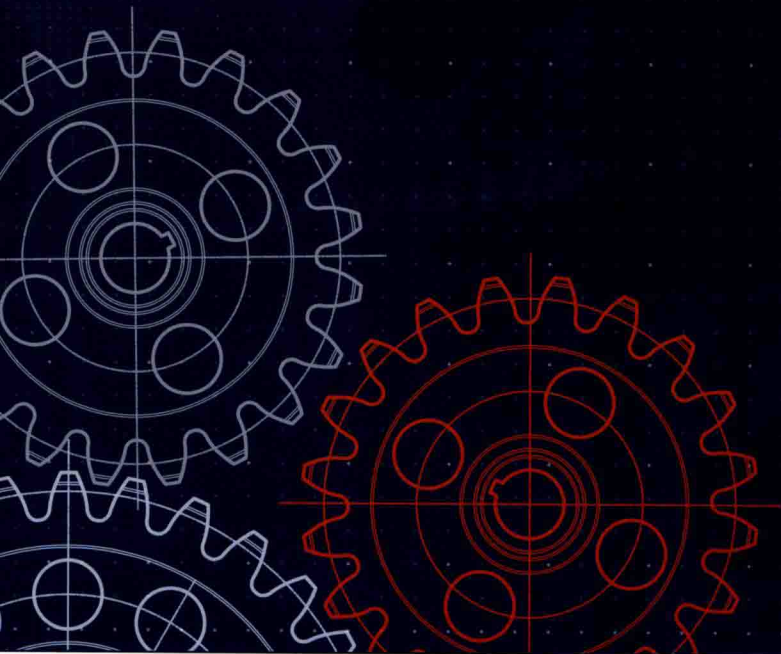


6455.65.224.2



渐开线圆柱齿轮 传动设计

赵振杰 著

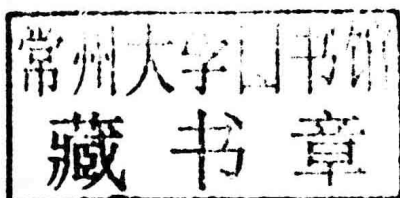
非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

渐开线圆柱齿轮传动设计

赵振杰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书主要对渐开线圆柱直齿、斜齿、人字齿轮传动的设计方法进行讨论。力求做到逻辑清晰,层次分明,便于读者对知识点的理解、掌握和运用。

全书共八章,第一章渐开线齿轮传动的基础理论,第二章渐开线直齿圆柱齿轮传动,第三章标准渐开线圆柱外齿轮的根切与变位齿轮传动,第四章内啮合渐开线圆柱齿轮传动,第五章斜齿渐开线圆柱齿轮传动,第六章圆柱齿轮传动的公差,第七章齿轮用材料以及热处理,第八章渐开线圆柱齿轮传动的设计计算。

本书可以作为机械类的工程技术人员的参考书和自学用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

渐开线圆柱齿轮传动设计 / 赵振杰著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5170-6014-7

I. ①渐… II. ①赵… III. ①齿轮传动—机械设计
IV. ①TH132.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第268496号

策划编辑: 石永峰

加工编辑: 张天娇

封面设计: 李 佳

书 名	渐开线圆柱齿轮传动设计
作 者	JIANKAIXIAN YUANZHU CHILUN CHUANDONG SHEJI 赵振杰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12印张 199千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

科学技术是人类智慧的结晶，随着人类社会的发展，机械出现在人们日常生活、生产、交通运输、军事和科研等各个领域，并且不断地要求机械最大限度地代替人的劳动，并产生更多更好的劳动成果。

齿轮传动是机械传动的主要形式之一，应用极为广泛，与其他传动相比，齿轮传动有很多优点，如传动比恒定不变、传动效率高、所传递的功率及速度范围大、结构紧凑、轴承压力小、工作可靠、运转维护简单及寿命长等。

