

国家级精品课程教材
普通高等教育“十二五”规划教材

Engineering Mechanics

工程力学

秦世伦 主编



化学工业出版社

TB12
Q433

4

国家级精品课程教材
普通高等教育“十二五”规划教材



郑州大学 *04010779572%*

Engineering
Mechanics

工程力学

秦世伦 主编



TB12
Q433



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是国家级精品课程的配套教材。

书中系统介绍了刚体静力学的基本概念、汇交力系、力偶系、任意力系、杆件的内力、变形固体的基本概念、杆件的拉伸与压缩、轴的扭转、梁的弯曲应力、梁的弯曲变形、复杂应力状态分析及其应用、弹性压杆稳定等内容。教材努力与工程实际和生活实际紧密结合,把工程实际问题简化为力学模型作为学生结合工程的切入口,以此引导学生理解工程问题。与此同时,教材加大了非工程类实践与课程结合的力度并提供数量较多的例题与习题。

本书适合于工科类如土木工程、工程管理、工程造价、食品工程、化学工程、纺织、材料、地质、建筑环境与设备、市政工程、机械工程等专业的本科生作为教材使用,同时适合于准备参加国家注册考试的有关工程技术人员作为参考书阅读学习,本书也可作为高等学校工科专业理论力学、材料力学的参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/秦世伦主编. —北京:化学工业出版社,2011.12
国家级精品课程教材 普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-12876-8

I. 工… II. 秦… 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(2011)第242882号

责任编辑:满悦芝
责任校对:陈静

文字编辑:张绪瑞
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数529千字 2012年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

这部教材是国家级精品课程“工程力学”的建设项目之一，其内容包含理论力学中的静力学部分和材料力学的主要部分。

四川大学的工程力学课程在近十余年中经历了一个着重于外延调整转化到着重于内涵深入的发展过程。这门课程传统定位于为工业工程专业服务的技术基础课，但这一定位在近年有所改变。四川大学的办学定位是创办一流的研究型综合大学，这就要求本科的基础性课程应该在培养研究型人才和复合型人才方面做出贡献。同时，学习本课程的学生有了很大变化，他们的专业对力学的专门知识要求不高，工程力学是本科阶段唯一的力学课程。随着本校文、理、工、医的学科融合，一些非工业工程专业（如生物医学工程、管理工程、化工安全工程等）也将本课程列为必修课程，某些理科专业（如应用物理等），甚至医科、文科专业的学生也在选修本课程。比起力学专门知识，这些专业更看重的是力学的思维方式和研究方法。针对这些情况，我们把课程重新定位为“应用科学基础课”。在课程目标方面，把培养学生的创新精神和科学素质作为课程改革的出发点，并把“工程力学，我们身边的科学”作为课程的基本理念；在课程内容和体系方面，在强调课程的应用性的同时，把课程的基础性放到重要位置。

为了实现上述设想，这部教材在以下几方面做出了努力：

(1) 重视学生对知识的积累、发展和创新过程的体验和理解。对于基本概念、基本原理和基本方法的引入、证明和应用，不仅讲“怎么做”，而且讲“为什么要这么做”，还要引导学生思考“怎么会想到要这样做”。同时辅之以图形，引导学生的思维从形象到逻辑，从具体到抽象的转化。让学生从知识的琢磨、讨论和研究的过程中领悟知识的发展和创造，从而培养学生的创新精神和能力。

(2) 重视方法论的启迪。教材中把力学分析、物理分析和几何分析作为核心思想贯穿始终，强化分析问题的总体思路分析，增加了对一些例题结果的评估和延伸。努力提高学生在总体上把握力学问题的能力。

(3) 重视知识的综合应用，有意识地加大了对综合问题分析和深度。

在内容的编写方面也有较大的改进。在“变形固体的基本概念”、“梁的弯曲变形”、“复杂应力状态分析及其应用”等章节与国内同类教材相比有明显的变化，出现了一些新的提法和处理方式。这些变化一方面来源于对国外教材的借鉴，一方面也来源于编者对于若干问题的研究体会。

本教材重视对学生认知规律的研究、适应和利用。内容的安排方面力求深度适宜，难点分散，在循序渐进的同时适当增大梯度；语言叙述方面力求在准确的同时做到流畅通俗，易于理解和自学。尽管这部教材是新的，但其体系、内容和方法在近几年的教学实践中已经得到了体现，并已取得了较好的效果。因此，本教材应该说是近几年教学改革及实践的一个反映和总结。

