

直齿圆锥齿轮

国防工业出版社

421

内 容 简 介

本书是国营渭阳柴油机厂的工人、技术人员和干部,总结了该厂数年来生产直齿圆锥齿轮的实践经验,并搜集了国内加工直齿圆锥齿轮的方法及有关资料编写的。

本书内容包括中模数直齿圆锥齿轮传动的基本知识与几何计算;直齿圆锥齿轮传动的公差与测量;直齿圆锥齿轮的加工方法;Y236型锥齿轮刨齿机工作原理及调整方法,以及直齿圆锥齿轮的设计、测绘与强化等。书末有附表,便于计算时应用。

该书比较浅显易懂,结合实际。可供从事直齿圆锥齿轮制造的工人、技术人员应用及有关院校师生阅读。

直 齿 圆 锥 齿 轮

国营渭阳柴油机厂 编著

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 13 5/16 350千字

1978年9月第一版 1978年9月第一次印刷 印数: 00,001—30,000册

统一书号: 15034·1698 定价: 1.65元

(限国内发行)

前 言

随着我国社会主义建设事业的飞跃发展，直齿圆锥齿轮日益广泛地应用于机器制造的各个行业。由于直齿圆锥齿轮在设计、制造、测量及啮合传动原理等方面的资料比较缺乏而且零散，故给从事这方面工作的同志带来了一定困难，这样就必然影响到直齿圆锥齿轮的产品质量。产品质量不仅是生产问题、技术问题，而且是政治问题、路线问题。为适应多快好省地建设社会主义的新形势，我们将生产中用到的资料进行了汇编。愿为今后深入系统的研究直齿圆锥齿轮作些有益的基础工作。

本书在编写过程中，得到了兄弟单位和有关同志的支持和协助，并提供了宝贵的经验，在此表示感谢。

由于执笔同志的政治、技术水平不高，加之编写时间仓促，书中一定会有不少缺点和错误，恳请读者提出批评指正。

国营渭阳柴油机厂

目 录

目

第一章 直齿圆锥齿轮传动的的基本知识与几何计算	1
§ 1-1 圆锥齿轮的基本概念	1
§ 1-2 圆锥齿轮的传动原理	2
§ 1-3 圆锥齿轮的齿廓曲线原理	3
§ 1-4 圆锥齿轮的引用齿数	5
§ 1-5 圆锥齿轮传动的几何计算	8
§ 1-6 变位圆锥齿轮	12
一、变位圆锥齿轮的基本概念与应用	12
二、变位圆锥齿轮的种类与计算	14
三、计算变位圆锥齿轮时的几个问题	26
四、等隙齿圆锥齿轮	28
第二章 直齿圆锥齿轮传动的公差与测量	29
§ 2-1 圆锥齿轮使用的基本要求	29
一、运动精度	29
二、工作平稳性精度	29
三、齿的接触精度	30
四、啮合侧隙	30
§ 2-2 圆锥齿轮的传动精度指标及公差标准	30
一、齿轮和齿轮传动的运动精度	31
二、齿轮和齿轮传动的工作平稳性精度	37
三、齿轮和齿轮传动中齿的接触精度	40
四、侧隙	44
五、圆锥齿轮精度指标的组合及标注示例	48
§ 2-3 圆锥齿轮的综合测量方法与仪器	48
一、单啮综合测量	49

二、双啮综合测量及其分析	49
三、滚动检查	60
§ 2-4 圆锥齿轮单个要素的测量方法与仪器	62
一、周节的测量	62
二、齿圈跳动的测量	70
三、范成误差的测量	72
四、侧隙变动的测量	73
五、齿形的测量	73
六、齿向的测量	98
七、齿厚的测量	103
§ 2-5 圆锥齿轮毛坯的公差与检查	117
一、圆锥齿轮毛坯的公差	117
二、圆锥齿轮毛坯的检查	119
§ 2-6 圆锥测量齿轮	122
一、圆锥测量齿轮的设计	122
二、圆锥测量齿轮的制造	125
三、圆锥测量齿轮的验收	127
第三章 直齿圆锥齿轮的加工方法	129
§ 3-1 仿形铣削法	129
一、圆锥齿轮铣刀的选择	129
二、铣削方法	133
三、分度计算法	140
§ 3-2 展成刨齿法	145
一、齿轮刨削的基本原理	146
二、刨齿机两种展成设计原理	147
三、常见到的几种齿形	149
§ 3-3 在牛头刨床上加工锥齿轮	156
一、基本原理	156
二、刨刀的刃磨及安装	157
三、滚切过程	158
四、胎具的结构	158

