

齿轮公差及其选用

丁志华 王嘉玲 编著



国防工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍渐开线圆柱齿轮与齿轮副误差的特征和相关性,并在误差分析的基础上,叙述了齿轮与齿轮副公差的项目、定义和选用原则。为了正确选用齿轮公差项目和公差值,对机械工业部最新颁布的JB179-83《渐开线圆柱齿轮精度标准》与原颁布的JB179-60《圆柱齿轮传动公差》标准作了比较分析。书后为选用齿轮公差附录了必要的资料。

全书共分四章:第一章渐开线圆柱齿轮基本知识,第二章齿轮误差、第三章渐开线圆柱齿轮公差及其选用,第四章齿轮副侧隙。

本书可供从事机械设计与制造的工程技术人员及大专院校师生参考。

齿轮公差及其选用

丁志华 王嘉玲 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 6¹/₂ 170千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷 印数: 0,001—8,000册

统一书号: 15034·3197 定价: 1.50元

前 言

齿轮是机械传动装置中的重要零件，它不仅广泛应用于金属切削机床、汽车、拖拉机、飞机、船舶、矿山冶金机械和轻工机械，而且应用于精密仪器、雷达和航天装置等。据统计，我国仅在机械制造业中每年生产的各种齿轮就有数千万只之多，随着我国工农业生产和科学技术的蓬勃发展，每年需要生产齿轮的数量越来越多，对齿轮质量的要求越来越高。在这种情况下，加强齿轮精度的理论研究，掌握齿轮误差规律，熟悉我国最新制订的齿轮精度标准，合理选用齿轮公差等就是我国机械工业的一项重要任务。《齿轮公差及其选用》一书正是为适应现代机械工业生产齿轮的需要而撰写的。

我国是发明和应用齿轮最早的国家，在西汉时期已经使用铸铜齿轮，而西欧当时还只是处于木制针轮时代。此后，由于我国长期的封建统治，象其他工业一样，齿轮制造业没有得到较好的发展。全国解放后，齿轮制造业有了很大的进展，许多省市都有了专门的齿轮加工厂，不少地方成立了有关齿轮的研究所或研究室，他们针对齿轮的啮合理论，加工工艺、误差测量及切齿设备进行了大量的研制工作，作出了显著的成绩。

近三十年来，由于新技术、新工艺、新设备、新材料的不断出现，以及修正齿轮的广泛应用，使齿轮的应用范围更加扩大。目前，齿轮传动功率最高可达 $6 \times 10^4 \text{ kW}$ ，齿轮的圆周速度最高可达 300 m/s ，齿轮的传动角度误差不超过 $2'' \sim 6''$ ，齿轮模数可用到 $0.05 \sim 75 \text{ mm}$ ，齿轮直径从 1 mm 到 10 m 以上，齿轮的压力角有 14.5° 、 18° 、 20° 、 25° 、 28° 和 30° 等，在国外，精密机械已用到 3 级精度的齿轮，汽车拖拉机用的齿轮也提高到 5 级精度，要求线速度 25 m/s ，使用寿命不低于 $2 \times 10^5 \text{ km}$ 。

近年来,我国为适应现代工业的发展,制定的有关齿轮标准有:

GB1356-78《渐开线圆柱齿轮基准齿形》;

GB1357-78《渐开线圆柱齿轮模数》;

GB2821-81《齿轮几何要素代号》;

GB3374-82《齿轮基本名词术语》;

GB3480-83《渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法》;

GB3481-83《齿轮轮齿损伤术语》;

JB179-83《渐开线圆柱齿轮精度》。

其中《渐开线圆柱齿轮精度》标准是参考国际标准ISO1328-1975《平行轴渐开线齿轮 ISO 精度制》,结合我国实际情况而制定的。该标准的实施,对改善齿轮传动性能,提高齿轮使用寿命,都有重要意义,故在本书中作了详尽地介绍,以供学习参考。

本书共分四章,第一章介绍掌握齿轮公差所必备的基本知识;第二章介绍齿轮误差规律,它是选择齿轮公差项目所必要的基本知识;第三章和第四章是本书的主要内容。为了便于学习齿轮误差特性,书中还简略叙述了各项误差的技术测量,书后附录了JB179-83 标准的各项齿轮公差数值表,以供设计选用。

