



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家首批材料力学精品课程主讲教材

新编材料力学

第2版

张少实 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家首批材料力学精品课程主讲教材

新编材料力学

第2版

哈尔滨工业大学国家工科力学基础课程教学基地 组编

主编 张少实

参编 张桂莲 王春香

主审 盖秉政 高宗俊



机械工业出版社

本书是“国家工科力学基础课程教学基地”建设项目的研究成果之一,是“十一五”国家级规划教材,是“哈尔滨工业大学‘十一五’教材规划”中的重点教材。本书编写过程中,充分注意到后续课程以及当代工程设计思想、理念与方法的深刻变革;刻意追求加强与适当拓宽基础,强化应力与应变分析主线,突出力学、几何、物理三大方程,向当代前沿开设窗口与接口等总体目标。本书在内容、体系、结构与问题表述上均有较大的创新。

全书包括绪论、应力状态分析、应变状态分析、材料的力学性能与应力应变关系、轴向拉压、扭转、弯曲、组合内力时杆件应力计算、能量原理、超静定结构、材料失效及强度理论、杆件的强度与刚度计算、联接、弹塑性变形与极限载荷分析、疲劳与断裂、压杆稳定等16章。

本书可作为高等工科院校本科各专业教材,亦可作为有关工程技术人员的参考书。

为便于教师讲授本教材,配套编制了电子教案,教师可通过<http://www.cmpedu.com>注册后免费下载使用。

图书在版编目(CIP)数据

新编材料力学/张少实主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2009.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家首批材料力学精品课程主讲教材

ISBN 978-7-111-27651-7

I. 新... II. 张... 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(2009)第118464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:季顺利 责任编辑:任正一

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2010年1月第2版第1次印刷

169mm×239mm·24.25印张·469千字

标准书号:ISBN 978-7-111-27651-7

定价:34.00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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书自2002年第1版出版以来，已使用了七年时间。本次修订期间，正值哈尔滨工业大材料力学国家精品课程、力学课程国家教学团队建设努力工作展开并取得一定成效的时期；也正值“十一五”国家规划教材方案实施和积极向前推进的时期。修订工作被纳入这一规划和建设工作当中，受到了学校和团队的热切关注和极大支持。团队和精品课程建设对本教材修订小组提出了高标准要求，并为本教材修订工作进一步指明了努力方向。

强化基础知识；深化应力与应变分析思想；突显平衡、几何、物理三方面条件在分析、求解力学问题中的核心作用；增强对理论知识的直观表述是本书的特色，也是本次修订工作所遵循的指导思想。七年来，随着教育部“教学质量工程”建设的进一步开展，随着我国教育、教学改革热潮的蓬勃兴起，随着使用本教材的教师投身教学实践的继续深入，证明当前在我国材料力学教材这个生机勃勃的百花园中，具有这一特色的材料力学是有其生命力的，并已得到广大教师、学生和读者的认可。

遵循上述思想，修订后的《新编材料力学》，沿用了原来的内容、体系架构；将圆轴扭转，梁弯曲变形时应力、变形分析和求解的叙述部分内容作了改写；增加了提高构件疲劳强度措施等联系工程实际的知识；新增了少量例题；重新绘制了插图，使得全书插图风格趋于统一。

参加第2版修订工作的有张少实教授、王春香教授和张桂莲副教授。张少实教授担任主编，并绘制了书中的全部插图。修订期间，哈尔滨工业大学教务处、航天学院、航天科学与力学系的领导给予了莫大的关怀和支持。团队和课程组同仁提出了中肯的意见，并给予有益

的指导。特别是哈尔滨工业大学固体力学学科带头人盖秉政教授、航天学院高宗俊教授审阅了全部书稿，提出了许多宝贵意见。在此，谨致以崇高的敬意和衷心的感谢。

因为水平有限，修订后的教材难免有疏漏和欠妥之处，敬望广大教师和读者批评与给予指导。

编 者
2009 年 3 月

第 1 版前言

本书是“国家工科力学教学基地”建设项目的研究成果之一，是“哈尔滨工业大学‘十五’教材规划”中的重点教材。

由于计算机技术的广泛应用，AutoCAD、大型结构有限元分析软件等已成为工程师手中的得力工具。高速快捷的计算机设计与精细周密的有限元分析，再加之新型材料与先进工艺的不断涌现，使得工程设计思想、理念与方法发生了深刻变革。本书编写过程中，充分注意到工程设计的这一变革以及后续课程的改革，刻意追求如下总体目标：

