



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

The Principle of Machinery

# 机械原理

(第4版)

安子军 主编

· 厚基础 宽口径 · 授理论 融先进 · 重实践 讲典型



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 机械原理

(第4版)

安子军 主编



国防工业出版社

·北京·

# 内 容 简 介

本书是根据国家教育部机械基础课程教学指导委员会批准的机械原理课程教学基本要求编写的。全书由理论教学内容和实践教学内容组成。理论教学内容共分13章,包括绪论、平面机构的结构分析、平面机构的运动分析和力分析、机械中的摩擦和机械效率、平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、间歇机构与其他机构、新型传动机构、机械运转及其速度波动调节、机械的平衡、机械传动系统方案设计。实践教学内容有机械原理课程设计指导书。每章末附有思考题与练习题。

本书可作为高等院校机械类和近机械类本科专业的教材,还可供有关专业的研究生入学考试和相关专业的工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械原理 / 安子军主编. — 4版. — 北京: 国防工业出版社, 2020. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 12089 - 9

I. ①机… II. ①安… III. ①机械原理 - 高等学校 - 教材 IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 034270 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 18½ 字数 352 千字

2020 年 2 月第 4 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 37.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

根据国家教育部机械基础课程教学指导委员会对机械原理课程教学的基本要求,为加强技术基础理论课的教学,结合机械原理课程在培养高素质人才及其经济建设中的重要作用,按照国家中长期教育改革与发展规划纲要中高等院校加强课程教学改革和教材建设的精神,开始机械原理教材的编写工作。

21世纪是人才竞争的时代,为了培养素质高、能力强、适应社会主义经济发展需要、有开拓创新精神的高级专门人才,结合高等院校课程学时减少,并保证主要教学内容和知识信息不能减少的发展需求,根据我们多年的教学经验和前两版教材的教学实践,按照机械原理课程教学基本要求,编写完成了这部机械原理教材,对教材体系进行了创新,并被评为首批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书强调对机械原理的基本概念、基本理论和机构分析与设计基本方法的理解和掌握,以机构通用的基础理论知识和主要传动机构的分析设计为重点,精选编排了教学内容。以图解法建立形象直观概念,侧重引入解析法。删去了与先修课程重复的有关内容,并对机构运动分析、连杆机构设计图解法和渐开线齿轮等章节过细部分内容进行了简化。对间歇机构、各种常用机构、组合机构和其他齿廓齿轮机构的传动原理、传动特点与应用及常用机构的设计计算等教学内容进行了优化,体现了对基础理论知识内容的编写特色。

为拓宽学生的知识面,了解新型机械传动机构的发展,增强发明创新意识,将有关新型机械传动机构方面带有创新性的研究成果充实到本书中,作为选择使用的教学内容,成为本书的另一特色。

机械原理课程设计是机械原理课程的重要实践教学环节,本书附有机械原理课程设计指导书,成为本书的又一重要特色。指导书中阐明了机械原理课程设计的作用和意义,系统地介绍了课程设计的内容、步骤和方法,介绍课程设计的方案分析与评价的方法,给出了若干实际应用机构及其设计要求,供学生分析和选择设计方案时借鉴。指导书中的具体机构例子,详细给出了课程设计的图解法和解析法分析的设计过程、设计要求和设计结果,编制计算机软件的程序,计算并绘制机

构运动线图的方法。该指导书可有效地帮助学生顺利完成机械原理课程设计的实践教学过程。

为了有利于学生更好地学习掌握专业外语知识,加强相关外文资料的阅读和理解,本书给出了机械原理重要名词术语的中英文对照表。

本书可作为高等院校机械类、近机械类本科专业的教材,也可供相关专业的研究生入学考试和相关专业的工程技术人员参考使用。

全书由全国机械原理教学研究会委员、华北地区(河北省)机械原理教学研究会副理事长(理事长)、河北省教学名师安子军教授(博士生导师)任主编。

参加全书编写的人员有:安子军教授(第1章、第7章、第10章、第13章)、曾达幸副教授(第2章、第6章、附录)、郑丽娟教授(第3章、第9章、第11章)、宜亚丽副教授(第4章、第12章)、陈革新副教授(第5章、第8章)、付宇明教授(机械原理课程设计指导书)。

