



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

理论力学

Theoretical Mechanics

西北工业大学理论力学教研室 编

支希哲 主编

高行山 朱西平 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

理论力学

Lilun Lixue

西北工业大学理论力学教研室 编

支希哲 主编

高行山 朱西平 副主编



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

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是2004年度国家精品课程《理论力学》主讲教材。本书以教育部力学基础课程教学指导分委员会2009年制定颁布的“理论力学课程教学基本要求(A类)”为依据,精选教学内容,优化课程体系,理论联系实际,突出能力培养。

全书分为两部分:基础部分——包括静力学、运动学、动力学普遍定理(动量定理、动量矩定理、动能定理)、达朗贝尔原理、虚位移原理等;动力学专题部分——包括碰撞、机械振动基础、刚体动力学、动力学普遍方程、拉格朗日方程和哈密顿原理等。书中引申和加选内容由“*”号标出,不同类型学时、不同类型专业可根据需要进行选用。

另外,配合本书还编有《理论力学电子教案》和辅助教材,可供读者选用。

本书可作为高等学校工科机械、航空、航天、航海、土建、机电、水利和动力能源等专业理论力学课程的教材,以及相关专业成人教育教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 支希哲主编;西北工业大学理论力学教研室编. —北京:高等教育出版社,2010.7

ISBN 978-7-04-028318-1

I. ①理… II. ①支… ②西… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第096716号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 28.5
字 数 530 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年7月第1版
印 次 2010年7月第1次印刷
定 价 39.80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 28318-00

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是2004年度国家精品课程《理论力学》主讲教材。

本书作为西北工业大学国家工科力学教学基地建设成果之一,是在西北工业大学理论力学教研室历年来编写出版的理论力学教材的基础上,为适应当前教育教学改革特点和趋势而编写完成的。

本书以教育部力学基础课程教学指导分委员会2009年制定颁布的“理论力学课程教学基本要求(A类)”为依据,优化课程体系,精选教学内容,理论联系实际,突出能力培养。

本书适应当前教学改革特点,充分利用前修课程基础,适当提升教材起点,避免课程间内容的简单重复;适度压缩篇幅,合理安排教学内容与课程体系,提高课程的教学效率,以适应课程学时减少的需要。全书叙述简明,科学严谨,注重深入浅出,突出重点与分散难点,富于启发性,便于学生自学。调整课程教学内容重点,由强调课程理论的系统性和完整性,转向更加重视对基础、应用、能力和素质的培养。注意反映本课程在现代科学技术中的应用,增加适量的联系工程实际的内容与习题。注意对工程实例的简化和分析,全书每章穿插有思考题,章末有小结,并附有与工程实际相联系的研究性学习题目,以开阔学生视野,拓宽知识面,培养学生建立力学模型的能力、分析与解决实际问题的能力以及创新思维和创新意识。

全书分为两部分:基础部分——包括静力学、运动学、动力学普遍定理(动量定理、动量矩定理、动能定理)、达朗贝尔原理、虚位移原理等;动力学专题部分——包括碰撞、机械振动基础、刚体动力学、动力学普遍方程、拉格朗日方程和哈密顿原理等。书中引申和加选内容由“*”号标出,不同类型学时、不同类型专业可根据需要进行选用。

为了便于教师教学和学生自学,配合本书还编有《理论力学电子教案》和辅助教材,可供读者选用。

本书可作为高等学校工科机械、航空、航天、航海、土建、机电、水利和动力能源等专业理论力学课程的教材,以及相关专业成人教育教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书由支希哲任主编,高行山、朱西平任副主编。参加编写工作的有(按章

节顺序)刘永寿(第一~五章)、张娟(第六~九章)、朱西平(第十、十四、十六章)、高行山(第十一~十三、十七章)、支希哲(第十五、二十章)、张劲夫(第十八、十九章)。

