

汽车自动变速器

原理与结构

唐德修 主 编



北京理工大学出版社



汽车自动变速器原理与结构

主 编 唐德修

副主编 孙富平 刘 春

参 编 袁尉铭 谢鹏飞

周贵富 冉强林

主 审 黄海波

内 容 提 要

本教材以齿轮传动基本理论为依据,脱离具体车型的约束,探索自动变速器轮系变速传递的内在规律,将美国米切尔维修信息公司编、中国机动车辆安全鉴定检测中心编译的《进口汽车自动变速器检测与维修》一书中所有款式的自动变速器无一遗漏、图文并茂地串起来,形成通用的、有科学依据的、读者容易理解的解释,并以这个解释为理论基础逐款、逐挡、逐零件地介绍它们的工作原理。同时还分析了《进口汽车自动变速器检测与维修》中没有涉及的主要轮系6速、8速自动变速器的挡位变化情况。

全书共7个理实一体化教学项目,项目一、项目二介绍齿轮和轮系的基础理论,项目三介绍自动变速器的一般常识,项目四~项目六分别介绍S式、R式、D式自动变速器的挡位变化情况,项目七介绍其他类型自动变速器的挡位变化情况。

本教材适合作为高等院校汽车专业的教学用书,任课教师可根据不同层次、不同专业、不同学时的教学大纲对内容做适当删减,也适合作为汽车设计、制造、维修、销售行业技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

汽车自动变速器原理与结构/唐德修主编. —北京:北京理工大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5682-4818-1

I. ①汽… II. ①唐… III. ①汽车—自动变速装置—高等学校—教材
IV. ①U463.212

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第218953号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市天利华印刷装订有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/21.25

