



全国高职高专土木工程专业系列规划教材

CAILIAO LIXUE

©沈养中 董平 主编

材料力学

(第二版)



科学出版社
www.sciencep.com

全国高职高专土木工程专业系列规划教材

材 料 力 学

(第二版)

沈养中 董 平 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是《全国高职高专土木工程专业系列规划教材》之一,是依据教育部制定的高职高专土木工程类专业力学课程教学基本要求编写的。本书着力体现当前高职高专教学改革的特点,突出针对性、适用性和实用性,突出职业技能、素质的培养。编写时精选内容,简化公式推导,理论联系实际,注重工程应用;文字简洁,叙述深入浅出,通俗易懂,图文配合紧密。全书共分九章,内容包括:绪论、轴向拉伸和压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定。每章后有思考题、习题,并附习题答案。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的土木工程类各专业力学课程的教材,专升本考试用书以及有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/沈养中,董平主编. —2版. 北京:科学出版社,2005

(全国高职高专土木工程专业系列规划教材)

ISBN 7-03-015523-8

I. 材… I. ①沈…②董… III. 材料力学-高等学校;技术学校-教材
N. TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第047553号

责任编辑:童安齐 彭明兰 / 责任校对:耿 耘

责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方上林

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年11月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2005年6月第 二 版 印张:15 1/4

2005年6月第五次印刷 字数:292 000

印数:12 001—15 000

定价:23.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话:010-62136131 编辑部电话 101-62137026(VA04)

第二版前言

本书是在第一版的基础上,根据当前高职高专教育教学改革的新特点进行修订的。本次修订继续保持第一版教材的特色,进一步精选内容、突出工程应用,突出职业技能、素质的培养,更加注意内容的深入浅出、通俗易懂。参加本次修订工作的有徐州建筑职业技术学院沈养中(第二、三、七、八、九章),华北航天工业学院董平(第一、四、五、六章)。全书由沈养中统稿。

在本书的修订过程中,许多同行提出了很好的意见和建议,在此表示感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请同行和广大读者批评指正。

第一版前言

本书是《新世纪高职高专土建类专业系列教材》之一,依据教育部制定的高职高专土建类专业力学课程教学基本要求编写。

本书为建筑力学之二,它与本套教材中的《理论力学》(建筑力学之一)、《结构力学》(建筑力学之三)、《工程结构有限元计算》(建筑力学之四)在内容上融合、贯通,有机地连成一体,构成高职高专土建类专业配套的力学课程教材。本教材重点体现当前高职高专教学改革的特点,突出针对性、适用性和实用性。编写时精选内容,简化公式推导,理论联系实际,注重工程应用;文字简洁,叙述深入浅出、通俗易懂,图文配合紧密。

参加本书编写工作的有:河北工程技术高等专科学校沈养中(第十二章)、高淑荣(第十一、十三章)、骆素培(第三章),华北航天工业学院董平(第一、六章)、苏垂汉(第七、八章)、高迎伏(第二章)、韩金亮(第五章),华北矿业高等专科学校李维安(第四、九章)、钱双斌(第四章)、郑笑红(第十章),南阳理工学院赵冰(第十四章)。全书由沈养中、董平统稿。本书由教育部高工专力学课程教学委员会陈贵龄主任和上海应用技术学院陈位宫教授担任主审。

在本书的编写过程中,许多同行提出了很好的意见和建议,在此表示感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

2001年7月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 绪论	1
1.1 材料力学的研究对象、任务和研究方法.....	1
1.2 变形固体及其基本假设	2
1.3 杆件变形的形式	4
思考题.....	6
第二章 轴向拉伸和压缩	7
2.1 工程实例和计算简图	7
2.2 内力 截面法 轴力图	8
2.3 拉压杆的应力.....	11
2.4 拉压杆的变形.....	16
2.5 材料在拉压时的力学性能.....	20
2.6 拉压杆的强度计算.....	27
2.7 应力集中的概念.....	32
2.8 拉压超静定问题.....	34
2.9 连接件的实用计算.....	39
思考题	43
习题	45
第三章 扭转	52
3.1 工程实例和计算简图.....	52
3.2 扭矩和扭矩图.....	53
3.3 圆轴扭转时的应力和强度计算.....	56
3.4 圆轴扭转时的变形和刚度计算.....	62
3.5 矩形截面杆自由扭转时的应力和变形.....	64
思考题	66
习题	67
第四章 弯曲内力	70
4.1 梁的平面弯曲的概念和计算简图.....	70
4.2 梁的内力——剪力和弯矩.....	73
4.3 用内力方程法绘制剪力图和弯矩图.....	76
4.4 用微分关系法绘制剪力图和弯矩图.....	80