本书的另一个特点，就是提供了较多的思考题和习题。这一方面是让学生有充分思考和

练习的机会，另一方面也为教师因材施教提供了一个平台。对于部分较深入内容的拓展就是以习题的形式出现的。习题和思考题充分注意了多样性与新颖性。其中有许多非工业工程类的题目，这是为了强调课程的基本理念而设置的。

根据我们的经验，讲授本书内容需要 64~80 学时。书中带“*”的章节可以根据情况选讲，跳过这些章节不会影响到后续的内容。

本书是我校工程力学教学团队编写的。参与本书编写的人员如下：

主编：秦世伦

筹划与审稿：王清远，蒋文涛，魏泳涛

编写人员：徐双武（第 1、5、6 章），董世明（第 2、4 章），李亚兰（第 3、10 章），石秋英（第 8、9 章），秦世伦（其余各章及最后统稿）

由于我们的水平和经验的限制，也由于教学改革是一个不断探索和创新的过程，因此恳请有关专家、同行以及使用本书的同学们提出批评、指正和建议。编者的电邮地址是 qinshilun@tom.com。

编者

于四川大学

2011 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程与力学的关系	1
1.2 工程力学的主要内容	2
1.3 刚体、变形固体及其基本假定	4
1.4 杆件及其基本变形形式	6
1.5 荷载的分类	8
1.6 工程力学的研究方法	8
第 2 章 刚体静力学的基本概念	11
2.1 矢量知识回顾	11
2.1.1 矢量的概念	11
2.1.2 矢量的运算	12
2.2 静力学基本概念	13
2.2.1 刚体、平衡和力的概念	13
2.2.2 力系的概念	15
2.2.3 静力学公理	15
2.3 约束和约束力	18
2.3.1 约束和约束力的概念	18
2.3.2 约束的一些基本类型	19
2.4 受力图	21
思考题 2	23
习题 2	24
第 3 章 汇交力系	26
3.1 汇交力系的简化与合成	27
3.1.1 汇交力系合成的几何法	27
3.1.2 汇交力系合成的解析法	28
3.2 汇交力系的平衡条件	29
思考题 3	33
习题 3	33
第 4 章 力偶系	36
4.1 力对点之矩	36
4.1.1 平面问题中力对点的矩	36

4.1.2	空间问题中力对点的矩	36
4.2	力对轴之矩	38
4.2.1	力对轴之矩的概念	38
4.2.2	力对点之矩与力对轴之矩的关系	39
4.3	力系的主矢和主矩	40
4.3.1	力系的主矢和主矩的概念	40
4.3.2	力系等效定理	42
4.4	力偶及其性质	42
4.5	力偶系的合成与平衡	44
	思考题 4	45
	习题 4	46
第 5 章	任意力系	49
5.1	力系的简化	49
5.1.1	力线平移定理	49
5.1.2	空间任意力系向一点的简化	50
5.1.3	空间任意力系的简化结果	52
5.1.4	平面任意力系的简化结果	54
5.1.5	平行力系及物体的形心	55
5.2	任意力系的平衡条件	61
5.2.1	平衡条件与平衡方程	61
5.2.2	平衡方程的应用	65
5.3	物系平衡	67
5.3.1	物体系统平衡问题	67
5.3.2	静定和超静定问题的概念	67
5.3.3	平面桁架	71
	思考题 5	74
	习题 5	75
第 6 章	杆件的内力	80
6.1	内力的定义及其符号规定	80
6.2	内力方程与内力图	82
6.3	梁的平衡微分方程及其应用	87
6.3.1	梁的平衡微分方程	87
6.3.2	梁承受集中荷载的情况	89
6.3.3	根据外荷载画剪力弯矩图	90
6.3.4	弯矩的峰值	91
6.4	简单刚架的内力图	95
	思考题 6	97
	习题 6	98

第 7 章 变形固体的基本概念	106
7.1 应力的基本概念	106
7.1.1 应力矢量的一般概念	106
7.1.2 切应力互等定理	109
7.2 应变的基本概念	110
7.3 材料的力学性能	112
7.3.1 材料力学性能的方向性	113
7.3.2 材料的变形能力	113
7.3.3 材料力学性能中的时间效应	116
7.4 材料的简单本构模型	117
7.4.1 线弹性体	117
7.4.2 弹塑性体*	118
7.4.3 黏弹性体*	119
7.5 材料的破坏及构件的失效	120
7.5.1 构件的强度、刚度和稳定性条件	120
7.5.2 构件的疲劳简介	122
思考题 7	123
习题 7	125
第 8 章 杆件的拉伸与压缩	128
8.1 杆件拉伸和压缩的应力	128
8.2 拉伸和压缩的变形	130
8.2.1 拉压杆的变形	130
8.2.2 简单桁架的结点位移	132
8.3 拉压超静定问题	134
8.3.1 拉压超静定问题及其求解方法	134
8.3.2 装配应力	138
8.3.3 热应力	139
8.4 连接件中应力的实用计算	141
思考题 8	143
习题 8	145
第 9 章 轴的扭转	153
9.1 圆轴扭转的应力	153
9.2 圆轴扭转的变形	158
9.3 扭转超静定问题	160
9.4 矩形截面轴的扭转	161
思考题 9	163
习题 9	165