本书请北京航空航天大学王琪教授审阅,提出了许多好的建议,在此表示衷心地感谢。

由于编者的水平有限,书中疏误在所难免,敬请读者批评指正。

西北工业大学理论力学教研室

2010年3月

目 录

绪论	1
----	---

静 力 学

第一章 静力学公理和物体的受力分析	7
§ 1-1 静力学的基本概念	7
§ 1-2 静力学公理	7
§ 1-3 工程中常见的约束和约束力	9
§ 1-4 物体的受力分析和受力图	13
小结	17
习题	18
第二章 基本力系	21
§ 2-1 共点力系合成的几何法及平衡的几何条件	21
§ 2-2 力的投影	22
§ 2-3 共点力系合成的解析法及平衡的解析条件	24
§ 2-4 力偶和力偶矩·力偶的等效条件	27
§ 2-5 力偶系的合成与平衡条件	30
小结	33
习题	34
第三章 任意力系	39
§ 3-1 力对点的矩和力对轴的矩	39
§ 3-2 任意力系的简化与合成	41
§ 3-3 任意力系的平衡条件和平衡方程	47
小结	52
习题	54
第四章 物体系的平衡问题	60
§ 4-1 静定问题与静不定问题的概念	60
§ 4-2 物体系平衡问题分析举例	61
§ 4-3 简单平面桁架的内力计算	66
§ 4-4 平行力系中心	69
小结	72

习题	73
第五章 摩擦	80
§ 5-1 滑动摩擦	80
§ 5-2 滚动摩阻	83
§ 5-3 考虑滑动摩擦时的平衡问题	84
小结	88
习题	89

运 动 学

第六章 点的运动学	95
§ 6-1 描述点的运动的矢量法	96
§ 6-2 描述点的运动的直角坐标法	98
§ 6-3 描述点的运动的自然法	100
小结	112
习题	112
第七章 刚体的基本运动	116
§ 7-1 刚体的平移	116
§ 7-2 刚体的定轴转动	117
§ 7-3 刚体角速度和角加速度的矢量表示 · 刚体内点的速度和加速度的矢积表示	123
小结	125
习题	126
第八章 点的合成运动	129
§ 8-1 合成运动的基本概念	129
§ 8-2 点的速度合成定理	132
§ 8-3 点的加速度合成定理	136
小结	142
习题	142
第九章 刚体的平面运动 · 运动学综合问题分析	151
§ 9-1 刚体平面运动的运动方程	151
§ 9-2 刚体平面运动的分解	152
§ 9-3 平面图形上各点的速度	153
§ 9-4 平面图形上各点的加速度	164
§ 9-5 运动学综合问题分析	167
小结	173

习题	173
动 力 学	
第十章 质点动力学	183
§ 10-1 质点运动微分方程	183
§ 10-2 质点动力学的基本问题	183
§ 10-3 非惯性参考系中的质点动力学基本方程	190
小结	195
习题	195
第十一章 动量定理	200
§ 11-1 动量与冲量	200
§ 11-2 动量定理的表述	202
§ 11-3 质心运动定理	205
小结	209
习题	210
第十二章 动量矩定理	216
§ 12-1 动量矩	216
§ 12-2 动量矩定理的表述	217
§ 12-3 刚体的定轴转动微分方程	222
§ 12-4 相对质心的动量矩定理	224
§ 12-5 刚体的平面运动微分方程	226
小结	229
习题	230
第十三章 动能定理·动力学综合问题分析	235
§ 13-1 力的功	235
§ 13-2 动能	242
§ 13-3 动能定理的表述	244
§ 13-4 功率·功率方程	248
§ 13-5 势力场·势能·机械能守恒定律	249
§ 13-6 动力学综合问题分析	253
小结	260
习题	261
第十四章 达朗贝尔原理与动静法	270
§ 14-1 达朗贝尔原理	270
§ 14-2 惯性力系的简化	271

§ 14-3 动静法的应用举例	274
§ 14-4 定轴转动刚体对轴承的动压力	278
小结	282
习题	282
第十五章 虚位移原理	288
§ 15-1 概述	288
§ 15-2 约束和约束方程	288
§ 15-3 虚位移·自由度	290
§ 15-4 虚功·理想约束	293
§ 15-5 虚位移原理	293
§ 15-6 广义坐标与广义力·广义坐标形式的虚位移原理	297
小结	301
习题	302

动力学专题

第十六章 碰撞	311
§ 16-1 碰撞现象及其基本特征	311
§ 16-2 碰撞时的动力学普遍定理	311
§ 16-3 碰撞恢复因数	313
§ 16-4 碰撞问题分析举例	315
§ 16-5 碰撞对定轴转动刚体的作用·撞击中心	323
小结	324
习题	325
第十七章 机械振动基础	329
§ 17-1 单自由度系统的自由振动	329
§ 17-2 单自由度系统的阻尼振动	332
§ 17-3 单自由度系统的强迫振动	336
§ 17-4 二自由度系统的自由振动	341
§ 17-5 二自由度系统的强迫振动	345
小结	348
习题	349
第十八章 刚体动力学	353
§ 18-1 刚体定点运动的运动学	353
§ 18-2 刚体定点运动的欧拉动力学方程	362
§ 18-3 陀螺近似理论	364

