

21世纪应用型机电规划教材

工程力学

主 编 杨传华 杨 海

副主编 舒 鑫 初旭宏 马浏轩



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

21 世纪应用型机电规划教材

工程力学

主 编 杨传华 杨 海
副主编 舒 鑫 初旭宏 马浏轩

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书为 21 世纪应用型机电规划教材,是根据材料力学教学大纲的要求,参照教育部高等学校教材指导委员会力学基础课程教学指导分委员会提出的工程力学课程教学基本要求进行编写的。突出实验与实践教学,编写时注重知识体系的完整性和实用性。增加了工程实际的基础训练习题与思考讨论题,其目的就是针对学生的特点,在对基础理论知识的理解和掌握的基础上,加强实践能力与试验技能的培养。全书共分 15 章,主要内容包括绪论、静力学的基础、平面基本力系、平面任意力系和摩擦、空间力系和重心、轴向拉伸和压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态理论与强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法等。

本套教材可作为高等院校机械、土建、水利、航空和力学等专业的工程力学课程教材,也可供高职院校、独立学院等作为教材使用,同时可供有关技术人员作为自学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 杨传华,杨海主编. --北京:北京航空航天大学出版社,2011.6

ISBN 978-7-5124-0417-5

I. ①工… II. ①杨… ②杨… III. ①工程力学 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 069354 号

版权所有,侵权必究。

工程力学

主编 杨传华 杨 海

副主编 舒 鑫 初旭宏 马浏轩

责任编辑 李松山

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:15.75 字数:353 千字

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-0417-5 定价:32.00 元

本书编委

主 编：杨传华 杨 海(佳木斯大学)

副主编：舒 鑫(中国人民解放军军械工程学院)

初旭宏(佳木斯大学)

马浏轩(佳木斯大学)

参 编：帅应芳 施 韵 汪 阳 袁晓刚 叶玲妮 金安丹

苏海峰 王莹莹 应 颖 刘胜利 洪 一 倪庆怡

王 兴 朱管翔 沙 敏 樊艳红

主 审：王俊发(佳木斯大学)

前 言

根据培养应用型人才的教学需要,结合目前学生状况,以及培养人才的规格,我们在总结多年理论与实践教学经验的基础上,汲取了国内许多优秀教材的长处编写了本书。在编写过程中,严格依照工程力学教学大纲的要求,并结合当前时代特点,与时俱进,既保留了国内原有教材结构严谨、逻辑性强等特点,又突出了实验与实践教学,增加了工程实际的基础训练习题与思考讨论题。本套教材的指导思想是教材架构、教材内容、例题难度、习题难度等符合教学应用型学校使用,培养面向 21 世纪的工程师以及新技术开发人员。因此,本套教材形成了自己的特色,与现有的研究型、研究教学型院校使用的教材有一定的区别。

书中的主要符号、术语等完全采用国家标准。本书内容丰富,定位适中,既突出了基本概念和基本理论,又注重了内容上的拓宽和更新;既力求用较少的课时完成基本要求,又为各种不同的需要提供了较大的选择余地,同时增加了工程概念和工程应用的内容。

本书的编写安排如下:杨传华编写第 1、4、5、15 章;杨海编写第 11、12、13 章;舒鑫编写第 2、3、6 章;初旭宏编写第 7、8、9 章;马浏轩编写第 10、14 章。

本书可作为普通高等工科、高等职业院校相关专业的教材,也可作为成人教育学院师生及有关工程技术人员参考书。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎各位读者批评指正。

作 者
2011 年 5 月

目 录

绪 论	1
0.1 工程力学的研究内容和任务	1
0.2 工程力学的力学模型	2
0.3 工程力学的研究方法	2
 第一篇 静力学	
第 1 章 静力学的基础	4
1.1 静力学基本概念	4
1.1.1 力的概念	4
1.1.2 刚体的概念	5
1.2 静力学公理	5
1.2.1 公理一(二力平衡公理)	6
1.2.2 公理二(加减平衡力系公理)	6
1.2.3 公理三(力的平行四边形公理)	7
1.2.4 公理四(作用和反作用公理)	8
1.2.5 公理五(刚化原理)	9
1.3 约束和约束反力	9
1.4 物体的受力分析和受力图	14
习 题	17
第 2 章 平面基本力系	20
2.1 平面汇交力系的合成与平衡	20
2.1.1 几何法	20
2.1.2 解析法	22
2.2 平面力对点之矩的概念及计算	23
2.2.1 力对点之矩——力矩	24
2.2.2 合力矩定理	24
2.3 平面力偶理论	25

