

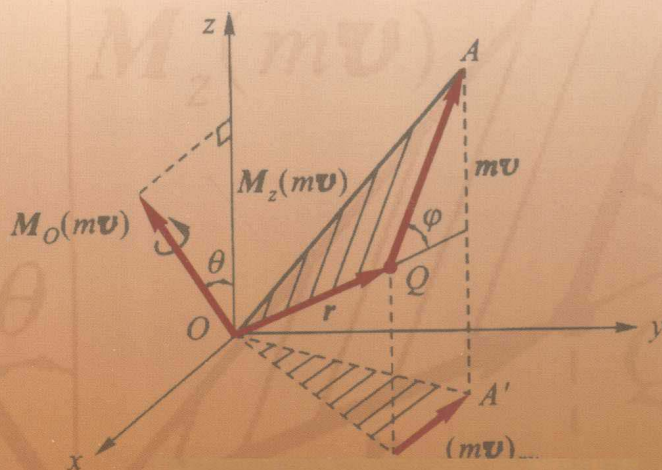


高等院校“十一五”规划教材

理论力学

L I L U N L I X U E

穆建春 龙志勤 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

理 论 力 学

穆建春 龙志勤^{*} 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

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(中学时)和全国高校中学时实际执行教学大纲情况编写,注重物理概念的阐述和解决实际力学问题能力的培养,突出针对性、适用性,努力做到理论与应用并重。全书概念严密、内容简明扼要、通俗易懂、图文配合紧密,例题和习题丰富,可满足熟练掌握基本理论、基本方法和计算技能的教学要求。

全书分为三篇,即静力学、运动学、动力学,共计十六章,每章后有小结、习题,并附有习题答案。

本书可作为高等院校土建、机械、材料、化工、水利、交通、冶金、采矿等专业本科教材,也可作为土建、机械、材料等专业高职高专教材,还可供函授、电大等相应专业人员以及工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 穆建春, 龙志勤主编. —北京: 中国石化出版社, 2010. 5
高等院校“十一五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5114 - 0418 - 3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 086139 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有; 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 16.75 印张 410 千字

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

定价: 30.00 元

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(中学时)和全国各高校中短学时实际执行教学大纲情况编写。可作为高等院校土建、机械、材料、化工、水利、交通、冶金、采矿等专业的本科教材,也可作为土建、机械、材料等专业高职高专教材,还可供函授、电大等相应专业人员以及工程技术人员学习和参考。

考虑到理论力学课程的特点:内容抽象、理论性强,以及学生学习理论力学课程时的被动性,本书总体上比较注重提高学生的学习兴趣,具有以下特点:

1. 理论力学是一门重要的专业技术基础课,其内容不但理论性强,而且又紧密结合工程实际。本书的理论分析严密、逻辑性强,推导方法新颖,有利于培养学生的逻辑思维能力。本书在概念的引出、理论的叙述及结论的应用中特别注重与工程实际的结合与联系,重视力学问题的数学描述,有利于培养学生的抽象思维能力。

2. 加强了基本概念、基本理论和基本方法的讲述,在基本概念的引入中注重结合工程实际,引导学生理论联系实际。

3. 本书不但吸取了现有教材的优点,为了增加学生对学习本课程的兴趣,本书还特意增加了两部分的内容:(1)每一篇开始都增加了历史渊源、科学家的小故事。历史渊源中主要表现了所在篇中基本概念、基本原理的历史背景,并强调了我国古代科学家在理论力学中的贡献,使学生对理论力学的起源和发展有一初步了解;科学家的小故事中,注重介绍了那些对理论力学有特殊贡献的历史人物以及他们对科学严谨的态度和孜孜不倦的学习精神。(2)每一篇都以一个身边的力学小问题开始,增加学生好奇心,使学生主动通过学习寻找答案,从而达到提高学生主动性的目的。最后利用本篇学习内容对此小问题作出详细的解答,由此学生可以充分体会用理论力学所学知识是能够解决实际问题的。

4. 本书在编写过程中,吸收、引用了部分国内外优秀理论力学教材的观点、例题和习题,在此谨向这些文献的作者们致以衷心的感谢。

本书由茂名学院穆建春、龙志勤主编,习会峰、王志刚、黄芹参编,在编写过程中尽心尽力,但限于编者的水平和经验,加之时间仓促,书中难免存在缺点和错误,恳请读者提出批评和指正。

