

普通高等教育系列规划教材

工程力学

何 伟 主编



科学出版社

普通高等教育系列规划教材

工 程 力 学

主 编 何 伟

副主编 周 娟 黄 亮

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书按照教育部高等学校工科工程力学课程(中、少学时)教学基本要求和全国各高校工程力学课程实际执行情况编写,编写过程中参考了全国主要高校的工程力学教改成果,力求内容由浅入深、知识点前后呼应,并注重静力学和材料力学的侧重点及其联系,突出理论知识的综合应用和计算技能的培养。各章后均设有思考题和习题,并附有部分思考题和习题答案,方便学生及时复习巩固。

本书可作为环境、交通、材料、地质、工管、冶金及机电类等专业的教材或教学参考书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/何伟主编. —北京:科学出版社,2013. 1

(普通高等教育系列规划教材)

ISBN 978-7-03-036081-6

I. ①工… II. ①何… III. ①工程力学-高等学校-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 278488 号

责任编辑:朱晓颖 张丽花 / 责任校对:张小霞

责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

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>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年1月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:488 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书定位于应用型本科教材,结合我国工程类专业工程力学课程教学实际,以培养目标为指导,遵循科学性、先进性、系统性、普适性和教与学实用性的原则。主要根据教育部高等学校工科工程力学课程(中、少学时)教学基本要求和全国各高校工程力学课程实际教学执行情况,并参考了全国主要高校的工程力学教改成果进行编写。本书具有以下特点:

1. 突出“培养工程应用型人才”的目标,根据以往教学经验,结合工程实际,参考有关教材编写。

2. 参考国家高等教育类相关工程专业本科教育评估标准,在保证基本培养规格的前提下,强化宽口径人才培养方针,拓宽学生知识面。使学生通过基础理论的学习,掌握工程力学的基本原理和分析方法,能把所学的应用性理论用于专业知识的学习,并在工程实践中加以应用。

3. 完善相关课程的衔接,避免重复,突出专业特点,并考虑教材的普适性。

4. 参考了现行新版教材,注重教材的科学性、完整性、系统性与学时关系,重点到位,特色鲜明。

5. 适当增加实际案例,提高学生分析问题、解决问题的能力。案例紧密结合工程实际,突出学以致用;突出力学在我国现代土木工程、水利工程、交通工程、航空航天工程等领域的应用,培养学生的爱国主义情操,引发学生的兴趣,调动学生的积极性。

6. 随着时代的发展,学生要学的学科越来越多,基础课学时越来越少,因此本书本着少而精、易掌握,同时不失系统性、完整性、严谨性和实用性的原则编写。内容力求简明扼要,适合中、少学时教学。

7. 本课程内容属于经典力学范畴,其基础理论适用于许多工科专业。本书作为培养工程类专业本科生的教材,在内容安排、例题及习题的编制上,力求难易适中、数量适度,且有一定的侧重。

本书由何伟任主编,周娟、黄亮任副主编。参加本书编写的有:何伟(第1章、第4章、附录A、附录B)、周娟(第2章、第3章)、何容(第9章、思考题及习题答案)、张多新(第5章、第8章)、石艳柯(第6章)、黄亮(第7章、附录C)。

在本书的编写过程中,编者参考了部分工程力学、理论力学和材料力学等方面的教材及相关题库,在此对这些教材及题库的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,在教材编写中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者
2012年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 力及其作用效果	1
1.2 工程力学的研究内容与研究对象	1
1.3 工程力学的研究任务及其与工程实践的联系	6
思考题	7
第 2 章 静力学基本概念和物体的受力分析	8
2.1 静力学基本概念	8
2.2 静力学基本公理	9
2.3 约束和约束力	11
2.4 物体的受力分析	15
思考题	18
习题	19
第 3 章 平面力系	22
3.1 平面汇交力系	22
3.2 平面力对点之矩	28
3.3 平面力偶系	29
3.4 平面任意力系	32
3.5 摩擦	55
思考题	60
习题	61
第 4 章 材料力学基本概念、轴向拉伸与压缩	66
4.1 材料力学的基本假设	66
4.2 外力、内力、截面法	66
4.3 应力与应变	67
4.4 杆件的基本变形	69
4.5 轴向拉伸与压缩的概念与实例	70
4.6 轴向拉伸与压缩时的内力	71
4.7 轴向拉伸与压缩时的应力	72
4.8 轴向拉伸与压缩时的变形、胡克定律	75
4.9 材料在拉伸与压缩时的力学性能	78
4.10 许用应力、安全系数、强度条件	85
4.11 圣维南原理与应力集中的概念	88
思考题	89
习题	92