齿轮传动的形式很多，有直齿圆柱齿轮传动、斜齿圆柱齿轮传动、人字齿轮传动、圆锥齿轮传动、交错轴斜齿轮传动、蜗杆传动等。

本书专注于应用最广泛的渐开线直齿、斜齿、人字齿的原理设计及应用，在编排过程中主要考虑了以下几个方面：

(1) 在结构顺序编排方面考虑较为合理，力求概念把握准确，叙述深入浅出、详略得当，便于循序渐进的学习。

(2) 重点突出，侧重于设计和应用，加强了基本理论及其有关设计方法的应用。

(3) 内容方面力求少而精，重点突出。

(4) 在内容编排上注重设计为主的思想，力求内容新颖，图文并茂，讲解通俗易懂。

由于编者水平有限，书中难免会有不妥和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 10 月

目 录

前言

第一章 渐开线齿轮传动的基础理论	1
1.1 齿轮传动的特点和类型	1
1.1.1 根据工作条件分类	1
1.1.2 根据齿轮的齿面硬度进行分类	2
1.1.3 根据齿轮轴线的相对位置进行分类	2
1.2 齿廓啮合基本定理与渐开线的形成和性质	4
1.2.1 齿廓啮合的基本定律	4
1.2.2 渐开线的形成与渐开线方程	6
1.2.3 渐开线的性质	7
第二章 渐开线直齿圆柱齿轮传动	9
2.1 渐开线标准直齿圆柱齿轮的几何尺寸和主要参数	9
2.1.1 渐开线齿轮的尺寸参数	9
2.1.2 渐开线齿轮的标准参数	12
2.2 渐开线标准直齿圆柱齿轮啮合传动的特点	15
2.2.1 正确啮合条件	15
2.2.2 渐开线齿轮连续传动的条件	17
2.2.3 齿轮传动的标准中心距	19
2.2.4 定传动比和可分性	19
2.3 渐开线齿轮传动的滑动率和重合度计算	21
2.3.1 渐开线齿轮传动的滑动率	21
2.3.2 标准渐开线齿轮传动的重合度计算	24
2.4 任意圆上的齿厚	26

2.5 齿轮与齿条啮合传动	28
第三章 标准渐开线圆柱外齿轮的根切与变位齿轮传动	30
3.1 标准齿轮的根切和最少齿数	30
3.1.1 标准渐开线齿轮的加工方法	30
3.1.2 标准渐开线齿轮的根切	33
3.2 变位齿轮传动	36
3.2.1 变位齿轮的加工原理	36
3.2.2 外啮合变位齿轮的几何计算	37
3.2.3 变位齿轮的用途	42
3.3 外啮合齿轮变位系数的选择	44
3.3.1 外啮合齿轮选择变位系数的基本原则	44
3.3.2 选择外啮合齿轮变位系数的限制条件	45
3.3.3 外啮合齿轮变位系数的选择	47
第四章 内啮合渐开线圆柱齿轮传动	51
4.1 内啮合标准齿轮传动	51
4.2 内啮合齿轮的顶切与干涉	52
4.2.1 内齿轮加工中的顶切	52
4.2.2 内啮合传动中的轮齿干涉	57
4.3 内啮合变位齿轮的特点	61
4.4 内啮合圆柱齿轮变位系数的选择原则	62
4.4.1 变位对内啮合齿轮强度的影响	63
4.4.2 变位对重合度、顶切以及两种干涉的影响	63
4.5 内啮合变位齿轮计算	63
4.5.1 无齿侧间隙啮合方程式和中心距变动系数	64
4.5.2 齿根圆直径	65
4.5.3 齿顶圆直径	66
4.5.4 滑动率与重合度	66

第五章 斜齿渐开线圆柱齿轮传动	67
5.1 斜齿轮齿面的形成以及啮合特点	67
5.2 斜齿圆柱齿轮的基本参数	68
5.2.1 螺旋角	68
5.2.2 周节与模数	70
5.2.3 压力角	71
5.2.4 齿顶高系数和径向间隙系数	72
5.2.5 其他几何尺寸	72
5.2.6 斜齿圆柱齿轮的正确啮合条件	73
5.3 斜齿圆柱齿轮传动的重迭系数和当量齿数	74
5.3.1 斜齿圆柱齿轮传动的重迭系数	74
5.3.2 斜齿圆柱齿轮的当量齿数	75
5.4 斜齿圆柱齿轮的变位和几何尺寸计算	77
5.4.1 斜齿圆柱齿轮的变位和几何尺寸计算	77
5.4.2 标准斜齿圆柱齿轮及其公法线长度的计算与测量	78
5.5 斜齿圆柱齿轮机构的优缺点以及人字齿轮	85
5.5.1 斜齿圆柱齿轮机构的主要优点	85
5.5.2 斜齿轮传动的主要缺点以及人字齿轮	86
第六章 圆柱齿轮传动的公差	89
6.1 概述	89
6.2 齿轮加工误差	90
6.3 第 I 组——影响运动准确性的误差	91
6.3.1 公法线长度变动—— ΔF_w	91
6.3.2 切向综合误差—— $\Delta F_i'$	92
6.3.3 径向综合误差—— $\Delta F_i''$	93
6.3.4 齿圈径向跳动—— ΔF_r	94
6.3.5 周节累积误差—— ΔF_P	96