编者

目 录

绪论	(1)
----------	-------

第一篇 静 力 学

第一章 静力学基本概念和物体的受力分析	(13)
第一节 静力学基本概念	(13)
第二节 静力学公理	(14)
第三节 约束和约束反力	(17)
第四节 物体的受力分析和受力图	(21)
小结	(26)
习题	(26)
第二章 平面汇交力系	(30)
第一节 平面汇交力系合成的几何法	(30)
第二节 平面汇交力系平衡的几何条件	(31)
第三节 平面汇交力系合成的解析法	(32)
第四节 平面汇交力系平衡方程及其应用	(34)
小结	(36)
习题	(37)
第三章 力矩与平面力偶系	(40)
第一节 平面问题中的力矩	(40)
第二节 力偶和力偶矩	(41)
第三节 平面力偶系的合成与平衡	(43)
小结	(45)
习题	(46)
第四章 平面任意力系	(49)
第一节 力的平移定理	(49)
第二节 平面任意力系向一点的简化·主矢和主矩	(50)
第三节 平面任意力系简化的最后结果·合力矩定理	(52)
第四节 平面任意力系的平衡条件与平衡方程	(54)
第五节 静定和静不定问题·物体系统的平衡	(58)
第六节 平面静定桁架的内力分析	(63)
小结	(65)
习题	(66)
第五章 摩擦	(70)
第一节 滑动摩擦	(70)
第二节 考虑摩擦时的平衡问题	(73)
第三节 滚动摩擦	(76)

小结	(77)
习题	(78)
第六章 空间力系	(80)
第一节 力在空间直角坐标轴上的投影	(80)
第二节 空间汇交力系的合成与平衡	(81)
第三节 力对点之矩矢与力对轴之矩	(83)
第四节 空间力偶	(86)
第五节 空间任意力系向已知点的简化·主矢与主矩	(88)
第六节 空间任意力系的平衡条件与平衡方程	(91)
第七节 平行力系中心·重心和形心	(95)
小结	(101)
工程实例	(101)
习题	(105)

第二篇 运 动 学

第七章 点的运动	(112)
第一节 点的运动的矢量表示法	(112)
第二节 点的运动的直角坐标表示法	(113)
第三节 点的运动的自然坐标表示法	(117)
小结	(123)
习题	(124)
第八章 刚体的运动	(127)
第一节 刚体的平行移动	(127)
第二节 刚体的定轴转动	(129)
第三节 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	(131)
小结	(134)
习题	(134)
第九章 点的合成运动	(137)
第一节 绝对运动、相对运动和牵连运动	(137)
第二节 点的速度合成定理	(139)
第三节 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	(143)
第四节 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	(144)
小结	(149)
习题	(150)
第十章 刚体的平面运动	(153)
第一节 刚体平面运动的概念	(153)
第二节 刚体的平面运动方程·平面运动分解为平动和转动	(154)
第三节 求平面图形内任一点的速度的合成法	(156)
第四节 求平面图形内任一点的速度的瞬心法	(158)
第五节 求平面图形内任一点的加速度的合成法	(161)

小结	(164)
工程实例	(164)
习题	(167)

第三篇 动 力 学

第十一章 质点运动的微分方程	(174)
第一节 动力学的基本定律	(174)
第二节 质点运动的微分方程	(175)
第三节 质点动力学的第一类基本问题	(177)
第四节 质点动力学的第二类基本问题	(178)
小结	(181)
习题	(181)
第十二章 动量定理	(185)
第一节 动量和冲量	(185)
第二节 动量定理	(187)
第三节 质心运动定理	(191)
小结	(195)
习题	(196)
第十三章 动量矩定理	(199)
第一节 动量矩	(199)
第二节 动量矩定理	(200)
第三节 刚体绕定轴转动的微分方程	(203)
第四节 刚体的转动惯量	(206)
第五节 刚体的平面运动微分方程	(209)
小结	(212)
习题	(214)
第十四章 动能定理	(218)
第一节 力的功	(218)
第二节 动能	(221)
第三节 动能定理	(222)
第四节 功率	(227)
第五节 势力场的概念·机械能守恒定理	(229)
第六节 动力学普遍定理综合应用	(232)
小结	(235)
习题	(236)
第十五章 达朗贝尔原理	(239)
第一节 惯性力	(239)
第二节 质点的达朗贝尔原理	(240)
第三节 质点系的达朗贝尔原理	(241)

第四节 刚体惯性力系的简化	(242)
小结	(245)
习题	(246)
第十六章 虚位移原理	(249)
第一节 约束和约束方程	(249)
第二节 虚位移	(250)
第三节 理想约束	(251)
第四节 虚位移原理	(252)
小结	(255)
工程实例	(255)
习题	(258)
参考文献	(260)

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学科。

所谓物体的机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。例如，河水的流动，车船的行驶，机器的运转，建筑物的振动，日、月、星辰的运行，等等，都是机械运动。

运动是物质存在的形式，是物质的固有属性，物质的运动包括宇宙中发生的一切变化和过程。因此物质的运动形式是多种多样的。除机械运动之外，物质的声、光、热、磁等物理现象，化学变化，生命过程，以及人类的思维活动等都是物质的运动形式。在多种多样的运动形式中，机械运动是物质运动中最简单的一种形式，也是日常生活和工程实际中最常见的一种运动，因而力学是发展最早的自然科学之一。可见，力学的研究具有很现实的指导意义。