五、挂轮计算	161
六、分度计算	162
§ 3-4 展成铣齿法	163
一、展成铣齿法基本原理	163
二、Y2726 型双头直齿锥齿轮铣齿机	164
三、格里森几种铣齿机	167
四、鼓形齿的一般介绍	170
五、圆盘铣刀的铣刀齿	172
§ 3-5 圆盘拉切法	176
一、Y2815 型拉齿机	176
二、简单介绍格里森 No.109 型拉齿机	187
§ 3-6 齿形精加工机床	189
一、在刨齿机上磨削齿形	189
二、直齿圆锥齿轮磨床	195
三、锥齿轮研齿机	196
§ 3-7 锥齿轮精密锻造与齿形粗切	196
一、精密锻造	196
二、齿形粗切	197
§ 3-8 圆锥齿轮制造的工艺过程	199
 第四章 Y236 型锥齿轮刨齿机工作原理及调整方法	203
§ 4-1 机床工作原理	204
§ 4-2 机床结构与传动系统	205
一、机床结构	205
二、机床主要规格	205
三、几何中心	207
四、传动系统	207
§ 4-3 刨齿刀的基本知识	213
一、夹固部分	213
二、切削部分的高度	213
三、台肩	213
四、刨刀顶刃宽度	213

五、刀尖圆角半径	217
六、刨齿刀四元素 (α_0 、 H 、 S 和 K) 之间的关系	217
七、刨刀宽度	218
八、刨齿刀的切削角度	219
九、刨齿刀的技术条件	221
§ 4-4 刨齿前机床的调整	221
一、刨齿机安装后的检查与调整	221
二、粗刨齿轮时机床的两种调整方法	226
三、精刨齿轮时调整机床的方法	248
§ 4-5 圆锥齿轮齿面接触印痕位置及其调整	258
一、理想的齿面接触印痕	258
二、允许的齿面接触印痕	261
三、齿面接触印痕位置的控制及调整	261
§ 4-6 展成刨齿加工误差的分析及刨齿常出现的问题	285
一、圆锥齿轮齿坯精度对各种误差的影响	285
二、展成刨齿加工误差的分析	291
三、刨齿中常见缺陷的产生原因及消防方法	301

第五章 直齿圆锥齿轮的设计、测绘与强化310

§ 5-1 直齿圆锥齿轮的设计	310
一、齿轮损坏的形式	310
二、直齿圆锥齿轮的受力分析	314
三、齿轮材料	318
四、直齿圆锥齿轮的强度计算	323
五、齿轮的许用应力	325
六、载荷系数	329
七、计算举例	331
§ 5-2 直齿圆锥齿轮的测绘及工作图	334
一、直齿圆锥齿轮的测绘	334
二、直齿圆锥齿轮的工作图	342
§ 5-3 直齿圆锥齿轮的强化	345
一、化学热处理(热扩散)强化法	345

二、表面淬火强化法	346
三、塑性变形强化法	347

附 表	348
------------------	------------

附表 1 节圆锥角 ψ_f 表	348
附表 2 齿顶圆直径系数 D_0 表	356
附表 3 节圆锥母线长度系数 L_0 表	370
附表 4 弦齿厚系数 S'_n 和弦齿高系数 K' 表	378
附表 5 圆锥变位-零齿轮 $\xi_1 = -\xi_2$ 变位系数表	379
附表 6 圆锥变位-正齿轮 ξ_1, ξ_2 变位系数表	381
附表 7 圆锥齿轮运动精度规范	388
附表 8 圆锥齿轮工作平稳性精度规范	390
附表 9 圆锥齿轮传动中齿的接触精度规范	393
附表 10 圆锥齿轮齿的最小减薄量	396
附表 11 圆锥齿轮齿厚公差	401
附表 12 圆锥齿轮保证侧隙和轴线夹角的偏差	402
附表 13 渐开线函数表(间隔: 1 分)	403

常用符号说明	415
--------------	-----

第一章 直齿圆锥齿轮传动的 基本知识与几何计算

§ 1-1 圆锥齿轮的基本概念

由于机器中各部分的布置关系,要传递相交轴间的运动,必须采用圆锥齿轮。

圆锥齿轮分为:直齿、斜齿、圆弧齿或螺旋齿圆锥齿轮。由于直齿圆锥齿轮比较容易制造,所以应用广泛。

在同一平面上,两相交圆锥齿轮的轴线夹角 φ_0 ,可以大于或小于 90° ,其中最常用的是轴线夹角 φ_0 等于 90° 。

圆锥齿轮从其传动情况可分为:外接齿轮传动、内接齿轮传动及平面齿轮传动三种(图 1-1a、b、c)。当从两轴的交点观察时,若两轮的回转方向相反,则为外接传动,若相同,则为内接传动,当外接传动中一个圆锥齿轮的节圆锥成为平面时,即形成平面齿轮传动,而该齿轮称为平面齿轮。由于内接圆锥齿轮的制造困难,所以实际上极少采用。

