

普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

Engineering Mechanics



张光伟 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

工 程 力 学

主 编 张光伟
参 编 刘振华 陈满国 张瑞萍
李军强 马建青



机械工业出版社

本书是根据教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会最新制定的教学基本要求,总结长期的教学实际经验,结合当前的教学实际情况而编写的。

本书注重工程实际应用,从力学素质教育的要求出发,在各章中精选了大量易于学生理解的工程和生活实例,以便于学生掌握工程力学的基本概念、基本理论和基本方法。

本书内容分为两部分,包括:静力学(静力学基础、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、空间力系);材料力学(材料力学基本概念、拉伸与压缩、剪切和挤压、扭转、弯曲内力、弯曲强度、弯曲变形、应力状态分析和强度理论、组合变形、压杆稳定)。书后附有常见截面的几何性质、型钢表以及部分习题答案。

本书可作为高等学校工科各专业的工程力学课程(中、少学时)的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/张光伟主编. —北京:机械工业出版社, 2015. 2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-48653-4

I. ①工… II. ①张… III. ①工程力学—高等学校—教材
IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 274153 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:姜 凤 责任编辑:姜 凤 任正一

版式设计:霍永明 责任校对:肖 琳

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18.5 印张·372 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48653-4

定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379469

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

工程力学是高等工科院校开设的一门技术基础课。编者在吸取国内外同类教材编写经验的基础上,结合自身多年的教学经验编写了本书。为了更好地适应普通高等学校新一轮培养计划中课程教学总学时数大幅度减少的状况,本书紧密结合当前力学教学改革的需求,既注意学生对基本力学知识的掌握,又能培养学生的力学素质,还能加强学生的工程概念,使学生了解一些基础力学的最新进展。

本书具有以下特点:

1) 从力学素质教育的要求出发,注重基本概念的阐述而不追求冗长的理论推导与烦琐的数学运算,力求通俗易懂。

2) 内容以课程基本要求为指导,在总体结构上,保留了“静力学”和“材料力学”的工程力学教学体系。多年的教学实践表明,该体系比较符合学生的认识规律。

3) 以强度、刚度和稳定性为主线,引入了大量的工程实例,以激发学生学习兴趣,提高想象力,便于实际应用。

4) 在例题和习题的选择上,尽量选择生活中和工程实际中常见的、易于理解的题目,有利于学生解题能力的培养。例题的分析和解题过程详尽、清晰,注意难点剖析等。

5) 每章的小结中列出了主要的知识点,并阐述理论发展的思路、相关结论的比较或与解题有关的规律与技巧,便于学生明确重点,并将所学知识系统化。

全书共分14章,第1~4章为静力学,第5~14章为材料力学。

本书编写人员长期担任“工程力学”课程的教学工作,书中融合了编者多年的教学经验与体会,是集体智慧的结晶。参加编写工作的有:张光伟(绪论、第1章、第11章)、马建青(第2章、第3章、第4章、第5章)、张瑞萍(第6章、第8章)、李军强(第7章、第12章)、陈满国(第9章、第10章)、刘振华(第13章、第14章)。本书由张光伟教授主编,并负责统稿。

本书承蒙西安交通大学黄上恒教授审核,为本书的编写提出了许多有益的建议,在此深表感谢。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持与协助。在编写过程中借鉴、引用了许多同类教材中的资料、图表和例题,谨此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年2月

主要符号表

A	面积	n_{st}	稳定安全因数
A_S	剪切面面积	P	功率
A_{bs}	挤压面面积	q	分布载荷集度
b	宽度	R, r	半径
D, d	直径	ν_d	形状改变比能
E	弹性模量	ν_V	体积改变比能
f	静摩擦因数	W_z, W_y	抗弯截面系数
f'	动摩擦因数	W_t	抗扭截面系数
F_f	静滑动摩擦力	φ	相对扭转角
F'_f	动滑动摩擦力	γ	切应变
F	力	ε	线应变
F_{Ax}, F_{Ay}, F_{Az}	A 点 x, y, z 方向约束力	λ	柔度, 长细比
F_N	法向约束力, 轴力	μ	泊松比
F_{cr}	临界压力	ρ	曲率半径, 材料密度
F_S	剪力	σ	正应力
F_R	合力	σ^+	拉应力
F_u	极限载荷	σ^-	压应力
$[F]$	许可载荷	σ_m	平均应力
F_x, F_y, F_z	x, y, z 方向分力	σ_b	强度极限
G	切变模量	σ_{bs}	挤压应力
h	高度	$[\sigma]$	许用应力
I, I_x, I_y	惯性矩	$[\sigma^+]$	许用拉应力
I_p	极惯性矩	$[\sigma^-]$	许用压应力
I_{xy}	惯性积	σ_{cr}	临界应力
i	惯性半径	σ_p	比例极限
S	静矩	σ_r	相当应力
l, L	长度	σ_s	屈服极限
M	弯矩	σ_u	极限应力
M_e	力偶矩	τ	切应力
M_O	对 O 点的矩	τ_u	极限切应力
T	扭矩	$[\tau]$	许用切应力
n	转速, 安全因数	w	挠度
n_s	塑性材料的安全因数	θ	转角
n_b	脆性材料的安全因数		