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。古典力学研究的是速度远小于光速的宏观物体的运动规律。而相对论力学研究的是速度接近于光速的物体的运动规律，量子力学研究的是微观粒子的运动规律。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。工程技术问题中所研究的对象一般都是宏观物体，而且其运动的速度也远低于光速，有关它们的力学问题，仍然可以用古典力学来解决。应用古典力学解决力学问题，不仅方便，而且能够保证足够的精确性，所以古典力学至今仍有很大的实用意义，并且还在不断发展。

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、动力学三部分。

静力学——研究物体受力平衡时，作用在物体上的力系所应满足的条件；同时也研究物体的受力分析方法，以及力系的简化方法等。

运动学——研究物体运动的几何性质（如轨迹、速度和加速度等），而不研究引起物体运动的物理原因。

动力学——研究物体运动的变化与作用在物体上的力之间的关系。

2. 学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的专业技术基础课。

理论力学是现代工程技术的重要基础理论之一。无论是工程结构、机械与电气设备、控制与自动化、航空与航天技术等技术科学都需要理论力学的知识。因此，工程技术人员必须掌握一定的理论力学知识，才能为解决有关的工程技术问题打下基础，才能掌握当今不断出现的新理论、新技术，从而解决现代工程技术提出的新问题。

理论力学是研究力学中最普遍、最基本规律的一门学科。很多工程专业的课程，例如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、振动理论以及许多专业课程等，都要以理论力学为基础，因此，理论力学是学习一系列后续课程的重要基础。另外，随着现代科学技术的发展，力学的研究内容已渗入到其他学科领域，形成了许多边缘学科，例如生物力学、电磁流体力学、爆炸力学、物理力学等。这些新兴学科的建立都必须以坚实的理论力学知识为基础。

学习理论力学也有助于树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,为今后解决生产实际问题,从事科学研究工作打下基础。

3. 理论力学的研究方法

任何一门学科,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。理论力学也必须遵循这个正确的认识规律进行研究和发 展。概括地说,理论力学的研究方法是从观察、实践出发,经过抽象化、综合和归纳,建立概念和公理或定律,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,然后再回到实践中去解决实际问题并验证理论的正确性。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的;也只有这样的理论,才有实际指导意义。

阅读材料:力学发展的回顾与前瞻

力学原本是物理学的一个分支,物理科学的建立则是从力学开始的。历史上,人们曾用纯粹力学理论解释机械运动以外的各种形式的运动,如热、光、分子和原子内的运动等。当物理学摆脱了这种机械(力学)的自然观而获得健康发展时,力学则在工程技术的推动下按自身逻辑进一步演化,逐渐从物理学中独立出来。从古希腊的阿基米德(约公元前287~公元前212年)初步建立静力学的基础开始,力学经历了漫长的发展过程。力学的产生和发展与人们认识世界及改造世界的过程紧密联系,认识世界是力学产生的源泉,改造世界的客观需要是力学发展的动力,生产发展又为力学的发展提供了研究的工具和对象。下面阐述力学发展的基本历史与现状并展望其未来,以揭示力学发展和社会发展的辩证关系。

一、力学发展的历史回顾

1. 学科基本分类体系

力学被定义为研究物质机械运动规律的科学。通常理解力学以研究宏观的对象为主,但由于科学的相互渗透,有时也涉及宏观和细观甚至微观各层次中的对象以及有关的规律。机械运动亦即力学运动,是物质在时间、空间中的位置变化,包括移动、转动、流动、变形、振动、波动、扩散等,而静止或平衡则是其中的一种特殊情况。机械运动是物质运动的最基本形式。物质运动还有其他形式,如热运动、电磁运动、原子及其内部的运动和化学运动等等。机械运动并不能脱离其他运动独立存在,只是在研究力学问题时,突出地考虑机械运动;如果其他运动对机械运动有较大影响,或者需要考虑它们之间的相互作用,便会在力学同其他学科之间形成交叉学科或边缘学科。力是物质之间的一种相互作用,机械运动状态的变化是由这种相互作用引起的。静止和运动状态不变,都意味着各作用力在某种意义上的平衡。

现代力学内容非常丰富,分支众多,按研究对象的运动状态和受力状态可粗分为静力学、运动学和动力学三大部分,按研究对象的性质又可粗分为固体力学、流体力学和一般力学三个分支。这三个主要分支在发展过程中因对象或模型的不同又出现一些分支学科和研究领域。属于一般力学的有理论力学、分析力学、外弹道学、振动理论、刚体力学等。属于固体力学的有材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、散体力学、断裂力学等。属于流体力学的有水力学、水动力学、空气动力学、气体动力学、多相流体力学、渗流力学等。各分支间的交叉又产生了黏弹性理论、流变学等。力学在工程技术方面的应用又形成了工程力学或应用力学的各种分支,如土力学、岩石力学、爆炸力学、复合材料力学等。力学和其他基

