

圆弧齿轮

第2版

邵家辉 主编

机械工业出版社

375635

圆 弧 齿 轮

第 2 版

邵家辉 主编



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书第1版于1980年出版。出版后受到读者的广泛欢迎与好评，因此荣获全国第一届优秀科技图书奖。

自本书第1版出版后的近10年来，我国在圆弧齿轮的科研和生产实践上又取得了很大的发展，并在标准化方面取得了长足进步。为了把这些新成果、新标准介绍给读者，所以对本书进行了修订。本书内容主要包括圆弧齿轮的啮合理论、齿形设计、承载能力计算、制造工艺、滚刀设计与制造、齿轮精度与检测、齿轮试验方法、装配维修与润滑，以及发展前景等。

本书可供从事圆弧齿轮设计、制造、使用方面的工程技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

圆弧齿轮/邵家辉主编.—2版.—北京：机械工业出版社，1994.10

ISBN 7-111-04031-7

I. 圆…

II. 邵…

III. 圆弧齿轮

IV. TH132.416

出版人 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑：冯宗青 版式设计：胡金瑛 责任校对：肖新民
封面设计：方 芬 责任印制：王国光

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1980年6月第1版·1994年7月第2版·1994年7月第3次印刷
787mm×1092mm^{1/32}·12.125印张·263千字
20 201—21 800册
定价：14.50元

前 言

圆弧齿轮是一种高承载能力的动力传动齿轮。圆弧齿轮由于其齿形特点，因而具有很高的接触强度和弯曲强度。

圆弧齿轮是一种点啮合制的齿轮传动，运动的传递依靠接触迹沿轴向移动而实现。所以与传统的、线啮合制的渐开线齿轮传动完全不同。因此，不仅在设计上有不同的考虑和计算方法，而且在制造、检测、安装和使用等各个方面都有特殊要求。只有在全面保证设计、制造、安装和使用的质量条件下，才能获得良好的效果。如果只套用渐开线齿轮的应用经验，往往将导致圆弧齿轮的早期失效，这是必须注意的。

本书于1980年出版了第1版。它总结了建国以来我国在圆弧齿轮方面的科研和生产实践上的成果，对推动圆弧齿轮在冶金、矿山、石油化工、煤炭、电力、建材、船舶、核工业及高速设备中的应用起了很大作用，并取得了巨大的经济效益，因此本书荣获了全国第一届优秀科技图书奖。但是自本书第1版出版以来，尤其是近10年来，圆弧齿轮在理论上和实践上又有了飞跃发展：建立了具有我国特色的圆弧齿轮点啮合理论；承载能力计算方法；检测方法与计算；热弹流润滑分析与计算；刀具设计，加工制造新方法等。从1985年开始，先后制订了五大基础标准（齿形、模数、精度、滚刀、承载能力计算方法），为圆弧齿轮的推广应用，开创了新的局面。因此，为了把这些新的科技成果、生产经验、新标

IV

准介绍给读者，使圆弧齿轮传动在经济建设中起到更大的作用，故对本书进行了修订。

本书除第四、八章由邵家辉教授和沈绍槐高级讲师共同编写外，其它各章均由邵家辉编写。

由于水平所限，错误与缺点在所难免，希望读者批评指正。

符 号 说 明

主 要 符 号

- a —— 中心距
- b —— 齿宽
- c —— 顶隙
- d —— 直径, 孔径, 节圆直径
- d_a —— 齿顶圆直径
- d_f —— 齿根圆直径
- d_e —— 滚刀外径
- D —— 滚刀内孔直径
- e_f —— 凹齿接触点处槽宽
- B —— 综合弹性模量
- E_1 —— 小齿轮材料弹性模量
- E_2 —— 大齿轮材料弹性模量
- F —— 力、圆周力
- F_r —— 径向力
- F_x —— 轴向力
- F_n —— 法向力
- F_t —— 端面节圆上的圆周力
- h —— 全齿高
- h_a —— 齿顶高
- h_f —— 齿根高
- h_K —— 接触点离节线高度
- h_e —— 齿顶修缘高度