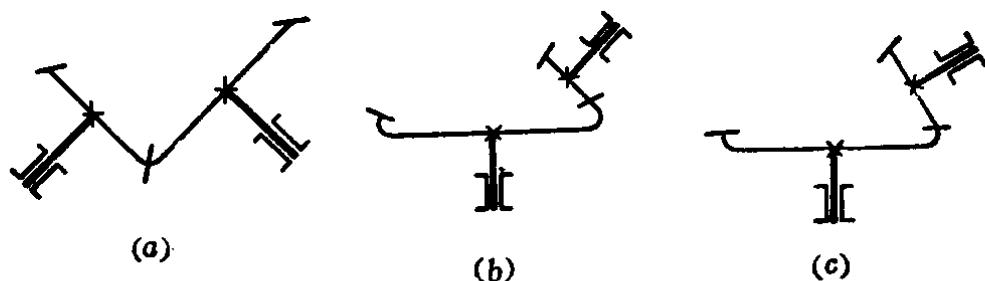


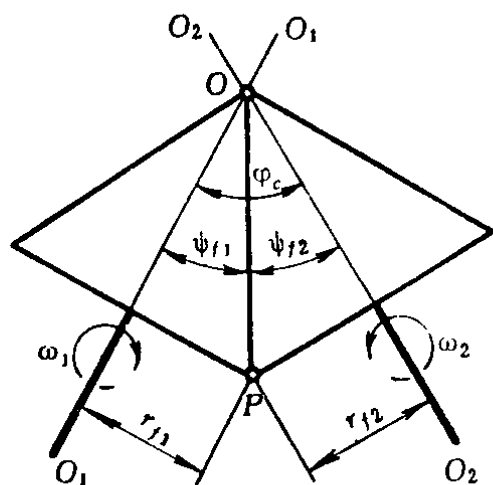
图 1-1 圆锥齿轮传动的种类

直齿圆锥齿轮传动的主要缺点是:在两个齿轮啮合的时候,同一时间内比圆弧齿或螺旋齿圆锥齿轮啮合的齿数较少(只有一对到两对),并且每一齿的受力不是逐渐的变化,所以转动时不够平稳,容易发生噪音。另外它承受负荷的能力也较小。虽然目前能

够制造出较高精度的直齿圆锥齿轮,但在高速和大动力传动中仍采用斜齿、圆弧齿或螺旋齿圆锥齿轮。

§ 1-2 圆锥齿轮的传动原理

直齿圆锥齿轮与圆柱齿轮在几何形状和许多参数方面是互相对应的,如果我们对圆柱齿轮有所了解,那么圆锥齿轮传动的几何关系是不难理解的。



我们知道,传递平行轴间运动的一对圆柱齿轮,其节圆柱相互滚动,犹如一对圆柱摩擦轮。同样,传递相交轴运动的一对圆锥齿轮,其节圆锥互相滚动,就好象一对圆锥摩擦轮。圆锥齿轮有节圆锥、齿顶圆锥、齿根圆锥以及基圆锥。

图 1-2 圆锥齿轮的节圆锥滚动

图 1-2 所示,为一对直齿圆锥齿轮其节圆锥相切时的情况,设 φ_o 为两轴的夹角, ψ_{f1} 及 ψ_{f2} 为两轮的节圆锥角,则圆锥齿轮的传动比 i 为:

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{r_{f2}}{r_{f1}}$$

式中

$$r_{f1} = \overline{OP} \sin \psi_{f1},$$

$$r_{f2} = \overline{OP} \sin \psi_{f2}$$

故得:

$$i_{12} = \frac{\sin \psi_{f2}}{\sin \psi_{f1}}$$

又因

$$\psi_{f1} + \psi_{f2} = \varphi_o$$

所以

$$i_{12} = \frac{\sin (\varphi_o - \psi_{f1})}{\sin \psi_{f1}} = \frac{\sin \varphi_o \cos \psi_{f1} - \cos \varphi_o \sin \psi_{f1}}{\sin \psi_{f1}} \\ = \sin \varphi_o \operatorname{ctg} \psi_{f1} - \cos \varphi_o$$

所以

$$\operatorname{ctg} \psi_{f1} = \frac{i_{12} + \cos \varphi_o}{\sin \varphi_o} \quad (1-1)$$

同理

$$\operatorname{ctg} \psi_{f2} = \frac{i_{12} + \cos \varphi_o}{\sin \varphi_o} = \frac{1 + i_{12} \cos \varphi_o}{i_{12} \sin \varphi_o} \quad (1-2)$$

若 $\varphi_c = 90^\circ$ 则 $i_{12} = \operatorname{ctg} \psi_{f1} = \operatorname{tg} \psi_{f2}$ (1-3)

如果已知两轴传动比 i_{12} 及其两轴夹角 φ_c , 则可应用式 (1-1) ~ (1-3) 求出 ψ_{f1} 及 ψ_{f2} , 从而定出两轮节圆锥角的大小。

§ 1-3 圆锥齿轮的齿廓曲线原理

就单一的圆锥齿轮而论, 其运动为平面运动, 但一对互相啮合的圆锥齿轮, 其相对运动却为空间的球面运动 (即一圆锥齿轮上各点相对固联在另一圆锥齿轮上的动坐标的相对运动轨迹为球面曲线), 因此两齿轮上只有与圆锥顶点等距离的各对应点才能互相啮合。换言之, 即圆锥齿轮的齿廓应为一球面曲线。