础科学的结合也产生了一些交叉性的分支,如天体力学、物理力学、生物力学、生物流变学、地质力学、地球流体力学等。

2. 社会发展与力学的沿革

(1) 经典力学的起源与建立

在阿基米德生活的年代之前几千年,人们就开始用杠杆、斜面、滑轮、重心等为生产实践服务。如在埃及第十九王朝底比斯伊普伊墓中的壁画中就有桔槔汲水图,这种中国称之为桔槔的灌溉器械,整体应用了杠杆知识,尖底水桶应用了重心变化的知识,入水时自动倾斜,水满时自动垂直。我国西安半坡遗址(公元前3000多年)出土的汲水壶也是尖底的形式。在埃及的胡夫金字塔的建造过程中已使用了滑轮组、斜面。和其他科学学科一样,力学中最简单、最基础的知识,最早起源于对自然现象的观察和在生产劳动中的经验。在长期观察和经验积累的基础上,逐渐形成一些概念,然后对一些现象的规律进行描述。我国的《墨经》(公元前4~公元前3世纪)中涉及外力的概念、杠杆平衡、浮力、强度和刚度的叙述。在亚里士多德(公元前384~公元前322年)的著作中有关于杠杆平衡的见解。阿基米德对杠杆平衡、物体重心位置、物体在水中受到的浮力等作了系统的研究,确定了它们的基本规律。他在研究杠杆平衡、平面图形重心位置时,先建立一些公式,而后用数学论证的方法导出一些定理。成果之一是用类似求和再取极限的方法,求出一个抛物线和它们两平行弦(与抛物线斜交)所围成平面图形面积的重心位置。他关于杠杆的公式之一是:不等距的等重不能平衡,杠杆将向距离较大的一侧倾斜。得出杠杆平衡条件是两臂长度同其上的物体重量成反比。这就是静力平衡的几何学方法的开端,经一千年的发展后演化为力矩表达的平衡条件。

古代对机械运动的描述只限于匀速直线和匀速圆周运动,亚里士多德认为行星轨道应是圆,托勒密在《天文学大成》(公元140年左右)的地心说中,认为太阳绕地球作匀速圆周运动,行星又绕太阳作匀速圆周运动,亚里士多德在《论天》中认为,体积相同的两物体,重者下落比较快。

古希腊以后,欧洲和西亚、南亚地区由于农奴制或宗教的束缚,在近2000年中生产停滞不前,力学的发展几乎停顿。在欧洲中世纪一千多年里,宗教势力为了维护教会的统治地位,刻意选择古人学说中有利于巩固宗教统治的内容,把它们绝对化、神化,不容违反,用以愚弄人民。同时把提出不同观念的学者一律视为异教徒,横加迫害。托勒密的地心说,亚里士多德的两个相同体积的自由落体,重者下落比轻者快的观点一直被奉为信条。

随着生产的发展,资本主义生产关系在欧洲封建社会内部逐渐形成和发展起来。和资产阶级的经济、政治相适应,十四、十五世纪以来,欧洲文化上也出现了新的运动。它的主要内容就是人文主义思想:反对中世纪的神学世界观,摆脱教会对人们的思想束缚,冲破各种神学的或经院哲学的传统教条。这个以文艺复兴为名的运动给欧洲的科学技术发展带来了勃勃生机。F. 培根所倡导的实验科学开始兴起,技术上工匠传统和学者传统趋于结合。17世纪中叶,欧洲各国纷纷成立科学院。商业和航海迅速发展,航海需要天文观测,好几个国家悬赏征求解决经度的测定问题,天文观测和对天体运行规律的研究受到重视。哥白尼的《天体运行论》出版(1543年)后,日心说冲击着托勒密的地心说。从力学学科本身来说,由于天体运动比地上物体的受力和运动更单纯,天文观测比当时地面上实验更便于揭示力和运动之间的关系,因此,力学中的规律往往先在天体运行研究中被发现。

17 世纪和 18 世纪是经典力学创立和完善的时期。意大利天文学家、力学家、哲学家伽利略(1564~1642 年)研究了地面上自由落体、斜面运动、抛射体运动等,建立了加速度的概念并发现了匀加速运动的规律。他采用科学实验和理论分析相结合的方法,指出了亚里士多德关于运动观点的错误,并竭力宣扬日心说。他在 1638 年出版的《关于两门新科学的谈话和数学证明》是动力学的第一本著作。他曾非正式地提出过惯性定律和外力作用下物体的运动规律,为牛顿正式提出运动第一、第二定律奠定了基础。因此,在经典力学的创立上,伽利略是牛顿的先驱。惠更斯在动力学研究中提出向心力、离心力、转动惯量、单摆的摆动中心等重要概念。开普勒总结出行星运动的三定律,牛顿(1642~1727 年)继承和发扬了这些成果,提出了物体运动三定律和万有引力定律。牛顿运动定律是就单个自由质点而言的,达朗贝尔把它推广到受约束质点的运动。J.-L. 拉格朗日进一步研究受约束质点的运动,并把结果总结在他的著作《分析力学》(1788 年出版)中,分析力学从此创立。此前,L. 欧拉建立了刚体的动力学方程(1758 年)。至此,以质点系和刚体的运动规律为主要研究对象的经典力学臻于完善。

