



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



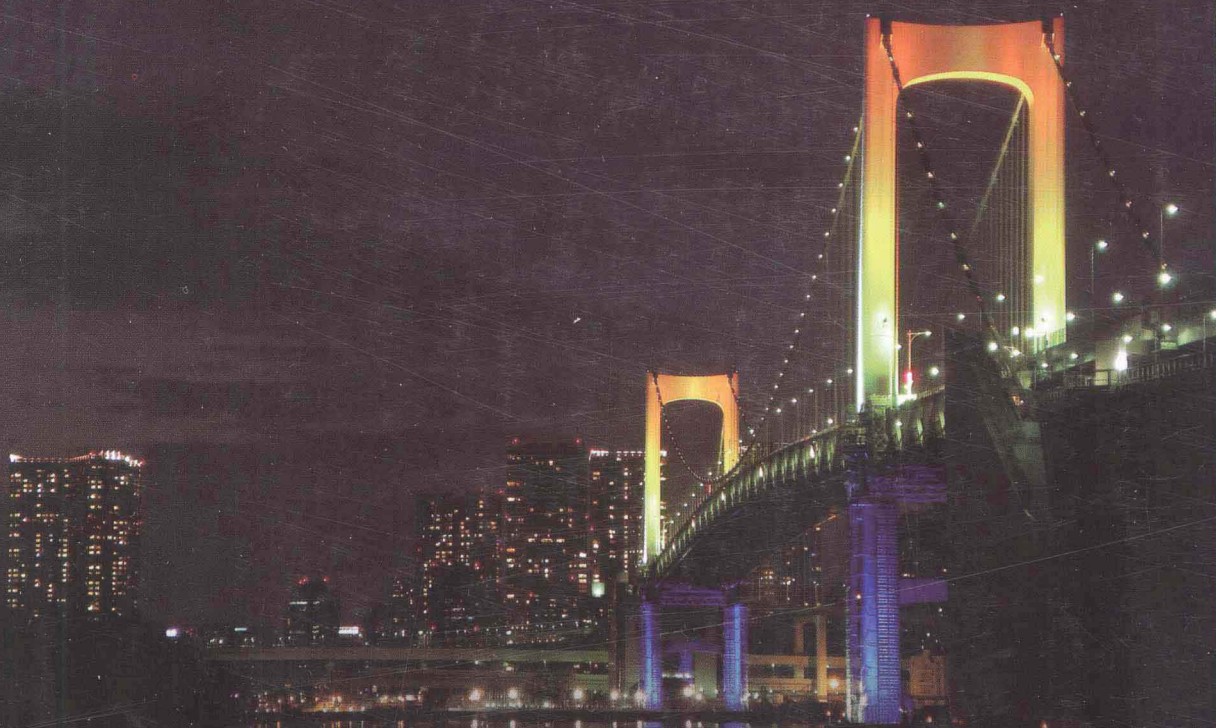
北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

高等院校精品教材系列

材料力学教程

◎ 韩 斌 刘海燕 水小平 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
北京高等教育精品教材
高等院校精品教材系列

材料力学教程

韩 斌 刘海燕 水小平 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“材料力学课程教学基本要求(A类)”编写,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和北京高等教育精品教材,也是国家精品课程的配套教材。全书共分10章。内容包括:杆件在一般外力作用下的内力分析、应力应变分析及应力应变关系、轴向拉压及材料的常规力学性能、扭转、弯曲、组合变形、能量法、静不定结构、压杆稳定、动载荷。全书共配有591道题目,其中包括例题128道、思考题168道和习题295道,以及北京理工大学2010~2013年攻读硕士学位研究生入学考试“材料力学”试题。

本教材可作为高等学校工程力学类、航空航天类、机械类、材料类、动力类、土建类、船舶类、水利类专业本科生多学时材料力学教材,也可供函授、远程、高职高专的相关专业师生及有关工程技术人员参考,同时也是研究生入学考试和教师备课值得选用的参考材料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学教程/韩斌,刘海燕,水小平编著. —北京:电子工业出版社,2013.11

高等院校精品教材系列

ISBN 978-7-121-21763-0

I. ①材… II. ①韩… ②刘… ③水… III. ①材料力学—高等学校—教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第257634号



策划编辑:余 义

责任编辑:余 义

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:25.25 字数:713千字

印 次:2013年11月第1次印刷

定 价:56.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“材料力学”是一门与工程实际联系非常紧密的技术基础课,对许多工科专业来说,是学生接触工程实际的第一门课程,也是学生从理论基础课程向工程专业课程过渡的一座桥梁,其教学质量的优劣对许多后续专业课程的学习都有直接的影响。这门课程同时运用了较多的高等数学知识进行理论分析与定量计算,研究解决的又是工程中真正的实际问题,是直接为各应用领域的工程技术服务的。

