



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

简明材料力学

第2版

刘鸿文 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

简明材料力学

第 2 版

	刘鸿文	主编	
刘鸿文	林建兴	曹曼玲	编著
	陈乃立	修订	

高等教育出版社

内容提要

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。它保持了原书的风格和特色,作了少量的修订。全书精选的材料力学的基本内容,与第一版相同,包括第1章至第13章,计有:绪论,拉伸、压缩与剪切,扭转,平面图形的几何性质,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,应力状态分析和强度理论,组合变形,压杆稳定,动载荷,交变应力,能量方法和超静定结构。本书如不讲授最后一章,并对其他章节作适当删减,可用作少学时的材料力学课程的教材;若能在能量方法、超静定结构等方面略作补充,本书亦可用作多学时材料力学课程的教材。

刘鸿文主编的《材料力学实验》(第3版)可与本书配套使用。

与刘鸿文主编的《材料力学》(第4版)配套的、由高等教育出版社出版的《材料力学学习指导书》,也可供使用本教材的学生复习、解题及教师备课时使用。

图书在版编目(CIP)数据

简明材料力学/刘鸿文主编.—2版.—北京:高等教育出版社,2008.6

ISBN 978-7-04-023928-7

I. 简… II. 刘… III. 材料力学-高等学校-教材
IV. TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第067586号

策划编辑 黄毅 责任编辑 杨倩 封面设计 赵阳 责任绘图 尹莉
版式设计 余杨 责任校对 姜国萍 责任印制 毛斯璐

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 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 国防工业出版社印刷厂

开本 787×960 1/16
印张 22
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.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 1997年7月第1版
2008年6月第2版
印次 2008年6月第1次印刷
定价 27.50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 23928-00

第二版前言

第二版保持原书的风格和特色不变、精选的材料力学基本内容不变。作了如下改动：

1. 采用当前规定使用的字符和术语。在数学运算式中,对所有物理量标明单位。

2. 修订了少量文字,改正了个别的排版疏漏之处。

3. 复核并补齐了全部的习题解答,原解答无一错误。某些题的答案提供了更多的信息。若答案值有较多的小数位,则规范化为保留三位有效数字。少数答案与第一版的略有差异,是因为计算的中间结果保留了较多的小数位。

本教材承大连理工大学郑芳怀教授审阅,他的审阅极为认真、细致和严谨,提出了许多精辟和中肯的意见,谨此致谢。

由于水平所限,教材中难免留下令人遗憾之笔,还望广大教师和读者批评指正。

修订者

2007年6月

第一版前言

本书是依据国家教委颁发的“高等学校工科本科材料力学课程教学基本要求”,为中学时的材料力学课程编写的。其中,第13章能量方法和超静定结构已超出中学时材料力学课程的基本要求,应作为补充内容。作者设想,如不讲授第13章,并对其他章节作适当删减,本书也可适用于学时更少的材料力学课程;若在能量方法、超静定结构等方面略作补充,也能基本上满足多学时材料力学课程的要求。为此,对基本内容的阐述仍尽可能详尽,以保持基本理论的完整;对比较深入的内容则节删颇多,力求简明扼要。尽管我们作了这样的一些思考和尝试,但教材却很难说已达到了预期的设想。

材料力学教材可以分成两部分。一部分为基本教材,包含各种类型材料力学课程都应学习的内容;另一部分则包含随学时多少、专业需要而异的内容。也许这本书能起到基本教材的作用。

