



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

机 械 原 理

邹慧君 傅祥志 张春林 李杞仪 主编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

TH111

296-2 面向 21 世纪 课程教材
Textbook Series for 21st Century

机械原理

邹慧君 傅祥志 张春林 李杞仪 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京) 112 号

内容提要

1253/16

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部机械原理学科“九五”规划教材。

本书对机械原理课程传统教材的内容和体系进行了较大的变革。除保留常用机构设计的内容外,增加了机构系统设计、机构创新设计方法的内容,并在章前加提要,章后有小结、思考题、习题,以利学习。

本书可供高等学校工科机械类专业学生学习,也可供有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/邹慧君等主编. -北京:高等教育出版社,1999

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-007282-3

I. 机… II. 邹… III. 机构学-高等学校-教材 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 07868 号

机械原理

邹慧君 傅祥志 张春林 李杞仪 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1999 年 6 月第 1 版

印 张 26.75

印 次 1999 年 6 月第 1 次印刷

字 数 490 000

定 价 27.90 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序

机械原理课程是机械类专业的一门重要的技术基础课程。随着科学技术的飞跃发展,机构、机器和机械的概念已有了新的拓宽和发展,机械工程学科也发生了广泛深刻的变化。针对这种情况,机械原理课程的内容与体系势必要求作出相应的改革。

本书是一本面向 21 世纪、具有较大改革力度的机械原理教材。它是由邹慧君、傅祥志、张春林和李杞仪等教授共同主编的,作者在认真总结近 20 年来我国机械原理课程改革经验的基础上,充分考虑 21 世纪机械产品创新设计的知识需要,对机械原理课程体系和内容进行了较大的改革。

为了使机械原理课程发挥更大的作用,本书一方面将机械原理课程的重要传统内容安排处理得更加符合机械产品概念设计的需要,另一方面又大量充实了机构及其系统创新的运动设计内容。这对于培养机械类专业学生的机械产品创新能力和科技发展适应能力,无疑是十分重要的。

本书在编写中比较注意知识面的扩大、三基(基本理论、基本知识和基本技能)的掌握以及解决问题能力的培养,这将对学生学习机械原理课程产生较好的效果。

我衷心祝贺机械原理课程新教材的编写出版。相信通过机械原理课程广大师生的教学实践,必将不断趋于完善。

中国工程院院士、北京航空航天大学教授

张启先

1998 年 10 月

前 言

18 世纪下半叶第一次工业革命促进了机械工程学科的迅速发展,促使机械原理在原来的机械力学基础上发展成为一门独立的学科,它对传统形式的机械的结构和性能的完善起了很大的推动作用。随着科学技术的飞跃发展,当今世界又在经历一场新的产业革命,现代机械的概念已大大不同于 19 世纪机械的概念,其特征是具有计算机信息处理和手段。因此,现代机器的工作原理、结构组成、设计思维方式已大大不同于传统的机器,促进了机械原理学科发生广泛、深刻和质的变化,这就要求机械原理课程的体系和内容作出与之适应的改革。

21 世纪机械产品的国际竞争将愈来愈剧烈,要求机械产品不断创新,努力提高产品质量,完善改进机械性能,满足市场需要。这是每一个机械设计人员的责任,也是机械学学科的研究内容。开发新产品,设计要先行。不少专家认为,一个产品的好坏,关键在于设计。机械产品设计又可分为两个阶段:机械产品的概念设计 (Conceptual Design) 和机械产品的构形设计 (Configuration Design)。概念设计是决定机械产品质量水平的高低、性能的优劣和经济效益好坏的关键性一步。机械原理的重要任务应是进行机械运动方案的构思、各个执行机构的类型和尺度综合等。这些内容是机械产品概念设计中不可缺少的部分。机械原理课程应紧密结合机械产品概念设计需要,充实机构创新设计内容,加强机构系统设计理论和方法的阐述,这不但是适应 21 世纪机械产品市场竞争的需要,也是机械原理课程体系、内容改革应该遵循的方向。

