



普通高等教育“十三五”力学规划系列教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

理论力学

(第二版)

华中科技大学理论力学教研室 编



扫码关注数字教学资源



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十三五”力学规划系列教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

理论力学

(第二版)

华中科技大学理论力学教研室编

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 介 绍

本书共 12 章和 6 个专题。第 1 章至第 4 章为静力学内容,主要介绍各种常见约束的约束力特征,各种平面力系的特征、简化和平衡。第 5 章至第 7 章为运动学内容,主要介绍点运动的基本特征和基本计算方法、刚体的基本运动分析方法、点的合成运动分析方法、刚体平面运动分析方法。第 8 章至第 12 章为动力学内容,主要介绍动力学三大普遍定理及其综合应用、达朗贝尔原理、虚位移原理、动力学普遍方程和第二类拉格朗日方程。大多数工程类专业根据专业特点学习前 11 章或前 12 章即可。专题部分包括在极坐标、柱坐标和球坐标下点的合成运动,质点相对运动动力学,空间运动刚体的相对运动动量矩定理及陀螺运动,空间运动刚体的动能,定轴转动刚体对轴承的附加动反力,第一类拉格朗日方程。

本书可以作为高等院校工科力学专业和工程类各专业的理论力学教材,各专业可以根据需要选学全部或部分内容;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/华中科技大学理论力学教研室编. —2 版. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8
普通高等教育“十三五”力学规划系列教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5680-4142-3

I. ①理… II. ①华… 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(2018)第 193073 号

理论力学(第二版)

Lilun Lixue(Di-er Ban)

华中科技大学理论力学教研室 编

策划编辑:万亚军

责任编辑:程 青

封面设计:刘 婷

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:25.75

字 数:515 千字

版 次:2018 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

定 价:58.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

根据世界高等教育与历次产业革命互动的规律,面向未来技术和产业发展的新趋势和新要求,在总结科学范式、技术范式、工程范式经验的基础上,需要探索建立新工科范式。以应对变化、塑造未来为指引,以继承与创新、交叉与融合、协同与共享为主要途径,深入开展新工科研究与实践,推动思想创新、机制创新、模式创新,探索实施工程教育人才培养的“新模式”,打造具有国际竞争力的工程教育“新质量”,建立完善中国特色工程教育的“新体系”,从而实现我国从工程教育大国走向工程教育强国,这是我国高校加快改造传统工科、建设和发展新工科的要求。

理论力学是机械、能源、动力、交通、土木、航空航天、力学等专业的一门重要基础课程,一些从这些传统工科专业中孕育出来的新工科专业仍必须学习该课程。对继承与创新能力的培养是新工科的灵魂。新的力学原理大多是在继承先前力学原理基础上创新出现的。为了简化复杂问题的分析而出现的新的力学原理非常明显地体现了继承与创新特征,该课程正是在继承与创新中建立了力学理论的科学范式,适合学生创新能力的培养。历次产业革命表明,工程改变世界。面对复杂多样的工程问题,研究有规律的工程范式可有效提高生产效率。理论力学是研究机械运动一般规律性的学科,研究力学问题规律性的分析方法,必然蕴含着研究复杂工程问题的规律性分析方法,适合培养学生解决复杂工程问题的工程范式能力。该课程所介绍的力学原理,都是由人类杰出的科学家发现和创立的,在学习力学原理过程中所涉及的哲学思想和科学家的研究经历,是对学生进行人文教育的一个良好载体。力学是工程学重要的基础学科,理论力学又是工程类专业学习力学知识最先了解的基础课程。基于上述特点,该课程一方面可解决实际问题,并为后续专业课程打基础。另一方面,有助于培养学生对物理世界客观规律内在联系的洞察力,从而为研究新的问题、提出创新性思想和理论打下基础,实现新形势下所要求的科学基础厚、工程能力强、综合素质高的人才培养目标。

本书是根据国家力学类专业教学指导分委员会提出的工科理论力学教学大纲并结合新工科所要求的科学基础厚、工程能力强等人才培养目标而编写的。在体系上,仍然采用了静力学、运动学和动力学三大模块的传统格局,实践证明,采用这种体系来编写理论力学教材和进行课堂教学是科学的、有效的。理论力学既强调基础理论(如通过引入公理和以此为基础开展数学推导建立力学理论),又强调工程应用(即如何应用力学理论对各种各样的工程问题进行分析计算和设计)。由于理论力学教材不仅仅面向力学专业学生,更多的是面向工程类专业的学生和读者,

