

创新型机械专业“十三五”规划教材
“互联网+教育”新形态教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

(含微课)

主编 伍春发 张凤 高文秀



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

创新型机械专业“十三五”规划教材

“互联网+教育”新形态教材

工 程 力 学

主编 伍春发 张 凤 高文秀

贵州师范学院内部使用



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共四篇 20 章。第一篇是“静力学”，内容包括静力学基础、平面基本力系、平面任意力系、摩擦、空间力系；第二篇是“运动学”，内容包括点的运动学和刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动；第三篇是“动力学”，内容包括质点动力学基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理；第四篇是“材料力学”，内容包括轴向拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲、应力状态与强度理论、组合变形、压杆稳定、动载荷与交变应力。

本书可作为各类院校机械类和近机类等专业的教材，也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

工程力学 / 伍春发, 张凤, 高文秀主编. -- 上海 :
上海交通大学出版社, 2019
ISBN 978-7-313-22434-7

I. ①工… II. ①伍… ②张… ③高… 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 (2019) 第 279310 号

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主 编：伍春发 张 凤 高文秀

出版发行：上海交通大学出版社

邮政编码：200030

印 制：北京京华铭诚工贸有限公司

开 本：787mm×1092mm 1/16

版 次：2019 年 12 月第 1 版

书 号：ISBN 978-7-313-22434-7

定 价：59.80 元

地 址：上海市番禺路 951 号

电 话：021-64071208

经 销：全国新华书店

印 张：20.25 字 数：468 千字

印 次：2019 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者：如发现本书有印装质量问题请与发行部联系

联系电话：010-62137141

贵州师范学院内部使用

前言 QIANYAN

《工程力学》是各类院校机械类和近机类等专业的基础专业课程，它涉及诸多学科分支，并拥有广泛的工程技术应用背景，对学生工程实践能力的培养至关重要。因此，为了更好地满足该课程的教学要求，实现人才培养目标，我们结合现代工程技术的发展态势，在总结多年教学经验的基础上，精心编写了本书。

本书具有以下几个鲜明的特点。

- **理实结合，注重应用。**本书坚持“必需与够用为前提，应用与实用为目的”的指导思想，在内容编排上，着力做到符合学生的认知特点和教学规律，注重引导学生将基础理论与工程实际相结合，培养和提高学生分析问题、解决问题的能力。

- **论述严谨，简明扼要。**本书在基本概念的论述上准确严谨、逻辑清晰，在定理与公式的讲解上简明扼要、突出重点。简化复杂公式的推导过程，着重讲解重点知识内容，在达到基本教学深度的基础上，使本书更加易学宜用。

- **海量例题，知识前沿。**本书在重要知识点后都设有例题，题目设计经典，解答过程详细，能帮助学生强化对知识点的理解和运用。此外，书中使用的力学术语、物理量名称等均符合最新发布的国家标准，确保知识内容的前沿性。

- **图片精美，模块丰富。**本书配有海量精心绘制的辅助教学图片，精美严谨、清晰直观，旨在帮助学生更好地理解所学内容。同时，书中设有“注意”“提示”“拓展阅读”等模块，不仅可以帮助学生加深对知识点的理解，还提升了教材的可读性。

- **精编习题，答案辅助。**本书根据各章内容，精心设计了思考题和练习题两部分习题，前者帮助学生回顾重要知识点，后者考查学生对所学知识的运用能力。而且，书中配有练习题答案，方便学生核对计算结果，全部习题详细解答过程可通过网络下载获得，有利于教师教学和自学者参考。

- **随堂微课，即扫即学。**本书部分知识点配有微课视频，学生可以直接扫描二维码进行观看，不仅丰富了教师的教学方式，使授课更高效，而且增加了学生的学习途径，使学习更轻松。

本书由伍春发、张凤、高文秀担任主编，李洁、潘怡、刘亚朋担任副主编，刘萍担任主审。在编写过程中，我们参考了大量与工程力学相关的资料和文献，并从 Internet 中获取了部分信息与图片，在此向这些材料的作者表示衷心的感谢。

