

机7-13)

高等学校教学参考书

---

# 机械原理

下 册

西北工业大学等校编

人民教育出版社

本书系以西北工业大学机械原理及机械零件教研组所编的“机械原理”(1960年版)为基础,于1961年3月间,经过西北工业大学、天津大学、哈尔滨工业大学、太原工学院、山东工学院、浙江大学、南京工学院等校机械原理课程的有关教师集体修改后而出版的。修改时注意吸取了各校几年来教育革命的成果,并选用了部分院校所编教材中的某些内容。1962年4月编者又根据半年来各校教师在使用本书时提出的意见作了局部修改。

全书共计十三章,分上、下两册出版。上册包括:绪论,机构的结构分析,机械中的摩擦,平面机构的运动分析,平面机构的动态静力分析,机器的运转和调速,机械的平衡,凸轮机构及其设计等八章;下册包括:齿轮机构及其设计,轮系及其设计,平面连杆机构及其设计,间歇传动机构及其他常用机构等五章。

## 机 械 原 理

### 下 册

西北工业大学等校编

人民教育出版社出版(北京沙滩后街)

民族印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

统一书号K150·10·1023 开本853×1168 1/16 印张8

字数215,000 印数103,801—153,500 定价(7)¥0.90

1960年9月合订本第1版(53,000册)

1961年6月第1版 1972年11月北京第13次印刷

## 重印说明

本书系文化大革命前原高等教育出版社出版。为了适应当前读者的需要，现由我社按原版重印，供教学参考。

人民教育出版社

一九七二年十一月

# 下册目录

第九章 齿輪机构及其設計	259
I 齿輪傳动的基本知識	259
§ 9-1 概述	259
§ 9-2 齿輪机构的分类	260
§ 9-3 齿廓啮合的基本定律	265
§ 9-4 渐开綫及其性质	266
§ 9-5 渐开綫齿廓的定传动比傳动	271
§ 9-6 标准齿輪各部分的名称及其基本尺寸	272
§ 9-7 渐开綫齿輪正确啮合的条件	278
§ 9-8 标准渐开綫齿輪的啮合傳动	280
§ 9-9 任意半徑上的齿厚	288
II 渐开綫齿輪傳动的质量指标	289
§ 9-10 渐开綫齿輪連續傳动的条件及其重合系数	289
§ 9-11 滑动系数	296
§ 9-12 几何压力系数及比压系数	302
III 齿輪制造	307
§ 9-13 齿輪制造的基本原理及方法	307
§ 9-14 渐开綫齿廓的根切現象	315
§ 9-15 标准齿輪不发生根切現象的最少齿数	318
IV 移距修正齿輪傳动	321
§ 9-16 以齿条型刀具切削移距修正齿輪的計算基础	321
§ 9-17 移距修正齿輪傳动	332
§ 9-18 移距系数的选择	339
V 斜齿圆柱齿輪傳动	340
§ 9-19 斜齿圆柱齿輪概述	340
§ 9-20 斜齿圆柱齿輪的周节、模数及压力角	342
§ 9-21 斜齿圆柱齿輪傳动的重合系数	344
§ 9-22 斜齿圆柱齿輪的当量齿数(又称选刀齿数)	345
§ 9-23 斜齿圆柱齿輪的正确啮合条件	347
§ 9-24 斜齿圆柱齿輪的齿頂系数、齿根系数、徑隙系数及移距系数	348
§ 9-25 斜齿圆柱齿輪傳动的几何計算	348
§ 9-26 斜齿圆柱齿輪的优缺点、人字齿輪	349
VI 相錯軸之間的齿輪傳动机构	353