故本书加强了对典型问题规律性分析方法的研究和对工程问题的工程范式分析方法的介绍。针对工程类学生和读者的知识结构及后续专业课对该课程的主干知识的需求特点,本教材在前面 12 章除了介绍空间静力学外,重点介绍平面(静力学、运动学和动力学)理论。根据平面问题的特点,介绍易于理解的理论体系和分析方法,侧重于帮助读者理解力学原理的物理意义和如何应用力学理论解决各自领域面临的工程问题。专题部分针对空间运动学和动力学以及复杂动力学问题,运用解析几何的矢量运算来进行数学表征和公式推导。对数理基础要求较高的力学等多学时专业的学生,在掌握前面 12 章的平面问题的力学原理和分析方法基础上,重点关注空间运动与平面运动的不同之处,再开始学习专题。这样的内容安排符合由简单到复杂的循序渐进的认知规律。此外,在许多理论力学教材中,有关于机械振动基础和平衡稳定性的内容,本书没有编入这些内容,主要原因是考虑到目前理论力学课程的教学课时较少,没有时间讲授这方面的内容,而需要学习这方面知识的专业又有专门的振动理论课程。

相比于其他同类教材,本书主要特点如下。

(1) 理论与分析方法并重。该课程的典型力学问题的多种分析方法中蕴含着深刻而丰富的哲学思想和科学的研究方法,本书增加了对典型问题的多种分析方法的比较和剖析,有助于读者深刻了解各力学原理的内在联系及其优缺点,掌握理论力学发展的内在驱动力和脉络,培养独立思考和创新思维能力。

读者在“大学物理”中已学过的部分力学知识注重力学原理本身,较少研究如何应用这些原理分析复杂的工程问题。物理系的理论力学,主要是分析力学,包括拉格朗日力学和哈密顿力学以及一些专题内容。物理系的理论力学为学习电动力学、量子力学打下了基础。本书更多的是面向机械、船舶、航空航天等工程类专业的学生,而工程类专业的理论力学不仅注重力学体系,还要培养学生应用力学原理分析工程中所面临的各种复杂问题的能力,因此也注重追求高效、有规律的工程范式的分析方法,提高学生分析工程问题的能力。

理论力学在不断克服现有力学分析方法在分析某些典型力学问题时存在的不足,追求新的分析方法,是在“否定之否定”中建立起来的。对于理论力学,揭示力学原理在分析问题的缺点时,典型例题是新工科所期望的培养继承与创新能力的很好的载体。理论力学发展到分析力学的目标就是建立范式的统一分析方法,本书就是以对典型例题的多种分析方法的研究为主线,围绕该主线展开并逐步深入来安排学习内容的,主要采用启发式编写方式。即介绍新的力学理论之前,先给出典型例题,使读者发现目前所学理论在分析该问题时的不足,然后再对典型问题的多种解法进行比较和剖析,启发式地引入新的理论,从而培养学生发现问题和自主探索的能力。比如,在介绍动力学多种力学原理时,针对同一道例题,先介绍利用动量定理、动量矩定理的分析方法;然后,启发读者发现其需要引入刚体间作

用力而导致计算量大的缺点,再针对同一例题启发读者借助数学点积思想来避免引入与速度方向垂直的法向力,从而引入功率方程的分析方法来克服动量定理、动量矩定理的缺点;接着对该题稍做改动,将功率方程只能求单自由度系统中做功力的缺点通过例题暴露出来,启发读者思考哲学上动、静相互转化的思想,为克服其不足而引入动静法;再对该例题稍做改动,揭示动静法仍无法完全克服不引入任何不待求未知力的不足,启发学生再次反思动、静相互转化的哲学原理,通过功率方程求解静力学问题而引入虚功原理;之后通过例题揭示虚功原理的优缺点,再次启发读者反思动、静相互统一的哲学原理,引导读者将虚功原理和动静法结合统一起来而发现动力学普遍方程,从而实现完全不引入任何不待求未知力;最后针对动力学普遍方程需要补充复杂的运动学加速度关系方程,启发读者用所学的线性代数中的基坐标思想,发现不需补充运动学加速度关系的拉格朗日方程。如此步步深入来介绍动力学理论。

此外,本书所介绍的力学原理对人类文明进步产生了巨大的影响,是科学巨匠的创新能力的展现和结晶,一些伟大的哲学思想也与该课程的力学原理息息相关。该课程典型问题的多种分析方法中蕴含着深刻而丰富的哲学思想和科学的研究方法,故本书加强了对分析方法的研究,尽量揭示其所蕴含的哲学原理和辩证的分析方法,使读者能以例题为载体,深刻体会科学巨匠如何取得突破,同时在潜移默化的学习中培养科学的世界观和方法论,提高人文素养,提高创新思维能力。

