

21世纪普通高等院校规划教材——基础力学

JIANMING
CAILIAO LIXUE

简明材料力学

田北平 主编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪普通高等院校规划教材——基础力学

简明材料力学

主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书根据高等学校土建类专业关于材料力学课程的基本要求编写,注重基本理论和基本方法的讲授,并在此基础上,注重学生能力的培养。力求论述的内容简明扼要、层次清楚,使学生达到熟练掌握关于材料力学的基本概念、基本理论、基本方法和一定的计算能力的教学要求并注意与相关课程的融会贯通。

本书内容共分为9章和1个附录,其主要内容包括:拉伸和压缩、扭转、弯曲应力、梁弯曲时的位移、简单超静定问题、应力状态和强度理论、组合变形及连接部分的计算、压杆稳定和截面图形的几何性质等。本书适合作为土木工程、建筑材料、给水排水、采暖通风、动力机械、工程管理、环境保护等土建类和机械类本科专业学生的材料力学课程的教材,同时也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

简明材料力学 / 田北平主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2010.8
21世纪普通高等院校规划教材. 基础力学
ISBN 978-7-5643-0817-9

I. 简… II. ①田… 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(2010)第162038号

21世纪普通高等院校规划教材——基础力学

简明材料力学

田北平 主编

*

责任编辑 张 波

特邀编辑 杨勇 曾荣兵

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话:
028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川经纬印务有限公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm × 230 mm 印张: 15.125

字数: 270千字

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-0817-9

定价: 26.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序 言

本教材根据高等学校土建类专业关于材料力学课程的基本要求编写，并从一般地方高校的教学实际和培养目标出发，以实际工程为背景，注重材料力学的基本概念、学生解题能力的培养，力求理论与应用并重、知识传授与能力培养并重，充分反映课程教学内容和课程体系改革的研究成果。本书具有以下特点：

(1) 贯彻少而精的原则，在保证教材的基本概念、基本原理等得到丰富的前提下，删除了不实用、不常用的内容。例如对连接件的计算只介绍实用的计算方法，并不进行应力分析。

(2) 加强了相关课程的融会贯通，删除了重复的内容。如扭转一章仅介绍圆截面杆的扭转变形。压杆稳定一章介绍了折减弹性模量理论，以便和后续课程——钢结构的压杆稳定的计算方法——相融合。

(3) 编者在选材，阐述问题的角度与方式，解题方法、行文等方面力求深入浅出，使教材内容通俗明晰、层次分明，引导教师在教学过程中注意启发式教学，为学生独立思考留下较大空间，以利于培养学生的创新能力。

(4) 从教学内容到例题、习题的编排上，归类精选各类概念性强的习题、例题，例题少而精，且为课程内容的重点，其分析与讨论由浅入深，有利于学生掌握解题的方法。本教材主要为了解决土建类专业面临的少教学时数的问题，故减少课堂授课时数，而增大学生自学和思考的空间。本教材全部内容讲授需要 50~60 学时。

参加本教材编写的有：四川理工学院的田北平、刘文方（第 7 章、第 9 章），钟小兵（第 4 章、第 5 章），胡庸（第 1 章、第 3 章），杨霞（第 6 章、附录），叶建兵（第 8 章）和西昌学院的岳华英（第 2 章）。全书由田北平主编并统稿。

希望采用本教材的教师和读者，若在使用过程中发现书中有不足之处，请提出宝贵的意见和建议，以便我们及时更正。（联系邮箱：tianbeiping@126.com）

编 者

2010 年 7 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 材料力学的任务	1
第二节 材料力学与生产实践的关系	2
第三节 可变形固体的性质及其基本假设	3
第四节 内力、截面法和应力的概念	4
第五节 杆件变形的基本形式	7
第二章 轴向拉伸与压缩	9
第一节 轴向拉伸和压缩的概念	9
第二节 轴向拉伸和压缩杆的内力轴力图	9
第三节 轴向拉压杆横截面上的应力	13
第四节 安全系数及轴向拉压杆的强度计算	16
第五节 轴向拉压杆的变形计算	22
第六节 材料在拉伸与压缩时的力学性质	28
第七节 应力集中的概念	33
第八节 轴向拉伸与压缩的超静定问题	34
思考题	43
习 题	45
第三章 扭 转	50
第一节 扭转的概念	50
第三节 纯剪切	53
第四节 圆轴扭转时的应力	56
第五节 圆轴扭转时的变形	60
思考题	63
习 题	64
第四章 弯曲内力及应力	67
第一节 梁承受荷载的特点及梁的计算简图	67
第二节 常见的简单梁	69