§ 9-27 螺旋齒輪傳動	353
§ 9-28 蝸輪蝸杆傳動	357
<b>VI 相交軸之間的齒輪傳動機構</b>	367
§ 9-29 圓錐齒輪概述	367
§ 9-30 圓錐齒輪的齒廓曲綫	369
§ 9-31 圓錐齒輪的背錐(輔助圓錐)及當量齒數	371
§ 9-32 圓錐齒輪的標準尺寸及其修正	374
§ 9-33 圓錐齒輪的製造	376
§ 9-34 圓弧錐齒輪	377
<b>VII 擺綫齒輪與針輪的基本知識</b>	380
§ 9-35 擺綫齒輪	380
§ 9-36 針輪	384
<b>IX 新型齒輪</b>	385
§ 9-37 圓弧點啮合齒輪	385
習題	390
<b>第十章 輪系及其設計</b>	409
§ 10-1 輪系的功用及其分類	409
§ 10-2 輪系的傳動比及其符號	418
§ 10-3 定軸輪系傳動比的計算	414
§ 10-4 我國古代發明的指南車與記里鼓車	417
§ 10-5 周轉輪系及其傳動比的計算	420
§ 10-6 混合輪系傳動比的計算	430
§ 10-7 定軸輪系的效率	431
§ 10-8 行星輪系的效率	434
§ 10-9 輪系設計	438
習題	452
<b>第十一章 平面連杆機構及其設計</b>	456
§ 11-1 概述	456
§ 11-2 四杆機構的基本型式及其條件	458
§ 11-3 四杆機構的派生型式	463
§ 11-4 四杆機構設計的基本問題	468
§ 11-5 用圖解法設計平面四杆機構	469
§ 11-6 用分析法設計平面四杆機構	476
§ 11-7 用實驗法設計平面四杆機構	479
習題	481
<b>第十二章 間歇傳動機構</b>	483
§ 12-1 概述	483

---

§ 12-2 棘輪机构	483
§ 12-3 擒纵机构	487
§ 12-4 槽輪机构	488
§ 12-5 间歇齿輪及星輪机构	490
<b>第十三章 其他常用机构</b>	<b>493</b>
§ 13-1 概述	493
§ 13-2 变角传动机构——万向鉸鏈	493
§ 13-3 螺旋机构	499
§ 13-4 反向机构	501
§ 13-5 自动控制或调节的机构和装置	503

## 第九章 齿轮机构及其设计

### I 齿轮传动的基本知识

#### § 9-1 概述

齿轮机构是应用最广泛的传动机构之一。它可以用来传递平行轴、相交轴以及相错轴之间的传动，因此几乎所有近代的机械和仪器中均用到齿轮传动。

齿轮机构也是应用最早的一种传动机构。远在我国汉代所造的翻水车，三国时代所发明的指南车以及晋代所发明的记里鼓车中均已应用了完整的齿轮机构。根据这些记载，可以肯定地说，齿轮在我国的发明还远远地在这些记载之前。我国对于齿轮的发明不但很早，而且在全国范围内的应用也很广泛。在刘仙洲所著“中国在传动机件方面的发明”一文中，就列举了很多齿轮传动的应用实例，其中有些齿轮传动直到今天还为劳动人民广泛地采用着。水车就是个很好的例子，虽然由于地区及其自然条件的不同，所采用的动力有畜力、风力、水力或电力之别，但是齿轮传动的型式却是相似的。其他如水磨等等，也是如此。

早期的齿轮传动多用木料制成，其轮齿齿廓也多为直线，所以当时的齿轮传动不仅承载能力很小，而且其传动质量也很低，只能传递两轴之间的回转运动，并不能保证一定的传动比<sup>①</sup>，也不能保证传动的平稳。随着冶金技术的发展，人们采用了金属铸造的齿轮，因此提高了齿轮传动的承载能力和传动速度。但是由于齿廓曲线的不正确，动负荷

---

① 传动比是指互相传动的两构件之间瞬时角速度之比。

便成了一个突出的问题,因而促使人们来从事研究齿廓的理论问题和齿轮的加工制造问题。十六世纪时人们已知应用摆线作为齿轮的齿廓,到十八世纪,人们又建议采用渐开线作为齿轮的齿廓曲线,于是齿轮原理进一步得到发展。但十八世纪初还多用铸造齿轮。十八世纪中叶已采用分度法铣切齿轮。直至十九世纪初出现了第一部插齿机床以后,解决了大量生产高精度齿轮的问题,从此齿轮的应用便更加广泛了。齿轮的发展过程,充分地说明了一门科学技术的发展是与生产的发展以及其他有关科学技术的发展密切联系的,而尤其有赖于生产的发展。