本书理论与分析方法并重,但相对于其他传统理论力学教材,本书加强了分析方法上的介绍。

(2) 偏重于介绍同一性的求解方法,加强工程范式能力的培养。

本课程基于数学演绎(主要是对时间求导)得到简单的定理和公式,其目的就是针对各种复杂的机械运动,可以直接应用这些结论,避免每次进行机械运动的分析时又重复烦琐、复杂的数学演绎。对于工程类专业的读者,在掌握定理的同时,更重要的是学会针对各种各样的复杂机械系统运用合适的定理的分析能力。与大多数课程不同,本课程一个显著特点是分析方法灵活多样,一道题一般都有多种解法。虽然可以“条条大路通罗马”,但因为可选择的途径太多,分析时有时像进入了迷宫,绕来绕去,不知下一步路如何走,甚至回到同一点。更困难的是对于复杂题目,往往需要列出多个联立方程才能求解。但同时应用多个定理解题时,容易列出相关的方程,而它们的相关性有时很难看出来,未列出该列的方程,或列的方程数目过多,使解题困难。一些读者感到理论力学比较灵活,难以掌握。比如用功率方程和动静法列出的方程表面上不同,有时本质上是相关的,一些读者会感到困惑,因为有些教科书上并未直接说明功率方程可由动静法推导得到,功率方程本质上也是一个力/力矩方程。鉴于此,对于主要关注应用力学原理解决工程问题的工程类专业学生来说,面对各种各样的复杂机械系统,其追求分析方法的同一性的愿

望,可能更为强烈。

本书以典型例题为载体,在一题多解的剖析中,偏重引导读者追求同一性的求解方法。理论力学所研究的客观物理世界具备多样性和同一性,为追求解题方法的同一性提供了可能。此外,从理论力学发展到分析力学,其目标就是建立范式的统一分析方法,本书也偏重于介绍同一性的求解方法,故在每一章,通过对典型例题的不同方法的剖析,引导读者归纳总结出一般规律性的分析方法。

(3) 动力学是学习理论力学的难点,相对于其他理论力学教材,本书在分析复杂动力学问题之前,首先引入自由度的概念,然后基于自由度对众多分析方法间的内在联系和差异给出了较深刻的分析,给出了基于自由度选择合适分析方法的判据和选择合适方法后基于自由度建立相应方法(比如动静法、功率方程)的统一分析格式,使读者能有规律地分析复杂的动力学问题。

(4) 增加了一些新的知识点。① 增加了多接触面摩擦静平衡问题的数学有解性分析法;② 刚体的速度瞬心在动力学分析中有重要的作用,因此在第7章,增加了运动学速度瞬心的加速度特点研究,并推导了两个在任意连续曲面的刚体做平面相对运动的接触点加速度关系;③ 在动力学有关章节,给出了如何才能应用简约式动量矩定理、功率方程和惯性力简化点的简单判据;④ 对于单自由度振动系统,增加了弹簧静变形和重力项在运动微分方程中消失的条件证明,为后续“机械振动”等课程采用简便方法计算势能、求固有频率等重要问题提供了简明判据。

由于理论力学教材更多的是面向工程类专业的学生和读者,故本书主要面向工程类中等学时的专业,遵循由浅入深的编排方式,希望读者能从中较容易地体会到力学原理的优美和简洁,并能轻松地掌握该课程的主干知识。对该课程要求较高的多学时专业,可参考其他相关教材或学完前12章后再阅读专题内容。

本书编写成员有郑慧明、何锟、杨汉文、刘军华、江雯、张雄、匡健、杨洪武、代胡亮、赵高煜、陈贻平、魏俊红。本书是为了适应新的教学安排,在何锟教授编写的《理论力学》(第一版)基础上改编的,部分习题取自华中科技大学理论力学教研室原来编写的《理论力学学习题集》,这些习题是经过多年积累形成的。中国科学院大学雷献奇博士根据自己在华中科技大学学习理论力学课程及该课程对其研究工作的帮助的切身体会,审阅了全稿,并提出了很多宝贵意见。华中科技大学能源学院彭夏尧、材料学院李智宇、机械学院章狄等一些学生从自身学习该课程的角度,对本书部分例题的解题方法和难点阐述方面提出了很多有价值的建议。在此向他们表示衷心的感谢。

还要感谢华中科技大学将本书列入“百门精品课程教材建设计划”,感谢教育部专家组将本书列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,感谢华中科技大学出版社的领导和编辑为本书出版所付出的辛勤劳动。

