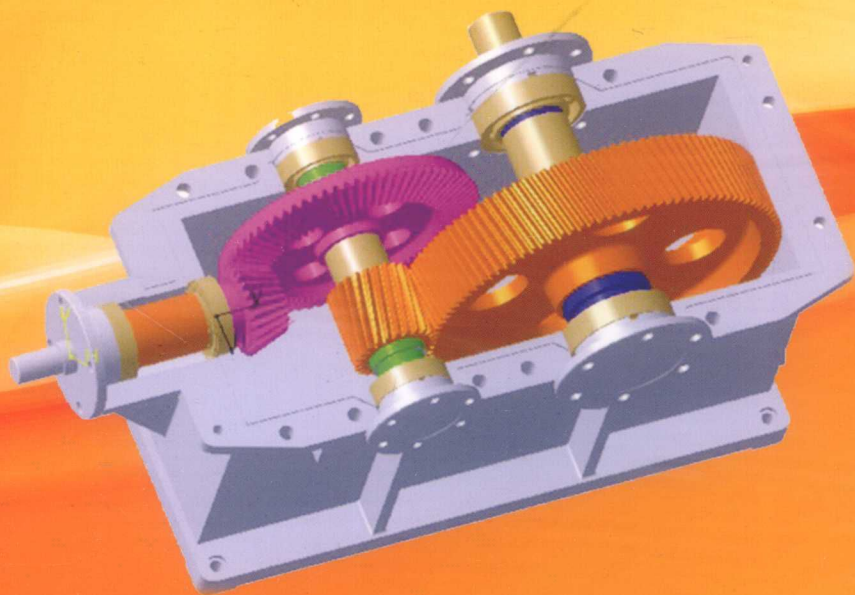


齿轮机构三维CAD/CAE

实用教程

主 编 齐从谦 副主编 何 燕





齿轮机构三维 CAD/CAE

实用教程

主 编 齐从谦
副主编 何 燕
参 编 王士兰



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是一本介绍齿轮传动数字化设计及其机构运动仿真和结构有限元仿真分析的专业图书。全书分为 8 章,包括齿轮机构设计概论、圆柱齿轮设计、圆锥齿轮设计、蜗杆蜗轮设计、非圆齿轮传动设计、齿轮机构装配设计、齿轮机构运动仿真和齿轮机构的力学分析及有限元仿真。各章节内容均包含大量的工程设计案例,以帮助读者理清思路,掌握诀窍,举一反三,熟练应用。本书重点对各类齿轮的三维数字化设计方法及设计过程中容易出现失误的多个细节做了细致入微的阐述,同时还对装配体设计、机构运动仿真及有限元结构分析等做了较为详尽的介绍。各章节中所介绍的设计案例主要由 Dassault Systèmes 公司的 CATIA V5R21 软件实现,但在有些章节中也插入了用 PTC 公司的 Creo3.0 软件及 SIEMENS 公司的 NEXT8.0 软件实现的方法,以供更多的读者参考使用。

全书内容充实,重点突出,特色鲜明,书中具体内容和实例特为高等学校工科类机械设计制造及其自动化、机械电子工程、汽车服务工程等专业的广大学生和教师度身定做。本书可以作为上述各类专业的教学用书,也可供机电类职业技术培训教材以及机电行业广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮机构三维 CAD/CAE 实用教程 / 齐从谦主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.5

ISBN 978-7-5123-8679-2

I. ①齿… II. ①齐… III. ①齿轮机构-计算机辅助技术-教材 IV. ①TH132.41-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 305234 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 杨淑玲 责任印制: 蔺义舟 责任校对: 闫秀英

北京市同江印刷厂印刷·各地新华书店经售

2016 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·13 印张·311 千字

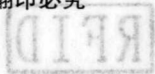
定价: 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

2015年3月5日,国务院总理李克强在第十二届全国人民代表大会第三次会议上所做的政府工作报告中,明确提出了实施创新驱动发展战略,实现制度创新、科技创新和制造创新的伟大目标。而制造创新的具体内涵就是要实施“中国制造2025”,走新型工业化的道路,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快从制造大国转向制造强国。这是我国政府在制造业领域务实求新,努力向德国的工业4.0及美国的CPS转型的重大举措。德国的工业4.0及美国的CPS的核心要义就是制造业应能实现基于数据分析的转型和延伸性服务。新一代信息技术与制造业深度融合,正在引发影响深远的产业变革,形成新的生产方式、产业形态、商业模式和经济增长点,这正是当前工业发展的大趋势。

创新创造关键在人,作为培养新一代工程技术人才的我国高等工科教育,应该紧跟这一大好形势,为工业化与信息化的深度融合培养出一大批具有创新能力的实用型工程技术人才。为此,本书作者在长期使用和讲授国外多款高端CAD软件的基础上,在中国电力出版社的支持下,以机械产品中最常用的齿轮机构为专题,编写了这本《齿轮机构三维CAD/CAE实用教程》。

随着经济全球化、信息一体化的快速发展,尤其是三维CAD技术的深化应用,PLM(Product Life-circle Management,产品全生命周期管理)的制造理念和MBD(Model Based Definition,基于模型定义)的数字化设计与制造技术及数据分析应用已经成为制造业信息化的发展趋势,也正是“中国制造2025”应有之要义。编写本书的指导思想就是以PLM理念和MBD技术为指导,强调机械原理、机械设计、机械制造工艺等基础理论知识与计算机软件和网络技术的融合,综合运用在机械制图、AutoCAD、材料力学、机械原理、机械设计、课程设计及三维建模技术(CATIA)等先修课程中所学到的基本理论、知识和方法,注重理论与实践的密切结合,突出创新意识和创新设计能力的提高,切实培养具有实际应用能力和创新能力的实用型技术人才。

齿轮机构虽然是一种典型、传统的机械产品,但它在机电、汽车、航空及船舶等各个行业内起到了举足轻重、不可或缺的关键作用。本书将采用全新的设计理念和动态分析方法对这一传统的机械产品进行新的诠释,对各类齿轮机构进行系统化的组织,并以大量的工程设计实践作为教学案例,具体地介绍各类齿轮机构和齿轮产品的设计过程和机构运动仿真及结构有限元仿真分析的方法。特别在解决问题的方式方法上注重对学生实际应用能力的培养,以帮助读者明确设计意图,理清设计思路,掌握设计诀窍,举一反三,灵活应用。

