

高等学校土木建筑专业
|应用型本科系列规划教材|

(第2版)

理论力学

金 江 ◎ 主编

L I L U N L I X U E



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

学校土木建筑专业应用型本科系列规划教材

理论力学

主 编 金 江

副主编 袁继峰 葛文璇

参 编 (以拼音为序)

金春花 钱声源 徐小丽

许 薇 张正维



东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 简 介

本书是编写组全体老师长期教学心得体会的总结,具有逻辑清晰、通俗易懂、结合实际、宜于教学的特点。本书内容是按照教育部力学基础课程教学指导分委员会在 2008 年制定的“理论力学课程教学基本要求”编写的,内容包括静力学(含静力学公理、物体体系的受力分析、平面力系、空间力系、摩擦等),运动学(含点的运动学、刚体简单运动、点的合成运动、刚体平面运动等),动力学(含质点动力学基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理等)。

本书可作为高等学校工科本科的工程力学、机械工程、土木工程、交通工程、航空航天工程等专业理论力学的教材,也适合作为高职高专、成人高校相应专业的自学和函授教材,还可以作为有关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 金江主编. —2 版. —南京:东南大学出版社,
2019.1

ISBN 978-7-5641-7867-3

I. ①理… II. ①金… III. ①理论力学 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153456 号

理论力学(第 2 版)

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人:江建中

责任编辑:史建农 戴坚敏

网 址:<http://www.seupress.com>

电子邮箱:press@seupress.com

经 销:全国各地新华书店

印 刷:南京玉河印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.75

字 数:477 千字

版 次:2019 年 1 月第 2 版

印 次:2019 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-7867-3

印 数:1~3 000 册

定 价:49.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

高等学校土木建筑专业应用型本科系列 规划教材编审委员会

名誉主任 吕志涛(院士)

主任 蓝宗建

副主任 (以拼音为序)

陈蓓 陈斌 方达宪 汤鸿

夏军武 肖鹏 宗兰 张三柱

秘书长 戴坚敏

委员 (以拼音为序)

程晔 戴望炎 董良峰 董祥

郭贯成 胡伍生 黄春霞 贾仁甫

金江 李果 李宗琪 刘殿华

刘桐 刘子彤 龙帮云 王丽艳

王照宇 徐德良 于习法 余丽武

喻骁 张靖静 张伟郁 张友志

章丛俊 赵冰华 赵才其 赵玲

赵庆华 周桂云 周 佶

总前言

国家颁布的《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》指出,要“适应国家和区域经济社会发展需要,不断优化高等教育结构,重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模”;“学生适应社会和就业创业能力不强,创新型、实用型、复合型人才紧缺”。为了更好地适应我国高等教育的改革和发展,满足高等学校对应用型人才的培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等的要求,东南大学出版社携手国内部分高等院校组建土木建筑专业应用型本科系列规划教材编审委员会。大家认为,目前适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对于培养应用型人才的院校来说起点偏高、难度偏大、内容偏多,且结合工程实践的内容往往偏少。因此,组织一批学术水平较高、实践能力较强、培养应用型人才的教学经验丰富的教师,编写出一套适用于应用型人才培养的教材是十分必要的,这将有力地促进应用型本科教学质量的提高。

经编审委员会商讨,对教材的编写达成如下共识:

一、**体例要新颖活泼。**学习和借鉴优秀教材特别是国外精品教材的写作思路、写作方法以及章节安排,摒弃传统工科教材知识点设置按部就班、理论讲解枯燥乏味的弊端,以清新活泼的风格抓住学生的兴趣点,让教材为学生所用,使学生对教材不会产生畏难情绪。

二、**人文知识与科技知识渗透。**在教材编写中参考一些人文历史和科技知识,进行一些浅显易懂的类比,使教材更具可读性,改变工科教材艰深古板的面貌。

三、**以学生为本。**在教材编写过程中,“注重学思结合,注重知行统一,注重因材施教”,充分考虑大学生人才就业市场的发展变化,努力站在学生的角度思考问题,考虑学生对教材的感受,考虑学生的学习动力,力求做到教材贴合学生实际,受教师和学生欢迎。同时,考虑到学生考取相关资格证书的需要,教材中

还结合各类职业资格考试编写了相关习题。

四、理论讲解要简明扼要,文例突出应用。在编写过程中,紧扣“应用”两字创特色,紧紧围绕着应用型人才培养的主题,避免一些高深的理论及公式的推导,大力提倡白话文教材,文字表述清晰明了、一目了然,便于学生理解、接受,能激起学生的学习兴趣,提高学习效率。

