

邓效忠 魏冰阳 著

锥齿轮设计的新方法



科学出版社

锥齿轮设计的新方法

邓效忠 魏冰阳 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统论述了锥齿轮的几何参数计算与设计的基本原理及方法,介绍了该领域内一些创新性的研究成果。内容主要包括:锥齿轮与准双曲面齿轮的设计原理,非零传动设计,高齿制设计,高重合度螺旋锥齿轮的设计方法,锥齿轮与准双曲面齿轮的强度评价准则与寿命计算方法;锥齿轮的装配、受力分析、质量检验等内容。

本书可作为从事齿轮传动设计、制造、检测的工程技术人员和科研人员的参考书,也可作为高等学校相关专业研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

锥齿轮设计的新方法 / 邓效忠, 魏冰阳著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-035129-6

I. ①锥… II. ①邓…②魏… III. ①锥齿轮-设计 IV. ①TH132.421-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 158293 号

责任编辑: 耿建业 唐保军 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 282 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

锥齿轮分为直齿锥齿轮、斜齿锥齿轮和曲齿锥齿轮。直齿锥齿轮目前用量最大的是在汽车的差速器内,一般工业也有不少场合应用。斜齿锥齿轮目前已被曲齿锥齿轮所替代。曲齿锥齿轮习惯上也被称为螺旋锥齿轮,根据齿线的不同又分为弧齿锥齿轮和延伸外摆线锥齿轮;根据齿制不同又分为格里森制锥齿轮、奥利康制锥齿轮和克林贝尔格制锥齿轮。螺旋锥齿轮由于传动平稳、强度高,被广泛用于交通运输、机床、直升机、工程矿山等机械产品中。对于主动锥齿轮的轴线与从动锥齿轮的轴线不相交、存在偏置距的锥齿轮副称为准双曲面齿轮。准双曲面齿轮由于减速比大、体积小,被广泛用于汽车驱动桥作为主传动。

国内关于螺旋锥齿轮的研究开始于 20 世纪 70 年代,当时为了掌握汽车驱动桥螺旋锥齿轮的制造技术,我国原机械工业部组织多家科研院所、工厂对锥齿轮的传动理论与国际上先进制造技术进行攻关,消化吸收了格里森、克林贝尔格-奥利康公司的先进技术,为建成我国锥齿轮传动的工业和技术体系奠定了坚实的技术基础,并且出版了一些译著和专著。目前,该套技术体系仍然在我国锥齿轮生产中发挥着重要作用。90 年代后,由于传统制造业的不景气,造成研究人员锐减,该领域的研究处于低潮。进入 21 世纪,在党中央提出建立制造业强国的政策指引下,作为工业基础件的齿轮领域的研究焕发了新的生机。在这几十年间,河南科技大学(原洛阳工学院)齿轮团队,一直以“咬定青山不放松”的热情,持续对锥齿轮传动理论和技术进行探索和研究,曾获国家发明二等奖、国家科技进步三等奖等十余项有关锥齿轮研究成果。本书在第 4 章对这些工作进行了总结。

近些年国内关于齿轮的专业书籍出版不多,锥齿轮方面的书籍更少,这些书籍可分作两类:纯实务工具书的手册类与纯学术的专著类。前者完全为生产服务,后者完全服务于学术,介于二者中间的参考书几乎没有。鉴于此,由魏冰阳教授执笔,我们编著了本书,其可作为从事齿轮传动设计、制造、检测的工程技术人员和科研人员的参考书,也可作为高等学校相关专业研究生的教学用书。

本书第 1 章从锥齿轮的分类开始讲述了锥齿轮的基本知识。第 2、3 章是关于锥齿轮与准双曲面齿轮的几何学,给出了弧齿锥齿轮、准双曲面齿轮的设计方法,并对重要公式进行了解析和推导,同时对 ANSI/AGMA2005-3、ANSI/AGMA ISO23509-A08 锥齿轮设计标准做了一定程度的剖析。第 4 章对“非零变位”、高齿制设计、高重合度数字化设计等研究成果进行了总结。第 5 章关于锥齿轮强度的评价是根据 ANSI/AGMA2003-B97、AGMA932-A05 资料编写。第 6 章介绍锥齿