第 10 章 梁的弯曲应力	170
10.1 梁的弯曲正应力.....	171
10.1.1 梁横截面上的正应力公式	171
10.1.2 梁的最大弯曲正应力	173
10.2 梁的弯曲切应力.....	177
10.3 梁的强度设计.....	183
思考题 10	186
习题 10	188
第 11 章 梁的弯曲变形	193
11.1 挠度曲线微分方程.....	193
11.2 积分法求梁的变形.....	195
11.3 叠加法计算梁的挠度与转角.....	197
11.3.1 荷载的分解与重组	198
11.3.2 逐段刚化法	198
11.3.3 利用结构的对称性	200
11.4 简单超静定问题.....	202
11.5 梁的刚度设计.....	208
思考题 11.....	209
习题 11.....	210
第 12 章 复杂应力状态分析及其应用	217
12.1 应力状态分析.....	217
12.1.1 单元体和应力状态矩阵	217
12.1.2 应力状态分析	220
12.1.3 应力状态的理论分析*	229
12.1.4 三向应力状态简介	233
12.2 应变状态分析.....	234
12.2.1 应变状态	234
12.2.2 应变的测量.....	235
12.2.3 三向应变简介	236
12.2.4 斜方向上应变公式的证明*	237
12.3 广义胡克定律.....	239
12.4 强度准则.....	242
12.5 组合变形应力分析.....	245
12.5.1 拉(压)弯组合	245
12.5.2 斜弯曲	249
12.5.3 截面核心的概念	252
12.5.4 弯扭组合	254
思考题 12	261

习题 12	264
第 13 章 弹性压杆稳定	275
13.1 压杆稳定的一般性概念	275
13.1.1 失稳与临界荷载	275
13.1.2 刚性杆的稳定	276
13.2 理想压杆	277
13.2.1 理想压杆的临界荷载	277
13.2.2 理想压杆的临界应力	280
13.2.3 压杆的稳定性设计	287
思考题 13	288
习题 13	288
附录 I 截面图形的几何性质	294
I.1 几何图形的一次矩	294
I.2 几何图形的二次矩	297
I.3 平行移轴定理	299
附录 I 思考题	301
附录 I 习题	302
附录 II 简单梁的挠度与转角	305
附录 III 常用工程材料的力学性能	307
附录 IV 型钢表	308
附录 V 习题参考答案	317
参考文献	330

第 1 章 绪 论

1.1 工程与力学的关系

什么是工程？这要从它的早期含义说起。古代作战用到了一些如石弩和攻城槌之类的军事器材，掌管设计及操作这些器材的军人被称作工程特种兵。随着武器和战争形式的发展，他们又要负责堡垒、桥梁、道路的修建。18 世纪中叶，出现了一些不在军中服役而从事道路、桥梁、运河建造工作的人，他们从事的工作被称为土木工程。随着采矿、冶金、机械、电子等这些专业性较强的行业相继兴起，形成了一些新的工程门类。今天，工程的含义既包括研究、设计、制造、维修各种人造产品的领域，以及那些合理利用自然资源为人类造福的领域，又包括这些领域中所积累起来的知识体系，还包括体现这些领域中各种成果的艺术等表现形式。总之，工程是一种基于应用的科学与技术。

什么是力学？力学是研究物质机械运动规律的科学。力学所研究的物质，主要指宏观物质；而运动的含义则是广义的，它包含移动、转动、流动、变形、振动、波动、扩散等。一旦理解了力学这个术语，那么工程力学，即力学在工程中的应用，其含义就容易理解了。

力学与工程是紧密相连的。这里仅以力学与土木工程为例，作一个简单的回顾。

人类最初居无定所，利用天然掩蔽物作为安身之处。农业出现以后需要定居，出现了原始村落，土木工程开始了它的萌芽时期。由于受到社会经济条件的制约，古代的土木工程实践依靠手工劳动，只能应用简单的工具，并没有系统的理论。但随着文明的发展和社会的进步，通过经验的积累，逐步形成了指导工程实践的一些通行的规则和方法。