目 录

前言

主要符号表

绪论..... 1

第 I 篇 静 力 学

第 1 章 静力学基础..... 13

1.1 静力学基本概念..... 13

1.2 静力学公理..... 14

1.3 约束和约束力..... 17

1.4 受力分析和受力图..... 22

本章小结..... 26

习题..... 26

第 2 章 平面汇交力系与平面力

偶系..... 29

2.1 平面汇交力系的合成与平衡..... 30

2.2 平面力矩..... 36

2.3 平面力偶系的合成与平衡..... 38

本章小结..... 42

习题..... 43

第 3 章 平面任意力系..... 46

3.1 力的平移定理..... 46

3.2 平面任意力系的简化..... 47

3.3 平面任意力系的平衡..... 51

3.4 刚体系统的平衡..... 56

3.5 平面简单桁架的内力计算..... 60

3.6 考虑摩擦时的平衡问题..... 64

本章小结..... 69

习题..... 70

第 4 章 空间力系..... 75

4.1 空间力、力矩和力偶..... 75

4.2 空间汇交力系与空间力偶系..... 81

4.3 空间任意力系..... 84

4.4 平行力系中心与物体的重心..... 89

本章小结..... 92

习题..... 93

第 II 篇 材料力学

第 5 章 材料力学基本概念..... 99

5.1 变形固体的基本假设..... 99

5.2 外力及其分类..... 100

5.3 内力与截面法..... 100

5.4 应力与应变..... 102

5.5 杆件变形的基本形式..... 104

本章小结..... 105

习题..... 106

第 6 章 拉伸与压缩..... 107

6.1 轴力和轴力图..... 107

6.2 拉压杆的应力..... 109

6.3 材料拉压时的力学性能..... 112

6.4 拉压杆的强度计算..... 117

6.5 应力集中的概念..... 122

6.6 拉压杆的变形..... 123

6.7 简单拉压超静定问题..... 126

本章小结..... 130

习题..... 131

第 7 章 剪切和挤压..... 135

7.1 剪切实用计算..... 136

7.2 挤压实用计算..... 137

本章小结..... 140

习题..... 141

第 8 章 扭转..... 142

8.1 外力偶矩的计算、扭矩和

扭矩图..... 143

8.2 薄壁圆筒的扭转..... 144

8.3 扭转应力与强度计算..... 146

8.4 扭转变形与刚度计算..... 151

本章小结..... 154

习题..... 155

第 9 章 弯曲内力..... 158

9.1 平面弯曲..... 158

9.2 梁的计算简图及分类	159	12.2 平面应力状态分析	214
9.3 剪力与弯矩	160	12.3 三向应力状态及广义胡克定律	217
9.4 剪力图与弯矩图	161	12.4 强度理论概述	222
9.5 弯矩、剪力和载荷集度间的关系	164	12.5 四种常用强度理论	223
本章小结	169	本章小结	227
习题	169	习题	228
第10章 弯曲强度	172	第13章 组合变形	231
10.1 弯曲正应力	172	13.1 拉伸(或压缩)与弯曲组合	232
10.2 梁的正应力强度计算	175	13.2 扭转与弯曲组合	239
10.3 梁的切应力强度计算	178	本章小结	244
10.4 提高梁弯曲强度的措施	183	习题	244
本章小结	185	第14章 压杆稳定	248
习题	187	14.1 压杆稳定的概念	248
第11章 弯曲变形	190	14.2 细长压杆的临界压力	249
11.1 弯曲变形的概念	190	14.3 欧拉公式适用范围与临界应力总图	252
11.2 梁的挠曲线近似微分方程	193	14.4 压杆稳定性计算	256
11.3 积分法求弯曲变形	194	14.5 提高压杆稳定性的措施	259
11.4 叠加法求弯曲变形	200	本章小结	261
11.5 梁的刚度条件与合理刚度设计	206	习题	262
11.6 提高梁抗弯刚度的措施	207	附录	265
本章小结	209	附录 A 常见截面的几何性质	265
习题	209	附录 B 型钢表	270
第12章 应力状态分析和强度理论	212	附录 C 部分习题答案	280
12.1 点的应力状态	212	参考文献	287