加强与适当拓宽基础；强化应力与应变分析观点并以此为全书主线；突出力学、几何、物理三大方程；统一坐标系统；加强对理论知识的形象直观表述与联系工程实际；向当代前沿适当开设窗口与接口等。

由此，本书在内容、体系、结构与知识表述上均作了较大幅度的更新。特别是书中的插图，由于得益于计算机强大的绘图功能，它们改变了传统的线框图形的面貌，取而代之的是立体感与透明感较强的二维与三维图形。这样，将会得到更形象直观的描述效果，更有助于读者对知识的理解。

全书包括绪论、应力状态分析、应变状态分析、应力应变关系与材料的力学性能、轴向拉压、扭转、弯曲、复杂内力时应力计算、能量原理、超静定结构、材料失效与强度理论、杆件强度与刚度计算、联接、弹塑性变形与极限载荷分析、疲劳与断裂、压杆稳定等 16 章。

本书由张少实教授主编，盖秉政教授主审。参加编写的老师有：王春香副教授（第 4、7、12、13 章）、薛福林副教授（第 6、9 章）、张桂莲副教授（第 8、10 章以及附录 A、B）、牟宗花副教授（第 5、

16 章)、张少实(第 1、2、3、11、14、15 章)。书中的绝大部分图形是由张少实在计算机上绘制的。

本书编写过程中,得到了国家工科力学基地建设项目基金与哈尔滨工业大学重点教材基金资助,哈尔滨工业大学教务部给予直接关怀与大力支持。在经历了五轮循环的试点教学过程中,哈尔滨工业大学实验学院、航天工程与力学系等单位积极配合、鼎力相助。哈尔滨工业大学固体力学学科带头人盖秉政教授、北京科技大学靳东来教授审阅了全书,提出了许多宝贵意见与建议。哈尔滨工业大学材料力学教研室全体老师,一直关注着本书的编写工作,他们也对本书提出了宝贵意见。我们在此谨致以衷心的感谢。

囿于编者的有限水平,书中难免存在缺点、疏漏与错误之处,恳请广大教师与读者不吝指正。

编者

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 强度 刚度 稳定性	1
1.2 变形固体及其基本假设	2
1.3 外力及其分类	4
1.4 变形与位移	5
第 2 章 应力状态分析	7
2.1 内力	7
2.2 应力的概念 正应力与切应力	11
2.3 一点的应力状态 切应力互等定律	12
2.4 二向应力状态分析 解析法	15
2.5 二向应力状态分析 图解法	19
2.6 三向应力状态分析	23
2.7 微体平衡	28
习题	30
第 3 章 应变状态分析	36
3.1 应变概念 线应变与切应变	36
3.2 位移与应变的关系 几何方程	37
3.3 应变协调条件 相容方程	39
3.4 平面应变状态分析	40
习题	43
第 4 章 材料的力学性能 应力应变关系	47
4.1 材料的力学性能与基本试验	47
4.2 轴向拉伸和压缩试验	48
4.3 常见工程材料的应力-应变曲线	53
4.4 应力松弛与蠕变	55
4.5 各向同性材料的广义胡克定律	56
4.6 应变能	60
4.7 各向同性材料弹性常数间的关系	64
4.8 各向异性材料应力-应变关系	64
习题	65

