

高 | 等 | 学 | 校 | 教 | 材

GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

工程力学

ENGINEERING MECHANICS

主 编 / 李卓球 朱四荣

主 审 / 黄玉盈



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

高等学校教材

工程力学

主 编 李卓球 朱四荣
主 审 黄玉盈

武汉理工大学出版社
· 武汉 ·

内 容 简 介

本书主要介绍工程力学的基本概念、基本理论与基本方法。全书共 13 章,第 1 章为绪论,第 2、3 章为静力学,第 4~12 章为材料力学,第 13 章为疲劳强度简介。重点内容包括物体及物体系统的静力分析;构件的强度、刚度、稳定性分析。每一章附有思考题及习题,书后附有截面图形的几何性质、型钢规格表,以及习题参考答案。

本书是编者在多年讲授工程力学课程的基础上精心编写而成的,在内容编排上既精选了工程力学的经典内容,又体现了 21 世纪现代科技发展的相关要求。本书可供高等院校相关专业的教师、学生及自学者使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/李卓球,朱四荣主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2008. 8

ISBN 978-7-5629-2754-9

I. 工… II. ①李…②朱… 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(2008)第 131969 号

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

E-mail:wutp8@163.com

印刷者:武汉理工大印刷厂

经销者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:18

字 数:461 千字

版 次:2008 年 8 月第 1 版

印 次:2008 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。

前 言

工程力学是大学本科相关专业的专业基础课,是培养学生工程应用的分析能力和科学研究素养的重要课程。为适应 21 世纪的社会发展和科技进步,这本“工程力学”教材在夯实课程基础,突出基本概念、基本理论、基本方法的前提下,力求突显以下三个方面的特点:

(1) 全书贯穿一条主线。即:将静力平衡、变形几何相容条件、力与变形间物理关系的研究作为分析、研究工程力学问题的基本思路。

(2) 注重理论结合工程实际。在教学内容中引入工程实例,引导学生对所学知识加以扩展、延伸和综合,尤其要使学生掌握从实际工程结构或构件中建立合理力学模型的方法,培养学生的科学素质。

(3) 注重归纳思维方法。在讨论不同问题的个性和特点时,突出共性的归纳,注重培养学生的综合与推广、求同与辨异等归纳思维方法,从中提高学生的创新意识。

此外,本书还为教师留有选择余地,以适应不同的需求。若安排 6~12 学时的相关实验,建议将课程设置为 64~72 学时。如果不讲授第 12 章和第 13 章,减少实验学时,也可满足一些专业进行 48 学时力学通识教育的需求。

本教材是武汉理工大学工程结构与力学系的教师在多年讲授工程力学课程的基础上精心编写而成的。第 1 章和第 13 章由李卓球教授编写,第 2 章和第 3 章由李瑶副教授编写,第 4 章、第 5 章及附录 II 由朱四荣教授编写,第 6 章和附录 I 由黄莉副教授编写,第 7 章和第 8 章由董北川副教授编写,第 9 章和第 12 章由孙明清教授编写,第 10 章和第 11 章由郑立霞副教授编写。全书由李卓球、朱四荣主编,由朱四荣统稿。

本书由华中科技大学黄玉盈教授主审,黄先生对全书进行了仔细的审阅,提出了许多精辟而中肯的意见,编者在此表示由衷的感谢。

由于水平所限,书中疏漏与不足之处难免,敬请读者批评指正。

衷心感谢为这本教材的编写、出版提供支持和方便的同志们。

编 者

2008 年 5 月于武汉理工大学

目 录

1 绪论	(1)
1.1 什么是工程力学	(1)
1.2 力学发展的简要回顾	(1)
1.3 力学的发展趋势	(3)
1.4 工程力学的研究方法	(3)
1.5 工程力学的基本研究主线	(5)
思考题	(5)
2 力的性质及物体的受力分析	(6)
2.1 静力学基本概念	(6)
2.2 力的性质	(7)
2.3 物体的受力分析和受力图	(9)
2.4 共点力的合成	(14)
2.5 力对点的矩和力对轴的矩	(17)
2.6 力偶	(20)
思考题	(21)
习 题	(22)
3 力系的简化和平衡	(25)
3.1 力系向一点的简化	(25)
3.2 力系的平衡条件和平衡方程	(29)
3.3 平面任意力系平衡方程的应用	(30)
3.4 空间任意力系平衡方程的应用	(35)
3.5 杆系结构的内力分析	(37)
思考题	(40)
习 题	(41)
4 轴向拉压杆的应力及变形	(45)
4.1 材料力学的基本假设及基本概念	(45)
4.2 拉压杆横截面上的轴力及轴力图	(49)
4.3 应力·拉压杆内的应力	(51)
4.4 轴向拉(压)杆的变形·胡克定律	(54)
4.5 拉压超静定问题	(59)

