



普通高等学校土木工程专业创新系列规划教材



理论力学

主编 赵元勤
主审 金英玉



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

普通高等学校土木工程专业创新系列规划教材

理论力学

主 编 赵元勤
副主编 周显波
主 审 金英玉



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

理论力学/赵元勤主编. —武汉:武汉大学出版社,2014.7
普通高等学校土木工程专业创新系列规划教材
ISBN 978-7-307-13109-5

I. 理… II. 赵… III. 理论力学—高等学校—教材 IV. O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 068630 号

责任编辑:余 梦

责任校对:方竞男

装帧设计:吴



出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本:850×1168 1/16 印张:15.75 字数:430 千字

版次:2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-13109-5 定价:31.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

普通高等学校土木工程专业创新系列规划教材 编审委员会

(按姓氏笔画排名)

主任委员:刘殿忠

副主任委员:张利 孟宪强 金菊顺 郑毅 秦力

崔文一 韩玉民

委员:马光述 王睿 王文华 王显利 王晓天

牛秀艳 白立华 吕文胜 仲玉侠 刘伟

刘卫星 李利 李栋国 杨艳敏 邱国林

宋敏 张自荣 邵晓双 范国庆 庞平

赵元勤 侯景鹏 钱坤 高兵 郭靳时

程志辉 蒙彦宇 廖明军

总责任编辑:曲生伟

秘书长:蔡巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。



本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录www.stmpress.cn下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

前 言

本书为“普通高等学校土木工程专业创新系列规划教材”之一。

本书根据高等学校土木工程学科专业指导委员会颁布的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的基本要求,并根据培养应用型人才的教学需要,结合目前学生状况及培养人才的规格,由武汉大学出版社组织有多年办学经验的学校,以及具有丰富教学实践经验的教师编写而成。

本书的指导思想是教学内容有的放矢,力求突出重难点但不失知识体系;例题、习题难度适中,或结合实际,或贴近本质,力求做到简洁易懂。本书形成了自己的特色,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。本书以基础理论知识为前提,以够用为度,以基本理论为主,不过多地强调理论推导,主张掌握基本原理,并辅之相应的例题、习题来加深学生的理解,使学生掌握基本的方法。

本书结合工程实际的应用,注重与同类教材的区别,着重于对学生实际能力的培养,突出理论与实践相结合的特点,培养学生综合运用所学知识分析与解决实际问题的能力及创新精神。

本书由长春建筑学院赵元勤担任主编,长春建筑学院周显波担任副主编,吉林建筑大学城建学院朗英彤担任参编。全书由赵元勤负责修订和统稿。

具体编写分工为:

长春建筑学院,赵元勤(前言、绪论、第4~9章);

长春建筑学院,周显波(第10~14章);

吉林建筑大学城建学院,郎英彤(第1~3章)。

长春建筑学院金英玉教授担任本书主审,并对本书的编写提出了许多宝贵建议,特致谢意。

由于时间仓促,加之编者水平有限,书中难免有不当和欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014年3月

目 录

0 绪论	1
------	---

上篇 静力学

1 静力学基础	5
---------	---

- 1.1 刚体与力的基本概念/5
- 1.2 静力学公理/6
- 1.3 力的合成、分解与力在坐标轴上的投影/9
- 1.4 力矩/10
- 1.5 力偶/13
- 1.6 主动力与约束力/15
- 1.7 物体的受力简图/19
- 知识归纳/22
- 思考题/23
- 习题/23
- 参考文献/25

2 平面力系的等效简化	26
-------------	----

- 2.1 力系的分类/26
- 2.2 力的平移定理/27
- 2.3 平面力系的等效简化/28
- 知识归纳/35
- 思考题/36
- 习题/36
- 参考文献/38

3 平面力系的平衡方程	39
-------------	----

- 3.1 平面汇交力系的平衡方程/39
- 3.2 力偶系的平衡方程/42
- 3.3 平面一般力系的平衡条件与平衡方程/44
- 3.4 静定与超静定的概念/47
- 3.5 物体系的平衡/47
- 3.6 平面简单桁架/50
- 知识归纳/57