轮坯设计、支承设计与装配,第7章介绍锥齿轮啮合质量检验,这两章内容以前常被人们忽视,但它对于锥齿轮传动设计又不可缺少。考虑到工程实用性及我国关于锥齿轮的设计标准尚不健全,本书在正文与附录A~H引入了AGMA、ISO资料和标准中的一些图表,供读者参考。

本书关于锥齿轮的一些符号尽量做到与ISO标准一致,同时兼顾我国当前行业通行的习惯。

本书的主要内容已在河南科技大学研究生课程“锥齿轮设计与加工”讲授多年。在本书编写过程中,得到了张华副教授和吴聪、彭宗和、袁群威等研究生的大力帮助,对此深表感谢,同时感谢中国齿轮专业协会、洛阳市机械设计与传动学会的大力支持。

本书涉及面广,而编著者水平有限,难免会存在错漏之处,热忱地欢迎广大读者批评指正。

邓效忠 魏冰阳

2012年7月18日于河南科技大学

目 录

前言

第 1 章 锥齿轮概述	1
1.1 锥齿轮的分类	1
1.1.1 直齿锥齿轮	1
1.1.2 弧齿锥齿轮	2
1.1.3 零度锥齿轮	2
1.1.4 准双曲面齿轮	3
1.2 锥齿轮齿廓的形成	4
1.3 锥齿轮的术语定义	7
1.4 锥齿轮的节锥	9
1.5 弧齿锥齿轮的旋向与螺旋角.....	11
1.5.1 旋向	11
1.5.2 螺旋角	11
1.5.3 弧齿锥齿轮的当量齿轮	12
1.6 弧齿锥齿轮的重合度.....	13
1.6.1 端面重合度	13
1.6.2 纵向重合度	14
第 2 章 锥齿轮的设计	16
2.1 齿轮基本参数的确定.....	16
2.1.1 小轮直径估算	16
2.1.2 齿数的确定	19
2.1.3 齿宽设计.....	21
2.1.4 螺旋角的确定	22
2.1.5 压力角的选取	23
2.2 切齿方式与中点曲率.....	23
2.2.1 逐齿铣削工序法	23
2.2.2 连续滚切工序法	24
2.3 轮齿的收缩.....	26
2.3.1 轮齿的收缩类型	27
2.3.2 齿高收缩方式	28

2.4	弧齿锥齿轮的轮齿设计	33
2.4.1	齿高系数与中点工作齿高	33
2.4.2	顶隙与中点全齿高	34
2.4.3	中点齿顶高系数	34
2.4.4	齿根角	35
2.4.5	面锥角	36
2.4.6	大端参数	37
2.4.7	弧齿厚系数与中点法向弧齿厚	37
2.4.8	大端法向许用侧隙	38
2.4.9	中点法向弦齿厚及中点法向弦齿高	40
2.5	锥齿轮的根切检验	40
第3章	准双曲面齿轮设计	42
3.1	准双曲面齿轮概述	42
3.1.1	准双曲面齿轮的特点	42
3.1.2	准双曲面齿轮的偏置	43
3.2	初始参数选取说明	44
3.2.1	齿数的选取	44
3.2.2	螺旋角选取	45
3.2.3	平均压力角	45
3.2.4	刀盘半径	45
3.2.5	齿高系数与齿顶高系数	46
3.2.6	轮齿收缩方式	46
3.3	准双曲面齿轮副的基本几何	47
3.3.1	原始单叶双曲面	47
3.3.2	准双曲面齿轮的节锥及其几何要素	49
3.4	准双曲面齿轮副节锥的确定	50
3.4.1	节锥面参数方程	50
3.4.2	纵向齿形与螺旋角	52
3.4.3	极限压力角	54
3.4.4	极限曲率半径	56
3.5	准双曲面齿轮节锥的迭代法求解	57
3.6	准双曲面齿轮的轮坯设计	60
3.6.1	大轮轮坯尺寸	60
3.6.2	小轮轮坯尺寸	62