本教材根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“材料力学课程教学基本要求(A类)”,借鉴了国内外一些优秀教材的成功经验,结合北京理工大学工程力学教研室(我校“工程力学”课程2006年被评为国家级精品课程,工程力学教学团队2007年被评为首届国家级教学团队)多年来的教学研究、改革与实践的成果和作者二十多年从事基础课教学的丰富经验编写而成,并被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和北京高等教育精品教材。

本教材注重材料力学的基本概念、基本理论和基本方法的阐述,力求体系优化、条理清晰、叙述清楚、内容翔实,所选例题、思考题和习题富有新意,题型覆盖面广并难易兼顾,着力培养学生将工程实际问题简化为适当力学模型并进行理论分析和工程计算的能力。围绕着重视理论基础,掌握研究方法,加强综合能力,提高科学素质,培养工程意识和激发创新思维等培养目标进行了有益的尝试。

材料力学具有公式繁多,知识点零散,基本概念和基本理论貌似浅显却难以深入掌握等特点,所研究的问题与工程实际及日常生活有着广泛的联系,解题过程中需要对基本定理或原理加以灵活应用,抓住主要矛盾,略去次要因素,并将其抽象为适当的理论模型,对于工科的大学生,这是他们从纯理论的基础课走向工程专业课学习的第一步。本教材较多地采用从一般到特殊的知识体系,结构紧凑,表述简洁,在重视理论分析的同时,特别注重其在实际工程中的应用,通过例题、思考题和习题将书本理论应用于实际问题,有利于培养和提高学生的学习兴趣和应用理论知识解决实际问题的能力。在例题的编写方面,注意典型性、多样性、新颖性、综合性、实用性与启发性,解题步骤规范,着力培养学生的正确思考方法。针对学生在阅读例题时往往止步于求出答案,缺乏对例题的深入思考这一弊端,本书在所有例题的后面都附有求解过程中的注意事项,有的特别点明本题的解题关键,有的详细点出学生在解题中容易混淆的概念或容易忽略的问题,还有的明确指出初学者常犯的错误及其根源,有的对学生可能遇到的相关问题展开了进一步的分析与讨论,让学生加深、加宽对问题本质的理解,以启迪学生的思维,开阔学生的视野,起到举一反三的作用。有些例题加强了与工程实际的联系,有助于提高学生的学习兴趣,对培养学生的工程意识也有促进作用;有些例题还给出了一题多解,并对各种方法进行了一定的分析与比较,从而引导学生用多角度分析问题,锻炼学生的综合思维能力,对培养学生的创新能力也有一定作用。每章后面都配有一定数量的与教学内容相关的思考题,一方面将有关重要概念的理解引向深入,另一方面也给学生留下独立思考的空间。每章之后还配有类型多样、

难度不等的习题,覆盖基本理论和基本方法的掌握以及理论结合实际问题的灵活应用,使学生得到比较全面的训练,并适度增加了综合性练习,以满足学生进一步提高的要求。为方便读者,书后附有习题参考答案。本书中的很多例题、思考题和习题是作者参考国内外一些优秀教材和教辅书籍中部分例题、思考题和习题,结合自己二十多年的教学经验重新编撰的,在此,作者向这些教材、教辅书籍的编著者们深表谢意!附录C给出了北京理工大学2010~2013年攻读硕士学位研究生入学考试“材料力学”试题,相信对有志于报考相关专业的研究生在“材料力学”课程的系统复习和提高方面有一定的帮助。

总之,全书力争将基本概念阐述得科学、准确,将基本理论阐述得系统、全面,将基本方法阐述得清楚、易懂,帮助读者在较短的时间内深入理解并融会贯通所学知识,掌握综合分析和解决基本实际力学问题的方法,具备理论联系实际的能力,富有开拓精神和创新思维,更好地满足新世纪对人才培养的更高要求。

本教材由全国力学教学优秀教师韩斌副教授潜心编著,刘海燕副教授仔细校核了所有例题和习题的解答并绘制了部分思考题和习题的插图,全国优秀教师、第三届北京市高等学校教学名师奖获得者水小平教授对全书内容进行了认真审核,并作了进一步修改完善。工程力学教研室全体教师对初稿经过了四年的教学实践,获得了很好的教学效果。廖力、秦晓桐、李海龙、白若阳、赵希淑等老师在教材的编写过程中也参与了部分工作,书中部分内容取自教师们日常教学中的研讨及期末试题。

首届高等学校国家级教学名师奖获得者梅凤翔教授对书稿进行了详细审阅并提出了宝贵意见。本书在编写过程中得到北京理工大学教务处、宇航学院的相关领导的关心和鼓励,电子工业出版社对本教材的出版提供了大力支持和热情帮助。对此,作者一并表示衷心的感谢!