现代齿轮的适用范围很广。齿轮直径可以小至1毫米以下,大至十几米;传递的动力可达数万马力;圆周速度可达150米/秒以上。由于齿轮的适用范围很广,效率较高,而且耐久可靠,因此在现代的各种机械中都广泛地应用齿轮传动,特别由于近来齿轮制造工艺的发展,许多特种齿轮加工机床相继出现,使齿轮制造走向大量生产,而且使加工精度也不断提高。加以修正齿轮的广泛采用,使齿轮的应用范围更加扩大,因此,齿轮在机器制造业中的重要性也就更为显著。尤其是近来点啮合的新型齿轮的出现,将进一步地促进机器制造业的发展。

### §9-2 齿轮机构的分类

按照互相啮合的一对齿轮的相对运动为平面运动或空间运动,齿轮机构可以分为平面齿轮机构及空间齿轮机构两类:

(1) 平面齿轮机构——凡互相传动的一对齿轮,其相对运动为平面运动者称为平面齿轮机构。平面齿轮机构的两轮轴互相平行,故两轮各点的运动平面也互相平行。在平面齿轮机构中,当传动比为常数时,构成齿轮机构的一对齿轮必为圆柱形的齿轮或简称圆柱齿轮。按照轮齿和轮轴的相对方向,圆柱齿轮又可分为:

a) 直齿圆柱齿轮——俗称正齿轮,其轮齿的素线与轴互相平行。



正齒輪傳動按照兩軸的運動方向又  
可分為：

i) 外接齒輪傳動——兩齒輪  
的轉動方向相反，如圖 9-1 所示。

ii) 內接齒輪傳動——兩齒輪  
的轉動方向相同。如圖 9-2 所示。

iii) 齒輪與齒條傳動，如圖 9-3  
所示。

b) 斜齒圓柱齒輪——俗稱斜  
齒輪，其輪齒的素綫乃是对輪軸傾  
斜某一角度的直綫，如圖 9-4 所示。  
斜齒輪也可以分為外接齒輪、內接  
齒輪以及齒輪與齒條等三種傳動。

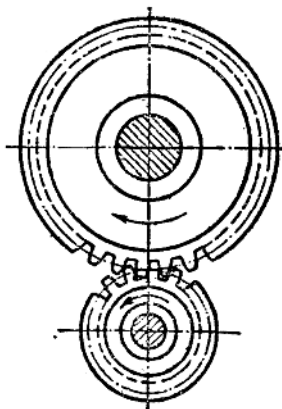


圖 9-1

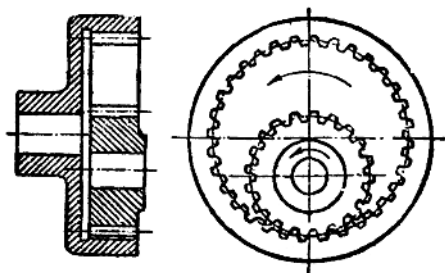


圖 9-2

(2) 空間齒輪機構——凡互相傳動的一對齒輪，其相對運動為空間運動者稱為空間齒輪機構。在空間齒輪機構中，兩輪的運動平面互不平行。空間齒輪機構按其兩輪軸的相對位置又可分為兩種：