目 录

2.3.1 力偶与力偶矩	25
2.3.2 力偶的性质	26
2.3.3 力偶系的简化及平衡条件	26
习 题	28
第3章 平面任意力系和摩擦	31
3.1 平面力系向一点简化	31
3.1.1 力的平移定理	31
3.1.2 力系向任意一点简化、主矢和主矩	32
3.2 力系简化结果的分析·合力矩定理	33
3.3 平面任意力系的平衡条件及平衡方程	34
3.4 物体系统的平衡、静定和静不定问题	37
3.5 摩 擦	41
3.5.1 滑动摩擦	41
3.5.2 摩擦角与自锁现象	42
习 题	46
第4章 空间力系和重心	48
4.1 空间汇交力系	48
4.1.1 力在直角坐标轴上的投影及其分解	48
4.1.2 空间汇交力系的合成	50
4.1.3 空间汇交力系的平衡	51
4.2 力 矩	52
4.2.1 空间力对点之矩	52
4.2.2 空间力对轴之矩	53
4.2.3 力对点之矩与力对通过该点的轴之矩的关系	54
4.3 空间力偶理论	55
4.3.1 空间力偶的等效定理·力偶矩矢的概念	55
4.3.2 空间力偶系的合成与平衡	56
4.4 空间力系向一点的简化·主矢和主矩	56
4.4.1 力系的简化	56
4.4.2 简化结果的分析	58
4.5 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	58
4.5.1 空间任意力系的平衡条件	58
4.5.2 空间任意力系的平衡方程	59
4.5.3 空间平行力系	59

4.6 物体的重心	61
4.6.1 重心的概念	61
4.6.2 重心的坐标	61
4.6.3 求重心的几种常用方法	63
习 题	66

第二篇 材料力学

第5章 材料力学中的几个基本问题	70
5.1 材料力学的任务	70
5.2 可变形固体的基本假设	71
5.3 材料力学中的几个基本概念	72
5.3.1 外力、内力及应力的概念	72
5.3.2 位移、变形与应变	74
5.4 杆件变形的基本形式	76
5.4.1 轴向拉伸或压缩	76
5.4.2 剪 切	77
5.4.3 扭 转	77
5.4.4 弯 曲	77
习 题	78
第6章 拉伸、压缩与剪切	79
6.1 轴向拉伸与压缩的概念及实例	79
6.2 拉(压)杆的内力及内力图	79
6.3 拉(压)杆截面上的应力	81
6.3.1 横截面上的应力	81
6.3.2 斜截面上的应力	83
6.4 拉(压)杆的变形	84
6.4.1 纵向变形及纵向应变	84
6.4.2 横向变形与横向应变	84
6.4.3 胡克定律	85
6.5 材料在拉伸和压缩时的力学性能	88
6.5.1 材料的拉伸与压缩实验	89
6.5.2 低碳钢拉伸时的机械性质	89
6.5.3 铸铁拉伸时的机械性质	93
6.5.4 材料在压缩时的力学性质	93

