

高等学校教材

理论力学

(第二版)

郝桐生 编

中国矿业学院理论力学教研组修订

高等教育出版社

高等学校教材

理论力学

(第二版)

郝桐生 编

中国矿业学院理论力学教研组修订

高等教育出版社

(京)112 号

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/郝桐生编;中国矿业学院理论力学教研组修订.-2版.-北京:高等教育出版社,1982.9(2000重印)
ISBN 7-04-001451-3

I.理… I.①郝…②中… 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 (96) 第 00041 号

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		
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	850×1168 1/32	版 次	1965 年 1 月第 1 版
印 张	14.25		1982 年 9 月第 2 版
字 数	345 000	印 次	2000 年 2 月第 29 次印刷
		定 价	13.70 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

第 二 版 序

本书原为北京矿业学院理论力学教研组郝桐生教授所编, 现根据一九八〇年五月高等学校工科力学教材编审委员会理论力学编审小组审订的《理论力学教学大纲》(90 学时)修订, 适用于高等学校工科电机、动力、采矿等类专业。

在修订中, 我们注意保持原书简明的特点, 考虑便于自学和适应各类专业的要求, 根据多年来的教学经验以及广大读者对原书的反映, 并参照兄弟院校的教材, 对原书增减了一些内容, 将单位制改为国际单位制(SI), 增换了部分例题, 在每章后增附了小结、思考题和习题。

参加修订工作的: 主要是一九六四年曾协助编者工作的郭桢同志及马向前同志(运动学部分)。我组其他同志参加了对修订稿的讨论和部分例题与习题答案的校核工作。最后由郭桢同志负责全书的修改定稿工作。

本书承北京航空学院黄克累、马宗祥同志审阅, 提出了不少宝贵的意见, 对此我们表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限, 书中定有不少缺点和错误, 诚恳希望读者批评指正。

中国矿业学院理论力学教研组

一九八二年六月

初 版 序

本书是根据一九六二年五月审订的高等工业学校电机制造、动力类专业适用的《理论力学教学大纲》(试行草案)编写的,可作为上述专业和采矿、冶金类各专业理论力学课程的教学用书。本书主要满足 110 学时类型各专业的要求,但在讲授时如作适当删减和增补,亦可适用于 90—130 学时范围内的各专业。

考虑到同学的接受能力,本书在静力学中汇交力系和力偶系采取了平面情形与空间情形分开讲授的安排。在动力学中普遍定理不按质点与质点系分章而是按定理分章,这样的安排一方面是为了节省篇幅,另一方面也是为了便于安排习题课。

本书中例题大致可分为两种类型,一种是典型例题,着重于理论的应用和解题方法的训练;另一种是联系工程实际的例题,便于培养同学的工程概念。例题数量虽多,但不可能满足各类专业的需要,因此在讲授时可作必要的增删。

本书中带有星号“*”或用小字排印的内容,可根据专业要求决定取舍。

本书在编写过程中得到了北京矿业学院理论力学教研室同志们的大力协助,同时也吸取了西北工业大学、哈尔滨工业大学和清华大学等学校理论力学教研室所编理论力学讲义中的不少宝贵经验。

初稿完成后曾在北京矿业学院采煤专业、矿山机电专业试用一次,在试用时教研室同志又提出了不少建设性的意见。本书承唐山铁道学院金传炳同志和西安交通大学施明诚同志等审阅,并蒙

北京航空学院理论力学教研室提出了宝贵意见,在此一并致谢。

本书虽经几次修改,但限于编者水平,缺点和错误在所难免,恳切希望读者提出批评和指正。

编 者

一九六四年八月

目 录

绪论	(1)
一、理论力学的研究对象	(1)
二、理论力学的任务及其研究内容	(1)
三、理论力学的研究方法	(2)
四、理论力学发展简史	(4)

