



中国机械工程学科教程配套系列教材  
教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

# 机械原理与机械设计 (上册)

范元勋 张庆 主编

中国机械工程学科教程研究组

China Mechanical Engineering Curricula  
中国机械工程学科教程

清华大学出版社

清华大学出版社



中国机械工程学科教程配套系列教材  
教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

# 机械原理与机械设计 (上册)

范元勋 张庆 主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是根据教育部高等学校机械基础课程教学指导委员会发布的机械原理和机械设计课程教学基本要求(2009年),结合当前教学改革和人才培养的要求编写的。

全书分上下册,本书为上册,为机械原理部分,共13章,内容包括:绪论,机构的结构分析,平面机构的运动分析,连杆机构,凸轮机构,齿轮机构及其设计,轮系及其设计,其他常用机构,平面机构的力分析,机械系统动力学,机械的平衡,机械系统的总体和执行系统的方案设计,机械传动系统的方案设计。每章内容包含了重点与难点、章节内容、拓展性阅读文献指南、思考题和习题等,对常用专业名词给出了对应的英文注释。

本书可作为高等学校机械类各专业的机械原理和机械设计课程或者机械设计基础课程的教材,也可供有关专业的师生和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

机械原理与机械设计.上册/范元勋,张庆主编.--北京:清华大学出版社,2014

中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

ISBN 978-7-302-35296-9

I. ①机… II. ①范… ②张… III. ①机构学—高等学校—教材 ②机械设计—高等学校—教材  
IV. ①TH111 ②TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第018934号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.25 字 数:513千字

版 次:2014年3月第1版 印 次:2014年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80元

产品编号:043423-01

中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

# 编 委 会

顾 问  
李培根院士

主任委员  
陈关龙 吴昌林

副主任委员  
许明恒 于晓红 李郝林 李 旦 郭钟宁

编 委(按姓氏首字母排列)  
韩建海 李理光 李尚平 潘柏松 芮执元  
许映秋 袁军堂 张 慧 张有枕 左健民

秘 书  
庄红权

## 丛书序言

## PREFACE

我曾提出过高等工程教育边界再设计的想法,这个想法源于社会的反应。常听到工业界人士提出这样的话题:大学能否为他们进行人才的订单式培养。这种要求看似简单、直白,却反映了当前学校人才培养工作的一种尴尬:大学培养的人才还不是很适应企业的需求,或者说毕业生的知识结构还难以很快适应企业的工作。

当今世界,科技发展日新月异,业界需求千变万化。为了适应工业界和人才市场的这种需求,也即是适应科技发展的需求,工程教学应该适时地进行某些调整或变化。一个专业的知识体系、一门课程的教学内容都需要不断变化,此乃客观规律。我所主张的边界再设计即是这种调整或变化的体现。边界再设计的内涵之一即是课程体系及课程内容边界的再设计。

技术的快速进步,使得企业的工作内容有了很大变化。如从20世纪90年代以来,信息技术相继成为很多企业进一步发展的瓶颈,因此不少企业纷纷把信息化作为一项具有战略意义的工作。但是业界人士很快发现,在毕业生中很难找到这样的专门人才。计算机专业的学生并不熟悉企业信息化的内容、流程等,管理专业的学生不熟悉信息技术,工程专业的学生可能既不熟悉管理、也不熟悉信息技术。我们不难发现,制造业信息化其实就处在某些专业的边缘地带。那么对那些专业而言,其课程体系的边界是否要变?某些课程内容的边界是否有可能变?目前不少课程的内容不仅未跟上科学研究的发展,也未跟上技术的实际应用。极端情况甚至存在有些地方个别课程还在讲授已多年弃之不用技术。若课程内容滞后于新技术的实际应用好多年,则是高等工程教育的落后甚至是悲哀。

课程体系的边界在哪里?某一门课程内容的边界又在哪里?这些实际上是业界或人才市场对高等工程教育提出的我们必须面对的问题。因此可以说,真正驱动工程教育边界再设计的是业界或人才市场,当然更重要的是大学如何主动响应业界的驱动。