本书承曲继方教授主审,提出了许多宝贵的意见和建议,并给予了大力的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

于秦皇岛·燕山大学

2019年12月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机械原理课程研究的对象和内容	1
1.2 机械原理课程的地位、作用和学习方法	3
思考题与练习题	5
第 2 章 平面机构的结构分析	6
2.1 机构的组成	6
2.2 机构运动简图	9
2.3 机构的自由度计算及其确定运动条件	11
2.4 平面机构的组成原理分析	16
思考题与练习题	19
第 3 章 平面机构的运动分析和力分析	22
3.1 用速度瞬心法作机构的速度分析	22
3.2 用相对运动图解法作机构的运动分析	25
3.3 用解析法作机构的运动分析	31
3.4 平面机构的力分析	36
思考题与练习题	43
第 4 章 机械中的摩擦和机械效率	49
4.1 移动副中的摩擦	49
4.2 螺旋副中的摩擦	52
4.3 转动副中的摩擦	54
4.4 考虑摩擦的机构受力分析	55
4.5 机械效率及自锁	57
思考题与练习题	66

<b>第 5 章 平面连杆机构</b> .....	71
5.1 平面四杆机构的类型及应用 .....	71
5.2 平面四杆机构的基本知识 .....	77
5.3 平面四杆机构设计的图解法 .....	81
5.4 平面四杆机构设计的解析法 .....	91
思考题与练习题 .....	95
<b>第 6 章 凸轮机构</b> .....	98
6.1 凸轮机构的应用和分类 .....	98
6.2 从动件的运动规律 .....	101
6.3 凸轮轮廓设计的图解法 .....	109
6.4 凸轮轮廓设计的解析法 .....	114
6.5 凸轮机构基本参数的确定 .....	119
思考题与练习题 .....	122
<b>第 7 章 齿轮机构</b> .....	125
7.1 齿轮机构的应用和分类 .....	125
7.2 齿轮的共轭齿廓曲线 .....	126
7.3 渐开线及其齿廓啮合特性 .....	129
7.4 渐开线标准齿轮的参数和尺寸 .....	134
7.5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 .....	138
7.6 渐开线齿廓的切削加工 .....	142
7.7 渐开线变位齿轮 .....	146
7.8 变位齿轮传动及设计 .....	148
7.9 斜齿圆柱齿轮机构 .....	152
7.10 交错轴斜齿轮机构 .....	158
7.11 蜗轮蜗杆机构 .....	160
7.12 锥齿轮机构 .....	164
7.13 其他齿廓齿轮机构 .....	166
思考题与练习题 .....	169
<b>第 8 章 轮系</b> .....	173
8.1 轮系及其分类 .....	173
8.2 定轴轮系的传动比计算 .....	175

8.3	周转轮系的传动比计算	177
8.4	混合轮系的传动比计算	180
8.5	轮系的功用及行星轮系的齿数条件	182
8.6	行星轮系的功率及效率	186
	思考题与练习题	189
<b>第9章</b>	<b>间歇机构与其他机构</b>	<b>194</b>
9.1	棘轮机构	194
9.2	槽轮机构	197
9.3	其他机构	200
9.4	组合机构	204
	思考题与练习题	206
<b>第10章</b>	<b>新型传动机构</b>	<b>207</b>
10.1	RV 传动机构	207
10.2	钢球行星传动机构	210
10.3	章动齿轮传动机构	214
10.4	活齿传动机构	215
10.5	等速传动机构	220
10.6	变自由度传动机构	224
	思考题与练习题	226
<b>第11章</b>	<b>机械运转及其速度波动调节</b>	<b>227</b>
11.1	机械运转过程及作用力	227
11.2	机械系统等效力学模型	229
11.3	机械系统运动方程式	233
11.4	机械系统速度波动及调节方法	235
	思考题与练习题	240
<b>第12章</b>	<b>机械的平衡</b>	<b>243</b>
12.1	机械平衡的目的和内容	243
12.2	刚性转子的平衡原理	243
12.3	刚性转子的平衡试验	246
12.4	平面机构的平衡原理	250
	思考题与练习题	253

