

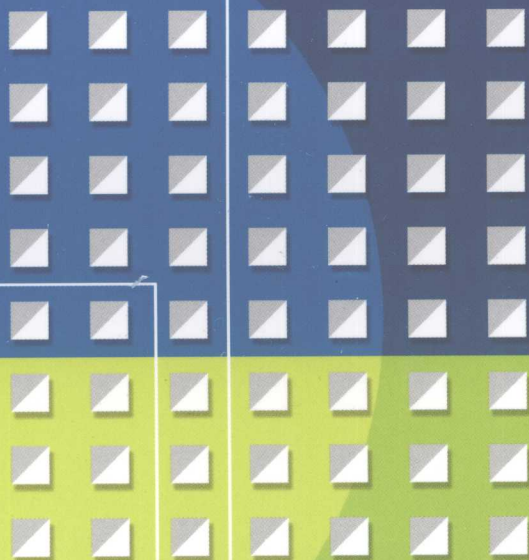


高等学校“十一五”精品规划教材

材料力学

主 编 戴景军 郭少春

CAILIAO LIXUE



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

材料力学

主 编 戴景军 郭少春

副主编 李红梅 邹春霞 路桂华

参 编 范桂菊 朱一丁 陶桂香 刘冬峰



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为《高等学校“十一五”精品规划教材》之一。编者在多年的教研基础上,将传统的材料力学按杆的变形进行分章编排,改为按内力、应力、变形进行分章编排,从而使体系更合理、内容更精练。全书共分8章,内容包括:引论、杆件的内力与内力图、杆件的应力与强度、杆件的变形与刚度、应力状态与强度理论、组合变形分析、压杆稳定及动荷载与交变应力。

本书可作为普通高等学校和成人高等教育土木工程类专业的教材,也可作为参加高等教育自学考试的考生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/戴景军,郭少春主编. —北京:中国水利水电出版社,2009

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-6676-7

I. 材… II. ①戴…②郭… 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124778号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 材料力学
作 者	主编 戴景军 郭少春
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 373千字
版 次	2009年7月第1版 2009年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	29.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

材 料 力 学

主 编 戴景军 (山东农业大学)

郭少春 (宁夏大学)

副主编 李红梅 (河北农业大学)

邹春霞 (内蒙古农业大学)

路桂华 (山东农业大学)

参 编 范桂菊 (山东农业大学)

朱一丁 (宁夏大学)

陶桂香 (黑龙江八一农垦大学)

刘冬峰 (山东水利职业学院)

前 言

本书将传统的材料力学按杆的变形进行分章编排,改为按内力、应力、变形进行分章编排,这样做有两方面的优点:①避免重复,使内容更精练;②可以节省4~8个学时。

全书共分8章,内容包括:引论、杆件的内力与内力图、杆件的应力与强度、杆件的变形与刚度、应力状态与强度理论、组合变形分析、压杆稳定及动荷载与交变应力(考虑到该教材主要是针对土木工程类专业,该专业学生都要开设结构力学,故没有编写能量法的相关内容)。全书除重视加强基础及概念的更新与拓宽外,还突出了对工程意识的培养,重点训练学生从工程中抽象和简化力学模型的能力,帮助学生建立力学思维模式。

本书由戴景军(山东农业大学)、郭少春(宁夏大学)主编,李红梅(河北农业大学)、邹春霞(内蒙古农业大学)、路桂华(山东农业大学)担任副主编。范桂菊(山东农业大学)、朱一丁(宁夏大学)、陶桂香(黑龙江八一农垦大学)、刘冬峰(山东水利职业学院)参与编写。

戴景军编写第1章、第5章;郭少春编写第3章;李红梅编写第6章;邹春霞编写第7章、附录A、附录B;路桂华编写第8章;朱一丁编写第2章;陶桂香编写第4章。刘冬峰和范桂菊负责全书例题、习题的校对工作。