当然,教育理想和社会需求是有矛盾的,对通才和专才的需求是有矛盾的。高等学校既不能丧失教育理想、丧失自己应有的价值观,又不能无视社会需求。明智的学校或教师都应该而且能够通过合适的边界再设计找到自己的平衡点。

我认为,长期以来,我们的高等教育其实是“以教师为中心”的。几乎所有的教育活动都是由教师设计或制定的。然而,更好的教育应该是“以学生

为中心”的,即充分挖掘、启发学生的潜能。尽管教材的编写完全是由教师完成的,但是真正好的教材需要教师在编写时常怀“以学生为中心”的教育理念。如此,方得以产生真正的“精品教材”。

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会、中国机械工程学会与清华大学出版社合作编写、出版了《中国机械工程学科教程》,规划机械专业乃至相关课程的内容。但是“教程”绝不应该成为教师们编写教材的束缚。从适应科技和教育发展的需求而言,这项工作应该不是一时的,而是长期的,不是静止的,而是动态的。《中国机械工程学科教程》只是提供一个平台。我很高兴地看到,已经有多位教授努力地进行了探索,推出了新的、有创新思维的教材。希望有志于此的人们更多地利用这个平台,持续、有效地展开专业的、课程的边界再设计,使得我们的教学内容总能跟上技术的发展,使得我们培养的人才更能为社会所认可,为业界所欢迎。

是以为序。



2009年7月

# 前 言

## FOREWORD

本书是根据教育部高等学校机械基础课程教学指导委员会发布的“机械原理课程教学基本要求”和“机械设计课程教学基本要求”(2009年),结合当前教学改革和机械类创新人才培养的要求,总结近几年教学实践的经验,在对原机械设计基础(上、下)教材进行适当扩充和修订的基础上编写的。教材适用于高等工科院校机械类各专业学时调整后的机械原理和机械设计课程教学,课内教学为100学时左右。教材修订时在体系和内容编排上主要有如下一些考虑:

(1) 为方便教学计划的实施,本书分上、下两册,即上册为机械原理的内容,下册为机械设计的内容,可分为两个学期来实施,但教材在编排时注意了内容的系统性,以机械设计为主线编排各篇和章节的内容。

(2) 注意对学生创造性思维能力和实际设计能力的培养,重视工程应用背景的介绍。

(3) 注意将课程的各局部知识点,放到机械整体设计的全局中考虑,培养学生的整体和系统观念,提高学生对机械设计知识的综合应用能力。

(4) 适应机械工业发展的要求,增加了反映机械设计技术发展成果的内容介绍,如机器人机构学、机械系统设计、主动磁轴承等,充实了机构解析法设计的内容。

(5) 尽量简化和避免烦琐、冗长的计算和公式推导,而注意突出基本原理、基本设计思想、基本结构特点和应用知识的介绍。

(6) 方便学生的自学和拓展性学习,每章配有重点、难点、思考题和扩展性阅读参考文献。

(7) 尽量采用了最新的国家标准和规范。

本书分为上、下两册。参加上册编写的有:范元勋(第1、6章和第7章部分内容)、祖莉(第2、3章)、梁医(第4、5章)、张庆(第8~11章)、张龙(第7章部分内容)、宋梅利(第12、13章);参加下册编写的有:范元勋(第1~3、13、14章)、宋梅利(第4、8章)、张庆(第5、6章)、祖莉(第7、11章)、张龙(第9、10章)、梁医(第12、15~17章)。上册由范元勋、张庆主编,下册由范元勋、梁医和张龙主编。全书由范元勋统稿。

教研室的研究生帮助绘制了本书的部分插图,本书前主编之一王华坤教授作为主审对本书的编写提供了许多有益的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者的水平和时间的限制,书中的缺点、错误仍在所难免,编者殷切希望各方面专家及读者提出批评和改进意见。