第 13 章 机械传动系统方案设计 .....	256
13.1 机构类型及运动特点分析 .....	256
13.2 机构的组合与变异演化方法 .....	258
13.3 机械传动系统方案设计 .....	262
思考题与练习题 .....	266
机械原理课程设计指导书 .....	267
附录 机械原理重要名词术语中英文对照表 .....	281
参考文献 .....	286

# 第1章 绪 论

机械原理是研究机械内部普遍存在的共性规律的一门课程和学科。在进入本课程学习时,首先需要熟悉机械原理的名词、概念和术语,了解机械原理课程所研究的内容和所用的一般方法,从而初步明确本课程的重要地位及在国民经济中的作用。

## 1.1 机械原理课程研究的对象和内容

### 1.1.1 机械原理课程研究的对象

机械原理课程研究的对象是机械,机械是机器与机构的总称。

机器是具有确定运动的构件组合体,它用来转换能量、改变或传递物料和处理信息,以代替和减轻人的体力劳动和脑力劳动。机器的种类很多,根据用途不同,机器可分为:动力机器(如电动机、内燃机、发电机、蒸汽机等)、加工机器(如金属切削机床、纺织机、包装机、缝纫机等)、运输机器(如汽车、拖拉机、起重机、输送机等)和信息机器(如计算机、机械积分仪、记账机等)。虽然机器的种类繁多,并具有不同形式的构造和用途,但它们都具有以下三个共同的特征:

- (1) 机器都是由一系列构件(也称运动单元体)组成。
- (2) 组成机器的各构件之间都具有确定的相对运动。
- (3) 机器均能转换机械能或完成有用的机械功。

如图1-1(a)所示,内燃机是由壳体1、活塞2、连杆3、曲轴4(与齿轮4'一体)、齿轮5(与凸轮5'一体)以及气门阀杆6等一系列构件所组成。其各构件之间的运动是确定的,机构简图如图1-1(b)所示。内燃机的功能是将热能转换成机械能。

机构是实现传递机械运动和动力的构件组合体,常见的机构如齿轮机构、连杆机构、凸轮机构、螺旋机构、带和链传动机构等。虽然机构有多种类型,用途各有不同,但它们都有与机器前两个特征相同的特征:

- (1) 机构由若干个构件所组成。

(2) 组成机构的各构件之间都有确定的相对运动。

如图 1-1(a)所示,汽车内燃机的结构由三个机构组成:壳体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4 四个构件组成的连杆机构;壳体 1、齿轮 4'、齿轮 5 三个构件组成的齿轮机构;壳体 1、凸轮 5'、气门杆 6 三个构件组成的凸轮机构,并且它们的运动均是确定的。其工作原理:燃烧的气体膨胀推动活塞 2 移动,通过连杆 3 带动曲轴 4 转动,与固联同一轴上的齿轮 4'与齿轮 5 啮合传动,其齿轮 5 转动带动固联同一轴上的凸轮 5'转动,凸轮 5'的运动推动气门 6 往复移动。