在图 1-3 所示的球体中, 取一基圆锥 A , 再通过球心 O , 取一与基圆锥 A 相切的扇形

(为通过球心的大圆面的一部分), 扇形沿基圆锥作纯滚动时, 则扇形上的直线 $\overline{OC}$ 在空间画出圆锥渐开面。由于线上的各点画出的各自的空间曲线在不同的球面上, 故称为球面

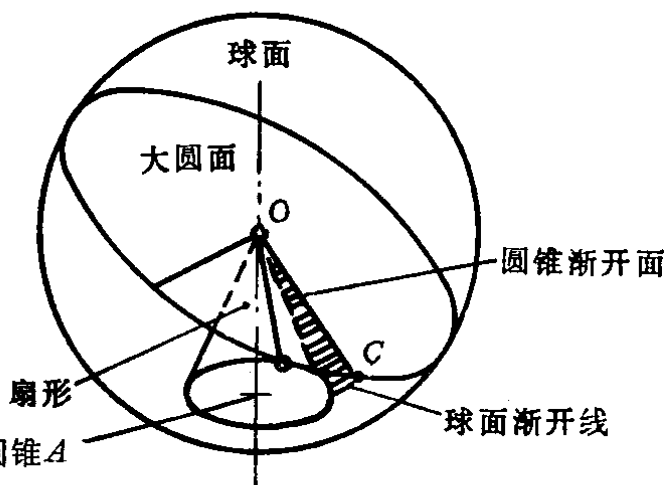


图 1-3 球面渐开线的形成原理

渐开线 (例如 C 点的轨迹

就是一根球面渐开线)。此圆锥渐开面就是齿廓曲线, 而扇形就是它的法面。由球面渐开线曲面形成的原理可知, 球面上任一点的法线必与基圆锥相切, 当球面的半径增至无穷大时 (即锥顶移至无穷远时), 球面渐开线变为平面渐开线。

现在我们来研究一对互相啮合的渐开线直齿圆锥齿轮其齿廓是如何形成的。

如图 1-4 所示, 节圆锥 A_1 与 A_2 , 相切于 $\overline{OP}$ 线, $\overline{OO_1}$ 及 $\overline{OO_2}$ 为两齿轮的中心轴, O 为其顶点, 以 O 为中心, 以 $\overline{OP}$ 为半径作球面, 此球面与两节圆锥的交线为圆 I 及圆 II, 则该两圆切于 P 点。过 $\overline{OP}$ 作平面 AOB , 使与两节圆锥的公切面 (与图纸垂直, 图中即以

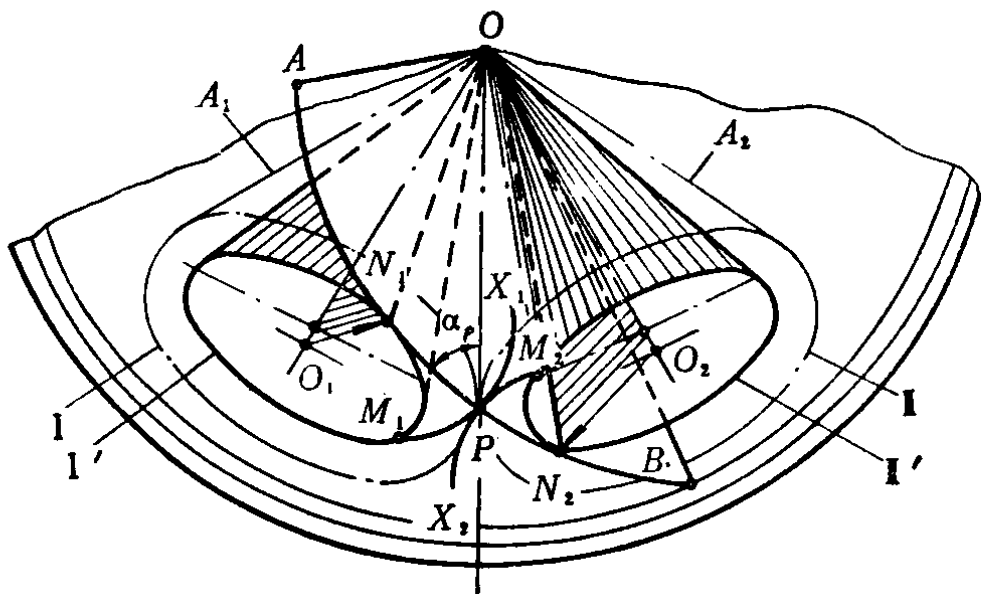


图 1-4 圆锥齿轮齿廓的形成

$\overline{OP}$ 线表示)成一两面角 α_P (即啮合角), 该平面与球面的交线为大圆弧 $\widehat{APB}$, 过 $\overline{OO_1}$ 及 $\overline{OO_2}$ 分别作平面 OO_1N_1 及 OO_2N_2 垂直于平面 AOB , 将 $\triangle OO_1N_1$ 及 $\triangle OO_2N_2$ 分别绕 $\overline{OO_1}$ 及 $\overline{OO_2}$ 旋转一周, 即得到与 AOB 平面相切的两基圆锥, 此基圆锥与球面的交线分别为圆 I' 及 II' 。再将平面 AOB 分别沿上述两基圆锥作纯滚动, 则 $\widehat{AB}$ 弧上任一点 P 将在球面上画出球面渐开线 M_1X_1 及 M_2X_2 , 而 $\overline{OP}$ 线将画出球面渐开线的齿廓曲面。

