

渐开线外啮合 圆柱齿轮传动

朱景梓 张 展 秦立高 编著

国防工业出版社

TH132.417
Z87

347683

渐开线外啮合圆柱齿轮传动

朱景梓 张 展 秦立高 编著



国防工业出版社

DW02 / 01

内 容 简 介

本书对渐开线外啮合圆柱齿轮传动的啮合原理、直齿与斜齿圆柱齿轮的变位及其几何计算、齿根过渡曲线、齿廓修形与齿向修形、齿厚测量计算、齿轮精度标准 (GB10095-88)、圆柱齿轮的加工及其提高加工精度的方法、圆柱齿轮的测绘、齿轮噪声及其控制、齿轮传动的失效形式及其强度计算 (GB3480-83)、齿轮传动的摩擦、磨损与润滑等方面分别作了论述。书中引用了国内、外最新资料, 是大量实践经验的总结。书中列有大量实用的线图与数据, 便于实际应用。附录中附有常用计算数据、变位齿轮的 y_x 、 x_x 、 Δy_x 和啮合角 α' ($\alpha=20^\circ$ 时) 的数值表、以及渐开线函数表。

本书可供广大科研工作者与工程技术人员阅读, 也可供工院校师生参考。



渐开线圆柱齿轮传动

朱景村 张 展 秦立高 编著

查任编辑 林国方

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路22号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张12⁵/₈ 325千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷 印数: 0,001— 3,000册

ISBN 7-118-00669-6/TH·42

定价: 9.90元

前 言

齿轮是使用量大面广的传动元件，齿轮的生产水平是一个国家工业水平的象征之一。

齿轮传动在工业、农业、国防、科学技术及国民经济各部门中都得到广泛的应用，尤其在机械传动装置中，它是最重要的组成部分之一，齿轮的质量、性能和寿命直接影响着机电产品的性能和可靠性，由于齿轮传动的损坏而引起设备的故障、差错，会造成巨大的损失。例如，年产一百万吨钢板的轧机停产一天，其损失将达 500 万元。至于航天、宇航、舰船齿轮传动损坏，其损失更是无法估量。因此，齿轮这样一种应用十分广泛的基础元件，对工业、农业和现代国防将产生巨大的影响。同时，世界各国对于齿轮传动技术都十分重视。

随着机械工业的发展，目前齿轮朝大型、精密、高速、成套和自动化方向发展，有的则向小型、轻量化方向发展，技术水平不断提高，为了使机器在国际市场中具有更大的竞争能力，机器传递的功率愈来愈大，速度愈来愈快，精度愈来愈高，技术经济指标愈来愈先进。

为了适应智力开发和技术发展之需要，我们对渐开线外啮合圆柱齿轮传动的基本原理、变位与几何计算、齿廓修形和齿向修形、齿根过渡曲线、齿轮的加工与精度、齿轮的测绘、齿轮的噪声与对策、齿轮传动的失效形式与强度计算、齿轮传动的摩擦、磨损与润滑等一一作了论述。主要术语附有英文对照。