17 世纪到 18 世纪下半叶，伽利略、牛顿等所阐述的力学原理是近代土木工程发展的起点。伽利略在 1638 年出版的著作《关于两门新科学的对话》中，论述了材料的力学性质和梁的强度，首次用公式表达了梁的设计理论。这本书是材料力学领域中的第一本著作，也是弹性体力学史的开端。1687 年牛顿总结的力学运动三大定律是自然科学发展史的一个里程碑，直到现在还是土木工程设计理论的基础。瑞士学者欧拉在 1744 年出版的《寻求具有某种极大或极小性质的曲线的方法》中建立了柱的压屈公式，算出了柱的临界压曲荷载，这个公式在分析工程构筑物的弹性稳定方面得到了广泛的应用。法国学者库伦 1773 年写的著名论文《论极大极小法则对建筑有关的静力学问题的应用》，说明了材料的强度理论、梁的弯曲理论、挡土墙上的土压力理论及拱的计算理论。随后，在材料力学、弹性力学和材料强度理论的基础上，法国学者纳维尔于 1825 年建立了土木工程中结构设计的容许应力法。从此，土木工程的结构设计有了比较系统的理论指导。

在这些理论的指导下，产生了很多具有历史意义的土木工程项目。如 1883 年美国芝加哥在世界上第一个采用了钢铁框架作为承重结构，建造了一幢 11 层的保险公司大楼，被誉为现代高层建筑的开端。1889 年法国建成了高达 300m 的埃菲尔铁塔。该塔已成为巴黎乃至法国的标志性建筑，至今观光者络绎不绝。在第一次世界大战后，许多大跨度、高耸和宏大的土

木工程相继建成。其中典型的工程有 1937 年美国旧金山建成的金门大桥和 1931 年美国纽约建成的帝国大厦。帝国大厦共 102 层，高 378m。这一建筑高度的世界纪录保持达 40 年之久。

第二次世界大战后，力学在非线性的研究等方面有了长足的进步；同时，借助于计算机科学的发展，出现了计算力学这一崭新的领域，并形成了以有限元为代表的新型计算理论和方法。这些成就极大地推动了土木工程领域的飞速发展，使土木工程领域出现了崭新的面貌。这一时期，出现了斜拉桥、网壳网架结构、索膜结构、地下工程等新的结构形式；出现了以流体模拟为基础的现代道路交通理论。土木工程在材料、施工、理论三个方面也出现了新趋势，即材料轻质高强度、施工过程工业化和理论研究精密化。这些新趋势又给力学在材料的本构理论、流变学等多方面提出了新的研究课题。

由此可见，土木工程与力学始终是相互支撑而又相互推动的。

土木工程是这样，机械工程、化学工程、能源工程等也是这样。航空航天工程更是与力学的发展休戚相关，它的每一个重大进展都依赖于力学的新突破。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。同时，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，新的分枝层出不穷。力学与工程的紧密联系，使它成为一门既古老又有永恒活力的学科。

本世纪初，美国工程院历时半年、与 30 多家美国专业工程协会一起评出的 20 世纪对人类社会生活影响最大的 20 项工程技术成就，这些成就展示了工程技术对改变人类生产和生活方式、提高生活质量所产生的巨大影响。而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，如电力系统技术、汽车制造技术、航空技术、航天技术、农业机械化、保健技术、高性能材料、高速公路等。

对工程力学所发挥的重大作用，著名的力学家、航空专家与火箭专家钱学森在 1997 年说：“工程力学走过了从工程设计的辅助手段到中心主要手段的过程，不是唱配角而是唱主角了。”

1.2 工程力学的主要内容

本书所涉及的“工程力学”是一门研究工程构件和机械元件的强度、刚度、稳定性理论的基础性课程，也是固体力学中具有入门性质的课程。它以一维构件作为基本研究对象，定量地研究构件内部在各类变形形式下的力学规律。

所谓**强度 (strength)**，是指构件抵抗破坏的能力。在一定的荷载的作用下，某些构件可能会在局部产生裂纹。裂纹的扩展可能最终导致构件的断裂。还有些构件虽然没有裂纹产生，但可能会在局部产生较大的不可恢复的变形，导致整个构件失去承载能力。这些现象都是工程构件应该避免的。容易想到，将构件换用另一类更加结实耐用的材料，就能够提高构件的强度，这的确是问题的一个方面。正因为如此，这就需要对各类工程材料的力学性能加以研究、分析和比较，把一定的材料应用于最适合的场合。但是问题并非如此简单，因为更加结实耐用的材料往往意味着构件成本的提高。另外一方面，不换用材料，不增加材料用量，而采用更加合理的结构形式，也能提高结构的强度。例如图 1.1 的矩形截面悬臂梁，仅仅将构件的放置方向改变一下，就提高了构件抵抗破坏的能力。因此，在本课程中，将全面地考虑影响构件强度的因素，并予以定量分析，从而使人们能够采取更为合理而可靠的措施提高构