本书承蒙山东农业大学刘福胜教授主审,他提出了许多精辟而中肯的意见,在此致以衷心感谢。

由于编者的水平有限,书中难免存在缺点与不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009年3月

目 录

前言

第1章 引论	1
1.1 材料力学概述	1
1.2 材料力学发展简史	2
1.3 变形固体的基本假设	3
1.4 杆件变形的基本形式	4
思考题	6
第2章 杆件的内力与内力图	7
2.1 基本概念	7
2.2 轴向拉压杆的轴力	8
2.3 扭矩与扭矩图	12
2.4 梁的剪力和弯矩	15
2.5 荷载集度、剪力和弯矩的微积分关系	24
2.6 叠加法作梁的剪力图和弯矩图	28
小结	29
思考题	30
习题	30
习题答案	34
第3章 杆件的应力与强度	35
3.1 轴向拉压杆的应力与强度	35
3.2 材料的力学性能	43
3.3 圆轴扭转时的应力与强度	51
3.4 梁的应力与强度	63
3.5 剪切和挤压的实用计算	85
小结	91
思考题	93
习题	97
习题答案	107
第4章 杆件的变形与刚度	110
4.1 轴向拉压杆件的变形与刚度计算	110

4.2 扭转变形与刚度	112
4.3 梁的变形与刚度	114
4.4 简单超静定问题	126
小结	131
思考题	131
习题	132
习题答案	137
第5章 应力状态与强度理论	139
5.1 应力状态的概念	139
5.2 平面应力状态分析	140
5.3 空间应力状态简介	151
5.4 强度理论	153
小结	158
思考题	158
习题	159
习题答案	161
第6章 组合变形分析	162
6.1 基本概念	162
6.2 斜弯曲	163
6.3 弯曲与拉压的组合变形	168
6.4 偏心压缩	170
6.5 弯扭组合变形	176
小结	178
思考题	178
习题	180
习题答案	183
第7章 压杆稳定	185
7.1 压杆稳定的基本概念	185
7.2 理想压杆的临界力	186
7.3 压杆的临界应力	191
7.4 压杆的稳定计算	194
7.5 提高压杆稳定性的措施	197
小结	198
思考题	199
习题	200
习题答案	202

第 8 章 动荷载与交变应力	203
8.1 动静法求解动荷载和动应力	203
8.2 机械能守恒法求解冲击荷载与冲击应力	205
8.3 交变应力及疲劳失效	207
8.4 钢结构构件及其连接部位的疲劳计算	210
小结.....	214
思考题.....	214
习题.....	215
习题答案.....	216
附录 A 截面的几何性质	218
A.1 平面图形的静矩和形心	218
A.2 平面图形的惯性矩及极惯性矩	221
A.3 平行移轴公式	224
A.4 形心主轴和形心主惯性矩	226
小结.....	229
思考题.....	230
习题.....	230
习题答案.....	231
附录 B 型钢规格表	233
参考文献	244

第 1 章 引 论

1.1 材料力学概述

土木结构、水利工程结构、桥梁结构、机械结构、火电站与核电站结构、核反应堆结构、航空航天结构等，工程中各种结构的统称为工程结构。工程结构的各组成部分统称为结构构件，简称为构件。

结构物和机械通常都受到各种外力的作用，例如，厂房外墙受到的风压力、吊车梁承受的吊车和被起吊物体的重力等，这些力称为荷载。

图 1.1 所示为香港青马大桥，于 1992 年 5 月开始兴建，1997 年开放通车，历时 5 年竣工。总造价 71.44 亿港元。青马大桥横跨青衣岛及马湾，桥身总长度 2200m，主跨长度 1377m，离海面高 62m，缆绳的直径 1.1m，缆绳总长 16000km，创造了世界最长的行车铁路两用吊桥纪录。香港青马大桥，主结构由框式主塔、悬索、连续箱梁等组成。10 级风以下，车辆在桥面上行驶；10 级风以上时，车辆可以在封闭的桥箱内行驶。