4.5 用区段叠加法绘制弯矩图	85
思考题	90
习题	90
第五章 弯曲应力	93
5.1 概述	93
5.2 梁横截面上的正应力	93
5.3 梁横截面上的切应力	100
5.4 梁的强度计算	105
5.5 梁的极限弯矩	110
思考题	112
习题	113
第六章 弯曲变形	117
6.1 挠度和转角	117
6.2 挠曲线的近似微分方程	118
6.3 用积分法求梁的挠度和转角	118
6.4 用叠加法求梁的挠度和转角	123
6.5 梁的刚度校核	127
思考题	127
习题	128
第七章 应力状态和强度理论	130
7.1 应力状态的概念	130
7.2 平面应力状态分析	133
7.3 空间应力状态分析简介	142
7.4 广义胡克定律	145
7.5 强度理论及其应用	147
思考题	158
习题	159
第八章 组合变形	166
8.1 概述	166
8.2 斜弯曲	167
8.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	172
8.4 偏心压缩(拉伸)	175
8.5 弯曲与扭转的组合变形	180
思考题	184
习题	185
第九章 压杆稳定	190
9.1 压杆稳定的概念	190

9.2 细长压杆临界力的欧拉公式	192
9.3 欧拉公式的适用范围及经验公式	196
9.4 压杆的稳定计算	199
9.5 提高压杆稳定性的措施	204
思考题.....	206
习题.....	207
附录 I 型钢规格表	210
附录 I 部分习题答案	226
参考文献	232

第一章 绪 论

本章主要介绍材料力学的研究对象、研究任务和研究方法。研究对象是工程结构中的杆件；研究任务是解决杆件在荷载作用下的强度、刚度和稳定性问题；研究方法采用的是实验—假设—理论分析—实验验证的方法。本章还介绍了变形固体的基本概念和变形固体的基本假设，以及杆件在荷载作用下的变形形式。

1.1 材料力学的研究对象、任务和研究方法

1.1.1 材料力学的研究对象

在土木工程中，各种结构得到了广泛的运用。所谓**结构**，就是建筑物中承受力而起骨架作用的部分。结构是由单个的部件按照一定的规则组合而成的，组成结构的部件称为**构件**。一般来讲，构件都是由固体形态的工程材料制成的，并具有一定的外部形状和几何尺寸。在使用的过程中，所有的构件都要受到相邻构件或其他物体的作用，也就是说要受到外力。例如房屋的外墙壁要受到风的压力、建筑物要受到地震的冲击力、公路桥梁要受到过往车辆的压力等等，此外它们都还要受到自身重力的作用。这些作用在建筑物或结构上的外力，及它们自身的重力通称为**荷载**。

结构是由构件组成的，作用于结构上的荷载，也要由组成结构的构件来共同承担，因而构件是承受荷载的基本单元。材料力学的**研究对象**就是这种由工程材料制成的、在荷载作用下的构件。但由于构件和结构的密切联系，材料力学有时也会涉及一些比较简单的结构。

1.1.2 材料力学的研究任务

在荷载的作用下，构件的几何形状和尺寸大小都要发生一定程度的改变，这种改变，在材料力学中称为**变形**。一般来讲，变形要随着荷载的增大而增大，当荷载达到某一数值时，构件会因为变形过大或被破坏而失去效用，通常简称为**失效**。避免构件在使用时的失效是材料力学的主要研究任务。