本书的编撰是以渐开线齿轮传动为主线,以CATIA V5R21软件为支撑而成书的,所以大多数零件和产品的设计都是采用CATIA V5R21软件创建。为了使本书所介绍的内容在软件使用方面更具有可推广和可复制性,有些章节也插入了使用PTC公司的Creo3.0软件及SIEMENS公司的Next 8.0软件实现的方法和过程,以供更多读者的使用与参考。

全书共分为8章,各章的主要内容如下:

第1章 齿轮机构设计概论,介绍了齿轮机构的分类、特点及应用场合等基本知识,并着

重介绍了渐开线齿轮的齿形轮廓生成的方法。

第 2 章 圆柱齿轮设计, 其中包括直齿圆柱齿轮和斜齿圆柱齿轮, 这是齿轮设计的最基本的内容, 也是进一步设计其他类型齿轮的基础。

第 3 章 圆锥齿轮设计, 包括直齿圆锥齿轮和弧齿圆锥齿轮两大类型。

第 4 章 蜗杆蜗轮设计, 主要介绍以阿基米德蜗杆为代表的蜗杆蜗轮传动机构的设计方法。

第 5 章 非圆齿轮传动设计, 从数学物理方程中的第二类完全椭圆积分出发, 导出了以椭圆齿轮为代表的非圆齿轮节曲线的创建公式, 以及使用 CAD 软件构造标准椭圆齿轮渐开线齿廓的方法和技巧。

第 6 章 齿轮机构装配设计, 介绍在 CATIA V5R21 的装配环境下齿轮机构的装配设计方法和过程。

第 7 章 齿轮机构运动仿真, 分别以二级齿轮减速机构、汽车差速机构和锻压机床椭圆齿轮急回机构为例介绍了齿轮机构运动仿真的方法和技巧。

第 8 章 齿轮机构的力学分析及有限元仿真, 具体介绍了齿轮传动中齿轮和齿轮轴的受力分析和强度计算方法, 并以单个齿轮和装载齿轮的轴为例, 详细地介绍了齿轮及轴的有限元结构分析仿真的方法和步骤。

本书由同济大学齐从谦教授任主编, 上海师范大学天华学院何燕讲师任副主编, 参加编写的还有同济大学王士兰副教授。齐从谦负责编写并完成第 2~6 各章内容, 何燕编写并完成第 8 章的内容, 王士兰编写并完成第 1 章和第 7 章的内容, 全书统稿工作由齐从谦完成。上海师范大学天华学院李文静老师对全书各章的内容进行了仔细认真地校对, 作者特致以真诚的谢意。

本书内容充实、全面, 组织编排合理。全书最大的特色是科学、严谨地介绍了各类渐开线齿轮的齿廓曲线的创建方法, 书中所引入的“当量齿轮”的概念对斜齿轮、锥齿轮、蜗轮及非圆齿轮的创建具有特别重要的理论意义和实践意义, 也对当前不少出版物中关于齿轮设计中的种种谬误和不妥之处进行了更正。本书配有各章讲解和创建的实例及若干视频文件 (AVI 格式), 供读者上机演练时参考使用。如有需要, 可发邮件到 315429517@qq.com 说明。

本书重点突出, 特色鲜明, 书中具体内容和实例特为高等学校工科类机械设计制造及其自动化、机电一体化、汽车服务工程等专业的广大教师和学生度身定做。可以作为上述各类专业的课程设计和 CAD 实训教学用书, 也可以作为机电类职业技术培训教材以及机电行业广大工程技术人员的参考用书。

由于编者水平有限, 书中难免有错误和疏漏之处, 敬请各校师生及广大读者给予批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 齿轮机构设计概论	1
1.1 齿轮在机械产品中的重要地位	1
1.2 齿轮传动的特点	4
1.3 齿轮传动的分类	4
1.4 渐开线生成的基本原理及在 CAD 中的实现	7
1.4.1 渐开线生成的基本原理及性质	7
1.4.2 在 CAD 环境中构造渐开线	9
习题 1	17
第 2 章 圆柱齿轮设计	18
2.1 圆柱齿轮设计概述	18
2.2 标准直齿圆柱齿轮设计	18
2.2.1 标准直齿圆柱齿轮的基本参数	18
2.2.2 标准直齿圆柱齿轮的设计方法	19
2.2.3 内啮合圆柱齿轮设计	23
2.3 斜齿圆柱齿轮设计	27
2.3.1 斜齿圆柱齿轮的工作原理	27
2.3.2 斜齿圆柱齿轮的设计过程	29
2.3.3 人字齿轮的设计	33
习题 2	36
第 3 章 圆锥齿轮设计	37
3.1 圆锥齿轮设计概述	37
3.1.1 圆锥齿轮的特点及分类	37
3.1.2 圆锥齿轮齿廓曲面的形成和当量齿轮	38
3.2 直齿圆锥齿轮设计	39
3.2.1 直齿圆锥齿轮的设计参数	39
3.2.2 创建直齿圆锥齿轮三维实体模型	40
3.3 弧齿锥齿轮的设计	45
3.3.1 弧齿锥齿轮的基本概念	45
3.3.2 弧齿锥齿轮设计举例	46
习题 3	55

第 4 章 蜗杆蜗轮设计	58
4.1 蜗杆、蜗轮传动的特点及分类	58
4.1.1 蜗杆蜗轮传动的特点	58
4.1.2 蜗杆的分类	58
4.2 蜗杆设计实例	59
4.2.1 蜗杆的主要设计参数	59
4.2.2 蜗杆设计的方法和步骤	60
4.2.3 多头蜗杆的设计方法	62
4.3 蜗轮设计实例	64
4.3.1 蜗轮的主要设计参数	64
4.3.2 蜗轮设计的方法和步骤	65
习题 4	68
第 5 章 非圆齿轮传动设计	70
5.1 非圆齿轮设计概述	70
5.1.1 非圆齿轮机构的特点和功用	70
5.1.2 椭圆齿轮的工作原理和节曲线求解	72
5.2 椭圆齿轮设计实例	75
5.2.1 椭圆齿轮设计思路	75
5.2.2 椭圆齿轮主参数计算	77
5.2.3 椭圆齿轮设计的 CATIA 实现	77
习题 5	84
第 6 章 齿轮机构装配设计	85
6.1 装配设计综述	85
6.1.1 产品装配模型的层次结构	85
6.1.2 虚拟装配技术的优点和过程	86
6.1.3 CATIA 装配设计基本工具	87
6.2 两级蜗杆/蜗轮及齿轮传动减速器装配设计	89
6.2.1 两级减速器的结构组成	89
6.2.2 两级减速器部件装配	91
6.2.3 两级减速器的总装配	95
6.3 齿轮机构中的箱体设计	98
6.3.1 箱体设计的规划和布局	99
6.3.2 箱体的总体设计	100
6.3.3 下箱体的进一步设计	103
6.3.4 上箱体的进一步设计	105
6.3.5 端盖设计举例	106
6.4 汽车差速机构总成装配设计	108