第 5 章 圆轴扭转	98
5.1 圆轴扭转的概念	98
5.2 扭矩和扭矩图	99
5.3 圆轴扭转时的应力与强度条件	103
5.4 圆轴扭转时的变形与刚度条件	110
思考题	112
习题	113
第 6 章 平面弯曲	118
6.1 引言	118
6.2 平面弯曲的内力	120
6.3 梁横截面上的应力	128
6.4 梁的强度计算	134
6.5 梁的位移计算	136
6.6 提高梁强度和刚度的措施	142
思考题	143
习题	144
第 7 章 应力状态与强度理论	149
7.1 应力状态的概念	149
7.2 平面应力状态的应力分析	151
7.3 空间应力状态的概念	158
7.4 广义胡克定律	160
7.5 强度理论及其应用	163
思考题	168
习题	168
第 8 章 组合变形与连接部分的强度计算	173
8.1 组合变形的概念	173
8.2 斜弯曲	174
8.3 拉伸(压缩)与弯曲	177
8.4 扭转与弯曲	179
8.5 连接部分的强度计算	182
思考题	188
习题	190
第 9 章 压杆稳定	196
9.1 压杆稳定的概念	196
9.2 细长压杆临界荷载的欧拉公式	198
9.3 欧拉公式的适用范围、临界应力总图	202
9.4 压杆的稳定性计算	206
9.5 提高压杆稳定性的措施	213
思考题	214
习题	215

附录 A 截面的几何性质	217
A.1 静矩和形心	217
A.2 极惯性矩、惯性矩和惯性积	219
A.3 平行移轴公式	220
A.4 惯性矩和惯性积的转轴公式	222
A.5 截面的主惯性轴和主惯性矩	222
思考题	224
习题	225
附录 B 型钢规格表	227
附录 C 简单荷载作用下梁的挠度和转角	240
参考文献	243
思考题及习题答案	244

第 1 章 绪 论

1.1 力及其作用效果

力也称为**荷载**(load),它是指物体间的相互机械作用,这种作用使物体的机械运动状态或物体的形状发生改变,其作用形式大致可以分为两类。

(1) 两个物体之间接触作用。一般作用在物体表面,因此称为**表面力**(surface force)或称**面力**。作用于物体表面上的力,又可分为分布力和集中力。分布力是连续作用于物体表面的力,如作用于大坝体上的水压力、作用在挡土墙上的土压力等;集中力是作用于物体上一点的力,如火车车轮对钢轨的压力等。

(2) 场对物体的作用。此时力连续分布于物体内部各点,因此又称**体积力**(body force)或称**体力**,如物体的自重等。根据其不同特征,荷载有如下两种分类。

1) 荷载根据其作用时间的长短分为恒载和活载

(1) **恒载**(dead load):永久作用在结构上的不变荷载,如自重,固定于结构上的设备的重量等。

(2) **活载**(live load):暂时作用在结构上的可变荷载,如楼面上的人群、风载和雪载等。有些活载在结构上的作用位置是移动的,这类荷载又称移动荷载,如列车荷载和吊车荷载等。

2) 荷载根据其作用的性质分为静力荷载和动力荷载

(1) **静力荷载**(static load):静力荷载的大小、方向和作用位置不随时间变化或变化极为缓慢,不会使结构产生显著的振动,因而可略去惯性力的影响。结构的恒载都是静力荷载。只考虑位置改变,不考虑动力效应的移动荷载,也是静力荷载。静力荷载可简称**静载**。

(2) **动力荷载**(dynamic load):动力荷载是随时间迅速变化的荷载,使结构产生显著的振动,因而惯性力的影响不能忽略。如机械运转时产生的荷载,地震时由于地面运动对结构的动力作用以及爆炸引起的冲击波等。动力荷载可简称**动载**。

在工程力学中进行杆件结构的受力分析时,常把杆件简化为轴线,表面力和体积力都可以简化为作用在杆件轴线上的力。

力对受力物体作用会产生两种效应:其一使受力物体的运动状态发生改变,如使物体产生加速度,引起受力物体旋转以及改变物体运动方向等,称为力的**外效应**;其二使受力物体产生应力和变形,称为力的**内效应**。

