



面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材

机械原理

黄茂林 秦伟 主编



机械工业出版社
China Machine Press

7.11
H-523 X2

面向 21 世纪课程教材
国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材

机械原理

黄茂林 秦 伟 主 编



机械工业出版社

本书是机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的成果。全书根据 21 世纪机械专业人才培养方案及教学内容改革的总体构思和需要,以培养机构及机械系统运动方案的分析与设计能力为目标,安排的主要内容有:绪论,机构的结构设计,平面连杆机构及其分析设计,凸轮机构及其设计,轮系及其设计,机械系统动力学,机械系统运动方案设计等七章。

本书可作为高等学校机械类各专业的教学用书,也可作为非机械类学生及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/黄茂林,秦伟主编. —北京:机械工业出版社, 2002. 6
面向 21 世纪课程教材. 国家工科基础课程教学基地
机械基础系列教材
ISBN 7-111-10009-3

I. 机… II. ①黄…②秦… III. 机构学-高等学校-教材 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 037906 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:王霄飞 版式设计:冉晓华 责任校对:程俊巧
封面设计:鞠杨 责任印制:付方敏
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷
1000mm×1400mm B5·14 印张·545 千字
0 001—4 000 册
定价:34.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

国家工科基础课程教学基地机械基础系列 教材编审委员会

主任：唐一科

副主任：刘昌明 何玉林 黄茂林

顾问：杨叔子

主编人员：丁一 祖业发 黄茂林 龙振宇 刘天模 袁绩乾

赵月望 陈国聪 何玉林 吕仲文 杨学元 秦伟

李文贵

审稿人员：常明 华中科技大学

张策 天津大学

吴鹿鸣 西南交通大学

杨治国 四川大学

李建保 清华大学

林萍华 东南大学

张春林 北京理工大学

何援军 上海交通大学

谭建荣 浙江大学

张济生 重庆大学

(排名不分先后)

策划单位：机械工业出版社 重庆大学

序

为了适应 21 世纪我国现代化建设的需要，培养高质量的工程科学技术人才，教育部从 1996 年开始实施了“面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划”、接着又决定建设国家工科基础课程教学基地，这些措施推动了教育改革的深入发展，形成了一批有特色的课程体系和系列教材。由重庆大学国家工科基础课程机械基础教学基地组织编写、机械工业出版社出版的“国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材”就是其中之一。这套系列教材是国内众多资深教授的支持、指导和数十位长期从事教学和教学改革的教师辛勤劳动的结果，能够满足机械类专业人才培养的要求。

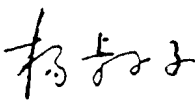
这套系列教材紧密结合“机械类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”、“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”两个面向 21 世纪重大教学改革项目和国家工科基础课程机械基础教学基地建设，集中反映了重庆大学等高校围绕人才培养，在改革机械基础课程体系和教学内容方面所取得的成果。

这套系列教材的特色在于将机械基础系列课程分为设计基础和制造基础两类课群。以拓宽基础、培养学生综合应用机械基础理论与现代设计分析方法进行机械设计和创新为宗旨，遵循认知规律，明确课程定位，突破各课程自身的传统体系，基本上实现了系列课程的整体优化。通过《机械认识实践》的实践教学，帮助学生建立机械的感性认识。制造基础课群则对原机械制造的冷、热加工专业课程进行了整合和改造，建立了适合宽口径大机械专业的三个知识点——“机械制造技术基础”、“材料成形工艺基础”和“工程材料”。设计基础课群对传统的“机械设计”及“机械原理”进行了大胆的尝试性整合；展示了在“机械创新设计”思维的引导下，运用“计算机图形学”、“机械 CAD/CAE 技术基础”等现代设计方法和手段进行机械设计主线。

这套系列教材较好地体现了面向 21 世纪机械类专业人才培养模式改革的思路，对机械类专业机械基础系列课程体系及教学内容的改革进行了富有成效的探索与实践。机械工业出版社出版这套教材，实为一件很有意义的事，其将为全国机械基础课程体系的教改与教学提供又一套很有特色的教材。

当然,这套系列教材还需要在教学改革和教学实践中经受检验、不断完善;以
结出我国教育改革的硕果。是为序。

中国科学院院士
重庆大学机械传动国家重点实验室学术委员会主任
华中科技大学教授



2001年6月16日

前 言

为了适应新世纪培养高素质、创造型机械科技人才的需要,重庆大学国家工科基础课程机械基础教学基地组织编写了机械基础系列教材。这套教材编写的整个过程就是我们完成教育部面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划中“机械类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”、“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”两个项目的过程。我们按照新世纪机械专业人才应该具备的能力、素质和知识结构,研究制定了机械类专业人才培养方案及教学内容体系和与之相适应的机械基础系列课程体系及教学内容,并在 97、98、99 级本科教学中经过实践,所以这套教材反映了我们进行教学改革成果。