彩 插/8

字 数/591千字

版 次/2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

定 价/79.00元

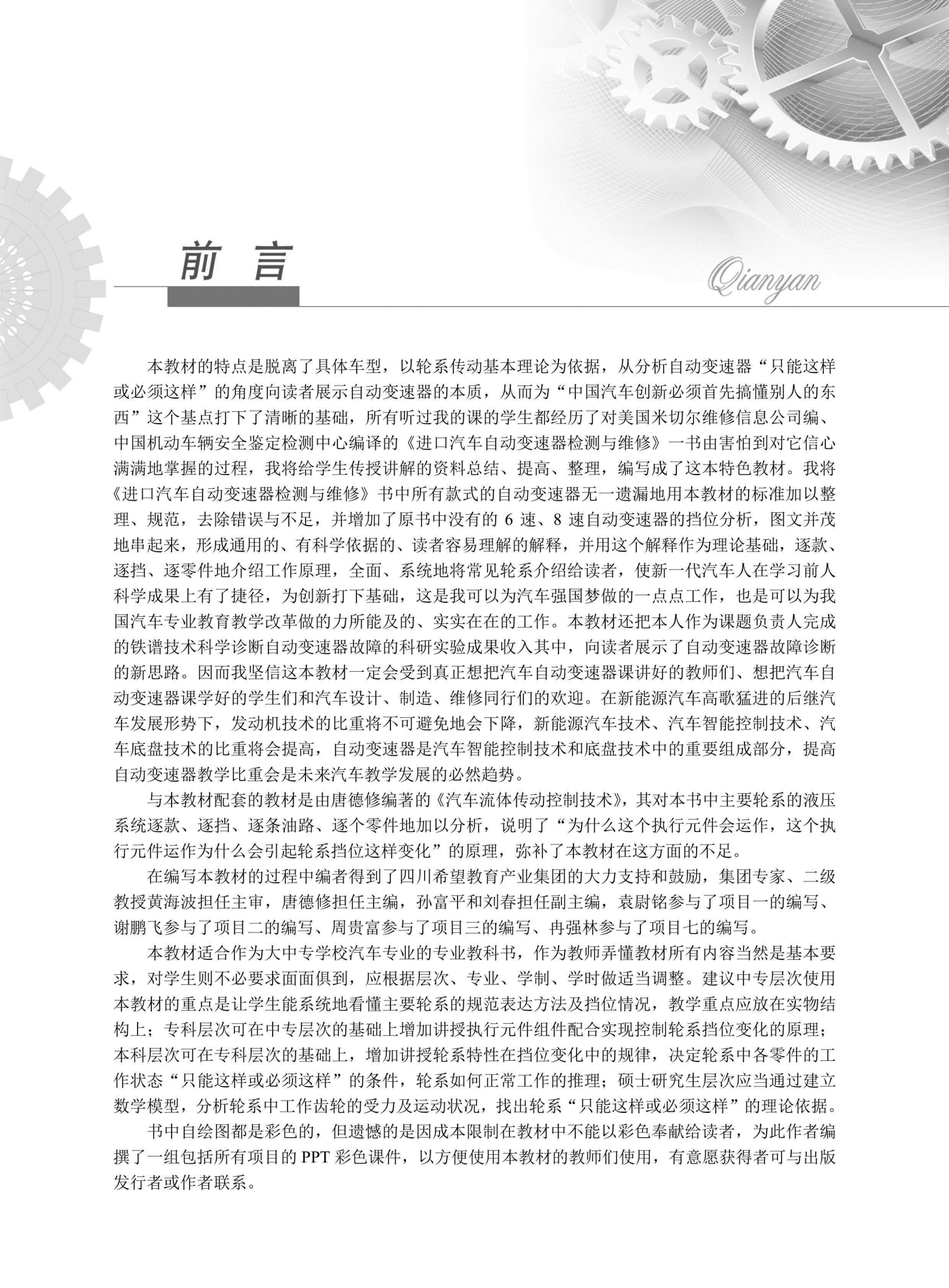
责任编辑/赵 岩

文案编辑/邢 琛

责任校对/周瑞红

责任印制/马振武

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



前言

Qianyan

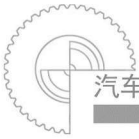
本教材的特点是脱离了具体车型,以轮系传动基本理论为依据,从分析自动变速器“只能这样或必须这样”的角度向读者展示自动变速器的本质,从而为“中国汽车创新必须首先搞懂别人的东西”这个基点打下了清晰的基础,所有听过我的课的学生都经历了对美国米切尔维修信息公司编、中国机动车辆安全鉴定检测中心编译的《进口汽车自动变速器检测与维修》一书由害怕到对它信心满满地掌握的过程,我将给学生传授讲解的资料总结、提高、整理,编写成了这本特色教材。我将《进口汽车自动变速器检测与维修》书中所有款式的自动变速器无一遗漏地用本教材的标准加以整理、规范,去除错误与不足,并增加了原书中没有的6速、8速自动变速器的挡位分析,图文并茂地串起来,形成通用的、有科学依据的、读者容易理解的解释,并用这个解释作为理论基础,逐款、逐挡、逐零件地介绍工作原理,全面、系统地将常见轮系介绍给读者,使新一代汽车人在学习前人科学成果上有了捷径,为创新打下基础,这是我可以为汽车强国梦做的一点点工作,也是可以为我国汽车专业教育教学改革做的力所能及的、实实在在的工作。本教材还把本人作为课题负责人完成的铁谱技术科学诊断自动变速器故障的科研实验成果收入其中,向读者展示了自动变速器故障诊断的新思路。因而我坚信这本教材一定会受到真正想把汽车自动变速器课讲好的教师们、想把汽车自动变速器课学好的学生们和汽车设计、制造、维修同行们的欢迎。在新能源汽车高歌猛进的后继汽车发展形势下,发动机技术的比重将不可避免地会下降,新能源汽车技术、汽车智能控制技术、汽车底盘技术的比重将会提高,自动变速器是汽车智能控制技术和底盘技术中的重要组成部分,提高自动变速器教学比重会是未来汽车教学发展的必然趋势。

与本教材配套的教材是由唐德修编著的《汽车流体传动控制技术》,其对本书中主要轮系的液压系统逐款、逐挡、逐条油路、逐个零件地加以分析,说明了“为什么这个执行元件会运作,这个执行元件运作为什么会引起轮系挡位这样变化”的原理,弥补了本教材在这方面的不足。

在编写本教材的过程中编者得到了四川希望教育产业集团的大力支持和鼓励,集团专家、二级教授黄海波担任主审,唐德修担任主编,孙富平和刘春担任副主编,袁尉铭参与了项目一的编写、谢鹏飞参与了项目二的编写、周贵富参与了项目三的编写、冉强林参与了项目七的编写。

本教材适合作为大中专学校汽车专业的专业教科书,作为教师弄懂教材所有内容当然是基本要求,对学生则不必要求面面俱到,应根据层次、专业、学制、学时做适当调整。建议中专层次使用本教材的重点是让学生能系统地看懂主要轮系的规范表达方法及挡位情况,教学重点应放在实物结构上;专科层次可在中专层次的基础上增加讲授执行元件组件配合实现控制轮系挡位变化的原理;本科层次可在专科层次的基础上,增加讲授轮系特性在挡位变化中的规律,决定轮系中各零件的工作状态“只能这样或必须这样”的条件,轮系如何正常工作的推理;硕士研究生层次应当通过建立数学模型,分析轮系中工作齿轮的受力及运动状况,找出轮系“只能这样或必须这样”的理论依据。

书中自绘图都是彩色的,但遗憾的是因成本限制在教材中不能以彩色奉献给读者,为此作者编撰了一组包括所有项目的PPT彩色课件,以方便使用本教材的教师们使用,有意愿获得者可与出版发行者或作者联系。



欢迎读者不吝赐教指出本教材存在的不足甚至错误，以便今后在去错纠偏、删繁取简、推陈出新的再版中改进和完善，以适应现代汽车飞速发展的步伐，共同为圆满实现汽车强国梦做出我们的微薄贡献，为汽车专业教育教学改革添砖增瓦。

唐德修

2017年7月18日于成都

项目一 轮系的基础知识	1
任务一 对齿轮传动的认识	3
任务二 齿轮的啮合与传动	13
任务三 轮系	17
项目检测要点	22
项目二 汽车变速轮系的布置与结构	23
任务一 汽车变速器的布置	23
任务二 汽车自动变速器的结构	32
任务三 汽车变速轮系的润滑	40
项目检测要点	47
项目三 汽车变速器的结构原理	48
任务一 汽车手动变速器的结构与工作原理	49
任务二 汽车自动变速器组成与分类	55
任务三 汽车自动变速器的控制元件	67
任务四 无级变速在汽车自动变速器上的运用	79
任务五 自动变速器的控制	83
任务六 自动变速器型号识别	91
任务七 自动变速器维修基础	96
项目检测要点	104
项目四 共太阳轮式自动变速器	106
任务一 基本的共太阳轮式轮系结构特点	107
任务二 共太阳轮式 4 速自动变速器的配置	109
任务三 S 一式 4 速自动变速器	112
任务四 S 一式 4 速轮系挡位分析	115
任务五 S 二式 4 速自动变速器	134
任务六 S 二式 4 速轮系的挡位分析	137
任务七 S 式 6 速轮系挡位分析	155
项目检测要点	161



项目五 共架圈式自动变速器	162
任务一 基本的共架圈式轮系的结构特点	162
任务二 5 速共架圈式自动变速器的配置	167
任务三 5 速复合 R 一轮系的挡位分析	173
任务四 5 速复合 R 二轮系的挡位分析	208
任务五 R 式 8 速轮系挡位分析	227
项目检测要点	234
项目六 对称式自动变速器	235
任务一 基本对称式轮系的结构特点	235
任务二 D 式 5 速自动变速器的配置	238
任务三 D 式 5 速复合轮系的挡位分析	242
任务四 D 式 8 速轮系挡位分析	273
项目检测要点	277
项目七 其他形式轮系自动变速器简介	278
任务一 定轴轮系自动变速器挡位分析	278
任务二 特殊动轴轮系自动变速器挡位分析	290
任务三 多轮系自动变速器挡位分析	303
项目检测要点	315
项目检测要点参考答案	316
附录一 按字母顺序排列的汽车常用专业英语	323
附录二 汽车常用专业术语英汉对照表（按项目列出）	327
参考文献	332

项目一 轮系的基础知识



学习目标

1. 了解传动的基本概念。
2. 掌握齿轮基础知识与术语。
3. 了解齿轮参数的意义。
4. 掌握齿轮传动比的概念和轮系的类型。
5. 能计算定轴轮系的传动比。
6. 了解动轴轮系传动比计算基本方法。



学习要求

能力目标	知识要点	权重
能描述轮系传动的基本概念	轮系传动的作用、基本概念	20%
熟知齿轮传动的特点	齿轮能正常工作的条件	20%
会分析轮系的组成	对定轴轮系组成有清楚的认识	20%
能分析动轴轮系的组成	动轴轮系基本元件组成规律	40%

齿轮是汽车变速器中重要的零件之一。传递动力和运动是齿轮最基本的任务，齿轮必须要相互啮合成齿轮副才能完成这个任务。若干齿轮副组成轮系，轮系将齿轮的作用扩大到足以满足人们对机器的期望。