力作用于物体所产生的效应,取决于力的作用点、大小和方向。这三者称为力的**三要素**。

1.2 工程力学的研究内容与研究对象

工程力学是一门研究物体机械运动和构件承载能力的科学。例如,工程中常见的起重机,设计时,要对各构件在静力平衡状态下进行受力分析,确定构件的受力情况,研究作用力必须满足的条件。当起重机工作时,各构件处于运动状态,要对构件进行运动和动力分析,这些问题均属于研究物体机械运动所涉及的内容。为保证起重机安全正常工作,要求各构件不发生

断裂或产生过大变形,则必须根据构件的受力情况,选择适当的材料、设计合理的截面形状和尺寸,这些问题则是属于研究构件承载能力方面的内容。

工程力学研究对象根据变形性质可分为**刚体**和**变形体**。**刚体**是指在力的作用下,不会产生变形的物体,此时其内部任意两点之间的距离始终保持不变。显然刚体是理想化的模型,在实际问题中并不存在真正的刚体。当物体的变形相对于原始尺寸微小而可以忽略时,可视微变形的物体为刚体。此时忽略它的变形不影响所研究的问题。**变形体**是指在外力作用下发生变形的物体,由固体材料制成的变形体,常称为**变形固体**。

工程力学根据其研究内容和重点的不同,可分为静力学、材料力学和运动力学三部分。其中,静力学主要研究力系的简化及物体在力系作用下的平衡规律;材料力学主要研究构件在外力作用下的强度、刚度和稳定性等问题的基本理论和计算方法;运动力学是从几何角度来研究物体运动的规律,以及物体的运动与其所受力之间的关系。限于篇幅,本书主要介绍静力学和材料力学两部分内容,运动力学部分内容读者朋友可参考相关教材文献。

1.2.1 静力学的研究内容和研究对象

静力学研究刚体在力系作用下的平衡规律,同时也研究力的一般性质及其合成法则。静力学思想起源于远古时期,人类在生产劳动和对自然现象观察的过程中逐步积累了力学知识,逐渐形成了一些概念,然后对一些现象的规律进行了描述。这种描述起先是定性描述,而后发展为定量描述。阿基米德(Archimedes,约公元前287—前212)是几何静力学(简称为静力学)的奠基人。阿基米德在研究杠杆平衡、平面图形的重心位置时,先提出了一些公设,然后用数学论证的方法导出了一些定理。阿基米德和力学有关的著作有《平面图形的平衡或其重心》、《力学(机械学)方法论》。伐里农(Pierre Varignon,1654—1722)发展了古希腊静力学的几何学观点,提出了力矩的概念和计算方法,并用以研究刚体的平衡问题。潘索(PansuoLouis Poinsot,1777—1859)首次提出了力偶的概念,提出了任意力系的简化和平衡理论,约束的定义以及解除约束原理。他的《静力学原理》一书建立了静力学的体系。

静力学的研究对象是刚体,是人们将各种各样的实际物体抽象化为便于计算的理想模型。如前所述,力是物体间的相互机械作用,作用在同一物体上的一群力,称为**力系**。力系按作用线分布情况的不同可分为下列几种:当所有力的作用线在同一平面内时,称为**平面力系**;否则称为**空间力系**。当所有力的作用线汇交于同一点时,称为**汇交力系**;而所有力的作用线都相互平行时,称为**平行力系**;否则称为一般力系。下面给出静力学中几个重要的概念。

平衡:平衡是指物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或匀速直线运动状态。如桥梁、机床的床身、做匀速直线飞行的飞机等,都处于平衡状态。平衡是物体机械运动的一种特殊形式。

平衡力系:如果一个力系作用在某物体上而使物体保持平衡状态时,则称该力系为**平衡力系**。一个力系必须满足某些条件才能使物体保持平衡状态,这些条件称为**平衡条件**。

平衡力系中的任一力对于其余的力来说都称为**平衡力**,即与其余的力相平衡的力。

等效力系:若两个力系对同一物体的作用效果相同时,则这两力系互为**等效力系**。若力系与一力等效,则此力就称为该力系的**合力**,而力系中的各力,则称为此合力的**分力**。