欧拉是继牛顿之后对力学贡献最多的学者。他列出了刚体运动的运动方程和动力学方程并求得一些解;同时,对弹性稳定性作了开创性研究,并开辟了流体力学的理论分析,奠定了理想流体力学的基础,在这一时期经典力学的创立和下一时期弹性力学、流体力学成长为独立分支之间,他起着承上启下的作用。

静力学和运动学可以看作动力学的组成部分,但又具有其独立特征。它们在动力学之前产生,又可看作是动力学产生的前提。直到 19 世纪,人们才把力学明确分为静力学、运动学和动力学三个部分。

R. 胡克 1660 年在实验室中发现弹性体的力和变形之间的关系,建立了弹性体胡克定律。B. 帕斯卡指出不可压缩静止流体各向压力(压强)相同。牛顿在《自然哲学的数学原理》(1687 年出版)中指出流体阻力与速度差成正比,这是黏性流体剪应力与剪应变之间成正比关系的最初形式。1636 年 M. 梅森测量了声音的速度。R. 波意耳于 1662 年和 E. 马略特于 1676 年各自独立地建立了气体压力和容积关系的定律。所有这些,为后来的弹性力学、黏性流体力学、气体力学等学科的出现作了准备。与此同时,有关材料力学、水力学的奠基工作亦已开始。马略特在 1680 年作了梁的弯曲试验,并发现变形与外力的正比关系。丹尼尔第一、伯努利和欧拉在弹性梁弯曲试验问题中假定弯矩和曲率成正比,丹尼尔第一、伯努利还在流体力学中导出能量关系式,第一次采用水动力学一词。

(2) 19 世纪新兴的主要力学分支

19 世纪,欧洲主要国家相继完成了产业革命。以机器为主体的工厂代替手工业。大机器生产对力学提出了更高的要求。各国加强了科学研究机构。在建立了经典力学之后,物理学的前缘逐渐移向热力学和电磁学。能量守恒和转换定律的确立开始冲击机械的(即力学的)自然观。客观现实社会环境促进了力学在工程技术和应用方面的发展。同时,一些学者又竭力实现力学体系的完善化,把力学和当时蓬勃发展的数学理论广泛地结合起来,促使力学原理的应用范围从质点系、刚体扩大到可变形的固体和流体,而前一历史时期取得的研究成果则为此准备了条件。弹性固体和黏性流体的基本方程的建立,标志着力学从物理学中走出来。19 世纪力学的主要分支都完成了建立过程。

19 世纪固体方面的力学发展,除了材料力学更趋完善,随着大型复杂工程结构的出现,逐渐发展出解决杆件系统问题的结构力学之外,主要是数学弹性力学的建立。材料力学、结

构力学与当时的土木建筑、机械制造、交通运输等密切相关,而弹性力学在当时很少有直接的应用背景,主要是为探索自然规律而作基础研究。

这一时期内有关流体方面的力学发展情况类似于固体方面,在实践的推动下水力学发展出不少经验或半经验公式;另一方面在数学理论上,最主要的进展是黏性流体运动基本方程,即纳维-斯托克斯方程。纳维在1821年发表了不可压缩黏性流体运动方程。1831年泊松第一次完整地给出黏性流体的本构关系。G. G. 斯托克斯在1845年得到了黏性流体运动基本方程。但对非牛顿流体的研究,无论从理论上或实际上,只是到了20世纪40年代才有发展。

在可压缩流体或气体的力学方面,根据实验发现了不少基本规律。圣维南在1839年给出气体通过小孔的计算公式。在声学理论方面,除了瑞利的弹性振动理论外,气体的波动理论也有很大的发展。对于超音速流动,E. 马赫在1887年开始发表关于弹丸在空气中飞行实验的结果,提出流速与声速之比这个无量纲数,后来这个参数被称为马赫数(1929年),兰金和P. H. 许贡纽分别在1870年和1887年考虑了一维冲击波(激波)前后压力和密度的不连续变化规律。

O. 雷诺在1883年用管道实验研究了流体从层流到湍流的过渡,以及流动失稳问题。他在实验中指出了流动的动力相似定律,以及在其中起关键作用的一个无量纲数,即雷诺数。此外雷诺还开始了湍流理论的艰难研究。

兰姆在其《流体运动数学理论》(1878年)中总结了19世纪流体动力学的理论成就。但是,实用中出现的许多流体力学问题还得依靠水力学中经验或半经验公式。

分析力学方面的主要成就是由拉格朗日力学发展为以积分形式变分原理为基础的哈密顿力学。积分形式变分原理的建立对力学发展,无论在近代或现代,无论在理论和应用上,都具有重要的意义。哈密顿的另一贡献是正则方程和正则变换,它们为力学运动方程的求解提供了途径。牛顿、拉格朗日和哈密顿的力学理论构成物理学中的经典力学部分。

