

高等学校教材

*Engineering Mechanics*



# 工程力学

陈传尧 编



高等教育出版社  
Higher Education Press

## 内容简介

本书的主要内容包括刚体静力学、流体静力学和变形体静力学的基本概念、基本理论、基本方法及其应用。突出力的平衡、变形的几何协调、力与变形间的物理关系这一研究主线,使学生能建立对于工程力学的清晰的整体认识。

本书共12章。第1~3章为绪论、刚体静力学基本概念与理论、静力平衡问题,属刚体静力学。第4~6章为变形体静力学基础、材料的力学性能、强度与连接件设计,结合杆的拉压阐述变形体静力学的基本概念与研究方法。第7章为流体力,容器,用刚体静力学方法研究静止流体作用在壁面上的力及容器的强度。第8~11章为圆轴的扭转、梁的平面弯曲、强度理论与组合变形、压杆的稳定,利用变形体静力学基本方法研究各种变形体力学问题。第12章为疲劳与断裂,深入浅出地介绍疲劳与断裂失效的基本概念、基本规律及现代设计控制方法,适应时代发展。

全书力求概念准确,叙述简明,主干清晰,启发思维。本书可作为高等学校各专业工程力学(48~72学时)课程教材,也可供高职高专及成人教育院校师生选用或参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程力学/陈传尧编. —北京:高等教育出版社, 2006.7

ISBN 7-04-019331-0

I. 工... II. 陈... III. 工程力学-高等学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第027488号

策划编辑 黄毅 责任编辑 张玉海 封面设计 张楠 责任绘图 朱静  
版式设计 张岚 责任校对 杨雪莲 责任印制 宋克学

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 100011  
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京人卫印刷厂

开 本 787×960 1/16  
印 张 21.75  
字 数 410 000

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landrao.com>  
<http://www.landrao.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006年7月第1版  
印 次 2006年7月第1次印刷  
定 价 25.10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 19331-00

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1.1 什么是力学 .....	1
§ 1.2 力学发展简史 .....	1
§ 1.3 力学与工程 .....	4
§ 1.4 学科分类 .....	6
§ 1.5 基本概念与基本方法 .....	7
1.5.1 力和运动 .....	7
1.5.2 研究方法 .....	8
1.5.3 工程静力学的基本研究内容 .....	9
小 结 .....	10
思考题 .....	10
<b>第二章 刚体静力学基本概念与理论</b> .....	11
§ 2.1 力 .....	12
2.1.1 力的合成(几何法) .....	12
2.1.2 力的合成(投影解析法) .....	13
2.1.3 二力平衡公理 .....	16
§ 2.2 力偶 .....	16
§ 2.3 约束与约束力 .....	19
§ 2.4 受力图 .....	22
§ 2.5 平面力系的平衡条件 .....	26
2.5.1 力的平移与力对点之矩 .....	26
2.5.2 平面一般力系的简化 .....	28
2.5.3 平面力系的平衡条件 .....	33
小 结 .....	36
思考题 .....	37
习 题 .....	39
<b>第三章 静力平衡问题</b> .....	43
§ 3.1 平面力系的平衡问题 .....	43

3.1.1	平面力系平衡问题的分析方法	43
3.1.2	静不定问题的概念	47
§ 3.2	含摩擦的平衡问题	48
3.2.1	静滑动摩擦	48
3.2.2	含摩擦的平衡问题的分析方法	50
§ 3.3	平面桁架	56
3.3.1	节点法	57
3.3.2	截面法	59
§ 3.4	空间力系的平衡问题	60
3.4.1	力在空间坐标轴上的投影	61
3.4.2	力对轴之矩	61
3.4.3	空间力系的平衡方程及其求解	63
3.4.4	重心	67
小 结		70
思考题		71
习 题		72
<b>第四章</b>	<b>变形体静力学基础</b>	<b>79</b>
§ 4.1	变形体静力学的一般分析方法	79
§ 4.2	基本假设	81
§ 4.3	内力、截面法	82
§ 4.4	杆件的基本变形	88
§ 4.5	杆的轴向拉伸和压缩	89
§ 4.6	一点的应力和应变	93
4.6.1	应力	93
4.6.2	应变	95
§ 4.7	变形体静力学分析	96
§ 4.8	应力集中的概念	101
小 结		102
思考题		104
习 题		104
<b>第五章</b>	<b>材料的力学性能</b>	<b>108</b>
§ 5.1	概述	108
§ 5.2	低碳钢拉伸应力-应变曲线	109

