

J C L
Jianming Cailiao Lixue

高等学校教材

简明材料力学

刘鸿文 主编

高等教育出版社

Gaodeng Jiaoliu Chubanshe

ND19/09

高等学校教材

简明材料力学

刘鸿文 林建兴 曹曼玲 编著

刘鸿文 主编

高等教育出版社

(京) 112 号

图书在版编目 (CIP) 数据

简明材料力学/刘鸿文主编; 林建兴, 曹曼玲编著. —
北京: 高等教育出版社, 1997 (1999 重印)
高等学校教材
ISBN 7-04-006078-7

I. 简… II. ①刘… ②林… ③曹… 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 (96) 第 21721 号

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

开 本 850×1168 1/32

版 次 1997 年 7 月第 1 版

印 张 12.5

印 次 1999 年 6 月第 3 次印刷

字 数 320 000

定 价 12.20 元

凡购买高等教育出版社图书, 如有缺页、倒页、脱页等
质量问题, 请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书是根据国家教委 1995 年颁发的“高等学校工科本科材料力学课程教学基本要求(中学时)”编写的。本教材在内容上精选了材料力学的基本内容,全书包括第一章至第十三章,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,能量方法和静不定结构。本书如不讲授最后一章,并对其他章节作适当删减,可用于少学时的材料力学课程教材;若能在能量方法、静不定结构等方面略作补充,本书亦可用于多学时材料力学课程教材。

刘鸿文主编的《材料力学实验》可与本书配套使用。

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，第十三章能量方法和静不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，如不讲授第十三章，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、静不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

第一章 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	(3)
§ 1.4 位移、变形与应变	(6)
§ 1.5 杆件变形的基本形式	(10)
习题	(11)
第二章 拉伸、压缩与剪切	(13)
§ 2.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	(13)
§ 2.2 拉伸或压缩时的内力和横截面上的应力	(14)
§ 2.3 材料拉伸时的力学性能	(18)
§ 2.4 材料压缩时的力学性能	(24)
§ 2.5 失效、安全系数和强度计算	(26)
§ 2.6 轴向拉伸或压缩的变形	(30)
§ 2.7 轴向拉伸或压缩的变形能	(34)
§ 2.8 拉伸、压缩静不定问题	(37)
§ 2.9 温度应力和装配应力	(39)
§ 2.10 应力集中的概念	(42)
§ 2.11 剪切和挤压的实用计算	(44)
习题	(50)
第三章 扭转	(68)
§ 3.1 扭转的概念和实例	(68)
§ 3.2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	(69)
§ 3.3 纯剪切	(72)
§ 3.4 圆轴扭转时的应力	(74)
§ 3.5 圆轴扭转时的变形	(81)

§ 3.6	扭转变形能	(84)
§ 3.7	圆柱形密封圈螺旋弹簧	(86)
§ 3.8	矩形截面杆扭转理论简介	(90)
习题		(93)
第四章	平面图形的几何性质	(101)
§ 4.1	静矩和形心	(101)
§ 4.2	惯性矩和惯性半径	(105)
§ 4.3	惯性积	(108)
§ 4.4	平行移轴公式	(109)
§ 4.5	转轴公式 主惯性轴	(113)
习题		(116)
第五章	弯曲内力	(120)
§ 5.1	弯曲的概念和实例	(120)
§ 5.2	梁的支座和载荷的简化	(121)
§ 5.3	剪力和弯矩	(124)
§ 5.4	剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	(127)
§ 5.5	载荷集度、剪力和弯矩间的关系	(133)
* § 5.6	刚架和曲杆的弯曲内力	(136)
习题		(139)
第六章	弯曲应力	(146)
§ 6.1	梁的纯弯曲	(146)
§ 6.2	纯弯曲时的正应力	(148)
§ 6.3	横力弯曲时的正应力	(152)
§ 6.4	弯曲切应力	(155)
§ 6.5	提高弯曲强度的措施	(163)
习题		(170)
第七章	弯曲变形	(178)
§ 7.1	工程问题中的弯曲变形 挠度和转角	(178)
§ 7.2	挠曲线的近似微分方程	(180)
§ 7.3	用积分法求弯曲变形	(181)
§ 7.4	用叠加法求弯曲变形	(187)