6.4.1	差速机构总成装配思路	109
6.4.2	差速机构各子组件的装配	110
6.4.3	差速器组件的总装配	117
	习题 6	121
第 7 章	齿轮机构运动仿真	123
7.1	齿轮运动仿真概述	123
7.1.1	机构运动仿真的意义	123
7.1.2	CATIA V5R21 的机构运动仿真环境	124
7.1.3	机构运动仿真基础知识	126
7.2	二级齿轮传动机构的运动仿真	129
7.2.1	二级齿轮传动机构的运动仿真前处理	129
7.2.2	二级齿轮传动机构的运动模拟	134
7.3	汽车差速机构运动仿真分析	142
7.3.1	汽车差速器的基本原理及运动关系	142
7.3.2	主减速器运动仿真	144
7.3.3	差速轮系的装配及运动关系	146
7.3.4	差速机构总成的运动仿真	148
7.4	锻压机床椭圆齿轮传动急回机构运动仿真	155
7.4.1	锻压机床急回机构的工作原理及结构模型	155
7.4.2	基于 Creo3.0 的椭圆齿轮急回机构运动仿真	155
	习题 7	165
第 8 章	齿轮机构的力学分析及有限元仿真	167
8.1	齿轮和齿轮轴的力学分析	167
8.1.1	标准直齿圆柱齿轮的力学分析	167
8.1.2	齿轮轴的力学分析	172
8.2	有限元分析的基础知识	174
8.2.1	有限元分析简介	174
8.2.2	有限单元法及其基本术语	175
8.2.3	有限元分析的基本流程和应用领域	176
8.3	CATIA V5R21 有限元仿真的工具和步骤	177
8.3.1	CATIA V5R21 有限元仿真的主要工具	177
8.3.2	CATIA V5R21 有限元仿真分析步骤	180
8.4	齿轮和齿轮轴有限元仿真实例	186
8.4.1	标准直齿圆柱齿轮的有限元仿真	186
8.4.2	齿轮轴的静态有限元仿真分析	190
	参考文献	197

第1章 齿轮机构设计概论

1.1 齿轮在机械产品中的重要地位

齿轮及其传动机构是机械工业中一大类最常用且最重要的基础件之一，齿轮和齿轮机构的设计和制造质量直接关系到整个机械工业的技术水平。齿轮的结构设计、尤其是轮齿的构型和实现，是指导和实施齿轮产品的加工、检测、装配乃至整个生产过程的依据和先导，因而也是决定此类产品技术性能和经济效益的重要环节。

齿轮机构在各类机械行业包括机床制造业、工程机械、建筑机械、轻工机械、印刷机械、交通运输，汽车拖拉机制造业、航空工业、船舶制造及国防工业等国民经济的各个重要行业都得到十分广泛的应用，成为不可或缺的重要部件。

以机床制造业为例，几乎任何一台机床都离不开齿轮。图 1-1 所示为 C-6140 车床的主轴变速机构，由多个齿轮间的交换啮合，可以令车床主轴获得不同的转速和转矩，以适应加工各类不同的回转类工件。图 1-1 和图 1-2 所示为车床进给机构中的变速齿轮。图 1-3 和图 1-4 所示，分别为 C-6140 车床和 X-62W 万能铣床的主轴变速机构。

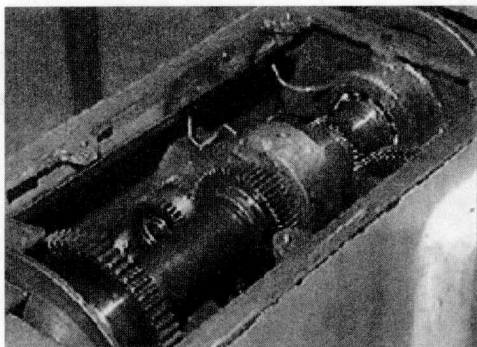


图 1-1 车床变速箱中的齿轮（实拍）

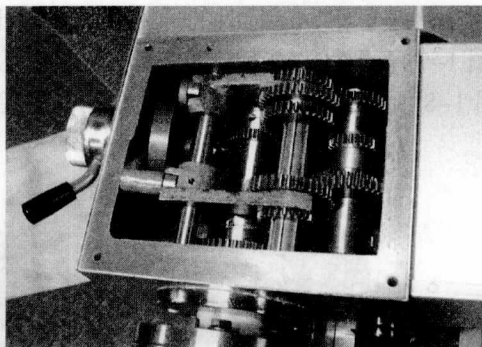


图 1-2 车床进给机构变速箱（实拍）

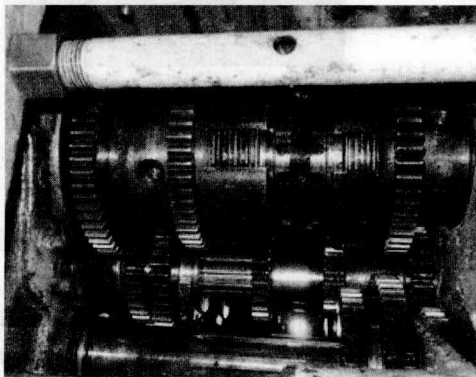


图 1-3 车床主轴变速机构（实拍）

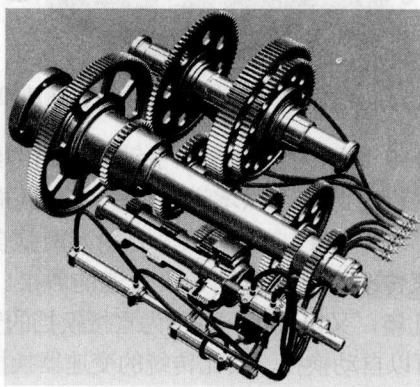


图 1-4 铣床主轴变速机构

图 1-5 所示为多级通用齿轮变速箱,图 1-6 所示为二级通用齿轮变速箱的三维装配模型。这些变速箱的输入端可以用普通的三相交流电机作为动力输入,通过带轮、齿轮(或蜗杆、蜗轮)变速获得一种或多种低速大转矩的输出,它们作为一种通用的变速装置广泛用于各种运输、工程机械设备中。