思考题	(63)
习 题	(64)
5 材料的拉伸和压缩力学性能	(67)
5.1 概述	(67)
5.2 材料在拉伸时的力学性能	(67)
5.3 材料在压缩时的力学性能	(74)
5.4 轴向拉伸或压缩时的强度计算	(75)
5.5 等直杆在轴向拉伸或压缩时的应变能	(79)
思考题	(80)
习 题	(81)
6 连接件的实用计算与圆轴扭转	(83)
6.1 剪切与挤压的实用计算	(83)
6.2 圆轴扭转的实例及计算模型	(87)
6.3 薄壁圆筒的扭转	(90)
6.4 圆轴扭转时的应力与变形	(92)
6.5 圆轴扭转时的强度、刚度条件	(96)
6.6 圆轴扭转时的应变能	(100)
思考题	(102)
习 题	(104)
7 梁的弯曲内力	(109)
7.1 弯曲的概念	(109)
7.2 剪力和弯矩	(111)
7.3 剪力方程、弯矩方程和剪力图、弯矩图	(114)
7.4 剪力、弯矩和分布荷载集度间的微分关系	(118)
7.5 用叠加法作弯矩图	(120)
思考题	(121)
习 题	(122)
8 梁的弯曲应力与强度计算	(127)
8.1 梁弯曲时横截面上的正应力	(127)
8.2 弯曲正应力的强度条件	(131)
8.3 梁的剪应力及其强度条件	(134)
8.4 提高弯曲强度的措施	(140)
思考题	(142)
习 题	(143)

9 梁的弯曲变形与刚度计算	(148)
9.1 工程中的弯曲变形问题	(148)
9.2 挠曲线的近似微分方程	(148)
9.3 积分法求梁的变形	(150)
9.4 叠加法求梁的变形	(153)
9.5 梁的刚度计算及提高梁的刚度的措施	(158)
9.6 简单超静定梁	(162)
9.7 梁的弯曲应变能	(163)
思考题	(165)
习 题	(166)
10 应力状态与强度理论	(171)
10.1 应力状态基本概念	(171)
10.2 平面应力状态分析	(173)
10.3 空间应力状态的最大应力	(179)
10.4 广义胡克定律与应变能密度	(180)
10.5 强度理论	(184)
思考题	(192)
习 题	(193)
11 组合变形	(199)
11.1 组合变形的概念	(199)
11.2 斜弯曲	(200)
11.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合	(203)
11.4 弯曲与扭转的组合	(206)
思考题	(210)
习 题	(211)
12 压杆的稳定性分析	(216)
12.1 压杆稳定性概念	(216)
12.2 两端铰支细长压杆的临界力	(217)
12.3 其他约束条件下细长压杆的临界力	(219)
12.4 压杆的临界应力总图	(221)
12.5 压杆的稳定性校核	(225)
思考题	(227)
习 题	(228)

13 疲劳强度简介	(231)
13.1 交变应力和疲劳破坏.....	(231)
13.2 疲劳破坏机理的基本概念.....	(234)
13.3 构件外形与表面对疲劳极限的影响.....	(236)
13.4 提高构件疲劳强度的措施.....	(241)
思考题.....	(242)
习 题.....	(242)
附录 I 截面的几何性质	(243)
I.1 静矩和形心	(243)
I.2 极惯性矩、惯性矩和惯性积	(245)
I.3 惯性矩、惯性积的平行移轴公式	(249)
I.4 惯性矩、惯性积的转轴公式	(250)
思考题.....	(252)
习 题.....	(253)
附录 II 型钢表	(255)
主要参考文献	(265)
习题参考答案	(266)
索 引	(274)
Synopsis	(276)
Contents	(277)

1 绪 论

1.1 什么是工程力学

力学是研究力与运动的科学。大到宇宙,小到基本粒子,力与运动无所不在。

力学横跨自然科学与工程技术。力的作用与物质的运动,是自然界和人类活动最基本的现象,这奠定了力学在科学体系中的基础科学地位。力学以工程和自然界的真实介质和系统为研究对象,成为众多需要精细化、机理化描述的应用科学和工程技术的基础,这又奠定了力学的工程技术地位。力学的这种双重属性是经典力学三百多年来发展历程的客观描绘,得到国际科技界的广泛认同。