构件的**失效形式**通常有三种：一是构件在使用中因承受的荷载过大而发生破坏，如起重吊车的绳索被拉断、建筑物的基础被压坏等；二是构件的变形超出了工程上所允许的范围，如工业厂房中吊车的横梁或建筑物的房梁在受载时发生过大的弯曲等；三是构件在荷载的作用下其几何形状无法保持原有的状态而失去平衡，通常也称为失稳，如细长的支柱在受压时突然变弯等。

构件本身对各种失效具有抵抗的能力,简称为**抗力**。在材料力学中,把构件抵抗破坏的能力称为**强度**,构件抵抗变形的能力称为**刚度**,构件抵抗失稳、维持原有平衡状态的能力称为**稳定性**。研究表明:构件的强度、刚度和稳定性,与其本身的几何形状、尺寸大小、所用材料、荷载情况以及工作环境等都有着非常密切的关系。

在工程结构的设计过程中,必须根据荷载的情况对结构本身和组成结构的每一个构件进行力学分析。构件的力学分析,首先要保证的就是构件要有足够的强度、刚度和稳定性,以使构件能够安全工作而不至于发生失效。这是任何一个工程结构所必须满足的三项基本要求。一般说来,为构件选用较好的材料和较大的截面尺寸,上述的三项基本要求是可以满足的,但是这样又可能造成材料的浪费和结构的笨重。由此可见,结构的安全性与经济性之间是存在矛盾的。所以,如何合理地选用构件材料,恰当地确定构件的截面形状和几何尺寸,是构件设计中的一个十分重要的问题,也是材料力学所要完成的主要研究任务。

综合以上分析,可以把材料力学的主要研究任务归纳为:研究各种构件在荷载的作用下所表现出来的变形和破坏的规律,为合理设计构件提供有关强度、刚度和稳定性分析的理论基础和设计计算方法,从而为构件选择适当的材料、确定合理的形状和足够的尺寸,以保证建筑物或工程结构在满足安全、可靠、适用的前提下,符合最经济的要求。

1.1.3 材料力学的研究方法

材料力学采用的是实验—假设—理论分析—实验验证的研究方法。

材料力学所研究的是工程中的实际问题,它们往往是非常复杂的。有些问题很难找到精确的理论解答,而只能得出符合工程实际要求的近似解。因而,在研究工作中,首先要进行实验来观察事物的具体现象,以求通过具体现象来探求事物的本质。在大量实验的基础上,略去那些与所研究问题无关或影响不大的次要因素,保留与所研究问题有密切关系的主要因素,从而建立假设,把问题抽象化。用理想的力学模型来代替实际的问题。

实际问题经过简化、建立了力学模型后,就可以借助数学和力学等工具进行理论上的分析。理论分析所得出的结论以及由这些结论所推导出来的计算方法、计算公式是否正确,还需要经过大量的实验验证和生产实践的考验。确实正确的方可以作为理论公式或经验公式,应用到工程实际的设计和计算中来。

1.2 变形固体及其基本假设

1.2.1 刚体与变形固体

理论力学研究的是物体的运动和平衡问题的一般规律。在这类问题中,物体的微小变形对事物本质的影响很小,是可以忽略的次要因素。因而,在理论力学的研

究中,把物体都看作是**刚体**,即在外力的作用下,物体的大小和形状都绝对不变。用绝对刚体这个抽象的力学模型代替真实的物体,这是理论力学研究的特点之一。

材料力学所研究的是构件的强度、刚度和稳定性问题。在这类问题中,物体的变形虽然很小,但却是主要影响因素之一,必须要予以考虑而不能忽略。因而,在材料力学的研究中,把物体(构件)都看作是**变形固体**,即在外力的作用下都要发生变形——包括尺寸的改变和形状的改变。

1.2.2 变形固体的基本假设

材料力学研究的是变形固体。工程中使用的固体材料是多种多样的,其微观结构和力学性能更是非常复杂的。为了便于构件的强度、刚度和稳定性的分析,对变形固体通常作如下几个基本假设。