按上述步骤, 即可作出两圆锥齿轮的啮合齿廓。两齿廓啮合传动时, 平面 AOB 就是它们的啮合平面或齿廓接触处的公法面。而该平面与轴平面 OO_1O_2 的交线 $\overline{OP}$ 是一条固定直线, 即所谓瞬心轴。其球面渐开线的齿廓曲面传动比是定值。

下面介绍球面渐开线极坐标方程式。如图 1-5 所示, 在以顶点为中心的单位半径的球面上, 以圆锥齿轮的中心 O (即球面和齿轮轴线的交点) 为原点, 以通过渐开线起点 A 和中心 O 的大圆 OA 为原线 (在球面三角学上大圆用直线表示), 球面渐开线上任意点 P 的球面极坐标 $(\psi_P, \beta_{P_{球}})$ 方程式如下:

$$\begin{aligned}\beta_{P_{球}} &= \frac{1}{\sin \psi_0} \arccos \frac{\cos \psi_P}{\cos \psi_0} - \arccos \frac{\operatorname{tg} \psi_0}{\operatorname{tg} \psi_P} \\ &= \sin \gamma_r(\psi_P, \psi_0)\end{aligned}\quad (1-4)$$

式中 $\sin \gamma_r$ ——球面极渐开线函数，这个函数表示渐开线上任意点的偏角 β_{P*} 与该点的锥角 ψ_P 和基锥角 ψ_o 有关；

$\psi_P(\overline{OP})$ ——在球面上的直线长度代表角度。
 ψ_P 实际上就是被测点 P 的锥角；

ψ_o ——基锥角。

$$\sin \psi_o = \sin \psi_f \cos \alpha_f \tag{1-5}$$

式中 ψ_f ——节锥角；

α_f ——节圆压力角。

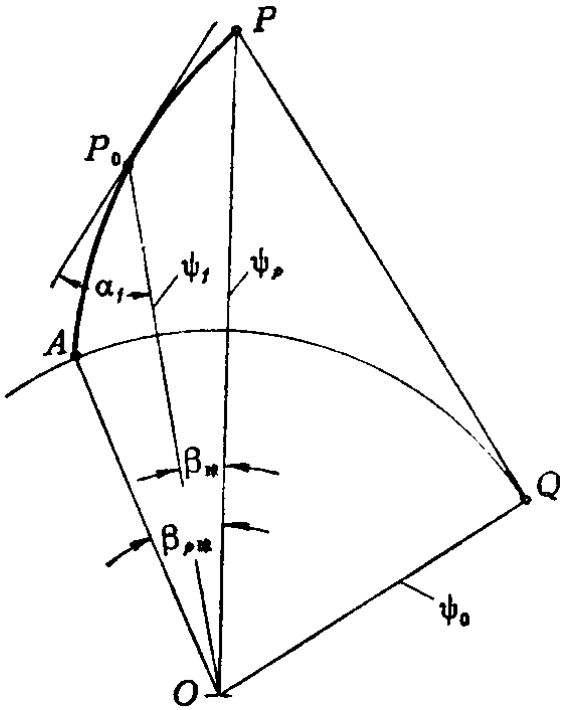


图 1-5 球面渐开线的极坐标

节点的偏角 β_f 按下式计算：

$$\begin{aligned} \beta_f &= \frac{1}{\sin \psi_o} \arccos \frac{\cos \psi_f}{\cos \psi_o} - \frac{\operatorname{tg} \psi_o}{\operatorname{tg} \psi_f} \\ &= \sin \gamma_r(\psi_f, \psi_o) \end{aligned} \tag{1-6}$$

当以连接节点 P_o 和中心 O 的大圆作为原线时，渐开线上任意点 P 的球面极坐标方程式为：

$$\beta_{*} = \sin \gamma_r(\psi, \psi_o) - \sin \gamma_r(\psi_f, \psi_o) \tag{1-7}$$

§ 1-4 圆锥齿轮的引用齿数

因为圆锥齿轮的齿廓曲线为球面曲线，但是由于球面无法展成平面，以致圆锥齿轮的设计和制造产生很多困难，因此，不得不采用近似的方法。图 1-6 所示，为圆锥齿轮在其轴面上的投影。 OAB 为其节圆锥，如果该圆锥齿轮为球面渐开线的齿廓，则其齿顶圆锥和齿根圆锥应分别为 Obb 及 Oaa ，圆弧 $\widehat{ab}$ 则为其轮齿大端的轴面投影。