随着科学技术和现代工业的发展,力学从早期的静力学和牛顿力学发展到众多的力学分支学科,工程力学就是其中之一。工程力学是研究实际工程中的力学问题,并将力学原理应用于工程技术领域的科学。

作为高等工科大学的一门课程,工程力学只是其中最基础的部分,涵盖了静力学和材料力学两部分的主要内容。

静力学又称刚体静力学,主要是研究刚性物体在平衡状态时的受力问题。刚性物体是假定物体不变形的一种理想化状态,这种假定是为了分析简便而设定的。平衡状态是一种特殊的运动状态。例如,在地面上静止的建筑物,做匀速直线运动的火车等,都处于平衡状态。

材料力学以变形固体为研究对象,主要研究变形固体的受力、变形、破坏的一门科学。由此可见,工程力学是研究自然界以及各种工程中机械运动最普遍、最基本的规律,以指导人们认识自然界,科学地从事工程技术工作。只有这样,工程师们才能够合理的设计规范与手册,才能正确地对工程技术问题进行分析计算与设计,使机械、结构等按设计要求实现运动、承受荷载,控制它们不发生影响使用功能的变形,更不允许发生破坏。

1.2 力学发展的简要回顾

力学是具有悠久历史的学科之一,它的发展过程,是人类通过观察生活和生产实践中的各种现象,不断认识物体机械运动的过程。

远古时代,人们使用杠杆、斜面和滑轮进行简单的建筑施工,制造推车用长运输,制造船舶用于航运等。这些生产工具的制造和使用,使得人类对于机械运动有了初步的认识。但是,在很长的一段时期内,人类的认识仅仅限于经验的积累,而未形成理论知识。

关于力学最早的文字记述,当推我国的墨翟(公元前 468~公元前 382)。在他所著的《墨经》里,给出了力的一种定义,并对于杠杆平衡问题以及斜面与浮力问题进行了描述。希腊哲学家亚里斯多德(公元前 384~公元前 322)最早从理论层面上提出了杠杆平衡(equilibrium of levers)问题,并提出了影响今后近两千年的力学观点,如地心说、物体下落说等唯象说。

阿基米德(公元前 287~公元前 212)在他的两本著作《论平面图形的平衡》、《论浮体》中用了明确而普遍的方式建立了杠杆平衡学说(Relationships for the equilibrium of levers),以及几何静力学(Statics for geometry)、重心静力学(Statics for barycenter),从而奠定了静力学的基础。

从 15 世纪中叶到 18 世纪下半期,是欧洲的封建社会向资本主义社会转化时期,为了适应当时的社会与工业发展,力学与其他自然科学一样得到了发展。如:达·芬奇(1451~1519)提出的力矩概念;史蒂芬(1548~1620)在进行斜面问题研究时提出了力的合成与分解定律;潘索(1777~1859)提出了力偶的概念及有关的理论等,使得静力学理论得到了进一步的发展。

哥白尼(1473~1548)提出了太阳中心学说后,在科学界引起了宇宙观的大革命;开普勒(1571~1630)根据哥白尼的学说以及其他天文学家的观测资料,得出了行星运动三大定律,成为牛顿万有引力的基础。伽利略(1564~1642)观察了落体运动并试验物体沿斜面的运动,从而提出了落体在真空中的运动定律,并引出了加速度的概念,奠定了动力学的基础。他是用实验及演绎的方法研究动力学的创始人。

牛顿(1642~1727)在伽利略等人研究的基础上进行深入研究,总结出了物体运动的三个基本定律,即牛顿三定律。因此,牛顿集前人之大成,创立了经典力学,并对其他学科的发展产生了巨大影响。

由此可见,经典力学是从哥白尼提出的太阳中心学说开始,由伽利略奠基,而由牛顿总结而形成的。尤其值得注意的是,在这一时期(即 17 世纪初至 18 世纪末),力学在自然科学领域占据中心地位。最伟大的科学家几乎都集中在这一学科,如伽利略、惠更斯、牛顿、胡克、莱布尼兹、伯努利、拉格朗日、欧拉、达朗伯等。由于这些杰出科学家的努力,借助于当时取得的数学进展,使力学取得了十分辉煌的成就,在整个知识领域中起着支配作用。