1. 有关材料的三个基本假设

(1) 连续性假设

假设构成变形固体的物质完全填满了固体所占的几何空间而毫无空隙存在。

事实上,构件的材料是由微粒或晶粒组成的,各微粒或晶粒之间是有空隙的,是不可能完全紧密的,但这种空隙和构件的尺寸比起来极为微小,因而可以假设是紧密而毫无空隙存在。以这个假设为依据,在进行理论分析时,与构件性质相关的物理量可以用连续函数来表示,所得出的结论与实际情况不会有显著的误差。

(2) 均匀性假设

假设构件中各点处的力学性能是完全相同的。

事实上,组成构件材料的各个微粒或晶粒,彼此的性质不一定完全相同。但是构件的尺寸远远大于微粒或晶粒的尺寸,构件所包含的微粒或晶粒的数目极多,按照统计学的观点,材料的性质与其所在的位置无关,即材料是均匀的。按照这个假设,在进行分析时,就不必要考虑材料各点处客观上存在的不同晶格结构和缺陷等引起的力学性能上的差异,而可以从构件内任何位置取出一小部分来研究,其结果均可代表整个物体。

(3) 各向同性假设

假设构件中的一点在各个方向上的力学性能是相同的。

事实上,组成构件材料的各个晶粒是各向异性的。但由于构件中所含晶粒的数目极多,在构件中的排列又是极不规则的,因而,按统计学的观点,可以认为某些材料是各向同性的,如金属材料。根据这个假设,当获得了材料在任何一个方向的力学性能后,就可将其结果用于其他方向。

以上三个假设对金属材料相当吻合,对砖、石、混凝土等材料的吻合性稍差,但仍可近似地采用。木材可以认为是均匀连续的材料,但木材的顺纹和横纹两个方向的力学性能不同,是具有方向性的材料。实践表明,材料力学的研究结果也可以近似的用于木材。

根据上述三个假设,可以从构件中任何位置、沿任何方向取出任意微小的部

分,采用微分和积分等数学方法对构件进行受力、变形和破坏的分析。

2. 有关变形的两个基本假设

(1) 小变形假设

假设变形量远小于构件的几何尺寸。这样,在研究构件的平衡和运动规律时仍可以直接利用构件的原始尺寸而忽略变形的影响。在研究和计算变形时,变形的高次幂也可忽略,从而使计算得到简化。当构件受到多个荷载共同作用时,根据小变形假设,可以认为各荷载的作用及作用的效应是相互独立、互不干扰的。因此,只要某个欲求量值与外力之间存在着线性关系,就可以利用叠加原理来进行分析。

(2) 线弹性假设

固体材料在外力作用下发生的变形可分为**弹性变形**和**塑性变形**。外力卸去后能完全消失的变形称为弹性变形;外力卸去后不能完全消失而永久保留下来的变形称为塑性变形。在材料力学中,假设外力的大小没有超过一定的限度,构件只产生了弹性变形,并且外力与变形之间符合线性关系,能够直接利用胡克定律。

以上是有关变形固体材料和变形的几个基本假设。实践表明,在这些假设的基础上建立起来的理论都是符合工程实际的要求的。同时,也大大地简化了某些工程实际问题的分析与计算过程。

1.3 杆件变形的形式

工程实际中构件的几何形状是多种多样的,根据几何形状和尺寸的不同,通常可分为杆件、板壳和块体。材料力学的主要研究对象是工程实际中应用得最为广泛的构件——**杆件**。所谓杆件是指横向尺寸远小于纵向尺寸的构件。杆件的形状和尺寸是由其轴线和横截面来决定的,轴线和横截面之间存在着一定的关系:轴线通过横截面的形心,横截面与轴线相正交。根据轴线和横截面的特征,杆件可以分为直杆和曲杆、等截面杆和变截面杆等。