本教材是一本面向 21 世纪、具有较大改革力度的机械原理教材。为了达到上述目标,按照我们对现代机械工作原理和结构组成的理解及对现代机械设计理论和方法的体会,在编写本教材时要求满足:培养 21 世纪人才需要,提高学生的设计思维和设计创新能力;产品自主开发的需要,培养机械产品现代设计的能力;学科发展的需要,充实广义机构内容和现代设计方法;改革原有课程内容的需要,建立起新的课程体系和内容。具体来说,就是要加强机构设计,加强机构系统设计,增加机构创新设计方法,充实广义机构的类型、特点的介绍。

为了扩大知识面、促进学生能力的培养,除重点内容外,内容的选取尽可能要宽,但阐述要少而精,给学生有一定的思考余地。为了便于学生更好掌握各章重点内容,我们在各章前加了提示。为了便于学生复习掌握每章的基本理论、基本知识和基本技能,培养他们分析问题、解决问题的能力,我们在每

章末尾编写了思考题和习题。

参加本书编写的有：上海交通大学邹慧君（第一、十三章）、华南理工大学李杞仪（第二、九章）、华中理工大学傅祥志（第三章）、北京理工大学张同庄（第四章）、华南理工大学罗雪波（第五章）、华中理工大学杨家军（第六、七章）、上海交通大学王石刚（第八章）、上海交通大学沈乃勳（第十、十一章）、北京理工大学张春林（第十二、十四章）。并由邹慧君、傅祥志、张春林、李杞仪担任主编，最后由邹慧君负责统稿、编定。

本书承中国工程院院士、北京航空航天大学张启先教授和原国家教育委员会机械原理课程教学指导小组成员、东南大学郑文纬教授精心审阅，提出了很多宝贵意见，编者在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，不当之处在所难免，敬希各位机械原理课程的教师 and 广大读者不吝指正。

作 者

1998年9月

责任编辑	李 平
封面设计	张 楠
责任绘图	李维平
版式设计	周顺银
责任校对	马桂兰
责任印制	宋克学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 机械原理的研究对象及基本概念	1
§ 1-2 机械设计概述	3
§ 1-3 机械原理课程的地位和作用	4
§ 1-4 机械原理学科的发展动向	6
思考题	11
第二章 机构的组成原理和机构类型综合	12
§ 2-1 机构的组成及运动简图	12
§ 2-2 机构的自由度计算及机构运动确定条件	19
§ 2-3 机构的高副低代、结构分析和组成原理	24
§ 2-4 机构类型综合	30
习题	32
第三章 连杆机构设计和分析	36
§ 3-1 平面四杆机构的特点和基本型式	36
§ 3-2 平面连杆机构设计中的一些共性问题	40
§ 3-3 平面连杆机构运动设计的基本问题及应用	47
§ 3-4 刚体导引机构的设计	50
§ 3-5 函数机构的设计	60
§ 3-6 轨迹机构的设计	69
§ 3-7 多杆机构的设计和应用	71
§ 3-8 平面连杆机构的运动分析	75
§ 3-9 速度瞬心及其在平面机构速度分析中的应用	85
§ 3-10 平面连杆机构力分析特点	88
思考题	94
习题	94
第四章 凸轮机构及其设计	102
§ 4-1 概述	102
§ 4-2 从动件的运动规律	108
§ 4-3 凸轮轮廓曲线的设计	117
§ 4-4 凸轮机构的压力角及基本尺寸的确定	125
§ 4-5 力封闭凸轮机构的动态静力分析	132

§ 4-6 高速凸轮机构简介	136
思考题	138
习题	139
第五章 齿轮机构及其设计	144
§ 5-1 概述	144
§ 5-2 齿廓啮合基本定律及渐开线齿形	145
§ 5-3 渐开线圆柱齿轮各部分名称和尺寸	148
§ 5-4 渐开线直齿圆柱齿轮机构的啮合传动	151
§ 5-5 其他齿轮机构的啮合特点	164
§ 5-6 定轴轮系的传动比	179
§ 5-7 周转轮系的传动比及设计要点	182
§ 5-8 复合轮系的传动比	189
§ 5-9 其他类型齿轮传动简介	190
思考题	196
习题	197
第六章 间歇运动机构	202
§ 6-1 棘轮机构	202
§ 6-2 槽轮机构	207
§ 6-3 不完全齿轮机构	210
§ 6-4 凸轮式间歇机构	213
§ 6-5 星轮机构	214
思考题	216
习题	217
第七章 实现其他功用的机构	218
§ 7-1 万向联轴节	218
§ 7-2 螺旋机构	220
§ 7-3 行程增大和可调机构	222
§ 7-4 供料机构及抓取机构	224
§ 7-5 组合机构	230
§ 7-6 瞬心线机构	232
§ 7-7 共轭曲线机构	236
思考题	239
习题	239
第八章 广义机构	241
§ 8-1 概述	241
§ 8-2 液、气动机构	241
§ 8-3 电磁机构	243
§ 8-4 振动及惯性机构	247