思考题/58

习题/58

参考文献/62

4 空间力系

63

4.1 空间汇交力系/63

4.2 空间任意力系/68

4.3 空间力系的简化和合成/70

4.4 空间力系的平衡方程及其应用/72

4.5 重心/75

知识归纳/80

思考题/81

习题/82

参考文献/85

5 摩擦及考虑摩擦的平衡问题

86

5.1 滑动摩擦/87

5.2 摩擦角与自锁现象/88

5.3 考虑摩擦时的平衡分析/89

5.4 滚动摩擦/91

知识归纳/94

思考题/95

习题/95

参考文献/98

中篇 运动学

6 点的运动学

101

6.1 矢量法/101

6.2 直角坐标法/103

6.3 自然坐标法/107

知识归纳/114

思考题/115

习题/115

参考文献/118

7 刚体的基本运动

119

7.1 刚体的平动/119

7.2 刚体的定轴转动/120

知识归纳/123

思考题/124

习题/124

参考文献/127

8 点的合成运动

128

8.1 点的速度合成定理/128

8.2 牵连运动为平动时点的加速度合成/132

8.3 牵连运动为转动时点的加速度合成/135

知识归纳/139

思考题/139

习题/140

参考文献/143

9 刚体的平面运动

144

9.1 刚体平面运动的概念与平面运动方程/144

9.2 平面图形上各点的速度分析/146

9.3 平面图形上各点的加速度分析/152

知识归纳/155

思考题/155

习题/155

参考文献/159

下篇 动力学

10 质点动力学的基本方程

163

10.1 动力学基本定律/163

10.2 质点的运动微分方程/164

10.3 质点动力学的两类基本问题/165

知识归纳/169

思考题/170

习题/170

参考文献/172

11 动量定理

173

11.1 动力学普遍定理概述/173

11.2 质点的动量定理/173

11.3 质点系的动量定理/176

11.4 质心运动定理/178

知识归纳/182

思考题/183

习题/183

参考文献/185

12 动量矩定理

186

12.1 质点的动量矩定理/186

12.2 质点系的动量矩定理/188

12.3 刚体的定轴转动微分方程/191

12.4 转动惯量/194

12.5 质点系相对质心的动量矩定理/196

12.6 刚体的平面运动微分方程/198

知识归纳/200

思考题/201

习题/201

参考文献/204

13 动能定理

205

13.1 力的功/205

13.2 质点的动能定理/207

13.3 质点系的动能定理/209

知识归纳/216

思考题/217

习题/217

参考文献/220

14 达朗贝尔原理

221

14.1 质点的惯性力/221

14.2 达朗贝尔原理/222

14.3 刚体惯性力系的简化/225

知识归纳/230

思考题/230

习题/231

参考文献/232

习题参考答案

233



绪 论

(1) 理论力学的研究对象和内容

在客观世界中,存在各种各样的物质运动,例如发热、发光和产生电磁场等物理现象,化合和分解等化学变化,以及人的思维活动等。

物体在空间的位置常常随着时间的变化而改变,这种运动称为机械运动。机械运动是人们生活和生产实践中最常见、最简单的一种运动。其中,平衡是机械运动的特殊情况。物质的各种运动形式在一定的条件下可以相互转化,而且在高级和复杂的运动中,往往存在着简单的机械运动。

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

本课程研究的内容是速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于经典力学的范畴。宏观物体速度远小于光速的运动是日常生活及一般工程中最常遇到的,因此经典力学有着最广泛的应用。至于速度接近光速的物体和基本粒子的运动,则必须用相对论和量子力学的观点才能完善地予以解释。理论力学所研究的运动则是这种运动中最一般、最普遍的规律,是各门力学分支的基础。

本课程的内容包括以下三个部分:

静力学——主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条件;同时也研究物体受力的分析方法,以及力系简化的方法等。

运动学——只从几何的角度来研究物体的运动(如轨迹、速度和加速度等),而不研究引起物体运动的物理原因。

动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。

(2) 理论力学的研究方法

研究科学的过程,就是认识客观世界的过程,任何正确的科学研究方法,一定要符合辩证唯物主义的认识论。理论力学也必须遵循这个正确的认识规律进行研究和发

①人们在长期的生活、生产实践和科学实验中观察各种现象,进行分析、综合和归纳,逐渐总结出力学的最基本的规律。

从制造和使用的辘轳、杠杆、斜面和滑轮,到风车和水车等,人类对于机械运动有了初步的认识,并逐渐形成了如“力”和“力矩”等基本概念,以及如“二力平衡”“杠杆原理”“力的平行四边形法则”和“万有引力定律”等力学的基本规律。