编写一套基本概念清楚,基本理论系统,例题和解题指导富有启发性,与教材内容结合的思考题和习题类型丰富、题材新颖,并能与实际问题的紧密结合的材料力学教材是作者多年的愿望,也深深体会到做好这项工作的艰难,需要有极大的热情、强烈的责任心并投入不懈的精力。限于作者的水平,教材中难免存在疏漏和错误之处,真诚期待广大读者提出进一步修改的意见和建议,使本教材能够不断得到改进和提高。

韩 斌 刘海燕 水小平

2013年10月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

绪论	1
1.1 外力与杆件横截面上的内力	3
1.2 杆件变形的基本形式	6
1.3 杆件的内力方程和内力图	7
1.4 直杆横截面上内力与载荷集度的微分关系	18
1.5 弯曲时内力图的绘制	19
思考题	36
习题	38
第 2 章 应力应变分析及应力应变关系	42
2.1 应力的概念及变形体在一点处的应力状态	42
2.2 平面应力状态的解析法	44
2.3 平面应力状态的图解法——应力圆(莫尔圆)	48
2.4 三向应力状态分析简介	49
2.5 应变的概念及一点处的应变状态	57
2.6 平面应力状态下的应变分析	59
2.7 应力应变关系	60
思考题	66
习题	68
第 3 章 轴向拉压及材料的常规力学性能	72
3.1 轴向拉压杆件的应力和变形	72
3.2 常温静载下材料的基本力学性能	77
3.3 材料的塑性变形机理与模型	82
3.4 复合材料的力学性能及新材料简介	83
3.5 轴向拉压杆件的失效及强度条件	84
3.6 轴向拉压杆件的分析和强度计算	85
3.7 应力集中及其对构件强度的影响	89

3.8 剪切和挤压的工程实用计算	90
3.9 变形比较法求解简单拉压静不定问题	92
思考题	95
习题	98
第4章 扭转	103
4.1 圆轴扭转时的应力和变形	103
4.2 圆轴扭转的强度与刚度	108
4.3 非圆截面杆扭转简介	113
4.4 薄壁杆件扭转简介	114
4.5 圆轴的弹塑性扭转	118
思考题	120
习题	122
第5章 弯曲	127
5.1 弯曲变形的基本概念与分类	127
5.2 纯弯曲时的应力与弯曲正应力公式	128
5.3 剪切弯曲时的应力与弯曲切应力公式	131
5.4 弯曲强度条件及应用	138
5.5 弯曲中心简介	145
5.6 弯曲变形的描述与挠曲线近似微分方程	147
5.7 计算弯曲位移的积分法	149
5.8 计算弯曲位移的叠加法	155
5.9 提高弯曲强度和刚度的主要措施	159
5.10 弯曲问题的进一步讨论	161
思考题	165
习题	169
第6章 组合变形	175
6.1 组合变形的概念与分析方法	175
6.2 复杂应力状态下的强度理论	175
6.3 斜弯曲	182
6.4 拉(压)弯组合变形与偏心拉压	186
6.5 弯扭组合变形	191
6.6 组合变形的一般情形	196
思考题	198
习题	203

第 7 章 能量法	210
7.1 弹性变形固体的外力功、应变能和功能原理	210
7.2 互等定理	217
7.3 变形体的虚位移原理及杆件的虚功方程	219
7.4 单位载荷法	220
7.5 单位载荷法用于求解线弹性结构的位移——莫尔定理	223
7.6 计算莫尔积分的图乘法	227
思考题	237
习题	241
第 8 章 静不定结构	246
8.1 静不定结构的概念与分类	246
8.2 力法求解静不定结构	249
8.3 利用对称性与反对称性简化静不定结构的求解	261
8.4 温度应力和装配应力问题	271
8.5 静不定结构的主要特点及其在工程中的应用	276
思考题	276
习题	280
第 9 章 压杆稳定	286
9.1 压杆稳定的基本概念	286
9.2 理想细长压杆的临界压力	288
9.3 压杆的柔度与临界应力	299
9.4 压杆的稳定性计算	304
思考题	311
习题	315
第 10 章 动载荷	319
10.1 动载荷的基本概念	319
10.2 以恒定加速度平移或做匀速转动构件的强度计算	319
10.3 冲击问题	322
10.4 交变应力与疲劳失效	338
思考题	347
习题	350
附录 A 平面图形的几何性质	355
A.1 静矩和形心	355

A.2 惯性矩、极惯性矩与惯性积	357
A.3 平行移轴公式	358
A.4 转轴公式、主惯性轴与主惯性矩	360
思考题	363
习题	364
附录 B 型钢表	366
附录 C 北京理工大学 2010~2013 年攻读硕士学位研究生入学考试“材料力学”试题	369
习题参考答案	377
参考文献	392