§ 7.5 弯曲变形能	(192)
§ 7.6 简单静不定梁	(194)
§ 7.7 提高弯曲刚度的措施	(198)
习题	(200)
第八章 应力状态分析和强度理论	(209)
§ 8.1 应力状态概述 单向拉伸时斜截面上的应力	(209)
§ 8.2 二向和三向应力状态的实例	(212)
§ 8.3 二向应力状态分析	(214)
§ 8.4 二向应力状态的应力圆	(221)
§ 8.5 三向应力状态简介	(224)
§ 8.6 广义胡克定律	(226)
§ 8.7 复杂应力状态的变形比能	(230)
§ 8.8 强度理论概述	(232)
§ 8.9 四种常用强度理论	(233)
习题	(238)
第九章 组合变形	(248)
§ 9.1 组合变形和叠加原理	(248)
§ 9.2 拉伸或压缩与弯曲的组合	(249)
§ 9.3 斜弯曲	(252)
§ 9.4 扭转与弯曲的组合	(254)
习题	(259)
第十章 压杆稳定	(267)
§ 10.1 压杆稳定的概念	(267)
§ 10.2 两端铰支细长压杆的临界压力	(269)
§ 10.3 其他支座条件下压杆的临界压力	(272)
§ 10.4 欧拉公式的适用范围 经验公式	(276)
§ 10.5 压杆的稳定校核	(280)
§ 10.6 提高压杆稳定性的措施	(282)
习题	(285)
第十一章 动载荷	(290)
§ 11.1 概述	(290)

§ 11.2 动静法的应用	(290)
§ 11.3 受冲杆件的应力和变形	(294)
习题	(302)
第十二章 交变应力	(308)
§ 12.1 交变应力与疲劳失效	(308)
§ 12.2 循环特性、平均应力和应力幅度	(310)
§ 12.3 疲劳极限	(312)
§ 12.4 影响疲劳极限的因素	(314)
§ 12.5 对称循环下的疲劳强度计算	(318)
§ 12.6 不对称循环下和扭弯组合下的疲劳强度计算	(320)
§ 12.7 提高构件疲劳强度的措施	(323)
习题	(325)
*第十三章 能量方法和静不定结构	(328)
§ 13.1 变形能的计算	(328)
§ 13.2 互等定理	(331)
§ 13.3 卡氏定理	(334)
§ 13.4 莫尔定理	(338)
§ 13.5 用力法解静不定结构	(343)
习题	(348)
附录 A 型钢表	(357)
附录 B 单位换算	(372)
附录 C 习题答案	(373)

第一章 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;建筑物的梁受由地板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,构件应有足够的能力负担起应当承受的载荷。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,储气罐不能破裂。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)有些受压力作用的构件,如千斤顶的丝杆,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**。

若构件的截面尺寸过小或材料质地不好,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、刚度和稳定性的要求下,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

固体因受外力作用而变形,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. 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。

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为数极多的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。

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。就单一的金属晶粒来说,沿不同方向性能并不完全相同。因金属构件包含数量极多的晶粒,且又无序地排列,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。如铸钢、铸铜、玻璃等即为各向同性材料。

也有些材料沿不同方向性能并不相同,如木材、纤维织品和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 $P_1, P_2, \dots$ 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,其中包括约束反力、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。