§ 18-4 刚体一般运动的运动学	366
§ 18-5 刚体一般运动的动力学	368
小结	370
习题	372
第十九章 动力学普遍方程·拉格朗日方程	375
§ 19-1 动力学普遍方程	375
§ 19-2 第一类拉格朗日方程	377
§ 19-3 第二类拉格朗日方程	381
§ 19-4 第二类拉格朗日方程的首次积分	387
小结	390
习题	392
第二十章 哈密顿原理和正则方程	397
§ 20-1 增广位形空间·真实路径与可能路径	397
§ 20-2 哈密顿原理	397
§ 20-3 哈密顿正则方程	401
小结	406
习题	406
附录 A 转动惯量	410
§ A-1 转动惯量的概念与计算	410
§ A-2 刚体对任意轴的转动惯量·惯性积和惯性主轴	413
§ A-3 质量对称分布刚体的惯性主轴方向的判定	415
§ A-4 惯性椭球	417
习题答案	419
参考文献	438
Contents	439

绪 论

1. 理论力学的研究内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

所谓机械运动,是指物体在空间的位置随时间的变化。它是人们日常生活和生产实践中最常见、最简单的一种运动。掌握物体机械运动的普遍规律,不仅能够解释许多发生在我们周围的机械运动现象,而且还能将理论力学的定律和结论广泛应用于工程技术之中。如机械和建筑结构的设计、航空与航天技术等,都以本学科的理论为基础。

本书的内容分为静力学、运动学和动力学三部分。

静力学是研究力系的等效和简化及物体在力系作用下的平衡规律。

运动学是研究物体机械运动的几何性质(如位置坐标、速度、加速度等),而不涉及引起物体运动的物理原因。

动力学是研究物体机械运动状态的变化与作用力之间的关系。

理论力学所研究的内容是以伽利略和牛顿所总结的关于机械运动的基本定律为基础,它属于古典力学的范畴。在全部科学中,古典力学最能成功地把来自经验的物理理论,系统地表达成数学抽象的简明形式,它是人类的财富和技术史上的伟大里程碑。实践表明,古典力学的定律有着极其广泛的适用性。这些定律就是这门课程的科学根据。

理论力学起源于物理学的一个独立分支,但它的内容大大超过了物理学的内容。在 20 世纪初,由于物理学的重大发展,产生了相对论力学和量子力学,表明古典力学的应用范围是有局限性的。古典力学的规律不适用于速度接近光速的宏观物体的运动,也不适用于微观粒子的运动。这样,在 20 世纪初出现了较古典力学更为严谨的相对论力学和适用于微观粒子运动的量子力学。但是,在研究速度远小于光速的宏观物体的运动,特别是研究一般工程上的力学问题时,应用古典力学分析所得的结果是足够精确的。

由于理论力学是工程技术的重要理论基础,所以,它在工科院校中是一门重要的技术基础课程。它为学习一系列后续课程提供基础知识。例如,材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、流体力学和振动理论等课程都要以理论力学为重要基础。在很多专业课程中,也要用到理论力学的知识。因此,如果没有扎实的、足够的理论力学知识,在学习阶段中很难顺利地学好一系列后续课程;在工作岗位上也不可能成为一个有独立解决工程实际问题能力的工程师。

2. 理论力学的研究方法

任何一门科学的研究方法都不能离开认识过程的客观规律。理论力学也毫不例外,它的研究方法是从实践出发,经过抽象、综合、归纳,建立一些基本概念、定律或公理,再用数学演绎和逻辑推理得到定理和结论,然后再通过实践来证实并发展这些理论。

实验是理论力学研究的重要手段之一。在力学的萌芽时期,建立力学的基本概念及基本定律,都是以对自然的直接观察及从生活和生产劳动取得的经验作为出发点的。之后,系统地组织实验,就成了科学研究的重要手段。从观察和实验中得到感性经验上升到理性认识,必须抓住事物和现象的内部联系。这样,就必须从被观察到的现象中抽出最主要的因素和特征,而撇开其余次要的东西。这就是力学中的抽象化方法。