绪 论

材料力学是固体力学的一个分支,研究的内容是构件(主要是杆件)在外力作用下产生的内力、变形以及破坏的规律。

在工程实际中广泛应用的各类机械与结构,都是由各种零部件构成的,如机床的轴,汽车的叠板弹簧,房屋和桥梁的柱和梁,桁架结构中的直杆等,这些部件统称为**构件**。机械和结构处于工作状态时,其构件受到外力的作用,会发生形状、尺寸的变化,即产生**变形**。如果构件的变形过大,甚至产生断裂,或者结构整体丧失了稳定性,都不能保证其正常和安全地工作。通过增加构件的尺寸,尽量选用优质材料,一般来说可以提高构件承载能力和工作时的安全性,但同时也增加了成本,甚至造成了浪费。因此,在尽可能经济合理的条件下,保证机械和结构在正常工作状态下具有足够的**强度**(抵抗破坏的能力)、**刚度**(抵抗变形的能力)和**稳定性**(保持原有平衡形式的能力),就是材料力学这门学科分支的基本任务。

材料力学的研究对象是工程中的构件,制造构件的材料各不相同,有异常复杂的成分和多种多样的微观结构,但材料力学对构件进行的是宏观力学分析,只保留各种材料的主要宏观共性,将其抽象为变形固体理想模型,并对其作如下基本假设:

连续性假设——组成变形固体的物质密实地充满了其所占据的空间,内部不存在空隙。因而各类物理量均可表示为空间坐标的连续函数,并可运用数学分析工具进行微分、积分等运算,且变形固体在变形前后均保持连续性。

均匀性假设——变形固体在外力作用下产生的力学响应(即材料的力学性能)与空间位置无关。因而变形固体内任意一点处的力学性能都完全相同,可任取材料试样进行试验以测定该种材料的力学性能参数。

各向同性假设——变形固体在任意点处的宏观力学性能都与材料的空间取向无关,即各向同性材料。实际上,大多数金属材料都由无数小晶粒构成,各个晶粒本身具有微观结构,故呈现各向异性,但大量晶粒随机取向构成的材料,其宏观效果则呈现出各向同性。不过某些材料(如木材)由于其特殊的微观结构,宏观上应按各向异性处理。

小变形假设——工程实际中大多数构件的变形量与其原始尺寸相比是很小的,因而在研究构件的受力平衡时可以忽略变形引起的尺寸改变,采用变形前的原始尺寸进行简化计算,结果产生的误差仍在工程应用许可的范围内。

在工程实际中,形状多种多样的构件按其几何特点可分为具有一维尺寸的杆件、二维尺寸的板或壳和三维尺寸的块体三类。材料力学的研究对象主要是杆件及由杆件组成的简单杆系结构。其他两类构件及较为复杂的杆系结构则属于弹性力学及结构力学的研究领域。

材料力学是与工程实际有紧密联系的各类工程技术学科的基础,掌握了材料力学的基本知识和研究方法,就为进一步学习工科各领域的专业课程铺平了道路。材料力学的分析方法是在实验的基础上对问题作合理的假设,将复杂的实际问题简化并运用力学基本原理和数学运算工具,得出便于工程应用的理论结果和计算公式。依照这些结论对工程中的构件进行受力、变形和失效分析,为其选择适当的材料,设计合理的截面形状尺寸,使构件达到既安全又经济的设计目标。因此,材料力学本身与工程实际有非常紧密的联系,在航空、航天、机械、土木、交通、兵器、材料等各工程技术领域都有广泛的实际应用。

材料力学的研究方法既要用到力学的基本原理和理论结果,又要结合实验结果并考虑工程实际因素进行合理简化与假设,因此是一门实践性很强的工程技术基础课。学习材料力学应做到:深刻理解基本理论和基本概念,特别注意它们与工程实际的联系,尤其是与工程背景有关的基本假定和合理简化;灵活掌握基本研究思路和基本计算方法,熟悉并理解其工程应用背景,避免单纯死记硬背公式;注意归纳整理典型实例,触类旁通,举一反三,提高运用基本方法解决工程实际问题的能力等。

第 1 章 杆件在一般外力作用下的内力分析

工程实际中的机械和结构都是由各种类型的构件组成的,构件可依据其三维方向上的几何特点分为杆件、板或壳、块体等几大类。在一个方向上的尺寸远大于另外两个方向尺寸的构件,常称为**杆件**;若在一个方向上的尺寸远小于另外两个方向的尺寸,这类构件常称为**板**(各处曲率都为零)或**壳**(至少有一个方向的曲率不为零);若构件在三个方向上的尺寸量级相当,则称为**块体**。

工程中应用的许多重要构件(如传动轴、连杆、承重结构的梁和柱等)都可以视为杆件。还有某些构件(如曲轴的轴颈、连接件等)虽然不是典型的杆件,但在进行定性分析或工程近似计算中,也常常简化为杆件。