目 录

6.6 拉(压)杆的强度计算	94
6.6.1 许用应力和安全系数	94
6.6.2 轴向拉伸和压缩时的强度计算	95
6.7 拉(压)杆的超静定问题	97
习 题	99
第7章 剪 切	101
7.1 剪切概述	101
7.2 连接件的剪切与挤压实用计算	102
7.2.1 剪切强度的实用计算	102
7.2.2 挤压强度的实用计算	103
习 题	104
第8章 扭 转	106
8.1 概 述	106
8.2 轴的内力——扭矩及扭矩图	107
8.2.1 轴的外力偶矩的计算	107
8.2.2 轴扭转时的内力——扭矩和扭矩图	107
8.3 薄壁圆筒的扭转	109
8.3.1 薄壁圆筒扭转时的应力	110
8.3.2 薄壁圆筒扭转时的变形	111
8.3.3 剪应力互等定理	111
8.3.4 纯剪切、剪切胡克定律	112
8.4 圆轴扭转时的应力与变形	112
8.4.1 圆轴扭转时横截面上的应力	112
8.4.2 极惯性矩 I_p 和抗扭截面模量 W_p 的计算	115
8.4.3 圆轴扭转的强度条件	116
8.5 圆轴在扭转时的变形和刚度条件	118
8.5.1 圆轴扭转时的变形	118
8.5.2 圆轴扭转时的刚度条件	118
习 题	120
第9章 弯曲内力	122
9.1 平面弯曲的概念与梁的分类	122
9.1.1 平面弯曲的概念	122
9.1.2 梁的计算简图	123
9.2 梁的内力——剪力和弯矩	124

9.3 剪力方程与弯矩方程·剪力图与弯矩图	127
9.4 载荷集度、剪力和弯矩之间的微分关系	132
习 题	135
第 10 章 弯曲应力	138
10.1 梁横截面上的正应力	138
10.1.1 弯曲变形的基本假设	138
10.1.2 梁横截面上的正应力	139
10.2 梁横截面上的切应力	142
10.2.1 矩形截面	142
10.2.2 圆形截面	143
10.2.3 工字形截面	144
10.3 梁的弯曲强度条件	145
10.3.1 弯曲正应力强度条件	145
10.3.2 弯曲切应力强度条件	147
10.4 梁的合理设计	149
10.4.1 合理选取截面形状	149
10.4.2 合理设计梁的外形	151
习 题	151
第 11 章 弯曲变形	153
11.1 梁的挠度与横截面转角	153
11.2 梁的挠曲线近似微分方程	154
11.3 积分法求梁的变形	155
11.4 叠加法求梁的变形	158
11.5 梁的刚度条件	160
11.6 超静定梁	162
习 题	163
第 12 章 应力状态理论与强度理论	166
12.1 应力状态的概念	166
12.2 二向应力状态分析	168
12.2.1 解析法	168
12.2.2 图解法	170
12.3 三向应力状态分析	173
12.4 强度理论	174
12.4.1 强度理论的概述	174

目 录

12.4.2 常用的4种强度理论	175
习 题	177
第13章 组合变形	179
13.1 概 述	179
13.2 斜弯曲	180
13.3 弯扭组合变形	184
13.4 弯拉(压)扭组合变形	187
13.5 偏心拉(压)与截面核心	190
习 题	192
第14章 压杆稳定	195
14.1 压杆稳定的概念	195
14.2 压杆的临界力的欧拉公式	196
14.2.1 两端铰接压杆临界力的欧拉公式	196
14.2.2 不同杆端约束情况下压杆临界载荷的欧拉公式	198
14.3 欧拉公式的适用范围·临界应力总图	199
14.4 压杆的稳定性校核	202
习 题	204
第15章 能量法	206
15.1 应变能及其计算	206
15.1.1 应变能概念	206
15.1.2 应变能的计算	207
15.2 互等定理	209
15.3 余 能	210
15.4 卡氏定理	211
15.4.1 卡氏第一定理	212
15.4.2 卡氏第二定理	213
15.5 莫尔定理	213
习 题	221
附 录	223
附录A 简单载荷作用下梁的挠度和转角	223
附录B 型钢规格表	225
参考文献	240

绪 论

0.1 工程力学的研究内容和任务

工程力学是一门研究物体机械运动以及构件强度、刚度和稳定性的科学。它涵盖了理论力学与材料力学两门课程的主要内容。

力学是研究物体宏观机械运动的学科。所谓“机械运动”是指物体在空间的位置随时间的变化。机械运动是物质运动最简单、最基本的形式。

工程力学所研究的机械运动主要有两大类：一类是研究物体的运动及研究作用在物体上的力和运动之间的关系；另一类是研究物体的变形，即研究作用在物体上的力与变形之间的关系。本书将这两类问题归纳为静力学与材料力学两大部分。