这套系列教材的特色在于将机械基础系列课程分为设计基础和制造基础两类课群。对原机械制造工艺、金属切削机床、金属切削刀具、夹具、铸造、锻压等专业课程进行了整合和改造,编写了适合宽口径机械专业的《机械制造技术基础》、《材料成形工艺基础》和《工程材料》;增设了以参观和实践为主的《机械认识实践》课程;《现代机械制图》把投影制图和计算机绘图作为重点,并将其贯穿于全书;以设计为主线,重新规划了机械设计基础的体系结构,把齿轮机构的原理与设计有机融合,放在《机械设计》教材中,将《机械原理》的重点定位于机构的运动学、动力学和机械系统运动方案的分析与设计,并将《机械设计》安排在《机械原理》之前开出。增加了《计算机图形学》、《机械 CAD/CAE 技术基础》等计算机应用技术基础教材,反映了现代科学技术的新发展,引导学生应用现代设计方法和手段进行机械设计;增加了《机械创新设计》,介绍创新方法,启发创新思维。

《机械原理》课程,是机械基础系列课程中设计基础系列课程之一。机械原理课程,定位于机构及机械系统的运动方案设计,特别是机构的运动学结构和尺寸设计及机械系统(特别是执行系统)的运动方案设计。就机械设计的总体而言,这部分内容具有很强的综合性和突出的创新性。对培养学生的综合设计能力及创新意识与能力,以及理论联系工程实际的能力等方面起着重要的作用。为适应 21 世纪培养高素质创新型人才的需要,机械原理课程在系列课程进行总体优化与整合的前提下,根据其定位与任务,面向培养学生综合设计能力的总体目标,对课程体系和内容进行了较大幅度的改革与精选整合。主要体现在以下几个方面:

1. 突出以设计为主线，强调分析与设计的有机统一

根据本课程在系列课程中的定位与任务，以及系列课程以设计为主线的原则，机械原理的整个内容也体现了以“设计”为主，将分析与设计有机地紧密结合的编写原则。设计，就是综合应用基本理论与专业知识进行创造性实践的过程，突出设计主线，即是突出综合与创新能力的培养。全书除常用机构一章外，其余各章均切切实实地突出了设计。例如将原结构分析一章改为结构设计，加强了运动链及机构的结构综合，将自由度与约束分析计算改为设计，把虚约束、局部自由度从结构设计的特殊功能需要提出……等。又例如在凸轮机构设计一章中，首先明确地提出了凸轮机构的基本运动学参数及主要结构参数，全章均围绕如何确定和设计这些参数展开。这不仅为了突出设计这一主线，更主要的目的是为使学生能更好地理解、掌握与应用所学内容。

机构及机构系统的方案设计，其首要的任务是选型和对常用机构的正确应用。而正确的选型与应用，依赖于对机构性能与特点的认识与掌握，需要对机构性能（运动、传动及动力性能）进行分析。设计结果是否满足预期的要求及方案的比较与优选，都离不开分析这一最基本最重要的过程和手段。因此，分析与设计是密不可分。为此，本书将分析的内容都有机融入相应的机构设计的章节中，不再单独设章。

2. 强调联系机械系统及工程实际

机构是机械系统中的一个组成部分。认识与了解机构的结构与应用特点，以及对机构设计提出要求，都必须从它们在机械系统中的任务和所要实现的功能出发，才能使学生较好地、本质地去认识机构，正确地设计机构。因此，在各种典型机构的设计中，都强调从它们在机械中的实际应用和作用提出其结构和运动学特征，尽可能由某一机器的实际工作要求，提出设计要求并讨论如何去合理地确定设计参数。

为了分析与设计的方便，运动链、机构及机械系统，在机械原理课程中均以较抽象的简图形式来描述，而且在论述上也常强调其运动学、动力学的原理和概念。为了学生能实际应用，能较深刻地理解和掌握，我们在编写中强调了紧密联系工程实际。例如对运动副及构件以至机构都尽可能配有必要的结构图，并讲清在工程中应用的优缺点和选用的原则；强调如何根据工程实际对象，应用基本理论建立模型的思路与策略，并能使之具有更好的适应性、通用性，同时明确指出其应用条件和应注意的问题。题例及习题的选用也强调其内容的工程性与综合性，以有利于培养学生的工程意识与分析应用能力。把机械设计课程安排在机械原理课程之前学习，其中一个主要的出发点也就是为了使学生在学习本课程时能具有较好的工程实际及结构方面的基础。