力系简化:为了便于寻求各种力系对于物体作用的总效应和力系的平衡条件,需要将力系进行简化,使其变换为另一个与其作用效果相同的简单力系。这种等效简化力系的方法称为**力系的简化**。

研究力系等效并不限于分析静力学问题。例如：飞行中的飞机，受到升力、牵引力、重力、空气阻力等作用，这群力错综复杂地分布在飞机的各部分，每个力都影响飞机的运动。要想确定飞机的运动规律，必须了解这群力总的作用效果，为此，可以用一个简单的等效力系来代替这群复杂的力，然后再进行运动的分析。所以研究力系的简化不仅是为了导出力系的平衡条件，同时也是为动力学的研究提供基础。所以，在静力学中，我们将研究以下三个问题：

(1) 物体的受力分析。分析某个物体共受几个力，以及每个力的作用位置和方向。

(2) 力系的简化(等效替换)。研究如何把一个复杂的力系简化为一个简单的力系。

(3) 建立各种力系的平衡条件。研究物体平衡时，作用在物体上的各种力系所需满足的条件。

静力学的主要工作就是分析、研究作用在物体上各种力系所需满足的平衡条件。平衡条件在工程中具有十分重要的意义，它是设计结构、构件或机械零件时静力计算的基础。因此可以看出，静力学在工程中应用广泛。

1.2.2 材料力学的研究内容和研究对象

在古代建筑中，尽管还没有严格的科学理论，但人们从长期生产实践中，对构件的承力情况已有一些定性或较粗浅的定量认识。例如，从圆木中截取矩形截面的木梁，当高宽比为 3 : 2 时最为经济，这大体上符合材料力学的基本原理。

随着工业的发展，在车辆、船舶、机械和大型建筑工程的建造中所碰到的问题日益复杂，单凭经验已无法解决，这样，在对构件强度和刚度长期定量研究的基础上，逐渐形成了材料力学。意大利科学家伽利略为解决建造船舶和水闸所需的梁的尺寸问题，进行了一系列实验，并于 1638 年首次提出梁的强度计算公式。由于当时对材料受力后会发生变形这一规律缺乏认识，他采用了刚体力学的方法进行计算，以致所得结论不完全正确。后来，英国科学家 R. 胡克在 1678 年发表了他根据弹簧实验观察所得的“力与变形成正比”这一重要物理定律(即胡克定律)。从 18 世纪起，材料力学开始沿着科学理论的方向向前发展。

高速车辆、飞机、大型机械以及铁路桥梁等的出现，使减轻构件的自重成为亟待解决的问题。随着冶金工业的发展，新的高强度金属(如钢和铝合金等)逐渐成为主要的工程材料，从而使薄形和细长形构件大量被采用。这类构件的失稳破坏屡有发生，从而引起工程界的注意。这些因素成为构件刚度和稳定性理论发展的推动力。由于超高强度材料和焊接结构的广泛应用，低应力脆断和疲劳事故又成为新的研究课题，促使这方面研究迅速发展。

为便于说明，下面给出材料力学中常用到的几个基本概念。

工程中各种各样的建筑物、机械等都是由若干构件(或零件)按照一定的规律组合而成的，称为**工程结构**，简称**结构**。图 1-1 是一些工程结构的例子，体现了我国在土木、交通、航天航空等领域的成就。结构和构件都是肉眼能分辨的，并且相对于地球静止或以速度远小于光速运动的宏观物体，它们都是工程力学的研究对象。