第5章 轴向拉压	69
5.1 轴向拉压杆的内力	69
5.2 轴向拉压杆的应力	70
5.3 圣维南原理 应力集中	73
5.4 轴向拉压杆的变形 变形能	75
5.5 轴向拉压超静定问题 温度应力 装配应力	77
5.6 构件受惯性力作用时的应力计算	82
习题	86
第6章 扭转	93
6.1 扭转杆件的内力	93
6.2 圆轴扭转横截面上的切应力	95
6.3 圆轴扭转破坏模式的分析	99
6.4 圆轴扭转变形与变形能	100
6.5 非圆截面杆扭转	102
6.6 薄壁杆的自由扭转 剪力流	104
习题	107
第7章 弯曲	111
7.1 梁的内力 剪力与弯矩	111
7.2 剪力图与弯矩图	113
7.3 载荷、剪力及弯矩间的关系	117
7.4 纯弯曲梁的正应力	120
7.5 有关弯曲的讨论	126
7.6 弯曲切应力	128
7.7 开口薄壁非对称截面梁的弯曲 弯曲中心	135
7.8 梁的弹性弯曲变形 弹性曲线微分方程	138
7.9 直接积分求梁的变形	139
7.10 叠加原理与叠加法求变形	143
7.11 曲杆弯曲	147
习题	150
第8章 组合内力时杆件应力计算	159
8.1 斜弯曲	159
8.2 偏心拉伸与压缩	163
8.3 弯曲与扭转	167
习题	170
第9章 能量原理	175
9.1 虚功 杆件内力的虚功	175
9.2 虚功原理及其对杆件的应用	178
9.3 莫尔定理	180

9.4	图形互乘法	184
9.5	虚功原理应用于小变形固体	189
9.6	冲击	193
	习题	197
第10章	超静定结构	201
10.1	超静定结构的概念及其分析方法	201
10.2	用力法分析超静定结构	203
10.3	具有对称与反对称性的超静定结构	212
10.4	连续梁	214
	习题	217
第11章	材料失效及强度理论	223
11.1	常用工程材料的失效模式及强度理论概念	223
11.2	关于断裂的强度理论	225
11.3	关于屈服的强度理论	226
11.4	莫尔强度理论	229
11.5	强度条件与强度计算	231
	习题	234
第12章	杆件的强度与刚度计算	237
12.1	强度计算与刚度计算	237
12.2	轴向拉压杆件的强度计算	238
12.3	扭转杆件的强度与刚度计算	240
12.4	弯曲杆件的强度与刚度计算	243
12.5	组合内力时杆件的强度与刚度计算	248
12.6	提高杆件强度与刚度的一些措施	252
	习题	254
第13章	联接	264
13.1	工程中常见的联接结构	264
13.2	剪切实用计算	265
13.3	挤压实用计算	266
13.4	焊缝与胶粘接缝的实用计算	268
	习题	270
第14章	弹塑性变形与极限载荷分析	274
14.1	弹塑性变形与极限载荷法概念	274
14.2	应力-应变关系曲线的简化	276
14.3	超静定桁架的极限载荷	278
14.4	圆轴的弹塑性扭转 残余应力	280
14.5	梁的弹塑性弯曲 塑性铰	281
	习题	283

第 15 章 疲劳与断裂	286
15.1 交变应力及其描述	286
15.2 疲劳的概念与材料的疲劳极限	289
15.3 影响疲劳极限的主要因素	291
15.4 疲劳强度计算	295
15.5 变幅交变应力下构件的疲劳强度计算	299
15.6 疲劳裂纹扩展与构件的疲劳寿命	302
15.7 提高构件疲劳强度的措施	306
习题	308
第 16 章 压杆稳定	311
16.1 压杆稳定性概念	311
16.2 确定临界力的静力法 欧拉公式	312
16.3 超过比例极限压杆临界力的计算	317
16.4 关于压杆稳定性的进一步讨论	321
16.5 中心加载压杆稳定性计算	324
习题	328
附录	332
附录 A 截面的几何性质	332
附录 B 型钢表 (GB/T 706—2008)	346
附录 C 部分习题答案	362
参考文献	375

第1章 绪 论

与理论力学不同，材料力学的研究对象——构件，不再是刚体，而是变形固体，在外力作用下将发生形状与大小的改变。当构件所承受的外力超过某一定程度时，就要丧失承载能力而不能正常工作。因而要求构件应具有一定的强度、刚度与稳定性。材料力学就是研究构件强度、刚度、稳定性的一门科学。

1.1 强度 刚度 稳定性

材料力学将工程结构（各种机械、仪器及建筑结构等）的零部件统称为构件。例如，图 1-1 所示的车床主轴、齿轮、传动轴等均为构件。构件工作时因承受一定的外力（包括载荷和约束力）而发生几何形状和大小的改变，称为变形。当构件所承受的外力超过某一定程度时，就要丧失承载能力而不能正常工作。有如下三种丧失承载能力的形式：

