



全国高等农林院校“十三五”规划教材

材料力学

CAILIAO LIXUE

邱秀梅 戴景军◎主编



 中国农业出版社

全国高等农林院校“十三五”规划教材

材 料 力 学

邱秀梅 戴景军 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料力学 / 邱秀梅, 戴景军主编. —北京: 中国农业出版社, 2016. 12

全国高等农林院校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-109-22380-6

I. ①材… II. ①邱… ②戴… 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 (2016) 第 278106 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

策划编辑 薛 波

文字编辑 李兴旺

农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
6 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18.25

字数: 405 千字

定价: 37.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

ABSTRACT

内容提要

本书是全国高等农林院校“十三五”规划教材，是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会制定的“材料力学课程教学基本要求”和有关国家标准及教学改革发展的需要编写而成的，是山东省精品课程材料力学的配套教材。

本书分为绪论、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、压杆稳定共七章内容，章后附有小结、思考题、习题及习题参考答案。

本书可供大学本科院校水电、土木、桥梁等专业教学选用，也可作为相关专业的电大、夜大和函授的自学教材，并可供其他专业学生和技术人员参考。

主 编 邱秀梅 (山东农业大学)

戴景军 (山东农业大学)

副主编 姜德贵 (山东农业大学)

王素华 (山东农业大学)

周海龙 (内蒙古农业大学)

参 编 陈亮亮 (新疆农业大学)

张玉清 (沈阳农业大学)

主 审 王新忠 (黑龙江八一农垦大学)

本教材由中国农业出版社组织,以山东农业大学为主,内蒙古农业大学、新疆农业大学、沈阳农业大学参与编写,是全国高等农林院校“十三五”规划教材,根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会制定的“材料力学课程教学基本要求”和有关国家标准及教学改革发展的需要编写而成。

本教材是山东省精品课程材料力学的配套教材,充分体现了精品课程建设过程中的教研成果。该教材以培养和造就“厚基础、强能力、高素质、广适应”的创造型复合人才为宗旨,编写大纲经过了编委的认真讨论和反复修改,集中了编委多年的教学经验和智慧。在阐述材料力学基本概念、基本原理和基本方法上,力求实现体系上和内容上的更新,做到了内容精炼,由浅入深,并引入工程领域的实例及与工程有关的算例与例题,为读者的后续学习和掌握新方法、新技术提供了必要的材料力学基础,也为读者的独立思考留有空间,以利于创新能力的培养。

本教材与同类教材相比具有以下特色:重组课程体系,打破了以变形为主线的材料力学课程教材编排方式,全书内容以内力—应力—变形为主线,精炼成经典的七章内容,突出强化了材料力学的基本概念;对经典内容加以精选,使之更加简练,满足了目前教学课时少的要求;每章之前予以概述,每章之后附有小结、思考题和习题,便于学生学习,并为学生独立思考留出较大空间;注意与相关课程的贯通、融合与渗透,减少了不必要的相互重叠内容;广泛涉及工程概念,缩短了理论和工程实践的距离;本书中的所有量均按照国家标准(GB 3100~3102—93)进行标注,提高了教材的规范性和适用性。

本教材由邱秀梅、戴景军任主编,姜德贵、王素华、周海龙任副主编。编写分工为:姜德贵编写第一章、附录I;姜德贵和陈亮亮编写第二章;王素华和张玉清编写第三章;王素华编写第四章;邱秀梅、

戴景军编写第五和第六章、附录Ⅱ；周海龙编写第七章。全书由邱秀梅统稿。

本教材承蒙黑龙江八一农垦大学王新忠教授主审，王教授对本教材提出了很多宝贵意见，作者谨致深切的感谢。

由于编者水平所限，教材中不妥之处，敬请读者指正。

编 者

2016年7月

前言

第一章 绪论	1
§ 1-1 材料力学的任务及研究对象	1
§ 1-2 变形固体及其基本假设	3
§ 1-3 杆件变形的基本形式	4
§ 1-4 材料力学与工程实践	5
小结	7
思考题	7
第二章 杆件的内力与内力图	8
§ 2-1 基本概念	8
§ 2-2 轴向拉压杆件的内力	10
§ 2-3 受扭杆件的内力	12
§ 2-4 弯曲杆件的内力	15
小结	31
思考题	32
习题	33
习题参考答案	36
第三章 杆件的应力与强度	38
§ 3-1 应力应变及其相互关系	38
§ 3-2 材料的力学性质	40
§ 3-3 轴向拉压杆件的应力与强度	50
§ 3-4 圆轴扭转的应力与强度	58
§ 3-5 梁的应力与强度	71
§ 3-6 连接件的应力与强度	93
小结	100
思考题	102

