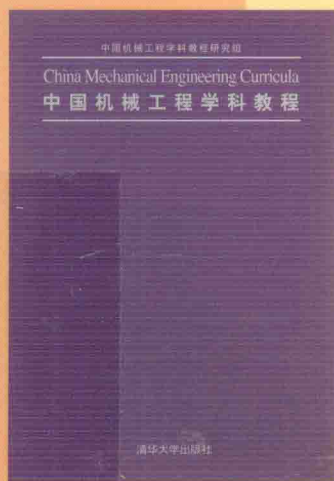




中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

机械原理教程

李琳 邹焱飏 主编
张铁 翟敬梅 参编
谢存禧 李杞仪 主审



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

机械原理教程

李 琳 邹焱飏 主编
张 铁 翟敬梅 参编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本教材是根据机械原理课程教学基本要求,为适应教学改革而编写的。本教材包含两部分内容,第1部分为理论篇(第1~7章)包括:绪论、平面机构的结构分析、平面连杆机构的运动分析、平面机构中的受力分析、平面机构中的效率和自锁、机械的平衡、机械的运转及其速度波动的调节。第2部分为设计方法篇(第8~14章),包括:平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、间歇运动机构、其他常见机构简介、执行机构中的运动协调设计。各章均附有一定数量的思考题和习题。

本教材可以作为高等学校机械类专业的机械原理教材,也可作为有关工程技术人员的参考书籍。

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

机械原理教程/李琳,邹焱飏主编.--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 978-7-302-36967-7

I. ①机… II. ①李… ②邹… III. ①机构学—高等学校—教材 IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 135284 号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

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

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17 字 数:410 千字

版 次:2014 年 11 月第 1 版 印 次:2014 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:38.00 元

产品编号:059705-01

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 张有忱 左健民

秘 书
庄红权

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的技术。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适合自己的平衡点。

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

本教材是根据教育部新制定的“机械原理教学基本要求”等文件精神,充分吸取了高校近年来的教学改革经验,并结合多年教学经验而编写的。

机械原理是机械工程的基础,机械原理的核心内容是研究机械的基础理论与基本方法,是进行机械设计的概念设计阶段。学习机械原理对培养学生的创新思维与创新设计能力是非常重要的。

本教材包含两部分内容,第1部分为理论篇(第1~7章)包括:绪论、平面机构的结构分析、平面连杆机构的运动分析、平面机构中的受力分析、平面机构中的效率和自锁、机械的平衡、机械的运转及其速度波动的调节;第2部分为设计方法篇(第8~14章),包括:平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、间歇运动机构、其他常见机构简介、执行机构中的运动协调设计。各章均附有一定数量的思考题和习题。

本教材可以作为高等学校机械类专业的机械原理教材,也可作为有关工程技术人员的参考书籍。

本教材分内容共14章,由李琳和邹焱飏主编。具体编写分工如下:李琳(第1、2、6、7、11章),张铁(第3、4、5章),翟敬梅(第9、12、13章),邹焱飏(第8、10、14章)。

本书承蒙华南理工大学谢存禧、李杞仪两位教授精心审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,在本教材编写中一定会有不足之处,希望读者予以批评指正。

作 者

2014年2月

目 录

CONTENTS

第 1 部分 理 论 篇

第 1 章 绪论	3
1.1 机械原理课程的研究对象及内容	3
1.2 学习本课程的目的与方法	5
1.3 机械原理学科的发展方向	6
思考题与习题	7
第 2 章 平面机构的结构分析	8
2.1 机构的组成基本概念	8
2.2 平面机构的运动简图	10
2.3 平面机构的自由度计算及运动确定条件	13
2.3.1 机构具有确定运动的条件	13
2.3.2 机构的自由度计算	14
2.3.3 计算平面机构自由度时应注意的问题	15
2.4 平面机构中的高副低代	18
2.5 平面机构的组成原理及结构分析	19
2.5.1 平面机构的组成原理	19
2.5.2 机构的结构分析	21
思考题与习题	22
第 3 章 平面连杆机构的运动分析	27
3.1 机构运动分析的目的和方法	27
3.2 平面机构速度分析的瞬心法	28
3.3 平面机构运动分析的矢量方程图解法	31
3.3.1 同一构件上两点之间的速度、加速度关系	31
3.3.2 利用两构件重合点间的运动矢量方程作机构的 速度及加速度的图解分析	33
3.4 平面机构运动分析的解析法	39
思考题与习题	44