绪 论

1. 力学与工程技术

力学作为一门科学应该从牛顿时代算起，它和天文学一起是最早形成的两门自然科学。到 19 世纪末，力学已发展到很高的水平。当时它主要以比较理想的模型，如质点、质点系、刚体、理想弹性体、理想流体等为对象，建立起了相当完善的普遍适用的理论体系。同时，也开始了与工程技术问题的结合。

20 世纪力学发展的最大特点是：它的研究对象已不再局限于理想模型，而更多地以自然界和工程技术中必然遇到的复杂介质或系统为对象，建立各种力学模型，并且在解决问题过程中形成了更多的力学分支。既丰富了力学的体系，也使力学成为众多工程和技术科学的重要基础。在 20 世纪，由于力学的参与而得以形成的工程或技术科学有：航空航天技术、船舶工程、土木工程（包含水利工程）、机械工程、运输工程、能源技术、气象科学、海洋科学以及兵器工程等。它们无疑对人类文明起了极大的推动作用。

工程技术中由于力学发展才得以实现的标志性成果有：航母舰载机（图 0-1）、将人类送入太空的航天技术（图 0-2）、单台功率达百万千瓦量级的发电机组（图 0-3）、斜拉桥主孔跨度 1088m 的桥梁（图 0-4）、有抗震能力的超高层建筑（图