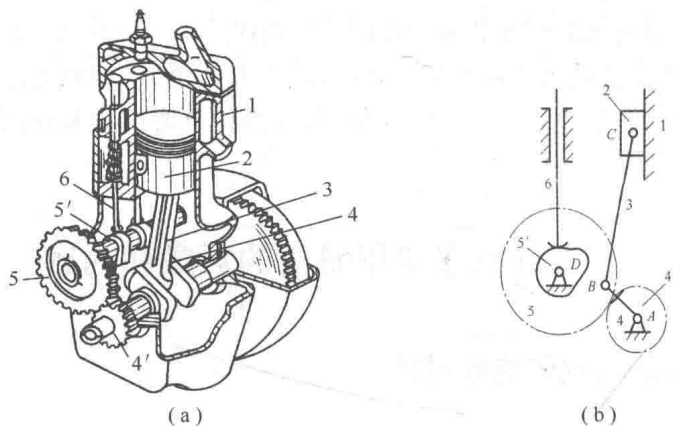


图 1-1

从上述分析可知,机构是机器的重要组成部分,用以实现机器的动作要求。一部机器可能只有一个机构,也可能包含若干个机构。机构与机器的根本区别在于:机构的主要职能是传递运动和动力,而机器的主要职能除传递运动和动力外,还能转换机械能或完成有用的机械功。

虽然机器和机构的种类很多,但组成各种机器的基本机构的种类却不很多,最常用的机构有连杆机构、齿轮机构、凸轮机构、间歇运动机构等。这些机构也是机械原理课程的主要研究对象。

### 1.1.2 机械原理课程研究的内容

机械原理课程研究的内容如下:

(1) 机构的结构分析。机构的结构分析将研究机构是怎样组成的,机构组成情况对其运动的影响以及机构具有确定运动应满足的条件;还将研究如何绘制机构运动简图,以便对实际机构进行运动和动力分析。此外,为便于更系统地研究现有机构及创造发明新机构,还需研究机构的组成原理和方法。

(2) 机构的运动分析。机构的运动分析将研究并介绍机构在给定原动件运动的条件下,求解其他构件的位移、轨迹、速度、加速度的基本原理和方法,进而考察

输出构件的运动变化规律。对机构进行运动分析,将为机构受力和动力学分析提供基础,也是设计新机械、合理使用现有机械的必须步骤和重要依据。

(3) 机械的动力学分析。机械的动力学分析一方面将研究机构在给定运动及已知外力条件下,求解各运动副的反力,以便了解机构上的动压力及其变化情况,研究机械在运转过程中各运动副的摩擦、构件受力及其所作的功、机械的效率,以决定构件的尺寸和形状,了解机械的动力性能等;另一方面将研究各构件质量、转动惯量以及惯性力(矩)和其他外力作用下,机构各构件的真实运动规律。

此外,还将研究因机械运动速度波动带来的机械运转稳定性问题及其调节方法。由于机械各构件产生的惯性力将影响到机械的正常工作效率和使用寿命,所以还要研究机械的平衡问题。

(4) 常用机构的分析与设计。常用机构的分析与设计将对组成各种机器的典型机构如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构及常用的间歇机构等运动和工作特性和有关理论进行较系统的分析,并研究探索典型机构满足一定运动规律、动力要求时机构设计的方法。为充分了解、有效利用这些机构提供理论基础。

(5) 机械的传动系统设计。机械的传动系统设计将讨论机械传动系统设计时如何选用机构、机构间如何组合和协调、机构的变异与演化方法以及拟定传动系统方案时必须考虑的问题。

应当指出,在机械原理课程中,有关机构设计的研究只限于给定运动和动力的设计要求,不涉及各个零件的结构形状、工艺要求、材料选择、热处理方式、强度及刚度计算等问题。所以,本课程中的机构设计又常称为机构综合。机械原理课程研究的内容可概括为机构分析与综合两部分。

## 1.2 机械原理课程的地位、作用和学习方法

### 1.2.1 机械原理课程的地位和作用

机械原理是机械类及近机械类专业进入专业课前必修的一门重要的技术基础课。它主要是在高等数学、普通物理、理论力学等理论基础课后,将这些理论和实际机械相结合来探讨机械内部基本规律的基础性理论课程。课程所学内容是研究现有机械运动、工作性能和设计、发明新机械的知识基础,对机械类及近机械类各专业的专业课学习、毕业设计乃至参加实际工作都有直接和长远的意义,起着非常重要的作用。

