

齿轮技术资料

齿轮的功能

齿轮作为最常用的机械元件，广泛地使用在机械传动装置中。齿轮之所以能有如今这般普及，恐怕其最主要的理由是传动功率的范围之广。

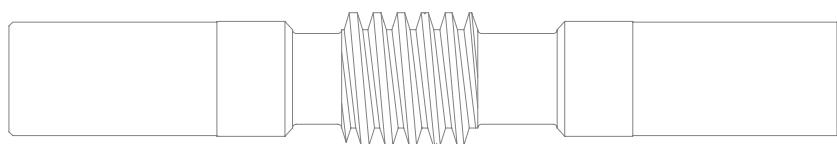
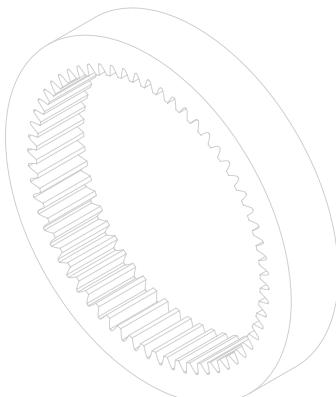
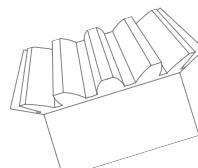
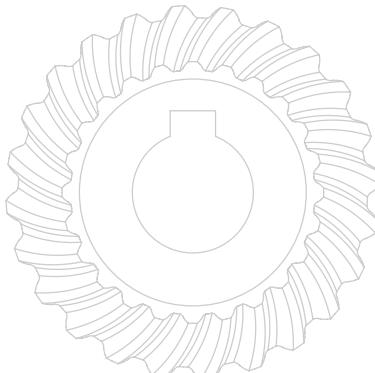
小自钟表用齿轮，大至船舶涡轮机用大型齿轮，它都可以确实地传动动力。

通过选择不同齿数的组合，可以得到任意且正确的传动比。

通过增减齿轮组合数，可以自由地变换旋转轴之间的相互关系位置。

可以使用在平行轴，相交轴，交错轴等各种轴间传动上。

我们综合了使用齿轮时所需要的基本知识，编写了这部「齿轮技术资料篇」。希望我们在这里介绍的齿轮基本知识有助于客户正确地从「KHK3010」中选择齿轮。



齿轮技术资料目录

1	齿轮的种类及术语	499
1.1	齿轮的种类	499
1.2	齿轮几何代号及术语	501
2	齿轮系的传动比和旋转方向	503
2.1	单级齿轮机构	503
2.2	二级齿轮机构	504
3	齿轮的齿形	505
3.1	渐开线齿轮的齿形及尺寸	505
3.2	渐开线曲线	506
3.3	渐开线齿轮的啮合	507
3.4	渐开线齿形的展成	507
3.5	根切	508
3.6	齿轮的变位	508
3.7	齿形修整及齿线修整	509
4	齿轮的尺寸计算	510
4.1	正齿轮	510
4.2	内齿轮	515
4.3	斜齿齿轮	518
4.4	锥齿轮	524
4.5	交错轴斜齿轮	530
4.6	圆柱蜗杆蜗轮	532
5	齿轮的齿厚	537
5.1	弦齿厚法	537
5.2	公法线长度法	542
5.3	量柱(球)法	543
6	齿轮的侧隙	552
6.1	各种齿轮的侧隙	552
6.2	各种齿轮的侧隙计算式	552
6.3	齿厚与侧隙	554
6.4	齿轮系与侧隙	554
6.5	减小侧隙的方法	555
7	齿轮的精度	557
7.1	正齿轮与斜齿齿轮的精度	557
7.2	锥齿轮的精度	559
8	齿轮的安装精度	560
8.1	中心距精度	560
8.2	轴平行度	560
8.3	齿轮的齿接触	562
9	齿轮的材料及热处理	565
9.1	齿轮的常用材料	565
9.2	代表性的齿轮热处理方法	565
10	齿轮的强度	567
10.1	正齿轮及斜齿齿轮的抗弯强度计算公式	567
10.2	正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算公式	574
10.3	锥齿轮的抗弯强度计算公式	583
10.4	锥齿轮的齿面强度计算公式	589
10.5	圆柱蜗杆蜗轮的强度计算公式	592
11	塑料齿轮的设计	597
11.1	尼龙 MC901 和 DURACOM M90 的物理特性	597
11.2	塑料齿轮的强度计算	599
12	齿轮的受力	603
12.1	平行轴齿轮	603
12.2	相交轴齿轮	604
12.3	交错轴齿轮	606
13	齿轮的润滑	608
13.1	齿轮的润滑法	608
13.2	齿轮的润滑油	610
14	齿轮的损伤及对策	613
14.1	齿轮的磨损	613
14.2	齿轮的折损	613
14.3	齿轮的损伤状态及术语	614
15	齿轮的噪音及对策	615
16	齿轮的测绘	616
16.1	正齿轮的测绘	616
16.2	斜齿齿轮的测绘	616
17	齿轮传动机构	617
17.1	行星齿轮机构	617
17.2	少齿差行星齿轮机构	619
17.3	封闭行星齿轮机构	619
<与齿轮相关的 JIS 标准>		
1	正齿轮与斜齿齿轮的精度	620
2	锥齿轮的精度	626
3	正齿轮与斜齿齿轮的侧隙	628
4	锥齿轮的侧隙	629
5	常用配合孔的尺寸容许偏差	630
6	常用配合轴的尺寸容许偏差	632
7	中心孔	634
8	普通螺纹 内螺纹直径	635
9	带六角孔螺杆	636
10	带六角孔螺杆的镗孔尺寸及螺孔尺寸	637
11	公称直径六角螺栓—普通螺纹—(等级 A : 第 1 选择) 的尺寸	637
12	六角螺母—式样 1—普通螺纹(第 1 选择)的尺寸	638
13	内六角凹头紧固螺钉的尺寸	638
14	圆锥销	639
15	直槽弹性圆柱销	640
16	键及键槽	641
17	C 型扣环	642
17.1	C 型扣环轴用	642
17.2	C 型扣环孔用	642
17.3	E 型扣环	643
18	直边花键	644
19	切削加工尺寸的普通容许公差	645
20	表面粗度	646
21	齿轮制图使用的几何特性代号	646
<数学公式·单位·相关资料>		
1	数学公式	648
2	国际单位系统 (SI)	649
3	便利的力学换算式	650
4	钢材重量表	651
5	主要元素符号 及 比重	652
6	硬度换算表	653
7	齿轮的齿距比较表	654
8	正齿轮及斜齿齿轮的跨齿数线图	655
9	标准正齿轮的公法线长度 ($\alpha = 20^\circ$)	656
10	标准正齿轮的公法线长度 ($\alpha = 14.5^\circ$)	658
11	渐开线反函数的计算	660
12	渐开线函数表	661



1 齿轮的种类及术语

齿轮有很多种类,有关齿轮的专业术语也有很多。在这里,我们首先介绍常用齿轮的特征以及常用的齿轮专业术语。

1.1 齿轮的种类

齿轮的种类繁多,其分类方法最通常的是根据齿轮轴性。一般分为平行轴、相交轴及交错轴三种类型。

平行轴齿轮包括正齿轮、斜齿轮、内齿轮、齿条及斜齿条等。

相交轴齿轮有直齿锥齿轮、弧齿锥齿轮、零度齿锥齿轮等。

交错轴齿轮有交错轴斜齿齿轮、蜗杆蜗轮、准双曲面齿轮等。

表 1.1 中列出了常用齿轮的分类情况。

表 1.1 齿轮的分类和种类

齿轮的分类	齿轮的种类	效率 (%)
平行轴	正齿 轮	98.0—99.5
	齿 条	
	内齿 轮	
	斜齿 轮	
	斜齿 条	
	人字齿 轮	
相交轴	直齿 锥 齿 轮	98.0—99.0
	弧齿 锥 齿 轮	
	零度齿 锥 齿 轮	
交错轴	交错轴斜齿 齿 轮	70.0—95.0
	圆柱蜗杆 蜗 轮	30.0—90.0

此表中所列出的效率为传动效率,不包括轴承及搅拌润滑等的损失。

平行轴及相交轴的齿轮副的啮合,基本上是滚动,相对的滑动非常微小,所以效率高。

交错轴斜齿轮及蜗杆蜗轮等交错轴齿轮副,因为是通过相对滑动产生旋转以达到动力传动,所以摩擦的影响非常大,与其他齿轮相比传动效率下降。

齿轮的效率是齿轮在正常装配状况下的传动效率。如果出现安装不正确的情况,特别是锥齿轮装配距离不正确而导致圆锥交点有误差时,其效率会显著下降。

(1) 平行轴的齿轮

① 正齿轮

齿线与轴心线为平行方向的圆柱齿轮。

因为易于加工,因此在动力传动上使用最为广泛。

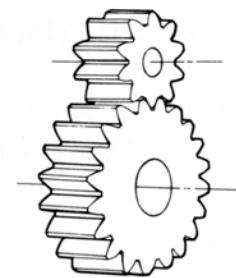


图 1.1 正齿轮

② 齿条

与正齿轮啮合的直线齿条状齿轮。

可以看成是正齿轮的节圆直径变成无限大时的特殊情况。

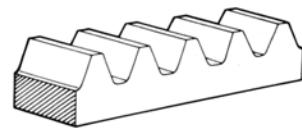


图 1.2 齿条

③ 内齿轮

与正齿轮相啮合在圆环的内侧加工有轮齿的齿轮。

主要使用在行星齿轮传动机构及齿轮联轴器等应用上。

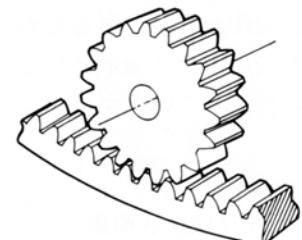


图 1.3 内齿轮与外齿轮

④ 斜齿齿轮

齿线为螺旋线的圆柱齿轮。

因为比正齿轮强度高且运转平稳,被广泛使用。

传动时产生轴向推力。

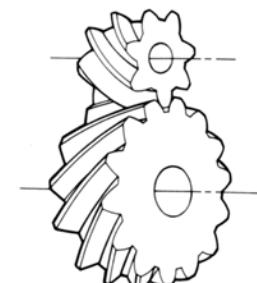


图 1.4 斜齿齿轮

⑤ 斜齿齿条

与斜齿齿轮相啮合的条状齿轮。

相当于斜齿齿轮的节径变成无限大时的情形。

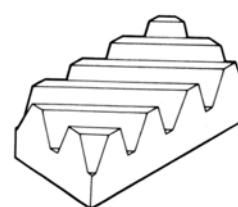


图 1.5 斜齿齿条



⑥ 人字齿轮

齿线为左旋及右旋的两个斜齿齿轮组合而成的齿轮。

有在轴向不产生推力的优点。

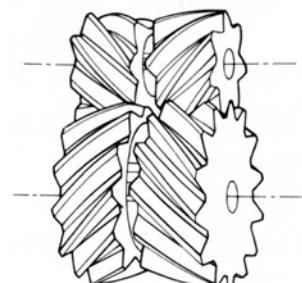


图 1.6 人字齿轮

(3) 交错轴齿轮

① 圆柱蜗杆副

圆柱蜗杆副是圆柱蜗杆和与之啮合的蜗轮的总称。

运转平稳及单对即可获得大传动比为其最大的特征,但是有效率低的缺点。

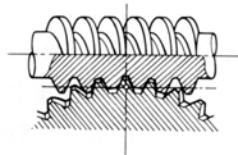


图 1.10 圆柱蜗杆副

② 交错轴斜齿齿轮

圆柱蜗杆副在交错轴间传动时的名称。可在斜齿齿轮副或斜齿齿轮与正齿副的情况下使用。

运转虽然平稳,但只适合于使用在轻负荷的情况下。

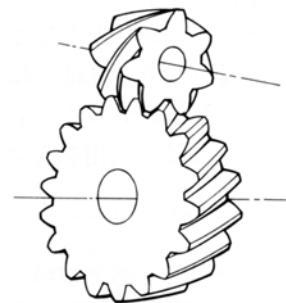


图 1.11 错交斜齿齿轮

(4) 其他特殊齿轮

① 面齿轮

可与正齿轮或斜齿齿轮啮合的圆盘状齿轮。

在直交轴及交错轴间传动。

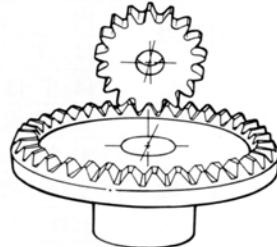


图 1.12 面齿轮

② 鼓形蜗杆副

鼓形蜗杆及与之啮合的蜗轮的总称。

虽然制造比较困难,但比起圆柱蜗杆副,可以传动大负荷。

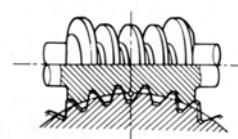


图 1.13 鼓形蜗杆副

③ 准双曲面齿轮

在交错轴间传动的圆锥形齿轮。

大小齿轮经过偏心加工,与弧齿齿轮相似,啮合原理非常复杂。

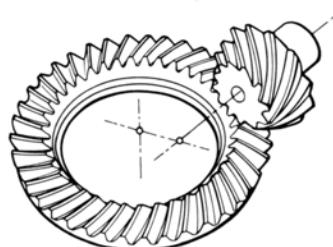


图 1.14 准双曲面齿轮

(2) 相交轴齿轮

① 直齿锥齿轮

齿线与节锥线的母线一致的锥齿轮。

在锥齿轮中,属于比较容易制造的类型,所以,作为传动用锥齿轮应用范围广泛。

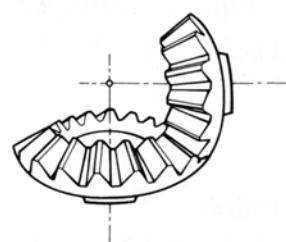


图 1.7 直齿锥齿轮

② 弧齿锥齿轮

齿线为曲线,带有螺旋角的锥齿轮。

虽然与直齿锥齿轮相比,制作难度较大,但是作为高强度,低噪音的齿轮使用也很广泛。

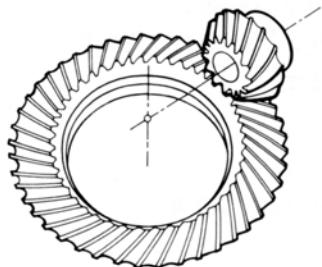


图 1.8 弧齿锥齿轮

③ 零度锥齿轮

螺旋角为零度的曲线齿锥齿轮。

因为同时具有直齿和曲齿锥齿轮的特征,齿面的受力情形与直齿锥齿轮相同。

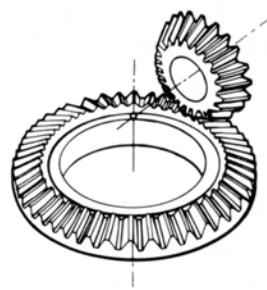


图 1.9 零度锥齿轮



1.2 齿轮几何代号及术语

在本产品目录中使用的齿轮几何代号及术语列于表 1.2 ~ 1.4 中。伴随国际化的发展, 将齿轮几何代号的表示与国际标准统一作为目的, 日本标准调查会依

据 ISO 标准对齿轮代号及术语的规定进行了改定。本产品目录的技术资料中所使用的齿轮几何要素代号及术语也依据 ISO 标准进行了统一。

表 1.2 直线上及圆周上的尺寸

意义	代号
中心距	a
分度圆齿距	p
端面齿距	p_t
法向齿距	p_n
轴向齿距	p_x
基圆齿距	p_b
端面基圆齿距	p_{bt}
法向基圆齿距	p_{bn}
齿高	h
齿顶高	h_a
齿根高	h_f
弦齿高	\bar{h}_a
固定弦齿高	\bar{h}_c
工作齿高	h_w
齿厚	s
法向齿厚	s_n
端面齿厚	s_t
齿顶厚	s_a
基圆齿厚	\bar{s}_b
弦齿厚	\bar{s}
固定弦齿厚	\bar{s}_c
公法线长度	W
齿槽宽	e
顶隙	c
圆周侧隙	j_t
法向侧隙	j_n
径向侧隙	j_r
轴向侧隙 ^{注 1}	j_x
螺旋角侧隙	j_θ
齿宽	b
工作齿宽	b_w
导程	p_z
端面啮合线长度	g_a
远离啮合线长度	g_f
接近啮合线长度	g_a
纵向啮合线长度	g_β
分度圆直径	d
节圆直径	d_w
齿顶圆直径	d_a
基圆直径	d_b
齿根圆直径	d_f
中央基圆直径	d_m
小端齿顶圆直径	d_i
分度圆半径	r
节圆半径	r_w
齿顶圆半径	r_a
基圆半径	r_b
齿根圆半径	r_f
齿形的曲率半径	ρ
锥距, 外锥距	R
背锥距	R_v

注 1. 轴向侧隙在 JIS 标准中没有正式定义。

表 1.3 角度尺寸

意义	代号
分度圆压力角	α
啮合角, 工作压力角	α_w
刀具压力角	α_0
端面压力角	α_t
法向压力角	α_n
轴向压力角	α_x
端面工作压力角	α_{wt}
齿顶圆压力角	α_a
法向工作压力角	α_{wn}
分度圆螺旋角	β
节圆螺旋角	β_w
中央螺旋角	β_m
齿顶圆螺旋角	β_a
基圆螺旋角	β_b
分度圆导程角	γ
节圆导程角	γ_w
齿顶圆导程角	γ_a
基圆导程角	γ_b
轴交角	Σ
分锥角	δ
节圆锥角 ^{注 3}	δ_w
顶圆锥角 ^{注 4}	δ_a
根圆锥角 ^{注 5}	δ_f
齿顶角	θ_a
齿根角	θ_f
端面作用角	ζ_a
纵向作用角	ζ_β
总作用角	ζ_γ
齿厚半角	ψ
顶圆齿厚半角	ψ_a
齿槽半角	η
冠轮上的齿距角	τ
渐开线函数角 (渐开线 α)	$\text{inv}\alpha$

注 2. 弧齿锥齿轮的螺旋角, JIS B 0102 的定义为弯角。

注 3. JIS B 0102 的定义为节锥角。

注 4. JIS B 0102 的定义为顶锥角。

注 5. JIS B 0102 的定义为根锥角。



表 1.4 其他术语

齿数	z
当量齿轮齿数	z_v
头数或小齿轮齿数	z_1
齿数比	u
传动比	i
模数	m
端面模数	m_t
法向模数	m_n
轴向模数	m_x
径节	P
端面重合度	ε_a
纵向重合度	ε_b
总重合度	ε_g
角速度	ω
线速度	v
转数	n
变位系数	x
法向变位系数	x_n
切向变位系数	x_t
中心距变动系数	y
切向力	F_t
轴向力(推力)	F_x
径向力	F_r
测量柱(球)直径	d_p
理想的量柱直径	d'_p
量柱尺寸	M
作用角	ϕ
摩擦系数	μ
齿厚系数	K
单齿距偏差	f_{pt}
齿距偏差	f_v 或 f_{pu}
齿距累积总偏差	F_p
齿形总偏差	F_a
径向跳动	F_r
齿线总偏差	F_β

以上的代号加注角标 1 或 2, 以区别大齿轮与小齿轮, 蜗杆与蜗轮, 驱动齿轮与被动齿轮等。使用例请参照 P503 图 2.1。

表 1.5 为希腊字母。

表 1.5 希腊字母表

大写字母	小写字母	拼写法
A	α	Alpha
B	β	Beta
Γ	γ	Gamma
Δ	δ	Delta
Ε	ϵ	Epsilon
Ζ	ζ	Zeta
Η	η	Eta
Θ	θ	Theta
Ι	ι	Iota
Κ	κ	Kappa
Λ	λ	Lambda
Μ	μ	Mu
Ν	ν	Nu
Ξ	ξ	Xi
Ο	$\ο$	Omicron
Π	π	Pi
Ρ	ρ	Rho
Σ	σ	Sigma
Τ	τ	Tau
Υ	ν	Upsilon
Φ	ϕ	Phi
Χ	χ	Chi
Ψ	ψ	Psi
Ω	ω	Omega



2 齿轮系的传动比和旋转方向

单一的齿轮无法进行动力传动。至少要有两个以上的齿轮相互啮合才能达到传动目的。

在这里，首先从最单纯简单的单级齿轮机构、二级齿轮机构开始说明。

2.1 单级齿轮机构

一对齿轮啮合后而形成的齿轮系称为单级齿轮机构。单级齿轮机构如图 2.1 所示。

设单级齿轮机构驱动齿轮的齿数为 z_1 ，转数为 n_1 ，被驱动齿轮的齿数为 z_2 ，转数为 n_2 ，传动比的计算方程式如下：

$$\text{传动比} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.1)$$

根据传动比的数值，可将单级齿轮机构分为三类：

传动比 < 1 增速齿轮机构 $n_1 < n_2$

传动比 $= 1$ 等速齿轮机构 $n_1 = n_2$

传动比 > 1 减速齿轮机构 $n_1 > n_2$

图 2.1 (A) 和 (B) 的外齿轮啮合的单级齿轮机构中，驱动齿轮与被动齿轮的旋转方向相反。

图 2.1 (C) 的外齿轮与内齿轮相啮合的情况下，转向相同。

图 2.1(D) 的蜗杆蜗轮啮合的情况下，旋转方向随螺旋方向而变化。

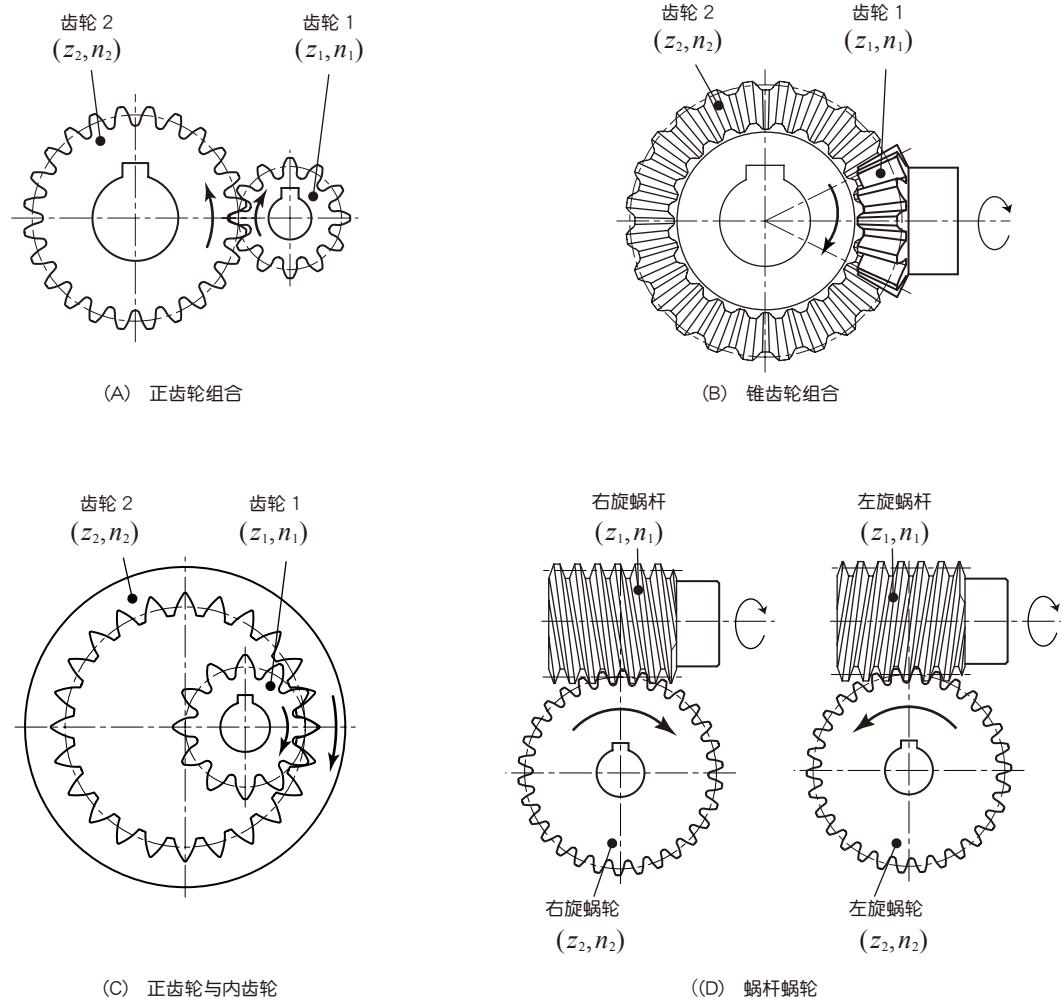


图 2.1 单级齿轮机构



除此之外,还有使用了齿条的单级齿轮机构。在这个单级齿轮机构中,小齿轮的齿数为 z_1 的话,小齿轮在旋转 θ 角度后,齿条移动量 ℓ 的数值可根据下式进行计算:

$$\ell = \frac{z_1 \theta}{360} \times \pi m \quad (2.2)$$

公式中的 πm 为齿条的分度齿距。

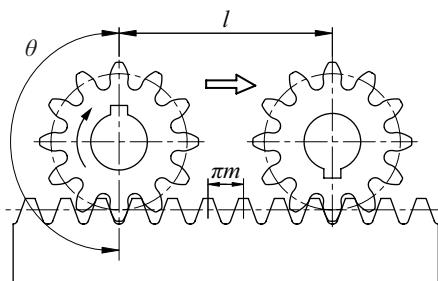


图 2.2 小齿轮和齿条

2.2 二级齿轮机构

二级齿轮机构是使用了二组单级齿轮机构所构成的。图 2.3 示意了二级齿轮机构的构造。

在这里,如果设第一级的齿轮 1 为驱动齿轮的话,此齿轮机构的传动比 i 可由(2.3)式表示。

$$\text{传动比 } i = \frac{z_2}{z_1} \times \frac{z_4}{z_3} = \frac{n_1}{n_2} \times \frac{n_3}{n_4} \quad (2.3)$$

其中 $n_2 = n_3$

在这个二级齿轮机构中,齿轮 1 和齿轮 4 的旋转方向相同。

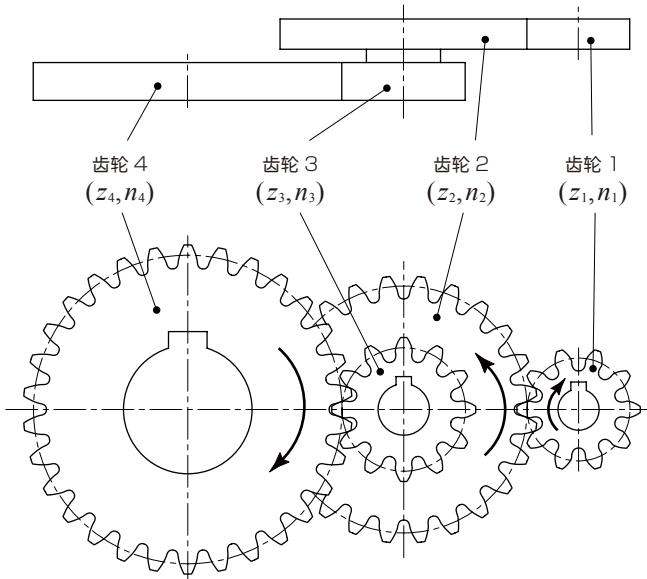


图 2.3 二级齿轮机构

如果机构中的齿轮 2 与齿轮 3 的齿数相等时,就将变成图 2.4 所示的机构。

在图 2.3 的机构中,齿轮 2 对传动比不产生影响,变成了惰轮(空转轮)。

因此,可以将此机构看成是使用了惰轮的单级齿轮机构,其传动比 i :

$$\text{传动比 } i = \frac{z_2}{z_1} \times \frac{z_3}{z_2} = \frac{z_3}{z_1} \quad (2.4)$$

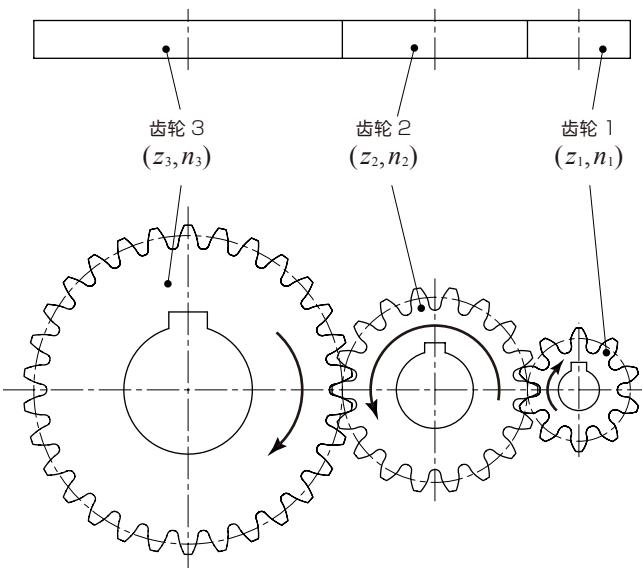


图 2.4 使用了惰轮的单级齿轮机构

图 2.3 的二级齿轮机构的计算例列于表 2.1。

表 2.1 二段齿轮机构的传动比

序号	项目	代号	计算式	计算例	
				小齿轮	大齿轮
1	齿数(第一级齿轮)	z_1, z_2	设定值	10	24
2	齿数(第二级齿轮)	z_3, z_4		12	30
3	回转(齿轮 1)	n_1		1200	-
4	传动比(一级)	i_1	$\frac{z_2}{z_1}$	2.4	
5	传动比(二级)	i_2	$\frac{z_4}{z_3}$	2.5	
6	传动比	i	$i_1 \times i_2$	6	
7	转数(齿轮 2 及 3)	n_2	$\frac{n_1}{i_1}$	500	
8	转数(齿轮 4)	n_4	$\frac{n_1}{i}$	-	200

转数的单位是 rpm。设定值为设计者预先设定的值。



3 齿轮的齿形

现在，在动力传动用齿轮中使用最为广泛的齿形是渐开线齿形。渐开线齿轮的特点是制作容易，中心距多少有些误差也能圆滑地啮合。

3.1 渐开线齿轮的齿形及尺寸

图 3.1 显示了渐开线齿轮齿形的基准齿条齿形。表 3.1 列出了有关齿形的术语、代号、计算公式及定义。如图所示的齿轮齿形，齿高为模数的 2.25 倍，被称为全齿高齿。全齿高齿是最为一般的齿形。另外，还有齿高低于全齿高齿的短齿齿形和齿高高于全齿高齿的高齿齿形。压力角为 20 度的齿形最为常见。此外还有 14.5 度、17.5 度等使用特殊压力角的齿轮。

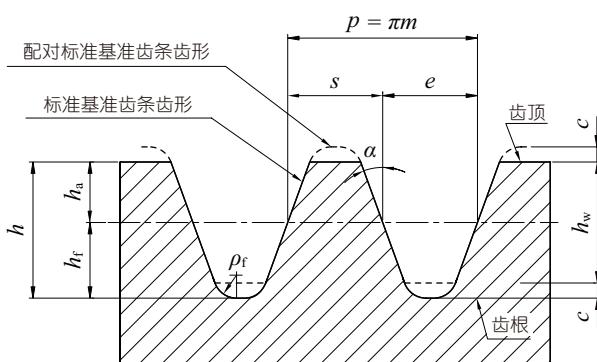


图 3.1 基准齿条齿形

表 3.1 有关齿形的术语

术语	代号	公式	定义
模数	m	$\frac{p}{\pi}$	用公制单位表示轮齿大小的术语 数值为分度圆齿距除以圆周率 π
齿距	p	πm	基准线上相邻两齿之间的距离 模数 m 与圆周率 (π) 相乘之积
压力角	α	(20 度)	轮齿相对于基准线的法线的倾斜角度
齿顶高	h_a	1.00m	由基准线到齿顶的距离
齿根高	h_f	1.25m	由基准线到齿根的距离
齿高	h	2.25m	齿顶到齿根的距离
工作齿高	h_w	2.00m	与配对齿轮啮合的齿高
顶隙	c	0.25m	齿高到配对齿轮的齿顶间的距离 (间隙)
齿根圆角半径	ρ_f	0.38m	齿面与齿根间的曲率半径

JIS 标准中规定的一般机械及重机械用正齿轮及斜齿齿轮使用模数的标准值列于表 3.2。标准推荐应尽量使用 I 列的模数值并且避免使用模数 6.5。

表 3.2 模数标准值

单位 mm

I	II	I	II
0.1	0.15	3	3.5
0.2	0.25	4	4.5
0.3	0.35	5	5.5
0.4	0.45	6	(6.5)
0.5	0.55	7	
0.6	0.7	8	
0.8	0.75	10	9
1	0.9	12	11
1.25	1.125	16	14
1.5	1.375	20	18
2	1.75	25	22
2.5	2.25	32	28
	2.75	40	36
		50	45

* 摘自 JIS B 1701-2: 1999 圆柱齿轮—渐开线齿轮
齿形第 2 部：模数

图 3.2 示意了模数 1/2/4/8 的齿条原尺。

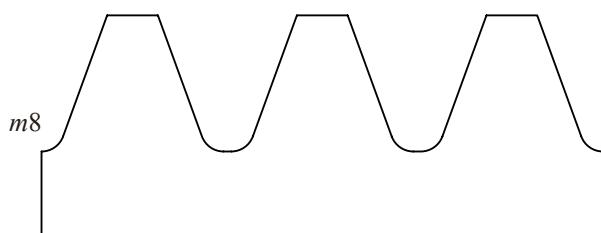
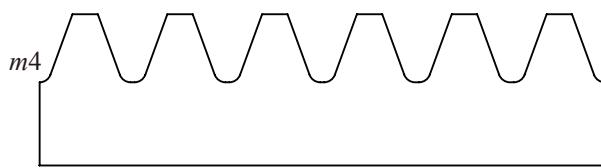
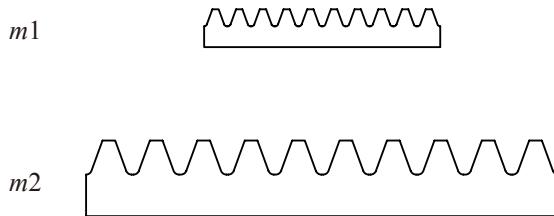


图 3.2 齿条齿形的模数原寸图



除模数以外还有使用周节 p (CP) 或径节 P 来表示轮齿大小的方法。

周节 (CP) 是指分度圆齿距 p 。因为分度圆齿距为整数, 所以将其使用在进给机构中的话, 进给量可以简单的控制为整数。

径节 P (DP) 是长度单位使用英制单位的国家 (例如美国等) 所使用的表示轮齿大小的单位。径节 P 可以通过公式 (3.1) 与模数 m 进行换算。

$$m = \frac{25.4}{P} \quad (3.1)$$

表 3.3 是模数 (m)、周节 (CP) 及径节 (DP) 的对照表。

表 3.3 齿距比较表

模数 m	周节 CP	径节 DP
0.39688	1.24682	64
0.5	1.57080	50.8
0.52917	1.66243	48
0.6	1.88496	42.33333
0.79375	2.49364	32
0.79577	2.5	31.91858
0.8	2.51327	31.75
1	3.14159	25.4
1.05833	3.32485	24
1.25	3.92699	20.32
1.27000	3.98982	20
1.5	4.71239	16.93333
1.59155	5	15.95929
1.58750	4.98728	16
2	6.28319	12.7
2.11667	6.64970	12
2.5	7.85398	10.16
2.54000	7.97965	10
3	9.42478	8.46667
3.17500	9.97456	8
3.18310	10	7.97965
4	12.56637	6.35
4.23333	13.29941	6
4.77465	15	5.31976
5	15.70796	5.08
5.08000	15.95929	5
6	18.84956	4.23333
6.35000	19.94911	4
6.36620	20	3.98982
8	25.13274	3.175
8.46667	26.59882	3
10	31.41593	2.54

3.2 渐开线曲线

如图 3.3 所示, 渐开线曲线是一端固定在圆筒上的线, 通过张力反松卷线时, 线的另一端所画出的曲线。这个圆筒是齿轮的基圆。沿着这个基圆转动规尺, 规尺上的一点所画出的曲线也为渐开线。

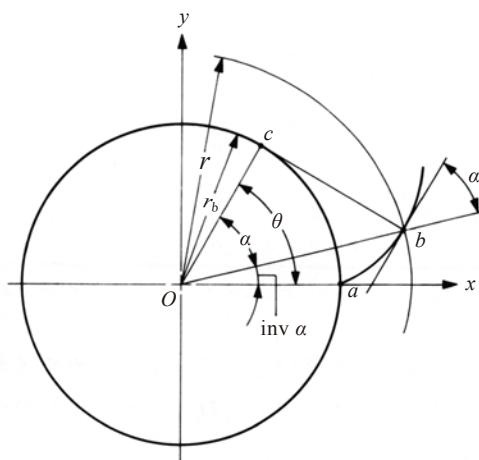


图 3.3 渐开线曲线

图 3.3 的 $\text{inv} \alpha$ 被称为渐开线函数角。单位为弧度 (rad)。角度 θ 则被称为渐开线转动角。

$$\text{inv} \alpha = \tan \alpha - \alpha \quad (\text{rad}) \quad (3.2)$$

渐开线曲线的 (x , y) 可根据公式 (3.3) 进行计算。座标的计算例列于表 3.4 中。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \cos^{-1} \frac{r_b}{r} \\ x &= r \cos (\text{inv} \alpha) \\ y &= r \sin (\text{inv} \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

表 3.4 渐开线曲线座标计算例

齿轮要素	设定值	齿轮要素	设定值
模数	5	分度圆直径	150
压力角	20	基圆直径	140.95389
齿数	30	齿顶圆直径	160

r (半径)	α (压力角)	x 座标	y 座标
70.47695	0.00000	70.4769	0.0000
72	11.80586	71.9997	0.2136
74	17.75087	73.9961	0.7628
76	21.97791	75.9848	1.5192
78	25.37123	77.9615	2.4494
80	28.24139	79.9218	3.5365

座标计算的顺序如下。

- ① 决定半径 (r)
- ② 代入公式 3.3, 分别计算出压力角及座标 α 、 x / y



3.3 渐开线齿轮的啮合

图 3.4 所示为一对标准正齿轮的啮合状态。

如图所示, 渐开线齿轮的接触点在基圆的公用切线(作用线)上移动。

由此得出, 做为一对齿轮的啮合条件, 基圆齿距 P_b 必须相等。

$$P_b = \pi m \cos \alpha \quad (3.4)$$

通过公式 (3.4) 可以看出, 一对齿轮啮合的条件不仅仅是模数 m 相等, 压力角 α 也必须相等, 齿轮才能正确地啮合。

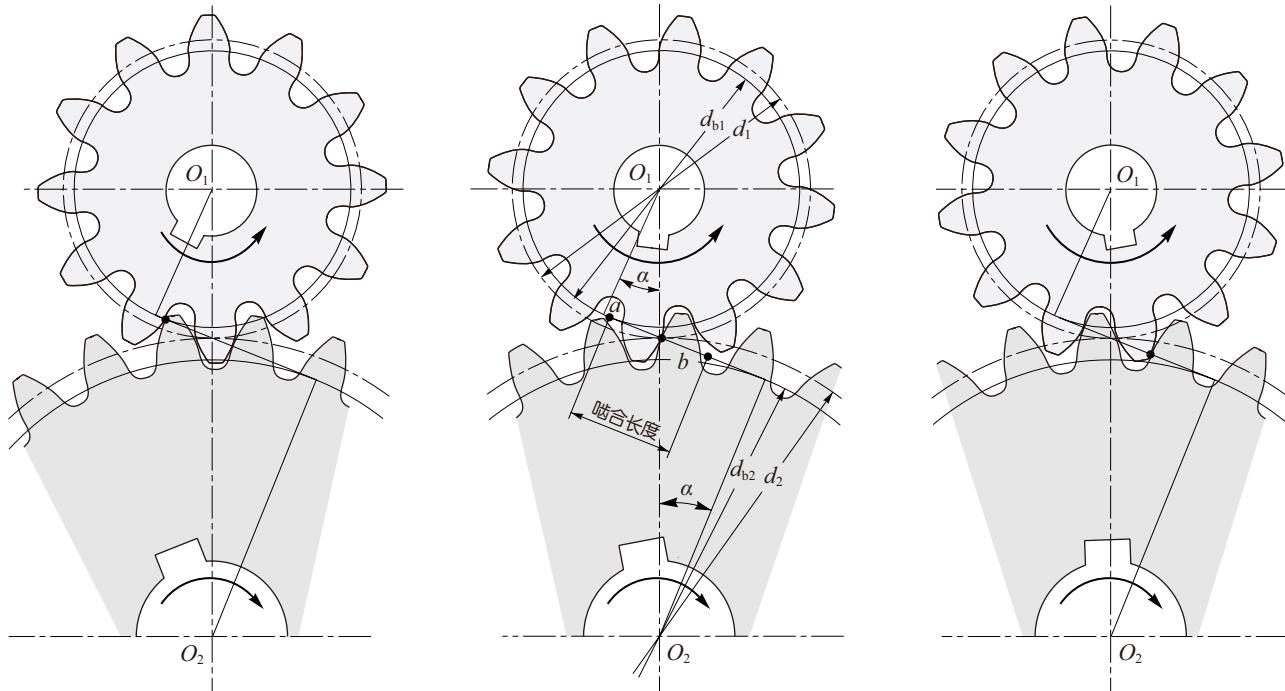


图 3.4 渐开线齿轮的啮合

3.4 渐开线齿形的展成

利用齿条形刀具可以很容易地加工出渐开线齿形。应用展成原理的切齿机械, 具有代表性的有滚齿机及插齿机。

图 3.5 示意了利用展成机械加工渐开线齿形时的模样。做为标准正齿轮, 齿轮的分度圆直径和齿条形刀具的分度圆齿距线在不产生滑动的条件下相切转动, 即可展成出如图 3.5 所示的渐开线齿形。

做为渐开线齿轮的展成切削机械, 还有使用小齿轮铣刀的插齿机。这种插齿机, 不但可以加工外齿轮, 还可以加工内齿轮。

图 3.4 中作用线上的长度 ab 被称为啮合线长度。啮合线长度 ab 除以基圆齿距 P_b 的值被称为端面重合度。

$$\text{端面重合度 } \varepsilon_a = \frac{\text{啮合线长度 } ab}{\text{基圆齿距 } P_b} \quad (3.5)$$

要想使齿轮做正确的传动, 重合度必须大于 1。

如上所述, 渐开线齿轮啮合时, 模数 m 和压力角 α 是十分重要的要素。

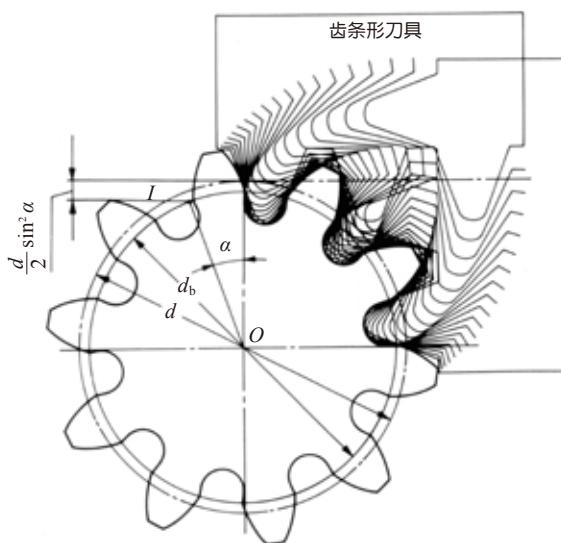


图 3.5 标准正齿轮的展成
($\alpha = 20^\circ, z = 10, x = 0$)



3.5 根切

如图 3.5 中所示的小齿数正齿轮切齿加工时, 刀具超过根切界限点 I 切削时, 产生根切。

根切是刀具的刃部先端直线部分 (h_c) 将齿轮的齿根部齿形曲线的一部分切掉的现象。

设标准正齿轮的刀刃先端直线部的深度为 m 的话, 不产生根切的条件为:

$$m \leq \frac{mz}{2} \sin^2 \alpha \quad (3.6)$$

根据这个条件, 导出标准正齿轮根切界限齿数 z 的公式 (3.7)。

$$z = \frac{2}{\sin^2 \alpha} \quad (3.7)$$

分度圆压力角 $\alpha = 20^\circ$ 时, 根切界限齿数 z 为 17。不过, 即使齿数在 16 以下, 强度及重合度等方面没有问题的话, 在使用上没有妨碍。

3.6 齿轮的变位

图 3.5 中所示的分度压力角 $\alpha = 20^\circ$ 、齿数 $z = 10$ 的标准正齿轮发生根切。防止根切的方法是对齿轮实行变位。变位有正变位和负变位。为了防止如图 3.5 中所示的根切, 我们列举了正变位的例子, 并图示于 3.6 中。与图 3.6 相反, 负变位的例子示意在图 3.7 中。从图中可以明显地看出, 由于实行了负变位, 根切现象也变得更加严重了。图 3.6 和图 3.7 的变位齿轮加工时, 刀具的移动距离 xm 被称为变位量, x 是变位系数。

变位齿轮不产生根切的条件是:

$$m - xm \leq \frac{zm}{2} \sin^2 \alpha \quad (3.8)$$

表 3.5 正齿轮齿顶宽度 (齿顶厚) 的计算

序号	项目	代号	单位	计算公式	计算例
1	模数	m	mm	设定值	2
2	压力角	α	度		20
3	齿数	z	-		16
4	变位系数	x	-		0.3
5	分度圆直径	d	mm	zm	32
6	基圆直径	d_b		$dcos\alpha$	30.07016
7	齿顶圆直径	d_a		$d + 2m(1+x)$	37.2
8	齿顶圆压力角	α_a	度	$\cos^{-1} \frac{d_b}{d_a}$	36.06616
9	渐开线函数 α	$\text{inv}\alpha$	弧度	$\tan\alpha - \alpha$	0.014904
10	渐开线函数 α_a	$\text{inv}\alpha_a$		$\tan\alpha_a - \alpha_a$	0.098835
11	齿顶圆齿厚半角	ψ_a		$\frac{\pi}{2z} + \frac{2x \tan \alpha}{z} + (\text{inv} \alpha - \text{inv} \alpha_a)$	0.027893
12	齿顶厚	s_a	mm	$\psi_a d_a$	1.03762

由此得出根切界限齿数 z 为:

$$z = \frac{2(1-x)}{\sin^2 \alpha} \quad (3.9)$$

同样亦可得出, 变位系数 x 为:

$$x = 1 - \frac{z}{2} \sin^2 \alpha \quad (3.10)$$

除了防止根切的发生外, 调整中心距时, 也经常使用齿轮的变位。

齿轮在变位时必须注意的问题是齿顶的宽度。小齿数齿轮的正变位过大, 会造成齿顶过尖。

有关正齿轮齿顶宽度 (齿顶厚) 的计算方法列于表 3.5 中。

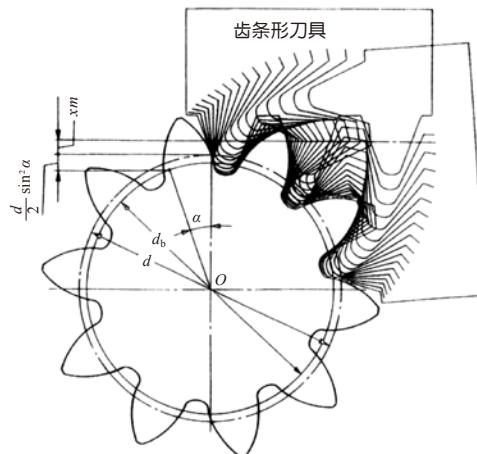


图 3.6 正变位正齿轮的展成
($\alpha = 20^\circ, z = 10, x = +0.5$)

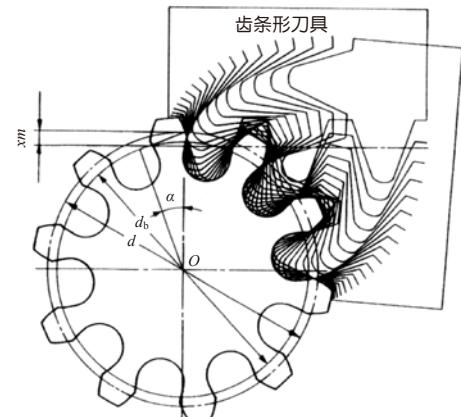


图 3.7 负变位正齿轮的展成
($\alpha = 20^\circ, z = 10, x = -0.5$)

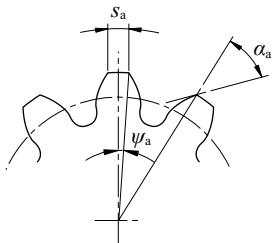


图 3.8 齿顶厚



3.7 齿形修整及齿线修整

齿轮有许多特殊术语。齿轮加工也使用很多独特的方法。在这里我们将介绍其中具有代表性的方法。

(1) 齿形修整

齿形修整是修缘和修根的总称。

一般地说,修缘的方法使用比较普遍。

修缘是指有意识的修削齿顶的齿形,使齿型偏离正确的渐开线齿形。

由此,当齿轮齿面受外力产生变形时,可以避免对与之啮合的齿轮产生干涉,并且可以降低噪音,延长齿轮寿命。

但是,要注意不能修整过量。过量修整等于增加了齿形误差,将对啮合产生不良影响。

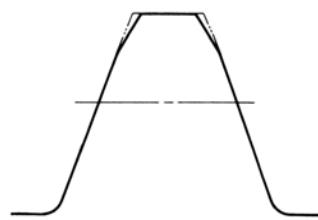


图 3.9 齿形修整

(2) 鼓形加工和齿端修薄

鼓形加工和齿端修薄都是沿齿线方向的修整。特别是鼓形加工,是以使轮齿接触集中到齿宽的中央部为目的的加工,所以,沿齿线方向加工适当的鼓形。此时,应注意不能加工过甚。过量的鼓形加工会引起轮齿接触面积的减小,对齿轮强度产生不良影响。

齿端修薄是将齿宽的两端部加以适当的倒角加工的方法。

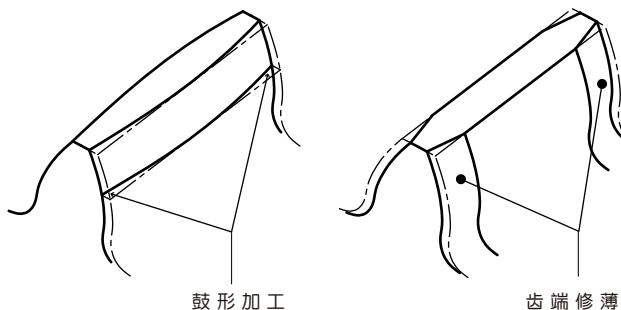


图 3.10 鼓形加工和齿端修薄

(3) 外径加工及齿顶倒角加工

使用滚齿展成法加工齿轮的方法,已经在齿轮入门篇的 3.4, 渐开线齿轮的展成中加以说明。滚齿加工的同时,齿轮的外径加工及齿顶倒角加工亦可同时进行。

图 3.5、图 3.6、图 3.7 示意了利用齿条刀具进行齿形展成加工和外径加工的情形。通过这种加工,可以减少外径的偏差,还可以防止齿顶产生毛边。

图 3.11 示意了齿顶倒角刀具的刀刃形状及由此刀具切削加工的齿轮齿形。通过齿顶倒角加工、对防止发生在齿顶的撞痕及毛刺等起了很好的作用。

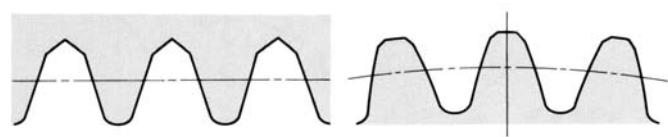


图 3.11 齿顶倒角的刀形及齿形

因为实行了齿顶倒角,啮合时有效的齿顶高减少,啮合率也降低,所以,通常不希望过量的倒角。

图 3.12 示意了标准的齿顶倒角的大小及形状。

外径加工及齿顶倒角有时并用,有时单独采取其中的一种。

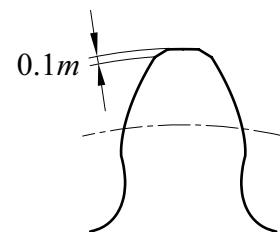


图 3.12 齿顶倒角的大小及形状



4 齿轮尺寸计算

齿轮的大小取决于模数 m 、齿数 z 、压力角 α 、变位系数 x 等齿轮的基本要素。在本章中，我们将介绍正齿轮、斜齿轮、齿条、锥齿轮、交错轴斜齿轮及蜗杆蜗轮等各种齿轮的尺寸计算方法。

这里计算的齿轮外形尺寸（齿顶圆直径等）是齿坯的车削加工时必要的数据，齿高及齿根圆直径等轮齿尺寸是切齿加工时的参考尺寸。

4.1 正齿轮

齿轮中最为单纯的齿轮是正齿轮。计算也颇为简单，是计算其他齿轮的基础。

下面，我们将介绍标准正齿轮、变位正齿轮及直线齿形齿条的尺寸计算方法。

标准正齿轮是指变位为零（无变位）的正齿轮。

（1）标准正齿轮

图 4.1 示意了标准正齿轮的啮合状况。

标准正齿轮的分度圆在相切状态下啮合。

表 4.1 为标准正齿轮的计算表。

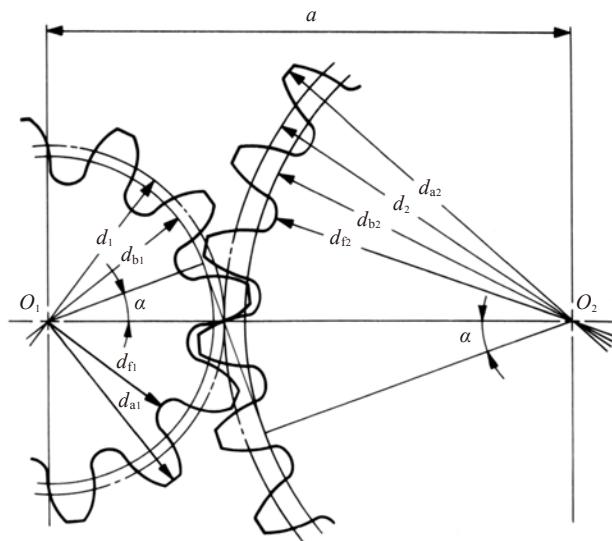


图 4.1 标准正齿轮的啮合
($\alpha = 20^\circ$, $z_1 = 12$, $z_2 = 24$, $x_1 = x_2 = 0$)

表 4.1 标准正齿轮的计算表

序号	计算项目	代号	计算式	计算例	
				小齿轮 (1)	大齿轮 (2)
1	模数	m		3	
2	分度圆压力角	α		20°	
3	齿数	z		12	24
4	中心距	a	$\frac{(z_1+z_2)m}{2}$	注 1	54.000
5	分度圆直径	d	zm		36.000 72.000
6	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha$	33.829	67.658
7	齿顶高	h_a	$1.00m$	3.000	3.000
8	齿高	h	$2.25m$	6.750	6.750
9	齿顶圆直径	d_a	$d+2m$	42.000	78.000
10	齿根圆直径	d_f	$d-2.5m$	28.500	64.500

注 1 代号加注下标 1、2，可以区别大、小齿轮。



在表 4.1 中,首先指定了模数 m 及齿数 z_1, z_2 。与此不同首先决定模数 m 和中心距 a 与传动比 i , 然后计算齿数 z_1, z_2 的模式列于表 4.2。

表 4.2 齿数的求法

序号	计算项目	代号	计算式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	模数	m	设 定 值	3	
2	中心距	a		54.000	
3	传动比	i		1.25	
4	齿数的和	$z_1 + z_2$	$\frac{2a}{m}$	36	
5	齿数	z	$\frac{z_1 + z_2}{i + 1}$	16	20

如上例所示,齿数刚好成为整数。但是,在实际计算时并非如此.象这种情况下,对齿轮实行变位或者用斜齿齿轮代替正齿轮的话,可以得到与所需的传动比相近的数值。



(2) 变位正齿轮

图 4.2 为变位齿轮的啮合示意图。

变位正齿轮的啮合最重要的是啮合节圆直径 d_w 和压力角 α_w 。

这些数值, 可依据变位正齿轮的中心距 a 利用下列方程式求出。

$$\left. \begin{aligned} d_{w1} &= 2a \frac{z_1}{z_1 + z_2} \\ d_{w2} &= 2a \frac{z_2}{z_1 + z_2} \\ \alpha_w &= \cos^{-1} \left(\frac{d_{b1} + d_{b2}}{2a} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

变位齿轮与这个啮合圆相切啮合。啮合节圆的压力角即为啮合压力角。

表 4.3 中, 示意了首先确定变位系数 x_1, x_2 后计算齿轮参数的方法。这个变位计算是以保持顶隙 c 为 $0.25m$ 的设定为基础。

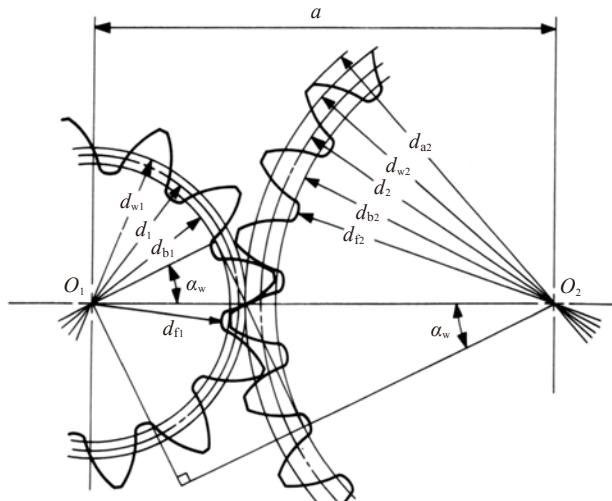


图 4.2 变位齿轮的啮合

($\alpha = 20^\circ, z_1 = 12, z_2 = 24, x_1 = +0.6, x_2 = +0.36$)

表 4.3 变位正齿轮的计算 (1)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮 (1)	大齿轮 (2)
1	模数	m		3	
2	压力角	α		20°	
3	齿数	z		12	24
4	变位系数	x		0.6	0.36
5	α_w 角的渐开线函数	$\text{inv } \alpha_w$	$2 \tan \alpha \left(\frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \right) + \text{inv } \alpha$	0.034316	
6	啮合压力角	α_w	由渐开线函数表中求出	26.0886°	
7	中心距变动系数	y	$\frac{z_1 + z_2}{2} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} - 1 \right)$	0.83329	
8	中心距	a	$\left(\frac{z_1 + z_2}{2} + y \right) m$	56.4999	
9	分度圆直径	d	zm	36.000	72.000
10	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha$	33.8289	67.6579
11	啮合节径	d_w	$\frac{d_b}{\cos \alpha_w}$	37.667	75.333
12	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$\frac{(1 + y - x_2)m}{(1 + y - x_1)m}$	4.420	3.700
13	全齿高	h	$\{2.25 + y - (x_1 + x_2)\} m$	6.370	
14	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	44.840	79.400
15	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	32.100	66.660

变位齿轮的计算中, 当 $x_1 = x_2 = 0$ 时, 即为标准齿轮的计算。



计算表(1)中的第4到第8项的顺序颠倒以后进行计算时,如方法(2)。

表 4.4 变位齿轮的计算(2)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	中心距	a	设定值	56.4999	
2	中心距变动系数	y	$\frac{a}{m} - \frac{z_1 + z_2}{2}$	0.8333	
3	啮合压力角	α_w	$\cos^{-1} \left(\frac{\cos \alpha}{\frac{2y}{z_1 + z_2} + 1} \right)$	26.0886°	
4	变位系数和	$x_1 + x_2$	$\frac{(z_1 + z_2)(\operatorname{inv} \alpha_w - \operatorname{inv} \alpha)}{2 \tan \alpha}$	0.9600	
5	变位系数	x	—	0.6000	0.3600

变位系数的和 $x_1 + x_2$ 采用什么方法分配到每个齿轮上,有着各种各样的提案。例如,比较著名的有BSS(英国国家规格),DIN(德国国家规格)等。在这里,我们将省略对此问题的说明。

在这个例子中,即防止根切,又不使齿顶变尖地为小齿轮($z_1 = 12$)选择了变位系数。



(3) 齿条和正齿轮

在这里,我们将介绍齿条与正齿轮的啮合及计算方法。

在图 4.3(1) 中,我们已经示意了标准正齿轮与齿条的啮合状况。这个啮合中,标准正齿轮的分度圆与齿条的节线相切。

表 4.5 齿条与变位正齿轮的啮合计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				正齿轮	齿条
1	模数	m	设 定 值	3	
2	压力角	α		20°	
3	齿数	z		12	—
4	变位系数	x		0.6	
5	节线高度	H		—	32.000
6	啮合压力角	α_w		20°	
7	组装距离	a	$\frac{zm}{2} + H + xm$	51.800	
8	分度圆直径	d	zm	36.000	—
9	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha$	33.829	
10	啮合节径	d_w	$\frac{d_b}{\cos \alpha_w}$	36.000	
11	齿顶高	h_a	$m(1+x)$	4.800	3.000
12	全齿高	h	$2.25m$	6.750	
13	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	45.600	—
14	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	32.100	

齿条与正齿轮啮合时,正齿轮旋转一周时的齿条移动量 l 为分度圆齿距的齿数倍。

$$l = \pi m z \quad (4.2)$$

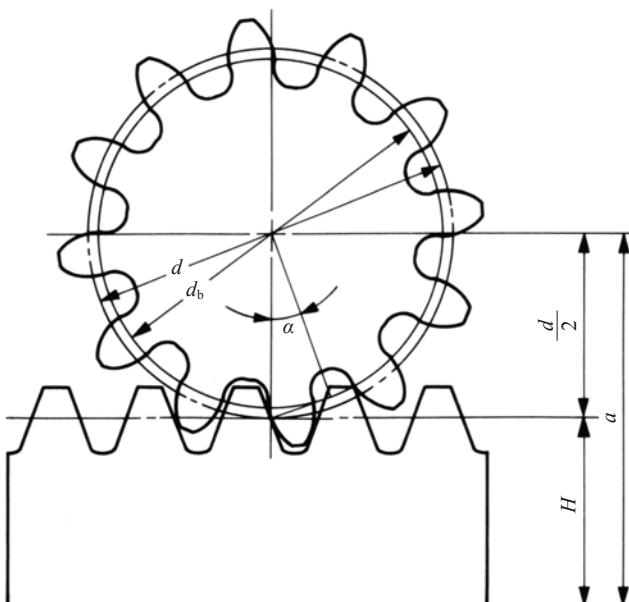


图 4.3(1) 标准正齿轮与齿条的啮合
($\alpha = 20^\circ, z_1 = 12, x_1 = 0$)

图 4.3(2) 示意了变位正齿轮和齿条的啮合状态。变位正齿轮的分度圆和齿条的节线离开变位量 xm 的距离啮合。

表 4.5 中,示意了齿条和变位正齿轮啮合的计算方法。当表中的变位系数 $x_1 = 0$ 时,可以做为无变位标准正齿轮的计算公式加以使用。

齿条的移动量 l 不受齿轮变位的影响,只由齿条的分度圆齿距 πm 和正齿轮的齿数 z 来决定。

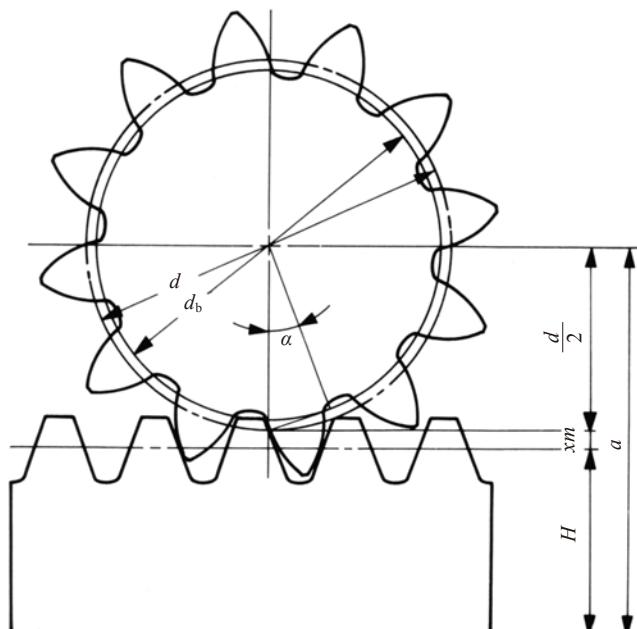


图 4.3(2) 变位正齿轮与齿条的啮合
($\alpha = 20^\circ, z_1 = 12, x_1 = +0.6$)



4.2 内齿轮

内齿轮是在圆筒的内侧加工有轮齿，与正齿轮啮合使用的齿轮。内齿轮的轮齿是正齿轮的齿槽部分的齿形。内齿轮的齿形是凹齿形，与正齿轮的齿形相反。下面我们就变位内齿轮的尺寸计算方法及内齿轮的干涉问题做以介绍。

(1) 变位内齿轮的计算

图 4.4 中示意了内齿轮与正齿轮的啮合状况。

内齿轮和外齿轮啮合时，最重要的是啮合节径 d_w 和啮合压力角 α_w 。

具体的数据可以根据变位齿轮的中心距 a 利用下式简单地求出。

$$\left. \begin{aligned} d_{w1} &= 2a \frac{z_1}{z_2 - z_1} \\ d_{w2} &= 2a \frac{z_2}{z_2 - z_1} \\ \alpha_w &= \cos^{-1} \left(\frac{d_{b2} - d_{b1}}{2a} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

表 4.6 中，列出了变位内齿轮与正齿轮的计算方法。

计算标准齿轮时，我们推荐将式中的 $x_1 = x_2 = 0$ 进行计算。

表 4.6 变位内齿轮和正齿轮的计算 (1)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				正齿轮 (1)	内齿轮 (2)
1	模数	m	设 定 值	3	
2	压力角	α		20°	
3	齿数	z		16	24
4	变位系数	x		0	+ 0.516
5	渐开线函数	$\text{inv } \alpha_w$	$2 \tan \alpha \left(\frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} \right) + \text{inv } \alpha$	0.061857	
6	啮合压力角	α_w	由渐开线函数表中查出	31.321258°	
7	中心距变动系数	y	$\frac{z_2 - z_1}{2} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} - 1 \right)$	0.4000	
8	中心距	a	$\left(\frac{z_2 - z_1}{2} + y \right) m$	13.2	
9	分度圆直径	d	zm	48.000	72.000
10	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha$	45.105	67.658
11	啮合节径	d_w	$\frac{d_b}{\cos \alpha_w}$	52.7998	79.1997
12	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$(1 + x_1) m$ $(1 - x_2) m$	3.000	1.452
13	全齿高	h	$2.25m$	6.75	
14	齿顶圆直径	d_{a1} d_{a2}	$d_1 + 2h_{a1}$ $d_2 - 2h_{a2}$	54.000	69.096
15	齿根圆直径	d_{f1} d_{f2}	$d_{a1} - 2h$ $d_{a2} + 2h$	40.500	82.596

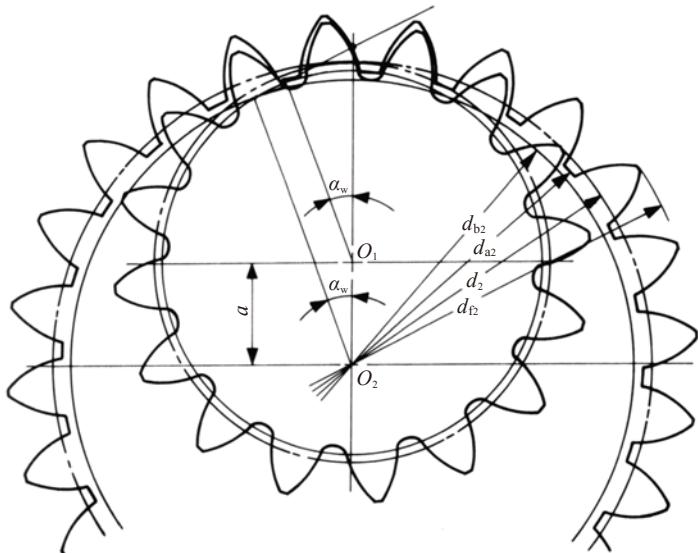


图 4.4 内齿轮与正齿轮的啮合
($\alpha = 20^\circ, z_1 = 16, z_2 = 24, x_1 = x_2 = +0.5$)



做为齿轮的要素,如果首先在中心距 a 一定的情况下求得变位系数 x_1, x_2 时,将表 4.6 中的第 4 到第 8

的五个计算项目的顺序颠倒过来进行计算,计算方法列于表 4.7。

表 4.7 变位内齿轮和正齿轮的计算 (2)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				正齿轮 (1)	内齿轮 (2)
1	中心距	a	设定值	13.1683	
2	中心距变动系数	y	$\frac{a}{m} - \frac{z_2 - z_1}{2}$	0.38943	
3	啮合压力角	α_w	$\cos^{-1} \left(\frac{\cos \alpha}{\frac{2y}{z_2 - z_1} + 1} \right)$	31.0937°	
4	变位系数的差	$x_2 - x_1$	$\frac{(z_2 - z_1)(\operatorname{inv} \alpha_w - \operatorname{inv} \alpha)}{2 \tan \alpha}$	0.5	
5	变位系数	x	—	0	0.5

内齿轮或正齿轮在使用小齿轮铣刀切齿时,加工齿轮的齿高及齿根圆直径可能与根据上式所计算的数据不同。这是因为受到齿数及小齿轮铣刀变位的影响。要想得到正确的尺寸,需要根据小齿轮铣刀的变位系数进行计算。

(2) 内齿轮的干涉

内齿轮与外齿轮在啮合时,容易发生渐开曲线干涉、次摆线干涉、齿轮间干涉等具有代表性的三种干涉。

(a) 渐开曲线干涉

渐开曲线干涉是正齿轮的齿根与内齿轮的齿顶间的干涉,容易发生在正齿轮的齿数较少时。

避免渐开曲线干涉发生的条件是:

$$\frac{z_1}{z_2} \geq 1 - \frac{\tan \alpha_{a2}}{\tan \alpha_w} \quad (4.4)$$

其中 α_{a2} : 内齿轮的齿顶压力角

$$\alpha_{a2} = \cos^{-1} \left(\frac{d_{b2}}{d_{a2}} \right) \quad (4.5)$$

α_w : 喷合压力角

$$\alpha_w = \cos^{-1} \left\{ \frac{(z_2 - z_1)m \cos \alpha}{2a} \right\} \quad (4.6)$$

要想使 (4.5) 公式成立的必要条件是内齿轮的齿顶圆大于基圆。

$$d_{a2} \geq d_{b2} \quad (4.7)$$

分度圆压力角 $\alpha = 20^\circ$ 的标准齿轮,如果齿数不满足条件 $z_2 > 34$ 的话,内齿轮的齿顶圆无法比基圆大。

(b) 次摆线干涉

次摆线干涉是正齿轮的齿顶离开齿槽时,与内齿轮的齿顶间产生干涉,容易发生在内齿轮与正齿轮的齿数差较小时。

不产生次摆线干涉的条件是:

$$\theta_1 - \frac{z_1}{z_2} + \operatorname{inv} \alpha_w - \operatorname{inv} \alpha_{a2} \geq \theta_2 \quad (4.8)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \cos^{-1} \left(\frac{r_{a2}^2 - r_{a1}^2 - a^2}{2ar_{a1}} \right) \\ &\quad + \operatorname{inv} \alpha_{a1} - \operatorname{inv} \alpha_w \\ \theta_2 &= \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + r_{a2}^2 - r_{a1}^2}{2ar_{a2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

其中 α_{a1} 是正齿轮的齿顶压力角

$$\alpha_{a1} = \cos^{-1} \left(\frac{d_{b1}}{d_{a1}} \right) \quad (4.10)$$

通过计算可以得出,分度圆压力角 $\alpha = 20^\circ$ 的标准内齿轮与标准正齿轮啮合时齿数差 $z_2 - z_1$ 只要大于 9,就不会发生次摆线干涉。



(c) 齿轮间干涉

齿轮间干涉是指正常啮合的内齿轮与正齿轮间，正齿轮无法从啮合位置沿半径方向移动的干涉，容易发生在内齿轮与正齿轮的齿数差小时。

不发生此干涉的条件如式(4.11)所示。

$$\theta_1 + \operatorname{inv} \alpha_{a1} - \operatorname{inv} \alpha_w \geq \frac{z_2}{z_1} \quad (\theta_2 + \operatorname{inv} \alpha_{a2} - \operatorname{inv} \alpha_w)$$

其中

(4.11)

$$\left. \begin{array}{l} \theta_1 = \sin^{-1} \sqrt{\frac{1 - (\cos \alpha_{a1}/\cos \alpha_{a2})^2}{1 - (z_1/z_2)^2}} \\ \theta_2 = \sin^{-1} \sqrt{\frac{(\cos \alpha_{a2}/\cos \alpha_{a1})^2 - 1}{(z_2/z_1)^2 - 1}} \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

即使发生此干涉，只要将齿轮沿轴方向移动并使之啮合后，对通常齿轮的啮合完全不产生任何影响。

但是，当使用小齿轮铣刀展成内齿轮时，这种干涉就成了重大的问题。也就是说，发生干涉时，小齿轮铣刀从内齿轮脱出时，由于干涉的影响刀具有发生破损的可能。

刀具压力角 $\alpha_0 = 20^\circ$ 的标准内齿轮利用无变位的 ($x_0 = 0$) 小齿轮铣刀进行切齿时，不发生齿轮间干涉的内齿轮齿数极限值列于表 4.8(1)。

表 4.8(1) 避免干涉的内齿轮齿数极限值 $\alpha_0 = 20^\circ, x_0 = x_2 = 0$

z_0	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27
z_2	34	34	35	36	37	38	39	40	42	43	45
z_0	28	30	31	32	33	34	35	38	40	42	
z_2	46	48	49	50	51	52	53	56	58	60	
z_0	44	48	50	56	60	64	66	80	96	100	
z_2	62	66	68	74	78	82	84	98	114	118	

此表中， $z_0 = 15 \sim 22$ 时，将发生渐开曲线干涉。
(z_0 为小齿轮铣刀的齿数)

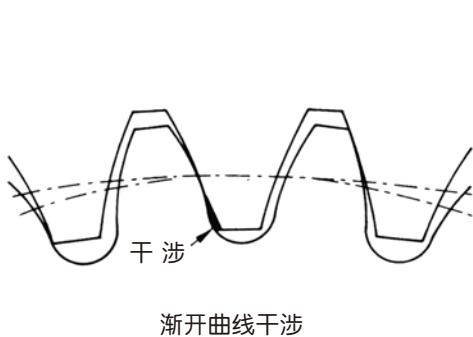
表 4.8(2) 列出了利用变位小齿轮铣刀切削标准内齿轮时，不发生齿轮间干涉的内齿轮的齿数。

此时，设 $x_0 = 0.0075z_0 + 0.05$ 。

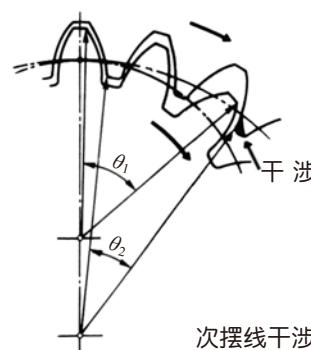
表 4.8(2) 避免齿轮间干涉的内齿轮齿数极限值 $\alpha_0 = 20^\circ, x_2 = 0$

z_0	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27
x_0	0.1625	0.17	0.1775	0.185	0.1925	0.2	0.2075	0.215	0.23	0.2375	0.2525
z_2	36	38	39	40	41	42	43	45	47	48	50
z_0	28	30	31	32	33	34	35	38	40	42	
x_0	0.26	0.275	0.2825	0.29	0.2975	0.305	0.3125	0.335	0.35	0.365	
z_2	52	54	55	56	58	59	60	64	66	68	
z_0	44	48	50	56	60	64	66	80	96	100	
x_0	0.38	0.41	0.425	0.47	0.5	0.53	0.545	0.65	0.77	0.8	
z_2	71	76	78	86	90	95	98	115	136	141	

此表中，当 $z_0 = 15 \sim 19$ 时，将发生渐开曲线干涉，内齿轮齿顶的一部分正确的渐开线齿形会被切削掉。



渐开曲线干涉



次摆线干涉

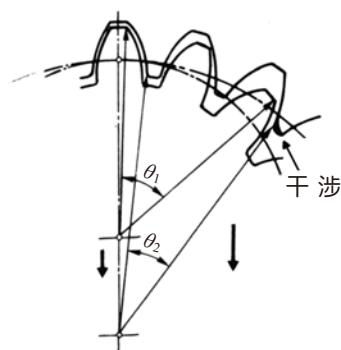


图 4.5 渐开曲线干涉和次摆线干涉

图 4.6 齿轮间干涉



4.3 斜齿齿轮

如图 4.7 所示, 斜齿齿轮是齿线呈螺旋线的圆柱齿轮。在分度圆上, 螺旋线拥有螺旋角 β , 旋转一周的进程为 p_z 。

斜齿齿轮的齿形曲线, 从正面看为渐开线曲线, 齿形有齿直角方式与轴直角方式两种。

沿齿直角螺旋线测定的齿距 p_n (法向齿距) 除以圆周率 π 的数值为法向模数 m_n 。

$$m_n = \frac{p_n}{\pi} \quad (4.13)$$

以法向模数 m_n 和法向压力角 α_n 为基准的齿轮为齿直角方式斜齿齿轮。

与同时垂直于轴平面和节面的平面(即端面)上测定的分度圆柱上的齿距 p_t (端面齿距)除以圆周率 π 的数值为端面模数 m_t 。

$$m_t = \frac{p_t}{\pi} \quad (4.14)$$

以端面模数 m_t 和端面压力角 α_t 为基准的齿轮为轴直

角方式斜齿齿轮。

齿直角方式斜齿齿轮的模数 m_n 和压力角 α_n 只要相同, 分度圆螺旋角 β 即使不同也可以利用相同的滚刀进行切齿加工。

但是, 虽然轴直角方式斜齿齿轮的模数 m_t 和压力角 α_t 相同, 分度圆螺旋角 β 不同的话, 切齿时就必须更换滚刀。

因为制作容易, 齿直角方式斜齿齿轮非常普及。

在平行轴使用斜齿齿轮啮合时, 必须使用螺旋角相同, 螺旋方向相反的齿轮副。

螺旋角不同的斜齿齿轮, 不能在平行轴上啮合, 只能在交错轴上啮合, 所以, 称为交错轴斜齿轮。

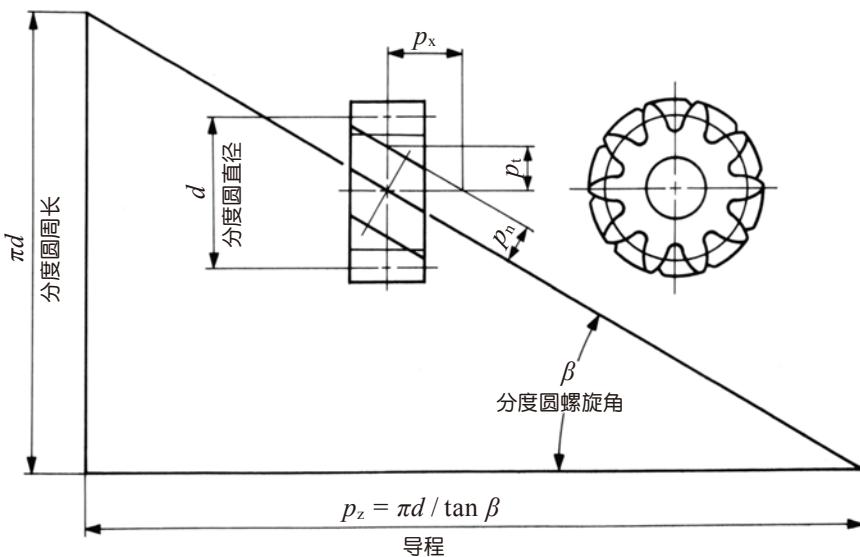


图 4.7 斜齿齿轮(右旋齿)



(1) 齿直角方式斜齿齿轮

啮合节径 d_w 和端面压力角 α_{wt} 对于变位斜齿齿轮的啮合而言亦是重要的要素。从端面来考虑的话, 正齿轮和斜齿齿轮的啮合是相同的, 所以计算方程式也相同。

$$\left. \begin{aligned} d_{w1} &= 2a \frac{\frac{z_1}{z_1 + z_2}}{\frac{z_2}{z_1 + z_2}} \\ d_{w2} &= 2a \frac{\frac{z_2}{z_1 + z_2}}{\left(\frac{d_{b1} + d_{b2}}{2a} \right)} \\ \alpha_{wt} &= \cos^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

表 4.9 是齿直角方式变位斜齿齿轮的计算表。计算标准斜齿齿轮时, 式中的 $x_{n1} = x_{n2} = 0$ 。

表 4.9 齿直角方式变位斜齿齿轮的计算(1)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	法向模数	m_n	设 定 值	3	
2	法向压力角	α_n		20°	
3	分度圆螺旋角	β		30°	
4	齿数(螺旋方向)	z		12 (L)	60 (R)
5	法向变位系数	x_n		+ 0.09809	0
6	端面压力角	α_t	$\tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right)$	22.79588°	
7	渐开线函数 α_{wt}	$\text{inv } \alpha_{wt}$	$2 \tan \alpha_n \left(\frac{x_{n1} + x_{n2}}{z_1 + z_2} \right) + \text{inv } \alpha_t$	0.023405	
8	端面啮合压力角	α_{wt}	由渐开线函数表中查出	23.1126°	
9	中心距变动系数	y	$\frac{z_1 + z_2}{2\cos \beta} \left(\frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}} - 1 \right)$	0.09744	
10	中心距	a	$\left(\frac{z_1 + z_2}{2\cos \beta} + y \right) m_n$	125.000	
11	分度圆直径	d	$\frac{z m_n}{\cos \beta}$	41.569	207.846
12	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha_t$	38.322	191.611
13	啮合节径	d_w	$\frac{d_b}{\cos \alpha_{wt}}$	41.667	208.333
14	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$\frac{(1 + y - x_{n2}) m_n}{(1 + y - x_{n1}) m_n}$	3.292	2.998
15	全齿高	h	$\{2.25 + y - (x_{n1} + x_{n2})\} m_n$	6.748	
16	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	48.153	213.842
17	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	34.657	200.346



当齿轮的中心距 a 一定的条件下求变位系数 x_{n1} ， x_{n2} 时，将表 4.9 中的第 5 到第 10 项按相反的顺序进行计算。

计算结果列于表 4.10。

表 4.10 齿直角方式变位斜齿齿轮的计算 (2)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮 (1)	大齿轮 (2)
1	中心距	a	设定值	125	
2	中心距变动系数	y	$\frac{a}{m_n} - \frac{z_1 + z_2}{2\cos \beta}$	0.097447	
3	端面啮合压力角	α_{wt}	$\cos^{-1} \left(\frac{\cos \alpha_t}{\frac{2y \cos \beta}{z_1 + z_2} + 1} \right)$	23.1126°	
4	变位系数的和	$x_{n1} + x_{n2}$	$\frac{(z_1 + z_2)(\operatorname{inv} \alpha_{wt} - \operatorname{inv} \alpha_t)}{2\tan \alpha_n}$	0.09809	
5	齿直角变位系数	x_n	—	0.09809	0

齿直角方式斜齿齿轮与轴直角方式斜齿齿轮的换算

关系如下：

$$\left. \begin{aligned} x_t &= x_n \cos \beta \\ m_t &= \frac{m_n}{\cos \beta} \\ \alpha_t &= \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$



(2) 轴直角方式斜齿齿轮

表 4.11 是轴直角方式变位斜齿齿轮的计算表。计算标准斜齿齿轮时, 取 $x_{11} = x_{12} = 0$ 。

表 4.11 轴直角方式变位斜齿齿轮的计算(1)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	端面模数	m_t	设 定 值	3	
2	端面压力角	α_t		20°	
3	分度圆螺旋角	β		30°	
4	齿数(螺旋方向)	z		12 (L)	60 (R)
5	切向变位系数	x_t		0.34462	0
6	渐开线函数 α_{wt}	$inv \alpha_{wt}$	$2 \tan \alpha_t \left(\frac{x_{11} + x_{12}}{z_1 + z_2} \right) + inv \alpha_t$	0.0183886	
7	端面啮合压力角	α_{wt}	由渐开线函数表中查出	21.3975°	
8	中心距变动系数	y	$\frac{z_1 + z_2}{2} \left(\frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}} - 1 \right)$	0.33333	
9	中心距	a	$\left(\frac{z_1 + z_2}{2} + y \right) m_t$	109.0000	
10	分度圆直径	d	$z m_t$	36.000	180.000
11	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha_t$	33.8289	169.1447
12	啮合节径	d_w	$\frac{d_b}{\cos \alpha_{wt}}$	36.3333	181.6667
13	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$(1 + y - x_{11}) m_t$ $(1 + y - x_{12}) m_t$	4.000	2.966
14	全齿高	h	$\{2.25 + y - (x_{11} + x_{12})\} m_t$	6.716	
15	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	44.000	185.932
16	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	30.568	172.500