机器具有人为的实物组合体、各部件之间有确定的相对运动、能进行有用的功能转换三大特征，任何一台机器都由原动机、工作机、传动机构和控制机构四大部分组成。图 1-1 是 1788 年瓦特设计的近代工业中第一台完整的机器。

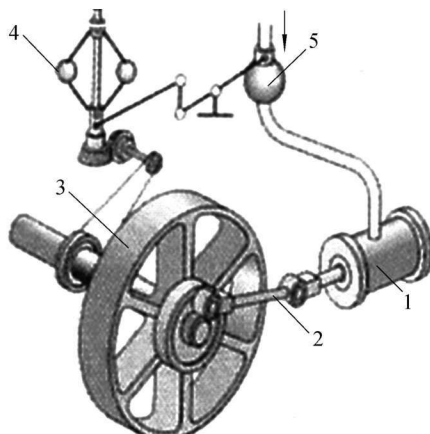


图 1-1 第一台完整的近代机器

1—原动机（蒸汽机）；2—传动装置；3—工作机；4—离心调速器；5—负反馈控制装置



将原动机的动力和运动传递到工作机的过程称为传动，完成这个任务的装置称为传动系。汽车传动系中最主要的部件是由轮系组成的变速器。按轴的工作情况将轮系分定轴轮系和动轴轮系两大类。本章仅介绍轮系传动常识。

在追求安全、经济、舒适、智能的过程中，汽车不断完善与进步，是高度自动化的、能行走的机器。发动机是它的原动机，轮胎和车厢是工作机，离合器、变速箱、传动轴、主减速器、差速器、半轴是它的传动装置，转向盘、加速踏板、制动踏板、离合器踏板（自动变速汽车无）是主要的控制机构。随着电子控制汽车的电控系统的发展，汽车智能控制成为现实。

原动机将自然界的能量转换成机器可以利用的能量推动工作机做功；工作机完成设计者赋予它的工作功能，或减轻人的劳动强度，或提高工作效率，或提高工作精度，或兼而有之；传动机构将原动机的动力和运动（简称传递要素）传到工作机，使原动机与工作机相互匹配；控制机构是供人操纵与控制机器的装置，现代机器在控制机构上向着智能化、自动化、精细化方向发展，科技含量越来越高。

现代汽车由机、电、液、光、磁等组成的智能集团担负起完成传动环节上自动化控制的任务，变成了能行走的智能机器，无须人驾驶的智能汽车已经上路行驶了。

原动机将动力（常用力 F 或力矩 M 来描述）和运动（常用直线运动速度 v 或旋转运动角速度 ω 来描述）两个要素传给工作机，这种传动能够顺利进行的充要条件是有传动机构和传动介质。传动机构的主动元件（运动已知的元件，简称主动件）接受原动机的传动要素，通过介质，传给传动机构的被动元件（简称从动件），在这个过程中，对传动要素进行加工，把原动机的传动要素转换成工作机需要的传动要素。不管是哪种传动，上述充要条件总是不可少的。传动机构常用介质有固体、流体、电力、场力等，因此一般传动可分为以下三种：

- (1) 机械传动（以固体机件间的摩擦力或相互间啮合方式传递传动要素的传动）。
- (2) 流体传动（以流体为介质，传递传动要素的传动）。
- (3) 电力传动（利用电能传递传动要素的传动）。

本教材讨论的轮系传动属于机械传动中的一种，汽车的轮系通过飞轮、离合器（液力变矩器是自动离合器）与发动机连接，如图 1-2 所示，再通过万向传动装置、主减速器、差速器传给车轮，在这个过程中对发动机传来的传动要素进行适合汽车运行状况的加工，即变速、变矩和改变转动方向。

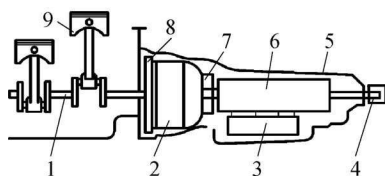


图 1-2 汽车发动机与变速器的布置

1—曲轴；2—液力变矩器（简称液矩器）；3—液压控制系统；4—输出轴；
5—变速器壳体；6—轮系变速系统；7—液压泵；8—飞轮；9—活塞连杆组

常用七种图表达轮系各部零件间的相互关系：机构运动简图（用简单的线条和国家标准规定的符号表达轮系最本质的运动特征、最本质的连接特性和与运动有关的几何尺寸的图形）、机构示意图（用简单的线条和国家标准规定的符号表达轮系最本质的运动特征、最本质的连接特性但不严格按几何尺寸比例画的图）、机构装配图（严格按几何尺寸比例关系及国家标准规定画法表达轮系各部零件装配关系的图形）、结构示意图〔不按几何尺寸比例关系表达轮系各部零件装配关系的图形，部分活塞回位弹簧采用简化画法，也有部分画成膜片弹簧，如图 5-5、图 5-9（b）等〕、轮系轴测图（用轴测法表达轮系各部零件相互关系的立体图）、传递路线示意图（在机构示意图上标注了表示动力传递和运动传递的图）、轮系示意图（对同时有上述多种图形的表达图的统称）。本教材涉及除机构运动简图和机构装配图外的其余五种图，其中传递路线示意图用得最多。



任务一 对齿轮传动的认识

齿轮传动是轮系最基本的传动形式，它最大的优点是保持瞬时传动比恒定，这是其他传动形式难以做到的，同时传动的力矩大，自身的强度高、刚度好，易加工，结构紧凑，精度高，工作可靠，传动效率高，适用范围广也是齿轮传动的重要优点。

一、齿轮传动

1. 齿轮传动基本定律

齿轮传动必须遵守齿轮啮合基本定律（图 1-3）才能保证瞬时传动比恒定。

一对相互啮合的齿轮 O_1 与齿轮 O_2 ，其齿廓接触点（称为啮合点）的运动轨迹称为啮合线，无论两齿廓在任何位置接触，过接触点所作的两齿廓的公共法线 N_1N_2 （称为理论啮合线）都必须与两轮的连心线 O_1O_2 交于一固定点 C ，这点称为节点，如图 1-3 中的 C 点。 N_1 、 N_2 所在的圆分别称为各自的基圆（图中粗实线圆）。分别以 O_1C 、 O_2C 为半径所作的相切于 C 点的两个圆称为节圆，如图 1-3 中的双点画线圆 O_1 和双点画线圆 O_2 。理论啮合线 N_1N_2 与过节点 C 所作两节圆的公切线 t 所夹的锐角称为啮合角，用 α' 表示。图中 B_2 为齿轮 O_2 的齿顶圆（图中细实线圆）与理论啮合线 N_1N_2 的交点， B_1 为齿轮 O_1 的齿顶圆（图中细实线圆）与理论啮合线的交点， B_2B_1 为两齿轮的实际啮合线。从图中还可以知道，在 O_1N_1 、 O_2N_2 、 O_1O_2 三线长度不变的条件下，两齿轮角速度之比为

$$i_{\text{瞬时}} \equiv O_2N_2 / O_1N_1 = O_2C / O_1C = d_2 \cos \alpha_1 / d_1 \cos \alpha_1 = z_2 / z_1 \quad (1-1)$$