当所研究物体的运动范围远远超过其本身的几何尺度时，物体的形状和大小对运动的影响很小，可将其抽象为只有质量而无体积的“质点”。由有限或无限多质点组成的系统，称为“质点系”。因此，质点的力学问题是工程力学的基础。

在机电设备、机械安装，以及建筑、化工、轻工、包装等许多工业生产领域，存在大量的工程力学应用问题，如高速离心机转鼓的回转运动、牛头刨床的往复运动、包装机械的各种复杂运动等。静止是机械运动的特例。研究静止物体的受力和平衡问题，都要用到静力学的知识。

各类结构物、设备和机械都是由构件组成的，构件在工作时，总要受到载荷的作用。为了使构件在载荷作用下能正常工作而不损坏，也不发生过度的变形而不丧失稳定，就要求构件具有一定的强度、刚度和稳定性，材料力学就是研究在各类载荷作用下构件强度、刚度和稳定性计算原理的学科。

0.2 工程力学的力学模型

实际工程构件受力后,几何形状和几何尺寸都要发生改变,这种改变称为变形,这些构件都称为变形体。

当研究构件的受力时,在大多数情形下,变形都比较小,忽略这种变形对构件的受力分析不会产生什么影响。由此,在静力学中,可以将变形体简化为不变形的刚体。

当研究作用在物体上的力与变形规律时,即使变形很小,也不能忽略。但是在研究变形问题的过程中,当涉及平衡问题时,大部分情形下依然可以沿用刚体模型。

0.3 工程力学的研究方法

进行现场观察和实验是认识力学规律的重要实践性环节。将实践过程中所得结果,利用抽象化的方法,加以分析、归纳、综合,可得到一些最普遍的公理或定律;再通过严格的数学推演,可得到运用于工程的力学公式。学习工程力学,并不要求去重复经历力学的发展过程,而是要深刻理解工程力学中已经实践证明是正确的基本概念和基本定律,这些是力学知识的基础。由基本概念和基本定律导出的工程力学定理和公式,必须熟练掌握。把学到的理论知识不断用到实践中去,是巩固和加深理解所学知识的重要途径。

自然界与各种工程中涉及机械运动的物体有时是很复杂的,工程力学研究其机械运动时,必须忽略一些次要因素的影响,对其进行合理的简化,抽象出研究模型。研究不同的问题,采用不同的力学模型,是研究工程力学问题的重要方法。

由于计算机的飞速发展和广泛应用,除传统的力学研究方法(理论方法和实验方法)外,又增加了一种新的研究方法,即计算机分析方法。对于一些较为复杂的力学问题,人们可以借助于计算机推导那些难以导出的公式,利用计算机整理数据、绘制实验曲线、显示图形等。由此可以展望,力学加电子计算机将成为工程设计的新的主要手段。

“工程力学”是土木工程和机电类专业以及其他工科类专业的重要专业基础课。工程力学中讲述的基础理论和基本知识,在基础课与专业课之间起桥梁作用。它为专业设备及机器的机械运动分析和强度计算提供必要的理论基础。

在具体的学习过程中,要注意:

(1) 正确理解有关力学概念的来源、含义、用途及有关理论公式推导的根据和关键,公式的物理意义及应用条件和范围;理论力学分析和解决问题的方法;各章节的主要内容和要点;各章节在内容和分析问题的方法上的区别与联系。

(2) 理论力学基本概念的理解和理论应用能力是通过大量习题的求解逐步加深和提高的。因此,在学习中必须要做一定量的习题。

(3) 温故而知新,及时复习和常做小结。

第一篇 静力学

静力学研究作用于物体上力系的平衡规律以及力的性质及其合成法则。

力系,是指作用于物体上的一组力。平衡是物体机械运动的一种特殊情况。因为物体机械运动的传递和变换是通过物体间的相互作用力来实现的,所以作为理论力学的首篇,静力学首先建立理论力学中最重要的概念——力,并研究力的性质,在此基础上进一步研究物体和物体系统平衡时作用力之间的平衡条件。