图 1.1

参观者看到大桥，首先想到的是悬索会不会被拉断？桥面会不会被破坏？无疑，这是设计者应该考虑的问题。悬索和桥梁在荷载作用下应该具有设计所要求的抵抗破坏的能力，即这些构件有足够的强度；车辆在桥面上行驶时，桥梁不允许有过量的变形，桥梁构件有抵抗变形的能力，即有足够的刚度；主塔架通过悬索支撑着大桥，塔架立柱受力后应该具有保持原有平衡形式的能力，即有足够的稳定性。

设计构件时，不但要满足上述强度、刚度和稳定性要求，还必须尽可能地合理选用材料和降低材料的消耗量，以节约资金或减轻构件的自身重量。前者往往要求多用材料，而后者则要求少用材料，两者之间存在着矛盾。材料力学的任务应在于合理地解决这种矛盾。在不断解决新矛盾的同时，也促进了材料力学的发展。

构件的强度、刚度和稳定性问题均与所用材料的力学性能（主要包括材料变形与外力之间的关系，以及材料抵抗变形与破坏的能力）有关，这些力学性能均需通过材料试验来

测定。此外,也有些单靠现有理论解决不了的问题,需借助于实验来解决。因此,实验研究和理论分析同样重要,都是完成材料力学的任务所必需的。

材料力学的任务是:研究构件的强度、刚度、稳定性理论,为设计安全、经济的构件及结构提供相应的理论指导,检测构件的力学性能、确保其安全运行,研究新型的构件、结构和鉴定新材料。

1.2 材料力学发展简史

中国、古希腊、罗马、埃及以及其他早期文明国家,曾经建造了许多宏伟而耐久的结构物,都有过一些关于材料力学方面的知识,但是绝大多数都因缺少记述而流失了。现有材料力学的发展是从中世纪之后欧洲文艺复兴时代开始的。这一时期最早的某些工作,包括达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452~1519年)的研究,如:确定作用在结构构件上的力以及通过材料的试验确定材料的强度等,达·芬奇不仅是一位艺术家,而且是一位伟大的科学家和工程师。他没有科学著作,但后人在他的笔记本里发现他在许多科学领域都有一些伟大的发明。达·芬奇对力学特别有兴趣,他在笔记中写道:“力学是数学的乐园,因为我们在这里获得了数学的果实。”

最早尝试用解析法确定构件安全尺寸是从 17 世纪才开始的。一般认为以伽利略的名著《关于两门新科学的谈话和数学证明》(1638 年)为标志,表示材料力学的开端。需要指出的是,最早的材料力学实验(木梁弯曲试验)是由伽利略完成的。

在此期间,世界上许多著名的科学家,包括胡克(Hooke, R.)、马略特(Mariotte, E.)、约翰第一·伯努利(Bernoulli, Johann I.)、雅各布第一·伯努利(Bernoulli, Jakob I.)等,都得出了有关梁、柱性能的基础知识,并且研究了材料的强度性能与其他力学性能。在这一世纪里,意大利、英国等欧洲国家建立了国家科学院,这对材料力学的研究产生了巨大影响。

到了 18 世纪,17 世纪的科学研究成果被推广应用于实际。随着军事工程和结构工程的发展,对于木材、石料、钢和铜等建筑材料,做了很多力学性能试验。第一本与材料有关的书于 1729 年出自法国,书名为《工程师的科学》,作者是贝多利(Belidor, B. f. de, 1698—1761)。书中有一章讨论材料力学,贝利多所引理论没有超出伽利略与马略特已经得到的成果,他的贡献是将这两位理论应用于木梁实验中,并由此得出确定梁安全尺寸的法则。

18 世纪对材料力学贡献最大的科学家,首推库仑(Coulomb, C. — A. de, 1736—1806)。他在材料力学方面的主要成就是通过实验验证,修正了伽利略和马略特理论中的错误。