习题	106
习题参考答案	117
第四章 杆件的变形与刚度	120
§ 4-1 轴向拉压杆件的变形与刚度	120
§ 4-2 圆轴扭转的变形与刚度	124
§ 4-3 梁的弯曲变形与刚度	127
§ 4-4 简单超静定问题	141
小结	148
思考题	149
习题	150
习题参考答案	157
第五章 应力状态与强度理论	159
§ 5-1 应力状态概述	159
§ 5-2 平面应力状态分析	162
§ 5-3 空间应力状态简介	176
§ 5-4 广义胡克定律	179
§ 5-5 强度理论及其应用	183
小结	194
思考题	195
习题	196
习题参考答案	199
第六章 组合变形分析	200
§ 6-1 组合变形的概念及分析方法	200
§ 6-2 斜弯曲	201
§ 6-3 拉伸(压缩)与弯曲	206
§ 6-4 扭转与弯曲	215
§ 6-5 组合变形一般情况的应力分析	220
小结	221
思考题	222
习题	223
习题参考答案	227
第七章 压杆稳定	228
§ 7-1 压杆稳定的基本概念	228

§ 7-2 细长压杆临界荷载的欧拉公式	229
§ 7-3 压杆的临界应力及临界应力总图	235
§ 7-4 压杆的稳定设计	238
§ 7-5 提高压杆稳定性的措施	242
小结	244
思考题	245
习题	245
习题参考答案	247
附录 I 截面的几何性质	249
§ I-1 静矩和形心及其相互关系	249
§ I-2 惯性矩 极惯性矩 惯性积 惯性半径	252
§ I-3 惯性矩和惯性积的平行移轴定理	256
§ I-4 惯性矩和惯性积的转轴定理	258
§ I-5 主轴与形心主轴及主惯性矩与形心主惯性矩	259
§ I-6 组合图形形心及形心主轴和形心主矩的计算	260
小结	262
思考题	262
习题	264
习题参考答案	266
附录 II 型钢规格表	268
参考文献	281

第一章 绪 论

理论力学的研究对象主要是质点和质点系以及刚体和刚体系，其研究方法主要是理论研究。材料力学的研究对象主要是变形体，其研究方法是在理论研究基础上通过一些合理假定，选取材料力学的力学模型，通过实验测定常用材料的力学性质，联系理论、假定、实验建立起材料力学的知识体系，进而简化计算，这就是材料力学分析方法的特点。