例如,伽利略(1564—1642年)对自由落体和物体在斜面上的运动做了多次实验,引出“加速度”的概念。此外,如摩擦定律、动力学三定律等,都是建立在大量实验基础之上的。由此可见,实验是形成理论的重要基础。

②在对事物进行观察和实验的基础上,经过抽象化建立力学模型,形成概念,在基本规律的基础上,经过逻辑推理和数学演绎,建立理论体系。

客观事物都是具体的、复杂的,为找出其共同的规律性,必须抓住主要因素,舍弃次要因素,建立抽象化的力学模型。例如,忽略一般物体的微小变形,建立在力的作用下物体形状、大小均不改变的刚体模型;抓住不同物体间机械运动的相互限制的主要方面,建立一些典型的理想约束模型;为分析复杂的振动现象,建立弹簧质点的力学模型等。这种抽象化、理想化的方法,一方面简化了

所研究的问题,另一方面也更深刻地反映出事物的本质。当然,任何抽象化的模型都是相对的。当条件改变时,必须再考虑影响事物的新的因素,并建立新的模型。例如,在研究物体受外力作用而平衡时,可以忽略物体形状的改变,采用刚体模型,但要分析物体内部的受力状态或解决一些复杂体系的平衡问题时,还必须考虑到物体的变形,建立弹性体的模型。

生产实践中的问题是复杂的,不是零散的感性认识所能解决的。理论力学成功地运用逻辑推理和数学演绎的方法,由极少量最基本的公理出发,得到了从多方面揭示机械运动规律的定理和定律,建立了严密而完整的理论体系。

数学方法在理论力学的发展中起到了重大的支持和推动作用。近代计算机技术的发展和普及,不仅能完成力学问题中大量的繁杂的数值计算,而且在逻辑推理、公式推导等方面也是极有效的工具,如 MATLAB 语言等。

③实践是检验真理的唯一标准,将理论力学的理论应用于实践,在解释世界、改造世界中不断得到验证和发展。

实践中所遇到的新问题又是促进理论发展的源泉。经典力学理论在现实生活和工程中,被大量实践验证为正确,并在不同领域的实践中得到发展,形成了许多分支,如固体力学、弹塑性力学、流体力学、生物力学等。大到天体运动,小到基本粒子的运动,经典力学理论在实践中又都出现了矛盾,表现出真理的相对性。在新条件下,必须修正原有的理论,建立新的概念,进一步发展力学理论,才能正确指导实践,并改造世界。

(3)学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性、实践性均较强的专业基础课程。学习理论力学的目的如下:

①工程专业一般都要接触机械运动的问题。许多工程问题可以直接应用理论力学的基本理论去解决;有些比较复杂的问题,则需要用理论力学和其他专门知识共同来解决。因此学习理论力学能为解决工程问题打下一定的基础。

②理论力学不仅广泛应用于工程实际,而且也是诸多力学分支课程(如材料力学、结构力学、弹塑性力学、机械原理、机械设计、流体力学、断裂力学)及专业课程的必备理论基础。

③理论力学是人类长期进行科学实践的产物,有助于培养辩证唯物主义世界观,其知识体系中诸多方法、思路,既包括形象思维和抽象思维,又包括两种思维相结合以分析解决问题,如等效分析的方法,它们对学生创新能力的提高有很大的帮助。

· 上 篇 ·

静 力 学



静力学是研究物体在力的作用下平衡规律的科学。

所谓平衡,是指物体相对于惯性参照系处于静止或匀速直线运动的状态,也指此时作用于该物体全部力的状态。在地面上静止的建筑物、做匀速直线运动的汽车等都处于平衡状态。

在静力学中,将研究以下三个问题:

(1)物体的受力分析

对物体实际受力的情况进行分析,弄清有哪些力是促使物体运动的力,哪些力是阻碍物体运动的力。分析归纳各种约束类型对研究对象施加的约束力的方向,并绘制成物体的受力简图。