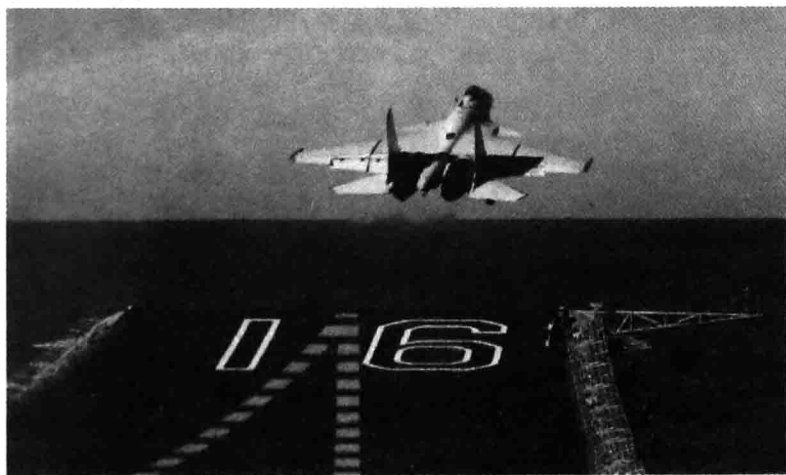


图 0-1 国产歼 15 舰载机

0-5)、时速达 300km 的高速列车 (图 0-6)、巨型水利枢纽 (图 0-7) 和下潜深度达 7000m 的载人潜水器 (图 0-8) 等。

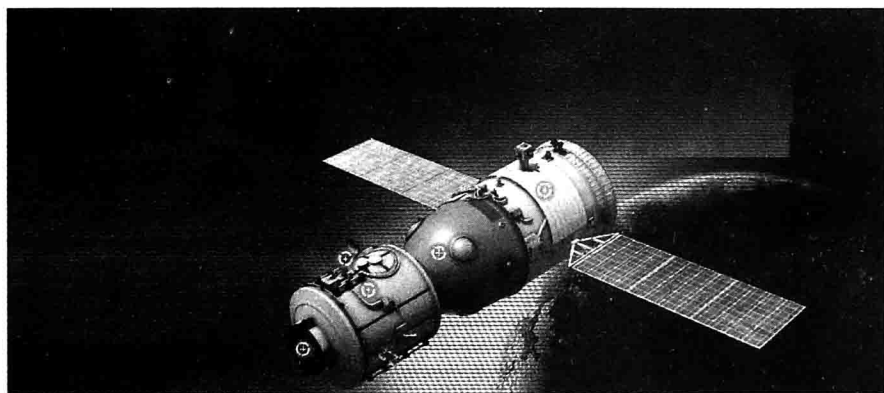


图 0-2 神舟十号飞船

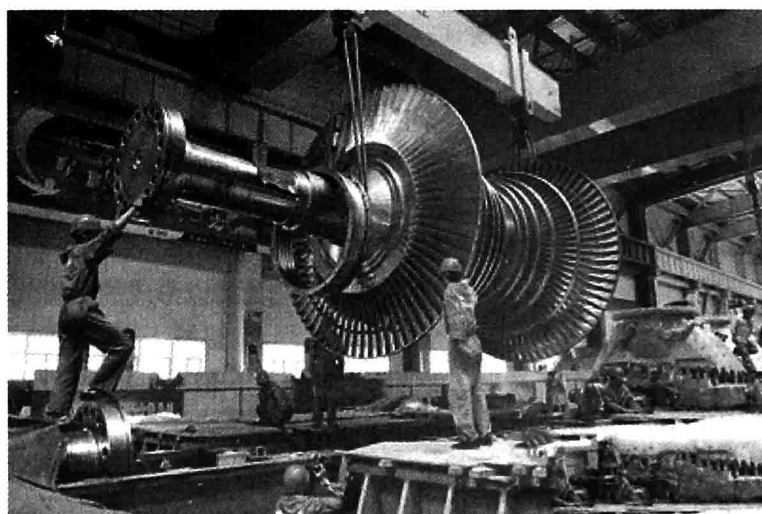


图 0-3 华能宁夏灵武空冷发电机转子



图 0-4 苏通大桥

2000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,例如,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涡轮机带动发电机产生的,而涡轮机、发电机以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kW,每年发电约28万亿kW·h,总值约10000亿美元。20世纪后半叶,由于力学的发展,涡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约5000亿美元,而这里还没有考虑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。和涡轮机得以改进的情况一样,力学的发展使半个世

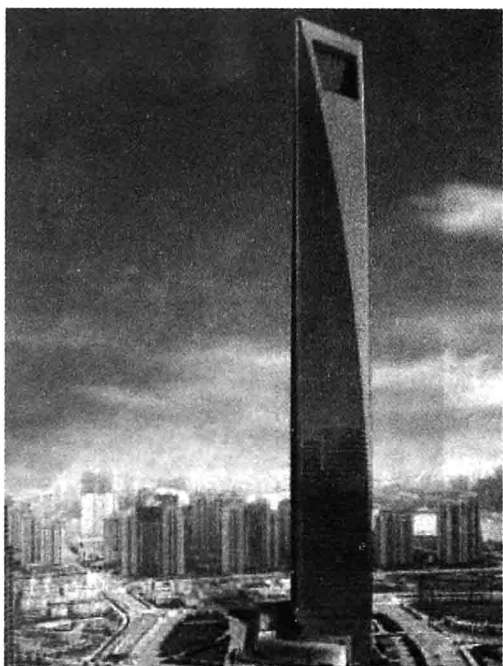


图 0-5 上海环球金融中心

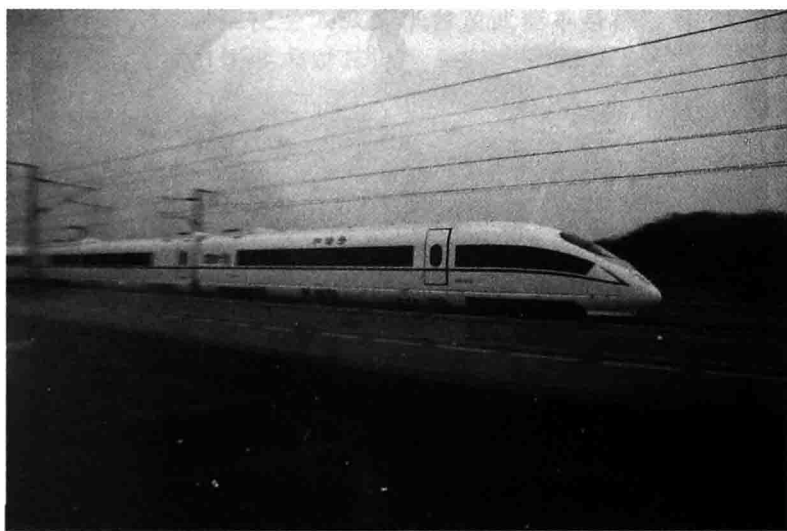


图 0-6 和谐号高速列车

纪以来汽车发动机的效率提高了约1/3。仅以小汽车为例,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(其中化学也起了重要作用)。