18 世纪后期开始的工业革命以及后来一直延续下来的技术进展,为材料力学的应用提供了许多新的领域。铁桥、铁路工程,机器设计等都是极好的例子。这些应用领域所提出的问题与工程实际经验相联系,又有更多的补充知识,与前几个世纪积累的知识一起组成了较系统的材料力学知识。全世界许多领域的工程师和科学家,都对这些知识的积累作出了他们的贡献。

1826年, 第一本《材料力学》出版, 作者是法国著名科学家纳维 (Navier, C.-L.-M.-H., 1785-1836)。19世纪中叶, 铁路尤其是铁路桥梁工程的发展, 大大推动了材料力学的发展。使材料力学变成以钢材为主要研究对象的材料力学。按照钢材的特点, 均匀连续、各向同性这些基本假定以及胡克定律成为当今材料力学的基础。

20世纪特别是近50年来科学技术有了突飞猛进的发展, 主要是工业技术高度发展, 特别是航空与航天工业的崛起, 计算机的出现和不断更新换代, 各种新型材料 (例如复合材料、高分子材料) 的不断问世并应用于工程实际, 实验设备日趋完善, 实验技术水平不断提高, 所有这些进展使得材料力学所涉及的领域更加宽阔, 知识更加丰富。这也表明材料力学仍然处于新的发展之中, 20世纪形成的材料力学也面临着逐步更新的趋势。

1.3 变形固体的基本假设

材料力学研究的构件, 在外力作用下都会产生变形。所谓变形, 是指在外力作用下构件几何形状和尺寸的改变。这些变形与构件的强度、刚度、稳定性等方面密切相关, 为了突出组成构件的固体特性, 通常把构件称为变形固体。

变形固体在外力作用下会产生变形, 就其变形的性质可分为弹性变形和塑性变形。

弹性变形——作用在变形固体上的外力去掉后可以消失的变形。

塑性变形——作用在变形固体上的外力去掉后不能消失的变形, 也称残余变形。

小变形——工程中大多数构件在荷载作用下, 其几何尺寸的改变量和构件本身的尺寸相比是一个很微小的量, 这种变形称为小变形。在研究构件的平衡和运动等问题时, 均可忽略这种小变形量, 按构件的原始尺寸进行计算, 而且在计算整体平衡时, 可按刚体考虑。

材料力学在研究变形固体时, 为了建立简化模型, 忽略了对研究主体影响不大的次要因素, 保留了主体的基本性质, 对变形固体作了如下假设。

1.3.1 连续性假设

假设物质连续无间隙地充满构件所占有的空间。实际变形固体, 就其微观组织来看, 都具有不同程度的空隙。然而, 这些空隙的大小与构件尺寸相比, 都是极其微小的, 因而, 可以忽略不计, 而认为变形固体的结构是密实的。根据这一假设, 可将物体内部的物理量 (应力、应变、位移等) 用数学的函数来表示。

1.3.2 均匀性假设

材料在外力作用下所表现的性能, 称为材料的力学性能。均匀性假设认为材料的力学性能与其在构件中的位置无关。认为从构件内取出的任一体积单元, 其力学性能都能代表整个构件的力学性能。实际变形固体其微观基体的性质会有不同程度的差异, 但由于微观基体与构件尺寸相比是个微量, 基体在构件中的排列是不规则的, 但按统计学观点, 仍可认为变形固体的性质是均匀的。因而, 我们可以从构件中切取微单元体进行应力和应变分析。

1.3.3 各向同性假设

假设材料沿各个方向的力学性能相同。实际上只有个别变形固体属于各向同性材料,

例如：金属的各个晶粒，其力学性能是有方向性的，但由于构件包含的晶粒数量极多，且排列没有规则，按统计学的观点可以将金属假设为各向同性材料。为了确保金属材料力学性能试验结果的统一性和可比性，国家标准规定了试样的取样规则。在设计和计算各向同性材料制成的构件时，可以使用按国家标准测出的材料弹性常数。

