



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

理论力学

(第2版)

范钦珊 陈建平 主编

陶秋帆 李明成 浦奎英 编著



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

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

理论力学

Lilun Lixue

(第2版)



高等教育出版社 · 北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/范钦珊,陈建平主编.—2版.
北京:高等教育出版社,2010.1

ISBN 978-7-04-028319-8

I.理… II.①范…②陈… III.理论力学-高等学校-教材 IV.O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第220763号

策划编辑 孙成奇 责任编辑 葛 心 封面设计 杨立新
责任绘图 尹 莉 版式设计 王 莹 责任校对 杨雪莲
责任印制 毛斯璐

| | | | |
|------|--------------|------|---|
| 出版发行 | 高等教育出版社 | 购书热线 | 010-58581118 |
| 社 址 | 北京市西城区德外大街4号 | 咨询电话 | 400-810-0598 |
| 邮政编码 | 100120 | 网 址 | http://www.hep.edu.cn |
| 总 机 | 010-58581000 | | http://www.hep.com.cn |
| 经 销 | 蓝色畅想图书发行有限公司 | 网上订购 | http://www.landaco.com |
| 印 刷 | 国防工业出版社印刷厂 | | http://www.landaco.com.cn |
| | | 畅想教育 | http://www.widedu.com |
| 开 本 | 787×960 1/16 | 版 次 | 2000年2月第1版 |
| 印 张 | 33 | | 2010年1月第2版 |
| 字 数 | 620 000 | 印 次 | 2010年1月第1次印刷 |
| | | 定 价 | 38.40元 |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28319-00

第2版序

本书第1版作为面向21世纪课程教材,出版至今已经近10年了,这期间高等学校的教育教学改革出现了一些新的情况。

最近几年,著者在全国30余所高校讲学的同时,对我国高等学校“理论力学”的教学状况以及对“理论力学”教材的需求进行了调研,与全国500多名基础力学老师以及近2000名同学交换关于“理论力学”教材使用和修改的意见。在此基础上,形成了第2版《理论力学》编写的基本思路。

全国普通高等学校新一轮培养计划中,课程的教学总学时数大幅度减少。理论力学课程的教学学时数也要相应压缩。怎样在有限的教学时间内,使学生既能掌握理论力学的基本知识,又能了解一些理论力学的最新进展;既能培养学生的理论力学素质,又能加强工程概念?这是很多力学教育工作者关心的事情。

从力学素质教育的要求出发,本书更注重基本概念,而不追求繁琐的理论推导与繁琐的数字运算。

工科院校的“理论力学”教学内容与很多工程领域密切相关。理论力学教学不仅可以培养学生的力学素质,而且可以加强学生的工程概念。这对于他们向其他学科或其他工程领域扩展是很有利的。基于此,本书与以往的同类教材相比,工程概念有所加强,引入了大量涉及广泛领域的工程实例以及与工程有关的例题和习题。

本书第2版在保持第1版特色的基础上,作了以下一些调整和补充:

(1) 根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会2009年制订的“理论力学课程教学基本要求(A类)”,将全书内容分为基础部分和专题部分,以便任课老师更加方便地组织教学;

(2) 根据工程实际的要求,应用现代计算技术和计算工具,在运动学和动力学中引入过程分析,新增“运动学和动力学计算机辅助分析”一章;

(3) 在每章习题中增加概念题,以强化学生对理论力学基本概念的理解和掌握;

(4) 补充和更新了部分例题,每章最后一节改为“本章讨论与小结”,便于

读者学习和总结。

第2版反映了著者近年来开展启发式和研究型教学改革与实践的成果。

全书共分18章,1~13章为基础部分,14~18章为专题部分,可供工科院校不同专业、不同层次教学选用。

本书可作为高等学校工科各专业的理论力学课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书稿由北京航空航天大学王琪教授审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

著者

2009年6月28日

于南京

第 1 版序

(一)

理论力学所涉及的是牛顿力学的主要基本原理及其对宏观离散力学系统的应用。它是经典力学三大分支(固体力学、流体力学和一般力学)中一般力学的组成部分,又称动力学、振动与控制。