(2)力系的简化

将作用在物体上的一个复杂力系用另一个简单力系等效代替,而不改变原力系对物体作用的运动效应,这个过程称为力系的简化,其实质是力系的等效替换。

(3)力系的平衡条件及其应用

平衡是有条件的。当物体在力系作用下处于平衡状态时,作用在物体上的力系(平衡力系)需要满足一定的条件,称为力系的平衡条件。力系的平衡条件是设计构件、结构时静力计算的基础。

静力学在工程实际及后续课程中有着十分广泛的作用。

1 静力学基础

内容提要

本章主要内容包括刚体及力的基本概念、静力学公理,力的合成及分解、力在坐标轴上的投影,力矩、力偶及约束与约束反力、受力图。本章的教学重点为力的概念和静力学公理、力在平面直角坐标轴上的投影、力对点之矩的计算、合力矩定理、力偶的概念及性质、物体的受力分析和受力图;教学难点为力的矢量性、公理及推论的适用对象,力在坐标轴上投影的性质,力偶的概念及性质,约束构造和约束反力特点及受力图的画法。

能力要求

通过本章的学习,学生应掌握力的概念及表示方法,掌握公理和推论的适用对象,理解并掌握各种常见约束的构造及反力确定方法,掌握物体的受力分析方法和受力图的绘制方法及注意事项,理解静力学基本公理和推论,并掌握力的投影、力对点之矩的概念及计算。

1.1 刚体与力的基本概念

1.1.1 刚体

刚体(rigid body)是指在力的作用下不变形的物体。实际上任何物体在外力作用下总会发生或大或小的变形,但在研究某些问题时,例如物体在力作用下的平衡问题,物体的微小变形对研究这种问题的影响很小,可以作为次要因素而忽略不计。这时,我们就可以不考虑物体的变形,将物体视为不变形的刚体,从而使研究的问题得到简化。

1.1.2 力与力系

1.1.2.1 力的概念

力是物体相互间的一种机械作用,它能使物体的运动状态或形状发生改变。力对物体的作用效应包括两个方面:一是力使物体的运动状态发生改变,称为运动效应或外效应,例如静止在地面上的物体,当用力推时,它便开始运动;二是力使物体形状发生改变,称为变形效应或内效应,例如钢筋受到横向压力时将会发生弯曲变形等。研究刚体时只考虑力对物体的外效应,而研究变形固体时还要研究其内效应。

经验表明,力对物体作用的效应完全取决于力的大小、方向和作用点,通常称为力的三要素。如果改变了力的三要素中的任一要素,也就改变了力对物体的作用效应。

力是有方向的量,可以用矢量表示,一般用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示,它在图上可以用有向线段表示,线

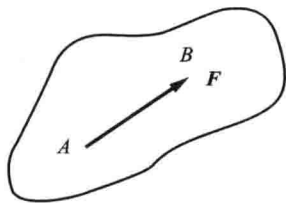


图 1-1

段的长度表示力的大小,线段所在的方位和箭头表示力的作用方向,线段的起点 A 或终点 B 表示力的作用点,如图 1-1 所示。在国际单位制中,力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN), $1\text{kN}=1\times 10^3\text{N}$ 。

1.1.2.2 力系的概念

一般情况下,一个物体总是同时受到若干个力的作用。人们把同时作用于一个物体上的一群力称为力系。

如果力系中所有力的作用线同在一条直线上时,称为共线力系;如果力系中所有力的作用线汇交于一点,称为汇交力系;如果力系中所有力的作用线分布在同一平面内,称为平面力系;如果力系中所有力的作用线不在同一平面内分布,称为空间力系;如果力系中所有力的作用线相互平行,称为平行力系;如果力系中所有力的作用线任意分布,称为任意力系或一般力系。

由若干力偶组成的力系称为平面力偶系。

1.1.3 刚体的平衡状态

平衡是指物体在力的作用下相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动的状态。在一般工程技术问题中,平衡常常都是相对于地球而言的。例如桥梁、机床的床身、水坝等建筑物,在水平直线轨道上做匀速运动的火车或匀速水平飞行的飞机等,都是在各种力作用下处于平衡状态。平衡是相对的、暂时的、有条件的,而变化则是绝对的、永恒的和无条件的。

1.1.4 平衡力系及平衡的条件

使物体处于平衡状态的力系称为平衡力系,此时作用在物体上的力系也称为平衡力系。物体在力系作用下处于平衡时,力系所必须满足的条件,称为力系的平衡条件,这种条件用数学公式表述时称作平衡方程。平衡方程的数目,有时是一个,有时是几个。利用它们可以计算处于平衡状态物体上的未知力的大小和方向,它们是建筑工程中力学分析的基础。