即在满足上述条件下，两齿轮的瞬时角速度之比恒等于两轮齿数的反比，称为齿轮啮合基本定律。其中 O_1N_1 、 O_2N_2 分别为齿轮 O_1 、齿轮 O_2 的基圆半径； d_1 、 d_2 为两齿轮的分度圆直径； α_1 、 α_2 为两齿轮分度圆上的压力角； z_1 、 z_2 为两齿轮的齿数。

2. 共轭齿廓

凡能满足齿廓啮合基本定律的一对齿廓，称为共轭齿廓。在理论上可作为共轭齿廓的曲线很多，常用的齿廓有渐开线齿廓、圆弧齿廓、摆线齿廓。大多数机器都采用渐开线作为齿轮的工作齿廓，这是因为渐开线齿廓除了符合齿轮基本定律外，还有易于加工，强度、刚度好的优点；圆弧齿廓的齿轮有滑移量小、啮合间隙小的优点，多用于高速重载的机器；摆线齿廓的密封性能好，多用于齿轮泵。

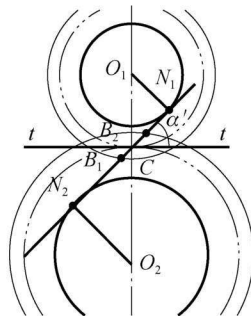


图 1-3 齿轮啮合基本定律

3. 常用共轭齿廓曲线的生成原理

1) 渐开线齿轮

如图 1-4 所示，一个标准平面 M （称为发生平面）在一个标准圆柱体 OO' （称为基圆柱）的表面做纯滚动，平面上一条定线（称为发生母线）在空中的运动轨迹就是一个渐开面。如果发生母线是一条与基圆柱的回转母线平行的直线 AB ，产生的渐开面就是直齿圆柱渐开面，如图 1-4 (a) 中的直线渐开面 $ABB'A'$ ；如果发生母线 AT 是一条与回转母线有一个夹角 β 的直线，产生的就是斜齿圆柱渐开面，如图 1-4 (b) 中的螺旋渐开面 $ATT'A'$ ，夹角 β 称为斜齿圆柱渐开面的螺旋角。如果发生母线是一条曲线 AR ，曲线 AR 过 A 点的切线与圆柱体的母线夹角为 ϕ ，产生的就是曲线圆柱渐开面，如图 1-4 (c) 中的曲线渐开面 $ARR'A'$ ，如果该曲线是一条双曲线，就会生成双曲线渐开面。在所有参数不变的条件下，比较三条发生母线的长度，可以看到曲线 $AR >$ 斜线 $AT >$ 直线 AB ，所以曲



线渐开面齿轮的强度最高，直线渐开面齿轮的强度最低，斜线渐开面齿轮强度介于二者之间。

为了便于理论研究，将以上所有参数向垂直于基圆柱的回转轴线的平面上投影，如图 1-4 (d) 所示，发生面就变成线 3，发生线变成点 K （斜齿轮与曲线齿轮的线除外），基圆柱就变成圆 1（称为基圆），渐开面就变成渐开线 2，基圆柱的一条母线就变成一个点 A ，这是渐开线的起点（或渐开面的起点线），基圆（柱）内没有渐开线（面）。如图 1-4 (e) 所示，两个相邻反向的渐开面就形成了渐开面齿轮的工作轮廓曲面。工程上习惯于将上述的渐开面都称为渐开线，相应的齿轮称为渐开线齿轮。

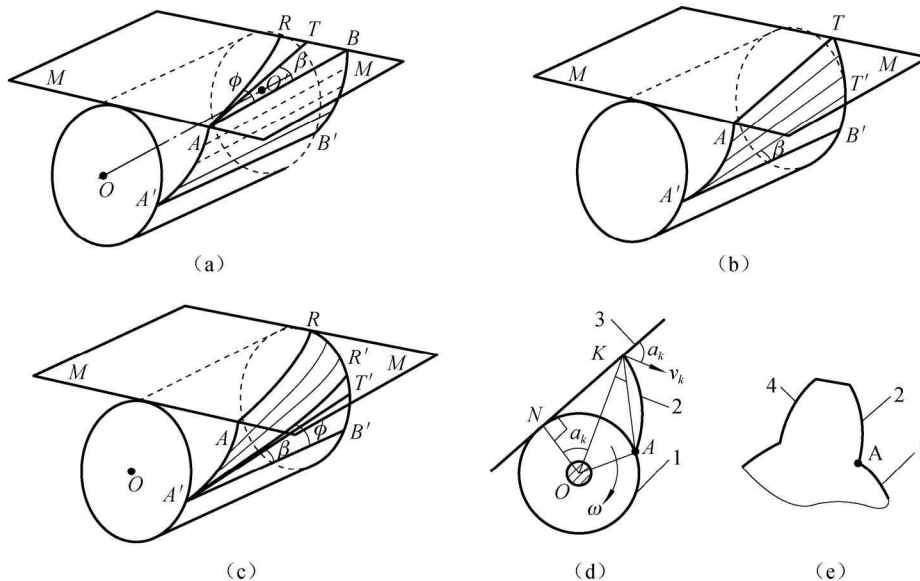


图 1-4 渐开面生成原理

M —发生平面； OO' —基圆柱； AB —发生母线（与圆柱母线平行的直线）； AT —发生母线（与圆柱母线有一 β 夹角的直线）； AR —发生母线（曲线的切线与圆柱母线有一 ϕ 夹角）；1—基圆（柱）；2—渐开线（面）；3—发生线（面）；4—同一基圆（柱）上相邻反向的渐开线（面）； A —基圆（柱）上的一点（线）； K —渐开线的一点（线）； N —渐开线与基圆的切点； O —基圆（柱）转动中心； ω —基圆（柱）角速度； v_k — K 点（线）的线速度； α_k — K 点（线）的压力角