6.4	第Ⅱ组——影响传动平稳性的误差	97
6.4.1	基节偏差—— Δf_{pb}	97
6.4.2	齿形误差—— Δf_f	99
6.4.3	螺旋线波度误差—— $\Delta f_{f\beta}$	100
6.4.4	周节偏差—— Δf_{pt}	101
6.4.5	径向一齿综合误差—— $\Delta f_i''$	101
6.4.6	切向一齿综合误差—— $\Delta f_i'$	102
6.5	第Ⅲ组——影响载荷分布均匀性的误差	102
6.5.1	轴向齿距偏差—— ΔF_{px}	104
6.5.2	接触线误差—— ΔF_b	104
6.5.3	齿向误差—— ΔF_{β}	105
6.6	齿轮副误差及其评定指标	106
6.6.1	齿轮副的中心距偏差—— Δf_a	106
6.6.2	轴线的平行度误差	106
6.7	渐开线圆柱齿轮精度	109
6.7.1	精度等级	109
6.7.2	齿轮副侧隙	119
6.7.3	量柱(球)测量跨距	127
6.7.4	齿坯精度	132
6.7.5	齿轮精度的标注	132
第七章	齿轮用材料以及热处理	134
7.1	齿轮传动的失效形式	134
7.1.1	轮齿折断	134
7.1.2	齿面塑性变形	135
7.1.3	齿面磨损	136
7.1.4	齿面疲劳点蚀	136
7.1.5	齿面胶合	137

7.2	齿轮传动的设计准则	138
7.3	齿轮常用材料及热处理	139
7.3.1	锻钢	139
7.3.2	铸钢	140
7.3.3	铸铁	140
7.3.4	非金属材料	140
第八章	渐开线圆柱齿轮传动的设计计算	154
8.1	渐开线圆柱齿轮传动主要参数的选择	154
8.1.1	齿数比 u	154
8.1.2	齿数 z	155
8.1.3	模数 m	155
8.1.4	螺旋角 β	155
8.1.5	齿宽系数 φ_m 、 φ_a 、 φ_d	155
8.1.6	重合度 ε_α 、 ε_β	156
8.1.7	齿轮精度等级	157
8.2	圆柱齿轮传动主要尺寸的初步确定	157
8.2.1	圆柱齿轮传动轮齿受力计算公式	157
8.2.2	主要尺寸的初步确定	158
8.3	齿面接触疲劳强度与齿根弯曲疲劳强度校核计算	159
8.3.1	计算公式	159
8.3.2	轮齿静强度校核	172
附录		173
参考文献		183

第一章 渐开线齿轮传动的基础理论

齿轮机构是最古老的传动机构之一。根据古书记载，我国早在两千多年前的西汉初年（公元前二世纪），就已经在农业、冶金业中应用了齿轮机构。尤其是早在两千多年前，我们的祖先就采用了所谓的人字齿轮，由此可见我国劳动人民在长期的生产实践中所积累的丰富经验和所表现出的聪明才智！

1.1 齿轮传动的特点和类型

齿轮传动是机械传动的主要形式之一，应用极为广泛。与其他传动相比，齿轮传动有很多优点：传动比恒定不变，传动效率高，传递的功率以及速度范围大，结构紧凑，工作可靠，运转维护简单以及使用寿命长等。其缺点是：高精度齿轮在制造时需要用特种机床及刀具加工，安装精度要求也很高，所以生产成本低；低精度齿轮在传动时，则会产生高噪音以及大的震动；不适合远距离传动等。