理论力学的研究方法是,首先建立研究对象的力学模型和基本概念,然后以反映物体机械运动最基本原理或定律为依据,运用数学演绎方法建立有关定理与方程。此即演绎法。

理论力学课程对理工科的学生既有基础性又具有应用性。

基础性是指理论力学以一般质点系为力学模型,所建立的牛顿力学主要基本原理及由此导出的有关动力学定理与方程具有普遍意义。本课程中,将这些原理及有关定理与方程主要应用于简单刚体系统。上述普遍规律也可以直接应用或经过适当变换应用于其他动力学系统,如固体动力学和流体动力学等。

应用性是指动力学基本规律在工程实际中的广泛应用性。现代科技的发展业已证明,无论是历史较久的土木工程、建筑工程、水利工程、机械工程、船舶工程等,还是后起的航空航天工程、核技术工程、生物医学工程等,都愈来愈多地需要动力学的支持。理论力学讲授的动力学基本概念、理论和方法,成为对现代工程对象进行动力分析的基础以及为读者学习现代工程动力学等后续课程、分析和解决复杂工程中的动力学问题的基础。

总之,理论力学的基础性使之具有很强的理论系统(包括必要的严密数学推导);理论力学的应用性又使课程注重动力学的分析方法,包括受力分析方法、运动分析方法和动力学建模方法。读者对理论力学基本概念的掌握是在分析和研究一些典型的工程实际问题(也包括一定数量的习题)中完成的,而不只是依赖于记住这些概念的定义。

本书分为静力学、运动学和动力学三篇。其中主要内容是动力学篇。这是因为静力学是动力学的特例,运动学除其运动分析的独立意义外,是动力分析的基础。

(二)

本书是教育部《面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划》中“力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目的研究成果之一,也是作者多年来从事力学系列课程教学内容与课程体系改革以及力学科学研究的结晶。力学系列课程是指高等院校有关专业必修的三门相关的力学课程,即理论力学、材料力学和结构力学。

本书内容已在清华大学讲授 2 年,大部分内容还在北方交通大学、上海大学、北京建筑工程学院、石家庄铁道学院等院校中试用。

根据我国面向 21 世纪高等教育改革的要求,理论力学教学内容和课程体系的改革包括以下几方面:

首先根据现代科技的发展,对原有教学内容进行适当的调整,增加了部分新内容。

理论力学所涉及的动力学规律一方面是有较大的相对稳定性;另一方面,现代动力学又以前所未有的方式,将经典动力学规律与计算机分析相结合,解决了仅靠这些规律无法解决的现代工程力学问题。经典动力学各部分内容的重要程度也发生了相应地变化;例如某些动力学方程现在可以应用计算机进行数值仿真。

为此,本书在编写过程中注意将点和刚体的五种运动形式(主要为突出三维运动形式)定义集中在一起,结合工程实例予以叙述;适当加强分析力学,使分析力学与矢量力学并重;在矢量力学中加强动量与能量两个概念、两种方法;以人工参与工作量少和数值处理方便作为选择现代动力学建模方法的标准。

其次突破一门课程的封闭体系,实行相关课程内容贯通。

理论力学与相关课程内容的贯通、融合和渗透,不仅减少了有关课程之间不必要的重复,有利于减少学时数,提高课程的教学效率,而且有利于使学生学会寻找不同事物之间的内在联系,掌握课程的精华,培养学生的创新精神。

书中与相关课程贯通内容主要有:刚体(矢量)静力学与矢量动力学,刚体模型与变形体模型,理论力学与材料力学、结构力学中的虚位移原理和势能原理;静荷载、静内力、静应力与动荷载、动内力、动应力;碰撞与冲击初步知识;理论力学与物理中力学部分(如质点动力学、力矩、动力学普遍定理等);矢量力学与分析力学等。

第三,用现代动力学的观点、方法、语言和实例,改进叙述经典理论力学教学内容。

静力学中,以物体间接触性质和连接方式的理想化叙述约束,将约束作为一种力学模型。在各有关章节突出力学模型的简化。

运动学中,突出变矢量的变化图像及其变化率,即变矢量分析方法。

动力学中,明确提出对现代动力学建模有重要应用意义的三种方法:质点系动量与动量矩定理、达朗贝尔-拉格朗日原理和拉格朗日方程及其变形。

希望能够激发读者的学习兴趣;使读者深入体会力学概念的物理本质,启发和提高思维能力;增大了知识信息量。

第四,注重广泛联系工程实际,从不同的角度提出问题,揭示矛盾,培养读者发现问题、分析问题和解决问题的能力。

为此,书中用富有启发性的工程实例提出基本理论或基本概念问题;在动力学篇中,几乎每章都开设专节,进行定性的工程实例分析;精选例题和习题,特别是反映近代科学技术和工程实际发展,又具有启发性的题目;通过每章最后的“结论与讨论”开设窗口,介绍基本内容的现代发展,加深读者对基本内容的理解。