杆件的几何特征由横截面和轴线表示。垂直于杆件长度方向的截面称为**横截面**;各横截面形心的连线称为**轴线**;轴线为直线时称为**直杆**,轴线为曲线时称为**曲杆**;横截面的形状、尺寸不沿轴线变化的杆件称为**等截面杆**,否则称为**变截面杆**(图 1.1)。

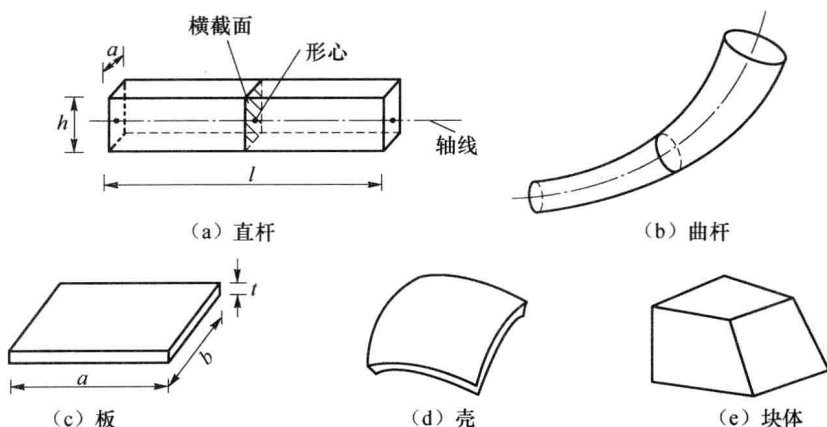


图 1.1 各类构件

材料力学的主要研究对象就是杆件和由杆件组成的简单杆系结构。

1.1 外力与杆件横截面上的内力

工程中的构件在工作状态下会受到主动力及其他部件的作用,当以某个构件为研究对象时,主动力及其他部件对该构件的作用力均称为**外力**,也统称为**载荷**。

按照工程中常见的外力作用方式,作用于杆件上的外力可依其特点进行如下分类。

根据载荷随时间变化的特点,可分为:

静载荷——载荷的大小由零开始非常缓慢地增加到某一数值后即保持不变。将重物缓慢地放置在承重支架上时,重物对支架的作用就可视为静载荷。

动载荷——载荷随时间显著变化,或构件在载荷作用下处于运动状态,并产生不可忽略的加速度。例如,齿轮传动系统在工作时,每个齿轮的齿所受到的啮合力就是随时间周期性变化的;机床急刹车时飞轮的轴、锻造时汽锤的锤杆受到的是瞬时突然作用的外力等,都是典型的动载荷。

材料力学研究的主要内容是静载荷作用下杆件的各种响应,对动载荷作用下情形,将以专门的章节加以讨论。

除了按其随时间变化的特点分类外,外力作用于构件上还有各种各样的作用方式。作用于物体表面的外力称为**表面力**,如两物体接触时相互作用力,液体对容器内壁的压力等。作用于物体内部连续分布的各质点上的外力称为**体积力**,如物体的自重和运动过程中其各点有加速度时所加的惯性力。在材料力学中,主要涉及的是一维杆件,对作用于杆件上的表面力或体积力,则按其分布特点向杆件的轴线进行简化后,得到如下几种形式的静力等效力系:

分布力——连续地作用于杆件一段长度范围内的外力。描述分布力可用外力沿杆件轴线的分布规律表示,即作用于单位长度轴线上的外力,称为**线分布集度** q ,单位为 N/m 、 N/mm 等。若沿轴线建立 x 坐标轴,则 $q(x)$ 称为线分布集度函数,当 $q(x)$ 为常数时称为**线均布载荷**。例如,均质材料的横梁,其自重可简化为沿轴线分布的均布载荷。挡水堤坝受到的水压力,沿水深方向为线性分布,可简化为**三角形分布载荷**(图 1.2)。

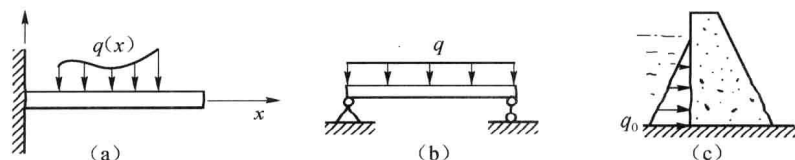


图 1.2 分布载荷

集中力和集中力偶——若外力在杆件轴线方向上的作用范围远小于杆件轴线方向长度的量级,则可将该外力简化为作用于杆件轴线上某一点处的合力或某截面处的合力偶,称为**集中力**或**集中力偶**。例如,火车车厢作用于火车轮轴上的压力(图 1.3(a)),滚珠轴承支座对轴的约束力(图 1.3(b))等都可简化为集中力。电机传动轴外伸部分受到的胶带张力,可向传动轴轴线简化成为集中力和集中力偶(图 1.3(c));开车时双手转动汽车方向盘所施加的一对力,可简化为作用于方向盘转动轴上的集中力偶(图 1.3(d))。