结构一般由多个构件连接而成。根据工程中构件几何形状的不同可将构件分为：杆件、板和壳、块体。

1) 杆件

杆件的几何特征是长度远大于横向尺寸，横截面的形状可以是矩形、圆形、工字形等。其几何要素是横截面和轴线，其中横截面是与轴线垂直的截面；轴线是横截面形心的连线。按



(a) 2008北京奥运会主体育场——鸟巢



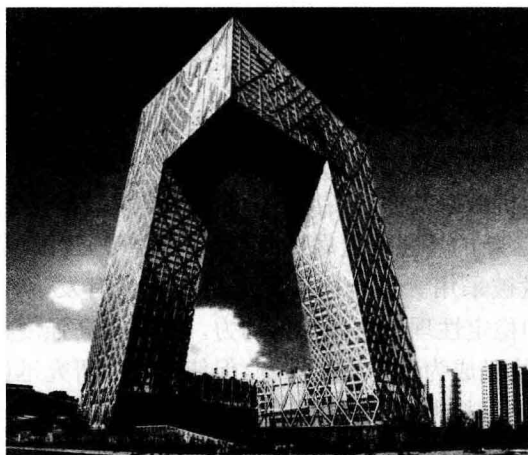
(b) 京港澳高速郑州黄河大桥



(c) 上海世博会中国馆



(d) 神州9号与天宫1号



(e) 中央电视台新楼

图 1-1 工程结构示例^①

横截面和轴线两个因素可将杆件分为:等截面直杆,如图 1-2(a)所示;变截面直杆,如图 1-2(b)所示。当轴线为曲线时即为等截面曲杆(图 1-2(c))和变截面曲杆(图 1-2(d))。

^① 注:图 1-1 中部分图片来源于百度图库,特表感谢。

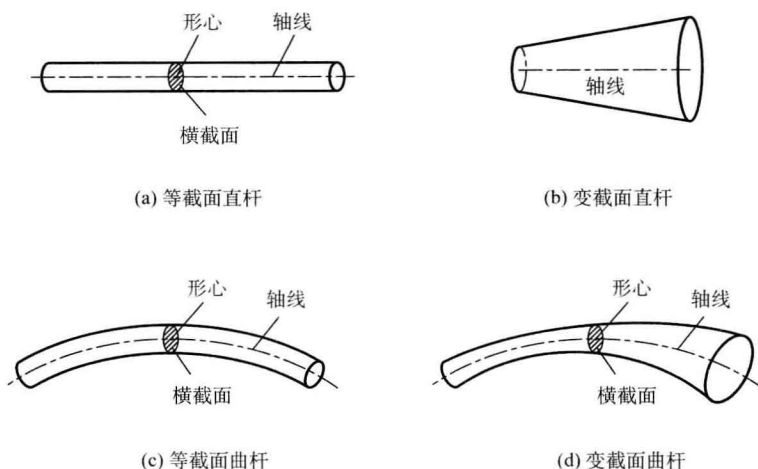
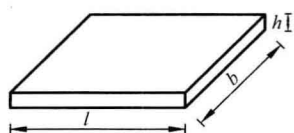


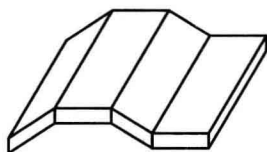
图 1-2 杆件

2) 板和壳

构件一个方向的尺寸(厚度)远小于其他两个方向的尺寸(长度和宽度),当为平板状的称为**板**,如图 1-3(a)和(b)所示。当为曲面时,则称为**壳**,如图 1-4 所示。



(a) 平板



(b) 折板

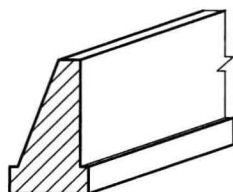
图 1-3 板



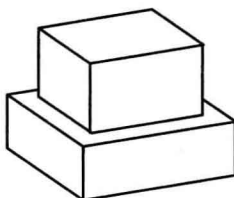
图 1-4 壳

3) 块体

三个方向(长、宽、高)的尺寸大致相当的构件,图 1-5(a)所示挡土墙和图 1-5 (b) 所示独立基础都属于块体。



(a) 挡土墙



(b) 独立基础

图 1-5 块体

材料力学的研究对象为变形固体。变形固体在外力作用上会产生两种不同性质的变形:一种是当外力消除时,变形也随着消失,这种变形称为弹性变形;另一种是外力消除后,变形不能全部消失而留有残余,这种不能消失的残余变形称为塑性变形。一般情况下,物体受力较大

时,就会产生弹性变形和塑性变形。

由于在工程中,大多数变形固体的构件为杆件,因而材料力学的主要研究对象为杆件。本书中,如未作说明,构件即认为是指杆件。

在工程中,要保证结构、构件安全工作,必须满足以下三项基本要求。

(1) **强度要求**:强度是指材料、构件抵抗外力而不失效(屈服或断裂)的能力。强度包括材料强度和结构强度两方面。**强度要求**是指构件在外力作用下,具有足够的抵抗断裂破坏或显著塑性变形的能力。例如储气罐不应爆破,机器中的齿轮轴不应断裂等。

