

自动化

本科自动化
● 机械设计制造及自动化
电气工程及其自动化

高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材



工程力学

主编 张光伟



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

IB12

111

2007

高等学校机械设计制造及自动化专业“十一五”规划教材

工 程 力 学

主 编 张光伟

参 编 冯军刚 李军强 张瑞萍

陈满国 刘振华

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书是根据高等学校工科本科“工程力学”课程的基本教学要求编写而成的。在本书的编写过程中,吸取了国内外同类教材的编排经验,且在内容的选取和阐述方法上做了必要的改革和调整。全书内容精练,思路清楚,语言流畅,着眼于学生综合素质和能力的培养。全书分静力学和材料力学两篇,共 11 章,适用于 40~60 学时的教学安排。

本书可作为高等学校工科各专业“工程力学”课程的教材,也可供高职高专与成人高校的师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/张光伟主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2007.3

高等学校机械设计制造及自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-1802-9

I. 工… II. 张… III. 工程力学—高等学校—教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020393 号

策 划 杨 璠

责任编辑 邵汉平 杨 璠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.375

字 数 386 千字

印 数 1~4000 册

定 价 21.00 元

ISBN 978-7-5606-1802-9/TB·0006

XDUP 2094001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

“工程力学”是现代工程技术的基础，是高等学校各工科专业一门重要的技术基础课。为了更好地适应各专业对中少学时“工程力学”课程的要求及高等教育改革对学生素质和创新能力培养的教学需要，在吸取国内外同类教材编写经验的基础上，编者结合自身多年的教学经验编写了本书。

本书在内容的选取和阐述方法上较传统教材做了一些必要的调整，主要有以下特点：

(1) 从力学素质教育的要求出发，本书更加注重基本概念的阐述而不追求冗长的理论推导与繁琐的数学运算。为了加强学生对工程力学的基本概念的理解，书中引入了大量的工程实例。

(2) 在本书的总体结构上，保留了“静力学”和“材料力学”的工程力学教学体系。多年的教学实践表明，该体系比较符合学生的认识规律，其讲述风格已得到广大教师的认同。

(3) 以强度、刚度和稳定性为本教材的主线，将静力学和材料力学的内容融会贯通，以求易教易学，便于实际应用。

(4) 为了使学生切实掌握工程力学的基本内容，本书精选了一定数量的典型例题，并在每章配置了适当数目的习题，提倡学生在演算习题、得出结论后进行讨论。

(5) 每章的小结中列出了主要的知识点，并阐明理论发展的思路、相关结论的比较或与解题有关的规律与技巧，便于学生明确重点，并将所学知识系统化。

全书共 11 章，适用于中少学时(40~60 学时)的教学需要，少学时可根据需要取舍。

本书编写人员长期担任“工程力学”课程的教学工作，书中融合了编者多年的教学经验与体会，是集体智慧的结晶。参加编写工作的有：张光伟(绪论、第 1 章、第 8 章)、冯军刚(第 2 章)、李军强(第 3 章、第 5 章、第 9 章)、张瑞萍(第 4 章、第 6 章)、陈满国(第 7 章)、刘振华(第 10 章、第 11 章)，全书由张光伟教授统稿。

本书由张光伟主编。本教材承蒙西安交通大学工程力学系黄上恒教授审阅，为本书的编写提出了许多有益的建议，在此深表感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2006 年 10 月

目 录

绪论	1
----------	---

第1篇 静 力 学

第1章 力的性质及物体受力分析	9
1.1 力的性质	9
1.2 力矩	11
1.3 力偶	14
1.4 约束	16
1.5 物体的受力分析及受力图	22
本章小结	24
习题	24
第2章 平面力系的简化和平衡	27
2.1 工程中的平面力系	27
2.2 平面汇交力系的简化与平衡	28
2.3 平面力偶系的简化与平衡	34
2.4 平面任意力系的简化与平衡	39
2.5 简单平面桁架的内力计算	47
2.6 考虑摩擦时物体的平衡问题	51
本章小结	54
习题	55
第3章 空间力系的简化与平衡	62
3.1 空间力系的简化	62
3.2 空间力系的平衡	64
3.3 物体的重心	69
3.4 平行力系中心	74
本章小结	75
习题	76