第三节	梁的弯矩和剪力	69
第四节	剪力、弯矩方程及剪力图、弯矩图	72
第五节	弯矩、剪力与分布荷载的关系及其应用	78
第六节	几种常见荷载下梁的剪力图与弯矩图的特征	80
第七节	用叠加法作弯矩图	82
第八节	梁的弯曲实验、平面假设	86
第九节	对称弯曲正应力公式	88
第十节	常见截面的 I_z 和 W_z	91
第十一节	梁的正应力强度条件	95
第十二节	梁的剪应力	97
第十三节	梁的合理截面	99
思考题		101
习 题		102
第五章	梁弯曲时的位移	111
第一节	弯曲变形的概念	111
第二节	积分法求梁的变形	111
第三节	用积分法求梁的变形	113
第四节	叠加法求梁的变形	116
思考题		118
习 题		119
第六章	简单超静定问题	123
第一节	超静定问题及其解法	123
第二节	拉压超静定问题	124
第三节	扭转超静定问题	131
第四节	简单超静定梁	134
思考题		140
习 题		142
第七章	应力状态和强度理论	147
第一节	应力状态问题的概论	147
第二节	平面应力状态的应力分析	150
第三节	平面应力状态下的相值应力和主应力	155
第四节	广义胡克定律	159

第五节 强度理论	161
思考题	166
习 题	166
第八章 组合变形及连接部分计算	169
第一节 概 述	169
第二节 两相互垂直平面内的弯曲——斜弯曲	170
第三节 拉伸或压缩与弯曲的组合	173
第四节 扭转与弯曲的组合变形	182
第五节 连接件的实用计算	185
第六节 铆钉连接的计算	188
思考题	193
习 题	194
第九章 压杆稳定	197
第一节 压杆稳定的概念	197
第二节 两端铰支细长压杆临界力的欧拉公式	199
第三节 不同约束条件下细长压杆的临界力	202
第四节 欧拉公式的应用范围·临界应力总图	202
第五节 压杆的稳定计算及提高稳定的措施	207
思考题	209
习 题	209
附录 I 截面的几何性质	211
第一节 截面的静矩和形心	211
第二节 惯性矩·惯性积和极惯性矩	213
第三节 惯性矩和惯性积的平行移轴和转轴公式	216
第四节 惯性矩和惯性积的转轴公式·截面的 主惯性轴和主惯性矩	219
思考题	225
习 题	227
附录 II 常用截面的面积、形心、形心惯性矩	233
参考文献	234

第一章 绪 论

材料力学是固体力学的一个分支，是各工科专业的一门重要的技术基础课。本章主要介绍材料力学的任务、研究对象、衡量构件承载能力三个方面，以及材料力学中对材料所作的基本假设以及材料力学与实际工程的联系等。对作用于物体上的外力进行分类，并引出内力的概念以及用截面法求内力；分析内力的集度即应力的定义及类型，阐述由于外力作用导致构件发生的位移、变形及线应变；最后简单介绍杆件的类型及其所发生的四种基本变形。详细介绍见以后各章节。

第一节 材料力学的任务

一、材料力学的任务

结构物或机械通常都受到各种外力的作用。例如，房屋外墙受到的风压力，吊车梁承受吊车和起吊物的重力等，这些力都称为荷载。组成结构物和机械的单个组成部分，统称为构件。

要保证建筑物或机械安全，显然其组成构件需要安全地工作，即要求其有承受足够荷载的能力，这种承受荷载的能力简称为承载力。如果构件设计薄弱，或选用的材料不恰当，不能安全工作，则会影响整个结构物的安全工作，甚至造成严重事故；如果构件设计过于保守，虽保证了构件和结构物的安全性，但构件的承载能力不能充分发挥，既浪费材料，又增加构件的重量和成本，也是不可取的。

显然，构件设计是否合理有着相互矛盾的两个方面，即安全性和经济性。即要求构件有足够的承载能力，又要经济适用。解决这个矛盾正是材料力学的任务所在。材料力学为解决上述矛盾提供了理论依据和计算方法。而且，材料力学还在基本概念、基本理论和基本方法等方面，为“结构力学”“弹性力学”“钢筋混凝土”“钢结构”等后续课程提供基础。

