



国家级精品课程主干教材
普通高等教育“十一五”规划教材

理论力学

王永岩 主编



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书按教育部高等学校工科理论力学课程教学基本要求(多学时)和各高校中学时实际执行教学大纲综合编写。编写中收集了全国各院校多年来理论力学教学改革的共识,适当提高了理论讲述起点,精简了学时,加强了基本概念、基本理论和基本方法的讲述。在讲述中采用了由浅入深、由简单到复杂、由特殊到一般、由质点到质点系、由矢量到代数量循序渐进的次序。选编了有关“理论力学试题库”中部分优秀试题作为本书的习题和思考题,各章后均设有本章小结,习题附有答案,方便学生自学、归纳、总结和复习。

本书可作为力学、机械、土建、交通、材料、化工、水利、采矿、冶金等各专业中学时本科生教材或教学参考书,也可供相关专业及有关工程技术人员参考。

本书配套有“理论力学电子教程”(教师多媒体电子教案)光盘。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/王永岩主编. —北京:科学出版社, 2007
(国家级精品课程主干教材,普通高等教育“十一五”规划教材)
ISBN 978-7-03-019259-2

I. 理… II. 王… 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(2007)第 124432 号

责任编辑:段博原 毛 莹 潘继敏 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 8 月第一次印刷 印张: 34

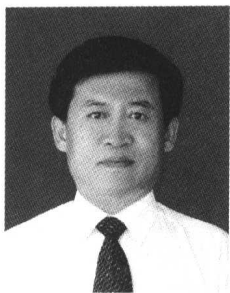
印数: 1—5 000

字数: 652 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

作者简介



王永岩 男,1956年12月生,博士、教授、博士生导师、国家级教学名师。1982年于辽宁工程技术大学本科毕业并获力学、矿建双学士学位,1983~1985年在东北大学攻读硕士,1998~2001年在辽宁工程技术大学攻读博士,并获“辽宁省优秀博士论文奖”和“国家优秀博士论文提名奖”,1995年破格晋升为教授,2001年被聘为博士生导师。主要研究方向:计算力学结构仿真及预测,岩石力学与矿压控制,机械振动及控制,虚拟工程。主讲《理论力学》国家级精品课程等20余门,已培养30余名博士、硕士研究生,主编出版《动态子结构方法及其应用》、《理论力学》、《材料力学》、《工程力学》、《结构力学》、《有限元》、《振动力学》、《弹性力学》、《流体力学》等力学系列教材、专著、课堂教学软件和英汉双语电子教程25部,共1000多万字。在国内外核心刊物上发表论文70余篇。主持国家自然科学基金和教育部教改项目等20余项,有23项教学成果在全国27个省、市232所大专院校和国外两所大学使用,受到好评。主持的项目获国家教学成果二等奖1项,省教学成果一等奖3项,省教学成果二等奖2项,省科技进步二等奖2项,市科技进步一等奖1项,国家级行业二、三等奖3项。先后被评为省突出贡献专家,省科技工作者,省优秀教师、省五一奖章和市十大杰出青年、市青年科技先锋、市专业技术拔尖人才和市特等劳模等荣誉称号,获国务院政府特贴,2003年被评为首届“国家级教学名师”。

前 言

本书参照教育部高等学校工科理论力学课程教学基本要求(多学时)和全国各高校中长学时实际执行教学大纲综合编写。本书可作为工科高等院校机械、土建、交通、材料、冶金、化工、采矿等专业 70~100 中长学时本科生教材,也可供相关工程师、科研人员、研究生,以及专科学校、函授、电大相应专业人员学习或参考。

考虑到当前理论力学教学改革及今后发展的需要,我们将多年来全国各院校理论力学教学改革的共识编入此书。本书具有以下几个特点:

1. 本书适当提高了理论力学教学的起点,合并和缩减了部分章节中的一些不必要的重复内容,同时考虑到本课程的系统性为了方便学生学习和复习,有些内容则精简得当地编入了本书。本书在平面特殊力系、点的运动学和质点动力学、动量定理等部分内容与传统教学内容相比都做了较大精简和改动。在讲述中,采用了由浅入深、由简单到复杂、由特殊到一般、由质点到质点系、由矢量到代数量循序渐进的次序,便于学生理解和掌握。

2. 加强了基本概念、基本理论和基本方法的讲述。对一些重要概念和定理的讲述提高了要求。对于平面一般力系、点的合成运动、刚体平面运动及动力学普遍定理和达朗贝尔原理等重点内容均作了重点讲述。为提高学生对基本概念的理解和提高分析问题及解决问题的能力,在例题讲述中着重阐述了分析问题的思路和方法及步骤,并注意在重点章节配置一些一题多种解法等有助于开发学生思维能力的例题。

3. 在本书的习题和思考题中,除一些基本的习题外,重点选编了“理论力学试题库”和中外习题集中的部分优秀、新颖、适中的习题和思考题。为加强学生对基本概念、基本理论和基本方法的理解,本书适当地提高了思考题选编的比例。为方便学生自学、归纳、总结和复习,各章后均设有本章小结,习题附有答案。

参加本书编写的人员有:王永岩(绪论、第 7~18 章)、朱月明(第 1 章)、苏荣华(第 2 章)、张永利(第 3、4 章)、宋维元(第 5、6 章)、李吉(第 19 章),最后由王永岩统稿、修改和定稿,并将“理论力学试题库”中的部分优秀试题选编入各章后习题和思考题中。

本书由国家级教学名师、北京理工大学梅凤翔教授详细审阅,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

本书配有“理论力学电子教程”(教师多媒体电子教案)光盘一张(王永岩、苏荣华),该光盘已由科学出版社出版,欢迎广大师生选用,联系邮件: gk@mail. sciencep. com.

编 者

2007 年 3 月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第 1 篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析	7
1.1 静力学的基本概念	7
1.2 静力学公理	8
1.3 约束与约束反力	11
1.4 物体的受力分析与受力图	15
本章小结	18
思考题	18
习题	20
第 2 章 平面特殊力系	23
2.1 平面汇交力系合成和平衡的几何法	23
2.2 平面汇交力系合成和平衡的解析法	27
2.3 力对点的矩与合力矩定理	32
2.4 平面力偶理论	35
2.5 平面平行力系的合成与平衡	41
本章小结	45
思考题	47
习题	49
第 3 章 平面一般力系	55
3.1 力线平移定理	56
3.2 平面一般力系向一点的简化	57
3.3 平面一般力系的简化结果与合力矩定理	59
3.4 平面一般力系的平衡条件与平衡方程	62
3.5 物体系统的平衡	67
3.6 静定与静不定问题的概念	74
3.7 平面简单桁架的内力分析	75
本章小结	79

思考题	80
习题	83
第4章 摩擦	90
4.1 滑动摩擦	90
4.2 摩擦角和自锁	92
4.3 考虑摩擦时的平衡问题	94
4.4 滚动摩擦阻的概念	98
本章小结	101
思考题	102
习题	103
第5章 空间力系	108
5.1 空间汇交力系	108
5.2 空间力偶系	111
5.3 力对点的矩与力对轴的矩	114
5.4 空间一般力系向一点的简化	118
5.5 空间一般力系简化结果的讨论	120
5.6 空间一般力系的平衡方程及应用	121
5.7 平行力系的中心和物体的重心	128
本章小结	134
思考题	136
习题	137

第2篇 运 动 学

第6章 点的运动学	147
6.1 点的运动矢量分析方法	147
6.2 点的运动的直角坐标法	149
6.3 点的运动的自然坐标法	154
本章小结	160
思考题	161
习题	162
第7章 刚体的基本运动	166
7.1 刚体的平行移动	166
7.2 刚体的定轴转动	168
7.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	169
7.4 绕定轴转动刚体的传动问题	172