齿轮传动的分类方法有很多种，下面介绍在齿轮传动中常见的三种分类方法。

1.1.1 根据工作条件分类

（1）闭式传动：指将传动齿轮安装在润滑和密封条件良好的箱体内的传动，一般重要的齿轮传动都采用闭式传动。

（2）开式传动：指将传动齿轮暴露在外的传动，由于工作时容易落入灰尘，而且润滑不良，轮齿齿面极其容易被磨损，所以这种传动适用于简单的机械设备和低速的场合。

1.1.2 根据齿轮的齿面硬度进行分类

(1) 软齿面传动：若两个啮合齿轮的齿面硬度 $\leq 350\text{HBS}$ ，这种齿轮传动被称为软齿面传动。

(2) 硬齿面传动：若两个啮合齿轮的齿面硬度均 $>350\text{HBS}$ ，这种齿轮传动被称为硬齿面传动。

1.1.3 根据齿轮轴线的相对位置进行分类

根据齿轮传动中两齿轮轴线的相对位置，可以将齿轮传动分为平面齿轮传动和空间齿轮传动两大类。

1. 平面齿轮传动

用于传递两平行轴间运动和动力的齿轮传动称为平面齿轮传动。

(1) 直齿圆柱齿轮传动。

如图 1-1 至图 1-3 所示为直齿圆柱齿轮传动，其特点是齿轮的轮齿的齿向相对于齿轮的轴线是平行的。图 1-1 为齿轮齿条传动，图 1-2 为外啮合直齿圆柱齿轮传动，图 1-3 为内啮合直齿圆柱齿轮传动，其中齿条可以看成直径为无穷大的齿轮的一部分。



图 1-1 齿轮与齿条传动



图 1-2 直齿外啮合传动



图 1-3 直齿内啮合传动

(2) 斜齿圆柱齿轮传动。

图 1-4 为斜齿圆柱齿轮传动，该传动中轮齿的齿向与齿轮的轴线方向有一倾斜角，此角称为斜齿圆柱齿轮的螺旋角。

(3) 人字齿轮传动。

图 1-5 为人字齿轮传动, 该传动中的每个人字齿轮均可以看成是由两个螺旋方向相反的斜齿轮构成。



图 1-4 平行轴斜齿轮传动



图 1-5 人字齿轮传动

2. 空间齿轮传动

用于传递两相交轴或空间交错轴之间的运动和动力的齿轮传动称为空间齿轮传动。

(1) 圆锥齿轮传动。

圆锥齿轮传动用于两相交轴线之间的传动, 其轮齿分布在截锥体的表面上, 有直齿、斜齿和圆弧齿之分。如图 1-6 所示的直齿圆锥齿轮应用最广。

(2) 蜗杆传动。

蜗杆传动通常用于两交错垂直轴之间的传动, 如图 1-7 所示。

(3) 交错轴斜齿轮传动。

如图 1-8 所示为交错轴斜齿轮传动, 其中的每一个齿轮都是斜齿圆柱齿轮。

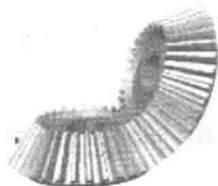


图 1-6 直齿圆锥齿轮传动



图 1-7 蜗杆传动



图 1-8 交错轴斜齿轮传动

1.2 齿廓啮合基本定理与渐开线的形成和性质

1.2.1 齿廓啮合的基本定律

齿轮机构是一种高副机构,它是利用共轭齿廓来传递运动的,所传递的主要运动形式是回转运动,因此有必要讨论齿轮机构两构件的角速度,我们把传递所需角速度比的两条齿廓曲线的相互接触,称为啮合。齿轮传动的基本要求之一是其瞬时传动比必须保持不变,否则当主动轮以相等角速度回转时,从动轮的角速度为变数,从而产生惯性力。该惯性力将影响齿轮的强度、寿命以及工作精度。齿廓啮合基本定律就是研究当齿廓形状符合何种条件时,才能满足这一基本要求。

如图 1-9 所示为两个相互啮合的齿廓 E_1 和 E_2 在 K 点接触,两轮的角速度分别为 ω_1 和 ω_2 。过 K 点作两齿廓的公法线 N_1N_2 ,与连心线 O_1O_2 交于 C 点。两轮齿廓上 K 点的速度分别为

$$\begin{cases} v_{k1} = \omega_1 \overline{O_1K} \\ v_{k2} = \omega_2 \overline{O_2K} \end{cases} \quad (1-1)$$