材料力学研究的杆件主要是等截面的直杆,简称**等直杆**。它是杆件中最简单也是最常用的一种,其计算理论可近似用于曲率不大的曲杆和截面变化不剧烈的变截面杆。

1.3.1 基本变形

杆件在不同的荷载的作用下,会产生不同的变形。根据荷载本身的性质及荷载作用的位置不同,变形可以分为轴向拉伸(压缩)、剪切、扭转、弯曲四种基本变形。

1. 轴向拉伸和压缩

如果在直杆的两端各受到一个外力 F 的作用,且两者的大小相等、方向相反,作用线与杆件的轴线重合,那么杆的变形主要是沿轴线方向的伸长和缩短。当外力 F 的方向沿杆件截面的外法线方向时,杆件因受拉而变长,这种变形称为**轴向拉伸**;当外力 F 的方向沿杆件截面的内法线方向时,杆件因受压而变短,这种变形称

为**轴向压缩**,分别如图 1.1(a)、(b)所示。

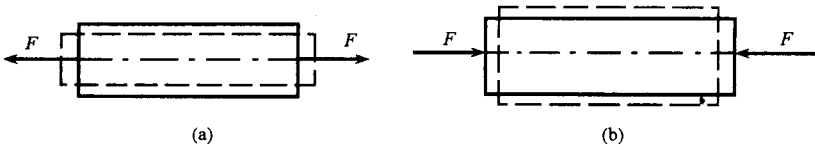


图 1.1

2. 剪切

如果直杆上受到一对大小相等、方向相反、作用线平行且相距很近的外力沿垂直于杆轴线方向作用时,杆件的横截面将沿外力的方向发生相对错动,这种变形称为**剪切**,如图 1.2 所示。

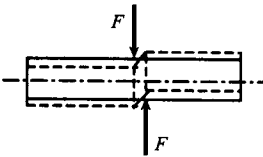


图 1.2

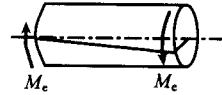


图 1.3

3. 扭转

如果在直杆的两端各受到一个外力偶 M_e 的作用,且二者的大小相等、转向相反,作用面与杆件的轴线垂直,那么杆件的横截面将绕轴线发生相对转动,这种变形称为**扭转**,如图 1.3 所示。

4. 弯曲

如果直杆在两端各受到一个外力偶 M_e 的作用,且二者的大小相等、转向相反,作用面都与包含杆轴的某一纵向平面重合,或者是受到位于纵向平面内且垂直于杆轴线的外力 F 作用时,杆件的轴线就要变弯,这种变形称为**弯曲**,如图 1.4 (a)、(b)所示。图 1.4(a)所示为**纯弯曲**,图 1.4(b)所示为**横力弯曲**。

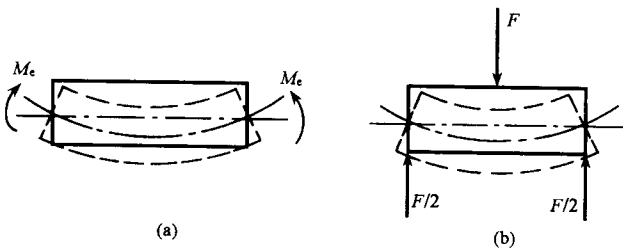


图 1.4

1.3.2 组合变形

在工程实际中杆件的变形,可能只是某一种基本变形,也可能是两种或两种以上的组合变形,称为**组合变形**。常见的组合变形形式有:斜弯曲(或称双向弯曲)、拉(压)与弯曲的组合、弯曲与扭转的组合等等,如图 1.5(a)、(b)、(c)所示。