7.5 角速度和角加速度的矢量表示与点的速度和加速度的矢积表示	175
本章小结	176
思考题	178
习题	179
第8章 点的合成运动	183
8.1 点的合成运动的概念	183
8.2 点的速度合成定理	185
8.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	189
8.4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	193
本章小结	198
思考题	199
习题	200
第9章 刚体的平面运动	206
9.1 刚体平面运动的概述	206
9.2 平面运动的分解与刚体的平面运动方程	207
9.3 平面图形内各点的速度	208
9.4 平面图形内各点的加速度	218
本章小结	225
思考题	226
习题	228
第10章 刚体的一般运动	236
10.1 刚体的合成运动	236
*10.2 刚体的定点运动	245
*10.3 刚体的一般运动	250
本章小结	254
思考题	255
习题	257

第3篇 动 力 学

第11章 质点运动微分方程	263
11.1 质点运动微分方程形式	263
11.2 质点动力学两类问题	264
本章小结	275
思考题	275

习题	276
第 12 章 动量定理	279
12.1 质点系的质心与内力和外力	279
12.2 动量与冲量	281
12.3 动量定理	284
12.4 质心运动定理	289
本章小结	294
思考题	295
习题	296
第 13 章 动量矩定理	301
13.1 刚体对轴的转动惯量	301
13.2 质点和质点系的动量矩	307
13.3 动量矩定理	310
13.4 刚体定轴转动微分方程	314
13.5 质点系相对于质心的动量矩定理与刚体平面运动微分方程	317
本章小结	322
思考题	324
习题	325
第 14 章 动能定理	330
14.1 力的功与功率	330
14.2 动能	340
14.3 动能定理	342
14.4 势能与机械能守恒定律	350
14.5 动力学普遍定理及其综合应用	356
本章小结	362
思考题	364
习题	366
第 15 章 达朗贝尔原理	374
15.1 惯性力与质点的达朗贝尔原理	374
15.2 质点系的达朗贝尔原理	378
15.3 刚体惯性力系的简化	380
15.4 定轴转动刚体的轴承动反力	387
本章小结	391
思考题	392

习题	394
第 16 章 虚位移原理	400
16.1 约束及其分类	400
16.2 虚位移和虚功	403
16.3 广义坐标与自由度	405
16.4 理想约束	408
16.5 虚位移原理	410
16.6 广义力及广义坐标下的质点系的平衡条件	417
本章小结	423
思考题	424
习题	424
第 17 章 拉格朗日方程	428
17.1 动力学普遍方程	428
17.2 拉格朗日第二类方程	430
17.3 拉格朗日第二类方程的积分	438
本章小结	442
思考题	443
习题	444
第 18 章 机械振动基础	448
18.1 单自由度系统无阻尼自由振动	448
18.2 求系统固有频率的方法	458
18.3 单自由度系统的有阻尼自由振动	462
18.4 单自由度系统的无阻尼强迫振动	468
18.5 单自由度系统的有阻尼强迫振动	474
18.6 临界转速与隔振	478
*18.7 两个自由度系统无阻尼自由振动	484
*18.8 两个自由度系统无阻尼强迫振动	491
本章小结	495
思考题	497
习题	498
第 19 章 碰撞	505
19.1 碰撞现象及其基本特征与碰撞力	505
19.2 用于碰撞过程的基本定理	506
19.3 质点对固定面的碰撞与恢复系数	507

19.4 两物体的对心正碰撞与动能损失·····	509
19.5 碰撞冲量对绕定轴转动刚体的作用与撞击中心·····	512
本章小结·····	515
思考题·····	516
习题·····	516
参考文献·····	519
习题答案·····	520