静 力 学

第一章 静力学的基本概念与公理	(8)
§ 1-1 静力学的基本概念	(8)
§ 1-2 静力学公理	(11)
§ 1-3 约束与约束反力	(16)
§ 1-4 受力分析与受力图	(22)
习题	(26)
第二章 平面汇交力系	(29)
§ 2-1 平面汇交力系的合成与平衡——几何法	(29)
§ 2-2 力在坐标轴上的投影	(33)
§ 2-3 平面汇交力系的合成与平衡——解析法	(34)
习题	(39)
第三章 力矩与平面力偶理论	(44)
§ 3-1 力矩的概念与计算	(44)
§ 3-2 力偶及其性质	(47)
§ 3-3 平面力偶系的合成与平衡	(50)
习题	(55)
第四章 平面任意力系	(58)

§ 4-1	力线平移定理	(58)
§ 4-2	平面任意力系向已知点的简化·主矢与主矩	(59)
§ 4-3	简化结果的分析·合力矩定理	(62)
§ 4-4	平面任意力系的平衡条件与平衡方程	(64)
§ 4-5	平面平行力系的合成与平衡	(67)
§ 4-6	物体系统的平衡·静定与静不定问题的概念	(70)
* § 4-7	平面静定桁架的内力分析	(75)
	习题	(82)
第五章	摩擦	(91)
§ 5-1	摩擦现象	(91)
§ 5-2	滑动摩擦	(92)
§ 5-3	具有滑动摩擦的平衡问题	(96)
§ 5-4	滚动摩擦	(102)
	习题	(108)
第六章	空间力系和重心	(112)
§ 6-1	空间力沿坐标轴的分解与投影	(112)
§ 6-2	空间汇交力系的合成与平衡	(114)
§ 6-3	空间力偶理论	(117)
§ 6-4	力对于点之矩与力对于轴之矩	(119)
§ 6-5	空间任意力系向已知点的简化·主矢与主矩·空间力系的合力矩定理	(124)
§ 6-6	空间任意力系的平衡条件与平衡方程	(128)
§ 6-7	平行力系的中心与重心	(135)
	习题	(142)

运 动 学

第七章	点的运动学	(149)
§ 7-1	运动学的基本概念	(149)
§ 7-2	决定点的运动的基本方法·点的运动方程	(151)
§ 7-3	速度与加速度的矢径表示法	(153)
§ 7-4	速度与加速度的直角坐标表示法	(155)

§ 7-5	自然轴系	(160)
§ 7-6	速度与加速度的自然表示法	(161)
习题		(169)
第八章	刚体的基本运动	(173)
§ 8-1	刚体的平行移动	(173)
§ 8-2	刚体的定轴转动	(175)
§ 8-3	转动刚体内各点的速度与加速度	(177)
§ 8-4	绕定轴转动刚体的传动问题	(182)
§ 8-5	角速度及角加速度的矢量表示·以矢积表示转动刚体内点的速度与加速度	(185)
习题		(189)
第九章	点的合成运动	(193)
§ 9-1	点的合成运动的概念	(193)
§ 9-2	绝对运动·相对运动和牵连运动的速度与加速度	(195)
§ 9-3	点的速度合成定理	(197)
§ 9-4	牵连运动为平动时点的加速度合成定理	(201)
* § 9-5	牵连运动为转动时点的加速度合成定理	(203)
习题		(209)
第十章	刚体的平面运动	(214)
§ 10-1	刚体平面运动的概述	(214)
§ 10-2	平面运动分解为平动与转动·刚体平面运动的运动方程	(215)
§ 10-3	平面图形内各点的速度·速度投影定理·速度瞬心	(217)
* § 10-4	平面图形内各点的加速度·加速度瞬心的概念	(225)
* § 10-5	刚体绕平行轴转动的合成	(227)
习题		(232)

动 力 学

第十一章	动力学基本定律·质点的运动微分方程	(238)
§ 11-1	引言	(238)