在静力学中,主要研究以下 3 个问题。

1. 物体的受力分析

分析某个物体共受几个力,以及每个力的作用大小、方向和作用位置。

2. 力系的等效替换或简化

将作用在物体上的一个力系用另一个与它等效的力系来代替,这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,则称为力系的简化。

研究力系等效替换并不局限于分析静力学的问题,静力学中关于力的概念、有关的分析理论和分析方法,在运动学和动力学部分的研究中还将用到,所以它也是研究运动学和动力学内容的基础。同时,静力学的内容也是后续的材料力学、结构力学等课程的重要基础。由于建筑结构及其相关设施多数首先是作为静止物体受平衡力系作用来处理的,所以静力学的理论与方法本身在工程技术中也有着广泛的应用。

3. 建立各种力系的平衡条件

物体处于平衡状态时,作用在物体上的各个力所满足的条件即为力系的平衡条件。

工程上常见的力系,按其作用线位置在空间的分布可以分为平面力系和空间力系两大类;按其作用线的相互关系,分为共线力系、平行力系、汇交力系和任意力系。不同力系的平衡条件各有其不同的特点。满足平衡条件的力系称为平衡力系。

本篇内容在理论力学课程中占有十分重要的地位,是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。对机械、建筑等工程类专业学生来说,静力学是学习理论力学的基础,所以学习一开始就应给予足够的重视。

第 1 章

静力学的基础

1.1 静力学基本概念

在学习和工程实际中,常常要接触到一些十分重要的概念。本节首先介绍几个最常用又十分重要的静力学基本概念,包括它们的名称定义、主要特征、表达方式、计算方法、单位等。而涉及这些概念的基本性质,将在后面的有关章节详细讨论。

1.1.1 力的概念

力是力学中一个极为重要的基本概念。它是产生于生产实践,并经过人们对感性认识加以概括和改造,提高到理性认识而形成的科学概念。

力是物体间的相互机械作用,其效应是使被作用物体的运动状态发生变化,同时使物体产生变形。力使物体运动状态发生改变的效应称为力的外效应或运动效应;力使物体产生变形的效应称为力的内效应或变形效应。因为静力学只限于研究刚体,不考虑物体的变形,所以只涉及力的外效应,力的内效应将在后续的材料力学等学科中进行研究。

在自然界里可以看到由各种不同的物理原因所产生的力,如任何物体间的万有引力、带电体间的引力与斥力、由物体间的摩擦与碰撞而引起的力、蒸气的压力等。但在理论力学里,只研究力所产生的效应,而不研究它的物理来源,因为种种事实都证明,力的物理来源完全不决定力的效应。

力对物体作用的效应取决于力的大小、方向和作用点,通常称为力的三要素。需要特别指出的是,力的方向包括方位和指向两个要素。由于力的大小和方向具有矢量的特征,力的合成又服从矢量合成规则,所以力是一种矢量。力矢量在印刷时常用黑体字母表示,如图 1.1 所

示,而力的大小则用普通字母表示。在书写中,由于写不出黑体字,常在字母的上方加一个箭头,以示该字母表示一个矢量,如 $\vec{F}$ 。表示力矢量与仅表示力的大小是不同的,这点需要特别注意。

力的单位在国际单位制(SI)中是个有专门名称的导出单位,用N(牛顿)或kN(千牛顿)表示,1 kN=1 000 N。

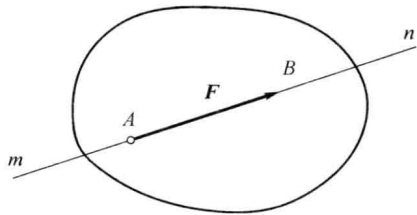


图 1.1

同时作用于物体上的若干个力称为力系。若两个力系分别作用于同一物体而作用效果相同,则称这两个力系为等效力系或互等力系。如果一个力与一个力系等效,则称该力为此力系的合力,而此力系中的各力称为合力的分力。求力系的合力,称为力的合成;将一个力分解成两个或两个以上的分力,称为力的分解。若一个力系对物体作用后,并不改变物体原有的运动状态,则该力系称为平衡力系。平衡力系的外效应为零。