编 者

2013年12月



## 第 1 篇 机械原理导论

<b>第 1 章 绪论</b> .....	2
1-1 机械原理研究的对象 .....	2
1-2 机械原理课程的研究内容 .....	4
1-3 本课程学习的目的和方法 .....	5

## 第 2 篇 机构的组成与分析

<b>第 2 章 机构的结构分析</b> .....	8
2-1 机构结构分析的目的和内容 .....	8
2-2 机构的组成 .....	8
2-3 机构的运动简图和拓扑构造 .....	11
2-4 机构的自由度 .....	16
2-5 平面机构的组成原理及结构分析 .....	20
2-6 开链机构简介 .....	22
拓展性阅读文献指南 .....	23
思考题 .....	23
习题 .....	23
<b>第 3 章 平面机构的运动分析</b> .....	26
3-1 研究机构运动分析的目的和方法 .....	26
3-2 速度瞬心及其在速度分析中的应用 .....	26
3-3 用相对运动图解法求机构的速度和加速度 .....	30
3-4 用解析法求机构的位置、速度和加速度 .....	37
3-5 运动线图 .....	40

拓展性阅读文献指南 .....	41
思考题 .....	41
习题 .....	42
<b>第 3 篇 常用机构及其设计</b>	
<b>第 4 章 连杆机构 .....</b>	<b>46</b>
4-1 平面连杆机构设计的类型、特点和应用 .....	46
4-2 平面连杆机构的运动和动力特性 .....	51
4-3 平面连杆机构的综合概述 .....	54
4-4 平面连杆机构的综合——作图法 .....	55
4-5 平面连杆机构的综合——解析法 .....	59
4-6 空间连杆机构简介 .....	63
拓展性阅读文献指南 .....	68
思考题 .....	68
习题 .....	69
<b>第 5 章 凸轮机构 .....</b>	<b>74</b>
5-1 凸轮机构的应用和分类 .....	74
5-2 从动件的常用运动规律 .....	77
5-3 平面凸轮廓线设计的作图法 .....	83
5-4 平面凸轮廓线设计的解析法 .....	88
5-5 平面凸轮机构基本尺寸的确定 .....	94
拓展性阅读文献指南 .....	99
思考题 .....	99
习题 .....	100
<b>第 6 章 齿轮机构及其设计 .....</b>	<b>104</b>
6-1 齿轮机构的应用与分类 .....	104
6-2 齿廓啮合基本定律 .....	106
6-3 渐开线的形成及其特性 .....	107
6-4 渐开线齿轮的各部分名称及标准齿轮的尺寸 .....	110
6-5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 .....	114
6-6 渐开线齿轮的加工 .....	119
6-7 渐开线齿廓的根切现象和不发生根切的最小齿数 .....	122
6-8 变位齿轮 .....	124
6-9 斜齿圆柱齿轮机构 .....	129
6-10 交错轴斜齿轮机构 .....	135

6-11 蜗杆蜗轮机构 .....	138
6-12 圆锥齿轮机构 .....	141
6-13 圆弧齿轮机构简介 .....	144
拓展性阅读文献指南 .....	146
思考题 .....	146
习题 .....	147
<b>第 7 章 轮系及其设计 .....</b>	<b>149</b>
7-1 轮系及其分类 .....	149
7-2 定轴轮系传动比的计算 .....	150
7-3 周转轮系传动比的计算 .....	151
7-4 复合轮系传动比的计算 .....	156
7-5 行星轮系各轮齿数和行星轮数的选择 .....	159
7-6 新型行星传动简介 .....	161
拓展性阅读文献指南 .....	166
思考题 .....	166
习题 .....	166
<b>第 8 章 其他常用机构 .....</b>	<b>169</b>
8-1 万向联轴节 .....	169
8-2 螺旋机构 .....	171
8-3 棘轮机构 .....	173
8-4 槽轮机构 .....	176
8-5 不完全齿轮机构 .....	179
8-6 非圆齿轮机构 .....	181
8-7 组合机构简介 .....	184
8-8 机器人机构简介 .....	188
拓展性阅读文献指南 .....	196
思考题 .....	196
习题 .....	197
<b>第 4 篇 平面机构的力分析和机械动力学基础</b>	
<b>第 9 章 平面机构的力分析 .....</b>	<b>200</b>
9-1 概述 .....	200
9-2 运动副中的摩擦及自锁 .....	201
9-3 平面机构的动态静力分析 .....	207
9-4 茹可夫斯基杠杆法 .....	215