1) 构件发生损坏。例如，图 1-1 所示的车床主轴若断裂，则车床将不能工作。又如，飞机的机翼断裂，其后果是不堪设想的。

2) 构件的变形过大，超过允许范围。例如，图 1-2 所示的车床主轴，由于工作时发生弯曲变形而使工件的回转轴线与刀具前进方向发生偏斜，这样，加

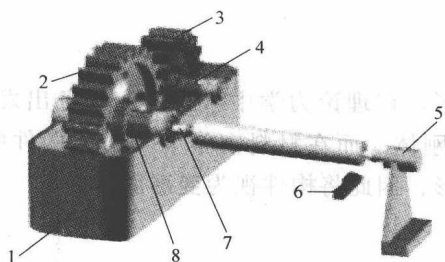


图 1-1

1—床头箱 2—主轴齿轮 3—传动轴齿轮
4—传动轴 5—尾座 6—刀具
7—顶尖 8—主轴

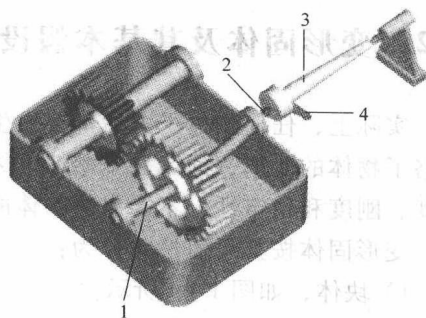


图 1-2

1—主轴 2—顶尖 3—工件 4—刀具

工出的工件便带有一定的锥度。主轴变形越大，工件锥度亦越大。可见，若主轴变形过大而超过允许范围，那么加工出的工件就不能满足精度要求而成为废品。不仅如此，主轴弯曲变形过大还将使齿轮不能正常啮合、轴承不合理的磨损、甚至要引起车床振动等。

3) 构件不能稳定地保持原来的平衡形态。图 1-3 所示为磨床工作原理图，当活塞杆受压时，若压力达到某一数值，在意外干扰力下，活塞杆会突然弯曲而失去原来直杆的平衡形态，从而丧失承载能力。这种破坏称为失稳（或屈曲）。

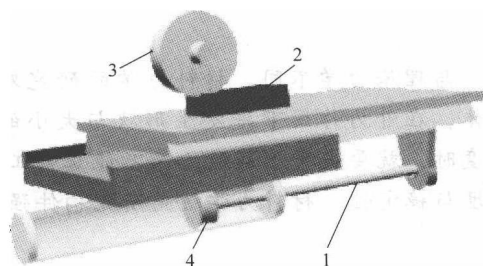


图 1-3

1—活塞杆 2—工件 3—砂轮 4—活塞

由此可见，要保证构件工作时不丧失承载能力，应要求其具有一定的强度、刚度和稳定性。

- **强度**——构件抵抗破坏的能力；
- **刚度**——构件抵抗变形的能力；
- **稳定性**——构件保持原来平衡形态的能力。

为提高构件的强度、刚度、稳定性，而盲目地增大构件截面面积或选用优质材料，势必要提高成本、浪费材料、增加构件重量、降低机械效率而不经济，在某种条件下，一味地增大构件截面面积反而会降低强度。

应用材料力学的知识能设计出具有足够强度、刚度和稳定性，同时又最节省材料、最经济的合理构件。

1.2 变形固体及其基本假设

实际上，任何物体受力后都要发生变形。在理论力学中从其研究任务出发，忽略了物体的变形，通常将研究对象视为刚体。而在材料力学中要研究构件的强度、刚度和稳定性，不能忽略物体的变形，因此将构件视为**变形固体**。

变形固体按其几何形状分为：

- 1) 块体，如图 1-4a 所示。
- 2) 板，如平板（图 1-4b）、曲板（或称壳体）（图 1-4c）。
- 3) 杆件，轴线是直线的为直杆（图 1-4d），轴线是曲线的为曲杆（图 1-4e），等截面的直杆为等直杆。

变形固体的性质是多方面的，在研究构件强度、刚度和稳定性时，自然要关心变形固体与强度、刚度和稳定性有关的物理性质，而对与其无关的性质

(如导电性、导热性等)不予考虑,为此对变形固体作下列基本假设:

(1) 连续性假设 假设变形固体在其整个体积内,连续地、毫无空隙地被构成该固体的物质所充满,即变形固体内的介质是连续介质。这样,在材料力学中就可以引入无穷小概念并能运用数学中的微分、积分等分析方法。

