



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

理 论 力 学

范钦珊 主编

范钦珊 薛克宗 程保荣 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

00116550

理论力学

范钦珊 主编

范钦珊 薛克宗 程保荣 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/范钦珊主编;范钦珊等编著. —北京:高等教育出版社,2000.2

ISBN 7-04-007992-5

I.理… II.①范…②范… III.理论力学-高等学校-教材 IV.031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 64388 号

理论力学

范钦珊 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

排 版 高等教育出版社照排中心

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 2000年2月第1版

印 张 31.75

印 次 2000年2月第1次印刷

字 数 570 000

定 价 32.90 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

内 容 提 要

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,是教育部面向 21 世纪课程教材和教育部工科力学“九五”规划教材。本书与同类教材相比,具有以下特色:注意与相关课程的贯通、融合与渗透,减少了不必要的相互重叠的内容;对经典内容加以精选,使之更加简练,并富有新意;在保证基础的前提下,引进了一些反映近代科技成果的新内容;广泛涉及诸多工程概念,重组课程体系;注意启发式教学,为学生独立思维留出较大的空间。

全书共 19 章,前 4 章为静力学篇,5~9 章为运动学篇,10~19 章为动力学篇,可供工科院校不同专业、不同层次教学选用。

本书可作高等学校工科各类专业教材。

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_τ	切向加速度
a_n	法向加速度
a_{BA}^τ	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_r	径向加速度
a_φ	横向加速度
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,弹性模量
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	主矢,合力
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_{le}	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	功率
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
ΔE	能量损失
v	速度
v_a, v_e, v_r	绝对速度, 牵连速度, 相对速度
v_r, v_φ	径向速度, 横向速度
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
ζ	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

说明:在实施国家标准(GB3100~3102—93)《量和单位》的过程中,为保证国家标准和现有惯例的衔接,本书作了认真的考虑。例如:

1. 国家标准规范的物理量的名称和符号,按国家标准使用,注重量的物理属性。如各种力、活载荷、反力和内力,都用 F 作为主符号,而将其特性以下标(或上标)表示,等等。

2. 对于量的数学运算,为使书写简单和习惯保持一致,在不致引起混淆的情况下,经征得国家技术监督局同意,采用如下处理方法:运算的中间步骤,在所有量的单位均采用基本单位表示情形下,省略单位符号,而只在运算的最后结果标明量的单位(需要时再给出其倍数单位)。

3. 书中凡重点内容或第一次出现的名词与术语,均用黑体;要点用楷体;一般用宋体。



主 编 简 介

范钦珊 清华大学工程力学系教授,博士生导师。历任清华大学固体力学教研组副主任、材料力学教研组主任、系学术委员会委员、校专业技术职称评审委员会委员、校教学委员会委员;现任教育部工科力学课程教学指导委员会副主任,教育部工科基础力学课程教学指导组组长;国家面向 21 世纪力学系列课程教学内容和体系改革项目总负责人。长期从事“非线性屈曲理论与应用”、“反应堆结构力学”、“结构疲劳寿命”、“电力系统导线振动与舞动”、“高压输电线路铁塔优化设计”等方面研究。同时从事“材料力学”、“工程力学”、“反应堆结构力学基础”、“板壳应力与设计”、“弹性稳定理论”等本科生和研究生课程的教学工作以及计算机辅助教学软件的研制与开发工作。

出版教材专著与译著 15 部共约 500 余万字,在国内外发表各类学术论文 60 余篇。

1979 年获全国优秀科技图书奖,1989 年获国家级优秀教学成果奖,1995 年、1996 年获电力部、核工业部科技进步奖,1993 年获北京市优秀教学成果奖,1993、1997 年两次获国家教委优秀教材奖。