二、强度、刚度、稳定性

材料力学中，衡量构件的承载能力主要通过以下三个方面：

(1) 强度——构件抵抗破坏（断裂或塑性变形）的能力。

所有的机械或结构物在运行或使用中，其构件都将受到一定的力作用，通常称为构件承受一定的荷载，但是对于构件所承受的荷载都有一定的限制，不允许过大，如果过大，构件就会发生断裂或产生塑性变形而使构件不能正常工作，此时称为失效或破坏；严重时将发生工程事故，如桥梁折断、房屋坍塌等，工程中的事故屡见不鲜，因此必须研究受载构件抵抗破坏的能力——强度，对构件进行强度计算，以保证构件有足够的强度。

(2) 刚度——构件抵抗变形的能力。

当构件受载时，其形状和尺寸都要发生变化，此时称为变形。工程中要求构件的变形不允许过大，如果过大构件就不能正常工作。如机床的齿轮轴，变形过大就会造成齿轮啮合不良；又如吊车大梁变形过大，会使吊车出现爬坡，引起振动；房梁变形过大，会引起楼面、屋面开裂滴漏等。因此，必须研究构件抵抗变形的能力——刚度，并进行刚度计算，以保证构件有足够的刚度。

(3) 稳定性——构件保持原来平衡形态的能力。

衡量构件在荷载作用下是否能保持原有状态的平衡，即稳定平衡，例如千斤顶的螺杆、房屋的柱子，这类构件如果较为细长，在压力作用下杆轴线有发生弯曲的可能，为保证其正常工作，要求这类构件能始终保持直轴线的平衡状态，即保证构件有足够的稳定性。

三、材料力学的研究方法

构件的承载能力与其构成材料的机械性能即力学性能有关，而材料的力学性能必须通过试验来测定。此外，在材料力学中许多理论分析都是建立在某些假设条件的基础上的，其分析结果的正确与否有待于实验的检验；对于用现有理论无法分析解决的问题，也必须借助于实验解决。所以，实验分析和理论推导是材料力学解决问题的手段和方法，随着计算机技术的发展，计算机也成为研究材料力学的重要工具。

第二节 材料力学与生产实践的关系

科学的产生和发展是由生产决定的，而科学的发展又推动和促进生产的发

展。材料力学与生产实践之间同样是这种辩证关系。

从远古时代起,人类就开始从事房屋、桥梁的建修,后来又在车辆、船只和其他简单机械的制造等方面,逐渐积累了关于结构的受力和材料强度的知识。例如,早在两三千年的以前,我国就已经采用柱、梁、檩、椽等木结构建造墙壁不承重的房屋,知道了立柱宜采用圆截面,木梁应采用矩形截面。由隋朝工匠李春主持建造的赵州桥,跨长 37 m,是由石块砌成的拱结构,既利用了石料耐压的特性,又减轻了桥身的重量。

材料力学成为一门比较系统的科学,是在 17 世纪以后随着大工业生产而发展起来的。通常认为,意大利科学家伽利略《关于两种新科学的叙述及其证明》(1638 年)一书的发表,是材料力学开始形成一门科学的标志。当时欧洲各国生产规模及海外交通迅速扩大,工业兴起,单凭经验或用简单的比例放大方法,都不能解决大型和新型的船舶、水闸、海港等结构的设计问题。在这种情况下,伽利略及其他科技人员开始研究材料的强度问题,并引入了试验研究和理论分析相结合的科学方法。英国科学家胡克利用弹簧做实验,在 1678 年得出了变形和外力成正比的结论,在这个基础上发展成胡克定律。根据胡克定律,并经过进一步的实验和理论分析,法国科学家库仑在 1773 年正确地解决了梁的弯曲问题。这样,在材料力学的发展史上,形成了一条理论分析与实验研究相结合的道路。