(2) 均匀性假设 假设变形固体内各个质点(或各个部分)物质的性质都是相同的。这就是说,从变形固体内任意切取一体积单元,其物质的性质与所切取的部位、切取的大小无关。譬如材料的弹性模量(是我们在物理学中早就熟悉的),由于有了均匀性假设,那么它对变形固体内任何一点都具有相同的数值。

(3) 各向同性假设 假设变形固体内每一点处,沿任何方向物质的性质都是相同的。这样,若在变形固体内切取一体积单元,其物质的性质与该单元在变形固体内的方位无关,这种性质称为各向同性。具有各向同性的物体称为各向同性体,否则称为各向异性体。

从微观或细观的角度来说,制成变形固体的任何材料都是不连续、不均匀和各向异性的。例如工程中常用的金属材料,其内部总是存在诸如砂眼、气孔等各种缺陷;即便是没有缺陷,组成物质的分子、原子间还会有空隙,因而是非连续的。钢材是由铁、碳等元素组成,不同元素其性质不同,因而钢材是不均匀的。金属中包含着许许多多且排列错综复杂的晶体,就每个晶体来说,不同方向性质是不相同的,晶体是各向异性的。但是,由于是从宏观的、统计的角度来研究变形固体的力学行为,因而完全可以把变形固体假设成连续的、均匀的各向同性体。

需要说明的是,由于所面临的问题和研究的对象不同,在某种情况下不得不放弃其中某一个或某几个假设。譬如,近些年来高技术领域中广泛使用的纤维增强复合材料,是由纤维、基体和界面相复合而成。对于这类材料,即使是从宏观、统计的角度来研究,纤维、基体和界面的性质也是完全不同的;顺着纤维方向和垂直纤维方向的力学行为也是大不相同的。这样,在复合材料力学学科中,就需放弃均匀性假设和各向同性假设,把复合材料制成的变形固体视为非均匀的各向异性体。

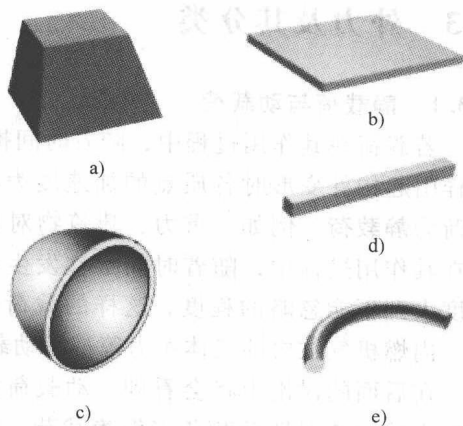


图 1-4

1.3 外力及其分类

1.3.1 静载荷与动载荷

若载荷在其作用过程中, 随着时间推移不发生变化或变化十分缓慢和微小, 这样引起构件变形时各质点的加速度为零或小到可以忽略的程度, 则称这样的载荷为**静载荷**。例如, 重力、建筑物对地基的压力等都是静载荷。反之, 若载荷在其作用过程中, 随着时间推移发生明显变化, 引起构件变形时各质点的加速度大到不能忽略的程度, 这样的载荷称为**动载荷**。譬如, 锻锤对工件的打击力、内燃机气缸内的气体压力等都是动载荷。

在后面的讨论中将会看到, 动载荷作用效果与静载荷大不相同。因此, 在工程设计中若误把动载荷当做静载荷, 则设计或分析的结果将是错误的, 可能要产生危险的后果。

1.3.2 体积力与表面力

分布在物体整个体积内的力称为**体积力**, 例如重力和惯性力。体积力作用在物体各个质点上, 通常情况下各点处体积力是不同的。为表明物体某点 a 处体积力大小和方向, 围绕点 a 取一微小体积 ΔV , 如图 1-5a 所示。设 ΔV 内的体积力为 ΔQ , 则平均集度 $\Delta Q/\Delta V$ 的极限 F

$$F = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

就是 a 点**体积力集度**。矢量 F 在坐标轴上投影 F_x 、 F_y 、 F_z 称为点 a 的**体积力分量**, 其指向沿坐标轴正方向者为正, 反之为负。它们的因次是 $[\text{力}][\text{长度}]^{-3}$ 。