1.2 静力学公理

静力学公理是人们在长期的生活和生产实践中积累、总结出来,并通过实践反复验证的具有一般规律的定理和定律,是不能被更简单的原理再证明、也无须再证明的真理,是静力学的理论基础。

1.2.1 力的平行四边形法则(三角形法则)

作用在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这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定,这种合成方法称为力的平行四边形法则。如图 1-2(a)所示, $\mathbf{F}_R$ 为 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 的合力,即合力等于两个分力的矢量和,表达式为:

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

也可采用三角形法则确定合力,如图 1-2(b)所示,力的平行四边形法则是简单的力系简化,同时此法则也是力的分解法则。

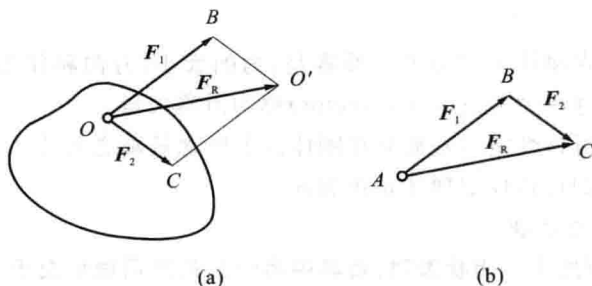


图 1-2

1.2.2 二力平衡公理

如图 1-3 所示,作用在同一刚体上的两个力,若这两个力的大小相等、方向相反,且作用在同一直线上,此力系为平衡力系。或者说,作用在同一刚体上的两个力若使物体平衡,则这两个力必大小相等、方向相反,且作用在同一直线上。即作用在同一刚体上的两个力,使刚体处于平衡状态的充分必要条件是:这两个力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线。如图 1-3 所示,矢量表示为:

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

利用此公理可以确定力的作用线位置,例如,刚体在两个力的作用下平衡,若已知两个力的作用点,则此作用点的连线可以确定力的作用线;二力平衡力系也是最简单的平衡力系。应当指出的是,二力平衡条件对刚体是必要且充分的,对变形体则是必要的,但不是充分的。

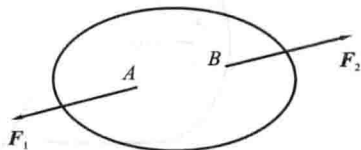


图 1-3

1.2.3 加减平衡力系公理

生活经验和工程实践证明,在作用于同一刚体的任意力系上,增加或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对该刚体的作用效果。这一公理表明,加减平衡力系后,新力系与原力系等效。此公理是研究力系等效替换与简化的重要依据。由此还可以推导出如下两个重要推论。

推论 1 力的可传性定理

由加减平衡力系公理可知,作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移动到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用效果。

证明:设力 $\mathbf{F}$ 作用于刚体上的 A 点,如图 1-4(a)所示。根据加减平衡力系公理,在该力的作用线上的任意 B 点加上一对平衡力 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$,且有 $F_1 = F_2 = F$ (即三力的大小相等),如图 1-4(b)所示。显然,图 1-4(a)与图 1-4(b)二力系为等效力系。由于图 1-4(b)中 $\mathbf{F}_2$ 与 $\mathbf{F}$ 又组成平衡力系,可除去,即得图 1-4(c)所示力系,同理图 1-4(b)与图 1-4(c)力系等效,最终图 1-4(a)与图 1-4(c)力系等效,但此时力已由刚体的 A 点沿作用线移到了 B 点,而未改变原力系对它的作用效果。

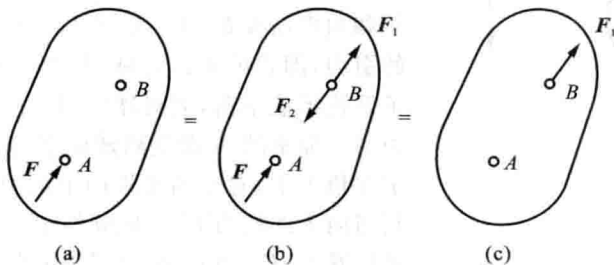


图 1-4