a) 傳遞相交兩軸運動的齒輪機構——如圖 9-5 所示，傳遞相交兩軸的運動的齒輪機構為圓錐齒輪（或稱傘齒輪）。其輪齒是排列在圓錐

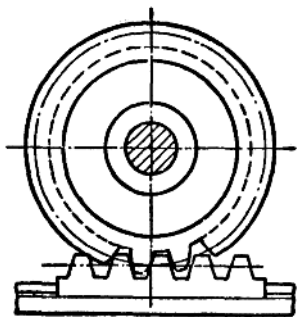


圖 9-3

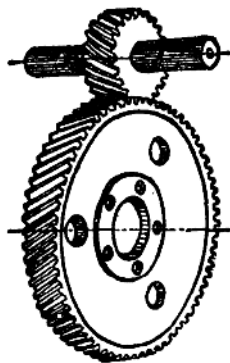


圖 9-4

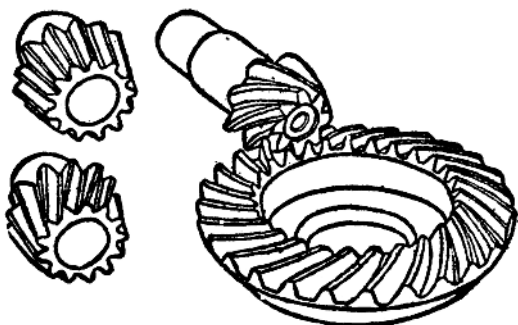


圖 9-5

體表面上的。依其輪齒的形狀，圓錐齒輪又分為直齒圓錐齒輪、斜齒圓錐齒輪及曲齒圓錐齒輪三種。

b) 傳遞相錯兩軸（不平行也不相交）的運動的齒輪機構——這又有下列三種：

i) 雙曲綫體齒輪傳動——如圖 9-6 所示，雙曲綫體齒輪的輪齒排

列在雙曲綫體的表面上，輪齒的素綫為傾斜的直綫。雙曲綫體齒輪雖有百年以上的歷史，但是由於製造困難，而且在傳動時沿輪齒的方向有很大的滑動，故實際上很少應用。

ii) **螺旋齒輪傳動**——如圖 9-6 所示，若僅截取雙曲綫體中頸部的一段  $A_2$  及  $B_2$ ，並近似地以圓柱齒輪來代替，則成為螺旋齒輪傳動(如圖 9-7 所示)。組成螺旋齒輪傳動的齒輪也是圓柱齒輪，只不過兩輪的

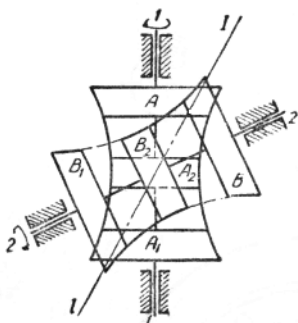


圖 9-6

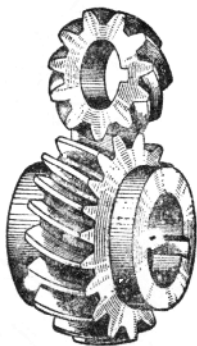


圖 9-7

軸是相錯的而已。一般螺旋齒輪傳動的两軸之間夾角(指兩軸在與其平行的平面上的投影的夾角)可以為任意值。當兩軸互相垂直，而且傳動比很大，以致小輪的輪齒能繞其輪面達一周以上時，則這種螺旋齒輪傳動特稱為**蝸桿與蝸輪傳動**(如圖 9-8 所示)。

iii) **偏斜錐齒輪傳動**——如圖 9-6 所示，若僅取雙曲綫體遠離頸部的兩段  $A_1$  及  $B_1$ ，並近似地以圓錐齒輪來代替，則成為偏斜圓錐齒輪傳動，亦即所謂**海拔齒輪**(гибондные колеса)，如圖 9-9 所示。組成這種齒輪傳動的齒輪與曲齒圓錐齒輪的外形相似，所不同者只是其兩輪軸並不相交而已。

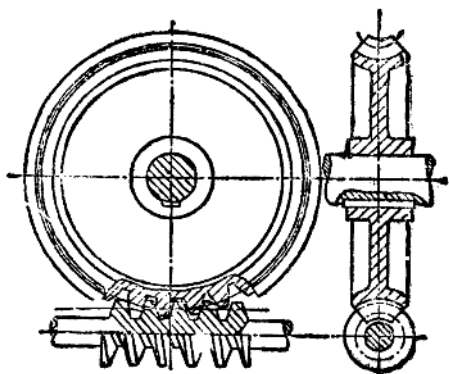


图 9-8

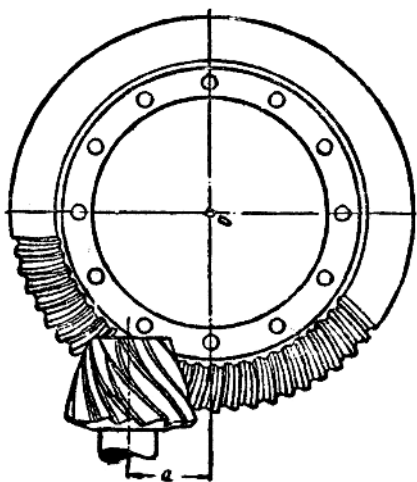


图 9-9

## § 9-3 齿廓啮合的基本定律

对齿轮传动最重要的要求就是其传动比必须恒为常数。否则当原动轮以等角速度回轉时，其从动轮的角速度将为变数，从而产生惯性力。这种惯性力不仅影响到齿轮的寿命而使其过早地破坏，同时也引起机器的振动，从而影响其工作精度。