(2) **刚度要求**:构件在外力作用下,应具有足够的抵抗变形的能力。在荷载作用下,构件即使有足够的强度,但若变形过大,仍不能正常工作。例如,机床主轴的变形不应过大,否则影响加工精度;齿轮轴变形过大将造成齿轮和轴承的不均匀磨损,引起噪声。**刚度要求**是指构件在规定的使用条件下不会发生较大的变形。

(3) **稳定性要求**:稳定性是指某些构件在特定外力(如压力)作用下,具有足够的保持其原有平衡状态的能力。例如在安全工作时,千斤顶的螺杆、内燃机的挺杆等都应始终维持原有的平衡状态,保证不被压弯。**稳定性要求**就是指构件在规定的使用条件下不产生丧失稳定性破坏。

构件的强度、刚度和稳定性问题是材料力学的主要研究内容。设计构件时,必须满足强度、刚度、稳定性要求,确保结构能正常工作。但是同时也应该注意经济方面的要求。一般情况下,构件的截面尺寸越大,材料质量越好,承载能力越大。但这样又会浪费材料,增加构件重量和成本。这样就存在安全与经济的矛盾。**材料力学的任务**就是满足了强度、刚度和稳定性要求前提下,为设计既经济又安全的构件,提供必要的理论和科学计算方法。

研究构件的强度、刚度和稳定性时,应了解材料在外力作用下表现出的变形和破坏方面的性能,即材料的力学性质,而材料的力学性质要由实验来测定。此外,经过简化得出的理论是否可信,还有一些尚无理论结果的问题,都需要借助实验方法来解决。所以实验分析和理论研究是材料力学解决问题的基本方法。

1.3 工程力学的研究任务及其与工程实践的联系

物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动,机械运动具有相对性。因此,在研究一个物体运动时,必须选定一个物体作为参照体。在多数工程问题中,都把地球作为参照体。若物体相对于地球静止或匀速直线运动,则称物体处于平衡状态。平衡是机械运动的特殊情况。作用于物体上的各力必须满足一定条件,物体才能处于平衡状态。根据这种平衡条件,可以由物体上的已知力求出未知力,这一过程称为静力分析。对于平衡状态的物体进行受力分析是工程力学的一项任务。

当作用于物体上的力系不满足平衡条件时,物体将改变其原有的静止或匀速直线运动状态。研究物体运动时其位置变化的规律,如轨迹、速度和加速度等,建立物体的运动状态的变化与作用力之间的关系是工程力学的又一项任务。

工程实际问题往往比较复杂,为了使研究的问题简单化,通常抓住问题的本质,忽略次要因素,将所研究的对象抽象化为力学模型。如研究物体平衡时,用抽象化的刚体这一理想模型取代实际物体;研究物体的受力与变形规律时,用变形固体模型取代实际物体;对构件进行计算时,将实际问题抽象化为计算简图等。所以,根据不同的研究目的,将实际物体抽象化为不

同的力学模型是工程力学研究中的一种重要方法。

工程力学有较强的系统性,各部分内容之间联系较紧密,学习中要循序渐进,要认真理解基本概念、基本理论和基本方法。要注意所学概念的来源、含义、力学意义及其应用;要注意有关公式的根据、适用条件;要注意分析问题的思路,解决问题的方法。在学习中,一定要认真研究,独立完成一定数量的思考题和习题,以巩固和加深对所学概念、理论、公式的理解、记忆和应用。

工程力学来源于实践又服务于实践。在研究工程力学时,现场观察和实验是认识力学规律的重要实践环节。可以通过实验来验证理论的正确性,实验所提供的测试数据资料可作为理论分析、简化计算的依据。此外在学习本课程时,应注意观察生活中的力学现象,初步学会运用工程力学相关知识去解释这些现象。

思 考 题

- 1-1 力的作用效果包括哪些方面?
- 1-2 静力学的研究对象与任务是什么?
- 1-3 材料力学的研究对象与任务是什么?
- 1-4 简述平衡、平衡力系、等效力系的概念。

第2章 静力学基本概念和物体的受力分析

2.1 静力学基本概念

2.1.1 力的概念

力的概念是人们在生活和生产实践中,通过长期的观察和分析而形成的。比如:拎东西的时候,由于肌肉紧张而感受到力的作用;用手推物体,物体就由静止开始运动;挑水时扁担受力会变弯,等等。人们从大量的实践中逐步建立起力的概念。力(force)是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化,或者使物体发生变形。力使物体运动状态发生变化的效应,称为力的**运动效应**(motion effect)或外效应。力使物体发生变形的效应,称为力的**变形效应**(deformation effect)或内效应。静力学只研究力的运动效应,而材料力学将研究力的变形效应。