由于编者精力和水平有限，书中疏漏与不完善之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

另外，本书配有丰富的教学资源包，读者可以登录网站（<http://www.bjjqe.com>）下载。

本书编委会

主 编 伍春发 张 凤 高文秀

副主编 李 洁 潘 怡 刘亚朋

主 审 刘 萍

目录 MULU

绪论	1
----------	---

第一篇 静力学

第1章 静力学基础	4
1.1 静力学基本概念	4
1.2 静力学公理	6
1.3 约束和约束反力	8
1.4 受力分析与受力图	11
本章小结	15
思考题	17
练习题	17
第2章 平面基本力系	19
2.1 平面汇交力系合成和平衡的几何法	19
2.2 平面汇交力系合成和平衡的解析法	24
2.3 力矩和合力矩定理	27
2.4 平面力偶理论	30
本章小结	33
思考题	35
练习题	35
第3章 平面任意力系	37
3.1 平面任意力系的简化	37
3.2 平面任意力系的平衡方程	41
3.3 物系的静定与超静定问题	44
本章小结	46
思考题	47
练习题	48
第4章 摩擦	50
4.1 滑动摩擦	50
4.2 摩擦角与自锁现象	52
4.3 考虑摩擦时物体的平衡问题	53
4.4 滚动摩擦简介	55



本章小结	56
思考题	57
练习题	58
第 5 章 空间力系	60
5.1 空间汇交力系	60
5.2 空间力对点之矩和力对轴之矩	64
5.3 空间力系的平衡方程	69
5.4 重心	74
本章小结	80
思考题	83
练习题	83

第二篇 运动学

第 6 章 点的运动学和刚体的基本运动	87
6.1 点的运动学	87
6.2 刚体的基本运动	96
本章小结	101
思考题	103
练习题	103
第 7 章 点的合成运动	105
7.1 点的合成运动的基本概念	105
7.2 点的速度合成定理	106
本章小结	109
思考题	110
练习题	110
第 8 章 刚体的平面运动	112
8.1 刚体平面运动的基本概念和运动分解	112
8.2 用基点法求平面图形内各点的速度	114
8.3 用瞬心法求平面图形内各点的速度	117
本章小结	120
思考题	121
练习题	122

第三篇 动力学

第 9 章 质点动力学基本方程	126
9.1 动力学基本定律	126

9.2 质点运动微分方程	127
9.3 质点动力学的两类基本问题	128
本章小结	132
思考题	133
练习题	134
第 10 章 动量定理	136
10.1 动量和冲量	136
10.2 动量定理	138
10.3 质心运动定理	141
本章小结	146
思考题	148
练习题	148
第 11 章 动量矩定理	151
11.1 动量矩	151
11.2 动量矩定理	152
11.3 刚体对轴的转动惯量	157
11.4 刚体定轴转动微分方程	159
本章小结	163
思考题	165
练习题	165
第 12 章 动能定理	168
12.1 力的功	168
12.2 质点和质点系的动能	172
12.3 动能定理	174
12.4 功率与机械效率	177
本章小结	178
思考题	179
练习题	180
第四篇 材料力学	
第 13 章 轴向拉伸与压缩	185
13.1 轴向拉伸与压缩的概念	185
13.2 轴向拉伸与压缩时截面上的内力	186
13.3 轴向拉伸与压缩时截面上的应力	188
13.4 拉压变形与胡克定律	191
13.5 材料拉伸与压缩时的力学性能	193

13.6	许用应力与安全系数	197
13.7	轴向拉伸与压缩时的强度计算	198
13.8	拉压超静定问题简介	200
13.9	应力集中的概念	201
	本章小结	202
	思考题	204
	练习题	204
第14章 剪切与挤压		206
14.1	剪切与挤压的概念	206
14.2	剪切与挤压的实用计算	207
14.3	剪切胡克定律	209
	本章小结	209
	思考题	211
	练习题	211
第15章 扭转		213
15.1	扭转的概念	213
15.2	扭矩和扭矩图	214
15.3	圆轴扭转时横截面上的应力	216
15.4	圆轴扭转时的强度计算	219
15.5	圆轴扭转时的变形及刚度计算	220
	本章小结	222
	思考题	223
	练习题	223
第16章 弯曲		226
16.1	平面弯曲的概念及梁的计算简图	226
16.2	梁的剪力和弯矩	228
16.3	剪力图和弯矩图	230
16.4	弯矩、剪力与载荷集度间的关系	232
16.5	纯弯曲正应力	233
16.6	弯曲切应力简介	239
16.7	梁的弯曲变形及刚度条件	240
16.8	梁的合理设计	245
	本章小结	247
	思考题	249
	练习题	249