本书是为了适应教学、设计和制造的迫切需要而编写的。由于水平所限，其中的缺点和错误在所难免，敬希各位读者批评指正。

编著者

目 录

主要符号	1
第一章 概论	5
§ 1.1 齿轮传动在工业领域中的地位	5
§ 1.2 齿轮生产的特点与现状	6
§ 1.3 国外齿轮研究组织的概况	11
§ 1.4 齿轮传动技术的发展趋向	13
§ 1.5 齿轮传动的分类	17
第二章 圆柱齿轮啮合的基本原理	22
§ 2.1 齿廓啮合的基本定律	22
§ 2.2 渐开线及其性质	24
§ 2.3 渐开线齿轮的啮合传动	27
§ 2.4 齿条与齿轮的啮合	34
§ 2.5 齿轮传动的滑动系数	36
§ 2.6 渐开线齿形的计算	37
第三章 直齿圆柱齿轮传动	42
§ 3.1 直齿圆柱齿轮各部分名称及主要尺寸的计算	42
§ 3.2 直齿圆柱齿轮的啮合传动条件	54
第四章 斜齿圆柱齿轮传动	55
§ 4.1 斜齿圆柱齿轮的形成原理和啮合特点	55
§ 4.2 斜齿轮传动的正确啮合条件及螺旋角旋向的选择	60
§ 4.3 斜齿轮的基本参数及几何尺寸计算	63
§ 4.4 斜齿轮的当量齿数	66
第五章 圆柱齿轮变位及其几何计算	68
§ 5.1 圆柱齿轮的变位原理	68
§ 5.2 变位系数的选择	80
§ 5.3 变位齿轮的几何尺寸计算	99

第六章 齿根过渡曲线	104
§ 6.1 过渡曲线的形式	104
§ 6.2 加大齿根过渡圆角是提高齿轮弯曲强度的有效措施	113
§ 6.3 齿形系数	119
第七章 圆柱齿轮的齿廓修形与齿向修形	123
§ 7.1 概述	123
§ 7.2 修形量的确定	125
§ 7.3 圆柱齿轮的修形方法	127
第八章 圆柱齿轮的齿厚测量计算	133
§ 8.1 分度圆弦齿厚	135
§ 8.2 固定弦齿厚	143
§ 8.3 公法线长度	148
§ 8.4 量柱(球)测量法	169
第九章 齿轮精度标准 (GB10095-88)	178
§ 9.1 概述	178
§ 9.2 渐开线圆柱齿轮精度 (GB10095-88)	182
§ 9.3 侧隙与齿厚公差确定	211
第十章 圆柱齿轮的加工	238
§ 10.1 概述	238
§ 10.2 滚齿加工	241
§ 10.3 插齿加工	251
§ 10.4 磨齿加工	259
§ 10.5 剃齿加工与珩齿加工	260
§ 10.6 齿轮加工方法的选择	264
§ 10.7 齿轮材料及热处理	264
第十一章 提高圆柱齿轮加工精度的方法	268
§ 11.1 齿轮传动的运动精度	268
§ 11.2 齿轮传动的工作平稳性	278
§ 11.3 齿轮传动的接触精度	283
§ 11.4 齿轮传动接触与噪声问题	284
§ 11.5 齿面光洁度问题	287

第十二章 圆柱齿轮的测绘	289
§ 12.1 直齿圆柱齿轮的测绘	289
§ 12.2 斜齿圆柱齿轮的测绘	302
第十三章 齿轮噪声及其控制	316
§ 13.1 渐开线齿轮啮合噪声的产生	316
§ 13.2 影响齿轮噪声的因素	318
§ 13.3 噪声的控制	327
第十四章 齿轮传动的失效形式及其强度计算	332
§ 14.1 齿轮传动的失效形式	332
§ 14.2 齿轮传动的强度计算	338
第十五章 齿轮传动的摩擦、磨损与润滑	347
§ 15.1 摩擦	347
§ 15.2 磨损	348
§ 15.3 齿轮传动的润滑	353
附录	359
附 1 常用计算数据	359
附 2 变位齿轮的 y_x 、 x_x 、 Δy_x 和啮合角 α' ($\alpha = 20^\circ$ 时)	360
附 3 渐开线函数表 $\text{inv} \alpha = \text{tg} \alpha - \alpha$	371
参考文献	387