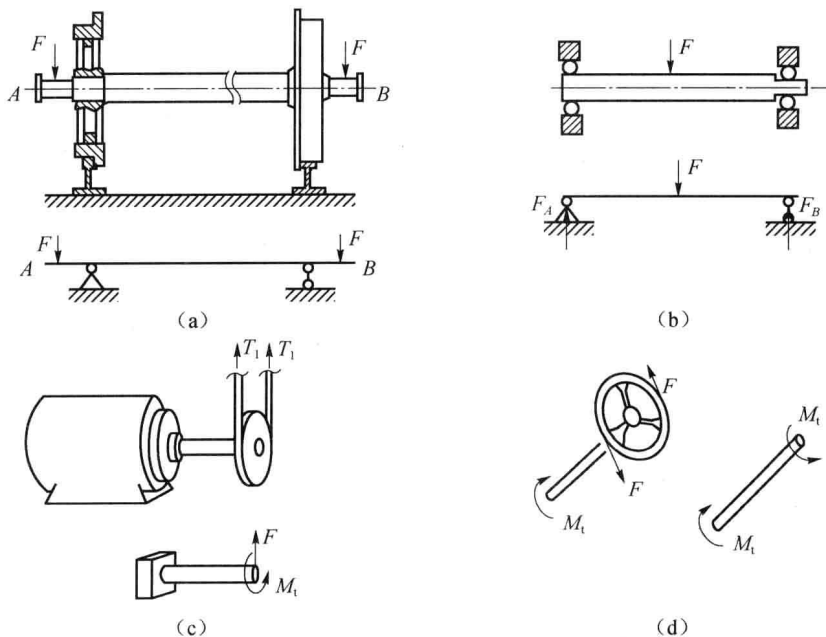


图 1.3 集中力和集中力偶实例

在外力作用下,杆件内部的任意截面上都会产生截面一侧部分对截面另一侧部分的相互作用

力,称为杆件在某一截面上的内力。已知杆件所受的外力,求其任意截面上的内力,可采用“理论力学”课程静力学部分中曾经介绍过的“截面法”。

如图 1.4 所示,杆件 ABD(也可为曲杆)受空间一般力系作用,若讨论杆件在横截面 B 上的内力,可用一假想平面沿横截面 B 将杆件切开成为 AB 和 BD 两部分,则每一部分在切开的横截面内各点处都受到另一部分的约束力作用,横截面上各点的约束力构成一分布力系。将该分布力系向所在横截面的形心 C 处简化,得到与之等效的一个力 $\mathbf{F}$ 和一个力偶 $\mathbf{M}$,利用杆件切开后任意一部分的静力学平衡条件就可以确定 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{M}$ 。 $\mathbf{F}$ 即为该横截面上的内力矢量,而 $\mathbf{M}$ 即为该横截面上的内力偶矢量。

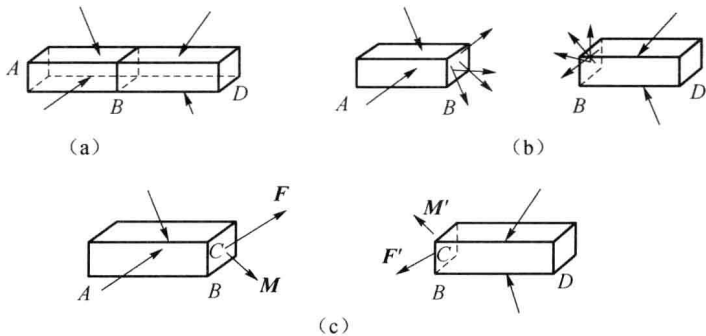


图 1.4 杆件内力

为了便于分析杆件与内力相关的变形,以杆件的轴线为 x 坐标轴,在横截面上再取相互垂直的 y, z 两坐标轴,构成杆件的直角坐标系(图 1.5(a))。将杆件横截面上的内力 $\mathbf{F}$ 和内力偶 $\mathbf{M}$ 分别沿直角坐标轴的 3 个方向分解,得到 3 个内力分量和 3 个内力偶矩分量(图 1.5(b))。这 6 个分量可归纳为 4 种类型的内力分量。