排在第三位的是航空技术,第十一位的是航天技术,它们和力学的关系就更密切了。力学对它们的发展,起到了关键的作用,它们的每一个重大进展都依赖于力

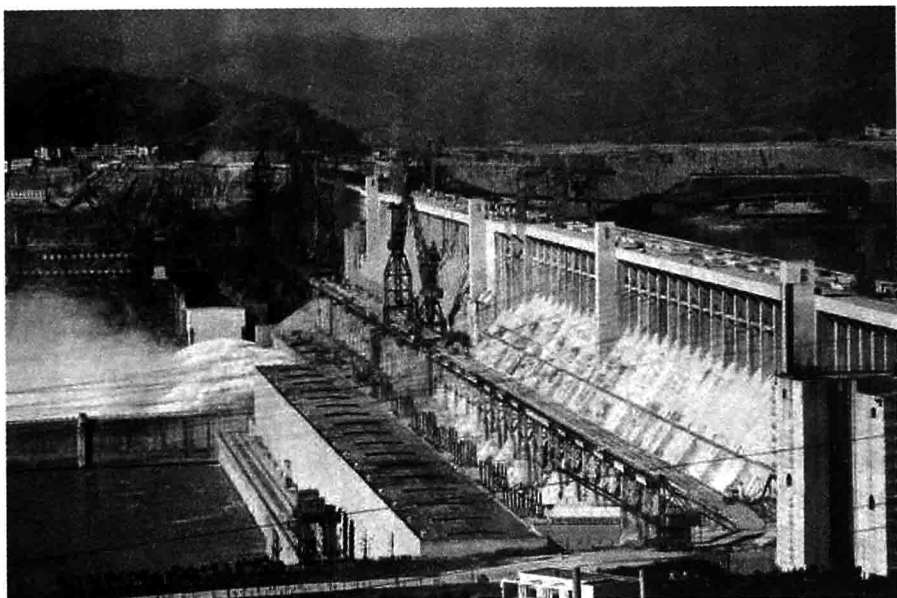


图 0-7 三峡大坝

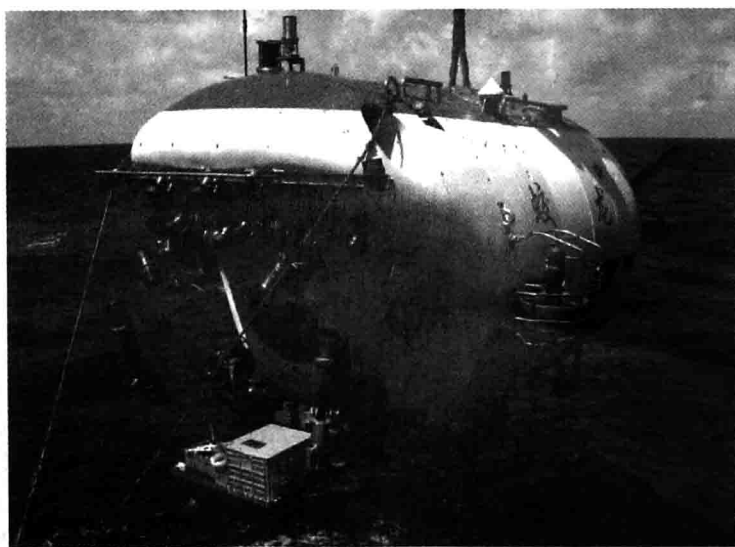


图 0-8 蛟龙号载人潜水器

学的新突破。如流体力学先后为航空技术的四次飞跃提供了科学基础：第一次解决了能不能飞的问题；第二次解决了能不能超音速飞行的问题；第三次解决了导弹重返大气层或飞机超高音速飞行时的热保护问题；第四次解决了高速飞行时气体电离导致的通信中断问题，同时也为隐身技术提供了新思路。