第2篇 材 料 力 学

第4章 轴向载荷作用下杆件的材料力学问题	81
4.1 轴力和轴力图	81
4.2 杆件横截面上的正应力	84
4.3 轴向载荷作用下材料的力学性能	87
4.4 强度计算	92
4.5 变形分析与计算	97
4.6 拉压简单超静定问题	100
4.7 应力集中的概念	105

本章小结	106
习题	106
第 5 章 剪切和挤压的实用计算	114
5.1 剪切实用计算	115
5.2 挤压实用计算	116
本章小结	118
习题	118
第 6 章 圆轴扭转时的强度与刚度计算	121
6.1 外力偶矩、扭矩与扭矩图	121
6.2 横截面上的切应力分析与强度计算	124
6.3 变形与刚度条件	131
本章小结	134
习题	135
第 7 章 梁的强度	140
7.1 引言	140
7.2 梁的内力及正负号规定	141
7.3 内力方程与内力图	142
7.4 弯矩、剪力及载荷集度之间的关系	146
7.5 与应力分析相关的截面图形的几何性质	151
7.6 梁横截面上的正应力	154
7.7 梁的弯曲正应力强度	155
7.8 提高梁的强度的措施	158
本章小结	160
习题	160
第 8 章 梁的变形分析与刚度问题	167
8.1 引言	167
8.2 梁变形的基本方程	170
8.3 积分法求梁的变形	171
8.4 叠加法求梁的变形	177
8.5 梁的刚度条件与合理刚度设计	184
本章小结	186
习题	187
第 9 章 应力状态、强度理论及其工程应用	191
9.1 应力状态概述	191
9.2 二向应力状态分析——解析法	193
9.3 三向应力状态简介	195
9.4 广义胡克定律	198
9.5 强度理论概述	200
9.6 四种常用强度理论	201
本章小结	204
习题	205
第 10 章 组合变形	210

10.1 概述	210
10.2 拉伸(或压缩)与弯曲组合	211
10.3 扭转与弯曲组合	216
本章小结	221
习题	221
第 11 章 压杆稳定	226
11.1 压杆稳定的概念	226
11.2 细长压杆的临界压力	227
11.3 欧拉公式适用范围与临界应力总图	230
11.4 压杆的稳定计算	234
11.5 提高压杆稳定性的措施	238
本章小结	239
习题	240
附录 I 常见截面的几何性质	245
附录 II 型钢表	247
参考文献	254

绪 论

1. 力学与工程技术

力学作为一门科学应该从牛顿时代算起。它和天文学是最早形成的两门自然科学。到 19 世纪末,力学已发展到很高的水平。当时的力学主要以比较理想的模型,如质点、质点系、刚体、理想弹性体、理想流体等为对象,建立起了相当完善的普遍适用的理论体系,同时也开始了与工程技术问题的结合。

20 世纪力学发展的最大特点是:研究对象已不再局限于理想模型,而更多地以自然界和工程技术中必然遇到的复杂介质或系统为对象,建立各种力学模型,并且在解决问题的过程中形成了更多的力学分支。这既丰富了力学的体系,也使力学成为众多工程和技术科学的重要基础。20 世纪,由于力学的参与而得以形成的工程或技术科学有:航空航天技术的科学、船舶工程的科学、土木工程(包含水利工程)的科学、机械工程的科学、运输工程的科学、能源技术的科学、气象科学、海洋科学以及兵器工程的科学等。它们无疑对人类文明起了极大的推动作用。