五、突出先进性、现实性、实用性、可操作性。对于知识更新较快的学科,力求将最新最前沿的知识写进教材,并且对未来发展趋势用阅读材料的方式介绍给学生。同时,努力将教学改革最新成果体现在教材中,以学生就业所需的专业知识和操作技能为着眼点,在适度的基础知识与理论体系覆盖下,着重讲解应用型人才培养所需的知识点和关键点,突出实用性和可操作性。

六、强化案例式教学。在编写过程中,有机融入最新的实例资料以及操作性较强的案例素材,并对这些素材资料进行有效的案例分析,提高教材的可读性和实用性,为教师案例教学提供便利。

七、重视实践环节。编写中力求优化知识结构,丰富社会实践,强化能力培养,着力提高学生的学习能力、实践能力、创新能力,注重实践操作的训练,通过实际训练加深对理论知识的理解。在实用性和技巧性强的章节中,设计相关的实践操作案例和练习题。

在教材编写过程中,由于编写者的水平和知识局限,难免存在缺陷与不足,恳请各位读者给予批评斧正,以便教材编审委员会重新审定,再版时进一步提升教材的质量。本套教材以“应用型”定位为出发点,适用于高等院校土木建筑、工程管理等相关专业,高校独立学院、民办院校以及成人教育和网络教育均可使用,也可作为相关专业人士的参考资料。

高等学校土木建筑专业应用型
本科系列规划教材编审委员会

前 言

本书是在编写组全体老师教学讲义的基础上修改而成的。经过长期的理论力学的教学实践,我们学习其他教材的先进之处,结合新时期工科本科培养卓越工程师的要求,总结我们自己教学实践中的经验教训,编写并不断修改讲义,并在此基础上编成本书。

本书具有以下特色:

(1) 紧密结合现代工程、生产实践和实际生活,充分反映力学在现代工程、生产实践和实际生活中的应用和基础主导作用。

(2) 与绝大多数国内教材不同,本书力图反映理论力学知识体系的来源和历史沿革,并同时简要介绍了作出显著贡献的力学家的生平。

(3) 本书的语言在保持严谨、逻辑的基础上,使叙述能做到简洁明了、通俗易懂,更试图使语言具有一定的趣味性。

参与编写本书的作者有金江(南通大学,编写引言、第1章和第13章),钱声源(东南大学,编写第2章和第4章),葛文璇(南通大学,编写第3章和第5章),许薇(南通大学,编写第6章和第10章),金春花(南通大学,编写第7章和第9章),徐小丽(南通大学,编写第8章),张正维(南通大学,编写第11章),袁继峰(南京理工大学泰州科技学院,编写第12章和第14章)。

陈明和凌庚两位同学绘制了本书的部分插图。

本书在编写过程中参考了一些资料,在此向原作者表示感谢。由于作者水平所限,书中难免存在不足甚至错误,敬请读者提出意见,以便再版时改正。

编 者

2012 年 12 月

第 2 版前言

本书第 1 版出版后,我们听取了许多使用该教材的教师和读者的意见,对其进行了修改。

本版中,在保留第 1 版教材理论联系工程和生活实际、阐释概念深入浅出、介绍知识体系发展的历史沿革、说理透彻、叙述通俗易懂等特色的基础上,对第一版中的全部内容做了必要的增添和删减,使各章内容在全书中所占篇幅分布更趋均衡,同时也订正了第 1 版中的印刷错误。

本版的修改工作是由金江教授执笔完成的,修改和订正的内容曾由部分该教材编写者和使用教师参加讨论。

本书虽经修改,但由于水平所限,错误仍在所难免,衷心希望尊敬的读者提出批评和指正,以利于教材质量的进一步提高。

编 者

2018 年 12 月

目 录

第一篇 静力学

1 静力学公理和物体受力分析	3
1.1 静力学公理及其推论	3
1.2 工程中常见约束和约束力	5
1.3 物体的受力分析和受力图	8
思考题	11
习题	11
2 平面力系	13
2.1 力	13
2.2 平面力偶	16
2.3 平面力系的简化	18
2.4 平面力系的平衡条件和平衡方程	26
2.5 物体系的平衡,静定和静不定问题	32
2.6 平面简单桁架的内力计算	37
思考题	41
习题	42
3 空间力系	49
3.1 力在直角坐标轴上的投影	49
3.2 力对点的矩和力对轴的矩	52
3.3 空间力偶	55
3.4 空间任意力系的简化	59
3.5 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	64
3.6 重心	71
思考题	78
习题	78
4 摩擦	81
4.1 滑动摩擦	81
4.2 摩擦角和自锁现象	83
4.3 滚动摩阻的概念	86