总之,及时反映与动力学有关的现代科技发展状况,更新理论力学的例题、习题,加强工程实例分析,是本课程内容更新的重要方面。

(三)

在面向21世纪高等教育教学内容和课程体系改革的实践中,改革教学方法和教学手段对于培养学生的创新精神,提高教育质量,也是十分重要的。因此,本书既重视教师在教学活动中的主导作用,又重视学生在学习过程中的主体地位,实行启发式教学,给学生留有充分的思维时间和空间。同时,积极采用多媒体技术,改革陈旧的教学手段。通过这些措施,力求使理论力学课程做到内容新、体系新、方法新、手段新。

为了给学生积极思维创造必要的条件,启发学生有问题可想,有问题可研究,本书采用以下方法:

一是在对典型例题进行分析、计算,得出结果后,一般都安排“小结”部分。在这部分中,或结合工程实际拓展该例题的其他工程应用,或围绕例题的求解过程提出深入的思考问题,引导学生讨论。

二是提倡学生在演算习题,得出结果后,进行讨论。用研究的方法演算习题,这是因为理论力学习题涉及的力学概念强,可研究的余地大。

三是每章最后,设立“结论与讨论”专节,其中编写了一定数量的具有思考性或研究性的内容。这些内容中,既有对前面已讲述过的结论的进一步提炼,也有推理过程中没有详细论及的部分,还有关于已讲授内容的可扩展性和可延伸性问题。

四是改进课外学习方法与训练方法,组织学生撰写学习研究报告,这样,可以引导学生对所学知识加以综合和扩展,学有特点,学有创见,并培养他们撰写

论文和报告的能力。

培养学生的创新精神,关键是要他们养成独立思考、自己研究问题的习惯和勇气。逐步做到在学习中研究,在研究中学习。

书稿承蒙北京理工大学梅凤翔教授和北京航空航天大学王琪教授认真仔细地审阅,提出宝贵意见。

藉本书出版之际,谨向所有关心和支持力学系列课程改革的人们,致以谢忱。

著者

1999 年教师节

于清华大学

主要符号表

| 符号 | 量的名称 |
|------------------|------------------------|
| a | 加速度 |
| a_a | 绝对加速度 |
| a_e | 牵连加速度 |
| a_r | 相对加速度 |
| a_C | 科里奥利加速度(科氏加速度) |
| a_t | 切向加速度 |
| a_n | 法向加速度 |
| a_{BA}^t | 点 B 相对于基点 A 的切向加速度 |
| a_{BA}^n | 点 B 相对于基点 A 的法向加速度 |
| A | 面积 |
| c | 粘阻系数 |
| C | 质心,重心 |
| d | 力偶臂,直径,距离 |
| e | 恢复因数,偏心距 |
| E | 机械能 |
| f | 频率,动摩擦因数 |
| f_s | 静摩擦因数 |
| F | 力 |
| F_N | 法向约束力 |
| F_R | 合力 |
| F'_R | 主矢 |
| F_{Ax}, F_{Ay} | A 处的约束力分量 |
| F_I | 达朗贝尔惯性力(惯性力) |
| F_{Ie} | 牵连惯性力 |

| | |
|---------------------------------|-------------------------|
| F_{IC} | 科里奥利力(科氏力) |
| g | 重力加速度 |
| I | 冲量 |
| I_x, I_y, I_z | 冲量在 x, y, z 轴上的投影 |
| J | 转动惯量 |
| k | 弹簧刚度系数 |
| L_O | 质点系对点 O 的动量矩 |
| L_x, L_y, L_z | 质点系对 x, y, z 轴的动量矩 |
| m | 质量 |
| m_{eq} | 等效质量 |
| M_O | 力系对点 O 的主矩 |
| $M_O(F)$ | 力 F 对点 O 之矩 |
| M | 力偶矩 |
| M_x, M_y, M_z | 力系对 x, y, z 轴的主矩 |
| M_f | 滚动阻力偶 |
| n | 转速 |
| p | 动量 |
| q | 分布载荷 |
| q_1, q_2, \dots, q_n | 广义坐标 |
| $F_{Q1}, F_{Q2}, \dots, F_{Qn}$ | 广义主动力 |
| R, r | 半径 |
| r | 位置矢量(位矢) |
| s | 路程, 弧长, 弧坐标 |
| t | 时间 |
| T | 周期, 动能 |
| T_d | 衰减振动周期 |
| v | 速度 |
| v_a, v_e, v_r | 绝对速度, 牵连速度, 相对速度 |
| v_{BA} | 平面图形上点 B 相对基点 A 的速度 |
| V | 势能, 体积 |
| W | 功, 重量 |
| α | 角加速度 |
| δ | 滚动阻碍系数 |
| ρ | 曲率半径, 回转半径, 密度 |