第4章 平面机构中的受力分析	47
4.1 机构力分析概述	47
4.2 构件惯性力的确定	48
4.3 用图解法作机构的动态静力分析	50
4.4 用解析法作机构的动态静力分析	53
思考题与习题	55
第5章 平面机构中的效率和自锁	56
5.1 运动副中的摩擦	56
5.1.1 移动副中摩擦力的确定	56
5.1.2 螺旋副中摩擦力的确定	60
5.1.3 转动副中的摩擦力确定	61
5.2 机械的效率和自锁	63
5.2.1 机械的效率	63
5.2.2 机械系统的效率	65
5.2.3 自锁和效率的关系	66
5.3 考虑摩擦时机构的受力分析	67
5.4 摩擦在机械中的应用	70
思考题与习题	72
第6章 机械的平衡	74
6.1 平衡的目的及分类	74
6.2 刚性转子的平衡计算	75
6.2.1 静平衡	75
6.2.2 动平衡	77
6.3 刚性转子的平衡实验	79
6.4 转子的平衡精度和许用不平衡量	80
6.5 平面机构的平衡	82
6.5.1 平面机构的平衡条件与方法	82
6.5.2 完全平衡	83
6.5.3 部分平衡	85
思考题与习题	87
第7章 机械的运转及其速度波动的调节	89
7.1 概述	89
7.1.1 研究内容	89
7.1.2 机械运转过程的三个阶段	89
7.1.3 作用在机械上的力	91

7.2 机械的运动方程	92
7.2.1 机械运动方程的建立	92
7.2.2 机械的等效动力学模型	93
7.2.3 机器运动方程(即等效构件的运动方程)	97
7.2.4 机械运动方程式的求解	98
7.3 周期性速度波动及其调节	101
7.3.1 产生周期性速度波动的原因	101
7.3.2 周期性速度波动的调节	102
7.3.3 飞轮的简易设计	103
7.4 非周期性速度波动及其调节	108
思考题与习题	110

第2部分 设计方法篇

第8章 平面连杆机构	115
8.1 平面连杆机构的特点、类型及应用	115
8.1.1 平面连杆机构的特点	115
8.1.2 平面四杆机构的基本型式及其应用	116
8.1.3 平面四杆机构的演化	118
8.2 平面连杆机构设计的基本运动特性	122
8.2.1 铰链四杆机构有曲柄的条件	122
8.2.2 急回运动和行程速比系数	123
8.2.3 压力角和传动角	124
8.2.4 死点位置	125
8.3 平面连杆机构的设计	126
8.3.1 平面连杆机构设计的基本问题与方法	126
8.3.2 刚体导引机构的设计	127
8.3.3 函数生成机构的设计	127
8.3.4 轨迹生成机构的设计	131
思考题与习题	133
第9章 凸轮机构	136
9.1 凸轮机构的类型及特点	136
9.1.1 凸轮机构的组成	136
9.1.2 凸轮机构的特点和分类	137
9.2 从动件的运动规律	140
9.2.1 凸轮机构的基本名词术语	140
9.2.2 从动件的运动规律	141
9.2.3 从动件运动规律的选择	147