过大端上的 A 点，作球面的切线 O_1A ，与其轴相交于 O_1 ，以

OO_1 为轴, O_1A 为斜边作一圆锥, 则 $\triangle AO_1B$ 即为该圆锥在轴面上的

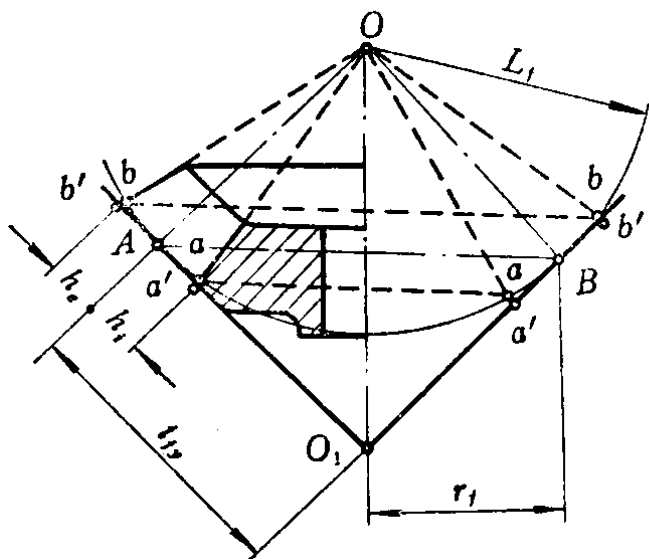


图 1-6 圆锥齿轮的背锥

的投影, 我们称其为辅助圆锥或背锥。

由此可知, 背锥与球面相切于圆锥齿轮大端的节圆上, 并与节圆锥直角相接。

将轮齿球面渐开线上的 a 、 b 点向背锥上投影, 得 a' 及 b' 点, 由图可以看出, $\widehat{a'b'}$ 与 $\widehat{ab}$ 相差极小,

尤其是当球的半径或节锥母线 L_f 与齿的模数 m 的比值愈大时 (一般 $L_f/m > 30$), 相差愈小。既然这种误差极微, 而且背锥表面可以展成平面, 因此可以采用以下的近似方法来求圆锥齿轮的齿廓。

图 1-7 表示将两圆锥齿轮背锥展成平面, 则成为两个扇形, 两个扇形的半径即为其背锥的半径 r_{fv1} 及 r_{fv2} 。今以 r_{fv1} 及 r_{fv2} 为节圆半径, 以圆锥齿轮大端的模数为模数, 并取标准压力角, 按照圆柱齿轮的作图, 画出扇形齿轮的齿形, 然后设想将这扇形齿轮卷在背锥上, 通过点 O 连接齿廓上的各点, 则这些连线与背锥面的交线即为圆锥齿轮的齿侧表面。因为扇形齿轮之齿形与圆锥齿轮真正齿形极为近似, 所以可近似的将其视为圆锥齿轮的齿形。两扇形齿轮的齿数 Z_1 及 Z_2 当然等于两圆锥齿轮的真实齿数。若将两扇形齿轮补足为完整的圆柱齿轮, 则它们的齿数将增加为 Z_{v1} 及 Z_{v2} , 该圆柱齿轮称为圆锥齿轮的引用圆柱齿轮, 其齿数 Z_{v1} 及 Z_{v2} 称为两圆锥齿轮的引用齿数。由图 1-7 可知:

$$r_{fv1} = \frac{r_{f1}}{\cos \psi_{f1}} = \frac{mZ_1}{2 \cos \psi_{f1}} \quad \text{而} \quad r_{fv1} = \frac{1}{2} mZ_{v1}$$

故得:

$$Z_{v1} = \frac{Z_1}{\cos \psi_{f1}}$$

同理

$$Z_{v2} = \frac{Z_2}{\cos \psi_{f2}}$$

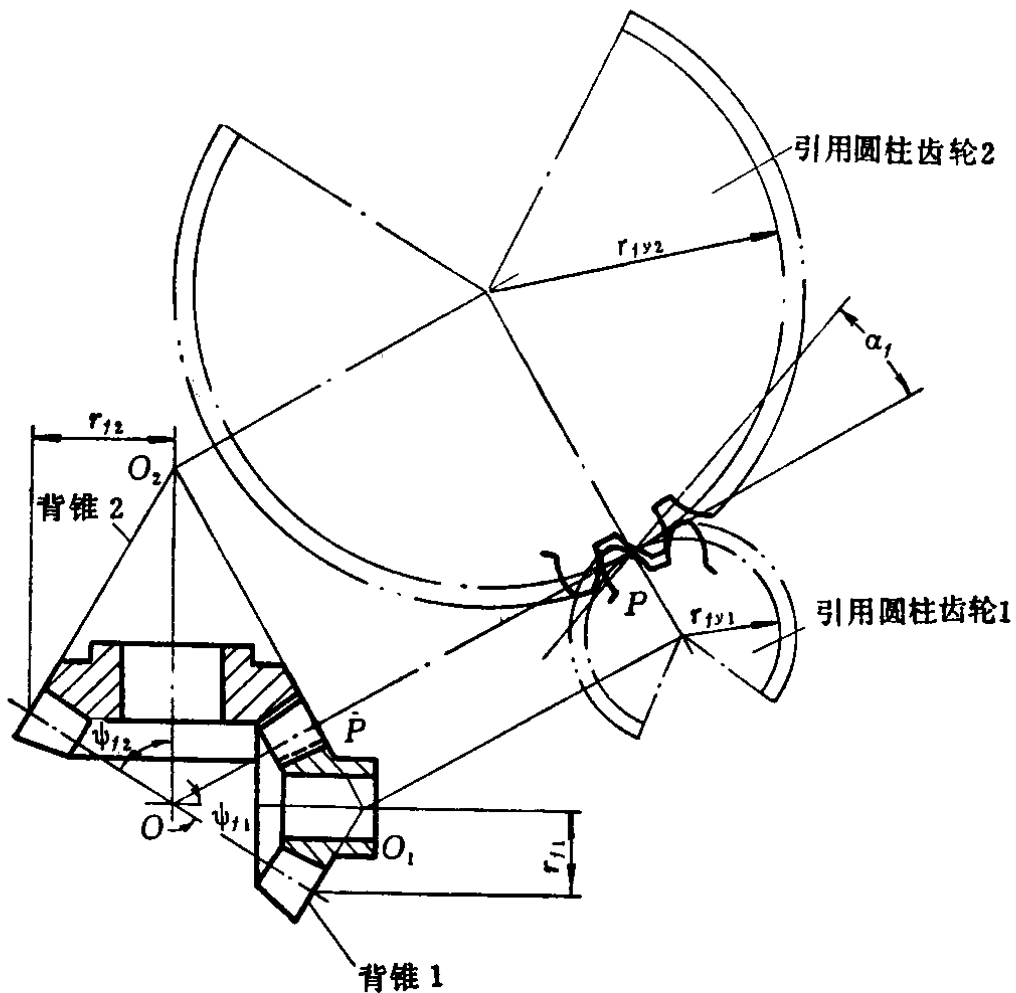


图 1-7 引用圆柱齿轮

因为 $\cos \psi_{f1}$ 及 $\cos \psi_{f2}$ 小于 1, 故 $Z_{v1} > Z_1$, $Z_{v2} > Z_2$ (Z_{v1} 及 Z_{v2} 不一定恒为整数)。

从图 1-7 可以看出, 一对圆锥齿轮啮合时, 从其共同的背锥面上看(展开)起来, 相当于一对它们的引用圆柱齿轮的啮合情况, 这是圆锥齿轮传动最主要的特点。正由于这个特点, 说明了圆锥齿轮的齿形可以按背锥展开面上引用圆柱齿轮的齿形来加工。这时圆锥齿轮传动的瞬时速比, 就决定于引用圆柱齿轮的速比了。即:

$$\begin{aligned} i_{12} &= \frac{r_{f2}}{r_{f1}} = \frac{r_{fv2} \cos \psi_{f2}}{r_{fv1} \cos \psi_{f1}} = \frac{\frac{1}{2} m Z_{v2} \cos \psi_{f2}}{\frac{1}{2} m Z_{v1} \cos \psi_{f1}} \\ &= \frac{Z_{v2} \cos \psi_{f2}}{Z_{v1} \cos \psi_{f1}} = \frac{Z_2}{Z_1} \end{aligned}$$

这说明圆锥齿轮传动的瞬时速比也是它们的齿数比。所以一

对圆锥齿轮正确啮合条件，也和一对渐开线圆柱齿轮的正确啮合条件一样：两轮的基节必须相等，即它们的模数 m 和压力角 α_f 必须分别相等。

这里再说明一点，圆锥齿轮不发生根切的最少实际齿数可以用 $Z_v = \frac{Z}{\cos \psi_f}$ 算出，即 $Z_{\text{最少}} = Z_{v\text{最少}} \cos \psi_f$ 。因为当 $\alpha_f = 20^\circ$ 时，圆柱齿轮不发生根切的最少齿数是 17，所以引用圆柱齿轮不发生根切的最少齿数 $Z_{v\text{最少}} = 17$ 。因此当节锥角 $\psi_f = 45^\circ$ 时的圆锥齿轮不发生根切的最少实际齿数将是： $Z_{\text{最少}} = 17 \cos 45^\circ \approx 12$ 齿

同理，引用圆柱齿轮传动的啮合系数也可以看作是圆锥齿轮相应数值。由于引用圆柱齿轮的齿数大于圆锥齿轮的实际齿数，所以，在实际齿数相同的条件下，圆锥齿轮比圆柱齿轮有较大的啮合系数。