§ 8-5 微位移机构	250
§ 8-6 光电机构	255
思考题	256
习题	257
第九章 功能分析和机构创新	258
§ 9-1 功能分析方法	258
§ 9-2 功能求解	262
§ 9-3 机构创新方法	265
思考题	275
习题	275
第十章 执行机构的运动规律及运动协调设计	276
§ 10-1 工作原理设计和工艺动作设计	276
§ 10-2 工艺过程和运动规律设计	279
§ 10-3 执行机构的运动协调设计	286
§ 10-4 机械运动循环图设计	290
思考题	299
习题	299
第十一章 机械运动方案设计	301
§ 11-1 机构选型	301
§ 11-2 机械运动方案的构思和拟定	308
§ 11-3 机械运动方案的评价体系和评价方法	316
§ 11-4 机械运动方案设计举例	323
思考题	328
习题	329
第十二章 机械的运转及其速度波动的调节	331
§ 12-1 概述	331
§ 12-2 机械系统的动力学模型	336
§ 12-3 机械系统运动方程及求解	340
§ 12-4 周期性速度波动的调节	345
§ 12-5 非周期性速度波动的调节	355
思考题	357
习题	357
第十三章 机械振动及隔离	361
§ 13-1 概述	361
§ 13-2 转轴的横向振动	364
§ 13-3 转轴的扭转振动	369
§ 13-4 机械系统振动模型建立的基本原理	375
§ 13-5 机械系统的隔振和消振	380

思考题	385
习题	385
第十四章 机械平衡	387
§ 14-1 概述	387
§ 14-2 刚性转子的平衡设计和平衡实验	389
§ 14-3 挠性转子的动平衡简介	399
§ 14-4 平面机构的平衡	401
§ 14-5 多缸发动机惯性力的部分平衡简介	409
思考题	412
习题	412
参考文献	416

第一章 绪 论

本章介绍本课程的研究对象和主要内容，机构、机器、机械的基本概念和机械运动方案设计的基本要求。

§ 1-1 机械原理的研究对象及基本概念

机械原理又称为机器理论与机构学。

机械原理是研究机构和机器的运动及动力特性，以及机械运动方案设计的一门基础技术学科。它是机械设计理论和方法中的重要分支。机械原理的研究对象是机械，而机械是机构与机器的总称。

机器的种类繁多，如内燃机、拖拉机、起重机、金属切削机床、纺织机、缝纫机、包装机、电脑绣花机等。根据它们的组成、功用和运动的特点，进行概括和抽象，对机器可定义如下：机器是一种由人为物体组成的具有确定机械运动的装置，它用来完成一定的工作过程，以代替人类的劳动。根据工作类型的不同，机器一般可以分为动力机器、工作机器和信息机器三类。

动力机器的功用是将任何一种能量变换成机械能，或者将机械能变换成其他形式的能量。例如，内燃机、压气机、涡轮机、电动机、发电机等都属于动力机器。

工作机器的功用是完成有用的机械功或搬运物品。例如，金属切削机床、轧钢机、织布机、包装机、汽车、机车、飞机、起重机、输送机等都属于工作机器。

信息机器的功用是完成信息的传递和变换。例如，复印机、打印机、绘图机、传真机、照相机等都属于信息机器。

现代机器通常由控制系统、信息测量和处理系统、动力部分、传动部分及执行机构系统等组成。其中控制和信息处理是由计算机来完成的，使机器达到机电一体化的水平，例如加工中心、机器人、全自动照像机等。

不管现代机器如何先进，机器与其他装置的主要不同点是产生确定的机械运动，完成有用的工作过程。因此，实现机械运动的执行机构系统是机器的核心，机器中各个机构通过有序的运动和动力传递来最终实现功能变换、完成自己的工作过程。机器中的运动单元体称为构件。因此，机构是把一个或几个构件的运动，变换成其他构件所需的具有确定运动的构件系统。从现代机器发展