表(2)是按相反顺序计算表 4.11 的第 5 项到第 9 项的结果。

表 4.12 轴直角方式变位斜齿齿轮的计算(2)

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	中心距	a	设 定 值	109	
2	中心距变动系数	y	$\frac{a}{m_t} - \frac{z_1 + z_2}{2}$	0.33333	
3	端面啮合压力角	α_{wt}	$\cos^{-1} \left(\frac{\cos \alpha_t}{\frac{2y}{z_1 + z_2} + 1} \right)$	21.39752°	
4	变位系数的和	$x_{11} + x_{12}$	$\frac{(z_1 + z_2)(inv \alpha_{wt} - inv \alpha_t)}{2 \tan \alpha_t}$	0.34462	
5	切向变位系数	x_t	—	0.34462	0

轴直角方式斜齿齿轮与齿直角方式斜齿齿轮的换算关系如下:

$$\left. \begin{aligned} x_n &= \frac{x_t}{\cos \beta} \\ m_n &= m_t \cos \beta \\ \alpha_n &= \tan^{-1}(\tan \alpha_t \cos \beta) \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$



(3) 斜齿齿条

斜齿轮与斜齿条的啮合从正面(轴直角方向)看上去,与齿条和正齿轮的啮合完全相同。

表 4.13 为齿直角方式斜齿条的计算,表 4.14 为轴直角方式斜齿条的计算。

表 4.13 齿直角方式斜齿条的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				斜齿齿轮	斜齿齿条
1	法向模数	m_n	设 定 值	2.5	
2	法向压力角	α_n		20°	
3	分度圆螺旋角	β		10°57'49"	
4	齿数(螺旋方向)	z		20 (R)	— (L)
5	法向变位系数	x_n		0	—
6	节线高度	H		—	27.5
7	端面压力角	α_t		20.34160°	
8	装配距离	a	$\frac{zm_n}{2\cos\beta} + H + x_n m_n$	52.965	
9	分度圆直径	d	$\frac{zm_n}{\cos\beta}$	50.92956	—
10	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha_t$	47.75343	
11	齿顶高	h_a	$m_n (1 + x_n)$	2.500	2.500
12	全齿高	h	$2.25m_n$	5.625	
13	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	55.929	—
14	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	44.679	

当表中 $x_n = 0$ 时,即为无变位齿直角齿轮的计算。

齿直角方式斜齿齿条与斜齿齿轮在平行轴相互啮合时,螺旋角相等,旋向相反是必要条件。

斜齿齿轮旋转一周时齿条的位移量 l 为齿条端面齿距的齿数倍。

$$l = \frac{\pi m_n}{\cos \beta} z \quad (4.18)$$

表 4.13 的情况下,端面齿距 p_t 为 8mm, 所以位移 l 为 160 mm。

如上所述,只要适当地选择螺旋角,端面齿距 p_t 可以成为整数。



表 4.14 轴直角方式斜齿齿条的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				斜齿齿轮	斜齿齿条
1	端面模数	m_t	设 定 值	2.5	
2	端面压力角	α_t		20°	
3	螺旋角	β		10°57'49"	
4	齿数(螺旋方向)	z		20 (R)	— (L)
5	切向变位系数	x_t		0	—
6	节线高度	H		—	27.5
7	装配距离	a	$\frac{zm_t}{2} + H + x_t m_t$	52.500	
8	分度圆直径	d	zm_t	50.000	—
9	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha_t$	46.98463	
10	齿顶高	h_a	$m_t (1 + x_t)$	2.500	2.500
11	全齿高	h	$2.25m_t$	5.625	
12	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	55.000	—
13	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	43.750	

轴直角方式斜齿齿条和斜齿轮啮合时,斜齿轮旋转一周时齿条的位移量 l 是齿条的端面齿距的齿数倍。

$$l = \pi m_t z \quad (4.19)$$



4.4 锥齿轮

锥齿轮是在相交的两轴之间做传动的圆锥齿轮。根据齿线的形状，分为直齿形锥齿轮、曲齿形锥齿轮、零度齿锥齿轮。锥齿轮是拥有锥形节圆面的两个齿轮在即相切又不产生滑动的状态下做啮合传动的齿轮。

齿数为 z_1 的小齿轮和齿数为 z_2 的大齿轮在轴交角为 Σ (相交两轴间的夹角) 喷合时，各自的分度圆锥角 δ_1 、 δ_2 的计算方法如下所示。

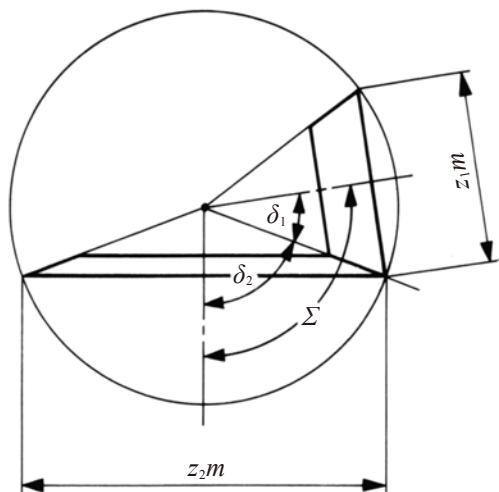


图 4.8 锥齿轮的分度圆锥角

$$\left. \begin{array}{l} \tan \delta_1 = \frac{\sin \Sigma}{\frac{z_2}{z_1} + \cos \Sigma} \\ \tan \delta_2 = \frac{\sin \Sigma}{\frac{z_1}{z_2} + \cos \Sigma} \end{array} \right\} \quad (4.20)$$

轴交角 Σ 为直角的情形最为常见。除直角外，也在锐角及钝角的状态下使用。在锐角及钝角的状态下使用的锥齿轮被称为斜交锥齿轮。图 4.8 示意了钝角锥齿轮的情形。

轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ 时，方程式 (4.20) 变化如下。

$$\left. \begin{array}{l} \delta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \\ \delta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \end{array} \right\} \quad (4.21)$$

轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ ，齿数比 $z_2/z_1 = 1$ 的锥齿轮被称为等径锥齿轮。

图 4.9 示意了锥齿轮的啮合。

锥齿轮的啮合必须在齿轮副的情况下加以考虑。被决定的齿数以外的组合无法正确地啮合。

锥齿轮的啮合，如果如图 4.9 所示，由端面做基准去考虑的话，可以得到与正齿轮的啮合很近似的结果。

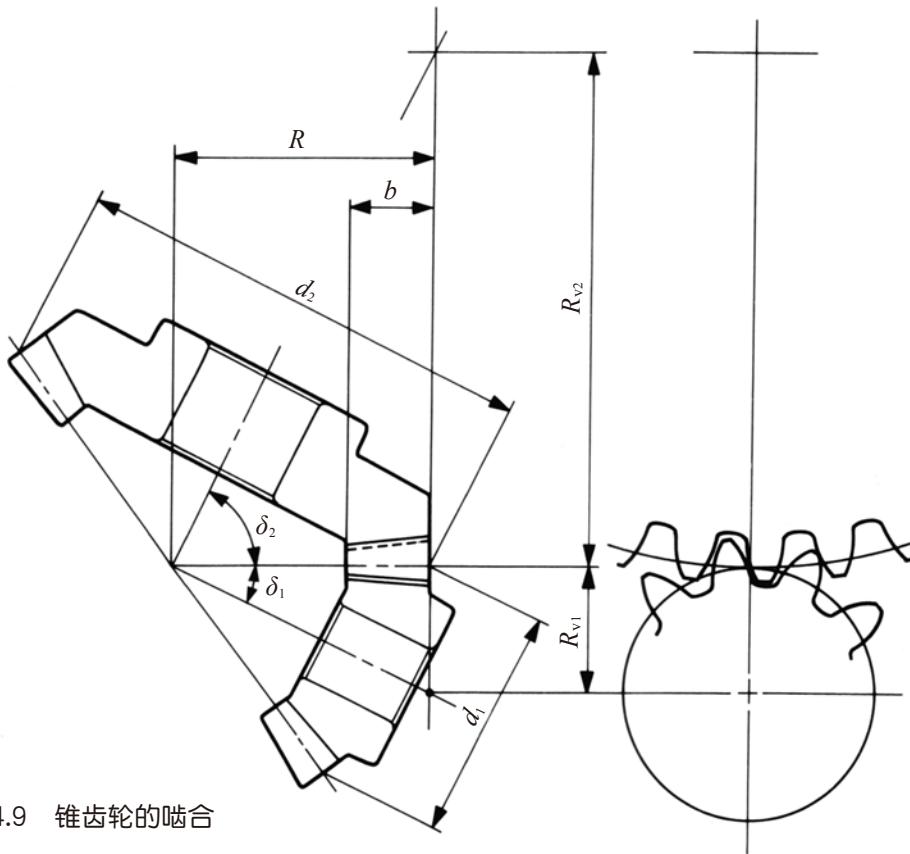


图 4.9 锥齿轮的啮合



(1) 格里森直齿锥齿轮

直齿锥齿轮是齿线为沿圆锥面指向圆锥顶点的直线锥齿轮。

直齿锥齿轮有格里森直齿锥齿轮和标准直齿锥齿轮两种具有代表性的方式。

这里介绍的格里森直齿锥齿轮的齿形为齿高 $h = 2.188m$, 顶隙 $c = 0.188m$, 工作齿高 $h_w = 2.000m$ 。

这种齿轮的特点是：

○ 变位齿轮。

通过对小齿轮正变位, 大齿轮负变位处理, 使强度平衡得以保证。

但是, 大小齿轮齿数相等的等径齿轮不进行变位。

○ 平行顶隙。

齿顶圆锥母线和配对齿轮的齿底圆锥母线平行。

轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ 的格里森直齿锥齿轮的防止产生根切的最小齿数列于表 4.15。

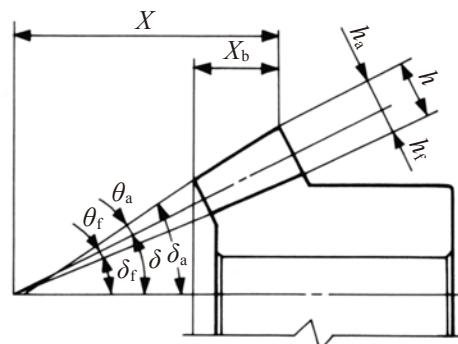
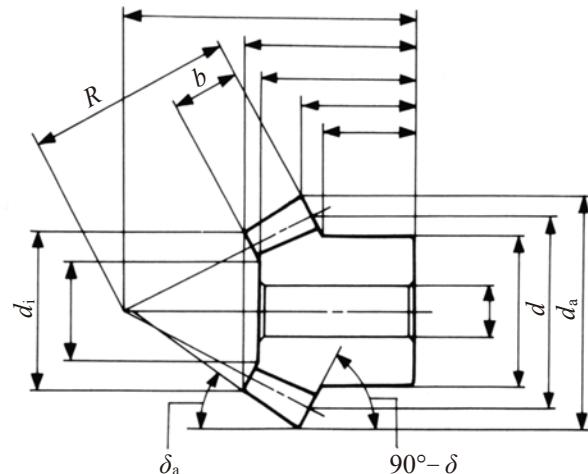


图 4.10 锥齿轮的尺寸及角度

表 4.15 防止根切的最小齿数

分度圆压力角	齿数的组合 z_1 / z_2					
	29/29 以上	28/29 以上	27/31 以上	26/35 以上	25/40 以上	24/57 以上
(14.5°)						
20°	16/16 以上	15/17 以上	14/20 以上	13/30 以上		
(25°)	13/13 以上					

表 4.16 是格里森直齿锥齿轮的计算表。计算出的尺寸及角度示意于图 4.10。

表 4.16 也可计算斜交直齿锥齿轮。

在格里森公司, 将经过鼓形加工的直齿锥齿轮称为弯曲圆锥磨削齿轮 (coniflex)。经过此加工的齿轮对防止由于组装误差而引起的片面接触非常有效。

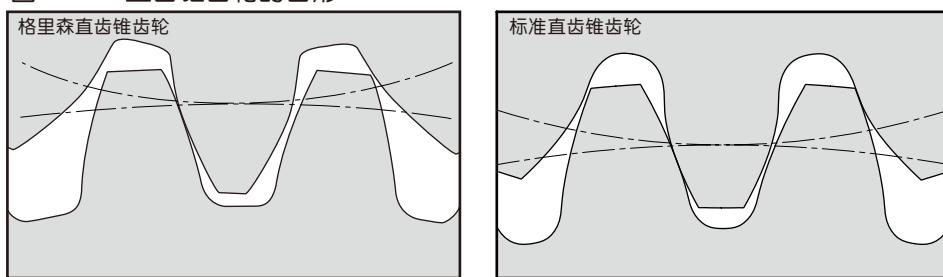


表 4.16 格里森直齿锥齿轮的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	轴交角	Σ	设 定 值	90°	
2	大端模数	m		3	
3	分度圆压力角	α		20°	
4	齿数	z		20	40
5	分度圆直径	d	zm	60	120
6	分锥角	δ_1	$\tan^{-1} \left(\frac{\sin \Sigma}{\frac{z_2}{z_1} + \cos \Sigma} \right)$	26.56505°	63.43495°
		δ_2	$\Sigma - \delta_1$		
7	大端锥距	R	$\frac{d_2}{2 \sin \delta_2}$	67.08204	
8	齿宽	b	最好能控制在 $R/3$ 或 $10m$ 以下	22	
9	大端齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$2.000m - h_a$ $0.540m + \frac{0.460m}{\left(\frac{z_2 \cos \delta_1}{z_1 \cos \delta_2} \right)}$	4.035	1.965
10	大端齿根高	h_f	$2.188m - h_a$	2.529	4.599
11	齿根角	θ_f	$\tan^{-1}(h_f/R)$	2.15903°	3.92194°
12	齿顶角	θ_{a1} θ_{a2}	θ_{f2} θ_{f1}	3.92194°	2.15903°
13	顶锥角	δ_a	$\delta + \theta_a$	30.48699°	65.59398°
14	根锥角	δ_f	$\delta - \theta_f$	24.40602°	59.51301°
15	大端齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a \cos \delta$	67.2180	121.7575
16	冠顶距	X	$R \cos \delta - h_a \sin \delta$	58.1955	28.2425
17	齿顶间轴向距	X_b	$\frac{b \cos \delta_a}{\cos \theta_a}$	19.0029	9.0969
18	小端齿顶圆直径	d_i	$d_a - \frac{2b \sin \delta_a}{\cos \theta_a}$	44.8425	81.6609

格里森直齿锥齿轮的特点是变位。表 4.16 的格里森直齿锥齿轮的齿形和表 4.17 的标准直齿锥齿轮的齿形示意于图 4.11。

图 4.11 直齿锥齿轮的齿形





(2) 标准直齿锥齿轮

标准直齿锥齿轮的齿形为全齿高齿，并且没有变位。

计算方法如表 4.17。

表 4.17 标准直齿锥齿轮的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	轴交角	Σ	设 定 值	90°	
2	大端模数	m		3	
3	分度圆压力角	α		20°	
4	齿数	z		20	40
5	分度圆直径	d	zm	60	120
6	分锥角	δ_1	$\tan^{-1} \left(\frac{\sin \Sigma}{\frac{z_2}{z_1} + \cos \Sigma} \right)$	26.56505°	63.43495°
		δ_2	$\Sigma - \delta_1$		
7	大端锥距	R	$\frac{d_2}{2 \sin \delta_2}$	67.08204	
8	齿宽	b	最好能控制在 $R/3$ 或 $10m$ 以下	22	
9	大端齿顶高	h_a	1.00m	3.00	
10	大端齿根高	h_f	1.25m	3.75	
11	齿根角	θ_f	$\tan^{-1}(h_f/R)$	3.19960°	
12	齿顶角	θ_a	$\tan^{-1}(h_a/R)$	2.56064°	
13	顶锥角	δ_a	$\delta + \theta_a$	29.12569°	65.99559°
14	根锥角	δ_f	$\delta - \theta_f$	23.36545°	60.23535°
15	大端齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a \cos \delta$	65.3666	122.6833
16	冠顶距	X	$R \cos \delta - h_a \sin \delta$	58.6584	27.3167
17	齿顶间轴向距	X_b	$\frac{b \cos \delta_a}{\cos \theta_a}$	19.2374	8.9587
18	小端齿顶圆直径	d_i	$d_a - \frac{2b \sin \delta_a}{\cos \theta_a}$	43.9292	82.4485

表 4.17 除正交轴外，也可使用其计算斜交直齿锥齿轮。



(3) 格里森弧齿(螺旋齿)锥齿轮

弧齿锥齿轮如图 4.12 所示, 是齿线呈曲线形的锥齿轮。齿线 d_c 和节锥母线的夹角为螺旋角。齿面中央的螺旋角为中央螺旋角 β_m , 或称为螺旋角。

表 4.20 所示的格里森弧齿锥齿轮的计算公式是使用双面切削法及单面铣刀切削法展成加工时的公式。使用不同的方法加工时, 计算公式也不同。

这里所介绍的格里森弧齿锥齿轮的齿形是齿高 $h = 1.888m$, 顶隙 $c = 0.188m$, 工作齿高 $h_w = 1.700m$ 的短齿, 模数 2.1 以上的齿轮可以使用。

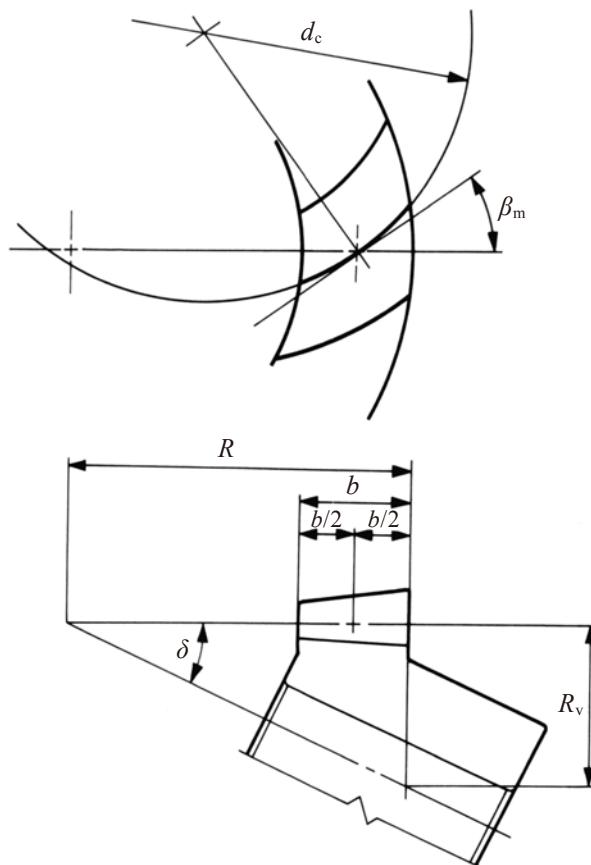


图 4.12 弧齿锥齿轮(左旋)

表 4.18 防止根切的最小齿数

法向压力角	齿数的组合						$\beta = 35^\circ$
	z_1/z_2	17/17 以上	16/18 以上	15/19 以上	14/20 以上	13/22 以上	
20°							
	20°	17/17 以上	16/18 以上	15/19 以上	14/20 以上	13/22 以上	12/26 以上

小齿轮的齿数小于 12 时, 根据表 4.19 来决定齿形的尺寸。

表 4.19 小齿轮齿数不超过 12 的弧齿伞轮的尺寸

小齿轮齿数	z_1	6	7	8	9	10	11
大齿轮齿数	z_2	34 以上	33 以上	32 以上	31 以上	30 以上	29 以上
工作齿高	h_w	1.500	1.560	1.610	1.650	1.680	1.695
全齿高	h	1.666	1.733	1.788	1.832	1.865	1.882
大齿轮的齿顶高	h_{a2}	0.215	0.270	0.325	0.380	0.435	0.490
小齿轮的齿顶高	h_{a1}	1.285	1.290	1.285	1.270	1.245	1.205
大齿轮的圆弧齿厚 s_2	30	0.911	0.957	0.975	0.997	1.023	1.053
	40	0.803	0.818	0.837	0.860	0.888	0.948
	50	—	0.757	0.777	0.828	0.884	0.946
	60	—	—	0.777	0.828	0.883	0.945
法向压力角	α_n	20°					
螺旋角	β	$35^\circ \sim 40^\circ$					
轴交角	Σ	90°					

(注) 表内数据为 $m = 1$ 时的结果。



格里森弧齿锥齿轮的计算列于表 4.20。

表 4.20 格里森弧齿锥齿轮的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例		
				小齿轮(1)	大齿轮(2)	
1	轴交角	Σ	设 定 值	90°		
2	大端端面模数	m		3		
3	法向压力角	α_n		20°		
4	中央螺旋角	β_m		35°		
5	齿数(螺旋方向)	z		20 (L)	40 (R)	
6	端面压力角	α_t	$\tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_m} \right)$	23.95680		
7	分度圆直径	d	zm	60	120	
8	分锥角	δ_1	$\tan^{-1} \left(\frac{\sin \Sigma}{\frac{z_2}{z_1} + \cos \Sigma} \right)$	26.56505°	63.43495°	
		δ_2	$\Sigma - \delta_1$			
9	锥距	R	$\frac{d_2}{2 \sin \delta_2}$	67.08204		
10	齿宽	b	希望控制在 $0.3R$ 或 $10m$ 以下	20		
11	大端齿顶高	h_{a1}	$1.700m - h_{a2}$	3.4275	1.6725	
		h_{a2}	$0.460m + \frac{0.390m}{\left(\frac{z_2 \cos \delta_1}{z_1 \cos \delta_2} \right)}$			
12	大端齿根高	h_f	$1.888m - h_a$	2.2365	3.9915	
13	齿根角	θ_f	$\tan^{-1} (h_f / R)$	1.90952°	3.40519°	
14	齿顶角	θ_{a1} θ_{a2}	θ_{f2} θ_{f1}	3.40519°	1.90952°	
15	顶锥角	δ_a	$\delta + \theta_a$	29.97024°	65.34447°	
16	根锥角	δ_f	$\delta - \theta_f$	24.65553°	60.02976°	
17	大端齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a \cos \delta$	66.1313	121.4959	
18	冠顶距	X	$R \cos \delta - h_a \sin \delta$	58.4672	28.5041	
19	齿顶间轴向距	X_b	$\frac{b \cos \delta_a}{\cos \theta_a}$	17.3563	8.3479	
20	小端齿顶圆直径	d_i	$d_a - \frac{2b \sin \delta_a}{\cos \theta_a}$	46.1140	85.1224	

斜交格里森弧齿齿轮亦可使用表 4.20 进行计算。

齿轮副的组合为旋向相反的一对齿轮相配合。

(4) 格里森零度锥齿轮

如图 4.13 所示, 中央螺旋角 β_m 为零的锥齿轮被称为零度锥齿轮。

齿轮的计算与格里森直齿锥齿轮相同, 可以使用表 4.16 进行计算。

螺旋方向为左旋与右旋齿相配合使用。图 4.13 示意了左旋齿齿轮。

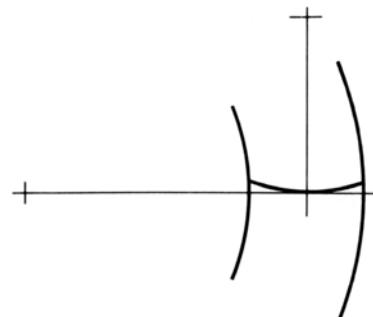


图 4.13 零度锥齿轮(左旋齿)



4.5 交错轴斜齿齿轮

交错轴斜齿齿轮是圆柱齿轮(斜齿齿轮)副在交错轴间传动时的名称。

交错轴斜齿齿轮本身是斜齿齿轮。

啮合状态示意在图 4.14 中。

交错轴斜齿齿轮相互间的法向模数 m_n 与法向压力角 α_n 必须相等才能啮合。

齿轮在无变位情况下啮合时的轴角 Σ 根据分度圆螺旋角 β_1 、 β_2 进行计算。

齿轮副的螺旋方向相同时：

$$\Sigma = \beta_1 + \beta_2$$

齿轮副的螺旋方向相反时：

$$\Sigma = \beta_1 - \beta_2 \text{ 或 } \Sigma = \beta_2 - \beta_1$$

(4.22)

如果将其实行变位，啮合会变得非常复杂。此时的轴角 Σ 根据啮合节圆柱螺旋角 β_{w1} 、 β_{w2} 进行计算。

齿轮副的螺旋方向相同时：

$$\Sigma = \beta_{w1} + \beta_{w2}$$

齿轮副的螺旋方向相反时：

$$\Sigma = \beta_{w1} - \beta_{w2} \text{ 或 } \Sigma = \beta_{w2} - \beta_{w1}$$

(4.23)

表 4.21 中列出了齿直角方式交错轴变位斜齿齿轮的计算。

计算无变位的标准齿轮时，计算表中的 $x_{n1} = x_{n2} = 0^\circ$ 。

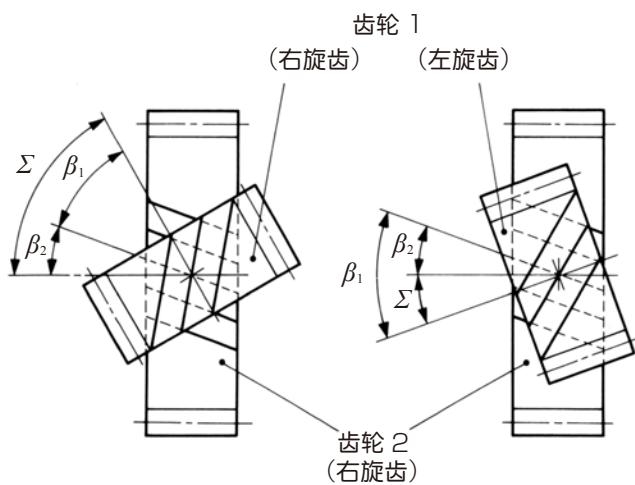


图 4.14 交错轴斜齿齿轮的啮合



表 4.21 齿直角方式变位交错轴斜齿齿轮的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				小齿轮(1)	大齿轮(2)
1	法向模数	m_n	设 定 值	3	
2	法向压力角	α_n		20°	
3	分度圆螺旋角	β		20°	30°
4	齿数(螺旋方向)	z		15 (R)	24 (R)
5	法向变位系数	x_n		0.4	0.2
6	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z}{\cos^3 \beta}$	18.0773	36.9504
7	端面压力角	α_t	$\tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right)$	21.1728°	22.7959°
8	α_{wn} 角的渐开线函数	$\text{inv} \alpha_{wn}$	$2 \tan \alpha_n \left(\frac{x_{n1} + x_{n2}}{z_{v1} + z_{v2}} \right) + \text{inv} \alpha_n$	0.0228415	
9	法向啮合角	α_{wn}	由渐开线函数表中查出	22.9338°	
10	端面啮合角	α_{wt}	$\tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_{wn}}{\cos \beta} \right)$	24.2404°	26.0386°
11	中心距变动系数	y	$\frac{1}{2} (z_{v1} + z_{v2}) \left(\frac{\cos \alpha_n}{\cos \beta} - 1 \right)$	0.55977	
12	中心距	a	$\left(\frac{z_1}{2 \cos \beta_1} + \frac{z_2}{2 \cos \beta_2} + y \right) m_n$	67.1925	
13	分度圆直径	d	$\frac{z m_n}{\cos \beta}$	47.8880	83.1384
14	基圆直径	d_b	$d \cos \alpha_t$	44.6553	76.6445
15	啮合节径	d_{w1}	$2a \frac{d_1}{d_1 + d_2}$	49.1155	85.2695
		d_{w2}	$2a \frac{d_2}{d_1 + d_2}$		
16	啮合节圆螺旋角	β_w	$\tan^{-1} \left(\frac{d}{d} \tan \beta \right)$	20.4706°	30.6319°
17	轴交角	Σ	$\beta_{w1} + \beta_{w2}$ 又是 $\beta_{w1} - \beta_{w2}$	51.1025°	
18	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$(1 + y - x_{n2}) m_n$ $(1 + y - x_{n1}) m_n$	4.0793	3.4793
19	全齿高	h	$\{2.25 + y - (x_{n1} + x_{n2})\} m_n$	6.6293	
20	齿顶圆直径	d_a	$d + 2h_a$	56.0466	90.0970
21	齿根圆直径	d_f	$d_a - 2h$	42.7880	76.8384

无变位的标准交错轴斜齿齿轮的啮合, 如下的关系式成立。

$$\left. \begin{array}{l} d_{w1} = d_1 \quad d_{w2} = d_2 \\ \beta_{w1} = \beta_1 \quad \beta_{w2} = \beta_2 \end{array} \right\} \quad (4.24)$$



4.6 圆柱蜗杆蜗轮

圆柱蜗杆蜗轮是拥有螺纹状轮齿的蜗杆和与之啮合的蜗轮的齿轮副。蜗杆蜗轮副是作用在交错轴的齿轮，使用最为广泛。一般轴交角为 $\Sigma = 90^\circ$ 。双头以上的蜗杆被称为多头蜗杆。

如图 4.16 所示，蜗杆是具有单头以上的轮齿的螺纹状齿轮。节圆柱上，螺旋线拥有分度圆导程角 γ 。螺旋线旋转一周时，进程为导程 p_z 。

根据日本工业标准 JIS B1723-1977，圆柱蜗杆的齿形尺寸规定为以下四种类型。

1型：轴向截面齿形为梯形

2型：齿槽在法向截面中为梯形

3型：蜗杆螺旋面由锥形铣刀或砂轮包络而成。蜗杆轴线在空间交错成分度圆导程角（参考：JIS B0102：1999 齿轮术语中称为 K型）

4型：端面齿形为渐开线

KHK 标准齿轮全部为 3型轮齿（图 4.15）。加工工具使用蜗杆铣刀。蜗杆铣刀是拥有基准齿的单片刀刃的工具。加工机械使用被称为蜗杆磨床的专用机床。

蜗杆蜗轮副是交错轴齿轮，蜗杆的轴平面和蜗轮的轴平面不同。

蜗杆的轴平面是蜗轮的端面，蜗杆的端面是蜗轮的轴平面。

唯一相同的平面是法向平面。

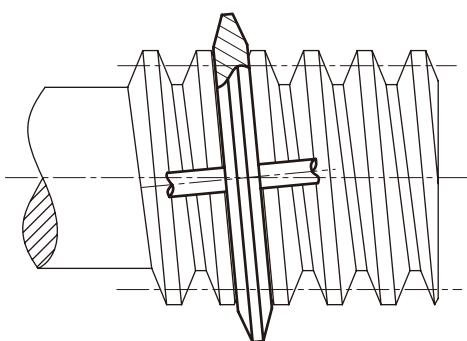


图 4.15 3形蜗杆的切削及磨削

以法向平面的法向模数 m_n 做为基准制作蜗杆蜗轮的方法已经非常普及。

根据这种方式，利用市场上出售的齿轮滚刀即可切削蜗轮，非常方便。

下面将蜗杆副在轴平面，端面和法平面上的模数，齿形角，齿距及导程的关系列于表 4.23。

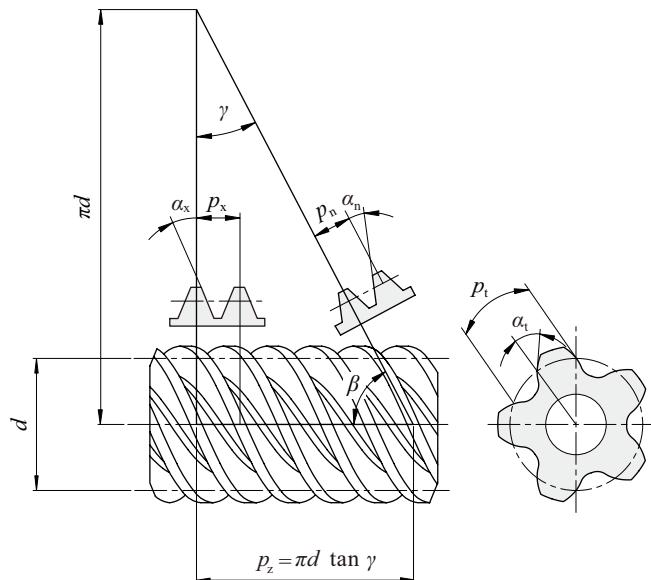


图 4.16 圆柱蜗杆（右螺旋）

表 4.22 蜗杆蜗轮比较表

蜗 杆		
轴 平 面	法 平 面	轴直角平面(端平面)
$m_x = \frac{m_n}{\cos \gamma}$	m_n	$m_t = \frac{m_n}{\sin \gamma}$
$\alpha_x = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \gamma} \right)$	α_n	$\alpha_t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\sin \gamma} \right)$
$P_x = \pi m_x$	$P_n = \pi m_n$	$P_t = \pi m_t$
$P_z = \pi m_x z$	$P_z = \frac{\pi m_n z}{\cos \gamma}$	$P_z = \pi m_t z \tan \gamma$
轴直角平面(端平面)	法 平 面	轴 平 面
蜗 轮		

参考图 4.16，可以对理解表 4.22 中蜗杆蜗轮各不同平面间的相互关系有帮助。各要素之间的关系式与斜齿齿轮的计算公式 (4.16)、(4.17) 相同，只是将其中的 β 角换成了 $(90^\circ - \gamma)$ 。所以，可以近似地看成分度圆柱导程角 γ 的蜗杆是螺旋角 $(90^\circ - \gamma)$ 的斜齿齿轮。



(1) 轴向模数方式蜗杆蜗轮

这种方式的蜗杆蜗轮以轴向模数 m_x ，法向齿形角 $\alpha_n = 20^\circ$ 为基准进行齿轮计算。表 4.23 为计算结果。

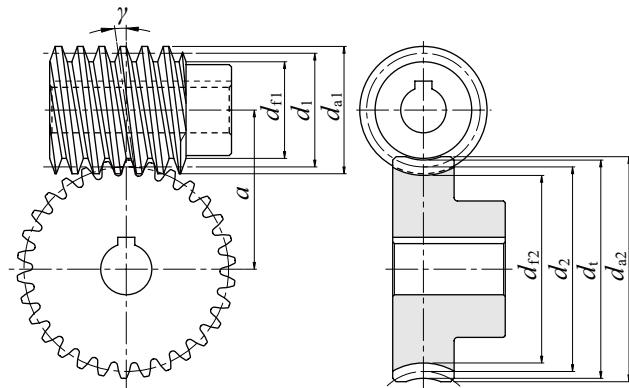


图 4.17 圆柱蜗杆蜗轮的尺寸

表 4.23 轴向模数方式蜗杆蜗轮计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				蜗杆 (1)	蜗轮 (2)
1	轴向模数	m_x	设 定 值	3	
2	法向齿形角	(α_n)		(20°)	
3	头数·齿数	z		右双头	30 (R)
4	切向变位系数	x_{t2}		—	0
5	分度圆直径	d_1 d_2	(Qm_x) 注 1 $z_2 m_x$	44.000	90.000
6	分度圆柱导程角	γ	$\tan^{-1} \left(\frac{m_x z_1}{d_1} \right)$	7.76517°	
7	中心距	a	$\frac{d_1 + d_2}{2} + x_{t2} m_x$	67.000	
8	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	$1.00 m_x$ $(1.00 + x_{t2}) m_x$	3.000	3.000
9	全齿高	h	$2.25 m_x$	6.750	
10	齿顶圆直径	d_{a1} d_{a2}	$d_1 + 2h_{a1}$ $d_2 + 2h_{a2} + m_x$	50.000	99.000
11	喉径	d_t	$d_2 + 2h_{a2}$	—	96.000
12	喉圆半径	r_i	$\frac{d_1}{2} - h_{a1}$	—	19.000
13	齿根圆直径	d_{f1} d_{f2}	$d_{a1} - 2h$ $d_t - 2h$	36.500	82.500

注 1 · 直径系数 Q 是蜗杆的节径 d_1 与轴向模数 m_x 的比。

$$Q = \frac{d_1}{m_x}$$

注 2 · 蜗轮齿顶圆直径 d_{a2} 的计算还有许多其他的方法。

注 3 · 蜗杆的齿宽 b_1 有 $\pi m_x (4.5 + 0.02 z_2)$ 就足够了。

注 4 · 蜗轮的工作齿宽 b_w 为 $2m_x \sqrt{Q + 1}$ 所以，蜗轮的齿宽 b_2 达到 $b_w + 1.5m_x$ 以上的话就足够了。



(2) 齿直角方式蜗杆蜗轮

此方式的蜗杆蜗轮以法向模数 m_n , 法向齿形角 $\alpha_n = 20^\circ$ 为基准进行齿轮的计算。表 4.24 为计算表。

表 4.24 齿直角方式蜗杆蜗轮的计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例	
				蜗杆(1)	蜗轮(2)
1	法向模数	m_n	设 定 值	3	
2	法向齿形角	α_n		(20°)	
3	头数·齿数	z		右双头	30 (R)
4	蜗杆节圆直径	d_1		44.000	—
5	法向变位系数	x_{n2}		—	-0.1414
6	分度圆柱导程角	γ	$\sin^{-1}\left(\frac{m_n z_1}{d_1}\right)$	7.83748°	
7	蜗轮节圆径	d_2	$\frac{z_2 m_n}{\cos \gamma}$	—	90.8486
8	中心距	a	$\frac{d_1 + d_2}{2} + x_{n2} m_n$	67.000	
9	齿顶高	h_{a1} h_{a2}	1.00 m_n (1.00 + x_{n2}) m_n	3.000	2.5758
10	全齿高	h	2.25 m_n	6.75	
11	齿顶圆直径	d_{a1} d_{a2}	$d_1 + 2h_{a1}$ $d_2 + 2h_{a2} + m_n$	50.000	99.000
12	喉径	d_t	$d_2 + 2h_{a2}$	—	96.000
13	喉圆半径	r_i	$\frac{d_1}{2} - h_{a1}$	—	19.000
14	齿根圆直径	d_{f1} d_{f2}	$d_{a1} - 2h$ $d_t - 2h$	36.500	82.500

关于注释请参照表 4.23。

(3) 蜗杆蜗轮的鼓形加工

对于蜗杆蜗轮,与其他的齿轮相比,鼓形加工尤为重要。通过鼓形加工,可以防止因为齿轮的安装误差等引起的片面接触,确保形成油膜所必须的入口间隙。

鼓形加工的四种方法介绍如下。

对蜗轮的轮齿施行鼓形加工的方法,有以下几种。

(a) 使用比蜗杆的分度圆大的滚刀加工蜗轮

使用与蜗杆同径的滚刀加工蜗轮时,蜗轮的鼓面加工余量为零。

象这样完全没有误差地被加工出来的蜗轮副,被无误差地组装后,齿接触应该是齿面全面重合。这主要有两个问题,一是入口间隙无法确保,二是象这样无误差的理想状况是不现实的,结果终究是成为片面接触。

想解决这些问题,如图 4.18 所示,使用大分度圆直径的滚刀切削蜗轮,这样使齿接触集中在齿宽的中央部,入口的间隙得以保证。

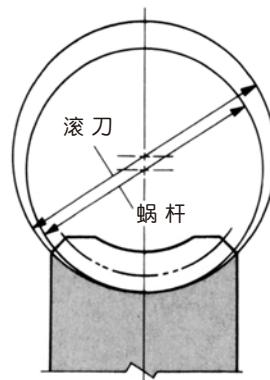


图 4.18 使用大直径滚刀的切齿方法



(b) 滚刀轴沿齿宽方向上下微量 Δh 移动后切齿的方法

使用滚床对蜗轮进行切齿时,滚刀轴与蜗轮的中心对位。在这种情况下,完成通常的全深度切齿后,将滚刀轴的中心向上移动 Δh 量后切齿,然后按同样的顺序向下移动 Δh 后切齿。因为上下移动时,沿着齿线进行,所以需要选择移动方向。一是与导程角相吻合的导程上下移动,二是将半成品沿圆周方向移动后在上下的位置固定。通过这样的方法达到齿部的鼓形加工目的。

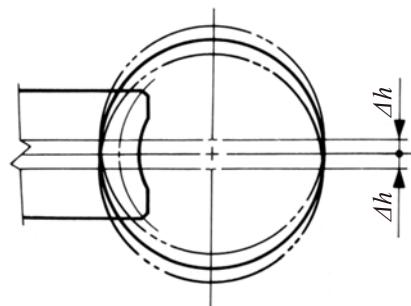


图 4.19 上下移动法

(c) 滚刀轴左右倾斜 $\Delta\theta$ 角度的切齿方法

利用滚床加工蜗轮轮齿时,滚刀轴按已经过计算的安装角进行安装后实行通常的切齿加工,然后将滚刀轴向左倾斜 $\Delta\theta$ 角度,安装后切齿。按同样顺序向右倾斜后切齿,这样达到齿面的鼓形加工目的。

以上对蜗轮实行鼓形加工的方法中,使用最为广泛的是(a)的方法。(b) 和(c)很少被使用。

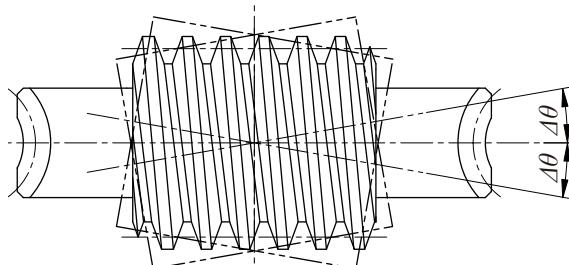


图 4.20 左右倾斜法

下面介绍蜗杆的鼓形加工方法。

(d) 将蜗杆的轴平面齿形角加工成比蜗轮的轴平面齿形角大以得到蜗杆的鼓形

这个方法可以不改变对于齿轮来说最为重要的轴平面上的基圆齿距,只改变轴平面齿形角及轴向齿距即可达到蜗杆的鼓形加工目的。

$$p_x \cos \alpha_x = p_{wx} \cos \alpha_{wx} \quad (4.25)$$

修形后的轴平面齿形角 α_x 比修形前的 α_{wx} 增大后,要想满足方程式(4.25),就必须将修形后的轴向齿距 p_x 也增大。

也就是说,这种方法是轴平面齿形角 α_x 和轴向齿距 p_x 增大修形法。

$$\text{鼓形修形量} \doteq k \frac{p_x - p_{wx}}{p_{wx}} \frac{d_1}{2} \quad (4.26)$$

其中 d_1 : 蜗杆的分度圆直径

k : 系数。可以从表 4.25 或图 4.21 中查出。

表 4.25 系数 k 值

α_x	14.5°	17.5°	20°	22.5°
k	0.55	0.46	0.41	0.375

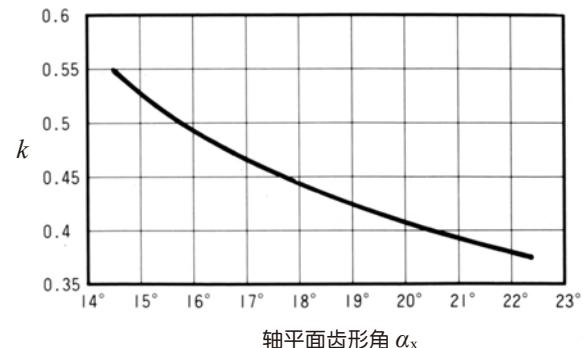


图 4.21 系数 k 值



表 4.26 列出了蜗杆的鼓形修形计算。

表 4.26 蜗杆的鼓形加工计算

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	轴向模数	m_{wx}	注: 这是修形前的数值。	3
2	法向齿形角	α_{wn}		20°
3	蜗杆的头数	z_1		2
4	蜗杆的分度圆直径	d_1		44.000
5	分度圆柱导程角	γ_w	$\tan^{-1} \left(\frac{m_{wx} z_1}{d_1} \right)$	7.765166°
6	轴平面齿形角	α_{wx}	$\tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_{wn}}{\cos \gamma_w} \right)$	20.170236°
7	轴向齿距	p_{wx}	πm_{wx}	9.424778
8	导程	p_{wz}	$\pi m_{wx} z_1$	18.849556

9	鼓形修形量	C_R	根据齿接触的比例来决定	0.04
10	系数	k	从表 4.26 中查出	0.41

※修形后的数据				
11	轴向齿距	p_x	$p_{wx} \left(\frac{2C_R}{kd_1} + 1 \right)$	9.466573
12	轴平面齿形角	α_x	$\cos^{-1} \left(\frac{p_{wx}}{p_x} \cos \alpha_{wx} \right)$	20.847973°
13	轴向模数	m_x	$\frac{p_x}{\pi}$	3.013304
14	分度圆柱导程角	γ	$\tan^{-1} \left(\frac{m_x z_1}{d_1} \right)$	7.799179°
15	法向齿形角	α_n	$\tan^{-1} (\tan \alpha_x \cos \gamma)$	20.671494°
16	导程	p_z	$\pi m_x z_1$	18.933146

(4) 蜗杆副的自锁

蜗杆副的特点之一是自锁现象。

自锁现象是指由蜗轮无法驱动蜗杆的状态。利用这种特性在升降装置中, 可以简单地保持停止位置等, 其他亦有很多有效的用途。

受各种因素的影响, 蜗杆副有能自锁和不能自锁两种。

轴承损失, 搅拌润滑油损失等完全不产生影响的理想状态下, 自锁现象是否发生的判断取决于齿面的作用力。蜗轮做为驱动齿轮时, 蜗杆的切向力 F_{t1} 可通过下式计算。

$$F_{t1} = F_n (\cos \alpha_n \sin \gamma - \mu \cos \gamma) \quad (4.27)$$

切向力 F_{t1} 大于零时, 不能自锁。从公式中看出, 法向齿形角 α_n 分度圆柱导程角 γ 与摩擦系数 μ 这三个要素对自锁产生影响。其中静摩擦系数 μ 受润滑状况及表面粗糙度等影响, 是不确定要素。

公式 (4.27) 中, 如果设 $F_{t1} = 0$, $\alpha_n = 20^\circ$ 的话, 分度圆柱导程角 γ 与摩擦系数 μ 的关系如图 4.23 所示。

实际的蜗杆副中, 摩擦系数 μ 值的正确计算非常的困难。而且, 实际上轴承损失及润滑油搅拌损失等引起的制动力起作用, 要想完全正确地掌握这些要素的作用非常困难。所以, 蜗杆副是否能自锁的判断也就非常的困难。

但是, 可以很确定地断言, 分度圆柱导程角 γ 越小, 自锁性越高。

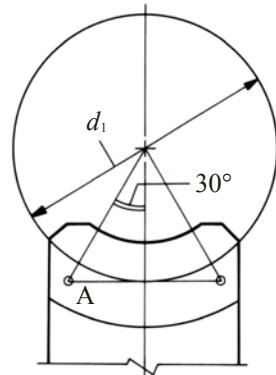
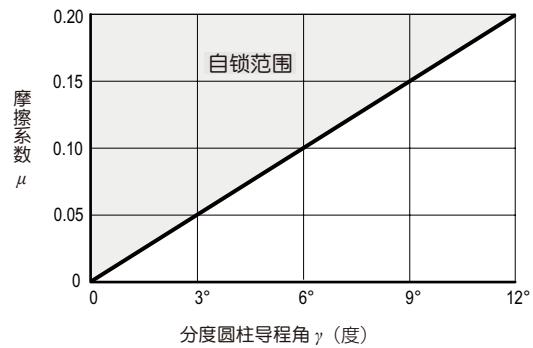


图 4.22 计算鼓形修形量的点 A

图 4.23 分度圆柱导程角 γ 与摩擦系数 μ 的自锁极限



5 齿轮的齿厚

齿轮的齿厚测定方法有二种,一种是直接测齿厚,另一种是测与齿厚有关的其他尺寸。

一般采用弦齿厚法,公法线长度法,量柱(球)法。

5.1 弦齿厚法

如图 5.1 所示,将齿轮的齿顶圆做为基准,用卡钳测量分度圆上的弦齿厚。

(1) 正齿轮

表 5.1 为正齿轮的弦齿厚计算公式。

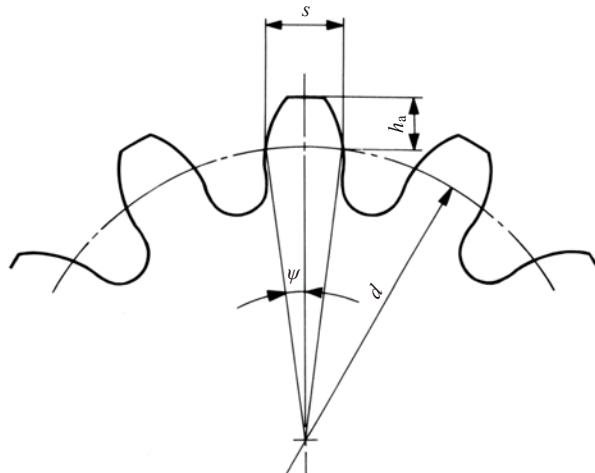


图 5.1 弦齿厚法

表 5.1 正齿轮的弦齿厚

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	圆弧齿厚	s	$\left(\frac{\pi}{2} + 2x \tan \alpha\right) m$	$m = 10$ $\alpha = 20^\circ$ $z = 12$ $x = +0.3$ $h_a = 13.000$ $s = 17.8918$ $\psi = 8.54270^\circ$ $\bar{s} = 17.8256$ $\bar{h}_a = 13.6657$
2	齿厚半角	ψ	$\frac{90}{z} + \frac{360x \tan \alpha}{\pi z}$	
3	弦齿厚	\bar{s}	$zm \sin \psi$	
4	弦齿高	\bar{h}_a	$\frac{zm}{2} (1 - \cos \psi) + h_a$	

(2) 齿条和斜齿齿条

因为齿条的齿形为直线型,所以使用的计算公式也很简单,见表 5.2。

表 5.2 齿条的弦齿厚

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	弦齿厚	\bar{s}	$\frac{\pi m}{2}$ 或 $\frac{\pi m_n}{2}$	$m = 3$ $\alpha = 20^\circ$ $\bar{s} = 4.7124$ $h_a = 3.0000$
2	弦齿高	\bar{h}_a	h_a	

斜齿齿条亦可使用上表的公式进行计算。



(3) 斜齿齿轮

弦齿厚在法平面上测定。

表 5.3 是齿直角方式斜齿齿轮的计算表。表 5.4 是轴直角方式斜齿齿轮的计算表。

表 5.3 齿直角方式斜齿齿轮的弦齿厚

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	法向齿厚	s_n	$\left(\frac{\pi}{2} + 2x_n \tan \alpha_n\right)m_n$	$m_n = 5$ $\alpha_n = 20^\circ$ $\beta = 25^\circ 00' 00''$ $z = 16$ $x_n = +0.2$ $h_a = 6.0000$ $s_n = 8.5819$ $z_v = 21.4928$ $\psi_v = 4.57556^\circ$ $\bar{s} = 8.5728$ $\bar{h}_a = 6.1712$
2	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z}{\cos^3 \beta}$	
3	齿厚半角	ψ_v	$\frac{90}{z_v} + \frac{360x_n \tan \alpha_n}{\pi z_v}$	
4	弦齿厚	\bar{s}	$z_v m_n \sin \psi_v$	
5	弦齿高	\bar{h}_a	$\frac{z_v m_n}{2} (1 - \cos \psi_v) + h_a$	

表 5.4 轴直角方式斜齿齿轮的弦齿厚

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	法向齿厚	s_n	$\left(\frac{\pi}{2} + 2x_t \tan \alpha_t\right)m_t \cos \beta$	$m_t = 2.5$ $\alpha_t = 20^\circ$ $\beta = 21^\circ 30' 00''$ $z = 20$ $x_t = 0$ $h_a = 2.5$ $s_n = 3.6537$ $z_v = 24.8311$ $\psi_v = 3.62448^\circ$ $\bar{s} = 3.6513$ $\bar{h}_a = 2.5578$
2	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z}{\cos^3 \beta}$	
3	齿厚半角	ψ_v	$\frac{90}{z_v} + \frac{360x_t \tan \alpha_t}{\pi z_v}$	
4	弦齿厚	\bar{s}	$z_v m_t \cos \beta \sin \psi_v$	
5	弦齿高	\bar{h}_a	$\frac{z_v m_t \cos \beta}{2} (1 - \cos \psi_v) + h_a$	

(4) 锥齿轮

表 5.5 是格里森直齿锥齿轮的计算表, 表 5.6 是标准直齿锥齿轮的计算表, 表 5.7 是格里森弧齿锥齿轮的计算表。

表中的弦齿高的计算公式为近似公式。

表 5.5 格里森直齿锥齿轮的弦齿厚

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	齿厚变动系数 (切向变位系数)	K	由图 5.2 中求出。	$m = 4$ $\alpha = 20^\circ$ $\Sigma = 90^\circ$ $z_1 = 16$ $z_2 = 40$ $z_1/z_2 = 0.4$ $K = 0.0259$ $h_{a1} = 5.5456$ $h_{a2} = 2.4544$ $\delta_1 = 21.8014^\circ$ $\delta_2 = 68.1986^\circ$ $s_1 = 7.5119$ $s_2 = 5.0545$ $\bar{s}_1 = 7.4946$ $\bar{s}_2 = 5.0536$ $\bar{h}_{a1} = 5.7502$ $\bar{h}_{a2} = 2.4692$
2	弧齿厚	s_1 s_2	$\pi m - s_2$ $\frac{\pi m}{2} - (h_{a1} - h_{a2}) \tan \alpha - Km$	
3	弦齿厚	\bar{s}	$s - \frac{s^3}{6d^2}$	
4	弦齿高	\bar{h}_a	$h_a + \frac{s^2 \cos \delta}{4d}$	

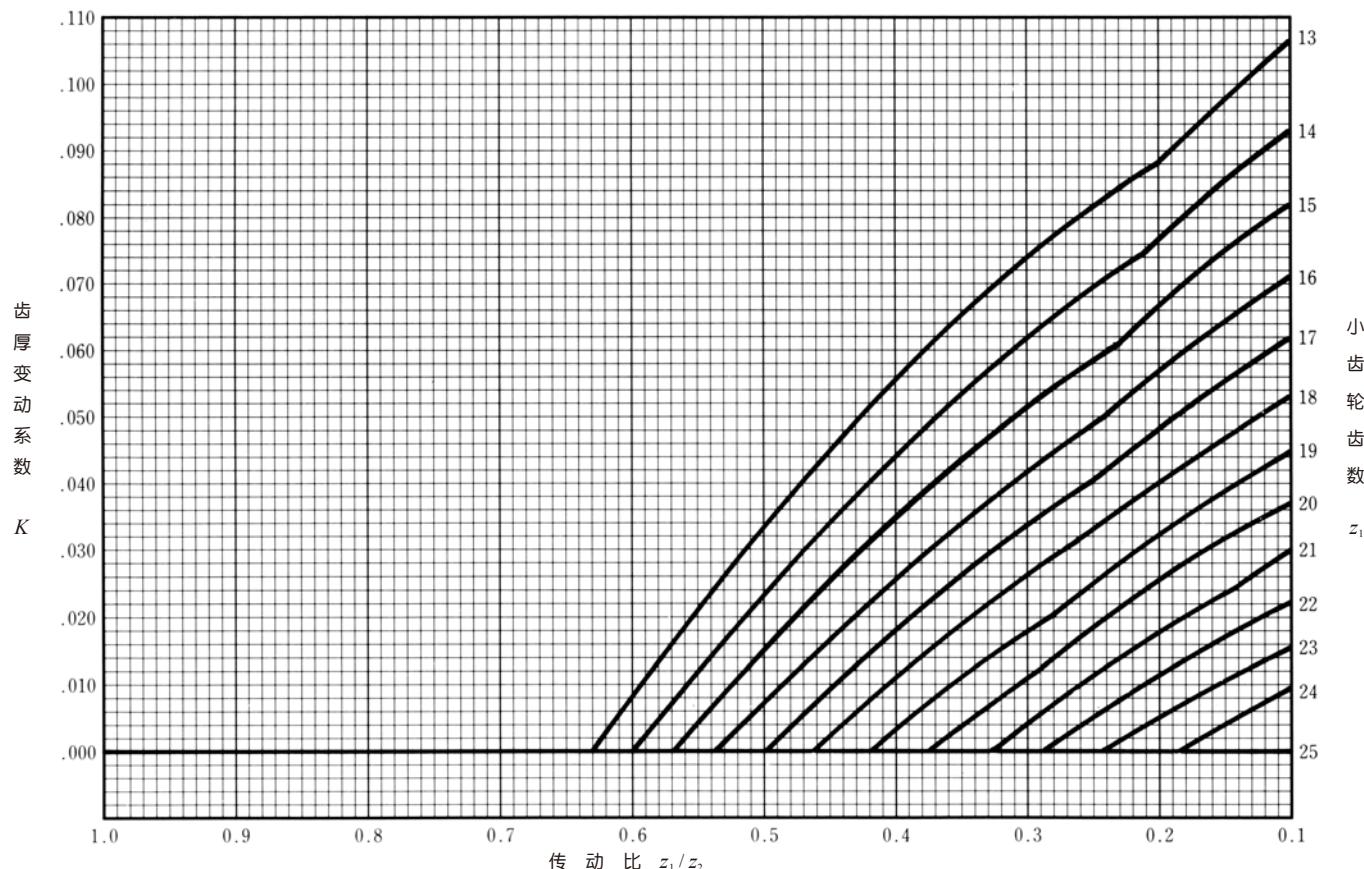
图 5.2 格里森直齿锥齿轮的齿厚变动系数 K 线图

表 5.6 标准直齿锥齿轮的弦齿厚

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	弧齿厚	s	$\frac{\pi m}{2}$	$m = 4$ $\alpha = 20^\circ$ $\Sigma = 90^\circ$ $z_1 = 16$ $z_2 = 40$ $d_1 = 64$ $d_2 = 160$ $h_a = 4.0000$ $\delta_1 = 21.8014^\circ$ $\delta_2 = 68.1986^\circ$ $s = 6.2832$ $z_{v1} = 17.2325$ $z_{v2} = 107.7033$ $R_{v1} = 34.4650$ $R_{v2} = 215.4066$ $\psi_{v1} = 5.2227^\circ$ $\psi_{v2} = 0.83563^\circ$ $\bar{s}_1 = 6.2745$ $\bar{s}_2 = 6.2830$ $\bar{h}_{a1} = 4.1431$ $\bar{h}_{a2} = 4.0229$
2	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z}{\cos \delta}$	
3	背锥距	R_v	$\frac{d}{2 \cos \delta}$	
4	齿厚半角	ψ_v	$\frac{90}{z_v}$	
5	弦齿厚	\bar{s}	$z_v m \sin \psi_v$	
6	弦齿高	\bar{h}_a	$h_a + R_v (1 - \cos \psi_v)$	

直齿锥齿轮在使用格里森刨齿机切齿时,有必要计算刨齿机用的齿角。
计算公式如(5.1)所示。

$$\text{齿角 } (\circ) = \frac{180}{\pi R} \left(\frac{s}{2} + h_f \tan \alpha \right) \quad (5.1)$$

这个角度是为了决定直齿锥齿轮的弧齿厚 s 而设置的,只为参考值。

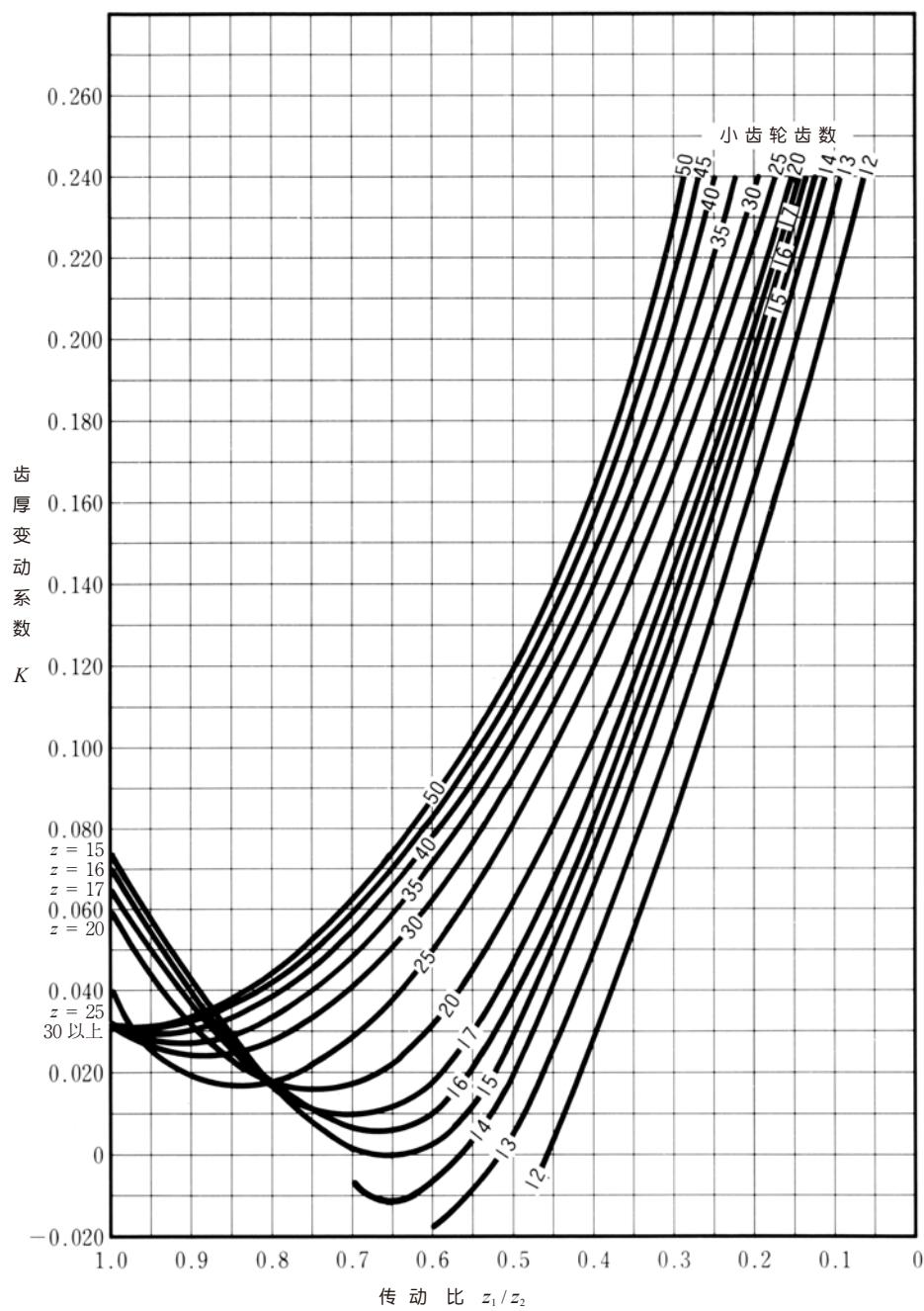


图 5.3 格里森弧齿锥齿轮的齿厚变动系数 K 线图

表 5.7 格里森弧齿锥齿轮

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	齿厚变动系数	K	由图 5.3 中查出。	$\Sigma = 90^\circ$ $m = 3$ $\alpha_n = 20^\circ$ $z_1 = 20$ $z_2 = 40$ $\beta_m = 35^\circ$ $h_{a1} = 3.4275$ $K = 0.060$ $h_{a2} = 1.6725$
2	齿厚	s_1 s_2	$s_1 = p - s_2$ $s_2 = \frac{p}{2} - (h_{a1} - h_{a2}) \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_m} - Km$	$p = 9.4248$ $s_1 = 5.6722$ $s_2 = 3.7526$

弦齿厚的计算公式，随切齿方式而变化，计算亦非常复杂，在这里加以省略。



(5) 蜗杆蜗轮

表 5.8 是轴向模数方式蜗杆副的计算表, 表 5.9 是齿直角方式蜗杆副的计算表。

表 5.8 轴向模数方式蜗杆副

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	轴向齿厚(蜗杆)	s_{x1}	$\frac{\pi m_x}{2}$	
	端面齿厚(蜗轮)	s_{t2}	$\left(\frac{\pi}{2} + 2x_{t2} \tan \alpha_t\right) m_t$	
2	当量齿轮齿数(蜗轮)	z_{v2}	$\frac{z_2}{\cos^3 \gamma}$	
3	齿厚半角(蜗轮)	ψ_{v2}	$\frac{90}{z_{v2}} + \frac{360 x_{t2} \tan \alpha_t}{\pi z_{v2}}$	
4	弦齿厚	\bar{s}_1 \bar{s}_2	$s_{x1} \cos \gamma$ $z_{v2} m_t \cos \gamma \sin \psi_{v2}$	
5	弦齿高	\bar{h}_{a1}	$h_{a1} + \frac{(s_{x1} \sin \gamma \cos \gamma)^2}{4d_1}$	
		\bar{h}_{a2}	$h_{a2} + \frac{z_{v2} m_t \cos \gamma}{2} (1 - \cos \psi_{v2})$	

表 5.9 齿直角方式蜗杆副

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	法向齿厚	s_{n1}	$\frac{\pi m_n}{2}$	
		s_{n2}	$\left(\frac{\pi}{2} + 2x_{n2} \tan \alpha_n\right) m_n$	
2	当量齿轮齿数(蜗轮)	z_{v2}	$\frac{z_2}{\cos^3 \gamma}$	
3	齿厚半角(蜗轮)	ψ_{v2}	$\frac{90}{z_{v2}} + \frac{360 x_{n2} \tan \alpha_n}{\pi z_{v2}}$	
4	弦齿厚	\bar{s}_1 \bar{s}_2	s_{n1} $z_{v2} m_n \sin \psi_{v2}$	
5	弦齿高	\bar{h}_{a1}	$h_{a1} + \frac{(s_{n1} \sin \gamma)^2}{4d_1}$	
		\bar{h}_{a2}	$h_{a2} + \frac{z_{v2} m_n}{2} (1 - \cos \psi_{v2})$	



5.2 公法线长度法

如图 5.4 所示, 使用卡尺测定跨齿数为 k 的公法线长度 W , 卡爪相切于轮齿的不同侧面。用这个方法所测出的公法线长度是基圆柱上的法向齿厚 s_{bn} 与基圆齿距 $p_{bn} \times (k - 1)$ 的和。

(1) 正齿轮与内齿轮

表 5.10 列出了计算公式。

表 5.10 正齿轮及内齿轮的公法线长度

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	跨齿数	k	$k_{th} = zK(f) + 0.5$ 注 1 k 是与 k_{th} 最接近的整数。	$m = 3$ $\alpha = 20^\circ$ $z = 24$ $x = +0.4$ $k_{th} = 3.78787$ $k = 4$ $W = 32.8266$
2	公法线长度	W	$m \cos \alpha \{ \pi (k - 0.5) + z \operatorname{inv} \alpha \} + 2xm \sin \alpha$	

注 1. 其中

$$K(f) = \frac{1}{\pi} \{ \sec \alpha \sqrt{(1 + 2f)^2 - \cos^2 \alpha} - \operatorname{inv} \alpha - 2f \tan \alpha \} \quad (5.2)$$

$$f = \frac{x}{z}$$

图 5.4 示意了正齿轮的公法线长度测定法, 测量轮齿的外侧尺寸。

内齿轮的齿形, 因为是正齿轮的齿槽部分为轮齿, 所以, 内齿轮的公法线测定时与正齿轮相反, 在齿的内测进行测量。

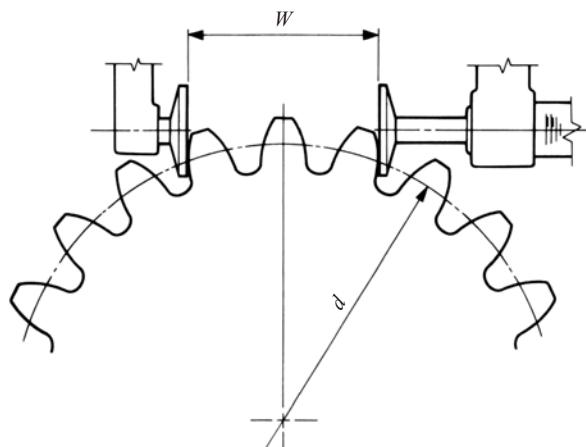


图 5.4 公法线长度法 (正齿轮)

表 5.11 齿直角方式斜齿齿轮的公法线长度

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	跨齿数	k	$k_{th} = zK(f) + 0.5$ 注 1 k 是与 k_{th} 最接近的整数。	$m_n = 3, \alpha_n = 20^\circ, z = 24$ $\beta = 25^\circ 00' 00''$ $x_n = +0.4$ $\alpha_t = 21.88023^\circ$ $k_{th} = 4.63009$ $k = 5$ $W = 42.0085$
2	公法线长度	W	$m_n \cos \alpha_n \{ \pi (k - 0.5) + z \operatorname{inv} \alpha_t \} + 2x_n m_n \sin \alpha_n$	

注 1. 其中

$$K(f, \beta) = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(1 + \frac{\sin^2 \beta}{\cos^2 \beta + \tan^2 \alpha_n} \right) \sqrt{(\cos^2 \beta + \tan^2 \alpha_n) (\sec \beta + 2f)^2 - 1} - \operatorname{inv} \alpha_t - 2f \tan \alpha_n \right\} \quad (5.3)$$

$$\text{只是 } f = \frac{x_n}{z}$$

变位正齿轮及斜齿齿轮的求跨齿数速查图登载在第 655 页。



表 5.12 轴直角方式斜齿齿轮的公法线长度

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	跨齿数	k	$k_{th} = zK(f) + 0.5$ k 是与 k_{th} 最接近的整数。	注 1 $m_t = 3, \alpha_t = 20^\circ, z = 24$ $\beta = 22^\circ 30' 00''$ $x_t = +0.4$ $\alpha_n = 18.58597^\circ$ $k_{th} = 4.31728$ $k = 4$ $W = 30.5910$
2	公法线长度	W	$m_t \cos \beta \cos \alpha_n \{ \pi (k - 0.5) + z \operatorname{inv} \alpha_t \} + 2x_t m_t \sin \alpha_n$	

注 1. 其中

$$K(f, \beta) = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(1 + \frac{\sin^2 \beta}{\cos^2 \beta + \tan^2 \alpha_n} \right) \sqrt{(\cos^2 \beta + \tan^2 \alpha_n) (\sec \beta + 2f)^2 - 1} - \operatorname{inv} \alpha_t - 2f \tan \alpha_n \right\} \quad (5.4)$$

$$f = \frac{x_t}{z \cos \beta}$$

如图 5.5 所示, 斜齿齿轮的公法线长度测定时, 需要有一定的齿宽(端面宽度)。

如果设最低齿宽为 b_{min} 的话:

$$b_{min} = W \sin \beta_b + \Delta b \quad (5.5)$$

其中 β_b 是基圆螺旋角

$$\left. \begin{aligned} \beta_b &= \tan^{-1} (\tan \beta \cos \alpha_t) \\ &= \sin^{-1} (\sin \beta \cos \alpha_n) \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

要想获得安定的测量数据, Δb 的量至少要取 3mm 左右。

标准正齿轮的公法线(压力角 20 度及 14.5 度)数据表登载在 656 ~ 659 页。

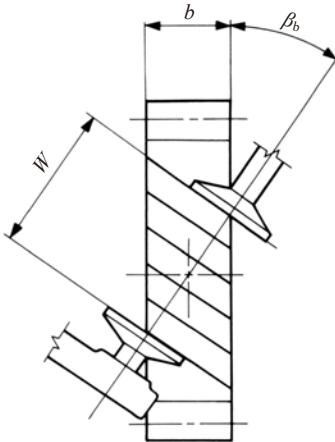


图 5.5 斜齿齿轮的齿宽

5.3 量柱(球)法

正齿轮及斜齿齿轮测定时, 如图 5.6 所示。偶数齿时, 量柱(球)放入沿直角方向相对应的两齿槽中, 奇数齿时, 将量柱(球)放入偏转 $180/z^\circ$ 角度的齿槽中, 然后测定其外侧尺寸。

内齿轮时, 测量其内侧尺寸。

测定斜齿齿轮时, 使用两个量柱(球)。

测定齿条时如图 5.8 所示, 将量柱(球)放入到齿槽中, 用卡尺测量从基准面到量柱(球)的距离, 只需使用一个量柱(球)。

测定蜗杆时, 如图 5.10 所示, 将三根量柱放入齿槽中, 测量其外侧尺寸。

这种方法称为三量柱法, 与螺丝的精密测定时使用的三针法相同。

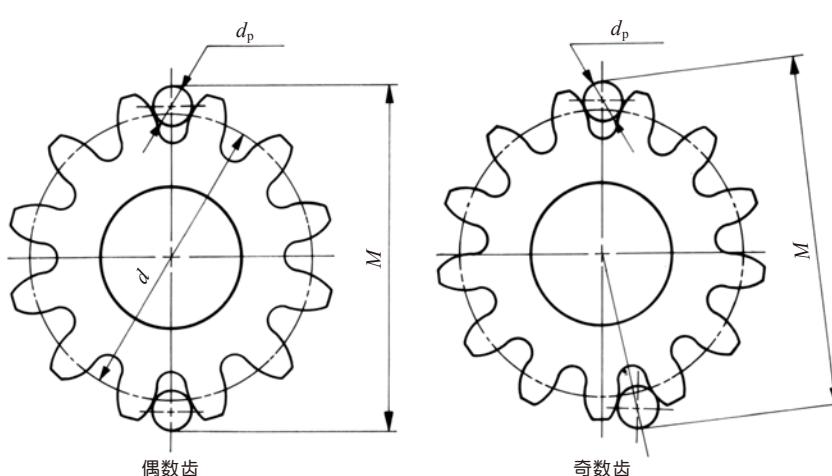


图 5.6 正齿轮的量柱(球)法



(1) 正齿轮

柱(球)法的量柱(球),标准齿轮时在啮合节圆上,变位齿轮时在 $d + 2xm$ 的圆上与齿轮相接触是最为理想的。

如图 5.7 中所示的正齿轮中,求出在理想齿面上的量柱(球)直径的方法列于表 5.13。

表 5.13 与正齿轮接触的量柱(球)直径

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	齿槽半角	η	$\left(\frac{\pi}{2z} - \operatorname{inv} \alpha\right) - \frac{2x \tan \alpha}{z}$	$m = 1$ $\alpha = 20^\circ$ $z = 20$ $x = 0$ $\eta = 0.0636354$
2	量柱(球)与齿面接触点上的压力角	α'	$\cos^{-1} \left\{ \frac{zm \cos \alpha}{(z + 2x)m} \right\}$	$\alpha' = 20^\circ$ $\phi = 0.4276057$
3	通过量柱中心的作用角	ϕ	$\tan \alpha' + \eta$	$d_p' = 1.7245$
4	量柱(球)的理想直径	d_p'	$zm \cos \alpha (\operatorname{inv} \phi + \eta)$	

注. 角度 η 、 ϕ 的单位为弧度。

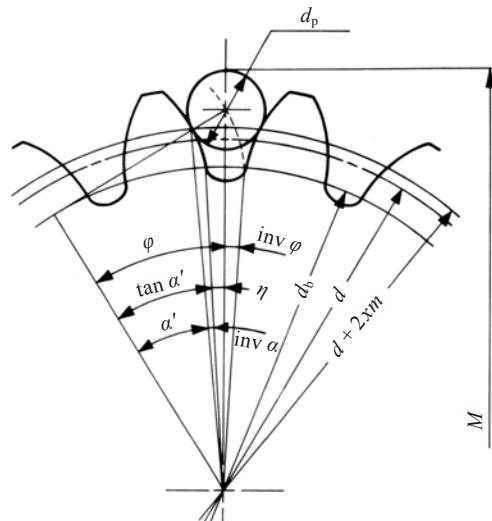


图 5.7 正齿轮的量柱跨距

表 5.14 正齿轮的量柱(球)跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	量柱(球)直径	d_p	注 1	
2	ϕ 的渐开线函数	$\operatorname{inv} \phi$	$\frac{d_p}{zm \cos \alpha} - \frac{\pi}{2z} + \operatorname{inv} \alpha + \frac{2x \tan \alpha}{z}$	$d_p = 1.7$ (设定) $\operatorname{inv} \phi = 0.0268197$
3	通过量柱中心的作用角	ϕ	由渐开线函数表中查出。	$\phi = 24.1350^\circ$
4	量柱(球)跨距	M	偶数齿 $\frac{zm \cos \alpha}{\cos \phi} + d_p$ 奇数齿 $\frac{zm \cos \alpha}{\cos \phi} \cos \frac{90^\circ}{z} + d_p$	$M = 22.2941$

注 1. 使用由表 5.13 所求出的理想量柱(球)直径或与之接近的直径。



表 5.15 为模数 $m = 1$, 分度圆压力角 $\alpha = 20^\circ$ 的正齿轮在 $d + 2xm$ 的圆上与量柱(球)相接时, 量柱(球)的计算直径值。

表 5.15 $d + 2xm$ 圆上与正齿轮相接的量柱(球)直径

$m = 1, \alpha = 20^\circ$

齿数 z	变位系数 x							
	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
10	1.6347	1.7886	1.9979	2.2687	2.6079	3.0248	3.5315	
20	1.6231	1.6599	1.7244	1.8149	1.9306	2.0718	2.2389	2.4329
30	1.6418	1.6649	1.7057	1.7632	1.8369	1.9267	2.0324	2.1542
40	1.6500	1.6669	1.6967	1.7389	1.7930	1.8589	1.9365	2.0257
50	1.6547	1.6680	1.6915	1.7247	1.7675	1.8196	1.8810	1.9515
60	1.6577	1.6687	1.6881	1.7155	1.7509	1.7940	1.8448	1.9032
70	1.6598	1.6692	1.6857	1.7090	1.7391	1.7759	1.8193	1.8691
80	1.6613	1.6695	1.6839	1.7042	1.7304	1.7625	1.8003	1.8438
90	1.6625	1.6698	1.6825	1.7005	1.7237	1.7521	1.7857	1.8242
100	1.6635	1.6700	1.6814	1.6975	1.7184	1.7439	1.7740	1.8087
110	1.6642	1.6701	1.6805	1.6951	1.7140	1.7372	1.7645	1.7960
120	1.6649	1.6703	1.6797	1.6931	1.7104	1.7316	1.7567	1.7855
130	1.6654	1.6704	1.6791	1.6914	1.7074	1.7269	1.7500	1.7766
140	1.6659	1.6705	1.6785	1.6900	1.7048	1.7229	1.7443	1.7690
150	1.6663	1.6706	1.6781	1.6887	1.7025	1.7194	1.7394	1.7625
160	1.6666	1.6706	1.6777	1.6876	1.7006	1.7164	1.7351	1.7567
170	1.6669	1.6707	1.6773	1.6867	1.6988	1.7137	1.7314	1.7517
180	1.6672	1.6707	1.6770	1.6858	1.6973	1.7114	1.7280	1.7472
190	1.6674	1.6708	1.6767	1.6851	1.6959	1.7093	1.7250	1.7432
200	1.6676	1.6708	1.6764	1.6844	1.6947	1.7074	1.7223	1.7396

(2) 齿条与斜齿齿条

在齿条上, 量柱(球)与分度圆节线上相接是最为理想的。

齿条的量柱跨距计算列于表 5.16。

斜齿齿条的情况下, 将表中的模数 m 换成法向模数 m_n , 分度圆压力角 α 换成法向压力角 α_n 后进行计算。

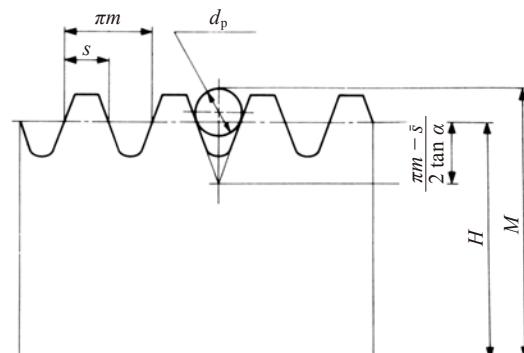


图 5.8 齿条的量柱跨距

表 5.16A 齿条的量柱(球)跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	理想量柱(球)直径	d'_p	$\frac{\pi m - \bar{s}}{\cos \alpha}$	$m = 1$ $\alpha = 20^\circ$ $s = 1.5708$ $d'_p = 1.6716$ $d_p = 1.7$ (设定) $H = 14.0000$ $M = 15.1774$
2	量柱(球)跨距	M	$H - \frac{\pi m - \bar{s}}{2 \tan \alpha} + \frac{d_p}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right)$	



表 5.16B 斜齿齿条的量柱(球)跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	理想量柱(球)直径	d'_p	$\frac{\pi m_n - s}{\cos \alpha_n}$	$m_n = 1$ $\alpha_n = 20^\circ, \beta = 15^\circ$ $s = 1.5708$ $d'_p = 1.6716$ $d_p = 1.7$ (设定) $H = 14.0000$ $M = 15.1774$
2	量柱(球)跨距	M	$H - \frac{\pi m_n - s}{2 \tan \alpha_n} + \frac{d_p}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha_n} \right)$	

(3) 内齿轮

如图 5.9 所示, 内齿轮的情况下, 也是量柱(球)在 $d + 2xm$ 的圆上于内齿轮相接是最为理想的。

表 5.17 是理想量柱(球)直径的求法计算表, 表 5.18 是内齿轮的内侧量柱跨距计算表。

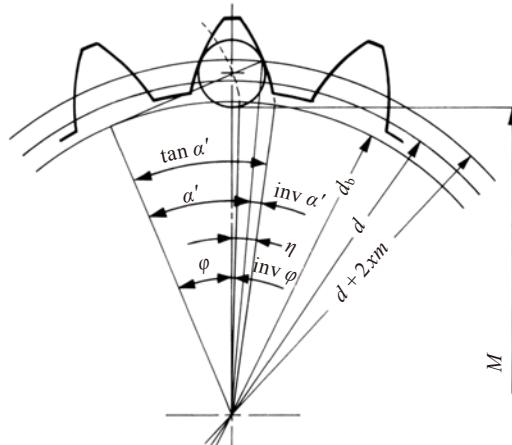


图 5.9 内齿轮的量柱(球)跨距

表 5.17 量柱(球)的直径

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	齿槽半角	η	$\left(\frac{\pi}{2z} + \operatorname{inv} \alpha \right) + \frac{2x \tan \alpha}{z}$	$m = 1$ $\alpha = 20^\circ$ $z = 40$ $x = 0$ $\eta = 0.054174$
2	量柱(球)与齿面接触点上的压力角	α'	$\cos^{-1} \left\{ \frac{zm \cos \alpha}{(z + 2x)m} \right\}$	$\alpha' = 20^\circ$ $\varphi = 0.309796$
3	通过量柱中心的压力角	φ	$\tan \alpha' - \eta$	
4	理想的量柱(球)直径	d'_p	$zm \cos \alpha (\eta - \operatorname{inv} \varphi)$	$d'_p = 1.6489$

注. 角度 η 、 φ 的单位为弧度。

表 5.18 内齿轮的量柱(球)内侧跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	量柱(球)直径	d_p	注 1	
2	φ 的渐开线函数	$\operatorname{inv} \varphi$	$\left(\frac{\pi}{2z} + \operatorname{inv} \alpha \right) - \frac{d_p}{zm \cos \alpha} + \frac{2x \tan \alpha}{z}$	$d_p = 1.7$ (设定) $\operatorname{inv} \varphi = 0.0089467$
3	通过量柱中心的作用角	φ	由渐开线函数表中查出。	$\varphi = 16.9521^\circ$
4	量柱内侧跨距	M	偶数齿 $\frac{zm \cos \alpha}{\cos \varphi} - d_p$ 奇数齿 $\frac{zm \cos \alpha}{\cos \varphi} \cos \frac{90^\circ}{z} - d_p$	$M = 37.5951$

注 1. 使用通过表 5.17 所求出的量柱(球)直径或与之接近的量柱直径。



表 5.19 为模数 $m = 1$, 分度圆压力角 $\alpha = 20^\circ$ 的内齿轮在 $d + 2xm$ 的圆上与量柱(球)相接时, 量柱(球)的计算直径值。