本书由丁志华主编。第二、三章由丁志华编写,第一、四章由王嘉玲编写。

本书由太原工业大学齿轮研究所主任朱景梓教授、山西省科协王克工程师担任审稿,在编写过程中,还得到机械工业部郑州机械研究所许洪基高级工程师的大力帮助,在此再表谢意。

由于编者水平所限,书中若有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 渐开线圆柱齿轮基本知识	1
一、齿轮传动基本原理	1
二、齿轮几何要素代号	9
附录A: 《齿轮几何要素代号》(GB2821-81)	9
附录B: 齿轮几何要素代号的组合示例	13
三、齿轮基本名词术语	15
四、标准直齿圆柱齿轮主要参数及尺寸计算	29
五、渐开线圆柱齿轮模数	30
六、齿轮基准齿形	36
第二章 齿轮误差	39
一、齿轮误差分类	39
二、齿轮误差的工艺分析	45
三、齿轮误差的综合分析	55
第三章 渐开线圆柱齿轮公差及其选用	60
一、齿轮误差及公差代号	62
二、齿轮与齿轮副误差的术语、定义	65
三、齿轮精度等级及其选用	113
四、齿轮公差项目的选用	128
五、齿坯公差及其选用	136
六、齿轮图样标注	140
第四章 齿轮副的侧隙	143
一、基本概念	144
二、侧隙种类	146
三、齿轮副侧隙的设计计算	147
附录一 JB179-83 标准公差数值表	189
附录二 几个国家的齿轮精度等级对照表	201
主要参考资料	202

第一章 渐开线圆柱齿轮基本知识

齿轮是应用最广泛的传动零件,它不仅用于一般机械制造业,而且用于航天设备和尖端技术装置上。齿轮传动所以能得到普遍地应用,主要是齿轮传动具有以下优点:

- (1) 能保证固定的瞬时传动比,使传动平稳,传递运动准确可靠;
- (2) 传递功率和圆周速度的能力大;
- (3) 传递效率高,使用寿命长;
- (4) 传动结构紧凑,而且可实现大的降速,单级传动比可达 50~300。

近年来,在齿轮的啮合理论、精度理论、强度理论以及材料与工艺学等领域都取得了一系列的研究成果,为齿轮传动设计与制造提供了新的科学依据,使齿轮更扩大了使用范围。

一、齿轮传动基本原理

1. 渐开线齿形曲线的基本特性

一对齿轮在啮合过程中,要求其传动比恒定,即要求齿轮在传动过程中保持瞬时角速比固定不变。通过理论分析可知,传动比的变化规律在很大程度上取决于轮齿的齿形曲线。由于渐开线齿形不仅能保持传动过程中的瞬时传动比恒定,又有易于制造,便于安装和互换性好等优点,所以目前常用的机械设备和装置中的齿轮绝大多数为渐开线齿轮。下面分别讨论渐开线的形成及其性质。

如图 1-1 所示,当一直线沿一圆周上作无滑动的滚动时,此直线上任一点的轨迹为该圆的渐开线。如直线 $x-x$ 上 K 点的轨迹 AK 即为该圆的渐开线。半径为 r_b 的圆称为渐开线的基圆,而