9.2.4 组合型运动规律	147
9.3 凸轮廓曲线的设计	148
9.3.1 凸轮轮廓设计的基本原理	148
9.3.2 凸轮轮廓的图解法设计	149
9.3.3 解析法设计凸轮轮廓曲线	153
9.4 凸轮机构的压力角及基本尺寸的确定	155
9.4.1 凸轮机构的压力角	156
9.4.2 凸轮机构基本尺寸的设计	158
思考题与习题	161
第 10 章 齿轮机构	163
10.1 齿轮机构的类型及应用	163
10.2 齿廓啮合基本定律及渐开线齿形	164
10.2.1 齿廓啮合基本定律	164
10.2.2 渐开线齿廓	165
10.2.3 渐开线的方程及渐开线函数	166
10.2.4 渐开线齿廓的啮合特点	166
10.3 渐开线标准直齿圆柱齿轮	167
10.4 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合传动	169
10.4.1 一对渐开线齿轮正确啮合条件	169
10.4.2 齿轮传动的中心距及啮合角	170
10.4.3 齿轮和齿条传动	174
10.5 变位齿轮传动	175
10.5.1 齿廓切制的原理	175
10.5.2 标准齿轮的切制	175
10.5.3 变位齿轮的切制	176
10.5.4 渐开线齿廓的根切	176
10.5.5 变位齿轮基本尺寸的计算	178
10.5.6 变位齿轮的应用	180
10.5.7 渐开线直齿圆柱齿轮机构的设计步骤	181
10.6 其他齿轮机构的啮合特点	183
10.6.1 平行轴斜齿圆柱齿轮机构	183
10.6.2 交错轴斜齿轮机构	188
10.6.3 蜗轮蜗杆机构	190
10.6.4 直齿圆锥齿轮机构	192
10.6.5 非圆齿轮机构简介	197
10.6.6 摆线齿轮机构简介	198
10.6.7 圆弧齿轮机构简介	199
思考题与习题	200

第 11 章 轮系	202
11.1 轮系的类型	202
11.2 定轴轮系的传动比	204
11.2.1 平面定轴轮系的传动比	204
11.2.2 空间定轴轮系的传动比	206
11.3 周转轮系的传动比	207
11.4 复合轮系的传动比	210
11.5 轮系的功用	211
11.6 行星轮系的效率及各轮齿数的选择	213
11.6.1 行星轮系的效率计算	213
11.6.2 行星轮系中各轮齿数的确定	215
思考题与习题	216
第 12 章 间歇运动机构	219
12.1 棘轮机构	219
12.2 槽轮机构	223
12.3 不完全齿轮机构	227
12.4 凸轮式间歇运动机构	229
思考题与习题	231
第 13 章 其他常见机构简介	232
13.1 万向联轴节	232
13.2 螺旋机构	233
13.3 供料机构	234
13.4 行程放大机构	237
13.5 增力机构	239
思考题与习题	241
第 14 章 执行机构中的运动协调设计	242
14.1 机构设计概述	242
14.2 执行机构运动规律设计	243
14.3 执行机构运动协调设计	247
14.4 机械运动循环图设计	250
思考题与习题	254
参考文献	256

第 1 部分

理 论 篇

绪 论

内容提要

主要阐述机械原理课程的研究对象、主要内容和学习方法；介绍机械、机器、机构等的基本概念，并介绍本课程的扩展研究方向。

1.1 机械原理课程的研究对象及内容

1. 研究对象

机械原理研究的对象是机械(Mechanism)，而机械是机构(Machine)与机器(Enginery)的总称，因此机械原理研究有关机构和机器的基本理论问题，如其结构、运动特性、动力分析以及机械运动方案设计等，可以认为机械原理是机器和机构理论的简称，也可称为机器理论与机构学，属于机械产品性能分析和设计的基础理论课程之一，它广泛地使用了现代数学工具，并研究求解机构分析与综合问题的各种实际方法，这些方法有采用计算机的解析法，也有图解法。图 1-1 表示了机械原理的研究对象、研究内容及其相互关系。