第 17 章 应力状态与强度理论	251
17.1 应力状态的概念	251
17.2 平面应力状态分析	253
17.3 广义胡克定律	256
17.4 强度理论简介	257
本章小结	260
思考题	262
练习题	263
第 18 章 组合变形	264
18.1 组合变形的概念	264
18.2 拉(压)弯组合变形的强度计算	265
18.3 扭转组合变形的强度计算	268
本章小结	271
思考题	273
练习题	273
第 19 章 压杆稳定	275
19.1 压杆稳定性的基本概念	275
19.2 欧拉公式	276
19.3 压杆稳定性的计算	280
19.4 提高压杆稳定性的措施	282
本章小结	283
思考题	284
练习题	284
第 20 章 动载荷与交变应力	286
20.1 动载荷	286
20.2 交变应力	290
本章小结	295
思考题	297
练习题	297
附录	299
附录 A 型钢截面尺寸、截面面积、理论重量及截面特性	299
附录 B 练习题参考答案	304
参考文献	311

绪 论

1. 工程力学的研究内容

工程力学是一门涉及诸多力学学科分支并有着广泛工程技术应用背景的学科。工程力学所包含的内容极为广泛,本书所讲的工程力学包含静力学、运动学、动力学和材料力学四篇内容。

静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律;运动学是从几何观点研究物体的运动,而不涉及作用在物体上的力;动力学研究作用于物体上的力与运动变化之间的关系。静力学、运动学和动力学统称为理论力学。材料力学主要研究物体在外力作用下的强度、刚度以及稳定性等问题。

在实际工程中设计构件时,首先,要搞清楚作用在构件上的外力,即理论力学所要研究的问题;其次,还必须为构件选择合适的材料,确定合理的截面形状和尺寸,以保证构件既安全可靠又经济实惠,即材料力学所要研究的问题。因此,理论力学与材料力学是工程力学中紧密联系、不可分割的两部分。工程力学的任务就是为各类工程结构的力学计算提供基本的理论和方法。

2. 工程力学的研究方法

在外力作用下,任何材料制成的物体都会发生变形。为了保证构件的正常工作,工程中通常把各构件的变形限制在很小的范围内,使其与构件的原始尺寸相比微不足道。因此,当对物体进行受力分析并研究物体的平衡与运动规律时,为了简化问题并抓住重点,可以将这些微小的变形忽略。在理论力学中,通常把构件看成是没有变形的刚性物体,简称为刚体。

此外,当构件的形状和尺寸不影响所研究问题的本质时,可以把真实的物体看作质点。但在材料力学中,当研究构件的强度、刚度、稳定性等问题时,变形则成为不可忽略的因素,刚体模型已经不能反映所研究问题的本质,需用变形体模型来代替真实物体。因此,根据研究问题的不同,必须采用不同的力学模型,这是研究工程力学问题的重要方法。

科学研究的过程就是认识客观世界的过程。人类对于自然界运动规律的认识,是在实践中逐渐由低级到高级、由简单到复杂发展的。工程力学的研究方法与任何一门科学的研究方法一样,都必须遵循认识过程中的客观规律。

工程力学的特点是理论体系严密完整,并与工程实际问题紧密相联,是一门理论性和应用性都很强的学科。在工程力学概念和体系的形成过程中,抽象化和数学演绎两种方法起到了重要的作用,即通过对生活和生产实践中各种现象的观察,经过分析、综合、归纳,