综上所述，在材料力学中是把实际材料看作为连续、均匀、各向同性的变形固体，大多数情况只限于研究弹性范围内的小变形情况。

木材和各种复合材料均属于各向异性材料，应按各向异性材料进行计算。

1.4 杆件变形的基本形式

1.4.1 弹性体的几何分类

如图 1.2 所示，根据几何形状以及各个方向上尺寸的差异，弹性体大致可分为杆、板、壳、体四大类。

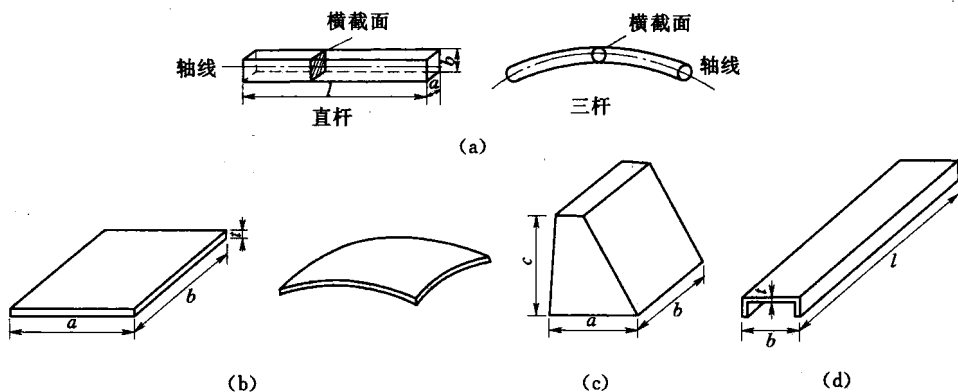


图 1.2

(a) 直杆、曲杆；(b) 板、壳；(c) 块体；(d) 薄壁杆

杆——一个方向的尺寸远大于其他两个方向的尺寸，这种弹性体称为杆。杆的各横截面形心的连线称为杆的轴线；轴线为直线的杆称为直杆；轴线为曲线的杆称为曲杆。按各截面相等与否，杆又分为等截面杆和变截面杆。材料力学研究的主要是杆件，尤其是工程上最常见的等截面直杆，简称等直杆。

板——一个方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸，且各处曲率均为零，这种弹性体称为板。

壳——一个方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸，且至少有一个方向的曲率不为零，这种结构称为壳。