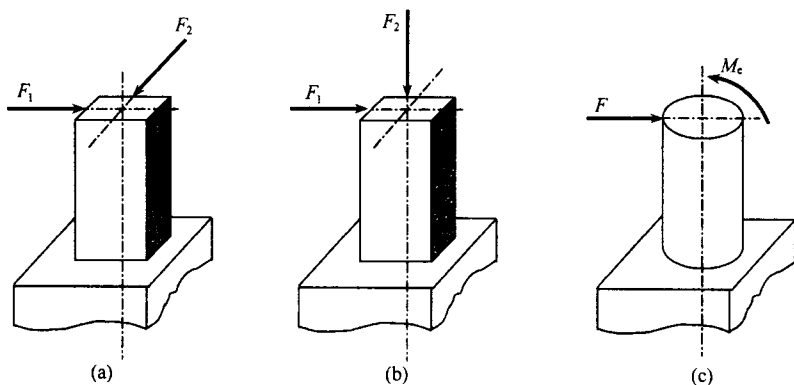


图 1.5

思考题

- 1.1 什么是变形? 变形体和刚体有什么主要的区别?
- 1.2 什么叫失效? 失效的形式具体有哪些?
- 1.3 什么是构件的强度、刚度和稳定性?
- 1.4 材料力学的研究对象和主要的研究任务是什么?
- 1.5 变形体的基本假设有哪些? 都分别是什么?
- 1.6 杆件变形的形式有哪些? 分别各举一例说明。
- 1.7 常见的杆件组合变形形式有哪些? 分别举一房屋建筑的例子说明。

第二章 轴向拉伸和压缩

本章介绍杆件在轴向拉(压)时的内力、应力和变形,轴向拉(压)杆的强度计算,拉压超静定问题以及连接件的强度计算。

2.1 工程实例和计算简图

在工程中,经常会遇到承受轴向拉伸或压缩的杆件。例如桁架中的杆件[图 2.1(a)]、斜拉桥中的拉索[图 2.1(b)]以及闸门启闭机中的螺杆[图 2.1(c)]等。

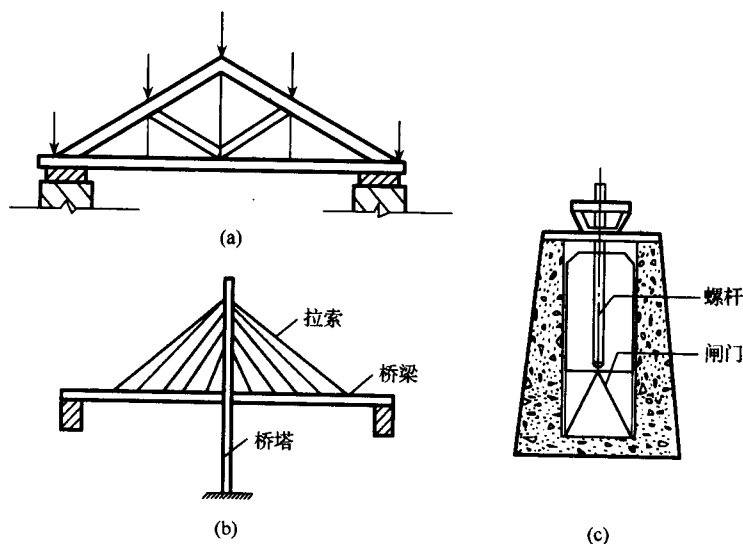


图 2.1

承受轴向拉伸或压缩的杆件称为**拉(压)杆**。实际拉压杆的几何形状和外力作用方式各不相同,若将它们加以简化,则都可抽象成如图 2.2 所示的计算简图。其受力特点是外力或外力合力的作用线与杆件的轴线重合;变形特征是沿轴线方向的伸长或缩短,同时横向尺寸也发生变化。

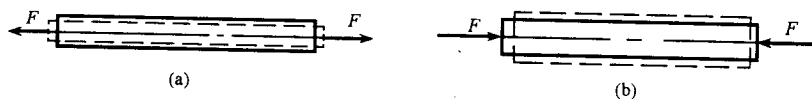


图 2.2

2.2 内力 截面法 轴力图

2.2.1 内力的概念

我们知道,物体没有受到外力作用时,其内部各质点之间就存在着相互作用的内力。这种内力相互平衡,使得各质点之间保持一定的相对位置。在物体受到外力作用后,其内部各质点之间的相对位置就要发生改变,内力也要发生变化而达到一个新的量值。材料力学中所讨论的内力,指的是因外力作用而引起的物体内部各质点间相互作用的内力的改变量,即由外力引起的“附加内力”,简称为**内力**。