力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点,简称**力的三要素**(three elements of force)。当这三个要素中任何一个改变时,力的作用效应也就发生改变。

力的大小是指物体间相互作用的强弱程度,在国际单位制中,力的单位为 N 或 kN。

力的方向包括方位和指向,如水平向左,铅直向上等。

力的作用点指力在物体上的作用位置。一般来讲,力的作用位置并不是一个点而是一定的面积。当作用面积小到可以不计其大小时,就抽象为一个点,该点就是力的作用点,这种作用于一点的力称为**集中力**(concentrated force)。过力的作用点,沿力的方位的直线称为力的作用线。

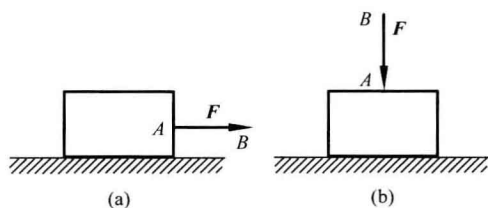


图 2-1

力是一个既有大小又有方向的量,因此,力是矢量。在力学中,矢量可以用具有方向的线段来表示,如图 2-1 所示。线段的起点表示拉力的作用点,线段的终点表示压力的作用点,线段的方位和箭头表示力的方向,线段的长度(按一定的比例尺)表示力的大小。本书中力的矢量用黑斜体字母如 $\boldsymbol{F}$ 表示,力的大小用普通字母 F 表示。

2.1.2 刚体的概念

在静力学中所指的物体都是刚体。所谓**刚体**(rigid body)是指在力的作用下,大小和形状都不发生改变的物体。这是一种理想化的模型,实际上刚体是不存在的。任何物体在力的作用下,或多或少总会产生变形。工程实际中构件的变形通常都非常微小,在研究物体的平衡或运动时,这种微小变形成为次要因素,可以忽略不计,这样处理既可以简化对问题的研究,又不影响问题的实质。所以在静力学中,我们把实际物体都抽象为刚体。静力学以刚体为研究对象,所以也称为刚体静力学。而在另一些情况下,比如研究物体的外力和变形的关系时,变形成为主要因素,不能再把物体看做刚体,而要作为变形体,在后面的材料力学部分将以变形体为研究对象。

2.2 静力学基本公理

静力学公理是人们在长期的生活和生产中积累的经验总结,又经过实践反复检验的力的基本性质,它们是静力学理论的基础。

公理 1 二力平衡公理(equilibrium principle of two forces)

作用在同一个刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力的大小相等,方向相反,并且作用在同一条直线上(简称二力等值、反向、共线)。如图 2-2 所示。

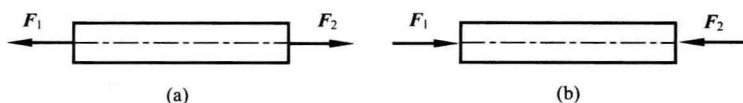


图 2-2

在工程上,通常把只受两个力的作用而处于平衡的构件称为二力构件(two-force member)(或二力杆)。二力杆上的力必须满足二力平衡条件,二力杆的受力特点是:两个力必沿着作用点的连线。比如图 2-3 所示的三铰拱,AB 杆的质量忽略不计时,就可以看成是二力杆。

二力平衡公理表明了作用在刚体上的最简单的力系平衡时,所必须满足的条件。对于刚体来讲,这个条件是必要且充分的。但是,对于变形体来讲,这个条件是不充分的。例如图 2-4 所示绳子受两个等值反向的拉力作用时可以平衡,而当受到两个等值反向的压力作用时,就不能平衡了。

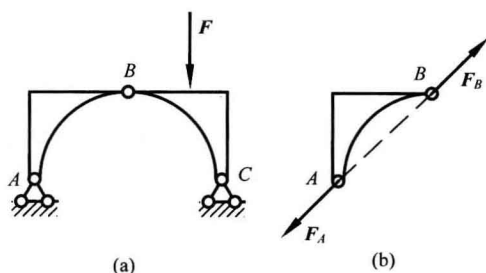


图 2-3

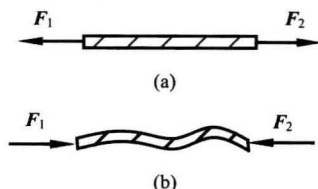


图 2-4

公理 2 加减平衡力系公理(axiom of add or reduce equilibrium force system)