注意：板与壳的区别就在于“平、曲”二字，平的为板，曲的为壳。

体——三个方向具有相同量级的尺寸，这种弹性体称为体。

1.4.2 杆件变形的四种基本形式

1. 轴向拉（压）

如图 1.3 所示，当杆件两端承受沿轴线方向外荷载作用时，杆件将产生轴向伸长或压

缩变形，简称轴向拉（压）变形。

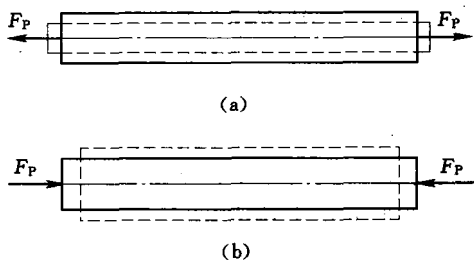


图 1.3

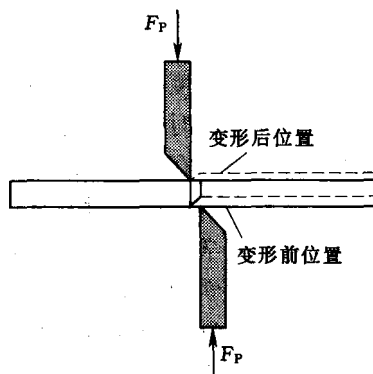


图 1.4

2. 剪切

如图 1.4 所示，在平行于杆横截面的两个相距很近的平面内，方向相对地作用着两个横向力，杆件的左右两侧将沿着外力的作用方向产生相对错动，称为剪切变形。

3. 扭转

如图 1.5 所示，当作用在杆件上的力组成作用在垂直于杆轴平面内的扭转力偶 M_e 时，杆件的横截面将绕其轴线相互转动，称为扭转变形。

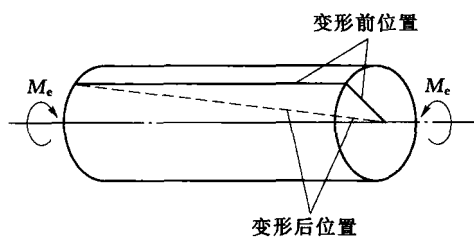


图 1.5

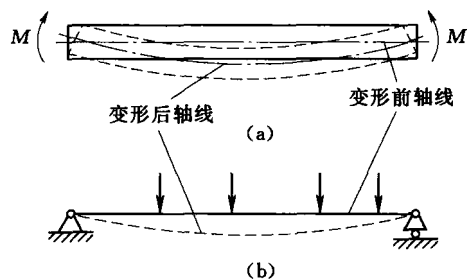


图 1.6

4. 弯曲

如图 1.6 所示，当外加力偶 M 或外力作用于杆件的纵向平面内时，杆件将发生弯曲变形，其轴线将变成曲线，称为弯曲变形。

实际工程结构中的受力构件，大都受到上述两种或两种以上的外荷载，因而产生的是上述两种或两种以上基本变形的组合，称为组合变形。例如图 1.6 中所示杆，产生的是轴向拉伸与平面弯曲的组合变形。

实际杆件的受力不管多么复杂，在一定条件下，都可以简化为上述四种基本变形的组合。

通常土木、水利和桥梁工程上将承受拉伸的杆件统称为拉杆；受压杆件称为压杆或柱；将承受弯曲的杆件统称为梁。机械上，将承受扭转或主要承受扭转的杆件为轴。

思 考 题

- 思 1.1 构件的强度、刚度、稳定性在工程中的实际意义是什么？
- 思 1.2 设计构件时首先应考虑什么问题？设计中存在哪些矛盾？
- 思 1.3 材料力学在专业中的地位如何？
- 思 1.4 材料力学的研究对象是什么？
- 思 1.5 材料力学主要研究什么问题？
- 思 1.6 材料力学的基本假设是什么？这些假设如何简化了力学模型？
- 思 1.7 杆件有哪几种基本变形？其受力与变形的特点是什么？

第2章 杆件的内力与内力图

本章研究轴向拉压杆件、扭转杆件、弯曲杆件的内力计算及内力图的绘制。杆件的内力计算是应力与强度计算、变形与刚度计算的基础，因此，本章是材料力学的核心内容之一。

2.1 基本概念

2.1.1 内力的概念

我们知道，物体是由无数微粒组成的，在其未受到外力作用时，各微粒间就存在着相互作用的内力（称为固有内力），以维持它们之间的联系及物体的形状。当物体受到外力作用时，各微粒间的相对位置将发生改变，引起物体变形。与此同时，颗粒间的固有内力也将发生变化，这种因外力作用而引起的固有内力的改变量，称为附加内力，简称内力。这种内力随外力的增加而增大。当内力增大到一定限度时就会引起构件破坏，因而它与构件的强度密切相关。因此，研究构件的内力就成为材料力学的重要内容之一。

如前所述，在分析两物体之间的相互作用力时，须将此两物体分开。同理，为研究构件在外力作用下，各部分之间的内力，也应将各部分分离。如要研究图 2.1 (a) 所示 $m-m$ 截面上的内力，首先假想选取截面，将构件沿该截面切开为 I、II 两个部分，如图 2.1 (b) 所示，将内力暴露出来。