进入 19 世纪后,欧洲各主要国家相继完成了工业革命,大机器工业生产对力学提出了更高的要求。为适应当时土木建筑、机械制造和交通运输的发展,使得材料力学、结构力学和流体力学得到了发展和完善。因为在建筑、机械中出现的大量强度和刚度问题,由材料力学或结构力学计算。此外,作为探索普遍规律而进行的基础研究,弹性力学也取得了很大的进展。

从 1900 年直至 1960 年,力学随着航空航天的发展形成了近代力学。1903 年,莱特兄弟飞行成功,飞机很快成为重要的战争和交通工具。1957 年,人造地球卫星发射成功,标志着航天事业的开端。而在这期间,力学解决了各种飞行器的空气动力学性能问题、推进器动力学问题、飞行稳定性和操纵性问题及结构和材料的强度等一系列问题。包括超声速飞行、航天器返回地面等关键问题,都是基于力学研究才得以解决的。由此,人们清楚地看到了力学研究对于工程技术的先导和促进作用。力学还解决了核爆炸中对猛烈炸药爆炸的精密控制、强爆炸波的传播、反应堆的热应力等重要问题。

20 世纪 60 年代以来,由于电子计算机技术的飞跃发展和广泛应用,力学同计算机技术和其他自然科学学科广泛结合,进入了近代力学的新时代。过去力学中大量复杂、困难而使人不敢问津的问题,因此有了解决的希望。20 世纪 60 年代兴起的有限元法,能够将一个复杂的结构经离散化处理为有限单元的组合后,计算机可以对这种复杂的结构系统迅速计算出结果。有限元法是力学、数学与计算机的巧妙结合,该方法一出现,就显示出无比的优越性,被广泛应用于工程技术的各个领域,例如汽车碰撞、复杂结构的服役过程模拟等复杂的设计与计算。

1.3 力学的发展趋势

1997年9月30日,钱学森先生在给清华大学工程力学系成立40周年的信中写道“回顾一个世纪,工程力学走过了从工程设计的辅助手段到中心主要手段,不是唱配角而是唱主角了。”这一论断,在进入21世纪时,越来越多地得到了印证。

进入21世纪之际,力学面临着更大的发展机遇,同时也面临着更大的挑战。例如在空间应用、深海开发、灾害防治、国家安全等方面,将有更新、更大、更复杂的工程技术问题需要力学去解决,力学将适应国家发展的重大战略需求,继续为新一代工程技术的突破作出前瞻性、带动性的贡献。

目前,力学的学科体系正孕育着重大变革。这些变革涉及:

(1)国际科学界特别是力学界正在关注跨物质层次、多尺度的力学现象和非线性非平衡力学行为,这是力学基础研究的重要发展趋势。

(2)人们将面对更为复杂的力学系统,将越来越多地涉及智能系统(intelligence systems)、微机电系统(Micro Electro Mechanics Systems—MEMS)和生物系统(biology systems)。这是因为现代结构和机械的发展趋势之一是智能化,这可使结构与机械成为集力学性能和信息功能为一身的可控制体,趋势之二是轻柔化和微型化,前者导致复杂的非线性行为,后者导致尺度效应。

(3)人类对健康水平日益提高的需求,要求力学家更为关心生物力学问题。涉及在细胞力学、应力与生长、细胞与材料表面相互作用,生物大分子及其结构的力学特性等方面进行新的开拓。这将使力学在揭示诸如心脑血管疾病等重大疾病机理,探索其诊治手段方面发挥作用。

(4)面对日益复杂的重大工程中力学问题,力学的研究手段不断更新。例如,现代测控技术和数据处理技术将开拓新的实验力学手段,快速发展的信息科学和计算机技术将不断推动力学的进展。以计算力学方法为纲,集建模推理、数据测量、智能控制和力学计算为一体的力学研究手段正在形成。

(5)虚拟型号研制需求正在使力学在重大工程中扮演着越来越重要的角色,并将导致一系列新的计算体系、大规模高性能的数值和智能算法、软件可视化的发展。这种新的计算力学体系,在虚拟工程、虚拟设计、虚拟制造等虚拟仿真技术中将起到关键性作用。