最终总结出力学的最基本规律，建立公理。在此基础上，经过抽象化处理建立力学模型，并从基本规律出发，应用数学演绎和逻辑推理的方法，得到具有物理意义和实用价值的定理和结论，形成理论体系，再通过实践来检验理论的正确性，这就是工程力学学科发展形成至今所走过的道路，也是工程力学的研究方法。

3. 工程力学的学习目的

作为一门专业基础课，工程力学主要讲述力学的基础知识和基本理论，以及处理工程力学问题的基本方法，为构件和机械的运动分析及强度计算提供必要的理论基础。

学习工程力学不仅要深刻理解力学的基本概念和基本定律，还要熟练掌握由这些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。只有这样，才能更好地培养自己处理实际工程力学问题的能力。



第一篇

静力学

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。

力系是指作用于同一物体上的一群力。**平衡**是指物体机械运动中的一种特殊状态。若物体相对于惯性参考系静止或做匀速直线运动，则称此物体处于平衡状态。对于工程技术中的大多数问题来说，平衡是指物体相对于地球表面保持静止或做匀速直线运动。静置于地面的足球、匀速直线行驶的汽车等，都是物体处于平衡状态的实例。

物体平衡时，作用于其上的力系称为**平衡力系**。显然平衡力系中各力不是任意的，而应满足一定的条件，这些条件称为力系的**平衡条件**。研究物体在力系作用下的平衡规律，就是要研究作用在其上的力系成为平衡力系时所应满足的条件。因此，也可以说静力学是研究力系平衡条件的科学。

在静力学中，我们将研究以下三个问题。

(1) **物体的受力分析**：即分析某个物体共受几个力，以及每个力的大小、方向和作用点位置。

(2) **力系的等效替换**：为了研究一个复杂力系对物体的作用效应和力系的平衡条件，通常需要将复杂力系简化，即用一个最简单的力系来代替原有的复杂力系，并使其对物体的作用效应不变，这种简化方法称为力系的等效替换。若两个力系对物体的作用效应相同，则称二力系等效，或者称二力系为等效力系。在特殊情况下，如果一个力和一个力系等效，则称此力为此力系的合力，而力系中的各力均称为合力的分力。

(3) **力系的平衡条件**：即研究物体平衡时，作用在物体上的各力系所需满足的条件。

静力学在工程技术中有着广泛的应用。力系的平衡条件是工程中设计构件、结构和机器零件时进行静力学计算的基础。静力学将推导出各力系的平衡条件，建立平衡方程，并应用它来求解工程中的平衡问题。

第1章 静力学基础

学习目标

- ① 了解力、刚体的基本概念。
- ② 了解静力学公理。
- ③ 了解约束与约束反力的概念，以及工程中常见的约束类型。
- ④ 熟练掌握受力分析的方法，并能准确地画出受力图。

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力的概念

人们在日常生活和生产实践中，对力有许多感性认识。随着观察的不断深入，人们发现，力可以改变物体的运动状态。例如，原来静止的物体，在力的作用下，可以由静止开始运动；而原来运动的物体，在力的作用下，速度可以发生变化。人们的这些感性认识经过概括和总结，并提高到理性认识后，便形成了力的科学概念。

力是物体间的相互作用，在力学范围内，这种作用的效应是使被作用物体的运动状态发生变化，同时使该物体发生变形。其中，力使被作用物体的运动状态发生变化的效应称为**运动效应**，又称**外效应**；力使物体发生变形的效应称为**变形效应**，又称**内效应**。静力学仅限于研究刚体，不考虑物体的变形，故只涉及力的外效应，而不考虑力的内效应。关于力的内效应问题，将在本书材料力学部分进行探讨。

力对物体的作用效应取决于三个要素，即力的大小、方向和作用点，简称**力的三要素**。

力是一个既有大小又有方向的物理量，所以力是矢量。如图 1-1 所示，该矢量的长度按一定比例尺表示力的大小；矢量的箭头表示力的方向；矢量的始点或终点表示力的作用点；矢量所在的直线（即直线 mn ）表示力的作用线。