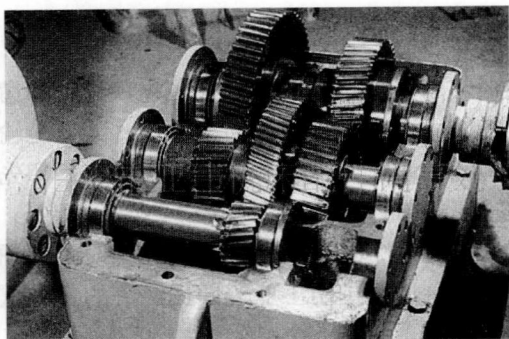


图 1-5 多级通用齿轮变速箱(实拍)

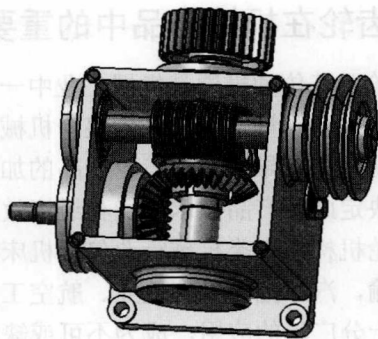


图 1-6 二级通用齿轮变速箱三维装配模型

在汽车行业,早期的汽车变速机构几乎全部使用齿轮实现变速,即使发展到当前的汽车全自动电子变速或液压变速,其中齿轮也是不可或缺的重要部件。

在各类汽车变速机构中,使用的齿轮几乎都是斜齿轮,因为斜齿轮啮合具有较大的重合度,传动比较平稳,运行时的冲击和噪声都比较小,对于轿车还将大大提高其舒适度。

图 1-7 所示为普通大众轿车的变速箱,从图中可以看到,几乎所有的齿轮都采用了斜齿轮。图 1-8 所示是一种新款大众轿车的变速箱的结构图。这类变速箱大都采用手动换挡变速。

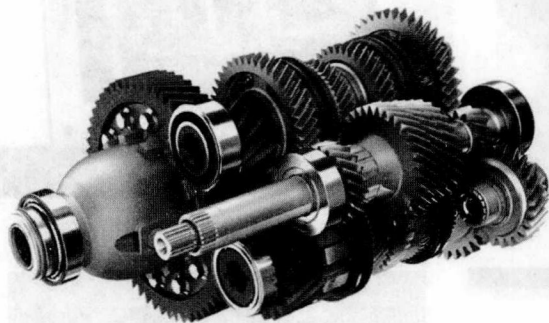


图 1-7 普通大众轿车变速箱

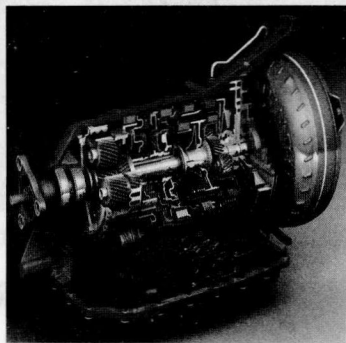


图 1-8 新款大众汽车变速箱

图 1-9 所示为一种 5 挡手动变速箱的结构示意图,图 1-10 是该变速箱的构造图。读者将二者进行对照,可以增进对汽车变速机构结构和功能的理解。

图 1-11 和图 1-12 所示,分别为两款自动变速箱的构造图,后者在齿轮传动的基础上增加了摩擦传动,可以得到无级变速的效果。

近几年,又出现了一种称为直接换挡的变速器(Direct Shift Gearbox),这种变速箱可以手动换挡也可以自动换挡,要比传统的变速器换挡反应更快,能传递更大的功率,而且效率更高、更易于控制。图 1-13 所示是一种 7 速 DSG 变速箱的工作原理。直接换挡变速箱中如果使用了两个离合器,也能达到自动变速箱的效果,又称之为 DSG 双离合自动变速箱,如图 1-14 所示。