件的强度。

所谓刚度 (stiffness), 是指构件抵抗变形的能力。许多构件都需要满足一定的变形要求。例如在精密仪器中, 结构的布置往往都十分紧凑。构件变形过大, 会使构件之间产生摩擦而妨碍正常运转。如果摩天大楼在风荷载作用之下发生相当大的变形而摇晃, 难免会使位于高层的人们惊慌失措。这些情况都希望提高结构的刚度。另一方面, 跳水运动员往往希望跳板有足够的弹性和适当的变形量, 以便能发挥出更高的水平, 这就要求构件的刚度要与使用要求相适应。针对这些实际要求, 本课程中将研究构件的变形的形式和机理, 研究控制构件变形的措施。

一个容易让初学者混淆的问题就是把强度和刚度混为一谈, 认为提高强度的同时也必然提高了刚度。的确, 有些措施在提高强度的同时也提高了刚度。但即使是这样, 它们在数量关系上也是不一样的。在今后的章节中读者会看到, 当把梁由图 1.1(b) 的形式变为图 1.1(c) 的形式时, 若截面宽度为 b , 高度为 h , 则在同样的强度条件要求下, 允许施加的荷载提高到 $\frac{h}{b}$ 倍; 而在同样的刚度条件要求下, 允许施加的荷载提高到 $\left(\frac{h}{b}\right)^2$ 倍。况且, 还存在着另外的情况。例如, 在以后的学习中可以获知, 在不改变其他条件的前提下, 仅用高强度的合金钢材代替普通钢材, 的确能够提高强度, 却不能明显提高刚度。因此, 强度和刚度是完全不同的两个概念。

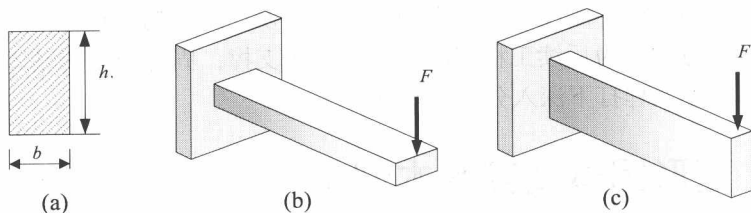


图 1.1 提高强度

从图 1.1 可看出, 如果荷载沿竖直方向作用, 提高构件截面的高宽比有助于提高强度和刚度。但是, 过大的高宽比却可能产生如图 1.2 的另外一类情况。当外荷载不是很大时, 梁保持着仅在竖直平面内发生弯曲的平衡状态, 如图 1.2(a) 的左图。但是当荷载逐渐增大, 原有的平衡状态变得很不稳定了, 很容易转为图 1.2(a) 右图的平衡状态。这种情况称作失稳。图 1.2(b) 的压杆也存在着类似的情况。工程结构应该有足够的保持原有平衡状态的能力, 这就是结构的稳定性 (stability)。本课程将以图 1.2(b) 一类的压杆为例研究多大的荷载会使它失稳, 研究哪些因素在影响压杆的稳定性。

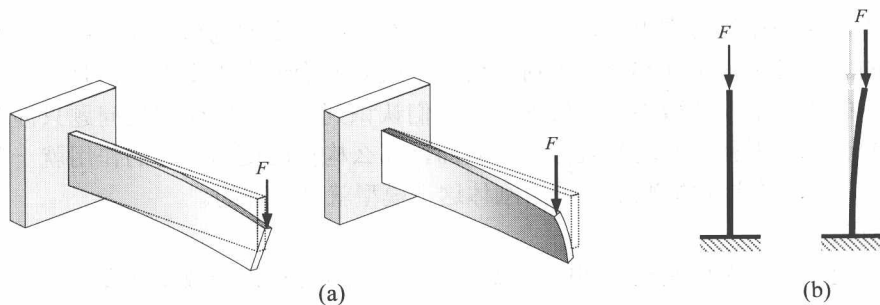


图 1.2 失去稳定性

工程构件要能够正常工作，应能满足强度、刚度和稳定性三个方面的要求。

为了研究构件的强度、刚度和稳定性，必须借助于固体力学中所使用的一系列基本概念；其中最重要的概念是应力、应变和本构关系。

变形体在外荷载的作用下，内部将产生力学的响应。但是，这种内部的力将以什么样的形式出现？外力可以用矢量来描述，变形体中某点处的内力也可以用矢量来描述吗？这种内部的力如何与外荷载相联系？如何与构件的强度相联系？回答这些问题需要使用应力 (stress) 这一概念。