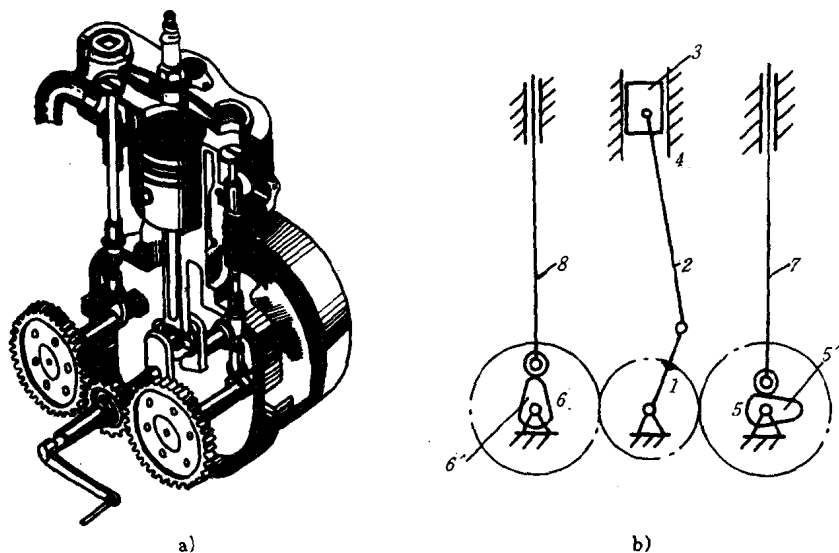


图 1-1

趋势来看,机构中的各构件可以都是刚性的,也可以某些构件是挠性的或弹性的,或是由液压、气动、电磁件构成的。现代机器中的机构不再是纯刚性构件的机构。

在机构中给定运动的构件称为输入构件,又称为原动件;完成执行动作的构件称为输出构件,又称为执行构件。

机器的类型虽然很多,但组成各种机器的基本机构的种类却并不多。对于刚性构件机构,最常用的机构有:连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、间歇运动机构等。如图 1-1 所示,内燃机是由曲柄滑块机构(属连杆机构) 1-2-3-4、齿轮机构 1-4-5-6 及凸轮机构 4-5'-7 及 4-6'-8 组成的,其中构件 5 和 5'、6 和 6' 各为同一个构件。如图 1-2 所示的化妆品冷霜灌装机,主要由曲柄滑块机构 1-2-3-4、凸轮机构 1-5-6、凸轮机构 1-7-8、凸轮机构 1-9-10、

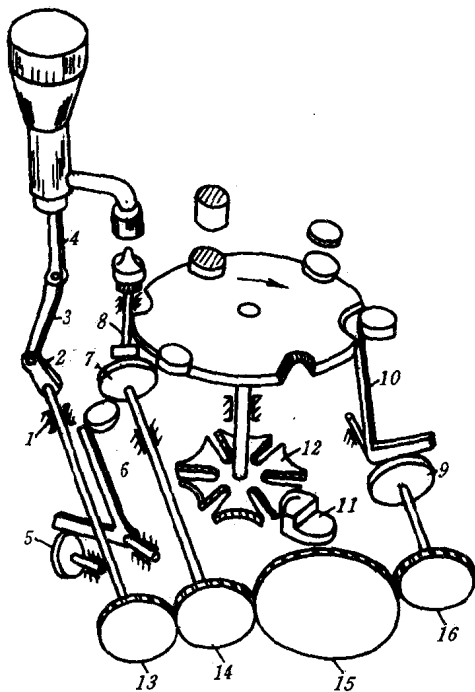


图 1-2

槽轮机构 1-11-12、齿轮机构 1-13-14-15-16 等组成。

§ 1-2 机械设计概述

一、机械设计的一般进程

机械设计过程并没有一个通用的固定顺序,而必须按具体情况确定。机械设计的一般进程,可分为产品规划、方案设计、详细设计和改进设计四个阶段。现分述如下。

1. 产品规划阶段

这一阶段的中心任务是进行需求分析、市场预测、可行性分析,确定设计参数及制约条件,最后给出详细的设计任务书(或要求表),作为设计、评价和决策的依据。产品开发是从需求识别开始的,不但要开发显需求的产品,而且要开发隐需求的产品。