§ 1-5 圆锥齿轮传动的几何计算

由于圆锥齿轮的背锥面展开后，相当于一个圆柱齿轮，所以圆锥齿轮的各个参数都规定以大端背锥上的为标准，它的各部分尺寸也都规定以大端为基准。至于各参数与各部分尺寸的关系就和圆柱齿轮的情况一样，不过要考虑节圆是个圆锥面这一点，这样在

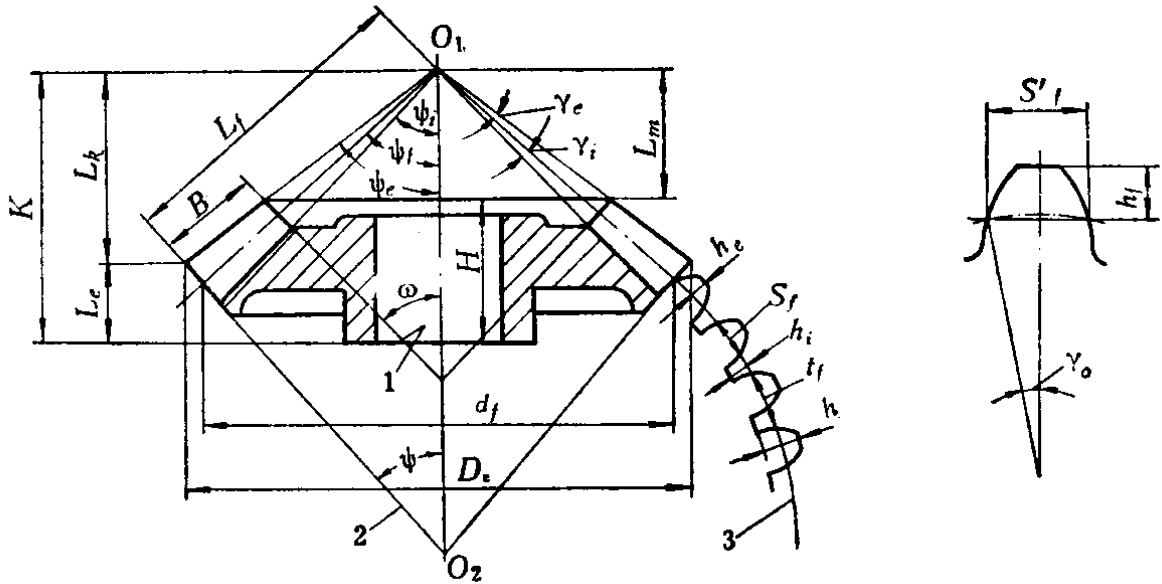


图 1-8 直齿圆锥齿轮的各部名称及代号

1—内圆锥 2—背锥 3—展开引用平齿轮节圆

设计圆锥齿轮时，都以其大端为标准，不仅此处尺寸最大，计算出来的尺寸比较准确，同时也便于估计机构的外形尺寸和便于测量。圆锥齿轮各部的尺寸(图 1-8)，可按表 1-1 所列公式计算。

表 1-1 圆锥齿轮尺寸计算公式表
(一) 求基本参数

项目	单位	代号	通用公式 (正常齿、短齿)		备 注
模数	毫米	m	按 JB111-60 选取		
周节	毫米	t_f	$t_f = \pi m$		
齿 轮			小 齿 轮	大 齿 轮	
齿数	个	Z	Z_1 按结构需要, 但 $Z_{y1} = \frac{Z_1}{\cos \psi_{f1}}$ $\geq \frac{2f}{\sin^2 \alpha_f}$	$Z_2 = iZ_1$ (i —传动比)	正常齿 $f=1$ 短齿 $f=0.8$
节圆锥角	度	ψ_f	$\psi_{f1} = \arctg \frac{Z_1 \sin \varphi_c}{Z_2 + Z_1 \cos \varphi_c}$	$\psi_{f2} = \arctg \frac{Z_2 \sin \varphi_c}{Z_1 + Z_2 \cos \varphi_c}$ 或 $\psi_{f2} = \varphi_c - \psi_{f1}$	两轴交角 $\varphi_c < 90^\circ$
			$\psi_{f1} = \arctg \frac{Z_1 \sin (180^\circ - \varphi_c)}{Z_2 - Z_1 \cos (180^\circ - \varphi_c)}$	$\psi_{f2} = \arctg \frac{Z_2 \sin (180^\circ - \varphi_c)}{Z_1 - Z_2 \cos (180^\circ - \varphi_c)}$ 或 $\psi_{f2} = \varphi_c - \psi_{f1}$	$\varphi_c > 90^\circ$
			$\psi_{f1} = \arctg \frac{Z_1}{Z_2}$	$\psi_{f2} = \arctg \frac{Z_2}{Z_1}$ 或 $\psi_{f2} = 90^\circ - \psi_{f1}$	$\varphi_c = 90^\circ$
轴线夹角	度	φ_c	$\varphi_c = \psi_{f1} + \psi_{f2}$		