变形体对外荷载的另一类响应是几何响应，这就是变形。当外荷载作用在物体上时，物体将发生怎样的变形？变形有哪些基本形式？它们该如何描述？如何度量？又如何与刚度相联系？解决这些问题要用到应变 (strain) 的概念。

一般地讲（尤其是弹性构件），只要约束允许，变形体内部的力学响应越强烈，它的变形也越大。因此，变形体的力学和几何两类响应应该是彼此相关的。另一方面，由不同材料制成的构件，在相同的荷载作用之下其变形是不一样的，这就意味着力学和几何这两类响应之间的关系与材料特性有关。反映材料特性的关系泛称**本构关系** (constitutive relation)。

应力、应变、本构关系及其所衍生的一系列概念的研究，构成本课程主要内容的又一个方面。

工程力学对构件的强度、刚度和稳定性的研究，为设计工程构件提供了一套行之有效的理论基础分析和计算方法，为后续工程课程提供了技术支撑；固体力学的基本概念，则将为后续的力学课程和工程课程打下深入分析的基础。

1.3 刚体、变形固体及其基本假定

工程力学的研究对象主要是结构的构件、机器的零件等，通常称之为构件。在对构件进行力学分析时，首先需要把实际问题理想化。也就是说，合理地去掉一些次要因素，将实际问题抽象为力学模型，然后利用这种模型去进行分析和计算。最后，还需要将计算结果与实验结果或工程实践相比较。如果误差符合需求，说明力学模型的建立与实际问题相符合，反之，应重新修改力学模型。这是解决实际工程问题的一般分析程序。它充分说明了力学模型的合理性对实际工程计算的直接影响。

工程力学课程的学习也必须从力学模型的建立开始。对于一般的工程构件，人们经常采用刚体和变形固体这两种模型。

(1) 刚体

所谓刚体，就是在外力作用下，大小和形状始终保持不变的物体。在严格的意义上，刚体是不存在的。各类工程构件都会在外荷载作用下或多或少地产生变形。但是，相当多的工程构件所产生的变形都十分微小。不仅如此，人们认识到，如果所研究的问题只涉及构件的平衡和狭义的运动（平移和转动）规律这一侧面，那么构件的变形所起的作用就十分微小，因而可以忽略不计。在这种情况下，使用刚体这一模型就是合理的。

(2) 变形固体

任何固体受力后其内部质点之间的距离都会产生相对变动，导致物体发生了形状和尺寸的改变，称之为变形。由于实际工程中对机器零件和结构部件的安装和运行的精度往往都有明确的要求，而这些要求与变形密切相关。有时，即使微小的变形也会对构件的安全性造成

明显的影响。在这种情况下，刚体这种模型就不再适用了，而必须采用变形固体的模型。

由于工程中绝大部分构件在使用中所产生的都是弹性变形，因此，如果没有特别的说明，本书所讨论的变形固体都是指弹性体。

(3) 基本假定

工程力学作为一门基础性学科，将研究工程构件中普遍存在的力学问题。因此，有必要摒弃个别构件中存在的局部现象，而抓住各类构件普遍存在着的带有共性的本质特征，这就要求把这种共性特征作为研究的基本前提，从而形成这门学科的基本假定。对于所研究的对象，工程力学采用了连续、均匀和各向同性的基本假定。

所谓**连续性 (continuity)**，是指在物体所占据的空间中，物质是无间隙地连续地分布的。所谓**均匀性 (uniformity)**，是指物体的各部分的力学性能是相同的。显然，连续均匀是一种理想化的模型。根据这一模型，连续体中的物理量（如密度、温度等），以及描述物体变形和运动的几何量（如位移、速度等），都假定为空间位置的连续函数。这样，便可以使用无穷小、极限等一系列数学概念。

近代物理学关于物质结构的理论指出，世间一切物体都是由基本粒子构成的。从这个意义上讲，物体构成的模型应该是分离的，物体各部分的组成也是有差异的。但是，如果所研究的对象不是少数粒子的微观的行为，而是大量物质微粒集合的宏观的行为，就可以采用连续均匀模型。

人们之所以能够把事实上分离的物质微粒的集合简化为连续体，其原因在于，单个物质微粒的具体运动对物体的宏观行为影响不大；同时，个体性质相差甚远的物质微粒所构成的物体（例如铸铁和陶瓷），其宏观的力学性质却有可能是很相似的。另一方面，若从单个的物质微粒的运动规律出发去寻求大量物质微粒集合的宏观的运动规律，至少在目前还存在着巨大的数学和物理学的困难，因此，从连续体假定出发直接研究物体宏观的运动规律，在许多情况下仍然是十分必要的。