最初,天然的木料、石料和较粗糙的铸钢、铸铁是主要的工程材料。随着铁路、车辆、动力机械、金属切削机床和飞机的发明及使用,钢和铝合金的随之出现,人们才广泛地使用有较高强度的金属。同时促使了弯曲、扭转理论进一步完善,薄板、薄壳理论也有了很大发展,测定材料的力学性质的专门实验室也建立了起来。在这个基础上,符合一定强度要求的构件的截面尺寸大为减小,自重和材料消耗也得以降低。可是,由于构件细长了,它变形的问題却显得突出了,这就促进了对构件刚度的研究。著名数学家欧拉早在 1774 年就提出了压杆稳定临界荷载的计算公式,但也是在发生了多起由于压杆失稳而引起严重事故之后(如 1896 年瑞士孟汗太因坦铁桥因桁架压杆失稳而倒塌),压杆稳定理论才在欧拉公式的基础上发展起来。

第三节 可变形固体的性质及其基本假设

建筑物、机械等各种构件都是由各种材料制成的,虽然其物质结构和性质各异,但都为固体,且在荷载的作用下都会发生尺寸和形状的变化,故在材料力学中称其为变形固体。对变形固体制成的构件进行强度、刚度和稳定性研究

时,为了简化计算,常根据所研究问题的性质,略去一些次要因素,做出某些假设得出其理想化模型,从而使所研究的问题得以简化或使得用精确的理论方法无法求解的问题得以解答。材料力学对变形固体做了以下假设:

(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内部。实际上,变形固体从其物质结构而言,组成固体的粒子之间是有空隙的,但这些空隙的大小与构件的尺寸相比极其微小,故假设固体内部是密实无空隙的。根据这一假设,对物体内的一些物理量(如应力、变形和位移等)就可以用位置坐标的连续函数表示。

(2) 均匀性假设。认为物体在其整个体积内,材料的结构和性质是相同的。事实上,变形固体的结构和性质并不是处处相同,如混凝土中,石块、砂和水泥微粒,它们的性质就各不相同,但因一般混凝土结构物的体积都很大,从中任取出的一部分作为研究对象时,都必定会包含很多的石块、砂和水泥,故认为混凝土也是均匀材料。根据这一性质,我们就可以取出构件中的任何部分来研究材料的性质,并将其结果用于整个构件。

(3) 各向同性假设。认为无论沿任何方向,固体的力学性能都是相同的。实际上,对于晶体结构的金属材料而言,每个晶粒在不同的方向均有不同的性质。但构件中包含晶粒的数量极多,晶体间的尺寸及其相互间的间隙与构件的尺寸相比均极其微小,且晶体在构件内部错综交叠地排列着,所以材料的力学性质是组成材料的所有晶粒的性质的统计平均量,宏观上可以认为材料是各向同性的。根据这一假设,我们就可以在物体的同一处沿不同方向截取出性质相同的材料进行研究。

但也有一些材料只在某一方向上才会有相同的性质,例如各种轧制钢筋、冷拉钢丝以及纤维整齐的木材等,都可认为是单向同性材料。另外,一些材料完全不具备各向同性的单向同性的性质,例如纤维纠结杂乱无章的木材、经过冷扭的钢丝、胶合板、纺织品等,称为各向异性材料。

综上所述,在材料力学中,将材料看做是连续、均匀、各向同性的变形固体。

第四节 内力、截面法和应力的概念

一、内力(附加内力)

物体在外力作用下会发生形状和尺寸的改变,其原因其内部各质点的相对位置发生改变导致各质点之间的相互作用力发生变化。在外力作用下,构件内部相连部分之间的相互作用力称为内力。为了使之与分子间的结合力相区

别, 这种内力称为附加内力。此内力随外力增加而增大, 当达到某一限度时, 物体就会发生破坏, 所以它与构件的承载能力密切相关。

二、截面法

为显示和计算构件的内力, 可采用截面法, 计算出内力的大小和方向 (图 1.1)。

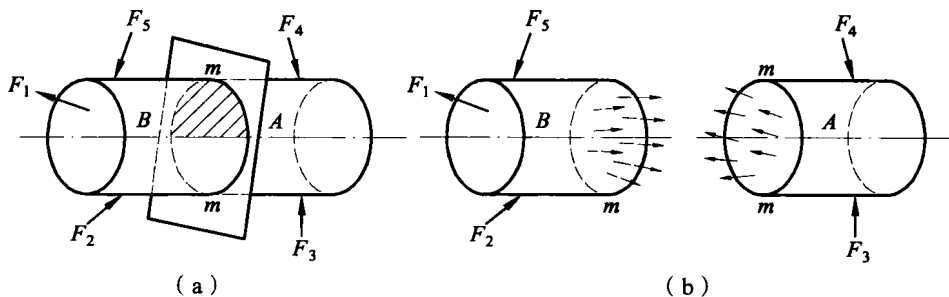


图 1.1 截面法

截面法三步骤:

- (1) 切: 欲求某一截面上的内力, 可用一假想的平面将物体分为两部分;
- (2) 代: 两部分之间的相互作用以内力代替;
- (3) 平: 建立其中任一部分的平衡条件, 求未知内力。

注: 内力为连续分布的力, 用平衡方程求解的, 为其分布内力的合力。

上述步骤可以叙述为: 一截为二, 去一留一, 平衡求力。

这种假想地用一截面将构件截开为两部分, 取其中任一部分为隔离体, 利用静力平衡方程求解截面上内力的方法称为截面法, 是材料力学中求解截面内力的基本方法, 下面举例说明。

【例 1.1】 试求图 1.2 所示悬臂梁 $m-m$ 截面上的内力。

解 利用截面法

- (1) 切: 从 $m-m$ 处截开截面。
- (2) 代: 取右段为隔离体, 左段对右段的作用用内力 F_s 和 M 代替。
- (3) 平: 对右段隔离体建立平衡方程。

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

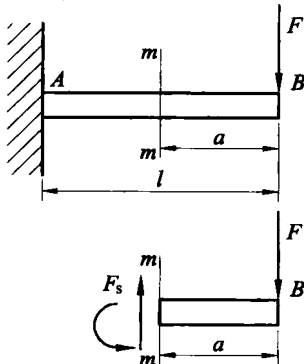


图 1.2 截面法

$$\sum M_0 = 0, \quad M - Fa = 0$$

求得: $F_s = F$, $M = Fa$ (剪力、弯矩)。

三、应 力

用截面法求得的是构件截面上分布的内力系对截面形心的主矢和主矩, 并不能说明其在截面内某一点处的强弱程度。而对构件强度而言, 分布内力系在各点的强弱程度即内力的集度是至关重要的。故仅仅知道构件截面上的内力是不够的, 还需进一步研究内力分布的密集度。内力的密集度通常称为应力。

在截面上, 围绕一点取微面积 ΔA , 其上作用着内力的一部分, 设其为 ΔF (图 1.3)。称 ΔF 与 ΔA 的比值为小面积 ΔA 上的平均应力, 即

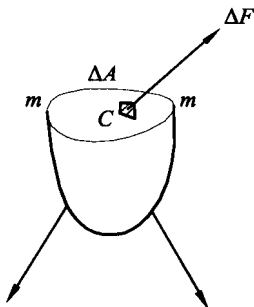


图 1.3 内力

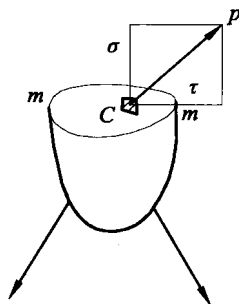


图 1.4 应力

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

式中, p 为 C 点的内力集度, 称为 C 点处的总应力, p 为矢量。

若将 p 分解为垂直于截面的分量 σ 和平行于截面的分量 τ , 如图 1.4 所示, 称 σ 为截面上的正应力, τ 为截面的切应力。

在应用时, 常把应力当做作用于单位面积上的内力。它的量纲是 [力] / [长度]², 即 N/m^2 , 国际单位为帕斯卡 (Pa)。这个单位较小, 通常使用的有千帕 (kPa)、兆帕 (MPa)、吉帕 (GPa)。

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}, \quad 1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}, \quad 1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$$

第五节 杆件变形的形式

作用在杆件上的外力是多种多样的，因此，杆件的变形也是多种多样的。无论多么复杂的变形，其基本变形不外乎有以下四种或是这四种基本变形的组合变形。

一、轴向拉伸或轴向压缩

在一对作用线与直杆轴线重合的外力 F 作用下，直杆沿轴线方向产生伸长或缩短。这种变形形式称为轴向拉伸或轴向压缩（图 1.5）。简单桁架在荷载作用下，桁架中的杆件就发生轴向拉伸或轴向压缩。