哈尔滨建筑大学的干光瑜教授审阅了书稿,他提出的修改意见精辟中肯、弥足珍贵,谨此致谢。

限于编者水平,疏漏之处必多,还望广大教师和读者批评指正。

作者

1995年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 变形固体的基本假设	2
1.3 内力、应力和截面法	2
1.4 位移、变形与应变	5
1.5 杆件变形的基本形式	8
习题	9
第 2 章 拉伸、压缩与剪切	11
2.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	11
2.2 拉伸或压缩时杆横截面上的内力和应力	11
2.3 材料拉伸时的力学性能	15
2.4 材料压缩时的力学性能	20
2.5 失效、安全因数和强度计算	21
2.6 杆件轴向拉伸或压缩时的变形	25
2.7 轴向拉伸或压缩的应变能	29
2.8 拉伸、压缩超静定问题	31
2.9 温度应力和装配应力	33
2.10 应力集中的概念	36
2.11 剪切和挤压的实用计算	37
习题	43
第 3 章 扭转	57
3.1 扭转的概念和实例	57
3.2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	57
3.3 纯剪切	60
3.4 圆轴扭转时的应力	62
3.5 圆轴扭转时的变形	68
3.6 扭转应变能	71
3.7 圆柱形密封圈螺旋弹簧	72
3.8 矩形截面杆扭转理论简介	76
习题	78

第4章 平面图形的几何性质	85
4.1 静矩和形心	85
4.2 惯性矩和惯性半径	88
4.3 惯性积	91
4.4 平行移轴公式	92
4.5 转轴公式 主惯性轴	95
习题	98
第5章 弯曲内力	101
5.1 弯曲的概念和实例	101
5.2 梁的支座和载荷的简化	102
5.3 剪力和弯矩	104
5.4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	107
5.5 载荷集度、剪力和弯矩间的关系	112
5.6 刚架和曲杆的弯曲内力	115
习题	117
第6章 弯曲应力	124
6.1 梁的纯弯曲	124
6.2 纯弯曲时的正应力	125
6.3 横力弯曲时的正应力	129
6.4 弯曲切应力	132
6.5 提高弯曲强度的措施	139
习题	145
第7章 弯曲变形	152
7.1 工程问题中的弯曲变形 挠度和转角	152
7.2 挠曲线的近似微分方程	153
7.3 用积分法求弯曲变形	155
7.4 用叠加法求弯曲变形	160
7.5 弯曲应变能	164
7.6 简单超静定梁	166
7.7 提高梁弯曲刚度的措施	170
习题	171
第8章 应力状态分析和强度理论	179
8.1 应力状态概述 单向拉伸时斜截面上的应力	179
8.2 二向和三向应力状态的实例	181
8.3 二向应力状态分析	183

8.4	二向应力状态的应力圆	189
8.5	三向应力状态简介	192
8.6	广义胡克定律	194
8.7	复杂应力状态下的应变能密度	198
8.8	强度理论概述	199
8.9	四种常用强度理论	200
	习题	205
第9章	组合变形	213
9.1	组合变形和叠加原理	213
9.2	拉伸或压缩与弯曲的组合	214
9.3	斜弯曲	216
9.4	扭转与弯曲的组合	218
	习题	223
第10章	压杆稳定	229
10.1	压杆稳定的概念	229
10.2	两端铰支细长压杆的临界压力	231
10.3	其他支座条件下细长压杆的临界压力	233
10.4	欧拉公式的适用范围 经验公式	236
10.5	压杆的稳定校核	239
10.6	提高压杆稳定性的措施	241
	习题	244
第11章	动载荷	248
11.1	概述	248
11.2	动静法的应用	248
11.3	受冲击杆件的应力和变形	251
	习题	258
第12章	交变应力	263
12.1	交变应力与疲劳失效	263
12.2	循环特征、平均应力和应力幅	264
12.3	持久极限	266
12.4	影响持久极限的因素	267
12.5	对称循环下的疲劳强度计算	271
12.6	不对称循环下和扭转组合下的疲劳强度计算	272
12.7	提高构件疲劳强度的措施	275
	习题	277

* 第 13 章 能量方法和超静定结构	279
13.1 应变能的计算	279
13.2 互等定理	282
13.3 卡氏定理	284
13.4 莫尔定理	287
13.5 用力法解超静定结构	292
习题	296
附录 A 型钢表	304
附录 B 习题答案	319
参考文献	340
作者简介	341