4.4 考虑摩擦时物体系统的平衡问题·····	90
思考题·····	96
习题·····	97

第二篇 运动学

5 点的运动学·····	102
5.1 矢量法·····	102
5.2 直角坐标法·····	103
5.3 自然法·····	106
思考题·····	113
习题·····	113
6 刚体的简单运动·····	116
6.1 刚体的平行移动·····	116
6.2 刚体绕定轴的转动·····	117
6.3 转动刚体内各点的速度和加速度·····	118
6.4 轮系的传动比·····	121
6.5 以矢量表示角速度和角加速度·以矢积表示点的速度和加速度·····	122
思考题·····	124
习题·····	125
7 点的合成运动·····	127
7.1 相对运动·牵连运动·绝对运动·····	127
7.2 点的速度合成定理·····	128
7.3 牵连运动是平移时点的加速度合成定理·····	131
7.4 牵连运动是定轴转动时点的加速度合成定理·科氏加速度·····	133
思考题·····	138
习题·····	139
8 刚体的平面运动·····	143
8.1 刚体平面运动的概述和运动分解·····	143
8.2 求平面图形内各点速度的基点法·····	145
8.3 求平面图形内各点速度的瞬心法·····	148
8.4 用基点法求平面图形内各点的加速度·····	151
8.5 运动学综合应用举例·····	154
思考题·····	157
习题·····	158

第三篇 动力学

9 质点动力学的基本方程	162
9.1 动力学的基本定律	162
9.2 质点运动微分方程	164
思考题	167
习题	167
10 动量定理	170
10.1 动量与冲量	170
10.2 动量定理	173
10.3 质心运动定理	178
思考题	182
习题	182
11 动量矩定理	185
11.1 质点和质点系的动量矩	185
11.2 动量矩定理	188
11.3 刚体绕定轴的转动微分方程	195
11.4 刚体对轴的转动惯量	198
11.5 质点系相对于质心的动量矩定理	206
11.6 刚体的平面运动微分方程	209
思考题	214
习题	216
12 动能定理	221
12.1 力的功	221
12.2 质点和质点系的动能	226
12.3 动能定理	228
12.4 功率 · 功率方程 · 机械效率	231
12.5 势力场 · 势能 · 机械能守恒定律	233
12.6 普遍定理的综合应用举例	237
思考题	243
习题	243
13 达朗贝尔原理	249
13.1 惯性力 · 质点的达朗贝尔原理	249
13.2 质点系的达朗贝尔原理	250

13.3	刚体惯性力系的简化.....	251
13.4	绕定轴转动刚体的轴承动约束力.....	257
	思考题.....	259
	习题.....	260
14	虚位移定理.....	264
14.1	约束·虚位移·虚功.....	264
14.2	虚位移原理.....	267
	思考题.....	274
	习题.....	274
	参考答案.....	278
	参考文献.....	287

第一篇 静力学

引言

静力学是力学的一个分支,在工程技术中有着广泛的应用,它主要研究物体在力的作用下处于平衡的规律。

平衡是物体机械运动的特殊形式,是指物体相对于惯性参照系处于静止或做匀速直线运动的状态,即加速度为零的状态都称为平衡。对于一般工程问题,平衡状态是以地球为参照系确定的。

力是指物体间的机械作用,它是物体的机械运动状态发生变化的原因。力系则是指作用在物体上的一群力。

在静力学中所指的物体都是刚体,即在力的作用下不会发生变形的物体。刚体是一个理想化的力学模型。之所以要采用这种模型,是因为在考虑物体的平衡问题时,物体受力产生的变形对其影响很小,作为问题的次要因素可以忽略。

“静力学”一词是法国数学家、力学家 P. 伐里农于 1725 年引入的。

从现存的许多古代建筑,如埃及的金字塔、古希腊和古罗马的众多神庙、中国的长城,可以推测当时的建筑者已使用了某些由经验得来的静力学知识,并且为了举高和搬运重物,已经能运用杠杆、滑轮和斜面等简单机械。

通过力学史的研究可以得知,静力学的发展始于公元前 3 世纪,至公元 16 世纪伽利略奠定了动力学基础。

阿基米德是使静力学成为一门真正科学的奠基者。他创立了杠杆理论,并且奠定了静力学的主要原理。他还是第一个使用严密推理来求出平行四边形、三角形和梯形物体的重心位置的人。