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| ξ | 阻尼比 |
| λ | 频率比 |
| ω | 角速度,角频率 |
| ω_0 | 固有频率 |
| $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ | 角速度沿 x, y, z 轴的分量 |

目 录

| | |
|----------|---|
| 绪论 | 1 |
|----------|---|

基础部分

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 静力学概念与物体受力分析 | 8 |
| § 1-1 静力学模型概述 | 8 |
| § 1-2 静力学公理 | 11 |
| § 1-3 工程常见约束与约束力 | 13 |
| § 1-4 受力分析初步 | 18 |
| § 1-5 本章讨论与小结 | 21 |
| 习题 | 23 |
| 第 2 章 力系的等效与简化 | 27 |
| § 2-1 力矩概念的扩展和延伸 | 27 |
| § 2-2 等效力系定理 | 30 |
| § 2-3 力偶及其性质 | 32 |
| § 2-4 力系的简化 | 37 |
| § 2-5 本章讨论与小结 | 40 |
| 习题 | 44 |
| 第 3 章 力系的平衡 | 51 |
| § 3-1 力系的平衡条件 | 51 |
| § 3-2 一般力系的平衡方程 | 51 |
| § 3-3 单个刚体的平衡问题 | 54 |
| § 3-4 简单多刚体系统的平衡问题 | 56 |
| § 3-5 承受空间力系的刚体平衡问题 | 60 |
| § 3-6 超静定平衡问题 | 62 |

| | | |
|------------|-----------------------------|-----|
| | § 3-7 本章讨论与小结 | 64 |
| | 习题 | 70 |
| 第4章 | 桁架静力分析与摩擦平衡问题 | 80 |
| | § 4-1 平面静定桁架的静力分析 | 80 |
| | § 4-2 考虑摩擦的平衡问题 | 85 |
| | § 4-3 本章讨论与小结 | 103 |
| | 习题 | 107 |
| 第5章 | 点的一般运动与刚体的基本运动 | 116 |
| | § 5-1 点的一般运动 | 116 |
| | § 5-2 刚体的基本运动 | 128 |
| | § 5-3 本章讨论与小结 | 134 |
| | 习题 | 136 |
| 第6章 | 点的复合运动 | 140 |
| | § 6-1 绝对运动、相对运动与牵连运动 | 140 |
| | § 6-2 绝对运动方程与相对运动方程 | 142 |
| | § 6-3 速度合成定理 | 144 |
| | § 6-4 加速度合成定理 | 148 |
| | § 6-5 本章讨论与小结 | 159 |
| | 习题 | 162 |
| 第7章 | 刚体平面运动 | 168 |
| | § 7-1 刚体平面运动方程 | 168 |
| | § 7-2 平面运动分解为平移和转动 | 171 |
| | § 7-3 平面图形上各点的速度分析 | 174 |
| | § 7-4 平面图形上各点的加速度分析 | 180 |
| | § 7-5 平面运动分解为转动和转动 | 185 |
| | § 7-6 本章讨论与小结 | 188 |
| | 习题 | 190 |
| 第8章 | 质点动力学 | 196 |
| | § 8-1 质点在惯性参考系中的动力学 | 196 |
| | § 8-2 质点在非惯性参考系中的动力学 | 202 |
| | § 8-3 本章讨论与小结 | 209 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 习题 | 213 |
| 第 9 章 质点系动量定理 | 217 |
| § 9-1 动量定理与质心运动定理 | 217 |
| § 9-2 动量定理应用于简单刚体系统 | 220 |
| § 9-3 动量定理应用于开放质点系:定常质量流 | 225 |
| § 9-4 本章讨论与小结 | 229 |
| 习题 | 233 |
| 第 10 章 质点系动量矩定理 | 238 |
| § 10-1 质点系对定点的动量矩定理 | 238 |
| § 10-2 刚体定轴转动微分方程 | 241 |
| § 10-3 质点系对质心的动量矩定理 | 245 |
| § 10-4 刚体平面运动微分方程 | 247 |
| § 10-5 本章讨论与小结 | 252 |
| 习题 | 259 |
| 第 11 章 质点系动能定理 | 265 |
| § 11-1 动量与能量 | 265 |
| § 11-2 力的功 | 266 |
| § 11-3 质点系的动能与刚体的动能 | 271 |
| § 11-4 质点系动能定理与机械能守恒 | 276 |
| § 11-5 动力学普遍定理综合应用 | 281 |
| § 11-6 本章讨论与小结 | 286 |
| 习题 | 289 |
| 第 12 章 达朗贝尔原理 | 296 |
| § 12-1 质点的达朗贝尔原理 | 296 |
| § 12-2 质点系的达朗贝尔原理 | 298 |
| § 12-3 刚体惯性力系的简化 | 299 |
| § 12-4 本章讨论与小结 | 309 |
| 习题 | 313 |
| 第 13 章 分析静力学 | 318 |
| § 13-1 刚体静力学与分析静力学比较 | 318 |
| § 13-2 分析力学的基本概念 | 320 |