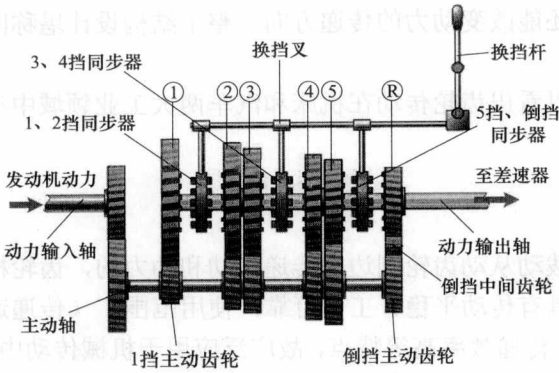


图 1-9 一种 5 挡手动变速箱结构示意图

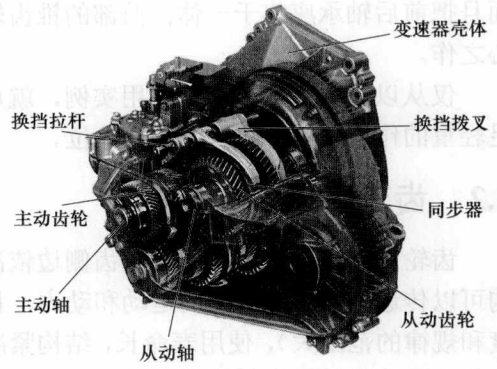


图 1-10 手动变速箱构造图

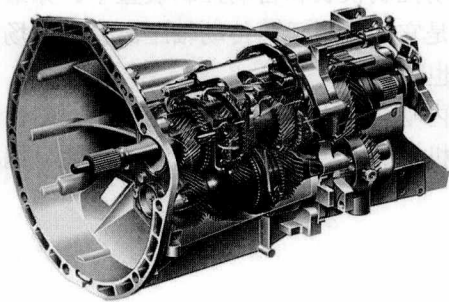


图 1-11 自动变速箱构造图

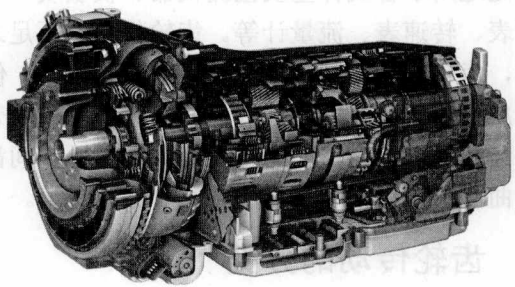


图 1-12 自动无级变速箱构造图

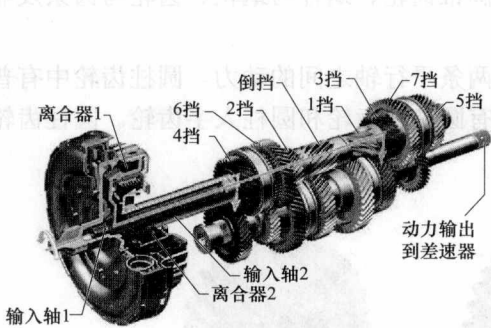


图 1-13 7 速 DSG 变速箱工作原理

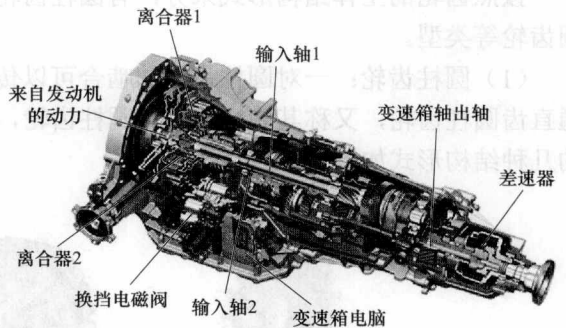


图 1-14 DSG 双离合自动无级变速箱构造图

在航空工业中，对变速器的要求更高，它不仅要求变速器能够输出更多的速度级数和更大的转矩，还要求变速器具有更紧凑的结构，尽可能轻的质量，占用更少的空间；还要满足更高的强度和刚度。图 1-15 所示是一种具有多项功能的、结构紧凑的航空变速箱齿轮。

这种变速机构直接与发动机前端相连，其中空的薄壁结构可大大减轻减速箱的质量，不仅增加了齿轮本体的刚度，还为发动机预留了可用空间，

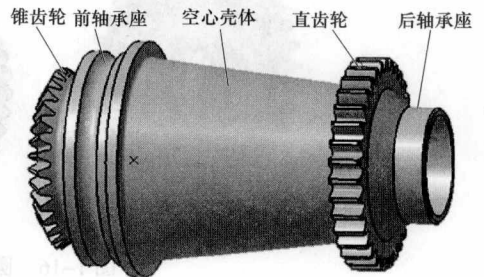


图 1-15 一种具有多功能的、结构紧凑的航空变速箱齿轮

而且把前后轴承座集于一体；前部的锥齿轮还能改变动力的传递方向，整个结构设计堪称匠心之作。

仅从以上所列出的这些应用实例，就可以看出齿轮传动在机床和汽车两大工业领域中举足轻重的作用和不可或缺的重要地位。

1.2 齿轮传动的特点

齿轮传动是靠主动齿轮的轮齿侧边依次拨动从动齿轮侧边来传递运动和动力的，齿轮机构可以传递空间任意轴间的运动和动力，且具有传动平稳、工作可靠，使用范围广（传递速度和规律的范围大），使用寿命长，结构紧凑，传递效率高等特点，故广泛应用于机械传动中。此外由于齿轮传动与其他传动方式，如带传动、链传动等相比具有更为精确的传动比，因此被广泛地用于各类计量及检测仪器、仪表及一些自动控制仪表和自动控制装置中。如最常见的钟表、转速表、流量计等。齿轮传动的不足之处是它不宜用于两传动轴距离较大的场合，另外，齿轮的加工制造及安装要求也比较高，价格也略贵。

广义的齿轮机构除了标准圆柱齿轮（外啮合或内啮合）之外，还有齿轮齿条、斜齿轮、人字齿轮（以上为平面齿轮机构）和用于空间齿轮机构的直齿、斜齿锥齿轮，蜗轮、蜗杆及准双曲面齿轮、格利森弧齿轮及非圆齿轮等。

1.3 齿轮传动的分类

1. 按主体结构形式分类

按照齿轮的主体结构形式来分，有圆柱齿轮、圆锥齿轮、蜗杆与蜗轮、齿轮与齿条及非圆齿轮等类型。

(1) 圆柱齿轮：一对圆柱齿轮的啮合可以传递两条平行轴之间的动力。圆柱齿轮中有普通直齿圆柱齿轮，又称其为标准直齿圆柱齿轮，还有圆柱斜齿轮和圆柱人字齿轮。圆柱齿轮的几种结构形式如图 1-16 所示。