该直线 $x-x$ 称为渐开线的发生线。

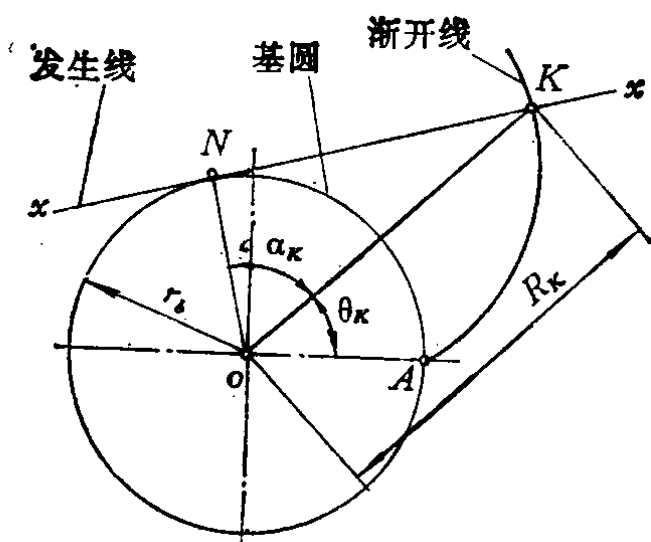


图1-1 渐开线

从渐开线的形成原理可知，它具有以下特性：

(1) 发生线在基圆上滚过的线段长度等于基圆上被滚过的弧长，即 $\overline{KN} = \widehat{AN}$ ；

(2) 发生线是切于基圆的切线，也是渐开线上对应 K 点的法线，因此，渐开线上各点的法线都与基圆相切；

(3) 当发生线 $x-x$ 在基圆上作纯滚动时，接触点(切点) N 是瞬时转动中心， $\overline{NK}$ 即为渐开线在 K 点的法线，所以 $\overline{NK}$ 的长度即为渐开线在 K 点的曲率半径，渐开线越接近基圆的部分，其曲率半径越小；

(4) 渐开线的形状完全取决于基圆的大小，基圆越大，渐开线在其对应点的曲率半径也越大(如图 1-2 所示)，当基圆半径趋于无穷大时，渐开线转化成直线，即为齿条的齿廓形状；

(5) 在同一基圆上各条同向的渐开线形状完全相同，而且同向的诸渐开线彼此等距，即法向距离不变，都等于两渐开线起始的基圆弧长，即 $x_0x_1 = x'_0x'_1 = N_0N_1$ (见图 1-3)；