通过抽象化,进一步把人类在长期生产中通过直接观察、实验所获得的经验加以分析、综合和归纳,建立起一些最基本的定律或公理,作为整个古典力学的理论基础。这些工作已由牛顿总结完成。建立起作为理论力学依据的定律或公理后,再根据这些定律或公理,借助于严密的数学工具进行演绎推理,考虑所研究问题的具体条件,从而得出了适用于各种形式的定理和结论,揭示了各个物理量的内在联系和变化规律。还要注意,力学现象之间的关系是通过数量来表示的。因此,计算技术在力学的应用和发展方面有着巨大的作用。现代电子计算机的出现,为数学在力学中的应用提供了方便,从而也促进了力学的发展。当然,数学工具的运用,决不能脱离具体的研究对象,只有将数学运算与力学现象的物理本质紧密联系起来,才能得出符合实际的正确结论。

在今后力学的研究中,还必须与研究对象更加深入地联系起来,以便更深入地探索力学现象的物理本质,进一步发掘事物的特征,从而建立起更符合实际的新模型和相应的力学规律。只有这样,力学的内容才能不断地丰富起来。科学的目的是不只在认识世界,更重要地在于改造世界。实践既是认识的唯一目的,同时又是认识的唯一标准。任何科学理论,包括力学,都必须在它指导实践时加以验证,只有当它足够精确地符合客观实际时,才能被认为正确可靠,也只有这样的理论才有实际意义。

3. 学习理论力学的目的

(1) 有些工程实际问题可以直接应用理论力学的基本理论去解决。对比较复杂的问题,则需要用理论力学和其他专门知识共同来解决。学习理论力学是为解决工程问题打下一定的基础。

(2) 理论力学研究力学中最普遍、最基本的规律。很多工程专业的课程,如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、飞行力学、振动理论、断裂力学等,都要以理论力学为基础,所以理论力学是学习一系列相关

后续课程的重要基础。

随着现代科学技术的发展,力学的研究内容已渗入到其他科学领域,从而形成了一系列新的现代学科。例如,生物力学、电磁流体力学、物理力学、系统力学等都是力学和其他学科结合而形成的交叉学科。这些新兴学科的建立都是以理论力学知识为基础的。

(3) 理论力学是一门演绎性较强的课程。掌握理论力学的研究方法,不仅可以深入地掌握这门学科,而且有助于学习其他课程或学科,有助于培养辩证唯物主义世界观,培养正确的分析问题和解决问题的能力,提高学生的综合素质,为今后解决生产实际问题、从事科学研究工作打下基础。

4. 力学发展简史

一切科学的发展过程都是与社会生产力的发展紧密地联系着的。力学也和其他自然科学一样,是由生产实践的需要而得到发展的。由于力学所研究的机械运动是物质运动的最简单的形式,而且它在日常生活中最容易被直接觉察到。因此,力学是最早获得发展的学科之一。

远古以来,人们在生产劳动中积累了力学知识。古代在建造各种宏伟的建筑物时(如古埃及的金字塔和我国的万里长城),当时的建筑者已具备了许多来自经验的静力学知识,已能使用一些简单的机械装置(如斜面、杠杆、滑轮等)去提升和搬运巨大的重物。我国古代在很多书籍文献中,对于力的概念、杠杆的平衡、滚动摩擦、功的概念、乐器的振动以及材料强度等力学知识都有相当的记载。由此可见,我国古代勤劳勇敢的劳动人民在很早就积累了丰富的力学知识。但是,在其后直到公元14世纪的漫长时期中,由于封建和神权的统治,生产力受到束缚,科学的发展陷于停顿状态,力学也和其他学科一样,得不到发展。

15世纪后半期,由于商业资本的兴起,手工业、航海工业和军事工业等都得到了空前的发展,促进了力学和其他学科的突飞猛进。从16—17世纪,力学开始形成一门系统的、独立的学科。意大利学者伽利略(1564—1642年)首先在力学中应用了有计划科学实验,创立了科学的研究方法。他根据观察和实验,明确地提出了惯性定律的内容,得出了真空中落体运动的正确结论,引进了加速度的概念并解决了真空弹道问题。牛顿总结了前人的成就,建立了经典力学的基本定律。

18世纪以后,工业与技术的蓬勃发展向科学提出了许多新的问题,同时由于微积分的出现,更加促进了力学的进一步发展。18世纪和19世纪是理论力学发展成熟的时期,相继提出了虚位移原理、达朗贝尔原理、动力学普遍方程等,于是以动力学普遍方程为基础的分析力学发展起来了。19世纪上半期,由于大量机器的使用,功和能的概念在科学技术中得到了发展,这时期发现了能量守恒和转化定律,使力学的发展在许多方面和理论物理紧密地交织在一起,沟通了机