第 4 章 锥齿轮设计的新方法	67
4.1 弧齿锥齿轮“非零变位”	67
4.1.1 非零变位原理	67
4.1.2 分锥变位的几种形式	68
4.1.3 切向变位的特点	70
4.1.4 分锥综合变位	70
4.2 非零变位系数的选取	71
4.2.1 径向变位	71
4.2.2 切向变位	72
4.3 “非零”变位准双曲面齿轮的设计方法	74
4.3.1 准双曲面齿轮的“非零变位”设计原理	74
4.3.2 “非零变位”设计计算步骤	76
4.4 高齿制准双曲面齿轮的设计方法	76
4.4.1 设计方法	77
4.4.2 优化设计方法	78
4.5 轮齿接触分析	80
4.5.1 轮齿接触分析 TCA 的原理	80
4.5.2 传动误差	81
4.5.3 轮齿承载接触分析	82
4.5.4 考虑边缘接触的轮齿承载接触分析	82
4.6 传动误差所反映的啮合信息	85
4.6.1 传动误差所反映出的主要啮合信息	85
4.6.2 几何传动误差幅值	87
4.7 提高齿面有效重合度的设计方法	89
4.7.1 接触路径与重合度	89
4.7.2 提高齿面有效重合度的设计方法	90
第 5 章 锥齿轮的强度评价	92
5.1 锥齿轮强度问题概述	92
5.1.1 适用范围	92
5.1.2 计算中应考虑的因素	93
5.1.3 其他考虑因素	93
5.2 轮齿承载能力准则	95
5.2.1 抗点蚀能力与弯曲强度之间的关系	95
5.2.2 点蚀	95
5.2.3 硬化层剥落	96

5.2.4 弯曲强度	96
5.3 基本计算公式	97
5.3.1 抗点蚀能力	97
5.3.2 弯曲强度	98
5.4 影响强度因素的系数	99
5.4.1 过载系数	99
5.4.2 安全系数	100
5.4.3 工作系数	101
5.4.4 动载系数	101
5.4.5 尺寸系数	105
5.4.6 载荷分布系数	106
5.4.7 抗点蚀鼓形系数	107
5.4.8 弯曲强度纵向曲率系数	108
5.4.9 几何系数	108
5.4.10 应力循环系数	109
5.4.11 抗点蚀硬度比系数	111
5.4.12 温度系数	112
5.4.13 可靠性系数	113
5.4.14 抗点蚀弹性系数	113
5.5 强度几何系数	114
5.5.1 接触强度几何系数	114
5.5.2 弯曲强度几何系数	115
5.6 准双曲面齿轮的抗点蚀能力及弯曲强度评价	121
5.6.1 评价方法的特别说明	121
5.6.2 抗点蚀能力	122
5.6.3 弯曲强度	123
5.6.4 几何系数	124
第 6 章 锥齿轮的轮坯、支承与装配	126
6.1 轮坯设计依据	126
6.1.1 压紧面	126
6.1.2 定位面	127
6.1.3 辅助定位面	127
6.1.4 背锥实体	127
6.1.5 载荷方向	127
6.1.6 轴齿轮	128

6.1.7 带凸缘轮毂	129
6.1.8 花键内孔	129
6.1.9 齿圈设计	130
6.1.10 柱销	132
6.1.11 轮毂上的凸缘	132
6.2 公差要求	132
6.2.1 轮坯尺寸和公差	132
6.2.2 图纸中的轮坯尺寸标注	134
6.2.3 轮齿精度	134
6.2.4 齿面粗糙度	135
6.2.5 公差等级选择	135
6.2.6 侧隙	135
6.3 锥齿轮支承的设计	137
6.3.1 支承设计要求	137
6.3.2 支承类型	138
6.4 受力分析	140
6.4.1 切向力	140
6.4.2 轴向力	140
6.4.3 径向力	141
6.4.4 受力方向	141
6.5 装配	143
6.5.1 正确的装配	143
6.5.2 标记	143
6.5.3 齿轮副的定位	145
6.5.4 侧隙检查	153
6.5.5 侧隙变化与轴向位移的关系	155
6.5.6 端面游隙	155
第7章 锥齿轮啮合质量检验	157
7.1 齿面接触印痕	157
7.1.1 典型接触印痕	157
7.1.2 对接触区位置要求的控制	157
7.1.3 变形试验	158
7.1.4 图形说明	158
7.2 轮齿接触检验与评价	158
7.2.1 接触印痕评价	158