本教材没有特殊说明的地方都是基于这种投影后的平面图形来研究齿轮的。

如图 1-4 (d) 所示，从一条已知的渐开线上一点 K ，向基圆作切线，与基圆交于 N 点，切线 KN 也是渐开线上 K 点的法线，也是前面说到的啮合线，即渐开线的发生线、渐开线的法线、基圆的切线和两齿轮的啮合线四线合一。圆 O 绕 O 点顺时针旋转，渐开线上任意一点 K 的线速度 v_k 与 NK 之间夹的锐角称为 K 点的压力角 α_k ，从图 1-4 (d) 可以知道： $\triangle ONK$ 中 $ON=OK\cos\alpha_k$ ， OK 是圆 O 的 K 圆半径， ON 是圆 O 的基圆半径。

2) 摆线齿轮与圆弧齿轮 (图 1-5)

一个标准的圆柱体 1 在一个标准的平面 3 上从 K 位置做纯滚动滚到 K' 、 K'' 处，圆柱体上的任意一条与母线平行的线 K 在此过程中画出的轨迹 2，就是摆线面，用其作齿廓生成的齿轮就是摆线面齿轮。同理，为研究方便将摆线面投影到与轴线垂直的平面上就得到摆线 2。

两个圆弧面 4 与 5，在一定条件可以实现相互啮合，本教材不特别指明时，只研究渐开线（面）齿轮。

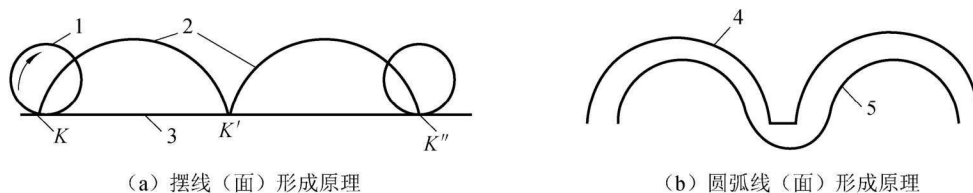


图 1-5 其他常用的共轭曲线(面)

1—标准圆柱体; 2—摆线; 3—标准平面; 4、5—圆弧线; K 点—标准圆柱体上选定的一个点

二、齿轮的分类

齿轮分类角度很多, 本教材不能一一涉及, 只介绍以下几种分类方式。

1. 按齿轮传动方式分类(图 1-6)

1) 平面齿轮传动

圆柱直齿齿轮传动、平行轴圆柱斜齿轮传动、人字齿轮传动和圆锥齿轮传动的共同特点是两齿轮的轴线(平行或垂直)处于同一平面内, 如图 1-6 (a) ~ (h) 所示。

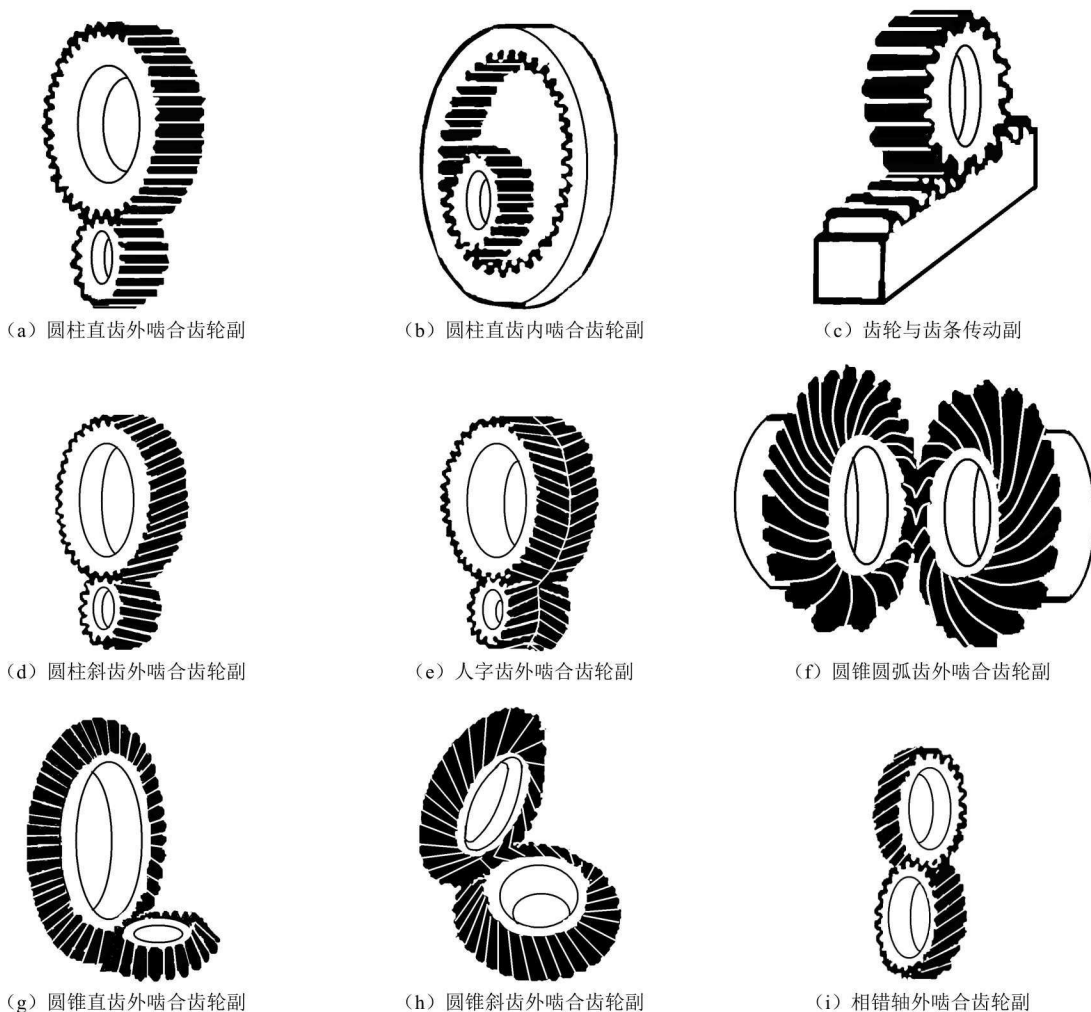


图 1-6 常见的齿轮传动副



2) 空间齿轮传动

相错轴齿轮传动（蜗轮蜗杆传动，蜗轮蜗杆副不属于齿轮传动，与齿轮传动有很多相似之处，故把它放在此处介绍，但蜗轮蜗杆副传动有许多自己的特点，有兴趣的读者可参阅相关的资料）如图 1-6 (i) 所示，这种空间相错轴齿轮的两根轴线不在同一平面内，它们可以在空间以任何角度相交，但以空间垂直为常见，由于轴线不在同一平面，就把齿轮传动的运用面扩大了，而且它们的传动比需遵循定轴齿轮传动比规律，与蜗轮蜗杆副只能是大传动比空间传动不同，这种齿轮副曾经在汽车的转速检测上广泛运用。