且 v_{k1} 和 v_{k2} 在法线 N_1N_2 上的分速度应该相等,否则两齿廓将会被压坏或分离,即

$$v_{k1} \cos \alpha_{k1} = v_{k2} \cos \alpha_{k2} \quad (1-2)$$

由式(1-1)与式(1-2)可得:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2K} \cos \alpha_{k2}}{\overline{O_1K} \cos \alpha_{k1}} \quad (1-3)$$

过 O_1 、 O_2 分别作 N_1N_2 的垂线 O_1N_1 和 O_2N_2 ,得 $\angle KO_1N_1 = \alpha_{k1}$ 、 $\angle KO_2N_2 = \alpha_{k2}$,所以式(1-3)可以写成:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2K} \cos \alpha_{k2}}{\overline{O_1K} \cos \alpha_{k1}} = \frac{\overline{O_2N_2}}{\overline{O_1N_1}} \quad (1-4)$$

又因为 $\triangle CO_1N_1 \sim \triangle CO_2N_2$ ，则式(1-4)又可以写成：

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2N_2}}{\overline{O_1N_1}} = \frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_1C}} \quad (1-5)$$

由式(1-1)可知，要保证传动比为定值，则比值 $\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_1C}}$ 应该是常数。因为两个轮轴心连线 $\overline{O_1O_2}$ 为定长，故如果要满足上述要求， C 点应为连心线上的定点，这个点 C 称为节点。

所以为了使齿轮保持恒定的传动比，必须使点为连心线上的固定点，或者说欲使齿轮保持定角速比，无论齿廓在任何位置接触，过接触点所作的齿廓公法线都必须与两轮的连心线相交于一个定点，这就是齿廓啮合的基本定律。

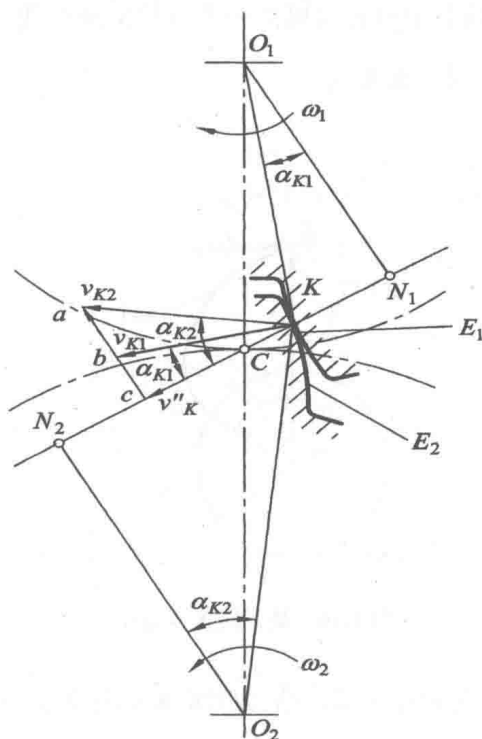


图 1-9 齿廓曲线与齿轮传动比的关系

凡是满足齿廓啮合基本定律而相互啮合的一对齿廓，称为共轭齿廓。满足齿

廓啮合基本定律的共轭齿廓曲线有无数种。传动齿轮的齿廓曲线除了要求满足角速度比值外,齿廓曲线的选择应考虑到加工和测量的方便,以及综合强度的大小等。目前机械传动机构中用得最多的齿廓曲线是渐开线,其次是圆弧和摆线。本书只讲述渐开线。

1.2.2 渐开线的形成与渐开线方程

当一条直线在一个圆上作纯滚动时,该直线上任一点的轨迹称为该圆的渐开线,这个圆称为基圆,该直线称为渐开线的发生线。如图 1-10 所示,发生线 $L1$ 从位置 E 处按逆时针方向沿基圆纯滚到位置 F 时,其上一一点 K 的轨迹 $inv1$ 称为渐开线,取渐开线上的一段曲线作为齿轮一侧的齿廓曲线。当发生线 $L1$ 从位置 E 沿顺时针方向滚动时,则其上点 K 将展出一条对称的渐开线,如图 1-10 中虚线 $inv2$ 所示,它是齿轮的另一侧齿廓曲线。