主要符号

- a —— 中心距, 标准中心距, 高度变位齿轮中心距
 a' —— 实际工作中心距, 角度变位齿轮中心距
 a'_0 —— 用插齿刀切齿时的中心距
 b —— 齿宽
 b' —— 工作齿宽
 c —— 顶隙
 c^* —— 顶隙系数 (对斜齿轮系指法向顶隙系数)
 d —— 直径, 分度圆直径
 d_a —— 齿顶圆直径
 d_{a0} —— 插齿刀顶圆直径
 d_{a1} —— 小齿轮顶圆直径
 d_{a2} —— 大齿轮顶圆直径
 d_b —— 基圆直径
 d_f —— 齿根圆直径
 d_{f1} —— 小齿轮齿根圆直径
 d_{f2} —— 大齿轮齿根圆直径
 d_y —— 任意圆直径
 d' —— 节圆直径
 d'_1 —— 小齿轮节圆直径
 d'_2 —— 大齿轮节圆直径
 d_1 —— 小齿轮分度圆直径
 d_2 —— 大齿轮分度圆直径
 d_0 —— 插齿刀分度圆直径
 h —— 齿高
 h_a —— 齿顶高

- h_a^* ——齿顶高系数 (对斜齿轮系指法向齿顶高系数)
 h_{a0} ——刀具齿顶高
 h_{a0}^* ——刀具齿顶高系数
 $\bar{h}_a$ ——分度圆齿厚弦齿高
 $\bar{h}_e$ ——固定弦齿高
 h_f ——齿根高
 h' ——工作齿高
 i ——传动比
 j ——侧隙
 k ——跨测齿数 (对内齿轮为跨测齿槽数)
 M ——量柱 (球) 的测量距
 m ——模数 (对斜齿轮为法向模数)
 m_s ——端面模数
 p ——齿距, 周节
 p_b ——基圆齿距
 p_{bt} ——端面基圆齿距
 p_x ——导程
 r ——半径, 分度圆半径
 s ——齿厚, 分度圆齿厚
 $\bar{s}$ ——分度圆弦齿厚
 s_a ——齿顶厚
 s_{at} ——端面齿顶厚
 s_f ——齿根厚
 s_r ——任意圆齿厚
 $u = \frac{Z_2}{Z_1}$ ——齿数比
 v ——速度, 分度圆的圆周速度 (m/s)
 w ——公法线长度
 x ——径向变位系数
 $x_{\min}$ ——不根切的最小变位系数

x_f ——端面变位系数

$x_z = x_2 \pm x_1$ ——变位系数和(“+”用于外啮合, “-”用于内啮合)

x_0 ——插齿刀变位系数

x_1 ——小齿轮变位系数

x_2 ——大齿轮变位系数

y ——中心距变动系数

y_f ——端面中心距变动系数

y_0 ——用插齿刀加工齿轮时的中心距变动系数

y_F ——齿形系数

Δy ——齿顶高变动系数

Z ——齿数

$Z_{\min}$ ——不根切的最少齿数

Z_1 ——小齿轮齿数

Z_2 ——大齿轮齿数

Z_0 ——刀具齿数或头数

$Z_z = Z_2 \pm Z_1$ ——齿数和 (“+”号用于外啮合, “-”号用于

内啮合)

Z_v ——当量齿数

α ——齿形角, 分度圆压力角, 基本齿条齿形角

α_a ——齿顶圆压力角

α_M ——量柱(球)中心所在圆的压力角

α_y ——任意圆压力角

α_f ——端面压力角

α' ——啮合角

α'_0 ——用插齿刀加工齿轮时的啮合角

β ——螺旋角, 分度圆螺旋角

β_0 ——基圆螺旋角

β_1 ——小齿轮螺旋角

β_2 ——大齿轮螺旋角

ε ——重合度

ε_{α} ——端面重合度

ε_{β} ——纵向重合度

ε_{γ} ——总重合度

η ——滑动系数

$\eta'_{\max}$ ——小齿轮齿根处的最大滑动系数

$\eta''_{\max}$ ——大齿轮齿根处的最大滑动系数

φ ——齿宽系数

$\varphi_a = b/a$ ——对中心距的齿宽系数

$\varphi_m = b/m$ ——对模数的齿宽系数

$\varphi_d = b/d$ ——对分度圆直径的齿宽系数

ρ_f ——齿根圆角半径

ρ_0 ——刀具齿顶圆半径

第一章 概 论

§ 1.1 齿轮传动在工业领域中的地位

一、传动的定义和分类

传动是在一定距离间传递能量或运动、并实现某些作用的装置。这些作用包括：能量的分配；转速的改变；运动形式的改变等。

通常应用的传动可分为机械传动、电传动和其他传动三大类。其中机械传动又可分为啮合传动、摩擦传动、液力传动、气力传动和其他机械传动五种。啮合传动一般可分为齿轮传动和链传动。