7.2.2	V、H与J 检验	160
7.2.3	工作平稳性	162
7.2.4	承载接触印痕评价	163
7.3	检验机上齿面接触区发生变化原理分析	165
7.3.1	小轮安装距的改变对齿面接触区的影响	165
7.3.2	小轮偏置距的变化对齿面接触区的影响	166
7.3.3	V/H调整的作用与意义	166
7.4	锥齿轮检验	167
7.4.1	肉眼检查	167
7.4.2	轮坯检验	167
7.4.3	轮齿各项要素检验	168
7.4.4	侧隙测量	169
7.4.5	单齿面综合检验	169
7.4.6	金属学特性检验	170
参考文献		171
附录 A	锥齿轮设计标准数据	173
附录 B	米纳法则	183
附录 C	锥齿轮强度几何系数 Z_I/Y_J 图表	188
附录 D	准双曲面齿轮几何系数线图	200
附录 E	弧齿锥齿轮几何计算示例	207
附录 F	准双曲面齿轮几何计算示例	211
附录 G	弧齿锥齿轮强度校核算例	220
附录 H	准双曲面齿轮强度校核算例	222

第 1 章 锥齿轮概述

1.1 锥齿轮的分类

锥齿轮用于传递两相交轴或交错轴之间的动力和速度。锥齿轮分为直齿锥齿轮、斜齿锥齿轮和曲齿锥齿轮。斜齿锥齿轮目前已被曲齿锥齿轮所替代。曲齿锥齿轮习惯上也称螺旋锥齿轮,根据齿线的不同分为弧齿锥齿轮、零度锥齿轮和延伸外摆线锥齿轮;根据齿制不同又分为格里森制锥齿轮、奥利康制锥齿轮和克林贝尔格制锥齿轮。对于主动锥齿轮的轴线与从动锥齿轮的轴线不相交、存在偏置距的锥齿轮副称为准双曲面齿轮。以下对工业上常用的直齿锥齿轮、弧齿锥齿轮、零度锥齿轮和准双曲面齿轮进行简单介绍。

1.1.1 直齿锥齿轮

直齿锥齿轮是锥齿轮一种最简单的形式。齿长方向上为直线形,齿高、弧齿厚逐渐收缩,如果向内延伸会与两轴线相交于公共点,如图 1.1 所示。直齿锥齿轮通常为线接触传动,啮合从齿顶开始,沿齿面到达齿根。直齿锥齿轮有时也通过修形实现局部共轭点接触。直齿锥齿轮多应用在低速传动场合如汽车的差速器。直齿锥齿轮通常采用刨齿或铣齿的方法制造,修形也是比较困难的。精锥直齿锥齿轮能够通过模具修形,但制造精度较低。

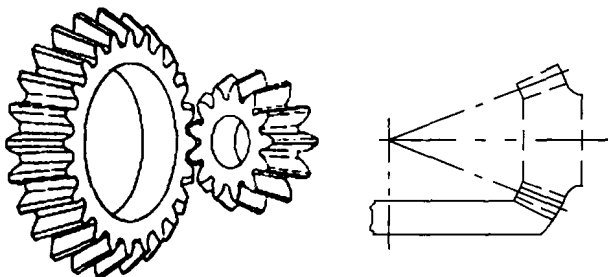


图 1.1 直齿锥齿轮

直齿锥齿轮在圆周速度不超过 5m/s、静音和平稳性要求不是很高的场合使用。

1.1.2 弧齿锥齿轮

弧齿锥齿轮具有倾斜的曲线轮齿,齿线的形状是圆弧或近似圆弧(图 1.2),其接触开始于齿的某一端并平滑地移向另一端。它们的啮合接触尽管和直齿锥齿轮相似,但由于多对轮齿重合的附加作用,比直齿锥齿多了轴面重合度,其总重合度增大了很多,其传递运动比直齿锥齿轮和零度锥齿轮平稳,这将有效降低振动和噪声,在高速工况下效果尤为显著。