9-5 机械效率 .....	217
拓展性阅读文献指南 .....	225
思考题 .....	226
习题 .....	226
<b>第 10 章 机械系统动力学 .....</b>	<b>231</b>
10-1 概述 .....	231
10-2 单自由度机械系统动力学分析 .....	233
10-3 机械运动方程的求解 .....	238
10-4 机械的速度波动及其调节 .....	241
10-5 飞轮设计 .....	244
拓展性阅读文献指南 .....	247
思考题 .....	247
习题 .....	247
<b>第 11 章 机械的平衡 .....</b>	<b>250</b>
11-1 机械平衡的目的和分类 .....	250
11-2 刚性转子的平衡原理 .....	251
11-3 刚性转子的平衡试验 .....	254
11-4 平面机构的平衡 .....	259
拓展性阅读文献指南 .....	262
思考题 .....	262
习题 .....	262

## 第 5 篇 机械系统的方案设计

<b>第 12 章 机械系统的总体和执行系统的方案设计 .....</b>	<b>266</b>
12-1 机械系统的总体方案设计 .....	266
12-2 执行系统的功能原理和运动规律设计 .....	272
12-3 执行系统的型综合和协调设计 .....	277
12-4 基于功能分析的执行系统的方案设计 .....	292
12-5 机构运动方案的评价体系和评价方法 .....	298
拓展性阅读文献指南 .....	305
思考题 .....	305
习题 .....	306
<b>第 13 章 机械传动系统的方案设计 .....</b>	<b>308</b>
13-1 机械传动系统的作用及其设计过程 .....	308

13-2 机械传动系统的组成及常用部件 .....	309
13-3 传动链的方案选择 .....	313
13-4 机械传动系统的特性及其参数计算 .....	318
13-5 机械传动系统方案设计实例 .....	320
拓展性阅读文献指南 .....	323
思考题 .....	323
习题 .....	324
<b>参考文献</b> .....	<b>325</b>

# 第 1 篇 机械原理导论

## 第 1 章 绪论

# 第 1 章

## 绪 论

**内容提要:** 本章介绍机械原理课程研究的对象和机构、机器等概念,对课程的研究内容、课程的性质和地位及课程的学习目的和方法等也进行了阐述,以使对整个课程的学习有一个引领的作用。

### 1-1 机械原理研究的对象

“机械原理”(theory of machines and mechanisms)是“机构和机械原理”的简称。它是一门以机构和机器为研究对象的科学,研究内容为有关机械的基本理论问题。

机械(machinery)是机器(machine)和机构(mechanism)的总称。机器和机构对我们来说都并不陌生。在理论力学和机械制图课程中已了解了一些机构(如齿轮机构、连杆机构、螺旋机构等)及应用,各种机构都是用来传递与变换运动和动力的可动装置,工程实际中常用的机构还有带传动机构、链传动机构、凸轮机构等。而机器则是根据某种使用要求设计,将一种或多种机构组合在一起,实现预定机械运动的装置,它可以用来传递和变换能量、物料和信息。如电动机和发电机用来变换能量,机床用来改变物料的状态,运输机械用来传递物料等。

在日常生活和工作中,我们接触过许多机器,从家庭用的缝纫机、洗衣机、自行车,到工业部门使用的各种机床;从汽车、飞机到工业机器人、医疗机械等。机器的种类很多、用途各不相同,但它们却有着共同的特征。