扫一扫

力的三要素

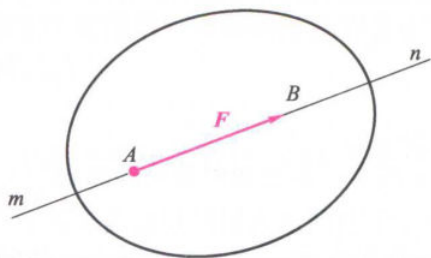


图 1-1

注意

书中矢量用加粗字母(如 \mathbf{F} , \mathbf{F}_1)表示, 而力的大小用普通字母(如 F , F_1)表示, 这两种符号代表的意义是不同的, 初学者需要特别注意。

为了测定力的大小, 必须确定力的单位。在国际单位制(SI制)中, 力的单位为 N 或 kN, 其中 $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$ 。

1.1.2 刚体的概念

刚体是指在任何情况下都不会变形的物体。这一特征表现为刚体内任意两点的距离永远保持不变。显然, 刚体并不存在, 它是人们在认识客观世界时, 把实际物体抽象化后所得到的理想模型。

实际上, 任何物体受力后都会有或多或少的变形。但是一些物体, 如工程结构的构件或机器的零件等, 受力后变形非常微小。在这种情况下, 对于静力学研究的问题来讲, 忽略变形不仅不会对研究结果产生明显的影响, 而且还可以使问题大大简化。此时, 把实际物体抽象为刚体是合理和必要的。

静力学的研究对象仅限于刚体, 故静力学又称为刚体静力学。变形体将在材料力学、弹性力学等内容中研究。应当指出的是, 一切变形体平衡问题的研究都是以刚体静力学理论为基础的。

1.1.3 力系和平衡的概念

力系是指作用于物体上的所有力的集合。根据力的作用线分布的不同, 力系可分为平面力系和空间力系。各力的作用线位于同一平面内的力系称为**平面力系**; 各力的作用线不在同一平面内的力系称为**空间力系**。有关这部分内容, 将在以后的章节中详细介绍。

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或做匀速直线运动的状态。平衡是物体机械运动的一种特殊形式。在宇宙中没有绝对的平衡, 一切平衡都是相对的、暂时的。

1.2 静力学公理

公理是人们在生产生活实践中,将长期积累的经验通过反复实践检验,所总结出的最基本、最普遍的客观规律。静力学公理是人们经过反复实践总结出来的最基本的力学规律。

公理 1 (二力平衡公理):作用在同一刚体上的两个力使刚体保持平衡的充分必要条件是:两个力的大小相等、方向相反,且作用在同一直线上(简称等值、反向、共线)。

二力平衡公理用矢量公式表示即为

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2 \quad (1-1)$$

公理 1 表明了作用在刚体上的最简单力系平衡时必须满足的条件。工程上将只受两个力作用而处于平衡状态的构件称为**二力构件**或**二力杆**。根据二力平衡公理,作用于二力构件上的两个力一定沿作用点的连线方向,如图 1-2 所示。

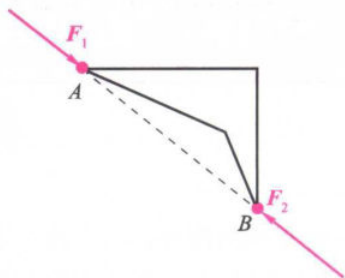


图 1-2

公理 2 (力的平行四边形法则):作用在物体上同一点的两个力可以合成为仍作用于该点的一个合力,合力的大小和方向由以这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线矢量来确定。

如图 1-3 (a) 所示,合力等于两个分力的矢量和,用矢量公式表示即为

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

公理 2 给出了两个共点力的合成方法。如图 1-3 (b) 所示,由 \boldsymbol{F}_R , \boldsymbol{F}_1 和 \boldsymbol{F}_2 构成的三角形称为**力三角形**,这种求合力的方法称为**力的三角形法则**。