1864年,海王星的发现先经计算做出预言,而后用观察证实,推动了天体力学的研究。H. 庞加莱对三体问题研究的成果不仅推动了力学稳定性理论、摄动理论的发展,也促进了数学拓扑学、微分方程定性理论两个分支的发展。E. J. 劳思, H. E. 儒科夫斯基等人解决了不少工程技术和天体力学中的其他运动稳定性问题, A. M. 里雅普诺夫的著作《运动稳定性的一般问题》(1892年)直到20世纪中叶仍有意义。

在应用方面,大机器的发展提出大量与机器传动有关的运动学、动力学问题,并得到了解决,逐步形成现在的机械原理等学科。

(3) 近代力学的发展

从1900年到1960年被称之为近代力学时期。20世纪上半叶,物理学发生巨大的变化。狭义相对论、广义相对论以及量子力学的相继建立,冲击了经典物理学。前两个世纪以力学模型来解释一切物理现象的观点(即唯力学论)退出了历史舞台。经典力学的适用范围被明确为宏观物体的远低于光速的机械运动,力学进一步从物理学中分离出来成为独立的学科。

这半个多世纪中力学发展的主要动力来自工程技术的发展。1903年莱特兄弟飞行成功,飞机很快成为交通工具;1957年人造卫星发射成功,标志着航天事业的开端。力学解决了飞机、航天器等各种飞行器的空气动力学性能问题、推进器的叶栅动力学问题、飞行稳定性和操纵性问题以及结构和材料强度等问题。在航空和航天事业的发展过程中,人们清楚地看到力学研究对于工业的先导作用。1945年第一次核爆炸成功,标志着核技术时代的开始。

力学解决了猛烈炸药爆轰的精密控制、材料在高压下的冲击绝热性能,强爆炸波的传播、反应堆的热应力等问题。此外,新型材料的出现,如混凝土、合成橡胶和塑料的制成,都向力学提供了新的课题。

这一时期力学发展有两大特点:一是力学实验规模日益扩大,需要复杂的机器设备、精密的控制测量仪表、巨大的能量和各种技术人员协同工作,例如做流体力学实验用的风洞、激波管、水洞、水池,做动态强度用的振动台离心机等。二是应用力学的影响遍及全世界,注重力学理论、力学实验和工程技术实践相结合。

这个时期固体力学的发展主要表现在材料力学、弹性力学和结构力学的理论和实际应用方面,进一步通过解决大量的工程技术问题,创立了塑性力学和黏弹性力学。弹性力学解决了弹性波传播问题,孔附近的应力集中问题,并据此发展出复变函数处理弹性力学的一般方法,板壳理论空前发展,解决了飞机轻质蒙皮的强度、颤振、疲劳和稳定性问题,解决了薄板大挠度问题,开创了非线性曲屈理论,用张量分析建立了极为普遍的板壳理论,发展出瑞利-里兹和伽辽金法,发展了各种变分原理,建立了有限元法等等,从而使弹性力学的求解方法出现了重大突破。

塑性力学的建立是力学在 20 世纪发展中的大事。增量塑性本构关系、全量塑性本构关系的建立, R. 希尔对塑性理论的总结(50 年代), 德鲁克公设(1952 年)和以后的伊柳辛公设(1961 年)为塑性理论的建立奠定了理论基础。60 年代塑性力学解决了金属压延和结构强度等大量问题。极限设计理论的提出,显示出塑性力学在节约材料中的重大作用。在二战期间建立了塑性波理论,开辟了塑性动力学的新领域。

流体力学在 20 世纪上半叶的发展主要在空气动力学方面。空气动力学最早是由解释和计算机翼举力开始的。F. W. 兰彻斯特的《空气动力学》(1907 年)和《空气翱翔学》(1908 年)两书中,包含了举力环流理论。儒科夫斯基解决了关于二元机翼即无限翼展机翼问题。普朗特提出有限翼展的举力线理论(1918 年),这一理论成为一切中等速度飞机的设计基础。阿克莱特(1946 年)、H. W. 李普曼(1946 年)、钱学森和郭永怀(1946 年)成功地解决了跨声速飞行中的空气动力学理论问题。力学上有关理论的建立和工程上后掠机翼的采用,使跨声速飞行成为现实,力学对突破航空中的声障起了关键作用。50 年代又解决了洲际导弹、航天飞行中的飞行器在入大气层时的加热问题,产生了当前通用的烧蚀防热办法。用力学中量纲分析的方法提出的自模拟理论,以及该理论以后的发展是核爆炸技术中计算冲击波强度的主要理论根据。流体力学的其他方面,如边界层理论(在高速边界层、层流边界层和湍流边界层中)也有了重要进展。