20 世纪,由于力学发展才得以实现的工程技术中的标志性成果有:可载 400 多人的喷气式客机,将人类送入太空的航天技术,单台功率达百万千瓦量级的发电机组,单跨近 2000 米的桥梁,有抗震能力的超高层建筑,时速达 300 公里的高速列车,巨型水利枢纽(如长江三峡工程)和大型海上钻井平台等。

在 2000 年下半年,美国的三十几个专业工程协会评出了 20 世纪对人类影响最大的 20 项技术,而力学在其中多项技术的发展中起着重要的甚至是关键的作用。

例如,排在第一位的是电力系统技术,目前几乎所有输入电网的电力都是通过涡轮机带动发电机产生的,而涡轮机、发电机以及输电线路的设计都离不开力学。现在,全世界电网装机容量约为 40 亿 kW,每年发电约 28 万亿 kW·h,总值约 10 000 亿美元。20 世纪后 50 年,由于力学的发展,涡轮机的设计得以改进,其效率提高约 1/3,这相当于每年节省电费约 5000 亿美元,而这里还没有考虑力学对锅炉燃烧过程效率提高的贡献。

排在第二位的是汽车制造技术,它同样离不开力学的支持。和涡轮机得以改进的情况一样,力学的发展使半个世纪以来汽车发动机的效率提高了约 1/3。仅以小轿车为例,全世界每年节省燃料费约 2000 亿美元,而排气的污染却减少了 90% 以上(其中化学也起了重要作用)。

排在第三位的是航空技术,第十一位的是航天技术,它们和力学的关系就更密切了。力学对它们的发展不仅起了重要的,而且是关键的作用,它们的每一个重大进展都依赖于力学的新突破。如流体力学先后为航空技术的四次飞跃提供了科学基础:第一次解决了能不能飞的问题;第二次解决了飞行能不能超音速的问题;第三次解决了飞弹重返大气层或飞机做高超音速飞行时的热保护问题;第四次解决了高速飞行时气体电离导致的通信中断

问题,同时也为隐身技术提供了新思路。

20 世纪后半叶,战机的发展经历了四代:第一代是附体流型飞机;第二代是带定常脱体涡的飞机;第三代是带非常定常脱体涡的高机动性及高敏捷性飞机;第四代是能超音速巡航及隐身的飞机。航天技术也已从火箭发展到航天飞机,每一次技术的飞跃,都伴随着流体力学的新进展。

航空航天技术的发展同时伴随着材料的发展。最早的飞机的骨架、螺旋桨等是木制的,蒙皮则是帆布,后来用了金属材料,近来则大量采用复合材料。每一种新材料的采用,都带来了新的固体力学问题。而计算力学的发展,为复杂结构的设计计算提供了必需及有效的工具。

20 项技术中还有其它与力学有密切关系的,在此就不一一列举了。

在为工程技术提供科学基础的过程中,力学形成了许多新的分支学科。如流体力学有粘性流体力学、空气动力学、气动热力学、热化学流体力学、电磁流体力学、稀薄气体动力学等;固体力学有弹塑性力学、振动力学、结构力学、断裂力学、损伤力学、板壳力学和复合材料力学等。

力学还为非线性科学提供了范例,如孤立波、混浊、分叉等。

由此可见,从学科上讲,力学既是一门基础科学,又是众多工程科学和技术科学的基础。

20 世纪的工程技术固然取得了巨大的成就,但人类的需求是无止境的。例如:交通工具要求更快、更安全、更舒适,以及耗能低、无污染;建筑物越建越高而且要能抗震;石油开采要求尽可能采出更多原油;人类对环境有更高的要求,对灾害的防治要更有把握等,这些都会提出新的力学问题。而高技术战争则要求能从空天平台上发射更多的武器,这促使空天武器平台及武器本身都向高速、高机动性、隐身、大航程的方向发展,迫切要求对其提出全新的设计思想,而没有力学的发展这是不可能的。因此,虽然力学在 20 世纪得到了非常大的发展,但面向 21 世纪,仍有很多重要问题亟待解决。这首先是工程技术发展的需要,同时,这些问题的解决也必然会促进力学的进步。