§ 5.3	不同材料拉伸压缩时的机械性能 .....	112
§ 5.4	真应力、真应变 .....	114
§ 5.5	应力 - 应变曲线的理想化模型 .....	116
§ 5.6	不同材料模型下力学问题的分析 .....	118
小 结	.....	122
思考题	.....	123
习 题	.....	123
<b>第六章</b>	<b>强度与连接件设计 .....</b>	<b>125</b>
§ 6.1	强度条件和安全因数 .....	125
§ 6.2	拉压杆件的强度设计 .....	127
§ 6.3	剪切及其实用计算 .....	131
§ 6.4	挤压及其实用计算 .....	135
§ 6.5	连接件的强度设计 .....	138
小 结	.....	143
思考题	.....	144
习 题	.....	145
<b>第七章</b>	<b>流体力、容器 .....</b>	<b>148</b>
§ 7.1	流体的特征及其主要物理性能 .....	148
7.1.1	流体的特征 .....	148
7.1.2	流体的主要物理性能 .....	148
§ 7.2	静止流体中的压强 .....	151
7.2.1	流体静压强 .....	151
7.2.2	静止流体内任一点的压强 .....	152
§ 7.3	作用在壁面上的流体力 .....	154
7.3.1	静止流体作用于平壁面上的压力 .....	154
7.3.2	静止流体作用于曲壁面上的压力 .....	159
§ 7.4	薄壁容器 .....	164
7.4.1	圆筒形薄壁压力容器的应力 .....	164
7.4.2	球形薄壁压力容器的应力 .....	165
7.4.3	强度条件 .....	166
小 结	.....	167
思考题	.....	168
习 题	.....	169

<b>第八章 圆轴的扭转</b> .....	172
§ 8.1 扭转的概念和实例 .....	172
§ 8.2 扭矩与扭矩图 .....	173
§ 8.3 圆轴扭转时的应力和变形 .....	177
8.3.1 圆轴扭转的应力公式 .....	177
8.3.2 极惯性矩和抗扭截面系数的计算 .....	180
8.3.3 扭转圆轴任一点的应力状态 .....	181
8.3.4 圆轴扭转时的变形 .....	183
§ 8.4 圆轴扭转的强度条件和刚度条件 .....	185
8.4.1 强度条件 .....	185
8.4.2 刚度条件 .....	185
§ 8.5 静不定问题和弹塑性问题 .....	188
小 结 .....	191
思考题 .....	191
习 题 .....	192
<b>第九章 梁的平面弯曲</b> .....	196
§ 9.1 用截面法作梁的内力图 .....	197
§ 9.2 利用平衡微分方程作梁的内力图 .....	204
9.2.1 梁的平衡微分方程 .....	205
9.2.2 梁的剪力图、弯矩图的简捷画法 .....	205
§ 9.3 梁的应力与强度条件 .....	212
9.3.1 变形几何分析 .....	213
9.3.2 材料的物理关系 .....	214
9.3.3 静力平衡条件 .....	215
9.3.4 平面弯曲时的正应力公式及强度条件 .....	217
9.3.5 矩形截面梁横截面上的切应力 .....	221
§ 9.4 梁的变形 .....	225
9.4.1 梁的挠度和转角 .....	225
9.4.2 梁的挠曲线微分方程 .....	225
9.4.3 用积分法求梁的变形 .....	226
* § 9.5 弯曲静不定问题和弹塑性问题简介 .....	233
小 结 .....	237
思考题 .....	238