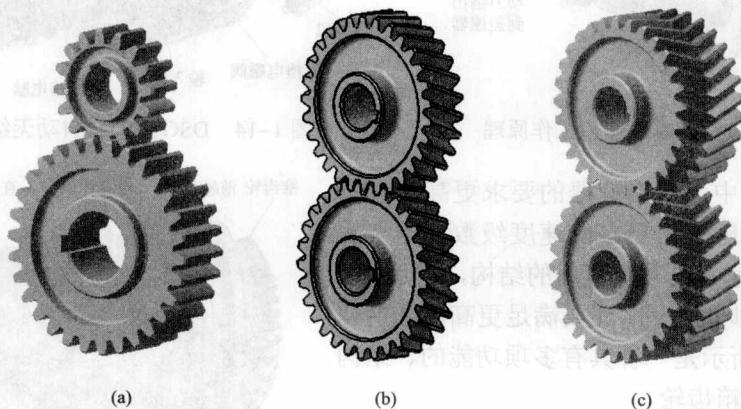


图 1-16 圆柱齿轮的几种结构形式

(a) 直齿；(b) 斜齿；(c) 人字齿

(2) 圆锥齿轮：一对圆锥齿轮的啮合可以传递两条成正交的相交轴之间的动力。圆锥齿

轮中有直齿圆锥齿轮, 还有斜齿圆锥齿轮、弧齿圆锥齿轮及双曲面圆锥齿轮。图 1-17 所示分别为直齿圆锥齿轮和弧齿圆锥齿轮。

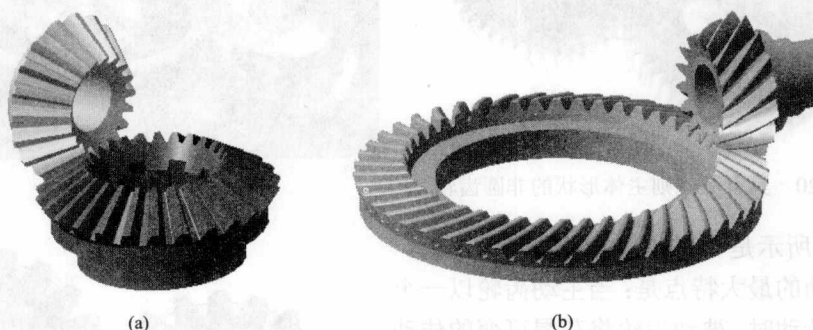


图 1-17 圆锥齿轮的结构形式

(a) 直齿; (b) 弧齿

(3) 蜗杆与蜗轮: 从外形上看, 蜗杆与蜗轮虽也具有圆柱形的特征, 但是它们的齿形结构已不是一般意义上的圆柱齿轮, 而有其自己独特的结构形式。常用的标准阿基米德蜗杆的齿廓形状为两侧成一定角度 (通常为 $2 \times 20^\circ$) 的直边。而蜗轮的齿形也像斜齿轮那样, 与圆柱面的母线成一定角度, 这个倾斜角恰好等于与之相配套的蜗杆的导程角; 蜗轮的整个齿形则“蜗居”在齿圈内, 这也是蜗轮名称的由来。一对蜗杆、蜗轮的啮合可以传递两条成正交的相交轴之间的运动和动力。图 1-18 所示为一对蜗杆、蜗轮的传动。

(4) 齿轮与齿条: 当一对相互啮合的齿轮中的一个齿轮的直径变成无限大时, 这个齿轮就转换为齿条, 它的曲线齿廓也变成了直线, 这便是一个齿轮与一根齿条的啮合传动。因此, 齿条可以看成是齿轮的特例, 只是结构形式变了。齿轮与齿条啮合可以传递平行轴之间的动力, 并且把旋转运动转换为直线运动, 或者把直线运动转换为旋转运动, 通过齿条的直线运动长度来控制齿弧的转角, 达到控制目的。图 1-19 所示即为齿轮与齿条之间的传动。

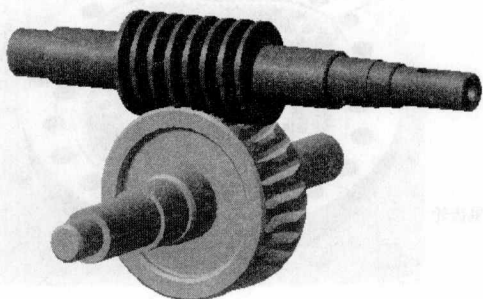


图 1-18 蜗杆、蜗轮传动

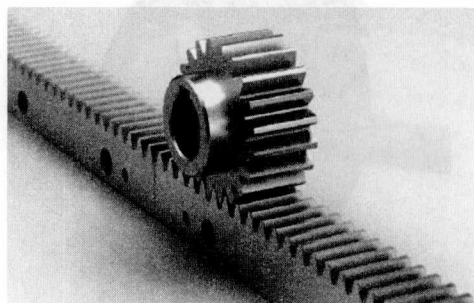


图 1-19 齿轮与齿条传动

(5) 非圆齿轮: 还有一类齿轮传动, 它们自身的主体形状已不再是圆形, 而是各种非圆形状。图 1-20 所示的非圆齿轮, 其主体形状为不规则非圆曲线; 图 1-21 所示的非圆齿轮形如鹅卵, 故又称为卵形齿轮。这类齿轮在齿轮流量计中得到广泛应用。

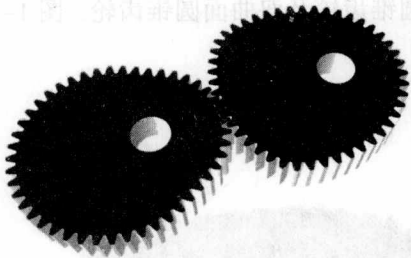


图 1-20 具有不规则主体形状的非圆齿轮

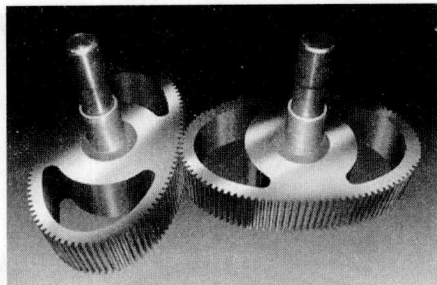


图 1-21 卵形齿轮

图 1-22 所示是一对典型的椭圆齿轮传动。椭圆齿轮传动的最大特点是：当主动齿轮以一个定常的转速转动时，被动齿轮将获得可变的传动比。这一特色使得它们常被应用在一些有特定传动比要求的场合，如机床的急回机构中。

2. 按传动形式分类

若按传动形式分类，齿轮传动又可以分为定轴传动和动轴传动两大类。

(1) 定轴齿轮传动：像图 1-16、图 1-17 和图 1-18 中的那些齿轮传动都属于定轴传动，即在传递运动和动力的过程中各个齿轮自己的回转轴都是固定不动的。

(2) 动轴齿轮传动：所谓动轴传动是指相互啮合的一对齿轮或多个齿轮中某些齿轮的回转中心是固定的，但其中有些齿轮随着运动状态的变化，其自身的回转中心也在不断地变动。如图 1-23 所示的差速机构的行星齿轮，在与左右驱动轮啮合传动的过程中随时改变自己的回转中心位置。图 1-24 中非圆齿轮传动中的行星齿轮与内外齿轮之间的传动也属于动轴传动。