2. 方案设计阶段

市场需求的满足或适应,是以产品的功能来体现的。产品功能与产品设计是因果关系。体现同一功能的产品,可以是多种多样的。方案设计阶段要完成产品功能分析、功能原理理解和评价决策以得到最佳功能原理方案,并由此最后完成机械运动方案的设计。产品方案的好坏,决定着产品性能和成本,关系到产品的水平和竞争能力,因此,它是产品设计的关键。由此可见,机械原理课程内容将为方案设计提供设计理论和方法。

3. 详细设计阶段

这一阶段是将机械运动简图具体化为机器及零部件的合理结构,也就是要完成产品的总体设计、部件和零件的设计,完成全部生产图纸并编制设计说明书等有关技术文件。在此阶段中,零部件的结构形状、装配关系、材料选择。尺寸大小、加工要求、表面处理、总体布置等设计合理与否,对产品的技术性能和经济指标都有着直接的影响。

4. 改进设计阶段

这一阶段的主要任务是根据产品在试验、使用、鉴定中所暴露的问题,进一步作相应的技术完善工作,使产品的效能、可靠性和经济性得到提高,更具生命力。

二、机械运动方案设计的主要内容

在机械设计过程中根据产品功能要求、工作性质和工作过程等基本要求进行新机械的方案设计,愈来愈受到产品设计人员的重视。在方案设计阶段应该完成机械运动简图的设计。所谓机械运动简图设计,就是按机械的工作过程和动作要求设计出由若干机构组成的机构系统运动简图。一般情况下,它往往是

机械最核心的部分。

机械运动方案（机械运动简图）的设计主要包括下列两部分。

1. 机械运动简图的型综合

它是按工作过程和工艺动作要求来确定若干个执行动作；根据执行动作要求选择各个执行机构的机构型式（或创造一些新机构）；将这些机构组合成一个机构系统。这就是机械运动简图的型综合。

2. 机械运动简图的尺度综合

它是按初步确定的机构系统的机构型式，根据各执行构件的运动规律要求和动作相互配合要求进行各机构的运动尺度的设计计算和各机构间的协调设计。这就是机械运动简图的尺度设计。

在机械运动方案设计过程中这两部分设计往往需要反复进行，使机构系统的类型和运动尺度都能较好地满足设计要求。

由此看出，机械运动方案设计是机械产品设计中十分重要的内容，是决定机械产品质量、水平、性能和经济效益的关键性一步。

为了搞好机械运动方案设计，我们应该努力掌握机构及其系统设计的理论和方法，努力学好机械原理的基本内容。

三、机电一体化技术在机械运动方案设计中的作用

采用纯机械的各种机构来完成机器的传动、控制和执行动作虽然是能够做到的，但在工艺动作过程比较繁复的场合，会导致机械结构复杂，可调整性差，难以达到优良的机器功能。由于机电一体化技术日益发展并广泛应用，机器中的传动、控制和执行机构的数目有减少的趋势，机构的结构有简化的可能。同时，可使机器的档次和水平有较大的提高。机电一体化技术虽然发展很快，但在现代机械中不会取消传统机构的应用，为了产生确定的运动和传递机械能，仍然离不开传统机构。由于机电一体化技术的广泛应用，我们应该努力掌握电磁、液气、声光等多种工作原理的机构设计原理。因此，人们已普遍提出进行广义机构设计的研究。总之，在确定机械工作原理、工艺路线方案时，选择传动、控制和执行机构，进行机械运动简图设计时，均应考虑电子技术与机械技术的结合，使新设计的机器达到性能优良、适应性强、操作控制方便、结构简单紧凑、生产效率高、自动化程度高的先进水平。

§ 1-3 机械原理课程的地位和作用

一、机械原理课程的地位和作用

机械原理是研究机构及机械运动简图设计的一门重要技术基础课。它的任务主要是使学生掌握机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能，培

培养学生初步拟定机械运动方案、分析和设计基本机构的能力。它是以高等数学、普通物理、机械制图及理论力学等课程为基础,同时又为以后学习机械设计和有关专业课程以及掌握新的科学技术成就打好工程技术的理论基础,并能使学生受到一些必要的、严格的基本技能和创造思维的训练。特别是一些机械类的专业,为了拓宽专业面和扩大知识范围而合并为一个机械工程及自动化专业,机械原理课程对其愈来愈显得重要。机械原理在培养高级技术人才的全局中,具有增强学生对机械技术工作的适应能力和开发创新能力的作用。即使对于主要是应用机械的工程技术人员,也应熟悉各种机构的工作原理及在机器中的作用。掌握了机械原理,有利于发挥机器的工作性能,维护保养好机器。