械运动与其他形式的运动之间的联系。

20 世纪以来,由于航空工业、现代国防技术和其他新技术的需要,力学的许多分支如弹塑性理论、流体和气体力学、运动稳定性理论、非线性振动理论、陀螺力学和飞行力学等方面都有很大的发展,并取得了巨大的成就。20 世纪中叶以后,航天工程的兴起又给力学提出了许多新的极为复杂的理论问题。依靠快速电子计算机的协助,已解决了宇宙火箭的发射、人造卫星轨道的计算、稳定性与控制等一系列重大问题。所有这些都充分说明了现代力学的高度发展水平。

进入 21 世纪以后,纳米技术、生命科学与生物技术、信息技术等,成为科技界最具吸引力与影响力的三大领域。在这样一种大的背景下,许多传统科学都面临巨大的挑战,力学由于其内在的特质及其普遍性,仍然展示出旺盛的生命力并将继续发挥巨大的作用。在研究这些高新技术问题的过程中,诞生了许多新的力学分支。如微纳米力学、化学流体力学、电磁流体力学、物理力学、生物力学、多体系统动力学、工程控制等。

在现实社会生活中,如自然环境与灾害预报以及材料损伤、疲劳、破坏等对国民经济有重大影响的问题,依然有待于进一步的研究;在空间科学、空间安全、空间利用方面,力学仍然是国家需求迫切的重要学科;在各种复杂、创新、重大的工程问题中,不断对力学提出了新的挑战,同时也为力学注入了长盛不衰的生命力。信息技术、生物工程、航天工程等,必将催生新世纪的力学家和一大批适应现代工程发展需要的力学工程师。

力学发展史内容极为丰富,以上仅简单地介绍了与本课程直接相关的部分。作为力学工作者,既要充分重视力学的基础理论研究,又要创造新概念、新理论,开拓新领域,同时还要充分重视力学的广泛应用,为实现四个现代化,赶超世界先进水平作出贡献。

静 力 学

静力学,主要是刚体静力学,要研究的主要问题是:

- (1) 作用于刚体的力的性质及其运算(包括合成、分解和简化)方法。
- (2) 刚体在力系作用下维持平衡的条件及其应用。

所谓平衡,是指物体相对于某个惯性参考系静止。工程上常取地球作为惯性参考系。在本书中,如无特别说明,都作这样的理解。平衡状态排除任何转动。

平衡规律在工程上有广泛的应用,各种建筑物在设计时就往往首先要通过静力分析。同时,在静力学里关于力的合成、分解和简化等理论,也是研究动力学所需要的。因此,本课程中先叙述静力学。

第一章 静力学公理和物体的受力分析

§ 1-1 静力学的基本概念

1-1-1 力

力(force)是物体相互间的机械作用,其作用结果使受力物体的形状和运动状态发生改变。

把引起物体变形的效应称为力的**内效应**(internal effect),而使物体运动状态改变的效应称为**外效应**(external effect)。力对物体的作用效应取决于力的**三要素**(three elements of force),即力的作用位置或作用点、力的方向、力的大小。

作用于同一物体或物体系上的一群力称为**力系**(force system)。对刚体的作用效果相同的两个力系称为**等效力系**(equivalent force system)。如果一个力系可以和一个力等效,那么把这个力称为该力系的**合力**(resultant force);而该力系中的各力称为其合力的各分力(component force)。使刚体维持平衡的力系称为**平衡力系**(equilibrium force system)。

1-1-2 刚体

刚体(rigid body)是指在外界的任何作用下形状和大小都始终保持不变的物体。或者说,在力的作用下,任意两点间距离保持不变的物体。刚体是一种理想的力学模型。实际的物体在受力作用时总会有变形,都是变形体。一个物体能否视为刚体,不仅取决于变形的大小,而且和问题本身的要求有关。

§ 1-2 静力学公理

静力学公理(axioms of statics)是力的基本性质的概括和总结,其正确性已为实践所证实。

公理 1(二力平衡公理)(equilibrium axiom of two forces)

要使刚体在两个力作用下维持平衡状态,必须也只需这两个力大小相等、方向相反、沿同一直线作用。