表 5.19 在 $d + 2xm$ 圆上与内齿轮相接的量柱直径 $m = 1, \alpha = 20^\circ$

齿数 z	变位系数 x							
	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
10	—	1.4789	1.5936	1.6758	1.7283	1.7519	1.7460	1.7092
20	1.4687	1.5604	1.6284	1.6759	1.7047	1.7154	1.7084	1.6837
30	1.5309	1.5942	1.6418	1.6751	1.6949	1.7016	1.6956	1.6771
40	1.5640	1.6123	1.6489	1.6745	1.6895	1.6944	1.6893	1.6744
50	1.5845	1.6236	1.6532	1.6740	1.6862	1.6900	1.6856	1.6732
60	1.5985	1.6312	1.6562	1.6737	1.6839	1.6870	1.6832	1.6725
70	1.6086	1.6368	1.6583	1.6734	1.6822	1.6849	1.6815	1.6721
80	1.6162	1.6410	1.6600	1.6732	1.6810	1.6833	1.6802	1.6718
90	1.6222	1.6443	1.6612	1.6731	1.6800	1.6820	1.6792	1.6717
100	1.6270	1.6470	1.6622	1.6729	1.6792	1.6810	1.6784	1.6715
110	1.6310	1.6492	1.6631	1.6728	1.6785	1.6801	1.6778	1.6715
120	1.6343	1.6510	1.6638	1.6727	1.6779	1.6794	1.6772	1.6714
130	1.6371	1.6525	1.6644	1.6727	1.6775	1.6788	1.6768	1.6714
140	1.6395	1.6539	1.6649	1.6726	1.6771	1.6783	1.6764	1.6714
150	1.6416	1.6550	1.6653	1.6725	1.6767	1.6779	1.6761	1.6713
160	1.6435	1.6561	1.6657	1.6725	1.6764	1.6775	1.6758	1.6713
170	1.6451	1.6570	1.6661	1.6724	1.6761	1.6771	1.6755	1.6713
180	1.6466	1.6578	1.6664	1.6724	1.6759	1.6768	1.6753	1.6713
190	1.6479	1.6585	1.6666	1.6723	1.6757	1.6766	1.6751	1.6713
200	1.6490	1.6591	1.6669	1.6723	1.6755	1.6763	1.6749	1.6713

(4) 斜齿齿轮

斜齿齿轮上, 在 $d + 2x_n m_n$ 圆上与齿轮相接的理想量柱(球)直径, 利用正齿轮的公式, 将式中的齿数 z 换成当量齿数 z_v , 即可得到量柱直径的计算值。

表 5.20 是齿直角方式斜齿齿轮的量球(柱)直径的计算表, 表 5.21 是量球(柱)跨距的计算表。

表 5.20 齿直角方式斜齿齿轮的量球(柱)直径

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z}{\cos^3 \beta}$	$m_n = 1$ $\alpha_n = 20^\circ$ $z = 20$ $\beta = 15^\circ 00' 00''$ $x_n = +0.4$ $z_v = 22.19211$ $\eta_v = 0.0427566$ $\alpha'_v = 24.90647^\circ$ $\varphi_v = 0.507078$ $d'_p = 1.9020$
2	齿槽半角	η_v	$\frac{\pi}{2z_v} - \operatorname{inv} \alpha_n - \frac{2x_n \tan \alpha_n}{z_v}$	
3	量球(柱)与齿面接点上的压力角	α'_v	$\cos^{-1} \left(\frac{z_v \cos \alpha_n}{z_v + 2x_n} \right)$	
4	过量球(柱)中心的压力角	φ_v	$\tan \alpha'_v + \eta_v$	
5	理想的量球(柱)的直径	d'_p	$z_v m_n \cos \alpha_n (\operatorname{inv} \varphi_v + \eta_v)$	

注: 角度 η_v 、 φ_v 的单位为弧度。



表 5.21 齿直角方式斜齿齿轮的量球(柱)跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	量球(柱)直径	d_p	注 1	
2	ϕ 的渐开线函数	$\text{inv } \varphi$	$\frac{d_p}{m_n z \cos \alpha_n} - \frac{\pi}{2z} + \text{inv } \alpha_t + \frac{2x_n \tan \alpha_n}{z}$	$d_p = 2$ (设定) $\alpha_t = 20.646896^\circ$ $\text{inv } \varphi = 0.058890$
3	通过中心的压力角	φ	由渐开线函数表中查出。	$\varphi = 30.8534^\circ$
4	量球(柱)跨距	M	偶数齿 $\frac{zm_n \cos \alpha_t}{\cos \beta \cos \varphi} + d_p$ 奇数齿 $\frac{zm_n \cos \alpha_t}{\cos \beta \cos \varphi} \cos \frac{90^\circ}{z} + d_p$	$M = 24.5696$

注 1. 使用通过表 5.20 所求出的量球(柱)直径或与之接近的量球。

表 5.22 是轴直角方式斜齿齿轮的量球(柱)直径

的计算表, 表 5.23 是量球(柱)跨距的计算表。

表 5.22 轴直角方式斜齿齿轮的量球(柱)直径

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z}{\cos^3 \beta}$	$m_t = 3$ $\alpha_t = 20^\circ$
2	齿槽半角	η_v	$\frac{\pi}{2z_v} - \text{inv } \alpha_n - \frac{2x_t \tan \alpha_t}{z_v}$	$z = 36$ $\beta = 33^\circ 33' 26.3''$ $\alpha_n = 16.87300^\circ$
3	量球(柱)与齿面接点上的压力角	α'_v	$\cos^{-1} \left(\frac{z_v \cos \alpha_n}{z_v + 2 \frac{x_t}{\cos \beta}} \right)$	$x_t = +0.2$ $z_v = 62.20800$ $\eta_v = 0.014091$ $\alpha'_v = 18.26390$
4	通过量球(柱)中心的压力角	φ_v	$\tan \alpha'_v + \eta_v$	$\varphi_v = 0.34411$ $\text{inv } \varphi_v = 0.014258$
5	理想的量球(柱)的直径	d'_p	$z_v m_t \cos \beta \cos \alpha_n (\text{inv } \varphi_v + \eta_v)$	$d'_p = 4.2190$

注. 角度 η_v 、 φ_v 的单位为弧度。

表 5.23 轴直角方式斜齿齿轮的量球(柱)跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	量球(柱)直径	d_p	注 1	
2	ϕ 的渐开线函数	$\text{inv } \varphi$	$\frac{d_p}{m_t z \cos \beta \cos \alpha_n} - \frac{\pi}{2z} + \text{inv } \alpha_t + \frac{2x_t \tan \alpha_t}{z}$	$d_p = 4.5$ $\text{inv } \varphi = 0.027564$
3	通过球心的压力角	φ	由渐开线函数表中查出。	$\varphi = 24.3453^\circ$
4	量球(柱)跨距	M	偶数齿 $\frac{zm_t \cos \alpha_t}{\cos \varphi} + d_p$ 奇数齿 $\frac{zm_t \cos \alpha_t}{\cos \varphi} \cos \frac{90^\circ}{z} + d_p$	$M = 115.892$

注 1. 使用通过表 5.22 所求出的量球(柱)直径或与之接近的量球。



(5) 蜗杆的三量柱法

做为蜗杆的齿形被广泛使用的3型齿形,虽然以工具压力角 $\alpha_0 = 20^\circ$ 做为基准,但是用此刀具切齿时,蜗杆的法向压力角 α_n 将小于 20° ,求出这个法向压力角 α_n 的AGMA(美国齿轮制造商协会)近似值的方程式如下所示。

$$\alpha_n = \alpha_0 - \frac{90}{z_1} \frac{r}{r_0 \cos^2 \gamma + r} \sin^3 \gamma \quad (5.7)$$

其中 r : 蜗杆的分度圆半径

r_0 : 刀具的半径

z_1 : 蜗杆的头数

γ : 蜗杆的分度圆柱导程角

有关3型齿形三量柱跨距的资料非常少,在这里介绍几种近似的计算方法。

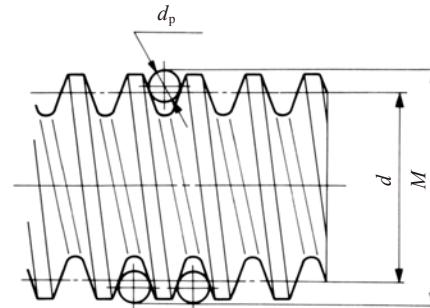


图 5.10 蜗杆的三量柱法

(a) 将蜗杆看成与齿条相同的直线齿形进行计算

如果将蜗杆的齿形近似地看成直线齿形的话,可以与齿条同样利用表5.24的方法进行计算。

表 5.24 蜗杆的三量柱跨距的计算 (a)- 1

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	理想的量柱(球)直径	d'_p	$\frac{\pi m_x}{2 \cos \alpha_x}$	$m_x = 2$ $z_1 = 1$ $\gamma = 3.691386^\circ$ $\alpha_x = 20.03827^\circ$ $d'_p = 3.3440$ $d_p = 3.3$ $M = 35.3173$ $\alpha_n = 20^\circ$ $d_1 = 31$
2	三量柱跨距	M	$d_1 - \frac{\pi m_x}{2 \tan \alpha_x} + d_p \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha_x} \right)$	

但是,这种方法中,因为蜗杆的导程角很小,所以没有加以考虑其影响。导程角变大时,误差也将随之增加。

考虑导程角影响的计算方法列于表5.25。

表 5.25 蜗杆的三量柱跨距的计算 (a)- 2

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	理想的量柱(球)直径	d'_p	$\frac{\pi m_n}{2 \cos \alpha_n}$	$m_x = 2$ $z_1 = 1$ $\gamma = 3.691386^\circ$ $m_n = 1.99585$ $d'_p = 3.3363$ $d_p = 3.3$ $M = 35.3344$ $\alpha_n = 20^\circ$ $d_1 = 31$
2	三量柱跨距	M	$d_1 - \frac{\pi m_n}{2 \tan \alpha_n} + d_p \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha_n} \right) - \frac{(d_p \cos \alpha_n \sin \gamma)^2}{2 d_1}$	



(b) 斜齿齿轮的计算公式近似代用的方法

这种方法是将斜齿齿轮的量柱(球)跨距计算公式做为蜗杆的三量柱跨距计算的代用公式进行跨距计算。

3型的蜗杆齿形因为不是渐开线齿形,所以,这种方法只能是一种近似的代用法,但在实际应用中完全可以满足要求。

表5.26, 5.27是轴向模数方式蜗杆的计算表,表5.28, 5.29是法向模数方式蜗杆的计算表。

表5.26 轴向模数方式蜗杆的量柱(球)直径

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z_1}{\cos^3(90^\circ - \gamma)}$	$m_x = 2$ $\alpha_n = 20^\circ$ $z_1 = 1$ $d_1 = 31$ $\gamma = 3.691386^\circ$ $z_v = 3747.1491$ $\eta_v = -0.014485$ $\alpha'_v = 20^\circ$ $\varphi_v = 0.349485$ $\text{inv } \varphi_v = 0.014960$ $d'_p = 3.3382$
2	齿槽半角	η_v	$\frac{\pi}{2z_v} - \text{inv } \alpha_n$	
3	量柱与齿面相接点上的压力角	α'_v	$\cos^{-1}\left(\frac{z_v \cos \alpha_n}{z_v}\right)$	
4	通过中心的压力角	φ_v	$\tan \alpha'_v + \eta_v$	
5	理想的量柱直径(球)	d'_p	$z_v m_x \cos \gamma \cos \alpha_n (\text{inv } \varphi_v + \eta_v)$	

注. 角度 η_v 、 φ_v 的单位为弧度。

表5.27 轴向模数方式蜗杆的三量柱跨距

序号	计算项目	代号	计算方程式	计算例
1	量柱(球)直径	d_p	注1	$d_p = 3.3$
2	φ 的渐开线函数	$\text{inv } \varphi$	$\frac{d_p}{m_x z_1 \cos \gamma \cos \alpha_n} - \frac{\pi}{2z_1} + \text{inv } \alpha_t$	$\alpha_t = 76.96878^\circ$ $\text{inv } \alpha_t = 4.257549$ $\text{inv } \varphi = 4.446297$ $\varphi = 80.2959^\circ$ $M = 35.3345$
3	通过球心的压力角	φ	由渐开线函数表中查出。	
4	三量柱跨距	M	$\frac{z_1 m_x \cos \alpha_t}{\tan \gamma \cos \varphi} + d_p$	

注1. 使用通过表5.26所求出的量球(柱)直径或与之接近的量柱。

注2. 其中 $\alpha_t = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \alpha_n}{\sin \gamma}\right)$



下面介绍法向(齿直角)模数方式蜗杆的计算方法。

基本上说,不论是轴向模数还是法向模数方式,完全可以使用同样的公式进行计算。为了使用做为基准的模数,将计算公式做了变形。

表 5.28 法向模数方式蜗杆量柱(球)的直径

序号	计算项目	记号	计算式	计算例
1	当量齿轮齿数	z_v	$\frac{z_1}{\cos^3(90^\circ - \gamma)}$	$m_n = 2.5$ $\alpha_n = 20^\circ$ $z_1 = 1$ $d_1 = 37$ $\gamma = 3.874288^\circ$ $z_v = 3241.792$ $\eta_v = -0.014420$
2	齿槽半角	η_v	$\frac{\pi}{2z_v} - \operatorname{inv} \alpha_n$	$\alpha'_v = 20^\circ$ $\varphi_v = 0.349550$ $\operatorname{inv} \varphi_v = 0.0149687$
3	量球(柱)与齿面接点上的压力角	α'_v	$\cos^{-1} \left(\frac{z_v \cos \alpha_n}{z_v} \right)$	$d'_p = 4.1785$
4	通过量球(柱)中心的压力角	φ_v	$\tan \alpha'_v + \eta_v$	
5	理想的量球(柱)的直径	d'_p	$z_v m_n \cos \alpha_n (\operatorname{inv} \varphi_v + \eta_v)$	

注: 角度 η_v 、 φ_v 的单位为弧度。

表 5.29 法向模数方式蜗杆的三量柱跨距

序号	计算项目	记号	计算式	计算例
1	量柱(球)直径	d_p	注 1	$d_p = 4.2$ $\alpha_t = 79.48331^\circ$ $\operatorname{inv} \alpha_t = 3.999514$ $\operatorname{inv} \varphi = 4.216536$ $\varphi = 79.8947^\circ$ $M = 42.6897$
2	φ 的渐开线函数	$\operatorname{inv} \varphi$	$\frac{d_p}{m_n z_1 \cos \alpha_n} - \frac{\pi}{2z_1} + \operatorname{inv} \alpha_t$	
3	通过球心的压力角	φ	由渐开线函数表中查出。	
4	三量柱跨距	M	$\frac{z_1 m_n \cos \alpha_t}{\sin \gamma \cos \varphi} + d_p$	

注 1. 使用通过表 5.28 所求出的量球(柱)直径或与之接近的量柱。

注 2. 其中 $\alpha_t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\sin \gamma} \right)$



6 齿轮的侧隙

一对齿轮要想达到圆滑流畅的旋转传动,需要有侧隙。侧隙是指一对齿轮啮合时,齿面间的间隙,根据测定方向,分类如下。

6.1 各种齿轮的侧隙

(1) 圆周方向侧隙 (j_t)

在齿轮副中,固定其中一个齿轮,另一个齿轮所能转过的节圆弧长称为圆周侧隙。

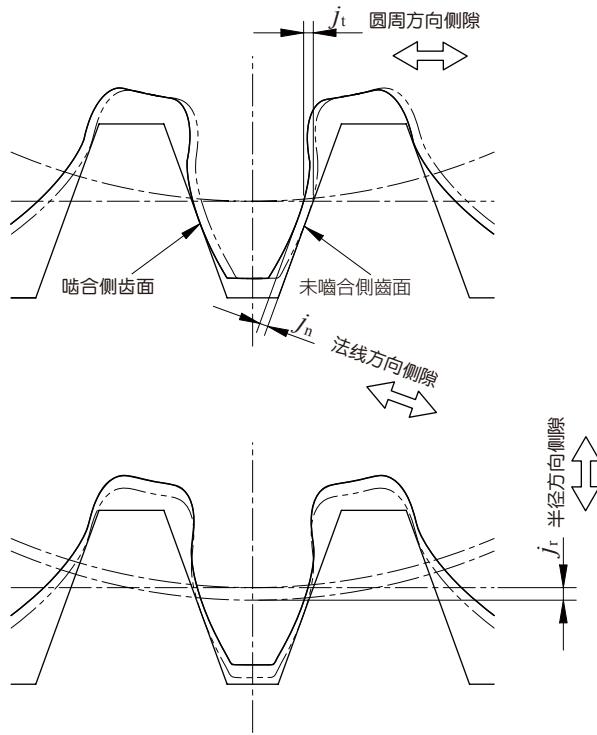


图 6.1 圆周方向 / 法线方向及半径方向的侧隙

(3) 旋转角度侧隙 (j_θ)

齿轮副在标准中心距下固定时,其中的一个齿轮所能转动的最大角度。

(4) 半径方向侧隙 (j_r)

啮合侧齿面与非啮合侧齿面同时接触时的中心距与所定中心距之差,称为径向侧隙。

(5) 轴向侧隙 (j_x)

锥齿轮的啮合齿面与非啮合齿面同时接触时的装配距离与所定装配距离之间的差,称为轴向侧隙。

6.2 各种齿轮的侧隙关系式

表 6.1 中,列出了各种齿轮的侧隙关系式。圆锥形齿轮(锥齿轮)の場合,作为径向侧隙的替代,需要讨论轴向侧隙。

表 6.1 各种侧隙间关系式

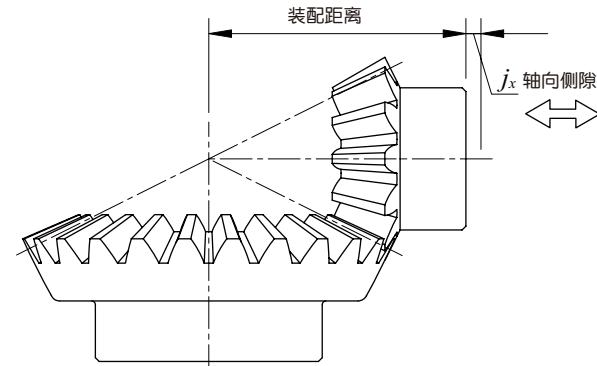


图 6.2 锥齿轮的轴向侧隙

齿轮副	齿轮的种类	圆周方向齿隙 j_t	法线法线齿隙 j_n	旋转方向齿隙 j_θ	半径方向齿隙 j_r	轴向齿隙 j_x
平行轴	正齿轮	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \beta}$	$j_t \cos \alpha_n \cos \beta$	$\frac{360^\circ j_t}{\pi d}$	$\frac{j_n}{2 \sin \alpha_n}$	
	斜齿齿轮	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \beta_m}$	$j_t \cos \alpha_n \cos \beta_m$		$\frac{j_n}{2 \sin \alpha_n \sin \delta}$	
交错轴	交错轴斜齿轮	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \beta}$	$j_t \cos \alpha_n \cos \beta$	$\frac{360^\circ j_t}{\pi d}$	$\frac{j_n}{2 \sin \alpha_n}$	
	蜗杆	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \sin \gamma}$	$j_t \cos \alpha_n \sin \gamma$			
	蜗轮	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \gamma}$	$j_t \cos \alpha_n \cos \gamma$			



(1) 平行轴齿轮副的侧隙换算例

表 6.2 是正齿轮及斜齿齿轮副的侧隙的计算例。增减中心距离 (径向齿隙), 可以调节齿轮副的齿隙。

表 6.2 正齿轮及斜齿齿轮副

No.	计算项目	代号	计算公式	正齿轮		斜齿齿轮 (轴直角)	
1	端面模数	m_t	设定值	2		2	
2	法向压力角	α_n		20°		18°43'	
3	端面压力角	α_t		20°		20°	
4	齿数	z		20	40	20	40
5	螺旋角	β		0		21°30'	
7	法向侧隙	j_n		0.150		0.150	
6	分度圆直径	d		zm_t	40	80	40
8	圆周侧隙	j_t	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \beta}$	0.160		0.170	
9	旋转角侧隙 (°)	j_θ	$\frac{360^\circ j_t}{\pi d}$	0.457°	0.229°	0.488°	0.244°
10	径向侧隙	j_r	$\frac{j_n}{2\sin \alpha_n}$	0.219		0.234	

(2) 相交轴齿轮副的侧隙换算例

表 6.3 是锥齿轮的侧隙的计算例。

锥齿轮的侧隙调整, 最为一般的是使用垫片调整装配距离 (轴向侧隙)。调整装配距离时, 需要特别注意调整大小两齿轮的平衡, 保持两齿轮轮齿接触的正常。

表 6.3 锥齿轮副

No.	计算项目	代号	计算公式	直齿锥齿轮		弧齿锥齿轮	
				小齿轮	大齿轮	小齿轮	大齿轮
1	轴交角	Σ	设定值	90°		90°	
2	模数	m		2		2	
3	法向压力角	α_n		20°		20°	
4	齿数	z		20	20	20	40
5	中央螺旋角	β_m		0		35°	
6	法向侧隙	j_n		0.150		0.150	
7	分度圆直径	d		zm	40	40	40
8	分锥角	$\delta_1 \cdot \delta_2$	$\tan^{-1} \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \Sigma - \delta_1$	45°	45°	26°34'	63°26'
9	圆周侧隙	j_t	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \beta_m}$	0.160		0.195	
10	螺旋角侧隙 (°)	j_θ	$\frac{360^\circ j_t}{\pi d}$	0.457°	0.457°	0.558°	0.279°
11	轴向侧隙	j_x	$\frac{j_n}{2\sin \alpha_n \sin \delta}$	0.310	0.310	0.490	0.245

(3) 交错轴齿轮副的侧隙换算例

表 6.4 是蜗杆蜗轮副侧隙的计算例。

蜗杆蜗轮副的特点是, 驱动齿轮和被动齿轮的 (蜗杆与蜗轮) 的圆周侧隙不同。

表 6.4 蜗杆蜗轮副

No.	计算项目	代号	计算公式	蜗轮副	
				蜗杆	蜗轮
1	轴交角	Σ	设定值	90°	
2	轴向 / 端面模数	$m_x \cdot m_t$		2	
3	法向压力角	α_n		20°	
4	齿数	z		1	20
6	分度圆直径 (蜗杆)	d_1		31	—
5	法向侧隙	j_n		0.150	
7	分度圆直径 (蜗轮)	d_2		—	40
8	导程角	γ	$\tan^{-1} \left(\frac{m_x z_1}{d_1} \right)$	3°41'	
9	圆周侧隙	j_{t1}	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \sin \gamma}$	2.480	—
		j_{t2}	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \gamma}$	—	0.160
10	螺旋角侧隙 (°)	j_θ	$\frac{360^\circ j_t}{\pi d}$	9.165°	0.458°
11	径向侧隙	j_r	$\frac{j_n}{2\sin \alpha_n}$	0.219	

表 6.5 是交错轴斜齿齿轮的侧隙的计算例。

表 6.5 交错轴斜齿齿轮

No.	计算项目	代号	计算公式	交错轴斜齿轮	
				小齿轮	大齿轮
1	轴交角	Σ	设定值	90°	
2	法向模数	m_n		2	
3	法向压力角	α_n		20°	
4	齿数	z		10	20
5	螺旋角	β		45°	45°
7	法向侧隙	j_n		0.150	
6	分度圆直径	d	$\frac{zm_n}{\cos \beta}$	28.284	56.569
8	圆周侧隙	j_t	$\frac{j_n}{\cos \alpha_n \cos \beta}$	0.226	0.226
9	螺旋角侧隙 (°)	j_θ	$\frac{360^\circ j_t}{\pi d}$	0.915°	0.457°
10	径向侧隙	j_r	$\frac{j_n}{2\sin \alpha_n}$	0.219	



6.3 齿厚与侧隙

使齿轮产生侧隙的方法有两种,一是将齿厚减薄,二是增大中心距。一般的说,前者较为常用。在这里,将介绍齿厚减薄的方法。

前面已经介绍了齿轮的齿厚计算方法,所计算的齿厚值为齿轮的基础齿厚。在一对相互啮合的正齿轮中,将小齿轮的圆弧齿厚 s_1 减薄 Δs_1 ,大齿轮的齿厚 s_2 减薄 Δs_2 时,圆周方向侧隙为 $\Delta s_1 + \Delta s_2$ 。设齿厚的减少量 Δs_1 、 Δs_2 分别为 0.1, 压力角 $\alpha = 20^\circ$ 时,圆周侧隙 j_t 为:

$$\begin{aligned} j_t &= \Delta s_1 + \Delta s_2 \\ &= 0.1 + 0.1 = 0.2 \end{aligned}$$

将其换算成法向侧隙 j_n ,则:

$$\begin{aligned} j_n &= j_t \cos \alpha \\ &= 0.2 \times \cos 20^\circ = 0.1879 \end{aligned}$$

换算成半径方向侧隙 j_r ,则:

$$\begin{aligned} j_r &= \frac{j_t}{2 \tan \alpha} \\ &= \frac{0.2}{2 \times \tan 20^\circ} = 0.2747 \end{aligned}$$

实际上需要减少圆弧齿厚,增加侧隙时,应该参考 JIS 的侧隙标准进行。

JIS 的侧隙规格包括 JIS B 1703 - 1976 (已废止) 正齿轮及斜齿齿轮的侧隙和 JIS B 1705 - 1973 锥齿轮侧隙。这些标准中,都规定了在端平面上的圆周侧隙 j_t 的数值。标准中的数值是一般情况下的标准侧隙值。据使用目的,亦可采用规格外的侧隙。

在图纸上注明齿厚值时,除记入齿厚外,还应该记入齿厚的容许尺寸公差及侧隙。

例如:

齿厚 3.141^{-0.050}_{-0.100}

侧隙 0.100 ~ 0.200

因为齿厚的容许公差决定侧隙,所以非常重要。

6.4 齿轮系与侧隙

在单级齿轮机构中的侧隙已经在各种齿轮的侧隙中做以介绍。在此,来考虑二级齿轮机构的侧隙。

如图 6.3 所示的二级齿轮机构中,设 j_{t1} 为第一级的圆周侧隙, j_{t4} 为第二级的圆周侧隙。

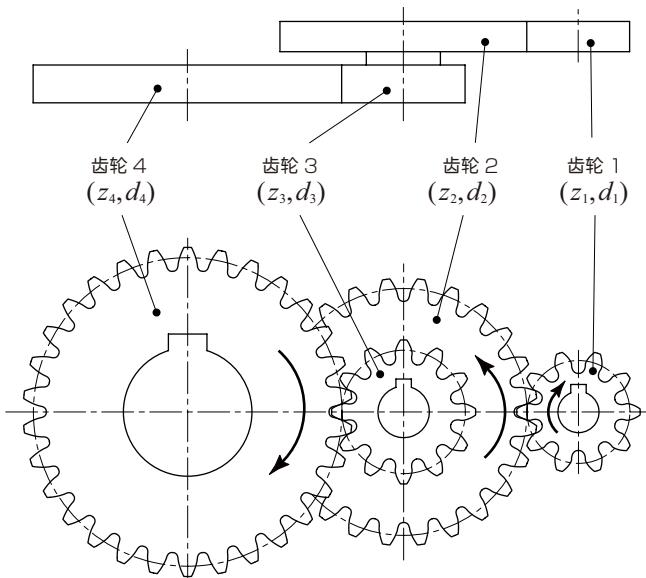


图 6.3 二级齿轮机构的侧隙

在此将第一级的小齿轮 1 固定,第二级的大齿轮 4 的总圆周侧隙 j_{t14} 为:

$$j_{t14} = j_{t1} \frac{d_3}{d_2} + j_{t4} \quad (6.1)$$

换算成旋转角侧隙则为:

$$j_\theta = j_{t14} \frac{360}{\pi d_4} \text{ (度)} \quad (6.2)$$

当固定大齿轮 4 时,第一级的小齿轮 1 的总圆周侧隙 j_{t11} 为:

$$j_{t11} = j_{t1} \frac{d_2}{d_3} + j_{t4} \quad (6.3)$$

换算成旋转角侧隙则为:

$$j_\theta = j_{t11} \frac{360}{\pi d_1} \text{ (度)} \quad (6.4)$$



6.5 减小侧隙的方法

(无侧隙齿轮)

在高精度定位的齿轮装置中, 小侧隙或无侧隙齿轮是提高精度的重要性能。最近, 这种需求比以前更有增加。这里介绍几种减小各种齿轮侧隙及实现零侧隙的方法。

(1) 小齿厚减少量齿轮(一般方法)

在制作齿轮时控制齿厚减少量小于标准齿轮, 然后在正常的中心距或装配距离下啮合, 可以得到比较小的侧隙。

使用这个方法虽然不能得到零侧隙, 但是, 可以适用于所有类型的齿轮, 是最为简单的方法。如果注意选用径向跳动小的齿轮, 侧隙的变动也可以很小。

侧隙为零的齿轮有发生不能圆滑运转的可能性, 需要多加注意。

(2) 侧隙可调小的齿轮

侧隙可调至很小的齿轮或使用此类结构的方法。不为零侧隙。

(a) 调整中心距方式

这种方法可以适用于正齿轮、斜齿轮、交错轴斜齿轮及蜗杆蜗轮。

通过减小齿轮的中心距, 达到调整径向侧隙的目的, 使齿轮侧隙变小。

可以调整中心距的构造比较复杂。

(b) 调整装配距离方式

通过减小锥齿轮的装配距离, 达到调整轴向侧隙的目的, 使锥齿轮侧隙变小。

锥齿轮的场合, 如果过大调整一个齿轮的装配距离, 会对齿轮的齿接触产生不良影响。

在锥齿轮副中, 同时调整两方齿轮的装配距离以保持轮齿接触的正常非常重要。

使用垫片调整装配距离是最为一般的方法。

(c) 两个重迭齿轮移动调整方法

几乎所有的齿轮都可以适用的方法。

将两个重迭齿轮相互的轮齿相位关系调整固定, 使侧隙减小。原理示意在图 6.4 中。

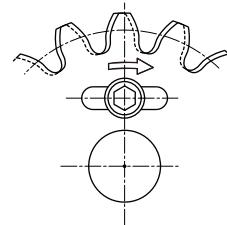


图 6.4 两个重迭齿轮的调节(固定式)

斜齿齿轮及蜗杆蜗轮中, 还有将其中的一个齿轮①沿轴向移动, 然后调整相互的轮齿相位的方法。原理示意在图 6.5 中。

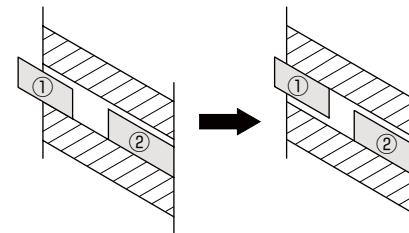


图 6.5 斜齿齿轮的侧隙调整

(d) 锥形齿轮(正齿轮及锥形齿条)

锥形齿轮, 亦被称为 CONICAL GEAR。

因为锥形齿轮的轮齿是连续变位的圆锥状齿轮, 所以齿形和齿厚连续变化。

锥形正齿轮的齿形示意于图 6.6。

锥形齿轮沿轴向移动的话, 相啮轮齿的齿厚发生变化, 达到调整侧隙的目的。使用垫片调整锥形齿轮沿轴向移动是即简单又确实的方法。

锥形齿轮的长处是即使沿轴向移动也不会改变轮齿的接触。

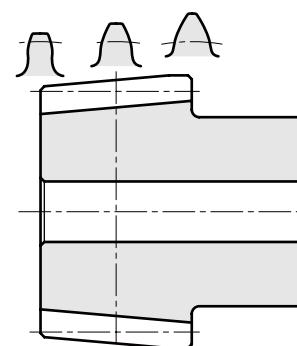


图 6.6 锥形正齿轮的齿形



(e) 双导程蜗杆副

双导程蜗杆蜗轮是左右齿面的模数变化的齿轮。蜗杆的左右齿面的齿距不同,所以齿厚连续变化。蜗杆沿轴向移动时,啮合部的齿厚不断变化,侧隙得以调整。

轴向的调整可以有各种各样的方法,与其他齿轮相同,所以垫片调整是最为简便、确实的方法。

为了保证啮合齿面的油膜不被切断,需要保持适当的侧隙。零侧隙状态的使用不被推荐。

图 6.7 示意了双导程蜗杆副的原理。(详细解说登载在第 418 页。请参考。)

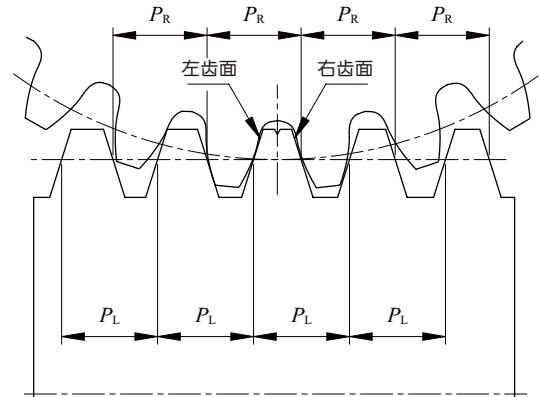


图 6.7 双导程蜗杆副原理图

(3) 侧隙可以调整为零的齿轮

利用外力强行去除齿轮侧隙的构造。

因为齿轮为两齿面啮合,所以需要特别注意齿面的润滑状况,避免发生齿面无润滑现象。

这种方法,不适合使用在蜗杆蜗轮及交错轴斜齿轮等传动时齿面的滑动大的齿轮。

齿面滑动大的齿轮在没有油膜的状态下传动时,会造成齿面的急速磨损。

圆周侧隙为零的剪形夹齿轮

将分为两半的齿轮利用弹簧等的外力与另一个齿轮的轮齿夹紧,以去除轮齿间侧隙。

图 6.8 示意了其构造图。

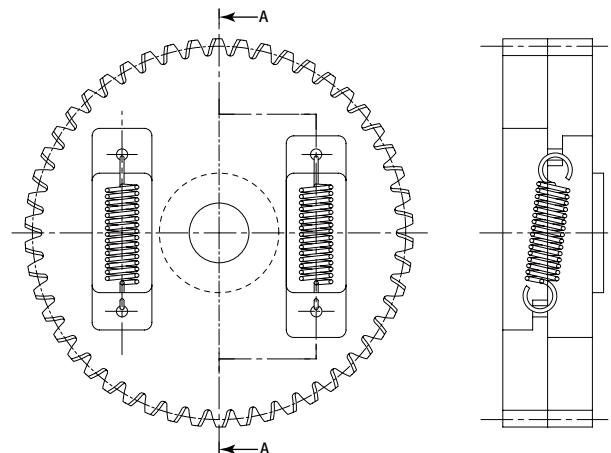


图 6.8 剪形夹齿轮 (盘簧使用例)



7 齿轮的精度

齿轮是传达动力和旋转的机械要素。对于齿轮的性能要求主要有：

- ① 更大的动力传达能力
- ② 尽可能使用体积小的齿轮
- ③ 低噪音
- ④ 正确性

要想满足如上所述的要求，提高齿轮的精度将成为必须解决的课题。本章中，将就「齿轮的精度」问题做以说明。

7.1 正齿轮与斜齿齿轮的精度

正齿轮与斜齿齿轮的精度，在以下的标准中做有明确的规定。这里，按照标准的顺序加以说明。

JJIS B 1702-1:1998 圆柱齿轮—精度等级 第1部：齿轮的齿面误差及容许值

此标准中规定的精度等级分为13级。0等级为最高精度，12等级为最低精度。

JIS B 1702-2:1998 圆柱齿轮—精度等级 第2部：径向综合偏差及径向跳动的定义和精度容许值

此标准中规定的精度由最高精度4级，最低精度12级的9个精度等级所构成。

在旧标准JIS B1702:1976中，精度等级被分为0~8级的9个等级，新标准与此有很大的不同。在本社的产品中，为了避免新、旧标准的混乱，在按1998年版新标准表示精度等级时，精度级别数字的前面加注N，以示区别。

(1) 单齿距偏差 (f_{pt})

单齿距偏差是端平面上，接近齿高中心部分的一个与齿轮轴线同心的圆上，实际侧隙与理论侧隙的代数差。

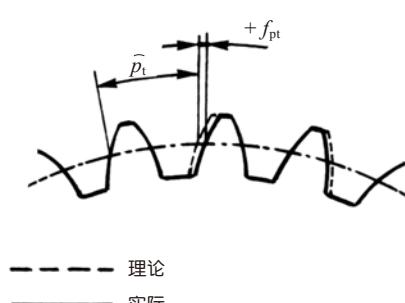


图 7.1 单齿距偏差 f_{pt}

(2) 齿距累积偏差 (F_p)

齿轮的同侧齿面在任意弧段内的最大齿距累积偏差。它表现为齿距累积偏差曲线的总幅值。

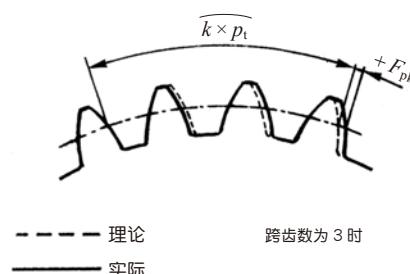


图 7.2 齿距偏差

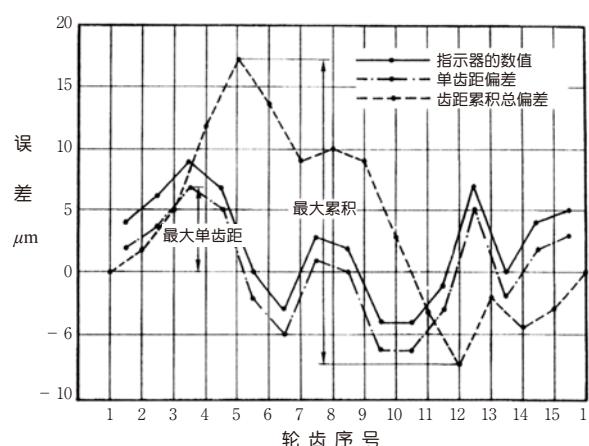


图 7.3 齿距偏差的例子

(3) 齿形总偏差 (F_a)

齿形总偏差是在预定的齿形检查范围内，包容实际齿形的两条设计齿形线间的距离。

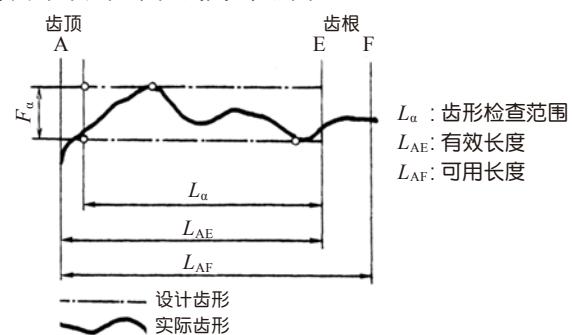


图 7.4 齿形总偏差 F_a



(4) 齿线总偏差 (F_β)

齿线总偏差是在预定的齿形检查范围内, 包容实际齿线的两条设计齿线间的距离。

齿线总偏差对齿面接触产生影响。偏差过大将使齿接触集中于轮齿宽度端部, 造成齿接触不良。为了避免产生这种齿接触, 对齿面施行鼓型加工或齿端修薄等齿线方向的修整。

图 7.6 是利用 ZEISS UMC550 测定齿形及齿线偏差的例子。

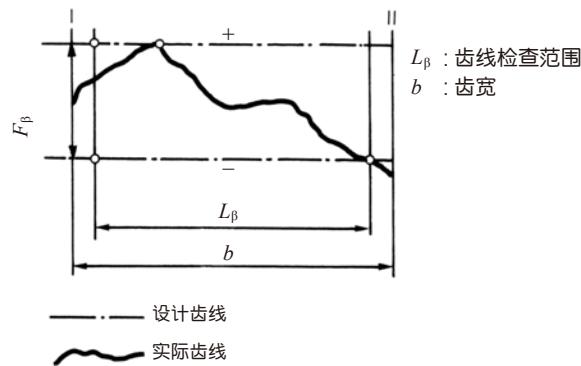


图 7.5 齿线总偏差 F_β

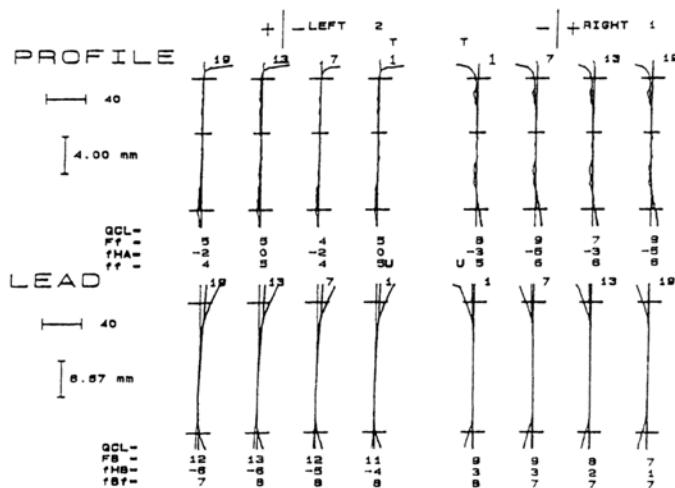


图 7.6 齿形偏差及齿线方向偏差的测定例

(5) 两齿面总啮合偏差 (F_i'')

两齿面总啮合偏差是被测齿轮的左右齿面同时与测量齿轮接触, 被测齿轮旋转一周时, 中心距的最大值与最小值的差。

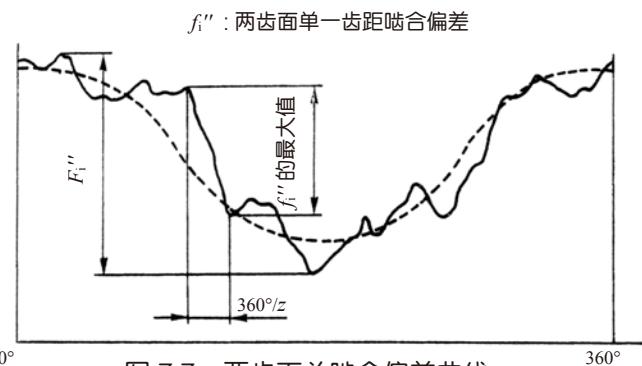


图 7.7 两齿面总啮合偏差曲线

(6) 径向跳动 (F_r)

径向跳动的数值, 是将测头(球, 圆柱等)按顺序逐一地插入齿槽中, 测定测头径向位置的最大值与最小值之差。

径向跳动对齿轮的噪音等产生不良影响。齿轮加工或磨削时, 工件夹具的摆动对此有很大的影响。最近, 因为机械设备的精度逐渐提高, 要想减小径向跳动, 使用高质量的夹具机械齿轮的加工成为必要的选择。图 7.8 示意了径向跳动线, 在径向跳动中, 还包括偏心。

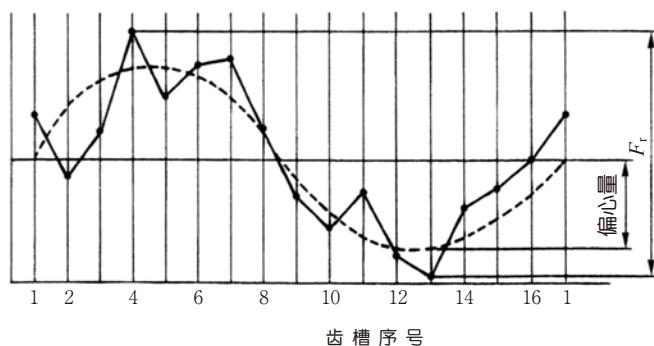


图 7.8 齿轮(齿数为 16)的径向跳动

各误差的容许值标准的拔萃、登载在第 620 ~ 625 页。



7.2 锥齿轮的精度

锥齿轮的精度，在 JIS B 1704:1978 标准中有明确的规定。在这里，我们按照标准的顺序加以说明。

齿轮的精度等级由 0~8 分为 9 个等级。

齿轮的容许偏差，规定了以下四个项目：

- (1) 单齿距偏差
- (2) 相邻齿距偏差
- (3) 齿距累积偏差
- (4) 径向跳动

以上容许偏差的定义，基本上与正齿轮及斜齿齿轮的精度中的定义相同。

① 单齿距偏差

在中点分度圆上，相邻两齿的实际齿距与公称齿距之差。

② 相邻齿距偏差

在中点分度圆上的两相邻齿距差的绝对值。

③ 齿距累积偏差

在中点分度圆上任意两齿之间实际的齿距之和与公称齿距之和的差。

④ 径向跳动

测头在齿槽内与齿面中点度圆附近双面接触时，沿分锥法向的最大变动量。

表 7.1 列出了单齿距，累积，径向跳动容许值的计算公式。

表 7.1 单齿距，累积齿距偏差，径向跳动容许值的计算公式 (μm)

等级	单齿距偏差	齿距累积偏差	径向跳动
JIS 0	$0.4W + 2.65$	$1.6W + 10.6$	$2.36\sqrt{d}$
1	$0.63W + 5.0$	$2.5W + 20.0$	$3.6\sqrt{d}$
2	$1.0W + 9.5$	$4.0W + 38.0$	$5.3\sqrt{d}$
3	$1.6W + 18.0$	$6.4W + 72.0$	$8.0\sqrt{d}$
4	$2.5W + 33.5$	$10.0W + 134.0$	$12.0\sqrt{d}$
5	$4.0W + 63.0$	—	$18.0\sqrt{d}$
6	$6.3W + 118.0$	—	$27.0\sqrt{d}$
7	—	—	$60.0\sqrt{d}$
8	—	—	$130.0\sqrt{d}$

其中 W ：公差单位

$$W = \sqrt[3]{d} + 0.65m \quad (\mu m)$$

d ：分度圆直径 (mm)

标准中规定，相邻齿距误差是单齿距误差的 k 倍。

表 7.2 为 k 值表。 k 值大小随单齿距误差的容许值大小而变化。

表 7.2 k 值

单齿距偏差 (μm)	相邻齿距偏差 k
70 以下	1.3
70~100	1.4
100~150	1.5
超过 150	1.6

齿轮的容许偏差以外，锥齿轮轮坏的尺寸及角度公差，跳动公差等，分以下八个项目作了规定，在这里不再做详细的说明。

- ① 齿轮坯外径及轮冠距的公差
- ② 齿轮轮坯顶锥角的公差
- ③ 齿轮轮坯圆锥母线跳动公差
- ④ 齿轮轮坯基准端面跳动公差
- ⑤ 齿轮轮坯基准端面的翘曲测定用间隙片的尺寸
- ⑥ 齿轮轮坯轴跳动公差
- ⑦ 齿轮轮坯内孔径尺寸公差
- ⑧ 齿接触

其中最重要的是第 8 项的齿接触。

因为齿轮的其他精度再高，齿接触不良的锥齿轮，不可能充分地发挥其性能。

各误差的容许值标准的拔萃、登载在第 626 ~ 627 页。



8 齿轮的安装精度

即使齿轮的精度很高,但如果安装精度有问题的话,也会引起齿轮的轮齿接触不良、噪音、磨耗、损伤等问题的发生。

8.1 中心距精度

中心距误差对齿轮副的侧隙产生影响。中心距越大,齿轮副的侧隙也越大,啮合变浅,工作齿高变小,重合率低下。反之中心距小则侧隙变小。侧隙过小可能造成齿轮无法旋转。

表 8.1 是正齿轮及斜齿齿轮的中心距容许差,摘自 JGMA1101-01(2000)。

此表中给出的容许差数值,适用于钢制渐开线正齿轮及斜齿轮。

表 8.1 齿轮副的中心距容许公差 $\pm f_a$ 单位 μm

中心距 (mm)		齿轮的精度等级			
超过	以下	N3,N4	N5,N6	N7,N8	N9,N10
5	20	6	10	16	26
20	50	8	12	20	31
50	125	12	20	32	50
125	280	16	26	40	65
280	560	22	35	55	88

8.2 轴平行精度

平行轴间的精度由平行误差和交错误差所构成。这些误差主要影响齿线方向的齿接触,有在齿宽端部发生不良轮齿接触的危险。随误差增大,可能造成侧隙变小、产生噪音、轮齿损伤等不良结果。

表 8.2/8.3 是正齿轮及斜齿齿轮的轴平行误差及交错误差的容许值。摘自 JGMA1102-01(2000)。

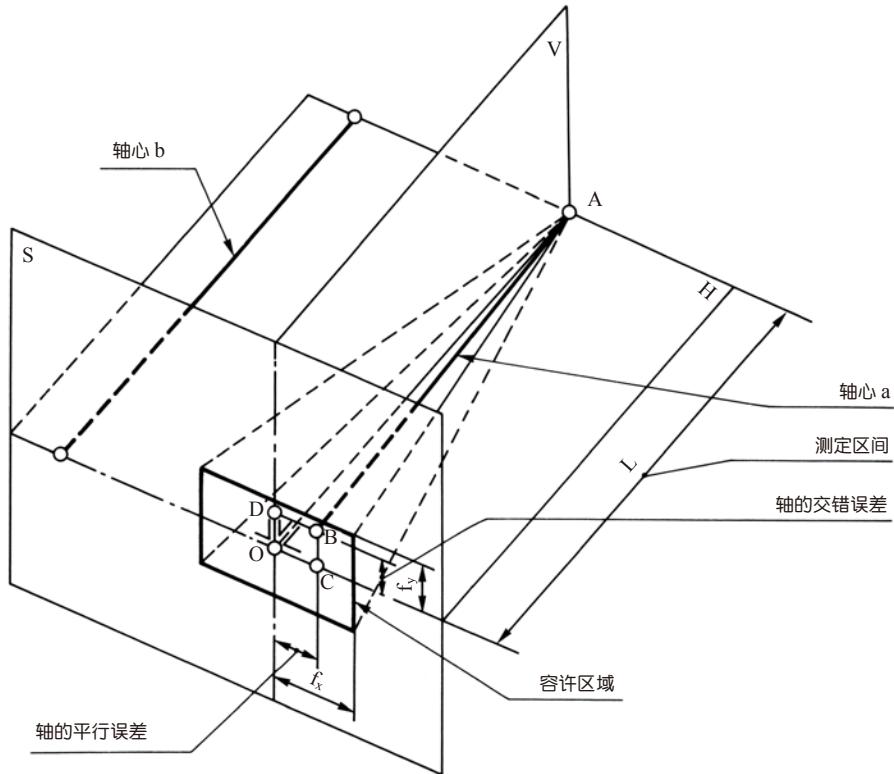


图 8.1 轴平行误差与交错误差

表 8.2 相对齿宽的轴平行误差的容许值 f_x' 单位 μm

分度圆直径 d (mm)	齿 宽 b (mm)	精度等级					
		N5	N6	N7	N8	N9	N10
5 $\leq d \leq 20$	4 $\leq b \leq$ 10	6.0	8.5	12	17	24	35
	10 $< b \leq$ 20	7.0	9.5	14	19	28	39
20 $< d \leq 50$	4 $\leq b \leq$ 10	6.5	9.0	13	18	25	36
	10 $< b \leq$ 20	7.0	10	14	20	29	40
	20 $< b \leq$ 40	8.0	11	16	23	32	46
	40 $< b \leq$ 80	9.5	13	19	27	38	54
50 $< d \leq 125$	4 $\leq b \leq$ 10	6.5	9.5	13	19	27	38
	10 $< b \leq$ 20	7.5	11	15	21	30	42
	20 $< b \leq$ 40	8.5	12	17	24	34	48
	40 $< b \leq$ 80	10	14	20	28	39	56
125 $< d \leq 280$	4 $\leq b \leq$ 10	7.0	10	14	20	29	40
	10 $< b \leq$ 20	8.0	11	16	22	32	45
	20 $< b \leq$ 40	9.0	13	18	25	36	50
	40 $< b \leq$ 80	10	15	21	29	41	58
	80 $< b \leq$ 160	12	17	25	35	49	69
280 $< d \leq 560$	10 $< b \leq$ 20	8.5	12	17	24	34	48
	20 $< b \leq$ 40	9.5	13	19	27	38	54
	40 $< b \leq$ 80	11	15	22	31	44	62

表 8.3 相对齿宽的轴交错误差的容许值 f_y' 单位 μm

分度圆直径 d (mm)	齿 宽 b (mm)	精度等级					
		N5	N6	N7	N8	N9	N10
5 $\leq d \leq 20$	4 $\leq b \leq$ 10	3.1	4.3	6.0	8.5	12	17
	10 $< b \leq$ 20	3.4	4.9	7.0	9.5	14	19
20 $< d \leq 50$	4 $\leq b \leq$ 10	3.2	4.5	6.5	9.0	13	18
	10 $< b \leq$ 20	3.6	5.0	7.0	10	14	20
	20 $< b \leq$ 40	4.1	5.5	8.0	11	16	23
	40 $< b \leq$ 80	4.8	6.5	9.5	13	19	27
50 $< d \leq 125$	4 $\leq b \leq$ 10	3.3	4.7	6.5	9.5	13	19
	10 $< b \leq$ 20	3.7	5.5	7.5	11	15	21
	20 $< b \leq$ 40	4.2	6.0	8.5	12	17	24
	40 $< b \leq$ 80	4.9	7.0	10	14	20	28
125 $< d \leq 280$	4 $\leq b \leq$ 10	3.5	5.0	7.0	10	14	20
	10 $< b \leq$ 20	4.0	5.5	8.0	11	16	22
	20 $< b \leq$ 40	4.5	6.5	9.0	13	18	25
	40 $< b \leq$ 80	5.0	7.5	10	15	21	29
	80 $< b \leq$ 160	6.0	8.5	12	17	25	35
280 $< d \leq 560$	10 $< b \leq$ 20	4.3	6.0	8.5	12	17	24
	20 $< b \leq$ 40	4.8	6.5	9.5	13	19	27
	40 $< b \leq$ 80	5.5	7.5	11	15	22	31



8.3 齿轮的轮齿接触

齿轮的齿接触与精度相同,是对齿轮的噪音及效率产生重大影响的要素之一。

要想获得好的轮齿接触,需要注意以下几点:

- 齿线(螺旋线)修整
对齿轮施行鼓型加工或修薄加工。
- 提高齿轮精度
对齿轮施行磨削加工或磨齿加工。
- 提高齿轮箱精度
提高平行度,垂直度等加工精度。

以上几点都是与齿轮及齿轮箱的加工精度有关的指标。

但是,尽管在加工阶段尽了最大的努力,仍然会出现最终组装后轮齿接触检查时,发生轮齿接触不良的问题。这种情况下,对于锥齿轮或蜗杆蜗轮副来说,通过将齿轮沿轴方向移动,轮齿接触会得到一定程度的改善。

齿轮的轮齿接触是齿轮精度的一部分,特别是对锥齿轮及蜗杆蜗轮副来说是一项极为重要的指标。与正齿轮及斜齿齿轮相比,锥齿轮及蜗轮的精度测试比较困难。做为最后的精度确认方法,轮齿接触的检查非常重要的。

关于轮齿接触,JGMA1002-01(2003)标准中做有规定。在这个标准中,齿轮的轮齿接触被分为A、B、C三级。

表 8.4 轮齿接触的百分比

区分	齿 轮 类 型	轮齿接触百分比	
		齿线方向	齿高方向
A	圆 柱 齿 轮	70%以上	40%以上
	锥 齿 轮	50%以上	
	蜗 轮	35%以上	
B	圆 柱 齿 轮	50%以上	30%以上
	锥 齿 轮	35%以上	
	蜗 轮	25%以上	
C	圆 柱 齿 轮	35%以上	20%以上
	锥 齿 轮	25%以上	
	蜗 轮	20%以上	

这里所示的轮齿接触百分比是相对各个齿轮的有效齿线及有效(工作)齿高的指标。

8.3.1 锥齿轮的轮齿接触

制作锥齿轮时,利用轮齿接触测试仪进行轮齿接触及侧隙检查是必不可少的。通过这个检查,可以判断齿轮的综合性能。

利用试验机检查轮齿接触的原理是:首先在对齿轮施加轻制动负荷的状态下使齿面接触,此时的理想轮齿接触如图8.2所示,齿宽中央部靠近小端。对于锥齿轮,随负载增大,齿接触面逐渐向齿宽中央移动。负载值达到锥齿轮使用时的全负载量,轮齿接触面刚好在齿宽中央部附近时为最理想状态。

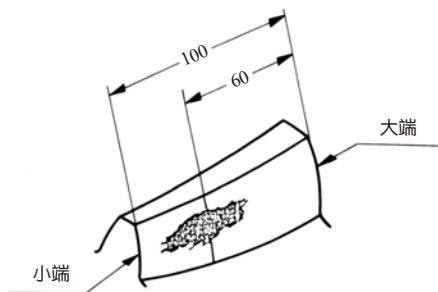


图 8.2 中央靠近小端接触

锥齿轮如图所示,在加工阶段即使得到了理想的轮齿接触,由于齿轮箱的加工精度不良,齿轮的装配位置不良等原因,最终,轮齿接触会无法达到理想状态。

影响锥齿轮轮齿接触的原因,可以考虑有如下三种误差:

- ① 齿轮箱的偏心误差
- ② 齿轮箱的轴角误差
- ③ 齿轮的装配距离误差

在以上三种误差中,①和②的误差的情况下,不重新加工齿轮箱的话,无法得到理想的轮齿接触。关于③的误差,可以通过沿轴向移动齿轮(小齿轮)的调整,得到理想的轮齿接触。

这三种误差,虽然程度不同,但都对侧隙产生很大的影响。



(1) 齿轮箱的偏心误差

如图 8.3 所示, 齿轮箱有偏心误差时, 轮齿会出现交叉接触。

齿轮箱的偏心误差, 如同齿轮有齿线误差(螺旋角误差), 同样对轮齿接触产生影响。

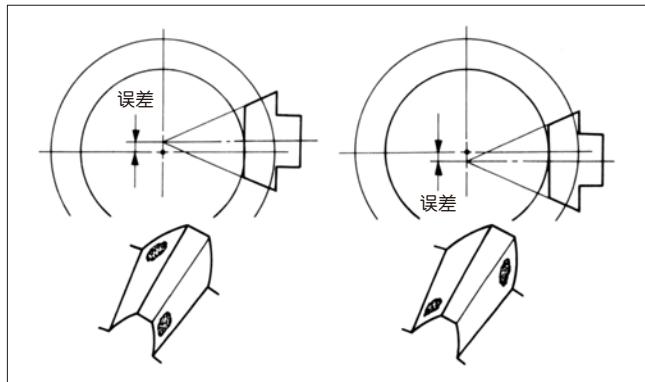


图 8.3 齿轮箱有偏心误差时的轮齿接触

(2) 齿轮箱的轴角误差

如图 8.4 所示, 齿轮箱的轴角误差有正误差时, 锥齿轮的轮齿接触大, 小齿轮共同靠近小端。

相反, 负误差时, 共同靠近大端。

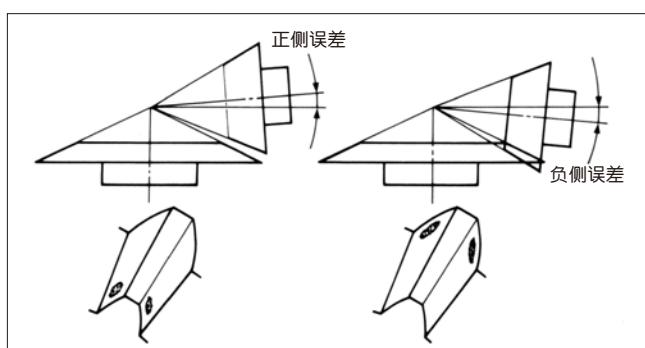


图 8.4 齿轮箱有轴角误差时的轮齿接触

(3) 齿轮的装配距离误差

如图 8.5 所示, 小齿轮在组装时出现正误差, 在齿高方向, 小齿轮的齿接触变低, 大齿轮则出现高位接触。这是因为小齿轮装配距离出现正误差时, 与小齿轮的压力角有正误差时产生同样影响。

相反的, 小齿轮的装配距离出现负误差时, 小齿轮会出现高位接触, 而大齿轮则为低位接触。与小齿轮的压力角有负误差时, 带来同样效果。

装配距离的误差, 可以通过组装时的垫片调整等方法加以修正。

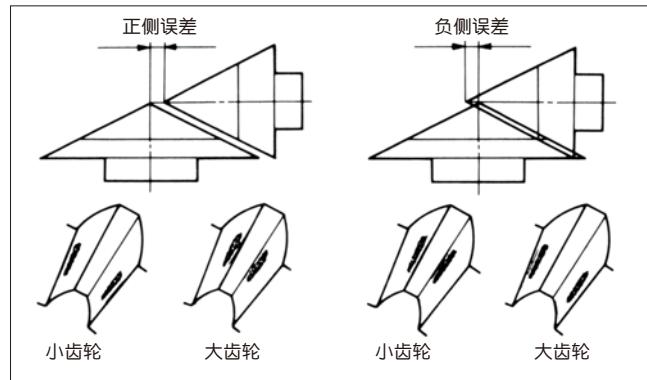


图 8.5 齿轮装配距离有误差时的轮齿接触

装配距离的误差对齿隙的大小也产生影响。误差正向增加时, 齿隙也随之变大。

因为小齿轮的装配距离误差对轮齿接触的影响很大。所以, 对侧隙做微小调整时, 一般采用仅沿轴向调整大齿轮的方法。对侧隙做较大调整时, 应同时对大小齿轮沿轴向做调整, 避免对轮齿接触造成不良影响。

8.3.2 蜗杆副的轮齿接触

在日本国内, 还没有关于蜗杆蜗轮的精度标准。日本的工业标准中, 有关齿轮的轮齿接触的标准, 只有 JGMA1002-01 (2003)。

因此, 关于蜗杆蜗轮的轮齿接触及齿隙的检查, 最一般的方法是使用轮齿接触测试仪。

轮齿接触测试时, 理想的轮齿接触状况示意于图 8.6 中。

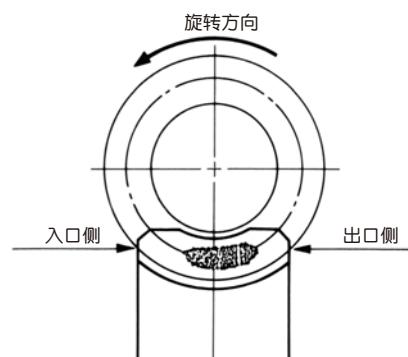


图 8.6 理想的轮齿接触

图中所示的轮齿接触, 齿线方向的齿接触中心多少有些偏向出口侧, 以确保油膜形成时所必要的入口间隙。

实际上, 即使能保证生产出理想的轮齿接触的蜗杆



蜗轮,由于齿轮箱的加工精度不够,蜗杆的组装位置不良等,仍然会造成轮齿的接触不良。

影响蜗杆副轮齿接触的误差,可以考虑有以下三种:

- ① 齿轮箱的轴角误差
- ② 齿轮箱的中心距离误差
- ③ 蜗轮的装配位置误差

其中,①和②的误差无法调整,只能重新加工齿轮箱。③的误差,可以通过沿轴向移动蜗轮调整安装位置而获得正确的轮齿接触。

上述的三种误差,虽然程度不同,但都对齿隙产生很大影响。

(1) 齿轮箱的轴角误差

如图 8.7 所示,齿轮箱有轴角误差时,轮齿将出现交叉接触。

交叉接触在齿轮有齿线方向误差时(螺旋角误差)也同样发生。

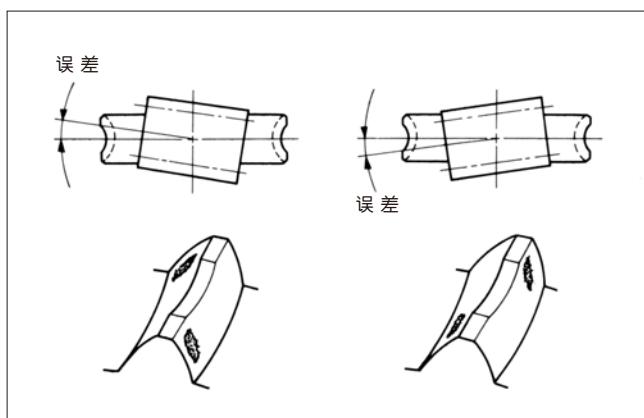


图 8.7 齿轮箱有轴角误差时的轮齿接触

(2) 齿轮箱的中心距误差

如图 8.8 所示,齿轮箱的中心距误差非常大时,轮齿也将出现交叉接触。

产生这种误差时,不仅仅是对齿轮的轮齿接触,对齿隙的大小也将产生很大的影响。正侧误差时,齿隙变大,有负侧误差时齿隙变小。

负侧误差过大会造成无齿隙状态,致使齿轮无法啮合。

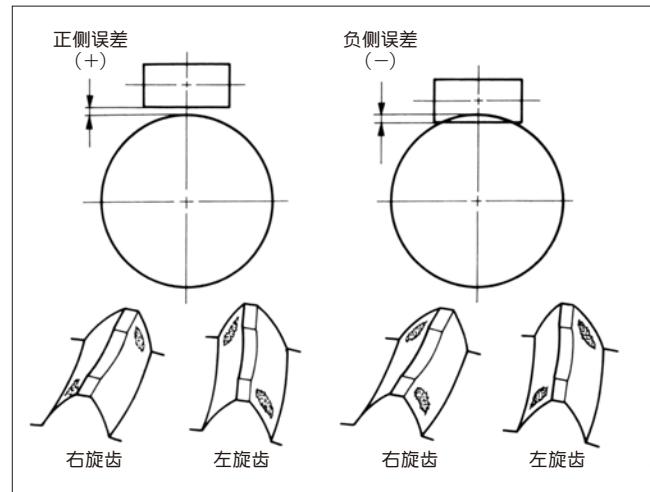


图 8.8 齿轮箱有中心距误差时的轮齿接触

(3) 蜗轮的安装位置误差

如图 8.9 所示,蜗轮有安装位置误差时,轮齿接触会向齿的端部移动,齿接触的移动方向与蜗轮的安装位置误差的方向一致,安装误差对齿隙产生很大影响,随误差之增加,齿隙减小。

安装位置误差可以通过组装时的垫片调整加以修正。

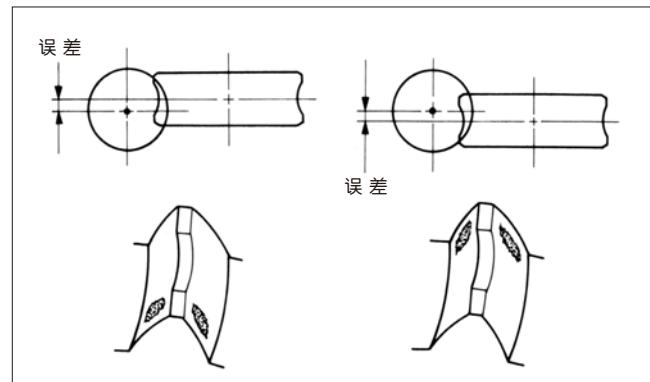


图 8.9 蜗轮有安装位置误差时的轮齿接触



9 齿轮的材料及热处理

齿轮,根据各自的用途,分别使用黑色金属、有色金属及工程塑料等制作。材料的种类、热处理手段等的不同,齿轮的强度也不同。

9.1 齿轮用一般材料

齿轮使用的一般材料及其机械性能、特征等列于表 9.1。

表 9.1 齿轮用一般材料

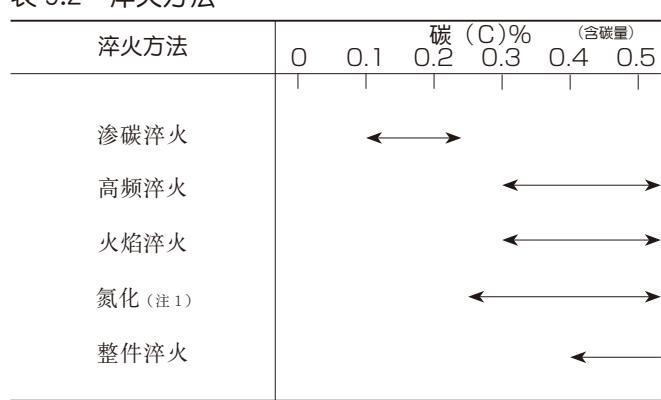
材料分类	JIS 材料牌号	抗拉强度 N/mm ²	延伸率% 以 上	断面收缩率% 以 上	硬度 HB	特征·热处理及用途例等
机械结构用碳素钢	S15CK	490 以上	20	50	143 ~ 235	低碳钢。通过渗碳热处理得到高硬度。
	S45C	690 以上	17	45	201 ~ 269	最为普通的中碳钢。调质 / 高频淬火。
机械结构用合金钢	SCM435	930 以上	15	50	269 ~ 331	中碳合金钢(含碳量 C 0.3 ~ 0.7%)。
	SCM440	980 以上	12	45	285 ~ 352	调质及高频淬火。
	SNCM439	980 以上	16	45	293 ~ 352	高强度(抗弯强度 / 齿面强度)。
	SCr415	780 以上	15	40	217 ~ 302	低碳合金钢(含碳量 C 0.3% 以下)。
	SCM415	830 以上	16	40	235 ~ 321	表面硬化处理(渗碳、氮化、渗碳氮化等)。
	SNC815	980 以上	12	45	285 ~ 388	高强度(抗弯强度大 / 齿面强度大)。
	SNCM220	830 以上	17	40	248 ~ 341	适合使用于除蜗轮外的各种齿轮。
	SNCM420	980 以上	15	40	293 ~ 375	
一般结构用压延钢材	SS400	400 以上	—	—	—	低强度 / 廉价。
灰铸铁	FC200	200 以上	—	—	223 以下	与钢材相比强度低。适合大批量齿轮生产。
球墨铸铁	FCD500-7	500 以上	7	—	150 ~ 230	高强度球墨铸铁。大型铸造齿轮。
不锈钢	SUS303	520 以上	40	50	187 以下	比 SUS304 的切削性、抗磨损性能高。
	SUS304	520 以上	40	60	187 以下	使用最为广泛的不锈钢。适合于食品机械等。
	SUS316	520 以上	40	60	187 以下	在海洋环境中比 SUS304 有更高的防腐性能。
	SUS420J2	540 以上	12	40	217 以上	可以淬火热处理的马氏体不锈钢。
	SUS440C	—	—	—	58HRC 以上	提高淬火得到最高硬度。齿面强度高。
有色金属	C3604	335	—	—	80HV 以上	快削黄铜。各种小型齿轮。
	CAC502	295	10	—	80 以上	铸造磷青铜。最适合于制造蜗轮。
	CAC702	540	15	—	120 以上	铸造铝青铜。蜗轮等。
工程塑料	MC901	96	—	—	120HRR	机械加工齿轮。轻量。不生锈。
	MC602ST	96	—	—	120HRR	
	M90	62	—	—	80 HRR	注塑成型齿轮。低价大量生产。轻负荷用。

9.2 具有代表性的齿轮热处理方法

热处理是为了得到所需的金相组织及性能对金属材料做加热和冷却处理的过程。特别是随冷却方式不同,可以得到各种不同的组织及性能。热处理大致可以分为正火、退火、淬火、回火、表面硬化等几种。有效的利用热处理,可以充分发挥钢材的潜在性能。

通过对钢材实行各种热处理,使钢材变硬,齿轮的强度得以提高。特别是齿面强度,会得到大幅度提高。根据钢材所含的碳素量不同,淬火方法如表 9.2 所示而变化。

表 9.2 淬火方法



注 1. 氮化处理时,材料中必须含有 Al、Cr、Mo、V 等一种以上的合金元素。



(1) 正火 normalizing

正火是为了细化钢材晶粒，均匀内部组织的热处理方法。正火处理的目的是消除机械加工时产生的内应力及压延等塑性加工时产生的纤维组织。

(2) 退火 annealing

退火是为了软化钢材、调整结晶组织、去除内部应力、改善冷轧加工及切削性的热处理方法。根据使用目的，退火细分为完全退火、球化退火、去应力退火、中间退火等。

① 去应力退火

不改变金属组织，消除金属内部应力的退火处理。

② 矫直退火

为了除去钢材的翘曲等变形，对钢材一边加载一边进行退火的处理。

③ 工序间退火

为了使下道工序的加工容易进行，冷轧工序的途中对变硬的材料做软化处理的退火加工。

(3) 淬火 quenching

淬火是钢材经高温加热后快速冷却处理的加工。提高钢材硬度及强度。根据冷却条件分为水淬、油淬、真空淬火等。

淬火后的材料必须经过回火处理。

(4) 回火 tempering

回火是钢件淬硬后再度加热到某一温度，然后以适当的速度冷却的热处理。

淬火后的材料必须经过回火处理。

回火处理的主要目的是调整材料硬度、提高韧性及消除内部应力。

根据回火温度的不同，回火可分为低温回火和高温回火。回火温度越高，材料的硬度降低，韧性增强。

调质处理采用高温回火。

高频淬火、渗碳淬火等表面硬化处理后的回火处理为低温回火。

(5) 调质

调质是淬火与回火（高温）处理相结合、调整钢的硬度 / 强度 / 韧性的热处理。调质处理后的材料硬度为一般机械加工范围的硬度。

一般调质硬度如下所示。

S45C (机械结构用碳素钢) 200 ~ 270 HB

SCM440 (机械结构用合金钢) 230 ~ 270 HB

(6) 渗碳淬火

渗碳淬火是在低碳钢的表面渗入碳素后淬火处理的热处理。渗入碳素的表层得到高硬度。淬火后经低温回火，调整硬度。

材料经渗碳淬火后，心部硬度也会有一定的提高，但达不到表面的程度。

如果在材料的一部分涂抹防渗碳剂，可以防止碳素的渗入，达到防止这个部分硬度变高的目的。

表面硬度及硬化层深度大致如下。

· 淬火硬度 55 ~ 63 HRC (参考)

· 有效硬化层深度 0.3 ~ 1.2 mm (参考)

齿轮经过渗碳淬火处理后产生变形，齿轮精度下降。要想提高齿轮精度，必须对齿轮做磨削加工。

(7) 高频淬火

高频淬火是将含碳量在 0.30% 以上的钢材通过感应加热，使材料表面变硬的淬火热处理。经过高频淬火的齿轮，其齿面及齿顶可以得到高硬度。但是，齿根部有得不到硬化的可能性。

由于高频淬火产生形变，所以一般情况下齿轮精度下降。

S45C 钢制产品的高频淬火硬度及硬化层深度请参考如下。

· 淬火硬度 45 ~ 55 HRC

· 有效硬化层深度 1 ~ 2 mm

(8) 火焰淬火

热源为明火的表面热处理。主要在钢铁的任意表面或某一部分需要淬火时使用。

(9) 氮化

将氮素扩散渗入钢材表面使钢材表面得以硬化的热处理方法。含有铝、铬、钼的钢材容易通过氮化处理提高硬度。具有代表性的氮化钢是 SACM645 (铝钼钢)。

(10) 整件淬火

整件经过加热、速冷的淬火热处理。材料的表面于心部达到相同的硬度。



10 齿轮的强度

在一般情况下,计算齿轮强度时需要考虑齿轮的弯曲强度和齿面强度。对于在过酷条件下使用的齿轮,还需要考虑齿轮的抗胶合能力。

在这里,我们将介绍日本工业会标准的各种计算公式。因为只是摘录,所以如果需要更详细的资料,请参考下面所列的标准。

日本齿轮工业会标准

JGMA 401-01 : 1974 正齿轮及斜齿齿轮的弯曲强度计算公式

JGMA 402-01 : 1975 正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算公式

JGMA 403-01 : 1976 锥齿轮的弯曲强度计算公式

JGMA 404-01 : 1977 锥齿轮的齿面强度计算公式

JGMA 405-01 : 1978 圆柱蜗杆副的强度计算公式

(社)日本齿轮工业会

东京都港区芝公园3丁目5番8号 机械振兴会馆
Tel 03(3431)1871 ~ 1872 208号室

10.1 正齿轮及斜齿齿轮的弯曲强度计算公式

JGMA 401-01 : 1974

此标准适用于一般产业机械中使用在动力传动上的正齿轮及斜齿齿轮(包括人字齿轮和内齿轮)。适用范围如下:

模数	m	1.5 ~ 25mm
节圆直径	d_b	25 ~ 3200mm
圆周速度	v	25m/s 以下
转数	n	3600rpm 以下

(1) 基本换算公式

强度计算中,端面内啮合节圆上的切向力 F_t (kgf),名义功率 P (kW)与转矩 T (kgf · m)之间有下列关系:

$$F_t = \frac{102P}{v} = \frac{1.95 \times 10^6 P}{d_b n} = \frac{2000T}{d_b} \quad (10.1)$$

$$P = \frac{F_t v}{102} = \frac{10^6}{1.95} F_t d_b n \quad (10.2)$$

$$T = \frac{F_t d_b}{2000} = \frac{974P}{n} \quad (10.3)$$

其中 v : 喷合节圆上的圆周速度 (m/s)

$$v = \frac{d_b n}{19100}$$

d_b : 喷合节圆直径 (mm)

n : 转数 (rpm)

(2) 弯曲强度计算公式

要想满足弯曲强度,啮合节圆上的名义切向力 F_t 必须小于根据齿根弯曲应力计算得出的啮合节圆上的容许切向力 $F_{t\text{lim}}$ 。

$$F_t \leq F_{t\text{lim}} \quad (10.4)$$

另外,由啮合节圆上的名义切向力 F_t 求得的齿根应力 σ_F 必须小于容许齿根弯曲应力 $\sigma_{F\text{lim}}$ 。

$$\sigma_F \leq \sigma_{F\text{lim}} \quad (10.5)$$

啮合节圆上的容许切向力 $F_{t\text{lim}}$ (kgf)可以根据下式求出。

$$F_{t\text{lim}} = \sigma_{F\text{lim}} \frac{m_n b}{Y_F Y_\varepsilon Y_\beta} \left(\frac{K_L K_{FX}}{K_V K_O} \right) \frac{1}{S_F} \quad (10.6)$$

齿根弯曲应力 (kgf/mm²) 可以根据下式求出。

$$\sigma_F = F_t \frac{Y_F Y_\varepsilon Y_\beta}{m_n b} \left(\frac{K_V K_O}{K_L K_{FX}} \right) S_F \quad (10.7)$$

(3) 各种系数的求法

(3)-1 齿宽 b (mm)

齿宽不同时,设宽齿面为 b_w ,窄齿面为 b_s

$b_w - b_s \leq m_n$ 时,做为计算齿宽,使用 b_w 、 b_s 的数值。

$b_w - b_s > m_n$ 时,设 b_w 等于 $b_s + m_n$, b_s 不变。

注 关于圆形齿条的齿宽请参照「10.2 正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算公式」(3)-1。

(3)-2 齿形系数 Y_F (30° 切线法)

只要是 JIS B 1701 标准中规定的压力角 $\alpha_n = 20^\circ$ 的全高齿齿形的话,可以根据当量齿轮齿数 z_v 和变位系数 x 从图 10.1 中求出齿形系数。

因为图 10.1 中同时示意了理论根切极限和齿顶变尖极限,对决定齿轮要素将起重要作用。

内齿轮的齿形系数,可以近似地利用替代齿条进行计算。

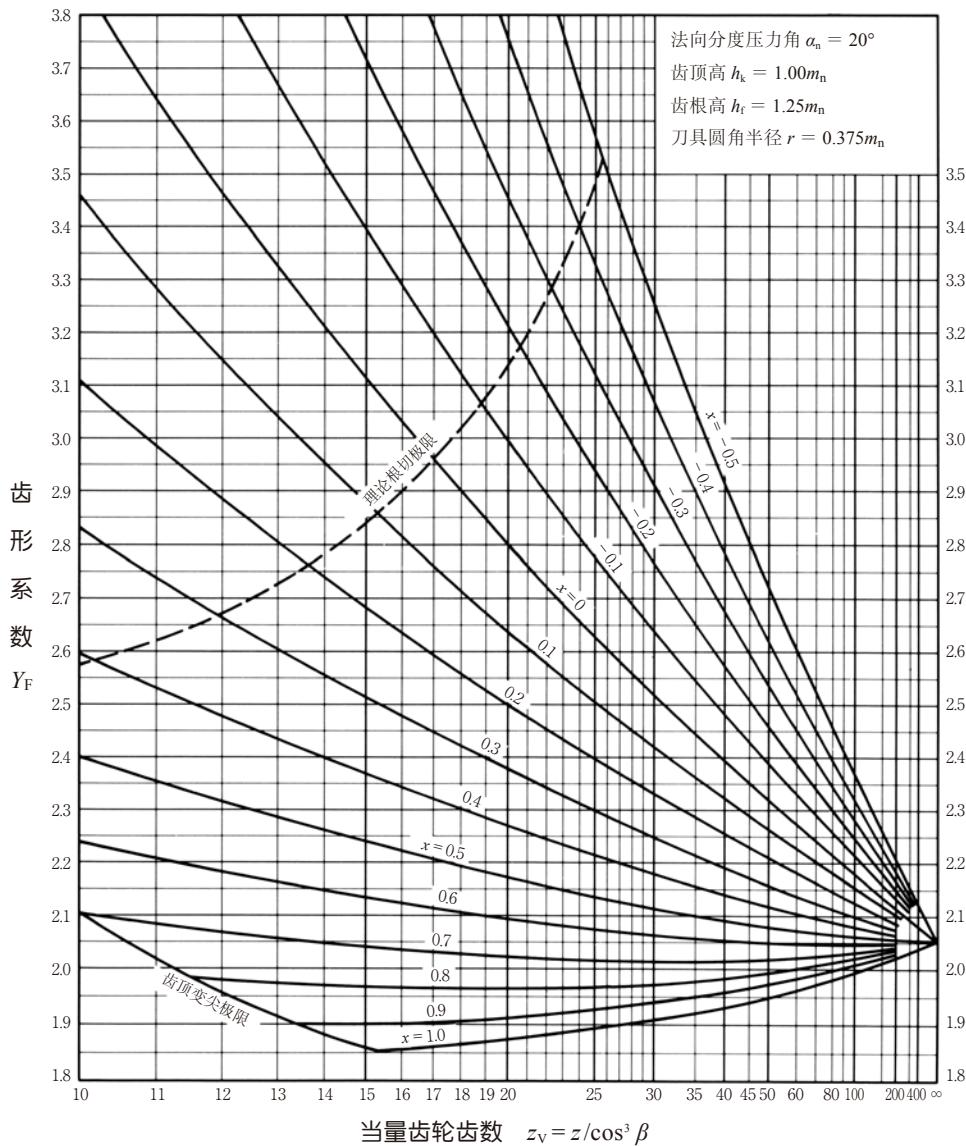
(3)-3 重合度系数 Y_ε

重合度系数 Y_ε 按端面重合度 ε_a 的倒数进行计算。

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_a} \quad (10.8)$$



图 10.1 齿形系数图表

表 10.1 标准正齿轮的端面重合度 ε_u $(\alpha_0 = 20^\circ)$

齿数	17	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120
17	1.514																			
20	1.535	1.557																		
25	1.563	1.584	1.612																	
30	1.584	1.605	1.633	1.654																
35	1.603	1.622	1.649	1.670	1.687															
40	1.614	1.635	1.663	1.684	1.700	1.714														
45	1.625	1.646	1.674	1.695	1.711	1.725	1.736													
50	1.634	1.656	1.683	1.704	1.721	1.734	1.745	1.755												
55	1.642	1.664	1.691	1.712	1.729	1.742	1.753	1.763	1.771											
60	1.649	1.671	1.698	1.719	1.736	1.749	1.760	1.770	1.778	1.785										
65	1.655	1.677	1.704	1.725	1.742	1.755	1.766	1.776	1.784	1.791	1.797									
70	1.661	1.682	1.710	1.731	1.747	1.761	1.772	1.781	1.789	1.796	1.802	1.808								
75	1.666	1.687	1.714	1.735	1.752	1.765	1.777	1.786	1.794	1.801	1.807	1.812	1.817							
80	1.670	1.691	1.719	1.740	1.756	1.770	1.781	1.790	1.798	1.805	1.811	1.817	1.821	1.826						
85	1.674	1.695	1.723	1.743	1.760	1.773	1.785	1.794	1.802	1.809	1.815	1.821	1.825	1.830	1.833					
90	1.677	1.699	1.726	1.747	1.764	1.777	1.788	1.798	1.806	1.813	1.819	1.824	1.829	1.833	1.837	1.840				
95	1.681	1.702	1.729	1.750	1.767	1.780	1.791	1.801	1.809	1.816	1.822	1.827	1.832	1.836	1.840	1.844	1.847			
100	1.683	1.705	1.732	1.753	1.770	1.783	1.794	1.804	1.812	1.819	1.825	1.830	1.835	1.839	1.843	1.846	1.850	1.853		
110	1.688	1.710	1.737	1.758	1.775	1.788	1.799	1.809	1.817	1.824	1.830	1.835	1.840	1.844	1.848	1.852	1.855	1.858	1.863	
120	1.693	1.714	1.742	1.762	1.779	1.792	1.804	1.813	1.821	1.828	1.834	1.840	1.844	1.849	1.852	1.856	1.859	1.862	1.867	
RACK	1.748	1.769	1.797	1.817	1.834	1.847	1.859	1.868	1.876	1.883	1.889	1.894	1.899	1.903	1.907	1.911	1.914	1.922	1.926	

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - r_{g1}^2} + \sqrt{r_{k2}^2 - r_{g2}^2} - a \sin \alpha_b}{\pi m \cos \alpha_o}$$



端面重合度

正齿轮：

$$\varepsilon_a = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - r_{g1}^2} + \sqrt{r_{k2}^2 - r_{g2}^2} - a \sin \alpha_b}{\pi m \cos \alpha_0} \quad (10.9)$$

斜齿齿轮：

$$\varepsilon_a = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - r_{g1}^2} + \sqrt{r_{k2}^2 - r_{g2}^2} - a \sin \alpha_{bs}}{\pi m_s \cos \alpha_s} \quad (10.9)$$