第1章 绪 论

1.1 材料力学的任务

机械或工程结构的各组成部分,如机床的轴、建筑物的梁和柱等,统称为构件。当机械或工程结构工作时,构件将受到力的作用。例如,车床主轴受切削力和齿轮啮合力的作用;建筑物的梁受由地面传递来的力和自身重力的作用等。作用于构件上的这些力都可称为载荷。构件一般由固体制成,在载荷作用下,固体有抵抗破坏的能力,但这种能力又是有限度的。而且,在载荷作用下,固体的形状和尺寸还会发生变化,称为变形。

为保证机械或工程结构的正常工作,构件应有足够的承受载荷的能力。因此它应该满足下述要求:

(1) 在规定载荷作用下构件不能破坏。例如,屋梁不应折断,储气罐不能爆裂。所以,构件应有足够的抵抗破坏的能力,这就是**强度要求**。

(2) 在规定载荷作用下,某些构件除满足强度要求外,变形也不能过大。例如,车床主轴的变形过大将影响加工精度。所以,构件应有足够的抵抗变形的能力,这就是**刚度要求**。

(3) 有些受压力作用的细长杆件,如千斤顶的螺杆,驱动装置的活塞杆等,应始终保持原有的直线平衡形态,保证不被压弯。亦即,构件应有足够的保持原有平衡形态的能力,这就是**稳定性要求**。

若构件的横截面尺寸过小或形状不合理、或材料质地不好,以致不能满足上述要求,便不能保证机械或工程结构的安全工作。反之,不恰当地加大横截面尺寸、选用优质材料,虽满足了上述要求,却增加了成本,未免浪费。材料力学的任务就是在满足强度、刚度和稳定性要求的前提下,为设计既经济又安全的构件,提供必要的理论基础和计算方法。

对具体构件,上述三项要求往往有所侧重,例如储气罐主要是要保证强度;车床主轴主要是要保证刚度;受压的活塞杆则应保持稳定性。

在材料力学中,经过简化建立的理论,需由实验来验证。这些理论中所需要的材料的力学性能,要由实验来测定。尚无理论结果的问题又往往要用实验的方法来解决。所以实验分析和理论研究同是材料力学解决问题的方法。

1.2 变形固体的基本假设

固体因外力作用而变形,故称为变形固体或可变形固体。为把变形固体抽象为力学模型,省略一些与强度、刚度和稳定性关系不大的因素,对变形固体作出下列假设:

1.2.1 连续性假设

认为组成固体的物质不留空隙地充满了固体的体积。实际上,组成固体的粒子之间存在着空隙、并不连续。但这种空隙与构件的尺寸相比极其微小,可以不计,于是就认为固体在其整个体积内是连续的。这样,当把力学量表示为固体的点的坐标的函数时,对这些量就可进行坐标增量为无限小的极限分析。

1.2.2 均匀性假设

认为在固体内到处都有相同的力学性能。就金属而言,组成金属的各晶粒的力学性能并不完全相同,但因构件或它的任意一部分中都包含为数极多的晶粒,而且无规则地排列,固体每一部分的力学性能都是众多晶粒的性能的统计平均值,所以可以认为各部分的力学性能是均匀的。这样,如从固体中任意地取出一部分,不论从何处取出,也不论大小,性能总是一样的。

1.2.3 各向同性假设

认为沿任何方向,固体的力学性能都是相同的。就单一的金属晶粒而言,沿不同方向,性能并不完全相同。但金属构件包含数量极多的晶粒,晶粒又无序地排列,这样沿各个方向的性能就接近相同了。具有这种属性的材料称为各向同性材料,如钢、铜、玻璃等。