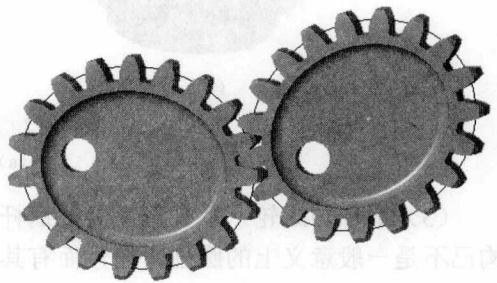


图 1-22 一对椭圆齿轮的传动

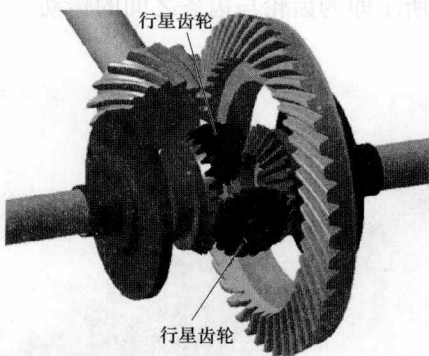


图 1-23 差速机构中的行星齿轮

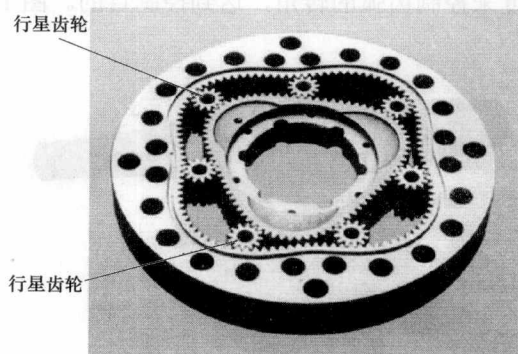


图 1-24 非圆齿轮传动中的行星齿轮

图 1-19 中的齿轮齿条传动，在齿条固定不动的情况下，与之相啮合的齿轮在转动的同时，也在不断地改变其回转中心的位置，也属于动轴传动。

3. 按啮合形式分类

按啮合形式分类，齿轮传动又可分为外啮合传动和内啮合传动两大类。

(1) 外啮合齿轮传动：以上从图 1-16~图 1-23 中的齿轮传动全是外啮合传动，这是大多数齿轮传动的啮合形式。

(2) 内啮合齿轮传动：图 1-24 中的多个行星齿轮与非圆齿圈的啮合属于内啮合形式，但它们与内部非圆齿轮的啮合仍然是外啮合。

请注意：在内啮合的情况下，内齿圈的轮齿曲线是“内凹”的。因此在设计此类齿轮传动时应特别引起注意。

从图 1-25 中的一对内啮合齿轮传动中可以明显地看到：内齿圈的齿廓曲线是“内凹”的。图 1-26 所示为转子发动机中的一对内啮合齿轮传动，其中位于内部的圆柱齿轮是固定不动的，与之内啮合的转子齿轮属于动轴传动，三角转子齿轮回转中心的运动轨迹是一个呈“8”字形的封闭曲线。

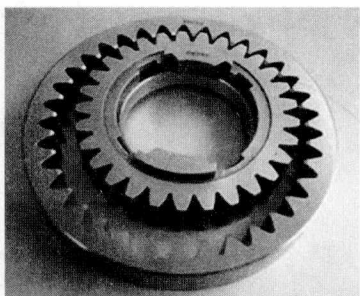


图 1-25 内啮合齿轮

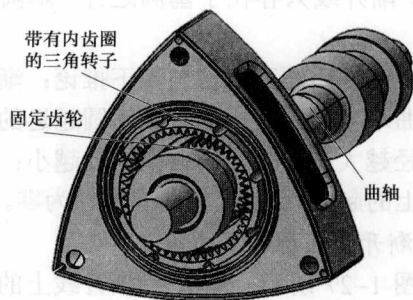


图 1-26 转子发动机中内啮合齿轮

4. 按齿廓曲线形式分类

若按齿轮的齿廓曲线分类，有如下多种形式：

- (1) 渐开线齿轮。
- (2) 准渐开线齿轮。
- (3) 双曲线齿轮。
- (4) 圆弧齿轮。
- (5) 摆线齿轮。
- (6) 谐波齿轮。

本书将以渐开线齿轮为主要对象，详细地介绍各类渐开线齿轮的三维数字化模型的创建方法和步骤，并着重结合渐开线齿轮和各类圆锥齿轮、非圆齿轮的创建过程与具体应用，展示本书编著者的若干创新设计思想。

1.4 渐开线生成的基本原理及在 CAD 中的实现

1.4.1 渐开线生成的基本原理及性质

1. 渐开线的形成

齿轮传动具有传动比准确、传动精度高、传动平稳等特点。因为齿轮的齿廓是由渐开线曲面构成的，渐开线轮齿侧边之间无滑动的滚动啮合是实现高精度和平稳传动的关键。

由机械原理可知：在图 1-27 中，直线 $n-n$ 沿圆 O 圆周作纯滚动时，直线上任意一点 K 的轨迹 $\widehat{K_0K}$ 称为该圆的渐开线。这个圆 O 称为渐开线的基圆，其半径用 r_b 表示；直线 $n-n$

称为渐开线的发生线, $\theta_k (= \angle K_0OK)$ 称为渐开线 $\widehat{K_0K}$ 段的展角。

2. 渐开线的性质

由渐开线生成的基本原理可知, 渐开线具有下列性质:

(1) 发生线沿基圆滚过的长度等于基圆上被滚过的弧长, 即 $\widehat{K_1K} = \widehat{K_0K_1}$ 。

(2) 渐开线上任一点的法线必与基圆相切。

(3) 发生线与基圆的切点 K_1 是渐开线上点 K 的曲率中心, 而线段 $\widehat{K_1K}$ 是其对应的曲率半径。

(4) 渐开线的形状决定于基圆的大小, 基圆越大, 渐开线越平直; 当基圆半径趋于无限大时, 渐开线将成为一条垂直于 $\widehat{K_1K}$ 的直线。这种情况下, 圆形的齿轮就演化成平直的齿条齿廓。

(5) 渐开线只存在于基圆之外, 基圆内无渐开线。

由上述性质还可以得出如下推论: 渐开线上各点的曲率半径是不同的, 离基圆越远的点, 其曲率半径越大; 反之, 则曲率半径越小; 渐开线在基圆上的起始点 K_0 处的曲率半径为零。