1.1.2 刚体的概念

任何物体受力后或多或少都会产生变形。在许多工程问题中,物体的变形往往是非常微小的,甚至必须用极精密的仪器来测量才能发现。例如,钢杆在受拉时的伸长,一般不超过原长度的几分之一;又如,在高速切削机床中,主轴以及其他各传动轴的最大挠度不超过轴座间距的0.000 2。如此微小的变形,在许多力学问题的研究中不起主要作用,完全可以忽略,因此,提出了所谓“刚体”这个理想模型,刚体是指在力作用下不变形(即任意两点间的距离保持不变)的物体。显然,现实中并无刚体存在。这里所说的“刚体”,只是实际物体在一定条件下抽象的力学模型。

对静力学研究的问题,忽略变形不会对研究的结果产生显著的影响,却能使问题的研究大大简化。在这种情况下,把实际的物体抽象为刚体,是合理的,也是必要的。例如,桥梁问题,在计算承载时可视为刚体,在计算振动或温度的影响时就要视为变形体。由此可见,一个物体能否简化为刚体,应看在所研究的问题中,物体的变形(即使是很微小)是否起重要作用,而不应把刚体的概念绝对化。

理论力学中,主要研究力的外效应,此时微小变形在整体上对结果的影响可以忽略,所以将研究的物体都抽象为刚体,故又称为刚体静力学,它是研究变形体力学的基础。

1.2 静力学公理

理论力学的研究方法,其特点之一就是将在观察和实验等实践过程中经反复验证的正确

结果,提炼成具有普遍意义的公理。所谓公理就是指符合客观实际,不能用更简单的原理去代替,也无须证明而为大家所公认的普遍规律。在力的概念逐步形成的同时,人们对力的基本性质的认识也逐步深入,静力学的公理就是力的这些简单的和显而易见的基本性质的概括和总结,它们是以大量的客观事实为依据的,其正确性已为实践所证实,它们构成了静力学全部理论的基础。静力学的所有定理都是借助数学工具,从这些公理中推导出来的。学习中不要求去重复理解这些公理的形成过程,但是理解、掌握和熟练应用这些公理,对于学好理论力学却是十分重要的。

1.2.1 公理一(二力平衡公理)

刚体受两个力的作用而处于平衡状态,其充分必要条件是:此二力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

满足此条件且作用于同一物体上的两个力,是一个最简单的平衡力系。二力平衡条件对于刚体是必要和充分条件;而对于非刚体,该条件只是平衡的必要条件而非充分条件。

工程上,常遇到只有两点受力而处于平衡状态的构件,称为二力构件或二力杆。根据公理一,作用于二力构件的两力的作用线必通过作用点的连线。如图 1.2(a)、(b)所示(不计自重),不论构件的几何形状如何,只要符合二力平衡条件,就可按二力构件来处理。掌握了二力构件的这种受力特征,对物体进行受力分析是很有用的。

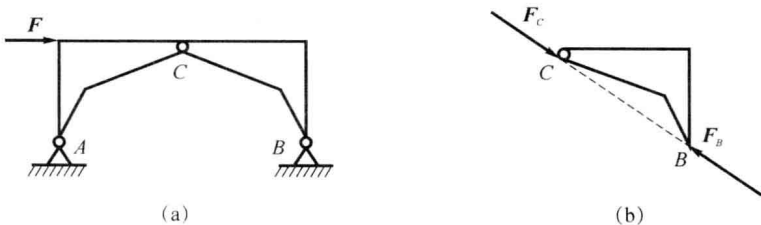


图 1.2

1.2.2 公理二(加减平衡力系公理)

在已知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。也就是说,如果两个力系只相差一个或几个平衡力系,则它们对刚体的作用是相同的,因此可以等效替换。这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

根据上述公理可以导出如下推理。