也有些材料沿不同方向的性能并不相同,如纤维织品、某些人工合成材料等。这类材料称为各向异性材料。

1.3 内力、应力和截面法

研究某一构件时,可设想把它从周围的其他物体中单独取出,并用 $F_1, F_2, \dots$ 等力代替周围其他物体对构件的作用(图 1.1a)。如划定研究范围为整个构件,则来自构件外部的力,其中包括约束力、自重和惯性力等,都可称为外力。当构件处于平衡状态时,作用于构件上的外力构成一个平衡力系。

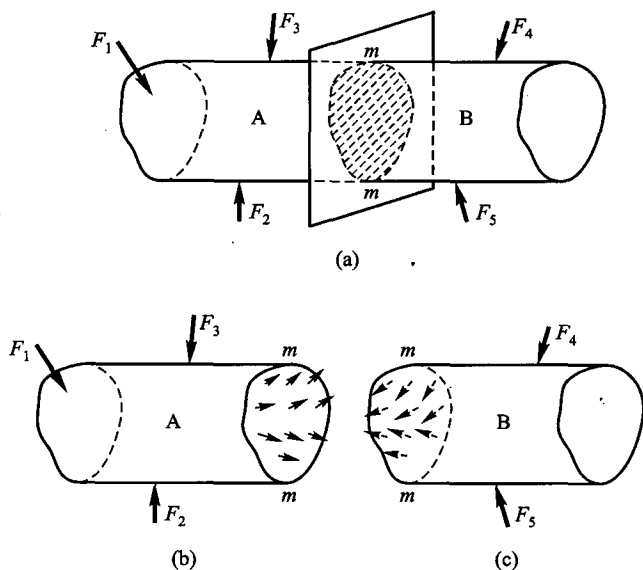


图 1.1

由物理学可知,即使不受外力作用,构件内部各质点之间就存在着相互作用力。当受外力作用时,构件各部分间的相对位置发生变化,从而引起上述相互作用力的改变,其改变量称为内力。可见,内力是构件各部分之间相互作用力因外力而引起的附加值。这样的内力随外力增加而加大,到达某一限度时,就会引起构件的破坏,所以与构件的强度是密切相关的。

为了显示出内力,用截面 $m-m$ 假想地把构件分成 A、B 两部分,任取其中一部分,例如部分 A,作为分离体,如图 1.1b 所示。对部分 A,除外力 F_1 、 F_2 、 F_3 外,在截面 $m-m$ 上必然还有来自部分 B 的作用力,这就是内力。部分 A 是在上述外力和内力共同作用下保持平衡的。类似地,如取出部分 B(图 1.1c),则它在外力 F_4 、 F_5 和 $m-m$ 截面上的内力共同作用下保持平衡。至于部分 B 的截面 $m-m$ 上的内力,则是来自部分 A 的反作用力。根据作用和反作用定律, A、B 两部分在截面 $m-m$ 上相互作用的内力,必然大小相等、方向相反。

因为假设固体是连续的,截开的两部分在截面 $m-m$ 上的每一点都应有相互作用的内力,这样,在截面上将形成一个分布的内力系。为了描述这个内力系在截面上一点处的强弱程度,引进应力的概念。在截面 $m-m$ 上围绕一点 C 取微小面积 ΔA (图 1.2a),设 ΔA 上内力的合力为 ΔF , ΔF 的大小和方向与 C 点的位置和 ΔA 的面积有关。比值

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.1)$$

称为 ΔA 上的平均应力,其方向与 ΔF 相同。它代表在 ΔA 内,单位面积上的平均内力(即平均集度)。随着 ΔA 的逐渐缩小, p_m 的大小和方向都将逐渐改变。当 ΔA 趋于零时, p_m 的大小和方向都将趋于某极限值。这样得到