绪 论

1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门科学。

所谓**机械运动**,就是物体在空间的相对位置随时间的变化。它是宇宙间一切物质运动的最简单形式。例如,机器的运转、车辆的行驶、人造卫星的飞行、建筑物的振动等,都是机械运动。除机械运动外,物质还有发光、发热、发生电磁现象、化学过程以及人的思维活动等各种不同形式的运动。这些运动比较复杂,但总是与机械运动存在着或多或少的联系,而且它们在一定条件下可以相互转化。

物体的机械运动存在着一般规律,这些一般规律就是理论力学的研究对象。

理论力学的研究内容是以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础的,属于古典力学的范畴。而古典力学则是研究速度远小于光速的宏观物体的运动规律。因此,古典力学的应用范围是有局限性的。但是,古典力学仍然具有很强的生命力。除了大量的工程技术问题,还包括一些尖端科学技术问题,所研究的也有许多是宏观物体,它们运动的速度也远小于光速,有关它们的力学问题应用古典力学研究,不仅方便,而且能有足够的精度,所以古典力学至今仍有很大的实用价值,并且还在不断地发展。

理论力学的内容共分为以下三个部分:

静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律,同时也研究力的一般性质及力系的简化方法等;

运动学——研究物体机械运动的几何性质,而不研究引起物体运动的原因;

动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。

2. 理论力学的学习目的及研究方法

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。它是工程结构、机械设备、控制与自动化、航空航天技术等的重要理论基础,工程技术人员只有掌握一定的理论力学知识,才能为解决工程实际问题打下一定的基础。

理论力学所研究的是力学中最普遍、最基本的规律。它是很多工科专业课程,例如材料力学、机械原理、机械零件、结构力学、弹性力学、流体力学、机械振动等一系列后续课程的重要基础。

此外,学习理论力学也有助于学习和掌握新的科学技术,有助于建立辩证唯物

主义的世界观,培养正确的分析问题和解决问题的能力,为以后解决生产实际问题、从事科学研究工作打下基础。

理论力学的研究方法应遵循人类认识过程的客观规律,即从观察、实践和科学实验出发,经过分析、抽象、归纳和总结,建立力学的最基本的概念和规律,从而建立力学模型,并利用数学工具推导演绎,得出正确的结论和定理,从而将实践中大量的感性认识上升为理性认识,形成力学理论。然后再回到实践中去验证该理论的正确性,并指导实践。

从实践到理论,再由理论回到实践,如此循环往复,每一次循环都使原来的理论有进一步的提高和完善,理论力学就是沿着这条道路不断向前发展的。

3. 理论力学发展简史

一切科学的发展过程都与社会生产的发展紧密联系,力学的发展充分证实了这一点。力学是最早形成并获得发展的科学之一。远古人类通过劳动积累经验创造了一些简单工具,并不断改进,从经验中获得知识,形成了人们认识力学规律的最初起点。人类开始研究力学理论大约可追溯到 2400 多年以前,在叙述我国古代伟大学者墨翟(公元前 468~前 382)学说的《墨经》中,有一部分涉及力的概念和杠杆平衡原理的初步认识。古希腊自然科学家阿基米德(公元前 287—前 212)在他的著作《论比重》中,总结了古代积累起来的静力学知识,建立了有关杠杆平衡、重心、液体中浮体的平衡等理论,奠定了静力学的基础。

但是,从阿基米德以后直到公元 14 世纪的漫长时期中,由于封建和神权的长期统治,生产力停滞不前,力学及其他科学也得不到发展。直到 15 世纪后期进入了文艺复兴时期,由于商业资本的兴起,生产发展很快,手工业、航海、建筑及军事技术等方面提出的问题,推动了力学和其他科学迅速发展。意大利著名艺术家、物理学家列奥纳多·达·芬奇(1452~1519)研究了物体沿斜面运动和滑动摩擦的问题,并在研究平衡问题时引出了力矩的概念。波兰科学家尼古拉·哥白尼(1473~1543)创立了宇宙的太阳中心学说,引起科学界宇宙观的革命。在这个基础上,德国学者约翰·开普勒(1571~1630)提出了行星运动三定律,为牛顿发现万有引力定律打下了基础。意大利著名科学家伽利略(1564~1642)通过实验手段确定了自由落体运动规律,并明确提出了惯性定律及加速度的概念。