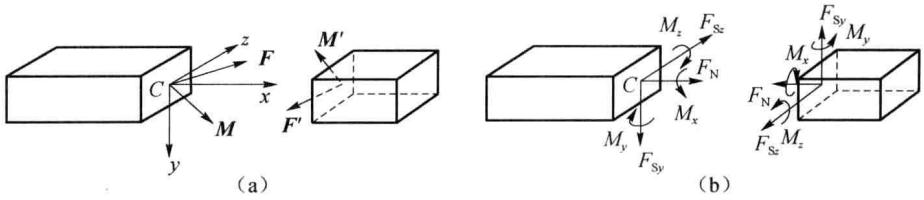


图 1.5 杆件的直角坐标系和内力分量

- 轴力**——内力 $\mathbf{F}$ 沿垂直于横截面的 x 轴方向的分量,称为轴力,用 F_N 表示;
- 剪力**——内力 $\mathbf{F}$ 在横截面内的分量,即沿 y 轴和 z 轴方向的内力分量 F_{Sy} 、 F_{Sz} ,两者的合力为 F_S ,称为剪力;
- 扭矩**——内力偶矩 $\mathbf{M}$ 沿 x 轴方向的分量称为扭矩,用 T 表示,扭矩的作用面为杆件的横截面;
- 弯矩**——内力偶矩 $\mathbf{M}$ 沿 y 轴和 z 轴方向的分量 M_y 、 M_z ,其作用面分别为 xz 平面和 xy 平面, M_y 和 M_z 的合力偶矩称为弯矩。

以上 4 种内力分量就表示了杆件在横截面上的内力,不同的内力分量,引起杆件不同类型的变形,由于材料力学中这些内力分量并不涉及矢量运算,故并不用矢量符号表示它们,只取其在自身方向上的投影大小表示,同时规定其正负号。

此外,在讨论杆件某个截面上的内力分量时,由于内力是通过截面法将该截面切开并取分离体列写平衡方程得出结果的,如果在某截面上恰好作用了集中外力,则无法通过截面法切取分离体确定该截面的内力分量。实际上,在有集中外力作用附近的截面相应的内力分量分布很复杂,无法用材料力学的简化分析方法求解(见 1.3 节例 1.1 后的注意事项中有关“圣维南原理”的解释),故作用了集中外力附近的截面不在材料力学的适用范围内。

1.2 杆件变形的形式

对变形体来说,外力的作用除了产生内力之外,还会引起变形体形状或尺寸的变化即变形。受不同外力作用的杆件,变形可能是多种多样的,但其基本变形形式可分为 4 种,即轴向拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲。工程实际中杆件的真正变形往往是这 4 种基本变形之一或由两种以上基本变形组合而成。

轴向拉伸或压缩——杆件所受外力或外力系简化后的合力,其作用线与杆件的轴线重合,杆件横截面上的内力分量仅有轴力,称为轴向拉伸或压缩。轴向拉压时杆件的变形主要是沿轴线方向的伸长或缩短。例如,起吊重物的钢索、支架结构中的二力杆、房屋的立柱等(图 1.6)。

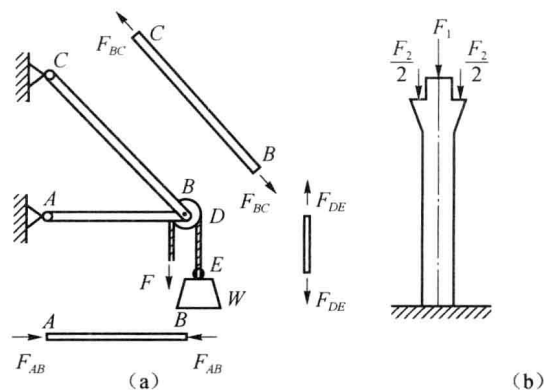


图 1.6 轴向拉伸或压缩实例

剪切——杆件相距很近的两个横截面内作用一对大小相等,方向相反的横向外力,其间的各横截面上的主要内力分量为剪力,称为剪切。剪切时杆件相邻的两横截面将产生相对错动。工程中常见的各类连接部件如销钉、螺钉、铆钉和键等都产生剪切变形(图 1.7)。由于这些连接件本身尺寸较小,受力情况复杂,其几何形状又难以归纳为典型的杆件,故材料力学分析连接件的内力和变形时采用了假定的工程实用计算方法。此外,杆件受到一般的垂直于轴线的任意外力作用时,还会产生另一种基本变形——弯曲(如下文所述),这种情况下,剪切变形的影响往往处于次要地位。

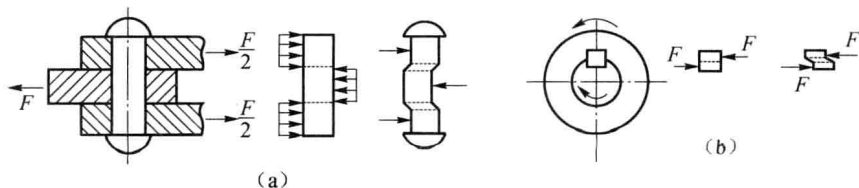


图 1.7 剪切实例

扭转——杆件的不同横截面内作用了外力偶,横截面上的内力分量仅有扭矩,称为扭转。扭转时杆件的任意两个横截面都可能发生绕杆件轴线的相对转动。变形形式主要为扭转的杆件常称为轴。