§ 11-2 动力学基本定律·····	(239)
§ 11-3 质点的运动微分方程·····	(242)
习题·····	(252)
第十二章 动量定理 ·····	(256)
§ 12-1 动力学普遍定理·····	(256)
§ 12-2 质点的动量定理·····	(256)
§ 12-3 质点系的动量定理·····	(259)
§ 12-4 质心运动定理·····	(264)
* § 12-5 碰撞现象·两平动物体的对心正碰撞·····	(269)
习题·····	(275)
第十三章 动量矩定理 ·····	(279)
§ 13-1 质点的动量矩定理·····	(279)
§ 13-2 质点系的动量矩定理·····	(283)
§ 13-3 刚体的定轴转动微分方程·····	(286)
§ 13-4 转动惯量·····	(292)
* § 13-5 碰撞时动量矩的变化·碰撞对于定轴转动刚体的作用·····	(298)
习题·····	(302)
第十四章 动能定理 ·····	(308)
§ 14-1 力的功·····	(308)
§ 14-2 质点的动能定理·····	(313)
§ 14-3 作用于质点系与刚体上的力系的功·····	(316)
§ 14-4 质点系和刚体的动能·····	(319)
§ 14-5 质点系的动能定理·····	(321)
§ 14-6 功率·功率方程·····	(327)
* § 14-7 势力场·势能·机械能守恒定律·····	(331)
习题·····	(335)
第十五章 达朗伯原理 ·····	(342)
§ 15-1 惯性力的概念·····	(342)
§ 15-2 达朗伯原理·····	(343)
§ 15-3 刚体惯性力系的简化·····	(348)
* § 15-4 定轴转动刚体的动反力·静平衡与动平衡的概念·····	(355)

习题	(363)
第十六章 虚位移原理	(369)
§ 16-1 质点系的自由度·约束与广义坐标	(369)
§ 16-2 虚位移与理想约束	(373)
§ 16-3 虚位移原理	(374)
§ 16-4 用虚位移原理求约束反力	(380)
* § 16-5 动力学普遍方程	(382)
习题	(385)
*第十七章 质点的相对运动	(389)
§ 17-1 质点的相对运动动力学	(389)
§ 17-2 牵连运动为平动时质点的相对运动微分方程	(389)
§ 17-3 牵连运动为定轴转动时质点的相对运动微分方程	(392)
习题	(398)
*第十八章 振动理论基础	(400)
§ 18-1 振动的概念	(400)
§ 18-2 自由振动	(401)
§ 18-3 阻力对于自由振动的影响	(409)
§ 18-4 强迫振动·共振	(414)
§ 18-5 阻力对于强迫振动的影响	(421)
§ 18-6 转轴的临界转速	(425)
§ 18-7 减振和隔振的概念	(428)
习题	(433)
综合题	(439)
附录 国际单位制(SI)与工程单位制	(445)

绪 论

一、理论力学的研究对象

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科。

所谓机械运动，是指物体在空间的位置随时间的变化。物体的平衡是机械运动的特殊情况，理论力学也研究物体的平衡问题。然而，在宇宙中没有绝对的平衡，一切平衡都只是相对的和暂时的。

机械运动是自然界和工程技术中最常遇到的运动，因而力学是发展最早的自然科学之一，可见力学的研究具有实际的意义。

理论力学所研究的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。由于近代物理学的重大发展，指出了古典力学的局限性：不适用于速度接近光速的物体的运动，也不适用于微观粒子的运动。但是，对于速度远小于光速的宏观物体的运动，古典力学并未丧失其重要意义，它具有足够的精确度。因此，在日常生活和一般的工程技术问题中，古典力学仍然是研究机械运动的既准确又方便的工具。

二、理论力学的任务及其研究内容

学习理论力学的目的在于掌握机械运动的客观规律，能动地改造客观世界，为生产建设服务。因此学习本课程的任务：一方面是运用力学基本知识结合其他有关的课程，解决工程技术中的实际问题；另一方面是为学习一系列的后继课程，如材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、机械原理、机械零件等以及有关的专业课程提供重要的理论基础。此外，理论力学的学习还有助于培