- H ——滚刀槽深
 $\bar{h}$ ——弦齿高
 i ——传动比
 j ——侧隙
 k ——公法线跨齿数, 铲背量、曲率
 k_1 ——二次铲背量
 K_A ——使用系数
 K_v ——动载系数
 K_1 ——接触迹间载荷分配系数
 K_{H2} ——接触强度计算的接触迹内载荷分布系数
 K_{F2} ——弯曲强度计算的接触迹内载荷分布系数
 $K_{\Delta r}$ ——接触迹系数
 L ——滚刀长度
 L_1 ——滚刀工作部分长度
 l_a ——凸齿齿廓圆心偏移量
 l_f ——凹齿齿廓圆心偏移量
 m ——模数
 n ——转速
 N_L ——应力循环次数
 N_v ——当量应力循环次数
 P ——齿距、螺旋参数
 p_x ——导程
 P_1 ——小齿轮的名义功率
 q_{TA} ——同一齿上两个接触点间的轴向距离
 Q_1 ——减速器产生的热量
 Q_2 ——减速器散发的热量
 r, R ——半径
 r_j ——齿腰连接圆弧半径
 r_k ——凹齿齿根圆弧半径

s ——齿厚

$\bar{s}_a$ ——凸齿接触点处齿厚

s_a ——凸齿节圆齿厚

s_f ——凹齿节圆齿厚

$\bar{s}$ ——弦齿厚

S_H ——接触强度的计算安全系数

$S_{H\min}$ ——接触强度的最小安全系数

S_F ——弯曲强度的计算安全系数

$S_{F\min}$ ——弯曲强度的最小安全系数

ΔS ——齿端修薄量

T ——扭矩

t ——时间、温度

u ——齿数比

v ——圆周速度

v_k ——轴向滚动速度

v_c ——相对滑动速度

W ——公法线长度

X_a ——凸齿齿廓圆心移距量

X_f ——凹齿齿廓圆心移距量

Y_E ——弯曲强度计算的弹性系数

Y_{End} ——齿端系数

Y_F ——齿形系数

Y_N ——弯曲强度计算的寿命系数

Y_u ——弯曲强度计算的齿数比系数

Y_β ——弯曲强度计算的螺旋角系数

Y_X ——尺寸系数

Z_a ——接触弧长系数

Z_E ——接触强度计算的弹性系数

Z_L ——润滑剂系数

X

- Z_N ——接触强度计算的寿命系数
- Z_u ——接触强度计算的齿数比系数
- Z_v ——速度系数
- Z_β ——接触强度计算的螺旋角系数
- z ——齿数
- z_v ——当量齿数
- z_k ——滚刀容屑槽数
- α_s ——端面压力角
- α ——压力角、滚刀后角
- α_0 ——名义压力角、压粘系数
- α_a ——齿顶压力角
- β ——螺旋角
- γ ——滚刀前角
- γ_x ——滚刀螺旋升角
- δ_1 ——凸齿工艺角
- δ_2 ——凹齿工艺角
- ε_a ——端面重合度
- ε_β ——纵向重合度
- ε_s ——总重合度
- $\Delta\varepsilon$ ——纵向重合度的尾数部分
- η ——效率
- θ ——滚刀槽角
- λ ——膜厚比
- μ_s ——纵向重合度的整数部分
- ν ——粘度
- ν_1 、 ν_2 ——小齿轮、大齿轮的泊桑比
- ξ ——力-速度因子
- σ_H ——计算接触应力
- σ_{HP} ——许用接触应力

- σ_{Hlim} —— 试验齿轮的接触疲劳极限
 σ_F —— 计算弯曲应力
 σ_{FP} —— 许用弯曲应力
 σ_{Flim} —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限
 σ_{sx} —— 轮齿心部材料的屈服极限
 ρ —— 曲率半径
 ρ_n —— 相对曲率半径
 ρ_a —— 凸齿齿廓圆弧半径
 ρ_f —— 凹齿齿廓圆弧半径
 ω —— 转速

角 标

- a —— 齿顶的
 f —— 齿根的
 n —— 法面的、法向的
 r —— 径向的
 t —— 切向的
 x —— 轴向的
 1 —— 小齿轮上的
 2 —— 大齿轮上的