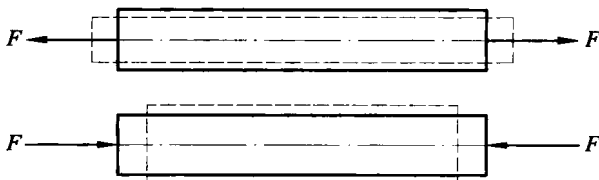


图 1.5 轴向拉伸或轴向压缩

二、剪 切

在一对相距很近、大小相同、方向相反的横向外力 F 作用下，直杆的主要变形是横截面沿外力作用方向发生相对错位（图 1.6），这种变形形式称为剪切变形。一般在发生剪切变形的同时，杆件还存在其他的变形形式。

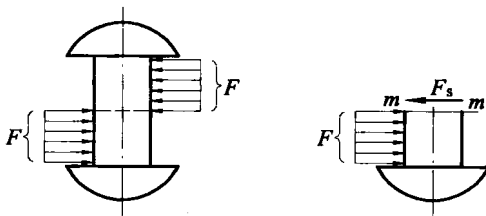


图 1.6 剪 切

三、扭 转

在一对转向相反、作用面垂直于直杆轴线的外力偶（其矩为 M_e ）作用下，直杆的相邻截面将绕轴线发生相对转动，杆件表面纵向线将呈螺旋线，而轴线仍维持直线形态。这种变形形式称为扭转（图 1.7）。

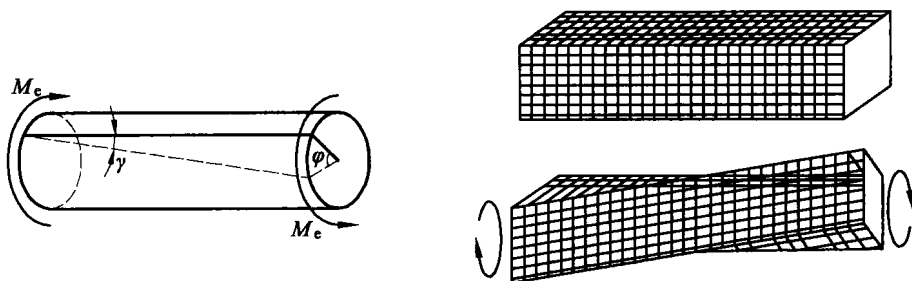


图 1.7 扭 转

四、弯 曲

这类变形的发生是由垂直于杆件轴线的横向力,或由大小相等、方向相反、作用面位于包含轴线的纵向平面内的一对力偶引起的,表现为杆件的轴线由直线变为曲线(图 1.8)。在工程中,杆件受弯是最常见的情形之一。例如,楼板下面的梁、起重机的大梁、各种轴以及车刀等均发生此类变形。

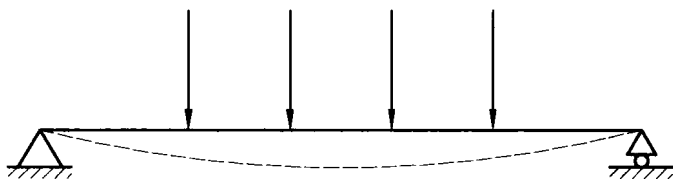


图 1.8 弯 曲

五、组合变形

当杆件同时发生两种或两种以上基本变形时,称为组合变形(图 1.9)。

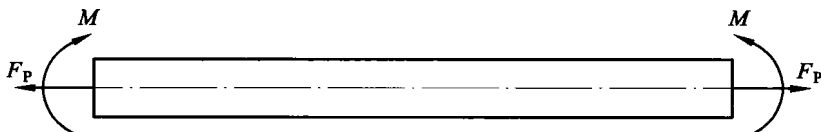


图 1.9 组 合 变 形

第二章 轴向拉伸与压缩

第一节 轴向拉伸和压缩的概念

工程结构中有许多发生轴向拉伸和压缩的构件。例如起吊重物时的起重钢索、如图 2.1 所示的三角支架的杆件 AB 、桁架结构中的一些杆件，都发生轴向拉伸变形；而图 2.1 的三角支架中的杆 BC 、千斤顶中的螺杆、房屋中的某些柱子、在燃气爆发冲程中内燃机的连杆等，都发生轴向压缩变形。