由于笔者水平所限,书中缺点和错误在所难免,衷心希望读者批评和指正,使本书不断完善。

扫右边二维码可下载课后习题参考答案及文字大题自动批改软件。



华中科技大学理论力学教研室

2018年3月

目 录

绪论	(1)
第1章 静力学公理和物体的受力分析	(8)
1.1 基本概念	(8)
1.2 静力学公理	(10)
1.3 力系的等效	(12)
1.4 平面力矩和平面力偶	(13)
1.5 约束与约束力	(15)
1.6 受力分析与受力图	(18)
习题	(24)
第2章 平面力系的简化和平衡	(29)
2.1 力的合成与分解	(29)
2.2 平面汇交力系	(30)
2.3 平面力偶系	(32)
2.4 平面任意力系	(33)
2.5 物系的平衡、静定与超静定问题	(39)
2.6 简单平面静定桁架	(53)
习题	(60)
第3章 摩擦	(66)
3.1 滑动摩擦	(66)
3.2 滚动摩擦	(71)
3.3 多接触面带摩擦力的平衡问题	(73)
习题	(81)
第4章 空间力系的简化和平衡	(84)
4.1 空间汇交力系	(84)
4.2 空间力矩理论	(86)
4.3 空间力偶理论	(88)
4.4 空间任意力系的简化	(90)
4.5 空间任意力系的平衡	(92)
习题	(99)

第5章 点的运动学和刚体的基本运动	(104)
5.1 运动学的基本概念.....	(104)
5.2 点的运动方程描述方法.....	(104)
5.3 动点的速度和加速度.....	(106)
5.4 刚体的平动和定轴转动.....	(109)
5.5 刚体的定点转动.....	(115)
习题	(116)
第6章 点的合成运动	(120)
6.1 点合成运动的基本概念.....	(120)
6.2 点的速度、加速度合成定理的应用	(122)
6.3 动系任意运动时速度、加速度合成定理的推导	(135)
习题	(140)
第7章 刚体的平面运动	(147)
7.1 刚体的平面运动及其分解.....	(147)
7.2 平面运动图形上任意点速度的求法.....	(148)
7.3 平面运动图形上任意点加速度的求法.....	(153)
7.4 运动学的综合应用举例.....	(168)
7.5 刚体绕平行轴转动的合成.....	(180)
习题	(181)
第8章 动力学普遍定理	(187)
8.1 质点的运动微分方程描述方法.....	(188)
8.2 动量定理.....	(189)
8.3 动量矩定理.....	(196)
8.4 动能定理积分形式.....	(209)
习题	(223)
第9章 动力学普遍定理的综合应用	(233)
9.1 约束及其分类.....	(233)
9.2 广义坐标与自由度.....	(234)
9.3 机械能守恒定律.....	(241)
9.4 功率方程.....	(246)
9.5 求一个过程的速度及位置问题.....	(261)
9.6 碰撞.....	(267)
习题	(274)

第 10 章 达朗贝尔原理	(278)
10.1 达朗贝尔原理	(279)
10.2 达朗贝尔原理的应用	(281)
习题	(302)
第 11 章 虚位移原理(虚功原理)	(307)
11.1 虚位移原理	(308)
11.2 虚位移原理的应用	(312)
小结	(324)
习题	(324)
第 12 章 动力学普遍方程及第二类拉格朗日方程	(328)
12.1 动力学普遍方程	(328)
12.2 第二类拉格朗日方程	(336)
12.3 完整系统的能量关系	(344)
12.4 结语	(348)
习题	(349)
专题 1 在极坐标、柱坐标和球坐标下点的合成运动	(353)
专题 2 质点相对运动动力学	(357)
专题 3 空间运动刚体的相对运动动量矩定理及陀螺运动	(364)
专题 4 空间运动刚体的动能	(374)
专题 5 定轴转动刚体对轴承的附加动反力	(376)
专题 6 第一类拉格朗日方程	(382)
习题参考答案	(388)
参考文献	(397)

绪 论

1. 理论力学的研究内容及其发展情况简介

理论力学(theoretical mechanics)是大部分工程技术学科的基础,也称经典力学,其理论基础是牛顿运动定律。20 世纪初建立起来的量子力学和相对论,表明经典力学所表述的是相对论力学在物体速度远小于光速时的极限情况,也是量子力学在量子数为无限大时的极限情况。速度远小于光速的宏观物体的运动,包括超音速喷气飞机及宇宙飞行器的运动,都可以用经典力学进行分析。