目 录

前言

符号说明

第一章 总论	1
第一节 圆弧齿轮的发展史	1
第二节 圆弧齿轮的应用与发展概况	7
第三节 圆弧齿轮的应用范围及其使用前景	11
第二章 圆弧齿轮传动的基本理论	13
第一节 圆弧齿轮传动的基本原理	13
第二节 圆弧齿轮的齿面特性	17
第三节 圆弧齿轮的正确啮合条件	23
第四节 圆弧齿轮的齿面方程式	25
第五节 圆弧齿轮的接触迹线和啮合线	33
第六节 圆弧齿轮的运动特性	36
第七节 圆弧齿轮的啮合特性	40
第八节 圆弧齿轮齿面的曲率问题	57
第九节 圆弧齿轮的变位和中心距敏感性	67
第三章 圆弧齿轮齿形设计与计算	72
第一节 单啮合线圆弧齿轮传动	72
第二节 双啮合线圆弧齿轮传动	76
第三节 圆弧齿轮齿形参数的选择	86
第四节 双圆弧齿轮的齿形计算	95
第四章 圆弧齿轮传动的设计计算	100
第一节 圆弧齿轮几何参数和尺寸计算	100
第二节 圆弧齿轮的失效形式及其防止措施	100
第三节 圆弧齿轮基本参数的选择	109

第四节	圆弧齿轮的强度计算	113
第五节	圆弧齿轮材料的选择	154
第六节	设计计算举例	158
第五章	圆弧齿轮制造工艺	167
第一节	圆弧齿轮的工艺特性	167
第二节	圆弧齿轮的齿坯加工	170
第三节	圆弧齿轮的滚齿工艺	172
第四节	圆弧齿轮其他加工方法简述	186
第五节	圆弧齿轮的跑合	190
第六章	圆弧齿轮滚刀的设计和制造	192
第一节	概述	192
第二节	圆弧齿轮滚刀的主要参数及设计计算	193
第三节	圆弧齿轮滚刀的技术条件和公差	213
第四节	圆弧齿轮滚刀的齿形计算	222
第五节	圆弧齿轮滚刀的制造	229
第七章	圆弧齿轮传动公差和测量	235
第一节	圆弧圆柱齿轮的精度和公差	235
第二节	圆弧圆柱齿轮测量尺寸计算	258
第三节	圆弧齿轮测量方法与测量工具	290
第八章	圆弧齿轮的试验	294
第一节	概述	294
第二节	齿轮试验台的基本原理与结构	294
第三节	圆弧齿轮的承载能力试验	309
第四节	圆弧齿轮的其他性能试验	313
第九章	圆弧齿轮的装配和维修	326
第一节	圆弧齿轮的装配与安装	326
第二节	圆弧齿轮的使用与维修	340
第十章	圆弧齿轮传动的润滑与冷却	342
第一节	圆弧齿轮的润滑	342
第二节	圆弧齿轮减速器的散热与冷却	365
	参考文献	369

第一章 总 论

第一节 圆弧齿轮的发展史

齿轮传动是现代各类机械中应用最广的一种基本传动形式。齿轮传动是靠主动轮的轮齿依次推压从动轮的轮齿以实现传递运动和动力。由于各种机器中齿轮的传动都是一个复杂的运动过程,包含着许多有关强度(折断、点蚀、胶合、磨损、塑性变形等)、使用寿命和传动质量(冲击、振动、噪声)等方面的矛盾,因此设计时要综合考虑各方面的因素,特别是下述各方面的基本要求:

1) 啮合过程中,轮齿的传递要平稳连续,即齿轮传动时的瞬时速比不变(或按预定规律变化)。传动时齿廓不允许出现干涉。

2) 相啮合的轮齿表面尽可能地紧密贴合,以保证高的接触强度。

3) 轮齿的断面要厚,以保证高的抗折断强度。

4) 传动时齿面间滑动要小,以减小磨损,提高效率。

5) 对传动零件的变形,轴的歪斜以及制造、装配误差的敏感性要小。

6) 齿廓形状要简单,以便于制造,降低成本,并容易达到较高的精度。

齿轮传动的发展和生产发展密切相关。在古代的齿轮传动中,由于齿轮传动的速度低、功率小,齿轮能相互传动就

已满足要求, 齿廓曲线采用最简单的直线, 例如我国古代水车上的齿轮。随着生产的发展, 齿轮传动的功率日益扩大, 速度越来越高, 轮齿齿廓曲线的选择就显得十分重要。1674年丹麦天文学家 Olaf Roemer 提出了摆线作为轮齿齿廓曲线。由于摆线的制造和安装较困难, 限制了它的发展。1765年 Leonhard Euler 提出用渐开线作为轮齿齿廓曲线。渐开线齿廓在制造和安装上都显示出很大的优越性。经过 200 多年的实践, 获得了广泛的应用和发展。直到如今它也是最主要的齿轮轮廓曲线。一对啮合的渐开线齿轮, 其端面齿廓是共轭的, 为了保证正确的啮合传动, 只有在前一对齿脱离啮合之前, 随后的一对齿必须已进入啮合, 才能保证齿轮的连续传动。即端面重合度 ϵ_a 大于 1。显然, 端面重合度 ϵ_a 越大, 传动过程中, 同时啮合的轮齿对数越多, 传动越平稳。为了加大渐开线齿轮的端面重合度, 必须增加轮齿齿高。但是, 齿高越大, 轮齿的抗弯折断能力越低, 同时离节点远的齿面, 相对滑动速度越大, 摩擦损失也大, 从而导至效率降低。此外, 还易产生干涉或根切及齿顶变尖等缺点。增加重合度的另一种办法是采用渐开线斜齿轮。在渐开线斜齿轮传动中, 除了有端面重合度外, 还存在着因螺旋角而造成的延迟脱离啮合时间, 即增加了一个轮齿纵向重合度。轮齿纵向重合度随齿宽和螺旋角增加而增大。但螺旋角的增大, 将增加齿轮轴向力。齿宽的增加将影响载荷在齿面的均匀分布, 均有一定限制。

渐开线齿轮由于中心距的可分性及制造、测量方便等许多优点, 得到广泛应用, 但也存在着下述缺点:

1) 渐开线齿轮两轮齿在节点处啮合时, 两齿面之间的相对运动是纯滚动。但啮合点离节点越远, 则两啮合面之

间的滑动速度也越大。这种滑动，对于齿面的磨损、发热、传动平稳性和效率以及使用寿命都很不利。因此，渐开线齿轮滑动系数的大小（以齿根最大滑动系数为指标）要力求降低。

2) 渐开线外啮合齿轮传动是凸齿对凸齿的啮合传动，从接触强度来看，由于相对曲率半径较小，承载能力受到限制。

随着生产和科学技术的发展，对高速、重载、大功率的齿轮传动装置，提出了更高的要求。为了提高齿轮传动的承载能力和传动平稳性，目前在以下几方面采取措施：

1) 提高齿轮材料的质量，发展新钢种。

2) 发展各种热处理方法，如渗碳淬火、碳氮共渗，低温氮化等，提高齿面表面质量。

3) 改进工艺方法，如采用各种磨齿工艺、珩齿工艺，提高齿轮精度，可以很有效地提高齿轮传动质量，但成本也相应提高。

4) 应用电子计算机，对齿轮参数进行优化设计，充分发挥齿轮的潜力，使齿轮设计合理化。

5) 对齿轮进行变位和修形，如各种变位齿轮，其目的是防止根切、改变中心距、改善重合度和滑动比。对轮齿进行修顶挖根和螺旋线修正，可减小啮合冲击和动载荷。

6) 创造新的啮合制，采用渐开线以外的新齿形。设计各种新型齿轮机构。

圆弧齿轮的提出，即属于创造新的啮合制。将渐开线齿轮轮齿的凸面与凸面相接触，改变成齿廓为圆弧，使凸圆弧齿廓与凹圆弧齿廓相啮合，以增大相对曲率半径，提高接触强度。

早在1922年, Vichers-Bostock-Bramley 提出了凸、凹齿面相啮合的齿轮传动, 简称 VBB 齿轮(图1-1)。其齿形廓线本质上是摆线, 凸齿为长幅外摆线, 凹齿为长幅内摆线。在端面内仍有重合度 ε_a 。在接触强度方面, 由于啮合齿廓具有很大的相对曲率半径, 齿面接触应力比渐开线齿轮小得多。但是这种齿轮由于凹齿齿顶厚度很小, 因而弯曲强度较弱, 易于折断。这就限制了 VBB 齿轮的应用。