一般力学在 20 世纪上半叶最重要的发展是非线性振动理论。另外,航空、航天事业对导航控制装置及其他机械装置的需要促进了陀螺仪和复杂刚体系统力学的研究,使刚体动力学从 19 世纪出现的纯数学领域转向工程实用。在这些方面遇到的运行稳定性课题,也都得到了解决。

二、现代力学的发展

20 世纪 60 年代以来,由于电子计算机的飞跃发展和广泛应用,由于基础科学和技术科学各学科间相互渗透和综合倾向的出现,以及宏观和微观相结合的研究途径的开拓,力学出现了崭新的发展。

计算机自 1946 年问世以来,计算速度、存储容量和运算能力飞速发展,同时计算机软件、计算方法的日新月异直接导致了计算力学的产生和发展。计算力学主要的数值方法有有

限差分方法、有限元法、变分方法、直线法、特征线法和谱方法; 计算力学既可在固体力学应用, 也可在流体力学、生物力学中应用。计算机技术、计算力学的诞生和发展改变了力学的面貌, 也改变了力学家的思想方法。过去力学中大量复杂、困难而无人敢问津的问题, 因此有了解决的门路。

现代科学学科的渗透产生了新的力学交叉分支学科。航天工程开辟人们的视野, 现代力学再度向天文学渗透。人们用磁流体力学研究太阳风在地球磁场中形成的冲击波, 用流体力学结合恒星动力学研究密度波……力学向生物学渗透——根据已经确立的力学原理来研究生物中的力学问题, 从而产生了生物力学这门崭新的学科。力学同时向地球、能源、环境、材料、海洋、安全等科学或工程渗透。

力学发展中的综合倾向主要表现在理性力学及其学派的产生上。理性力学学派试图用数学的基本概念和严格的逻辑推理研究力学中带共性的问题。

从构成物质的微观粒子(如分子、原子、电子)或者细观结构(如晶粒、分子链)的性质及其相互作用来确定材料的宏观性质(如弹性系数、热导率、比热容等), 或者解释变形或破坏机制等是力学研究中采用宏观和微观结合的方法。例如金属中的位错假说在 50 年代被实验证实, 60 年代发展成位错力学, 而用位错参数表达的奥罗万应变率公式已经通过“内变量”的桥梁进入宏观的本构关系, 沟通了宏观和微观的联系。位错理论和断裂力学分别从微观和宏观的角度突出缺陷材料性能的重要性, 两者之间有密切联系。断裂力学在 60 年代迅速发展, 是现代力学最重要的发展之一。

下面对有限元法、生物力学、断裂力学的发展作一简单介绍。

有限元法是 20 世纪 60 年代逐渐发展起来的一种以连续体离散化, 来求解力学和物理问题的数值方法。其做法是, 对要求解的力学或物理问题, 通过有限元素的划分将连续体的无限自由度离散为有限自由度, 从而基于变分原理或用其他方法将其归结为代数方程求解。有限元法不仅具有理论完整可靠, 形式单纯、规范, 精度和收敛性得到保证等优点, 而且可根据问题的性质构造适用的单元, 从而具有比其他数值解法更广泛的适用范围。但是, 为得到具体问题较为精确的计算结果, 有限元法所涉及的计算量一般都比较巨大, 一些复杂的计算需要借助于大型、甚至巨型计算机。随着计算机技术的迅猛发展, 有限元法的应用越来越广泛, 80 年代末 90 年代初, 需要借助大型计算机, 耗费大额资金才能解决的问题, 现在用个人电脑就能解决。有限元法已成为力学研究和工程技术所不可或缺的工具。

断裂力学是 20 世纪固体力学重大成就之一。1921 年 Griffith 提出了能量释放理论, 认为玻璃等一类脆性材料含有微小缺陷或裂纹, 这一类脆性材料低应力脆断是由于微小裂纹失稳扩展造成的。他指出, 一旦含裂纹物体能量释放率等于表面能, 裂纹就会失稳扩展, 导致低应力脆断。

1948 年 Irwin、Orowan、Mott 都提出了修正的 Griffith 理论, 提出将裂纹尖端塑区塑性功计入耗散能, 就能将 Griffith 理论用到金属材料。1956 年 Irwin 提出了应力强度因子理论和断裂韧性新观念, 建立了临界应力强度因子准则, 认为裂纹尖端应力强度因子达到临界值时, 裂纹就会失稳扩展, 奠定了线弹性断裂力学理论基础。1962 年, Paris 提出了疲劳裂纹扩展公式, 开辟了疲劳寿命预测的新领域。1962 年, Dugdale 提出了窄带屈服区模型, 1968 年, Rice 建立了 J 积分原理, 提出了积分的守恒性, Hutchinson, Rice 和 Rosengren 提出了弹塑性材料裂纹尖端 HRR 奇异场, 为弹塑性断裂力学奠定了理论基础。