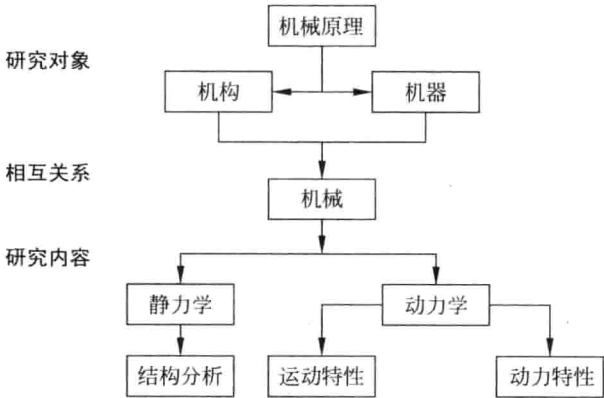


图 1-1 机械原理的研究对象、研究内容及相互关系

1) 机器

机器是由各种机构所构成的系统，机构是用来传递与变换运动和力的可动装置，常见的有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、螺旋机构等。机器则是实现能量、物料和信息变换，代替或减轻人的体力劳动和脑力劳动的一种执行机械运动的装置，如发动机或发电机用来转换

能量；工作机(金属加工机床及机组、锻压设备、轧机、铸造设备等)用以改变原材料和毛坯的形状、尺寸、性质和状态；运输机械和传送装置使重物、工具、人及其他物体按要求在空间移动。动力机械使能量发生转换；信息机将输入的信息进行变换，以监控、调节和控制机械运动。机器完成有规律的机械运动以实现自己的工作过程。这些运动的载体就是机构。所以，机构是由许多刚体组成的系统，这些刚体通过接触可动地联接起来，并相对于其中之一的机构以所要求的确定形式运动。多数机构的功用是完成刚体机械运动的变换。

如图 1-2 所示为一台内燃机。它可以把燃气燃烧时产生的热能转化为机械能。其工作原理如下：燃气由进气管通过进气阀 3 被下行的活塞 2 吸入气缸，然后进气阀 3 关闭，活塞 2 上行压缩燃气，点火使燃气在气缸中燃烧、膨胀产生压力，推动活塞上行，通过连杆 5 带动曲轴 6 转动，向外输出机械能。当活塞 2 再次上行时，排气阀 4 打开，废气通过排气管排出。图中，凸轮 7 和顶杆 8 用来启、闭进气阀和排气阀；齿轮 9、10 则用来保证进气阀、排气阀和活塞之间形成一定规律的动作。以上各部分协调配合动作、便能将燃气燃烧时的热能转变为曲轴转动的机械能。

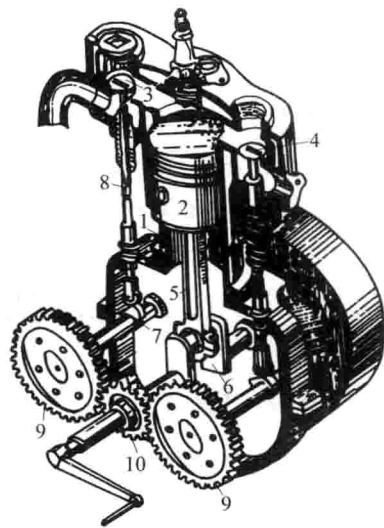


图 1-2 内燃机

图 1-3 所示为一台六自由度的机器人操作机本体。它可以实现空间的运动，具有 6 个关节，分别有 6 个电机分别驱动，通过这 6 个关节的耦合运动，其末端执行器按照一定的要求完成预定运动轨迹和运动，从而代替人完成有用的机械功。