机械原理在发展国民经济方面也具有重要意义。实现生产的机械化、自动化和高效益是不同专业领域的所有生产部门的目标,这就需要创造出大量结构

新颖、性能优良的新型机械设备充实和装备各行各业;需要更新改造现有机械设备,以期合理有效地使用,发挥其潜力;需要提高操作者的业务水平、技术人员的创造能力、管理者的素质和指挥能力。所以,有关机械原理的知识是必不可少的。

机械原理对提高我国机械学理论及技术在国际上的学术地位也起着非常重要的作用。我国学者在著名的国际学术会议,如“机构与机器理论”、“机械传动与机构学”等上发表的论文越来越多,学术水平不断提高,而机械原理方面的知识则是重要的基础知识。

### 1.2.2 机械原理课程的学习方法

由于机械原理课既不同于理论基础课,又有别于专业课,因此在学习本课程的过程中,一方面要着重搞清基本概念,理解基本原理,掌握机构分析和设计的基本方法;另一方面也要注意这些原理和方法在机械工程实际应用的范围和条件。

(1) 强调重视基本概念。课程中的基本概念不仅仅是简单名词定义,它对课程的学习、认识和理解有着非常重要的作用,有时会直接用基本概念来分析、解决问题以及进行机构的分析和设计。因此,基本概念不能死记硬背,应重点弄清其含义和指导意义。

(2) 深入理解基本原理。机构结构理论、机构分析的运动学和动力学理论、齿轮啮合、加工及其传动理论、摩擦学理论、机械速度波动及调节原理、机械平衡理论等构成了本课程的理论框架,因此要充分理解、正确应用这些理论,并要善于用理论及其公式证明问题和解决问题,使之更具说服力。

(3) 牢牢掌握基本研究方法。在课程中,机构结构组成方法、高副低代法;机构分析中的瞬心法、相对运动法、扩大构件法、复数矢量法、直角坐标法、等效力学模型分析法、速度波动调节方法及机械平衡方法;机构设计的反转法、齿轮传动设计方法以及机构组合、变异、演化方法等都是机械原理课程应用的基本研究方法,应牢牢掌握并善于用其解决工程实际问题。

(4) 逐步树立工程观点。机械原理是一门理论性比较强的技术基础课,其研究对象和内容就是工程实际上常用的机械及其相关知识。因此,在学习过程中应把基本原理和方法与研究实际机构和机器密切联系起来。善于用所学知识观察和分析日常生产、生活中所遇到的各种机构和机器。在一定附加条件下,可将一些比较复杂的问题转化为比较简单问题,并注意各种理论和方法的应用条件和范围,以求能正确而灵活地应用。同时要注意:解决工程实际问题可以有几种方法,其所得结果也往往不唯一,有时也不要求十分精确。因此,树立工程观点,培养综合分析、判断、决策的能力和严肃认真的科学态度是十分重要的。

## 思考题与练习题

- 1-1 什么是机构、机器、机械？它们之间有何联系？试举例说明。
- 1-2 机构和机器各有什么特征？
- 1-3 机械原理课程研究的内容是什么？
- 1-4 如何学好机械原理课程？

## 第 2 章 平面机构的结构分析

机构有多种类型,不同的机构有着不同的结构,而机构的结构取决于机构的运动形式、组成方法和机构自由度等一些重要的因素。机构的组成是把若干构件按一定规律连接起来使之成为运动的系统,所以在设计机构时,需要从大量的各种各样的机构中选择最合适的结构及其零件的形式。为此,应该了解现代机构的基本形式、结构特点和组成原理。因为在实际机械中平面机构应用较多,所以本章将主要研究平面机构的结构分析。

### 2.1 机构的组成

#### 2.1.1 构件与零件

机构是由具有确定运动的单元体组成的,这些运动单元体称为构件。在机械原理中,一般认为构件是刚体或柔韧体(如皮带、钢丝绳和链条等),而不是液体和气体。组成构件的制造单元体称为零件。构件可以由一个或多个零件构成,如图 1-1 所示,内燃机的曲轴 4 为一个零件,而连杆 3 为多个零件组成。因此,构件是相互固接在一起的零件组合体。