由于现代工业化生产流程的规范性，把研究对象的材料简化为均匀体也是符合客观实际的。当然，由于科学技术的发展，满足某些特殊要求的非均匀材料也逐渐进入人们的视野。关于非均匀材料的力学特性和机理的研究，是固体力学研究的前沿领域之一。

如果材料的力学性能与空间方向无关，这种材料就称为**各向同性 (isotropy)**的，否则就称为**各向异性 (anisotropy)**的。钢材是一种典型的各向同性材料。如果在一块钢锭中沿不同方向取材制成相同规格的试件进行试验，那么各个试件将显示出相同的力学性能。这就是各向同性的含义。一般的金属材料，如铝、铜等，许多非金属材料，如陶瓷、玻璃、混凝土等，都可以视为各向同性材料。在本书中，除了特别声明的个别情况，总是假定所研究材料都是各向同性的。

工程力学假定，所研究的构件在外荷载作用下发生的变形都是微小的，在很多情况下都是需要用仪器才能观察到的。比如结构工程中的梁，它在荷载作用下整个跨度上所产生的最大位移，也比梁横截面的尺寸小很多。这就是所谓**小变形假定**。

绝大多数工程构件在实际工作状态所发生的变形，都是这样的小变形。这正是采用小变形假定的合理之处。

采用了小变形假定，可以使分析过程得以简化。

第一个简化之处，是使得分析和计算可以在未变形的形态（形状和尺寸）上进行。这可以从图 1.3 加以说明。图 1.3(a) 是一个简单桁架，其中一根杆件是竖直的，另一根是倾斜的。现在欲在下部结点作用一个竖向作用力。根

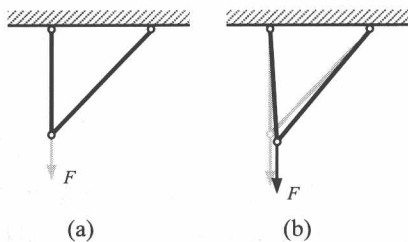


图 1.3 两种计算构型

据中学物理的知识可以知道,斜杆内部没有作用力存在。但是当作用力实际作用而使杆件变形后,平衡的形态将如图 1.3(b) 所示。在严格的意义上,斜杆不是完全没有作用力,因而两杆内部的力及变形都不再如图 1.3(a) 的分析那么简单。但是,严密的分析指出,由于杆件发生的是小变形,图 1.3(b) 计算的结果与图 1.3(a) 的计算结果的差别是比杆件内所发生的小变形还要小一阶的微量,因此完全可以忽略不计,斜杆仍然可认为是没有作用力的。因此,除了特别需要并加以声明之处,本书总是在未变形的初始形态上进行分析研究和计算的。

第二个简化之处,便是对高阶小量的处理。在这里,首先应该明确什么是小量。一般说来,量的大小是相对,例如伸长量 1mm 对原长为 1m 的杆件来讲就是小量;而对原长为 10mm 的杆件来讲就不再是小量了。因此,一般应在无量纲的意义上讨论一个量是否是小量。在许多分析过程中,如果能够确定某些无量纲量是高阶小量,本书都将适时地将其舍去,从而使分析的方程线性化。

与此相联系的是常用函数的近似处理。例如,在已经确认 x 是小量的前提下, $\sin x$ 和 $\tan x$ 都可以简化为 x , 而 $\cos x$ 则可以简化为 1。诸如此类的处理将在本书中经常出现,这可以使分析计算容易得多。

1.4 杆件及其基本变形形式

工程结构是工程中各种结构的统称,包括机械结构、土木结构、水利结构、电站结构、核反应堆结构、航空航天结构、船舶结构、电器电子元件结构等。工程结构的组成部分统称为结构构件,简称为构件。构件是构成工程结构的最小单元。本课程的研究就从这个最小单元开始。

工程构件的形式千差万别,但仍然可以根据其形状尺寸的特点划分为杆、板、壳、体四种类型,如图 1.4(a)、(b)、(c)、(d) 分别所表示。其中,“杆”在某一个方向上的尺寸显著地大于其他两个方向上的尺寸。“板”在某一个方向上的尺寸显著地小于其他两个方向上的尺寸,而且板面曲率为零。若构件在某一个方向上的尺寸显著地小于其他两个方向上的尺寸,同时板面曲率不为零,则构成“壳”。而“体”则在三个方向上的尺寸相差不大。