习 题	239
<b>第十章 应力状态、强度理论与组合变形</b>	<b>243</b>
§ 10.1 应力状态	243
10.1.1 平面应力状态的一般分析	243
10.1.2 极限应力与主应力	244
10.1.3 广义胡克定理与应变能	248
§ 10.2 强度理论简介	250
10.2.1 关于破坏的强度理论	250
10.2.2 关于屈服的强度理论	251
§ 10.3 组合变形	254
10.3.1 拉(压)弯组合变形	255
10.3.2 弯扭组合变形	259
小 结	263
思考题	264
习 题	264
<b>第十一章 压杆的稳定</b>	<b>268</b>
§ 11.1 稳定的概念	268
§ 11.2 两端铰支细长压杆的临界载荷	269
§ 11.3 不同支承条件下压杆的临界载荷	271
§ 11.4 中小柔度杆的临界应力	275
§ 11.5 压杆的稳定计算	280
小 结	283
思考题	284
习 题	284
<b>第十二章 疲劳与断裂</b>	<b>287</b>
§ 12.1 疲劳破坏及其断口特征	287
12.1.1 什么是疲劳?	287
12.1.2 疲劳断口特征	289
§ 12.2 $S-N$ 曲线及疲劳裂纹萌生寿命预测	292
12.2.1 基本 $S-N$ 曲线	292
12.2.2 平均应力的影响	293
12.2.3 线性累积损伤理论和变幅载荷谱下的疲劳寿命	295

§ 12.3 断裂失效与断裂控制设计 .....	299
12.3.1 结构中的裂纹 .....	299
12.3.2 断裂控制参量和断裂判据 .....	300
12.3.3 断裂控制设计的基本概念 .....	303
§ 12.4 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线及疲劳裂纹扩展寿命 .....	305
12.4.1 疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ .....	306
12.4.2 疲劳裂纹扩展寿命预测 .....	308
小 结 .....	311
思考题 .....	312
习 题 .....	313
<b>附录 型钢表</b> .....	<b>315</b>
<b>部分习题参考答案</b> .....	<b>321</b>
<b>索 引</b> .....	<b>325</b>
<b>主要参考文献</b> .....	<b>331</b>
<b>Synopsis</b> .....	<b>332</b>
<b>Contents</b> .....	<b>333</b>
<b>作者简介</b> .....	<b>337</b>



# 第一章 绪论

## § 1.1 什么是力学

力学是研究物质机械运动规律的科学。世界充满着物质,有形的固体、无形的空气,都是力学的研究对象。力学所阐述的物质机械运动的规律,与数学、物理等学科一样,是自然科学中的普遍规律。因此,力学是基础科学。同时,力学研究所揭示出的物质机械运动的规律,在许多工程技术领域中可以直接获得应用,实际面对着工程,服务于工程。所以,力学又是技术科学。力学是工程技术学科的重要理论基础之一。工程技术的发展过程中不断提出新的力学问题,力学的发展又不断应用于工程实际并推动其进步,二者有着十分密切的联系。从这个意义上说,力学是沟通自然科学基础理论与工程技术实践的桥梁。

力学是研究力和(机械)运动的科学。从基于实验观察的规律和结果出发,建立假设和模型,由数学逻辑推演可对自然界物质运动的现象做出相当详尽的描述和预测。

力学是最古老的物理科学之一,可以回溯到阿基米德时代。力学探讨的问题十分广泛,研究的内容和应用的范围不断扩展,引起了几乎所有伟大科学家的兴趣。如伽利略、牛顿、达朗贝尔、拉格朗日、拉普拉斯、欧拉、爱因斯坦等。

工程力学(或应用力学)是将力学原理应用于有实际意义的工程系统的科学。其目的是:了解工程系统的性态并为其设计提供合理的规则。机械、机构、结构等如何受力,如何运动,如何变形,如何破坏?都是工程师们需要了解的工程系统的性态;只有认识了这些性态,才能够制定合理的设计规则、规范、手册,使机械、机构、结构等按设计要求实现运动、承受载荷,控制它们不发生影响使用功能的变形,更不能发生破坏。

## § 1.2 力学发展简史

力学发展史,就是人类从自然现象和生产活动中认识和应用物体机械运动规律的历史。“力”是人类对自然的省悟。人类历史有多久,力学的历史就有多久。

中国春秋时期,墨翟及其弟子的著作《墨经》中,就有关于力的概念、杠杆平衡、重心、浮力、强度和刚度的叙述。古希腊哲学家亚里士多德(Aristotle,前384—前322)的著作也有关于杠杆和运动的见解。为静力学(statics)奠定基础的是著名的古希腊科学家阿基米德(Archimedes,前287—前212)。

1687年,牛顿的著作《自然哲学的数学原理》出版,给出了运动三定律。牛顿运动定律的建立,是力学发展过程中的重要里程碑。

牛顿以后力学研究的历史大致可分为四个时期:

### (1) 17世纪初—18世纪末,经典力学(研究宏观物体的运动规律)的建立和完善

这一时期,力学在自然科学领域占据中心地位。最伟大的科学家几乎都集中在这一学科,如伽利略、惠更斯、牛顿、胡克、莱布尼兹、伯努利、拉格朗日、欧拉、达朗贝尔等。由于这些杰出科学家的努力,借助于当时取得的数学进展,使力学取得了十分辉煌的成就,在整个知识领域中起着支配作用。到18世纪末,经典力学的基础(静力学、运动学和动力学)已经建立并得到极大的完善。同时,还开始材料力学、流体力学及固体和流体的物性研究。

### (2) 19世纪,力学各主要分支的建立

19世纪,欧洲各主要国家相继完成了工业革命,大机器工业生产对力学提出了更高的要求。为适应当时土木建筑、机械制造和交通运输的发展,主要是材料力学、结构力学和流体力学得到了发展和完善。建筑、机械中出现的大量强度和刚度问题,由材料力学或结构力学计算。作为探索普遍规律而进行的基础研究,弹性力学也取得了很大的进展。

### (3) 1900—1960年,近代力学

这半个多世纪,力学的主要推动力来自以航空为代表的近代工程技术。1903年莱特兄弟飞行成功,飞机很快成为重要的战争和交通工具。1957年,人造地球卫星发射成功,标志着航天事业的开端。力学解决了各种飞行器的空气动力学性能问题、推进器动力学问题、飞行稳定性和操纵性问题及结构和材料的强度等问题。超声速飞行、航天器返回地面等关键问题,都是基于力学研究才得以解决的。由此,人们清楚地看到了力学研究对于工程技术的先导和促进作用。力学还解决了核爆炸中对猛烈炸药爆轰的精密控制、强爆炸波的传播、反应堆的热应力等重要问题。

这一时期,由古老的材料力学、19世纪发展起来的弹性力学和结构力学、20世纪前期建立理论体系的塑性力学和粘弹性力学融合而成的固体力学发展迅速,建立和开辟了弹性动力学、塑性动力学等新的领域。空气动力学则是流体力学在航空、航天事业推动下的主要发展。在固体力学、流体力学形成力学分支的同时,以质点、质点系、刚体、多刚体系统等具有有限自由度的离散系统为研究对

象的一般力学,也在技术进步的促进下继续发展。

#### (4) 1960 年以后,现代力学

20 世纪 60 年代以来,力学同计算技术和其他自然科学学科广泛结合,进入了现代力学的新时代。由于计算机技术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的相互渗透和融合,以及宏、微观相结合的研究途径的开拓,力学出现了崭新的面貌。满足工程技术要求的能力也得到了极大的增强。

自 1946 年计算机问世以后,计算速度、存储容量和运算能力迅速提高。过去力学中大量复杂、困难而使人不敢问津的问题,因此而有了解决希望。20 世纪 60 年代兴起的有限元法,发源于结构力学。一个复杂的连续体结构经离散化处理为有限单元的组合后,计算机可以对这种复杂的结构系统迅速计算出结果。有限元法一出现,就显示出无比的优越性,被广泛地应用于力学各领域甚至向传热学、电磁学等领域渗透。计算机的迅速发展,使力学除理论与实验这两种传统研究手段外,增加了第三种手段,即计算力学。不仅如此,理论与实验的某些部分也离不开计算模拟。钱学森先生曾经在中国力学学会讲过:“必须把计算机和力学工作结合起来,不然就不是现代力学,就不是现代化。”

力学与基础和技术学科间相互渗透,产生了许多新的力学生长点。例如,由冯元桢等创建的生物力学就是一个学科渗透的例证。生物力学在考虑生物形态和组织的基础上,测定生物材料的力学性能,确定其物理关系,再结合力学基本原理研究解决问题,在定量生理学、心血管系统临床问题和生物医学工程方面取得了不少成就。使人们认识到:“没有生物力学,就不能很好地了解生理学。”

材料中往往存在着大量裂隙、损伤,位错理论和断裂力学分别从微观和宏观的角度突出了缺陷材料行为的特性,两者之间的密切联系也是人们探求的问题。20 世纪 60 年代以来,断裂力学的迅速发展,改变了工程界对强度或安全设计和材料性能评价的传统观点,促进了设计技术的进步。