按照连续性假设，在该截面上的内力是连续分布力，并且两部分物体在 $m-m$ 截面上的力是作用力与反作用力的关系。通常，把这个分布力系向截面上形心（即截面形状的几何中心）简化，得到主矢和主矩。主矢和主矩与作用在分离部分 I 的所有外力形成平衡力系，可由平衡方程求出。今后所称内力，即指截面上分布内力的主矢和主矩。在后面的章节中，会分别详细介绍这些内力的具体类型。一般它们包括轴力、扭矩、剪力和弯矩等。

2.1.2 截面法

上述用截面假想地把构件分成两个部分，以便显示并计算内力的方法称为截面法。可将其归纳为以下三个步骤：

1. 截开

欲求某一截面上的内力时，就沿该截面假想地把构件分成两个部分，任意保留其中一

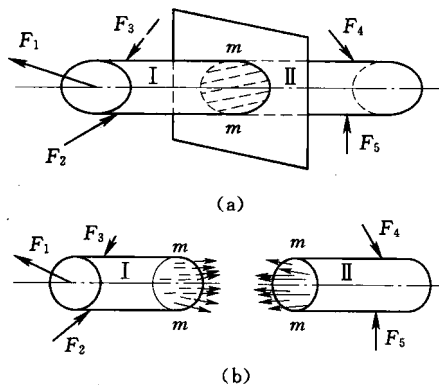


图 2.1 截面法示意图

部分为研究对象，而移去另一部分。

2. 代替

用作用于截面上的内力来代替移去部分对保留部分的作用。

3. 平衡

作用在保留部分上的外力和内力保持平衡，建立平衡方程，确定未知内力的大小和方向。

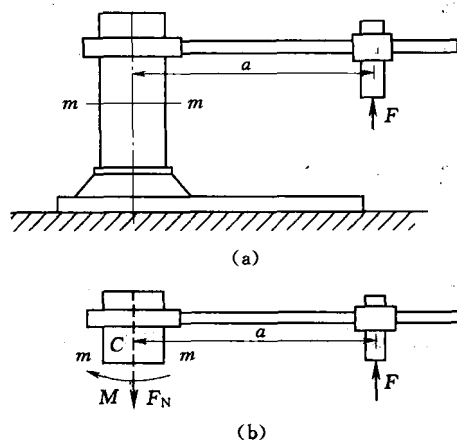


图 2.2

【例 2.1】 钻床如图 2.2 (a) 所示，在载荷 F 作用下，试确定 $m-m$ 截面上的内力。

解：(1) 截开：沿 $m-m$ 截面假想地将钻床分成两个部分，保留 $m-m$ 截面以上部分为研究对象如图 2.2 (b) 所示。

(2) 代替：在研究对象的 $m-m$ 截面上作用着分布内力系，将此内力系向 $m-m$ 截面形心 C 简化，根据研究对象的平衡条件知，我们可以得到一个主矢和主矩，它们的方向和转向如图 2.2 (b) 所示，这里的 F_N 和 M 就是弃去的下半部分对保留的上半部分的作用力（即内力）。

(3) 平衡：由于整个钻床是平衡的，所以我们选取的上半部分也应该保持平衡。也就是说，作用在研究对象上的外力 F 和内力 F_N 应该相互平衡，据此写出研究对象的平衡方程。于是，可求得截面 $m-m$ 上的内力 F_N 和 M 为

$$F_N = F$$

$$M = Fa$$

2.2 轴向拉压杆的轴力

2.2.1 工程实例

轴向拉伸或轴向压缩变形是杆件最基本的变形之一。在工程实际中，受拉伸或压缩的杆件也是常见的。现考察以下几个工程实例：

图 2.3 (a) 为一悬臂吊车。当吊起重量为 F 的物体时。受拉构件有钢丝绳和杆 BC ，如果要研究钢丝绳的受力，则可截取钢丝绳 DE 为分离体，其两端受有与轴线重合的抗力 F 。受力如图 2.3 (b) 所示；如果要研究拉杆 BC 的受力，则应将杆 BC 取出，受力分析如图 2.3 (c)，杆受拉伸。