| | |
|----------------------------|-----|
| § 13-3 虚位移原理 | 326 |
| § 13-4 势能驻值定理与最小势能原理 | 332 |
| § 13-5 本章讨论与小结 | 335 |
| 习题 | 338 |

专题部分

| | | |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| 第 14 章 | 刚体定点转动与刚体一般运动 | 348 |
| | § 14-1 刚体定点转动力学模型的再简化 | 348 |
| | § 14-2 用欧拉角描述刚体定点转动 | 349 |
| | § 14-3 达朗贝尔-欧拉位移定理 转动瞬轴与瞬时角速度 | 350 |
| | § 14-4 刚体绕相交轴转动的角速度合成定理 | 352 |
| | § 14-5 刚体一般运动 | 355 |
| | § 14-6 本章讨论与小结 | 356 |
| | 习题 | 358 |
| 第 15 章 | 分析动力学基础 | 360 |
| | § 15-1 引言 | 360 |
| | § 15-2 动力学普遍方程 | 362 |
| | § 15-3 拉格朗日第一类方程 | 365 |
| | § 15-4 拉格朗日第二类方程 | 367 |
| | § 15-5 本章讨论与小结 | 377 |
| | 习题 | 380 |
| 第 16 章 | 碰撞问题 | 385 |
| | § 16-1 碰撞的力学特征与模型 | 385 |
| | § 16-2 动力学普遍定理在碰撞问题中的应用 恢复因数 | 387 |
| | § 16-3 两球的斜碰撞 | 395 |
| | § 16-4 刚体碰撞中的突加约束问题与撞击中心 | 397 |
| | § 16-5 本章讨论与小结 | 401 |
| | 习题 | 403 |
| 第 17 章 | 离散系统的振动 | 407 |
| | § 17-1 振动的概念与振动微分方程 | 407 |
| | § 17-2 单自由度线性系统的自由振动 | 412 |
| | § 17-3 单自由度线性系统的受迫振动 | 419 |
| | § 17-4 本章讨论与小结 | 427 |

| | |
|--|------------|
| 习题 | 431 |
| 第 18 章 运动学和动力学计算机辅助分析 | 437 |
| § 18-1 瞬时分析与过程分析 | 437 |
| § 18-2 单个刚体的加速度分析通用子模型 | 438 |
| § 18-3 两个相互约束刚体的加速度分析通用子模型 | 442 |
| § 18-4 基于 MATLAB/Simulink 的运动学过程分析示例 | 448 |
| § 18-5 单个刚体的动力学分析通用子模型 | 453 |
| § 18-6 两个相互约束刚体的动力学分析通用子模型 | 459 |
| § 18-7 基于 MATLAB/Simulink 的动力学过程分析示例 | 472 |
| § 18-8 本章讨论与小结 | 476 |
| 习题 | 478 |
| 附录 A MATLAB/Simulink 应用基础 | 480 |
| 附录 B 习题答案 | 489 |
| 参考文献 | 504 |
| 主编简介 | 506 |