§ 1-1 材料力学的任务及研究对象

§ 1-1-1 材料力学的任务

机械和工程结构中的单个组成部分，统称为构件。图 1-1 所示的厂房柱、吊车梁、屋架中的各杆等均为构件。

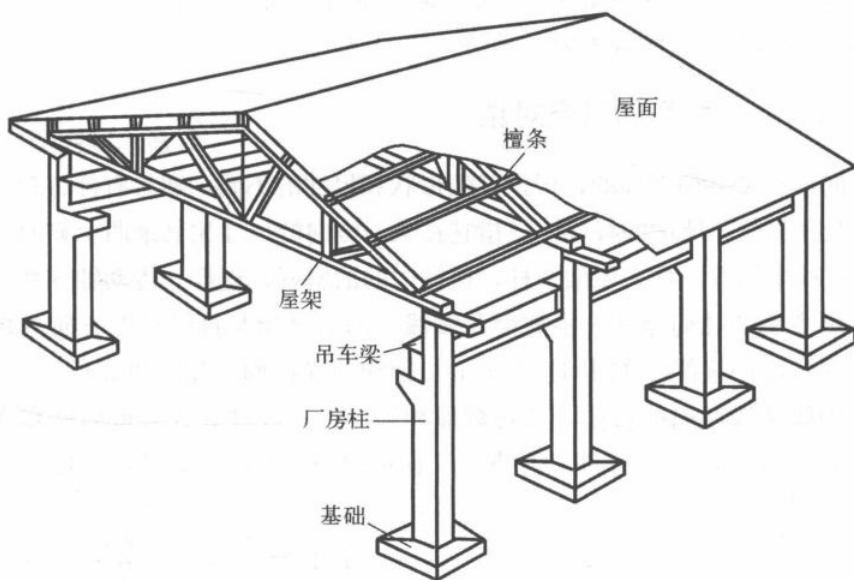


图 1-1

当结构或机械承受荷载或传递运动时，为保证整个结构或机械的正常工作，每一构件均应保证其能正常工作，即要求任一构件都要有足够的承受载荷作用的能力，简称为承载能力。构件的承载能力通常由以下三个方面来衡量：

(1) 强度 它表示构件抵抗破坏的能力。构件在外力作用下必须具有足够的强度才不致发生破坏，即不发生强度失效。

(2) 刚度 它表示构件抵抗变形的能力。在某些情况下，构件虽有足够的强度，但若刚

度不够,即受力后产生的变形过大,也会影响正常工作。因此设计时,必须使构件具有足够的刚度,使其变形限制在工程允许的范围,即不发生刚度失效。

(3) 稳定性 它表示构件在外力作用下保持原有平衡形式不变的能力。例如受压力作用的细长直杆,当压力较小时,其直线形状的平衡是稳定的;但当压力过大时,直杆不能保持直线形状下的平衡,称为失稳。这类构件须具有足够的稳定性,即不发生稳定失效。

一般说来,强度要求是基本的,只是在某些情况下,才对构件提出刚度要求。至于稳定性问题,只有在一定受力情况下的某些构件才会出现。

构件的承载能力不能不足而影响构件的正常工作,也不必过大而造成浪费。因此,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。材料力学的任务就在于力求合理地解决这一矛盾。具体地说,材料力学的任务是为构件的强度、刚度、稳定性要求提供必要的理论基础和计算方法,使设计的构件在形状、尺寸和选用的材料诸方面既满足承载能力的要求,又经济适用。

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在材料力学中具有同等重要的地位。

§ 1-1-2 材料力学的研究对象

工程构件的形状是多种多样的,根据几何形状和尺寸的不同,通常有杆、板、壳、块体之分。但杆件是最常见的。所谓的杆件,是指它在某一方向的尺寸比其余两个方向的尺寸大得多的构件。房屋结构中的梁、柱、屋架弦杆,机械中的活塞杆、连杆、传动轴等都可看作杆件。

杆件有两个主要的几何特征:横截面和轴线。前者是指与杆件长度方向垂直的截面。后者是所有横截面形心的连线,如图 1-2 所示。轴线与横截面是相互垂直的。

根据杆件轴线和横截面的特征,按各截面相等与否,杆件分为等截面杆和变截面杆,分别如图 1-3 (a)、(b) 所示;杆件又有直杆、曲杆之分。轴线为直线的杆称为直杆;轴线为

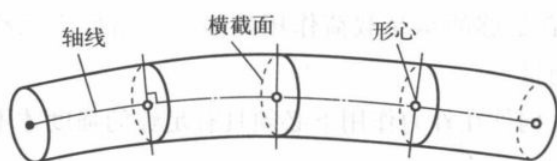


图 1-2

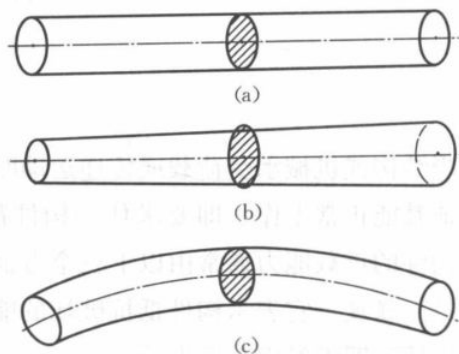


图 1-3

曲线的杆称为曲杆,如图1-3(c)所示。材料力学研究对象主要是杆件,尤其是工程上最常见的等截面直杆,简称等直杆。

§ 1-2 变形固体及其基本假设

1. 变形固体

从几何尺度上,科学研究可分为宇观、宏观和微观,材料力学研究的是宏观问题。在理论力学中,研究物体在外力作用下的平衡和运动规律时,物体的微小变形是个次要因素,因而把物体抽象为刚体。但在材料力学中,研究构件强度、刚度及稳定性问题,物体的变形是主要因素。而刚度本身就需要考虑变形,因此,材料力学必须将物体看成可变形的固体,简称为**变形固体**。