3. 加强与拓宽基础, 提高内容的现代化水平, 注意培养学生的创新意识与能力

加强基础是学生能力培养的根本, 也是对今后工作适应能力的根本。机械原理课程的理论基础主要是前继课程、特别是力学提供的。因此在本教材中, 主要强调运动学、力学在机构及机械系统中的综合应用; 加强机构学本身的结构学基础。并根据发展的需要, 适当加强与拓宽动力学及现代分析设计方法的基础。适当增加了空间、开链机构和自调、自适应机构的基本知识; 增加了功率流、非回转质量的平衡及弹性动力学概念等内容。全书均以采用计算机技术为基础的现代分析与设计方法为主等。

为了启迪学生的创新兴趣与欲望, 培养学生的创新意识, 在教材中加强了机构的构形设计及机械系统运动方案设计中的创新思维与方法的介绍, 特别是功能原理的构思及多方案的设计、评价与优选; 强调各种模型建立的思路与基本出发点的介绍; 加强典型案例的分析和发展方向的介绍与思考等。

本书编写的另一原则是; 既注意精选内容, 突出重点, 又注意了扩大知识面和便于学生自学, 并使之能具有较强的参考实用价值。因此, 在内容的叙述上尽可能深入浅出; 注意系统性、完整性和尽可能多举一些有启发性的实例。书中还包含了一些带*号的内容使用者可根据教学基本要求及学时的多少有选择地进行讲授和指定学生自学, 也可为因材施教提供较大的知识空间。

全书共分七章, 其中绪论、第一章由黄茂林编写; 第二章、第四章、第六章由吕仲文编写; 第三章由秦伟编写; 第五章由杜静编写, 第七章由马正纲(昆明理工大学)与黄茂林共同编写。全书由黄茂林统稿和主编, 秦伟为副主编。

本书由全国机械基础教学指导委员会主任、天津大学张策教授担任主审, 张策教授对书稿进行了认真细致的审阅, 并提出了极为宝贵的修改意见, 对提高本书的水平和编写质量给予重要的帮助, 在此致以衷心的感谢!

本书经过了近三年的编写历程, 参考了其他面向21世纪的教材, 经过了两届试点班的实践和反复修改。尽管如此, 由于按照新的体系和整合的内容进行编写, 以及本课安排在机械设计课程之后进行等, 均尚属首次尝试, 加之编者水平有限, 误漏在所难免。希望广大读者和同行专家不吝赐教, 并在此一并表示感谢!

编者

2002年1月

目 录

序
前言

绪 论	1
第一节 机器的功能结构及机构	1
第二节 机械总体方案设计的内容及机械原理课程的定位与任务	7
第三节 机械原理课程的主要内容、基本要求与学习方法	9
一、机构的结构设计	9
二、常用机构的设计	9
三、机械动力学	10
四、系统运动方案设计	10
思考题	12
第一章 机构的结构设计	13
第一节 机构的基本结构及简图	13
一、构件与自由度	13
二、运动副与约束	15
三、运动副的封闭	19
四、运动链、机构及简图	20
(一) 运动链与结构简图	20
(二) 机构及机构运动简图	23
第二节 运动链及机构的自由度计算和机构运动简图的绘制	24
一、运动链的自由度计算及平面机构	24
二、平面机构运动简图的绘制	25
三、平面机构(运动链)中的过约束、虚约束和局部自由度结构	27
(一) 平面闭链机构中的过约束及其计算	27
(二) 平面机构中的虚约束结构及复合铰链	28
(三) 运动链和机构中的局部自由度	30
第三节 平面运动链与机构的结构设计	32
一、平面运动链的自由度与结构设计	32
二、运动链结构公式推导法	32
三、机构结构的替代与演化	34