理论力学是研究物体机械运动的基本规律的学科。它是一般力学各分支学科的基础。理论力学所研究的对象(即所采用的力学模型)为质点或质点系时,称为质点力学或质点系力学;对象为刚体时,称为刚体力学。根据所研究问题的不同,理论力学又可分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究作用于物体上的力系的简化理论及力系平衡条件;运动学只从几何角度研究物体机械运动特性而不涉及物体的受力;动力学则研究物体机械运动与受力的关系。动力学是理论力学的核心内容。理论力学的重要分支有振动理论、运动稳定性理论、陀螺仪理论、变质量体力学、刚体系统动力学、自动控制理论等。这些内容,有时总称为一般力学。理论力学与许多技术学科直接有关,如水力学、材料力学、结构力学、机器与机构理论、外弹道学、飞行力学等,理论力学是这些学科的基础。

下面简要介绍理论力学中静力学、运动学和动力学三部分的研究内容及其发展历史。

静力学(statics)研究质点系受力作用时的平衡规律。平衡是指质点系相对于惯性参考系保持静止的状态。静力学一词是法国数学家、力学家皮埃尔·伐里农于 1725 年引入的。按研究对象的不同,静力学可分为质点静力学、刚体静力学、流体静力学等;按研究方法的不同可分为几何静力学(或初等静力学)和分析静力学。

几何静力学是基于力矢量的概念,主要研究作用于刚体上的力系平衡,故这一部分又称为刚体静力学,处理的是力、力矩等矢量的几何关系。几何静力学从静力学公理出发,通过推理得出力系平衡应满足的条件,即平衡条件;这用数学方程表示,就形成平衡方程。静力学中关于力系简化和物体受力分析的结论,也可应用于动力学。借助达朗贝尔原理,可将动力学问题转化为静力学问题。分析静力学基于功和能量标量的概念,不仅仅研究刚体而且研究任意质点系(包括变形体、流体)的平衡问题,给出质点系平衡的充分必要条件(虚功原理)。分析静力学是拉格朗

日提出来的,它以虚位移原理为基础,以分析的方法为主要研究手段,建立了任意力学系统平衡的一般准则,因此,相对于几何静力学,分析静力学的方法是一种更为普遍的方法。本书前面部分介绍几何静力学,再介绍动力学,最后再介绍分析静力学。

静力学从公元前3世纪开始发展,公元16世纪伽利略奠定了动力学基础,这期间经历了西欧奴隶社会后期、封建时期和文艺复兴初期。农业、建筑业的要求,以及同贸易发展有关的精密测量的需要,推动了力学的发展。人们在使用简单的工具和机械的基础上,逐渐总结出了力学的概念和公理。例如,从滑轮和杠杆中得出力矩的概念,从斜面得出力的平行四边形法则等。阿基米德是使静力学成为一门真正学科的奠基者。他在关于平面图形的平衡和重心的著作中,创立了杠杆理论,并且奠定了静力学的主要原理。阿基米德得出的杠杆平衡条件是,若杠杆两臂的长度同其上的物体的质量成反比,则此二物体必处于平衡状态。阿基米德是第一个使用严密推理求出平行四边形、三角形和梯形物体的重心位置的人,他还应用近似法,求出了抛物线段的重心。著名的意大利艺术家、物理学家和工程师达·芬奇是文艺复兴时期首先跳出中世纪烦琐科学的人中的一个,他认为运用实验和数学方法解决力学问题有巨大意义。他应用力矩法解释了滑轮的工作原理,应用虚位移原理的概念分析了起重机构中的滑轮和杠杆系统;研究了物体的斜面运动和滑动摩擦阻力,首先得出了滑动摩擦阻力同物体的摩擦接触面的大小无关的结论。对物体在斜面上的力学问题的研究,最有功绩的是斯蒂文,他得出并论证了力的平行四边形法则。静力学一直到皮埃尔·伐里农提出了著名的伐里农定理(合力矩定理)后才完备起来。伐里农定理和潘索力多边形原理是图解静力学的基础。图解静力学是用作图方式求解问题的一种方法,所得结果的精确度虽不如解析法,但能迅速得出一目了然的答案,故在简单的工程结构的设计中也常采用。用此法进行设计,便于随时调整原始数据和快速找出计算过程中的错误,并可用于比较几种设计方案的长处和短处。对于复杂的工程结构,几何静力学常用解析法,即通过平衡条件式用代数的方法求解未知约束反作用力。本书主要介绍解析法。