2. 变形固体的类型

变形固体在外力作用下会产生变形。当变形固体所受外力不超过某一范围时,若除去外力,则变形可以完全消失,并恢复原有的形状和尺寸,这种性质称为**弹性**。若外力超过某一范围,而除去外力后,变形不会全部消失,其中能消失的变形称为弹性变形,不能消失的变形称为塑性变形,或残余变形、永久变形。对大多数的工程材料,当外力在一定的范围内时,所产生的变形完全是弹性的。对多数构件,要求在工作时只产生弹性变形。因此,在材料力学中,主要研究构件产生弹性变形的问题,即弹性范围内的问题。

3. 变形固体的基本假设

材料力学在研究变形固体时,常略去一些无关的次要因素,并根据与问题有关的主要因素,对可变形固体做某些假设,将它抽象为理想模型,然后进行理论分析。因此,在材料力学中,对可变形固体做如下基本假设。

(1) **连续性假设** 假设物体内部充满了物质,没有任何空隙。而实际物体内部当然存在着空隙,而且随着外力或其他外部条件的变化,这些空隙的大小会发生变化。但从宏观方面研究,只要这些空隙的大小比物体的尺寸小得多,就可不考虑空隙的存在,而认为物体是连续的。

(2) **均匀性假设** 假设物体内部各处的力学性质是完全相同的。实际上,工程材料的力学性质都有一定程度的非均匀性。例如金属材料由晶粒组成,各晶粒的性质不尽相同,晶粒与晶粒交界处的性质与晶粒本身的性质也不同;又如混凝土材料由水泥、砂和碎石组成,它们的性质也各不相同。但由于这些组成物质的大小和物体尺寸相比很小,而且是随机排列的,因此,从宏观上看,可以将物体的性质看作各组成部分性质的统计平均量,而认为物体的性质是均匀的。

(3) **各向同性假设** 假设材料在各个方向的力学性质均相同。金属材料由晶粒组成,单个晶粒的性质有方向性,但由于晶粒交错排列,从统计观点看,金属材料的力学性质可认为是各个方向相同的。例如铸钢、铸铁、铸铜等均可认为是各向同性材料。同样,像玻璃、塑料、混凝土等非金属材料也可认为是各向同性材料。但是,有些料在不同方向具有不同的力

学性质，如经过辗压的钢材、纤维整齐的木材以及冷拔的钢丝等，这些材料是各向异性材料。在材料力学中主要研究各向同性的材料。

变形固体受外力作用后将产生变形。如果变形的大小较之物体原始尺寸小得多，这种变形称为小变形。材料力学所研究的构件，受力后所产生的变形大多是小变形。在小变形情况下，研究构件的平衡以及内部受力等问题时，均可不计这种小变形，而按构件的原始尺寸计算。

综上所述，在材料力学中，将实际材料看作均匀、连续、各向同性的可变形固体，且在大多数情况下局限在弹性变形范围内和小变形条件下进行研究。用这种模型进行计算所得的结果，在大多数情况下是能符合工程计算的精度要求的。