二、机械传动在机器设备中的重要性

在绝大多数的情况下，机器装备中包含有传动装置。因为：

1. 工作机构所要求的速度通常与原动机的额定速度不一致。
2. 工作机构常需要根据工作情况改变速度，采用原动机调速的办法既不一定经济，而有时甚至是不可能的。
3. 原动机输出的运动方式，不一定适合工作机构的需要，例如，原动机输出等速回转运动，而工作机构却需要直线运动、间歇运动或螺旋运动。
4. 一个原动机有时要带动若干种运动形式和速度各异的工作机构。

三、齿轮传动在工业领域中的地位

齿轮传动可用来传递空间任意两轴间的运动和动力，而且传动准确可靠，使用寿命长，因此，齿轮传动是现代机器和仪器中最重要的一种传动。例如，在汽车制造中，制造传动部件所花费的劳动量约占制造整个汽车的50%，其中齿轮传动就占传动部件的60%以上；又如在金属切削机床中，传动部分约占60%，其中齿轮传动占传动部分的70%以上。

随着工业的发展, 齿轮传动将会获得愈来愈广泛地应用, 其在机械工业中占有极其重要的地位。

§ 1.2 齿轮生产的特点与现状

一、齿轮生产的特点

齿轮生产与其他机械零件的生产相比, 具有下列特点:

1. 特殊的生产工艺: 滚齿、插齿、剃齿、拉齿、珩磨、磨齿和热处理的渗碳、氮化、碳氮共渗等工艺。

2. 产量大、品种多、变型多 (新件与备品共存)。

3. 工序多 (涉及锻、铸、机械加工、热处理等), 周期长, 要求较多较好的工艺装备, 而且要有复杂刀具的设计及产品设计、试验和研究等机构。

4. 对生产和管理人员的技术水平要求较高。

二、齿轮生产的专业化

目前, 国内外齿轮生产大部分已专业化。专业化生产有利于提高产品质量、发展品种和降低成本。使齿轮设计及工艺便于系列化、通用化和标准化, 便于采用新设备、新技术, 提高劳动生产率。

40 余年前, 一些先进的工业国家就建立了规模宏大的齿轮厂, 如德国的ZF 公司和美国通用汽车公司的阿里森变速箱厂, 生产车间面积在 10 万 m^2 以上, 年产齿轮一千万只。随着技术的发展, 近 20 年来, 新建齿轮专业厂的规模较前稍小, 但年产量却大多维持在 1000 万只左右。如英国福特 (Ford) 公司的变速箱厂, 法国雷诺公司的克里安变速箱厂等。

西德洛曼 (LS) 公司生产各种用于工程机械和船舶上的大中型减速器。弗来达 (FLENDER) 公司生产有机动力传动设备。而泰克 (TACKE) 公司是欧洲最大的联轴器生产企业, 以生产鼓形齿联轴器闻名于世。这些都是世界著名的齿轮生产专业厂家。

在国外, 以百万只计年产量的齿轮专业厂相当多。

解放以后,我国的齿轮生产已逐步走向专业化生产的道路。北京、上海、沈阳、南昌、西安、太原和昆明等都建立了齿轮专业厂。

三、齿轮设计与试验

齿轮设计中,近年来国外广泛采用电子计算机,我国也已开始应用。日本东洋工业汽车公司、美国柯他变速箱公司和格利森公司以及瑞士奥利康公司已使用电子计算机程序设计齿轮,并结合新件设计,验证库存刀具,以利用现有刀具设计出合乎要求的齿轮。