图 2.4 (a) 为固紧螺栓工作原理示意图。在固紧力的作用下，螺杆产生拉伸变形。研究螺杆时，取螺杆为研究对象，因螺母所受力是沿轴对称分布的，如图 2.4 (b) 可以简化为沿螺杆轴线的合力 F ，因此，螺杆的受力如图 2.4 (c) 所示。与这个例子类似，螺旋千斤顶的螺杆是受压杆件，如图 2.5 (a)，其受力简图如图 2.5 (b)、(c) 所示。

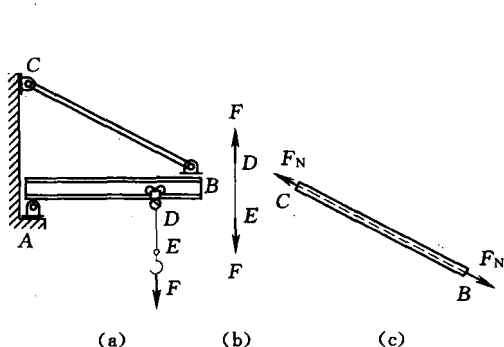


图 2.3

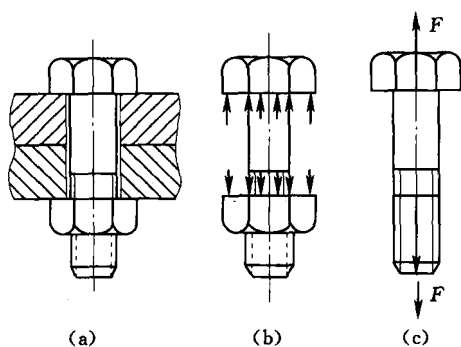


图 2.4

2.2.2 轴力

可以看出, 上述轴向拉伸(压缩)的杆件(简称为拉压杆)虽然端部的连接情况或传力方式各不相同, 但它们受力的共同特点是: 杆上的外力作用线与杆的轴线重合。在这种外力作用下, 杆件的变形特点是: 杆件只沿轴线伸长或缩短 [图 2.6 (a)、(b)]。

图 2.7 (a) 所示一受轴向外力拉伸的杆件。欲求杆某一横截面 $m-m$ 上的内力, 用截面法将杆件沿该截面切开, 取左段为研究对象。根据平衡条件, 截面 $m-m$ 上的分布力系应与 F 平衡, 设分布力的合力为 F_N [图 2.7 (b)], 它与 F 构成二力平衡关系, 必与杆的轴线重合, 故称该合力为轴力。

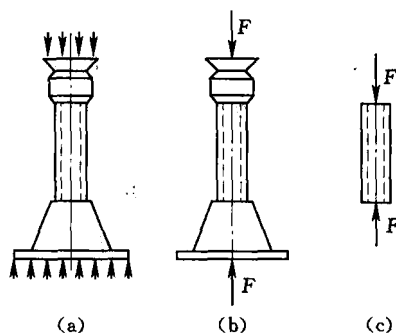


图 2.5



图 2.6

根据平衡方程:

$$\sum F_x = 0$$

$$F_N - F = 0$$

$$F_N = F$$

上式表达了杆件某截面上的轴力 F_N 与杆件所受外力的关系。

如果以右段为研究对象 [图 2.7 (c)], 按上述过程进行类似的处理, 也可求得 $m-m$ 截面上的轴力为

$$\sum F_x = 0$$

$$F_N' - F = 0$$

$$F_N' = F$$

即轴力 F_N' 的大小也等于 F , 方向与 F_N 相反, 作用线沿杆轴线。由此可见, 用截面法求