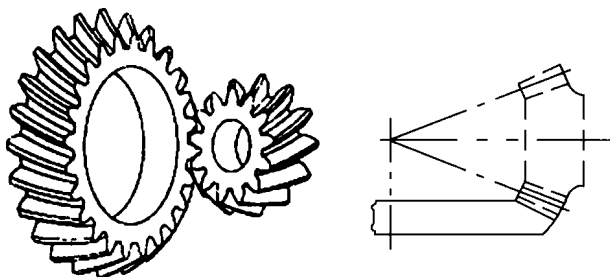


图 1.2 弧齿锥齿轮

弧齿锥齿轮已广泛应用于矿山、石油、煤矿机械、机床、铁路机车、航海舰船、航空直升机等机械工程领域,其应用领域有逐步扩大的趋势。

1.1.3 零度锥齿轮

零度锥齿轮像弧齿锥齿轮一样具有弯曲的齿线(图 1.3),但弯曲方向与弧齿锥齿轮不同,螺旋角为零度。它们对支承产生的作用力同直齿锥齿轮大致一样,可以采用相同的安装形式,且具有传动平稳的特性,采用同弧齿锥齿轮一样的机床进行制造。

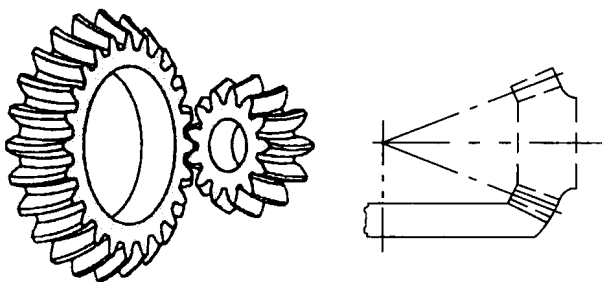


图 1.3 零度锥齿轮

零度锥齿轮运动的平稳性和静音性优于直齿锥齿轮,可以用于圆周速度高达 40m/s 的场合。

1.1.4 准双曲面齿轮

准双曲面齿轮除了小轮轴线能够向上或向下偏置一个距离 E 外,外形与弧齿锥齿轮相似(图 1.4)。如果偏置足够大,两轴能够交错通过,则可以采用紧凑的跨式支承。

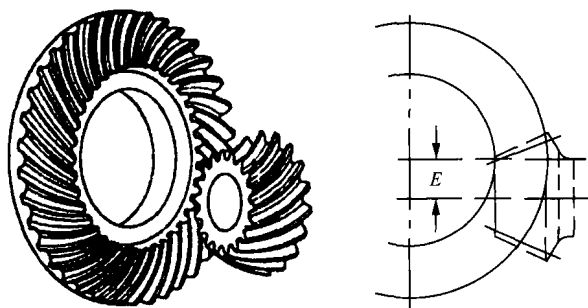


图 1.4 准双曲面齿轮

准双曲面齿轮的典型应用是作为汽车主减速器的一对锥齿轮,即后桥驱动。近年来大减速比的准双曲面齿轮也大量应用于其他领域,如在数控机床上直联伺服电机驱动动力部件。

弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的运转平稳性和静音性更优,可以在速度高达 40m/s 以上的场合使用。当圆周速度超过 40m/s 时,应当进行精密加工。

此外,锥齿轮还有其他一些分类方法。例如,按齿高分类,锥齿轮还可以分为收缩齿和等高齿,如图 1.5 所示。

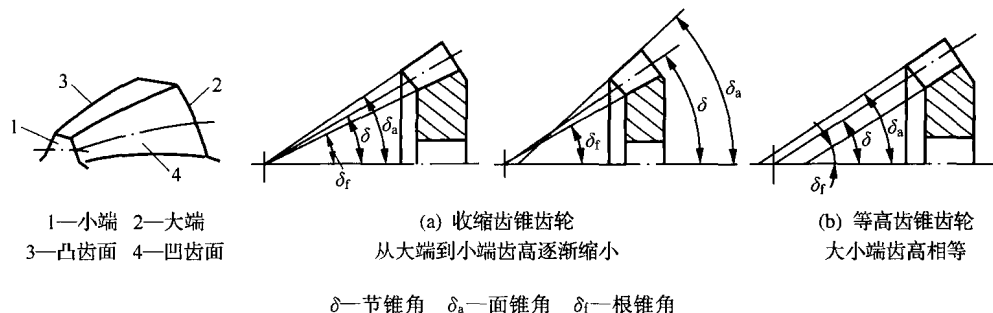


图 1.5 锥齿轮按齿高分类

节锥与齿面的交线称为齿线,如图 1.6(a)所示的 $e-e$ 线。按齿面齿线分类,锥齿轮可分为如图 1.6(b)、(c)、(d)所示的直齿锥齿轮、弧齿锥齿轮、摆线齿锥齿轮三类。摆线齿锥齿轮齿线为延伸外摆线的一部分,由于齿线为延伸外摆线,加工时可连续滚切,这种锥齿轮通常设计为等高齿,最早在克林贝尔格、奥利康公司兴起,