§ 1-3 杆件变形的的基本形式

杆件的受力形式不同，变形的类型也不同，根据杆件的受力特征和变形特征，杆件变形的的基本形式不外乎四种基本变形和基本变形的组合。

1. 轴向拉伸或压缩

直杆受到与轴线重合的外力作用时所产生的变形称为轴向拉伸或压缩，这时杆件的变形是轴向伸长或缩短。

如图 1-4 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。

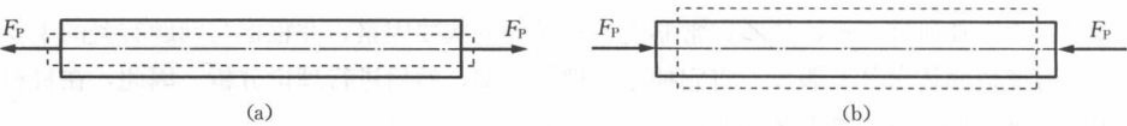


图 1-4

2. 剪切

如图 1-5 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。

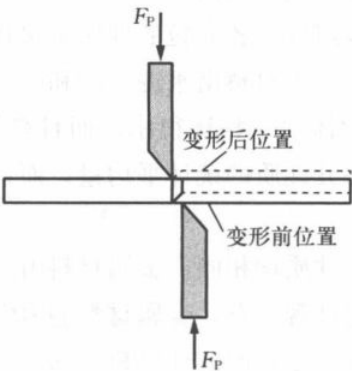


图 1-5

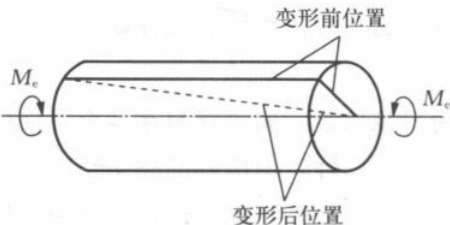


图 1-6

3. 扭转

如图 1-6 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**。

4. 弯曲

如图 1-7 (a)、(b) 所示, 当外加力偶 M_e 或横向力作用于杆件的纵向平面内时, 杆件将发生弯曲变形, 其轴线将由直线变成曲线, 称为**弯曲变形**。

5. 组合变形

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**。

图 1-1 中的厂房柱即为压缩和弯曲两种变形的组合。

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称为轴。

本书先研究杆的基本变形问题, 然后再研究杆的组合变形问题。

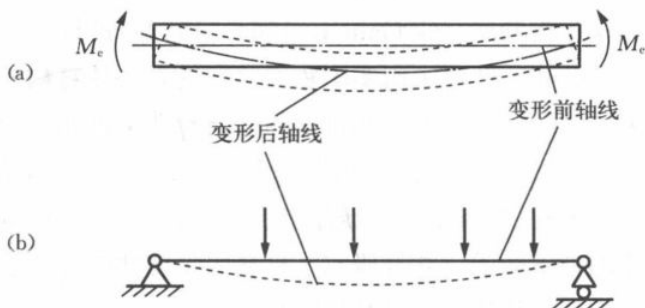


图 1-7

§ 1-4 材料力学与工程实践

与其他学科一样, 材料力学是由生产实践的推动逐步发展和丰富起来的, 是人们认识自然和改造自然的必然产物。同时, 它又反过来对生产实践起着重要的指导作用。

在古代, 建筑物多以石料、木材以及冶炼粗糙的铸铁、铸钢等为主要的建筑材料。同时这些建筑物的工作条件也比较简单, 在设计时大多根据经验或采用模仿的方法。但古代建筑已体现出当时劳动人民根据生产实践所积累起来的经验, 对构件的受力特点和材料的力学性能有了初步认识, 并能结合构件的受力特点合理地选用材料。在我国古代就将一些砖石结构作成拱形, 以充分发挥材料的压缩强度, 例如著名的河北赵州单跨石拱桥, 是世界上历史最悠久的石拱桥, 其建造时, 根据材料抗压的特性, 就地取材采用了当地盛产的质地坚硬的青白色石灰石; 在我国盛产竹子的南方用竹锁作成悬索桥, 就是充分利用材料的拉伸强度, 始建于宋朝 (960 年) 以前, 重建于清嘉庆九年 (1804 年) 的四川安澜竹索桥, 现今依然完好无损。此外, 在木结构中, 也积累了不少制造梁、柱的经验, 例如在我国宋朝李诫于 1103 年发表的《营造法式》中, 规定矩形截面木梁, 采用的截面高宽比为 $3:2$, 这事实上是符合材料力学的基本原理的, 且介于强度最高的 $\sqrt{2}:1$ 与刚度最大的 $\sqrt{3}:1$ 之间, 是非常合理的。建于辽清宁二年 (1056 年) 的山西应县木塔, 是世界上现存最高大的木结构建筑, 就是其典型代表。