分析静力学是意大利数学家、力学家拉格朗日提出来的,他在大型著作《分析力学》中,根据虚位移原理,用严格的分析方法叙述了整个力学理论。荷兰学者斯蒂文(16世纪)提出的著名的“黄金定则”,是虚位移原理的萌芽。这一原理的现代提法是瑞士学者约翰·伯努利于1717年提出的,而应用这个原理解决力学问题的方法的进一步发展和对它的数学研究却是拉格朗日的功绩。

我国古代科学家对静力学有着重大的贡献。春秋战国时期,伟大的哲学家墨翟(公元前5世纪至公元前4世纪)在他的代表作《墨经》中,对杠杆、轮轴和斜面做了分析,并明确指出“衡……长重者下,短轻者上”,提出了杠杆的平衡原理。

运动学(kinematics)运用几何学的方法来研究物体的运动,通常不考虑力和

质量等因素的影响。用几何方法描述物体的运动必须确定一个参照系,因此,单纯从运动学的观点看,对任何运动的描述都是相对的。这里,运动的相对性是指经典力学范畴内的,即在不同的参照系中时间和空间的量度相同,和参照系的运动无关。不过当物体的速度接近光速时,时间和空间的量度就同参照系有关了。这里的“运动”指机械运动,即物体位置的改变,从几何的角度考虑,即不涉及物体本身的物理性质和加在物体上的力。任何一个物体,如车子、火箭、星球等等,不论其尺寸大小,假若能够忽略其内部的相对运动,假若其内部的每一部分都朝相同的方向、以相同的速度移动,那么,可以简易地将此物体视为质点,将此物体的质心的位置当作质点的位置。在运动学里,这种质点运动,不论是直线运动还是曲线运动,都是最基本的研究对象。运动学主要研究点和刚体的运动规律。点是指没有大小和质量、在空间占据一定位置的几何点。刚体是指没有质量、不变形、但有一定形状、占据空间一定位置的形体。运动学包括点的运动学和刚体运动学两部分。掌握了这两类运动,才可能进一步研究变形体(弹性体、流体等)的运动。在变形体研究中,需把物体中微团的刚性位移和应变分开,这些都随所选的参照系不同而异。而刚体运动学还要研究刚体本身的转动过程、角速度、角加速度等更复杂的运动特征。刚体运动按运动的特性又可分为刚体的平动、刚体定轴转动、刚体平面运动、刚体定点转动和刚体一般运动。运动学为动力学、机械原理(机械学)提供理论基础,也包含自然科学和工程技术很多学科所必需的基本知识。

运动学在发展的初期,从属于动力学,随着动力学而发展。在古代,人们通过对地面物体和天体运动的观察,逐渐形成了物体在空间中的位置变化和时间的概念。在我国战国时期,《墨经》中已有了关于运动和时间先后的描述。亚里士多德在《物理学》中讨论了落体运动和圆周运动,已有了速度的概念。伽利略发现了等加速直线运动中,距离与时间的二次方成正比的规律,建立了加速度的概念。在对弹射体运动的研究中,他得出抛物线轨迹,并建立了运动(或速度)合成的平行四边形法则,伽利略为点的运动学奠定了基础。在此基础上,惠更斯在对摆的运动和牛顿在对天体运动的研究中,各自独立地提出了离心力的概念,从而发现了向心加速度与速度的二次方成正比、同半径成反比的规律。18世纪后期,由于天文学、造船业和机械业的发展和需要,欧拉用几何方法系统地研究了刚体的定轴转动和刚体的定点运动问题,提出了后人用他的姓氏命名的欧拉角的概念,建立了欧拉运动学方程和刚体有限转动位移定理,并由此得到了刚体瞬时转动轴和瞬时角速度矢量的概念,深刻地揭示了这种复杂运动形式的基本运动特征。所以欧拉可称为刚体运动学的奠基人。此后,拉格朗日和英国数学家哈密顿引入了广义坐标、广义速度和广义动量,为在多维位形空间和相空间中用几何方法描述多自由度质点系统的运动开辟了新的途径,促进了分析动力学的发展。19世纪末以来,为了适应不同生产需要,可完成不同动作的各种机器相继出现并广泛应用,于是,机构学应运而

生。机构学的任务是分析机构的运动规律,根据需要实现的运动设计新的机构和进行机构的综合。现代仪器和自动化技术的发展又促进了机构学的进一步发展,提出了各种平面和空间机构运动分析和综合的问题,作为机构学的理论基础,运动学已逐渐脱离动力学而成为经典力学中一个独立的分支。本书主要介绍机构运动学。