力学不仅有着悠久而辉煌的历史,而且随着工程技术的进步,近几十年来力学也在同样迅速地发展。力学研究的对象、涉及的领域、研究的手段都发生了深刻的变化,力学用来解决工程实际问题的能力得到极大的提高。

例如,由传统的金属材料、土木石等材料力学行为的研究,扩大到新型复合材料、高分子材料、结构陶瓷、功能材料等力学行为的研究;由传统的连续体宏观力学行为的研究,发展到含缺陷体力学,细、微观(甚至纳观)力学行为的研究;由传统的电、光测实验技术研究,发展到全息、云纹、散斑、超声、光纤测量等力学实验技术;由传统的静强度、刚度设计,发展到断裂控制设计、抗疲劳设计、损伤容限设计、结构优化设计、动力响应计算、监测与控制、计算机数值仿真、耐久性设计和可靠性设计等。

机械、结构的小型、轻量化设计和电子工业产品的小型、超大规模集成化趋

势,使力学应用的领域从传统的机械、土木、航空航天等扩大到包括控制、微电子和生物医学工程等几乎所有工程技术领域。计算机技术和计算力学的发展,给力学(尤其是应用力学)带来了更加蓬勃的生机,力学与工程结合、为工程服务的能力得到了极大的增强。计算机不仅成为辅助工程设计的有力工具,同时也是力学分析、数值计算、动态过程仿真的有力工具。力学在工程中应用的目的,除传统的保证结构与构件的安全和功能外,已经或正在向设计—制造—使用—维护的综合性分析与控制,功能—安全—经济的综合性评价,以及自感知、自激励、自适应(甚至自诊断、自修复)的智能结构设计与分析的方向延伸。

在力学学科发展的同时,还有一个十分重要的成果,那就是形成了一种“善于从错综复杂的自然现象、科学实验结果和工程技术实践中抓住事物的本质,提炼成力学模型,采用合理的数学工具,分析掌握自然现象的规律,进而提出解决工程技术问题的方案,最后再和观察或实验结果反复校核直到接近为止的科学研究方法”。培养这种科学思维和研究方法,其重要性绝不亚于获取力学知识本身。

### § 1.3 力学与工程

力学与工程是紧密相连的。工程技术的发展,不断提出新的力学问题;力学研究的发展又不断应用于工程实际并推动其进步。这里仅以力学与航空工程为例,做一简单的回顾。

人们向往能在天空自由自在地飞行。但直到 18 世纪初,除了有一些利用风筝或模拟翅膀,借助于风力的尝试外,人类自己还没有真正飞起来过。

最先开始的飞行,是气球飞行。1783 年 6 月,法国的蒙高兄弟(M. Joseph and M. Etienne)公开表演了布袋式热气球飞行。9 月,他们又表演了载有生物(羊、鸡、鸭各一)的气球飞行。12 月,罗赛亚和阿兰迪乘蒙高兄弟的热气球飞到近千米的高空。后来,又开始了氢气球载人飞行,升空高度也不断增加,直到万米高空。但高空似乎并不欢迎这些陌生的游客,严寒和缺氧夺去了一些勇敢者的生命。1875 年的一次飞行中,三人乘气球升到一万米高空,回来的幸存者仅有梯萨德(G. Tissandier)一人。

19 世纪后,蒸汽机、电动机、内燃机等动力装置得到应用。出现了用动力装置作为辅助动力,靠充填氢、氦、热空气等产生升力的飞艇。为了能将沉重的机器带上空中,飞艇不得不做成很大的体积。但人们可以向周围任意方向飞行,比气球前进了一步。无论气球还是飞艇,升力都是由比空气轻的气体获得的,是空气静力飞行。