目 录

静力学篇

第 1 章	引 论	4
§ 1-1	静力学模型概述	4
1-1-1	力的两种效应	4
1-1-2	物体的抽象与理想化——刚体	4
1-1-3	受力的抽象与理想化——集中力与分布力	5
1-1-4	接触与连接方式的抽象与理想化——约束	6
1-1-5	物体受力分类	6
§ 1-2	工程常见约束与约束力	7
1-2-1	柔性约束	7
1-2-2	刚性约束	7
§ 1-3	受力分析初步	11
1-3-1	受力图	11
1-3-2	基本平衡原理及其应用	12
§ 1-4	结论与讨论	15
1-4-1	关于平衡原理	15
1-4-2	关于二力构件	15
1-4-3	静力学原理的适用性	16
1-4-4	关于约束	17
1-4-5	受力分析方法与过程	17
习题		18
第 2 章	力系的等效与简化	24
§ 2-1	力矩概念的扩展和延伸	24
2-1-1	力对点之矩及其矢量表示	24
2-1-2	力对轴之矩	25
2-1-3	合力之矩定理	26

§ 2-2 等效力系定理	27
2-2-1 物理学中的结论	27
2-2-2 力系运动效应的特征量——力系的主矢与主矩	28
2-2-3 等效力系定理	29
§ 2-3 力偶及其性质	30
2-3-1 力偶的定义	30
2-3-2 力偶的基本性质	31
2-3-3 推论	32
2-3-4 力偶系及其合成	32
2-3-5 力偶系的平衡条件	33
§ 2-4 力系的简化	35
2-4-1 力向一点平移定理	35
2-4-2 一般力系的简化	36
2-4-3 力系简化在固定端约束力分析中的应用	37
§ 2-5 结论与讨论	39
2-5-1 关于力矢、主矢、力矩矢、力偶矩矢以及主矩的 矢量性质	39
2-5-2 关于合力之矩定理及其应用	39
2-5-3 关于力系简化的最后结果	39
2-5-4 关于实际约束与简化模型	40
2-5-5 关于力偶性质推论的适用性	41
习题	41

第3章 力系的平衡	47
§ 3-1 力系的平衡条件	47
§ 3-2 一般力系的平衡方程	47
3-2-1 平衡方程的一般形式	47
3-2-2 平面一般力系的平衡方程	48
3-2-3 平面力系平衡方程的其他形式	48
§ 3-3 单个刚体的平衡问题	49
§ 3-4 简单多刚体系统的平衡问题	52
§ 3-5 承受空间力系的刚体平衡问题	56
§ 3-6 超静定平衡问题	57
3-6-1 刚体自由度的概念	58
3-6-2 刚体的三种约束状态	58
3-6-3 超静定次数	59
§ 3-7 结论与讨论	59
3-7-1 受力分析的重要性	59

3-7-2 关于简单多刚体系统平衡问题的讨论	60
3-7-3 关于特殊力系的平衡问题	61
3-7-4 几种空间约束的约束力	62
3-7-5 正确的直观判断	62
3-7-6 关于完全约束与不完全约束的讨论	63
3-7-7 关于自由度	64
3-7-8 求解超静定问题的方法简述	65
习题	65

第4章 摩擦平衡问题	72
§4-1 摩擦的基本概念	72
4-1-1 摩擦与摩擦类型	72
4-1-2 滑动摩擦力 库伦定律	73
4-1-3 摩擦角与自锁现象	74
§4-2 摩擦平衡问题	77
4-2-1 工程中常见的几类摩擦平衡问题	77
4-2-2 求解摩擦平衡问题的基本方法	77
§4-3 应用实例	78
§4-4 螺旋器械与楔块自锁条件	85
4-4-1 螺旋器械的自锁条件	85
4-4-2 楔块与尖劈的自锁条件	86
§4-5 滚动阻碍概述	87
4-5-1 绝对刚性约束模型的局限性	87
4-5-2 考虑接触变形的柔性约束模型	88
4-5-3 滚动阻碍	88
4-5-4 滑动摩擦力在滚动运动中的作用	89
§4-6 结论与讨论	91
4-6-1 摩擦平衡问题的特点	91
4-6-2 摩擦平衡参数取值范围的确定	91
4-6-3 自锁与不自锁	92
4-6-4 分析摩擦平衡问题要点	92
4-6-5 自我命题研究	93
习题	94