当然，若就齿轮轉动的周数而論，則不論齿廓形状如何，齿轮傳动的轉数比恒能維持不变，且与其齿数成反比。但若欲使其每一瞬时的角速比亦为常数，則如前述，齿廓的形状便必须符合一定的条件。

为了弄清这一問題，首先有必要对齿轮角速比的变化規律加以研究。

如图 9-10 所示，齿轮 1 与 2 的齿廓  $\partial_1$  与  $\partial_2$  在  $K$  点相接触。两轮的角速度分别为  $\omega_1$  与  $\omega_2$ 。过  $K$  点作两齿廓的公法綫  $NN$ ，与連心綫  $O_1O_2$  相交于  $P$  点，則  $P$  点即为两齿轮的相对运动瞬心。因輪齿傳动实为高副机构的接触傳动，故由式(4-5)知其傳动比为

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{O_2P}{O_1P}, \quad (9-1)$$

即兩輪的角速度与連心綫被齿廓接触点的公法綫所分得的两綫段成反比。

以上关系也可用下面方法来求得。齿廓  $\partial_1$  上  $K_1$  点的速度  $v_1 (= \omega_1 \times O_1K)$ ；齿廓  $\partial_2$  上  $K_2$  点的速度为  $v_2 (= \omega_2 \times O_2K)$ 。  $K_2$  点与  $K_1$  点的速度  $v_2$  与  $v_1$  的关系应为

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}_{21},$$

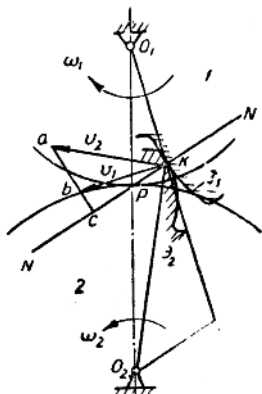


图 9-10

式中  $\vec{v}_1$  的大小和方向全知，而  $\vec{v}_2$  与  $\vec{v}_{21}$  的方向（后者与公法綫  $NN$  垂直）亦为已知。故可作其速度多边形，如图中所示的  $Kab$  即为其速度多边形。

过  $O_2$  作  $O_2Z \parallel NN$  使与  $O_2K$  的延長綫关于  $Z$  点。因  $\triangle Kab$  与  $\triangle KO_2Z$  的三边互相垂直，故  $\triangle Kab \sim \triangle KO_2Z$ ；因而

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{KZ}{O_2K},$$

或

$$\frac{\omega_1 \times O_1K}{\omega_2 \times O_2K} = \frac{KZ}{O_2K},$$

亦即

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{KZ}{O_1K}.$$

又因  $\triangle O_1O_2Z \sim \triangle O_1PK$ ，故

$$\frac{KZ}{O_1K} = \frac{O_1P}{O_1K},$$

因而

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{O_2P}{O_1P}.$$

由此可見，要使兩輪的角速比（或傳動比）恒定不變，則應使  $\frac{O_2P}{O_1P}$  恒为常数。但因兩輪的軸心  $O_1$  及  $O_2$  为定點，即  $O_1O_2$  为定長，故欲滿足上述要求，則必須使  $P$  成为連心綫上的一個固定點。此固定點  $P$  称为节点或嚙合極點。

如上所述，欲使齒輪傳動得到定傳動比，則其齒廓的形狀必須符合下列條件，即：不論輪齒齒廓在任何位置接觸時，過接觸點所作齒廓的公法綫必須通過节点  $P$ 。此即为齒廓嚙合的基本定律。

凡能適合上述定律而互相嚙合的一對齒廓称为共軛齒廓。理論上共軛齒廓有無窮多；任意給定一個一定曲綫的齒廓，都可以求出與其共軛的另一齒廓。但是這樣的任意齒廓往往在繪制、加工、安裝和使用方面都不方便，而且又不能互換，所以工程上通用的齒廓曲綫多为擺綫和漸開綫兩種。由于漸開綫齒廓易于製造和安裝，而且互換性大，故近代齒輪几乎完全應用漸開綫齒廓。