养辩证唯物主义世界观，树立正确的思想方法和提高分析问题与解决问题的能力。

根据循序渐进的认识规律及科学体系，理论力学的内容通常分为静力学、运动学及动力学三部分。

静力学 研究物体的平衡规律，同时也研究力的一般性质及其合成法则。

运动学 研究物体运动的几何性质，而不考虑物体运动的原因。

动力学 研究物体的运动变化与其所受的力之间的关系，是理论力学最主要的组成部分。

三、理论力学的研究方法

任何一门科学由于研究对象的不同而有不同的研究方法，但是通过实践而发现真理，又通过实践而证实真理和发展真理，这是任何科学技术发展的正确途径。理论力学也是这样，具体来说，是从实践出发，经过抽象化、综合、归纳，建立公理，再应用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论，形成理论体系，然后再通过实践来证实理论的正确性。

观察和实验是理论发展的基础。从力学发展的历史过程可以看出，理论体系的建立和形成的每一阶段都是与人类在生产劳动中的观察和实验分不开的。从观察实际得到的材料必须经过思考的加工才能上升到理论。因为我们所观察到的材料是复杂多样的，不易从中抓住事物的本质；因此必须在各种现象中抓住起决定性作用的主要因素，撇开次要的、局部的、偶然性的因素，这样才能深入现象的本质，明确事物间的内在联系。这就是力学中普遍采用的抽象化方法。抽象化的力学现象也称为力学的理想模型。例如，在研究物体的机械运动时，撇开物体的变形就得到刚体的概

念,撇开物体的广延性就得到质点的概念,撇开流体的粘性就得到理想流体的概念,撇开摩擦的作用就得到理想约束的概念,等等。经过第一次简化之后,为了满足进一步的要求,再考虑初步近似中所未计入的因素建立新的模型,得出更接近于实际情况的结果。这种由粗到精、由简单到复杂的研究方法在科学技术中得到广泛地应用。例如,建立刚体平衡规律之后,考虑物体变形的特征就得到弹塑性物体的模型,可以进一步研究变形体的平衡规律。实践证明,正确的抽象不是脱离实际而是更深刻地接近实际。

通过抽象化,将长期以来从生产劳动中直接观察实践所积累的经验加以分析、综合和归纳,建立最基本的公理或定律作为本课程的理论基础;再根据这些公理,通过演绎推理的方法,考虑到问题的具体条件,从而得出各种形式的定理和结论,建立起系统的理论。以公理为基础的理论体系,以统一的观点深刻地揭示了力学诸定理之间的内在联系,形成一定的逻辑系统,便于学习、掌握和运用,也是学科发展成熟的标志。

在力学中广泛地使用数学工具,不但运用在逻辑推理方面,而且运用于量的计算方面。通过数学语言,有助于更进一步揭示各物理量间的内在联系及机械运动规律的实质。计算机的出现和发展,为计算技术在工程技术问题中的应用开辟了广阔的道路,大大促进了数学在力学研究中的应用。应当指出的是数学工具的运用,不能脱离具体研究的对象,只有数学运算与力学现象的物理本质紧密地结合起来,才能得出符合实际的正确结论。

从实践得到理论,再由理论回到实践。只有当理论很好地符合客观实践时,这样的理论才是正确可靠的;也只有这样的理论,才有指导实践的作用。

四、理论力学发展简史

力学的发展与其他自然科学一样，是与社会生产力及社会物质文化的发展有不可分割的联系。力学的发展大致可分为下面三个阶段。

古代力学的萌芽、理论力学基础的建立时期

力学是最早获得发展的科学之一。远在奴隶社会时代，人们就通过劳动所积累的经验开始创造了一些简单工具；在不断改进工具与克服困难的过程中又积累了不少经验，从经验里获得知识，形成力学规律的起点。在这个时期，力学研究的对象主要是简单的工具和机械(如斜面、杠杆、滑车等)，限于当时生产水平，所涉及的问题主要是平衡问题。在叙述我国古代伟大学者墨翟(约公元前 468~376)及其学派学说的著作《墨经》中；有一部分涉及力学问题，对于力的定义及杠杆平衡等提出了正确的见解。古希腊自然科学家阿基米德(公元前 287~212)在他的著作《论比重》中，总结了前人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。