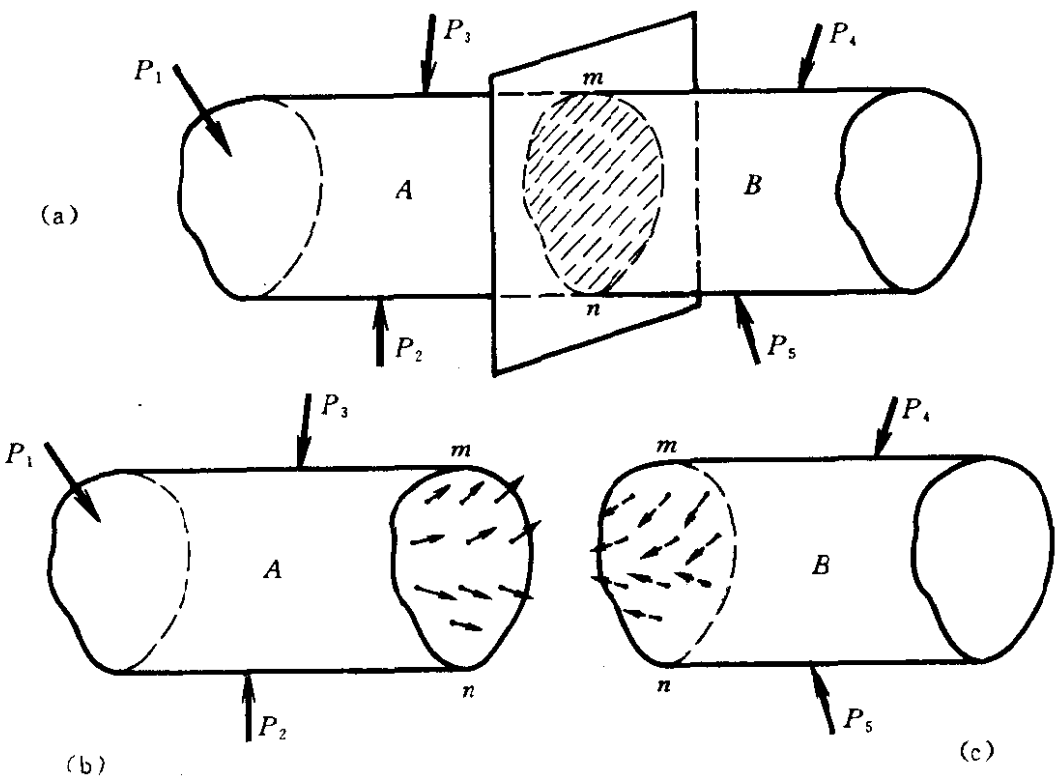


图 1.1

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 $m-n$ 假想地把构件分成 A 、 B 两部分,任意地取出部分 A 作为分离体如图 1.1b 所示。对部分 A ,除外力 P_1 、 P_2 、 P_3 外,在截面 $m-n$ 上必然还有来自部分 B 的作用力,这也就是内力。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),则它是在外力 P_4 、 P_5 和 $m-n$ 截面上的内力共同作用下保持平衡。至于部分 B 的截面 $m-n$ 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 $m-n$ 上相互作用的内力,必然是大小相等方向相反的。

因为假设固体是连续的,截面 $m-n$ 上的每一点都应有两部分相互作用的内力,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 $m-n$ 上围绕一点 C 取微小面积 ΔA (图 1.2a),设 ΔA 上内力的合力为 ΔP , ΔP 的大小和方向与 C 点的位置和 ΔA 的面积有关。比值

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

称为 ΔA 上的平均应力,方向与 ΔP 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一定极限。这样得到

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

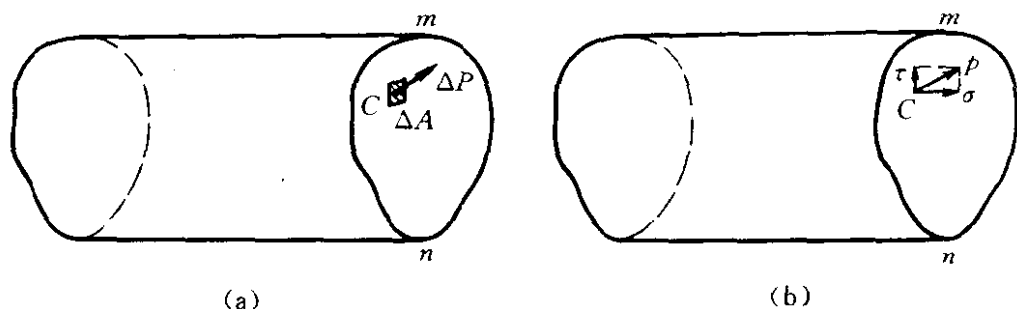


图 1.2

p 称为 C 点的应力^①。它是截面 $m-n$ 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 称为切应力或剪应力。

在我国法定计量单位中，应力的单位符号为 Pa，其名称为“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，即 $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

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说可以简化成一个力（主矢）和一个力偶矩（主矩），它们是截面上分布内力系的合力。今后约定，把内力系简化后得到的合力称为截面上的内力。为求出截面上的内力经常使用截面法。它可归纳为：首先，用一平面假想地把构件分成两部分，并任意地取出其中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。下面再用例题来说明。

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

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矩。这就暗示 ΔA 上的内力对 ΔA 内任一点的力矩都等于零。

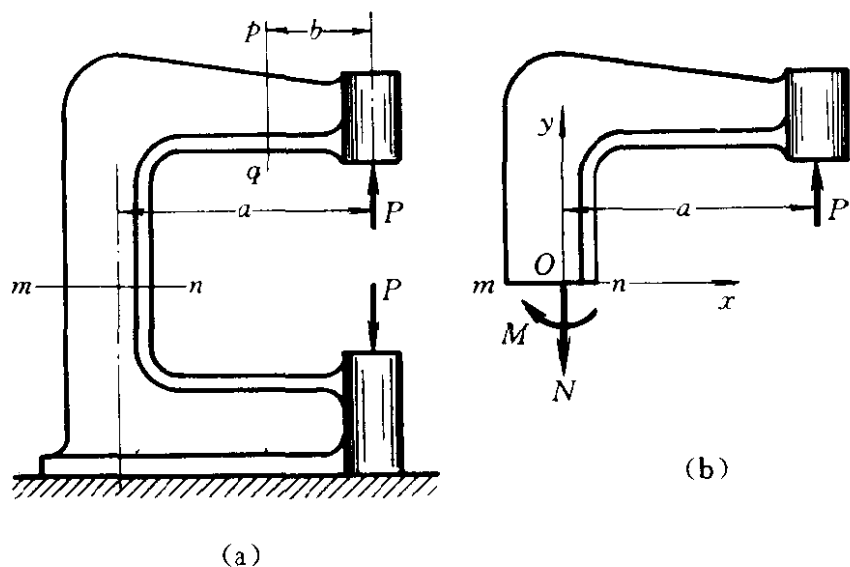


图 1.3

解：用截面 $m-n$ 假想地把框架分成两部分，并取出截面 $m-n$ 以上部分（图 1.3b）。将截面 $m-n$ 上的分布内力系向截面形心简化得向下的力 N 和顺时针方向的力偶矩 M ，它们分别阻抗外力 P 使取出部分向上移动并绕 O 点反时针转动的倾向，以保持取出部分的平衡。由平衡方程