(6) 在基圆以内不存在渐开线。

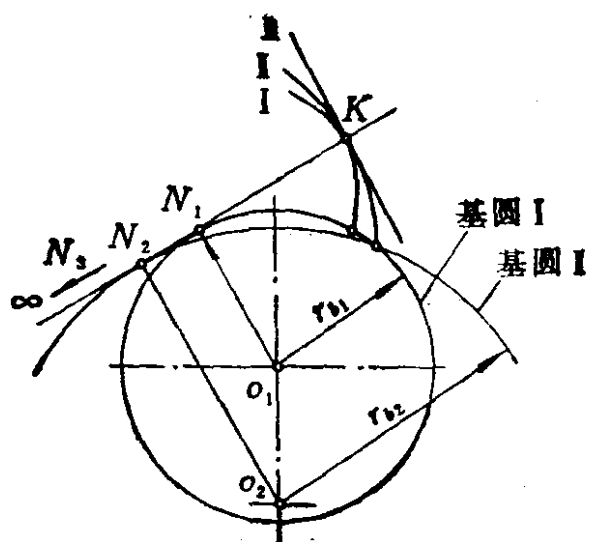


图1-2 渐开线的曲率半径

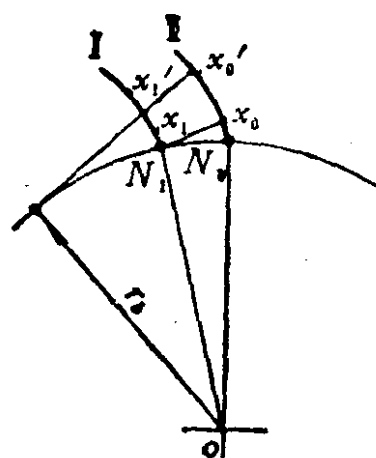


图1-3 等距渐开线

2. 渐开线齿形的啮合

一对渐开线齿形正常啮合时（见图 1-4），应具备下列条件：

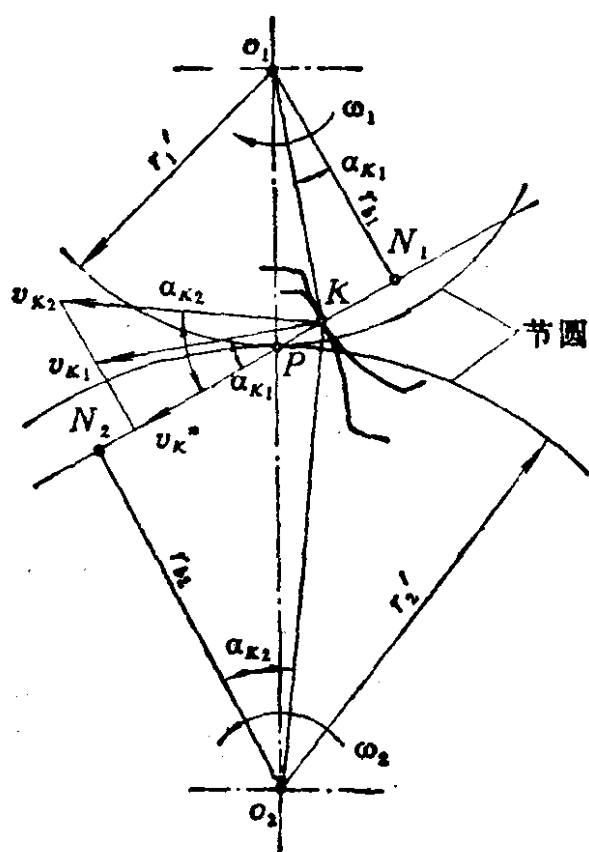


图1-4 渐开线齿形的啮合

(1) 瞬时啮合速度相等

设一对渐开线齿轮的两个轮齿在某瞬时啮合于 K 点, 若不考虑齿面变形, 则齿形曲线在 K 点接触时必须相切。过切点 K 可作出两齿形的公法线 N_1N_2 。两轮齿的瞬时啮合点的轨迹, 必在 N_1N_2 啮合线上。

设两齿轮的角速度分别为 ω_1 和 ω_2 , 则两齿轮齿形上 K 点的圆周速度为

$$\begin{aligned}v_{K1} &= \omega_1 \cdot \overline{O_1K} \\v_{K2} &= \omega_2 \cdot \overline{O_2K}\end{aligned}$$

为保证两齿形在公法线方向不存在相对速度, 即保证两齿形在啮合过程始终保持接触, 不发生脱离或撞击, 破坏连续地啮合, 则必须使两齿轮齿形上啮合点的速度在公法线 N_1N_2 方向的分量 v_{K1}'' , v_{K2}'' 相等, 即

$$v_{K1}'' = v_{K2}'' = v_K''$$

因为 $v_{K1}'' = v_{K1} \cos \alpha_{K1} = \omega_1 \cdot \overline{O_1K} \cos \alpha_{K1} = \omega_1 \cdot \overline{O_1N_1}$

$$v_{K2}'' = v_{K2} \cos \alpha_{K2} = \omega_2 \cdot \overline{O_2K} \cos \alpha_{K2} = \omega_2 \cdot \overline{O_2N_2}$$

所以 $\omega_1 \cdot \overline{O_1N_1} = \omega_2 \cdot \overline{O_2N_2}$

设 $r_{b1} = \overline{O_1N_1}$ (齿轮1的基圆半径)

$$r_{b2} = \overline{O_2N_2} \text{ (齿轮2的基圆半径)}$$

代入上式可得传动比 i 为

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{b2}}{r_{b1}}$$

上式说明:

① 若要保持两齿形处于连续啮合状态, 则应保证瞬时啮合速度相等;

② 若要保持瞬时啮合速比 i 不变, 则应保证两齿轮基圆半径的比值 i 为常数, 因为啮合速比 i 等于两齿轮的基圆半径之比;

③ 啮合速比 i 仅决定于两齿轮基圆半径的比值, 而与两轮中心距离无关, 即中心距的变化, 不影响啮合速比的变化;

④ 若要在齿轮传动过程中的任意瞬时角速度比值为常数,

则要求在任何啮合位置的齿形的公法线始终通过两轮连心线上的固定点 P 。该 P 点称为节点。

由图 1-4 可知 $\triangle o_1 N_1 P \sim \triangle o_2 N_2 P$

所以

$$\frac{\overline{o_2 N_2}}{\overline{o_1 N_1}} = \frac{\overline{o_2 P}}{\overline{o_1 P}}$$

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{o_2 P}}{\overline{o_1 P}}$$

由式可知，节点 P 的位置决定瞬时传动比数值的大小，如果瞬时传动比不变，则节点 P 必然是一固定点。

由渐开线的性质可知，渐开线上任一点的法线必切于基圆，所以过渐开线齿形啮合点的公法线必为两基圆的内公切线。这条内公切线 $N_1 N_2$ 即是渐开线齿轮传动的理论啮合线， N_1 和 N_2 点就是理论啮合线的极限点。啮合线与两齿轮连心线 $o_1 o_2$ 的交点为节点 P ，由于 $N_1 N_2$ 与 $o_1 o_2$ 的位置一定，所以节点 P 固定不变，因此渐开线齿形能保持两齿轮的瞬时传动比固定不变。