动力学(dynamics)研究作用于物体上的力与物体运动的关系。动力学的研究对象是运动速度远小于光速的宏观物体。原子和亚原子粒子的动力学研究属于量子力学,可以比拟光速的高速运动的研究则属于相对论力学。动力学是物理学和天文学的基础,也是许多工程学科的基础。许多数学上的进展常与解决动力学问题有关,所以数学家对动力学有浓厚的兴趣。动力学的研究以牛顿运动定律为基础,牛顿运动定律的建立则以实验为依据。动力学是牛顿力学或经典力学的一部分,但自 20 世纪以来,动力学又常被人们理解为侧重于工程技术应用方面的一个力学分支。动力学的基本内容包括质点动力学、质点系动力学、刚体动力学、达朗贝尔原理等。以动力学为基础而发展出来的应用学科有天体力学、振动理论、运动稳定性理论、陀螺力学、外弹道学、变质量力学,以及正在发展中的多刚体系统动力学、晶体动力学等。质点动力学有两类基本问题:一是已知质点的运动,求作用于质点上的力,二是已知作用于质点上的力,求质点的运动。求解第一类问题只要对质点的运动方程取二阶导数,得到质点的加速度,代入牛顿第二定律,即可求得力;求解第二类问题需要求解质点运动微分方程或求积分。所谓质点运动微分方程就是把运动第二定律写成包含质点的坐标对时间的导数的方程。动力学普遍定理是质点系动力学的基本定理,它包括动量定理、动量矩定理、动能定理以及由这三个基本定理推导出来的其他一些定理。动量、动量矩和动能是描述质点、质点系和刚体运动的基本物理量。作用于力学模型上的力或力矩与这些物理量之间的关系构成了动力学普遍定理。二体问题和三体问题是质点系动力学中的经典问题。刚体区别于其他质点系的特点是其质点之间距离的不变性。描述刚体姿态的经典方法是用三个独立的欧拉角。欧拉动力学方程是刚体动力学的基本方程,刚体定点转动动力学则是动力学中的经典理论。陀螺力学的形成说明刚体动力学在工程技术中的应用具有重要意义。多刚体系统动力学是 20 世纪 60 年代以来由于新技术发展而形成的新分支,其研究方法 with 经典理论的研究方法已有所不同。达朗贝尔原理是研究非自由质点系动力学的一个普遍而有效的方法。这种方法是指在牛顿运动定律的基础上引入惯性力的概念,从而用静力学中研究平衡问题的方法来研究动力学中不平衡的问题,所以又称为动静法。本书介绍动力学的基本内容。

动力学的学科基础以及整个力学的奠定时期在 17 世纪。伽利略创立了惯性定律,首次提出了加速度的概念。与静力学中力的平行四边形法则相对应,他应用了运动的合成原理,并把力学建立在科学实验的基础上。伽利略的研究开创了为

后人所普遍使用的、从实验出发又用实验验证理论结果的研究方法。17 世纪,牛顿和德国数学家莱布尼兹建立了微积分学,使动力学研究进入了一个崭新的时代。牛顿在 1687 年出版的巨著《自然哲学的数学原理》中,明确地提出了惯性定律、质点运动定律、作用和反作用定律、力的独立作用定律。他在寻找落体运动和天体运动的原因时,发现了万有引力定律,并根据它导出了开普勒定律,验证了月球绕地球转动的向心加速度同重力加速度的关系,说明了地球上的潮汐现象,建立了十分严格而完善的力学定律体系。动力学以牛顿第二定律为核心,这个定律指出了力、加速度、质量三者间的关系。牛顿首先引入了质量的概念,把它和物体的重力区分开来,说明物体的重力是地球对物体的引力。作用和反作用定律建立以后,人们开展了质点动力学的研究。牛顿的力学工作和微积分工作是不可分的。从此,动力学就成为一门建立在实验、观察和数学分析之上的严密学科,从而奠定了现代力学的基础。17 世纪,惠更斯通过对摆的观察,得到了地球重力加速度,建立了摆的运动方程。惠更斯又在研究锥摆时确立了离心力的概念;此外,他还提出了转动惯量的概念。牛顿定律出现 100 年后,拉格朗日建立了能应用于完整系统的拉格朗日方程。这组方程不同于牛顿第二定律的力和加速度的形式,而是用广义坐标为自变量通过拉格朗日函数来表示的。拉格朗日体系研究某些类型问题(例如小振荡理论和刚体动力学)比牛顿定律更为方便。18 世纪,欧拉引入了刚体的概念,把牛顿第二定律推广到刚体,他应用三个欧拉角来表示刚体绕定点转动的角位移,又定义转动惯量,并导出了刚体定点转动的运动微分方程。这样就完整地建立了描述具有六个自由度的刚体普遍运动方程。对于刚体来说,内力所做的功之和为零。因此,刚体动力学就成为了研究一般固体运动的近似理论。1755 年,欧拉又建立了理想流体的动力学方程;1758 年,约翰·伯努利的儿子丹尼尔·伯努利得到了关于沿流线的能量积分(称为伯努利方程);1822 年,纳维得到了不可压缩性流体的动力学方程;1855 年,法国希贡纽研究了连续介质中的激波。这样动力学就渗透到各种形态物质的领域中去。例如,在弹性力学中,由于研究碰撞、振动、弹性波传播等问题的需要而建立了弹性动力学,它可以用于研究地震波的传动。理论力学发展的重要阶段是建立了解非自由质点系力学问题的较有效方法。虚位移原理表示了质点系平衡的普遍条件。法国数学家达朗贝尔提出的、后来以他本人名字命名的原理,与虚位移原理结合起来,可以得出质点系动力学问题的分析解法,由此产生了分析力学。19 世纪,哈密顿用变分原理推导出了哈密顿正则方程,此方程是以广义坐标和广义动量为变量,用哈密顿函数表示的一阶方程组,其形式是对称的。用正则方程描述运动所形成的体系,称为哈密顿体系或哈密顿动力学,它是经典统计力学的基础,又是量子力学借鉴的范例。哈密顿体系适用于摄动理论,例如天体力学的摄动问题,并对理解复杂力学系统运动的一般性质有重要作用。拉格朗日动力学和哈密顿动力学所依据的力学原理与牛顿的力学原理,在经典力