(一) 运动副的等价替代	34
(二) 基本运动链的演化与派生	36
(三) 运动副元素与构件的功能结构演化	38
第四节 按基本杆组的机构结构综合与结构分析	41
一、基本杆组	41
二、基本杆组的联接和机构的构成	44
三、机构的结构分析	46
习题	48
第二章 平面连杆机构及其分析与设计	53
第一节 概述	53
一、平面连杆机构的基本结构	55
二、铰链四杆机构具有整转副和曲柄存在的条件	57
三、平面四杆机构的变异及其他基本类型	60
四、平面多杆机构	65
第二节 平面连杆机构的运动特性与分析方法	68
一、平面连杆机构的运动特性及其应用	68
(一) 实现多种运动形式的转换和运动性质的变换	69
(二) 实现运动规律的变换与运动函数的再现	76
(三) 实现轨迹运动	78
(四) 导引刚体实现一定的位置姿态要求	82
二、平面连杆机构的运动分析方法	83
(一) 运动分析的目的与方法	83
(二) 平面连杆机构运动分析的图解法与连杆机构基本运动特征参数	85
三、平面四杆机构的合理选用	107
第三节 平面四杆机构的传力特性与受力分析	110
一、机构中的摩擦及传动效率	110
(一) 作用在机构上的力	110
(二) 低副中的摩擦	110
(三) 机构的传动效率	117
二、平面连杆机构的传力特性	121
(一) 平面连杆机构的压力角与传动角	121
(二) 机构中力的增益与“死点”	123
三、平面连杆机构的静力学分析	125
(一) 连杆机构忽略摩擦时的静力分析	126
(二) 考虑摩擦的静力分析	127
四、根据受力分析合理地选择和设计平面连杆机构	130
第四节 平面四杆机构综合的内容与方法	133

一、平面四杆刚体导引机构的综合	134
(一) 刚体导引机构综合的图解法	134
(二) 刚体导引机构综合的解析法	135
二、两连架杆实现预期运动规律的平面四杆机构综合	144
(一) 反转原理在函数发生机构综合中的应用	144
(二) 函数发生机构综合的解析法	145
三、有急回运动四杆机构的综合	148
(一) 有急回运动平面四杆机构综合的图解法	149
*(二) 有急回运动平面四杆机构综合的解析法	152
四、实现预期轨迹平面四杆机构的综合	159
* 五、平面四杆机构优化设计 (简介)	163
(一) 优化设计的数学模型	164
(二) 优化问题的求解过程	167
(三) 约束优化方法简介	168
* 第五节 空间连杆机构	173
一、坐标变换	174
二、闭链型空间四杆机构的运动分析	179
三、开链型空间连杆机构的运动分析	184
习题	188
第三章 凸轮机构及其设计	196
第一节 概述	196
一、凸轮机构的基本组成及应用特点	196
二、凸轮机构的分类	197
(一) 按凸轮的形状分	197
(二) 按从动件运动副元素的形状分	197
(三) 按从动件的运动形式分	198
(四) 按凸轮与从动件维持高副接触 (封闭) 的方式分	198
三、凸轮机构的工作循环与运动学设计参数	199
第二节 凸轮机构的力分析和效率	201
第三节 凸轮机构的设计过程	202
第四节 凸轮机构运动学参数和基本尺寸的设计	203
一、工作循环图与凸轮工作角度的确定	203
二、从动件运动规律设计	203
(一) 基本运动规律	204
(二) 组合运动规律	208
(三) 设计从动件运动规律时应考虑的问题	209

三、盘形凸轮机构基本尺寸的设计	211
(一) 移动从动件盘形凸轮机构基本尺寸的设计	211
(二) 摆动从动件盘形凸轮机构基本尺寸的设计	213
第五节 平面凸轮轮廓曲线的设计	214
一、凸轮轮廓曲线设计的反转法原理	214
二、平面凸轮轮廓曲线设计的解析法	216
(一) 尖顶从动件盘形凸轮机构	216
(二) 滚子从动件盘形凸轮机构	217
(三) 平底移动从动件盘形凸轮机构	218
三、刀具中心轨迹计算	219
(一) 滚子从动件盘形凸轮机构	219
(二) 平底移动从动件盘形凸轮机构	220
第六节 凸轮机构从动件的设计	221
一、从动件高副元素形状的选择	221
二、从动件滚子半径及平底宽度的确定	221
(一) 滚子半径的确定	221
(二) 平底宽度的确定	223
三、封闭形式的选择	223
第七节 空间凸轮机构及高速凸轮机构简介	224
一、空间凸轮机构简介	224
(一) 圆柱凸轮机构	224
(二) 圆锥凸轮机构	224
(三) 弧面凸轮机构	225
(四) 球面凸轮机构	225
二、高速凸轮机构简介	225
(一) 弹性从动件的运动微分方程	226
(二) 动力系数	226
(三) 保证从动件与凸轮不脱离的条件	227
习题	227
第四章 轮系及其设计	231
第一节 轮系的分类	231
第二节 定轴轮系及其设计	231
一、定轴轮系的传动比计算	232
二、定轴轮系的传动效率计算	234
三、定轴轮系设计中的几个问题	236
(一) 传动比的合理分配	237
(二) 合理的布局	239