其中：

r_k ：齿顶圆半径 (mm) α_b ：啮合压力角 (度)
 r_g ：基圆半径 (mm) α_{bs} ：端面啮合压力角 (度)
 a ：中心距 (mm) α_0 ：分度压力角 (度)
 α_s ：端面分度压力角 (度)

表 10.1 是 $\alpha_0 = 20^\circ$ 的标准正齿轮的端面重合度 ε_a 值。

(3)-4 螺旋角系数 Y_β

螺旋角系数 Y_β 可按下式计算：

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq \beta \leq 30^\circ \text{ 时} & Y_\beta = 1 - \frac{\beta}{120} \\ \beta \geq 30^\circ \text{ 时} & Y_\beta = 0.75 \end{array} \right\} \quad (10.10)$$

(3)-5 寿命系数 K_L

寿命系数 K_L 可由表 10.2 中求出。

这里，循环次数是指寿命期限内齿轮在载荷条件下啮合的次数。

表 10.2 寿命系数

循环次数	硬度 ⁽¹⁾ H_B 120~220	硬度 ⁽²⁾ H_B 221以上	渗碳齿轮 氮化齿轮
10000 以下	1.4	1.5	1.5
100000 左右	1.2	1.4	1.5
10^6 左右	1.1	1.1	1.1
10^7 以下	1.0	1.0	1.0

注 (1) 铸钢齿轮使用本栏的数据。

(2) 高频淬火齿轮的硬度为心部硬度。

(3)-6 相对齿根应力尺寸系数 K_{FX}

相对齿根应力的尺寸系数 K_{FX} 设定为 1.00。

$$K_{FX} = 1.00 \quad (10.11)$$

(3)-7 动载系数 K_v

动载系数 K_v 可根据齿轮的精度及啮合节圆上的圆周速度由表 10.3 中求出。

表 10.3 动载系数 K_v

JIS B 1702 标准的 齿轮精度等级		啮合节圆上的圆周速度 (m/s)						
齿 形		1 以 下	超 过 1 到 3	超 过 3 到 5	超 过 5 到 8	超 过 8 到 12	超 过 12 到 18	超 过 18 到 25
非修整	修整							
	1	—	—	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3
1	2	—	1.0	1.05	1.1	1.2	1.3	1.5
2	3	1.0	1.1	1.15	1.2	1.3	1.5	
3	4	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5		
4	—	1.0	1.3	1.4	1.5			
5	—	1.1	1.4	1.5				
6	—	1.2	1.5					

(3)-8 过载系数 K_o

过载系数 K_o 通过下式求出。

$$K_o = \frac{\text{实际切向力}}{\text{名义切向力} F_t} \quad (10.12)$$

如果实际切向力不详时，可通过表 10.4 查出。作为参考资料，第 572 页登载了被动机械负载分类表。

表 10.4 过载系数 K_o

驱动侧传来的冲击	被动侧传来的冲击		
	均匀负载	中度冲击	剧烈冲击
均匀负载 (电动机, 叶轮机及油压 发动机等)	1.0	1.25	1.75
轻度冲击 (多气筒机构)	1.25	1.5	2.0
中度冲击 (单气筒机构)	1.5	1.75	2.25

(3)-9 相对齿根破损的安全系数 S_F

相对齿根破损的安全系数 S_F 由于受内部及外部的各种因素影响，定出一个定值虽然比较困难，但最少要在 1.2 以上。

(3)-10 容许齿根弯曲应力 σ_{Flim}

负载方向一定的齿轮的容许齿根弯曲应力 σ_{Flim} 示意于表 10.5~表 10.9 中。容许齿根弯曲应力 σ_{Flim} 值是材料的脉动拉伸疲劳极限除以应力集中系数 1.4 的商。

对于双向负荷，左右两齿面均等或与之相近的状态受载的齿轮， σ_{Flim} 的值应取表中数值的 2/3。

硬度或心部硬度的数值是指齿根中心部的硬度。



表 10.5 表面非硬化齿轮

材 料 (箭头指示参考范围)		硬 度		拉伸强度下限 kgf/mm ² (参考值)	σ_{Flim} kgf/mm ²
		H _B	H _V		
铸 钢 齿 轮	SC37			37	10.4
	SC42			42	12
	SC46			46	13.2
	SC49			49	14.2
	SCC3			55	15.8
				60	17.2
正 火 碳 素 钢 齿 轮	S25C	120	126	39	13.8
	S35C	130	136	42	14.8
	S43C	140	147	45	15.8
	S48C	150	157	48	16.8
	S53C	160	167	51	17.6
	S58C	170	178	55	18.4
		180	189	58	19
		190	200	61	19.5
		200	210	64	20
		210	221	68	20.5
		220	231	71	21
		230	242	74	21.5
		240	252	77	22
		250	263	81	22.5
淬 火 回 火 碳 素 钢 齿 轮	S35C	160	167	51	18.2
	S43C	170	178	55	19.4
	S48C	180	189	58	20.2
	S53C	190	200	61	21
	S58C	200	210	64	22
		210	221	68	23
		220	231	71	23.5
		230	242	74	24
		240	252	77	24.5
		250	263	81	25
		260	273	84	25.5
		270	284	87	26
		280	295	90	26
		290	305	93	26.5
淬 火 回 火 合 金 钢 齿 轮	SMn443	220	231	71	25
	SNC836	230	242	74	26
	SCM435	240	252	77	27.5
	SCM440	250	263	81	28.5
	SNCM439	260	273	84	29.5
		270	284	87	31
		280	295	90	32
		290	305	93	33
		300	316	97	34
		310	327	100	35
		320	337	103	36.5
		330	347	106	37.5
		340	358	110	39
		350	369	113	40
		360	380	117	41



表 10.6 高频淬火齿轮

	材 料 (箭头指示参考范围)	高频淬火前的 热处理条件	心部硬度		齿面硬度 ⁽¹⁾ H_V	σ_{Flim} kgf/mm ²
			H_B	H_V		
齿根部淬硬的 情况下	结构 用 碳 素 钢	正火	160	167	550 以上	21
			180	189	〃	21
			220	231	〃	21.5
			240	252	〃	22
	淬 火 回 火		200	210	550 以上	23
			210	221	〃	23.5
			220	231	〃	24
			230	242	〃	24.5
			240	252	〃	25
			250	263	〃	25
齿根部 不淬硬 的情况下	结构 用 合 金 钢	淬 火 回 火	230	242	550 以上	27
			240	252	〃	28
			250	263	〃	29
			260	273	〃	30
			270	284	〃	31
			280	295	〃	32
			290	305	〃	33
			300	316	〃	34
			310	327	〃	35
			320	337	〃	36.5

备注： σ_{Flim} 的数值，受淬裂，淬火深度不足或不均匀等欠陷的影响，会显着下降。请加以注意。

注(1) 低齿面硬度时的 σ_{Flim} 值使用表 10.5 中的与之相当材料的数值。

表 10.7 渗碳淬火齿轮

	材 料 (箭头指示参考范围)	心部硬度		σ_{Flim} kgf/mm ²
		H_B	H_V	
结构 用 碳 素 钢	S15C S15CK	140	147	18.2
		150	157	19.6
		160	167	21
		170	178	22
		180	189	23
		190	200	24
结构 用 合 金 钢	SCM415 SCM420 SNCM420 SNC815	220	231	34
		230	242	36
		240	252	38
		250	263	39
		260	273	41
		270	284	42.5
		280	295	44
		290	305	45
		300	316	46
		310	327	47
		320	337	48
		330	347	49
		340	358	50
		350	369	51
		360	380	51.5
		370	390	52

注(2) 本表中数值适用于为了提高齿面强度拥有适当的渗碳深度和表面硬度的齿轮。但是当渗碳层非常薄等例外的情况下，应使用表面不硬化调质齿轮的 σ_{Flim} 值。



表 10.8 氮化齿轮 摘自 JGMA403-01(1976)

材 料	齿面硬度 (参考值)	心部硬度		σ_{Flim} kgf/mm ²
		H _B	H _V	
氮化钢以外的结构用合金钢	H _V 650 以上	220	231	30
		240	252	33
		260	273	36
		280	295	38
		300	316	40
		320	337	42
		340	358	44
		360	380	46
氮化钢 SACM645	H _V 650 以上	220	231	32
		240	252	35
		260	273	38
		280	295	41
		300	316	44

注(1)本表中数值适用于为了提高齿面强度拥有适当的氮化深度的齿轮。但是当软氮化等氮化层非常薄的情况下,应使用表面不硬化调质齿轮的 σ_{Flim} 值。

表 10.9 不锈钢及快削黄铜 摘自 JGMA6101-02 (2007)

材 料	硬 度	屈服点 Mpa	拉伸强度 Mpa	σ_{Flim} Mpa
不锈钢 SUS304	187HB 以下	206 以上 (耐力)	520 以上	103
快削黄铜 C3604	80HV 以上	—	333 以上	39.3

【参考】被动机械负荷分类表 摘自 JGMA402-01 (1975)

被动机械名	负荷分类 级别	被动机械名	负荷分类 级别
搅拌机	M	食品机械	M
送风机	U	粉碎机	H
酿造及蒸馏器	U	材料转送机	M
车辆用机械	M	工作机械	H
净化装置	U	金属加工机械	H
选别机	M	旋转磨料机	M
制陶机械(中负荷)	M	滚筒式干燥机	H
制陶机械(重负荷)	H	搅拌机	M
压缩机	M	石油精制机械	M
输送机(均匀负荷)	U	制纸机械	M
输送机(不均匀或重负荷)	M	剥皮机	H
起重机	U	泵	M
碎石机	H	橡胶机械(中负荷)	M
挖泥船(中负荷)	M	橡胶机械(重负荷)	H
挖泥船(重负荷)	H	水处理机械(轻负荷)	U
电梯	U	水处理机械(中负荷)	M
押出机	U	筛选机	U
风扇(家庭用)	U	筛选机(砂石用)	M
风扇(工业用)	M	制糖机械	M
供给机	M	纺织机械	M
供给机(往返运动)	H		

备考 1. 此表是参照 AGMA151.02 而做成。

2. 表中的负荷分类级别 U 为均一负荷、M 为中度冲击、H 为剧烈冲击。

3. 此分类所示为一般倾向性,重负荷的状况应采用上段的级别。详细内容请参考 AGMA 的标准。



(4) 计算例

正齿轮要素

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	法向模数	m_n	mm	度	2
2	法向压力角	α_n	20°		
3	螺旋角	β	0°		
4	齿数	z		20	40
5	中心距	a	mm	60	
6	变位系数	x		+ 0.15	- 0.15
7	节圆直径	d_0	mm	40.000	80.000
8	啮合节圆直径	d_b		40.000	80.000
9	齿宽	b		20	20
10	精度			JIS 5(齿形无修整)	JIS 5(齿形无修整)
11	最后加工			滚刀	
12	齿面光洁度			12.5S	
13	转数	n	rpm	1500	750
14	圆周速度	v	m/s	3.142	
15	负载方向			单方向	
16	啮合次数			10 ⁷ 回以上	
17	材料			SCM415	
18	热处理			渗碳淬火	
19	表面硬度			H _v 600 – 640	
20	心部硬度			H _B 260 – 280	
21	有效渗碳深度			mm	0.3 – 0.5

正齿轮的弯曲强度计算

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	容许齿根弯曲应力	σ_{Flim}	kgf/mm ²	mm	42.5
2	法向模数	m_n	2		
3	齿宽	b	20		
4	齿形系数	Y_F		2.568	2.535
5	负载分配系数	Y_ϵ		0.619	
6	螺旋角系数	Y_β		1.0	
7	寿命系数	K_L		1.0	
8	相对齿根破损的安全系数	K_{FX}		1.0	
9	动载系数	K_V		1.5	
10	过载系数	K_O		1.0	
11	安全系数	S_F		1.2	
12	啮合圆上的容许切向力	F_{Flim}	kgf	594.1	601.9



10.2 正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算公式

JGMA 402-01 : 1975

此标准适用于一般产业机械中使用在动力传动上的正齿轮及斜齿齿轮(包括人字齿轮和内齿轮)。

模数	m	1.5 ~ 25mm
节圆直径	d_0	25 ~ 3200mm
圆周速度	v	25m/s 以下
转数	n	3600rpm 以下

(1) 基本换算公式

强度计算中,分度圆上的切向力 F_t (kgf),名义功率 P (kW) 与名义转矩 T (kgf · m) 之间有下列关系。

$$F_t = \frac{102P}{v_0} = \frac{1.95 \times 10^6 P}{d_0 n} = \frac{2000T}{d_0} \quad (10.12)$$

$$P = \frac{F_t v_0}{102} = \frac{10^{-6}}{1.95} F_t d_0 n \quad (10.13)$$

$$T = \frac{F_t d_0}{2000} = \frac{974P}{n} \quad (10.14)$$

其中

$$v_0 : \text{分度圆上的圆周速度 (m/s)} = \frac{d_0 n}{19100}$$

$$d_0 : \text{分度圆直径 (mm)}$$

$$n : \text{转数 (rpm)}$$

(2) 齿面强度计算公式

要想满足齿面强度,分度圆上的名义切向力 F_t 必须小于根据容许赫兹应力计算得出的分度节圆上的容许切向力 F_{tlim} 。

$$F_t \leq F_{tlim} \quad (10.15)$$

另外,由分度圆上的名义切向力 F_t 求得的赫兹应力 σ_H 必须小于容许赫兹应力 σ_{Hlim} 。

$$\sigma_H \leq \sigma_{Hlim} \quad (10.16)$$

分度圆上的容许切向力 F_{tlim} (kgf) 可以根据下式求出。

$$F_{tlim} = \sigma_{Hlim}^2 d_{01} b_H \frac{i}{i \pm 1} \quad (10.17)$$

$$\left(\frac{K_{HL} Z_L Z_R Z_V Z_W K_{HX}}{Z_H Z_M Z_e Z_\beta} \right)^2 \frac{1}{K_{H\beta} K_V K_O} \frac{1}{S_H^2}$$

赫兹应力 σ_H (kgf/mm²) 可以根据下式求出。

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_t}{d_{01} b_H} \frac{i \pm 1}{i}} \frac{Z_H Z_M Z_e Z_\beta}{K_{HL} Z_L Z_R Z_V Z_W K_{HX}} \sqrt{K_{H\beta} K_V K_O} S_H \quad (10.18)$$

公式(10.17)、(10.18)中的正号适用于外齿轮啮合,负号适用于内齿轮与外齿轮的啮合。

齿条与外齿轮啮合时,式中的 $\frac{i}{i \pm 1}$ 项的数值为 1。

(3) 各种系数的求法

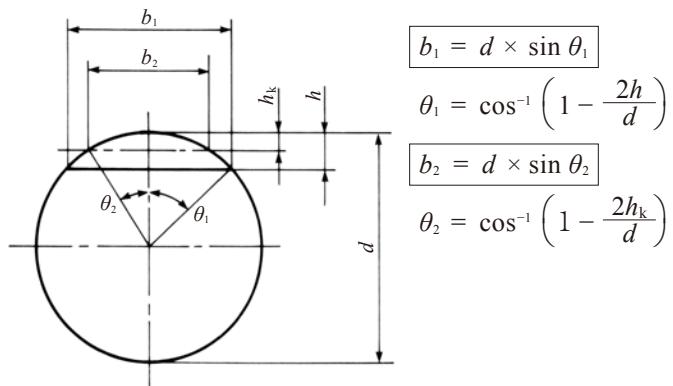
(3)-1 相对齿面强度的有效齿宽 b_H (mm)

相对齿面强度的有效齿宽 b_H 是指一对齿轮中较窄的齿宽。

齿宽的两端齿面经过修缘时,从全齿宽中将修缘部分的齿宽减去后,选择小齿宽的数值做为有效齿宽。

注 圆形齿条的齿宽

尺寸规格表中记载的容许传动力,弯曲强度的情况下,齿宽按 b_1 ,齿面强度按 b_2 的尺寸进行计算。



其中

h_k = 齿顶高

h = 全齿高

d = 外径



(3)-2 节点区域系数 Z_H

节点区域系数 Z_H 可利用下式进行计算。

$$Z_H = \sqrt{\frac{2 \cos \beta_g \cos \alpha_{bs}}{\cos^2 \alpha_s \sin \alpha_{bs}}} = \frac{1}{\cos \alpha_s \sqrt{\tan \alpha_{bs}}} \quad (10.19)$$

其中 $\beta_g = \tan^{-1} (\tan \beta \cos \alpha_s)$

β_g : 基圆柱螺旋角 (度)

α_{bs} : 端面啮合压力角 (度)

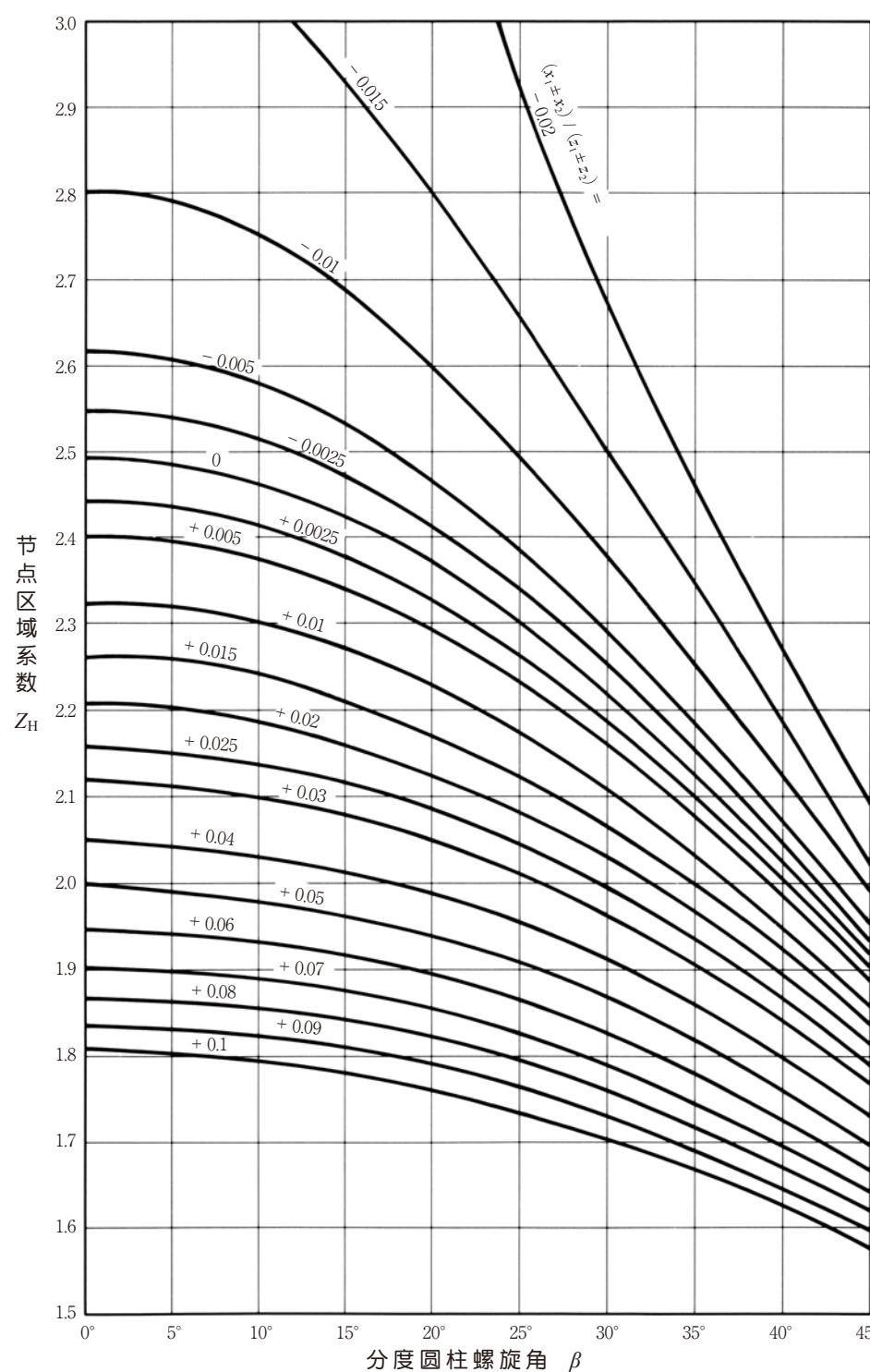
α_s : 端面分度压力角 (度)

图 10.2 节点区域系数 Z_H

只要是 JIS B 1701 中所规定的压力角为 $\alpha_n = 20^\circ$ 的全高齿齿形, 根据变位系数 x_1 、 x_2 , 齿数 z_1 、 z_2 , 螺旋角 β_0 , 可以从图 10.2 中查出节点区域系数。

关于图 10.2 的 ± 符号

图中 (+) 号用于外啮合, (-) 号用于内啮合。



(3)-3 弹性系数 Z_M

弹性系数 Z_M 可按下式求出。

$$Z_M = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (10.20)$$

其中 ν : 泊桑比

E : 弹性模量 (杨氏模量) (kgf/mm²)

下面将主要材料组合的弹性系数 Z_M 列于表 10.9。

表 10.9 弹性系数 Z_M

齿 轮				相 咬 齿 轮				弹性系数 Z_M (kgf/mm ²) ^{0.5}
材 料	代号	弹性模量 E kgf/mm ²	泊桑比 ν	材 料	代号	弹性模量 E kgf/mm ²	泊桑比 ν	
结构用钢	* (1)	21000	0.3	结构用钢	* (1)	21000		60.6
				铸钢	SC	20500		60.2
				球墨铸铁	FCD	17600		57.9
				灰铸铁	FC	12000		51.7
				铸钢	SC	20500		59.9
				球墨铸铁	FCD	17600		57.6
				灰铸铁	FC	12000		51.5
				球墨铸铁	FCD	17600		55.5
				灰铸铁	FC	12000		50.0
球墨铸铁	FCD	17600		灰铸铁	FC	12000		45.8
灰铸铁	FC	12000						

注(1)※构造用钢有 S ~ C、SNC、SNCM、SCr、SCM 等。

(3)-4 重合度系数 Z_ϵ

重合度系数 Z_ϵ 可利用下式求出。

正齿轮 : $Z_\epsilon = 1.0$

斜齿齿轮 : $\epsilon_\beta \leq 1$ 的场合

$$Z_\epsilon = \sqrt{1 - \epsilon_\beta + \frac{\epsilon_\beta}{\epsilon_a}} \quad (10.21)$$

$\epsilon_\beta > 1$ 的场合

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} \quad (10.21)$$

其中 ϵ_a : 端面重合度

ϵ_β : 纵向重合度

$$\epsilon_\beta = \frac{b_H \sin \beta}{\pi m_n} \quad (10.21a)$$

(3)-6 相对齿面强度的寿命系数 K_{HL}

相对齿面强度的寿命系数 K_{HL} 可通过表 10.10 求出。

表 10.10 相对齿面强度的寿命系数 K_{HL}

循环次数	寿命系数
10,000 以下	1.5
100,000 左右	1.3
10^6 左右	1.15
10^7 以上	1.0

备考 1. 这里的循环次数是指寿命期间中的啮合次数。

2. 空转轮 (惰轮) 旋转一周啮合两次, 啮合齿面不同的情况下, 旋转一周按一次计算。

3. 正逆转交互或与之相近的状态下运转时, 将两齿面中承受大负荷的齿面的啮合次数做为循环次数计算。

循环次数不明的情况下, 设 $K_{HL} = 1.0$ 。

(3)-5 相对齿面强度的螺旋角系数 Z_β

因为正确计算相对齿面强度的螺旋角系数 Z_β 很困难, 所以设定为 1.0。

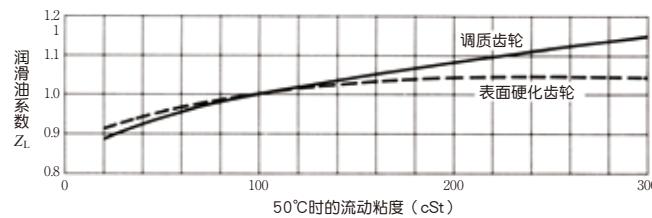
$$Z_\beta = 1.0 \quad (10.22)$$



(3)-7 润滑油系数 Z_L

润滑油系数 Z_L 以所使用的润滑油在 50°C 时的动粘度 (cSt) 为基准, 从图 10.3 中求出。

图 10.3 润滑油系数 Z_L



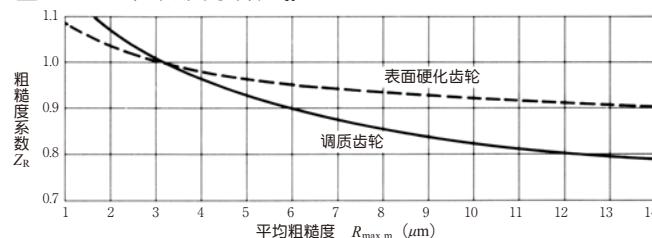
注: 调质齿轮包括淬火回火齿轮及正火齿轮。

(3)-8 粗糙度系数 Z_R

粗糙度系数 Z_R 可根据齿面的平均粗糙度 R_{maxm} (μm) 从图 10.4 中查出。平均粗糙度 R_{maxm} 的数值可根据大小齿轮的表面粗糙度 R_{max1} 和 R_{max2} 及中心距 a (mm) 通过下式求出。

$$R_{maxm} = \frac{R_{max1} + R_{max2}}{2} \sqrt[3]{\frac{100}{a}} \text{ } (\mu\text{m}) \quad (10.23)$$

图 10.4 粗糙度系数 Z_R

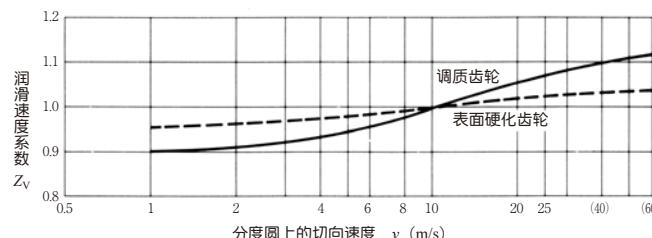


注: 调质齿轮包括淬火回火齿轮及正火齿轮。

(3)-9 润滑速度系数 Z_V

润滑速度系数 Z_V 可根据分度圆上的切向速度 v (m/s) 从图 10.5 中求出。

图 10.5 润滑速度系数 Z_V



注: 调质齿轮包括淬火回火齿轮及正火齿轮。

(3)-10 工作硬化系数 Z_W

工作硬化系数 Z_W 仅适用于经过淬火切削的大小齿轮, 可利用下式求出。

$$Z_W = 1.2 - \frac{H_{B2} - 130}{1700} \quad (10.24)$$

其中 H_{B2} : 大齿轮的齿面布氏硬度

条件 $130 \leq H_{B2} \leq 470$

不满足此条件时, 设 $Z_W = 1.0$

(3)-11 相对齿面强度的尺寸系数 K_{HX}

因为缺乏详细的资料, 无法正确的规定相对齿面强度的尺寸系数, 设定为 1.0。

$$K_{HX} = 1.0 \quad (10.25)$$

(3)-12 相对齿面强度的齿向载荷分布系数 $K_{H\beta}$

相对齿面强度的齿向载荷分布系数 $K_{H\beta}$ 可通过下面的方法确定。

① 载荷时的齿面接触无法预测的情况下

根据齿轮的支撑方法, 齿宽 b 与小齿轮分度圆直径 d_{01} 的比 b/d_{01} 的数值从表 10.11 中查出。

表 10.11 相对齿面强度的齿向载荷分布系数 $K_{H\beta}$

$\frac{b}{d_{01}}$	齿轮的支撑方法			
	两侧支撑		单侧支撑	
与两轴承对称	靠近一方的轴承轴的刚度高	靠近一方的轴承轴的刚度低		
0.2	1.0	1.0	1.1	1.2
0.4	1.0	1.1	1.3	1.45
0.6	1.05	1.2	1.5	1.65
0.8	1.1	1.3	1.7	1.85
1.0	1.2	1.45	1.85	2.0
1.2	1.3	1.6	2.0	2.15
1.4	1.4	1.8	2.1	—
1.6	1.5	2.05	2.2	—
1.8	1.8	—	—	—
2.0	2.1	—	—	—

备考 1. 正齿轮及斜齿齿轮的 b 值取工作齿宽, 人字齿轮的齿宽包括中央部的退刀槽部分。

2. 无负载时齿接触良好。

3. 不适用于空转轮及与大齿轮在两处啮合的小齿轮 (中间齿轮)。

② 负载时齿接触良好的情况下

负载时的齿接触得以保证, 再加上经过跑合的情况下, 可以取其值为 1.0 ~ 1.2。

$$K_{H\beta} = 1.0 \sim 1.2 \quad (10.26)$$

(3)-13 动载系数 K_v

动载系数 K_v 可根据齿轮的精度及分度圆的圆周速度 v_0 从表 10.3 中求出。

(3)-14 过载系数 K_o

过载系数 K_o 可通过公式 (10.11) 或表 10.4 求出, 与弯曲强度的计算相同。

(3)-15 相对齿面损伤(点蚀)的安全系数 S_h

相对齿面损伤(点蚀)的安全系数 S_h 因为受内部及

表 10.12 表面不硬化齿轮

材 料 (箭头指示参考范围)	齿 面 硬 度		拉伸强度下限 kgf/mm ² (参考值)	σ_{Hlim} kgf/mm ²
	H_B	H_V		
铸 钢	SC37		37	34
	SC42		42	35
	SC46		46	36
	SC49		49	37
	SCC3		55	39
			60	40
结 构 用 正 火 碳 素 钢	120	126	39	41.5
	130	136	42	42.5
	140	147	45	44
	150	157	48	45
	160	167	51	46.5
	170	178	55	47.5
	180	189	58	49
	190	200	61	50
	200	210	64	51.5
	210	221	68	52.5
	220	231	71	54
	230	242	74	55
	240	253	77	56.5
	250	263	81	57.5
	160	167	51	51
	170	178	55	52.5
	180	189	58	54
	190	200	61	55.5
	200	210	64	57
结 构 用 调 质 碳 素 钢	210	221	68	58.5
	220	231	71	60
	230	242	74	61
	240	252	77	62.5
	250	263	81	64
	260	273	84	65.5
	270	284	87	67
	280	295	90	68.5
	290	305	93	70
	300	316	97	71
	310	327	100	72.5
	320	337	103	74
	330	347	106	75.5
	340	358	110	77
	350	369	113	78.5

外部的各种因素影响, 给出一个定值比较困难, 但希望最少应在 1.15 以上。

(3)-16 接触疲劳极限 σ_{Hlim}

齿轮的接触疲劳极限值 σ_{Hlim} 示意于表 10.12~10.16 中。表中所示硬度的中间值可利用插值法求出。另外, 齿面硬度是指节圆附近的硬度。



表 10.12 未经表面硬化的齿轮 (续)

材 料 (箭头指示参考范围)	齿 面 硬 度		拉伸强度下限 kgf/mm ² (参考值)	σ_{Hlim} kgf/mm ²
	H _B	H _V		
结 构 用 合 金 钢 淬 火 回 火	220	231	71	70
	230	242	74	71.5
	240	252	77	73
	250	263	81	74.5
	260	273	84	76
	270	284	87	77.5
	280	295	90	79
	290	305	93	81
	300	316	97	82.5
	310	327	100	84
	320	337	103	85.5
	330	347	106	87
	340	358	110	88.5
	350	369	113	90
	360	380	117	92
	370	391	121	93.5
	380	402	126	95
	390	413	130	96.5
	400	424	135	98

表 10.13 高频淬火齿轮

材 料	高频淬火前的 热处理条件	齿面硬度 H _V (淬火后)	σ_{Hlim} kgf/mm ²
结 构 用 碳 素 钢	正火	420	77
		440	80
		460	82
		480	85
		500	87
		520	90
		540	92
		560	93.5
		580	95
		600 以上	96
结 构 用 碳 素 钢	淬火回火	500	96
		520	99
		540	101
		560	103
		580	105
		600	106.5
		620	107.5
		640	108.5
		660	109
		680 以上	109.5
结 构 用 合 金 钢	淬火回火	500	109
		520	112
		540	115
		560	117
		580	119
		600	121
		620	123
		640	124
		660	125
		680 以上	126



表 10.14 渗碳淬火齿轮

材 料		有效渗碳深度 (1)	齿面硬度 H_V	σ_{Hlim} kgf/mm ²	
结 构 用 碳 素 钢	S15C	比较浅 的情况下 注(1)A	580	115	
			600	117	
			620	118	
			640	119	
			660	120	
			680	120	
			700	120	
			720	119	
			740	118	
			760	117	
	S15CK		780	115	
			800	113	
			580	131	
			600	134	
			620	137	
结 构 用 合 金 钢	SCM415	比较浅 的情况下 注(1)A	640	138	
			660	138	
			680	138	
			700	138	
			720	137	
	SCM420		740	136	
			760	134	
			780	132	
			800	130	
	SNC420	比较深 的情况下 注(1)B 以上	580	156	
			600	160	
			620	164	
			640	166	
			660	166	
	SNC815		680	166	
			700	164	
			720	161	
			740	158	
			760	154	
	SNCM420		780	150	
			800	146	

注 (1) 有效渗碳深度比较浅的情况是指表中 A 行数值, 比较深的情况是指表中 B 以上数值的场合。有效渗碳深度为硬度达到 HV 513 (HR C50) 的深度。磨削齿轮为磨削后的深度。

模数	1.5	2	3	4	5	6	8	10	15	20	25
深度 (mm)	A	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.2	1.5
	B	0.3	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1.1	1.4	2.0	3.4

备考：特别是在大齿数齿轮副啮合时，由于齿面的面压在齿内部而引起的最大剪应力发生点很深，会有渗碳效果不及的情况，所以应注意增大齿轮的安全系数。



表 10.15 氮化齿轮 (1)

材 料		齿面硬度(参考值)	σ_{Him} kgf/mm ²	
氮化钢	SACM645 等	H _v 650 以上	一般情况下	120
			特别长时间氮化处理时	130 ~ 140

注⁽¹⁾ 适用于为提高齿面强度而经过氮化处理的齿轮(齿轮有一定的氮化深度和表面硬度)。齿面硬度比表中的参考值显着下降时,轮齿内部最大剪应力的发生点比氮化层厚度明显深时,应注意增大齿轮的安全系数 S_H 。

表 10.16 软氮化齿轮 ⁽¹⁾

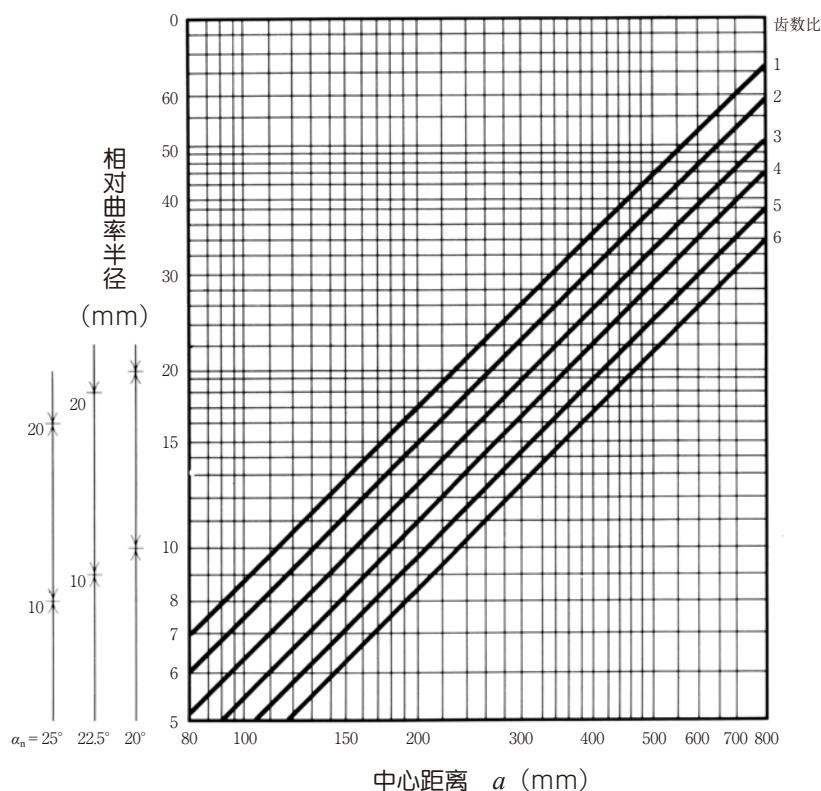
材 料	氮化时间 (h)	σ_{Hlim} kgf/mm ²		
		相对曲率半径 (mm) (%)		
		10 以下	10 ~ 20	20 以上
结构用碳素钢及合金钢	2	100	90	80
	4	110	100	90
	6	120	110	100

注⁽¹⁾ 适用于盐浴氮化及气体氮化齿轮。

(2) 相对曲率半径由图 1.6 中查出。

备考：使用心部经过适当调质处理的齿轮材料。

图 10.6 相对曲率半径





(4) 计算例

正齿轮要素

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	法向模数	m_n	mm 度	2	
2	法向压力角	α_n		20°	
3	螺旋角	β		0°	
4	齿数	z		20	40
5	中心距	a	mm	60	
6	变位系数	x		+ 0.15	- 0.15
7	分度圆直径	d_0	mm	40.000	80.000
8	啮合节圆直径	d_b		40.000	80.000
9	齿宽	b		20	20
10	精度			JIS 5 (齿形无修整)	JIS 5 (齿形无修整)
11	最后加工				滚刀
12	齿面光洁度				12.5S
13	转数	n	rpm	1500	750
14	切向速度	v	m/s	3.142	
15	润滑油的动粘度		cSt	100	
16	齿轮的支撑方法			两侧支撑 (轮齿接触难以预测)	
17	啮合次数			回	10 ⁷ 回以上
18	材料			SCM415	
19	热处理			渗碳淬火	
20	表面硬度			H _V 600 – 640	
21	心部硬度			H _B 260 – 280	
22	有效渗碳深度			mm	0.3 – 0.5

正齿轮的齿面强度

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	接触疲劳极限	σ_{Hlim}	kgf/mm ² mm	164	
2	小齿轮的节径	d_{01}		40	
3	有效齿宽	b_H		20	
4	齿数比 (z_2/z_1)	i		2	
5	节点区域系数	Z_H		2.495	
6	弹性系数	Z_M	(kgf/mm ²) ^{0.5}	60.6	
7	重合度系数	Z_ϵ		1.0	
8	螺旋角系数	Z_β		1.0	
9	寿命系数	K_{HL}		1.0	
10	润滑油系数	Z_L		1.0	
11	粗糙度系数	Z_R		0.90	
12	润滑速度系数	Z_V		0.97	
13	工作硬化系数	Z_W		1.0	
14	尺寸系数	K_{HX}		1.0	
15	齿向载荷分布系数	$K_{H\beta}$		1.025	
16	动载系数	K_V		1.5	
17	过载系数	K_O		1.0	
18	安全系数	S_H			1.15
19	分度圆上的容许切向力	F_{tlim}	kgf	233.8	233.8



10.3 锥齿轮的弯曲强度计算公式

JGMA 403-01 : 1976

此标准适用于使用在一般产业机械上动力传动范围的锥齿轮。

大端端面模数	m	1.5 ~ 25mm
大端节径	d_0	1600mm 以下 (直齿锥齿轮) 1000mm 以下 (弧齿锥齿轮)
大端切向速度	v	25m/s 以下
转数	n	3600rpm 以下

(1) 基本换算公式

强度计算中, 中央节圆上的名义切向力 F_{tm} (kgf), 名义功率 P (kW) 与名义转矩 T (kgf·m) 之间有下列关系。

$$F_{tm} = \frac{102P}{v_m} = \frac{1.95 \times 10^6 P}{d_m n} = \frac{2000T}{d_m} \quad (10.27)$$

$$P = \frac{F_{tm} v_m}{102} = 5.13 \times 10^{-7} F_{tm} d_m n \quad (10.28)$$

$$T = \frac{F_{tm} d_m}{2000} = \frac{974P}{n} \quad (10.29)$$

其中 v_m : 喷合节圆上的圆周速度 (m/s)

$$= \frac{d_m n}{19100}$$

d_m : 中央节圆直径 (mm)

$$= d_0 - b \sin \delta_0$$

(2) 弯曲强度计算公式

要想满足弯曲强度, 中央节圆上的名义切向力 F_{tm} 必须小于根据齿根弯曲应力 σ_{Flim} 计算得出的中央节圆上的容许切向力 F_{tmlim} 。

$$F_{tm} \leq F_{tmlim} \quad (10.30)$$

另外, 由中央节圆上的名义切向力 F_{tm} 求得的齿根应力 σ_F 必须小于容许齿根弯曲应力 σ_{Flim} 。

$$\sigma_F \leq \sigma_{Flim} \quad (10.31)$$

中央节圆上的容许切向力 F_{tmlim} (kgf) 可以根据下式求出。

$$F_{tmlim} = 0.85 \cos \beta_m \sigma_{Flim} m b \frac{R_a - 0.5b}{R_a} \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (10.32)$$

$$\frac{1}{Y_F Y_e Y_\beta Y_C} \left(\frac{K_L K_{FX}}{K_M K_V K_O} \right) \frac{1}{K_R}$$

其中 β_m : 中央螺旋角(度)

m : 大端端面模数 (mm)

R_a : 大端锥距 (mm)

齿根弯曲应力 σ_F (kgf/mm²) 可以根据下式求出。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_F = F_{tm} \frac{Y_F Y_e Y_\beta Y_C}{0.85 \cos \beta_m m b} \frac{R_a}{R_a - 0.5b} \\ \left(\frac{K_M K_V K_O}{K_L K_{FX}} \right) K_R \end{array} \right\} \quad (10.33)$$

(3) 各种系数的求法

(3)-1 齿宽 b

齿宽 b 指定为节圆上的齿宽度。

大小齿轮的齿宽不同时, b 值取窄面做为齿宽值计算。

(3)-2 齿形系数 Y_F

齿形系数 Y_F 利用以下方法求出。

首先使用图 10.8~10.9 查出仅经过纵向变位的齿形系数 Y_{F0} 值, 然后在图 10.7 中求出切向变位的补正系数 C , 再通过下式计算出齿形系数 Y_F 。

$$Y_F = C Y_{F0} \quad (10.34)$$

但是, 没有经过切向变位的齿形时 $Y_F = Y_{F0}$ 。

利用图 10.8~10.9 时, 当量齿轮齿数 z_v 及变位系数 x 根据下式求出。

$$\left. \begin{array}{l} z_v = \frac{z}{\cos \delta_0 \cos^3 \beta_m} \\ x = \frac{h_k - h_{k0}}{m} \end{array} \right\} \quad (10.35)$$

其中

h_k : 齿轮的大端齿顶高 (mm)

h_{k0} : 基准齿形的齿顶高 (mm)

m : 大端端面模数 (mm)

s : 大端端面弧齿厚 (mm)

切向变位系数 K 利用下式进行计算。

$$K = \frac{1}{m} \left\{ s - 0.5\pi m - \frac{2(h_k - h_{k0}) \tan \alpha_n}{\cos \beta_m} \right\} \quad (10.36)$$

图 10.7 切向变位的补正系数 C

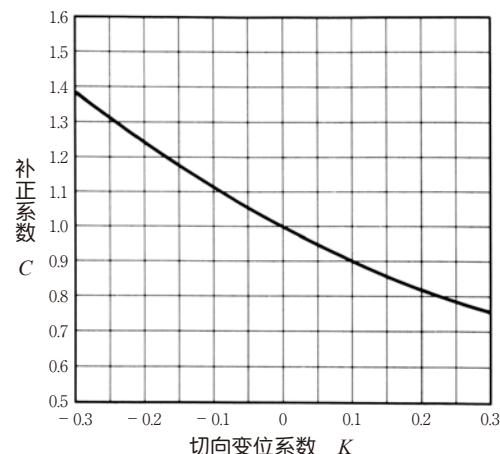


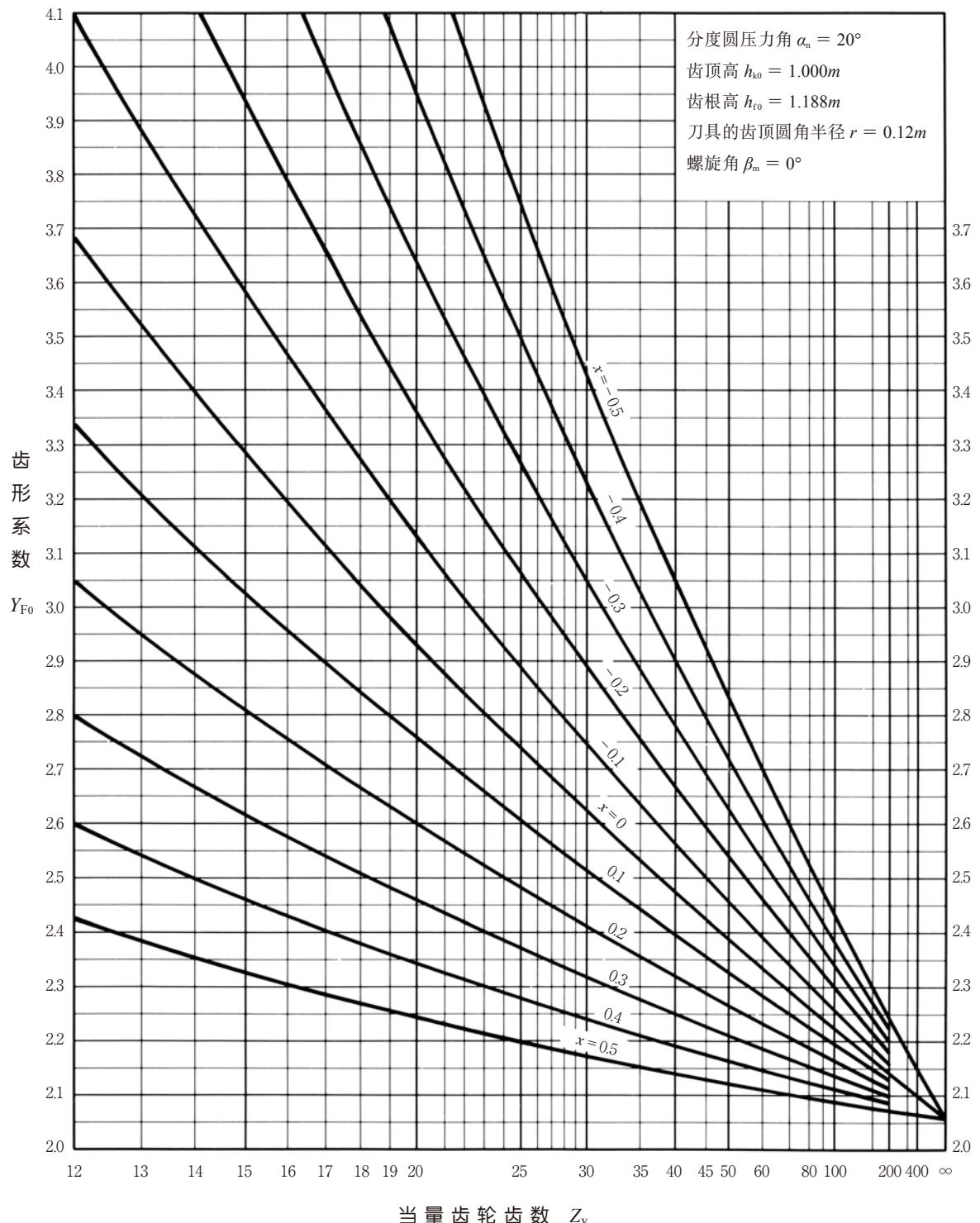
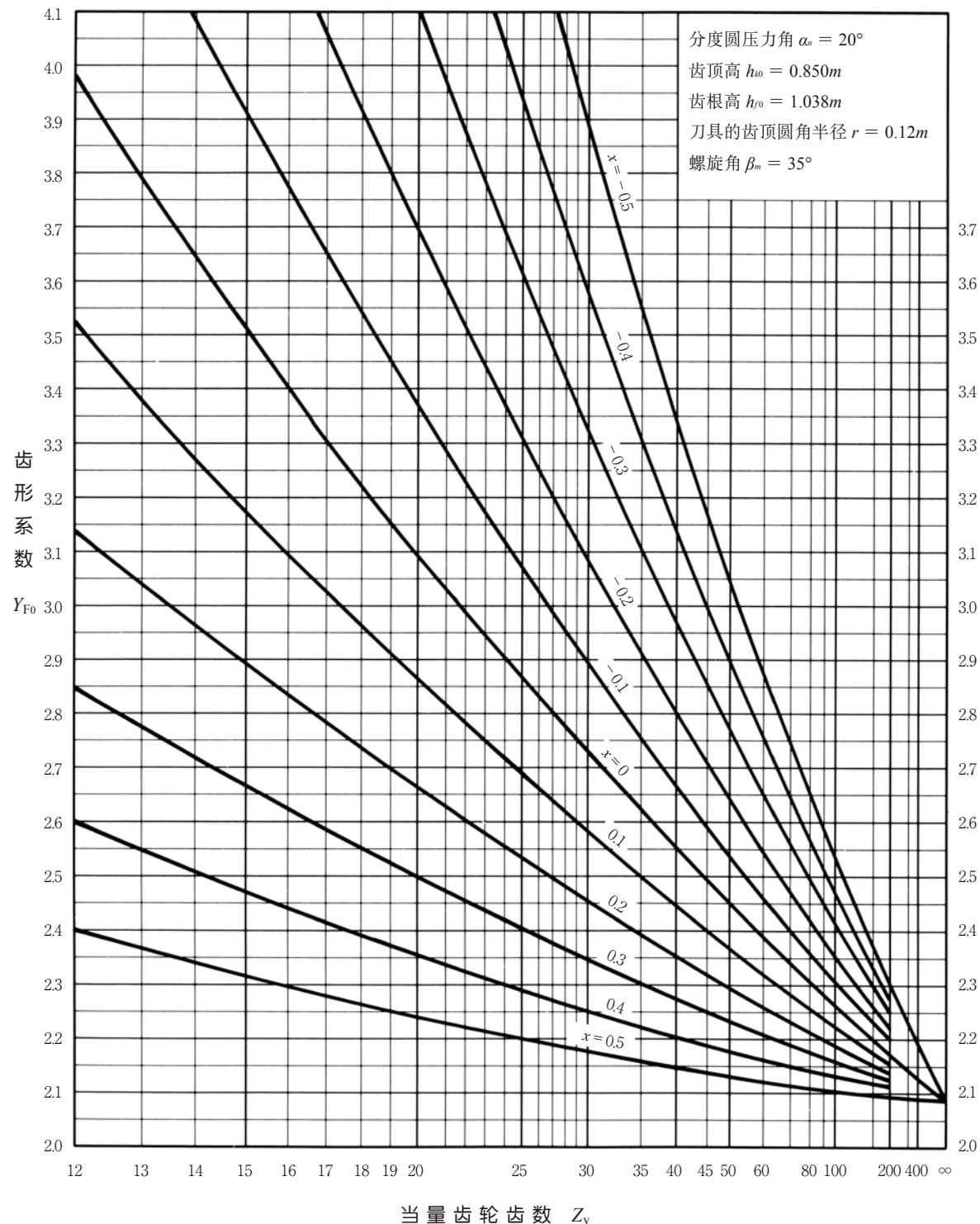
图 10.8 齿形系数 Y_{F0} (直齿锥齿轮)

图 10.9 齿形系数 Y_{F0} (弧齿锥齿轮)

(3)-3 重合度系数 Y_ε

重合度系数 Y_ε 按端面重合度 ε_a 的倒数进行计算。

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_a} \quad (10.37)$$

这里, 端面重合度 ε_a 值为

直齿锥齿轮:

$$\varepsilon_a = \frac{\sqrt{R_{vk1}^2 - R_{vg1}^2} + \sqrt{R_{vk2}^2 - R_{vg2}^2} - (R_{v1} + R_{v2}) \sin \alpha_0}{\pi m \cos \alpha_0} \quad (10.38)$$

弧齿锥齿轮:

$$\varepsilon_a = \frac{\sqrt{R_{vk1}^2 - R_{vg1}^2} + \sqrt{R_{vk2}^2 - R_{vg2}^2} - (R_{v1} + R_{v2}) \sin \alpha_s}{\pi m \cos \alpha_s}$$

表 10.17~10.19 示意了端面重合度的计算例。

其中:

R_{vk} : 背锥上当量正齿轮的齿顶圆半径 (mm)

$$R_{vk} = R_v + h_k = r_0 \sec \delta_0 + h_k$$

R_{vg} : 背锥上当量正齿轮的基圆半径 (mm)

$$\text{直齿锥齿轮} = R_v \cos \alpha_0 = r_0 \sec \delta_0 \cos \alpha_0$$

$$\text{弧齿锥齿轮} = R_v \cos \alpha_s = r_0 \sec \delta_0 \cos \alpha_s$$

$$R_v : \text{背锥距 (mm)} = r_0 \sec \delta_0$$

$$r_0 : \text{分度圆半径 (mm)} = 0.5z m$$

$$h_k : \text{大端齿顶高 (mm)}$$

$$\alpha_0 : \text{分度压力角 (度)}$$

$$\alpha_s : \text{中央端面压力角 (度)} = \tan^{-1}(\tan \alpha_n / \cos \beta_m)$$

$$\alpha_n : \text{法向分度压力角 (度)}$$

表 10.17 格里森直齿锥齿轮的端面重合度 ε_a ($\Sigma = 90^\circ$ 、 $\alpha_0 = 20^\circ$)

$\frac{z_1}{z_2}$	12	15	16	18	20	25	30	36	40	45	60
12	1.514										
15	1.529	1.572									
16	1.529	1.578	1.588								
18	1.528	1.584	1.597	1.616							
20	1.525	1.584	1.599	1.624	1.640						
25	1.518	1.577	1.595	1.625	1.650	1.689					
30	1.512	1.570	1.587	1.618	1.645	1.697	1.725				
36	1.508	1.563	1.579	1.609	1.637	1.692	1.732	1.758			
40	1.506	1.559	1.575	1.605	1.632	1.688	1.730	1.763	1.775		
45	1.503	1.556	1.571	1.600	1.626	1.681	1.725	1.763	1.781	1.794	
60	1.500	1.549	1.564	1.591	1.615	1.668	1.710	1.751	1.773	1.796	1.833

表 10.18 标准直齿锥齿轮的端面重合度 ε_a ($\Sigma = 90^\circ$ 、 $\alpha_0 = 20^\circ$)

$\frac{z_1}{z_2}$	12	15	16	18	20	25	30	36	40	45	60
12	1.514										
15	1.545	1.572									
16	1.554	1.580	1.588								
18	1.571	1.595	1.602	1.616							
20	1.585	1.608	1.615	1.628	1.640						
25	1.614	1.636	1.643	1.655	1.666	1.689					
30	1.634	1.656	1.663	1.675	1.685	1.707	1.725				
36	1.651	1.674	1.681	1.692	1.703	1.725	1.742	1.758			
40	1.659	1.683	1.689	1.702	1.712	1.734	1.751	1.767	1.775		
45	1.666	1.691	1.698	1.711	1.721	1.743	1.760	1.776	1.785	1.794	
60	1.680	1.707	1.714	1.728	1.739	1.762	1.780	1.796	1.804	1.813	1.833

表 10.19 格里森弧齿锥齿轮的端面重合度 ε_a ($\Sigma = 90^\circ$ 、 $\alpha_0 = 20^\circ$ 、 $\beta_m = 35^\circ$)

$\frac{z_1}{z_2}$	12	15	16	18	20	25	30	36	40	45	60
12	1.221										
15	1.228	1.254									
16	1.227	1.258	1.264								
18	1.225	1.260	1.269	1.280							
20	1.221	1.259	1.269	1.284	1.293						
25	1.214	1.253	1.263	1.282	1.297	1.319					
30	1.209	1.246	1.257	1.276	1.293	1.323	1.338				
36	1.204	1.240	1.251	1.270	1.286	1.319	1.341	1.355			
40	1.202	1.238	1.248	1.266	1.283	1.316	1.340	1.358	1.364		
45	1.201	1.235	1.245	1.263	1.279	1.312	1.336	1.357	1.366	1.373	
60	1.197	1.230	1.239	1.256	1.271	1.303	1.327	1.349	1.361	1.373	1.392

(3)-4 螺旋角系数 Y_β

螺旋角系数 Y_β 可由下式求出。

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq \beta_m \leq 30^\circ \text{ 时} & Y_\beta = 1 - \frac{\beta_m}{120} \\ \beta_m \geq 30^\circ \text{ 时} & Y_\beta = 0.75 \end{array} \right\} \quad (10.39)$$

(3)-5 刀具直径影响系数 Y_c

刀具直径影响系数 Y_c 可通过齿线长度 $b/\cos \beta_m$ (mm) 与刀具直径的比从表 10.20 中查出。

刀具直径不详时, 设 $Y_c = 1.0$ 。

表 10.20 刀具直径影响系数 Y_c

锥齿轮的种类	刀具直径			
	∞	齿线长度的 6 倍	齿线长度的 5 倍	齿线长度的 4 倍
直齿锥齿轮	1.15			
弧齿锥齿轮及零度齿锥齿轮	—	1.00	0.95	0.90

(3)-6 寿命系数 K_L

寿命系数 K_L 利用正齿轮及斜齿齿轮的弯曲强度计算中的表 10.2 求出。

(3)-7 相对齿根应力的尺寸系数 K_{FX}

相对齿根应力的尺寸系数 K_{FX} 根据端面模数由表 10.21 求出。

表 10.21 相对齿根应力的尺寸系数 K_{FX}

大端端面模数 m	表面非硬化齿轮	表面硬化齿轮
1.5 以 5 以下	1.0	1.0
超过 5 到 7	0.99	0.98
超过 7 到 9	0.98	0.96
超过 9 到 11	0.97	0.94
超过 11 到 13	0.96	0.92
超过 13 到 15	0.94	0.90
超过 15 到 17	0.93	0.88
超过 17 到 19	0.92	0.86
超过 19 到 22	0.90	0.83
超过 22 到 25	0.88	0.80

(3)-8 齿向载荷分布系数 K_M

齿向载荷分布系数 K_M 通过表 10.22 及表 10.23 求出。

表 10.22 弧齿齿轮, 零度锥齿轮及鼓型加工的直齿锥齿轮的齿向载荷分布系数 K_M

		两齿轮双支撑跨装	一轮悬臂安装	两齿轮悬臂安装
轴, 齿轮箱等的刚性	特别坚固	1.2	1.35	1.5
	普通	1.4	1.6	1.8
	比较弱	1.55	1.75	2.0

表 10.23 无鼓形加工直齿锥齿轮的齿向载荷分布系数 K_M

		两齿轮双支撑跨装	一轮悬臂安装	两齿轮悬臂安装
轴, 齿轮箱等的刚性	特别坚固	1.05	1.15	1.35
	普通	1.6	1.8	2.1
	比较弱	2.2	2.5	2.8

(3)-9 动载系数 K_V

动载系数 K_V 可根据齿轮的精度及大端截圆上的切向速度由表 10.24 中求出。

表 10.24 动载系数 K_V

JIS B 1704 的精度等级	圆周速度 (m/s)						
	1 以下	超过 3 以下到 1 到	超过 3 到 5 到	超过 5 到 8 到	超过 8 到 12 到	超过 12 到 18 到	超过 18 到 25 到
1	1.0	1.1	1.15	1.2	1.3	1.5	1.7
2	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	
3	1.0	1.3	1.4	1.5	1.7		
4	1.1	1.4	1.5	1.7			
5	1.2	1.5	1.7				
6	1.4	1.7					

(3)-10 过载系数 K_O

过载系数 K_O 通过正齿轮及斜齿齿轮的弯曲强度计算公式 (10.12) 及表 10.4 求出。

(3)-11 可靠性系数 K_R

可靠性系数 K_R 设定如下。

- ① 一般情况下 $K_R = 1.2$
- ② 明确知道齿轮的使用条件, 各个系数都已适当的给予设定的情况下 $K_R = 1.0$
- ③ 齿轮的使用条件不详, 各个系数的值也不确定的情况下 $K_R = 1.4$

(3)-12 容许齿根弯曲应力 σ_{Flim}

以正齿轮及斜齿齿轮的弯曲强度计算公式中容许齿根弯曲应力 σ_{Flim} 为基准。



(4) 计算例

格里森直齿锥齿轮要素

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	轴交角	Σ	度		90°
2	模数	m	mm		2
3	压力角	α_0	度	20°	
4	中央螺旋角	β_m		0°	
5	齿数	z		20	40
6	分度圆直径	d_0	mm	40.000	80.000
7	分锥角	δ_0	度	26.56505°	63.43495°
8	大端锥距	R_a	mm	44.721	
9	齿宽	b		15	
10	中央分度圆直径	d_m		33.292	66.584
11	精度			JIS 3	JIS 3
12	最后加工机械			格里森 No.104	
13	齿面光洁度			12.5S	12.5S
14	转数	n	rpm	1500	750
15	切向速度	v	m/s	3.142	
16	负载方向			单方向	
17	啮合次数			10 ⁷ 回以上	
18	齿轮支撑方法			两齿轮单侧支撑	
19	轴及齿轮箱的刚性			普通	
20	材料			SCM415	
20	热处理			渗碳淬火	
22	表面硬度			H _v 600 – 640	
23	心部硬度			H _B 260 – 280	
24	有效渗碳深度		mm	0.3 – 0.5	

格里森直齿锥齿轮的弯曲强度计算

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	中央螺旋角	β_m	度		0°
2	容许齿根弯曲应力	σ_{Flim}	kgf/mm ²	42.5	42.5
3	模数	m	mm	2	
4	齿宽	b		15	
5	大端锥距	R_a		44.721	
6	齿形系数	Y_F		2.369	2.387
7	重合度系数	Y_e		0.613	
8	螺旋角系数	Y_β		1.0	
9	刀具直径影响系数	Y_C		1.15	
10	寿命系数	K_L		1.0	
11	尺寸系数	K_{FX}		1.0	
12	齿向载荷分布系数	K_M		1.8	1.8
13	动载系数	K_V		1.4	
14	过载系数	K_O		1.0	
15	可靠性系数	K_R		1.2	
16	中央节圆上的容许切向力	F_{Flim}	kgf	178.6	177.3



10.4 锥齿轮的齿面强度计算公式 JGMA 404-01: 1977

此标准适用于使用在一般产业机械上动力传动范围的锥齿轮。

大端端面模数	m	1.5 ~ 25mm
大端分度圆直径	d_0	1600mm 以下 (直齿锥齿轮) 1000mm 以下 (弧齿锥齿轮)
大端切向速度	v	25m/s 以下
转数	n	3600rpm 以下

(1) 基本换算公式

使用计算弯曲强度时所使用的方程式 (10.27)~(10.29)。

(2) 齿面强度的计算公式

要想满足齿面强度, 中央分度圆上的名义切向力 F_{tm} 必须小于根据容许赫兹应力计算得出的分度节圆上的容许切向力 F_{tmlim}

$$F_{tm} \leq F_{tmlim} \quad (10.40)$$

另外, 由中央分度圆上的名义切向力 F_{tm} 求得的赫兹应力 σ_H 必须小于容许赫兹应力 σ_{Hlim}

$$\sigma_H \leq \sigma_{Hlim} \quad (10.41)$$

中央分度圆上的容许切向力 F_{tmlim} (kgf) 可以根据下式求出。

$$F_{tmlim} = \left(\frac{\sigma_{Hlim}}{Z_M} \right)^2 \frac{d_{01}}{\cos \delta_{01}} \frac{R_a - 0.5b}{R_a} b \frac{i^2}{i^2 + 1} \left(\frac{K_{HL} Z_L Z_R Z_V Z_W K_{HX}}{Z_H Z_e Z_\beta} \right)^2 \frac{1}{K_{H\beta} K_V K_O} \frac{1}{C_R^2} \quad (10.42)$$

赫兹应力 σ_H (kgf/mm²) 可以根据下式求出。

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\cos \delta_{01} F_{tm}}{d_{01} b} \frac{i^2 + 1}{i^2} \frac{R_a}{R_a - 0.5b} \frac{Z_H Z_M Z_e Z_\beta}{K_{HL} Z_L Z_R Z_V Z_W K_{HX}} \sqrt{K_{H\beta} K_V K_O} C_R} \quad (10.43)$$

(3) 各种系数的计算

(3)-1 齿宽 b

齿宽是指分锥上的齿宽。

大小齿轮的齿宽不同时, 取窄齿面为齿宽值 b 。

(3)-2 区域系数 Z_H

区域系数 Z_H 利用下式进行计算。

$$Z_H = \sqrt{\frac{2 \cos \beta_g}{\sin \alpha_s \cos \alpha_s}} \quad (10.44)$$

其中 β_m : 中央螺旋角

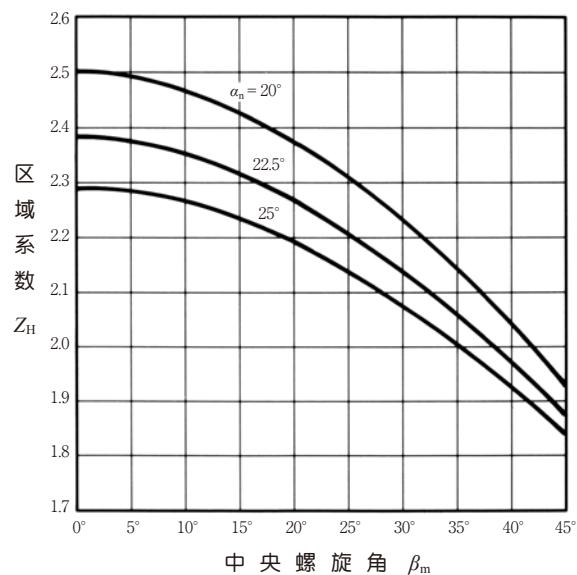
α_n : 法向分度压力角

$$\alpha_s : \text{中央端面压力角} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_m} \right)$$

$$\beta_g = \tan^{-1} (\tan \beta_m \cos \alpha_s)$$

法向分度压力角 α_n 为 20°、22.5° 及 25° 时, 区域系数 Z_H 可以由图 10.10 中查出。

图 10.10 区域系数 Z_H



(3)-3 弹性系数 Z_M

弹性系数 Z_M 利用正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算中的表 10.9 求出。

(3)-4 重合度系数 Z_e

重合度系数 Z_e 通过下式进行计算。

直齿锥齿轮: $Z_e = 1.0$

弧齿锥齿轮:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_\beta \leq 1 \quad Z_e = \sqrt{1 - \varepsilon_\beta + \frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_a}} \\ \varepsilon_\beta > 1 \quad Z_e = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_a}} \end{array} \right\} \quad (10.45)$$

其中 ε_a : 端面重合度

ε_β : 纵向重合度

$$\varepsilon_\beta = \frac{R_a}{R_a - 0.5b} \frac{b \tan \beta_m}{\pi m} \quad (10.45a)$$

(3)-5 相对齿面强度的螺旋角系数 Z_β

相对齿面强度的螺旋角系数 Z_β 正确的计算很困难, 设定为 1.0。

$$Z_\beta = 1.0 \quad (10.46)$$

(3)-6 相对齿面强度的寿命系数 K_{HL}

相对齿面强度的寿命系数 K_{HL} 可通过正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算中的表 10.10 求出。

(3)-7 润滑油系数 Z_L

润滑油系数 Z_L 可通过正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算中的图 10.3 求出。

(3)-8 粗糙度系数 Z_R

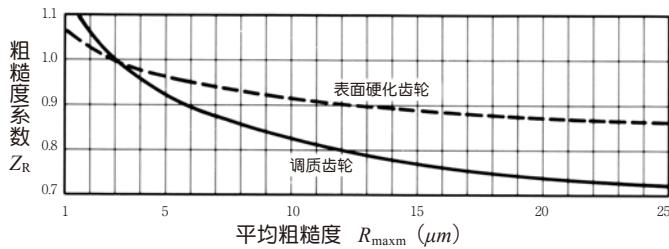
粗糙度系数 Z_R 可根据齿面的平均粗糙度 R_{maxm} (μm) 从图 10.11 中查出。平均粗糙度 R_{maxm} 的数值可根据大小齿轮的表面粗糙度 R_{max1} 和 R_{max2} 及中心距 a (mm) 通过下式求出。

$$R_{maxm} = \frac{R_{max1} + R_{max2}}{2} \sqrt[3]{\frac{100}{a}} \quad (\mu m) \quad (10.47)$$

其中 $a = R_m (\sin \delta_{01} + \cos \delta_{01})$

$$R_m = R_a - b/2$$

图 10.11 粗糙度系数 Z_R

(3)-9 润滑速度系数 Z_V

润滑速度系数 Z_V 可根据正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算中的图 10.5 中求出。

(3)-10 工作硬化系数 Z_W

工作硬化系数 Z_W 仅适用于经过淬火磨削的大小齿轮, 可利用下式求出。

$$Z_W = 1.2 - \frac{H_{B2} - 130}{1700} \quad (10.48)$$

其中 H_{B2} : 大齿轮的齿面布氏硬度

条件 $130 \leq H_{B2} \leq 470$

不满足此条件时, 设

$$Z_W = 1.0 \quad (10.49)$$

(3)-11 相对齿面强度的尺寸系数 K_{HX}

因为缺乏详细的资料, 无法正确的规定相对齿面强度的尺寸系数 K_{HX} , 设定为 1.0。

$$K_{HX} = 1.0 \quad (10.50)$$

(3)-12 相对齿面强度的齿向载荷分布系数 K_{HP}

相对齿面强度的齿向载荷分布系数通过表 10.25 及表 10.26 求出。

但是, 当两齿轮都未经过表面硬化处理时, 数值取表中数值的 90%。

表 10.25 弧齿齿轮(含零度锥齿轮)及鼓型加工的直齿锥齿轮的齿向载荷分布系数 K_{HP}

轴, 齿轮箱等的刚性	齿 轮 的 支 持 条 件		
	两齿轮 双支撑跨装	一 轮 悬臂安装	两齿轮 悬臂安装
特 别 坚 固	1.3	1.5	1.7
普 通	1.6	1.85	2.1
比 较 弱	1.75	2.1	2.5

表 10.26 不经过鼓型加工的直齿锥齿轮的齿向载荷分布系数 K_{HP}

轴, 齿轮箱等的刚性	齿 轮 的 支 持 条 件		
	两齿轮 双支撑跨装	一 轮 悬臂安装	两齿轮 悬臂安装
特 别 坚 固	1.3	1.5	1.7
普 通	1.85	2.1	2.6
比 较 弱	2.8	3.3	3.8

(3)-13 动载系数 K_V

动载系数 K_V 可根据锥齿轮的弯曲强度计算中的表 10.24 中求出。

(3)-14 过载系数 K_O

过载系数 K_O 可通过正齿轮及斜齿齿轮的弯曲强度计算公式 (10.12) 或表 10.4 求出。

(3)-15 相对齿面损伤(点蚀)的安全系数 C_R

相对齿面损伤(点蚀)的安全系数 C_R 因为受内部及外部的各种因素影响, 设定为 1.15。

(3)-16 接触疲劳极限 σ_{Hlim}

齿轮的接触疲劳极限值 σ_{Hlim} 由正齿轮及斜齿齿轮的齿面强度计算中的表 10.12~10.16 中求出。



(4) 计算例

格里森直齿锥齿轮要素

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	轴交角	Σ	度	90°	
2	模数	m	mm	2	
3	压力角	α_0	度	20°	
4	中央螺旋角	β_m		0°	
5	齿数	z		20	40
6	分度圆直径	d_0	mm	40.000	80.000
7	分锥角	δ_0	度	26.56505°	63.43495°
8	大端锥距	R_a	mm	44.721	
9	齿宽	b		15	
10	中央分度圆直径	d_m		33.292	66.584
11	精度			JIS 3	JIS 3
12	最后加工机械			格里森 No.104	
13	齿面光洁度			12.5S	12.5S
14	转数	n	rpm	1500	750
15	切向速度	v	m/s	3.142	
16	润滑油的动粘度		cSt	100	
17	齿轮支撑方法			两齿轮单侧支撑	
18	轴及齿轮箱的刚性			普通	
19	啮合次数			10 ⁷ 回以上	
20	材料			SCM415	
21	热处理			渗碳淬火	
22	表面硬度			H _V 600 – 640	
23	心部硬度			H _B 260 – 280	
24	有效渗碳深度			0.3 – 0.5	

格里森直齿锥齿轮的齿面强度计算

序号	项 目	代号	单位	小齿轮	大齿轮
1	容许齿根弯曲应力	σ_{Hlim}	kgf/mm ²	164	
2	小齿轮的分度圆直径	d_{01}	mm	40.000	
3	小齿轮的分锥角	δ_{01}	度	26.56505°	
4	大端锥距	R_a	mm	44.721	
5	齿宽	b		15	
6	齿数比 (z_2/z_1)	i		2	
7	区域系数	Z_H		2.495	
8	弹性系数	Z_M	(kgf/mm ²) ^{0.5}	60.6	
9	重合度系数	Z_e		1.0	
10	螺旋角系数	Z_β		1.0	
11	寿命系数	K_{HL}		1.0	
12	润滑油系数	Z_L		1.0	
13	粗糙度系数	Z_R		0.89	
14	润滑速度系数	Z_V		0.97	
15	工作硬化系数	Z_W		1.0	
16	尺寸系数	K_{HX}		1.0	
17	齿向载荷分布系数	$K_{H\beta}$		2.1	
18	动载系数	K_V		1.4	
19	过载系数	K_O		1.0	
20	可靠性系数	C_R		1.15	
21	中央节圆上的容许切向力	F_{lim}	kgf	101.3	101.3



10.5 圆柱蜗杆副的强度计算公式

JGMA 405-01 : 1978

此标准适用于一般产业机械中使用在动力传动范围的圆柱蜗杆蜗轮。

轴向模数	m_a	1 ~ 25mm
蜗轮的分度圆直径		
滑动速度	d_{02}	900mm 以下
蜗轮的转数	v_s	30m/s 以下

n_2 600rpm 以下

其中

T_2 : 蜗轮的名义转矩 (kgf·m)

T_1 : 蜗杆的名义转矩 (kgf·m)

F_t : 蜗轮节圆上的名义切向力 (kgf)

d_{02} : 蜗轮的分度圆直径 (mm)

i : 齿数比 = z_2/z_w

η_R : 由蜗杆驱动时的蜗杆副传动效率 (不考虑轴承损失及搅拌润滑油损失)

μ : 摩擦系数

(1) 基本换算公式

(1)-1 滑动速度 (m/s)

$$v_s = \frac{d_{01} n_1}{19100 \cos \gamma_0} \quad (10.51)$$

(1)-2 转矩, 切向力及效率

① 蜗杆为驱动轮时 (减速)

$$T_2 = \frac{F_t d_{02}}{2000}$$

$$T_1 = \frac{T_2}{i \eta_R} = \frac{F_t d_{02}}{2000 i \eta_R}$$

$$\eta_R = \frac{\tan \gamma_0 \left(1 - \tan \gamma_0 \frac{\mu}{\cos \alpha_n} \right)}{\tan \gamma_0 + \frac{\mu}{\cos \alpha_n}}$$

(10.52)

② 蜗轮为驱动轮时 (增速)

$$T_2 = \frac{F_t d_{02}}{2000}$$

$$T_1 = \frac{T_2 \eta_1}{i} = \frac{F_t d_{02} \eta_1}{2000 i} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (10.53)$$

$$\eta_1 = \frac{\tan \gamma_0 - \frac{\mu}{\cos \alpha_n}}{\tan \gamma_0 \left(1 + \tan \gamma_0 \frac{\mu}{\cos \alpha_n} \right)} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

其中 η_1 : 由蜗轮驱动时蜗杆副的传动效率 (不包括轴承及搅拌润滑油的损失)

图 10.12 摩擦系数

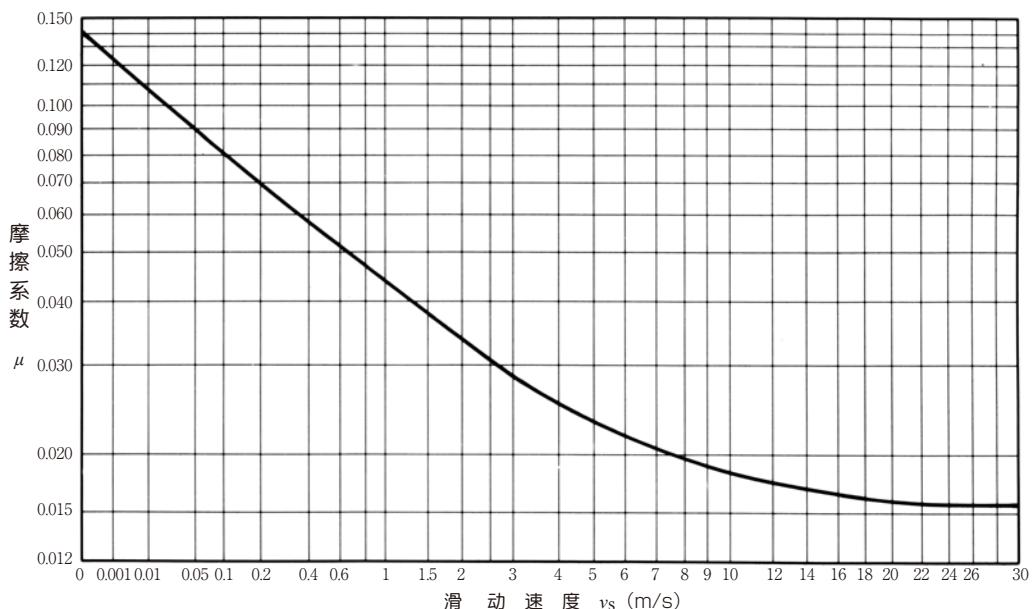


表 10.27 各种材料的组合及摩擦系数 μ

材料的组合	μ 值
铸铁和青铜	图 10.12 的摩擦系数的 1.15 倍
铸铁和铸铁	图 10.12 的摩擦系数的 1.33 倍
淬火钢和铝	图 10.12 的摩擦系数的 1.33 倍
钢和钢	图 10.12 的摩擦系数的 2.0 倍

③ 摩擦系数 μ 的数值

经过渗碳淬火, 齿面磨削的蜗杆和磷青铜制的蜗轮组合时, 摩擦系数 μ 的数值根据滑动速度 v_s 从图 10.12 中求出。



(2) 相对齿面强度的容许负载的计算公式

(2)-1 基本负载容量的计算

根据给定的圆柱蜗杆副的尺寸及材质, 相对此齿面强度的基本负载容量利用下式进行计算。

容许切向力 F_{tlim} (kgf)

$$F_{\text{tlim}} = 3.82 K_v K_n S_{\text{clim}} Z d_{02}^{0.8} m_a \frac{Z_L Z_M Z_R}{K_C} \quad (10.54)$$

容许蜗轮转矩 $T_{2\text{lim}}$ (kgf·m)

$$T_{2\text{lim}} = 0.00191 K_v K_n S_{\text{clim}} Z d_{02}^{1.8} m_a \frac{Z_L Z_M Z_R}{K_C} \quad (10.55)$$

(2)-2 当量负载的计算

据公式 10.54 和 10.55 计算出的基本负载容量是在无冲击的情况下, 持续使用 26000 小时的条件下的极限值。

但是, 起动时的冲击转矩在额定转矩^(注1)的 200% 以下, 起动次数 1 小时不超过两次的情况下, 做为无冲击看待。

在不符合上述条件时, 也就是说, 当期待寿命超过或不足 26000 小时的情况下, 有冲击时, 以及起动时的转矩或启动转数超过如上所述的情况下, 需要计算当量负载并与基本负载容量相比较。

当量负载的计算方法如下式。

当量切向力 F_{te} (kgf)

$$F_{\text{te}} = F_{\text{t}} K_h K_s \quad (10.56)$$

当量蜗轮转矩 $T_{2\text{e}}$ (kgf·m)

$$T_{2\text{e}} = T_2 K_h K_s \quad (10.57)$$

【注 1】 额定转矩是指原动机(或被动机械)在额定负载下运转的情况下蜗轮的转矩。

((2)-3 负载的判断

① 无冲击, 期待寿命能达到 26000 小时的场合, 需要满足下列条件。

$$F_{\text{t}} \leq F_{\text{tlim}} \quad \text{或} \quad T_2 \leq T_{2\text{lim}} \quad (10.58)$$

② 除上记以外的情况下, 需要满足下列条件。

$$F_{\text{te}} \leq F_{\text{tlim}} \quad \text{或} \quad T_{2\text{e}} \leq T_{2\text{lim}} \quad (10.59)$$

备考: 变动负载的情况下, 需要使用综合转矩 T_{2c} 来进行负载的判断。

(3) 各种系数的计算方法

(3)-1 蜗轮的齿宽 b_2 (mm)

蜗轮的齿宽 b_2 参照图 10.13。

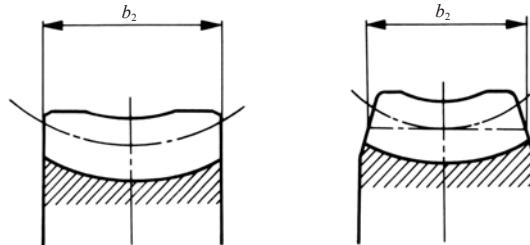


图 10.13 蜗轮的齿宽 b_2

(3)-2 领域系数 Z

① $b_2 < 2.3m_a \sqrt{Q + 1}$ 时

$$Z = (\text{区域系数基值}) \times \frac{b_2}{2m_a \sqrt{Q + 1}}$$

② $b_2 \geq 2.3m_a \sqrt{Q + 1}$ 时

$$Z = (\text{区域系数基值}) \times 1.15$$

(10.60)

表 10.28 区域系数基值

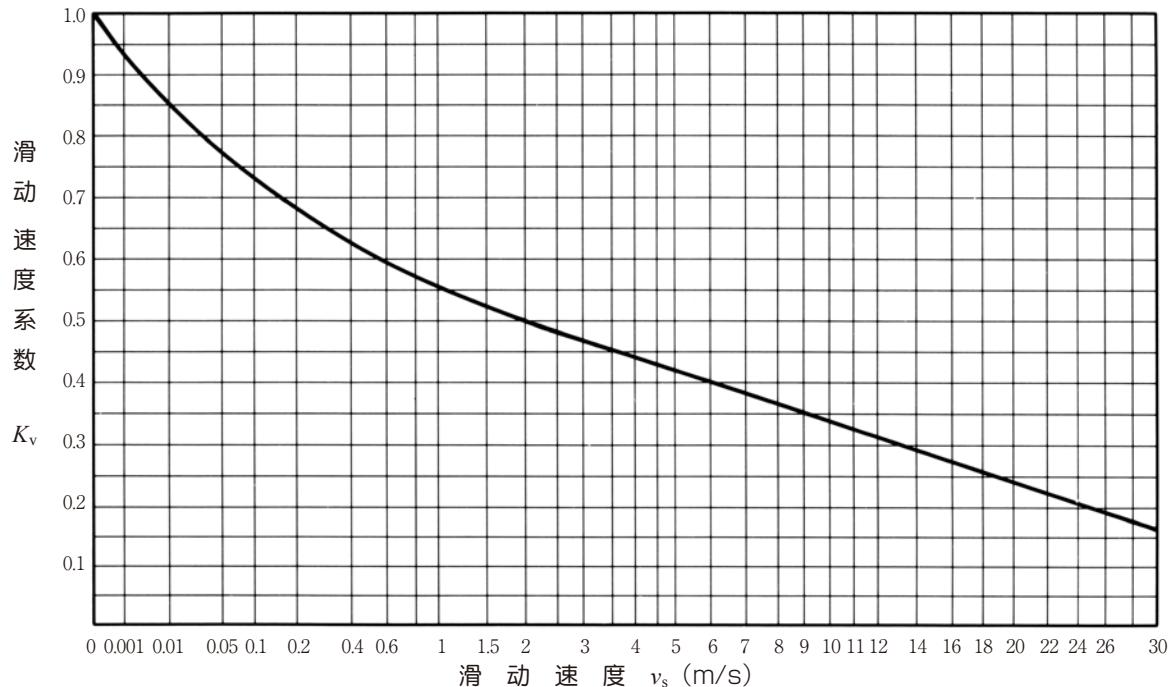
$z_w \backslash Q$	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	17	20
1	1.052	1.065	1.084	1.107	1.128	1.137	1.143	1.160	1.202	1.260	1.318	1.402	1.508
2	1.055	1.099	1.144	1.183	1.214	1.223	1.231	1.250	1.280	1.320	1.360	1.447	1.575
3	0.989	1.109	1.209	1.260	1.305	1.333	1.350	1.365	1.393	1.422	1.442	1.532	1.674
4	0.981	1.098	1.204	1.301	1.380	1.428	1.460	1.490	1.515	1.545	1.570	1.666	1.798