3. 渐开线齿廓的压力角

如图 1-27 所示, 点 K 为渐开线上的任意一点, 其曲率半径用 r_k 表示。如果用这一段渐开线作为齿轮的齿廓, 当齿轮绕轴心 O 点转动时, 齿廓上 K 点的速度方向应垂直于直线 OK , 即沿着直线 KV 的方向。工程上把发生线 K_1K 与 K 点的速度方向线 KV 之间所夹的锐角称为渐开线齿廓在该点的压力角, 用 α_k 表示, 其大小等于 $\angle K_1OK$ 。

由于齿廓的渐开线在不同的圆上具有不同的压力角, 我国国家标准 (GB) 规定分度圆压力角 α 的标准值一般为 20° ; 分度圆压力角 α 又称为齿形角。

4. 渐开线函数

由图中的几何关系, 可以求得

$$\begin{aligned} \cos \alpha_k &= r_b / r_k \\ \tan \alpha_k &= \widehat{K_0K_1} / r_b = r_b (\alpha_k + \theta_k) / r_b = \alpha_k + \theta_k \end{aligned}$$

将这两个关系式进行整理, 即得到

$$\left. \begin{aligned} r_k &= r_b / \cos \alpha_k \\ \theta_k &= \tan \alpha_k - \alpha_k \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

如果把 OK 视为一个由坐标原点 O 指向渐开线上任一点 K 的矢量, 那么式 (1-1) 中 r_k 和 θ_k 的几何意义是十分明确的: r_k 是该矢量的矢径, θ_k 为矢角——该矢量与坐标系 X 轴正向的夹角。式 (1-1) 正是渐开线在极坐标下的数学表达。其中 $\theta_k = \tan \alpha_k - \alpha_k$ 称为渐开线函数, 记作

$$\text{inv} \alpha_k = \theta_k = \tan \alpha_k - \alpha_k \quad (1-2)$$

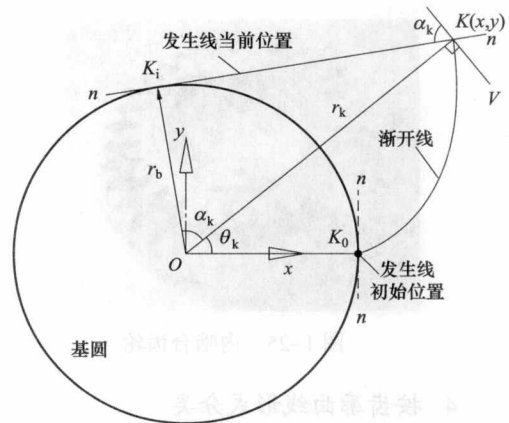


图 1-27 渐开线生成的原理

也就是说渐开线函数 $\text{inv}\alpha_k$ 是压力角 α_k 的函数。

由于 $\text{inv}\alpha_k$ 是一个超越函数, 工程上通常使用数值计算的方法把不同压力角 α_k (按度、分、秒的变化) 的渐开线函数值计算出来, 制成表格以备查用。大多数机械设计手册和齿轮传动设计手册都有这样的表格备查。

1.4.2 在 CAD 环境中构造渐开线

如果利用手册查表方式, 按照 α_k 度、分、秒的变化来逐个求得不同压力角的 $\text{inv}\alpha_k$ 值, 再去构造渐开线, 实在是过于烦琐。在 CAD 环境下, 可以利用各类 CAD 软件的功能, 采用不同的方式快速地构造渐开线图形。

在计算机辅助几何设计 (CAGD) 中, 大多采用一种“非均匀有理 B 样条” (NURBS) 理论和技术把空间或平面上的若干离散的点 (通常把这些点称为型值点) 拟合成样条曲线, 所得到的样条曲线通过或以非常高的拟合精度接近这些离散点, 且能达到十分令人满意的光顺性。在齿轮三维设计中正是使用这种方法来构造齿轮齿廓的渐开线。

以下给出在不同的 CAD 软件环境下构造渐开线的具体方法和过程。

对于标准圆柱齿轮来说, 可以通过它的模数 m 、齿数 Z_n 和分度圆压力角 α 等基本参数来依照式 (1-1) 计算出 r_k 和 α_k 的值。在如下的实例中, 设齿轮的模数 $m=3$, 齿数 $Z_n=30$, 分度圆压力角 $\alpha=20^\circ$ 。

1. 在 CATIA V5R21 中创建渐开线

在 CATIA 中, 由式 (1-2) 所描述的函数关系所定义的曲线叫作规则曲线, 因为 CATIA 软件的知识专家工作台仅支持直角坐标下的参数计算, 所以还必须对式 (1-1) 稍作变换, 使之转化为直角坐标下 x 、 y 坐标值的表达形式。由简单的三角关系算法, 分别将矢径 r_k 投影到 x 轴和 y 轴上

$$x = r_k \cos\theta_k = r_k \cos(\tan\alpha_k - \alpha_k), y = r_k \sin\theta_k = r_k \sin(\tan\alpha_k - \alpha_k)$$

于是, 可以得到

$$\left. \begin{aligned} x &= r_k \cos(\tan\alpha_k - \alpha_k) \\ y &= r_k \sin(\tan\alpha_k - \alpha_k) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 是我们在 CATIA 中构造渐开线的算法基础。

(1) 对零件基础结构中的选项进行预设置。使用 CATIA 软件来构造渐开线, 要经常使用到“参数”和“关系”这些基础结构元素。而在缺省情况下, 这两个结构选项是未被选中的, 这样将来在模型树上无法看到它们, 使用起来极为不便。因此, 需要对 CATIA 软件的基础结构/零件基础结构中有关“知识工程专家”工作台的“参数”和“关系”等选项进行预设置, 以确保在模型树中出现“参数”和“关系”的节点, 满足设计过程中的使用要求。

具体的预设置过程如下:

点击 CATIA V5R21 工作界面主菜单中点“工具”, 展开工具下拉菜单, 选择下拉菜单中的选项, 弹出“选项”对话框。如图 1-28 所示, 选择“选项”对话框左侧目录树上“基础结构”节点, 再选择该节点下的“零件基础结构”分支, 再把右侧的选项卡切换到“显示”选项卡, 分别选择“参数”和“关系”两个复选框。

此外在缺省情况下, 工作界面图形区内的三个基准平面的尺寸是 10mm, 如果感到较小,