19 世纪末,经典流体力学基础已经形成。到 20 世纪,研究飞行器或其他物

体在同空气作相对运动情况下的受力特性、气体流动规律的空气动力学从流体力学中发展出来,形成了一个的学科分支。

航空要解决的主要问题是获得飞行器所需要的举力(升力),减小飞行器的阻力并提高飞行速度。这就需要从理论和实践两方面研究飞行器与空气相对运动时作用力的产生及其规律。1894年到1910年,兰彻斯特(F. W. Lanchester, 英国)、库塔(M. W. Kutta, 德国)、儒科夫斯基(Н. Е. Жуковский, 俄国)和普朗特(L. Prandte, 德国)等,在无限翼展机翼举力理论、边界层理论、有限翼展机翼的举力线理论等方面的研究取得了重大进展,人类由此进入了利用空气动力飞行的时代。1946年,琼斯(R. T. Jones, 美国)提出了小展弦比机翼理论,可足够精确的求出机翼上的压力分布和表面摩擦阻力。

1903年,莱特兄弟(美国)用他们自己制作的木制机身、双层帆布机翼螺旋桨飞机进行了第一次飞行。不久,美、俄等国研制的飞机(主要是军用飞机)即达上千架。第一次世界大战后,开始出现单翼机。这个时期制造飞机的主要材料还是木材和帆布,飞行的速度、高度、距离都还有限。

1939年,随着燃气轮机的应用,第一架喷气式飞机诞生了。到1949年,英国研制成功第一架喷气式客机“彗星(Comet)号”,可载客80名,最大起飞重量达70t,飞行的速度和距离得到了很大的提高。

飞行速度接近声速时,飞机的气动性能发生急剧变化,阻力突增,举力骤降,飞机的操纵性和稳定性也极度恶化,这就是航空史上著名的声障。大推力发动机的出现使飞机冲过了声障,但并没有很好地解决复杂的跨声速流动问题。直到1946年,阿克莱特、李普曼、中国学者钱学森和郭永怀分析了流场中出现的边界层和冲击波的相互作用,才成功地解决了跨声速飞行中的空气动力学问题。相关力学理论的建立和工程中后掠式机翼的采用,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。在不断提高飞机速度的驱动下,高超声速(马赫数大于5)空气动力学研究也已经进行并且正在继续发展中。20世纪50年代以后,洲际导弹、航天技术、核爆炸技术等又不断地提出了许多新的力学问题,促进着力学的发展。

飞机能够在空中自由自在地飞行,除了必须提供足够的升力外,还必须保证结构的安全。1952年,第一架喷气式客机“彗星号”在试飞300多小时后投入使用。1954年元月一次飞机检修后的第四天,飞行中突然发生空中爆炸,坠落于地中海。从海中打捞出残骸并进行了仔细的研究后表明,事故是由压力舱的疲劳破坏引起的,疲劳裂纹起源于机身开口拐角处。人们从事故中吸取经验教训,进一步推动了疲劳研究。20世纪60年代末,美国空军F-111飞机连续多次发生灾难性事故,研究认为是由含裂纹构件的脆性断裂引起的,断裂力学方法也从此引入飞机设计中。以疲劳和断裂理论为基础,形成了破损安全设计、损伤

容限设计、耐久性设计等新的设计准则。

由此可见,力学与工程是紧密结合的。力学在研究自然界物质运动普遍规律的同时,不断地应用其成果,服务于工程,促进工程技术的进步。反之,工程技术进步的要求,不断地向力学工作者提出新的课题。在解决这些问题的同时,力学自身也不断地得到丰富和发展,新的分支层出不穷。

力学是一门既古老又有永恒活力的学科。它对于近、现代科学技术的进步,有着重要的影响。

2000年下半年,美国的三十几个专业工程协会评出了20世纪对人类影响最大的20项技术,力学在其中多项技术的发展中起着重要的、甚至是关键的作用。

排在第一位的是电力系统技术,目前几乎所有输入电网的电力都是通过叶轮机带动发电机产生的。而叶轮机、发电机及输电线路的设计都离不开力学。现在全世界电网装机容量约为40亿千瓦,每年发电约28万亿千瓦时,总值约10000亿美元。20世纪后50年,由于力学的发展,叶轮机的设计得以改进,其效率提高约1/3,这相当于每年节省电费达3000亿美元。这里,尚未计人力学对锅炉燃烧过程效率提高的贡献。

排在第二位的是汽车制造技术。它同样离不开力学的支持。半个世纪以来,力学的发展使汽车发动机的效率提高了约1/3。仅以小轿车为例,全世界每年节省燃料费约2000亿美元,而排气的污染却减少了90%以上。这里,也并没有计及汽车结构轻量化所带来的效益。

