



理论力学

邵兴 梁醒培 王辉 张维祥 编著

清华大学出版社



理论力学

邵兴 梁醒培 王辉 张维祥 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书讲述理论力学的基本理论及应用。对传统的课程体系作了适当改进,力求物理概念明确、逻辑清晰。书中例题和习题丰富,增加了 MATLAB 在理论力学中的应用等新内容,以适应计算机日益普及的现状,提高利用现代计算技术求解工程问题的能力。

本书共 12 章。静力学 3 章,包括静力学公理和物体的受力分析、平面力系和空间力系的简化与平衡。运动学 3 章,包括点的运动和刚体的简单运动、点的合成运动、刚体的平面运动。动力学 6 章,包括动力学基本方程和动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理以及机械振动等内容。

本书适用于高等学校土木工程、机械类专业本科生使用,也可作为高等院校工科其他专业的教学参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/邵兴等编著. —北京:清华大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-302-20579-1

I. 理… II. 邵… 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(2009)第 151078 号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17.5 字 数:418 千字

版 次:2009 年 9 月第 1 版 印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:029603-01



为满足中等学时理论力学课程的教学需要及当前教学改革的要求,我们在多年教学实践的基础上,参考了近年出版的多部教材,编写了本书。对传统的课程内容的章节结构作了调整,力求理论严谨、逻辑清晰,叙述由浅入深,适当简化推导。本书用较多篇幅讲解理论力学的基本概念、基本理论、基本方法,重视物理概念及工程应用。同时,为了增强学生使用现代计算技术解决实际工程问题的能力,本书增加了 MATLAB 在理论力学中的应用等新内容。

随着高等教育的发展,根据学校类型和学生情况,对课程提出不同层次的要求是必要的,而理论力学的课时也有所减少,因此,需要一类以适量的篇幅讲授基本内容的新教材。本书的编写基于以下考虑。

(1) 采用传统的静力学、运动学、动力学课程体系。教学实践证明,这一教学体系是符合学生认识规律的。

(2) 将内容较少的章节合并,使得物理概念和基本理论更为清晰,同时可避免叙述过于详细,为学生留出思考的空间。书中讲述的一般性概念、定理及一些重要结论,文字下划波浪线,主要概念用黑体字表示。

(3) 设置典型例题,注意一题多解,避免同类型重复。精选习题和思考题,数量适当。每章都有小结,列出主要的知识点,便于读者明确重点,将所学知识系统化。

(4) 增加 MATLAB 在理论力学中的应用等内容,体现了现代计算方法在传统理论中的应用。

参加本书编写的有河南工业大学邵兴、梁醒培、王辉、张维祥、原方,中原工学院孙玉周。邵兴担任主编。其中,绪论,第 1,2,4,5,6,7,8 章由邵兴编写;第 9,10,11 章及习题答案由张维祥编写;第 3,12 章,附录 A,附录 B 由孙玉周编写。梁醒培、王辉、原方等人也参加了部分编写工作和校核工作。

由于作者水平有限,本书不当与错误之处在所难免,恳请读者指正。

编 者

2008 年 11 月



绪论	1
----	---

第1篇 静力学

引言	5
----	---

第1章 静力学公理和物体的受力分析	7
-------------------	---

1.1 静力学公理	7
1.2 力的投影 力矩 力偶	9
1.3 约束	12
1.4 物体的受力分析和受力图	14
小结	17
思考题	18
习题	19

第2章 平面力系的简化与平衡	21
----------------	----

2.1 平面汇交力系 平面力偶系	21
2.2 平面任意力系向一点简化	25
2.3 平面任意力系的平衡条件	30
2.4 物体系统的平衡	33
2.5 平面简单桁架的内力	37
2.6 摩擦	40
小结	47
思考题	49
习题	51