图 1-1 所示的单缸内燃机由汽缸体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4、齿轮 5 和 6、凸轮 7 和顶杆 8 等组成。燃气推动活塞作往复运动,经连杆转变为曲轴的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进气阀和排气阀的。为了保证曲轴每转两周进、排气阀各启闭一次,利用固定在曲轴上的齿轮 5 带动固定在凸轮轴上的齿轮 6 转动。这样,当燃气推动活塞运动时,进、排气阀有规律地启闭,把燃气的热能转变为曲轴连续转动的机械能。

图 1-2 所示的六自由度关节式焊接机器人,其机构由以下几个部分组成:构件 7 为机座,作为机器人支撑的基础;构件 1 为腰部,连接大臂 2 和机座 7,作回转运动;大臂 2 与小臂 3 构成手臂机构,与腰部一起,用于确定机器人的空间作业位置;构件 4、5、6 组成手腕机构,其可以实现腕的俯仰、摆动和旋转运动,用于确定末端执行器在空间的姿态;手部,也称末端执行器,它安装于腕部机构的前端,是直接进行工作任务的装置,常见的末端执行器有夹持式、吸盘式和电磁式等。

随着科学的发展,现在已进入信息时代,计算机也是一种机器。它可以根据人们事先编

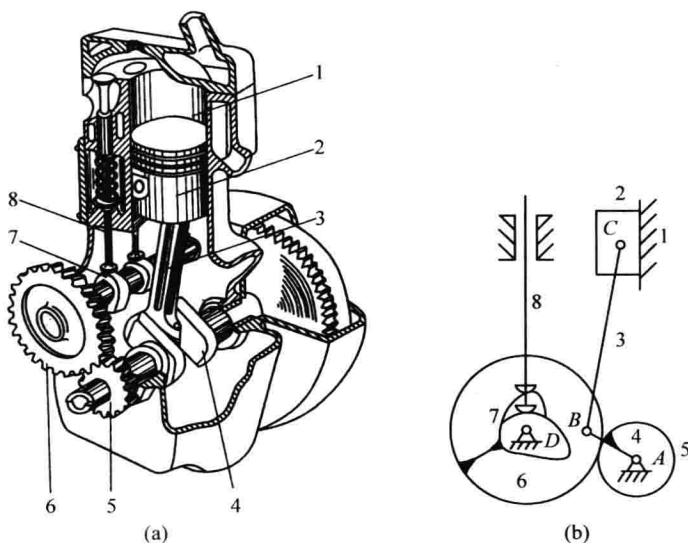


图 1-1 单缸内燃机

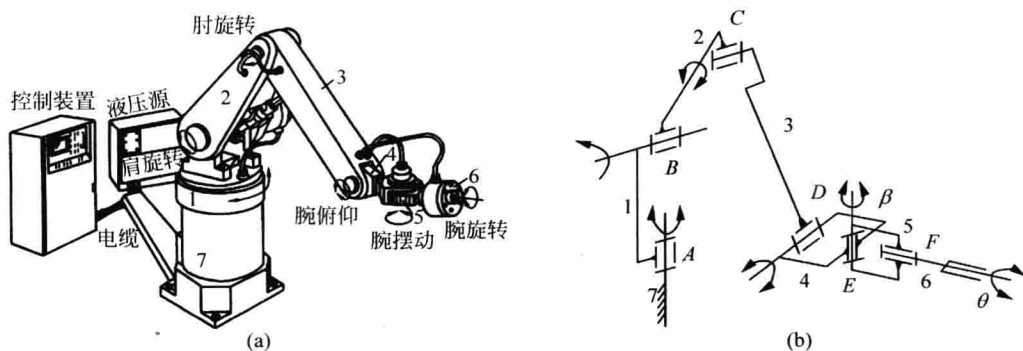


图 1-2 焊接机器人

好的程序进行数据处理、数据存储、数据交换及信息传输。例如，可将数据传给绘图仪，绘出精美的图画等。

从以上的例子可以看出，虽然这些机器的构造、用途和性能各异，但是从它们的组成和运动的确定性以及与功、能的关系来看，却有着三个共同的特征：

- (1) 它们是一种人为的实物组合；
- (2) 其组成各部分之间具有确定的相对运动；
- (3) 能完成有用的机械功、实现能量的转换或信息的处理与传递。

凡同时具备上述三个特征的设备便称为**机器**，而**机构**只具备机器的前两个特征。但从结构和运动的观点来看，两者之间并无区别。因此，为了简化叙述，常用“机械”一词作为“机构”和“机器”的总称。一个机器由多个或一个机构组成，如图 1-1 所示的单缸内燃机由齿轮机构、凸轮机构和连杆机构组成。

现代机械一般由四大部分组成。

- (1) 原动机(prime mover)，是驱动机械运动的动力来源。最常见的原动机有电动机、



内燃机、液压马达和空气压缩机等。

(2) 执行机构(actuating mechanism),能完成机械预期的动作,实现机器的功能,如机器人的手爪、机床的刀架等。执行机构随着所要求的工艺动作和性质不同而异,其结构形式完全取决于机械本身的用途。