由伽利略开始建立动力学基本定律,经法国学者笛卡儿(1596~1650)、荷兰学者惠更斯(1629~1695)等的努力,后来由英国伟大科学家牛顿(1643~1727)总其大成。牛顿在 1687 年出版的名著《自然哲学的数学原理》一书中提出动力学的三个基本定律,并且从这些定律出发将动力学作了系统的叙述。此外,他还发现万有引力定律,推动了天体力学的发展。

在力学史上,17 世纪是动力学基础建立时期,18、19 世纪是其发展成熟时期,

这段时期,一方面是西方工业革命后生产水平的迅速提高为力学的发展提出了许多新的问题,同时数学的发展也为力学朝分析方向发展提供了有利的条件,使得力学向着更严谨、更完整的学科体系发展。瑞士数学家约翰·伯努利(1667~1748)首先提出了虚位移原理,瑞士数学力学家列奥纳多·欧拉(1707~1783)在他的名著《力学》中给出了用微分方程表示的分析方法来解决质点运动问题。法国科学家达朗贝尔(1717~1785)在他的著作《动力学专论》中给出了一个解决动力学问题的普遍原理即达朗贝尔原理,从而奠定了非自由质点系动力学的基础。力学在分析方向的最大进展是法国数学、力学家拉格朗日(1736~1813)在他的巨著《分析力学》里,把虚位移原理与达朗贝尔原理结合起来,导出了非自由质点系的运动微分方程,即著名的第二类拉格朗日方程。拉格朗日也是天体力学的奠基人之一,天体力学的很大一部分奠基工作是由他和同时代的学者拉普拉斯(1749~1827)共同完成的。

19 世纪初到 19 世纪中叶,由于机器的大量使用,功和能的概念在科学技术中得到了发展。在这段时期发现了能量守恒和转化定律,为此力学的发展在许多方面与理论物理紧密地结合在一起。在古典力学分析方法发展的同时,几何法也在不断的发展。法国学者布安索(1777~1859)创立了几何静力学体系,英国数学家、物理学家哈密顿(1805~1865)提出了哈密顿函数、正则方程和哈密顿原理。这时力学也出现了许多分支,运动学成为理论力学的一个独立部分也是在这一时期,刚体的定点运动动力学、微振动理论、运动稳定性和变质量力学等均形成了重要的专题。19 世纪末到 20 世纪初期,随着物理学和其他学科的迅速发展,出现了许多以牛顿定律为基础的古典力学无法解释的问题,使得牛顿力学的普遍性受到了怀疑。伟大的物理学家爱因斯坦(1879~1955)创立了相对论力学,否定了绝对空间和绝对时间的概念,为力学这一学科的发展做出了划时代的贡献。

20 世纪以来,由于工业建设、现代国防技术和其他新技术的发展,力学的模型越来越复杂,力学的领域不断扩大,形成了大批新的边缘学科。分析力学、运动稳定性理论、非线性振动、有理力学、陀螺理论以及飞行力学等方面都有很大的发展。

力学的发展史内容极为丰富,以上仅简述了与本书相关的部分,详细的介绍可参阅有关力学史的专门著作。

第 1 篇 静 力 学

引 言

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。

力系是指作用于物体上的一群力。

平衡是指物体相对于惯性参考系处于静止或做匀速直线运动的状态。在一般工程问题中,通常将与地球相固结的参考系当作惯性参考系,若物体相对于地球保持静止或匀速直线运动,就称此物体处于平衡状态。如房屋,桥梁,堤坝,做匀速直线运行的火车、汽车、飞机等都是处于平衡状态。平衡是物体运动的一种特殊形式。