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.2)$$

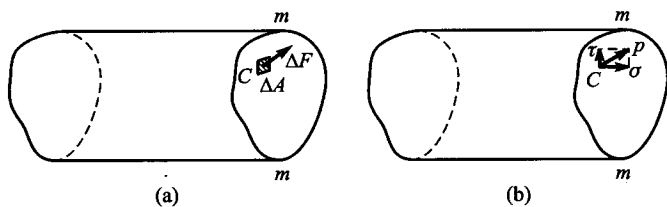


图 1.2

p 称为 C 点的应力^①。它是截面 $m-m$ 上分布内力系在 C 点的集度,反映内力系在 C 点的强弱程度。 p 是一个矢量,一般说既不与截面垂直也不与截面相切。通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和切于截面的分量 τ (图 1.2b), σ 称为正应力, τ 称为切应力。

在我国法定计量单位中,应力的单位为 Pa,称为“帕斯卡”或简称为“帕”, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。由于这个单位太小,通常用 MPa, $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

如上所述,因外力作用,构件截面上形成一个分布内力系。若向截面上的某一点(例如形心)简化,整个分布内力系一般可以简化成一个力(此力的矢量称为主矢)和一个力偶(此力偶之矩称为主矩),它们是截面上分布内力系的合成结果。今后约定,把内力系简化后得到的力和力偶称为截面上的内力。为求出截面上的内力,经常使用截面法(在材料力学中一般用横截面)。截面法可归纳为:首先,用一平面假想地把构件分成两部分,并任取一部分作为研究对象;其次,在截面上用内力代替另一部分对取出部分的作用;最后,利用取出部分在内、外力作用下的平衡关系,便可确定截面上的内力。下面用例题来说明。

例 1.1 小型压力机的框架如图 1.3a 所示。在 F 力作用下,试求立柱横截面 $m-m$ 上的内力。

解: 用截面 $m-m$ 假想地把框架分成两部分,并取出截面 $m-m$ 以上部分进行研究(图 1.3b)。将截面 $m-m$ 上的分布内力系向截面形心简化,得向下的力 F_N 和顺时针方向的力偶 M ,它们分别抵抗外力 F 使取出部分向上移动并绕 O 点逆时针方向转动的倾向,以保持取出

^① 按这里给出的应力的定义, $\Delta A \rightarrow 0$ 时, ΔA 上内力的极限状态将是一个力,而不是一个力和一个力偶。这就暗示 ΔA 上的内力对 ΔA 内任一点的力矩都等于零。