因此人们习惯上称等高齿或“奥制”锥齿轮。本书所述的多为收缩齿弧齿锥齿轮，即格里森制锥齿轮。切削加工这种锥齿轮时，必须逐齿分度，铣刀盘顶刃与被切锥齿轮的根锥母线相切，在根锥切平面上齿线为一段圆弧，而在节锥切平面内的投影为接近圆形的一段椭圆。

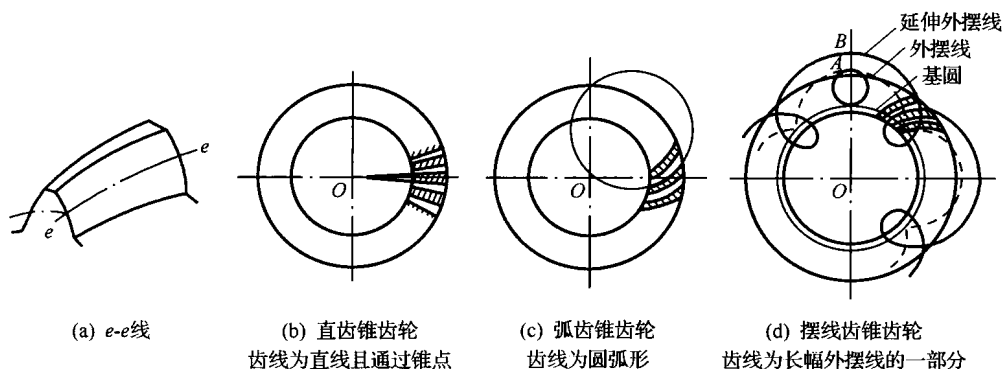


图 1.6 锥齿轮按齿面齿线分类

1.2 锥齿轮齿廓的形成

一对圆锥齿轮传动时，其锥顶相交于 O 点。显然，在两轮的轮齿上只有与锥顶 O 为等距离的对应点才能相互啮合。所以圆锥齿轮的共轭齿廓是分布在以锥顶 O 为球心的球面上，如图 1.7 所示。

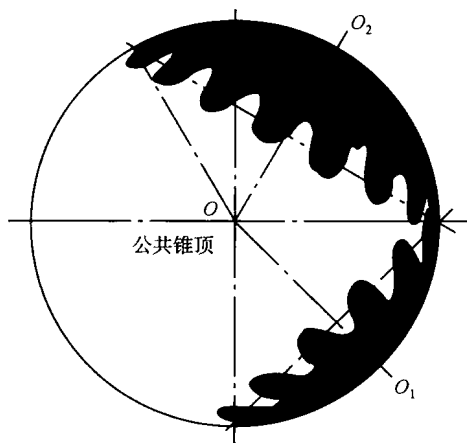


图 1.7 锥齿轮齿廓

为了保证圆锥齿轮机构传动的瞬时传动比为定值,端面齿廓曲线采用球面渐开线,而且由一系列不同半径球面上的渐开线组成圆锥齿轮的齿廓,如图 1.8 所示。球面渐开线的形成原理类似于平面渐开线的形成原理,有一母线长为 R 的基圆锥,发生面是半径为 R 的圆平面,当发生面切于基圆锥面,圆心重合于基圆锥顶点 O ,并绕基圆锥面纯滚动时,发生面圆周上任意点 K 自基圆锥底圆上展开的空间轨迹曲线必在半径为 R 的球面上,即称其为球面渐开线。同时,在发生面半径线 OK 上任意点 K' 也展开一条不同半径球面渐开线,无数个不同半径上 K' 点所展开的球面渐开线的集合构成了圆锥齿轮的齿廓曲面。