在静力学中,将研究以下三个问题:

(1) 物体的受力分析。

分析某个物体总共受力的个数,以及每个力的作用线位置、大小和方向。

(2) 力系的等效替换与力系的简化。

力系的等效替换,是指作用在物体上的一个力系用另一个与它等效的力系来代替。这两个力系互为**等效力系**。进行力系等效替换的目的是为了用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,我们称之为**力系的简化**。

通过力系的简化,可以把对复杂力系作用效果的研究转化为对较简单力系的作用效果的研究,从而使问题得到简化。例如,飞行中的飞机受到升力、牵引力、重力、空气阻力等作用,也就是说,飞机正是受到这样一群力的作用而运动的,显然,通过对这样一群复杂力进行分析来确定飞机的运动规律是十分困难的。如果用一个简单的等效力系来代替这群复杂的力,然后再进行运动分析就容易多了。

(3) 建立各种力系的平衡条件。

力系的**平衡条件**是指物体处于平衡状态时,作用于物体上的力系必须满足的条件。满足平衡条件的力系称为**平衡力系**。

力系的平衡条件,在静力学中具有重要的意义。它在理论上给出了各种力系平衡时具有的独立平衡方程的个数,这为分析和实际问题起到了指导作用。

力系的平衡条件在工程实践中也有着十分重要的意义。在设计建筑物的构件、工程结构和做匀速运动的机械零件时,可做近似计算,通常将低速或加速度较小的运动构件也视为平衡,对其进行受力分析,再应用平衡条件及相应的平衡方程进行受力计算,以便作为构件强度和刚度设计的依据。因此,力系的平衡条件是建筑工程、机械工程中静力学分析和计算的理论依据和基础。此外,力系的简化理论和物体受力分析的方法也是研究动力学的基础。

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析

本章将介绍作为静力学理论基础的几个公理和研究静力学首先遇到的几个基本概念,以及对物体进行受力分析的方法。

1.1 静力学的基本概念

1. 刚体

刚体是在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体,或者称之为在任何情况下永不变形的物体。它是一个理想化的模型。实际上,物体在力的作用下都会产生程度不同的变形,称之为内效应,但是当这些微小变形对研究的问题不起主要作用时,可以忽略不计。从另一个角度来讲,理论力学主要研究物体的宏观运动状态的变化,即外效应,所以刚体这个理想化的模型将会作为主要力学模型出现在静力学、运动学和动力学中。应当指出,刚体的概念是建立在变形不影响研究的主要方向前提下的一种科学的抽象。当问题的方向转向研究物体的变形时(如材料力学等),则无论其变形何等微小,均应视为弹性体或变形体。

2. 力的概念

力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化。

自然界中存在着各种各样的力,人们在生活和生产中逐渐产生了力的概念。早在 2400 多年前,我国春秋时代的墨翟就在《墨经》中说过,“力,形之所以奋也。”这句话的意思说,力是物体运动的原因。虽然墨翟给力下的定义还不够完善,但却标志着人类最早对力的认识。

在自然界中,力可以说是无处不在,如水压力、土压力、摩擦力、万有引力等。它们的物理本质虽然不同,但却可以产生相同的效应,即力的效应。力使物体的运动状态发生改变的效应,称之为**运动效应**或**外效应**。使物体产生变形的效应,称之为**变形效应**或**内效应**。其实,变形也是物体内部运动状态变化的结果,因其具有特殊性,所以与通常所说的运动状态的改变区别开来。力的变形效应将在研究变形体力学问题的各学科中加以讨论,在理论力学中主要讨论力的外效应。

实践证明,力的效应取决于力的大小、方向和作用点,称为**力的三要素**。力的大小可以用弹簧秤或测力计来测定。本书采用力的单位是国际单位制中的牛顿或