$$\sum Y = 0, \quad P - N = 0$$

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

求出截面 $m-n$ 上的内力为

$$N = P, \quad M = Pa$$

§ 1.4 位移、变形与应变

材料力学讨论固体的变形，除了是为研究构件的刚度外，还因变形与内力的分布有关。

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

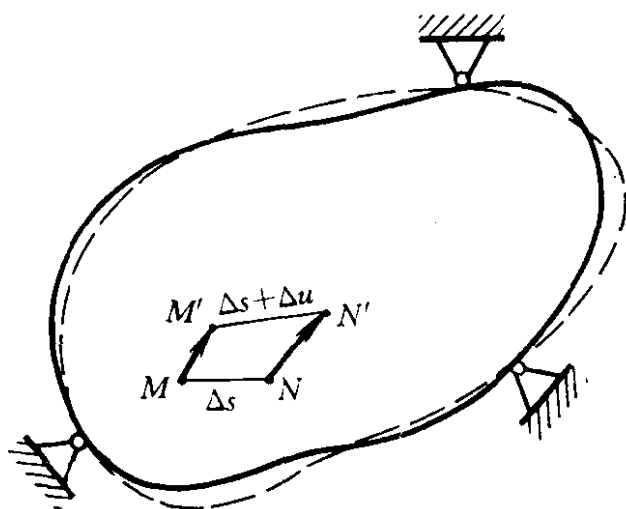


图 1.4

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

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。逐渐缩小 M 点和 N 点的距离,当 N 无限趋近于 M 时, ϵ_m 的极限为

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

ϵ 称为 M 点沿 MN 方向的线应变,简称为应变。如线段 MN 内各点沿 MN 方向变形程度是均匀的,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 无限趋近于 M 时,上述角度变化的极限值为

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

称为 M 点在平面 LMN 内的切应变或角应变。

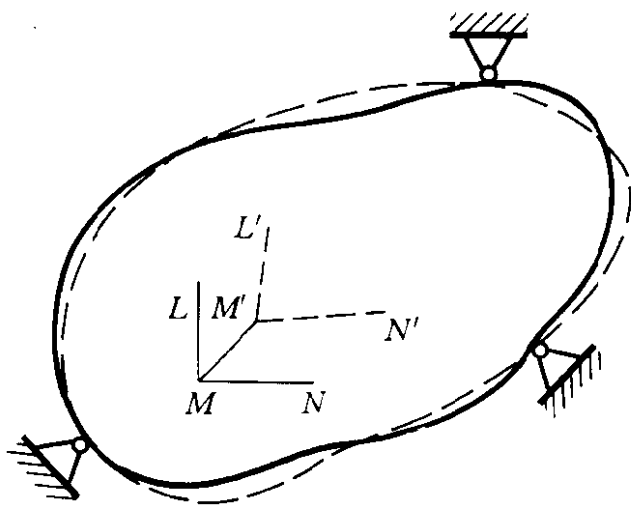


图 1.5

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, 它们都是无量纲量。

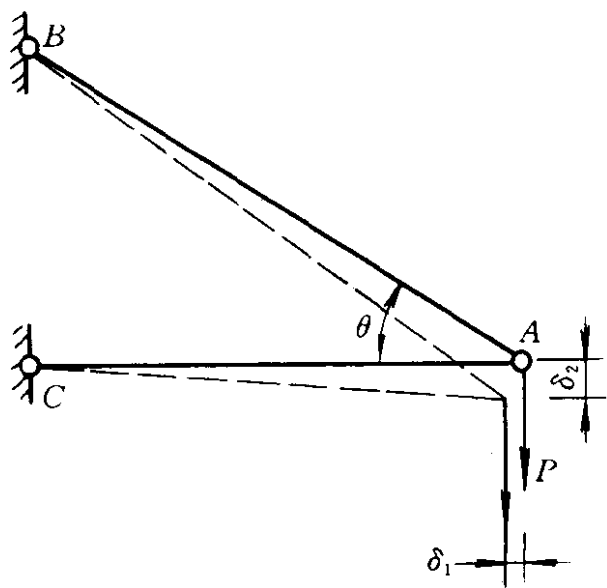


图 1.6

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