第三节 周转轮系及其设计	239
一、周转轮系及其结构分类	239
二、周转轮系的传动比计算	240
三、行星轮系的传动效率计算	246
四、行星轮系设计的几个问题	249
(一) 行星轮系类型的选择	249
(二) 行星轮系各轮齿数的确定	250
(三) 行星轮系的均载装置	253
第四节 复合轮系及其设计	254
一、复合轮系的传动比计算	255
(一) 串联型复合轮系	255
(二) 封闭型复合轮系	256
(三) 双重系杆型复合轮系	259
二、封闭型复合轮系的功率流	260
(一) 作用在差动轮系三个基本构件上的转矩比	261
(二) 封闭型差动轮系中的功率流	262
第五节 轮系的功用	265
第六节 少齿差传动简介	268
(一) 渐开线少齿差行星齿轮传动	268
(二) 摆线针轮传动	270
(三) 活齿传动	272
(四) 谐波齿轮传动	274
习题	276
第五章 其他常用机构	281
第一节 间隙运动机构	281
一、槽轮机构	281
(一) 槽轮机构的工作原理和类型	281
(二) 槽轮机构的运动与分析	282
(三) 槽轮机构的优缺点及应用	283
二、棘轮机构	284
(一) 棘轮机构的工作原理和类型	284
(二) 棘爪自动啮紧的条件	286
(三) 棘轮机构的优缺点和应用	287
三、不完全齿轮机构	288
四、凸轮式间歇机构	289
第二节 螺旋机构	290

一、螺旋机构的工作原理及类型	290
二、螺旋机构的特点及应用	291
第三节 摩擦传动机构	292
第四节 液、气动机构及电磁传动机构	294
一、液、气动机构	294
(一) 液动机构	294
(二) 气动机构	295
二、电磁传动机构	296
思考题	297
第六章 机械动力学	298
第一节 机构的动态静力分析	299
一、构件惯性力的确定	299
二、机构动态静力分析的解析法	300
三、考虑运动副摩擦的受力分析	304
第二节 机械的平衡	305
一、转子的平衡	305
(一) 刚性转子的平衡	306
* (二) 挠性转子的平衡	310
* 二、平面机构的平衡	315
(一) 平面机构惯性力完全平衡的条件	315
(二) 平面机构惯性力完全平衡的线性独立矢量法	318
(三) 平面机构惯性的部分平衡	322
第三节 机械的运转及其速度波动的调节	325
一、单自由度机械系统的等效动力学模型——等效构件、等效力矩与等效转动惯量	326
二、机械运动方程及其求解	333
(一) 机械运动分程	333
(二) 运动方程求解	334
三、机械系统速度波动的调节	338
(一) 机械运动速度不均匀系数及其许用值	341
(二) 最大盈、亏功与飞轮转动惯量的计算	342
(三) 飞轮尺寸的确定	344
* 第四节 考虑构件弹性时的机械动力学简介	347
习题	352
第七章 机械系统运动方案设计	357
第一节 机械总体方案设计	357

一、机械产品的设计过程	357
二、机械总体方案设计的目的和内容	359
(一) 总体方案设计的目的	359
(二) 总体方案设计的内容	359
第二节 现代设计观念与创新设计简介	359
一、现代设计观念	360
(一) 机械设计的历史回顾简述	360
(二) 现代设计方法的产生	360
(三) 机械现代设计和创新设计的特点	361
二、创造性设计与创造性思维	361
第三节 机械执行系统运动方案设计	363
一、机械执行系统运动方案设计的主要内容和过程	363
二、执行系统运动方案设计的思路与策略	366
(一) 巧妙的构思	367
(二) 功能分析与功能求解	369
三、机械执行系统的功能原理及运动方案设计的多方案性	373
四、执行机构的型式设计与创新	376
(一) 执行机构型式设计的原则	376
(二) 执行机构的选型	380
(三) 机构构型的创新设计	385
(四) 机构组合创新	391
(五) 执行机构型式设计实例	398
五、执行机械系统的协调设计	403
(一) 执行系统协调设计的基本要求	403
(二) 执行系统协调设计的方法	405
(三) 工作循环图的编制	407
六、机械系统运动方案的评价与优选	410
(一) 机械系统运动方案评价的意义、特点	410
(二) 评价内容与评价指标	411
(三) 机械运动方案的评价方法	414
第四节 机械传动系统的方案设计和原动机选择	417
一、机械传动系统的方案设计	417
(一) 传动在机械系统中的地位、作用及其设计过程	417
(二) 传动系统类型的选择	418
(三) 传动链的方案设计	419
二、原动机的选择	420
(一) 原动机的类型和特点	420
(二) 原动机的选择	421

三、控制系统概述	422
第五节 机械系统运动方案设计举例	424
习题	429
参考书目	431