2. 按齿廓形态分类

齿轮主要有渐开线齿轮、摆线齿轮和圆弧齿轮，渐开线齿廓齿轮是用得最普遍的齿轮。

3. 其他分类方法

齿轮分类方法很多，如分为标准齿轮与非标准齿轮、正常齿齿轮与短齿齿轮、普通齿轮与变位齿轮、高度变位齿轮与角度变位齿轮，以制造材料分类的金属齿轮和非金属齿轮，以制造工艺分类的精密铸造（锻造）齿轮和切削加工齿轮，以形状分类的圆柱齿轮、圆锥齿轮、扇形齿轮、齿条，以轮齿分布位置分类的外齿齿轮与内齿齿轮，以齿形分类的直齿齿轮、斜齿齿轮、曲线齿齿轮、人字齿齿轮等，读者可以参阅有关资料了解。

三、渐开线标准直齿圆柱齿轮的基本参数和几何尺寸

以下讨论的齿轮各部分名称及基本参数是齿轮的几何特性参数，与齿轮的加工无关。

1. 渐开线标准直齿圆柱单个齿轮上的几何参数

渐开线标准直齿圆柱单个齿轮上的几何参数：五参数、四圆、三高、两宽、一距（为便于记忆，可简称为单个齿轮的“54321”参数）。

1) 渐开线标准直齿圆柱单个齿轮的五参数

五参数确定了，一个标准直齿轮就确定了。

(1) 齿数 z ：齿轮上突起实体部分（轮齿齿廓）的个数。实体齿轮的齿数 z 一定是整数，当量齿轮的 z 可以是非整数。

齿顶圆到齿根圆之间有材料的实体部分称为轮齿，轮齿的个数称为齿数，用 z 表示，齿数决定齿轮副的传动比，同时还是齿轮基圆直径大小的决定因素之一（影响渐开线的形状，即轮齿的形状）。在轮齿上沿渐开线（面）的轮廓部分称为轮齿的工作轮廓曲线（面），轮齿的轮廓曲线（面）由一段齿顶圆圆弧、两段相向的工作轮廓曲线、两段齿根圆圆弧及连接两两之间的过渡圆弧组成，如图 1-7 所示。

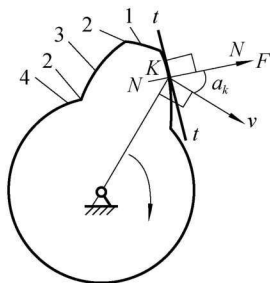


图 1-7 压力角及轮齿示意图

K —齿廓上的任意一点； $t-t$ —过 K 点的齿廓曲线的切线； $N-N$ —过 K 点的齿廓曲线的垂线；

v — K 点的绝对速度； F — K 点的受力方向；1—齿顶圆圆弧；2—过渡圆弧；3—工作轮廓曲线；4—齿根圆圆弧



(2) 模数 m : 表征齿轮轮齿承载能力的参数。齿轮的模数是一个有理数, 用模数来表示齿轮上的除齿数 z 以外的所有参数, 使齿轮的设计、加工都更加方便, 模数是齿轮十分重要的参数。

齿轮某圆上的齿距 p_k 与 π 的比值, 称为模数, 用 m_k 表示如下:

$$m_k = p_k / \pi \quad (1-2)$$

式中, k 表示任意圆, p_k 为该圆上的齿距, 齿距的概念如图 1-8 所示, 由于一个齿轮的工作轮廓线上有无数圆, 所以就有无数个齿距, 因而 m_k 有无数个数, 工程中只研究分度圆上的模数, 分度圆上的模数用 m 表示如下:

$$m = p / \pi \quad (1-3)$$

这样分度圆上的模数就具有唯一性, 从式 (1-3) 中可以看出, 模数是一个有理数, 这样就避免了无理数给齿轮设计、加工带来的不准确性。

由于有理数有无限多个, 为了避免给齿轮设计、加工、互换带来烦恼, 国家标准规定了有限个系列有理数为模数的选定数, 符合这些选定数的模数称为标准模数, 也用 m 表示。标准模数的值如表 1-1 所示。尽管表中都是标准模数, 但应尽可能选用第一系列的数。标准齿轮的模数一定是标准模数, 即使是非标准齿轮, 也尽量避免用非标准模数, 如果允许, 也尽量避免用第二系列的模数。

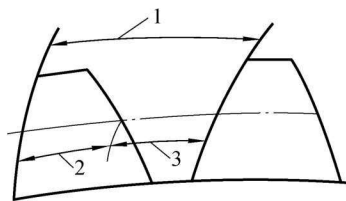


图 1-8 单个齿轮的两宽

1—齿距 p ; 2—齿厚宽 s ; 3—齿槽宽 e

表 1-1 标准模数值

(单位: mm)

第一系列	0.1	0.12	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8
	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
	10	12	16	20	25	32	40	50		
第二系列	0.35	0.7	0.9	1.75	2.25	2.75	(3.25)	3.5	(3.75)	4.5
	(6.5)	7	9	(11)	14	18	22	28	(30)	36

模数表征了齿轮的承载能力, 模数越大, 齿轮综合承载能力越强。设计齿轮时, 解决齿根弯曲疲劳强度的实质就是确定模数的大小, 然后以此去校核齿面接触疲劳强度 (即保证中心距大于会发生齿面接触疲劳时的最小值), 两个方面的承载能力都解决了。

汽车用变速器齿轮模数范围大致如表 1-2 所示。

表 1-2 汽车用变速器齿轮模数范围

(单位: mm)