排在第三位的航空技术和第十一位的航天技术,它们与力学的关系就更密切了。如前所述,航空和航天技术的每一个重大进展都依赖于力学的新突破。

21世纪,纳米科技已成为科技界最具活力与前景的重大研究领域之一。由于力学内在的特质及其所研究问题的普遍性,加上力学工作者的敏感,现代力学的最新分支——纳米力学迅速形成,成为与物理、化学、生物、材料等进行交叉研究的新学科而得到蓬勃发展。

可以预言,在未来的科技发展中,力学仍将展示出永恒与旺盛的生命力并发挥出巨大的影响。

## § 1.4 学科分类

力学可一般地分为静力学、运动学和动力学三部分。

静力学研究力系或物体的平衡问题,不涉及物体的运动;运动学研究物体如何运动,不讨论运动与受力的关系;动力学则讨论力与运动的关系。

力学也可按照其所研究的对象分为一般力学、固体力学和流体力学三个分支。

一般力学的研究对象是质点、质点系、刚体、多刚体系统,称为离散系统。研究力及其与运动的关系。属于一般力学范畴的有理论力学(含静力学、运动学、动力学)、分析力学、振动理论等。

固体力学的研究对象是可变形固体。研究在外力作用下,可变形固体内部各质点所产生的位移、运动、应力、应变及破坏等的规律。属于固体力学范畴的有材料力学、结构力学、弹性力学和塑性力学等,研究对象都被假设为均匀连续介质。近些年发展起来的复合材料力学、断裂力学等,将研究范围扩大到了非均匀连续体及缺陷体。

流体力学的研究对象是气体和液体,也采用连续介质假设。研究在力的作用下,流体本身的静止状态、运动状态及流体和固体间有相对运动时的相互作用和流动规律等。属于流体力学的有水力学、空气动力学、环境流体力学等。

现代力学的主要研究手段包括理论分析、实验研究和数值计算三个方面。因此,还有实验力学、计算力学两个方面的分支。

力学在各工程技术领域的应用也形成了诸如飞行力学、船舶结构力学、岩土力学、建筑结构力学、生物力学等各种应用力学分支。

## § 1.5 基本概念与基本方法

### 1.5.1 力和运动

力学研究涉及力和运动。因此,既要研究力,又要研究运动,还要将力和运动二者联系起来。

力(force)是物体间的相互作用。

相互直接接触的物体,通过接触表面,一定有力的相互作用(除非证明其为零),这类力称为表面力。如两物体间的接触压力、容器壁上的液体压力等。表面力一般是分布在一定接触面积上的分布力,若接触面积很小时,可简化为集中力。

非直接接触的物体,也可以有力的相互作用,如物体的重力、惯性力等。这些力是作用在物体整个体积内的分布力,与其体积和质量有关,故称为体积力。电场力、磁场力等特殊场力的作用,也是体积力。

在本课程的研究中,分析和研究的主要是物体接触表面间的表面力。

运动的研究,可以分为两类。一类是整个物体的位置随时间的变化,称为运动;另一类是物体自身尺寸、形状的改变,称为变形(deformation)。例如飞机在空中飞行,有着复杂的整体运动;同时,机翼、机身等结构自身的尺寸和形状也有微小的变化(变形),有时甚至可以看到机翼随飞机的升降而上下翘曲。这两种

效应都是力作用的结果。

力与运动之关系的研究,属于动力学。可以以牛顿第二定律为基础,将力与运动联系起来。牛顿第二定律为:物体运动状态的改变( $dv/dt = a$ )与作用于其上的力成正比,并发生于该力的作用线上。即

$$F = ma$$

上式是解决动力学问题的基本依据,故称为动力学基本方程。在速度远小于光速( $3 \times 10^8$  km/s)的一般工程领域中,上述定律的正确性已有充分的实验根据。

若物体的运动状态不发生改变( $a = 0$ ),则称物体处于平衡(equilibrium)。

力与固体的变形关系的研究,属于固体力学。将力与固体的变形联系起来的假设(或模型)是多种多样的,不同材料在不同加载条件和环境下,有不同的变形行为。如钢材和木材的力学行为不同,钢材在常温 and 高温下的力学行为不同,铸铁在拉伸和压缩下的力学行为不同等。在固体力学中,力与变形关系用物理方程(应力-应变关系)描述。