现在人们最感兴趣的学科是所谓的新兴学科,这是很容易理解的。但是否力学这种已有很大发展的学科就不会或不需要有更大的发展了呢?显然不是如此。正是由于力学是一个有较长历史的学科,已经渗透到很多工程技术科学中,因此如果它还有未解决的重大基础问题,则必然影响到很多工程技术的发展;反之,力学在基础研究上的任何重要进展,都将推动很多工程技术的发展。必须看到,解决一个传统学科的基础问题更多地具有攻坚的性质,它与新学科的基础研究更多地具有发现新规律的性质是不同的。但由于传统学科影响面广,即使不是突破性进展,只要有进展,就可能产生巨大的影响。上面所举的涡轮机和汽车发动机的改善得益于力学的进展,就是很好的例子。

力学发展的历史充分说明:力学是随着人类认识自然现象和解决工程技术问题的需要而发展起来的,力学又对认识自然和解决工程技术问题起着极为重要,甚至是关键的作用。因此,力学既是一门基础科学,它所阐明的规律带有普遍性;它又是一门技术科学,是许多工程技术的理论基础,并在广泛的应用过程中不断得到发展。目前,还有许多关系到人类生存和生活质量的宏观现象远没有被认识清楚,如全球气候变暖、环境污染、海洋开发利用、能源危机、自然灾害(地震、台风等)、彗星或小行星撞击地球等问题等。另外,21

世纪即将出现的新的、更复杂的工程技术问题也有赖于力学的新发展去解决。可以预期,力学除了继续在航空、航天、机械、土木、水利、化工、石油、交通运输等传统领域发挥为之提供基础理论和工具的作用外,也将在生命、材料、信息、能源、环境等高新技术领域发挥愈来愈大的作用。

2. 工程力学的研究内容

工程力学所包含的内容极其广泛,本书中所讨论的“工程力学”只包含“静力学”和“材料力学”两部分。“静力学”研究物体的受力和平衡规律,“材料力学”研究物体在外力作用下的变形和失效现象。二者都是工程设计中的基本知识。

工程构件(泛指结构元件、机器的零部件等)在外力作用下丧失正常功能的现象称为“失效”或“破坏”。工程构件的失效形式很多,但工程力学范畴内的失效通常可分为三类:强度失效、刚度失效和稳定失效。

强度失效是指构件在外力作用下发生不可恢复的塑性变形或发生断裂。图 0.1(a)和(b)所示分别为断裂了的销钉和产生塑性变形的铆钉。

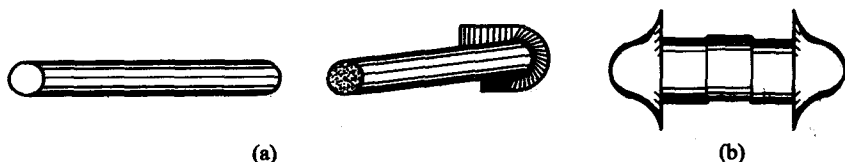


图 0.1

刚度失效是指构件在外力作用下产生过量的弹性变形。例如,齿轮传动轴如果弹性变形过大(图 0.2),不仅会影响齿轮间的正常啮合,缩短齿轮的在役寿命,而且会加大轴与轴承的磨损,从而导致传动机构丧失正常功能。