由于渐开线齿轮的传动比等于两轮基圆半径的反比，所以基圆大小被确定后，传动比也被固定，而与两轮中心距的变化无关。这是渐开线齿轮传动所具有的一个特性（摆线齿轮的中心距变更时，其传动比将不等于常数）。这个可分性给制造和安装渐开线齿轮带来了方便，因为制造和安装齿轮均会产生中心距误差，另外，由于径向作用力和长期使用引起轴承磨损等原因，都会造成一对传动齿轮的实际中心距与设计中心距不相等。

（2）啮合基节相等

一对齿轮的相邻齿同时啮合时（如图 1-5 所示），即相邻两对齿形同时在 A 、 B 两点啮合，则两对相邻齿同侧齿形之间的法向距离必须相等。由前述渐开线的性质可知，在啮合线上相邻两渐开线间的法向距离是齿轮的基节，因此保证正确啮合的必要条件是两轮的基节相等（或者模数与压力角分别相等）。这可保证

两对齿形同时进行啮合，也能保证一对齿形脱开，下一对齿形正常连续地啮合。

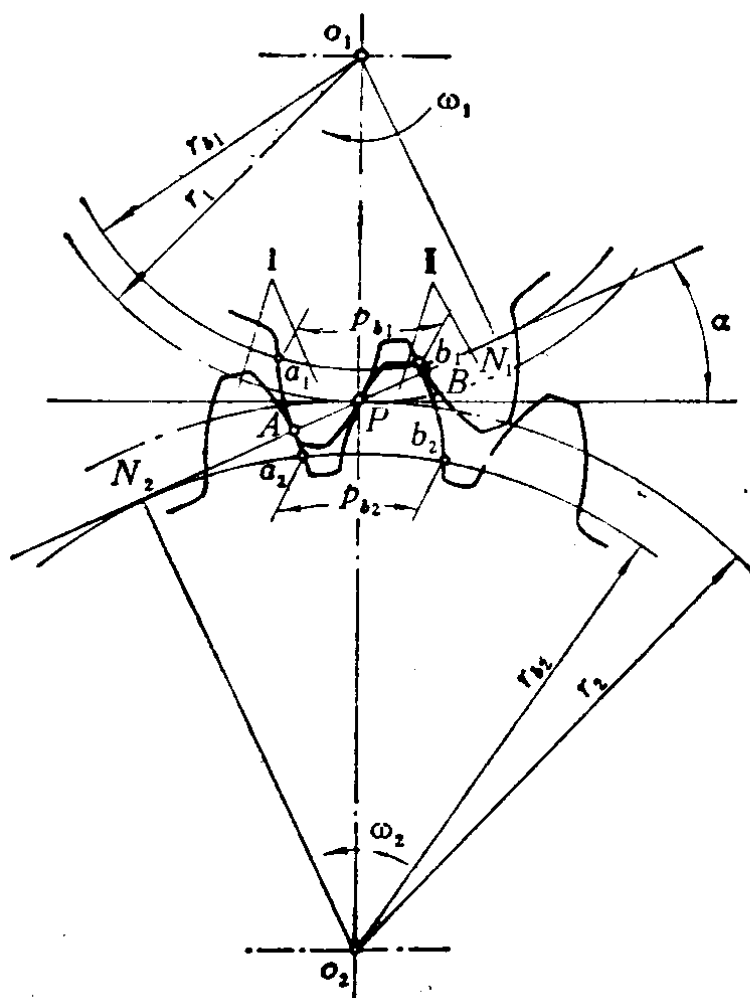


图1-5 两渐开线齿轮正确啮合条件

因为

$$p_{b1} = p_{b2}$$

$$p_{b1} = \pi m_1 \cos \alpha_1 \quad (\text{齿轮 1 的基节})$$

$$p_{b2} = \pi m_2 \cos \alpha_2 \quad (\text{齿轮 2 的基节})$$

所以

$$m_1 \cos \alpha_1 = m_2 \cos \alpha_2$$

由于齿轮分度圆上的模数和压力角均已标准化，因此要满足上式条件，通常就规定互相啮合的两个齿轮的模数和压力角分别相等，即保证两个齿轮正确啮合的条件为

$$m_1 = m_2 = m$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

3. 渐开线面的啮合

如图 1-6 所示，直齿圆柱齿轮的齿形曲面是平面 N 沿基圆柱