在西方，从阿基米德以后很长一个时期，由于封建、神权的长时期的统治，生产力停滞不前，力学及其他科学得不到发展。而我国在这个时期经历了汉、隋、唐、宋以至于明朝，力学及机械学得到了发展。汉朝大科学家张衡(78~139)创造了天文仪器“浑天仪”和测量地震的“候风地动仪”。三国时代的马钧(235年左右)创造了利用差动齿轮传动的指南车。在建筑工程方面，我国的劳动人民充分发挥了创造性和独特的建筑风格，很多现在还存在的宏伟的古代建筑足以证明这个问题。隋朝伟大的工匠李春(581~681)主持建造了著名的赵州桥(即今河北省赵县洺河上的安济桥)，这个单跨石拱桥不但发挥了石料的抗压性能而且具有美观的外形，它比世

界上相同类型的石拱桥要早一千二百多年。作为宇宙航行的基本技术——火箭原理也是我国劳动人民的伟大贡献。尽管祖国的劳动人民在力学与其他自然科学方面发挥了伟大的创造精神，但由于长期的封建统治，科学家及劳动人民的创造成果得不到重视，因此，自十五世纪以后，在西方科学技术迅速发展时，我国的科学仍停留在封建时期的水平。

西方在经过中世纪的停顿之后，于十五世纪后期进入文艺复兴时期，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。意大利著名画家、物理学家列奥纳多·达·芬奇(1452~1519)研究过物体沿斜面运动和滑动摩擦的问题，同时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“日心说”，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，经荷兰学者惠更斯(1629~1695)等人的努力，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。

与伽利略、牛顿建立动力学基础的同时，由于法国学者伐里农(1654~1722)的工作，刚体静力学几乎是完全建立起来了。

理论力学的发展时期

十七世纪是理论力学基础建立的时期，十八、十九世纪是其发

展成熟的时期。十八世纪特别是西方工业革命后,天文、军事、水利、建筑、航海、航空、机械和仪器等工业的迅速发展,给力学提出了不少新问题。同时数学的发展为力学朝分析方向的发展提供了有利的条件,使得力学向深度和广度两方面推进,发展成为理论严谨、体系完整的学科。瑞士数学家约翰·伯努利(1667~1748)最先提出了虚位移原理(1717)。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的问题,发展了摩擦、刚体运动等方面的研究。1743年法国科学家达朗伯(1717~1785)在他的著作《动力学专论》中提出了一个重要的原理——达朗伯原理,提供了非自由质点动力学的普遍解法。随后,法国数学力学家拉格朗日(1736~1813)在分析力学方面获得了辉煌的成就,他把虚位移原理与达朗伯原理结合起来,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。

十九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;能量守恒与转化定律不但在工程技术问题中具有重大的意义,而且沟通了各门科学之间的联系。

十九世纪是古典力学发展的高潮。与分析法发展的同时,几何法也在发展着,法国学者布安索(1777~1859)创立了几何静力学体系,并给刚体的运动以几何解释。英国数学物理学家哈密顿(1805~1865)提出的哈密顿函数、正则方程和哈密顿原理,起到了从古典力学到广义相对论与量子 and 波动力学的桥梁作用。俄国女数学家柯娃列夫斯卡娅(1850~1891)在刚体定点运动问题上得出第三种情形的解,这个问题在陀螺理论的发展中有重要的作用。俄国数学家李亚普诺夫(1857~1918)提出判断运动稳定性的新方法,在现代自动控制技术方面获得广泛的应用。变质量质点动力学是现代喷气飞行与火箭技术的理论基础,这一问题是俄国学者