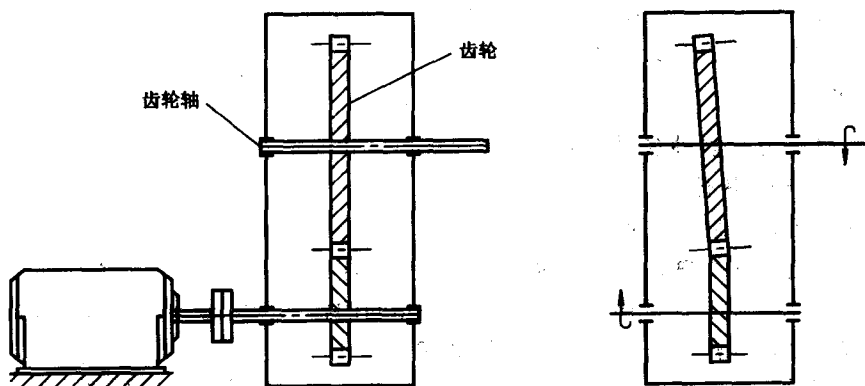


图 0.2

稳定失效是指构件在某种外力(例如轴向压力)作用下,其平衡形式发生突然转变。图 0.3 所示的内燃机中凸轮机构的挺杆,由于过于细长,当其所承受的压缩载荷超过一定数值时,便会从直线的平衡状态突然转变为弯曲的平衡状态,致使内燃机的进排气凸轮机构失去正常功能。

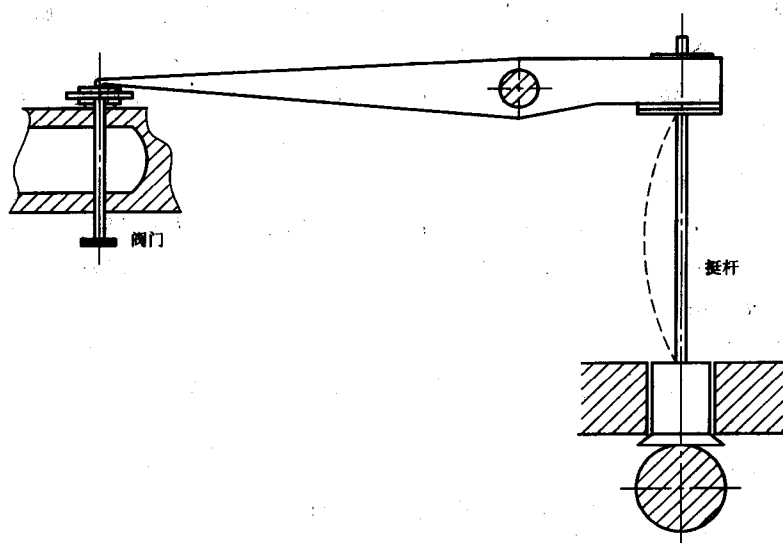


图 0.3

工程设计的任务之一就是保证构件在确定的外力作用下正常工作而不失效，即保证构件具有足够的强度、刚度与稳定性。所谓强度，是指构件承受载荷作用而不发生塑性变形或断裂的能力。所谓刚度，是指构件承受载荷作用而不发生过大的弹性变形的能力。所谓稳定性，是指构件承受载荷作用而不发生平衡与变形形式转变的能力。可以看出，在这里工程设计的任务是：

- (1) 分析并确定构件所受各种外力的大小和方向。
- (2) 研究在外力作用下构件的内部受力、变形和失效的规律。
- (3) 提出保证构件具有足够强度、刚度和稳定性的设计准则和方法。

以上便是本课程的主要内容。

3. 工程力学的研究对象

工程构件的形状多种多样，根据几何形状和尺寸的不同，工程构件大致可以分为四种类型：杆、板、壳、块体。

杆是一个方向(轴向)的尺寸远大于另两个方向(横向)的尺寸的细长构件(图 0.4)。杆横截面中心的连线称为轴线。轴线为直线的杆称为直杆(图 0.4(a))；轴线为曲线的杆称为曲杆(图 0.4(b))。所有横截面的形状、大小均相同的杆称为等截面杆。横截面的厚度比长和宽小得多的杆称为薄壁杆，如各种型钢(图 0.4(c))。