著名的意大利艺术家、物理学家和工程师达·芬奇对静力学有着巨大的贡献。在他看来,实验和运用数学解决力学问题有巨大意义。他应用力矩法解释了滑轮的工作原理;应用虚位移原理的概念来分析起重机构中的滑轮和杠杆系统;研究了物体的斜面运动和滑动摩擦阻力,首先得出了滑动摩擦阻力同物体的摩擦接触面的大小无关的结论。

在对物体在斜面上的力学问题的研究基础上,1586 年,荷兰的斯蒂文在其专著《静力学基础》一书中最早提出并论证了力的分解与合成原理,即力的平行四边形法则。

分析静力学是意大利数学家、力学家 J. L. 拉格朗日提出来的,他在著作《分析力学》中,根据虚位移原理,用严格的分析方法叙述了整个力学理论。虚位移原理早在 1717 年已由伯努利提出,而应用这个原理解决力学问题的方法的进一步发展和对它的数学研究却是拉格朗日的功绩。

我国古代科学家对静力学有着重大的贡献。春秋战国时期伟大的哲学家墨翟在他的代

表作《墨经》中,对杠杆、轮轴和斜面作了分析,提出了杠杆的平衡原理。

静力学中主要研究下面 3 个问题:

(1) 物体的受力分析

分析某个物体共受几个力作用及每个力的作用位置 and 方向。

(2) 力系的简化

将作用在物体上的一个力系用另一个与它等效的力系来替换,称为力系的等效替换。

经常是用一个简单的力系来等效替换一个复杂力系,称为力系的简化。

(3) 建立各种力系的平衡条件

研究作用在物体上的各种力系达到平衡所需满足的条件。

1 静力学公理和物体受力分析

众所周知,欧几里得几何学是在尽可能少的初始概念和一组不加证明的公理的基础上,逻辑推理成的一个演绎系统。与欧几里得几何学类似,理论力学也是在 5 个公理的基础上,通过这种公理化方法建成的演绎体系。本章除了阐述静力学公理外,还要介绍工程中常见的约束和物体受力分析,同时介绍力学建模的概念。

1.1 静力学公理及其推论

所谓公理,也就是经过人们长期实践检验、不需要证明同时也无法去证明的客观规律。

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的 2 个力,可合成一个合力,合力的作用点仍在该点,其大小和方向由以此两力为边构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-1(a)所示,即合力等于分力的矢量和。

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

合力的大小和方向也可通过形式上更简单的力三角形法则得到,即自任一点以此两力为两边作力三角形,第三边即所求合力,如图 1-1(b)、(c)所示。

此公理给出了力系简化的基本方法。平行四边形法则是力的合成法则,也是力的分解法则。

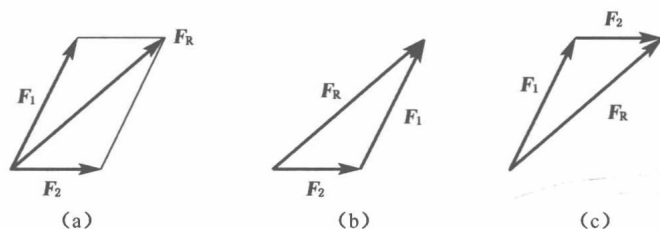


图 1-1

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的 2 个力,使刚体平衡的必要和充分条件是:2 个力的大小相等,方向相反,作用线沿同一直线。

此公理揭示了最简单的力系平衡条件。只在两力作用下平衡的刚体称为二力体或二力构件。当构件为杆件时称为二力杆。

公理 3 加减平衡力系原理

在已知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。

此公理是研究力系等效的重要依据。

根据上述公理可导出下列推理：

推理 1 力的可传性

作用在刚体上某点的力，可沿其作用线移动，而不改变它对刚体的作用。

证明：在刚体的 A 点作用有力 F ，如图 1-2(a) 所示。根据加减平衡力系原理，在力的作用线上任取一点 B ，并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F_2 = -F_1 = F$ ，如图 1-2(b) 所示。由于 F 和 F_1 也是一个平衡力系，可以除去，这样只剩下 F_2 ，如图 1-2(c) 所示，可以看成 F 沿其作用线移动到了点 B 。