20 世纪后半叶，战机的发展经历了四代：第一代是附体流型飞机；第二代是

带定常脱体涡的飞机；第三代是带非定常脱体涡的高机动性及高敏捷性飞机；第四代是能超音速巡航及隐身的飞机。航天技术也已从火箭发展到航天飞机，每一次技术的飞跃，都伴随着流体力学的新进展。

航空航天技术的发展，同时伴随着材料的发展。最早的飞机的骨架、螺旋桨等是木制的，蒙皮则是帆布，后来用了金属材料，近来则大量采用复合材料。每一种新材料的采用，都带来了新的固体力学问题。而计算力学的发展，则为复杂结构的设计计算提供了必需及有效的工具。

20 项技术中还有其他许多与力学有密切关系的技术，这里就不一一列举了。

在为工程和技术提供科学基础的过程中，力学形成了许多新的分支学科。如流体力学有黏性流体力学、空气动力学、气动热力学、热化学流体力学、电磁流体力学、稀薄气体动力学等；固体力学有弹塑性力学、振动力学、结构力学、断裂力学、损伤力学、板壳力学和复合材料力学等。

力学还为非线性科学提供了范例，如孤立波、混沌、分叉等。

由此可见，从学科上讲，力学既是一门基础科学，又是众多工程科学和技术科学的基础。

20 世纪的工程技术固然取得了巨大的成就，但人类的需求是无止境的。例如，交通工具要求更快、更安全、更舒适，以及耗能低无污染；建筑物会越建越高而且要能抗震；石油开采要求尽可能采出更多原油；人类对环境有更高的要求，对灾害的防治要更有把握等，这些都会提出新的力学问题。而高技术战争则要求能从空天平台上发射更多的武器，这促使空天武器平台及武器本身都向高速、高机动性、隐身、大航程的方向发展，迫切要求对其提出全新的设计思想，而这些没有力学的支持是不可能做到的。虽然力学在 20 世纪得到了非常大的发展，但面向 21 世纪，仍有很多重要问题亟待解决。这首先是工程技术发展的需要，同时这些问题的解决也必然会促进力学的进步。

现在人们最感兴趣的学科是所谓的新兴学科，这是否意味着力学这门已有很大发展的学科就不会或不需要有更大的发展了呢？显然不是。正是由于力学是一个有较长历史的学科，已经渗透到很多工程和技术科学中，所以如果它还有未解决的重大基础问题，必然将影响到很多工程技术的发展；反之，力学在基础研究上的任何重要进展，都将推动很多工程技术的发展。必须看到，解决一个传统学科的基础问题更多地具有攻坚的性质，它与新学科的基础研究更多地具有发现新规律的性质是不同的，但由于传统学科影响面广，只要它有进展，即使不是突破性进展，也有可能产生巨大的影响。上面所举的涡轮机和汽车发动机的改善得益于力学的进展，就是很好的例子。

力学发展的历史充分说明：力学是随着人类认识自然现象和解决工程技术问题的需要而发展起来的，力学又对认识自然和解决工程技术问题起着极为重要、甚至是关键的作用。因此，力学既是一门基础科学（它所阐明的规律带有普遍性），又是一门技术科学，是许多工程技术的理论基础，并在广泛的应用过程中不断得到发展。目前，环顾自然界，还有许多关系到人类生存和生活质量的宏观现象远没有被

认识清楚。如全球的气候问题、环境污染问题、海洋开发利用问题、能源危机问题、自然灾害（地震、台风等）问题、彗星或小行星撞击地球问题等，将会不断地提出新的力学问题。21 世纪将出现的新的、更复杂的工程技术问题也有赖于力学的新发展去解决。可以预期，力学除了将继续在航空、航天、机械、土木、水利、化工、石油、交通运输等传统领域发挥为之提供基础理论和工具的作用外，也将在生命、材料、信息、能源、环境等高新技术领域发挥越来越大的作用。

2. 工程力学的研究内容

工程力学所包含的内容极其广泛，本书中所讨论的“工程力学”只包含“静力学”和“材料力学”两部分。“静力学”研究物体的受力和平衡规律，“材料力学”研究物体在外力作用下的变形和失效现象，二者都是工程设计中的基本知识。

工程构件（泛指结构元件、机器的零部件等）在外力作用下丧失正常功能的现象称为“失效”或“破坏”。工程构件的失效形式很多，但工程力学范畴内的失效通常可分为三类：强度失效、刚度失效和稳定失效。