作无滑动的滚动，在切平面 N 上任一平行于基圆柱素线的直线 $x-x$ 所形成的轨迹曲面，该曲面称为渐开线面，所以直齿圆柱齿轮的啮合是指渐开线面的啮合。

在平行轴齿轮传动中，渐开线面的啮合性质与渐开线的啮合类似，区别只是以啮合平面代替啮合线，以接触线代替接触点。

在直齿轮啮合过程中，由于接触线平行于齿轮轴线，所以轮齿是沿着全齿宽同时进入啮合或同时脱离啮合的。若齿轮有加工误差（如基节偏差、周节偏差，齿形误差），则会产生振动和噪声，为了解决这个问题，一般是减少制造误差，提高齿轮精度，或是以渐开线螺旋面的斜齿轮代替渐开线面的直齿轮。

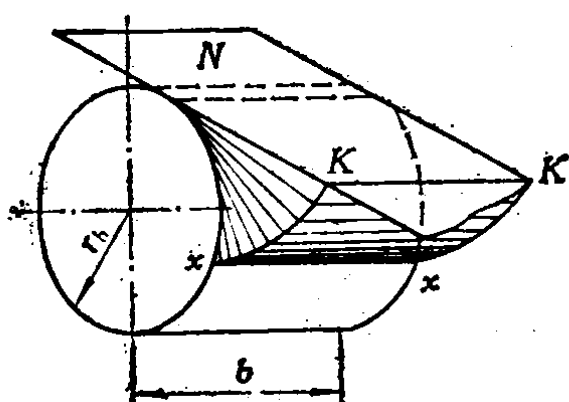


图1-6 渐开线面

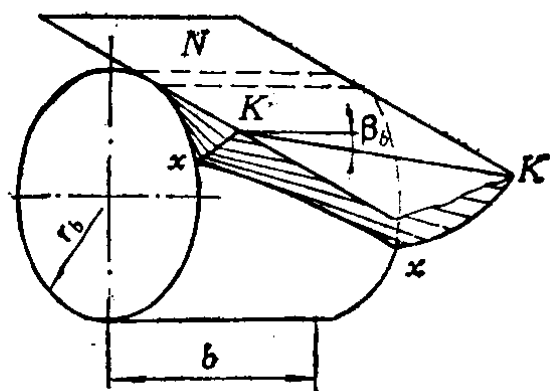


图1-7 渐开线螺旋面

4. 渐开线螺旋面的啮合

斜齿圆柱齿轮齿形曲面的形成原理与直齿圆柱齿轮的相同（如图1-7所示），其齿形曲面是由平面 N 与基圆柱素线相交成 β_d 角的直线 $x-x$ ，在平面 N 沿基圆柱作无滑动滚动时所形成的轨迹，这个轨迹曲面称为渐开线螺旋面。

从斜齿圆柱齿轮的渐开线螺旋面的形成原理可知，其端面（垂直于轴线的截面）齿形同直齿圆柱齿轮一样，都是渐开线齿形。由于这些渐开线都是由同一基圆柱上展成的，所以它们的形状都是一样的，只是起始点不同而已。

在齿轮的啮合过程中，直齿圆柱齿轮传动的接触线平行于齿轮轴线，且是在啮合面内的直线；而斜齿圆柱齿轮传动的接触线

是与轮轴交错，且位于两基圆柱的内公切面上的直线 $K-K$ ，如图 1-8 所示。接触线的长度随啮合位置不同而变化，开始接触时，其接触线长度由小变大，继而由大变小，直至脱离啮合。由于斜齿轮的齿向倾斜，轮齿一端退出啮合时，另一端还在啮合，直至轮齿另一端退出啮合为止，所以斜齿轮啮合的总重合度大大增加，可达到 2 或 2 以上，从而大大提高了齿轮传动的平稳性和轮齿的承载能力。其缺点是在传动时将产生附加轴向力，而且随着螺旋角 β 的增大而增加。