其中 Q : 直径系数 $= \frac{d_{01}}{m_a}$

z_w : 蜗杆的头数

(3)-3 滑动速度系数 K_v

滑动速度系数 K_v 依据滑动速度 v_s 在图 10.14 中求出。

图 10.14 滑动速度系数 K_v (3)-4 转数系数 K_n

转数系数 K_n 根据蜗轮的转数 n_2 (rpm) 在图 10.15 中求出。

(3)-5 润滑油系数 Z_L

使用具有适当的粘度并加入了极压添加剂的材料润滑油时, $Z_L = 1.0$ 。

蜗杆副装置中组装有轴承等部件时, 考虑轴承等的润滑不得不使用低粘度润滑油时, 必须保证 $Z_L < 1.0$ 。

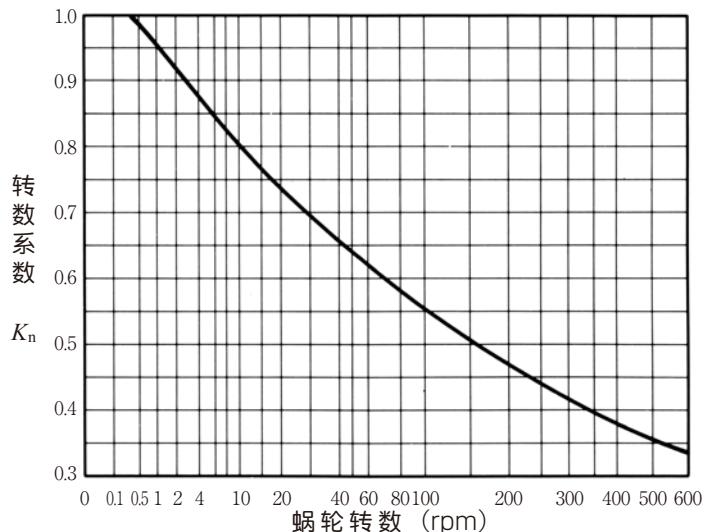
图 10.15 转数系数 K_n 

表 10.29 动粘度推荐值

单位: cSt/37.8°C

运 转 油 温		滑 动 速 度 m/s		
运转最高油温	起动时油温	不满 2.5	2.5 以上不满 5	5 以上
0°C 以上不满 10°C	-10°C 以上不满 0°C	110 ~ 130	110 ~ 130	110 ~ 130
	0°C 以上	110 ~ 150	110 ~ 150	110 ~ 150
10°C 以上不满 30°C	0°C 以上	200 ~ 245	150 ~ 200	150 ~ 200
30°C 以上不满 55°C	0°C 以上	350 ~ 510	245 ~ 350	200 ~ 245
55°C 以上不满 80°C	0°C 以上	510 ~ 780	350 ~ 510	245 ~ 350
80°C 以上不满 100°C	0°C 以上	900 ~ 1100	510 ~ 780	350 ~ 510

(3)-6 润滑方法系数 Z_M

润滑方法系数 Z_M 从表 10.30 中求出。

表 10.30 润滑方法系数 Z_M

滑动速度 m/s	10 不满	10 以上不满 14	14 以上
油 沾 润 滑	1.0	0.85	—
强 制 润 滑	1.0	1.0	1.0

(3)-7 粗糙度系数 Z_R

粗糙度系数 Z_R 是考虑蜗杆及蜗轮齿面的光洁度对点蚀及磨损产生影响的系数。因为没有充分的资料对次系数做出正确的规定, 所以设定为 1。

$$Z_R = 1.0 \quad (10.61)$$

但是, 齿面的粗糙度要保证蜗杆在 3S 以内, 蜗轮则在 12S 以内。

齿面的粗糙度超过上述范围时, 粗糙度系数有必要取值小于 1.0。

(3)-8 齿接触系数 K_C

齿接触是否良好对负载容量产生很大影响。

但是, 因为缺乏做出正确规定的资料, 现状是对相当于 JIS B 1741 标准中齿轮的齿接触分类 A 的齿接触系数 K_C 设定为 1.0。

$$K_C = 1.0 \quad (10.62)$$

齿接触为分类 B 和 C 时, 取 K_C 大于 1.0。

表 10.31 列出了 JIS 标准中的齿接触比例及与之对应的 K_C 概略值。

表 10.31 齿接触分类与齿接触系数 K_C 的概略值

分类	齿接触的比例		K_C
	齿线方向	齿高方向	
A	有效齿线长度的 50% 以上	有效齿高的 40% 以上	1.0
B	有效齿线长度的 35% 以上	有效齿高的 30% 以上	1.3 ~ 1.4
C	有效齿线长度的 20% 以上	有效齿高的 20% 以上	1.5 ~ 1.7

(3)-9 起动系数 K_S

起动时的转矩不超过定额转矩的 200% 时, 起动系数 K_S 由表 10.32 中查出。

表 10.32 起动系数 K_S

每小时中的起动次数	不满 2 次	2~5 次	5~10 次	10 次以上
K_S	1.0	1.07	1.13	1.18

(3)-10 时间系数 K_h

时间系数 K_h 根据期待寿命时间及冲击的程度由表 10.33 中求出。

期待寿命时间没有列入表中时, 利用插值法计算。

表 10.33 时间系数 K_h

原动机侧传来的冲击	期待寿命时间	K_h		
		由被动机械传来的冲击		
		均匀负载	中等冲击	剧烈冲击
均匀负载 (电动机, 汽轮机 及油压发动机)	1500 小时	0.80	0.90	1.0
	5000 "	0.90	1.0	1.25
	26000 " ⁽¹⁾	1.0	1.25	1.50
	60000 "	1.25	1.50	1.75
轻度冲击 (多气筒机构)	1500 小时	0.90	1.0	1.25
	5000 "	1.0	1.25	1.50
	26000 " ⁽¹⁾	1.25	1.50	1.75
	60000 "	1.50	1.75	2.0
中度冲击 (单气筒机构)	1500 小时	1.0	1.25	1.50
	5000 "	1.25	1.50	1.75
	26000 " ⁽¹⁾	1.50	1.70	2.0
	60000 "	1.75	2.0	2.25

注(1) 每天运转 10 小时, 一年中运转 260 天, 相当于 10 年。

(3)-11 容许应力系数 S_{clim}

相对齿面强度的容许应力系数 S_{clim} 及最大滑动速度列于表 10.34。

表 10.34 相对齿面强度的容许应力系数 S_{clim}

蜗轮的材料	蜗杆的材料	S_{clim}	最大滑动速度 ⁽¹⁾ m/s
磷青铜离心铸造件	合金钢渗碳淬火	1.55	30
	合金钢 H _B 400	1.34	20
	合金钢 H _B 250	1.12	10
磷青铜冷硬铸件	合金钢渗碳淬火	1.27	30
	合金钢 H _B 400	1.05	20
	合金钢 H _B 250	0.88	10
磷青铜砂型铸件 或锻造件	合金钢渗碳淬火	1.05	30
	合金钢 H _B 400	0.84	20
	合金钢 H _B 250	0.70	10
铝青铜	合金钢渗碳淬火	0.84	20
	合金钢 H _B 400	0.67	15
	合金钢 H _B 250	0.56	10
黄铜	合金钢 H _B 400	0.49	8
	合金钢 H _B 250	0.42	5
普通铸铁 (珠光体)	同左。但是要求比蜗轮的硬度高。	0.70	5
	磷青铜铸造件 或锻造件	0.63	2.5
	同左。但是要求比蜗轮的硬度高。	0.42	2.5

注(1) 使用表中的 S_{clim} 值进行计算时可以得到的最高滑动速度。即使在所计算的容许负载以下使用时, 只要滑动速度超过这个极限值, 就会出现烧结的危险。



(4) 计算例

圆柱蜗杆蜗轮要素

序号	项 目	代 号	单 位	蜗 杆	蜗 轮
1	轴向模数	m_a	mm	2	
2	法向压力角	α_n	度		20°
3	头数·齿数	$z_w \cdot z_2$		1	40
4	分度圆直径	d_0	mm	28	80
5	导程角	γ_0	度		4.08562°
6	直径系数	Q		14	—
7	齿宽	b	mm	()	20
8	最后加工			磨削	滚刀加工
9	齿面光洁度			3.2S	12.5S
10	转数	n	rpm	1500	37.5
11	滑动速度	v_s	m/s		2.205
12	材料			S45C	A7BC2
13	热处理			高频淬火	—
14	表面硬度			$H_s 63 - 68$	—

圆柱蜗杆副的强度计算

序 号	项 目	代 号	单 位	蜗 轮
1	轴向模数	m_a	mm	2
2	蜗轮的分度圆直径	d_{02}		80
3	区域系数	Z		1.5157
4	滑动速度系数	K_v		0.49
5	转数系数	K_n		0.66
6	润滑油系数	Z_L		1.0
7	润滑法系数	Z_M		1.0
8	粗糙度系数	Z_R		1.0
9	齿接触系数	K_C		1.0
10	容许应力系数	S_{clim}		0.67
11	容许切向力	F_{tlim}	kgf	83.5



11 塑料齿轮的设计

11.1 尼龙 MC901 和 DURACOM M90 的物理性能

MC 是 MONO CAST 的简称, 实质上是被称为尼龙 6 的聚酰胺树脂。

DURACOM(杜铬钢)M90 是被称为聚缩醛的结晶性热可塑工程塑料。

这些塑料的特点是:

- 有自润性, 必要时可以无润滑运转。
- 可以减少噪音。
- 重量轻, 具有优秀的耐腐蚀性。

拥有上述优点的反面, 做为塑料材的一般性质, 性能容易受温度上升及吸收水分的影响。这些缺点使塑料材做为齿轮等使用在机械重要部件上时成为问题点。为此, 关于塑料材料, 做为一般的方法, 需要预知其在具有代表性的条件下的性质, 并以此为基做出概略设计, 经过反复的实用试验后, 再正式投入使用。

(1) 机械特性

表 11.1 示意了标准状态下的机械特性。

表 11.1 MC901 尼龙和 M90 DURACOM 的机械特性

性 质	试验法 ASTM	单 位	尼 龙 MC901	DURACOM M90
拉 伸 强 度	D-638	kgf/cm ²	800~980	620
延 伸 率	D-638	%	10~50	60
拉伸弹性模量 (纵弹性模量)	D-638	10 ³ kgf/cm ²	30~35	28.8
抗压强度屈服点	D-695	kgf/cm ²	940~1050	—
5% 变 形	D-695	kgf/cm ²	940~970	—
压缩弹性模量	D-695	10 ³ kgf/cm ²	33~36	—
剪 切 强 度	D-732	kgf/cm ²	735~805	540
洛 氏 硬 度	D-785	R 标度	115~120	80
弯 曲 强 度	D-790	kgf/cm ²	980~1120	980
比 重 (23°C)	D-792	—	1.15~1.17	1.41
泊 桑 比	—	—	0.40	0.35

所有机械特性都有随温度上升强度下降的倾向。

(2) 温度特性

塑料材料与金属材料相比较, 尺寸受温度的影响变化大, 在使用时必须多加注意。

在这里, 列出了塑料材料的温度性质(表 11.2) 及载荷挠曲温度(表 11.3)。

表 11.2 各种塑料材料温度特性

性 质	测试方法 ASTM	单 位	MC		66 尼龙	缩醛 树脂	聚四 氟 乙烯
			901	900NC			
热 传 导 率	C-177	10 ⁻¹ Kcal/ mhr · °C	2		2.11		2.16
线膨胀系数	D-696	10 ⁻⁵ / °C	9	6.5	10~15	9	10
比 热	—	cal/ °C · g	0.4		0.4		0.25
载荷挠曲温度	D-648	18.6kgf/cm ²	160~200	200 以上	66	110	56
	D-648	4.6kgf/cm ²	200~215	215 以上	182	158	120
连续使用温度	—	°C	120	150	120	95	260
负荷变形率 (140kgf/cm ² 、50°C)	D-621	%	0.65				
熔 点		°C	220~223	220~223			165

◆ MC 尼龙 (MC901) 制齿条尺寸随温度变化量的计算例

设定产品型号: PR2-1000 (全长 1010 mm)

假设产品使用前

• 环境温度 20°C = 产品温度 20°C

• 全长 1010 mm

假设温度上升量为 20°C

• 20°C → 40°C

线膨胀系数

• $9 \times 10^{-5}/\text{°C}$

计算方法

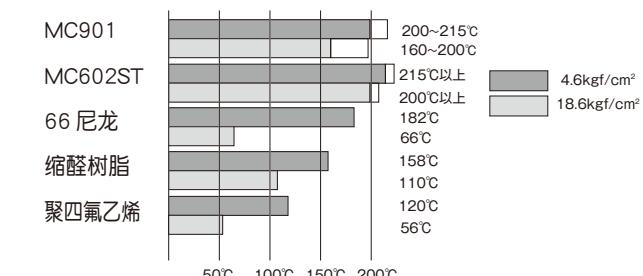
尺寸变化量 = 线膨胀系数 × 长度 × 温差

$$= 9 \times 10^{-5}/\text{°C} \times 1010 \text{ mm} \times 20\text{ °C}$$

$$= 1.818 \text{ mm}$$

MC 尼龙制齿条 PR2-1000 (全长 1010 mm) 在温度上升 20°C 时长度变化大约为 1.8 mm 左右。

表 11.3 各种塑料材的载荷挠曲温度 (ASTM-D648)



※塑料材在同一条件下长时间连续放置后判断其不产生影响的温度恐怕比较困难, 一般的是定为比载荷挠曲温度低 20~30°C。或者, 使用者依据多年积累的经验值进行判断。低温下的使用可能温度, 资料等的记载很少, 用户只能参考脆化温度 (-30~-50°C) 同时依据经验做出判断。



(3) 吸水性

塑料材料一般具有吸水性。受吸水的影响机械性能以及耐磨性能等下降。

表 11.3 中,列出了尼龙 MC901 和 DURACOM M90 的吸水率。

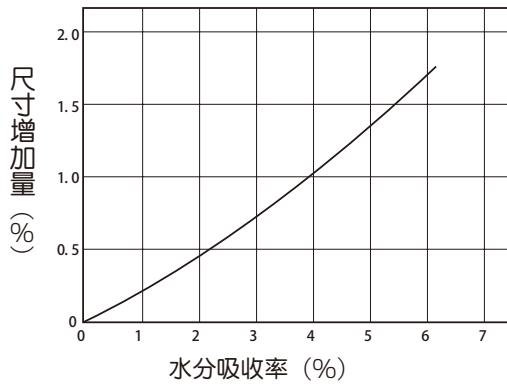
表 11.4 尼龙 MC901 和 DURACOM M90 吸水率

条件	试验法 ASTM	单位	尼龙 MC901	DURACOM M90
吸水率 (水中、常温、24小时)	D-570	%	0.5-1.0	0.22
吸水饱和值 (水中)		%	5.5-7.0	0.80
吸水饱和值 (室温、放于室内)		%	2.5-3.5	0.16

与 MC901 尼龙相比, DURACOM M90 是吸水性较低的塑料。

MC 尼龙产品由于吸水的影响会造成尺寸上的变化。购入时的尺寸会受使用环境及气候的影响,产生若干尺寸上的误差。以下为 MC901 的吸水率以及水分吸收率和尺寸增加量的关系。

表 11.5 MC901 的吸水率与尺寸增加量



◆ MC 尼龙 (MC901) 制齿条的膨胀量计算例

假设产品型号 PR2-1000 (全长 1010 mm)

假设产品使用前 预测膨胀后

- 水分吸收率 1% 假设常温室内,吸水率为 3%
- 全长 1010 mm

计算例

- ① 根据表 11.5 MC901 的吸水率与尺寸增加量
 - 使用前吸水率为 1% 时, 尺寸增加量为 0.2%
 - 膨胀后吸水率为 3%, 尺寸增加量为 0.75%
- ② 增量为 $0.75\% - 0.2\% = 0.55\%$
- ③ 因为齿条的原长为 1010 mm, 所以尺寸增加量为 $1010\text{mm} \times 0.55\% = 5.55\text{mm}$

(4) 耐化学腐蚀性

MC901 尼龙

MC901 尼龙的耐腐蚀性,与其他普通树脂基本上相同。一般的说,抗有机溶剂怕酸。

综合其特点,主要有下列几点。

- 对于大部分的有机酸,即使是在常温,低浓度的场合下也不能无条件使用。
- 在常温条件下,无机碱的使用浓度可以达到很高。
- 无机盐的水溶液的使用温度及浓度可以达到很高。
- 与无机酸相比,在有机酸(除蚁酸以外)中使用时的性能相当安定。
- 对酯类,酮类在常温下使用时,性能安定。
- 对芳香族类,常温条件下性能安定。
- 对矿物油,植物油,动物油脂,在常温条件下性能安定。

表 11.6 列出了尼龙树脂的耐腐蚀性能。根据使用条件可能会有不同的结果。请在使用前做预备试验。

表 11.6 MC 尼龙的耐腐蚀性

(○基本上不被腐蚀 △在一定的条件下可以使用 ×不能使用)

稀盐酸	△	醋酸甲烷	○	硝基苯	○
浓盐酸	×	醋酸乙烷	○	水杨酸	○
稀硫酸	△	醋酸钠	○	二乙醚	○
浓硫酸	×	丙酮	○	环乙烷	○
稀硝酸	△	丁酮	○	环乙醇	○
浓硝酸	×	甲醛	○	四氢氟酸	○
稀磷酸	△	乙醛	○	辛酸	○
氢氧化钠(50%)	○	乙醚	○	石油醚类	○
氨水(10%)	○	乙酰胺	○	汽油	○
氨气	○	乙二胺	○	柴油	○
盐水(10%)	○	丙烯腈	○	润滑油	○
氯化钾	○	四氯化碳	○	矿物油	○
氯化钙	○	氯化乙烯	○	蓖麻油	○
氯化铵	○	氯乙醇乙稀	○	亚麻籽油	○
次氯酸钠	×	三氯乙烯	○	矽油	○
硫酸钠	○	苯	○	食用脂肪	○
硫化硫酸钠	○	甲苯	○	牛油	○
硫酸氢钠	○	苯酚	△	奶油	○
硫酸铜	○	苯胺	△	牛奶	○
重铬酸钾(5%)	○	苯甲醛	△	葡萄酒	○
高锰酸钾	△	苯甲酸	△	水果果汁	○
碳酸钠	○	氯苯	○	碳酸饮料	○



DURACOM M90

DURACOM 材料的最大特点是耐有机化学药品的性能良好。但是,这个性质的反面,有找不到适当的溶剂型粘合剂的缺点。

综合其特点,主要有下列几点。

- 对无机化学药品具有良好的抗腐蚀性,但对硝酸,盐酸及硫酸等强酸类,容易受其侵蚀。
- 合成洗衣粉等家庭用化学用品基本上对其不产生影响。
- 在高温的润滑油中长时间使用也基本上不会劣化,但是,高级润滑油中的添加剂有对其产生影响的可能。
- 润滑脂也与润滑油相同,润滑脂中的添加剂可能对其产生影响。

要想知道相对每一种化学药品的抗腐蚀性,必须详细查阅各个塑料制造厂家的技术资料。

11.2 塑料齿轮的强度计算

(1) 正齿轮的弯曲强度

MC901 尼龙

MC901 尼龙的正齿轮,其节圆上的容许切向力 F (kgf) 根据路易斯方程式进行计算。

$$F = myb\sigma_b f \quad (11.1)$$

其中 m : 模数 (mm)

y : 节点附近的齿形系数
(由表 11.4 中求出)

b : 齿宽 (mm)

σ_b : 容许弯曲应力 (kgf/mm²)
(由图 11.1 中求出)

f : 速度系数 (从表 11.5 中求出)

图 11.1 容许弯曲应力 σ_b

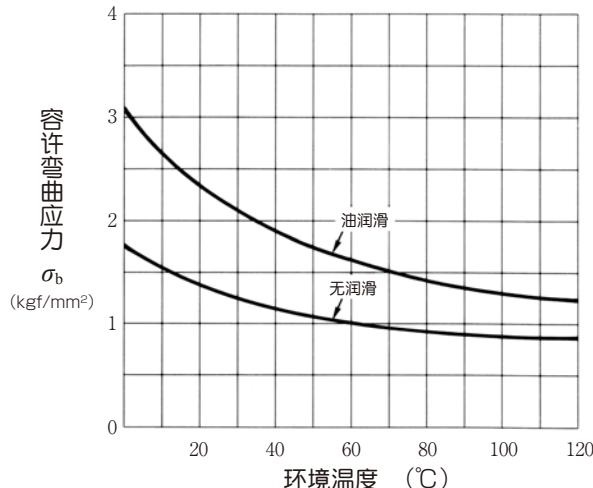


表 11.4 齿形系数 y

齿 数	齿 形 系 数		
	14 ^{1/2} °	20°全高齿	20°短齿
12	0.355	0.415	0.496
14	0.399	0.468	0.540
16	0.430	0.503	0.578
18	0.458	0.522	0.603
20	0.480	0.544	0.628
22	0.496	0.559	0.648
24	0.509	0.572	0.664
26	0.522	0.588	0.678
28	0.535	0.597	0.688
30	0.540	0.606	0.698
34	0.553	0.628	0.714
38	0.556	0.651	0.729
40	0.569	0.657	0.733
50	0.588	0.694	0.757
60	0.604	0.722	0.774
75	0.613	0.735	0.792
100	0.622	0.757	0.808
150	0.635	0.779	0.830
300	0.650	0.801	0.855
Rack	0.660	0.823	0.881

表 11.5 速度系数 f

润滑状态	切向速度 m/s	系 数
油 润 滑	不满 12	1.0
	12 以上	0.85
无 润 滑	不满 5	1.0
	5 以上	0.7

DURACOM M90

M90 DURACOM 的正齿轮,其节圆上的容许切向力 F (kgf) 根据路易斯方程式进行计算。

$$F = myb\sigma_b \quad (11.2)$$

其中 m : 模数 (mm)

y : 节点附近的齿形系数
(由表 11.4 中求出)

b : 齿宽 (mm)

σ_b : 容许弯曲应力 (kgf/mm²)

容许弯曲应力 σ_b 通过下式求出。

$$\sigma_b = \sigma_b' \frac{K_V K_T K_L K_M}{C_S} \quad (11.3)$$

其中 σ_b' : 标准条件下的最大容许弯曲应力 (kgf/mm²)

由图 11.2 中求出。

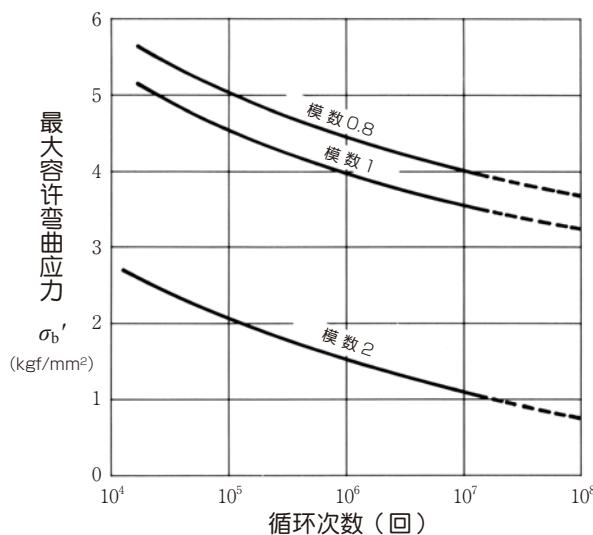
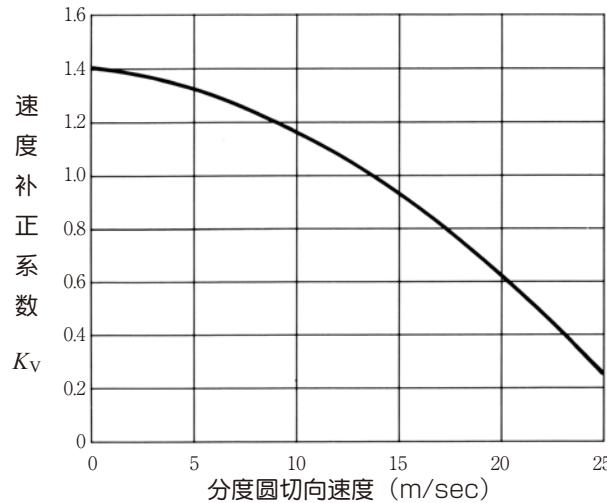
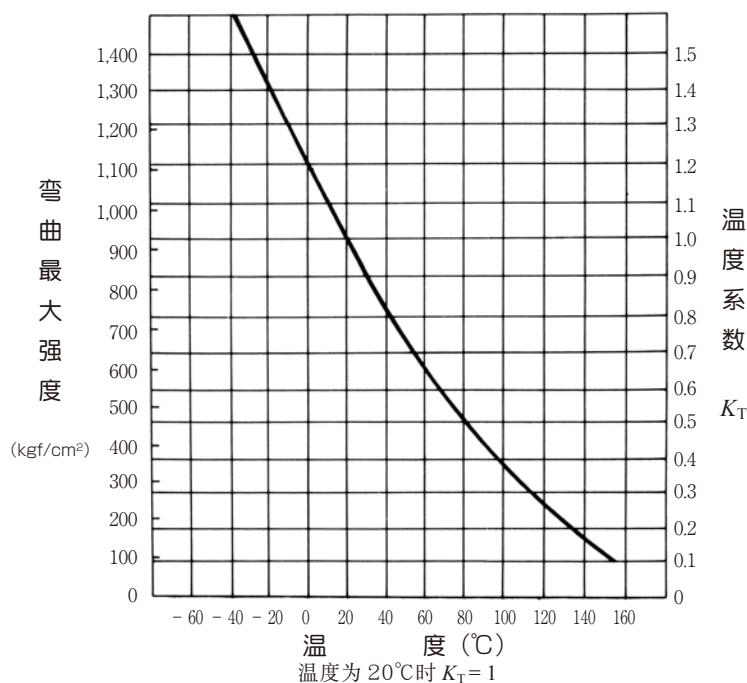
C_S : 使用状况系数 (由表 11.6 中求出)

K_V : 速度系数 (由图 11.3 中求出)

K_T : 温度系数 (由图 11.4 中求出)

K_L : 润滑系数 (由表 11.7 中求出)

K_M : 材质系数 (由表 11.8 中求出)

图 11.2 标准条件下的最大容许弯曲应力 σ_b' 图 11.3 速度系数 K_v 图 11.4 温度系数 K_T 表 11.6 使用状况系数 C_s

负 载 种 类	一天的运转时间			
	24 小时 / 每	8~10 小时 / 每天	3 小时 / 每天	0.5 小时 / 每天
相同时	1.25	1.00	0.80	0.50
有轻微冲击时	1.50	1.25	1.00	0.80
有中度冲击时	1.75	1.50	1.25	1.00
有剧烈冲击时	2.00	1.75	1.50	1.25

表 11.7 润滑系数 K_L

润 滑 条 件	K_L
使用润滑脂做初期润滑	1
使用润滑油做连续润滑	1.5~3.0

表 11.8 材质系数 K_M

材 质 的 组 合	K_M
DURACOM 与金属	1
DURACOM 与 DURACOM	0.75

使用上的注意

设计塑料齿轮时, 必须注意的是有关温度的问题。

① 增大齿隙。

塑料齿轮随温度上升及吸湿等尺寸增大, 所以有必要预料其影响设计齿隙。

② 使用油润滑。

塑料齿轮容易产生温升。为了达到润滑及冷却的目的, 我们推荐使用油润滑。

采用润滑油润滑, 可以充分的发挥出塑料齿轮的性能。特别是在高速旋转下使用的塑料齿轮, 油润滑非常重要。

③ 与金属制齿轮组合使用。

因为塑料齿轮容易产生温度上升, 所以选择与金属制齿轮配套的话, 可以起到抑制塑料齿轮升高的效果。



(2) 正齿轮的齿面强度

DURACOM M90

施行了润滑的 DURACOM 齿轮, 齿面磨损基本上不大成为问题。但是, 在无润滑的状态下使用时, 有必要检讨齿面强度。

齿面强度, 根据赫兹面压 S_c (kgf/mm^2) 进行计算。

$$S_c = \sqrt{\frac{F}{bd_{01}}} \frac{i+1}{i} \sqrt{\frac{1.4}{(1/E_1 + 1/E_2) \sin 2\alpha}} \quad (11.4)$$

其中 F : 作用在齿上的切向力 (kgf)

b : 齿宽 (mm)

d_{01} : 小齿轮的分度圆直径 (mm)

i : 齿数比 $= z_2/z_1$

E : 齿轮材料的弹性系数 (kgf/mm^2)

DURACOM 的弯曲弹性系数由图 11.5 中求出。

α : 压力角 (度)

图 11.5 DURACOM 的弯曲弹性系数

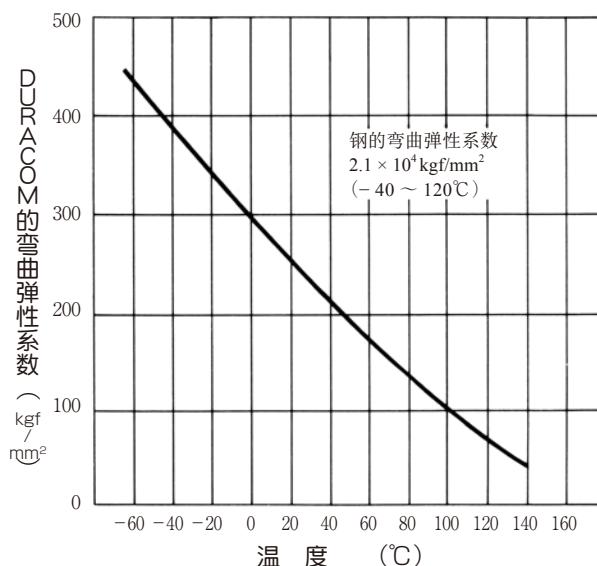
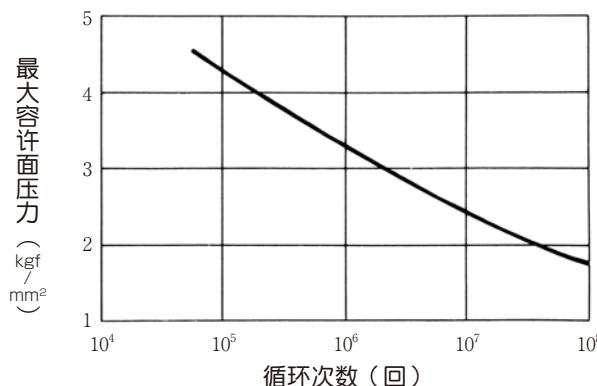


图 11.6 正齿轮的最大面压



利用公式 (11.4) 所计算的赫兹面压 S_c 数值, 如果在图 11.6 中曲线的下方的话, 使用可能, 在曲线上方的话, 不能使用。

但是, 图 11.6 的数据是在同为 DURACOM 齿轮, $m = 2$ 、 $v = 12 \text{ m/s}$ 的条件下的结果。只有在使用条件类似或更安全的条件下, 才可以使用图 11.6。

(3) 锥齿轮的弯曲强度

MC901 尼龙

锥齿轮的分度圆上的切向力 F (kgf) 根据下式进行计算。

$$F = m \frac{R_a - b}{R_a} y b \sigma_b f \quad (11.5)$$

其中 y : 节点附近的齿形系数

依据当量齿轮的齿数 z_v , 从表 11.4 中求出。

$$z_v = \frac{z}{\cos \delta_0} \quad (11.6)$$

R_a : 大端锥距 (mm)

δ_0 : 分锥角 (度)

其他各项的计算与尼龙正齿轮弯曲强度的计算相同。

DURACOM M90

锥齿轮的节圆上的切向力 F (kgf) 根据下式进行计算。

$$F = m \frac{R_a - b}{R_a} y b \sigma_b \quad (11.7)$$

其中

$$\sigma_b = \sigma_b' \frac{K_v K_T K_L K_M}{C_s}$$

y : 节点附近的齿形系数

根据公式 11.6 所计算出的当量齿数从表 11.4 中求出。

其他各项的计算与 DURACOM 正齿轮弯曲强度的计算相同。



(4) 蜗轮的弯曲强度

MC901 尼龙

在蜗杆蜗轮的组合中,因为一般是蜗杆比较安全,使用,针对蜗轮的轮齿做弯曲强度的计算。

蜗轮的节圆上的容许切向力 F (kgf) 通过下式计算。

$$F = m_n y b \sigma_b f \text{ (kgf)} \quad (11.8)$$

其中 m_n : 法向模数 (mm)

y : 节点附近的齿形系数

根据当量齿轮齿数 z_v 从表 11.4 中求出。

$$z_v = \frac{z}{\cos^3 \gamma_0} \quad (11.9)$$

蜗杆副传动中,因为相对滑动运动大,容易发热引起强度下降及异常磨损,所以滑动速度必须控制在表 11.9 所列数据以下。

表 11.9 材料的组合及滑动速度极限

蜗杆的材料	蜗轮的材料	润滑条件	滑动速度
“MC”	“MC”	无润滑	0.125m/s 以下
钢	“MC”	无润滑	1 m/s 以下
钢	“MC”	初期润滑	1.5 m/s 以下
钢	“MC”	连续润滑	2.5 m/s 以下

滑动速度 v_s 的计算公式为:

$$v_s = \frac{\pi d_1 n_1}{60000 \cos \gamma_0} \text{ (m/s)} \quad (11.10)$$

特别是对于塑料制蜗杆副,油润滑非常重要。无润滑条件下的高负载及连续运转必须回避。

(5) 塑料齿轮的键槽强度

将齿轮与轴连结时,使用键槽是最为常见的方法。

塑料齿轮的键槽强度根据键槽所受面压 σ (kgf/cm²) 的大小进行判断。

$$\sigma = \frac{2T}{dlh} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (11.11)$$

T : 传动转矩 (kgf · cm)

d : 轴径 (cm)

l : 有效键槽长度 (cm)

h : 键槽深度 (cm)

MC901 尼龙的最大容许面压是 200kgf/cm²,所以键槽所受的面压 σ 必须小于此数值。还有,键槽的角部加工成圆型是理想状态。

塑料齿轮除键槽强度外,还应注意齿根到键槽顶部的距离也必须有充分的长度。此长度原则上要在齿高的 2 倍以上。

下列情况下,必须避开在塑料齿轮上直接加工键槽。

- 键槽的强度不足
- 环境温度高
- 齿轮的直径大
- 承受剧烈的冲击

在这种情况下,首先在塑料齿轮上装填金属制的轮毂,然后在轮毂上开键槽的方法最为常用。

在塑料制的齿轮上装填轮毂的方法,有以下几种:

- 将塑料齿轮装填在金属制的轮毂上,然后用螺杆加以固定的方法
- 将金属制的环夹在塑料齿轮上,然后用螺杆加以固定的方法
- 将塑料齿轮熔接在金属轮毂上的方法



12 齿轮的受力

齿轮副在传动动力时,齿轮上产生作用力。在图 12.1 所示的正交坐标系中,如果设 Z 轴为齿轮轴的话,X 轴方向的作用力为切向力(圆周方向) F_t (N)、Y 轴方向的作用力为径向力(半径方向) F_r (N)、Z 轴方向的作用力为轴向力 F_x (N) 或称为推力(N)。这些作用力对决定齿轮的形状、轴、轴承的尺寸是非常重要的。

表 12.1 中示意了各种齿轮轮齿受力的计算关系式。转矩 T 及 T_1 的单位是 N·m。

表 12.1 齿轮的作用力计算关系式一览表

齿轮的种类		F_t : 切向力	F_x : 轴向力	F_r : 径向力
正 齿 轮		$F_t = \frac{2000T}{d}$		
斜 齿 齿 轮			$F_t \tan \beta$	$F_t \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}$
直 齿 锥 齿 轮		$F_t = \frac{2000T}{d_m}$ 其中 d_m 是中央分度圆直径 $d_m = d - b \sin \delta$	$F_t \tan \alpha \sin \delta$	$F_t \tan \alpha \cos \delta$
弧 齿 锥 齿 轮			凸齿面为工作面时: $\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \sin \delta - \sin \beta_m \cos \delta)$	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \cos \delta + \sin \beta_m \sin \delta)$
蜗 杆		$F_{t1} = \frac{2000T_1}{d_1}$	凹齿面为工作面时: $\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \sin \delta + \sin \beta_m \cos \delta)$	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \cos \delta - \sin \beta_m \sin \delta)$
蜗 轮			F_{t1}	$F_{t1} \frac{\sin \alpha_n}{\cos \alpha_n \sin \gamma + \mu \cos \gamma}$
交错轴 斜齿齿轮 ($\Sigma = 90^\circ$) ($\beta = 45^\circ$)	驱动齿轮	$F_{t1} = \frac{2000T_1}{d_1}$	$F_{t1} \frac{\cos \alpha_n \sin \beta - \mu \cos \beta}{\cos \alpha_n \cos \beta + \mu \sin \beta}$	$F_{t1} \frac{\sin \alpha_n}{\cos \alpha_n \cos \beta + \mu \sin \beta}$
	被动齿轮	$F_{t2} = F_{t1} \frac{\cos \alpha_n \cos \gamma - \mu \sin \gamma}{\cos \alpha_n \sin \gamma + \mu \cos \gamma}$	F_{t1}	

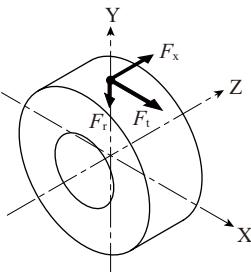


图 12.1 轮齿的受力示意图

12.1 平行轴齿轮

图 12.2 是斜齿齿轮轮齿受力示意图。

螺旋角越大,推力(轴向力)也越大。在正齿轮的情况下,不产生轴向力。

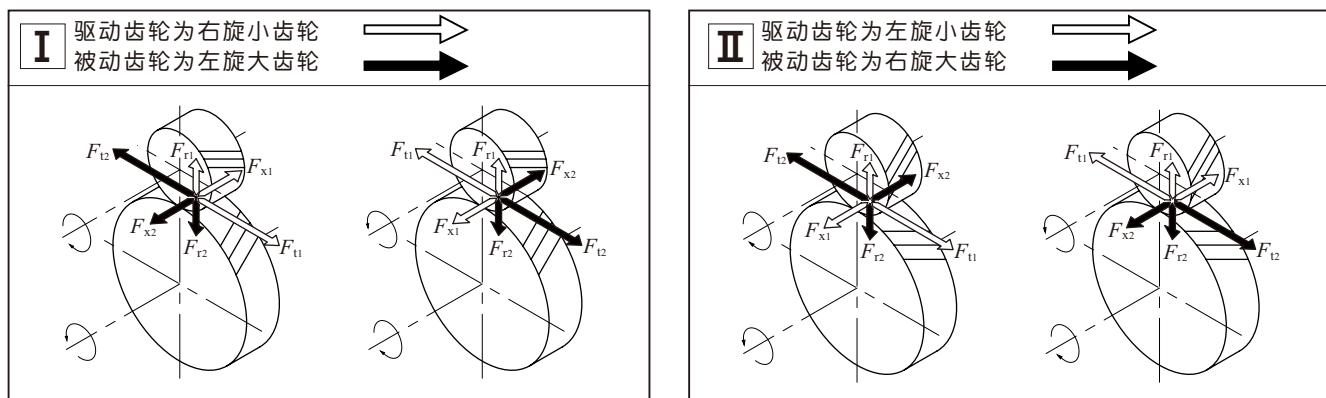


图 12.2 斜齿齿轮的旋转方向与轮齿受力



表 12.2 计算例 (正齿轮)

No.	规 格	代号	单 位	计算公式	正齿轮	
					小齿轮	大齿轮
1	模数	m	mm	设定值	2	
2	法向压力角	α_n	度		20°	
3	齿数	z	—		20	40
4	螺旋角	β	度		0	
5	输入转矩	T_1	N·m		2	—
6	分度圆直径	d	mm		zm	40 80
7	切向力	F_t	N		$\frac{2000T}{d}$	100.0
8	轴向力	F_x			—	0
9	径向力	F_r			$F_t \tan \alpha$	36.4
10	输出转矩	T_2	N·m		$\frac{F_t d_2}{2000}$	— 4

12.2 相交轴齿轮

轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ 的直齿锥齿轮啮合时, 作用于驱动齿轮的轴向力 F_{x1} 和作用于被动齿轮的径向力 F_{r2} 相同。同样, 作用于驱动齿轮的径向力 F_{r1} 和被动齿轮的轴向力 F_{x2} 也相同。

$$\left. \begin{array}{l} F_{x1} = F_{r2} \\ F_{r1} = F_{x2} \end{array} \right\} \quad (12.1)$$

(1) 直齿锥齿轮

直齿锥齿轮的轮齿受力如图 12.3 所示。

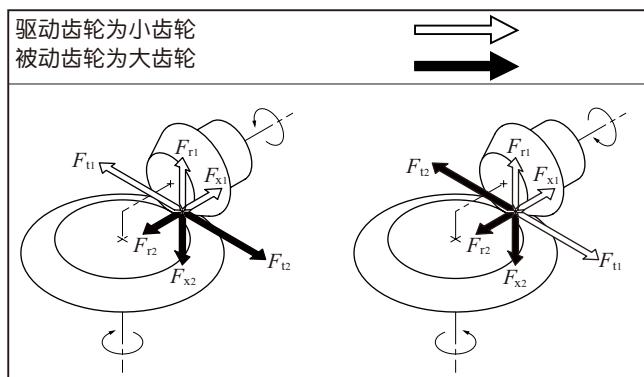


图 12.3 直齿锥齿轮的旋转方向与轮齿受力

(2) 弧齿锥齿轮

弧齿锥齿轮, 有凸齿面及凹齿面, 工作面不同, 轮齿所受的作用力也不同。齿轮的螺旋方向、旋转方向及啮合齿面之间的关系如表 12.5 所示。

弧齿锥齿轮的轮齿受力如图 12.5 所示。弧齿锥齿轮的轴向力 F_x 会出现负值, 此时, 齿轮在相互接近方向受力。需要设计能够承受负值轴向力的轴承。轴向的间隙过大时, 可能造成无齿隙啮合状态。

表 12.3 计算例 (斜齿齿轮)

No.	规 格	代号	单 位	计算公式	正齿轮	
					小齿轮	大齿轮
1	端面模数	m_t	mm	设定值	2	
2	端面压力角	α_t	度		20°	
3	齿数	z	—		20	40
4	螺旋角	β	度		21.5°	
5	输入转矩	T_1	N·m		2	—
6	法向压力角	α_n	度		$\tan^{-1}(\tan \alpha_t \cos \beta)$	18.70838°
7	分度圆直径	d	mm		zm_t	40 80
8	切向力	F_t	N		$\frac{2000T}{d}$	100.0
9	轴向力	F_x			$F_t \tan \beta$	39.4
10	径向力	F_r			$F_t \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}$	36.4
11	输出转矩	T_2	N·m		$\frac{F_t d_2}{2000}$	— 4

表 12.4 计算例 (直齿锥齿轮)

No.	规 格	代号	单 位	计算公式	直齿锥齿轮	
					小齿轮	大齿轮
1	轴交角	Σ	度	设定值	90°	
2	模数	m_t	mm		2	
3	压力角	α	度		20°	
4	齿数	z	—		20	40
5	螺旋角	β	度		0°	
6	齿宽	b	mm		15	
7	输入转矩	T_1	N·m		1.6646	—
8	分度圆直径	d	mm		zm	40 80
9	分度圆锥角	$\delta_1 \cdot \delta_2$	度		$\tan^{-1}\left(\frac{z_1}{z_2}\right) \Sigma - \delta_1$	26.56505 63.43495
10	中央分度圆直径	d_m	mm		$d - b \sin \delta$	33.292 66.584
11	切向力	F_t	N		$\frac{2000T}{d_m}$	100.0
12	轴向力	F_x			$F_t \tan \alpha \sin \delta$	16.3 32.6
13	径向力	F_r			$F_t \tan \alpha \cos \delta$	32.6 16.3
14	输出转矩	T_2	N·m		$\frac{F_t d_{m2}}{2000}$	— 3.329

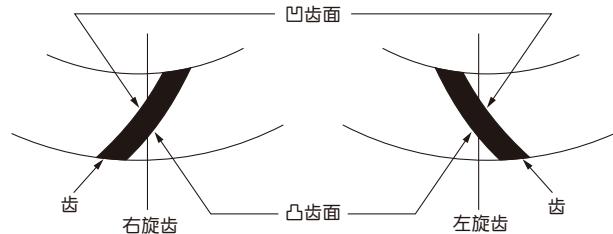


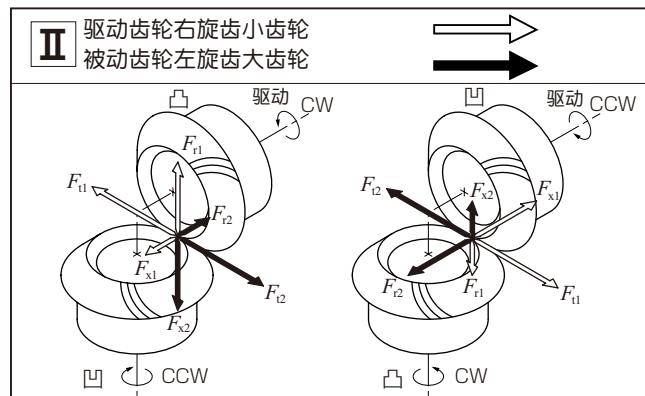
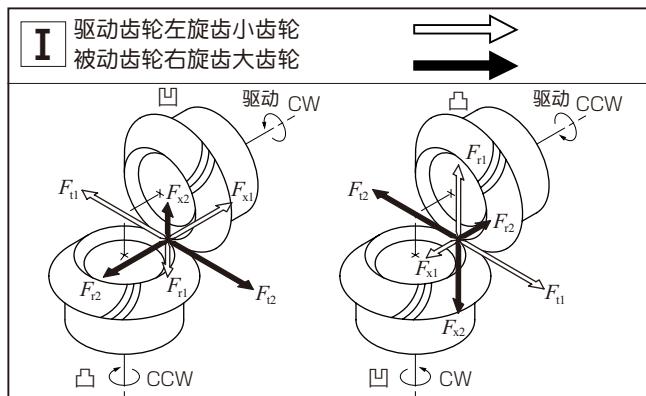
图 12.4 弧齿锥齿轮的凸齿面和凹齿面

表 12.5 喷合齿面一览表

螺旋方向	驱动齿轮		被动齿轮		
	旋转方向	啮合齿面	啮合齿面	旋转方向	螺旋方向
L	CW	凹	凸	CCW	R
	CCW	凸	凹	CW	
R	CW	凸	凹	CCW	L
	CCW	凹	凸	CW	



$$\Sigma = 90^\circ, \alpha_n = 20^\circ, \beta_m = 35^\circ, z_2/z_1 < 1.57357$$



$$\Sigma = 90^\circ, \alpha_n = 20^\circ, \beta_m = 35^\circ, z_2/z_1 \geq 1.57357$$

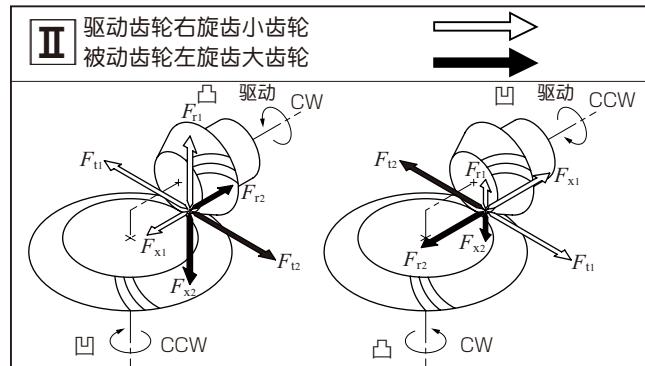
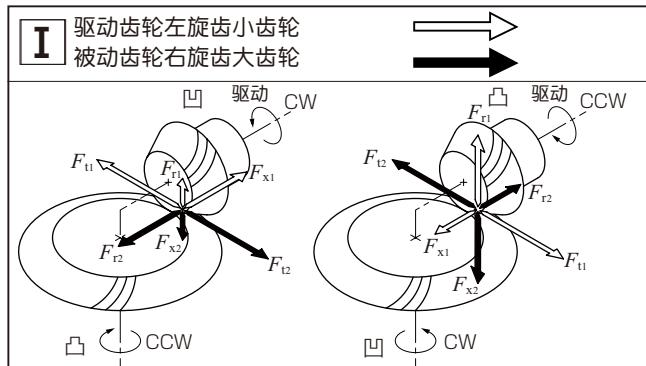


图 12.5 弧齿锥齿轮的旋转方向与轮齿的受力

表 12.6 计算例 (弧齿锥齿轮)

No.	规 格	代号	单 位	计算 公 式		弧齿锥齿轮	
				小齿轮	大齿轮	凸齿面	凹齿面
1	轴交角	Σ	度			90°	
2	端面模数	m_t	mm			2	
3	法向压力角	α_n	度			20°	
4	齿 数	z	—			20	40
5	螺旋角	β	度			35°	
6	齿 宽	b	mm			15	
7	输入转矩	T_1	N·m			1.6646	—
8	分度圆直径	d	mm	zm		40	80
9	分度圆锥角	$\delta_1 \cdot \delta_2$	度	$\tan^{-1}\left(\frac{z_1}{z_2}\right)$	$\Sigma - \delta_1$	26.56505	63.43495
10	中央分度圆直径	d_m	mm	$d - b \sin \delta$		33.292	66.584
11	切向力	F_t	N	$\frac{2000T}{d_m}$		100.0	
啮合齿面							
12	轴向力	F_x	N	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \sin \delta - \sin \beta_m \cos \delta)$	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \sin \delta + \sin \beta_m \cos \delta)$	-42.8	71.1
13	径向力	F_r	N	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \cos \delta + \sin \beta_m \sin \delta)$	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \cos \delta - \sin \beta_m \sin \delta)$	71.1	-42.8
啮合齿面							
14	轴向力	F_x	N	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \sin \delta + \sin \beta_m \cos \delta)$	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \sin \delta - \sin \beta_m \cos \delta)$	82.5	8.4
15	径向力	F_r	N	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \cos \delta - \sin \beta_m \sin \delta)$	$\frac{F_t}{\cos \beta_m} (\tan \alpha_n \cos \delta + \sin \beta_m \sin \delta)$	8.4	82.5
16	输出转矩	T_2	N·m	$\frac{F_t d_{m2}}{2000}$		—	3.329



12.3 交错轴齿轮

(1) 蜗杆蜗轮

图 12.6 示意了轴交角 $\Sigma = 90^\circ$ 的蜗杆副中, 轮齿的受力方向。因为蜗杆蜗轮的动力传动大部分为滑动接触, 所以齿面的摩擦系数对传动效率 η_R 及齿轮的受力有很大的影响。

$$\eta_R = \frac{T_2}{T_1 i} = \frac{\tan \gamma F_{t2}}{F_{t1}} \quad \left. \right\} \quad (12.2)$$

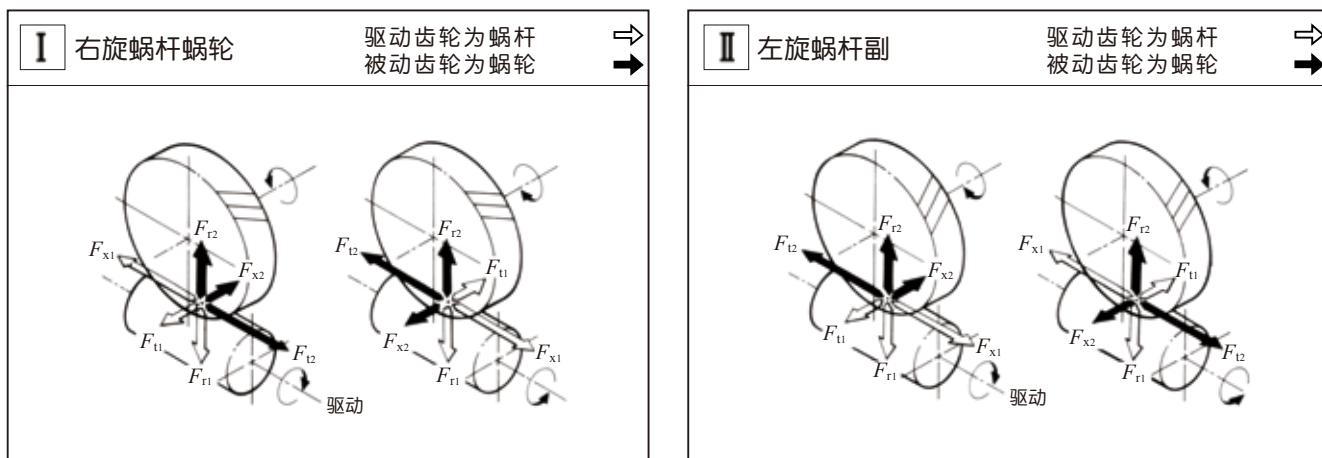


图 12.6 蜗杆蜗轮的旋转方向及轮齿受力

表 12.7 计算例 (蜗杆蜗轮)

No.	规 格	代号	单 位	计算 公 式	蜗杆蜗轮	
					蜗 杆	蜗 轮
1	轴交角	Σ	度		90°	
2	轴向 / 端面模数	$m_x \cdot m_t$	mm		2	
3	法向模数	a_n	度		20°	
4	齿 数	z	—		1	20
5	分度圆直径 (蜗杆)	d_1	mm		31	—
6	摩擦系数	μ	—		0.05	
7	输入转矩	T_1	N·m		1.550	—
8	分度圆直径 (蜗轮)	d_2	mm	—	$z_2 m_t$	40
9	导程角	γ	度	$\tan^{-1} \left(\frac{m_x z_1}{d_1} \right)$	3.69139°	
10	切向力	$F_{t1} \cdot F_{t2}$		$\frac{2000 T_1}{d_1}$	$F_{t1} \frac{\cos a_n \cos \gamma - \mu \sin \gamma}{\cos a_n \sin \gamma + \mu \cos \gamma}$	100.0 846.5
11	轴向力	F_x	N	$F_{t1} \frac{\cos a_n \cos \gamma - \mu \sin \gamma}{\cos a_n \sin \gamma + \mu \cos \gamma}$	F_{t1}	846.5 100.0
12	径向力	F_r		$F_{t1} \frac{\sin a_n}{\cos a_n \sin \gamma + \mu \cos \gamma}$		309.8
13	效 率	η_R	—	$\frac{\tan \gamma F_{t2}}{F_{t1}}$		0.546
14	输出转矩	T_2	N·m	—	$\frac{F_{t2} d_2}{2000}$	— 16.930



(2) 交错轴斜齿轮

基本上与蜗杆蜗轮的思考方法相同。

图 12.7 示意了轴交角 $\Sigma = 90^\circ$, 圆螺旋角为 $\beta = 45^\circ$ 的交错轴斜齿轮轮齿受力情况。

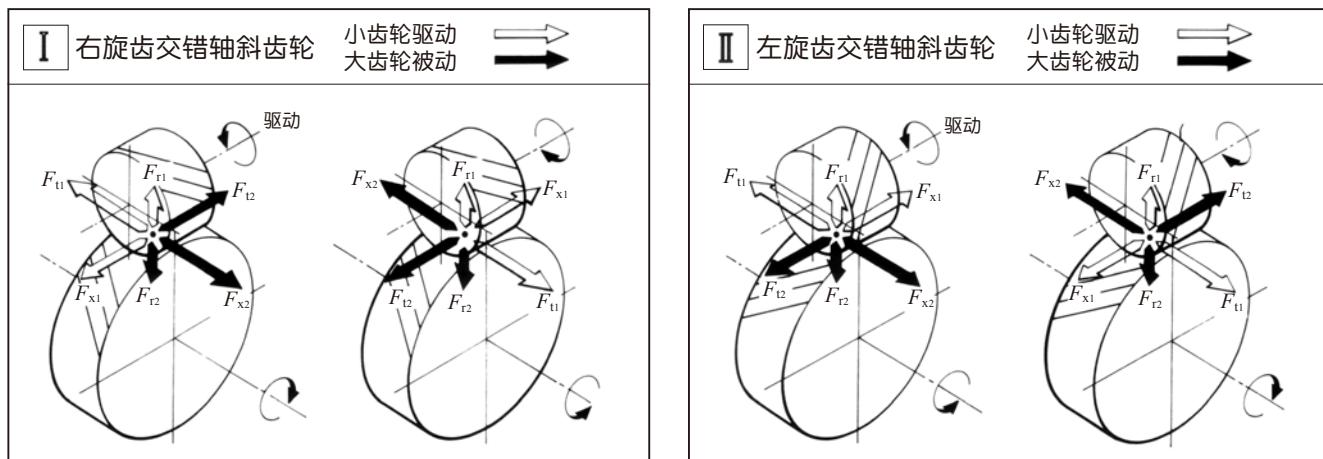


图 12.7 交错轴斜齿轮的旋转方向及轮齿受力

表 12.8 计算例 (交错轴斜齿轮)

No.	规 格	代号	单 位	计算 公 式	交错轴斜齿轮	
					小齿轮	大齿轮
1	轴交角	Σ	度		90°	
2	法向模数	m_n	mm		2	
3	法向压力角	α_n	度		20°	
4	齿 数	z	—		13	13
5	螺旋角	β	度		45°	
6	摩擦系数	μ	—		0.05	
7	输入转矩	T_1	N·m		1.838	—
8	分度圆直径	d	mm	$\frac{z m_n}{\cos \beta}$	36.770	36.770
9	切向力	$F_{t1} \cdot F_{t2}$	N	$\frac{2000 T_1}{d_1}$	$F_{t1} \frac{\cos \alpha_n \sin \beta - \mu \cos \beta}{\cos \alpha_n \cos \beta + \mu \sin \beta}$	100.0 89.9
10	轴向力	F_x		$F_{t1} \frac{\cos \alpha_n \sin \beta - \mu \cos \beta}{\cos \alpha_n \cos \beta + \mu \sin \beta}$	F_{t1}	89.9 100.0
11	径向力	F_r		$F_{t1} \frac{\sin \alpha_n}{\cos \alpha_n \cos \beta + \mu \sin \beta}$		48.9
12	效 率	η	—	$\frac{T_2 z_1}{T_1 z_2}$		0.899
13	输出转矩	T_2	N·m	—	$\frac{F_{t2} d_2}{2000}$	— 1.653



13 齿轮的润滑

齿轮的润滑，主要有二个目的：

1. 促进齿面间的滑动。
也就是说，减低齿面间的动摩擦系数。
2. 抑制齿面间由摩擦所引起的温度上升。
即冷却齿面。

要想满足上述两个条件，需要适当地选择润滑方法及润滑油，以避免润滑不良而引起的故障。

13.1 齿轮的润滑法

齿轮的润滑大致可以分为以下三类：

- (1) 润滑脂润滑法
- (2) 飞溅润滑法（油浴润滑）
- (3) 强制润滑法（循环喷油润滑）

润滑方法需要根据齿轮的使用条件进行适当的选择。选择的基准主要依据齿轮的圆周速度（m/s）及转数（rpm）。

通常，根据圆周速度对润滑法进行分类的话，应为低速时使用润滑脂润滑、中速时使用油浴润滑、高速时使用强制润滑。但是，这只是一个原则。有时，在相当高的周转速度下，由于保养等理由仍然采用润滑脂润滑。

表 13.1 中，列出了三种润滑法所适用的圆周速度范围。

低速轻载荷的齿轮，可以使用润滑脂。但是，需要定期地补充润滑脂，特别是在开放型结构中使用时。

润滑油经长时间使用会发生劣化、油量减少等。定期的检查、交换及补充非常必要。断油及使用不合适的润滑油是造成齿面的烧结、胶合等齿面损伤的原因。

对于在高速、重载下使用的齿轮及容易产生磨损的蜗杆蜗轮、交错轴斜齿轮，需要十分注意选择润滑油的种类、量及润滑方法。特别是润滑油的选择非常重要。

表 13.1-① 正齿轮及锥齿轮的圆周速度范围 (m/s)

No.	润 滑 法	圆 周 速 度 v (m/s)					
		0	5	10	15	20	25
1	润滑脂润滑法	←→					
2	飞溅润滑法		←→				
3	强制润滑法			←→			

表 13.1-② 蜗杆副的滑动速度范围

No.	润 滑 法	圆 周 速 度 v_s (m/s)					
		0	5	10	15	20	25
1	润滑脂润滑法	←→					
2	飞溅润滑法		←→				
3	强制润滑法			←→			

下面，就此三种润滑法做以简单的说明。

(1) 润滑脂润滑法

润滑脂润滑法主要使用在比较低速的开式及闭式齿轮箱传动中。

关于润滑脂润滑法，有各种需要注意的问题。这里，主要介绍下列三点。

◎选择合适稠度的润滑脂

特别是密封齿轮箱中，要保持润滑脂在润滑部位连续流动，需要选择高流动性润滑脂。

◎不适合使用在高负荷，连续运转的场合

因为润滑脂的冷却效果远远不如润滑油，所以，在高负荷，连续工作的条件下，会出现温度上升的问题。

◎润滑脂的适量使用

润滑脂过少，达不到润滑目的，相反的，在密封齿轮箱中，润滑脂过多会造成搅拌损失过大。



(2) 飞溅润滑法(油浴式)

飞溅润滑法是以齿轮箱做为油箱,将齿轮浸入到润滑油中至一定深度,依靠齿轮旋转时溅起的润滑油润滑齿轮及轴承部位。低速传动箱中使用油浴润滑时,圆周速度应在3m/s以上。

使用飞溅润滑法(油浴式)时,有许多需要注意的问题。这里就油面的规定及齿轮箱的最高油温做以说明。

① 油面的高度

使用润滑油的量越多,搅拌损失也随之增大,相反,油量过小则达不到所期待的润滑及冷却效果。表7.2中,列出了油面高度推荐值。

油面高度在齿轮开始转动后比静止时要下降,高度差过大时,需要采取对策加以改善。比如,增高静止时的油量或安装油盘等。

② 齿轮箱的极限温度

齿轮箱内的温度,随齿轮及轴承的摩擦损失及润滑油的搅拌损失等上升。温度上升会造成各种不良的影响。例如:

- 润滑油的粘度下降
- 润滑油劣化
- 齿轮箱、齿轮、轴等产生变形
- 齿隙减少

最近,随生产技术的进步,高性能的润滑油不断增加。做为大体上的基准80°C~90°C左右为极限温度。

超过这个极限温度使用时,需要采取手段增强齿轮箱的放热性,以达到冷却齿轮箱的目的。例如,在齿轮箱内安装散热片,或在轴上安装风扇送风。

表13.2 适当的油面高度

齿轮的种类	正齿轮及斜齿齿轮		锥齿轮	蜗杆 蜗轮	
	水平轴	垂直轴		蜗杆在上	蜗杆在下
油面高度					
水准O					

其中 h = 齿高, b = 齿宽, d_2 = 蜗轮的节径, d_1 = 蜗杆的节径

(3) 强制润滑法

强制润滑法是利用油泵直接对啮合部上油润滑。根据上油的方式,分为滴下式,喷射式和喷雾式三种。

下面就三种方式做以简单的说明。

○滴下式

利用导管将润滑油直接注入到啮合部。

○喷射式

利用喷油嘴将润滑油直接喷射到啮合部。

○喷雾式

利用压缩空气将润滑油转变成雾状,喷入轮齿的啮合部位。这种润滑方法特别常用在高速传动时。

强制润滑法因为需要油槽、油泵、过滤器、配管等一系列的配套装置,所以主要使用在特殊的高速,大型齿轮装置中。

利用强制润滑法,可以把经过过滤、冷却、粘度适宜的润滑油适量地送到啮合部,是最良的齿轮润滑方式。



13.2 齿轮的润滑油

要想使齿轮维持高效率的动力传动, 必须在啮合齿面上形成安定的油膜以防止金属接触。达到此目的, 对所使用的润滑油的性能要求及其特性, 列表于 13.3。

表 13.3 对润滑油性能的要求

序号	特 性	内 容 説 明
1	适当的粘度	润滑油需要在齿轮的一定转速及温度下保持其适当的粘度, 在齿轮表面形成油膜以达到润滑目的。
2	极压性(抗溶结性)	对重载荷齿面, 润滑油需要具有防止滑动时产生磨损融结, 擦痕等损伤的作用。
3	热氧化安定性	因为高温及潮湿等原因, 润滑油长期使用容易产生氧化。所以润滑油需要具有良好的抗氧化性能。
4	抗乳化性	由于开机, 停机等的温度变化所产生的水蒸气会使润滑油中混入水, 所以, 润滑油需要具有分离沉淀水分的性能。
5	抗泡性	齿轮的旋转使被搅拌的润滑油产生气泡, 对油膜的形成产生不利影响。所以, 润滑油需要具有良好的削泡性能。
6	防锈防腐性	润滑油中混入铁锈会造成齿面磨损及加快润滑油的氧化。所以, 润滑油需要具有防锈, 防腐性能。

(1) 润滑油的粘度

选择润滑油时, 最重要的指标是适宜的粘度。关于润滑油的粘度, 在 JIS K2001 工业用润滑油粘度分类的标准中做有规定, 表 13.4 中列出了工业用润滑油 ISO 粘度等级。

表 13.4 工业用润滑油 ISO 粘度等级 (JIS K 2001)

ISO 粘 度 等 级	运动粘度中心值 $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (cSt) (40°C)		运动粘度范围 $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (cSt) (40°C)	
	2.2	1.98 以上	2.42 以下	3.52 以下
ISO VG 2	2.2	1.98 以上	2.42 以下	3.52 以下
ISO VG 3	3.2	2.88 以上	3.52 以下	4.14 以上
ISO VG 5	4.6	4.14 以上	5.06 以下	6.12 以上
ISO VG 7	6.8	6.12 以上	7.48 以下	9.0 以上
ISO VG 10	10	9.0 以上	11.0 以下	13.5 以上
ISO VG 15	15	13.5 以上	16.5 以下	19.8 以上
ISO VG 22	22	19.8 以上	24.2 以下	28.8 以上
ISO VG 32	32	28.8 以上	35.2 以下	41.4 以上
ISO VG 46	46	41.4 以上	50.6 以下	61.2 以上
ISO VG 68	68	61.2 以上	74.8 以下	90.0 以上
ISO VG 100	100	90.0 以上	110 以下	135 以上
ISO VG 150	150	135 以上	165 以下	198 以上
ISO VG 220	220	198 以上	242 以下	288 以上
ISO VG 320	320	288 以上	352 以下	414 以上
ISO VG 460	460	414 以上	506 以下	612 以上
ISO VG 680	680	612 以上	748 以下	900 以上
ISO VG 1000	1000	900 以上	1100 以下	1350 以上
ISO VG 1500	1500	1350 以上	1650 以下	1980 以上
ISO VG 2200	2200	1980 以上	2420 以下	2880 以上
ISO VG 3200	3200	2880 以上	3520 以下	3520 以下

(2) 选择润滑油

根据用途, 润滑油有各种不同的分类。工业用分为 2 种、汽车用分为 3 种。此外, 根据粘度等级有更细致的分类。(表 13.5 的内容摘自 JIS K 2219 - 1993 润滑油标准)

表 13.5 润滑油的种类及用途

种类		用途
工业用	1类	ISO VG 32
		ISO VG 46
		ISO VG 68
		ISO VG 100
		ISO VG 150
		ISO VG 220
	2类	ISO VG 320
	ISO VG 460	主要使用在一般机械用负载较轻的闭式齿轮机构。
	ISO VG 68	主要使用在一般机械·压延机械的中·重载的闭式齿轮机构。
	ISO VG 100	
	ISO VG 150	
	ISO VG 220	
	ISO VG 320	
	ISO VG 460	
	ISO VG 680	

选择齿轮装置中使用的粘度适宜的润滑油时, 请参考 JIS、JGMA、AGMA 等的标准及润滑油生产厂家的资料及网上的情报。

表 13.6 为润滑油生产厂家推荐的闭式齿轮润滑油适宜粘度。

表 13.6 闭式齿轮油的适合粘度推荐值

小齿轮 转数 (rpm)	马力 (PS)	减速比 10 以下		减速比超过 10	
		cSt (40°C)	ISO 粘度等级	cSt (40°C)	ISO 粘度等级
300 以上	30 以下	5 ~ 234	150, 220	180 ~ 279	220
	30 ~ 100	180 ~ 279	220	216 ~ 360	220, 320
	100 以上	279 ~ 378	320	360 ~ 522	460
1,000	20 以下	81 ~ 153	100, 150	117 ~ 198	150
	20 ~ 75	117 ~ 198	150	180 ~ 279	220
	75 以上	180 ~ 279	220	279 ~ 378	320
2,000	10 以下	54 ~ 117	68, 100	59 ~ 153	68, 100, 150
	10 ~ 50	59 ~ 153	68, 100, 150	135 ~ 198	150
	50 以上	135 ~ 198	150	189 ~ 342	220, 320
5,000	5 以下	27 ~ 36	32	41 ~ 63	46
	5 ~ 20	41 ~ 63	46	59 ~ 144	68, 100
	20 以上	59 ~ 144	68, 100	95 ~ 153	100, 150
100 以上	1 以下	9 ~ 31	10, 15, 22	18 ~ 32	22, 32
	1 ~ 10	18 ~ 32	22, 32	29 ~ 63	32, 46
	10 以上	29 ~ 63	32, 46	41 ~ 63	46

注 1 · 齿轮的种类为正齿轮、斜齿齿轮、锥齿轮及弧齿锥齿轮, 工作温度(油温)为 10 ~ 50°C 的场合。

注 2 · 润滑方式为循环或飞溅润滑。



根据润滑油的用途（正齿轮、蜗轮用等）以及使用条件（装置的大小、环境温度等）选择适合的粘度后，从润滑油生产厂家的资料中决定润滑油牌号。表13.7是有代表性的润滑油生产厂家的工业用齿轮油牌号一例，仅供参考。

表13.7 工业用齿轮油一例

JIS 齿轮油		出光	COSMO	JAPAN ENERGY	SHOWA SHELL	新日本石油	MOBILE
1 类	ISO VG 32	Daphne Super Multi Oil 32	New Mighty Super 32 COSMO All Purpose 32	JOMO Lathus 32	Shell Tellus Oil C 32	Super Mulpus DX32	Mobil DTE Oil Light
	ISO VG 68	Daphne Super Multi Oil 68	New Mighty Super 68 COSMO All Purpose 68	JOMO Lathus 68	Shell Tellus Oil C 68	Super Mulpus DX68	Mobil DTE Oil Heavy Medium
	ISO VG 100	Daphne Super Multi Oil 100	New Mighty Super 100 COSMO All Purpose 100	JOMO Lathus 100	Shell Tellus Oil C 100	Super Mulpus DX100	Mobil DTE Oil Heavy
	ISO VG 150	Daphne Super Multi Oil 150	New Mighty Super 150	JOMO Lathus 150	Shell Tellus Oil C 150	Super Mulpus DX150	Mobil Vacuoline 528
工业用 2 类	ISO VG 100	Daphne Super Multi Oil 100	COSMO Gear SE100 COSMO ECO Gear EPS100	JOMO Reductus 100	Shell Omala Oil 100	BONNOC M100 BONNOC AX100	Mobil gear 600 XP 100
	ISO VG 150	Daphne Super Multi Oil 150	COSMO Gear SE150 COSMO ECO Gear EPS150	JOMO Reductus 150	Shell Omala Oil 150	BONNOC M150 BONNOC AX150	Mobil gear 600 XP 150
	ISO VG 220	Daphne Super Multi Oil 220	COSMO Gear SE220 COSMO ECO Gear EPS220	JOMO Reductus 220	Shell Omala Oil 220	BONNOC M220 BONNOC AX220	Mobil gear 600 XP 220
	ISO VG 320	Daphne Super Gear Oil 320	COSMO Gear SE320 COSMO ECO Gear EPS320	JOMO Reductus 320	Shell Omala Oil 320	BONNOC M320 BONNOC AX320	Mobil gear 600 XP 320
	ISO VG 460	Daphne Super Gear Oil 460	COSMO Gear SE460 COSMO ECO Gear EPS460	JOMO Reductus 460	Shell Omala Oil 460	BONNOC M460 BONNOC AX460	Mobil gear 600 XP 460
	ISO VG 680	Daphne Super Gear Oil 680	COSMO Gear SE680	JOMO Reductus 680	Shell Omala Oil 680	BONNOC M680 BONNOC AX680	Mobil gear 600 XP 680

（3）选择蜗杆蜗轮油

根据润滑油的用途（正齿轮、蜗轮用等）以及使用条件（装置的大小、环境温度等）选择适宜粘度后，从润滑油生产厂家的资料中决定润滑油牌号。

表13.8是根据JGMA405-01(1976)圆柱蜗杆蜗轮的强度计算所推荐的蜗杆蜗轮油粘度参考值。

表13.9是有代表性的润滑油生产厂家的蜗杆蜗轮油牌号一例。

表13.8 蜗杆蜗轮油适宜粘度参考值

单位：cSt (37.8°C)

运 转 油 温		滑 动 速 度 m/s		
运转最高油温	起动时油温	2.5 以下	2.5 以上 5 以下	5 以上
0°C以上 10°C以下	-10°C以上 0°C未满	110 ~ 130	110 ~ 130	110 ~ 130
	0°C以上	110 ~ 150	110 ~ 150	110 ~ 150
10°C以上 30°C以下	0°C以上	200 ~ 245	150 ~ 200	150 ~ 200
	30°C以上 55°C未满	350 ~ 510	245 ~ 350	200 ~ 245
55°C以上 80°C以下	0°C以上	510 ~ 780	350 ~ 510	245 ~ 350
	80°C以上 100°C以下	0°C以上	900 ~ 1100	510 ~ 780
		350 ~ 510		

表13.9 蜗杆蜗轮油一例

粘度	出光	COSMO	JAPAN ENERGY	SHOWA SHELL	新日本石油	MOBILE
ISO VG 150	Daphne Super Multi Oil 150	—	JOMO Reductus150	Shell Omala Oil 150	BONNOC M150	Mobil gear 629
ISO VG 220	Daphne Super Multi Oil 220	COSMO Gear W220	JOMO Reductus220	Shell Omala Oil 220	BONNOC M220	Mobil gear 630
ISO VG 320	Daphne Super Multi Oil 320	COSMO Gear W320	JOMO Reductus320	Shell Omala Oil 320	BONNOC M320	Mobil gear 632
ISO VG 460	Daphne Super Multi Oil 460	COSMO Gear W460	JOMO Reductus460	Shell Omala Oil 460	BONNOC M460	Mobil gear 634
ISO VG 680	Daphne Super Multi Oil 680	—	JOMO Reductus680	Shell Omala Oil 680	BONNOC M680	Mobil gear 636



(4) 选择润滑脂

润滑脂根据用途分为七类。此外，根据种类（成分及性能）及稠度号码（混合稠度范围或粘度范围）有更详细的划分。

表 13.10 中示意了润滑脂的一部分。（摘自 JIS K 2220:2003 润滑脂）

表 13.10 润滑脂的种类

种类			使用温度范围 ℃	参考				适用于		
用途	类别	稠度等级		是否符合使用条件						
				载荷	与水的接触					
一般用润滑脂	1类	1号、2号、3号、4号	-10 ~ 60	适	否	否	适	一般低载荷用		
	2类	2号、3号	-10 ~ 100	适	否	否	否	一般中载荷用		
集中润滑用润滑脂	1类	00号、0号、1号	-10 ~ 60	适	否	否	适	集中润滑中载荷用		
	2类	0号、1号、2号	-10 ~ 100	适	否	否	适			
	3类	0号、1号、2号	-10 ~ 60	适	适	适	适			
	4类	0号、1号、2号	-10 ~ 100	适	适	适	适			
重载荷用润滑脂	1类	0号、1号、2号、3号	-10 ~ 100	适	适	适	适	冲击高载荷用		
Gear Compound	1类	1号 ⁽¹⁾ 、2号 ⁽¹⁾ 、3号 ⁽¹⁾	-10 ~ 100	适	适	适	适	开式齿轮及钢缆用		

注(1) 此号码是根据运动粘度的分类。

备考 1 · 一般用润滑脂 1 类，主要是由原料基油和钙皂合成，耐水性能良好。

2 · 一般用润滑脂 2 类，主要是由原料基油和钠皂合成，耐热性能良好。

表 13.11 是代表性厂家的润滑脂产品一览表。

表 13.11 润滑脂

稠度等级	出光	COSMO	JAPAN ENERGY	SHOWA SHELL	新日本石油
00	—	—	—	Shell Alvania EP Grease R00	—
0	Daphne Eponex Grease SR №0	COSMO 集中润滑脂 №0	JOMO LISONIX GREASE EP0	Shell Alvania EP Grease R0	EPNOC GREASE AP(N)0
1	Daphne Eponex Grease SR №1	COSMO 集中润滑脂 №1	JOMO LISONIX GREASE EP1	Shell Alvania EP Grease S1	EPNOC GREASE AP(N)1
2	Daphne Eponex Grease SR №2	COSMO 集中润滑脂 №2	JOMO LISONIX GREASE EP2	Shell Alvania EP Grease S2	EPNOC GREASE AP(N)2
3	Daphne Eponex Grease SR №3	COSMO 集中润滑脂 №3	JOMO LISONIX GREASE EP3	Shell Alvania EP Grease S3	POWERNOC WB3



14 齿轮的损伤及对策

齿轮的损伤主要分为齿面的磨损与轮齿的折损。此外,作为特例,还有塑料齿轮的劣化及由轮缘或辐板引起的损伤。造成这些损伤的原因各种各样,比如,齿轮的强度不足、润滑及安装不好、予想外的超负载等等,找出原因及做出对策都很困难。关于齿轮的损伤,下面的两个标准中有详细的规定。

- JGMA 7001-01(1990) 齿轮的损伤状态及其术语
- JIS B 0160: 1999 齿轮—齿轮的磨损及损伤—术语

14.1 齿轮的磨损及齿面疲劳

齿轮的齿面磨损,由开始转动时齿面出现细微的凹凸、对齿轮的使用不产生什么影响的「跑和磨损」到齿面大量剥落的「重大磨损」等不同程度的磨损。磨损发展到轮齿的形状失去原型时,齿轮将不能正常的啮合。

齿面疲劳是齿面在反复的载荷作用下,在轮齿表面或表层下产生的应力大于此材料的疲劳极限时,齿面出现金属剥落现象的齿面损伤的总称。这类损伤包括点蚀、剥落、表层压碎等。

齿面发生重大的磨损、扩展性点蚀时,齿轮装置可能产生以下的异常现象。

- 噪音及振动增大
- 齿轮装置的温度急速上升
- 润滑油严重污染
- 喷合齿面间侧隙变大

如果能除掉这些异常现象的真正原因的话,即可解决轮齿的损伤问题。

齿面的损伤及对策如下。

(1) 相对负载齿轮强度(齿面强度)不足时

对策① 提高齿面接触疲劳强度(齿轮强度)

- 使用硬质及高强度齿轮材料
S45C → SCM440 / SCM415 等
请参照第 9 章 齿轮的材料及热处理
(P565 ~ P566)
- 增大齿轮尺寸
采用大模数或增加轮齿数
- 增加齿宽
- 由直齿齿轮改为螺旋齿齿轮
正齿轮 → 斜齿齿轮
直齿锥齿轮 → 弧齿锥齿轮
(提高纵向重合度)

对策② 降低负载

- 通过改变运行条件等减轻负载

(2) 因为安装状态不良轮齿接触不好时

对策:修正轮齿接触

根据齿轮的种类,具体对策不同。锥齿轮及蜗杆蜗轮的轮齿接触修正方法请参照第 8.3 齿轮的轮齿接触 (P562 ~ P564)。

(3) 齿轮及轴等变形造成齿轮片面接触时

对策:重新设计齿轮、轴及轴承等

提高系统刚性以改善轮齿接触

(4) 润滑状态不良时

对策:润滑油的种类、粘度、量等合理化

请参照第 13 章 齿轮的润滑 (P608 ~ P611)。

14.2 齿轮的折损

齿轮的轮齿折断有由于超过予想的重载作用在轮齿上造成破损的过载折断、交变载荷的重复作用下产生的疲劳折断等。正齿轮及锥齿轮等由于载荷集中在齿宽端部,造成片面轮齿接触(轮齿不当接触),也会发生轮齿的折断。

断齿的原因及对策例如下。

(1) 冲击负载造成的断齿

对策① 提高齿轮弯曲强度

改变材料或增大模数是最有效的手段

具体的对策与提高齿面强度(齿轮强度)相同

对策② 降低或去除冲击负载

例如,降低旋转速度等就是有效的手段

(2) 重复载荷造成疲劳折断时

对策① 提高齿轮强度

具体的对策与提高齿面强度(齿轮强度)相同

对策② 减轻负载或降低旋转速度

(3) 轮齿的磨损进展轮齿变薄而折断时

断齿问题的根本原因。需要做出对策避免磨损的发生。



14.3 齿轮的损伤状态及其术语

齿轮的损伤有各种各样，在这里，我们利用列表的形式，将摘自 JGMA 7001-01(1990)「齿轮的损伤状态及其术语」的代表性内容加以介绍。

表 14.1 齿轮损伤术语及种类

项目序号	损伤的种类	损伤状态及损伤原因
1	齿面耗损	
11	磨损	由于某种原因而造成的齿面材料的消耗及损失。
111	正常磨损	正常磨损不是损伤。齿轮运转的初级阶段、齿面的细微机加工痕迹磨失后的状态。
1111	中等磨损	齿面的磨损观察轮齿接触即清晰可见的状态。
1112	磨光	齿面的凸凹不平被逐步磨去，齿面呈光滑镜面的状态。
112	磨料磨损	齿面的滑动方向产生不规则的条痕，并伴有擦伤。
113	过度磨损	齿面磨损率很高，将对齿轮的设计寿命产生影响程度的磨损。
114	干涉磨损	齿轮的齿顶角部与相啮齿轮的齿根面干涉，齿根部被挖的磨损。
115	中等擦伤	是磨料磨损的一种。齿面滑动方向上形成线状的沟槽，齿面如同被犁铧耕过一般。
116	胶合	齿面的粘结与撕裂交互发生造成齿面劣化。
1161	中等胶合	有粘结倾向的轻度表面损伤，在滑动方向产生轻微的伤痕。
1162	破坏性胶合	沿滑动方向呈现明显的粘撕沟痕，齿形被完全破坏的损伤。
1163	局部胶合	在齿面的局部区域上发生胶合，损伤程度与中等胶合相同。
12	腐蚀	
121	化学腐蚀	齿面出现红棕色锈斑及蚀坑锈斑，齿轮材料劣化的现象。
122	微动腐蚀	相接触的两面之间在微小振幅下做相对往复运动时经常出现的表面损伤，伴随有氧化等化学腐蚀。
123	鳞蚀	由于热处理过程中的氧化作用，在齿面上产生不规则的凸起，传动后凸起呈现出金属光泽。
13	过热	齿轮温度极端过热现象。齿轮可见回火色。
14	侵蚀	强制润滑时喷射液体的冲击作用下在齿面形成的局部侵蚀。
15	电食	由于啮合齿面间的放电在齿面上产生蚀坑的损伤。
16	齿面疲劳	齿面产生金属脱落的齿面损伤的总称。
161	点蚀	齿面呈麻点状的齿面疲劳损伤。多出现在节线附近的下齿面上。
1611	初期点蚀	运转开始后不久在齿面出现的点蚀坑，齿面经跑和后凹坑不再扩展。
1612	扩展性点蚀	齿面经跑和后凹坑仍然继续扩展的点蚀。
1613	微点蚀	在过载及薄膜条件下运转时，齿面形成的细微的点蚀。
162	片蚀	剥落的一种。齿面发生比较大面积的薄金属片脱落。
163	剥落	在表面下发生材料疲劳，造成齿面金属片状剥落的轮齿损伤。
164	表层压碎	表面硬化层产生相当大范围剥落的损伤。
17	永久变形	
171	压痕	由于异物进入齿轮的啮合齿面间而产生的齿面凹坑。
1721	塑性变形	轮齿去载后形变也不能恢复的变形。是永久变形的典型形态。
1721	滚压塑变	齿面材料流动，节线附近出现沟槽及脊棱的损伤。
1722	轮齿锤击变形	由于轮齿承受剧烈振动载荷，齿面间相互锤击而引起的塑性变形。
173	起皱	垂直于旋转方向上，齿面出现周期性的波纹模样。
174	起脊	齿面及次表面的材料按一定方向塑性流动，产生条状的「垄」或「山脉」状的隆起。
175	飞边	与滚压塑变相同的塑性变形。齿顶面及齿宽端部材料的突出部分。
176	击痕	齿轮与其他物品冲突形成的微小塑性变形。表面出现凹凸。
18	裂纹	裂纹。分为制造工艺裂纹和使用裂纹的两大类。
181	淬火裂纹	淬火处理过程中产生的裂纹。
182	磨削裂纹	齿面的磨削加工中在齿面上产生的微小裂纹。
183	疲劳裂纹	重复应力或交变应力的作用下发生在齿根面及齿根圆角部的裂纹。
2	轮齿折断	
21	过载折断	轮齿由于短时、意外的过载造成的折断。
22	齿端折断	由于齿宽方向的片面接触而产生的折断，多发生在正齿轮及直齿锥齿轮上。
23	轮齿剪断	因为一次严重过载，导致轮齿从齿轮上被剪切。
24	塑性变形后折断	轮齿材料不能承受载荷强度，导致齿形严重变形后折断。
25	疲劳折断	由于疲劳齿根圆角部起始的龟裂不断扩展引起轮齿折断。
3	轮缘和辐板的折损	
4	塑料齿轮的劣化	
41	膨胀	固体在吸收液体后，高分子材料组织不变，体积增大的现象。