微型、普通级轿车	中级轿车	中型货车	重型货车
2.25~2.75	2.75~3.00	3.5~4.5	4.5~6.0

(3) 压力角 α : 表征齿轮轮齿受力方向的参数。如图 1-7 所示, 齿轮渐开线上某点的绝对速度与该点法线间所夹的锐角称为压力角, 用 α_k 表示, 由于齿轮上有无数个圆, 所以一个齿轮上有无数个压力角, 其中基圆上的压力角 α_b 最小, 为零, 随着圆直径增大, 压力角也在增大, 一个外啮合齿轮的齿顶圆 (内啮合齿轮的齿根圆压力角 α_f) 上的压力角 α_a 是该圆上的最大压力角, 如果一个齿轮的直径无限大, 渐开线就变成了一条直线, 它的压力角等于 90° , 这是压力角的极大值。在众多的压力角中, 唯有分度圆上的压力角才是我们研究的对象, 所以标准规定分度圆上的压力角为标准压力角, 这是唯一的, 我国规定标准压力角等于 20° , 用 α 表示, 工程上所指的压力角就是指分度圆上的压力角。其他国家规定的标准压力角还有 14.5° 、 15° 、 20° 、 22.5° 、 25° 等 (见《齿轮手册》上册表 14-1.3)。



齿数 z 、模数 m 、压力角 α 三参数一经确定，齿轮的基圆直径就确定了，轮齿的渐开线形状也就确定了，故这是齿轮的三个重要参数。

(4) 齿顶高系数 h_a^* ：表征轮齿高度与模数关系的参数。为了简化齿轮的计算，标准规定用齿高系数 h_a^* 表示齿顶高和齿根高，用来将齿顶高 h 换算成模数。

(5) 齿顶间隙系数 c^* ：表征轮齿齿顶间隙与模数关系的参数，用来将齿顶间隙 c 换算成模数。

表 1-3 齿轮两系数的值

(单位: mm)

项目	标准系数		非标准齿轮	
	正常齿高	短齿高	正常齿高	短齿高
齿高系数 h_a^*	1.0	0.8	可以选用别的值	可以选用别的值
齿顶间隙系数 c^*	0.25	0.3	可以选用别的值	可以选用别的值

以上五个参数决定标准直齿圆柱齿轮轮齿齿廓的形态，除齿数 z 外，其余四个参数都有标准值与非标准值之分。标准齿轮的四参数一定是标准值，但四参数是标准值的齿轮不一定是标准齿轮，因为标准齿轮还有一个条件是 $s=e$ ，其中 s 表示分度圆上的齿厚宽， e 表示分度圆上的齿槽宽。汽车变速器中非标准齿轮用得更多。

2) 单个齿轮上四圆

当一个齿轮的五参数决定后，齿轮就确定了，其圆投影面可以画出无数个不同半径的圆，工程上只对齿顶圆、分度圆、齿根圆、基圆四个圆感兴趣，如图 1-9 所示，图 (a) 是外齿齿轮的圆投影和非圆投影，图 (b) 是内齿齿轮的圆投影和非圆投影。

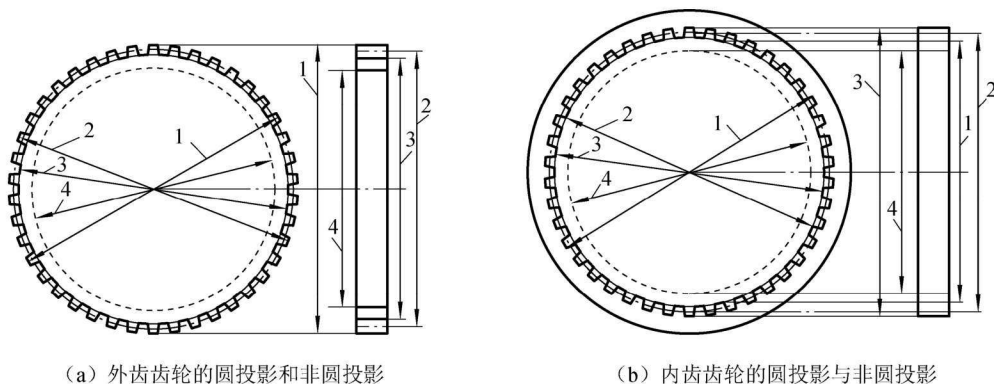


图 1-9 齿轮的四个圆的圆投影与非圆投影

1—齿顶圆；2—分度圆；3—齿根圆；4—基圆

(1) 齿顶圆：齿顶圆是轮齿的齿顶所在的圆，外啮合齿轮的齿顶圆是最大的圆，内啮合齿轮的齿顶圆是最小的圆，齿顶圆上的所有参数都用下标 a 表示，如 d_a 。

(2) 分度圆：齿轮上具有标准模数与标准压力角的圆称为分度圆，分度圆总是位于齿顶圆与齿根圆之间，分度圆是设计、计算、加工齿轮的重要参数，国家标准规定分度圆上的一切参数都不用下标，如 d 、 m 、 p 、 α ，且分度圆用点画线表示。国家标准还规定，在简化画法中用分度圆的点画线表示齿轮的圆投影或非圆投影，本教材以后都尽量用点画线表示齿轮。

(3) 齿根圆：齿根圆是轮齿的齿根所在的圆，外啮合齿轮的齿根圆比齿顶圆小，内啮合齿轮的齿根圆比齿顶圆大，齿根圆上的所有参数都用下标 f 表示，如 d_f 。

(4) 基圆：基圆是渐开线（面）的发生圆（圆柱），基圆上的所有参数都用下标 b 表示，如 d_b ，它与分度圆的关系是



$$d_b = d \cos \alpha \quad [\text{推导见图 1-4 (d)}] \quad (1-4)$$

式中, α 为齿轮的压力角。渐开线标准正常齿高直齿圆柱外齿轮的齿数大于 34 齿后, 基圆直径 d_b 将大于齿根圆直径 d_f 。

3) 齿轮上的三高 (图 1-10)