(3) 传动机构(transmission mechanism),是一部机械中,把原动机的运动和功率传递给工作机的中间环节,如齿轮机构、凸轮机构、连杆机构等。

(4) 控制系统(control system),用于协调机器各组成部分之间的工作,以及与外部其他机器或原动机之间的关系。

机构是由若干个构件组成的,构件可以是单一的零件,也可以是由几个零件装配成的刚性结构。所以说构件和零件是两个不同的概念,构件(link)是运动单元,而零件(element)是制造单元。在本课程中,我们将构件作为研究的基本单元。

凡本身固定不动的构件,或相对地球运动,但固结于给定坐标参考系并视为固定不动的构件统称为机架(frame),例如,汽车车厢、飞机机舱、机床床身等。研究机构在相对运动时,一般以机架为基准,即假定它是静止的。

## 1-2 机械原理课程的研究内容

机械原理所研究的问题归纳起来有两大类:第一类问题是根据已有机构的结构和主要参数来分析该机构或所组成机器的各种特性(结构、运动学和动力学),即机构的分析(analysis of mechanism),如机构的结构分析、运动分析、力分析和在已知力作用下机器的真实运动等;第二类问题是根据预期的各种特性来确定新的机构和机器型式、结构及主要参数,即机构的综合(synthesis of mechanism),如各种主要机构的运动设计、机构的平衡和机器速度波动的调节等。这里研究的问题只限于与机构和机器的运动和动力特性有关的机构型式、结构和各主要参数之间的关系,而不研究与机械零件有关的问题,如零件的形状、构造、强度、材料和工艺等。机械原理是一门以机构和机器为研究对象的学科。本课程的研究内容可归纳为如下几个方面:

(1) 机构的结构分析。研究机构的结构组成和组成原理、机构运动的可能性及确定性条件以及机构的结构分类等。

(2) 机构的运动分析。研究机构各点的轨迹、位移、速度、加速度的求法和机构的运动规律等。对机构进行运动分析是了解现有机构运动性能的必要手段,也是设计机构的必要步骤。

(3) 机器动力学。研究在机构运动过程中作用在各构件上的力的求法和确定机械效率的方法,并研究在已知力作用下机械的真实运动规律,以及作用力、运动构件的质量与这些构件运动之间的关系,即机械系统过渡过程和稳定运动状态下的动力学问题、机械的调速问题和不平衡惯性力的平衡问题等。

(4) 常用机构的分析与设计。对常用机构的工作特性进行分析,并研究按工作要求设计各种常用机构的方法,如齿轮机构、凸轮机构、连杆机构、间歇运动机构的设计等。

(5) 机械系统的方案设计。在机构的结构分析、运动分析和动力分析研究的基础上,介