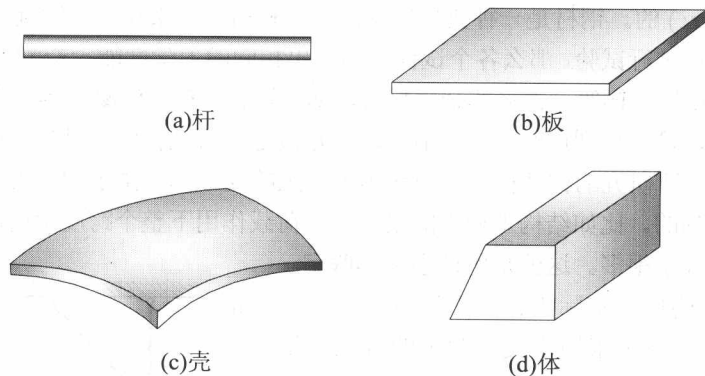


图 1.4 工程构件的基本类型

在本课程中,尤其是从第 8 章到第 13 章,将以杆件作为研究的基本对象。应当指出,虽然本课程主要研究杆件,但分析杆件所使用的一系列概念,如应力、应变、本构关系等,却是固体力学乃至其他力学分支所共有的基本概念;同时也是对其他类型(板、壳、体)构件

进行力学分析的基础。

杆件的各截面的形心的连线形成轴线。根据轴线的形状，杆件可分为直杆和曲杆。垂直于轴线的截面称为横截面。根据横截面的变化情况，杆件可分为等截面杆（或分段等截面杆）和变截面杆。

杆件在外荷载作用下将发生变形。其基本的变形形式分为四种。

如果外力作用在轴线上，杆件将会发生拉伸（tension）或压缩（compression）的变形，如图 1.5(a) 所示。在拉压变形中，杆件的两个相邻的横截面的距离会增加或缩短。桁架的各部件、吊索、千斤顶螺杆等构件在受力时就将发生这种变形。拉压构件一般就直接称为杆（bar），有时候也把竖直方向上承受压缩荷载的构件叫柱（column）。

如果垂直于杆件轴线方向作用着一对反向的外力，且这一对反向力之间的距离相距很近，杆件就会产生剪切（shearing）变形，如图 1.5(b) 所示。在剪切变形中，两个相邻的横截面将会发生平行错动。销钉、螺栓、键等连接件中在受力时就将发生这种剪切变形。

扭转（torsion）是又一类常见的变形，如图 1.5(c) 所示。通常把这种发生扭转变形的杆件称为轴（shaft）。在扭转中，两个相邻的横截面会绕着轴线发生相对的转动。机械中的传动轴、汽车方向盘传动杆、钻杆等构件在工作状态就会发生扭转变形。

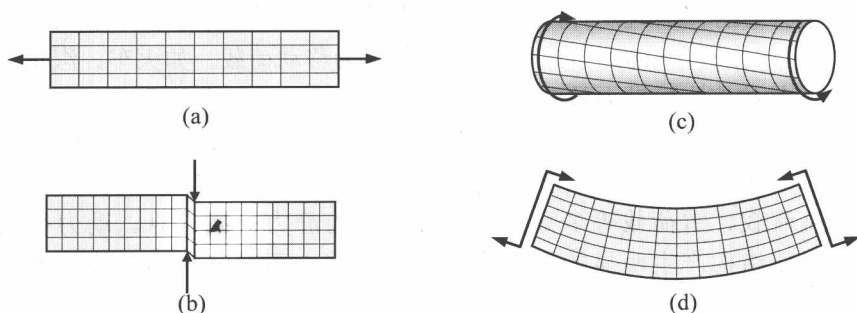


图 1.5 杆件的基本变形

还有一类变形称为弯曲（bending），如图 1.5(d) 所示。通常把这种发生弯曲变形的杆件称为梁（beam）。在弯曲变形中，两个相邻的横截面会绕着垂直于轴线的一条线发生相对的转动。结构工程中的横梁、桥式起重机的大梁、火车的轮轴等所发生的变形就是弯曲的例子。

实际工程结构中的杆件，有的只发生一种基本变形，有的则会同时发生几种基本变形，这类变形称为组合变形。例如图 1.6 所示的夹紧装置，当它被使用时，上方的弯臂部分就发生了拉伸和弯曲的组合变形。图 1.7 所示的直升机中连接螺旋桨与机体的主轴，在飞行过程中则发生了扭转、拉伸的组合变形；如果机体的重心不在主轴所在的直线上，则变形还包括弯曲。

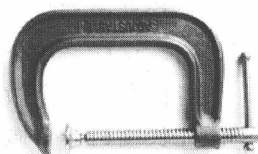


图 1.6 夹紧装置



图 1.7 直升机