板和壳则是一个方向的尺寸(厚度)远小于另两个方向尺寸的薄壁构件。平分厚度的面称为中面。板的中面为平面(图 0.5(a))；壳的中面为曲面(图 0.5(b))，如穹形屋顶、薄壁容器等均属此类构件。

块体是三个方向的尺寸同属一个数量级的构件(图 0.5(c))，如水坝、建筑结构物基础等均属此类构件。

作为力学入门课程，我们的研究对象以等截面直杆为主，但课程中介绍的基本概念和原理则同样适用于其它工程构件。板、壳及块体的研究属于“板壳理论”和“弹性力学”的范畴。

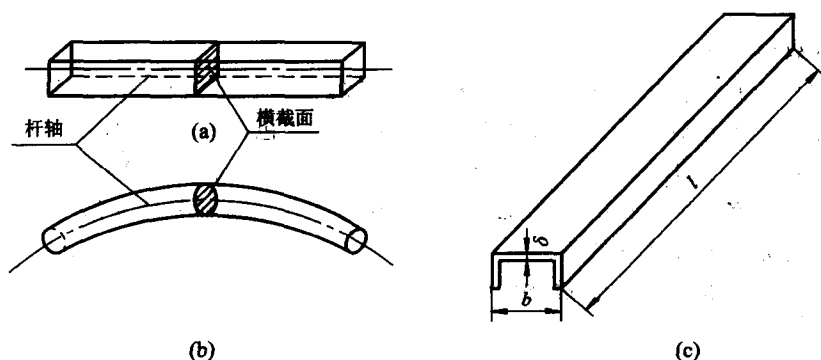


图 0.4

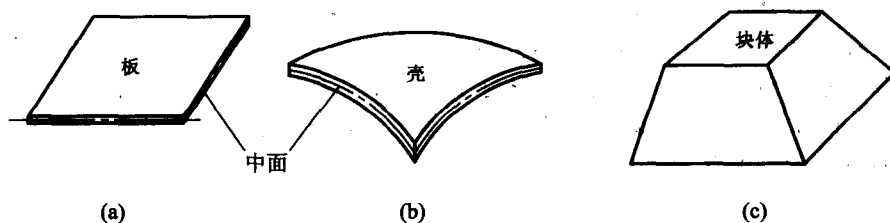


图 0.5

4. 工程力学的研究方法

工程力学的产生和发展过程是人类对于物体机械运动和构件承载能力的认识的深化过程,而这种认识是人们通过长期的生产实践和无数次的科学实验得到的。人们经过无数次的实践活动——理论总结——再实践的反复过程,使认识不断提高和深化,逐步地总结和归纳出物体机械运动和构件承载能力的一般规律,形成了工程力学的基本体系和理论知识。

在研究工程力学问题的过程中,抓住主要的影响因素,忽略次要的影响因素,采用抽象化的方法,将研究对象抽象化为各种力学模型。例如,在研究不同性质的力学问题时,分别用刚体、质点、变形固体等来代替真实物体,使问题大为简化。因此,研究不同的力学问题,采用不同的力学模型,是研究工程力学的重要方法。

本书中叙述的力学原理都是一些成熟的、经典的结果,我们的着眼点不在于这些原理的建立和论证,而是这些原理的合理应用。即要求学生深刻理解工程力学中已被实践证明了的正确的基本概念和基本定律,熟练掌握由基本概念和基本定律导出的解决工程力学问题的定理和公式;与此同时,通过演算一定数量的习题,把学到的知识应用到实践中去,以便巩固和进一步加深理解所学的理论知识。

工程力学研究问题的一般步骤如下:

- (1) 确定研究对象。
- (2) 建立或选择力学模型。这一步包括对研究对象性能的研究及对真实情况的理想化和简化,即力学建模。
- (3) 将力学原理应用于理想模型,进行理论分析和数学演绎,建立方程或其他表达式,