学的范畴内是等价的,但它们研究的途径或方法则不相同。直接运用牛顿方程的力学体系有时称为矢量力学;拉格朗日和哈密顿的动力学则称为分析力学。在目前所研究的力学系统中,需要考虑的因素逐渐增多,例如,变质量、非整、非线性、非保守及反馈控制、随机因素等,使运动微分方程越来越复杂,可正确求解的问题越来越少,许多动力学问题都需要用数值计算法近似地求解,微型、高速、大容量的电子计算机的应用,解决了复杂计算的问题。目前动力学系统的研究领域还在不断扩大,例如增加热和电等成为系统动力学;增加生命系统的活动成为生物动力学等,这都使得动力学在深度和广度两个方面有了进一步的发展。

2. 理论力学的任务

以牛顿运动定律为基础演化、发展而成的力学知识体系称为牛顿力学或经典力学,理论力学是经典力学的基础部分,它研究质点、质点系或物体在力的作用下做机械运动的基本规律。所谓机械运动,就是指物体之间在空间的相对位置随时间的变化。所谓力,是质点、质点系或物体之间的相互机械作用,这种作用使质点、质点系或物体的运动状态发生改变。理论力学研究力与机械运动改变之间的一般规律,物体的平衡(例如相对于地球静止、匀速直线运动)是机械运动的特殊情况,所以理论力学也研究物体的平衡规律,但应该指出,在宇宙中没有绝对的平衡,一切平衡都是相对的和暂时的。

由于质点和质点系是力学研究的最基本物质模型,因此,从知识体系上讲,理论力学中的力学定律、定理和基本方程适用于所有其他力学分支,是整个力学的重要基础,学习理论力学是学习和研究力学的起点。

物体的机械运动是生活和工程中最常见的运动,也是最简单的一种物质运动形式。在机械、航空航天、土木、交通、电力等重要工程领域中,需要解决大量的力学问题,其中大部分问题都涉及理论力学的基本概念和基本方法,因此理论力学是现代工程技术的重要理论基础之一。它与其他专业知识结合,可以帮助我们解决实际工程技术问题,促进科学技术和社会经济的发展。作为一个工科大学生或工程技术人员,必须对此有足够的了解,很好地掌握这些理论基础,才能适应实际工作和社会发展的需要。

由于机械运动具有广泛性,所以理论力学也是工科大学生的一门重要技术基础课。它为学习后续一系列力学和其他专业课程提供基础,如材料力学、机械原理、机械设计、流体力学、弹塑性力学和振动力学等,这些课程中的理论推导和计算,都经常需要用到本书的基本原理和方法。

3. 理论力学的研究方法

理论力学是经过长期的反复实践、深化和提高,逐步归纳总结出来的一个力学知识体系,通常分为三部分,即静力学、运动学和动力学。这种体系是经过长期提炼、发展形成的,它适合理论力学知识的论述,符合人们的认知过程,有利于教学。