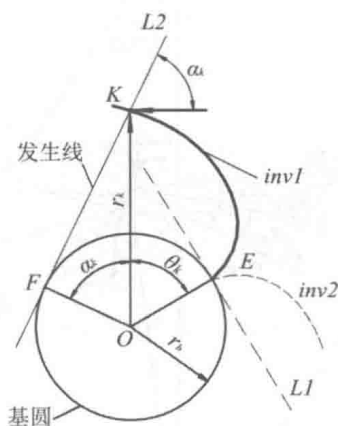


图 1-10 渐开线的形成图

渐开线在基圆上的起始点为 E , 则 $\angle EOK = \theta_k$ 称为渐开线上 K 点的展开角, $\angle KOF = \alpha_k$ 称为渐开线上 K 点的压力角, 显然, $\overline{KF} = r_b \tan \alpha_k$, 而 $\widehat{EF} = \overline{KF} = r_b(\theta_k + \alpha_k)$, 所以有:

$$r_k = \frac{r_b}{\cos\alpha_k} \quad (1-6)$$

$$\theta_k = \tan\alpha_k - \alpha_k \quad (1-7)$$

θ_k 常写为 $\text{inv}\alpha_k$ ，称为渐开线函数。

式(1-6)是以 α_k 为参数的渐开线参数方程。如果已知基圆半径 r_b ，则根据 α_k 的取值，可以求出 r_k 、 θ_k ，即能够求得渐开线上各点的极坐标。

渐开线上各点的压力角不相等，由等式 $\cos\alpha_k = r_b/r_k$ 可知，渐开线上离基圆越远的点压力角越大，渐开线在基圆上的压力角为 α_b 。

在渐开线齿轮的分析与参数计算中常用到上述以压力角为参数的渐开线方程，当压力角已知时，可以直接求得展开角，但当已知 θ_k 求 α_k 时，则需要解超越方程。为了应用方便，已编制成常用角度 $\alpha = 10^\circ \sim 39^\circ$ 的 $\text{inv}\alpha$ 函数表供查阅，见附录表1。

1.2.3 渐开线的性质

由上述渐开线的形成过程可以知道渐开线有如下性质：

(1) 发生在基圆上所滚过的圆弧 $\widehat{EK}$ 等于发生线上所滚过的长度 $\overline{EF}$ ，即 $\widehat{EK} = \overline{EF}$ 。

(2) 渐开线上任一点 K 的法线必切于基圆，并且为渐开线点的曲率半径。由此可知，渐开线上越接近基圆的点的曲率半径越小，曲率越大。基圆上点的曲率半径为0。

(3) 渐开线的形状决定于基圆的大小，如图 1-11 所示，基圆的半径越大，则渐开线越平直，当基圆半径为无限大时，渐开线成为直线(即齿条的齿形为直线)。

(4) 同一基圆上任意两条渐开线(不论是同向还是反向)之间的法向距离相等，如图 1-12 所示， $\overline{KK'} = \overline{K_1K'_1} = \widehat{EE'}$ 。

(5) 基圆以内无渐开线。

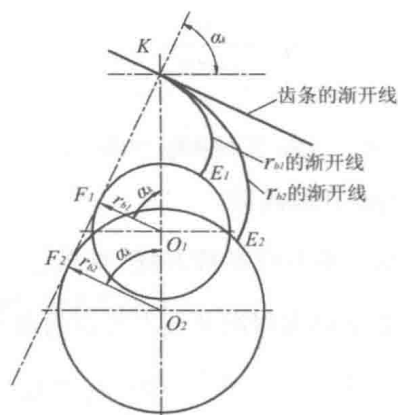


图 1-11 渐开线的形状与基圆大小的关系

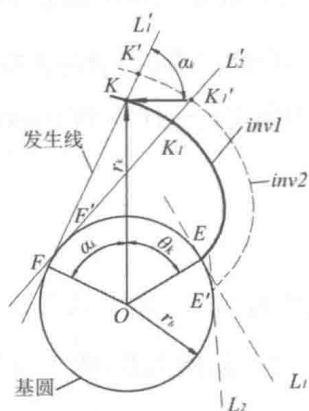


图 1-12 同一基圆的渐开线之间的关系