#### §9-4 漸開綫及其性質

如前所述，現代絕大部分的齒輪齒廓曲綫是漸開綫。為了研究漸

开线齿轮的特性,就有必要对渐开线的性质加以详细的研究。

如图 9-11 所示,当一直线沿一圆周作纯滚动(即无滑动的滚动)时,此直线上任一点的轨迹即称为该圆的渐开线。此圆称为渐开线的基圆,而该直线则称为其发生线。

根据渐开线的形成过程,知其有以下特性:

(1) 因发生线在基圆上作无滑动的滚动,故发生线上所滚过的一段长度必等于其在基圆上所滚过的一段圆弧的长度,即

$$\overset{\frown}{AB} = BK.$$

(2) 当发生线  $II-II$  沿基圆作无滑动的滚动时,  $B$  点即为其瞬时中心,故  $BK$  线就是渐开线在  $K$  点的法线。又因为  $BK$  线切于基圆,从而得出以下结论:渐开线上任意一点的法线必与其基圆相切;反之亦然(即基圆上的切线必为渐开线上某一点的法线)。

又  $BK$  线段亦为渐开线在  $K$  点之曲率半径,由图可见:渐开线愈接近基圆的部分,其曲率半径愈小,即曲率愈大。

(3) 渐开线的形状完全决定于基圆的大小。在同样大小的基圆上所生成的渐开线亦必完全相同;反之,若基圆的大小不同,则其生成的渐开线也不相同。如图 9-12 所示,当基圆

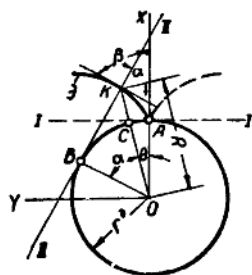


图 9-11

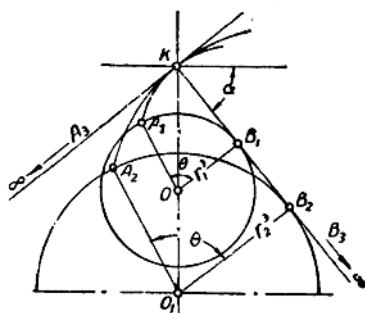


图 9-12

愈大時，漸開綫在其對應點(如  $K$  點)上的曲率半徑  $\rho$  亦愈大，即漸開綫的曲率愈小。又假如基圓半徑為無窮大，則其漸開綫將成為垂直於  $B_3K$  的直綫，以後所要討論的齒條，其齒廓就是直綫。

#### (4) 基圓以內無漸開綫。

根據漸開綫的定義可以導出漸開綫的數學方程式。

如圖 9-11 所示，當發生綫沿逆時針方向由  $I-I$  位置滾到  $II-II$  位置時，其上  $A$  點展出漸開綫  $AK$ 。連  $OA, OK$  及  $OB$ ，且令  $\angle AOK = \theta$ ， $\angle KOB = \alpha$ ， $OK = R$ ， $r^0 =$  基圓半徑，則  $K$  點的極坐標由角  $\theta$  和向徑  $R$  來確定。

$$\text{因} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{BK}{OB} = \frac{\overset{\frown}{AB}}{r^0} = \frac{r^0(\alpha + \theta)}{r^0} = \alpha + \theta,$$

$$\text{故} \quad \theta = \operatorname{tg} \alpha - \alpha.$$

角  $\theta$  稱為漸開綫  $AK$  的展角，又稱為角  $\alpha$  的漸開綫函數，其值隨參數  $\alpha$  而異。在工程上漸開綫函數通常用  $\operatorname{inv} \alpha$  表示，即

$$\operatorname{inv} \alpha = \operatorname{tg} \alpha - \alpha. \quad (9-2)$$

當  $\alpha$  已知時，則可由上式求出漸開綫函數  $\operatorname{inv} \alpha$ ；反之亦然。工程上已將不同  $\alpha$  值的漸開綫函數列成漸開綫函數表(見表 9-1)，以便應用。