齿轮的试验有现场试验和试验台试验两种,现场试验仅用于较成熟的产品做定期的抽验或记录整个工作过程,这种试验需要较长的时间,较多的人力和物力,不一定经济。更多的新产品则进行试验台试验。

试验台试验,常采用模拟法。例如,美国通用汽车公司的阿里森变速箱厂用磁带记录现场试验数据(来自传动链上应变计、传感器、转矩等的输入转矩、输出转矩、转速)。通过数据压缩机读出上述第一磁带,并按照所要求的具体试验目的,在规定时间内抽取所需要的数据或讯号,作出第二磁带。再经电子计算机读出,经过数据分析和强化加速处理,制成指挥试验的穿孔带。又如美国格里森公司用 No550 噪声分析系统,可以记录试验时的齿轮噪声,然后进行齿轮噪声的自动分析。

试验表明:噪声来源于齿轮啮合振动,但人耳听到的噪声往往是齿轮装置其他零件产生共振放大的结果。因此,降低噪声的方法,不仅要减少齿轮啮合振动,更重要的是找出上述零件,适当改变其外形或结构。

齿轮试验台有开式和闭式之分,闭式试验台可节约能量,应用广泛。格里森 No150 驱动桥闭式试验台装有 100HP 直流电机,最大扭矩达 $1150\text{kgf} \cdot \text{m}$,最高转速为 1500rpm,采用滑波传动机构加载。载荷、油温、噪声、振动与时间都可自动记录和自动控制,出现故障便自动停车。

四、工艺及设备

齿轮冷加工的传统工艺：车削、滚齿、插齿、剃齿等目前仍在应用。新工艺和新设备也陆续采用，其中效果明显的有：少无切削加工代替切削工艺；高效率切削；高效自动化连线和生产线。最早采用无切削加工，并且用电子计算机指挥齿轮自动化生产线的是美国的福特汽车公司的一条自动变速箱行星齿轮冷轧生产线。该生产线毛坯不用锻件而用盘料或棒料；以冷轧成形代替车削；以精轧代替剃齿。这种变革使操作人员由数十人减为三人，设备由44台减为22台，生产费用大量降低，原材料节约35%，而且提高了齿轮光洁度和强度，日产量可达两万七千只左右。

目前国外圆柱齿轮的冷轧工艺主要用精轧代替剃齿，而用粗轧代替滚轧，还只限于分度圆直径小于200mm，模数小于3mm的齿轮。

齿轮冷轧的工艺和设备，式样繁多，大致可分为两大类。第一类，轧具轴线与工件轴线平行，如美国密执根工具公司、国家拉床公司和兰迪公司的冷轧机及英国Form-F10冷轧机。第二类，轧辊轴线垂直于工件的轴线，如瑞士马格和克劳伯的冷轧机。

国外对精轧齿和剃齿问题有不同的看法，倾向剃齿工艺的观点是：精轧工艺对材料（硬度和组织）以及精轧前留量要求严格，一般不易做到；如果剃齿也用精轧齿的留量，则剃齿的生产效率将成倍提高，加上剃齿工艺在继续发展，其加工质量和生产率会进一步提高，成本也将有所降低。

美国国家拉床公司的单辊轧机，实际上是一种精轧与剃齿相结合的一种新型工艺设备。轧辊外形类似剃刀，因而滚轧压力较小。

近几年国内外在齿轮的热轧、滚锻和精锻工艺方面都有了很大的发展。粉末冶金精锻齿轮也已生产成功。

螺旋锥齿轮加工设备中，格里森(Gleason)机床最负盛名，近几十年美国格里森公司在锥齿轮加工工艺和设备上具有技术垄断性。过去多年来，美国把该机床列为对社会主义国家禁运项目之一。1972年对苏联解禁后，苏联订购了五千多万美元的该项设