1.4 工程力学的研究方法

1.4.1 建立力学模型

工程力学所研究的对象是受力物体,是实际中的客观存在。为了探索这类物体的基本规律,必须首先对物体作必要的简化,以建立力学模型。

例如,在研究汽缸内活塞的运动时,活塞在受到外力作用下而使自身产生微小变形,但为了研究活塞的运动规律,忽略它的微小变形,将活塞建立为受力而不变形的刚体模型。

又如,活塞与连杆之间的机械运动是相互制约的,为了研究它们之间的相互作用力,需要将它们的连接简化为理想约束模型。

这些力学模型有一个共同的特点:抓住研究对象的主要因素,舍弃其次要因素,以建立抽象化的模型。

但是,任何抽象化的模型都是相对的。当条件改变时,必须考虑影响事物的新的因素,建立新的模型。例如,要分析受力物体本身如何变形、是否破坏的状态时,则刚体模型是不适用的,必须考虑到物体的变形,需建立变形固体的模型。

一个受力构件的设计,首先要按照结构使用要求和功能要求提出设计要求,如:结构形式、受力情况、运行功能要求等;然后通过设计要求建立力学模型,采用力学和数学方法进行计算分析。如果分析的结果不能满足预期的要求,则必须修改设计,再次分析,直到获得满意的结果。其结果不仅包括构件的安全性和可靠性,还包括构件的经济性、易于制造、环保等因素。

上述方法中,力学模型的建立是非常关键的。一个好的力学模型,既能使问题求解简化,又能使结果符合实际情况,满足所要求的精度。力学模型的建立,不仅需要对其实际情况的充分了解及分析问题的能力,还与知识面和经验有关。

例如,在处理普通工程构件(如杆、梁、轴等)时,可以先将其假定为理想化的刚体,研究作用于其上的力,达到一定的认识水平;然后,将其视为变形体,并假定其变形是弹性(卸载后变形能完全恢复)的,研究构件在荷载作用下的弹性变形情况,这样,又达到了另一认识水平。

由此可见,通过合理简化以建立力学模型,是进行理论分析计算的基础。不仅要掌握一些基本的典型的力学模型的建立方法,而且要善于将较复杂的研究对象合理简化为分析模型,这将有助于提高学生抽象思维和创新思维能力。

1.4.2 归纳和演绎

在建立力学模型的基础上,运用归纳和演绎的方法,由少量的基本规律出发,得到了从多方面揭示受力物体的自然规律,获取相应的定理、定律和公式,建立严密而完整的基本理论和基本方法。

归纳与演绎是两种不同的推理和认识现实的科学方法。一般来说,归纳是由特殊到一般,演绎是由一般到特殊。

当对一个具体受力构件进行研究时,通常采用演绎的方法,利用一般的定理、定律和公式进行演绎分析计算,获得该构件的运动规律;同时,我们还应该对这一具体物体的研究成果进行归纳,寻找出具有普遍性的规律和结论,并获得触类旁通分析方法。

相对而言,我们较熟悉演绎的方法,因此,有必要更加重视归纳的方法。在讨论不同问题的个性和特点时,突出它们的共性归纳。如不同受力构件的基本变形的共性分析;静定问题与超静定问题的共性;不同材料物理模型下变形体力学分析的共性等。重视归纳思维方法的训练,从而培养学生一种对科学真理的探讨精神、一种勇于创新的精神。

1.4.3 力学性能实验

材料的力学性能是研究力与变形物理关系的基础。例如,在材料力学中,为了解决截面内的应力分布问题,必须观察杆件在某种受力形式下的变形特征;此外,通过一些假设所得到的材料力学结果是否可靠,还有待实验加以验证。因此,实验在材料力学研究方法中占有重要地位。

通过力学性能实验,可了解几种材料的基本力学性能,可掌握材料力学实验的现代测试方法。同时,通过力学实验,学生可对课程所学力学理论知识进一步吸收与消化。更重要的是,

通过力学性能试验,可以培养和提高学生的实际操作技能和解决实际问题的能力,为今后的工程结构实验打下坚实的基础。

1.5 工程力学的基本研究主线

本课程主要研究物体在受力状态下处于平衡状态的问题,其基本研究主线是:力的平衡,变形的几何协调,材料的物理关系这三个方面。

1.5.1 受力分析及静力平衡条件

对于受力物体,当然是要首先研究物体受到什么力的作用;而对于处于平衡状态的物体,则物体或其中任何一部分的受力应当满足一定的条件,使其满足静力平衡。因此,研究静力平衡条件及其应用是静力学最重要的内容之一。