强度失效是指构件在外力作用下发生不可恢复的塑性变形或断裂。图 0-9a、b 所示分别为断裂的螺栓和产生塑性变形的孔。

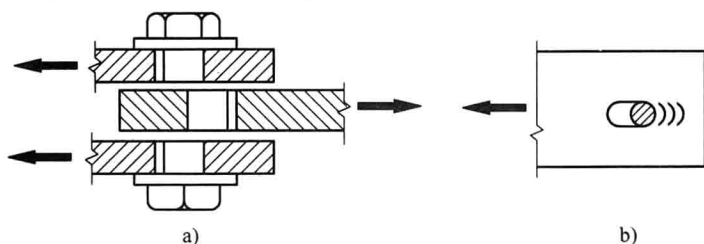


图 0-9

a) 断裂的螺栓 b) 产生塑性变形的孔

刚度失效是指构件在外力作用下产生过量的弹性变形。例如，齿轮传动轴如果弹性变形过大（图 0-10），不仅会影响齿轮间的正常啮合，缩短齿轮的使用寿命，而且会加大轴与轴承的磨损，从而导致传动机构丧失正常功能。

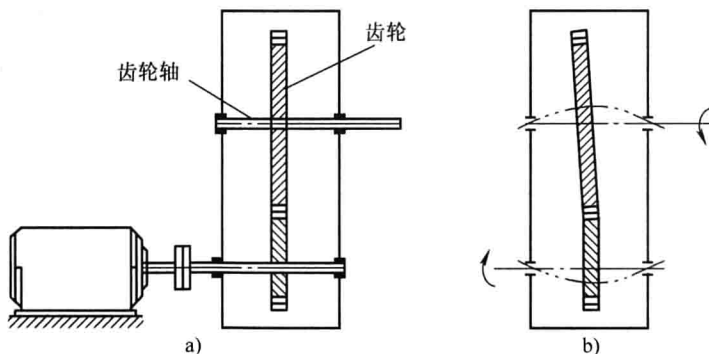


图 0-10

a) 变形前 b) 变形后

稳定失效是指构件在某种外力（例如轴向压力）作用下，其平衡形式发生突然转变。图 0-11 所示的内燃机中凸轮机构的挺杆，由于过于细长，当所承受的压缩载荷超过一定数值时，便会从直线的平衡状态突然转变为弯曲的平衡状态，致使内燃机的进排气凸轮机构丧失正常功能。

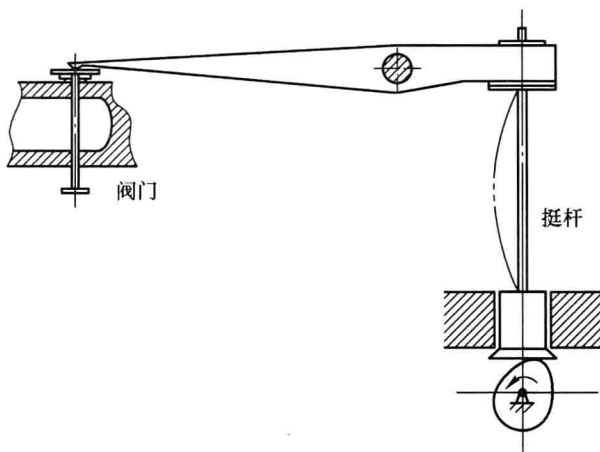


图 0-11

工程设计的任务之一就是保证构件在确定的外力作用下

正常工作而不失效，即保证构件具有足够的强度、刚度与稳定性。为此，需要进行以下工作：

- 1) 分析并确定构件所受各种外力的大小和方向。
- 2) 研究在外力作用下构件的内部受力、变形和失效的规律。
- 3) 提出保证构件具有足够强度、刚度和稳定性的设计准则和方法。

以上便是本课程的主要研究内容。

3. 工程力学的研究对象

工程构件的形状多种多样，根据几何形状和尺寸的不同，工程构件大致分为三种类型：杆、板壳、块体。杆是一个方向（轴向）的尺寸远大于另两个方向（横向）的尺寸的细长构件（图 0-12）；杆横截面中心的连线称为轴线，轴线为直线的杆称为直杆（图 0-12a），轴线为曲线的杆称为曲杆（图 0-12b），所有横截面的形状大小均相同者称为等截面杆。板壳则是一个方向的尺寸（厚度）远小于另两个方向尺寸