即数学建模。

(4) 求解数学问题，得到结果或结论。

在本课程中，上述研究工程力学问题的方法是理论分析的过程，它是认识力学规律、形成力学理论的关键步骤。在工程力学中，理论分析通常包括三方面的内容：

(1) 力的研究，即物体受力分析，平衡方程的建立。这是分析的静力学方面。

(2) 变形的研究，即变形几何关系的建立以及物体各单独部分的变形与整体变形相协调的条件。这是分析的几何学方面。

以上两方面分析都不涉及构成物体的材料的性质，故所得的结论对任何材料构成的物体都成立。

(3) 联系力和变形的规律的研究和应用。这是分析的物理学方面。此时，我们必须考虑特定材料所具有的特殊性质，这些信息来自于实验室。研究工程材料的性质是固体力学的一个内容丰富的分支学科，而本书仅用到这些研究的最终结果。

上述工程力学的研究方法与其他学科的研究方法有着相似之处。因此，充分理解和熟练掌握工程力学的研究方法，不仅可以学好工程力学本身的知识，而且有助于学好其它科学技术理论，培养学生分析问题和解决问题的能力，为今后解决工程中的生产实际问题，从事科学研究工作打下坚实的基础。

第 1 篇

静 力 学

静力学是研究物体或物体系统在力系作用下平衡规律的科学。所谓力系，是指作用于同一物体或物体系统的一群力。所谓物体的平衡，是指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线平移的状态。静力学主要解决两类问题：一是将作用在物体上的力系进行简化，即用一个简单的力系等效地替换一个复杂的力系，这类问题称为“力系的简化”或“力系的合成问题”；二是建立物体在各种力系作用下的平衡条件，这类问题称为“力系的平衡问题”。

静力学研究的物体主要是刚体。所谓刚体，是指在力的作用下不变形的物体，即刚体内部任意两点间的距离保持不变。在实际问题中，任何物体在力的作用下或多或少会产生变形。如果物体变形不大或变形对所研究的问题没有实质影响，则将物体抽象为刚体。

静力学研究作用在刚体上的力系简化与平衡问题。在静力学中由刚体得出的结论也可以推广，因此静力学的适用范围十分广泛，并成为许多后续课程的基础。



THE
FEDERAL
BUREAU OF
INVESTIGATION
OF THE
DEPARTMENT OF JUSTICE
WASHINGTON, D. C.
20535

第1章 力的性质及物体受力分析

力与力偶是力学中的两个基本物理量。本章在阐述力与力偶的概念、性质以及几个基本原理的基础上,研究了工程中常见的约束及产生的约束力,并讨论物体受力分析的方法。

1.1 力的性质

力是物体间的相互机械作用。这种作用可使物体的运动状态发生改变,或使物体产生变形。力使物体改变运动状态的效应称为力的运动效应(也称为外效应),使物体产生变形的效应称为变形效应(也称为内效应)。力对物体产生的这两种效应是同时出现的。对于不变形的刚体,力只改变其运动状态。

力具有下列性质:

(1) 力对物体的作用效应,取决于力的大小、方向(包括方位和指向)和作用点。这三个因素称为力的三要素。一个力可以用这三个要素来表示,因此力是矢量,可用一具有方向的线段来表示,如图 1.1 所示。线段的长度按一定的比例尺表示力的大小,线段的方位和箭头的指向表示力的方向,线段的起点(或终点)表示力的作用点,而与线段重合的直线表示力的作用线。在本书中,矢量用黑体字表示,如 $\mathbf{F}$; 该矢量的大小(又称模)则用同文的白体字表示,如 F 。在国际单位制中,力的单位是牛[顿],符号是 N, $1\text{ N}=1\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$ 。