设计和制造一种工作性能优良的新机器,需要掌握机器的工作原理、设计和制造原理,需要综合应用多门学科的知识,而机械原理是其中一门重要的学科。

二、机械原理课程的主要内容

如前所述,机械原理是一门研究机构及机械运动简图设计的学科,它的主要内容有以下四个方面。

1. 机构的组成和类型综合

研究机构组成原理是为了分析机构运动的可能性及确定性;也为了对组成机构的杆组进行分类,便于系统地建立机构运动分析和力分析的方法。通过机构类型综合可以探索创新机械的某些途径。

2. 机构设计

机器虽然种类繁多,然而构成各种机器的机构类型却是有限的,它们是齿轮机构、凸轮机构、连杆机构、间歇运动机构、其他用途机构及广义机构等一些常用的机构。本课程介绍满足预期运动和工作要求的各种机构的设计理论和方法。

3. 机构系统设计

机构系统设计是机械方案设计的主要内容,在本课程中介绍机械运动方案设计步骤、功能分析、机构创新、执行机构的运动规律和机构系统运动协调设计等的基本原则和方法。

4. 机械动力学

为了设计出动力性能良好的机械,在本课程中介绍了在已知力作用下机械的真实运动规律,减少机器速度波动的调节问题,机械振动和隔振方法,机械运动过程中惯性力系的平衡问题。

机械原理课程设计在本门课程中有着十分重要的作用,通过机械原理课程设计可以系统地、深入地掌握本课程的主要内容。

从另外一个角度来看,本课程研究的内容可以概括为两个方面:一是介绍

对已有机械进行结构、运动和动力分析的方法；二是探索根据运动和动力性能方面的要求设计新机械的途径。但是应该特别强调的是，在本课程中对机械设计的研究，只限于根据运动和动力要求，对机构各部分的尺度关系进行综合，而不涉及各零件的强度计算、材料选择，以及其具体结构形状和工艺要求等问题。正因为如此，所以本课程中又常用“综合”二字来代替“设计”二字。

三、机械原理课程学习方法

为了学好机械原理课程，读者应注意以下几点：

1) 熟悉和掌握各种典型机构的结构和运动特点，深入理解满足实际生产需要的机构分析和设计方法。

2) 熟悉和掌握机械运动简图的画法，要习惯于采用运动简图来认识机构和机器，想象机构和机器的运动情况。

3) 对于课程中的基本概念要深刻理解，才能更好地掌握课程内容，起到事半功倍的效果。

4) 深入理解和全面掌握本课程的基本研究方法。这些基本研究方法有：杆组法、转换机架法、机构演化法、等效法等。这些方法使我们能容易地对各种机构进行分析和设计。

5) 注意在学习中进行前后联系、融会贯通，如利用瞬心的概念对凸轮机构、齿轮机构等进行分析等。

6) 求解习题前应先重点复习有关例题，归纳总结解题思路，从中得到启示，以达到举一反三的效果。

§ 1-4 机械原理学科的发展动向

机械原理学科作为机械学学科的重要组成部分，是机械工业和现代科学技术发展的重要基础。目前，机械学科和电子学、信息科学、计算机科学、生物科学以及管理科学等相互渗透，相互结合，已经成为一门崭新的学科，充满着生机与活力。它的研究领域已扩展到航空航天、深海作业、生物工程、微观世界、机械电子等等。它的研究课题层出不穷，研究方法日新月异。现将机械原理学科的发展动向概述如下。

一、机构的结构理论

由于机器人、步行机、人工假肢和新型机器的发展需要，以及机器的动力源日益广泛采用液压与气动，因此近年来对于多自由度、多闭环的多杆平面连杆机构以及开式运动链的结构理论有了较多的研究。同时，由于空间连杆机构应用日益广泛，对于空间连杆机构的公共约束和过约束等问题也作了很多的研究。在机构的结构理论研究中，近年来采用了图论、网络分析、线性几何学、螺