受力分析及静力平衡条件的研究并不涉及材料的力与变形间的物理关系。在小变形情况下,一般也不涉及变形的几何关系。

1.5.2 变形的几何相容条件

基于固体的连续性假设,固体不仅在受力前是均匀连续的,受力后只要未发生破坏,仍然应当是均匀连续的。如一根完好的直杆,在受力后发生了弯曲变形并仍然保持完好,那么,这根直杆的任意两点间的物质在变形前后都是连续的,而且在这两点间既不引起“空隙”,也不会产生“重叠”,这就是变形的几何相容条件。但是,若直杆发生了折断,则折断处的物质显然不再连续。

因此,所谓变形的几何相容条件,就是指固体在变形后仍然是连续的。对于变形的几何相容条件的分析,是纯粹的几何分析,并不涉及材料的物理关系。

1.5.3 力与变形间的物理关系

众所周知,物体一旦受力就要发生变形。那么力与变形间存在着什么关系呢?研究表明,它与材料本身的物理性能及变形形式有密切关系,因此,力与变形间的关系表达了材料的物理关系。如果材料不同、受力状态不同、环境不同,所用的材料物理关系也不同。这正是不同性质固体之间的主要区别所在。

总之,在学习工程力学课程时,要善于抓住课程内容的研究主线。在考虑力的时候,应当考虑平衡状态应有的条件。在考虑变形时,必须考虑结构各部分变形与整体变形的协调。在研究力与变形的联系时,则必须考虑材料的物理性能。

思 考 题

- 1-1 为什么说力学具有双重性?
- 1-2 工程力学课程主要包含哪些基本内容?
- 1-3 工程力学的基本研究主线是什么?
- 1-4 试述工程力学研究问题的一般方法。

2 力的性质及物体的受力分析

静力学是研究物体在力系作用下的平衡问题,静力学的主要任务包括三个方面:物体的受力分析方法;力系的等效与简化;力系的平衡条件。力系是指作用于物体上的一群力。力系的简化是指在不改变物体的运动状态的条件下用简单的力系来代替给定力系,因而也适用于运动物体。力系的平衡条件是指物体处于平衡状态时作用于物体上的力系所应满足的条件,可用于计算结构物所受的外力及内力,为结构的设计提供依据。

2.1 静力学基本概念

2.1.1 工程问题的力学分析方法

工程力学研究工程中与力学密切相关的问题。对于一个工程问题,首先要对实际物体进行合理的抽象与理想化,建立相应的力学模型;对物体的实际工程背景,利用力学相关原理或方法,演绎推理得到问题的数学模型,对求解得到的结果加以分析并与实际问题进行比较来验证。图 2-1 简单描述了这一力学分析过程。

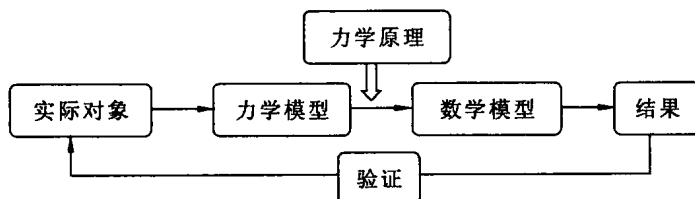


图 2-1 力学分析过程简图

2.1.2 刚体

静力学采用的力学模型是刚体,所以又称为刚体静力学。

所谓刚体(rigid body)是指物体在力的作用下,其内部任意两点间的距离始终保持不变。简单地说,刚体就是在力的作用下不变形的物体。刚体是一个理想化的模型,它可以是单个的工程构件,也可以是结构的整体。

实际上,物体在受到力的作用时,会产生不同程度的变形。实际物体能否简化为刚体,取决于问题的性质。例如图 2-2 所示的塔式吊车,当需要确定正常工作是否会倾覆时,塔吊可视为刚体;当需要设计其中每一部件时,必须视为变形体。

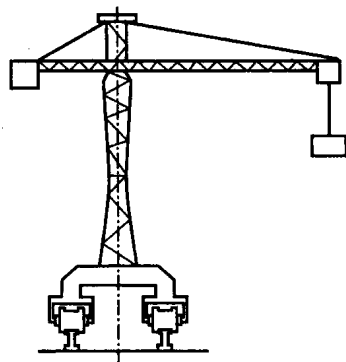


图 2-2 塔式吊车简图

对于受力作用后产生微小变形的物体,若研究它的运动变化规律,或研究它的平衡规律时,可以忽略其变形,把它看做刚体。这种抽象是合理且必要的,它使问题的研究大为简化,同时它也是研究变形体平衡问题的基础。