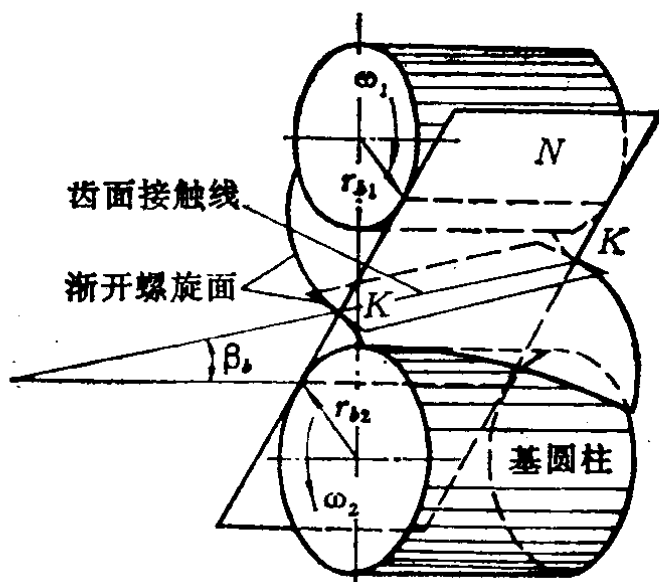


图1-8 斜齿圆柱齿轮传动的接触线

渐开线螺旋面的正常啮合条件与渐开线的一致。在法面上的啮合条件即为法面上的基节相等，或法面模数 m_n 与法面压力角 α_n 分别相等，即为

$$P_{bn1} = P_{bn2}$$

或

$$m_{n1} = m_{n2}, \quad \alpha_{n1} = \alpha_{n2}$$

除此之外，对外啮合的斜齿轮，还必须保证螺旋角 β 相等 ($\beta_1 = \beta_2 = \beta$)，且方向相反（一齿轮为左旋，另一齿轮应为右旋）；对内啮合的斜齿轮，必须保证螺旋角 β 相等，且方向相同（两轮同为左旋，或同为右旋）。

二、齿轮几何要素代号

齿轮是一个多要素零件。在过去,由于全国没有统一规定齿轮几何要素代号,故在生产中,标注齿轮几何要素代号较为混乱,其中有五十年代采用的苏联标准的标注代号,也有六十年代采用的我国汉语拼音的角标代号,还有工厂采用的厂标代号等。为了有利于发展生产和交流技术,全国很有必要制定国家标准,统一齿轮几何要素代号。国标 GB2821-81《齿轮几何要素代号》是参考国际标准 ISO701-1976 制定的。几何代号制订的原则有两条:

(1) 使我国的齿轮几何要素代号与国际标准的代号一致,以便于国际间技术交流;

(2) 为了齿轮几何要素代号的标准化和考虑到有关“齿轮”标准化的其他标注法,避免齿轮代号的混乱,又为今后选用其他术语的代号留有备用字母(如为编制齿轮精度标注法留有一定数量的字母),所以国标规定采用字母的组合。

代号采用大写、小写、斜体和正体罗马字母、希腊字母,以及正体的阿拉伯数字和其他标记。

齿轮几何要素代号包括主代号、复合代号和角标等部分。现将新标注代号及齿轮几何要素代号的组合示例录后供参考(圆括弧中的代号为旧标注的齿轮几何要素代号)。

附录A:《齿轮几何要素代号》(GB2821-81)

1. 主代号(它由单一基本字母组成)

1.1 小写罗马字母(斜体)

<i>a</i>	中心距,标准中心距 (A, A_0)
<i>b</i>	齿宽 (b, B)
<i>c</i>	顶隙 (c)
<i>d</i>	直径,分度圆直径 ($d_a, d_f, d_{\#}$)
<i>e</i>	槽宽、分度圆槽宽、偏心距 (W)
<i>h</i>	齿高,全齿高 (h)

i	传动比 (i)
j	侧隙 (c)
k	跨越齿数, 跨越槽数 (用于内齿轮) (n)
m	模数 (m)
n	转数 (n)
p	齿距, 分度圆齿距 (t)
q	蜗杆的直径系数 (q)
r	半径, 分度圆半径 (r_o, r_f)
s	齿厚, 分度圆齿厚 (s, s_o, s_f)
u	齿数比 (μ)
v	线速度, 分度圆上的线速度 (v)
x	径向变位系数 (ξ)
y	中心距变动系数 (λ, a)
z	齿数 (z)