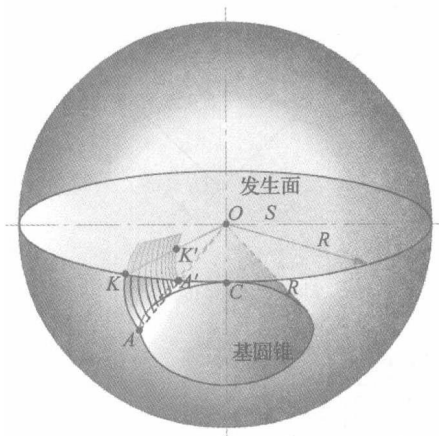


图 1.8 锥齿轮齿廓形成原理

上述直齿廓按相应的齿线方向扭转即形成相应的曲齿锥齿轮齿廓。

球面渐开线由于无法展为平面,为了便于设计、加工,需要用平面曲线来近似球面曲线。图 1.9 中, OAB 为分度圆锥, eA 和 fA 为轮齿在球面上的齿顶高和齿根高,过点 A 作直线 $AO_1 \perp AO$,与圆锥齿轮轴线交于点 O_1 ,若以 OO_1 为轴线, O_1A 为母线作一圆锥 O_1AB ,则称其为直齿圆锥齿轮的背锥。背锥与球面相切于直径为 AB 的圆,由于 A 、 B 附近背锥面与球面非常接近。因此,可以用背锥上的齿形近似代替直齿圆锥齿轮大端球面上的齿形,从而实现平面曲线近似球面曲线。

将背锥展成如图 1.10 所示的扇形齿轮,它的参数等于圆锥齿轮大端的参数,齿数就是圆锥齿轮的实际齿数 z 。将扇形齿轮补足,则齿数增加为 z_v 。这个补足后的直齿圆柱齿轮称为圆锥齿轮的当量齿轮,齿数称为当量齿数。其中

$$z_v = \frac{z}{\cos \delta} \quad (1.1)$$

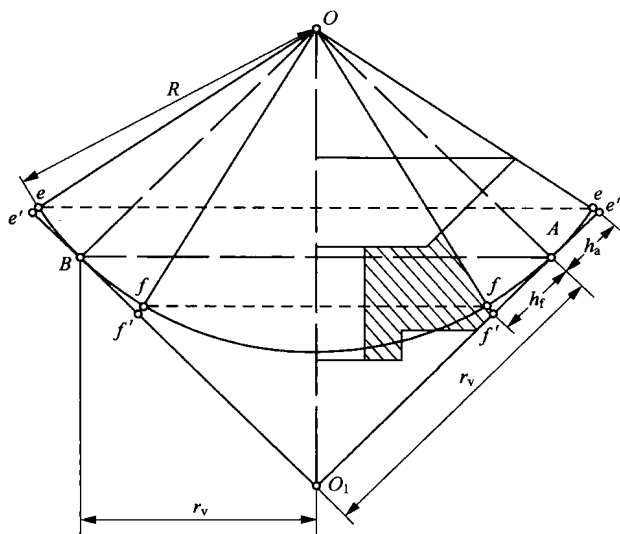


图 1.9 直齿锥齿轮的轴向半剖面图

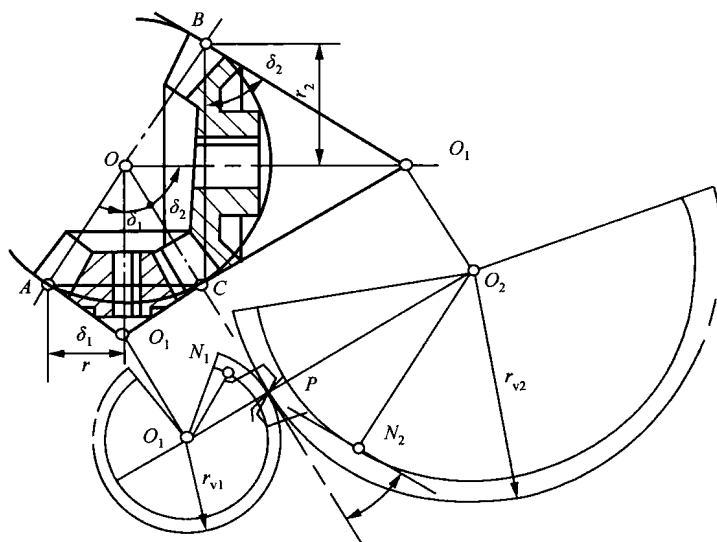


图 1.10 锥齿轮的当量齿轮