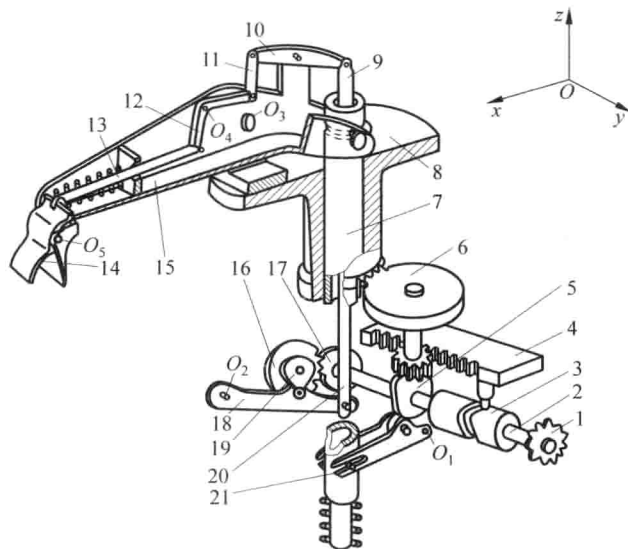


图 1-3 六自由度机器人操作机

在日常生活和工作中，我们见到过或接触过许多机器，从家庭用的洗衣机、摩托车、电冰箱，到工业生产中使用的车床、磨床等各种专门机床；从汽车、火车、轮船、飞机，到机器人、

宇宙飞船等。

2) 机构

什么是机构？我们来进一步分析图 1-2 所示的内燃机，从中可以看出，在该机器里有各种运动，有些构件组合是传递回转运动的；有些构件组合是把转动变为往复运动的；有些则是利用机件本身的轮廓曲线来实现预期规律的移动或摆动的。这些用来传递运动的构件组合体就是机构，图 1-2 内燃机中的构件 9 和 10 组成了齿轮机构；构件 7 和 8 组成了凸轮机构，活塞 2、连杆 5 和曲柄 6，组成了连杆机构。在内燃机中，连杆机构中活塞的往复移动被转换为曲柄的连续转动，从而带动齿轮机构、凸轮机构实现内燃机的进气门、排气门的开、闭，完成了内燃机的工作原理，实现了将化学能转换为机械能的功能，其中的连杆机构、齿轮机构、凸轮机构等只是起到转换运动的功能。

由以上的分析可以看出，**机构**是一种可以用来传递运动和力的组合体，**机器**则是实现能量、物料和信息变换的一种执行机械运动的装置，由此可以说，机器是由各种机构组成的。所以从结构和运动的观点来看，两者之间并无区别，因此，人们常将**机构**和**机器**统称为**机械**。

2. 研究内容

机械原理课程的研究内容，大体分为以下几个方面。

(1) 机构的结构分析：主要介绍机构的组成原理、机构具有确定运动的条件、机构运动简图的概念及如何绘制机构运动简图，最后了解机构的结构分类方法。

(2) 机构的运动分析：分析常用机构的运动特性，介绍常用的运动分析方法与原理。对机构进行运动分析是设计新机构的重要部分，它将为机械系统的方案设计打下必要的运动学基础。

(3) 机构的动力学：分析一下常用机构在运动过程中各构件的受力情况，研究影响机械效率的主要因素和机械效率的计算方法，判断其自锁条件；研究机械运转时惯性力和惯性力矩的平衡问题，以及如何通过合理设计和试验来消除或减小不平衡惯性力引起的有害振动；研究机械在外力作用下的真实运动规律和速度波动问题，以及如何合理地设计调速装置来降低速度波动的不良影响。

(4) 常用机构的设计与分析：对常用的机构，如平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等的工作特性与原理进行分析，介绍其常用的设计方法与要求。

(5) 机械系统方案设计：介绍具体机械设计时机构的选型、组合、变异以及机械系统总体方案的拟定、机械执行系统的设计、机械传动系统的设计等。主要包括：根据机械预期实现的功能，确定机械的工作原理；根据工艺动作的分解，确定机械的运动方案；合理地选择机构的形式并将其恰当地组合起来，实现机械的预期动作；根据工艺动作的要求，使各机构协调配合工作等。

1.2 学习本课程的目的与方法

1. 学习本课程的目的

机械原理课程属于机械类各专业必修的一门重要的技术基础课。它需要具有前期的基