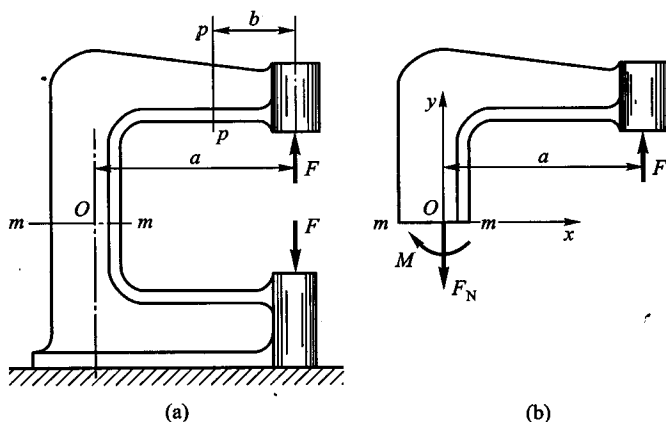


图 1.3

部分的平衡。由平衡方程

$$\sum F_y = 0, \quad F - F_N = 0$$

$$\sum M_O = 0, \quad Fa - M = 0$$

求出截面 $m-m$ 上的内力为

$$F_N = F, \quad M = Fa$$

若外力较为复杂,则 F_N 的指向和 M 的转向可任意假设。当求得其值为负时,说明实际指向或转向与假设的相反。

1.4 位移、变形与应变

材料力学讨论固体的变形,不仅为了研究构件的刚度,还因变形与内力的分布有关。

在图 1.4 中,固体内的 M 点因变形位移到 M' , 矢量 $\overrightarrow{MM'}$ 即为 M 点的位移。

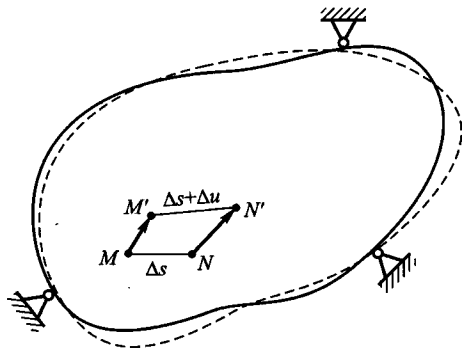


图 1.4

这里假设固体因受到约束,不可能作刚性位移, M 点的位移全是由变形引起的。设 N 为 M 的邻近点, MN 的长度为 Δs 。变形后 N 点的位移为 $\overrightarrow{NN'}$ 。这样,变形前的线段 MN 变形后变为 $M'N'$,其长度由 Δs 变为 $\Delta s + \Delta u$ 。这里 Δu 代表变形前、后线段 MN 的长度变化。比值

$$\varepsilon_m = \frac{\overline{M'N'} - \overline{MN}}{\overline{MN}} = \frac{\Delta u}{\Delta s} \quad (1.3)$$

称为平均线应变,它表示线段 MN 每单位长度的平均伸长或缩短。式中,字母上方的横杠记号表示线段的长度。逐渐缩小 M 点和 N 点的距离,当 N 无限趋近于 M 时, ε_m 的极限值为

$$\varepsilon = \lim_{\substack{MN \rightarrow 0 \\ \overline{MN}}} \frac{\overline{M'N'} - \overline{MN}}{\overline{MN}} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta s} \quad (1.4)$$

ε 称为 M 点沿 MN 方向的线应变,简称应变。如线段 MN 内各点沿 MN 方向的变形程度是均匀的,则由式(1.3)表示的平均线应变与由式(1.4)表示的线应变是相同的。如 MN 内各点的变形程度并不相同,则只有由式(1.4)定义的应变才能表示 M 点沿 MN 方向长度变化的程度。

固体的变形非但表现为线段长度的改变,而且正交线段的夹角有时也将发生变化。例如在图 1.5 中,变形前线段 MN 和 ML 相互正交,变形后 $M'N'$ 和 $M'L'$ 的夹角变为 $\angle L'M'N'$ 。变形前、后角度的变化是 $\left(\frac{\pi}{2} - \angle L'M'N'\right)$ 。当 L 和 N 都无限趋近于 M 时,上述角度变化的极限值

$$\gamma = \lim_{\substack{MN \rightarrow 0 \\ ML \rightarrow 0}} \left(\frac{\pi}{2} - \angle L'M'N' \right) \quad (1.5)$$