内力随外力的增大而增大,当内力达到某一限度时就会引起构件的破坏,因而它与构件的强度问题是密切相关的。下面先来介绍内力的计算。

2.2.2 截面法

截面法是求构件内力的基本方法。下面通过求解图 2.3(a)所示拉杆 $m-m$ 横截面上的内力来具体阐明截面法。

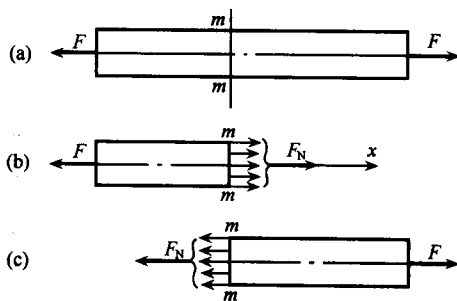


图 2.3

为了显示内力,假想地沿横截面 $m-m$ 将杆截开成两段,任取其中一段,例如取左段,作为研究对象。左段上除受到力 F 的作用外,还受到右段对它的作用力,此即横截面 $m-m$ 上的内力如图 2.3(b)所示。根据均匀连续性假设,横截面 $m-m$ 上将有连续分布的内力,以后称其为**分布内力**,而把内力这一名词用来代表分布内力的合力(力或力偶)。现要求的内力就是图 2.3(b)中的合力 F_N 。因左段处于平衡状态,故列出平衡方程

$$\sum X = 0 \quad F_N - F = 0$$

得

$$F_N = F$$

这种假想地将构件截开成两部分,从而显示并求解内力的方法称为**截面法**。由上可知,用截面法求构件内力可分为以下三个步骤:

- 1) **截开** 沿需要求内力的截面,假想地将构件截开成两部分。
 - 2) **代替** 取截开后的任一部分作为研究对象,并把弃去部分对留下部分的作用以截面上的内力代替。
 - 3) **平衡** 列出研究对象的静力平衡方程,解出需求的内力。
- 本节介绍的截面法也适用于其他变形构件的内力计算,以后将会经常用到。

2.2.3 轴力和轴力图

图 2.3(a)所示拉杆横截面 $m-m$ 上的内力 F_N 的作用线与杆轴线重合,故 F_N 称为**轴力**。

若取右段为研究对象,同样可求得轴力 $F_N = F$ [图 2.3(c)],但其方向与用左段求出的轴力方向相反。为了使两种算法得到的同一截面上的轴力不仅数值相等,而且符号相同,规定轴力的正负号如下:当轴力的方向与横截面的外法线方向一致时,杆件受拉伸长,轴力为正;反之,杆件受压缩短,轴力为负。在计算轴力时,通常未知轴力按正向假设。若计算结果为正,则表示轴力的实际指向与所设指向相同,轴力为拉力;若计算结果为负,则表示轴力的实际指向与所设指向相反,轴力为压力。

工程中常有一些杆件,其上受到多个轴向外力的作用,这时杆在不同横截面上的轴力将不相同。为了表明轴力随横截面位置的变化规律,以平行于杆轴线的坐标表示横截面的位置,垂直于杆轴线的坐标(按适当的比例)表示相应截面上的轴力数值,从而绘出轴力与横截面位置关系的图线,称为**轴力图**,也称 F_N 图。通常将正的轴力画在上方,负的画在下方。

【例 2.1】 拉压杆如图 2.4(a)所示,求横截面 1-1、2-2、3-3 上的轴力,并绘制轴力图。

【解】 1) 求支座反力。由杆 AD [图 2.4(a)] 的平衡方程

$$\sum X = 0 \quad F_D - 2\text{kN} - 3\text{kN} + 6\text{kN} = 0$$

得

$$F_D = -1\text{kN}$$

2) 求横截面 1-1、2-2、3-3 上的轴力。沿横截面 1-1 假想地将杆截开,取左段为研究对象,设截面上的轴力为 F_{N1} [图 2.4(b)],由平衡方程

$$\sum X = 0 \quad F_{N1} - 2\text{kN} = 0$$

得

$$F_{N1} = 2\text{kN}$$

算得的结果为正,表明 F_{N1} 为拉力。当然也可以取右段为研究对象来求轴力 F_{N2} ,但右段上包含的外力较多,不如取左段简便。因此计算时,应选取受力较简单的部分作为研究对象。

再沿横截面 2-2 假想地将杆截开,仍取左段为研究对象,设截面上的轴力为