齒廓上任一點法向壓力的方向綫(即齒廓曲綫在該點的法綫)和該點速度方向之間的夾角稱為齒廓在該點的壓力角。今漸開綫齒廓上  $K$  點的法向壓力是沿法綫  $KB$  方向的，而  $K$  點速度的方向垂直於  $OK$ ，所以  $OB$  及  $OK$  的夾角，即為漸開綫在  $K$  點的壓力角。由圖可知

$$\cos \alpha = \frac{r^0}{R}. \quad (9-3)$$

又由上式可知，壓力角  $\alpha$  的大小隨  $K$  點的位置而異，亦即漸開綫上各點壓力角的大小並不相等， $K$  點距輪心愈遠(即  $R$  愈大)時其壓力角愈大。



表 9-1. 渐开线函数

$\alpha^\circ$	次	0'	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'
1	0.000	00177	00325	00281	00346	00420	00501	00598	00704	00821	00950	01092	01248
2	0.000	01418	01603	01804	02020	02253	02503	02771	03058	03364	03689	04035	04402
3	0.000	04790	05201	05634	06091	06573	07079	07610	08167	08751	09362	10000	10668
4	0.000	11364	12190	12847	13634	14453	15305	16189	17107	18059	19045	20067	21125
5	0.000	22220	23352	24522	25731	26978	28266	29594	30963	32374	33827	35324	36861
6	0.00	03845	04008	04175	04347	04524	04706	04897	05093	05280	05481	05687	05898
7	0.00	06115	06337	06564	06797	07035	07279	07528	07783	08044	08310	08582	08861
8	0.00	19145	09435	09732	10034	10343	10559	10980	11303	11643	11981	12332	12687
9	0.00	03048	13416	13792	14174	14563	14960	15363	15774	16193	16618	17051	17492
10	0.00	17941	18397	18860	19332	19812	20299	20795	21299	21810	22330	22859	23396
11	0.00	23941	24495	25057	25628	26208	26797	27394	28001	28616	29241	29875	30518
12	0.00	31171	31832	32504	33185	33875	34575	35285	36005	36735	37471	38224	38984
13	0.00	39754	40534	41325	42126	42938	43760	44593	45437	46291	47157	48033	48921
14	0.00	49819	50729	51650	52582	53526	54482	55448	56427	57417	58420	59434	60460
15	0.00	61498	62548	63611	64636	65733	66873	67985	69110	70248	71398	72561	73738
16	0.0	07493	07613	07735	07857	07982	80107	08234	08362	08492	08623	08756	08889
17	0.0	09025	09161	09299	09439	09580	09722	09866	10012	10158	10307	10456	10603
18	0.0	10760	10915	11071	11228	11387	11547	11709	11873	12038	12205	12373	12543
19	0.0	12715	12888	13063	13240	13418	13598	13779	13963	14148	14334	14523	14713
20	0.0	14904	15098	15293	15490	15689	15890	16092	16296	16502	16710	16920	17132
21	0.0	17345	17560	17777	17996	18217	18440	18665	18891	19120	19350	19583	19817
22	0.0	20054	20292	20533	20775	21019	21266	21514	21765	22018	22272	22529	22788
23	0.0	23049	23312	23577	23845	24114	24386	24660	24936	25214	25495	25778	26062
24	0.0	26350	26639	26931	27225	27521	27820	28121	28424	28729	29037	29348	29660
25	0.0	29975	30293	30613	30935	31260	31587	31917	32249	32583	32920	33260	33602
26	0.0	33947	34294	34644	34997	35352	35709	36069	36432	36798	37166	37537	37910
27	0.0	38287	38666	39047	39432	39819	40209	40602	40997	41395	41797	42201	42607
28	0.0	43017	43430	43845	44264	44635	45110	45537	45967	46400	46837	47278	47718
29	0.0	48164	48612	49064	49518	49976	50437	50901	51368	51838	52312	52788	53268
30	0.0	53751	54238	54728	55221	55717	56217	56720	57226	57736	58249	58765	59285
31	0.0	59809	60336	60868	61400	61937	62478	63022	63570	64122	64677	65236	65799
32	0.0	66364	66934	67507	68084	68665	69250	69838	70430	71026	71626	72230	72838
33	0.0	73449	74064	74684	75307	75934	76565	77200	77839	78483	79130	79781	80437