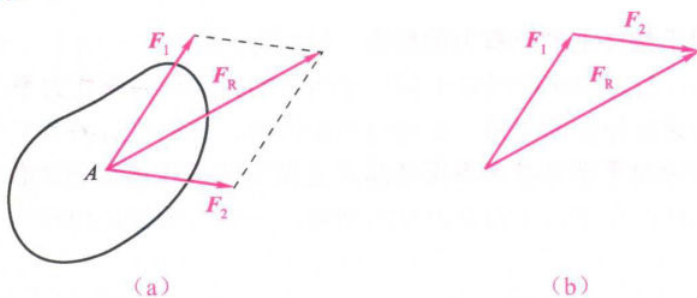


图 1-3



扫一扫

力的平行四边形法则

为力的三角形法则。

公理3 (加减平衡力系原理): 在作用于刚体的任意力系上, 加上或减去任意平衡力系, 并不改变原力系对刚体的作用效应。

公理3是研究力系等效替换的理论依据。根据加减平衡力系原理, 可以导出以下推论。

推论1 (力的可传递性): 作用于刚体上的力可以沿其作用线移动至该刚体内的任意一点, 而不改变力对刚体的作用效应。

推论1表明, 作用于刚体的二力, 若矢量相等且其作用线重合, 则它们各自对刚体单独作用的效果完全相同。

推论2 (三力平衡汇交原理): 作用于刚体上互不平行的三个力使刚体处于平衡时, 这三个力的作用线必在同一平面内, 且作用线汇交于同一点。

证明: 如图1-4所示, 在刚体的 A, B, C 三点上分别作用有三个力 F_1, F_2, F_3 , 其互不平行, 且为平衡力系。根据力的可传递性, 将力 F_1 和 F_2 移动到作用线的交点 O , 然后根据力的平行四边形法则, 得到合力 F_{12} 。则力 F_{12} 和 F_3 必为平衡力系。根据二力平衡公理, 力 F_{12} 和 F_3 必共线。又因 F_{12} 与 F_1 和 F_2 共面, 且相交于点 O , 故 F_3 亦与 F_1 和 F_2 共面, 且相交于点 O 。

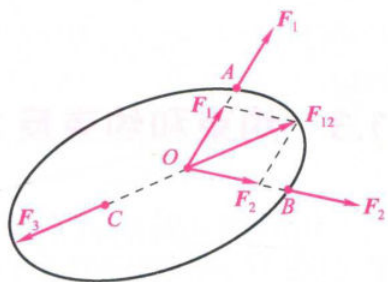


图 1-4

公理4 (作用力与反作用力公理): 任何两个物体相互作用的作用力和反作用力总是大小相等, 方向相反, 沿着同一条直线, 并分别作用在两个物体上。

如图1-5(a)所示, 重为 P 的球放在支承面上。此时, 球对支承面的作用力为 F_N , 支承面同时给球一个反作用力 F'_N , 如图1-5(b)所示。

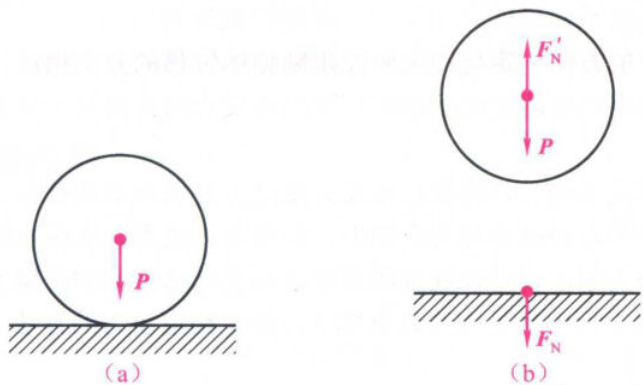


图 1-5

公理4概括了物体间相互作用的关系, 表明作用力和反作用力总是成对出现。由于作用力和反作用力分别作用在两个物体上, 故不可视为平衡力系。

公理5 (刚化公理): 变形体在某一力系作用下处于平衡时, 若将此变形体视为刚体(刚化), 则平衡状态保持不变。

公理5表明, 当变形体处于平衡时, 必然满足刚体的平衡条件。因此, 可以将刚体的平衡条件应用到变形体静力学中。但应注意, 刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件而