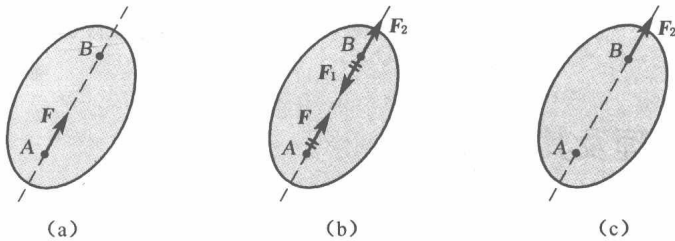


图 1-2

由此可知，对刚体来说，力的作用点已不是决定力的作用效果的要素，它已被作用线所替代。因此作用在刚体上的力的三要素为：力的大小、方向和作用线。所以，力是有固定作用线的滑动矢量。

推理 2 三力平衡汇交定理

当刚体受到同平面内不平行的三力作用而平衡时，三力的作用线必汇交于一点。

证明：如图 1-3 所示，在刚体的 A, B, C 三点上，分别作用 3 个力 F_1, F_2 和 F_3 ，这 3 个力组成平衡力系。根据推理 1 力的可传性，把力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ，然后由力的平行四边形法则，得到合力 F_{12} 。这个合力 F_{12} 与 F_3 平衡，必然共线，所以 F_3 也必定通过 F_1 和 F_2 的汇交点 O 。

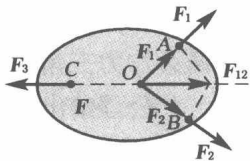


图 1-3

公理 4 作用和反作用定律

两个物体间的相互作用力，大小相等，方向相反，作用线沿同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。

此公理概括了物体间相互作用的关系，表明作用力与反作用力成对出现，并分别作用在不同的物体上。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡时，如将其刚化为刚体，其平衡状态保持不变。

此公理提供了将变形体看作刚体的条件。将拉力平衡的绳索刚化为刚性杆，其平衡状态不变，如图 1-4 所示。

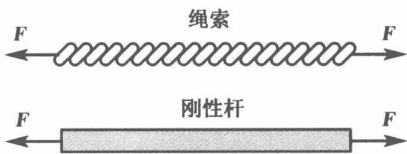


图 1-4

但反之,处于压力平衡下的刚杆若换成绳索,就不能平衡。

静力学的全部理论都可以由上述 5 个公理演绎推证而成,这既说明了理论体系的完整和严密,也说明了理论体系的成熟。

1.2 工程中常见约束和约束力

有些物体,如飞翔的鸟类,飞行的飞机、火箭和人造卫星等,它们在空间的运动没有受到其他物体预加的限制,称为自由体;而另一类物体,如在轨道上行驶的火车、在轴承中转动的电机转子、支承在桥墩上的公路和铁路桥梁等,它们在空间的运动受到其他物体预加的限制,称为非自由体。对非自由物体运动预加限制的其他物体称为约束。上述轨道对火车、轴承对转子、桥墩对梁等都是约束。

从力学角度来看,约束对非自由物体的作用,实际是通过力来实现的,这种力称为约束力。很明显,约束力的方向必定与该约束所能阻碍的运动或位移方向相反。

一般物体除了受到约束力的作用外,往往还要受到所谓主动力的作用。主动力是指约束力以外的其他力,又称载荷,如物体的重力、房屋建筑所受的风力、大坝所受的水力、电机转子所受的电磁力等。

下面介绍一些工程中常见的约束及相应的约束力。

1.2.1 光滑接触面的约束

被约束物体与约束体之间有接触面,且摩擦很小,可以忽略不计,看成是理想光滑接触面。例如,支持物体的固定面(图 1-5),啮合齿轮的齿面(图 1-6)。

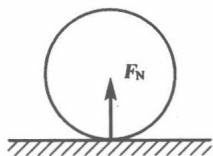


图 1-5

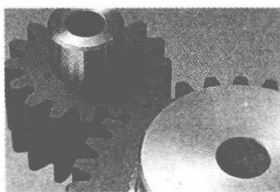


图 1-6

这类约束只能阻碍物体沿接触面法线方向往约束内部的位移,但不能限制物体沿接触面切线方向的位移。因此,光滑支承面对物体的约束力,作用在接触点,沿接触面公法线方向,并指向被约束的物体,这种约束力称为法向约束力,用 F_N 表示(N-normal, 法向),如图 1-5 所示。

1.2.2 柔索约束

由柔软的绳子、皮带、链条等构成的约束称为柔索约束。如吊住重物的钢丝绳(图 1-7)、皮带轮上的皮带(图 1-8)等。