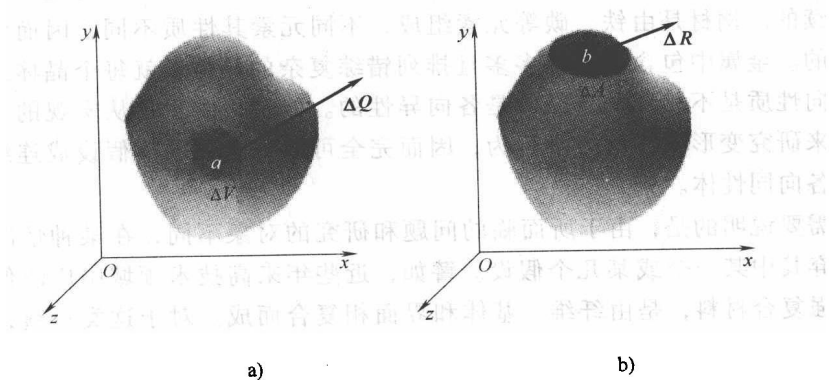


图 1-5

分布在物体表面上的力，例如流体的压力和接触力等，称为**表面力**。一般情况下，物体表面各点受力是不同的，为表明表面某点 b 处的表面力大小和方向，围绕点 b 取一微小面积 ΔA ，其上表面力为 $\Delta \mathbf{R}$ （图 1-5b），则表面力平均集度 $\Delta \mathbf{R}/\Delta A$ 的极限 $\mathbf{S}$

$$\mathbf{S} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{R}}{\Delta A}$$

就是点 b 的**表面力集度**。矢量 $\mathbf{S}$ 在坐标轴上投影 S_x 、 S_y 、 S_z 称为点 b 的**表面力分量**，其指向沿坐标轴正方向者为正，反之为负。它们的因次是 [力] [长度]⁻²。

1.3.3 分布力与集中力

外力作用在构件的某一区域内，则为**分布力**，上述的体积力与表面力均为分布力。若力作用在构件某一极小区域内，可视为作用在一点上，称为**集中力**。例如，一辆卡车对一长桥作用就可视为集中力。

1.4 变形与位移

1.4.1 弹性变形与塑性变形

变形固体在外力作用下将发生变形。若载荷完全卸去后，变形能够消失，使构件又恢复到原来的形状和大小，称这种变形为**弹性变形**。反之，变形不能消失，被永远保留下来，称这种变形为**塑性变形**或**残留变形**。

实验指出，一般金属材料在一定受力限度内，力和变形成正比（线性）关系，这样的弹性体称为**线性弹性体**，简称**线弹性体**。

1.4.2 大变形与小变形

若物体的变形量与物体变形前的尺寸相比很微小，这样在建立其静力平衡方程时可以忽略其变形量，而使用物体变形前尺寸，那么此种变形为**小变形**。反之，在建立其静力平衡方程时若无法忽略其变形量，那么这种变形为**大变形**。发生大变形时，变形与力不再呈线性关系，属非线性力学问题。材料力学只研究小变形问题。

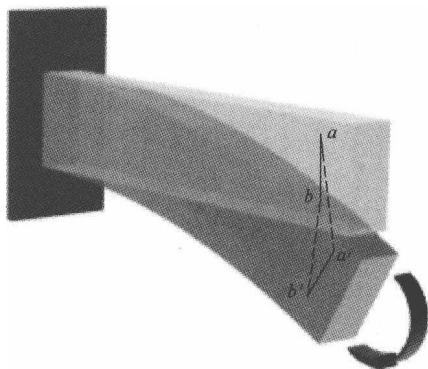


图 1-6

1.4.3 位移

物体发生变形时，物体内各个质点要移动（被固定约束的质点除外），使各个质点间的相对位置发生改变。如图 1-6 所示，点 a 在物体变形时移到点 a' ，点

b 移到点 b' 。线段 aa' 、线段 bb' 分别是点 a 、点 b 的线位移。变形前物体微线段 ab 变形后移到 $a'b'$ ，线段 $a'b'$ 和线段 ab 间夹角，就是 ab 微线段的角位移。位移是矢量，线位移在 x 、 y 、 z 方向的分量用 u 、 v 、 w 来表示，其指向沿坐标轴正方向者为正；反之为负。