在作用于刚体的任何一个力系上,加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

该公理的正确性是显而易见的。因为平衡力系不会改变刚体的运动状态,这个公理常被用来简化力系。

推论 力的可传性定理(mobility of force theorem)

作用于刚体上的力,可以沿其作用线移至刚体内任一点,而不改变它对刚体的作用效应。

证明:力 F 作用于刚体上的点 A ,如图 2-5(a)所示,在力的作用线上任取一点 B ,根据加减平衡力系原理,加上两个互相平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F_2 = -F_1 = F$,如图 2-5(b)所示,由于力 F 和 F_1 也构成一个平衡力系,所以可以去掉,这样只剩下一个力 F_2 ,如图 2-5(c)所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

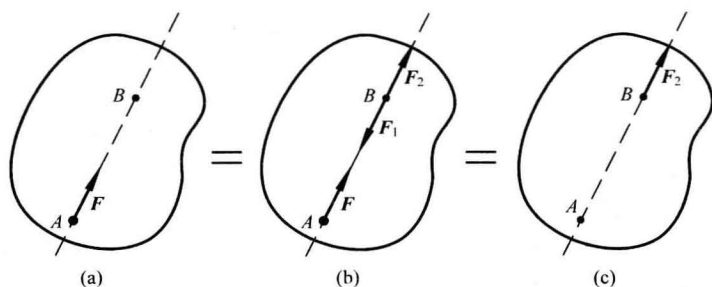


图 2-5

由此可见,对于刚体来讲,力的作用点已不是决定力的作用效应的要素,它已被力的作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素为:力的大小、方向和作用线。作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量(sliding vector)。

应注意,力的可传性定理只适用于刚体,不适用于变形体。如图 2-6(a)所示,变形体 AB 受到等值、反向、共线的拉力作用,杆发生伸长变形。如果把这两个力沿其作用线分别移到杆的另一端,如图 2-6(b)所示,此时杆就发生压缩变形。

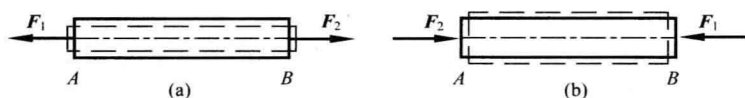


图 2-6

公理 3 力的平行四边形法则(rule of force parallelogram)

作用于物体上同一点的两个力,可以合成一个合力。合力的作用点仍在该点,合力的大小和方向由这两个力为边构成的平行四边形的对角线来确定,如图 2-7 所示。

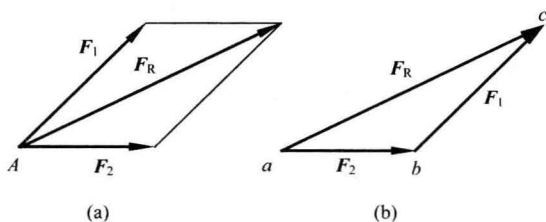


图 2-7

这种合成力的方法称为矢量加法,合力矢等于这两个力矢的几何和。即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (2-1)$$

式(2-1)是矢量等式,它与代数等式 $F_R = F_1 + F_2$ 的意义完全不同,要注意区别。

为了方便,在用矢量加法求合力时,不必画出整个的平行四边形,如图 2-7(b)所示,可以另外找一点 a,作一个与 $\mathbf{F}_2$ 大小相等、方向相同的矢量 $\vec{ab}$,过点 b 作一个与力 $\mathbf{F}_1$ 大小相等、方向相同的矢量 $\vec{bc}$,则 $\vec{ac}$ 表示力 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的合力 $\mathbf{F}_R$ 。这种求合力的方法称为力三角形法则。应注意,力三角形只表明力的大小和方向,它不表示力的作用点或作用线。

推论 三力平衡汇交定理(theorem of equilibrium of three forces)

刚体受到三个力作用而平衡,若其中两个力的作用线交汇于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过交汇点。

证明:如图 2-8 所示, $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 、 $\mathbf{F}_3$ 三个力分别作用于刚体上的 A、B、C 三点,使刚体处于平衡。根据力的可传性定理,将力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 沿各自的作用线移到其交汇点 O,根据力的平行四边形