随着社会的进步和生产力的不断发展,需要建造新的建筑物、车、船和机械等,单凭经验和模仿的方法解决不了新提出的问题。材料力学也就在这种情况下逐渐形成为一门科学。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)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。为了解决建造船只和水闸所需要梁的尺寸问题,意大利科学家伽利略(G. Galileo, 1564—1642)进行了一些实验,于1638年首先提出了梁的强度计算公式,开辟了用实验和按照理论方法计算构件的新途径。一般认为伽利略于1638年发表的名著《关于两门新科学的谈话和数学证明》,是材料力学学科的开端。后来,世界上许多著名科学家,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,提出了有关梁、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。从此以后,材料力学在过去生产实践所积累的丰富经验的基础上,开始有了新的发展。直到18世纪末19世纪初,材料力学作为一门学科,才真正形成了比较完整的体系。

生产的需要促进了材料力学的进一步发展。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。这些应用领域所提出的工程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日益完善的材料力学体系。随着铁路桥梁、船舶、飞机和新型建筑物的使用和发明,提出了减轻构件自重、减少材料消耗量的要求。为此必须提高材料的强度,推动了冶金工业的发展,高强度材料的出现和应用,使既满足强度要求而又减小截面面积成为可能。然而细长杆件的使用,杆件在载荷作用下变形显著增大。因此,保证构件的刚度要求成为在构件设计中必须加以考虑的另一方面。同时,细长杆件在受压时,又出现了丧失其原有平衡形态的稳定性问题,所以对构件进行稳定性计算,也成为受压构件在理论计算中不可忽视的又一方面。由此可见,在载荷作用下对构件进行强度、刚度和稳定性计算,是随着工程实践发展中不断提出新问题而逐渐提出来的。

人类进入21世纪,科学技术有了突飞猛进的发展。材料力学的研究与应用,不仅存在于历史较久的土木工程、建筑工程、水利工程、机械工程、船舶工程等,还广泛应用于后起的航空工程、航天工程、核技术工程、生物医学工程等领域。特别是近年来,航空航天工业和高铁建设的快速发展、深海领域的科研探索、登月计划的实施、计算机的不断更新换代等,各种新型材料(例如复合材料、高分子材料)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。这表明材料力学仍然处于新的发展之中,材料力学面临逐步更新的趋势,并将对现代工业技术的发展发挥更大的作用。

总之,材料力学和工程实践在相互促进中各自不断向前发展。一方面,工程实践提供了大量成功的经验和失败的教训,同时在实验室内进行的大量实验也不断积累着有关材料力学方面的实验资料,这都有助于材料力学的发展;另一方面,材料力学的发展对工程实践也起着重要的指导作用,它为构件的计算提供了科学、简便实用的方法,保证了构件在各种情况

下既能安全工作，又经济实用。

小 结

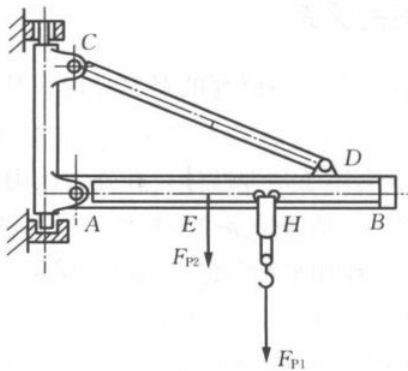
本章在分析实际工程的基础上，提出了材料力学的任务和研究对象，指出了结构安全可靠工作的基础是组成结构的每一个构件都必须满足强度、刚度和稳定性的要求；抽象出了为完成材料力学任务而需要的宏观力学模型；从受力和变形的角度分析了杆件基本变形的特点。

以上知识点要求读者在理解的基础上掌握，为更好地学习后续章节打下坚实的理论基础。

思考题

- 1-1 构件的强度、刚度、稳定性在工程中的实际意义是什么？
- 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？
- 1-3 材料力学的研究对象是什么？
- 1-4 材料力学主要研究什么问题？
- 1-5 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？
- 1-6 杆件有哪几种基本变形？其受力与变形的特点是什么？

1-7 图示悬臂吊车，杆件 CD 为钢杆，两端用销钉连接，杆件 AB 为工字梁， A 端固定铰支座。现起吊重物 F_{P1} ，并考虑工字梁自身重力 F_{P2} 。试问杆件 CD 和 AB 分别产生哪些变形？



思考题 1-7 图