G. B. Grant 基于轴向啮合传动的概念, 曾建议将斜齿轮的齿顶高取成接近于零, 而使一对齿只在节圆上接触(图1-2), 完全靠轴向重合度来保证传动的连续性。这样的齿轮, 事实上与刀口接触相类似, 传动能力甚微。Grant 的想法是利用这种只在节圆上接触的齿轮传动, 齿面之间无滑动的特点, 应用于仪表, 作为不需要润滑的齿轮。但由于这种齿轮, 必须要有较大的齿宽, 而且对中心距的敏感性又很强。因而在生产上没有得到实际的应用, 但对于齿轮的发展却是一种启发。

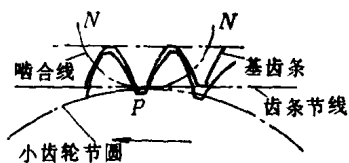


图1-1 端截面内的VBB齿轮

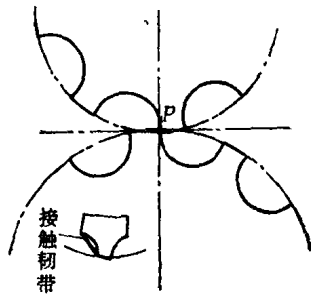


图1-2 葛朗特齿廓

1926年美国的 E. Wildhaber 提出的法面为圆弧齿廓的斜齿轮, 就是基于上述的概念而提出的, 如图1-3所示。凹齿齿廓圆弧半径 ρ_f 的圆心在齿条型刀具的节线上, 齿面啮

合时，凹齿齿廓圆心 P_2 和节点 P 重合。凸齿齿廓圆弧半径 ρ_c 比 ρ_f 减小一个 $\Delta\rho$ 值，其圆心 P_1 位于名义压力角 α 的半径线 KP 上。该齿轮为凸凹齿廓啮合，凸齿只有齿顶部分，凹齿只有齿根部分。由于受 VBB 齿轮断齿事故的影响，因此没有应用到工业生产上。

1956年，前苏联的诺维柯夫 (М. Л. НОВИКОВ) 又发明了一种端面为圆弧的圆弧齿轮。但为了制造方便，建议采用法面齿廓为圆弧。其齿廓形状如图1-4所示。凸齿齿廓的圆心 P_1 落在齿条型刀具的节线上，凹齿齿廓的圆弧半径比凸齿齿廓的圆弧半径大 $\Delta\rho$ 值，它的圆心 P_2 在名义压力角处半径延长线上。Wildhaber 齿廓和 НОВИКОВ 齿廓非常接近，所以国际上统称为 W-N 齿轮 (Wildhaber-Novikov 齿轮)。诺维柯夫对该种齿轮作了系统的理论分析和强度计算。因而在工业上得到广泛的应用。这种齿轮在跑合前，理论上啮合面仅在 K 点接触，所以又称为点接触齿轮。但加上载荷后，齿面发生弹性变形，再经过一段时间的运转，两啮合齿面逐渐磨合 (磨合)，凸齿齿廓在接触点处的曲率半径逐渐增大，凹齿齿廓在接触点处的曲率半径逐渐减小，两工作齿面的曲率半径逐渐趋于相等。两齿廓的圆弧中心逐渐向节点 P 趋近。

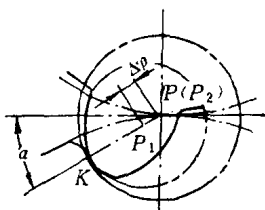


图1-3 维尔特哈泊建议
的圆弧齿轮

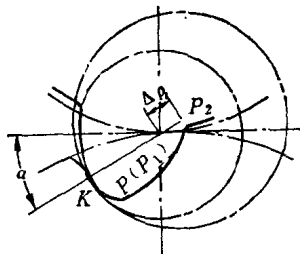


图1-4 诺维柯夫圆
弧齿轮