备，占该公司年产值一半以上。

瑞士大力改进奥利康（Oerlikon）螺旋锥齿轮加工机床，使生产率提高约 40%，并且达到了新型格里森机床水平。

日本已有东芝、西部电机等厂家生产螺旋锥齿轮设备，但在其国内仍主要采用格里森机床。

东德、西德和苏联等不少国家也生产螺旋锥齿轮机床，但质量和产量在国际市场上缺乏竞争能力。

我国已生产螺旋锥齿轮机床，并供应各厂，但限于产量和质量，仍进口了一些格里森机床和奥利康机床。

一般来说，高性能的齿轮和减速器的主要指标是：承载能力大、传动效率高、使用寿命长、运转平稳、噪声低、几何尺寸小、综合成本低。其中以承载能力、使用寿命和噪声三项指标最重要。

通常由齿轮接触疲劳强度决定的承载能力，大体上与齿面硬度的平方成正比。根据瑞士马格齿轮公司的经验介绍，渗碳淬火齿轮可比相同尺寸的调质齿轮承载能力大 2.5 倍。由此可见，提高齿面硬度对提高齿轮承载能力极为有效。

重载硬齿面齿轮的设计制造，最早出于瑞士、西德。美国在 50 年代使用的许多高质量重载齿轮，也是从这些国家引进的。美国费城齿轮公司研究了欧洲齿轮的特点，认为齿轮质量好的原因在于掌握了硬齿面制造技术，于五十年代末期，向瑞士马格公司引进了硬齿面制造技术。陆续还购置了近 20 台磨齿机及相应的其他设备，使该公司一跃而为世界著名的齿轮制造公司，有力地推动了美国齿轮工业的发展。当时，被称之为美国的“齿轮工业革命”。60 年代初，日本的住友、大阪制锁、北条等齿轮厂家，也引进了硬齿面制造技术，对生产装配进行了更新改造，使齿轮质量得到很大的提高。

图 1-1 所示的是 M·Bosch 对 40 年来齿轮和减速器承载能力的发展总结。

承载能力相同的硬齿面齿轮，其几何尺寸和重量也相应减

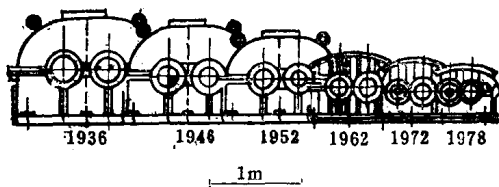


图1-1 四十年来齿轮和减速器的发展

小，这不仅可以节省贵金属材料，而且有利于加工机床和热处理设备的小型化。即使采用磨齿工艺，硬齿面齿轮的综合经济成本还是比较低的。西德温特（Winter）教授对相同承载能力， $n_1=500\text{rpm}$ ， $i=3$ ， $T_2=21400\text{ t} \cdot \text{m}$ （吨米），采用不同方式的加工与热处理的减速器进行了技术经济分析，其结果如表 1-1 所列。著名的西德弗兰达（Flender）跨国公司生产的大量中小型减速器，就是采用的这种工艺。

表 1-1

材 料	C 45	42CrMo4	20MnCr5 42CrMo4	32CrMoV9	34CrMo4	20MnCr5
热处理方式	正火	调质	渗碳淬火 调质	氮 化	高频淬火	渗碳淬火
齿轮加工方式	滚齿	滚齿	磨齿	精滚	滚齿研齿	磨齿
中心距	830	650	585	490	470	390
减速器重量 (kg)	8505	4860	3465	2620	2380	1581
重量比	174%	100%	71%	54%	49%	33%
价格比	132%	100%	85%	78%	66%	63%
抗点蚀安全系数	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.6
抗弯曲安全系数	6.1	5.7	3.9	2.3	2.3	2.3

但是，对于大直径重载齿轮采用渗碳淬火、磨齿工艺困难较大。它不仅需要有昂贵的大型渗碳炉和磨齿机，还由于热处理变形太大，往往把辛勤得来的部分渗碳层不得不作为余量而磨掉。