1.2 大写罗马字母 (斜体)

M	量柱或量球的测量距
P	径节 (D_p)
R	锥距, 外锥距 (L)
W	公法线长度 (L)

1.3 小写希腊字母 (斜体)

α	压力角, 齿形角, 分度圆压力角 ($\alpha_o, \alpha_f, \alpha_d$)
β	螺旋角, 分度圆螺旋角 (β)
γ	导程角 (λ)
δ	锥角, 分锥角 ($\phi, \psi, \delta, \phi_f$)
ε	重合度 (e)
η	槽宽半角
θ	与齿高有关的角度
ρ	曲率半径
τ	齿距角, 冠轮上的齿距角
φ	作用角

ψ 齿厚半角

ω 角速度 (ω)

1.4 大写希腊字母 (斜体)

Σ 轴交角

2. 复合主代号 (它由一基本字母和右上, 或右下角标号组成。右下角标号也按顺序排列)。

d' 节圆直径 (d, d_{π})

d_a 齿顶圆直径 ($D_e, D', D_a, D_{\text{顶}}$)

d_b 基圆直径 ($d_0, d_j, d_{\text{基}}$)

d_f 齿根圆直径 ($D_i, D'', D_g, D_{\text{根}}$)

h' 工作高度 ($h, h_g, h_{\text{工}}$)

h_a 齿顶高 ($h_e, h', h_d, h_{\text{顶}}$)

h_a^* 齿顶高系数 (f_0, f', f_d)

$\bar{h}_a$ 弦齿高 ($h_{ox}, h_x, h_{fx}, h_{\text{分弦}}$)

h_{a0} 刀具齿顶高

h_{a0}^* 刀具齿顶高系数 (f_{0m}, f_{0s})

$\bar{h}_c$ 固定弦齿高 ($h_x, h_x', h_{xG}, h_{\text{弦}}$)

h_f 齿根高 ($h_i, h'', h_g, h_{\text{根}}$)

h_0 刀具齿高

$\text{inv} \alpha$ α 角的渐开线函数 ($\text{inv} \alpha$)

j_n 齿轮副的法向侧隙 (c_n)

j_r 齿轮副的径向侧隙

j_t 齿轮副的圆周侧隙

P_z 导程 (T)

R_i 内锥距 (L_i)

R_m 中点锥距 (L_m)

r_a 齿顶圆半径 ($R_e, R', R_d, R_{\text{顶}}$)

r_b 基圆半径 ($r, R_0, R_j, r_{\text{基}}$)

r_f 齿根圆半径 ($R_i, R'', R_g, R_{\text{根}}$)

$\bar{s}$ 弦齿厚, 分度圆弦齿厚 ($s_x, s_{fx}, s_{\text{分弦}}$)

$\bar{s}_c$	固定弦齿厚 ($s'_x, s'_{xm}, s_x, s_{xk}$)
x_t	切向变位系数 (τ, ξ_t)
z_n	当量齿数 (z_d, z', z'_d)
z_0	刀具齿数
δ'	节锥角 (ϕ, ψ)
δ_a	顶锥角 ($\phi_e, \phi_d, \phi_{\text{顶}}$)
δ_f	根锥角 ($\phi_i, \phi_g, \phi_{\text{根}}$)
ε_a	端面重合度 (ε_f)
ε_β	纵向重合度 (ε_a)
ε_r	总重合度 (ε_t)
θ_a	齿顶角 ($\gamma_e, \gamma', \theta$)
θ_f	齿根角 ($\gamma_i, \gamma'', \gamma$)
φ_a	端面作用角
φ_β	纵向作用角
φ_γ	总作用角

3. 角标 (除特殊注明者外均标注在主代号的右下角)

3.1 小写罗马字母 (正体)

a	齿顶的, 齿顶高的
b	基圆的, 基圆柱的
c	常值的, 固定弦的
e	外部的, 大端的
f	齿根的, 齿根高的
i	内部的, 小端的
k	跨齿数的, 跨槽数的
m	中点的, 平均的
max	最大的 (max)
min	最小的 (min)
n	法向的, 法面上的 (n)
r	半径的, 径向的 (r)
s	齿厚的 (s)