这些受拉或受压的杆件虽外形各不相同，加载方式也有差异，但它们的共同点是：作用于杆件上的外力合力的作用线与杆件的轴线重合，杆件的变形是沿轴线方向的伸长或缩短，这样的变形称为轴向拉（压）变形。轴向拉（压）变形是杆件的基本变形形式之一。若把这些杆件的形状和受力进行简化，可以简化成如图 2.2 所示的计算简图（图中实线表示变形前的形状，虚线表示变形后的形状）。本章只讨论直杆的轴向拉伸与压缩。

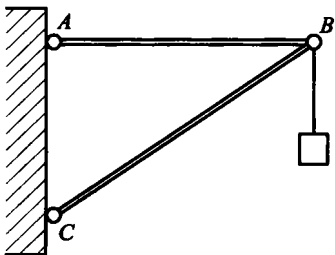


图 2.1

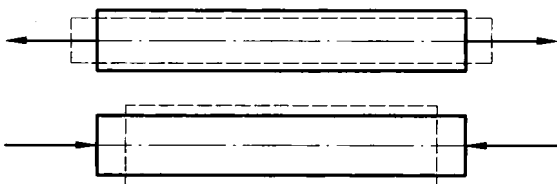


图 2.2

第二节 轴向拉伸和压缩杆的内力轴力图

如图 2.3 (a) 所示，轴向拉杆受轴向外力 F 作用，现要求其横截面 $m-m$ 上的内力。为了显示和计算杆件的内力，采用上一章介绍的截面法。沿横截面 $m-m$ 假想地把杆件分成两部分，如图 2.3 (b)、(c) 所示，两段杆件在横截面 $m-m$ 上的内力是一个分布力系，其合力为 F_N ，所以图 2.3 所示的受力图等效于图 2.4 所示的受力图。

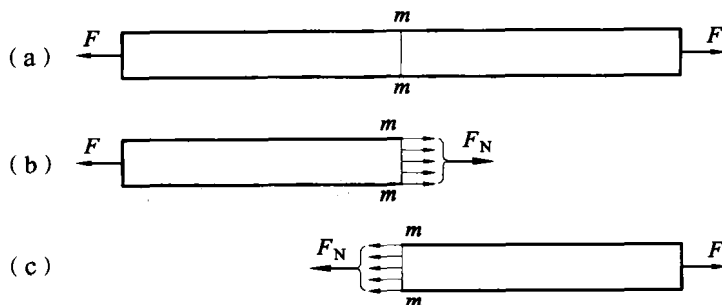


图 2.3

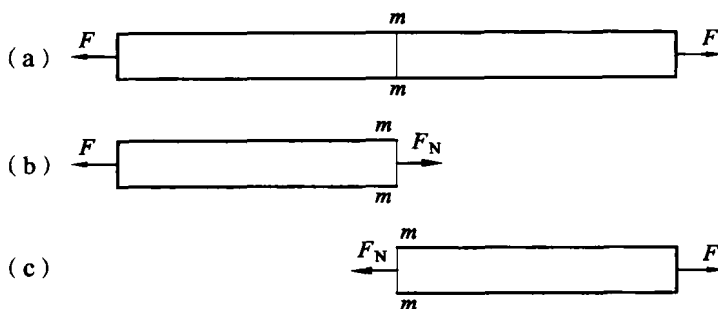


图 2.4

由左段或右段的平衡条件 $\sum F_x = 0$ ，得

$$F_N - F = 0$$

$$F_N = F$$

因外力合力的作用线与杆件轴线重合，根据二力平衡的条件，内力合力的作用线也与轴线重合，所以称为轴向内力，简称轴力。一般规定，截面受拉时的轴力为正，受压时为负，符号为 F_N 。根据国际单位制，其单位是“牛顿”，简称“牛”，记为“N”。

【例 2.1】图 2.5(a) 所示直杆的 A、B、C、D 四点分别作用有 $F_1 = 20 \text{ kN}$ ， $F_2 = 35 \text{ kN}$ ， $F_3 = 28 \text{ kN}$ ， $F_4 = 13 \text{ kN}$ 。方向如图所示，试求 1—1、2—2、3—3 截面的轴力并画出杆的轴力图。

解 按截面法的步骤，首先用假想的平面将杆件沿 1—1 截面切断，取左段为隔离体，画出隔离体的受力图，如图 2.5(b) 所示，通常将未知的轴力按正方向绘出（即受拉的方向）。根据平衡条件 $\sum F_x = 0$ ，得

$$F_{N1} - 20 = 0$$