#### 2.1.2 运动副及其分类

##### 1. 运动副

在机构中,每一构件都以一定方式与其他构件相互连接,这种使两构件直接接触的可动连接称为运动副,如轴与轴承、滑块与导轨、轮齿与轮齿、凸轮与推杆等的连接都构成了运动副,如图 2-1 所示。两构件组成运动副时,构件上参与接触的点、线、面称为运动副元素。在图 2-1 中,运动副元素分别为圆柱面和圆孔面、棱柱面和棱孔面、齿廓曲面及从动件尖顶和凸轮廓线。为保证两构件恒处于接触状态,运动副应是几何封闭或力封闭。至于组成运动副后,两构件能产生哪些相对运动,则与该运动副性质或该运动副所引入的限制条件有关。

##### 2. 运动副分类

由理论力学可知,作平面运动的构件可有三个独立运动,即在直角坐标系中沿  $x$  轴和  $y$  轴的移动,及绕  $z$  轴的转动。构件的独立运动数目称为构件的自由度。显

然,作平面运动的构件具有三个自由度,而作空间运动的构件具有六个自由度,即三个移动和三个转动。

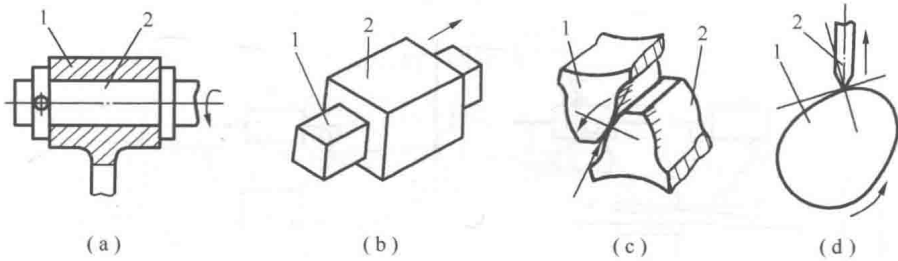


图 2-1

当一构件与另一构件组成运动副后,由于构件间的直接接触,使构件的某些独立运动受到限制,构件自由度便随之减少。这种对构件独立运动的限制称为约束。增加一个约束,构件便失去一个自由度。显然,作平面或空间运动的构件其约束数不能超过 2 或 5,否则构件将没有相对运动。

运动副的分类方法如下:

(1) 按运动副所引入的约束数目分。引入一个约束的运动副称为 I 级副,引入两个约束的运动副称为 II 级副,依次有 III 级副、IV 级副和 V 级副。

(2) 按两构件间的接触情况分。凡两构件以面接触构成的运动副称为低副,如图 2-1(a)、(b)所示的运动副。凡两构件以点或线接触构成的运动副称为高副,如图 2-1(c)、(d)所示的运动副。

(3) 按两构件间的相对运动形式分。两构件之间作相对转动的运动副称为转动副(或称铰链),如图 2-1(a)所示;作相对移动的运动副称为移动副,如图 2-1(b)所示,还有作相对螺旋运动的螺旋副和作相对球面运动的球面副和球销副等。

此外,若构成运动副的两构件之间的相对运动为平面运动,则该运动副称为平面运动副;若相对运动为空间运动,则该运动副称为空间运动副。

常用运动副的符号如表 2-1 所列。

表 2-1 常用运动副的符号

运动副名称		运动副符号	
		两运动构件构成的运动副	有一个固定构件时的运动副
平面运动副	转动副		

运动副名称		运动副符号	
		两运动构件构成的运动副	有一个固定构件时的运动副
平面运动副	移动副		
	平面高副		
空间运动副	螺旋副		
	圆柱副		
	球面副及球销副		

注:图中1、2分别表示构件;画斜线的表示固定构件。