运动学篇

第5章 引论	101
---------------------	------------

§ 5-1 运动学的任务	101
§ 5-2 运动学与工程运动分析	102
§ 5-3 运动学的模型及其运动形式	103
5-3-1 运动学的模型:点与刚体	103
5-3-2 点的运动形式	104
5-3-3 刚体的运动形式	104
§ 5-4 变矢量对时间的导数与动参考系	108
§ 5-5 结论与讨论	110
5-5-1 本课程中的运动学与物理学中运动学的比较	110
5-5-2 矢量导数 $\left(\frac{d\mathbf{A}}{dt}\right)_B$ 与标量导数(如, $y=f(x)$, $y' = \frac{dy}{dx}$)的重要区别	110
5-5-3 本课程所研究的刚体运动学,对变形体的 运动学描述有一定意义	110
习题	111

第 6 章 点的一般运动与刚体的简单运动	113
§ 6-1 描述点运动的变矢量法	113
6-1-1 点的运动方程、速度与加速度	113
6-1-2 速度端图	115
6-1-3 变矢量对时间导数的几何解释	116
§ 6-2 描述点运动的直角坐标法	116
6-2-1 运动方程	116
6-2-2 速度	117
6-2-3 加速度	117
§ 6-3 描述点运动的弧坐标法	120
6-3-1 运动方程	120
6-3-2 密切面与自然轴系	120
6-3-3 速度	122
6-3-4 切向加速度与法向加速度	123
§ 6-4 刚体的简单运动——平移与定轴转动	127
6-4-1 平移	127
6-4-2 定轴转动	128
§ 6-5 结论与讨论	131
6-5-1 建立点的运动方程与研究点的运动几何性质	131
6-5-2 描述点的一般运动的三种方法及其比较	131
6-5-3 运动学与静力学中的矢量运算比较;矢量导数与 标量导数运算比较	132

6-5-4 点的运动学的两类应用问题	132
6-5-5 极坐标形式的运动学方程	132
习题	133
第 7 章 点的复合运动	137
§ 7-1 绝对运动、相对运动与牵连运动	137
§ 7-2 绝对运动方程与相对运动方程关系式	138
7-2-1 变矢量法	138
7-2-2 直角坐标法	139
§ 7-3 速度合成定理	141
§ 7-4 加速度合成定理	144
7-4-1 绝对加速度、相对加速度与牵连加速度	144
7-4-2 一个反例	144
7-4-3 特例的几何法证明·科氏加速度	145
7-4-4 解析法证明的数学基础:矢量的绝对导数与相对 导数	148
7-4-5 解析法证明	152
§ 7-5 结论与讨论	156
7-5-1 与物理学研究点的复合运动的区别	156
7-5-2 牵连运动与牵连速度的概念	157
7-5-3 正确选择动点和动系,是应用点的复合运动理论的 重要步骤	157
7-5-4 科氏加速度概念与正确应用加速度合成定理的 投影式	158
习题	159
第 8 章 刚体平面运动	163
§ 8-1 刚体平面运动方程	163
8-1-1 刚体平面运动力学模型的再简化	163
8-1-2 刚体平面运动的自由度、广义坐标和运动方程	164
§ 8-2 平面运动分解为平移和转动 平面运动的角速度概念	166
§ 8-3 平面图形上各点的速度分析 瞬时速度中心概念	168
8-3-1 基点法	168
8-3-2 速度投影定理法	171
8-3-3 瞬时速度中心法	172
§ 8-4 平面图形上各点的加速度分析	175
§ 8-5 平面运动分解为转动和转动 平面运动的角速度 合成定理	180