术语说明

(1) 蚀点 (pit)

齿轮的齿面上形成的麻点模样的小孔。

(2) 海滩模样 (Beach mark)

疲劳折断的断面形貌。常用翻滚的浪花在沙滩上留下的模样做比喻。



15 齿轮的噪音及对策

齿轮噪音形成的原因很多。尤其是在高负荷、高速度旋转时，齿轮的噪音及振动会成为很大的问题。但是，齿轮的噪音由各种原因复合产生，发生原因的特定非常困难。我们将设计及制作齿轮及齿轮装置时必须考虑的降低齿轮噪音的要点介绍如下。

(1) 高精度

齿距误差、齿形误差、齿线方向误差、径向跳动等小的齿轮噪音低。

(2) 齿面粗糙度小

除对齿轮做磨削、研磨等加工外，适当的跑和能减低齿面的粗糙度。由降低齿轮噪音的效果。

(3) 正确的轮齿接触

轮齿接触在齿宽的中心部的齿轮运转噪音低。鼓型加工或削端加工等齿形修整可以防止轮齿接触集中于齿宽端部。

(4) 适当的侧隙

传动转距具有脉动性时，容易产生碰撞，减小侧隙可得到良好的效果。相反，侧隙过小反而加大噪音的发生。

(5) 高重合度

一般情况下，同时啮合的轮齿多的齿轮噪音低。减小啮合压力角或增加齿高对提高重合度有效。

(6) 高纵向重合度

螺旋齿齿轮的同时啮合轮齿增加。

一般情况下，斜齿齿轮比正齿轮、弧齿锥齿轮比直齿锥齿轮的噪音低。

(7) 没有干涉的齿形

齿顶倒圆角及齿形经过修整的齿轮圆滑啮合不产生干涉。

圆滑啮合的齿轮噪音低。

(8) 小轮齿

齿轮体积相同时，小模数、大齿数的齿轮噪音低。

(9) 齿轮箱高刚度

提高齿轮、轴、齿轮箱的刚度。

由于承受负载的齿轮、轴等的变形，造成轮齿接触恶化，成为发生噪音的原因。

(10) 树脂材料

轻负荷、低速旋转时，使用塑料齿轮是降低噪音的有效手段。

需要注意树脂材料经吸水（膨润）或升温后齿轮膨胀所造成的侧隙减少。

(11) 振动衰减率高的材料

铸铁齿轮比钢制齿轮对降低噪音有效。仅轮毂部分采用铸铁制也可以期待其效果。

(12) 适当的润滑

通过适当且充分的润滑确保油膜，维持流体润滑状态非常重要。

高粘度润滑油有利于降低噪音。

(13) 低速旋转·低负荷

齿轮的转数及负荷越低，噪音也随之降低。

(14) 无击痕的齿轮

齿顶及齿面有击痕的齿轮，会发生周期性的异常噪音。

(15) 腹板厚度不宜过薄

为了减重而对辐板厚度调整过的齿轮，比较容易发生高频噪音。需要多加注意。



16 齿轮的测绘

16.1 正齿轮的测绘

通过对样品的正齿轮进行测绘, 将决定齿轮要素的方法及顺序说明如下。

测绘的顺序

- ① 数出齿轮的齿数。 $z =$
- ② 测量齿轮的外径。 $d_a =$
- ③ 假设齿轮为全高齿, 无变位, 通过下式计算大体上的模数值。

$$m = \frac{d_a}{z + 2} \quad m \approx \boxed{\quad}$$

- ④ 选择适当的跨齿 k 和 $k - 1$, 然后测量其公法线长度, 计算其差值。

跨齿数 $k =$ 时, 公法线长度 $W_k =$

“ $k - 1 =$ $W_{k-1} =$

差值为 =

- ⑤ 因为此差值为基圆齿距 $p_b = \pi m \cos \alpha$, 可在附表中选择模数 m 及压力角 α 。

$$m = \boxed{\quad}$$

$$\alpha = \boxed{\quad}$$

- ⑥ 利用模数 m , 压力角 α 及公法线长度 W 可求出变位系数 x 。计算方法请参考第 542 页、表 5.10 的第二项。

$$x = \boxed{\quad}$$

表 16.1 基圆齿距 p_b

模数	压 力 角		模数	压 力 角	
	20°	14.5°		20°	14.5°
1	2.952	3.042	8	23.619	24.332
1.25	3.690	3.802	9	26.569	27.373
1.5	4.428	4.562	10	29.521	30.415
2	5.904	6.083	11	32.473	33.456
2.5	7.380	7.604	12	35.425	36.498
3	8.856	9.125	14	41.329	42.581
3.5	10.332	10.645	16	47.234	48.664
4	11.808	12.166	18	53.138	54.747
5	14.760	15.208	20	59.042	60.830
6	17.712	18.249	22	64.946	66.913
7	20.664	21.291	25	73.802	76.037

注. 齿形除全高齿外, 还有短齿及高齿。

也有使用 20° 及 14.5° 以外的压力角的齿轮。

16.2 斜齿齿轮的测绘

斜齿齿轮的测绘与正齿轮的不同之处是需要测定螺旋角。要想正确地测定螺旋角, 需要使用专用的齿轮试验机。在此, 我们将介绍在没有齿轮试验机的条件下, 利用分度器粗略地测定螺旋角的方法。

斜齿齿轮的导程 p_z 可以通过下式进行计算。

$$p_z = \frac{\pi z m_n}{\sin \beta}$$

由此而知, 只要知道导程 p_z 、齿数 z 和法向模数 m_n , 即可通过上式求出螺旋角 β 。

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{\pi z m_n}{p_z} \right)$$

齿数 z 及法向模数 m_n 可以应用正齿轮的测绘方法求出。求导程 p_z 时, 正确地测定齿轮的外径 d_a 。在齿

轮的外径上涂布一层红丹, 压紧齿轮在白纸上滚动, 测量在白纸上所留下的压痕的螺旋角 β_a 。然后根据下式计算出导程 p_z 。

$$p_z = \frac{\pi d_a}{\tan \beta_a}$$

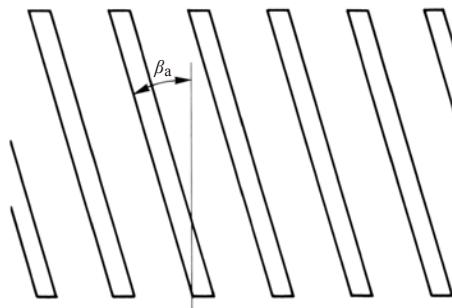


图 16.1 齿顶螺旋角的测定



17 齿轮机构

下面我们将介绍为了实现结构紧凑、大减速比等特别目的而使用的齿轮机构。行星齿轮机构、少齿差行星齿轮机构、封闭行星齿轮机构。

17.1 行星齿轮机构

最单纯的行星齿轮机构如图 17.1 所示。太阳齿轮 A、行星齿轮 B、内齿轮 C 及支撑行星齿轮并做公转运动的行星支架 D 这四个基本要素组成。

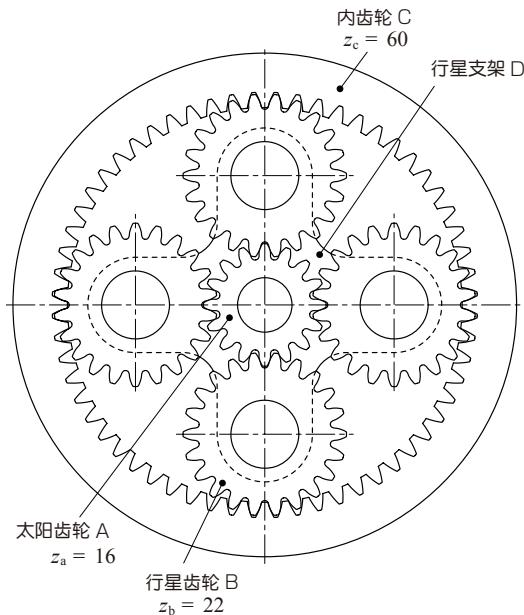


图 17.1 行星齿轮机构的构造

这种行星齿轮机构, 输入轴与输出轴可以配置在同一轴线上, 使用二个行星齿轮以分担负荷等, 因而可以使整个装置结构紧凑, 这些为其优点。

但是另一方面, 有构造的复杂性及内齿轮的干涉等比较难以对付的问题。图 17.1 的行星齿轮机构中, 太

阳齿轮 A 及内齿轮 C 和行星支架 D 拥有相同的中心轴线。

(1) 行星齿轮机构的齿数条件

此机构中太阳齿轮 A (z_a)、行星齿轮 B (z_b)、内齿轮 C (z_c) 的齿数和行星齿轮的个数 N 之间要满足下列的三个条件。

$$\boxed{\text{条件 1}} \quad z_c = z_a + 2z_b \quad (17.1)$$

这是保持中心距相等的必要条件, 称为同心条件。因为此条件是针对标准齿轮而言, 通过对啮合中心距 a 进行调整, 亦可选择不满足此条件齿数的齿轮。

也就是说, 太阳齿轮 A 和行星齿轮 B 的中心距 a_1 和行星齿轮 B 与内齿轮 C 的中心距 a_2 必须相等。

$$a_1 = a_2 \quad (17.2)$$

$$\boxed{\text{条件 2}} \quad \frac{z_a + z_c}{N} = \text{整数} \quad (17.3)$$

这是行星齿轮 B 对称地均匀配置在太阳轮与内齿轮之间时的必要条件, 称为封闭条件。行星齿轮 B 不均匀配置时, 则必须满足式 (17.4) 的条件。

一般地说, 行星齿轮 B 只要满足下面的封闭啮合条件, 就可以配置。

$$\frac{(z_a + z_c) \theta}{180} = \text{整数} \quad (17.4)$$

其中 θ : 相邻行星齿轮构成的半角 (°)

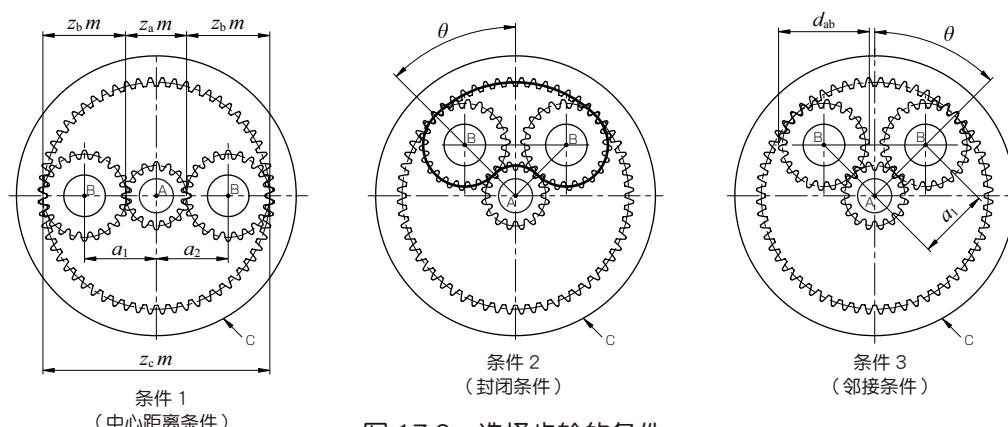


图 17.2 选择齿轮的条件



条件 3 $z_b + 2 < (z_a + z_b) \sin \frac{180^\circ}{N}$ (17.5)

这是保证行星齿轮间不得互相碰撞的必要条件，称为邻接条件（外径干涉条件）。

因为是使用标准齿轮（全高齿）均匀地配置时的条件，所以在其他的情况下，需要满足下式的条件。

$$d_{ab} < 2a_1 \sin \theta \quad (17.6)$$

其中 d_{ab} ：行星齿轮的齿顶圆直径

a_1 ：太阳齿轮和行星齿轮的中心距

满足了上述三个条件后，还有行星齿轮 B 与内齿轮 C 的啮合时产生干涉的问题。

关于内齿轮的干涉问题，内齿轮的计算 (P515 ~ 517) 中已经做了说明，也就是说，不能满足所有的这些条件，行星机构就不能成立。

(2) 行星齿轮机构的传动比

改变行星机构中的固定要素，就能改变传动比及旋转方向，如图 17.3 所示。

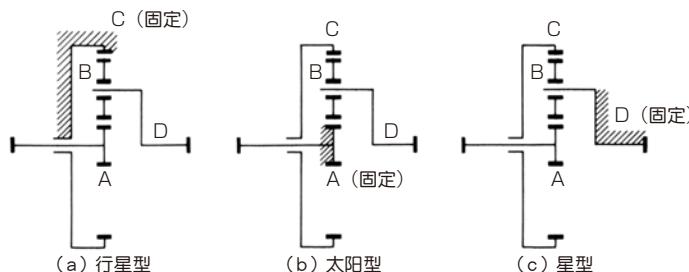


图 17.3 行星齿轮机构的类型

(a) 行星型

行星型是内齿轮 C 固定型。

在这个类型中，输入轴为太阳齿轮 A，输出轴为支架 D。根据数表法，可以求出传动比。

表 17.1 行星型的传动比计算

No.	说 明	太阳齿轮 A z_a	行星齿轮 B z_b	内齿轮 C z_c	行星支架 D
1	将支架固定后，太阳齿轮 A 旋转一周	+ 1	$-\frac{z_a}{z_b}$	$-\frac{z_a}{z_c}$	0
2	全体上胶后，转动 $+\frac{z_a}{z_c}$ 周	$+\frac{z_a}{z_c}$	$+\frac{z_a}{z_c}$	$+\frac{z_a}{z_c}$	$+\frac{z_a}{z_c}$
3	(1) + (2) 的合计	$1 + \frac{z_a}{z_c}$	$\frac{z_a}{z_c} - \frac{z_a}{z_b}$	0 (固定)	$+\frac{z_a}{z_c}$

$$\text{传动比} = \frac{1 + \frac{z_a}{z_c}}{\frac{z_a}{z_c}} = \frac{z_c}{z_a} + 1 \quad (17.7)$$

输入轴与输出轴旋转方向一致。

例如： $z_a = 16$ 、 $z_b = 16$ 、 $z_c = 48$ 的话，传动比为 4。

(b) 太阳型

太阳型是太阳齿轮 A 固定型。

当输入轴为内齿轮 C，输出轴为支架 D 时，求传动比。

表 17.2 太阳型的传动比计算

No.	说 明	太阳齿轮 A z_a	行星齿轮 B z_b	内齿轮 C z_c	行星支架 D
1	将支架固定后，太阳齿轮 A 旋转一周	+ 1	$-\frac{z_a}{z_b}$	$-\frac{z_a}{z_c}$	0
2	全体上胶后，转动一周	- 1	- 1	- 1	- 1
3	(1) + (2) 的合计	0 (固定)	$-\frac{z_a}{z_b} - 1$	$-\frac{z_a}{z_c} - 1$	- 1

$$\text{传动比} = \frac{-\frac{z_a}{z_c} - 1}{-1} = \frac{z_a}{z_c} + 1 \quad (17.8)$$

输入轴与输出轴的旋转方向相同。

例如，当 $z_a = 16$ 、 $z_b = 16$ 、 $z_c = 48$ 时，传动比为 1.33333。

(c) 星型

星型是行星支架 D 固定型。

在星型机构中，行星齿轮只进行自转没有公转。严格的讲，应不属于行星机构。

星形机构中，当输入轴为太阳齿轮，输出轴为内齿轮时的传动比为

$$\text{传动比} = -\frac{z_c}{z_a} \quad (17.9)$$

也就是说，行星齿轮做为惰轮（空转轮）对传动比不产生影响。

输入轴与输出轴的旋转方向相反。例如，当 $z_a = 16$ 、 $z_b = 16$ 、 $z_c = 48$ 时，传动比为 -3。



17.2 少齿差行星齿轮机构

齿数差很小的内齿轮与正齿轮通过适当的变位后可以避免干涉的发生。设内齿轮的齿数 $z_2 = 50$, 齿数差由 1 到 8 的齿轮要素, 列于表 17.3。

表 17.3 少齿数差的内齿轮和正齿轮 $(m = 1, \alpha = 20^\circ)$

z_1	49	48	47	46	45	44	43	42
x_1					0			
z_2					50			
x_2	1.00	0.60	0.40	0.30	0.20	0.11	0.06	0.01
α_b	61.0605°	46.0324°	37.4155°	32.4521°	28.2019°	24.5356°	22.3755°	20.3854°
a	0.971	1.354	1.775	2.227	2.666	3.099	3.557	4.010
ε	1.105	1.512	1.726	1.835	1.933	2.014	2.053	2.088

对于这些齿轮, 不会发生渐开曲线干涉与次摆线干涉, 但是会发生齿形重迭干涉。所以, 将齿轮移动至啮合位置时, 需要沿轴方向进行移动。

少齿数差的变位内齿轮做为少齿数差行星齿轮机构使用时, 单级即可获得高传动比。

此时的传动比为:

$$\text{传动比} = -\frac{z_1}{z_2 - z_1} \quad (17.10)$$

图 17.4 中示意了 $z_1 = 30$ 、 $z_2 = 31$ 的齿数差为 1 的内齿轮与正齿轮的啮合。

此时, 传动比为 -30。

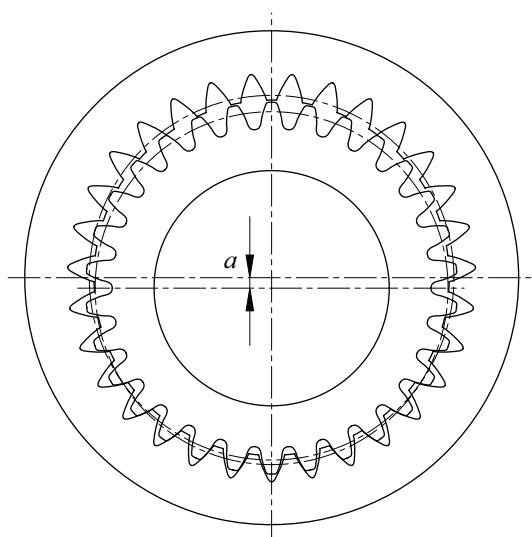


图 17.4 齿数差为 1 的内齿轮与正齿轮的啮合

17.3 封闭行星齿轮机构

已经在行星齿轮的齿数条件中有过说明, 象图 17.2 的条件中所示的四个齿轮的啮合, 称为封闭行星机构(封闭啮合齿轮系)。封闭行星机构的特点是, 喷合封闭在齿轮系中, 旋转一周后回到原来的位置。

此齿轮系中, 不能满足齿数条件的话, 齿轮的喷合就无法成立。

图 17.5 中所示的封闭喷合中, 将成立的齿数分别设为 z_1 、 z_2 、 z_3 。图中的粗实线所示部分的长度除以齿轮的齿距, 得出的数值为整数的话, 此封闭喷合成立。公式 (17.11) 为喷合条件公式。

$$\frac{z_1\theta_1}{180} + \frac{z_2(180 + \theta_1 + \theta_2)}{180} + \frac{z_3\theta_2}{180} = \text{整数} \quad (17.11)$$

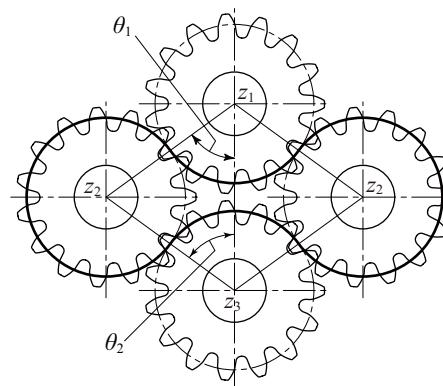


图 17.5 封闭啮合齿轮机构

图 17.6 示意了使用齿条的封闭啮合齿轮系。

图中粗实线部分的长度与齿轮齿距的商为整数的话, 此封闭啮合成立。

公式 (17.12) 为喷合条件公式。

$$\frac{z_1\theta_1}{180} + \frac{z_2(180 + \theta_1)}{180} + \frac{a}{\pi m} = \text{整数} \quad (17.12)$$

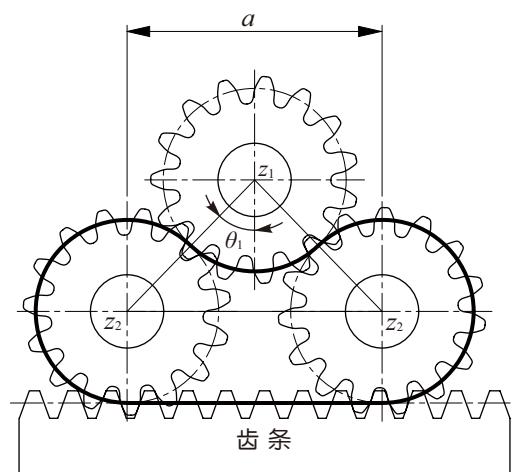


图 17.6 封闭啮合齿轮机构



〈有关齿轮的 JIS 标准〉

1 正齿轮及斜齿齿轮的精度 摘自 JIS B 1702-1:1998 JIS B 1702-2:1998

一直被广泛使用的有关齿轮精度的标准 JIS B 1702-1:1976(正齿轮及斜齿齿轮的精度),伴随与 ISO 标准的接轨,做了大幅度的更改。

新齿轮精度标准为 JIS B 1702-01:1998 (圆柱齿轮—精度等级 第 1 部: 齿轮齿面误差的定义及容许值) 和 JIS B 1702-02:1998 (圆柱齿轮—精度等级 第 2 部: 两齿面啮合误差及径向跳动的定义和精度容许值)。

新标准的精度摘录列于以下各表中。

为了避免与旧标准中的精度等级混同,新标准的精度等级在接头加上字母 N,以示区别。

〈新旧比较〉

我们尝试将新 JIS 标准与旧标准进行比较,但因为模数及分度圆直径(旧 JIS 为分度节径)的区分不同,比如说,旧 JIS 4 级相当于新 JIS 的几级这样的详细比较是不可能的。

做为大体上的基准,新 JIS 精度等级 = 旧 JIS 精度等级 + 4(级)。但是,不适用这个基准的部分也非常多。

重新确认旧图纸的齿轮精度时,有必要进行新旧精度等级的变换时,请参考(社)日本齿轮工业会发行的 JGMA/TR0001(2000):新旧 JIS 齿轮精度规格值对比表。

表 1 单齿距偏差 $\pm f_{pt}$

分度圆直径 d mm	模数 m mm	精度等级								
		$\pm f_{pt}$ μm								
		N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
5 $\leq d \leq 20$	0.5 $\leq m \leq 2$	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0	53.0
	2 $< m \leq 3.5$	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	59.0
20 $< d \leq 50$	0.5 $\leq m \leq 2$	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0
	2 $< m \leq 3.5$	3.9	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0
	3.5 $< m \leq 6$	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0
	6 $< m \leq 10$	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0
50 $< d \leq 125$	0.5 $\leq m \leq 2$	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	43.0	61.0
	2 $< m \leq 3.5$	4.1	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0
	3.5 $< m \leq 6$	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	52.0	73.0
	6 $< m \leq 10$	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	30.0	42.0	59.0	84.0
	10 $< m \leq 16$	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	35.0	50.0	71.0	100.0
	16 $< m \leq 25$	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	63.0	89.0	125.0
125 $< d \leq 280$	0.5 $\leq m \leq 2$	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	67.0
	2 $< m \leq 3.5$	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	51.0	73.0
	3.5 $< m \leq 6$	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0
	6 $< m \leq 10$	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	45.0	64.0	90.0
	10 $< m \leq 16$	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	53.0	75.0	107.0
	16 $< m \leq 25$	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0	47.0	66.0	93.0	132.0
280 $< d \leq 560$	0.5 $\leq m \leq 2$	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0	76.0
	2 $< m \leq 3.5$	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	57.0	81.0
	3.5 $< m \leq 6$	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0
	6 $< m \leq 10$	6.0	8.5	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	70.0	99.0
	10 $< m \leq 16$	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	81.0	115.0
	16 $< m \leq 25$	9.0	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	99.0	140.0

表2 齿距累积偏差 F_p

分度圆直径 d mm	模数 m mm	精度等级								
		N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
		F_p μm								
5 $\leq d \leq 20$	0.5 $\leq m \leq 2$	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	45.0	64.0	90.0	127.0
	2 $< m \leq 3.5$	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0	94.0	133.0
20 $< d \leq 50$	0.5 $\leq m \leq 2$	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	57.0	81.0	115.0	162.0
	2 $< m \leq 3.5$	10.0	15.0	21.0	30.0	42.0	59.0	84.0	119.0	168.0
	3.5 $< m \leq 6$	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	87.0	123.0	174.0
	6 $< m \leq 10$	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	93.0	131.0	185.0
50 $< d \leq 125$	0.5 $\leq m \leq 2$	13.0	18.0	26.0	37.0	52.0	74.0	104.0	147.0	208.0
	2 $< m \leq 3.5$	13.0	19.0	27.0	38.0	53.0	76.0	107.0	151.0	214.0
	3.5 $< m \leq 6$	14.0	19.0	28.0	39.0	55.0	78.0	110.0	156.0	220.0
	6 $< m \leq 10$	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0	116.0	164.0	231.0
	10 $< m \leq 16$	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0	124.0	175.0	248.0
	16 $< m \leq 25$	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	136.0	193.0	273.0
125 $< d \leq 280$	0.5 $\leq m \leq 2$	17.0	24.0	35.0	49.0	69.0	98.0	138.0	195.0	276.0
	2 $< m \leq 3.5$	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0	141.0	199.0	282.0
	3.5 $< m \leq 6$	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0	144.0	204.0	288.0
	6 $< m \leq 10$	19.0	26.0	37.0	53.0	75.0	106.0	149.0	211.0	299.0
	10 $< m \leq 16$	20.0	28.0	39.0	56.0	79.0	112.0	158.0	223.0	316.0
	16 $< m \leq 25$	21.0	30.0	43.0	60.0	85.0	120.0	170.0	241.0	341.0
280 $< d \leq 560$	0.5 $\leq m \leq 2$	23.0	32.0	46.0	64.0	91.0	129.0	182.0	257.0	364.0
	2 $< m \leq 3.5$	23.0	33.0	46.0	65.0	92.0	131.0	185.0	261.0	370.0
	3.5 $< m \leq 6$	24.0	33.0	47.0	66.0	94.0	133.0	188.0	266.0	376.0
	6 $< m \leq 10$	24.0	34.0	48.0	68.0	97.0	137.0	193.0	274.0	387.0
	10 $< m \leq 16$	25.0	36.0	50.0	71.0	101.0	143.0	202.0	285.0	404.0
	16 $< m \leq 25$	27.0	38.0	54.0	76.0	107.0	151.0	214.0	303.0	428.0

表3 齿形总偏差 F_a

分度圆直径 d mm	模数 m mm	精度等级								
		F_a μm								
		N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
5 $\leq d \leq 20$	0.5 $\leq m \leq 2$	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	37.0	52.0
	2 $< m \leq 3.5$	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0	53.0	75.0
20 $< d \leq 50$	0.5 $\leq m \leq 2$	3.6	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	58.0
	2 $< m \leq 3.5$	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	40.0	57.0	81.0
	3.5 $< m \leq 6$	6.0	9.0	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	99.0
	6 $< m \leq 10$	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	43.0	61.0	87.0	123.0
50 $< d \leq 125$	0.5 $\leq m \leq 2$	4.1	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0
	2 $< m \leq 3.5$	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	63.0	89.0
	3.5 $< m \leq 6$	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0	76.0	108.0
	6 $< m \leq 10$	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	92.0	131.0
	10 $< m \leq 16$	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0	112.0	159.0
	16 $< m \leq 25$	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	136.0	192.0
125 $< d \leq 280$	0.5 $\leq m \leq 2$	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	55.0	78.0
	2 $< m \leq 3.5$	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0	71.0	101.0
	3.5 $< m \leq 6$	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0	60.0	84.0	119.0
	6 $< m \leq 10$	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0	71.0	101.0	143.0
	10 $< m \leq 16$	11.0	15.0	21.0	30.0	43.0	60.0	85.0	121.0	171.0
	16 $< m \leq 25$	13.0	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0	144.0	204.0
280 $< d \leq 560$	0.5 $\leq m \leq 2$	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0	94.0
	2 $< m \leq 3.5$	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	58.0	82.0	116.0
	3.5 $< m \leq 6$	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	67.0	95.0	135.0
	6 $< m \leq 10$	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0	112.0	158.0
	10 $< m \leq 16$	12.0	16.0	23.0	33.0	47.0	66.0	93.0	132.0	186.0
	16 $< m \leq 25$	14.0	19.0	27.0	39.0	55.0	78.0	110.0	155.0	219.0

表 4 齿线总偏差 F_β

分度圆直径 d mm	齿 宽 b mm	精度等级								
		N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
		F_β μm								
5 ≤ d ≤ 20	4 ≤ b ≤ 10	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	35.0	49.0	69.0
	10 < b ≤ 20	4.9	7.0	9.5	14.0	19.0	28.0	39.0	55.0	78.0
	20 < b ≤ 40	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	45.0	63.0	89.0
	40 < b ≤ 80	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0	52.0	74.0	105.0
20 < d ≤ 50	4 ≤ b ≤ 10	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0
	10 < b ≤ 20	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	40.0	57.0	81.0
	20 < b ≤ 40	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	46.0	65.0	92.0
	40 < b ≤ 80	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0	76.0	107.0
	80 < b ≤ 160	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	46.0	65.0	92.0	130.0
50 < d ≤ 125	4 ≤ b ≤ 10	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	53.0	76.0
	10 < b ≤ 20	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0	60.0	84.0
	20 < b ≤ 40	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	95.0
	40 < b ≤ 80	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	56.0	79.0	111.0
	80 < b ≤ 160	8.5	12.0	17.0	24.0	33.0	47.0	67.0	94.0	133.0
	160 < b ≤ 250	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0	112.0	158.0
	250 < b ≤ 400	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	92.0	130.0	184.0
125 < d ≤ 280	4 ≤ b ≤ 10	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	40.0	57.0	81.0
	10 < b ≤ 20	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	32.0	45.0	63.0	90.0
	20 < b ≤ 40	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0	71.0	101.0
	40 < b ≤ 80	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	58.0	82.0	117.0
	80 < b ≤ 160	8.5	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	69.0	98.0	139.0
	160 < b ≤ 250	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0	116.0	164.0
	250 < b ≤ 400	12.0	17.0	24.0	34.0	47.0	67.0	95.0	134.0	190.0
280 < d ≤ 560	10 ≤ b ≤ 20	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	97.0
	20 < b ≤ 40	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0	76.0	108.0
	40 < b ≤ 80	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	87.0	124.0
	80 < b ≤ 160	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	52.0	73.0	103.0	146.0
	160 < b ≤ 250	11.0	15.0	21.0	30.0	43.0	60.0	85.0	121.0	171.0
	250 < b ≤ 400	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	70.0	98.0	139.0	197.0

表 5 两齿面总啮合偏差 F_t'' JIS B 1702-2:1998

分度圆直径 d mm	法向模数 m_n mm	精度等级									
		N4		N5		N6		N7		N8	
		F_t'' μm									
5 $\leq d \leq 20$	0.2 $\leq m_n \leq$ 0.5	7.5	11	15	21	30	42	60	85	120	
	0.5 < $m_n \leq$ 0.8	8.0	12	16	23	33	46	66	93	131	
	0.8 < $m_n \leq$ 1.0	9.0	12	18	25	35	50	70	100	141	
	1.0 < $m_n \leq$ 1.5	10	14	19	27	38	54	76	108	153	
	1.5 < $m_n \leq$ 2.5	11	16	22	32	45	63	89	126	179	
	2.5 < $m_n \leq$ 4.0	14	20	28	39	56	79	112	158	223	
20 < $d \leq 50$	0.2 $\leq m_n \leq$ 0.5	9.0	13	19	26	37	52	74	105	148	
	0.5 < $m_n \leq$ 0.8	10	14	20	28	40	56	80	113	160	
	0.8 < $m_n \leq$ 1.0	11	15	21	30	42	60	85	120	169	
	1.0 < $m_n \leq$ 1.5	11	16	23	32	45	64	91	128	181	
	1.5 < $m_n \leq$ 2.5	13	18	26	37	52	73	103	146	207	
	2.5 < $m_n \leq$ 4.0	16	22	31	44	63	89	126	178	251	
	4.0 < $m_n \leq$ 6.0	20	28	39	56	79	111	157	222	314	
	6.0 < $m_n \leq$ 10	26	37	52	74	104	147	209	295	417	
50 < $d \leq 125$	0.2 $\leq m_n \leq$ 0.5	12	16	23	33	46	66	93	131	185	
	0.5 < $m_n \leq$ 0.8	12	17	25	35	49	70	98	139	197	
	0.8 < $m_n \leq$ 1.0	13	18	26	36	52	73	103	146	206	
	1.0 < $m_n \leq$ 1.5	14	19	27	39	55	77	109	154	218	
	1.5 < $m_n \leq$ 2.5	15	22	31	43	61	86	122	173	244	
	2.5 < $m_n \leq$ 4.0	18	25	36	51	72	102	144	204	288	
	4.0 < $m_n \leq$ 6.0	22	31	44	62	88	124	176	248	351	
	6.0 < $m_n \leq$ 10	28	40	57	80	144	161	227	321	454	
125 < $d \leq 280$	0.2 $\leq m_n \leq$ 0.5	15	21	30	42	60	85	120	170	240	
	0.5 < $m_n \leq$ 0.8	16	22	31	44	63	89	126	178	252	
	0.8 < $m_n \leq$ 1.0	16	23	33	46	65	92	131	185	261	
	1.0 < $m_n \leq$ 1.5	17	24	34	48	68	97	137	193	273	
	1.5 < $m_n \leq$ 2.5	19	26	37	53	75	106	149	211	299	
	2.5 < $m_n \leq$ 4.0	21	30	43	61	86	121	172	243	343	
	4.0 < $m_n \leq$ 6.0	25	36	51	72	102	144	203	287	406	
	6.0 < $m_n \leq$ 10	32	45	64	90	127	180	255	360	509	
280 < $d \leq 560$	0.2 $\leq m_n \leq$ 0.5	19	28	39	55	78	110	156	220	311	
	0.5 < $m_n \leq$ 0.8	20	29	40	57	81	114	161	228	323	
	0.8 < $m_n \leq$ 1.0	21	29	42	59	83	117	166	235	332	
	1.0 < $m_n \leq$ 1.5	22	30	43	61	86	122	172	243	344	
	1.5 < $m_n \leq$ 2.5	23	33	46	65	92	131	185	262	370	
	2.5 < $m_n \leq$ 4.0	26	37	52	73	104	146	207	293	414	
	4.0 < $m_n \leq$ 6.0	30	42	60	84	119	169	239	337	477	
	6.0 < $m_n \leq$ 10	36	51	73	103	145	205	290	410	580	
560 < $d \leq 1000$	0.2 $\leq m_n \leq$ 0.5	25	35	50	70	99	140	198	280	396	
	0.5 < $m_n \leq$ 0.8	25	36	51	72	102	144	204	288	408	
	0.8 < $m_n \leq$ 1.0	26	37	52	74	104	148	209	295	417	
	1.0 < $m_n \leq$ 1.5	27	38	54	76	107	152	215	304	429	
	1.5 < $m_n \leq$ 2.5	28	40	57	80	114	161	228	322	455	
	2.5 < $m_n \leq$ 4.0	31	44	62	88	125	177	250	353	499	
	4.0 < $m_n \leq$ 6.0	35	50	70	99	141	199	281	398	562	
	6.0 < $m_n \leq$ 10	42	59	83	118	166	235	333	471	665	



JIS B 1702-2:1998 的附录 B (非标准, 仅供参考) 中刊载的径向跳动容许误差值列于表 6。

表 6 径向跳动容许偏差 F_r (μm)

分度圆直径 d mm	法向模数 m_n mm	精度等级								
		F_r μm								
		N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
5 $\leq d \leq 20$	0.5 $\leq m_n \leq$ 2.0	6.5	9.0	13	18	25	36	51	72	102
	2.0 $< m_n \leq$ 3.5	6.5	9.5	13	19	27	38	53	75	106
20 $< d \leq 50$	0.5 $\leq m_n \leq$ 2.0	8.0	11	16	23	32	46	65	92	130
	2.0 $< m_n \leq$ 3.5	8.5	12	17	24	34	47	67	95	134
	3.5 $< m_n \leq$ 6.0	8.5	12	17	25	35	49	70	99	139
	6.0 $< m_n \leq$ 10	9.5	13	19	26	37	52	74	105	148
50 $< d \leq 125$	0.5 $\leq m_n \leq$ 2.0	10	15	21	29	42	59	83	118	167
	2.0 $< m_n \leq$ 3.5	11	15	21	30	43	61	86	121	171
	3.5 $< m_n \leq$ 6.0	11	16	22	31	44	62	88	125	176
	6.0 $< m_n \leq$ 10	12	16	23	33	46	65	92	131	185
	10 $< m_n \leq$ 16	12	18	25	35	50	70	99	140	198
	16 $< m_n \leq$ 25	14	19	27	39	55	77	109	154	218
125 $< d \leq 280$	0.5 $\leq m_n \leq$ 2.0	14	20	28	39	55	78	110	156	221
	2.0 $< m_n \leq$ 3.5	14	20	28	40	56	80	113	159	225
	3.5 $< m_n \leq$ 6.0	14	20	29	41	58	82	115	163	231
	6.0 $< m_n \leq$ 10	15	21	30	42	60	85	120	169	239
	10 $< m_n \leq$ 16	16	22	32	45	63	89	126	179	252
	16 $< m_n \leq$ 25	17	24	34	48	68	96	136	193	272
280 $< d \leq 560$	0.5 $\leq m_n \leq$ 2.0	18	26	36	51	73	103	146	206	291
	2.0 $< m_n \leq$ 3.5	18	26	37	52	74	105	148	209	296
	3.5 $< m_n \leq$ 6.0	19	27	38	53	75	106	150	213	301
	6.0 $< m_n \leq$ 10	19	27	39	55	77	109	155	219	310
	10 $< m_n \leq$ 16	20	29	40	57	81	114	161	228	323
	16 $< m_n \leq$ 25	21	30	43	61	86	121	171	242	343



2 锥齿轮的精度

摘自 JIS B 1704 : 1978

齿轮的容许值

等 级	偏 差	端面模数																	
		0.6~1 的齿轮						1~1.6 的齿轮						1.6~2.5 的齿轮					
		节圆直径 (mm)																	
		3 以上	超过 6 到 12 以下	超过 12 到 25 以下	超过 25 到 50 以下	超过 50 到 100 以下	超过 100 到 200 以下	超过 6 到 12 以下	超过 12 到 25 以下	超过 25 到 50 以下	超过 50 到 100 以下	超过 100 到 200 以下	超过 200 到 400 以下	超过 12 到 25 以下	超过 25 到 50 以下	超过 50 到 100 以下	超过 100 到 200 以下	超过 200 到 400 以下	超过 400 到 800 以下
0	单齿距偏差 (±)	4	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5	6		4	4	5	5	6
	相邻齿距偏差	5	5	5	5	6	6	5	5	6	6	7	7		5	6	6	7	8
	齿距累积偏差 (±)	14	15	16	17	18	20	15	16	17	19	20	22		17	18	19	21	23
	径向跳动偏差	5	7	10	14	20	28	7	10	14	20	28	40		10	14	20	28	40
1	单齿距偏差 (±)	6	7	7	7	8	9	7	7	8	8	9	10		7	8	8	9	10
	相邻齿距偏差	8	9	9	10	10	11	9	9	10	11	11	13		10	10	11	12	13
	齿距累积偏差 (±)	25	26	28	30	32	34	27	29	30	32	35	39		30	32	34	36	40
	径向跳动偏差	7	10	15	21	30	43	10	15	21	30	43	60		15	21	30	43	60
2	单齿距偏差 (±)	12	12	13	13	14	15	12	13	14	14	16	17		13	14	15	16	17
	相邻齿距偏差	15	16	16	17	18	20	16	17	18	19	20	22		17	18	19	21	23
	齿距累积偏差 (±)	46	48	50	53	57	61	49	52	54	58	62	68		54	56	60	64	69
	径向跳动偏差	11	15	22	31	45	63	15	22	31	45	63	89		22	31	45	63	89
3	单齿距偏差 (±)							23	23	25	26	28	30		24	25	27	28	31
	相邻齿距偏差							29	30	32	34	36	39		31	33	35	37	40
	齿距累积偏差 (±)							90	94	98	105	110	120		97	100	105	115	120
	径向跳动偏差	16	24	33	48	67	95	24	33	48	67	95	135		33	48	67	95	135
4	单齿距偏差 (±)							41	42	44	46	49	52		43	45	47	50	55
	相邻齿距偏差							53	55	57	60	63	68		56	58	61	65	69
	齿距累积偏差 (±)							165	170	175	185	195	210		170	180	190	200	210
	径向跳动偏差	25	35	50	71	100	145	35	50	71	100	145	200		50	71	100	145	200
5	相邻齿距偏差														110	115	120	125	132
	径向跳动偏差	37	52	75	105	150	210	52	75	105	150	210	300		75	105	150	210	300
6	相邻齿距偏差														210	220	240	250	270
	径向跳动偏差	56	79	110	160	230	320	79	110	160	230	320	450		110	160	230	320	450



齿轮的容许值

等 级	偏 差	端面模数																		
		2.5~4 的齿轮						4~6 的齿轮						6~10 的齿轮						
		节圆直径 (mm)																		
		超过 12 到 25 以下	超过 25 到 50 以下	超过 50 到 100 以下	超过 100 到 200 以下	超过 200 到 400 以下	超过 400 到 800 以下	超过 800 到 1600 以下	超过 25 到 50 以下	超过 50 到 100 以下	超过 100 到 200 以下	超过 200 到 400 以下	超过 400 到 800 以下	超过 800 到 1600 以下	超过 25 到 50 以下	超过 50 到 100 以下	超过 100 到 200 以下	超过 200 到 400 以下	超过 400 到 800 以下	超过 800 到 1600 以下
0	单齿距偏差 (±)	5	5	5	6	6	7	8	5	6	6	7	7	8	6	6	7	7	8	9
	相邻齿距偏差	6	6	7	7	8	9	10	7	7	8	9	9	11	8	8	9	9	10	11
	齿距累积偏差 (±)	18	19	21	22	24	27	31	21	22	24	26	29	32	24	25	27	29	32	35
	径向跳动偏差	10	14	20	28	40	56	79	14	20	28	40	56	79	14	20	28	40	56	79
1	单齿距偏差 (±)	8	8	9	10	10	12	13	9	10	10	11	12	14	10	11	11	12	13	15
	相邻齿距偏差	10	11	12	12	14	15	17	12	12	13	14	16	18	13	14	15	16	17	19
	齿距累积偏差 (±)	32	33	36	38	42	46	51	36	38	41	45	49	54	41	43	46	49	54	59
	径向跳动偏差	15	21	30	43	60	86	120	21	30	43	60	86	120	21	30	43	60	86	120
2	单齿距偏差 (±)	14	15	16	17	18	20	22	16	17	18	19	21	23	18	19	20	21	23	25
	相邻齿距偏差	18	19	20	22	24	26	29	21	22	23	25	27	30	23	24	26	27	30	32
	齿距累积偏差 (±)	57	59	63	67	72	79	88	64	67	72	77	84	92	71	75	79	84	91	100
	径向跳动偏差	22	31	45	63	89	125	180	31	45	63	89	125	180	31	45	63	89	125	180
3	单齿距偏差 (±)	25	27	28	30	32	35	38	28	30	31	34	36	40	31	33	34	37	39	43
	相邻齿距偏差	33	34	36	39	41	45	49	37	39	41	44	47	52	41	42	45	48	51	56
	齿距累积偏差 (±)	100	105	110	120	130	140	150	115	120	125	135	145	160	125	130	140	145	155	170
	径向跳动偏差	33	48	67	95	135	190	270	48	67	95	135	190	270	48	67	95	135	190	270
4	单齿距偏差 (±)	45	47	50	52	55	59	65	50	52	54	58	62	68	54	56	59	62	67	72
	相邻齿距偏差	59	61	65	67	72	77	84	65	67	71	75	81	88	71	73	77	81	87	100
	齿距累积偏差 (±)	180	185	200	210	220	240	260	200	210	220	230	250	270	220	230	240	250	270	290
	径向跳动偏差	50	71	100	145	200	290	400	71	100	145	200	290	400	71	100	145	200	290	400
5	相邻齿距偏差	115	120	125	130	135	155	170	125	130	135	150	165	175	135	140	155	165	175	185
	径向跳动偏差	75	105	150	210	300	430	600	105	150	210	300	430	600	105	150	210	300	430	600
6	相邻齿距偏差	220	240	250	260	280	290	310	250	260	270	290	300	330	270	280	290	310	320	340
	径向跳动偏差	110	160	230	320	450	640	900	160	230	320	450	640	900	160	230	320	450	640	900
7	径向跳动偏差	250	360	500	720	1000	1450	2000	360	500	720	1000	1450	2000	360	500	720	1000	1450	2000



3 正齿轮及斜齿齿轮的侧隙

摘自废止标准 JIS B 1703 : 1976

侧隙的计算数值表 (JIS 0 级及 5 级)

单位 μm

端面模数 (mm)	齿厚减少量	节圆直径 (mm)																								
		1.5~3		3~6		6~12		12~25		25~50		50~100		100~200		200~400		400~800		800~1600		1600~3200				
		齿轮精度等级 (JIS)																								
0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级	0 级	5 级			
0.5	最小值	15		20		25		30		35		45		60		70										
	最大值	40	70	50	90	60	110	70	130	90	170	110	200	140	250	180	320									
1	最小值		25		25		35		40		50		60		70		90									
	最大值		60	100	70	120	80	150	100	180	120	220	150	270	180	330	230	410								
1.5	最小值			30		35		45		50		60		80		90										
	最大值			80	140	90	160	110	190	130	230	160	280	190	350	240	420									
2	最小值				40		50		60		70		80		100		120									
	最大值				100	180	120	210	140	250	170	300	200	360	240	440	300	540								
2.5	最小值				45		50		60		70		80		100		120									
	最大值				110	190	120	220	150	260	170	310	210	380	250	450	310	550								
3	最小值					50		60		70		90		100		130		150								
	最大值					130	240	150	280	180	330	220	390	260	470	310	570	380	690							
3.5	最小值					60		60		80		90		110		130		160								
	最大值					140	250	160	290	190	340	220	400	270	480	320	580	390	700							
4	最小值					60		70		80		90		110		130		160								
	最大值					150	270	170	310	200	360	230	420	280	500	330	590	400	720							
5	最小值					70		70		90		100		120		140		170								
	最大值					160	300	190	340	210	390	250	450	290	530	350	620	420	750							
6	最小值					70		80		90		110		120		150		170								
	最大值					180	330	200	370	230	410	260	480	310	560	360	650	430	780							
7	最小值					80		90		100		110		130		150		180								
	最大值					200	360	220	390	240	440	280	510	320	580	380	680	450	810							
8	最小值					90		90		110		120		140		160		190								
	最大值					210	380	240	420	260	470	300	540	340	610	400	710	460	840							
10	最小值						110		120		130		150		170		200									
	最大值						270	480	300	530	330	590	370	670	430	770	500	900								
12	最小值						120		130		140		160		180		210									
	最大值						300	540	330	590	360	650	410	730	460	830	530	950								
14	最小值						130		140		160		180		200		220									
	最大值						330	600	360	650	390	710	440	790	490	890	560	1010								
16	最小值							160		170		190		210		240										
	最大值							390	710	420	760	470	850	530	950	590	1070									
18	最小值							170		180		200		220		250										
	最大值							430	770	460	830	500	910	560	1000	630	1130									
20	最小值							180		200		210		240		260										
	最大值							460	820	490	890	540	960	590	1060	660	1190									
22	最小值								210		230		250		280											
	最大值								520	950	570	1020	620	1120	690	1250										
25	最小值									230		250		270		300										
	最大值									570	1030	620	1110	670	1210	740	1330									

JIS 0 级斜齿齿轮

侧隙的求法

法向模数 3

齿数 25 和 50

螺旋角 35°

$$\text{端面模数} = 3.66 \frac{3}{\cos 35^\circ}$$

小齿轮的节径 91.5

大齿轮的节径 183.0

小齿轮的齿厚减少量

最小值 $70\mu\text{m}$ 、最大值 $170\mu\text{m}$

大齿轮的齿厚减少量

最小值 $80\mu\text{m}$ 、最大值 $200\mu\text{m}$

侧隙

最小值 $70 + 80 = 150\mu\text{m}$ 最大值 $170 + 200 = 370\mu\text{m}$

根据齿轮的使用目的, 侧隙的大小可以采用与齿轮精度等级不同等级的侧隙值。

侧隙的计算公式

JIS 等级	最小值	最大值
0		$25W$
1 注 1		$28W$
2 注 1		$31.5W$
3		$35.5W$
4		$40W$
5		$45W$
6		$50W$
7		$63W$
8		$90W$
10W		



4 锥齿轮的侧隙

摘自 JIS B 1705 : 1973

侧隙的计算数值表 (JIS 0 级及 4 级)

单位 μm

端面模数 (mm)	齿厚减少量	节圆直径 (mm)																	
		3~6		6~12		12~25		25~50		50~100		100~200		200~400		400~800		800~1600	
		齿轮精度等级 (JIS)																	
0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级	0 级	4 级		
0.5	最小值	20	25	30	35	45	60												
	最大值	50	100	60	120	70	150	90	180	110	230	140	280						
1	最小值	25	25	35	40	50	60												
	最大值	60	120	70	140	80	160	100	200	120	240	150	300						
1.5	最小值	30	35	45	50	60	80												
	最大值	80	150	90	180	110	220	130	260	160	310	190	380						
2	最小值	40	50	60	70	80	100												
	最大值	100	200	120	230	140	280	170	330	200	400	240	490						
2.5	最小值	45	50	60	70	80	100												
	最大值	110	210	120	250	150	290	170	350	210	420	250	500	310	610				
3	最小值	45	50	60	70	80	90												
	最大值	110	230	130	270	150	310	180	360	220	430	260	520	310	630				
3.5	最小值	50	60	60	80	90	110												
	最大值	120	240	140	280	160	320	190	380	220	450	270	540	320	640				
4	最小值	50	60	70	80	90	110												
	最大值	130	260	150	300	170	340	200	400	230	470	280	550	330	660				
5	最小值	70	70	90	100	120	140												
	最大值	160	330	190	370	210	430	250	500	290	580	350	690						
6	最小值	70	80	90	110	120	150												
	最大值	180	360	200	410	230	460	260	530	310	620	360	730						
7	最小值	80	90	100	110	130	150												
	最大值	200	400	220	440	240	490	280	560	320	650	380	760						
8	最小值	90	90	110	120	140	160												
	最大值	210	430	240	470	260	530	300	600	340	680	400	790						
10	最小值	100	110	120	130	150	170												
	最大值	240	490	270	540	300	590	330	660	370	750	430	860						
12	最小值	120	130	140	160	180	200												
	最大值	300	600	330	660	360	730	410	810	460	920								
14	最小值	130	140	160	180	200	220												
	最大值	330	670	360	720	390	790	440	880	490	990								
16	最小值	150	160	170	190	210	230												
	最大值	360	730	390	790	420	850	470	940	530	1050								
18	最小值	170	180	200	220														
	最大值	430	850	460	920	500	1010	560	1120										
20	最小值	180	200	210	240														
	最大值	460	920	490	990	540	1070	590	1180										
22	最小值	200	210	230	250														
	最大值	490	980	520	1050	570	1140	620	1250	210	230	250	270						
25	最小值	210	230	250	270														
	最大值	540	1070	570	1150	620	1230	670	1340	540	1070	570	1150						

侧隙的计算公式

JIS 等级	最小值	最大值
0		25W
1		30W
2		35.5W
3		42.5W
4		50W
5		60W
6		71W

公差单位 W

$$W = \sqrt[3]{d_0} + 0.65m_s \quad (\mu\text{m})$$

其中 d_0 : 节径 (mm) m_s : 端面模数 (mm)



5 孔的公差带和极限偏差

摘自 JIS B 0401-2:1998

单位 μm

基准尺寸 (mm)		B		C		D			E			F			G		H					
超过	以下	B10	C9	C10	D8	D9	D10	E7	E8	E9	F6	F7	F8	G6	G7	H5	H6	H7	H8	H9	H10	
—	3	+ 180 + 140	+ 85 + 60	+ 100 + 20	+ 34 + 20	+ 45 + 30	+ 60	+ 24 + 14	+ 28 + 20	+ 39	+ 12 + 6	+ 16 + 10	+ 20	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 4 + 6	+ 10 0	+ 14	+ 25	+ 40		
3	6	+ 188 + 140	+ 100 + 70	+ 118 + 20	+ 48 + 30	+ 60 + 20	+ 78	+ 32 + 20	+ 38 + 10	+ 50	+ 18 + 22	+ 22 + 13	+ 28	+ 12 + 5	+ 16 + 4	+ 5 + 8	+ 12 0	+ 18	+ 30	+ 48		
6	10	+ 208 + 150	+ 116 + 80	+ 138 + 40	+ 62 + 40	+ 76 + 25	+ 98	+ 40 + 25	+ 47 + 61	+ 61	+ 22 + 13	+ 28 + 35	+ 35	+ 14 + 5	+ 20 + 5	+ 6 + 9	+ 15 0	+ 22	+ 36	+ 58		
10	14	+ 220 + 150	+ 138 + 95	+ 165 + 50	+ 77 + 50	+ 93 + 32	+ 120	+ 50 + 32	+ 59 + 75	+ 75	+ 27 + 16	+ 34 + 43	+ 43	+ 17 + 6	+ 24 + 7	+ 8 + 11	+ 18 0	+ 27	+ 43	+ 70		
14	18																					
18	24	+ 244 + 160	+ 162 + 110	+ 194 + 65	+ 98 + 40	+ 117 + 20	+ 149	+ 61 + 40	+ 73 + 20	+ 92	+ 33 + 20	+ 41 + 53	+ 53	+ 20 + 7	+ 28 + 7	+ 9 + 13	+ 21 0	+ 33 + 52	+ 84			
24	30																					
30	40	+ 270 + 170	+ 182 + 120	+ 220 + 120	+ 119 + 80	+ 142 + 80	+ 180	+ 75 + 50	+ 89 + 112	+ 112	+ 41 + 25	+ 50 + 64	+ 64	+ 25 + 9	+ 34 + 9	+ 11 + 16	+ 25 0	+ 39 + 62	+ 100			
40	50	+ 280 + 180	+ 192 + 130	+ 230 + 130																		
50	65	+ 310 + 190	+ 214 + 140	+ 260 + 140	+ 146 + 100	+ 174 + 100	+ 220	+ 90 + 60	+ 106 + 134	+ 134	+ 49 + 30	+ 60 + 76	+ 76	+ 29 + 10	+ 40 + 10	+ 13 + 19	+ 30 0	+ 46 + 74	+ 120			
65	80	+ 320 + 200	+ 224 + 150	+ 270 + 150																		
80	100	+ 360 + 220	+ 257 + 170	+ 310 + 170	+ 174 + 120	+ 207 + 120	+ 260	+ 107 + 72	+ 126 + 159	+ 159	+ 58 + 36	+ 71 + 90	+ 90	+ 34 + 12	+ 47 + 12	+ 15 + 12	+ 22 0	+ 35 + 87	+ 54 + 140			
100	120	+ 380 + 240	+ 267 + 180	+ 320 + 180																		
120	140	+ 420 + 260	+ 300 + 200	+ 360 + 200																		
140	160	+ 440 + 280	+ 310 + 210	+ 370 + 210	+ 208 + 145	+ 245 + 145	+ 305	+ 125 + 85	+ 148 + 185	+ 185	+ 68 + 43	+ 83 + 106	+ 106	+ 39 + 14	+ 54 + 14	+ 18 + 10	+ 25 0	+ 40 + 63	+ 100 + 160			
160	180	+ 470 + 310	+ 330 + 230	+ 390 + 230																		
180	200	+ 525 + 340	+ 355 + 240	+ 425 + 240																		
200	225	+ 565 + 380	+ 375 + 260	+ 445 + 260	+ 242 + 170	+ 285 + 100	+ 355	+ 146 + 100	+ 172 + 215	+ 215	+ 79 + 50	+ 96 + 122	+ 122	+ 44 + 15	+ 61 + 15	+ 20 + 15	+ 29 0	+ 46 + 72	+ 115 + 185			
225	250	+ 605 + 420	+ 395 + 280	+ 465 + 280																		
250	280	+ 690 + 480	+ 430 + 300	+ 510 + 300	+ 271 + 190	+ 320 + 110	+ 400	+ 162 + 110	+ 191 + 240	+ 240	+ 88 + 56	+ 108 + 137	+ 137	+ 49 + 17	+ 69 + 17	+ 23 + 17	+ 32 0	+ 52 + 81	+ 130 + 210			
280	315	+ 750 + 540	+ 460 + 330	+ 540 + 330																		
315	355	+ 830 + 600	+ 500 + 360	+ 590 + 360	+ 299 + 210	+ 350 + 125	+ 440	+ 182 + 125	+ 214 + 265	+ 265	+ 98 + 62	+ 119 + 151	+ 151	+ 54 + 18	+ 75 + 18	+ 25 + 12	+ 36 0	+ 57 + 89	+ 140 + 230			
355	400	+ 910 + 680	+ 540 + 400	+ 630 + 400																		
400	450	+ 1010 + 760	+ 595 + 440	+ 690 + 440	+ 327 + 230	+ 385 + 135	+ 480	+ 198 + 135	+ 232 + 290	+ 290	+ 108 + 68	+ 131 + 165	+ 165	+ 60 + 20	+ 83 + 20	+ 27 + 12	+ 40 0	+ 63 + 97	+ 155 + 250			
450	500	+ 1090 + 840	+ 635 + 480	+ 730 + 480																		

备考 表格中, 上段的数值为尺寸公差上限值, 下段的数值为尺寸公差下限值。

单位 μm

基准尺寸 (mm)		JS			K			M			N		P		R	S	T	U	X	
超过	以下	JS5	JS6	JS7	K5	K6	K7	M5	M6	M7	N6	N7	P6	P7	R7	S7	T7	U7	X7	
—	3	± 2	± 3	± 5	0 — 4	0 — 6	0 — 10	— 2 — 6	— 2 — 8	— 2 — 12	— 4 — 10	— 4 — 14	— 6 — 12	— 6 — 16	— 10 — 20	— 14 — 24	—	— 18 — 28	— 20 — 30	
3	6	± 2.5	± 4	± 6	0 — 5	+ 2 — 6	+ 3 — 9	— 3 — 8	— 1 — 9	0 — 12	— 4 — 13	— 4 — 16	— 9 — 17	— 8 — 20	— 11 — 23	— 15 — 27	—	— 19 — 31	— 24 — 36	
6	10	± 3	± 4.5	± 7.5	+ 1 — 5	+ 2 — 7	+ 5 — 10	— 4 — 10	— 3 — 12	0 — 15	— 7 — 16	— 4 — 19	— 12 — 21	— 9 — 24	— 13 — 28	— 17 — 32	—	— 22 — 37	— 28 — 43	
10	14	± 4	± 5.5	± 9	+ 2 — 6	+ 2 — 9	+ 6 — 12	— 4 — 12	— 4 — 15	0 — 18	— 9 — 20	— 5 — 23	— 15 — 26	— 11 — 29	— 16 — 34	— 21 — 39	—	— 26 — 44	— 33 — 51	
14	18																— 38 — 56			
18	24	± 4.5	± 6.5	± 10.5	+ 1 — 8	+ 2 — 11	+ 6 — 15	— 5 — 14	— 4 — 17	0 — 21	— 11 — 24	— 7 — 28	— 18 — 31	— 14 — 35	— 20 — 41	— 27 — 48	—	— 33 — 54	— 46 — 67	
24	30																— 33 — 54	— 40 — 61	— 56 — 77	
30	40	± 5.5	± 8	± 12.5	+ 2 — 9	+ 3 — 13	+ 7 — 18	— 5 — 16	— 4 — 20	0 — 25	— 12 — 28	— 8 — 33	— 21 — 37	— 17 — 42	— 25 — 50	— 34 — 59	— 39 — 59	— 51 — 76	—	
40	50																— 45 — 70	— 61 — 86		
50	65	± 6.5	± 9.5	± 15	+ 3 — 10	+ 4 — 15	+ 9 — 21	— 6 — 19	— 5 — 24	0 — 30	— 14 — 33	— 9 — 39	— 26 — 45	— 21 — 51	— 30 — 45	— 42 — 51	— 55 — 85	— 76 — 106	—	
65	80																— 32 — 62	— 48 — 78	— 64 — 94	— 91 — 121
80	100	± 7.5	± 11	± 17.5	+ 2 — 13	+ 4 — 18	+ 10 — 25	— 8 — 23	— 6 — 28	0 — 35	— 16 — 38	— 10 — 45	— 30 — 52	— 24 — 59	— 38 — 52	— 58 — 93	— 78 — 113	— 111 — 146	—	
100	120																— 41 — 76	— 66 — 101	— 91 — 126	— 131 — 166
120	140	± 9	± 12.5	± 20	± 3 — 15	± 4 — 21	± 12	± 9	± 8	± 0	± 16	± 10	± 30	± 24	± 48	± 77	± 107	± 147	\pm	
140	160																— 50 — 90	— 85 — 125	— 119 — 159	—
160	180																— 53 — 93	— 93 — 133	— 131 — 171	—
180	200	± 10	± 14.5	± 23	± 2 — 18	± 5 — 24	± 13	± 11	± 8	± 0	± 22	± 14	± 41	± 33	± 60	± 105	± 151	\pm	\pm	
200	225																± 63	± 113	± 159	\pm
225	250																	— 67 — 113	— 123 — 169	—
250	280	± 11.5	± 16	± 26	± 3 — 20	± 5 — 27	± 16	± 13	± 11	± 8	± 0	± 25	± 14	± 47	± 36	± 74	± 126	\pm	\pm	
280	315																	— 78 — 130	— 144	—
315	355	± 12.5	± 18	± 28.5	± 3 — 22	± 7 — 29	± 17	± 14	± 10	± 0	± 26	± 16	± 51	± 41	± 41	± 87	± 144	\pm	\pm	
355	400																	— 93 — 150	— 150	—
400	450	± 13.5	± 20	± 31.5	± 2 — 25	± 8 — 32	± 18	± 16	± 10	± 0	± 27	± 17	± 55	± 45	± 45	± 103	± 166	\pm	\pm	
450	500																	— 109 — 172	— 123	—

备考 表格中,上段的数值为尺寸公差上限值,下段的数值为尺寸公差下限值。



6 轴的公差带和极限公差

摘自 JIS B 0401-2:1998

单位 μm

基准尺寸 (mm)		b	c	d		e			f			g			h					
超过	以下	b9	c9	d8	d9	e7	e8	e9	f6	f7	f8	g4	g5	g6	h4	h5	h6	h7	h8	h9
—	3	—140 —165	—60 —85	—20 —34 —45	—14 —24 —28 —39	—6 —12 —16 —20	—2 —5 —6 —8	0 —3 —4 —6 —10 —14 —25												
3	6	—140 —170	—70 —100	—30 —48 —60	—20 —32 —38 —50	—10 —18 —22 —28	—4 —8 —9 —12	0 —4 —5 —8 —12 —18 —30												
6	10	—150 —186	—80 —116	—40 —62 —76	—25 —40 —47 —61	—13 —22 —28 —35	—5 —9 —11 —14	0 —4 —6 —9 —15 —22 —36												
10	14	—150 —193	—95 —138	—50 —77 —93	—32 —50 —59 —75	—16 —27 —34 —43	—6 —11 —14 —17	0 —5 —8 —11 —18 —27 —43												
14	18	—160 —212	—110 —162	—65 —98 —117	—40 —61 —73 —92	—20 —33 —41 —53	—7 —13 —16 —20	0 —6 —9 —13 —21 —33 —52												
18	24	—160 —212	—110 —162	—65 —98 —117	—40 —61 —73 —92	—20 —33 —41 —53	—7 —13 —16 —20	0 —6 —9 —13 —21 —33 —52												
24	30	—170 —232	—120 —182	—80 —119 —142	—50 —75 —89 —112	—25 —41 —50 —64	—9 —16 —20 —25	0 —7 —11 —16 —25 —39 —62												
30	40	—170 —232	—120 —182	—80 —119 —142	—50 —75 —89 —112	—25 —41 —50 —64	—9 —16 —20 —25	0 —7 —11 —16 —25 —39 —62												
40	50	—180 —242	—130 —192	—100 —146 —174	—60 —90 —106 —134	—30 —49 —60 —76	—10 —18 —23 —29	0 —8 —13 —19 —30 —46 —74												
50	65	—190 —264	—140 —214	—100 —146 —174	—60 —90 —106 —134	—30 —49 —60 —76	—10 —18 —23 —29	0 —8 —13 —19 —30 —46 —74												
65	80	—200 —274	—150 —224	—120 —174 —207	—72 —107 —126 —159	—36 —58 —71 —90	—12 —22 —27 —34	0 —10 —15 —22 —35 —54 —87												
80	100	—220 —307	—170 —257	—120 —174 —207	—72 —107 —126 —159	—36 —58 —71 —90	—12 —22 —27 —34	0 —10 —15 —22 —35 —54 —87												
100	120	—240 —327	—180 —267	—145 —208 —245	—85 —125 —148 —185	—43 —68 —83 —106	—14 —26 —32 —39	0 —12 —18 —25 —40 —63 —100												
120	140	—260 —360	—200 —300	—145 —208 —245	—85 —125 —148 —185	—43 —68 —83 —106	—14 —26 —32 —39	0 —12 —18 —25 —40 —63 —100												
140	160	—280 —380	—210 —310	—145 —208 —245	—85 —125 —148 —185	—43 —68 —83 —106	—14 —26 —32 —39	0 —12 —18 —25 —40 —63 —100												
160	180	—310 —410	—230 —330	—145 —208 —245	—85 —125 —148 —185	—43 —68 —83 —106	—14 —26 —32 —39	0 —12 —18 —25 —40 —63 —100												
180	200	—340 —455	—240 —355	—170 —242 —285	—100 —146 —172 —215	—50 —79 —96 —122	—15 —29 —35 —44	0 —14 —20 —29 —46 —72 —115												
200	225	—380 —495	—260 —375	—170 —242 —285	—100 —146 —172 —215	—50 —79 —96 —122	—15 —29 —35 —44	0 —14 —20 —29 —46 —72 —115												
225	250	—420 —535	—280 —395	—190 —271 —320	—110 —162 —191 —240	—56 —88 —108 —137	—17 —33 —40 —49	0 —16 —23 —32 —52 —81 —130												
250	280	—480 —610	—300 —430	—190 —271 —320	—110 —162 —191 —240	—56 —88 —108 —137	—17 —33 —40 —49	0 —16 —23 —32 —52 —81 —130												
280	315	—540 —670	—330 —460	—210 —299 —350	—125 —182 —214 —265	—62 —98 —119 —151	—18 —36 —43 —54	0 —18 —25 —36 —57 —89 —140												
315	355	—600 —740	—360 —500	—210 —299 —350	—125 —182 —214 —265	—62 —98 —119 —151	—18 —36 —43 —54	0 —18 —25 —36 —57 —89 —140												
355	400	—680 —820	—400 —540	—230 —327 —385	—135 —198 —232 —290	—68 —108 —131 —165	—20 —40 —47 —60	0 —20 —27 —40 —63 —97 —155												
400	450	—760 —915	—440 —595	—230 —327 —385	—135 —198 —232 —290	—68 —108 —131 —165	—20 —40 —47 —60	0 —20 —27 —40 —63 —97 —155												
450	500	—840 —995	—480 —635	—230 —327 —385	—135 —198 —232 —290	—68 —108 —131 —165	—20 —40 —47 —60	0 —20 —27 —40 —63 —97 —155												

备考 表格中, 上段的数值为尺寸公差上限值, 下段的数值为尺寸公差下限值。

单位 μm

基准尺寸 (mm)		js				k			m			n	p	r	s	t	u	x	
超过	以下	js4	js5	js6	js7	k4	k5	k6	m4	m5	m6	n6	p6	r6	s6	t6	u6	x6	
—	3	± 1.5	± 2	± 3	± 5	+ 3 0	+ 4 + 2	+ 6	+ 5 + 2	+ 6 + 4	+ 8	+ 10 + 4	+ 12 + 6	+ 16 + 10	+ 20 + 14	—	+ 24 + 18	+ 26 + 20	
3	6	± 2	± 2.5	± 4	± 6	+ 5 + 1	+ 6 + 4	+ 9	+ 8 + 4	+ 9 + 12	+ 12	+ 16 + 8	+ 20 + 12	+ 23 + 15	+ 27 + 19	—	+ 31 + 23	+ 36 + 28	
6	10	± 2	± 3	± 4.5	± 7.5	+ 5 + 1	+ 7 + 1	+ 10	+ 10 + 6	+ 12 + 15	+ 15	+ 19 + 10	+ 24 + 15	+ 28 + 19	+ 32 + 23	—	+ 37 + 28	+ 43 + 34	
10	14	± 2.5	± 4	± 5.5	± 9	+ 6 + 1			+ 12 + 7			+ 23 + 12	+ 29 + 18	+ 34 + 23	+ 39 + 28	—	+ 44 + 33	+ 51 + 40	
14	18					+ 9 + 12			+ 15 + 18			+ 29 + 23			+ 34 + 28			+ 56 + 45	
18	24	± 3	± 4.5	± 6.5	± 10.5	+ 8 + 2			+ 11 + 15			+ 14 + 8			+ 17 + 21			+ 54 + 41	+ 67 + 54
24	30					+ 11 + 15			+ 21 + 21			+ 28 + 15	+ 35 + 22	+ 41 + 28	+ 48 + 35	—	+ 61 + 48	+ 77 + 64	
30	40	± 3.5	± 5.5	± 8	± 12.5	+ 9 + 2			+ 13 + 18			+ 16 + 9			+ 20 + 25			+ 64 + 48	+ 76 + 60
40	50					+ 13 + 2			+ 20 + 25			+ 33 + 17	+ 42 + 26	+ 50 + 34	+ 59 + 43	+ 70 + 54	+ 86 + 70	—	
50	65	± 4	± 6.5	± 9.5	± 15	+ 10 + 2			+ 15 + 21			+ 19 + 11			+ 24 + 30			+ 60 + 41	+ 72 + 53
65	80					+ 15 + 21			+ 30 + 32			+ 39 + 20	+ 51 + 32	+ 85 + 66	+ 106 + 87	—	+ 121 + 102	—	
80	100	± 5	± 7.5	± 11	± 17.5	+ 13 + 3			+ 18 + 25			+ 23 + 13			+ 28 + 35			+ 73 + 51	+ 93 + 71
100	120					+ 18 + 3			+ 28 + 35			+ 45 + 23	+ 59 + 37	+ 113 + 94	+ 146 + 124	+ 126 + 104	+ 166 + 144	—	
120	140	± 6	± 9	± 12.5	± 20	+ 15 + 3			+ 21 + 28			+ 27 + 15			+ 33 + 40			+ 88 + 63	+ 117 + 92
140	160					+ 21 + 3			+ 28 + 40			+ 52 + 27	+ 68 + 43	+ 125 + 100	+ 159 + 134	—	+ 121 + 102	—	
160	180					+ 21 + 3			+ 28 + 40			+ 33 + 37			+ 133 + 108			+ 93 + 68	+ 171 + 146
180	200	± 7	± 10	± 14.5	± 23	+ 18 + 4			+ 24 + 33			+ 31 + 17			+ 37 + 46			+ 106 + 77	+ 151 + 122
200	225					+ 24 + 33			+ 37 + 46			+ 60 + 31	+ 79 + 50	+ 159 + 130	+ 159 + 134	—	—	—	
225	250					+ 24 + 33			+ 37 + 46			+ 60 + 31	+ 79 + 50	+ 159 + 130	+ 169 + 140	—	—	—	
250	280	± 8	± 11.5	± 16	± 26	+ 20 + 4			+ 27 + 36			+ 36 + 20			+ 43 + 52			+ 126 + 94	+ 147 + 122
280	315					+ 27 + 36			+ 33 + 20			+ 66 + 34	+ 88 + 56	+ 130 + 98	+ 144 + 108	—	—	—	
315	355	± 9	± 12.5	± 18	± 28.5	+ 22 + 4			+ 29 + 40			+ 39 + 21			+ 46 + 57			+ 144 + 108	+ 171 + 146
355	400					+ 22 + 4			+ 29 + 40			+ 73 + 37	+ 98 + 62	+ 150 + 114	+ 144 + 108	—	—	—	
400	450	± 10	± 13.5	± 20	± 31.5	+ 25 + 5			+ 32 + 45			+ 43 + 23			+ 50 + 63			+ 166 + 126	+ 151 + 122
450	500					+ 32 + 5			+ 45 + 23			+ 80 + 40	+ 108 + 68	+ 159 + 132	+ 169 + 132	—	—	—	

备考 表格中, 上段的数值为尺寸公差上限值, 下段的数值为尺寸公差下限值。



7 中心孔

摘自 JIS B 1011:1987

中心孔的种类

角度			型式
60 度	75 度	90 度	A
			B
			C
	—		R

备考 1 · 这里所示的角度是适用的中心孔角度。

2 · 尽可能不使用 75 度中心孔。

60 度中心孔的形状及尺寸

d 公称	D	D ₁	D ₂ (最小)	l ₁ (注 ¹ 最大)	b (约)	参考尺寸				
						l ₁	l ₂	l ₃	t	a
(0.5)	1.06	1.6	1.6	1	0.2	0.48	0.64	0.68	0.5	0.16
(0.63)	1.32	2	2	1.2	0.3	0.6	0.8	0.9	0.6	0.2
(0.8)	1.7	2.5	2.5	1.5	0.3	0.78	1.01	1.08	0.7	0.23
1	2.12	3.15	3.15	1.9	0.4	0.97	1.27	1.37	0.9	0.3
(1.25)	2.65	4	4	2.2	0.6	1.21	1.6	1.81	1.1	0.39
1.6	3.35	5	5	2.8	0.6	1.52	1.99	2.12	1.4	0.47
2	4.25	6.3	6.3	3.3	0.8	1.95	2.54	2.75	1.8	0.59
2.5	5.3	8	8	4.1	0.9	2.42	3.2	3.32	2.2	0.78
3.15	6.7	10	10	4.9	1	3.07	4.03	4.07	2.8	0.96
4	8.5	12.5	12.5	6.2	1.3	3.9	5.05	5.2	3.5	1.15
(5)	10.6	16	16	7.5	1.6	4.85	6.41	6.45	4.4	1.56
6.3	13.2	18	18	9.2	1.8	5.98	7.36	7.78	5.5	1.38
(8)	17	22.4	22.4	11.5	2	7.79	9.35	9.79	7	1.56
10	21.2	28	28	14.2	2.2	9.7	11.66	11.9	8.7	1.96

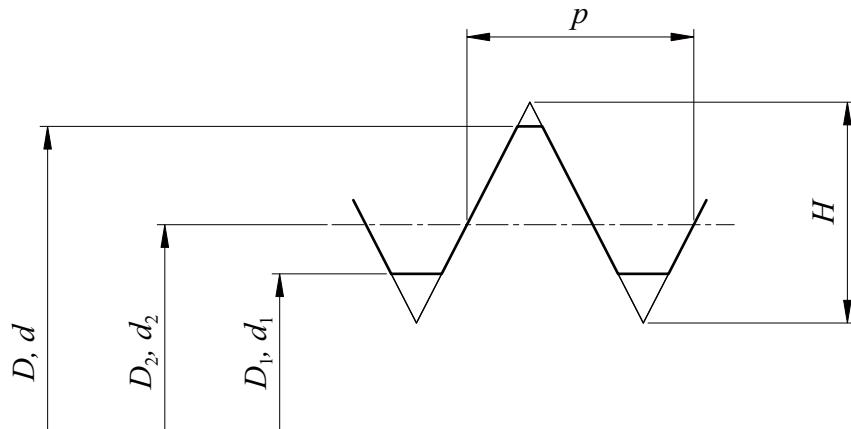
注 1. l 不能小于 t 。

备考 尽量避免使用公称栏中带有小括弧的数值。



8 普通螺纹 内螺纹直径

摘自 JIS B 0205-4:2001 JIS B 0209-2:2001



旋合精度：中等

旋合长度：普通

公差带：6H

基准尺寸

公称直径=外螺纹外径 <i>d</i>	螺距 <i>p</i>	内螺纹直径		
		基准值 D_1	最大	最小
M1.6	0.35	1.221	1.321	1.221
(M1.8)	0.35	1.421	1.521	1.421
M2	0.4	1.567	1.679	1.567
(M2.2)	0.45	1.713	1.838	1.713
M2.5	0.45	2.013	2.138	2.013
M3	0.5	2.459	2.599	2.459
(M3.5)	0.6	2.851	3.011	2.85
M4	0.7	3.242	3.422	3.242
(M4.5)	0.75	3.688	3.878	3.688
M5	0.8	4.134	4.334	4.134
M6	1	4.918	5.154	4.917
(M7)	1	5.918	6.154	5.917
M8	1.25	6.647	6.912	6.647
M10	1.5	8.376	8.676	8.376
M12	1.75	10.106	10.441	10.106
(M14)	2	11.835	12.21	11.835
M16	2	13.835	14.21	13.835
(M18)	2.5	15.294	15.744	15.294
M20	2.5	17.294	17.744	17.294
(M22)	2.5	19.294	19.744	19.294
M24	3	20.753	21.253	20.752
(M27)	3	23.753	24.253	23.752
M30	3.5	26.211	26.771	26.211

d : 外螺纹外径的基准尺寸

(公称直径)

p : 螺距*D*₁ : 内螺纹内径的基准尺寸

$$D_1 = D - 1.0825p$$

D : 内螺纹牙底直径的基准尺寸

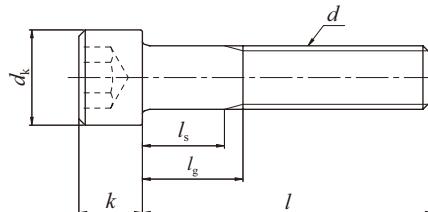
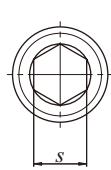
(公称直径)



9 内六角螺栓（普通螺纹）的尺寸

摘自 JIS B 1176 : 2006

单位 mm



螺栓规格 (d)			M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	(M14)(4)	M16	M20
螺距 (p)			0.5	0.7	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2	2.5
d _k	最大 (1)	5.5	7	8.5	10	13	16	18	21	24	30	
	最大 (2)	5.68	7.22	8.72	10.22	13.27	16.27	18.27	21.33	24.33	30.33	
	最小	5.32	6.78	8.28	9.78	12.73	15.73	17.73	20.67	23.67	29.67	
k	最大	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	20.00	
	最小	2.86	3.82	4.82	5.7	7.64	9.64	11.57	13.57	15.57	19.48	
s (3)	公称	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	17	
	最大	2.58	3.08	4.095	5.14	6.14	8.175	10.175	12.212	14.212	17.23	
	最小	2.52	3.02	4.02	5.02	6.02	8.025	10.025	12.032	14.032	17.05	
<i>l</i> (5)			<i>l_s</i> 及 <i>l_g</i>									
公称	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
长度												
5	4.76	5.24										
6	5.76	6.24										
8	7.71	8.29										
10	9.71	10.29										
12	11.65	12.35										
16	15.65	16.35										
20	19.58	20.42	4.5	7								
25	24.58	25.42	9.5	12	6.5	10	4	8				
30	29.58	30.42			11.5	15	9	13	6	11		
35	34.5	35.5			16.5	20	14	18	11	16		
40	39.5	40.5					19	23	16	21	5.75	12
45	44.5	45.5					24	28	21	26	10.75	17
50	49.5	50.5							31	15.75	22	10.5
55	54.4	55.6							31	36	20.75	27
60	59.4	60.6								31	15.5	23
65	64.4	65.6								36	10.25	19
70	69.4	70.6									25.75	32
80	79.4	80.6									20.5	28
90	89.3	90.7									15.25	24
100	99.3	100.7									10	20
110	109.3	110.7										
120	119.3	120.7										
130	129.2	130.8										
140	139.2	140.8										
150	149.2	150.8										
160	159.2	160.8										
180	179.2	180.8										
200	199.1	200.9										

注 1 适用于没有滚花的头部。

注 2 适用于拥有滚花的头部。

注 3 内六角的尺寸 *s* 及 *e* 量规检查, 参照 JIS B 1016。

注 4 尽量不使用带有括弧的螺纹规格。

注 5 一般流通螺纹的公称长度范围在粗折线之间。涂有灰色的部分为全螺纹, 头部下的不完全螺纹部分的长度在 $3p$ 以内。未涂色部分所列的数值是 *l_s* 及 *l_g* 的数值, 根据下面的公式求出。

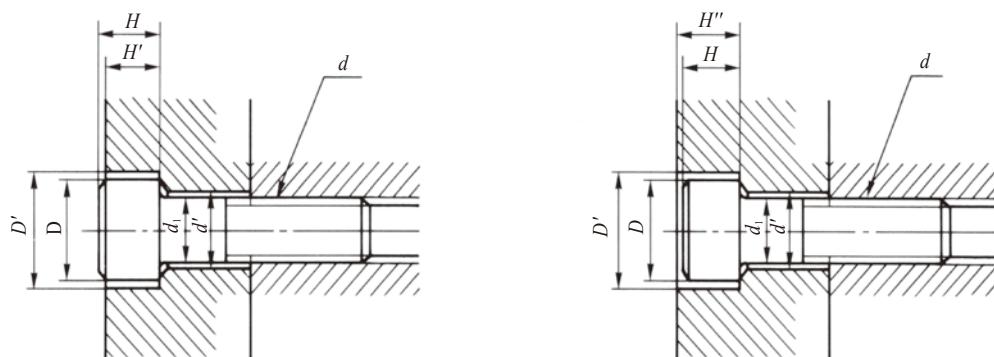
$$l_g \text{ 最大} = l \text{ 公称} - b \quad l_s \text{ 最小} = l_g \text{ 最大} - 5p$$



10 内六角螺栓的锪孔及螺栓通孔的尺寸

摘自旧标准 JIS B 1176 : 1974

单位 mm



螺栓规格 (d)	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d_1	3	4	5	6	8	10	12	13.5	15.5	17.5	20	22	24	27	30
d'	3.4	4.5	5.5	6.6	9	11	14 (13.5)	16 (15.5)	18 (17.5)	20	22	24	26	30	33
D	5.5	7	8.5	10	13	16	18	21	24	27	30	33	36	40	45
(D')	6.5	8	9.5	11	14	17.5	20	23	26	29	32	35	39	43	48
H	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
(H')	2.7	3.6	4.6	5.5	7.4	9.2	11	12.8	14.5	16.5	18.5	20.5	22.5	25	28
(H'')	3.3	4.4	5.4	6.5	8.6	10.8	13	15.2	17.5	21.5	19.5	23.5	25.5	29	32

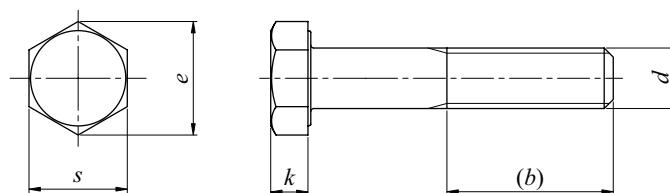
备考 上表的螺栓通孔径 (d') 为 JIS B 1001-1968 (螺栓孔径及锪孔径) 标准中的螺栓孔径 2 级的数值。

M12, M14, M16 螺栓孔径中带括弧的数值是 JIS B1001-1985 标准中规定的螺栓孔径值 (2 级)。

11 公称直径六角螺栓—普通螺纹—(等级 A : 第 1 选择) 的尺寸

摘自 JIS B 1180 : 2004

单位 mm



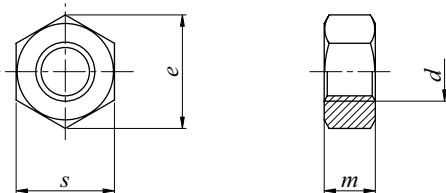
螺栓规格 (d)	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	
b (参考)	注 (1)	12	14	16	18	22	26	30	38	46
e	最小	6.01	7.66	8.79	11.05	14.38	17.77	20.03	26.75	33.53
k	基准尺寸	2	2.8	3.5	4	5.3	6.4	7.5	10	12.5
	最大	2.125	2.925	3.65	4.15	5.45	6.58	7.68	10.18	12.715
	最小	1.875	2.675	3.35	3.85	5.15	6.22	7.32	9.82	12.285
s	基准尺寸 = 最大	5.50	7.00	8.00	10.00	13.00	16.00	18.00	24.00	30.00
	最小	5.32	6.78	7.78	9.78	12.73	15.73	17.73	23.67	29.67