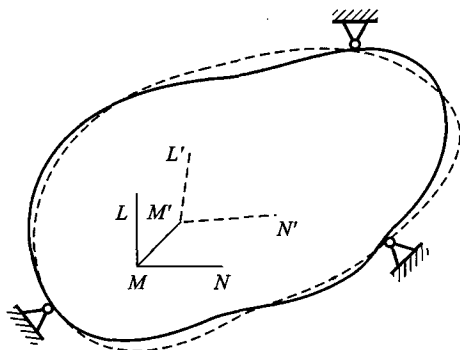


图 1.5

称为 M 点在平面 LMN 内的切应变或角应变。上式中的角度都用弧度来表示。

应变 ε 和切应变 γ 是度量一点处变形程度的两个基本量,从式(1.4)和(1.5)看出,它们的量纲都是 1。

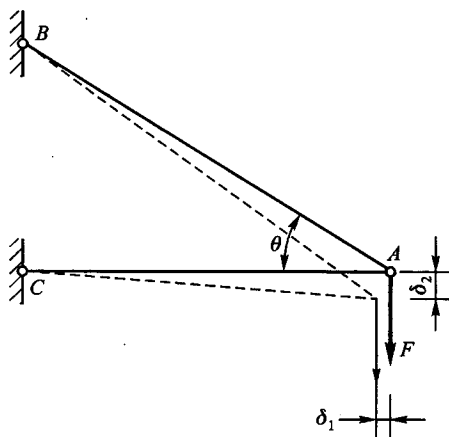


图 1.6

实际构件的变形、应变以及由变形引起的位移,一般是极其微小的。材料力学研究的问题就限于小变形的情况,认为无论是变形或由变形引起的位移,其大小都远小于构件的最小尺寸。例如在图 1.6 中,支架的各杆因受力而变形,引起节点 A 的位移。因位移 δ_1 和 δ_2 都是非常微小的量,所以当列节点 A 的平衡方程时,不计支架的变形,认为角 θ 未变,亦即沿用支架变形前的形状和尺寸,这种方法称为原始尺寸原理,它使计算得到很大的简化。否则,为求出 AB 和 AC 两杆所受的力,应先列出节点 A 的平衡方程,列平衡方程时又要考虑支架形状和尺寸的变化(即角 θ 的变化),而这些变化在求得两杆受力之前又是未知的。问题就变得非常复杂了。

例 1.2 三角形薄板 ABC 因受力而变形(图 1.7), B 点垂直向上的位移为 0.03 mm , 但 AB' 和 $B'C$ 两边仍保持为直线。试求沿 OB 的平均应变,并求 AB 、 BC 两边在 B 点夹角的变化。

解: 由公式(1.3),沿 OB 的平均应变为

$$\varepsilon_m = \frac{\overline{OB'} - \overline{OB}}{\overline{OB}} = \frac{0.03 \times 10^{-3} \text{ m}}{120 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.5 \times 10^{-4}$$

延长 CB 边,与 AB' 交于 D 点,由于 α 角甚小, $\alpha \approx \tan \alpha = \frac{BD}{AB}$ 。正因为 α 很小,也可以认为 BD 垂直于 AB' , $\overline{BD} = \overline{BB'} \cos 45^\circ$, 于是有

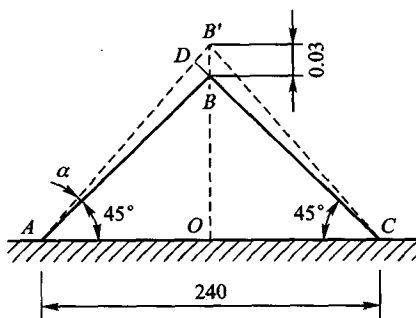


图 1.7

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\overline{BD}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BB'} \cos 45^\circ}{\overline{AC} \cos 45^\circ} = \frac{0.03 \times 10^{-3} \text{ m}}{240 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1.25 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

变形后, AB 和 BC 两边在 B 点夹角的变化是

$$\frac{\pi}{2} - \angle AB'C = 2(\angle ABO - \angle AB'O) = 2\alpha = 2.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

注:本书图中尺寸不注明单位的,均以 mm 为单位。

1.5 杆件变形的基本形式

构件可以有各种几何形状,材料力学主要研究长度远大于横截面尺寸的构件,这类构件称为杆件或简称为杆。杆件的轴线是杆件各横截面形心的连线。轴线为曲线的杆称为曲杆;轴线为直线的杆称为直杆。最常见的是横截面大小和形状均不变的直杆,称为等直杆。

杆件内一点周围的变形可由前节提到的线应变和角应变来描述。杆件所有各点变形的积累就形成它的整体变形。杆件的整体变形有以下几种基本形式:

1.5.1 拉伸或压缩

杆件在大小相等、方向相反、作用线与轴线重合的一对力作用下,变形表现为长度的伸长或缩短(图 1.8a)。

1.5.2 剪切

作用于杆件的是一对垂直于杆件轴线的横向力,它们的大小相等、方向相反且作用线很靠近,变形表现为杆件两部分沿外力方向发生相对错动(图 1.8b)。

1.5.3 扭转

在垂直于杆件轴线的两个平面内,分别作用力偶矩的绝对值相等、转向相反