2.1.3 力

力(force)是物体间相互的机械作用,这种作用的结果是使物体的运动状态发生改变,或使物体变形。力对物体的作用效果表现为两个方面:一是使物体的运动状态发生改变,叫做力的运动效应或外效应;二是使物体的形状发生改变,叫做力的变形效应或内效应。

物体间的作用形式是多种多样的,大致可分为两类:一类是通过场起作用,如重力、万有引力、电磁力等,这些力分布在物体的整个体积内,称为分布力;另一类是由物体间的接触而产生,如物体间的压力、摩擦力等,这些力是作用于接触面上的分布力,一般比较复杂,为方便计算可简化为作用于一点的集中力。

2.1.4 平衡

平衡(equilibrium)是指物体相对于惯性参考系处于相对静止或匀速直线运动。如果物体在力系的作用下保持平衡状态,则该力系称为平衡力系(equilibrium force system)。对一般的工程问题而言,取与地面相固连的坐标系为惯性参考系足够精确。例如,在地面上静止的建筑物,做匀速直线运动的车箱等,都处于平衡状态。

2.1.5 等效力系

如果作用于物体上的一个力系可用另一个力系代替,而不改变物体的运动状态,这两个力系互为等效力系。如果一个力与一个力系等效,则这个力称为该力系的合力(resultant force)。

2.2 力的性质

2.2.1 力的三要素

力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点。实验表明,力有确定的大小、方向,满足矢量运算法则,因而力是矢量,用 F 表示。在图 2-3 中,用一个带箭头的直线段表示力,线段的长度按一定比例表示力的大小;线段的方位及箭头的指向表示力的方向;通常线段的始端表示力的作用点。若以 F_0 表示沿力矢量方向的单位向量,则力矢 F 可以表示为 $F = FF_0$ 。

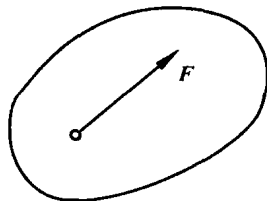


图 2-3 力的矢量表示

在国际单位制中,力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。

2.2.2 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力,可以合成为仍然作用于该点的一个合力,合力的大小和方向由这两个力构成的平行四边形的对角线确定,如图 2-4a 所示。用矢量加法表示为

$$F_R = F_1 + F_2$$

由此可见力 F_R 亦可沿两个给定方向分解为与其等效的两个力, F_1 、 F_2 称为 F 的分力。

为求合力,也可由任一点起,顺次画出矢量 F_1 、 F_2 ,连接起点与终点得到一力三角形,如图 2-4b 所示,第三边 F_R 即为合力矢,合力的作用点仍在汇交点。这一求合力的方法称为力的三角形法则。这一合成方法显然与顺序无关,也可用图 2-4c 表示。

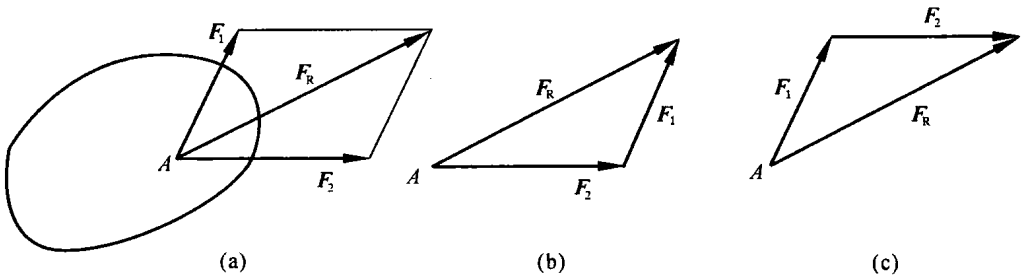


图 2-4 两个共点力的合成

力的平行四边形法则表明了最简单力系的简化规律,是研究力系简化的重要理论依据。

2.2.3 二力平衡条件

作用于同一刚体上的两个力使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,并且作用在同一条直线上,即

$$F_1 = -F_2$$

这个公理阐述了作用于刚体上最简单力系平衡时应满足的条件。需指出的是,此公理只适用于刚体。

仅受两个力作用且处于平衡状态的杆件或构件称为二力杆或二力构件,它所受的两个力必定在两个力作用点的连线上,且等值、反向。

2.2.4 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任何一个已知力系上加上或减去任意一个平衡力系,并不改变力系对刚体的效应。由上述公理可导出以下两条力的性质:

(1) 力的可传性

作用在刚体上的力可沿力的作用线移动到刚体内的任意一点,而不改变该力对刚体的效应。

此推论可由图 2-5 简单证明。设力 F 作用于刚体上的点 A , B 为力作用线上任一点。根据加减平衡力系公理,在 B 点加一对等值、反向、共线的力 F_1 和 F_2 ,令 $F = F_1 = -F_2$,这样并未改变力系对刚体的效应。而 F 与 F_2 也组成一对平衡力系,由上述公理去掉这两个力。这样只剩下作用于 B 点的力 F_1 ,相当于把 F 由 A 点移到 B 点。

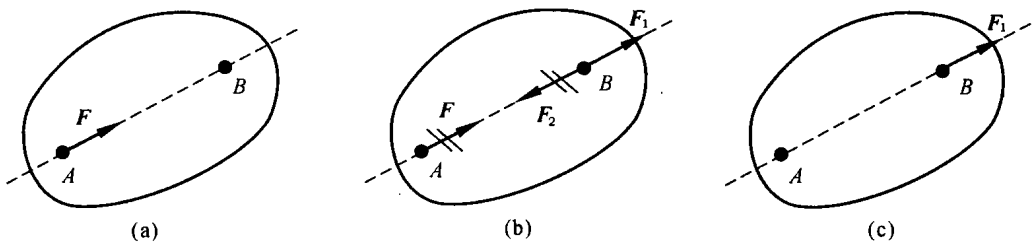


图 2-5 力的可传性

根据力的可传性,对于刚体而言,力的作用点可用力的作用线代替,作用于刚体上的力的三要素就是力的大小、方向和作用线。作用于刚体上的力可以沿作用线移动,这种矢量叫做滑动矢量。

(2)三力平衡汇交原理

刚体受三个力作用而处于平衡状态,若其中两力的作用线相交于一点,则此三力必在同一平面内,且汇交于同一点。读者可自行证明。

2.2.5 作用力和反作用力定律

两物体间相互作用的力,即作用力与反作用力总是大小相等,方向相反,沿同一条直线,分别作用在两个物体上。

这一定律概括了物体间相互作用的关系,作用力和反作用力总是成对出现的,无论物体是处于平衡状态或运动状态都普遍适用。

2.2.6 刚化原理

静力学中力的某些性质,如力的可传性、平衡的充要条件只是对刚体成立,而对于可变形体则在一定条件下成立。如果变形体在某一力系作用下已处于平衡状态,则将此变形体刚化为刚体时,其平衡状态不变。这一性质被称为刚化原理,它提供了将变形体看做刚体模型的条件。在本书研究变形体的内容中,将在刚体静力学的基础上,考虑变形体的几何和物理特性,进一步研究变形体的力学行为。

2.3 物体的受力分析和受力图

2.3.1 约束和约束反力

在分析和解决实际力学问题时,不仅要对物体进行理想化,还要对物体的接触性质和受力进行理想化。

凡位移不受任何限制可以在空间作任意运动的物体称为自由体,如在空中飞行的飞机、火箭等。如果物体的位移受到了预先给定的条件的限制,使它沿某些方向的运动成为不可能,则此物体称为非自由体。对非自由体的某些位移起限制性作用的周围物体称为约束(constraint)。如机车受铁轨的限制,只能沿轨道运动,铁轨就是机车的约束。其他如钢索对重物,轴承对电机转子等都是约束。

约束对物体沿某些方向运动的阻碍作用是通过力的作用实现的,这种约束作用于被约束物体上的力,称为约束反力(constraint force)或约束力,简称反力。约束反力的方向总是与约束所能阻碍的物体的运动方向相反。约束反力的作用点就是物体上与作为约束的物体相接触的点。约束反力的大小一般都是未知的,在静力学中,可通过与其他已知力组成的平衡力系,由力系的平衡条件求出。

约束力以外的其他力称为主动力,如重力、水压力、风压力、电磁力、弹簧力等。物体所受的主动力一般都是已知的。

实际工程中的约束形式复杂多样,经过简化可以抽象成理想的约束类型,下面介绍工程实