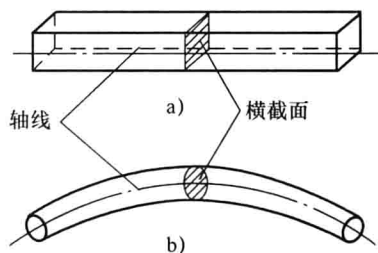


图 0-12

a) 直杆 b) 曲杆

的薄壁构件，平分厚度的面称为中面，板的中面为平面（图 0-13a）；壳的中面为曲面（图 0-13b），如穹形屋顶、薄壁容器等均属于此类构件。块体是三个方向的尺寸同属于一个数量级的构件（图 0-13c），如水坝、建筑结构物基础等均属于此类构件。作为力学入门课程，本课程的研究对象以等截面直杆为主，但课程中介绍的基本概念和原理则同样适用于其他工程构件。板壳和块体的研究属于“板壳理论”和“弹性力学”课程的范畴。

4. 工程力学的研究方法

工程力学的产生和发展过程是人类对于物体机械运动和构件承载能力的认识的

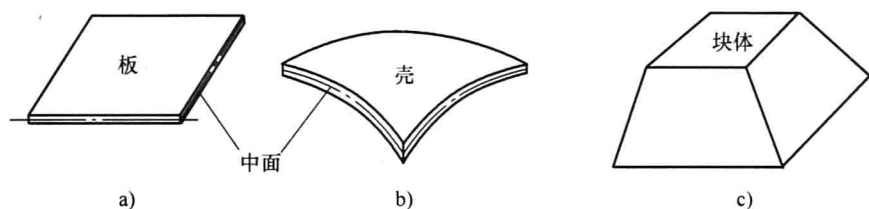


图 0-13

深化过程，而这种认识是人们通过长期的生产实践和无数次的科学试验得到的。人们经过无数次的实践活动—理论总结—再实践的反复过程，使认识不断提高和深化，逐步地总结和归纳出物体机械运动和构件承载能力的一般规律，形成了工程力学的基本体系和理论知识。

在研究工程力学问题的过程中，抓住主要的影响因素，忽略次要的影响因素，采用抽象化的方法，将研究对象抽象化为各种力学模型。例如，在研究不同性质的力学问题时，分别用刚体、质点、变形固体等来代替真实物体，使问题大为简化。因此，研究不同的力学问题，采用不同的力学模型，是研究工程力学的重要方法。

本书中所要叙述的一些力学原理，都是一些成熟的、经典性的结果，着眼点不是这些原理的建立和论证，而是这些原理的合理应用。学生需要深刻理解工程力学中已被实践证明了是正确的基本概念和基本定律，熟练掌握由基本概念和基本定律导出的解决工程力学问题的定理和公式。通过演算一定数量的习题，把学到的知识应用到实践中去，以便巩固和进一步加深理解所学的理论知识。

工程力学研究问题的一般步骤如下：

- 1) 确定研究对象。
- 2) 建立或选择力学模型。这一步包括对研究对象性能的研究及对真实情况的理想化和简化，即力学建模。
- 3) 将力学原理应用于理想模型，进行理论分析和数学演绎，建立方程或其他表达式，即数学建模。

- 4) 求解数学问题，得到结果或结论。

在本课程中，上述研究工程力学问题的方法是理论分析的过程，它是认识力学规律、形成力学理论的关键步骤。通常包括三方面的内容：

- 1) 力的研究。物体受力分析，平衡方程的建立。这是分析的静力学方面。
- 2) 变形的研究。变形几何关系的建立以及物体各单独部分的变形与整体变形相协调的条件，这是分析的几何学方面。

以上两方面分析都不涉及构成物体的材料的性质，故所得的结论对任何材料构成的物体都成立。

- 3) 联系力和变形的规律的研究和应用。这是分析的物理学方面。此时，我们

必须考虑特定材料所具有的特殊性质，这些信息来自于实验室。研究工程材料的性质是固体力学的一个内容丰富的分支学科，而本书中仅用到这些研究的最终结果。

工程力学的上述研究方法与其他学科的研究方法有着相似之处，因此，充分理解和熟练掌握这些研究方法，不仅可以学好工程力学本身的知识，而且有助于学好其他科学技术理论，培养学生的分析问题和解决问题的能力，为今后解决工程中的生产实际问题以及从事科学研究工作打下坚实的基础。