断裂力学已成为工程材料与构件强度估算和寿命预测的重要理论基础。在断裂力学原理

指导下建立起来的平面应变断裂韧性 K_{Ic} 和 J_{Ic} 以及裂纹尖张口位移临界值 δ_{Ic} 的测定规范及相应的断裂准则,已经成为工程材料与结构设计规范的重要组成部分。“损伤容限设计”已成为航空航天结构设计的重要原理。“缺陷评定规范”和“先泄漏原理”已经用于压力容器和管道的结构设计。断裂力学的发展还激发了细观和微观断裂原理理论研究的蓬勃发展。

生物力学创立于20世纪60年代后期,其内涵是力学方法和生物学方法相结合,研究不同层次生命体(从个体到生物大分子)结构-功能的定量关系。冯元桢(Y. C. Fung)关于肺微循环的研究(1969年)提出了生物力学的独特方法学原则,这是生物力学作为一门独立的分支学科产生的标志。而应力生长关系(冯元桢假说,1983年)则是生物力学的灵魂。以细胞层面为焦点,上及组织器官,下至生物大分子的生物力学的研究是当前生物医学工程十分活跃的一个领域。

30多年来生物力学的研究对相关领域的发展起了重大的推动作用。定量解剖学、定量形态学、系统(定量)生理学、血管生物学(Vassel Biology)的形成即为其例。而正在崛起的Mechano-cytobiology(细胞生物力学)、分子生物力学和Mechano-chemicaleffect(力学化学耦合效应)等的研究,正在大力推动21世纪生命科学的进步。同时,对力学本身提出了重大挑战,并赋予古老的力学以新的生命。

另一方面,生物力学是生物工程(含生物医学工程、生物化学工程、生物技术等)的基础之一。它对21世纪生物工程的前沿,如器官-组织工程、功能生物材料、生物微系统的发展具有重要意义。正如冯元桢在论及人工器官时所说:“莱特兄弟的飞机飞上天时,并不懂得空气动力学,但如果没有空气动力学就没有‘协和’飞机,生物力学和生物工程的关系,与此仿佛。”

生物力学有许多分支,目前研究和应用较广泛的有以研究生物材料的力学性能为主要内容的生物流变学,以研究血液在心脏、动脉、微血管床、静脉中流动以及心脏心瓣的力学问题为主要内容的循环系统动力学,以研究在呼吸过程中气道内气体的流动和肺循环中血液的流动以及气血间气体的交换为主要内容的呼吸系统动力学,以及冲击损伤生物力学等等。

三、21世纪力学发展的动向

力学的发展,以往、当今、今后都一直和社会的发展、其他自然科学和技术的发展紧密联系。人们预计生命科学、材料科学和外太空技术将会在21世纪得到蓬勃发展。

随着纳米材料的产生和迅速的开发应用,纳米力学也应运而生。纳米力学主要研究100nm以下尺度上物质的行为和变化规律。物质在纳米尺度上所具有的特殊效应、微尺度效应等导致了其特异的性能和行为。人们对纳米力学行为的认识,目前主要通过试验观测和数值模拟等方法。现行主要的模拟方法有分子动力学模拟、蒙特卡罗模拟等纳米力学计算方法。一些学者提出了以量子力学为基础、多学科交叉、多层次融合发展纳米力学研究的设想。目前纳米力学主要的分支有纳米晶体力学、纳米管力学和纳米压痕力学等。纳米材料刚刚兴起,人们已在众多行业发现其广泛的用途和无可比拟的优越性。专家预计在21世纪,纳米材料将会带动材料科学蓬勃发展,使材料科学成为最有发展前景的学科之一。随着纳米材料科学的发展,纳米力学也会不断发展。同时,纳米力学的发展反过来也会促进和指导纳米材料的发展。有专家预言,21世纪是生命科学和生物工程的世纪。21世纪生物力学的发展正在经历深刻的变化。由宏观向微(细)观深入,宏观和微(细)观相结合,工程科学与生命科学相融合,已成为当今生物力学发展的主要特色。生物力学将以解决生物学与医学的基础科学问题和工程应用问题为目标,在传统力学方法难以胜任的领域(如纳米生物学)建立

新的方法，体现力学、生命科学和工程科学的交叉与融合。主要在细胞与分子生物力学、组织力学与组织工程、生物微系统和空间生命技术等方面将会有长足的发展。

随着航空和航天技术与工程的进一步发展，高温气体动力学及高超声速飞行技术的研究，微重力科学的研究将会逐渐向纵深发展。

在不少力学的分支中，到目前为止还有许多问题没有研究彻底，尚需进一步探索。如流体力学中的复杂流动过程及其规律，理性力学、塑性力学、断裂力学、损伤力学的一些问题还有待力学工作者在 21 世纪中继续研究和探索。