各类机械中的传动轴、汽车方向盘的转向轴等都是产生扭转变形的例子(图 1.8)。

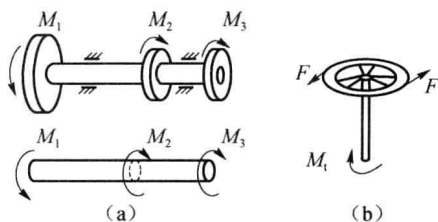


图 1.8 扭转实例

弯曲——杆件上作用了垂直于杆件轴线的集中力、分布力或作用面位于包含杆件轴线的纵向平面内的外力偶,横截面上的内力分量有剪力和弯矩,称为弯曲。弯曲时杆件的主要变形特点是轴线的形状从直线变为曲线(或曲线的曲率发生改变)。变形形式主要为弯曲的杆件常根据其轴线的形状

称为梁、刚架或曲杆。如桥式起重机的大梁、房屋结构中的横梁、框架结构及水槽等(图 1.9)。

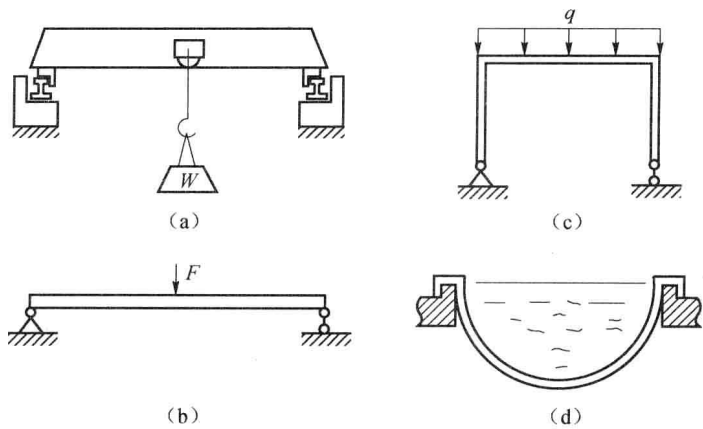


图 1.9 弯曲实例

1.3 杆件的内力方程和内力图

杆件横截面上的内力随横截面位置变化的情况,可以通过内力分量随坐标 x 变化的函数关系表示出来,称为内力方程。即

$$F_N = F_N(x), F_S = F_S(x), T = T(x), M = M(x) \tag{1.1}$$

通常,杆件的内力分量随坐标变化的函数关系需要分段表示,集中外力或集中外力偶的作用处以及分布外力集度函数形式变化处都是相应的内力方程的分段点。分段点所在的横截面也称为控制面。在各分段点之间的每一段内利用截面法可求出该段内力方程的具体表达式。

工程上还常用内力图更直观地描述内力随横截面位置变化的情况,即描绘出内力随 x 变化的函数图形。

若内力随 x 轴变化的图形比较简单,可先列出内力方程再根据方程绘出函数图形,例如轴力图和扭矩图的绘制。对于剪力和弯矩,由于随 x 轴变化的情况比较复杂,工程上采用直接利用剪力、弯矩与载荷分布之间的微分关系绘制剪力图和弯矩图。下面就各内力分量的内力方程列写和内力图绘制分别加以讨论。

1. 轴力的符号规定及轴力方程和轴力图

对轴向拉压的杆件,在切开的任意横截面 $m-m$ 上,轴力分量 F_N 的符号规定是:与横截面外法线方向一致的轴力符号为正,反之为负,即杆件在该横截面处受拉为正,受压为负(图 1.10)。

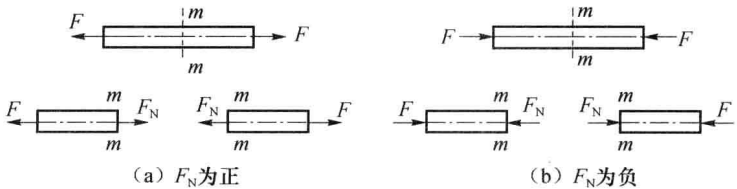


图 1.10 轴力的符号规定

考虑变形形式为轴向拉压的杆件 AC (图 1.11(a)),沿杆件轴线建立 x 坐标轴。根据杆件的受力可知 B 截面为分段点,轴力方程可分为 AB 与 BC 两段列写。若求 AB 段的轴力方程,可在 AB 段任取坐标为 x 的截面 $m-m$,将杆件切开分为两部分,画出切开截面上的内力分量 $F_N(x)$,任取一部分为分离体(如取右半部分)列 x 方向的力的平衡方程,即可得到 $F_N(x)$ 的表达式(图 1.11(b))。在