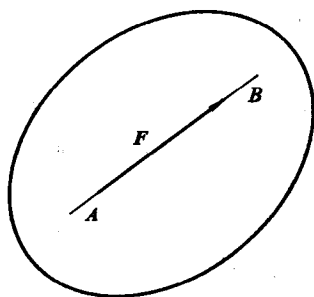


图 1.1

(2) 作用于物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点,合力的大小和方向由以这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定(图 1.2(a)),称为力的平行四边形合成法则,用数学公式表示为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

有时，我们不用力的平行四边形法则而用力的三角形法则求合力的大小和方向。在图 1.2(b) 中，将 F_1 、 F_2 首尾相连构成开口的力三角形，合力 F 就是这个力三角形的封闭边。

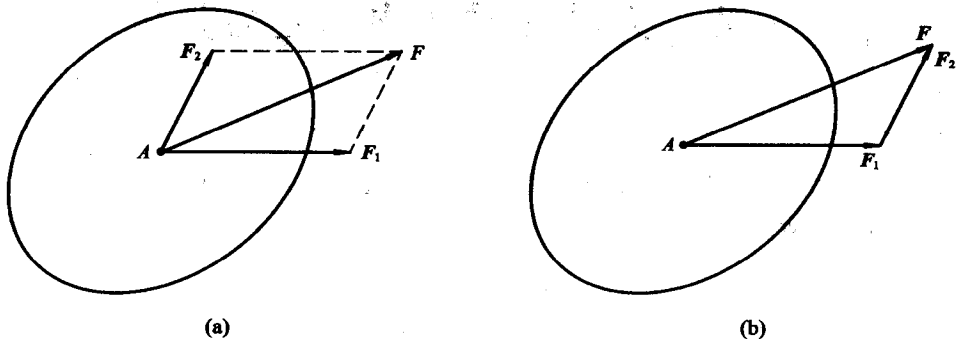


图 1.2

(3) 作用于同一刚体的两个力，使刚体平衡的必要与充分条件是：两个力的作用线相同，大小相等，方向相反。该条件称为二力平衡条件。例如，在工程中常有一些满足该条件的直杆，如图 1.3 中的杆 AB。这种杆件通常称为二力杆。

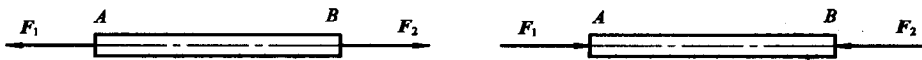


图 1.3

(4) 在任一力系中加上或减去任何一个平衡力系，并不改变原力系对刚体的运动效应，称为加减平衡力系原理。

利用二力平衡条件和加减平衡力系原理可以证明以下推论：

力在刚体上的作用点可沿作用线移至刚体内的任意一点而不改变该力对刚体作用的效果。此性质称为力的可传性，证明留给读者自己完成。

考虑这一性质，作用于刚体的力的三要素可改为：大小、方向和作用线。沿作用线可任意滑动的矢量称为滑移矢量，因此作用于刚体上的力是滑移矢量。但此结论完全不适用于变形体，对于变形体，力的作用效果与作用点密切相关。

(5) 两物体间相互作用的力(作用力与反作用力)同时存在，大小相等，作用线相同而指向相反，称为作用力与反作用力定律。

这一定律是由牛顿提出的(即牛顿第三定律)，这个定律概括了自然界中物体间相互作用力的关系，表明一切力总是成对出现的。根据这个定律，已知作用力则可得知反作用力。该定律是分析物体受力时必须遵循的原则，为研究由一个物体过渡到多个物体组成的系统问题提供了基础。

必须注意，作用力与反作用力是分别作用于两个物体上的，不能错误地与二力平衡条件混同起来。

(6) 如果变形体在某一力系的作用下处于平衡，若将此变形体刚化为刚体，则其平衡状态不变。这一论断称为刚化公理。

刚化公理建立了刚体的平衡条件和变形体平衡条件之间的联系，说明了变形体平衡