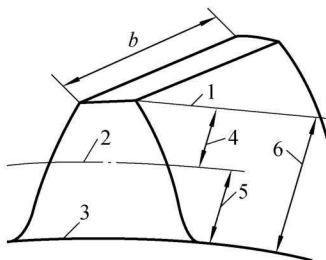


图 1-10 轮齿参数

1—齿顶圆; 2—分度圆; 3—齿根圆; 4—齿顶高; 5—齿根高; 6—全齿高; b —齿宽

(1) 齿顶高。齿顶圆到分度圆之间的部分称为齿顶, 二圆之间的径向距离称为齿顶高, 用 h_a 表示, 正常齿轮的齿顶高计算如下:

$$h_a = h_a^* m = m \quad (1-5)$$

(2) 齿根高。齿根圆到分度圆之间的部分称为齿根, 二圆之间的径向距离称为齿根高, 用 h_f 表示, 正常齿轮的齿根高计算如下:

$$h_f = (h_a^* + c^*) m = 1.25m \quad (1-6)$$

(3) 全齿高。齿顶圆到齿根圆之间的径向距离称为全齿高, 用 h 表示, 正常齿轮的全齿高计算如下:

$$h = h_a + h_f = (h_a^* + h_a^* + c^*) m = 2.25m \quad (1-7)$$

4) 齿轮的两宽

单个齿轮上与弧长有关的参数有三个, 它们分别是齿厚宽、齿槽宽和齿距, 如图 1-8 所示。

(1) 齿厚宽。在垂直于轴线的面上, 同一轮齿齿顶圆与齿根圆之间有材料的实体区域称为齿厚, 任意一个圆在同一齿厚上的弧长称为该圆的齿厚宽, 用 s_k 表示, 下标 k 表示任意圆, 不同圆的齿厚宽 s_k 是不相等的, s 表示分度圆上的齿厚宽。

(2) 齿槽宽。在垂直于轴线的面上, 相邻两轮齿的齿顶圆与齿根圆间没有材料的空间称为齿槽, 任意一个圆在同一齿槽内的弧长称为该圆的齿槽宽, 用 e_k 表示, 不同圆的齿槽宽 e_k 是不相等的, 分度圆上的齿槽宽用 e 表示。

国家标准规定标准齿轮上 $s = e$ 。

5) 单个齿轮的一距

同一齿轮相邻两齿同侧齿廓间的弧长称为齿距, 不同圆上的齿距是不相等的, 半径越大, 齿距越大, 任意圆的齿距用 p_k 表示, 分度圆上的齿距用 p 表示。显然

$$p_k = s_k + e_k = \pi d_k / z \quad (1-8)$$

$$p = s + e = \pi d / z \quad (1-9)$$

三段弧长中都含有 π , 故三个参数均是无理数, 这是不能避免的, 但无理数对齿轮的设计、加工都是很不利的, 必须要避免, 避免的方法就是利用模数, 如式 (1-2) 和式 (1-3), 即式 (1-8) 和式 (1-9) 两边分别除以 π , 得 $m = d/z$, 就变成了有理数, 这个有理数称为齿轮的模数。



6) 标准齿轮

五大参数中除齿数 z 外的四参数（模数 m 、压力角 α 、齿顶高系数 h_a^* 和顶隙系数 c^* ）均采用标准值，且分度圆齿厚宽与齿槽宽相等（ $s=e$ ）的齿轮称为标准齿轮。

应当指出，以上所有参数都是单个齿轮具有的。

综上所述，标准直齿渐开线圆柱齿轮用模数表示后的计算公式如表 1-4 所示。

表 1-4 用模数表示的标准直齿渐开线圆柱齿轮参数计算公式 [长度单位: mm, 角度单位: ($^\circ$)]

序号	项目	计算公式	序号	项目	计算公式
1	分度圆直径 d	$d = mz$	10	齿数 z	由传动比决定，一般不少于 17
2	齿顶圆直径 d_a	$d_a = d \pm 2h_a = m(z \pm 2)$	11	齿顶高系数 h_a^*	$h_a^* = 1$ 或 $h_a^* = 0.8$ 都是标准值
3	齿根圆直径 d_f	$d_f = d \pm 2h_f = m(z \pm 2.5)$	12	齿顶间隙系数 c^*	$c^* = 0.25$ 或 $c^* = 0.3$ 都是标准值
4	基圆直径 d_b	$d_b = d \cos \alpha$	13	齿宽系数 ψ_a	$\psi_a = b/a$ ，一般取 0.4~0.6
5	齿顶高 h_a	$h_a = h_a^* m = m$	14	齿厚宽 s	$s = p - e$ ，标准齿轮 $s = p/2$
6	齿根高 h_f	$h_f = m(h_f^* + c^*) = 1.25m$	15	齿槽宽 e	$e = p - s$ ，标准齿轮 $e = p/2$
7	全齿高 h	$h = h_a + h_f = 2.25m$	16	齿宽 b	$b = \psi_a a$
8	模数 m	$m = p/\pi$	17	齿距 p	$p = \pi d/z = m\pi$
9	压力角 α	我国标准为 20° ，由刀具的压力角决定			

注：1. 表中公式适用于正常齿高，短齿高计算请参阅有关资料。

2. 表中公式中的双加减号处的下面一个符号适用于内啮合齿轮。

3. 国家标准规定 h_a^* 为 1 或 0.8， c^* 为 0.25 或 0.3，其中 1、0.25 为正常齿高。

2. 两个齿轮啮合的几何参数

前面介绍齿轮啮合基本定律时已经涉及两齿轮啮合参数，概括起来是一圆、一角、四线合一、一距、一比、两间隙（为便于记忆，可简称为两个齿轮啮合的“114112”参数），如图 1-11 所示。

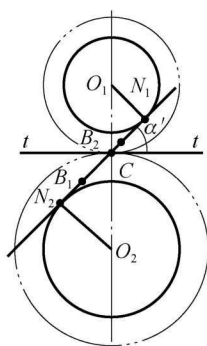


图 1-11 两轮啮合参数

1) 一圆

节圆，分别以两圆圆心为圆心，以 O_1C 和 O_2C 为半径的两个圆就是两齿轮啮合的节圆，两个齿轮的节圆相切于节点 C 。

2) 一角

啮合角，两节圆的内公切线与两基圆的内公切线之间所夹的锐角，如图 1-11 中的 α' 。

3) 四线合一

图 1-11 中的 N_1N_2 是两基圆的内公切线、两圆齿轮的啮合线、两圆渐开线的发生线（面）和两齿轮啮合点处的渐开线（面）的公共法线。四线合一的情况使得渐开线齿轮的受力和加工变得有利。

从图 1-11 中还可知，在啮合线上还可区分理论啮合线 N_1N_2 （啮合线与两基圆的内公切线）和实际啮合线 B_1B_2 （啮合线与齿顶圆的交线）。

4) 一距

中心距 $a = O_1O_2$ ，两齿轮啮合时的中心距实质是两齿轮节圆半径之和，它表征的是齿轮轮齿抵抗表面接触应力破坏的能力，中心距越大，承受表面接触应力的能力就越大，如果中心距大于某一设定值后，轮齿表面就不会发生疲劳点蚀型失效。

标准中心距：两轮的分度圆相切，节圆与分度圆重合时的中心距称为标准中心距。标准齿轮按标准中心距安装的中心距为标准中心距，计算公式如下：