注 (1) 相对于 $l_{\text{公称}} \leq 125\text{mm}$ 。



12 六角螺母-式样1-普通螺纹(第1选择)的尺寸

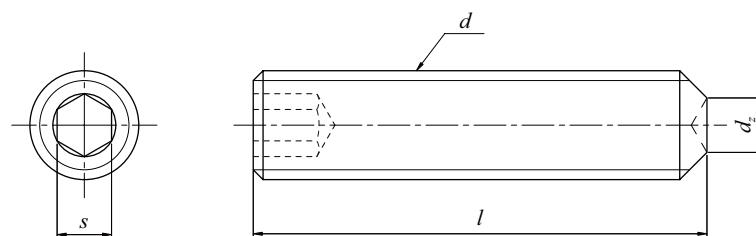
摘自 JIS B 1181 : 2004



螺母规格 (d)		M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20
<i>e</i>	最小	6.01	7.66	8.79	11.05	14.38	17.77	20.03	26.75	32.95
<i>m</i>	最大	2.40	3.2	4.7	5.2	6.80	8.40	10.80	14.8	18.0
	最小	2.15	2.9	4.4	4.9	6.44	8.04	10.37	14.1	16.9
<i>s</i>	基准尺寸=最大	5.50	7.00	8.00	10.00	13.00	16.00	18.00	24.00	30.00
	最小	5.32	6.78	7.78	9.78	12.73	15.73	17.73	23.67	29.16

13 内六角凹头紧固螺钉的尺寸

摘自 JIS B 1177 : 2007

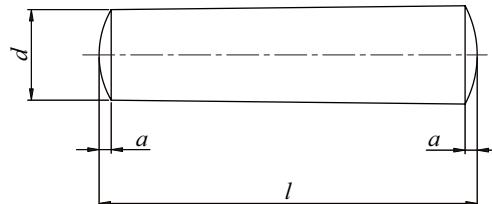


螺钉规格 (d)		M3	M4	M5	M6	M8	M10	
螺距 (p)		0.5	0.7	0.8	1	1.25	1.5	
<i>d</i> ₂	最大	1.40	2.00	2.50	3.00	5.00	6.00	
	最小	1.15	1.75	2.25	2.75	4.70	5.70	
<i>s</i> (1)	公称	1.5	2	2.5	3	4	5	
	最大	1.545	2.045	2.560	3.071	4.084	5.084	
	最小	1.520	2.020	2.520	3.020	4.020	5.020	
<i>l</i>		(参考) 每 1000 个的约重 · 单位 kg (密度 : 7.85kg /dm ³)						
公称长度	最大	最小						
2.5	2.3	2.7						
3	2.8	3.2	0.1					
4	3.76	4.24	0.14	0.23				
5	4.76	5.24	0.18	0.305	0.42			
6	5.76	6.24	0.22	0.38	0.54	0.74		
8	7.71	8.29	0.3	0.53	0.78	1.09	1.88	
10	9.71	10.29	0.38	0.68	1.02	1.44	2.51	3.72
12	11.65	12.35	0.46	0.83	1.26	1.79	3.14	4.73
16	15.65	16.35	0.62	1.13	1.74	2.49	4.4	6.73
20	19.58	20.42		1.4	2.22	3.19	5.66	8.72
25	24.58	25.42			2.82	4.07	7.24	11.2
30	29.58	30.42				4.94	8.81	13.7
35	34.5	35.5					10.4	16.2
40	39.5	40.5					12	18.7
45	44.5	45.5						21.2
50	49.5	50.5						23.6



14 圆锥销

摘自 JIS B 1352 : 1988



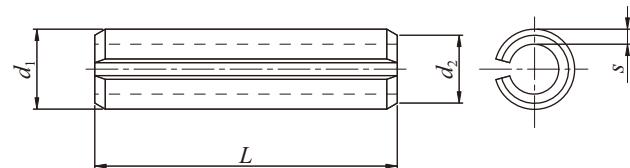
公称直径			1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10
d	基准尺寸		1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10
	容许公差 (h10)		0 -0.040				0 -0.048				0 -0.058	
a	约		0.16	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.63	0.8	1	1.2
l												
公称长度	最小	最大										
5	4.75	5.25										
6	5.75	6.25										
8	7.75	8.25										
10	9.75	10.3										
12	11.5	12.5										
14	13.5	14.5										
16	15.5	16.5										
18	17.5	18.5										
20	19.5	20.5										
22	21.5	22.5										
24	23.5	24.5										
26	25.5	26.5										
28	27.5	28.5										
30	29.5	30.5										
32	31.5	32.5										
35	34.5	35.5										
40	39.5	40.5										
45	44.5	45.5										
50	49.5	50.5										
55	54.5	55.5										
60	59.5	60.5										
65	64.5	65.5										
70	69.5	70.5										
75	74.5	75.5										

备考：粗线范围内的数值为相对销的公称直径的推荐长度 (l)。



15 直槽弹性圆柱销

摘自 JIS B 2808 : 2005



公称直径		1	1.2	1.4	1.5	1.6	2	2.5	3	4	5	6
安装径 d_1	最大	1.2	1.4	1.6	1.7	1.8	2.25	2.75	3.25	4.4	5.4	6.4
	最小	1.1	1.3	1.5	1.6	1.7	2.15	2.65	3.15	4.2	5.2	6.2
倒角径 d_2	最大	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.9	2.4	2.9	3.9	4.8	5.8
剪断负荷 kN (最小值)		0.69	1.02	1.35	1.55	1.68	2.76	4.31	6.2	10.8	17.25	24.83
适合孔径 (参考)	径	1	1.2	1.4	1.5	1.6	2	2.5	3	4	5	6
	容許公差	+ 0.08 0				+ 0.09 0				+ 0.12 0		
长度 L	容許公差	+ 0.5 0										
4												
5												
6												
8												
10												
12												
14												
16												
18												
20												
22												
25												
28												
32												
36												
40												
45												
50												
56	+ 1.5 0											
63												

备考： 粗线范围内为推荐数值。



16 键及键槽

摘自 JIS B 1301:1996

键的规格 $b \times h$	平键的尺寸				c	l	轴键槽		孔键槽				参考			
	b		h				b_1 及 b_2 的 基 准 尺 寸		紧固形		普通形					
	基 准 尺 寸	容 许 公 差 (h9)	基 准 尺 寸	容 许 公 差			b_1	b_2	容许公差 (P9)	容许公差 (N9)	容许公差 (J _s 9)	r_1 及 r_2				
2 × 2	2	0	2	0	h 9	0.16 ~ 0.25	6 ~ 20	2	- 0.006	- 0.004	± 0.0125	0.08	1.2	1.0	6 ~ 8 8 ~ 10 10 ~ 12 12 ~ 17 17 ~ 22 20 ~ 25 22 ~ 30 30 ~ 38 38 ~ 44 44 ~ 50 50 ~ 55 50 ~ 58 58 ~ 65 65 ~ 75 75 ~ 85 80 ~ 90 85 ~ 95 95 ~ 110 110 ~ 130 125 ~ 140 130 ~ 150 140 ~ 160 150 ~ 170 160 ~ 180 170 ~ 200 200 ~ 230 230 ~ 260 260 ~ 290 290 ~ 330 330 ~ 380 380 ~ 440 440 ~ 500	
3 × 3	3	- 0.025	3	- 0.025			6 ~ 36	3	- 0.031	- 0.029	~ 0.16	1.8	1.4	+ 0.1		
4 × 4	4	0	4	0			8 ~ 45	4	- 0.012	0	± 0.0150	2.5	1.8			
5 × 5	5	- 0.030	5	- 0.030			10 ~ 56	5	- 0.042	- 0.030	0.16	3.0	2.3	0		
6 × 6	6	- 0.030	6	- 0.030			14 ~ 70	6	- 0.015	0	~ 0.25	3.5	2.8			
(7 × 7)	7	0	7	- 0.036			16 ~ 80	7	- 0.051	- 0.036	4.0	3.3	4.0	20 ~ 25 22 ~ 30		
8 × 7	8	- 0.036	7	- 0.036			18 ~ 90	8	- 0.015	- 0.0180	5.0	3.3	5.0			
10 × 8	10	8	8	0	h 11	0.25 ~ 0.40 ~ 0.60 ~ 0.80 1.00 ~ 1.20	22 ~ 110	10	- 0.018	- 0.018	0.25	5.0	3.3	30 ~ 38 38 ~ 44 44 ~ 50 50 ~ 55 50 ~ 58 58 ~ 65 65 ~ 75 75 ~ 85 80 ~ 90 85 ~ 95 110 ~ 130		
12 × 8	12	8	8	0			28 ~ 140	12	- 0.061	0	~ 0.40	5.5	3.8			
14 × 9	14	9	9	- 0.090			36 ~ 160	14	- 0.043	- 0.0215	0.40	5.0	5.3			
(15 × 10)	15	0	10	- 0.043			40 ~ 180	15	- 0.018	- 0.0260	~ 0.60	6.0	4.3	+ 0.2		
16 × 10	16	10	10	- 0.043			45 ~ 180	16	- 0.061	- 0.052	0.40	7.0	4.4			
18 × 11	18	11	11	- 0.043			50 ~ 200	18	- 0.018	- 0.0260	~ 0.60	7.5	4.9	0		
20 × 12	20	12	12	- 0.052			56 ~ 220	20	- 0.074	0	0.40	9.0	5.4			
22 × 14	22	14	14	- 0.052			63 ~ 250	22	- 0.022	- 0.0260	~ 0.60	8.0	8.4			
(24 × 16)	24	0	16	- 0.052			70 ~ 280	24	- 0.074	- 0.052	0.40	9.0	5.4	+ 0.3		
25 × 14	25	14	14	- 0.052			70 ~ 280	25	- 0.026	- 0.0260	~ 0.60	10.0	6.4			
28 × 16	28	16	16	- 0.052			80 ~ 320	28	- 0.026	- 0.0260	0.70	11.0	7.4			
32 × 18	32	18	18	- 0.052			90 ~ 360	32	- 0.026	- 0.0260	~ 1.00	12.0	12.4			
(35 × 22)	35	22	22	- 0.062			100 ~ 400	35	- 0.088	0	~ 1.00	13.0	9.4			
36 × 20	36	20	20	- 0.062			—	36	- 0.026	- 0.0310	0.70	13.0	13.4			
(38 × 24)	38	0	24	- 0.062			—	38	- 0.088	- 0.062	~ 1.00	15.0	10.4			
40 × 22	40	22	22	- 0.062			—	40	- 0.026	- 0.0310	0.70	17.0	11.4			
(42 × 26)	42	26	26	- 0.062			—	42	- 0.088	- 0.062	~ 1.00	20.0	14.4			
45 × 25	45	25	25	- 0.062			—	45	- 0.026	- 0.0310	0.70	22.0	14.4			
50 × 28	50	28	28	- 0.062			—	50	- 0.088	- 0.062	~ 1.00	25.0	15.4			
56 × 32	56	32	32	- 0.074	0	1.60 ~ 2.00	—	56	- 0.032	0	1.20	20.0	12.4	+ 0.3		
63 × 32	63	32	32	- 0.074			—	63	- 0.106	- 0.0370	~ 1.60	20.0	12.4			
70 × 36	70	36	36	- 0.074			—	70	- 0.074	- 0.0370	~ 1.60	22.0	14.4			
80 × 40	80	40	40	- 0.074			—	80	- 0.037	0	2.00	25.0	15.4			
90 × 45	90	45	45	- 0.087	0	2.50 ~ 3.00	—	90	- 0.124	- 0.087	~ 2.50	28.0	17.4	0		
100 × 50	100	50	50	- 0.087			—	100	- 0.0435	- 0.0435	31.0	19.5	440 ~ 500			

注(1) 适合轴径, 是根据键强度所对应的转矩求出, 作为一般用途的大体基准。相对传动转矩键的尺寸适合的情况下, 可以选用比适合轴径更粗的轴。

这种情况下, 为使键的侧面与轴及毂部均匀接触, 可以对 t_1 及 t_2 进行修正。应尽量不使用比适合轴径更细的轴。

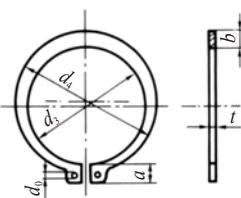
备考 带有括弧的平键规格尺寸, 因为相对应的国际标准中没有规定, 新规设计时不使用。



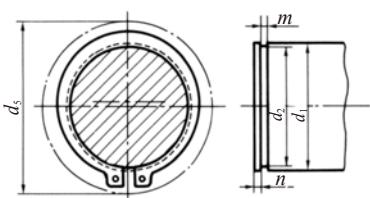
17 挡圈

摘自 JIS B 2804:2001

17.1 C型轴用挡圈



将挡圈安装于轴上时, 直径为 d_0 的孔位置要保证不被隐藏在槽内。



d_s 是夹在轴上时挡圈的最大外周直径

注 (1) 公称应首选第 1 栏, 必要时选择第 2 栏。

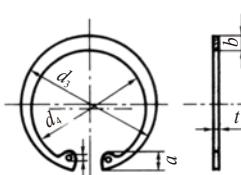
(2) 厚度 (t) = 1.6mm 暂时可以改用为 1.5mm。此时的 m 值为 1.65mm。

备 考 1. 挡圈的圆环部分的最小宽度不能小于环厚 t 。

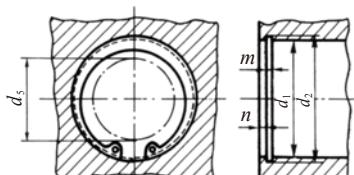
2. 适用轴的尺寸是参考推荐尺寸而示。

公称 (¹)		挡 圈						适 用 轴 (参 考)					
1	2	d_3 楚 墓 容 许 公 差	t 楚 墓 容 许 公 差	b 约	a 约	d_0 最 小	d_5	d_1	d_2 楚 墓 容 许 公 差	m 楚 墓 容 许 公 差	n 最 小		
10		9.3 ± 0.15	1 11 12 14 15 16 17 18 19 20	1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2	± 0.05 ± 0.18 ± 0.05 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06	1.6 1.8 1.8 2.0 2.1 2.2 2.2 2.6 2.7 2.7	3.0 3.1 3.2 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.8 3.9	1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2	17 18 19 22 23 24 25 26 27 28	10 11 12 14 15 16 17 18 19 20	9.6 10.5 11.5 13.4 14.3 15.2 16.2 17.0 18.0 19.0	1.15 1.15 1.15 1.35 1.35 1.35 1.35 1.5 1.5 1.5	
11	10.2												
12	11.1												
14	12.9												
15	13.8												
16	14.7												
17	15.7												
18	16.5												
19	17.5												
20	18.5												
22	20.5		1.2 24 25 26 28 30 32 35 36 38	± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06 ± 0.06	1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6 1.6	2.7 4.1 4.2 4.3 4.4 4.6 4.8 5.0 5.4 5.6	3.9 4.1 4.2 4.3 4.4 4.6 4.8 5.0 5.4 5.6	1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2	28 31 32 33 34 35 38 40 43 50	20 22 21.0 22.9 23.9 24.9 26.6 28.6 30.3 33.0	1.35 1.35 1.35 1.75 1.75 1.75 1.75 1.95 1.95 1.95		
24	22.2												
25	23.2												
26	24.2												
28	25.9												
30	27.9												
32	29.6												
35	32.2		1.8 40 42 45 48 50 55 60 65 70	± 0.07 ± 0.40 ± 0.40 ± 0.40 ± 0.40 ± 0.40 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45	1.6 1.8 1.8 1.8 1.8 1.8 2.0 2.0 2.0 2.0	4.0 4.5 4.5 4.5 4.8 5.0 5.0 5.5 6.4 6.4	5.4 5.6 5.8 6.2 6.3 6.7 7.0 7.0 7.4 7.8	1.8 2.0 2.0 2.0 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5	34.0 36.0 38.0 39.5 42.5 45.5 52.0 53.0 62.0 67.0	1.95 1.95 1.95 2.2 2.2 2.2 2.7 2.7 2.7 2.7			
36	33.2												
38	35.2												
40	37.0												
42	38.5												
45	41.5												
48	44.5												
50	45.8												
55	50.8		2 56 60 65 70 75 80 85 90 105	± 0.08 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45 ± 0.45	1.6 2 2.5 2.5 2.5 2.5 3 3 4	5.0 5.0 5.0 5.5 6.4 6.4 8.0 8.0 9.5	6.7 7.0 7.0 7.2 7.4 7.8 8.4 8.7 9.5 9.8	47 50 53 55 64 70 75 81 103 119	34.0 36.0 38.0 52.0 47.0 55 60 62.0 85 90	1.95 2.2 2.2 2.7 2.7 2.7 3.2 3.2 4.2			
56	51.8												
60	55.8												
65	60.8												
70	65.5												
75	70.5												
80	74.5												
85	79.5		3 95 100 105 110 120	± 0.09 ± 0.55 ± 0.55 ± 0.55 ± 0.55 ± 0.55	1.6 2 3 3 4	8.0 8.6 9.0 9.5 9.5 10.3	8.4 9.1 9.5 9.8 10.0 10.9	103 114 119 125 131 143	81.5 91.5 96.5 101.0 106.0 116.0	3.2 3.2 3.2 4.2 4.2			
90	84.5												
95	89.5												
100	94.5												
105	98.0												
110	103.0												
120	113.0												

17.2 C型孔用挡圈



将挡圈安装于孔内时, 直径为 d_0 的孔位置要保证不被隐藏在槽内。



d_s 是夹在孔内时挡圈的最小内侧直径

公称 (¹)		挡 圈						适 用 轴 (参 考)					
1	2	d_3 楚 墓 容 许 公 差	t 楚 墓 容 许 公 差	b 约	a 约	d_0 最 小	d_5	d_1	d_2 楚 墓 容 许 公 差	m 楚 墓 容 许 公 差	n 最 小		
10		10.7 ± 0.18	1 13 14 15 16 17 18 19 20 22	1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2	± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05 ± 0.05	1.8 1.8 2.0 2.0 2.0 2.0 2.5 2.5 2.5 2.5	3.1 3.2 3.6 3.6 3.7 3.8 4.0 4.0 4.1 4.1	1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2 1.2	10.4 11.4 12.5 13.6 14.6 15.7 16.8 20.0 21.0 23.0	1.15 1.15 1.15 1.15 1.15 1.15 1.15 1.15 1.15 1.15			
11	11.8												
12	13.0												
13	14.1												
14	15.1												
15	16.2												
16	17.3												
17	18.3												
18	19.5												
19	20.5												
20	21.5		2 24 25 26 28 30 32 34.4	± 0.06 ± 0.25 ± 0.25 ± 0.25 ± 0.25 ± 0.25 ± 0.25 ± 0.25	1.6 2 2.5 3 3 3.5 3.5 3.5	4.0 4.0 4.6 4.6 4.7 5.2 5.2 5.2	11 12 13 15 16 17 18 21	11 20 22 26 28 29.4 32	11.4 21.0 23.0 26.2 27.2 29.4 33.7	1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35			
22	23.5												
24	25.9												
25	26.9												
26	27.9												
28	30.1												
30	32.1												
32	34.4												



注 (1) 公称应首选第 1 栏, 必要时选择第 2 栏。

(2) 厚度 (t) = 1.6mm 暂时可以改用为 1.5mm。此时的 m 值为 1.65mm。

备 考 1. 挡圈的圆环部分的最小宽度不能小于环厚 t 。

2. 适用孔的尺寸是参考推荐尺寸而示。

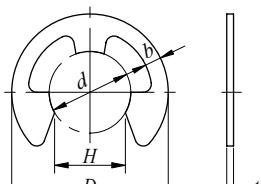
3. 理想的 d_4 尺寸 (mm)

$$d_4 = d_3 - (1.4 \sim 1.5)b$$

公称 (1)		挡 圈				适 用 轴 (参 考)					
1	2	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>约</u>	<u>约</u>	<u>最 小</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>
35		37.8				3.5	5.2		24	35	37.0
	36	38.8				3.5	5.2		25	36	38.0
37		39.8	± 0.25	± 0.06		3.5	5.2		26	37	39.0
	38	40.8				4.0	5.3		27	38	40.0
40		43.5				4.0	5.7		28	40	42.5
42		45.5	± 0.40			4.0	5.8		30	42	44.5
45		48.5				4.5	5.9		33	45	47.5
47		50.5				4.5	6.1		34	47	49.5
	48	51.5				4.5	6.2		35	48	50.5
50		54.2				4.5	6.5		37	50	53.0
52		56.2				5.1	6.5		39	52	55.0
55		59.2				5.1	6.5		41	55	58.0
	56	60.2				5.1	6.6		42	56	59.0
60		64.2	± 0.45			5.5	6.8		46	60	63.0
62		66.2				5.5	6.9		48	62	65.0
	63	67.2				5.5	6.9		49	63	66.0
	65	69.2				5.5	7.0		50	65	68.0
68		72.5				6.0	7.4		53	68	71.0
	70	74.5				6.0	7.4		55	70	73.0
72		76.5				6.6	7.4		57	72	75.0
75		79.5				6.6	7.8		60	75	78.0
80		85.5				7.0	8.0		64	80	83.5
85		90.5				7.0	8.0		69	85	88.5
90		95.5				7.6	8.3		73	90	93.5
95		100.5	± 0.55			8.0	8.5		77	95	98.5
100		105.5				8.3	8.8		82	100	103.5
	105	112.0				8.9	9.1		86	105	109.0
110		117.0				8.9	10.2		89	110	114.0
	112	119.0				8.9	10.2		90	112	116.0
	115	122.0				9.5	10.2		94	115	119.0
120		127.0	± 0.65			9.5	10.7		98	120	124.0
125		132.0				10.0	10.7	3.5	103	125	129.0

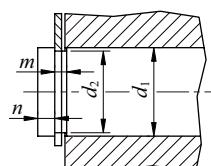
17.3 E型开口挡圈

自由状态



备 考 形状只为其中一例。

使用状态



公称	挡 圈						适 用 轴 (参 考)					
	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>约</u>	<u>超 过</u>	<u>下 以</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>	<u>公</u> <u>称</u> <u>尺寸</u>
0.8	0.8	0 - 0.08	2	± 0.1	0.7		0.2	± 0.02	0.3	1.0	1.4	0.8
1.2	1.2		3		1.0		0.3	± 0.025	0.4	1.4	2.0	1.2
1.5	1.5	0 - 0.09	4		1.3		0.4		0.6	2.0	2.5	1.5
2	2.0		5		1.7		0.4	± 0.03	0.7	2.5	3.2	2.0
2.5	2.5		6		2.1		0.4		0.8	3.2	4.0	2.5
3	3.0		7		2.6		0.6		0.9	4.0	5.0	3.0
4	4.0	0	9	± 0.2	3.5	0	0.6		1.1	5.0	7.0	4.0
5	5.0	$- 0.12$	11		4.3	0.6			1.2	6.0	8.0	5.0
6	6.0		12		5.2	$- 0.30$	0.8	± 0.04	1.4	7.0	9.0	6.0
7	7.0		14		6.1		0.8		1.6	8.0	11.0	7.0
8	8.0	0	16		6.9	0	0.8		1.8	9.0	12.0	8.0
9	9.0	$- 0.15$	18		7.8	$- 0.35$	0.8		2.0	10.0	14.0	9.0
10	10.0		20		8.7		1.0	± 0.05	2.2	11.0	15.0	10.0
12	12.0	0	23		10.4		1.0		2.4	13.0	18.0	12.0
15	15.0	$- 0.18$	29		13.0	0	$(^2)$		2.8	16.0	24.0	15.0
19	19.0	0	37		16.5	1.6	± 0.06		4.0	20.0	31.0	19.0
24	24.0	$- 0.21$	44		20.8	0 - 0.50	2.0	± 0.07	5.0	25.0	38.0	24.0

注(1) 使用圆柱型量规测量 d 的尺寸。

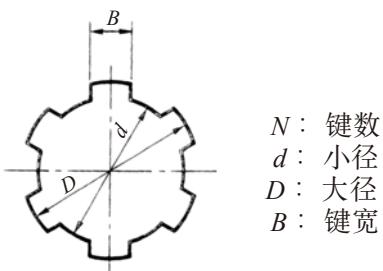
(2) 厚度 (t) = 1.6mm 暂时可以改用为 1.5mm。此时的 m 值为 1.65mm。

备 考 适用轴的尺寸是参考推荐尺寸而示。



18 矩形花键

摘自 JIS B 1601:1996



N : 键数
 d : 小径
 D : 大径
 B : 键宽

内花键及外花键的基准尺寸

d mm	轻 系 列				中 等 系 列			
	规格 N × d × D	N 键数	D mm	B mm	规格 N × d × D	N 键数	D mm	B mm
11	—	—	—	—	6 × 11 × 14	6	14	3
13	—	—	—	—	6 × 13 × 16	6	16	3.5
16	—	—	—	—	6 × 16 × 20	6	20	4
18	—	—	—	—	6 × 18 × 22	6	22	5
21	—	—	—	—	6 × 21 × 25	6	25	5
23	6 × 23 × 26	6	26	6	6 × 23 × 28	6	28	6
26	6 × 26 × 30	6	30	6	6 × 26 × 32	6	32	6
28	6 × 28 × 32	6	32	7	6 × 28 × 34	6	34	7
32	8 × 32 × 36	8	36	6	8 × 32 × 38	8	38	6
36	8 × 36 × 40	8	40	7	8 × 36 × 42	8	42	7
42	8 × 42 × 46	8	46	8	8 × 42 × 48	8	48	8
46	8 × 46 × 50	8	50	9	8 × 46 × 54	8	54	9
52	8 × 52 × 58	8	58	10	8 × 52 × 60	8	60	10
56	8 × 56 × 62	8	62	10	8 × 56 × 65	8	65	10
62	8 × 62 × 68	8	68	12	8 × 62 × 72	8	72	12
72	10 × 72 × 78	10	78	12	10 × 72 × 82	10	82	12
82	10 × 82 × 88	10	88	12	10 × 82 × 92	10	92	12
92	10 × 92 × 98	10	98	14	10 × 92 × 102	10	102	14
102	10 × 102 × 108	10	108	16	10 × 102 × 112	10	112	16
112	10 × 112 × 120	10	120	18	10 × 112 × 125	10	125	18

内花键及外花键的尺寸公差

内花键						外花键			装配型式	
拉削后不处理			拉削后热处理							
B	D	d	B	D	d	B	D	d		
H9	H10	H7	H11	H10	H7	d10	a11	f7	自由	
						f9	a11	g7	滑动	
						h10	a11	h7	固定	



尺寸公差及齿侧配合

		键宽 <i>B</i>		小径 <i>d</i>	大径 <i>D</i>	参 考
		孔侧不淬火	孔侧淬火处理			选择配合的基准
内花键	滑动及固定	D9	F10	H7	H11	
外花键	滑动的场合	f9	d9	e8	a11	配合长度为一般的场合 (配合长度约为小径的 2 倍以上) 一般的场合。 不需要精密配合时。
		h8	e8	f7		一般的场合。 配合长度需要有精密要求时 (配合长度约为小径的 2 倍以上) 需要精密配合时。
		js7(1) 或 k7(2)	f7	g6		特别需要精密配合时。
	固定的场合	n7	h7	js7	a11	一般的场合。
		p6	h6	js6		需要精密配合时。
		s6	js6	k6		需要特别坚固地固定时。
		s6(1) 或 u6(2)	js6(1) 或 k6(2)	m6		不再进行拆卸的场合。
		u6	m6	n6		

此表适用于旧 JIS B1601 标准的矩形花键。

注 (1) 适用于宽度为 6mm 以下的花键。

(2) 适用于宽度超过 6mm 的花键。

备 考 因为相对键宽 *B* 及小径 *d* 的尺寸容许公差相互关联, 必须选择相同行中所记载的尺寸公差。例如, 小径公差为 f7 时, 不经淬火的孔的键宽公差应选择 h8。

19 切削加工尺寸的普通公差 摘自 JIS B 0405:1991

尺寸区分		单位 mm		
等 级	精 级	中 级	粗 级	
0.5 以上 3 以下 超过 3 到 6 以下	± 0.05	± 0.1	± 0.2	
			± 0.3	
超过 6 到 30 以下 超过 30 到 120 以下 超过 120 到 400 以下	± 0.1	± 0.2	± 0.5	
	± 0.15	± 0.3	± 0.8	
	± 0.2	± 0.5	± 1.2	
超过 400 到 1000 以下 超过 1000 到 2000 以下	± 0.3	± 0.8	± 2	
	± 0.5	± 1.2	± 3	

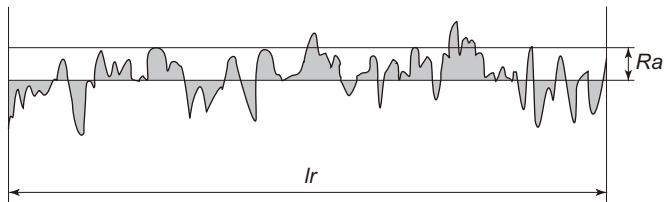


20 表面粗糙度 摘自 JIS B 0601: 2001

代表性的表面粗糙度

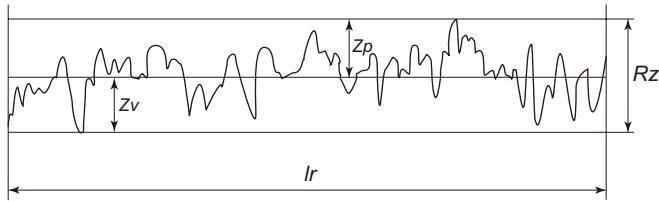
① 轮廓算数平均偏差 (R_a)

基准长度 (l_r) 内的粗糙度曲线高度 $Z(x)$ 绝对值的算数平均值。



② 轮廓最大高度 (R_z)

基准长度 (l_r) 内的粗糙度轮廓峰高 (Z_p) 最大值和谷深 (Z_v) 最大值的和。



备考: JIS B 0601: 1994 中, 代号 R_z 用于指示“不平度的十点高度”。

③ 轮廓总高度 (P_t)

评定长度 (l_n) 内轮廓峰高 (Z_p) 最大值与谷深 (Z_v) 的最大值之和。

表1 标准修订要点

几何参数(粗糙度)	轮廓	JIS B0601			
		1970	1982	1994	2001
轮廓总高度	原始轮廓	R_{\max}	R_{\max}	—	P_t
十点高度		R_z	R_z	—	—
中心线平均偏差	粗糙度	R_a	R_a	(R_{a75}) 附录	(R_{a75}) 参考
算术平均粗偏差		—	—	R_a	R_a
轮廓最大高度	轮廓	—	—		R_z
十点高度		—	—	R_z	(R_{zJIS}) 参考

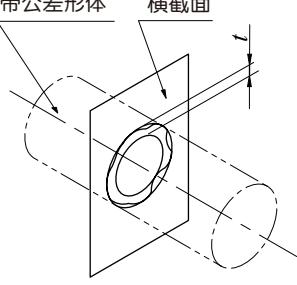
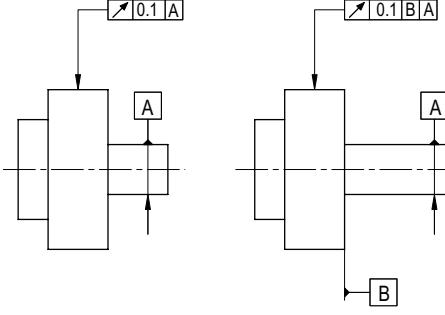
【解说】

JIS B 0601-1994「表面粗糙度 — 定义及表示」于2001年作了修订。新标准为JIS B 0601-2001「产品的几何特性规范 (GPS)- 表面结构：轮廓法 - 术语、定义及表面结构参数」。

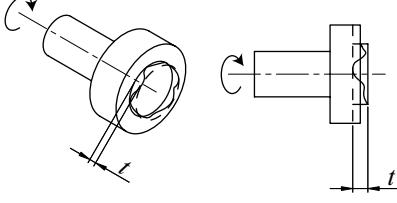
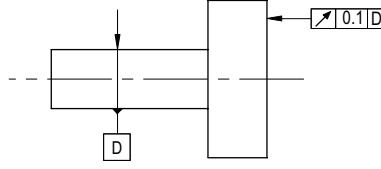
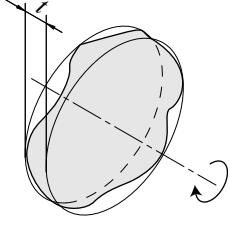
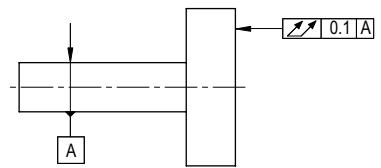
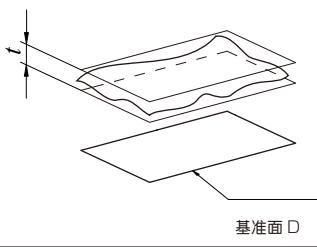
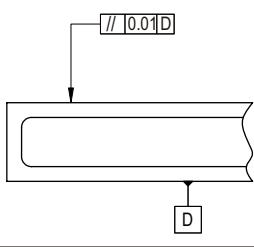
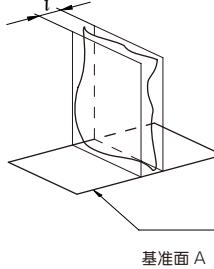
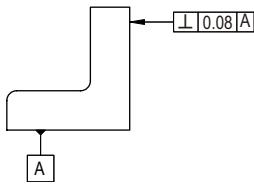
标准的名称变更、内容也作了大幅度变更。

中心线平均偏差 R_{a75} 及十点高度 R_{zJIS} 的定义作为参考内容记载在附录中。

21 齿轮制图时使用的几何公差标注 摘自 JIS B 0021:1998

符号	公差带的定义	标注方法及解释
↗	<p>圆跳动公差—径向 公差带为任一垂直于基准轴线的横截面内, 半径差为 t、圆心与基准轴线相同的两个同心圆所限定的区域。</p>  <p>通常、跳动适用于沿轴完全旋转的场合、但也可以规定只适用于一周转的某一部分。</p>	<p>旋转方向的实际(再现)圆跳动、基准轴线 A 的周围在与基准平面 B 同时接触并旋转的期间、在任意的横截面上都必须小于 0.1。</p> 



符号	公差带的定义	标注方法及解释
	圆跳动公差—轴向 公差带为轴线与基准轴线一致的任意半径的圆柱截面上, 间距等于 t 的两圆所限定的圆柱面区域。 	在与基准轴线 D 一致的圆柱轴上、轴向的实际（再现）轴线必须在距离等于 0.1 的两个圆之间。 
	轴向全跳动公差 公差带为间距等于 t 、垂直于基准轴线的两平行平面所限定的区域。 	实际（再现）的表面必须限制在间距等于 0.1、垂直于基准轴线 D 的两平行平面之间。 
	平行度公差 公差带为间距等于 t 、与基准平面平行的两平面所限定的区域。 	实际（再现）的表面必须限制在间距等于 0.01、平行于基准平面 D 的两平行平面之间。 
	垂直度公差 公差带为间距等于 t 、垂直于基准平面的两平行平面所限定的区域。 	实际（再现）的表面必须限制在间距等于 0.08、垂直于基准平面 A 的两平行平面之间。 



与齿轮有关的数学公式 · 单位 · 函数表

1 数学公式

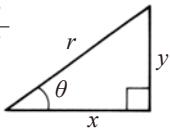
① 三角函数 \sin, \cos, \tan

$$\cos \theta = \frac{x}{r}, \sin \theta = \frac{y}{r}, \tan \theta = \frac{y}{x}$$

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1, \tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

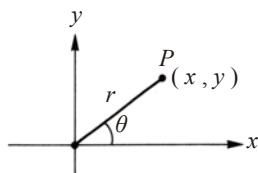
$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$



② 直角坐标 (x, y) 与极坐标 (r, θ) 的关系

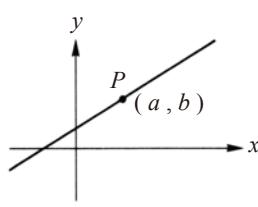
$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, \tan \theta = \frac{y}{x}$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$



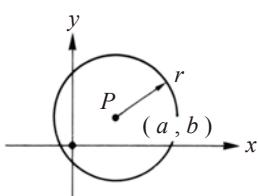
③ 通过点 (a, b) 斜率为 m 的直线方程式

$$(y - b) = m(x - a)$$



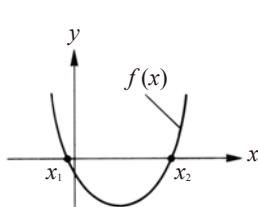
④ 以点 (a, b) 为圆心, 半径为 r 的圆的方程式

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

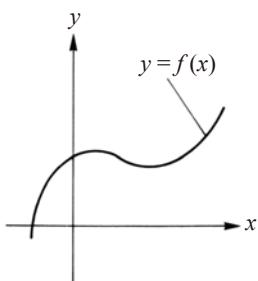


⑤ 二次函数 $y = ax^2 + bx + c = 0$ ($a \neq 0$) 的根

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$



⑥ 函数 $y = f(x)$ 导函数 $y' = f'(x)$



函数 $y = f(x)$ 导函数 $y' = f'(x)$

$y = f(x)$	$y' = f'(x)$	$y = f(x)$	$y' = f'(x)$
$\cos x$	$-\sin x$	$\frac{1}{\cos x}$	$\frac{\tan x}{\cos x}$
$\sin x$	$\cos x$	$\frac{1}{\sin x}$	$-\frac{1}{\sin x \tan x}$
$\tan x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$	$\frac{1}{\tan x}$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$
$\tan x - x$ 注 1.	$\tan^2 x$	$\sin^2 x$	$2 \sin x \cos x$
		$\sin^3 x$	$3 \sin^2 x \cos x$

注 1. 这是渐开线函数。

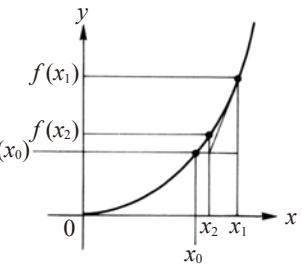
导函数的应用例 : 牛顿法

在这里介绍渐开线函数

$$f(x) = \tan x - x$$

已知 $f(x_0)$ 的值, 求 x_0 的近似值的方法。

牛顿法是适当地定出初值 x_1 后, 利用下式计算 x_2 的近似值。



$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{\tan^2 x_1}$$

$$\text{但是 } f'(x_1) = \tan^2 x_1$$

在这里所求出的近似值 $f(x_2)$ 与已知的 $f(x_0)$ 比误差很大时, 使用上述的同样方法, 计算新近似值 x_3 。

$$x_3 = x_2 - \frac{f(x_2) - f(x_1)}{\tan^2 x_2}$$

如上所述的计算重复数次后, 可以求出误差很小的 x_0 值。

因为齿轮的计算中, 渐开线函数 $\text{inv } \alpha$ 经常出现, 所以, 使用牛顿法会非常方便。



2 国际单位制 (SI)

基本单位 摘自 JIS Z 8202-0:2000

计量法的 SI 基本单位

量的名称	基本单位	
	单位名称	符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
发光强度	坎德拉	cd

具有专门名称的 SI 导出单位 摘自 JIS Z 8202-0:2000

量的名称	SI 导出单位		
	专门名称	符号	SI 基本单位及导出单位的表示方法
平面角	弧度	rad	1rad = 1m/m = 1
立体角	球面度	sr	1sr = 1m ² /m ² = 1
频率	赫兹	Hz	1Hz = 1s ⁻¹
力	牛顿	N	1N = 1kg • m/s ²
压力、压强、应力	帕斯卡	Pa	1Pa = 1N/m ²
能量、功、热量	焦耳	J	1J = 1N • m
功率、辐射能通量	瓦特	W	1W = 1J/s
电荷、电量	库伦	C	1C = 1A • s
电位、电位差、电压、电动势	伏特	V	1V = 1W/A
电容	法拉	F	1F = 1C/V
电阻	欧姆	Ω	1Ω = 1V/A
摄氏温度	摄氏度※	℃	1℃ = 1K

※摄氏度是表示摄氏温度时使用的代替开尔文的专有名称 (参照 JIS Z 8202-4:2000 4-1,a 及 4-2,a)

使用国际单位 (SI) 后出现问题的单位换算值

名称	换 算 值
力	1N = 0.101972 kgf 1kgf = 9.80665N
应力	1MPa = 1N/mm ² = 0.101972 kgf/mm ² 1kgf/mm ² = 9.80665MPa = 9.80665N/mm ²
功 能量	1J = 2.77778 × 10 ⁻⁷ kW · h = 0.101972 kgf · m 1kgf · m = 9.80665J, 1kW · h = 3.600 × 10 ⁶ J
功率 动力	1kW = 101.972 kgf · m/s 1kgf · m/s = 9.80665 × 10 ⁻³ kW

词头

词头名称 (符号)	因数	词头名称 (符号)	因数
尧 (Y)	10 ²⁴	分 (d)	10 ⁻¹
泽 (Z)	10 ²¹	厘 (c)	10 ⁻²
艾 (E)	10 ¹⁸	毫 (m)	10 ⁻³
拍 (P)	10 ¹⁵	微 (μ)	10 ⁻⁶
太 (T)	10 ¹²	纳 (n)	10 ⁻⁹
吉 (G)	10 ⁹	皮 (p)	10 ⁻¹²
兆 (M)	10 ⁶	飞 (f)	10 ⁻¹⁵
千 (k)	10 ³	阿 (a)	10 ⁻¹⁸
百 (h)	10 ²	仄 (z)	10 ⁻²¹
十 (da)	10 ¹	幺 (y)	10 ⁻²⁴

角度单位的换算

度换算为度分秒的方法 (例: θ = 20.5445°)				
计算项目	符号	单位	公式	结果
度	D	°	小数点以下舍去	20°
分	M	'	(θ - D) × 60 小数点以下舍去	32'
秒	S	"	{(θ - D) × 60 - M} × 60	40.2"

度分秒换算为度的方法 (例: D° M' S" = 25°30'40")				
计算项目	符号	单位	公式	结果
度	θ	°	$θ° = D° + \frac{M'}{60} + \frac{S''}{3600}$	25.5111°

度换算为弧度的方法 (例: θ = 25°)				
计算项目	符号	单位	公式	结果
弧度	θ	rad	$θ rad = \frac{θ° \times π}{180}$	0.4363

弧度换算为度的方法 (例: θ = 1.5 rad)				
计算项目	记号	单位	公式	结果
度	θ	°	$θ° = \frac{θ rad \times 180}{π}$	85.9437°



3 方便的力学换算式

为了简单的对转矩及功率等进行换算、这里登载了换算公式。

不仅限于国际单位、现在仍然广泛使用的重力单位也同时列入表中。

未知数	单位	已知数		单位	换算公式
转矩 T	N · m	力	F	N	$T = \frac{F \times r}{1000}$
		半径	r	mm	
		功率	P	kW	$T = \frac{9549P}{n}$
		旋转速度	n	min ⁻¹	
功率 P	kW	转矩	T	N · m	$P = \frac{T \times n}{9549}$
		旋转速度	n	min ⁻¹	
		力	F	N	$P = \frac{F \times v}{1000}$
		速度	v	m/s	

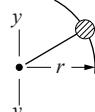
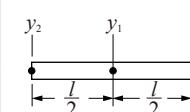
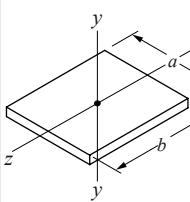
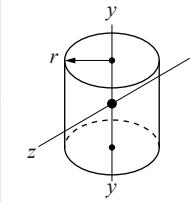
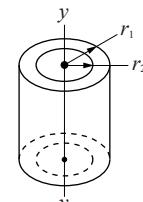
未知数	单位	已知数		单位	换算公式
转矩 T	kgf · m	力	F	kgf	$T = \frac{F \times r}{1000}$
		半径	r	mm	
		功率	P	kW	$T = \frac{974 \times P}{n}$
		旋转速度	n	min ⁻¹	
功率 P	kW	转矩	T	kgf · m	$P = \frac{T \times n}{974}$
		旋转速度	n	min ⁻¹	
		力	F	kgf	$P = \frac{F \times v}{102}$
		速度	v	m/s	

注：旋转速度的单位 $1\text{min}^{-1} = 1\text{rpm}$

参考 1：米制马力 $1\text{PS} \doteq 735\text{W} = 0.735\text{kW}$

参考 2：马力 $1\text{HP} \doteq 746\text{W} = 0.746\text{kW}$

转动惯量 $mk^2 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 或 $\frac{W}{g} k^2 (\text{kgf} \cdot \text{m}^2)$

名称	形 状	转 动 轴	转动惯量 · 单位	
			国际单位制 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	力学单位制 $\text{kgf} \cdot \text{m}^2$
质点		$y - y$	$m r^2$	$\frac{W}{g} r^2$
棒		$y_1 - y_1$	$m \frac{l^2}{12}$	$\frac{W}{g} \frac{l^2}{12}$
		$y_2 - y_2$	$m \frac{l^2}{3}$	$\frac{W}{g} \frac{l^2}{3}$
板		$y - y$	$m \frac{a^2+b^2}{12}$	$\frac{W}{g} \frac{a^2+b^2}{12}$
		$z - z$	$m \frac{a^2}{12}$	$\frac{W}{g} \frac{a^2}{12}$
圆柱		$y - y$	$m \frac{r^2}{2}$	$\frac{W}{g} \frac{r^2}{2}$
		$z - z$	$m \frac{r^2}{4}$	$\frac{W}{g} \frac{r^2}{4}$
圆筒		$y - y$	$m \frac{r_1^2+r_2^2}{2}$	$\frac{W}{g} \frac{r_1^2+r_2^2}{2}$

注 1. m : 质量、W : 重量、g : 重力加速度 = 9.80665m/s^2

注 2. $GD^2 = 4gI$ ($\text{kgf} \cdot \text{m}^2$)

未知数	单位	已知数		单位	换算公式
速度 v	m/s	直径	d	mm	$v = \frac{\pi \times d \times n}{60000}$
		旋转速度	n	min ⁻¹	



4 钢材重量表

断面形状	尺寸 (mm)	每米钢材的重量 (kgf/m)
圆形	○ d ↑	0.00616d ²
四方形	□ s ↑	0.00785s ²
六角形	○ h ↑	0.00680h ²

圆钢重量表 (kgf/m)

直径	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
00	0	0.01	0.02	0.06	0.10	0.15	0.22	0.30	0.39	0.50
10	0.62	0.75	0.89	1.04	1.21	1.39	1.58	1.78	2.00	2.22
20	2.46	2.72	2.98	3.26	3.55	3.85	4.16	4.49	4.83	5.18
30	5.54	5.92	6.31	6.71	7.12	7.55	7.98	8.43	8.90	9.37
40	9.86	10.36	10.87	11.39	11.93	12.47	13.03	13.61	14.19	14.79
50	15.40	16.02	16.66	17.30	17.96	18.63	19.32	20.01	20.72	21.44
60	22.18	22.92	23.68	24.45	25.23	26.03	26.83	27.65	28.48	29.33
70	30.18	31.05	31.93	32.83	33.73	34.65	35.58	36.52	37.48	38.44
80	39.42	40.42	41.42	42.44	43.47	44.51	45.56	46.63	47.70	48.79
90	49.90	51.01	52.14	53.28	54.43	55.59	56.77	57.96	59.16	60.37
100	61.60	62.84	64.09	65.35	66.63	67.91	69.21	70.53	71.85	73.19
110	74.54	75.90	77.27	78.66	80.06	81.47	82.89	84.32	85.77	87.23
120	88.70	90.19	91.69	93.19	94.72	96.25	97.80	99.35	100.93	102.51
130	104.10	105.71	107.33	108.96	110.61	112.27	113.94	115.62	117.31	119.02
140	120.74	122.47	124.21	125.97	127.73	129.51	131.31	133.11	134.93	136.76
150	138.60	140.45	142.32	144.20	146.09	147.99	149.91	151.84	153.78	155.73
160	157.70	159.67	161.66	163.67	165.68	167.71	169.75	171.80	173.86	175.94
170	178.02	180.13	182.24	184.36	186.50	188.65	190.81	192.99	195.17	197.37
180	199.58	201.81	204.04	206.29	208.55	210.83	213.11	215.41	217.72	220.04
190	222.38	224.72	227.08	229.45	231.84	234.23	236.64	239.06	241.50	243.94
200	246.40	248.87	251.35	253.85	256.36	258.87	261.41	263.95	266.51	269.08
210	271.66	274.25	276.86	279.47	282.10	284.75	287.40	290.07	292.75	295.44
220	298.14	300.86	303.59	306.33	309.08	311.85	314.63	317.42	320.22	323.04
230	325.86	328.70	331.56	334.42	337.30	340.19	343.09	346.00	348.93	351.87
240	354.82	357.78	360.75	363.74	366.74	369.75	372.78	375.82	378.87	381.93
250	385.00	388.09	391.19	394.30	397.42	400.55	403.70	406.86	410.03	413.22
260	416.42	419.63	422.85	426.08	429.33	432.59	435.86	439.14	442.44	445.74
270	449.06	452.40	455.74	459.10	462.47	465.85	469.24	472.65	476.07	479.50
280	482.94	486.40	489.87	493.35	496.84	500.35	503.86	507.39	510.94	514.49
290	518.06	521.64	525.23	528.83	532.45	536.07	539.72	543.37	547.03	550.71
300	554.40	558.10	561.82	565.54	569.28	573.03	576.80	580.57	584.36	588.16
310	591.98	595.80	599.64	603.49	607.35	611.23	615.11	619.01	622.92	626.85
320	630.78	634.73	638.69	642.67	646.65	650.65	654.66	658.68	662.72	666.76
330	670.82	674.90	678.98	683.08	687.19	691.31	695.44	699.59	703.74	707.91
340	712.10	716.29	720.50	724.72	728.95	733.19	737.45	741.72	746.00	750.29
350	754.60	758.92	763.25	767.59	771.95	776.31	780.69	785.09	789.49	793.91
360	798.34	802.78	807.23	811.70	816.18	820.67	825.17	829.68	834.21	838.75
370	843.30	847.87	852.45	857.04	861.64	866.25	870.88	875.52	880.17	884.83
380	889.50	894.19	898.89	903.60	908.33	913.07	917.82	922.58	927.35	932.14
390	936.94	941.75	946.57	951.41	956.25	961.11	965.99	970.87	975.77	980.68
400	985.60	990.53	995.48	1000.44	1005.41	1010.39	1015.39	1020.40	1025.42	1030.45
410	1035.50	1040.55	1045.62	1050.71	1055.80	1060.91	1066.02	1071.16	1076.30	1081.46
420	1086.62	1091.80	1097.00	1102.20	1107.42	1112.65	1117.89	1123.15	1128.41	1133.69
430	1138.98	1144.29	1149.60	1154.93	1160.27	1165.63	1170.99	1176.37	1181.76	1187.16
440	1192.58	1198.00	1203.44	1208.89	1214.36	1219.83	1225.32	1230.82	1236.34	1241.86
450	1247.40	1252.95	1258.51	1264.09	1269.67	1275.27	1280.89	1286.51	1292.15	1297.79
460	1303.46	1309.13	1314.82	1320.51	1326.22	1331.95	1337.68	1343.43	1349.19	1354.96
470	1360.74	1366.54	1372.35	1378.17	1384.00	1389.85	1395.71	1401.58	1407.46	1413.36
480	1419.26	1425.18	1431.12	1437.06	1443.02	1448.99	1454.97	1460.96	1466.97	1472.99
490	1479.02	1485.06	1491.11	1497.18	1503.26	1509.35	1515.46	1521.58	1527.70	1533.85
500	1540.00	1546.17	1552.34	1558.54	1564.74	1570.95	1577.18	1583.42	1589.67	1595.94

例 1. 直径 $\phi 128$ mm 的钢材每米的重量为 100.93 kg f。

例 2. 直径 $\phi 128$ mm 的铸铁每米的重量 100.93 (钢材重量) \times 0.918 (相对于铁的比重) = 92.65 kg f。



5 主要元素符号及比重

元素名称	符号	比重 (20°C) g/cm ³	元素名称	符号	比重 (20°C) g/cm ³	元素名称	符号	比重 (20°C) g/cm ³
锌	Zn	7.133 (25°)	溴	Br	3.12	钠	Na	0.9712
铝	Al	2.699	锆	Zr	6.489	铅	Pb	11.36
锑	Sb	6.62	汞	Hg	13.546	铌	Nb	8.57
硫	S	2.07	氢	H	0.0899 × 10 ⁻³	镍	Ni	8.902 (25°)
镱	Yb	6.96	锡	Sn	7.2984	铂	Pt	21.45
钇	Y	4.47	锶	Sr	2.60	钒	V	6.1
铱	Ir	22.5	铯	Cs	1.903 (0°)	钯	Pd	12.02
铟	In	7.31	铈	Ce	6.77	钡	Ba	3.5
锢	U	19.07	硒	Se	4.79	砷	As	5.72
氯	Cl	3.214 × 10 ⁻³	铋	Bi	9.80	氟	F	1.696 × 10 ⁻³
镉	Cd	8.65	铊	Tl	11.85	钚	Pu	19.00 ~ 19.72
钾	K	0.86	钨	W	19.3	铍	Be	1.848
钙	Ca	1.55	碳	C	2.25	硼	B	2.34
金	Au	19.32	钽	Ta	16.6	镁	Mg	1.74
银	Ag	10.49	钛	Ti	4.507	锰	Mn	7.43
铬	Cr	7.19	氮	N	1.250 × 10 ⁻³	钼	Mo	10.22
硅	Si	2.33 (25°)	铁	Fe	7.87	碘	I	4.94
锗	Ge	5.323 (25°)	碲	Te	6.24	镭	Ra	5.0
钴	Co	8.85	铜	Cu	8.96	锂	Li	0.534
氧	O	1.429 × 10 ⁻³	钍	Th	11.66	磷	P	1.83

* 主要齿轮材料的比重 (参考)

材料类型	材料牌号	比重
结构用碳素钢	S45C	7.85
结构用合金钢	SCM415	7.85
	SCM440	7.85
不锈钢	SUS304	7.81
	SUS303	7.80
MC 尼龙	MC901	1.16
	MC602ST	1.23
聚缩醛	M90-44	1.41
	M25-44	1.41
快削黄铜	C3604	8.50
铝青铜	CAC702(AlBC2)	7.60
磷青铜	CAC502(PBC2)	8.80
灰铸铁	FC200	7.21



6 硬度换算表

以钢材的 C 标尺洛氏硬度为基准的近似换算值 (注 1)

HRC	HV	HB		HRA	HRB	HRD	HR15N	HR30N	HR45N	HS	抗拉强度近似值 MPa (注 2)	HRC	主要材料硬度范围		
洛氏 C 标尺硬度 注 3.	维氏硬度 注 3.	布氏硬度 10mm 球 荷重 3000kgf		洛氏硬度 注 3.			表面洛氏硬度 金刚石圆锥压头			肖氏硬度	洛氏 C 标尺硬度 (注 3)				
		标准球	碳化钨球	A 标尺 荷重 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 荷重 100kgf 直径 1/16in 球	D 标尺 荷重 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 荷重 15kgf	30-N 标尺 荷重 30kgf	45-N 标尺 荷重 45kgf						
68	940	-	-	85.6	-	76.9	93.2	84.4	75.4	97	-	68			
67	900	-	-	85.0	-	76.1	92.9	83.6	74.2	95	-	67			
66	865	-	-	84.5	-	75.4	92.5	82.8	73.3	92	-	66			
65	832	-	(739)	83.9	-	74.5	92.2	81.9	72.0	91	-	65			
64	800	-	(722)	83.4	-	73.8	91.8	81.1	71.0	88	-	64			
63	772	-	(705)	82.8	-	73.0	91.4	80.1	69.9	87	-	63			
62	746	-	(688)	82.3	-	72.2	91.1	79.3	68.8	85	-	62			
61	720	-	(670)	81.8	-	71.5	90.7	78.4	67.7	83	-	61			
60	697	-	(654)	81.2	-	70.7	90.2	77.5	66.6	81	-	60			
59	674	-	(634)	80.7	-	69.9	89.8	76.6	65.5	80	-	59			
58	653	-	615	80.1	-	69.2	89.3	75.7	64.3	78	-	58			
57	633	-	595	79.6	-	68.5	88.9	74.8	63.2	76	-	57			
56	613	-	577	79.0	-	67.7	88.3	73.9	62.0	75	-	56			
55	595	-	560	78.5	-	66.9	87.9	73.0	60.9	74	2075	55			
54	577	-	543	78.0	-	66.1	87.4	72.0	59.8	72	2015	54			
53	560	-	525	77.4	-	65.4	86.9	71.2	58.6	71	1950	53			
52	544	(500)	512	76.8	-	64.6	86.4	70.2	57.4	69	1880	52			
51	528	(487)	496	76.3	-	63.8	85.9	69.4	56.1	68	1820	51			
50	513	(475)	481	75.9	-	63.1	85.5	68.5	55.0	67	1760	50			
49	498	(464)	469	75.2	-	62.1	85.0	67.6	53.8	66	1695	49			
48	484	451	455	74.7	-	61.4	84.5	66.7	52.5	64	1635	48			
47	471	442	443	74.1	-	60.8	83.9	65.8	51.4	63	1580	47			
46	458	432	432	73.6	-	60.0	83.5	64.8	50.3	62	1530	46			
45	446	421	421	73.1	-	59.2	83.0	64.0	49.0	60	1480	45			
44	434	409	409	72.5	-	58.5	82.5	63.1	47.8	58	1435	44			
43	423	400	400	72.0	-	57.7	82.0	62.2	48.7	57	1385	43			
42	412	390	390	71.5	-	56.9	81.5	61.3	45.5	56	1340	42			
41	402	381	381	70.9	-	56.2	80.9	60.4	44.3	55	1295	41			
40	392	371	371	70.4	-	55.4	80.4	59.5	43.1	54	1250	40			
39	382	362	362	69.9	-	54.6	79.9	58.6	41.9	52	1215	39			
38	372	353	353	69.4	-	53.8	79.4	57.7	40.8	51	1180	38			
37	363	344	344	68.9	-	53.1	78.8	56.8	39.6	50	1160	37			
36	354	336	336	68.4	(109.0)	52.3	78.3	55.9	38.4	49	1115	36			
35	345	327	327	67.9	(108.5)	51.5	77.7	55.0	37.2	48	1080	35			
34	336	319	319	67.4	(108.0)	50.8	77.2	54.2	36.1	47	1055	34			
33	327	311	311	66.8	(107.5)	50.0	76.6	53.3	34.9	46	1025	33			
32	318	301	301	66.3	(107.0)	49.2	76.1	52.1	33.7	44	1000	32			
31	310	294	294	65.8	(106.0)	48.4	75.6	51.3	32.5	43	980	31			
30	302	286	286	65.3	(105.5)	47.7	75.0	50.4	31.3	42	950	30			
29	294	279	279	64.7	(104.5)	47.0	74.5	49.5	30.1	41	930	29			
28	286	271	271	64.3	(104.0)	46.1	73.9	48.6	28.9	41	910	28			
27	279	264	264	63.8	(103.0)	45.2	73.3	47.7	27.8	40	880	27			
26	272	258	258	63.3	(102.5)	44.6	72.8	46.8	26.7	38	860	26			
25	266	253	253	62.8	(101.5)	43.8	72.2	45.9	25.5	38	840	25			
24	260	247	247	62.4	(101.0)	43.1	71.6	45.0	24.3	37	825	24			
23	254	243	243	62.0	100.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36	805	23			
22	248	237	237	61.5	99.0	41.6	70.5	43.2	22.0	35	785	22			
21	243	231	231	61.0	98.5	40.9	69.9	42.3	20.7	35	770	21			
20	238	226	226	60.5	97.8	40.1	69.4	41.5	19.6	34	760	20			
(18)	230	219	219	-	96.7	-	-	-	-	33	730	(18)			
(16)	222	212	212	-	95.5	-	-	-	-	32	705	(16)			
(14)	213	203	203	-	93.9	-	-	-	-	31	675	(14)			
(12)	204	194	194	-	92.3	-	-	-	-	29	650	(12)			
(10)	196	187	187	-	90.7	-	-	-	-	28	620	(10)			
(8)	188	179	179	-	89.5	-	-	-	-	27	600	(8)			
(6)	180	171	171	-	87.1	-	-	-	-	26	580	(6)			
(4)	173	165	165	-	85.5	-	-	-	-	25	550	(4)			
(2)	166	158	158	-	83.5	-	-	-	-	24	530	(2)			
(0)	160	152	152	-	81.7	-	-	-	-	24	515	(0)			

注 1. 表中的黑体字部分摘录于 ASTM E 140 表 1 (SAE-ASM-ASTM 共同调整。)

注 2. 1MPa = 1N/mm²

注 3. 表中小括弧内的数字是不太使用范围的数据, 仅供参考。



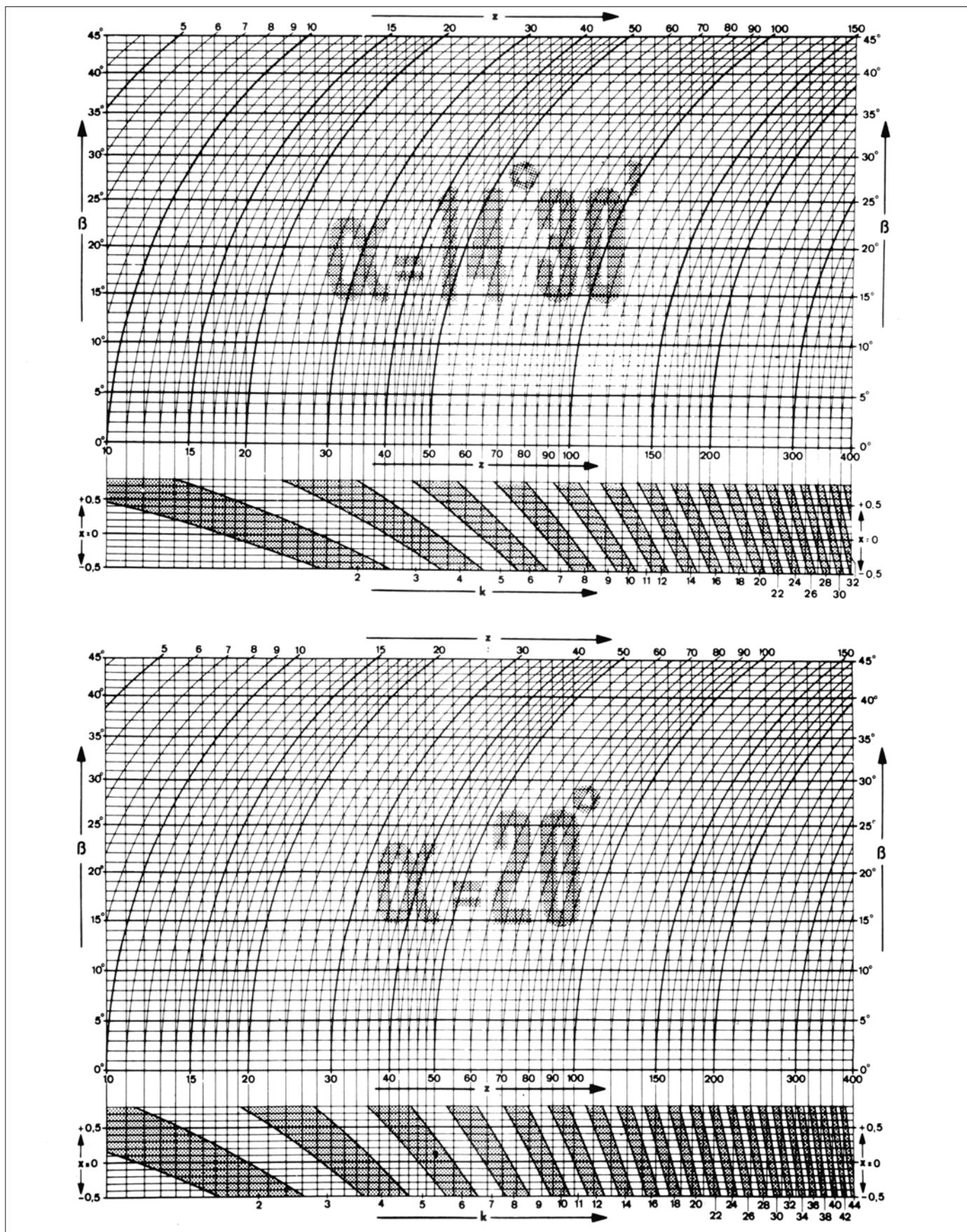
7 齿轮的齿距比较表

周节	齿距		模数 <i>m</i>	周节	齿距		模数 <i>m</i>	周节	齿距		模数 <i>m</i>
	英制单位	国际单位			英制单位	国际单位			英制单位	国际单位	
1	3.1416	79.796	25.4000	2.9568	1 $\frac{1}{16}$	26.988	8.5904	10.0531	$\frac{5}{16}$	7.938	2.5266
1.0053	3 $\frac{1}{8}$	79.375	25.2658	3	1.0472	26.599	8.4667	10.16	.3092	7.854	2.5
1.0160	3.0921	78.540	25	3.0691	1.0236	26	8.2761	10.6395	.2953	7.5	2.3873
1.0472	3	76.200	24.2550	3.1416	1	25.4	8.0851	11	.2856	7.254	2.3091
1.0583	2.9684	75.398	24	3.175	.9895	25.133	8	11.2889	.2783	7.069	2.25
1.0640	2.9528	75	23.8732	3.1919	.9843	25	7.9577	11.3995	.2756	7	2.2282
1.0927	2 $\frac{7}{8}$	73.025	23.2446	3.25	.9666	24.553	7.8154	12	.2618	6.650	2.1167
1.1399	2.7559	70	22.2817	3.3249	.9449	24	7.6394	12.2764	.2559	6.5	2.0690
1.1424	2 $\frac{3}{4}$	69.850	22.2339	3.3510	$\frac{15}{16}$	23.813	7.5798	12.5664	$\frac{1}{4}$	6.35	2.0213
1.1545	2.7211	69.115	22	3.5	.8976	22.799	7.2571	12.7	.2474	6.283	2
1.1968	2 $\frac{5}{8}$	66.675	21.2233	3.5904	$\frac{7}{8}$	22.225	7.0744	13	.2417	6.138	1.9538
1.2276	2.5591	65	20.6901	3.6271	.8661	22	7.0028	13.2994	.2362	6	1.9099
1.25	2.5133	63.837	20.3200	3.6286	.8658	21.991	7	14	.2244	5.700	1.8143
1.2566	2 $\frac{1}{2}$	63.500	20.2127	3.75	.8378	21.279	6.7733	14.5084	.2165	5.5	1.7507
1.27	2.4737	62.832	20	3.8666	$\frac{13}{16}$	20.638	6.5691	14.5143	.2164	5.498	1.75
1.3228	2 $\frac{3}{8}$	60.325	19.2020	3.9898	.7874	20	6.3662	15	.2094	5.320	1.6933
1.3299	2.3622	60	19.0986	4	.7854	19.949	6.3500	15.9593	.1969	5	1.5915
1.3963	2 $\frac{1}{4}$	57.150	18.1914	4.1888	$\frac{3}{4}$	19.05	6.0638	16	.1963	4.987	1.5875
1.4111	2.2263	56.549	18	4.1998	.7480	19	6.0479	16.7552	$\frac{3}{16}$	4.763	1.5160
1.4508	2.1654	55	17.5070	4.2333	.7421	18.850	6	16.9333	.1855	4.712	1.5
1.4784	2 $\frac{1}{8}$	53.975	17.1808	4.4331	.7087	18	5.7296	17.7325	.1772	4.5	1.4324
1.5	2.0944	53.198	16.9333	4.5	.6981	17.733	5.6444	18	.1745	4.433	1.4111
1.5708	2	50.8	16.1701	4.5696	$\frac{11}{16}$	17.463	5.5585	19.9491	.1575	4	1.2732
1.5875	1.9790	50.265	16	4.6182	.6803	17.279	5.5	20	.1571	3.990	1.27
1.5959	1.9685	50	15.9155	4.6939	.6693	17	5.4113	20.32	.1546	3.927	1.25
1.6755	1 $\frac{7}{8}$	47.625	15.1595	4.9873	.6299	16	5.0930	22	.1428	3.627	1.1545
1.6933	1.8553	47.124	15	5	.6283	15.959	5.0800	22.7990	.1378	3.5	1.1141
1.75	1.7952	45.598	14.5143	5.0265	$\frac{5}{8}$	15.875	5.0532	23	.1366	3.469	1.1043
1.7733	1.7717	45	14.3239	5.08	.6184	15.708	5	24	.1309	3.325	1.0583
1.7952	1 $\frac{3}{4}$	44.45	14.1489	5.3198	.5906	15	4.7746	25	.1257	3.192	1.016
1.8143	1.7316	43.982	14	5.5	.5712	14.508	4.6182	25.1327	$\frac{1}{8}$	3.175	1.0106
1.9333	1 $\frac{5}{8}$	41.275	13.1382	5.5851	$\frac{9}{16}$	14.288	4.5479	25.4	.1237	3.142	1
1.9538	1.6079	40.841	13	5.6444	.5566	14.137	4.5	26	.1208	3.069	.9769
1.9949	1.5748	40	12.7324	5.6997	.5512	14	4.4563	26.5988	.1181	3	.9549
2	1.5708	39.898	12.7000	6	.5236	13.299	4.2333	28	.1122	2.850	.9071
2.0944	1 $\frac{1}{2}$	38.1	12.1276	6.1382	.5118	13	4.1380	29	.1083	2.752	.8759
2.0999	1.4961	38	12.0958	6.2832	$\frac{1}{2}$	12.7	4.0425	30	.1047	2.660	.8467
2.1167	1.4842	37.699	12	6.35	.4947	12.566	4	31.75	.0989	2.513	.8
2.1855	1 $\frac{7}{16}$	36.513	11.6223	6.5	.4833	12.276	3.9077	31.9186	.0984	2.5	.7958
2.2166	1.4173	36	11.4592	6.6497	.4724	12	3.8197	32	.0982	2.494	.7938
2.25	1.3963	35.465	11.2889	7	.4488	11.399	3.6286	33.8667	.0928	2.356	.75
2.2848	1 $\frac{3}{8}$	34.925	11.1170	7.1808	$\frac{7}{16}$	11.113	3.5372	34	.0924	2.347	.7471
2.3091	1.3606	34.559	11	7.2542	.4331	11	3.5014	36	.0873	2.217	.7056
2.3470	1.3386	34	10.8225	7.2571	.4329	10.996	3.5	38	.0827	2.100	.6684
2.3936	1 $\frac{5}{16}$	33.338	10.6117	7.9796	.3937	10	3.1831	39.8982	.0787	2	.6366
2.4936	1.2598	32	10.1859	8	.3927	9.975	3.175	40	.0785	1.995	.635
2.5	1.2566	31.919	10.1600	8.3776	$\frac{3}{8}$	9.525	3.0319	45	.0698	1.773	.5644
2.5133	1 $\frac{1}{4}$	31.750	10.1063	8.3996	.3740	9.5	3.0239	50	.0628	1.596	.5080
2.54	1.2369	31.416	10	8.4667	.3711	9.425	3	50.2655	$\frac{1}{16}$	1.588	.5053
2.6456	1 $\frac{3}{16}$	30.163	9.6010	8.8663	.3543	9	2.8648	50.8	.0618	1.571	.5
2.6599	1.1811	30	9.5493	9	.3491	8.866	2.8222	53.1976	.0591	1.5	.4775
2.75	1.1424	29.017	9.2364	9.2364	.3401	8.639	2.75	63.5	.0495	1.256	.4
2.7925	1 $\frac{1}{8}$	28.575	9.0957	9.3878	.3346	8.5	2.7056	79.7965	.0394	1	.3183
2.8222	1.1132	28.274	9	9.9746	.3150	8	2.5465	84.6667	.0371	.942	.3
2.8499	1.1024	28	8.9127	10	.3142	7.980	2.54	127	.0247	.628	.2



8 正齿轮及斜齿齿轮的跨齿数线图

(资料摘自 MAAG 公司)





9 标准正齿轮的公法线长度

 $W(x=0)$ $m=1$ ($\alpha=20^\circ$)

z	k	W									
			61	7	20.0432	121	14	41.5484	181	21	63.0537
			62	7	20.0572	122	14	41.5625	182	21	63.0677
			63	8	23.0233	123	14	41.5765	183	21	63.0817
			64	8	23.0373	124	14	41.5905	184	21	63.0957
5	2	4.4982	65	8	23.0513	125	14	41.6045	185	21	63.1097
6	2	4.5122	66	8	23.0654	126	15	44.5706	186	21	63.1237
7	2	4.5262	67	8	23.0794	127	15	44.5846	187	21	63.1377
8	2	4.5402	68	8	23.0934	128	15	44.5986	188	21	63.1517
9	2	4.5542	69	8	23.1074	129	15	44.6126	189	22	66.1179
10	2	4.5683	70	8	23.1214	130	15	44.6266	190	22	66.1319
11	2	4.5823	71	8	23.1354	131	15	44.6406	191	22	66.1459
12	2	4.5963	72	9	26.1015	132	15	44.6546	192	22	66.1599
13	2	4.6103	73	9	26.1155	133	15	44.6686	193	22	66.1739
14	2	4.6243	74	9	26.1295	134	15	44.6826	194	22	66.1879
15	2	4.6383	75	9	26.1435	135	16	47.6488	195	22	66.2019
16	2	4.6523	76	9	26.1575	136	16	47.6628	196	22	66.2159
17	2	4.6663	77	9	26.1715	137	16	47.6768	197	22	66.2299
18	3	7.6324	78	9	26.1855	138	16	47.6908	198	23	69.1961
19	3	7.6464	79	9	26.1996	139	16	47.7048	199	23	69.2101
20	3	7.6604	80	9	26.2136	140	16	47.7188	200	23	69.2241
21	3	7.6744	81	10	29.1797	141	16	47.7328	201	23	69.2381
22	3	7.6885	82	10	29.1937	142	16	47.7468	202	23	69.2521
23	3	7.7025	83	10	29.2077	143	16	47.7608	203	23	69.2661
24	3	7.7165	84	10	29.2217	144	17	50.7270	204	23	69.2801
25	3	7.7305	85	10	29.2357	145	17	50.7410	205	23	69.2941
26	3	7.7445	86	10	29.2497	146	17	50.7550	206	23	69.3081
27	4	10.7106	87	10	29.2637	147	17	50.7690	207	24	72.2742
28	4	10.7246	88	10	29.2777	148	17	50.7830	208	24	72.2882
29	4	10.7386	89	10	29.2917	149	17	50.7970	209	24	72.3022
30	4	10.7526	90	11	32.2579	150	17	50.8110	210	24	72.3163
31	4	10.7666	91	11	32.2719	151	17	50.8250	211	24	72.3303
32	4	10.7806	92	11	32.2859	152	17	50.8390	212	24	72.3443
33	4	10.7946	93	11	32.2999	153	18	53.8051	213	24	72.3583
34	4	10.8086	94	11	32.3139	154	18	53.8192	214	24	72.3723
35	4	10.8227	95	11	32.3279	155	18	53.8332	215	24	72.3863
36	5	13.7888	96	11	32.3419	156	18	53.8472	216	25	75.3524
37	5	13.8028	97	11	32.3559	157	18	53.8612	217	25	75.3664
38	5	13.8168	98	11	32.3699	158	18	53.8752	218	25	75.3804
39	5	13.8308	99	12	35.3361	159	18	53.8892	219	25	75.3944
40	5	13.8448	100	12	35.3501	160	18	53.9032	220	25	75.4084
41	5	13.8588	101	12	35.3641	161	18	53.9172	221	25	75.4224
42	5	13.8728	102	12	35.3781	162	19	56.8833	222	25	75.4364
43	5	13.8868	103	12	35.3921	163	19	56.8973	223	25	75.4505
44	5	13.9008	104	12	35.4061	164	19	56.9113	224	25	75.4645
45	6	16.8670	105	12	35.4201	165	19	56.9253	225	26	78.4306
46	6	16.8810	106	12	35.4341	166	19	56.9394	226	26	78.4446
47	6	16.8950	107	12	35.4481	167	19	56.9534	227	26	78.4586
48	6	16.9090	108	13	38.4142	168	19	56.9674	228	26	78.4726
49	6	16.9230	109	13	38.4282	169	19	56.9814	229	26	78.4866
50	6	16.9370	110	13	38.4423	170	19	56.9954	230	26	78.5006
51	6	16.9510	111	13	38.4563	171	20	59.9615	231	26	78.5146
52	6	16.9650	112	13	38.4703	172	20	59.9755	232	26	78.5286
53	6	16.9790	113	13	38.4843	173	20	59.9895	233	26	78.5426
54	7	19.9452	114	13	38.4983	174	20	60.0035	234	27	81.5088
55	7	19.9592	115	13	38.5123	175	20	60.0175	235	27	81.5228
56	7	19.9732	116	13	38.5263	176	20	60.0315	236	27	81.5368
57	7	19.9872	117	14	41.4924	177	20	60.0455	237	27	81.5508
58	7	20.0012	118	14	41.5064	178	20	60.0595	238	27	81.5648
59	7	20.0152	119	14	41.5204	179	20	60.0736	239	27	81.5788
60	7	20.0292	120	14	41.5344	180	21	63.0397	240	27	81.5928


 $m = 1 \ (\alpha = 20^\circ)$

<i>z</i>	<i>k</i>	<i>W</i>									
241	27	81.6068	301	34	103.1121	361	41	124.6173	421	47	143.1704
242	27	81.6208	302	34	103.1261	362	41	124.6313	422	47	143.1844
243	28	84.5870	303	34	103.1401	363	41	124.6453	423	48	146.1506
244	28	84.6010	304	34	103.1541	364	41	124.6593	424	48	146.1646
245	28	84.6150	305	34	103.1681	365	41	124.6733	425	48	146.1786
246	28	84.6290	306	35	106.1342	366	41	124.6874	426	48	146.1926
247	28	84.6430	307	35	106.1482	367	41	124.7014	427	48	146.2066
248	28	84.6570	308	35	106.1622	368	41	124.7154	428	48	146.2206
249	28	84.6710	309	35	106.1762	369	42	127.6815	429	48	146.2346
250	28	84.6850	310	35	106.1903	370	42	127.6955	430	48	146.2486
251	28	84.6990	311	35	106.2043	371	42	127.7095	431	48	146.2626
252	29	87.6651	312	35	106.2183	372	42	127.7235	432	49	149.2288
253	29	87.6791	313	35	106.2323	373	42	127.7375	433	49	149.2428
254	29	87.6932	314	35	106.2463	374	42	127.7515	434	49	149.2568
255	29	87.7072	315	36	109.2124	375	42	127.7655	435	49	149.2708
256	29	87.7212	316	36	109.2264	376	42	127.7795	436	49	149.2848
257	29	87.7352	317	36	109.2404	377	42	127.7935	437	49	149.2988
258	29	87.7492	318	36	109.2544	378	43	130.7597	438	49	149.3128
259	29	87.7632	319	36	109.2684	379	43	130.7737	439	49	149.3268
260	29	87.7772	320	36	109.2824	380	43	130.7877	440	49	149.3408
261	30	90.7433	321	36	109.2964	381	43	130.8017	441	50	152.3069
262	30	90.7573	322	36	109.3104	382	43	130.8157	442	50	152.3210
263	30	90.7713	323	36	109.3245	383	43	130.8297	443	50	152.3350
264	30	90.7853	324	37	112.2906	384	43	130.8437	444	50	152.3490
265	30	90.7993	325	37	112.3046	385	43	130.8577	445	50	152.3630
266	30	90.8134	326	37	112.3186	386	43	130.8717	446	50	152.3770
267	30	90.8274	327	37	112.3326	387	44	133.8379	447	50	152.3910
268	30	90.8414	328	37	112.3466	388	44	133.8519	448	50	152.4050
269	30	90.8554	329	37	112.3606	389	44	133.8659	449	50	152.4190
270	31	93.8215	330	37	112.3746	390	44	133.8799	450	51	155.3851
271	31	93.8355	331	37	112.3886	391	44	133.8939	451	51	155.3991
272	31	93.8495	332	37	112.4026	392	44	133.9079	452	51	155.4131
273	31	93.8635	333	38	115.3688	393	44	133.9219	453	51	155.4271
274	31	93.8775	334	38	115.3828	394	44	133.9359	454	51	155.4412
275	31	93.8915	335	38	115.3968	395	44	133.9499	455	51	155.4552
276	31	93.9055	336	38	115.4108	396	45	136.9160	456	51	155.4692
277	31	93.9195	337	38	115.4248	397	45	136.9300	457	51	155.4832
278	31	93.9335	338	38	115.4388	398	45	136.9441	458	51	155.4972
279	32	96.8997	339	38	115.4528	399	45	136.9581	459	52	158.4633
280	32	96.9137	340	38	115.4668	400	45	136.9721	460	52	158.4773
281	32	96.9277	341	38	115.4808	401	45	136.9861	461	52	158.4913
282	32	96.9417	342	39	118.4470	402	45	137.0001	462	52	158.5053
283	32	96.9557	343	39	118.4610	403	45	137.0141	463	52	158.5193
284	32	96.9697	344	39	118.4750	404	45	137.0281	464	52	158.5333
285	32	96.9837	345	39	118.4890	405	46	139.9942	465	52	158.5473
286	32	96.9977	346	39	118.5030	406	46	140.0082	466	52	158.5614
287	32	97.0117	347	39	118.5170	407	46	140.0222	467	52	158.5754
288	33	99.9779	348	39	118.5310	408	46	140.0362	468	53	161.5415
289	33	99.9919	349	39	118.5450	409	46	140.0502	469	53	161.5555
290	33	100.0059	350	39	118.5590	410	46	140.0643	470	53	161.5695
291	33	100.0199	351	40	121.5251	411	46	140.0783	471	53	161.5835
292	33	100.0339	352	40	121.5391	412	46	140.0923	472	53	161.5975
293	33	100.0479	353	40	121.5531	413	46	140.1063	473	53	161.6115
294	33	100.0619	354	40	121.5672	414	47	143.0724	474	53	161.6255
295	33	100.0759	355	40	121.5812	415	47	143.0864	475	53	161.6395
296	33	100.0899	356	40	121.5952	416	47	143.1004	476	53	161.6535
297	34	103.0560	357	40	121.6092	417	47	143.1144	477	54	164.6197
298	34	103.0701	358	40	121.6232	418	47	143.1284	478	54	164.6337
299	34	103.0841	359	40	121.6372	419	47	143.1424	479	54	164.6477
300	34	103.0981	360	41	124.6033	420	47	143.1564	480	54	164.6617