### 1.5.2 研究方法

工程学研究解决问题的一般方法,可归纳为:

- (1) 选择有关的研究系统。
- (2) 对系统进行抽象简化,建立力学模型。其中包括几何形状、材料性能、载荷及约束等真实情况的理想化和简化。
- (3) 将力学原理应用于理想模型,进行分析、推理,得出结论。
- (4) 进行尽可能真实的实验验证或将问题退化至简单情况与已知结论相比较。
- (5) 验证比较后,若得出的结论不能满意,则需要重新考虑关于系统特性的假设,建立不同的模型,进行分析,以期取得进展。

例如,一个工程师首先要按照设计要求提出一个设计,然后需要假定其性态,建立模型,进行分析。如果分析的结果不能满足预期的功能,则必须修改设计,再次分析,直到获得可用的结果。可用性不仅包括有满意的功能,而且也包括如经济、轻量化、易于制造等因素的考虑,还可能要考虑环境等因素。

上述方法中,力学模型的建立是最关键的。一个好的力学模型,既能使问题求解简化,又能使结果基本符合实际情况,满足所要求的精度。力学模型的建立,不仅需要实际情况有充分的了解及分析问题的能力,还与知识面和经验有关。对由模型推出的结果进行实验验证或比较,有利于不断积累建立模型的经验。

例如,在处理普通工程构件(如杆、梁、轴等)时,可以先将其理想化为刚体,研究作用于其上的力,达到一定的认识水平;进一步将其视为变形体,并假定其变形是弹性(卸载后变形能完全恢复)的,研究在载荷作用下,构件的弹性变形情况,又达到了另一认识水平;如果再引入材料的塑性(卸载后变形不能恢复)



性态,研究其弹-塑性行为,就会得到更进一步的启发。

### 1.5.3 工程静力学的基本研究内容

力学问题的研究,一般都需要进行:

——力的研究;

——运动和变形的研究;

——联系力与运动或力与变形关系的假设(或模型)的研究。

对于大多数情况,上述三项都需要仔细分析。在某些特殊或理想简化情况下,可以不考虑其中的一项或两项。如物体因受约束而静止,则运动不必考虑;若再假设物体是完全刚性的,即物体被视为不发生变形的刚体,自然也无须考虑其变形。

本课程研究物体处于平衡状态(即  $\mathbf{a} = 0$ , 物体运动状态不发生改变)的问题,称为工程静力学问题。工程静力学的基本分析研究内容包括下述三方面:

#### (1) 受力分析及静力平衡条件

物体或物体系统受到什么力的作用,这是首先需要研究的。若物体或物体系统处于平衡状态,则系统整体或其中任何一部分的受力,显然应当满足一定的条件(静力平衡条件),研究静力平衡条件及其应用是静力学最重要的内容之一。受力分析及静力平衡条件的研究并不涉及材料的力与变形间的物理关系。在小变形情况下,一般也不涉及变形的几何关系。

#### (2) 变形的几何相容条件

基于固体的连续性假设,固体不仅在受力前是均匀连续的,受力后只要未发生破坏,仍然应当是均匀连续的,即固体受力后发生的变形或位移,应满足几何相容条件。所谓几何相容的变形,就是指固体在变形后仍然应当是连续的,固体内既不引起“空隙”,也不会产生“重叠”。如直杆弯曲变形是可能的,但若直杆发生了折弯,则折弯处的物质显然不再连续。对于变形的几何相容条件的分析,是纯粹的几何分析,并不涉及材料间的物理关系。

#### (3) 力与变形间的物理关系

物体受力时要发生变形。力与变形间的关系用应力-应变间的物理关系表达,它与材料本身的力学性能及变形形式有密切关系。材料不同、受力状态不同、环境不同、研究的问题不同,所用的材料物理关系也不同。这正是不同性质固体之间的主要区别所在。

在考虑力的时候,应当考虑平衡状态应有的条件。在考虑变形时,必须考虑结构各部分变形与整体变形的协调。在研究力与变形的联系时,则必须考虑特定材料的性能。力的平衡、变形的几何协调、材料的物理性能这三个方面,是研究工程静力学(也是研究固体力学)问题的核心内容和主线。