10 标准正齿轮的公法线长度

 $W(x=0)$ $m=1$ ($\alpha=14.5^\circ$)

z	k	W									
			61	5	14.0143	121	10	29.5440	181	15	45.0738
			62	5	14.0197	122	10	29.5494	182	15	45.0791
			63	6	17.0666	123	10	29.5548	183	15	45.0845
			64	6	17.0720	124	10	29.5602	184	15	45.0899
			65	6	17.0773	125	11	32.6070	185	15	45.0952
7	2	4.5999	66	6	17.0827	126	11	32.6124	186	15	45.1006
8	2	4.6052	67	6	17.0881	127	11	32.6178	187	16	48.1475
9	2	4.6106	68	6	17.0934	128	11	32.6232	188	16	48.1529
10	2	4.6160	69	6	17.0988	129	11	32.6285	189	16	48.1582
			70	6	17.1042	130	11	32.6339	190	16	48.1636
11	2	4.6213	71	6	17.1095	131	11	32.6393	191	16	48.1690
12	2	4.6267	72	6	17.1149	132	11	32.6446	192	16	48.1743
13	2	4.6321	73	6	17.1203	133	11	32.6500	193	16	48.1797
14	2	4.6374	74	6	17.1256	134	11	32.6554	194	16	48.1851
15	2	4.6428	75	7	20.1725	135	11	32.6607	195	16	48.1904
16	2	4.6482	76	7	20.1779	136	11	32.6661	196	16	48.1958
17	2	4.6535	77	7	20.1833	137	12	35.7130	197	16	48.2012
18	2	4.6589	78	7	20.1886	138	12	35.7184	198	16	48.2066
19	2	4.6643	79	7	20.1940	139	12	35.7237	199	17	51.2534
20	2	4.6697	80	7	20.1994	140	12	35.7291	200	17	51.2588
21	2	4.6750	81	7	20.2047	141	12	35.7345	201	17	51.2642
22	2	4.6804	82	7	20.2101	142	12	35.7398	202	17	51.2696
23	2	4.6858	83	7	20.2155	143	12	35.7452	203	17	51.2749
24	2	4.6911	84	7	20.2208	144	12	35.7506	204	17	51.2803
25	3	7.7380	85	7	20.2262	145	12	35.7559	205	17	51.2857
26	3	7.7434	86	7	20.2316	146	12	35.7613	206	17	51.2910
27	3	7.7488	87	8	23.2785	147	12	35.7667	207	17	51.2964
28	3	7.7541	88	8	23.2838	148	12	35.7720	208	17	51.3018
29	3	7.7595	89	8	23.2892	149	13	38.8189	209	17	51.3071
30	3	7.7649	90	8	23.2946	150	13	38.8243	210	17	51.3125
31	3	7.7702	91	8	23.2999	151	13	38.8297	211	17	51.3179
32	3	7.7756	92	8	23.3053	152	13	38.8350	212	18	54.3648
33	3	7.7810	93	8	23.3107	153	13	38.8404	213	18	54.3701
34	3	7.7863	94	8	23.3161	154	13	38.8458	214	18	54.3755
35	3	7.7917	95	8	23.3214	155	13	38.8511	215	18	54.3809
36	3	7.7971	96	8	23.3268	156	13	38.8565	216	18	54.3862
37	3	7.8024	97	8	23.3322	157	13	38.8619	217	18	54.3916
38	4	10.8493	98	8	23.3375	158	13	38.8672	218	18	54.3970
39	4	10.8547	99	8	23.3429	159	13	38.8726	219	18	54.4023
40	4	10.8601	100	9	26.3898	160	13	38.8780	220	18	54.4077
41	4	10.8654	101	9	26.3952	161	13	38.8834	221	18	54.4131
42	4	10.8708	102	9	26.4005	162	14	41.9302	222	18	54.4184
43	4	10.8762	103	9	26.4059	163	14	41.9356	223	18	54.4238
44	4	10.8815	104	9	26.4113	164	14	41.9410	224	19	57.4707
45	4	10.8869	105	9	26.4166	165	14	41.9464	225	19	57.4761
46	4	10.8923	106	9	26.4220	166	14	41.9517	226	19	57.4814
47	4	10.8976	107	9	26.4274	167	14	41.9571	227	19	57.4868
48	4	10.9030	108	9	26.4327	168	14	41.9625	228	19	57.4922
49	4	10.9084	109	9	26.4381	169	14	41.9678	229	19	57.4975
50	5	13.9553	110	9	26.4435	170	14	41.9732	230	19	57.5029
51	5	13.9606	111	9	26.4488	171	14	41.9786	231	19	57.5083
52	5	13.9660	112	10	29.4957	172	14	41.9839	232	19	57.5137
53	5	13.9714	113	10	29.5011	173	14	41.9893	233	19	57.5190
54	5	13.9767	114	10	29.5065	174	15	45.0362	234	19	57.5244
55	5	13.9821	115	10	29.5118	175	15	45.0416	235	19	57.5298
56	5	13.9875	116	10	29.5172	176	15	45.0469	236	20	60.5766
57	5	13.9929	117	10	29.5226	177	15	45.0523	237	20	60.5820
58	5	13.9982	118	10	29.5279	178	15	45.0577	238	20	60.5874
59	5	14.0036	119	10	29.5333	179	15	45.0630	239	20	60.5928
60	5	14.0090	120	10	29.5387	180	15	45.0684	240	20	60.5981



m = 1 (α = 14.5°)

<i>z</i>	<i>k</i>	<i>W</i>									
241	20	60.6035	301	25	76.1332	361	30	91.6629	421	34	104.1511
242	20	60.6089	302	25	76.1386	362	30	91.6683	422	34	104.1565
243	20	60.6142	303	25	76.1439	363	30	91.6737	423	35	107.2034
244	20	60.6196	304	25	76.1493	364	30	91.6790	424	35	107.2088
245	20	60.6250	305	25	76.1547	365	30	91.6844	425	35	107.2141
246	20	60.6303	306	25	76.1601	366	30	91.6898	426	35	107.2195
247	20	60.6357	307	25	76.1654	367	30	91.6951	427	35	107.2249
248	20	60.6411	308	25	76.1708	368	30	91.7005	428	35	107.2302
249	21	63.6880	309	25	76.1762	369	30	91.7059	429	35	107.2356
250	21	63.6933	310	25	76.1815	370	30	91.7112	430	35	107.2410
251	21	63.6987	311	26	79.2284	371	30	91.7166	431	35	107.2463
252	21	63.7041	312	26	79.2338	372	30	91.7220	432	35	107.2517
253	21	63.7094	313	26	79.2392	373	31	94.7689	433	35	107.2571
254	21	63.7148	314	26	79.2445	374	31	94.7742	434	35	107.2624
255	21	63.7202	315	26	79.2499	375	31	94.7796	435	36	110.3093
256	21	63.7255	316	26	79.2553	376	31	94.7850	436	36	110.3147
257	21	63.7309	317	26	79.2606	377	31	94.7903	437	36	110.3201
258	21	63.7363	318	26	79.2660	378	31	94.7957	438	36	110.3254
259	21	63.7416	319	26	79.2714	379	31	94.8011	439	36	110.3308
260	21	63.7470	320	26	79.2767	380	31	94.8065	440	36	110.3362
261	22	66.7939	321	26	79.2821	381	31	94.8118	441	36	110.3415
262	22	66.7993	322	26	79.2875	382	31	94.8172	442	36	110.3469
263	22	66.8046	323	27	82.3344	383	31	94.8226	443	36	110.3523
264	22	66.8100	324	27	82.3397	384	31	94.8279	444	36	110.3576
265	22	66.8154	325	27	82.3451	385	32	97.8748	445	36	110.3630
266	22	66.8207	326	27	82.3505	386	32	97.8802	446	36	110.3684
267	22	66.8261	327	27	82.3558	387	32	97.8856	447	37	113.4153
268	22	66.8315	328	27	82.3612	388	32	97.8909	448	37	113.4206
269	22	66.8369	329	27	82.3666	389	32	97.8963	449	37	113.4260
270	22	66.8422	330	27	82.3719	390	32	97.9017	450	37	113.4314
271	22	66.8476	331	27	82.3773	391	32	97.9070	451	37	113.4368
272	22	66.8530	332	27	82.3827	392	32	97.9124	452	37	113.4421
273	22	66.8583	333	27	82.3880	393	32	97.9178	453	37	113.4475
274	23	69.9052	334	27	82.3934	394	32	97.9231	454	37	113.4529
275	23	69.9106	335	27	82.3988	395	32	97.9285	455	37	113.4582
276	23	69.9160	336	28	85.4457	396	32	97.9339	456	37	113.4636
277	23	69.9213	337	28	85.4510	397	32	97.9392	457	37	113.4690
278	23	69.9267	338	28	85.4564	398	33	100.9861	458	37	113.4743
279	23	69.9321	339	28	85.4618	399	33	100.9915	459	37	113.4797
280	23	69.9374	340	28	85.4671	400	33	100.9969	460	38	116.5266
281	23	69.9428	341	28	85.4725	401	33	101.0022	461	38	116.5320
282	23	69.9482	342	28	85.4779	402	33	101.0076	462	38	116.5373
283	23	69.9535	343	28	85.4833	403	33	101.0130	463	38	116.5427
284	23	69.9589	344	28	85.4886	404	33	101.0183	464	38	116.5481
285	23	69.9643	345	28	85.4940	405	33	101.0237	465	38	116.5534
286	24	73.0112	346	28	85.4994	406	33	101.0291	466	38	116.5588
287	24	73.0165	347	28	85.5047	407	33	101.0344	467	38	116.5642
288	24	73.0219	348	29	88.5516	408	33	101.0398	468	38	116.5695
289	24	73.0273	349	29	88.5570	409	33	101.0452	469	38	116.5749
290	24	73.0326	350	29	88.5624	410	34	104.0921	470	38	116.5803
291	24	73.0380	351	29	88.5677	411	34	104.0974	471	38	116.5856
292	24	73.0434	352	29	88.5731	412	34	104.1028	472	39	119.6325
293	24	73.0487	353	29	88.5785	413	34	104.1082	473	39	119.6379
294	24	73.0541	354	29	88.5838	414	34	104.1136	474	39	119.6433
295	24	73.0595	355	29	88.5892	415	34	104.1189	475	39	119.6486
296	24	73.0648	356	29	88.5946	416	34	104.1243	476	39	119.6540
297	24	73.0702	357	29	88.5999	417	34	104.1297	477	39	119.6594
298	25	76.1171	358	29	88.6053	418	34	104.1350	478	39	119.6647
299	25	76.1225	359	29	88.6107	419	34	104.1404	479	39	119.6701
300	25	76.1278	360	30	91.6576	420	34	104.1458	480	39	119.6755



11 滚开线反函数的计算

滚开线反函数是由滚开线函数 ($\text{inv}\alpha = \tan\alpha - \alpha$) 的 $\text{inv}\alpha$ 求出 α 的值的计算公式。也可以从下一节中登载的滚开线函数表中查出正确的数值。

(1) 滚开线反函数的计算方法

下面是滚开线函数的计算公式及计算例。

* 计算公式

计算是的单位是弧度。计算从 1 rad 开始。

$$a_1 = 1 + (\text{inv}\alpha - \tan 1 + 1) \div \tan 1^2$$

$$a_2 = a_1 + (\text{inv}\alpha - \tan a_1 + a_1) \div \tan a_1^2$$

$$a_3 = a_2 + (\text{inv}\alpha - \tan a_2 + a_2) \div \tan a_2^2$$

⋮

$$a_x = a_{x-1} + (\text{inv}\alpha - \tan a_{x-1} + a_{x-1}) \div \tan a_{x-1}^2$$

最后将弧度换算为度。

$$\alpha = a_x \times 180 \div \pi$$

需要多次反复直到得出的数值收敛为止。

* 计算例

滚开线反函数的计算 (设 $\text{inv}\alpha = 0.014904384$)				
序号	计算公式	符号	单位	计算例
1		$\text{inv}\alpha$	rad	0.014904384
2	$a_1 = 1 + (\text{inv}\alpha - \tan 1 + 1) \div \tan 1^2$	a_1		0.776335135
3	$a_2 = a_1 + (\text{inv}\alpha - \tan a_1 + a_1) \div \tan a_1^2$	a_2		0.578494316
4	$a_3 = a_2 + (\text{inv}\alpha - \tan a_2 + a_2) \div \tan a_2^2$	a_3		0.438683749
5	$a_4 = a_3 + (\text{inv}\alpha - \tan a_3 + a_3) \div \tan a_3^2$	a_4		0.367880815
6	$a_5 = a_4 + (\text{inv}\alpha - \tan a_4 + a_4) \div \tan a_4^2$	a_5		0.350096245
7	$a_6 = a_5 + (\text{inv}\alpha - \tan a_5 + a_5) \div \tan a_5^2$	a_6		0.349069141
8	$a_7 = a_6 + (\text{inv}\alpha - \tan a_6 + a_6) \div \tan a_6^2$	a_7		0.34906585
9	$a_8 = a_7 + (\text{inv}\alpha - \tan a_7 + a_7) \div \tan a_7^2$	a_8		0.34906585
10	$a_9 = a_8 + (\text{inv}\alpha - \tan a_8 + a_8) \div \tan a_8^2$	a_9		0.34906585
11	$\alpha = \frac{a_9 \times 180}{\pi}$	α	度	20

附属资料 使用表计算软件的计算方法

使用表计算软件进行滚开线函数的收敛计算非常方便。

下面所示为使用表计算软件进行(1)的计算方法及计算例。

* 计算方法

首先输入滚开线函数值 $\text{inv}\alpha$ 。

$$= 1 + (\text{inv}\alpha - \text{TAN}(1) + 1) / \text{TAN}(1)^2$$

设上式的计算值为 B、代入到下式。

$$= B + (\text{inv}\alpha - \text{TAN}(B) + B) / \text{TAN}(B)^2$$

上式的结果为 B 代入式中做反复计算。

计算结果收敛在一定的数值时、将 B 换算成度。

$$= \text{DEGREES}(B)$$

* 计算例

实际的计算如下所示。

(设 $\text{inv}\alpha = 0.014904384$)

	A	B
1	0.014904384	
2	$= 1 + (A1 - \text{TAN}(1) + 1) / \text{TAN}(1)^2$	$= \text{DEGREES}(A2)$
3	$= A2 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A2) + A2) / \text{TAN}(A2)^2$	$= \text{DEGREES}(A3)$
4	$= A3 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A3) + A3) / \text{TAN}(A3)^2$	$= \text{DEGREES}(A4)$
5	$= A4 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A4) + A4) / \text{TAN}(A4)^2$	$= \text{DEGREES}(A5)$
6	$= A5 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A5) + A5) / \text{TAN}(A5)^2$	$= \text{DEGREES}(A6)$
7	$= A6 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A6) + A6) / \text{TAN}(A6)^2$	$= \text{DEGREES}(A7)$
8	$= A7 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A7) + A7) / \text{TAN}(A7)^2$	$= \text{DEGREES}(A8)$
9	$= A8 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A8) + A8) / \text{TAN}(A8)^2$	$= \text{DEGREES}(A9)$
10	$= A9 + (\$A\$1 - \text{TAN}(A9) + A9) / \text{TAN}(A9)^2$	$= \text{DEGREES}(A10)$



	A	B
1	0.014904384	
2	0.776335135	44.4807267
3	0.578494316	33.14528275
4	0.438683749	25.13472737
5	0.367880815	21.07801808
6	0.350096245	20.05903727
7	0.349069141	20.00018856
8	0.34906585	20
9	0.34906585	20
10	0.34906585	20

收敛为一定的值。



12 滚开线函数表

inv $\alpha = \tan \alpha - \alpha$

分(')	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
0	0.00001418	0.00004790	0.0001136	0.0002222	0.0003845	0.0006115	0.0009145	0.001305	0.001794	0.002394
1	0.00001454	0.00004871	0.0001151	0.0002244	0.0003877	0.0006159	0.0009203	0.001312	0.001803	0.002405
2	0.00001491	0.00004952	0.0001165	0.0002267	0.0003909	0.0006203	0.0009260	0.001319	0.001812	0.002416
3	0.00001528	0.00005034	0.0001180	0.0002289	0.0003942	0.0006248	0.0009318	0.001327	0.001821	0.002427
4	0.00001565	0.00005117	0.0001194	0.0002312	0.0003975	0.0006292	0.0009377	0.001334	0.001830	0.002438
5	0.00001603	0.00005201	0.0001209	0.0002335	0.0004008	0.0006337	0.0009435	0.001342	0.001840	0.002449
6	0.00001642	0.00005286	0.0001224	0.0002358	0.0004041	0.0006382	0.0009494	0.001349	0.001849	0.002461
7	0.00001682	0.00005372	0.0001239	0.0002382	0.0004074	0.0006427	0.0009553	0.001357	0.001858	0.002472
8	0.00001722	0.00005458	0.0001254	0.0002405	0.0004108	0.0006473	0.0009612	0.001364	0.001867	0.002483
9	0.00001762	0.00005546	0.0001269	0.0002429	0.0004141	0.0006518	0.0009672	0.001372	0.001877	0.002494
10	0.00001804	0.00005634	0.0001285	0.0002452	0.0004175	0.0006564	0.0009732	0.001379	0.001886	0.002506
11	0.00001846	0.00005724	0.0001300	0.0002476	0.0004209	0.0006610	0.0009792	0.001387	0.001895	0.002517
12	0.00001888	0.00005814	0.0001316	0.0002500	0.0004244	0.0006657	0.0009852	0.001394	0.001905	0.002528
13	0.00001931	0.00005906	0.0001332	0.0002524	0.0004278	0.0006703	0.0009913	0.001402	0.001914	0.002540
14	0.00001975	0.00005998	0.0001347	0.0002549	0.0004313	0.0006750	0.0009973	0.001410	0.001924	0.002551
15	0.00002020	0.00006091	0.0001363	0.0002573	0.0004347	0.0006797	0.0010034	0.001417	0.001933	0.002563
16	0.00002065	0.00006186	0.0001380	0.0002598	0.0004382	0.0006844	0.0010096	0.001425	0.001943	0.002574
17	0.00002111	0.00006281	0.0001396	0.0002622	0.0004417	0.0006892	0.0010157	0.001433	0.001952	0.002586
18	0.00002158	0.00006377	0.0001412	0.0002647	0.0004453	0.0006939	0.0010219	0.001441	0.001962	0.002598
19	0.00002205	0.00006474	0.0001429	0.0002673	0.0004488	0.0006987	0.0010281	0.001448	0.001972	0.002609
20	0.00002253	0.00006573	0.0001445	0.0002698	0.0004524	0.0007035	0.0010343	0.001456	0.001981	0.002621
21	0.00002301	0.00006672	0.0001462	0.0002723	0.0004560	0.0007083	0.0010406	0.001464	0.001991	0.002633
22	0.00002351	0.00006772	0.0001479	0.0002749	0.0004596	0.0007132	0.0010469	0.001472	0.002001	0.002644
23	0.00002401	0.00006873	0.0001496	0.0002775	0.0004632	0.0007181	0.0010532	0.001480	0.002010	0.002656
24	0.00002452	0.00006975	0.0001513	0.0002801	0.0004669	0.0007230	0.0010595	0.001488	0.002020	0.002668
25	0.00002503	0.00007078	0.0001530	0.0002827	0.0004706	0.0007279	0.0010659	0.001496	0.002030	0.002680
26	0.00002555	0.00007183	0.0001548	0.0002853	0.0004743	0.0007328	0.0010722	0.001504	0.002040	0.002692
27	0.00002608	0.00007288	0.0001565	0.0002879	0.0004780	0.0007378	0.0010786	0.001512	0.002050	0.002703
28	0.00002662	0.00007394	0.0001583	0.0002906	0.0004817	0.0007428	0.0010851	0.001520	0.002060	0.002715
29	0.00002716	0.00007501	0.0001601	0.0002933	0.0004854	0.0007478	0.0010915	0.001528	0.002069	0.002727
30	0.00002771	0.00007610	0.0001619	0.0002959	0.0004892	0.0007528	0.0010980	0.001536	0.002079	0.002739
31	0.00002827	0.00007719	0.0001637	0.0002986	0.0004930	0.0007579	0.0011045	0.001544	0.002089	0.002751
32	0.00002884	0.00007829	0.0001655	0.0003014	0.0004968	0.0007629	0.0011111	0.001553	0.002100	0.002764
33	0.00002941	0.00007941	0.0001674	0.0003041	0.0005006	0.0007680	0.0011176	0.001561	0.002110	0.002776
34	0.00002999	0.00008053	0.0001692	0.0003069	0.0005045	0.0007732	0.0011242	0.001569	0.002120	0.002788
35	0.00003058	0.00008167	0.0001711	0.0003096	0.0005083	0.0007783	0.0011308	0.001577	0.002130	0.002800
36	0.00003117	0.00008281	0.0001729	0.0003124	0.0005122	0.0007835	0.0011375	0.001586	0.002140	0.002812
37	0.00003178	0.00008397	0.0001748	0.0003152	0.0005161	0.0007887	0.0011441	0.001594	0.002150	0.002825
38	0.00003239	0.00008514	0.0001767	0.0003180	0.0005200	0.0007939	0.0011508	0.001602	0.002160	0.002837
39	0.00003301	0.00008632	0.0001787	0.0003209	0.0005240	0.0007991	0.0011575	0.001611	0.002171	0.002849
40	0.00003364	0.00008751	0.0001806	0.0003237	0.0005280	0.0008044	0.0011643	0.001619	0.002181	0.002862
41	0.00003427	0.00008871	0.0001825	0.0003266	0.0005319	0.0008096	0.0011711	0.001628	0.002191	0.002874
42	0.00003491	0.00008992	0.0001845	0.0003295	0.0005359	0.0008150	0.0011779	0.001636	0.002202	0.002887
43	0.00003556	0.00009114	0.0001865	0.0003324	0.0005400	0.0008203	0.0011847	0.001645	0.002212	0.002899
44	0.00003622	0.00009237	0.0001885	0.0003353	0.0005440	0.0008256	0.0011915	0.001653	0.002223	0.002912
45	0.00003689	0.00009362	0.0001905	0.0003383	0.0005481	0.0008310	0.0011984	0.001662	0.002233	0.002924
46	0.00003757	0.00009487	0.0001925	0.0003412	0.0005522	0.0008364	0.0012053	0.001670	0.002244	0.002937
47	0.00003825	0.00009614	0.0001945	0.0003442	0.0005563	0.0008418	0.0012122	0.001679	0.002254	0.002949
48	0.00003894	0.00009742	0.0001965	0.0003472	0.0005604	0.0008473	0.0012192	0.001688	0.002265	0.002962
49	0.00003964	0.00009870	0.0001986	0.0003502	0.0005645	0.0008527	0.0012262	0.001696	0.002275	0.002975
50	0.00004035	0.00010000	0.0002007	0.0003532	0.0005687	0.0008582	0.0012332	0.001705	0.002286	0.002987
51	0.00004107	0.00010132	0.0002028	0.0003563	0.0005729	0.0008638	0.0012402	0.001714	0.002297	0.003000
52	0.00004179	0.00010264	0.0002049	0.0003593	0.0005771	0.0008693	0.0012473	0.001723	0.002307	0.003013
53	0.00004252	0.00010397	0.0002070	0.0003624	0.0005813	0.0008749	0.0012544	0.001731	0.002318	0.003026
54	0.00004327	0.00010532	0.0002091	0.0003655	0.0005856	0.0008805	0.0012615	0.001740	0.002329	0.003039
55	0.00004402	0.00010668	0.0002113	0.0003686	0.0005898	0.0008861	0.0012687	0.001749	0.002340	0.003052
56	0.00004478	0.00010805	0.0002134	0.0003718	0.0005941	0.0008917	0.0012758	0.001758	0.002350	0.003065
57	0.00004554	0.00010943	0.0002156	0.0003749	0.0005985	0.0008974	0.0012830	0.001767	0.002361	0.003078
58	0.00004632	0.00011082	0.0002178	0.0003781	0.0006028	0.0009031	0.0012903	0.001776	0.002372	0.003091
59	0.00004711	0.00011223	0.0002200	0.0003813	0.0006071	0.0009088	0.0012975	0.001785	0.002383	0.003104
60	0.00004790	0.00011364	0.0002222	0.0003845	0.0006115	0.0009145	0.0013048	0.001794	0.002394	0.003117



渐开线函数表

$$\text{inv } \alpha = \tan \alpha - \alpha$$

分(°)	12°	13°	14°	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°
0	0.003117	0.003975	0.004982	0.006150	0.007493	0.009025	0.010760	0.012715	0.014904	0.017345
1	0.003130	0.003991	0.005000	0.006171	0.007517	0.009052	0.010791	0.012750	0.014943	0.017388
2	0.003143	0.004006	0.005018	0.006192	0.007541	0.009079	0.010822	0.012784	0.014982	0.017431
3	0.003157	0.004022	0.005036	0.006213	0.007565	0.009107	0.010853	0.012819	0.015020	0.017474
4	0.003170	0.004038	0.005055	0.006234	0.007589	0.009134	0.010884	0.012854	0.015059	0.017517
5	0.003183	0.004053	0.005073	0.006255	0.007613	0.009161	0.010915	0.012888	0.015098	0.017560
6	0.003197	0.004069	0.005091	0.006276	0.007637	0.009189	0.010946	0.012923	0.015137	0.017603
7	0.003210	0.004085	0.005110	0.006297	0.007661	0.009216	0.010977	0.012958	0.015176	0.017647
8	0.003223	0.004101	0.005128	0.006318	0.007686	0.009244	0.011008	0.012993	0.015215	0.017690
9	0.003237	0.004117	0.005146	0.006340	0.007710	0.009272	0.011039	0.013028	0.015254	0.017734
10	0.003250	0.004132	0.005165	0.006361	0.007735	0.009299	0.011071	0.013063	0.015293	0.017777
11	0.003264	0.004148	0.005184	0.006382	0.007759	0.009327	0.011102	0.013098	0.015333	0.017821
12	0.003277	0.004164	0.005202	0.006404	0.007784	0.009355	0.011133	0.013134	0.015372	0.017865
13	0.003291	0.004180	0.005221	0.006425	0.007808	0.009383	0.011165	0.013169	0.015411	0.017908
14	0.003305	0.004197	0.005239	0.006447	0.007833	0.009411	0.011196	0.013204	0.015451	0.017952
15	0.003318	0.004213	0.005258	0.006469	0.007857	0.009439	0.011228	0.013240	0.015490	0.017996
16	0.003332	0.004229	0.005277	0.006490	0.007882	0.009467	0.011260	0.013275	0.015530	0.018040
17	0.003346	0.004245	0.005296	0.006512	0.007907	0.009495	0.011291	0.013311	0.015570	0.018084
18	0.003360	0.004261	0.005315	0.006534	0.007932	0.009523	0.011323	0.013346	0.015609	0.018129
19	0.003374	0.004277	0.005334	0.006555	0.007957	0.009552	0.011355	0.013382	0.015649	0.018173
20	0.003387	0.004294	0.005353	0.006577	0.007982	0.009580	0.011387	0.013418	0.015689	0.018217
21	0.003401	0.004310	0.005372	0.006599	0.008007	0.009608	0.011419	0.013454	0.015729	0.018262
22	0.003415	0.004327	0.005391	0.006621	0.008032	0.009637	0.011451	0.013490	0.015769	0.018306
23	0.003429	0.004343	0.005410	0.006643	0.008057	0.009665	0.011483	0.013526	0.015809	0.018351
24	0.003443	0.004359	0.005429	0.006665	0.008082	0.009694	0.011515	0.013562	0.015849	0.018395
25	0.003458	0.004376	0.005448	0.006687	0.008107	0.009722	0.011547	0.013598	0.015890	0.018440
26	0.003472	0.004393	0.005467	0.006709	0.008133	0.009751	0.011580	0.013634	0.015930	0.018485
27	0.003486	0.004409	0.005487	0.006732	0.008158	0.009780	0.011612	0.013670	0.015971	0.018530
28	0.003500	0.004426	0.005506	0.006754	0.008183	0.009808	0.011644	0.013707	0.016011	0.018575
29	0.003514	0.004443	0.005525	0.006776	0.008209	0.009837	0.011677	0.013743	0.016052	0.018620
30	0.003529	0.004459	0.005545	0.006799	0.008234	0.009866	0.011709	0.013779	0.016092	0.018665
31	0.003543	0.004476	0.005564	0.006821	0.008260	0.009895	0.011742	0.013816	0.016133	0.018710
32	0.003557	0.004493	0.005584	0.006843	0.008285	0.009924	0.011775	0.013852	0.016174	0.018755
33	0.003572	0.004510	0.005603	0.006866	0.008311	0.009953	0.011807	0.013889	0.016214	0.018800
34	0.003586	0.004527	0.005623	0.006888	0.008337	0.009982	0.011840	0.013926	0.016255	0.018846
35	0.003600	0.004544	0.005643	0.006911	0.008362	0.010011	0.011873	0.013963	0.016296	0.018891
36	0.003615	0.004561	0.005662	0.006934	0.008388	0.010041	0.011906	0.013999	0.016337	0.018937
37	0.003630	0.004578	0.005682	0.006956	0.008414	0.010070	0.011939	0.014036	0.016379	0.018983
38	0.003644	0.004595	0.005702	0.006979	0.008440	0.010099	0.011972	0.014073	0.016420	0.019028
39	0.003659	0.004612	0.005722	0.007002	0.008466	0.010129	0.012005	0.014110	0.016461	0.019074
40	0.003673	0.004629	0.005742	0.007025	0.008492	0.010158	0.012038	0.014148	0.016502	0.019120
41	0.003688	0.004646	0.005762	0.007048	0.008518	0.010188	0.012071	0.014185	0.016544	0.019166
42	0.003703	0.004664	0.005782	0.007071	0.008544	0.010217	0.012105	0.014222	0.016585	0.019212
43	0.003718	0.004681	0.005802	0.007094	0.008571	0.010247	0.012138	0.014259	0.016627	0.019258
44	0.003733	0.004698	0.005822	0.007117	0.008597	0.010277	0.012172	0.014297	0.016669	0.019304
45	0.003747	0.004716	0.005842	0.007140	0.008623	0.010307	0.012205	0.014334	0.016710	0.019350
46	0.003762	0.004733	0.005862	0.007163	0.008650	0.010336	0.012239	0.014372	0.016752	0.019397
47	0.003777	0.004751	0.005882	0.007186	0.008676	0.010366	0.012272	0.014409	0.016794	0.019443
48	0.003792	0.004768	0.005903	0.007209	0.008702	0.010396	0.012306	0.014447	0.016836	0.019490
49	0.003807	0.004786	0.005923	0.007233	0.008729	0.010426	0.012340	0.014485	0.016878	0.019536
50	0.003822	0.004803	0.005943	0.007256	0.008756	0.010456	0.012373	0.014523	0.016920	0.019583
51	0.003838	0.004821	0.005964	0.007280	0.008782	0.010486	0.012407	0.014560	0.016962	0.019630
52	0.003853	0.004839	0.005984	0.007303	0.008809	0.010517	0.012441	0.014598	0.017004	0.019676
53	0.003868	0.004856	0.006005	0.007327	0.008836	0.010547	0.012475	0.014636	0.017047	0.019723
54	0.003883	0.004874	0.006025	0.007350	0.008863	0.010577	0.012509	0.014674	0.017089	0.019770
55	0.003898	0.004892	0.006046	0.007374	0.008889	0.010608	0.012543	0.014713	0.017132	0.019817
56	0.003914	0.004910	0.006067	0.007397	0.008916	0.010638	0.012578	0.014751	0.017174	0.019864
57	0.003929	0.004928	0.006087	0.007421	0.008943	0.010669	0.012612	0.014789	0.017217	0.019912
58	0.003944	0.004946	0.006108	0.007445	0.008970	0.010699	0.012646	0.014827	0.017259	0.019959
59	0.003960	0.004964	0.006129	0.007469	0.008998	0.010730	0.012681	0.014866	0.017302	0.020006
60	0.003975	0.004982	0.006150	0.007493	0.009025	0.010760	0.012715	0.014904	0.017345	0.020054



渐开线函数表

$$\text{inv } \alpha = \tan \alpha - \alpha$$

分(')	22°	23°	24°	25°	26°	27°	28°	29°	30°	31°
0	0.020054	0.023049	0.026350	0.029975	0.033947	0.038287	0.043017	0.048164	0.053751	0.059809
1	0.020101	0.023102	0.026407	0.030039	0.034016	0.038362	0.043100	0.048253	0.053849	0.059914
2	0.020149	0.023154	0.026465	0.030102	0.034086	0.038438	0.043182	0.048343	0.053946	0.060019
3	0.020197	0.023207	0.026523	0.030166	0.034155	0.038514	0.043264	0.048432	0.054043	0.060124
4	0.020244	0.023259	0.026581	0.030229	0.034225	0.038589	0.043347	0.048522	0.054140	0.060230
5	0.020292	0.023312	0.026639	0.030293	0.034294	0.038666	0.043430	0.048612	0.054238	0.060335
6	0.020340	0.023365	0.026697	0.030357	0.034364	0.038742	0.043513	0.048702	0.054336	0.060441
7	0.020388	0.023418	0.026756	0.030420	0.034434	0.038818	0.043596	0.048792	0.054433	0.060547
8	0.020436	0.023471	0.026814	0.030484	0.034504	0.038894	0.043679	0.048883	0.054531	0.060653
9	0.020484	0.023524	0.026872	0.030549	0.034574	0.038971	0.043762	0.048973	0.054629	0.060759
10	0.020533	0.023577	0.026931	0.030613	0.034644	0.039047	0.043845	0.049063	0.054728	0.060866
11	0.020581	0.023631	0.026989	0.030677	0.034714	0.039124	0.043929	0.049154	0.054826	0.060972
12	0.020629	0.023684	0.027048	0.030741	0.034785	0.039201	0.044012	0.049245	0.054924	0.061079
13	0.020678	0.023738	0.027107	0.030806	0.034855	0.039278	0.044096	0.049336	0.055023	0.061186
14	0.020726	0.023791	0.027166	0.030870	0.034926	0.039355	0.044180	0.049427	0.055122	0.061292
15	0.020775	0.023845	0.027225	0.030935	0.034996	0.039432	0.044264	0.049518	0.055221	0.061400
16	0.020824	0.023899	0.027284	0.031000	0.035067	0.039509	0.044348	0.049609	0.055320	0.061507
17	0.020873	0.023952	0.027343	0.031065	0.035138	0.039586	0.044432	0.049701	0.055419	0.061614
18	0.020921	0.024006	0.027402	0.031130	0.035209	0.039664	0.044516	0.049792	0.055518	0.061721
19	0.020970	0.024060	0.027462	0.031195	0.035280	0.039741	0.044601	0.049884	0.055617	0.061829
20	0.021019	0.024114	0.027521	0.031260	0.035352	0.039819	0.044685	0.049976	0.055717	0.061937
21	0.021069	0.024169	0.027581	0.031325	0.035423	0.039897	0.044770	0.050068	0.055817	0.062045
22	0.021118	0.024223	0.027640	0.031390	0.035494	0.039974	0.044855	0.050160	0.055916	0.062153
23	0.021167	0.024277	0.027700	0.031456	0.035566	0.040052	0.044939	0.050252	0.056016	0.062261
24	0.021217	0.024332	0.027760	0.031521	0.035637	0.040131	0.045024	0.050344	0.056116	0.062369
25	0.021266	0.024386	0.027820	0.031587	0.035709	0.040209	0.045110	0.050437	0.056217	0.062478
26	0.021316	0.024441	0.027880	0.031653	0.035781	0.040287	0.045195	0.050529	0.056317	0.062586
27	0.021365	0.024495	0.027940	0.031718	0.035853	0.040366	0.045280	0.050622	0.056417	0.062695
28	0.021415	0.024550	0.028000	0.031784	0.035925	0.040444	0.045366	0.050715	0.056518	0.062804
29	0.021465	0.024605	0.028060	0.031850	0.035997	0.040523	0.045451	0.050808	0.056619	0.062913
30	0.021514	0.024660	0.028121	0.031917	0.036069	0.040602	0.045537	0.050901	0.056720	0.063022
31	0.021564	0.024715	0.028181	0.031983	0.036142	0.040680	0.045623	0.050994	0.056821	0.063131
32	0.021614	0.024770	0.028242	0.032049	0.036214	0.040759	0.045709	0.051087	0.056922	0.063241
33	0.021665	0.024825	0.028302	0.032116	0.036287	0.040838	0.045795	0.051181	0.057023	0.063350
34	0.021715	0.024881	0.028363	0.032182	0.036359	0.040918	0.045881	0.051274	0.057124	0.063460
35	0.021765	0.024936	0.028424	0.032249	0.036432	0.040997	0.045967	0.051368	0.057226	0.063570
36	0.021815	0.024992	0.028485	0.032315	0.036505	0.041076	0.046054	0.051462	0.057328	0.063680
37	0.021866	0.025047	0.028546	0.032382	0.036578	0.041156	0.046140	0.051556	0.057429	0.063790
38	0.021916	0.025103	0.028607	0.032449	0.036651	0.041236	0.046227	0.051650	0.057531	0.063901
39	0.021967	0.025159	0.028668	0.032516	0.036724	0.041316	0.046313	0.051744	0.057633	0.064011
40	0.022018	0.025214	0.028729	0.032583	0.036798	0.041395	0.046400	0.051838	0.057736	0.064122
41	0.022068	0.025270	0.028791	0.032651	0.036871	0.041475	0.046487	0.051933	0.057838	0.064232
42	0.022119	0.025326	0.028852	0.032718	0.036945	0.041556	0.046575	0.052027	0.057940	0.064343
43	0.022170	0.025382	0.028914	0.032785	0.037018	0.041636	0.046662	0.052122	0.058043	0.064454
44	0.022221	0.025439	0.028976	0.032853	0.037092	0.041716	0.046749	0.052217	0.058146	0.064565
45	0.022272	0.025495	0.029037	0.032920	0.037166	0.041797	0.046837	0.052312	0.058249	0.064677
46	0.022324	0.025551	0.029099	0.032988	0.037240	0.041877	0.046924	0.052407	0.058352	0.064788
47	0.022375	0.025608	0.029161	0.033056	0.037314	0.041958	0.047012	0.052502	0.058455	0.064900
48	0.022426	0.025664	0.029223	0.033124	0.037388	0.042039	0.047100	0.052597	0.058558	0.065012
49	0.022478	0.025721	0.029285	0.033192	0.037462	0.042120	0.047188	0.052693	0.058662	0.065123
50	0.022529	0.025778	0.029348	0.033260	0.037537	0.042201	0.047276	0.052788	0.058765	0.065236
51	0.022581	0.025834	0.029410	0.033328	0.037611	0.042282	0.047364	0.052884	0.058869	0.065348
52	0.022632	0.025891	0.029472	0.033397	0.037686	0.042363	0.047452	0.052980	0.058973	0.065460
53	0.022684	0.025948	0.029535	0.033465	0.037761	0.042444	0.047541	0.053076	0.059077	0.065573
54	0.022736	0.026005	0.029598	0.033534	0.037835	0.042526	0.047630	0.053172	0.059181	0.065685
55	0.022788	0.026062	0.029660	0.033602	0.037910	0.042607	0.047718	0.053268	0.059285	0.065798
56	0.022840	0.026120	0.029723	0.033671	0.037985	0.042689	0.047807	0.053365	0.059390	0.065911
57	0.022892	0.026177	0.029786	0.033740	0.038060	0.042771	0.047896	0.053461	0.059494	0.066024
58	0.022944	0.026235	0.029849	0.033809	0.038136	0.042853	0.047985	0.053558	0.059599	0.066137
59	0.022997	0.026292	0.029912	0.033878	0.038211	0.042935	0.048074	0.053655	0.059704	0.066250
60	0.023049	0.026350	0.029975	0.033947	0.038287	0.043017	0.048164	0.053751	0.059809	0.066364



渐开线函数表

inv $\alpha = \tan \alpha - \alpha$

分(')	32°	33°	34°	35°	36°	37°	38°	39°	40°	41°
0	0.066364	0.073449	0.081097	0.089342	0.098224	0.107782	0.118061	0.129106	0.140968	0.15370
1	0.066478	0.073572	0.081229	0.089485	0.098378	0.107948	0.118238	0.129296	0.141173	0.15392
2	0.066591	0.073695	0.081362	0.089628	0.098531	0.108113	0.118416	0.129488	0.141378	0.15414
3	0.066705	0.073818	0.081494	0.089771	0.098685	0.108279	0.118594	0.129679	0.141583	0.15436
4	0.066819	0.073941	0.081627	0.089914	0.098840	0.108445	0.118772	0.129870	0.141789	0.15458
5	0.066934	0.074064	0.081760	0.090058	0.098994	0.108611	0.118951	0.130062	0.141995	0.15480
6	0.067048	0.074188	0.081894	0.090201	0.099149	0.108777	0.119130	0.130254	0.142201	0.15503
7	0.067163	0.074311	0.082027	0.090345	0.099303	0.108943	0.119309	0.130446	0.142408	0.15525
8	0.067277	0.074435	0.082161	0.090489	0.099458	0.109110	0.119488	0.130639	0.142614	0.15547
9	0.067392	0.074559	0.082294	0.090633	0.099614	0.109277	0.119667	0.130832	0.142821	0.15569
10	0.067507	0.074684	0.082428	0.090777	0.099769	0.109444	0.119847	0.131025	0.143028	0.15591
11	0.067622	0.074808	0.082562	0.090922	0.099924	0.109611	0.120027	0.131218	0.143236	0.15614
12	0.067738	0.074932	0.082697	0.091067	0.100080	0.109779	0.120207	0.131411	0.143443	0.15636
13	0.067853	0.075057	0.082831	0.091211	0.100236	0.109947	0.120387	0.131605	0.143651	0.15658
14	0.067969	0.075182	0.082966	0.091356	0.100392	0.110114	0.120567	0.131798	0.143859	0.15680
15	0.068084	0.075307	0.083100	0.091502	0.100548	0.110283	0.120748	0.131993	0.144067	0.15703
16	0.068200	0.075432	0.083235	0.091647	0.100705	0.110451	0.120929	0.132187	0.144276	0.15725
17	0.068316	0.075557	0.083371	0.091793	0.100862	0.110619	0.121110	0.132381	0.144485	0.15748
18	0.068432	0.075683	0.083506	0.091938	0.101019	0.110788	0.121291	0.132576	0.144694	0.15770
19	0.068549	0.075808	0.083641	0.092084	0.101176	0.110957	0.121473	0.132771	0.144903	0.15793
20	0.068665	0.075934	0.083777	0.092230	0.101333	0.111126	0.121655	0.132966	0.145113	0.15815
21	0.068782	0.076060	0.083913	0.092377	0.101490	0.111295	0.121837	0.133162	0.145323	0.15838
22	0.068899	0.076186	0.084049	0.092523	0.101648	0.111465	0.122019	0.133357	0.145533	0.15860
23	0.069016	0.076312	0.084185	0.092670	0.101806	0.111635	0.122201	0.133553	0.145743	0.15883
24	0.069133	0.076439	0.084321	0.092816	0.101964	0.111805	0.122384	0.133750	0.145954	0.15905
25	0.069250	0.076565	0.084457	0.092963	0.102122	0.111975	0.122567	0.133946	0.146165	0.15928
26	0.069367	0.076692	0.084594	0.093111	0.102280	0.112145	0.122750	0.134143	0.146376	0.15950
27	0.069485	0.076819	0.084731	0.093258	0.102439	0.112316	0.122933	0.134339	0.146587	0.15973
28	0.069602	0.076946	0.084868	0.093406	0.102598	0.112486	0.123116	0.134536	0.146798	0.15996
29	0.069720	0.077073	0.085005	0.093553	0.102757	0.112657	0.123300	0.134734	0.147010	0.16019
30	0.069838	0.077200	0.085142	0.093701	0.102916	0.112829	0.123484	0.134931	0.147222	0.16041
31	0.069956	0.077328	0.085280	0.093849	0.103075	0.113000	0.123668	0.135129	0.147435	0.16064
32	0.070075	0.077455	0.085418	0.093998	0.103235	0.113171	0.123853	0.135327	0.147647	0.16087
33	0.070193	0.077583	0.085555	0.094146	0.103395	0.113343	0.124037	0.135525	0.147860	0.16110
34	0.070312	0.077711	0.085693	0.094295	0.103555	0.113515	0.124222	0.135724	0.148073	0.16133
35	0.070430	0.077839	0.085832	0.094443	0.103715	0.113687	0.124407	0.135923	0.148286	0.16156
36	0.070549	0.077968	0.085970	0.094592	0.103875	0.113860	0.124592	0.136122	0.148500	0.16178
37	0.070668	0.078096	0.086108	0.094742	0.104036	0.114032	0.124778	0.136321	0.148714	0.16201
38	0.070788	0.078225	0.086247	0.094891	0.104196	0.114205	0.124964	0.136520	0.148928	0.16224
39	0.070907	0.078354	0.086386	0.095041	0.104357	0.114378	0.125150	0.136720	0.149142	0.16247
40	0.071026	0.078483	0.086525	0.095190	0.104518	0.114552	0.125336	0.136920	0.149357	0.16270
41	0.071146	0.078612	0.086664	0.095340	0.104680	0.114725	0.125522	0.137120	0.149572	0.16293
42	0.071266	0.078741	0.086804	0.095490	0.104841	0.114899	0.125709	0.137320	0.149787	0.16317
43	0.071386	0.078871	0.086943	0.095641	0.105003	0.115073	0.125895	0.137521	0.150002	0.16340
44	0.071506	0.079000	0.087083	0.095791	0.105165	0.115247	0.126083	0.137722	0.150218	0.16363
45	0.071626	0.079130	0.087223	0.095942	0.105327	0.115421	0.126270	0.137923	0.150433	0.16386
46	0.071747	0.079260	0.087363	0.096093	0.105489	0.115595	0.126457	0.138124	0.150650	0.16409
47	0.071867	0.079390	0.087503	0.096244	0.105652	0.115770	0.126645	0.138326	0.150866	0.16432
48	0.071988	0.079520	0.087644	0.096395	0.105814	0.115945	0.126833	0.138528	0.151083	0.16456
49	0.072109	0.079651	0.087784	0.096546	0.105977	0.116120	0.127021	0.138730	0.151299	0.16479
50	0.072230	0.079781	0.087925	0.096698	0.106140	0.116296	0.127209	0.138932	0.151516	0.16502
51	0.072351	0.079912	0.088066	0.096850	0.106304	0.116471	0.127398	0.139134	0.151734	0.16525
52	0.072473	0.080043	0.088207	0.097002	0.106467	0.116647	0.127587	0.139337	0.151951	0.16549
53	0.072594	0.080174	0.088348	0.097154	0.106631	0.116823	0.127776	0.139540	0.152169	0.16572
54	0.072716	0.080306	0.088490	0.097306	0.106795	0.116999	0.127965	0.139743	0.152388	0.16596
55	0.072838	0.080437	0.088631	0.097459	0.106959	0.117175	0.128155	0.139947	0.152606	0.16619
56	0.072959	0.080569	0.088773	0.097611	0.107123	0.117352	0.128344	0.140151	0.152825	0.16642
57	0.073082	0.080700	0.088915	0.097764	0.107288	0.117529	0.128534	0.140355	0.153043	0.16666
58	0.073204	0.080832	0.089057	0.097917	0.107452	0.117706	0.128725	0.140559	0.153263	0.16689
59	0.073326	0.080964	0.089200	0.098071	0.107617	0.117883	0.128915	0.140763	0.153482	0.16713
60	0.073449	0.081097	0.089342	0.098224	0.107782	0.118061	0.129106	0.140968	0.153702	0.16737



渐开线函数表

$$\text{inv } \alpha = \tan \alpha - \alpha$$

分(')	42°	43°	44°	45°	46°	47°	48°	49°	50°	51°
0	0.16737	0.18202	0.19774	0.21460	0.23268	0.25206	0.27285	0.29516	0.31909	0.34478
1	0.16760	0.18228	0.19802	0.21489	0.23299	0.25240	0.27321	0.29554	0.31950	0.34522
2	0.16784	0.18253	0.19829	0.21518	0.23330	0.25273	0.27357	0.29593	0.31992	0.34567
3	0.16807	0.18278	0.19856	0.21548	0.23362	0.25307	0.27393	0.29631	0.32033	0.34611
4	0.16831	0.18304	0.19883	0.21577	0.23393	0.25341	0.27429	0.29670	0.32075	0.34656
5	0.16855	0.18329	0.19910	0.21606	0.23424	0.25374	0.27465	0.29709	0.32116	0.34700
6	0.16879	0.18355	0.19938	0.21635	0.23456	0.25408	0.27501	0.29747	0.32158	0.34745
7	0.16902	0.18380	0.19965	0.21665	0.23487	0.25442	0.27538	0.29786	0.32199	0.34790
8	0.16926	0.18406	0.19992	0.21694	0.23519	0.25475	0.27574	0.29825	0.32241	0.34834
9	0.16950	0.18431	0.20020	0.21723	0.23550	0.25509	0.27610	0.29864	0.32283	0.34879
10	0.16974	0.18457	0.20047	0.21753	0.23582	0.25543	0.27646	0.29903	0.32324	0.34924
11	0.16998	0.18482	0.20075	0.21782	0.23613	0.25577	0.27683	0.29942	0.32366	0.34969
12	0.17022	0.18508	0.20102	0.21812	0.23645	0.25611	0.27719	0.29981	0.32408	0.35014
13	0.17045	0.18534	0.20130	0.21841	0.23676	0.25645	0.27755	0.30020	0.32450	0.35059
14	0.17069	0.18559	0.20157	0.21871	0.23708	0.25679	0.27792	0.30059	0.32492	0.35104
15	0.17093	0.18585	0.20185	0.21900	0.23740	0.25713	0.27828	0.30098	0.32534	0.35149
16	0.17117	0.18611	0.20212	0.21930	0.23772	0.25747	0.27865	0.30137	0.32576	0.35194
17	0.17142	0.18637	0.20240	0.21960	0.23803	0.25781	0.27902	0.30177	0.32618	0.35240
18	0.17166	0.18662	0.20268	0.21989	0.23835	0.25815	0.27938	0.30216	0.32661	0.35285
19	0.17190	0.18688	0.20296	0.22019	0.23867	0.25849	0.27975	0.30255	0.32703	0.35330
20	0.17214	0.18714	0.20323	0.22049	0.23899	0.25883	0.28012	0.30295	0.32745	0.35376
21	0.17238	0.18740	0.20351	0.22079	0.23931	0.25918	0.28048	0.30334	0.32787	0.35421
22	0.17262	0.18766	0.20379	0.22108	0.23963	0.25952	0.28085	0.30374	0.32830	0.35467
23	0.17286	0.18792	0.20407	0.22138	0.23995	0.25986	0.28122	0.30413	0.32872	0.35512
24	0.17311	0.18818	0.20435	0.22168	0.24027	0.26021	0.28159	0.30453	0.32915	0.35558
25	0.17335	0.18844	0.20463	0.22198	0.24059	0.26055	0.28196	0.30492	0.32957	0.35604
26	0.17359	0.18870	0.20490	0.22228	0.24091	0.26089	0.28233	0.30532	0.33000	0.35649
27	0.17383	0.18896	0.20518	0.22258	0.24123	0.26124	0.28270	0.30572	0.33042	0.35695
28	0.17408	0.18922	0.20546	0.22288	0.24156	0.26159	0.28307	0.30611	0.33085	0.35741
29	0.17432	0.18948	0.20575	0.22318	0.24188	0.26193	0.28344	0.30651	0.33128	0.35787
30	0.17457	0.18975	0.20603	0.22348	0.24220	0.26228	0.28381	0.30691	0.33171	0.35833
31	0.17481	0.19001	0.20631	0.22378	0.24253	0.26262	0.28418	0.30731	0.33213	0.35879
32	0.17506	0.19027	0.20659	0.22409	0.24285	0.26297	0.28455	0.30771	0.33256	0.35925
33	0.17530	0.19053	0.20687	0.22439	0.24317	0.26332	0.28493	0.30811	0.33299	0.35971
34	0.17555	0.19080	0.20715	0.22469	0.24350	0.26367	0.28530	0.30851	0.33342	0.36017
35	0.17579	0.19106	0.20743	0.22499	0.24382	0.26401	0.28567	0.30891	0.33385	0.36063
36	0.17604	0.19132	0.20772	0.22530	0.24415	0.26436	0.28605	0.30931	0.33428	0.36110
37	0.17628	0.19159	0.20800	0.22560	0.24447	0.26471	0.28642	0.30971	0.33471	0.36156
38	0.17653	0.19185	0.20828	0.22590	0.24480	0.26506	0.28680	0.31012	0.33515	0.36202
39	0.17678	0.19212	0.20857	0.22621	0.24512	0.26541	0.28717	0.31052	0.33558	0.36249
40	0.17702	0.19238	0.20885	0.22651	0.24545	0.26576	0.28755	0.31092	0.33601	0.36295
41	0.17727	0.19265	0.20914	0.22682	0.24578	0.26611	0.28792	0.31133	0.33645	0.36342
42	0.17752	0.19291	0.20942	0.22712	0.24611	0.26646	0.28830	0.31173	0.33688	0.36388
43	0.17777	0.19318	0.20971	0.22743	0.24643	0.26682	0.28868	0.31214	0.33731	0.36435
44	0.17801	0.19344	0.20999	0.22773	0.24676	0.26717	0.28906	0.31254	0.33775	0.36482
45	0.17826	0.19371	0.21028	0.22804	0.24709	0.26752	0.28943	0.31295	0.33818	0.36529
46	0.17851	0.19398	0.21056	0.22835	0.24742	0.26787	0.28981	0.31335	0.33862	0.36575
47	0.17876	0.19424	0.21085	0.22865	0.24775	0.26823	0.29019	0.31376	0.33906	0.36622
48	0.17901	0.19451	0.21114	0.22896	0.24808	0.26858	0.29057	0.31417	0.33949	0.36669
49	0.17926	0.19478	0.21142	0.22927	0.24841	0.26893	0.29095	0.31457	0.33993	0.36716
50	0.17951	0.19505	0.21171	0.22958	0.24874	0.26929	0.29133	0.31498	0.34037	0.36763
51	0.17976	0.19532	0.21200	0.22989	0.24907	0.26964	0.29171	0.31539	0.34081	0.36810
52	0.18001	0.19558	0.21229	0.23020	0.24940	0.27000	0.29209	0.31580	0.34125	0.36858
53	0.18026	0.19585	0.21257	0.23050	0.24973	0.27035	0.29247	0.31621	0.34169	0.36905
54	0.18051	0.19612	0.21286	0.23081	0.25006	0.27071	0.29286	0.31662	0.34213	0.36952
55	0.18076	0.19639	0.21315	0.23112	0.25040	0.27107	0.29324	0.31703	0.34257	0.36999
56	0.18101	0.19666	0.21344	0.23143	0.25073	0.27142	0.29362	0.31744	0.34301	0.37047
57	0.18127	0.19693	0.21373	0.23174	0.25106	0.27178	0.29400	0.31785	0.34345	0.37094
58	0.18152	0.19720	0.21402	0.23206	0.25140	0.27214	0.29439	0.31826	0.34389	0.37142
59	0.18177	0.19747	0.21431	0.23237	0.25173	0.27250	0.29477	0.31868	0.34434	0.37189
60	0.18202	0.19774	0.21460	0.23268	0.25206	0.27285	0.29516	0.31909	0.34478	0.37237



渐开线函数表

inv $\alpha = \tan \alpha - \alpha$

分(°)	52°	53°	54°	55°	56°	57°	58°	59°	60°	61°
0	0.37237	0.40202	0.43390	0.46822	0.50518	0.54503	0.58804	0.63454	0.68485	0.73940
1	0.37285	0.40253	0.43446	0.46881	0.50582	0.54572	0.58879	0.63534	0.68573	0.74034
2	0.37332	0.40305	0.43501	0.46940	0.50646	0.54641	0.58954	0.63615	0.68660	0.74129
3	0.37380	0.40356	0.43556	0.47000	0.50710	0.54710	0.59028	0.63696	0.68748	0.74224
4	0.37428	0.40407	0.43611	0.47060	0.50774	0.54779	0.59103	0.63777	0.68835	0.74319
5	0.37476	0.40459	0.43667	0.47119	0.50838	0.54849	0.59178	0.63858	0.68923	0.74415
6	0.37524	0.40511	0.43722	0.47179	0.50903	0.54918	0.59253	0.63939	0.69011	0.74510
7	0.37572	0.40562	0.43778	0.47239	0.50967	0.54988	0.59328	0.64020	0.69099	0.74606
8	0.37620	0.40614	0.43833	0.47299	0.51032	0.55057	0.59403	0.64102	0.69187	0.74701
9	0.37668	0.40666	0.43889	0.47359	0.51096	0.55127	0.59479	0.64183	0.69275	0.74797
10	0.37716	0.40717	0.43945	0.47419	0.51161	0.55197	0.59554	0.64265	0.69364	0.74893
11	0.37765	0.40769	0.44001	0.47479	0.51226	0.55267	0.59630	0.64346	0.69452	0.74989
12	0.37813	0.40821	0.44057	0.47539	0.51291	0.55337	0.59705	0.64428	0.69541	0.75085
13	0.37861	0.40873	0.44113	0.47599	0.51356	0.55407	0.59781	0.64510	0.69630	0.75181
14	0.37910	0.40925	0.44169	0.47660	0.51421	0.55477	0.59857	0.64592	0.69719	0.75278
15	0.37958	0.40977	0.44225	0.47720	0.51486	0.55547	0.59933	0.64674	0.69808	0.75375
16	0.38007	0.41030	0.44281	0.47780	0.51551	0.55618	0.60009	0.64756	0.69897	0.75471
17	0.38055	0.41082	0.44337	0.47841	0.51616	0.55688	0.60085	0.64839	0.69986	0.75568
18	0.38104	0.41134	0.44393	0.47902	0.51682	0.55759	0.60161	0.64921	0.70075	0.75665
19	0.38153	0.41187	0.44450	0.47962	0.51747	0.55829	0.60237	0.65004	0.70165	0.75762
20	0.38202	0.41239	0.44506	0.48023	0.51813	0.55900	0.60314	0.65086	0.70254	0.75859
21	0.38251	0.41292	0.44563	0.48084	0.51878	0.55971	0.60390	0.65169	0.70344	0.75957
22	0.38299	0.41344	0.44619	0.48145	0.51944	0.56042	0.60467	0.65252	0.70434	0.76054
23	0.38348	0.41397	0.44676	0.48206	0.52010	0.56113	0.60544	0.65335	0.70524	0.76152
24	0.38397	0.41450	0.44733	0.48267	0.52076	0.56184	0.60620	0.65418	0.70614	0.76250
25	0.38446	0.41502	0.44789	0.48328	0.52141	0.56255	0.60697	0.65501	0.70704	0.76348
26	0.38496	0.41555	0.44846	0.48389	0.52207	0.56326	0.60774	0.65585	0.70794	0.76446
27	0.38545	0.41608	0.44903	0.48451	0.52274	0.56398	0.60851	0.65668	0.70885	0.76544
28	0.38594	0.41661	0.44960	0.48512	0.52340	0.56469	0.60929	0.65752	0.70975	0.76642
29	0.38643	0.41714	0.45017	0.48574	0.52406	0.56540	0.61006	0.65835	0.71066	0.76741
30	0.38693	0.41767	0.45074	0.48635	0.52472	0.56612	0.61083	0.65919	0.71157	0.76839
31	0.38742	0.41820	0.45132	0.48697	0.52539	0.56684	0.61161	0.66003	0.71248	0.76938
32	0.38792	0.41874	0.45189	0.48758	0.52605	0.56756	0.61239	0.66087	0.71339	0.77037
33	0.38841	0.41927	0.45246	0.48820	0.52672	0.56828	0.61316	0.66171	0.71430	0.77136
34	0.38891	0.41980	0.45304	0.48882	0.52739	0.56900	0.61394	0.66255	0.71521	0.77235
35	0.38941	0.42034	0.45361	0.48944	0.52805	0.56972	0.61472	0.66340	0.71613	0.77334
36	0.38990	0.42087	0.45419	0.49006	0.52872	0.57044	0.61550	0.66424	0.71704	0.77434
37	0.39040	0.42141	0.45476	0.49068	0.52939	0.57116	0.61628	0.66509	0.71796	0.77533
38	0.39090	0.42194	0.45534	0.49130	0.53006	0.57188	0.61706	0.66593	0.71888	0.77633
39	0.39140	0.42248	0.45592	0.49192	0.53073	0.57261	0.61785	0.66678	0.71980	0.77733
40	0.39190	0.42302	0.45650	0.49255	0.53141	0.57333	0.61863	0.66763	0.72072	0.77833
41	0.39240	0.42355	0.45708	0.49317	0.53208	0.57406	0.61942	0.66848	0.72164	0.77933
42	0.39290	0.42409	0.45766	0.49380	0.53275	0.57479	0.62020	0.66933	0.72256	0.78033
43	0.39340	0.42463	0.45824	0.49442	0.53343	0.57552	0.62099	0.67019	0.72349	0.78134
44	0.39390	0.42517	0.45882	0.49505	0.53410	0.57625	0.62178	0.67104	0.72441	0.78234
45	0.39441	0.42571	0.45940	0.49568	0.53478	0.57698	0.62257	0.67189	0.72534	0.78335
46	0.39491	0.42625	0.45998	0.49630	0.53546	0.57771	0.62336	0.67275	0.72627	0.78436
47	0.39541	0.42680	0.46057	0.49693	0.53613	0.57844	0.62415	0.67361	0.72720	0.78537
48	0.39592	0.42734	0.46115	0.49756	0.53681	0.57917	0.62494	0.67447	0.72813	0.78638
49	0.39642	0.42788	0.46173	0.49819	0.53749	0.57991	0.62574	0.67532	0.72906	0.78739
50	0.39693	0.42843	0.46232	0.49882	0.53817	0.58064	0.62653	0.67618	0.72999	0.78841
51	0.39743	0.42897	0.46291	0.49945	0.53885	0.58138	0.62733	0.67705	0.73093	0.78942
52	0.39794	0.42952	0.46349	0.50009	0.53954	0.58211	0.62812	0.67791	0.73186	0.79044
53	0.39845	0.43006	0.46408	0.50072	0.54022	0.58285	0.62892	0.67877	0.73280	0.79146
54	0.39896	0.43061	0.46467	0.50135	0.54090	0.58359	0.62972	0.67964	0.73374	0.79247
55	0.39947	0.43116	0.46526	0.50199	0.54159	0.58433	0.63052	0.68050	0.73468	0.79350
56	0.39998	0.43171	0.46585	0.50263	0.54228	0.58507	0.63132	0.68137	0.73562	0.79452
57	0.40049	0.43225	0.46644	0.50326	0.54296	0.58581	0.63212	0.68224	0.73656	0.79554
58	0.40100	0.43280	0.46703	0.50390	0.54365	0.58656	0.63293	0.68311	0.73751	0.79657
59	0.40151	0.43335	0.46762	0.50454	0.54434	0.58730	0.63373	0.68398	0.73845	0.79759
60	0.40202	0.43390	0.46822	0.50518	0.54503	0.58804	0.63454	0.68485	0.73940	0.79862



渐开线函数表

inv $\alpha = \tan \alpha - \alpha$

分(')	62°	63°	64°	65°	66°	67°	68°	69°	70°	71°
0	0.79862	0.86305	0.93329	1.01004	1.09412	1.18648	1.28826	1.40081	1.52575	1.66503
1	0.79965	0.86417	0.93452	1.01138	1.09559	1.18810	1.29005	1.40279	1.52794	1.66748
2	0.80068	0.86530	0.93574	1.01272	1.09706	1.18972	1.29183	1.40477	1.53015	1.66994
3	0.80172	0.86642	0.93697	1.01407	1.09853	1.19134	1.29362	1.40675	1.53235	1.67241
4	0.80275	0.86755	0.93820	1.01541	1.10001	1.19296	1.29541	1.40874	1.53456	1.67488
5	0.80378	0.86868	0.93943	1.01676	1.10149	1.19459	1.29721	1.41073	1.53678	1.67735
6	0.80482	0.86980	0.94066	1.01811	1.10297	1.19622	1.29901	1.41272	1.53899	1.67983
7	0.80586	0.87094	0.94190	1.01946	1.10445	1.19785	1.30081	1.41472	1.54122	1.68232
8	0.80690	0.87207	0.94313	1.02081	1.10593	1.19948	1.30262	1.41672	1.54344	1.68480
9	0.80794	0.87320	0.94437	1.02217	1.10742	1.20112	1.30442	1.41872	1.54567	1.68730
10	0.80898	0.87434	0.94561	1.02352	1.10891	1.20276	1.30623	1.42073	1.54791	1.68980
11	0.81003	0.87548	0.94685	1.02488	1.11040	1.20440	1.30805	1.42274	1.55014	1.69230
12	0.81107	0.87662	0.94810	1.02624	1.11190	1.20604	1.30986	1.42475	1.55239	1.69481
13	0.81212	0.87776	0.94934	1.02761	1.11339	1.20769	1.31168	1.42677	1.55463	1.69732
14	0.81317	0.87890	0.95059	1.02897	1.11489	1.20934	1.31351	1.42879	1.55688	1.69984
15	0.81422	0.88004	0.95184	1.03034	1.11639	1.21100	1.31533	1.43081	1.55914	1.70236
16	0.81527	0.88119	0.95309	1.03171	1.11790	1.21265	1.31716	1.43284	1.56140	1.70488
17	0.81632	0.88234	0.95434	1.03308	1.11940	1.21431	1.31899	1.43487	1.56366	1.70742
18	0.81738	0.88349	0.95560	1.03446	1.12091	1.21597	1.32083	1.43691	1.56593	1.70995
19	0.81844	0.88464	0.95686	1.03583	1.12242	1.21763	1.32267	1.43895	1.56820	1.71249
20	0.81949	0.88579	0.95812	1.03721	1.12393	1.21930	1.32451	1.44099	1.57047	1.71504
21	0.82055	0.88694	0.95938	1.03859	1.12545	1.22097	1.32635	1.44304	1.57275	1.71759
22	0.82161	0.88810	0.96064	1.03997	1.12697	1.22264	1.32820	1.44509	1.57503	1.72015
23	0.82267	0.88926	0.96190	1.04136	1.12849	1.22432	1.33005	1.44714	1.57732	1.72271
24	0.82374	0.89042	0.96317	1.04274	1.13001	1.22599	1.33191	1.44920	1.57961	1.72527
25	0.82480	0.89158	0.96444	1.04413	1.13154	1.22767	1.33376	1.45126	1.58191	1.72785
26	0.82587	0.89274	0.96571	1.04552	1.13306	1.22936	1.33562	1.45332	1.58421	1.73042
27	0.82694	0.89390	0.96698	1.04692	1.13459	1.23104	1.33749	1.45539	1.58652	1.73300
28	0.82801	0.89507	0.96825	1.04831	1.13613	1.23273	1.33935	1.45746	1.58882	1.73559
29	0.82908	0.89624	0.96953	1.04971	1.13766	1.23442	1.34122	1.45954	1.59114	1.73818
30	0.83015	0.89741	0.97081	1.05111	1.13920	1.23612	1.34310	1.46162	1.59346	1.74077
31	0.83123	0.89858	0.97209	1.05251	1.14074	1.23781	1.34497	1.46370	1.59578	1.74338
32	0.83230	0.89975	0.97337	1.05391	1.14228	1.23951	1.34685	1.46579	1.59810	1.74598
33	0.83338	0.90092	0.97465	1.05532	1.14383	1.24122	1.34874	1.46788	1.60043	1.74859
34	0.83446	0.90210	0.97594	1.05673	1.14537	1.24292	1.35062	1.46997	1.60277	1.75121
35	0.83554	0.90328	0.97722	1.05814	1.14692	1.24463	1.35251	1.47207	1.60511	1.75383
36	0.83662	0.90446	0.97851	1.05955	1.14847	1.24634	1.35440	1.47417	1.60745	1.75646
37	0.83770	0.90564	0.97980	1.06097	1.15003	1.24805	1.35630	1.47627	1.60980	1.75909
38	0.83879	0.90682	0.98110	1.06238	1.15159	1.24977	1.35820	1.47838	1.61215	1.76172
39	0.83987	0.90801	0.98239	1.06380	1.15315	1.25149	1.36010	1.48050	1.61451	1.76436
40	0.84096	0.90919	0.98369	1.06522	1.15471	1.25321	1.36201	1.48261	1.61687	1.76701
41	0.84205	0.91038	0.98499	1.06665	1.15627	1.25494	1.36391	1.48473	1.61923	1.76966
42	0.84314	0.91157	0.98629	1.06807	1.15784	1.25666	1.36583	1.48686	1.62160	1.77232
43	0.84424	0.91276	0.98759	1.06950	1.15941	1.25839	1.36774	1.48898	1.62398	1.77498
44	0.84533	0.91396	0.98890	1.07093	1.16098	1.26013	1.36966	1.49112	1.62636	1.77765
45	0.84643	0.91515	0.99020	1.07236	1.16256	1.26187	1.37158	1.49325	1.62874	1.78032
46	0.84752	0.91635	0.99151	1.07380	1.16413	1.26360	1.37351	1.49539	1.63113	1.78300
47	0.84862	0.91755	0.99282	1.07524	1.16571	1.26535	1.37544	1.49753	1.63352	1.78568
48	0.84972	0.91875	0.99413	1.07667	1.16729	1.26709	1.37737	1.49968	1.63592	1.78837
49	0.85082	0.91995	0.99545	1.07812	1.16888	1.26884	1.37930	1.50183	1.63832	1.79106
50	0.85193	0.92115	0.99677	1.07956	1.17047	1.27059	1.38124	1.50399	1.64072	1.79376
51	0.85303	0.92236	0.99808	1.08100	1.17206	1.27235	1.38318	1.50614	1.64313	1.79647
52	0.85414	0.92357	0.99941	1.08245	1.17365	1.27410	1.38513	1.50831	1.64555	1.79918
53	0.85525	0.92478	1.00073	1.08390	1.17524	1.27586	1.38708	1.51047	1.64797	1.80189
54	0.85636	0.92599	1.00205	1.08536	1.17684	1.27762	1.38903	1.51264	1.65039	1.80461
55	0.85747	0.92720	1.00338	1.08681	1.17844	1.27936	1.39098	1.51482	1.65282	1.80734
56	0.85858	0.92842	1.00471	1.08827	1.18004	1.28116	1.39294	1.51700	1.65525	1.81007
57	0.85970	0.92963	1.00604	1.08973	1.18165	1.28293	1.39490	1.51918	1.65769	1.81280
58	0.86082	0.93085	1.00737	1.09119	1.18326	1.28470	1.39687	1.52136	1.66013	1.81555
59	0.86193	0.93207	1.00871	1.09265	1.18487	1.28648	1.39884	1.52355	1.66258	1.81829
60	0.86305	0.93329	1.01004	1.09412	1.18648	1.28826	1.40081	1.52575	1.66503	1.82105



渐开线函数表

inv $\alpha = \tan \alpha - \alpha$

分(°)	72°	73°	74°	75°	76°	77°	78°	79°	80°	81°
0	1.82105	1.99676	2.19587	2.42305	2.68433	2.98757	3.34327	3.76574	4.27502	4.90003
1	1.82380	1.99988	2.19941	2.42711	2.68902	2.99304	3.34972	3.77345	4.28439	4.91165
2	1.82657	2.00300	2.20296	2.43118	2.69371	2.99852	3.35619	3.78119	4.29379	4.92331
3	1.82934	2.00613	2.20652	2.43525	2.69842	3.00401	3.36267	3.78895	4.30323	4.93502
4	1.83211	2.00926	2.21008	2.43934	2.70314	3.00952	3.36918	3.79673	4.31270	4.94677
5	1.83489	2.01240	2.21366	2.44343	2.70787	3.01504	3.37570	3.80454	4.32220	4.95856
6	1.83768	2.01555	2.21724	2.44753	2.71262	3.02058	3.38224	3.81237	4.33173	4.97040
7	1.84047	2.01871	2.22083	2.45165	2.71737	3.02613	3.38880	3.82023	4.34130	4.98229
8	1.84326	2.02187	2.22442	2.45577	2.72214	3.03170	3.39538	3.82811	4.35090	4.99422
9	1.84607	2.02504	2.22803	2.45990	2.72692	3.03728	3.40197	3.83601	4.36053	5.00620
10	1.84888	2.02821	2.23164	2.46405	2.73171	3.04288	3.40859	3.84395	4.37020	5.01822
11	1.85169	2.03139	2.23526	2.46820	2.73651	3.04849	3.41523	3.85190	4.37990	5.03029
12	1.85451	2.03458	2.23889	2.47236	2.74133	3.05412	3.42188	3.85988	4.38963	5.04240
13	1.85733	2.03777	2.24253	2.47653	2.74616	3.05977	3.42856	3.86789	4.39940	5.05456
14	1.86016	2.04097	2.24617	2.48071	2.75100	3.06542	3.43525	3.87592	4.40920	5.06677
15	1.86300	2.04418	2.24983	2.48491	2.75585	3.07110	3.44197	3.88398	4.41903	5.07902
16	1.86584	2.04740	2.25349	2.48911	2.76071	3.07679	3.44870	3.89206	4.42890	5.09133
17	1.86869	2.05062	2.25716	2.49332	2.76559	3.08249	3.45545	3.90017	4.43880	5.10368
18	1.87154	2.05385	2.26083	2.49754	2.77048	3.08821	3.46222	3.90830	4.44874	5.11608
19	1.87440	2.05708	2.26452	2.50177	2.77538	3.09395	3.46902	3.91646	4.45871	5.12852
20	1.87726	2.06032	2.26821	2.50601	2.78029	3.09970	3.47583	3.92465	4.46872	5.14102
21	1.88014	2.06357	2.27192	2.51027	2.78522	3.10546	3.48266	3.93286	4.47877	5.15356
22	1.88301	2.06683	2.27563	2.51453	2.79016	3.11125	3.48952	3.94110	4.48885	5.16616
23	1.88589	2.07009	2.27935	2.51880	2.79511	3.11704	3.49639	3.94937	4.49896	5.17880
24	1.88878	2.07336	2.28307	2.52308	2.80007	3.12286	3.50328	3.95766	4.50911	5.19149
25	1.89167	2.07664	2.28681	2.52737	2.80505	3.12869	3.51020	3.96598	4.51930	5.20424
26	1.89457	2.07992	2.29055	2.53168	2.81004	3.13453	3.51713	3.97433	4.52952	5.21703
27	1.89748	2.08321	2.29430	2.53599	2.81504	3.14040	3.52408	3.98270	4.53978	5.22987
28	1.90039	2.08651	2.29807	2.54031	2.82006	3.14627	3.53106	3.99110	4.55007	5.24277
29	1.90331	2.08981	2.30184	2.54465	2.82508	3.15217	3.53806	3.99953	4.56041	5.25572
30	1.90623	2.09313	2.30561	2.54899	2.83012	3.15808	3.54507	4.00798	4.57077	5.26871
31	1.90916	2.09645	2.30940	2.55334	2.83518	3.16401	3.55211	4.01646	4.58118	5.28176
32	1.91210	2.09977	2.31319	2.55771	2.84024	3.16995	3.55917	4.02497	4.59162	5.29486
33	1.91504	2.10310	2.31700	2.56208	2.84532	3.17591	3.56625	4.03351	4.60210	5.30802
34	1.91798	2.10644	2.32081	2.56647	2.85041	3.18188	3.57335	4.04207	4.61262	5.32122
35	1.92094	2.10979	2.32463	2.57087	2.85552	3.18788	3.58047	4.05067	4.62318	5.33448
36	1.92389	2.11315	2.32846	2.57527	2.86064	3.19389	3.58762	4.05929	4.63377	5.34780
37	1.92686	2.11651	2.33230	2.57969	2.86577	3.19991	3.59478	4.06794	4.64441	5.36117
38	1.92983	2.11988	2.33615	2.58412	2.87092	3.20595	3.60197	4.07662	4.65508	5.37459
39	1.93281	2.12325	2.34000	2.58856	2.87607	3.21201	3.60918	4.08532	4.66579	5.38806
40	1.93579	2.12664	2.34387	2.59301	2.88125	3.21809	3.61641	4.09406	4.67654	5.40159
41	1.93878	2.13003	2.34774	2.59747	2.88643	3.22418	3.62366	4.10282	4.68733	5.41518
42	1.94178	2.13343	2.35162	2.60194	2.89163	3.23029	3.63094	4.11162	4.69816	5.42882
43	1.94478	2.13683	2.35551	2.60642	2.89684	3.23642	3.63823	4.12044	4.70902	5.44251
44	1.94779	2.14024	2.35941	2.61092	2.90207	3.24257	3.64555	4.12929	4.71993	5.45626
45	1.95080	2.14366	2.36332	2.61542	2.90731	3.24873	3.65289	4.13817	4.73088	5.47007
46	1.95382	2.14709	2.36724	2.61994	2.91256	3.25491	3.66026	4.14708	4.74186	5.48394
47	1.95685	2.15053	2.37117	2.62446	2.91783	3.26110	3.66764	4.15602	4.75289	5.49786
48	1.95988	2.15397	2.37511	2.62900	2.92311	3.26732	3.67505	4.16499	4.76396	5.51184
49	1.96292	2.15742	2.37905	2.63355	2.92840	3.27355	3.68248	4.17399	4.77507	5.52588
50	1.96596	2.16088	2.38300	2.63811	2.93371	3.27980	3.68993	4.18302	4.78622	5.53997
51	1.96901	2.16434	2.38697	2.64268	2.93903	3.28606	3.69741	4.19208	4.79741	5.55413
52	1.97207	2.16781	2.39094	2.64726	2.94437	3.29235	3.70491	4.20118	4.80865	5.56834
53	1.97514	2.17130	2.39492	2.65186	2.94972	3.29865	3.71243	4.21030	4.81992	5.58261
54	1.97821	2.17478	2.39891	2.65646	2.95509	3.30497	3.71998	4.21945	4.83124	5.59694
55	1.98128	2.17828	2.40291	2.66108	2.96046	3.31131	3.72755	4.22863	4.84260	5.61133
56	1.98437	2.18178	2.40692	2.66571	2.96586	3.31767	3.73514	4.23785	4.85400	5.62578
57	1.98746	2.18529	2.41094	2.67034	2.97126	3.32404	3.74275	4.24709	4.86544	5.64030
58	1.99055	2.18881	2.41497	2.67500	2.97669	3.33043	3.75039	4.25637	4.87693	5.65487
59	1.99365	2.19234	2.41901	2.67966	2.98212	3.33684	3.75806	4.26568	4.88846	5.66950
60	1.99676	2.19587	2.42305	2.68433	2.98757	3.34327	3.76574	4.27502	4.90003	5.68420



齿轮技术资料索引

A

安全系数 569, 578, 590
凹齿面 603, 604, 605

B

半径方向侧隙 552, 554
被动齿轮 503, 553, 603
变位量 508, 514
变位系数 508
变位正齿轮 512
标准正齿轮 510
标准直齿锥齿轮 527
泊桑比 576, 597

C

材质系数 600
测绘 616
侧隙 552
插齿机 507
齿槽半角 544, 546, 547, 548, 550, 551
尺寸系数 569, 577, 582, 587, 590
齿顶倒角 509
齿顶高 505, 528, 568, 583, 585
齿顶厚 508
齿顶圆 506
齿顶圆直径 506
齿顶圆锥母线 525
齿端修薄 509, 558
齿高 505
齿根 505
齿根高 505
齿根角 526, 527, 529
齿厚 537
齿厚半角 537, 538, 539, 541
齿厚变动系数 538, 583
齿角 539
齿接触系数 595
齿距 505
齿距累积偏差 557, 559, 621
齿宽 533, 543, 567, 583, 589, 593
齿轮 499
齿轮副 532
齿轮间干涉 517
齿轮系 503, 554, 619

齿面强度计算公式 574, 589
齿面损伤 578, 613, 614
齿数 510, 511
齿数比 524, 592, 601
齿条 499, 514
齿条形刀具 507
齿线 518, 524, 525, 528, 535, 587
齿线(螺旋线)修整 562
齿线方向的修整 509
齿向载荷分布系数 577, 587, 590
齿线总偏差 558, 623
齿形 505
齿形系数 567, 583, 599
齿形修薄 509, 558
齿形修整 509, 615
齿形总偏差 557, 622
重合度系数 567, 576, 586, 589
传动比 618
传动效率 606
次摆线干涉 516
coniflex 525
粗糙度系数 577, 590, 595

D
大齿轮 524, 528, 554
大端 562
大端锥距 583, 588, 591, 601
单齿距偏差 557, 559, 620, 626
当量齿轮齿数 531, 538, 541, 567, 583
当量负载 593
当量切向力 593
氮化 565, 566, 569, 572, 581
单级齿轮机构 503
单面铣刀切削法 528
导程 518, 532, 616
导程角 532, 533
刀具直径影响系数 587
等径锥齿轮 524
垫片调整 555
点蚀 578, 595, 614
顶隙 505, 512, 525, 528
顶锥角 526, 527, 529, 559
滴下式 609
动载系数 569, 578, 587, 590
短齿 505, 528, 599, 616
端面齿厚 541
端面齿距 518, 522
端面重合度 507, 569
端面模数 518, 521
端面啮合压力角 519



端面压力角	519, 521	弧齿锥齿轮	500, 528, 604
钝角锥齿轮	524		
惰轮	504, 576, 618		
E			
二级齿轮机构	504, 554	渐开曲线干涉	516, 517, 619
		渐开线齿轮	505
		渐开线齿形	505, 507, 509, 517, 550
		渐开线函数	648, 660
		渐开线函数表	512, 661
		渐开线函数角	506
法线方向侧隙	552	渐开线曲线	506, 518
法向变位系数	531, 534	减速比	610, 617
法向齿厚	538, 541, 542	减速齿轮	503
法向齿距	518	交叉接触	563
法向模数	518, 522, 530, 532, 534, 545	交错轴	499, 552, 606
法向压力角	518	交错轴斜齿齿轮	500, 530, 552, 607
飞溅润滑法	609	基本负载容量	593
封闭行星齿轮机构	619	接触疲劳极限	578, 590
分度圆	510, 514, 518	节点	599, 601, 602
分度圆齿距	505	节面	518
分度圆直径	510	节线高度	514
分度圆锥角	524	节圆直径	512, 515, 519
分度圆螺旋角	518, 531	节圆柱	530, 532
分锥角	526, 527, 529	径节	506
基圆齿距	535	径向力	603
负变位	508	径向跳动	558, 559
		径向跳动偏差	626
		径向跳动容许偏差	625
G			
高齿	505, 616	基圆	506, 507
高频淬火	566, 571, 579, 653	基圆齿距	507, 616
格里森弧齿锥齿轮	528	基圆直径	506
格里森直齿锥齿轮	525	基圆柱	542
根切	508, 513, 525	基准齿条	505
根切界限齿数	508	均匀配置	617
根切界限点	508		
公法线长度	542, 656	K	
公法线长度法	542	可靠性系数	587
公用切线	507	跨齿数	542, 655
工作硬化系数	577, 590		
滚床	535	L	
滚刀	532, 534	两齿面总啮合偏差	558, 624
过载系数	569, 578, 587, 590	量柱(球)法	537, 543
鼓形加工	509, 534	量柱(球)跨距	544, 545, 546, 550
鼓形蜗杆副	500	零度锥齿轮	500, 529
H			
赫兹面压	601	轮齿接触	562
喉圆半径	533, 534	轮齿接触测试仪	562
滑动速度	592, 595	螺旋方向	518, 529, 530, 604
滑动速度极限	602	螺旋角	518, 528
滑动速度系数	594	螺旋角系数	569, 576, 587, 590
		螺旋线	499, 518, 532



M			
面齿轮	500	润滑油系数	577, 590, 594
名义切向力	583, 589, 592	润滑脂润滑法	608
摩擦系数	536, 592, 608		
模数	505		
N		S	
耐化学腐蚀性	598	三量柱法	543, 549
内侧跨距	546	3型	532, 549
内齿轮	499, 503, 515, 542, 546, 567	少齿数差行星齿轮机构	619
粘度	610	渗碳淬火	566, 571, 580, 653
啮合节径	512, 515, 519	时间系数	595
啮合节圆	569	使用状况系数	600
啮合线长度	507	寿命系数	569, 576, 587, 590
啮合压力角	515, 519, 569	双导程蜗杆副	556
P		双面切削法	528
配对齿轮	505, 525	速度系数	599, 600
喷射式	609		
喷雾式	609	T	
偏心	500	太阳齿轮	617
偏心误差	562, 563	太阳型	618
平行顶隙	525	弹性模量	576
平行轴齿轮	553, 603	弹性系数	576, 589
Q		凸齿面	604, 605
强制润滑法	609	推力	499, 603
期待寿命	593, 595		
起动系数	595	W	
切向变位系数	521, 523	外齿轮	515, 574
切向力	603	外径加工	509
全齿高齿	505, 527	弯曲强度计算公式	567, 583
驱动齿轮	503, 536, 553, 603	弯曲弹性系数	601
区域系数	575, 589, 593	温度系数	599, 600
R		蜗杆	500, 532, 541, 549, 552, 556
人字齿轮	500	蜗杆副	563, 592, 602
日本齿轮工业会标准	567	蜗杆蜗轮	503, 532, 611
容许齿根弯曲应力	569, 587	蜗轮	500, 503, 532, 541, 552, 564
容许切向力	567, 574, 583, 589, 593, 599	无润滑运转	597
容许蜗轮转矩	593		
容许应力系数	595	X	
软氮化	572, 581	弦齿高	537, 538, 539, 541
人口间隙	534, 563	弦齿厚	537, 540, 541
润滑方法系数	595	小齿轮	513, 528, 554, 563, 573
润滑速度系数	577, 590	小齿轮铣刀	507, 516
润滑系数	600	小端齿顶圆直径	526, 527, 529
润滑油	610	效率	499, 562, 592, 606



吸水性	598	自润性	597
修薄	562	自锁	536
修根	509	纵向重合度	613, 615
修缘	509	最大滑动速度	595
旋转方向	503, 604, 618	最大容许面压力	601
旋转角侧隙	552, 553, 554	左齿面	556
旋转速度系数	594	左旋	529, 603
		作用线	507

Y

压力角	505, 506, 507
右齿面	556
有效长度(啮合长度)	557
有效齿宽	574
右旋	529, 564, 607
圆周方向侧隙	552, 554
圆周速度	567, 569, 574, 578, 583, 587
圆柱齿轮	499, 518, 530, 557, 620
圆柱蜗杆副	500

Z

噪音	615
减速齿轮	503
展成	507
正变位	508
正齿轮	499
正火	579
正交轴	527
直齿锥齿轮	500, 525, 527
直径系数	533
中点分度圆	559
中间齿轮	577
中心距	511, 512, 553, 554, 555, 560
中心距变动系数	512, 515, 519, 521, 531
中心距离误差	564
中央靠近小端接触	562
轴交角	524, 532
轴角误差	563
轴向齿距	535, 536
轴向力	603
轴向模数	533, 536, 550, 592
装配距离	552, 553, 555
装配距离误差	563
装配位置误差	564
转矩	567, 574, 583, 592, 593, 603
转数	503, 567, 574, 583, 589
锥齿轮	500, 503, 524, 538, 552, 555
锥形节圆面	524
准双曲面齿轮	500