第3章 空间力系的简化与平衡	59
----------------	----

3.1 空间中力的投影、力矩与力偶	59
3.2 空间汇交力系 空间力偶系	62
3.3 空间任意力系的简化与平衡	65

3.4 重心	70
小结	72
思考题	74
习题	74

第2篇 运动学

引言	81
----	----

第4章 点的运动和刚体的简单运动	83
------------------	----

4.1 点的运动的直角坐标法	83
4.2 点的运动的自然法	86
4.3 刚体的平移	91
4.4 刚体的定轴转动	91
小结	95
思考题	96
习题	97

第5章 点的合成运动	101
------------	-----

5.1 相对运动 牵连运动 绝对运动	101
5.2 速度合成定理	103
5.3 加速度合成定理	106
小结	113
思考题	113
习题	114

第6章 刚体的平面运动	118
-------------	-----

6.1 平面运动概念与运动分解	118
6.2 平面图形内各点的速度	120
6.3 平面图形内各点的加速度	127
小结	132
思考题	132
习题	133

第3篇 动力学

引言	141
----	-----

第7章 动力学基本方程和动量定理	143
------------------	-----

7.1 质点动力学的基本方程	143
----------------	-----

7.2 动量与冲量	147
7.3 动量定理 质心运动定理	148
小结	153
思考题	154
习题	155
第 8 章 动量矩定理	159
8.1 质点系的动量矩	159
8.2 动量矩定理	162
8.3 刚体定轴转动微分方程 转动惯量	165
8.4 刚体平面运动微分方程	170
小结	172
思考题	173
习题	173
第 9 章 动能定理	177
9.1 力的功	177
9.2 质点系的动能	181
9.3 动能定理	182
9.4 功率方程 机械能守恒定律	186
9.5 普遍定理的综合应用	189
小结	192
思考题	193
习题	194
第 10 章 达朗贝尔原理	200
10.1 惯性力 达朗贝尔原理	200
10.2 刚体惯性力系的简化	203
10.3 定轴转动刚体的动约束力	207
小结	208
思考题	209
习题	209
第 11 章 虚位移原理	212
11.1 约束 虚位移	212
11.2 虚位移原理	215
小结	218
思考题	219
习题	220

第 12 章 机械振动基础	223
12.1 单自由度系统的自由振动	223
12.2 计算固有频率的能量法	226
12.3 单自由度系统的衰减振动	228
12.4 单自由度系统的受迫振动	230
小结	233
思考题	234
习题	234
附录 A MATLAB 在理论力学中的应用	238
A.1 MATLAB 基本知识	238
A.2 利用 MATLAB 求解平衡问题	246
A.3 MATLAB 在运动学模拟方面的应用	247
A.4 MATLAB 在动力学模拟方面的应用	251
附录 B 简单均质几何形体的重心位置和转动惯量	256
习题答案	259
参考文献	269

1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体宏观机械运动的学科。

力学的发展有着悠久的历史,而且与人类的生产实践密切相关。1678年,牛顿发表了名著《自然哲学的数学原理》,在前人研究的基础上,牛顿总结出了运动三大定律和万有引力定律,奠定了经典力学的科学基础。18世纪,机械工业有了很大发展,日益复杂的机械运动与受力分析要求新的力学方法。1788年,拉格朗日发表了名著《分析力学》,建立了约束系统动力学的理论与方法,即经典力学的分析力学体系。20世纪中叶以后,由于机器人等复杂机械系统的应用、航天技术的发展、运动生物力学的出现,以及计算机的广泛应用,形成了许多研究机械运动的新学科,如多刚体系统动力学、计算动力学等。尽管如此,经典力学在解决现代科技和工程问题中仍然起着重要作用。

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,这种运动是日常生活及一般工程中最常遇到的,经典力学有着最广泛的应用。理论力学所研究的机械运动的最一般、最普遍的规律是各门力学分支的基础。

课程内容包括静力学、运动学和动力学三部分。

静力学主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条件,同时研究力系简化的方法,以及物体的受力分析等。

运动学只从几何的角度研究物体的运动(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

理论力学的研究途径可分为建立理论体系和理论的工程应用两个方面。

通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行科学试验,经过分析、综合和归纳,总结出力学的最基本规律。如伽利略对自由落体和物体在斜面上的运动做了多次试验,从而推翻了统治多年的错误观点,引出“加速度”的概念。在对事物观察和试验的基础上,经过抽象化建立概念和力学模型,以公理为基础,经过逻辑推理和数学演绎,建立系统的理论体系。

力学理论的工程应用涉及综合的知识及科学方法,读者在课程学习中可逐步体会。

3. 学习理论力学的目的

理论力学是学习一系列后续课程的重要基础。很多工程专业的课程,如材料力学、结构

力学、弹性力学、机械原理、机械设计、流体力学、振动理论、断裂力学以及许多专业课程,都要以理论力学为基础。

工程专业所遇到的机械运动问题,有些可以直接应用理论力学的基本理论来解决。

理论力学是一门演绎性较强的课程,对于逻辑思维训练非常有益。理论力学研究的机械运动广泛存在于日常生活和工程实际中,学习理论力学时还应善于联系实际,多作分析和训练,培养灵活应用知识的能力。

第 1 篇

静力学



静力学的任务是研究力系的简化与平衡条件。

力系是指作用在物体上的一组力。

平衡是指物体相对惯性参考系保持静止或作匀速直线运动。静止、运动都是相对某一参考系而言的。

力系的简化是指用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,同时保持对物体的作用不变。此两力系互为等效力系。

平衡条件指在物体平衡时作用于物体上的力系所应满足的条件。

力系简化是静力学中寻找力系平衡条件的简洁途径,同时,在动力学中,当研究在给定力系作用下物体如何运动时,力系简化同样重要。力系的平衡条件可用于计算结构物在载荷作用下的内力或所受的支承力,以便为结构设计提供依据,因而在工程上应用广泛。

在静力学中,将研究的物体视为刚体,刚体是指在力作用下不变形的物体,是一种理想化的模型。刚体是一种特殊的质点系,其内部各质点间的距离保持不变。实际物体都有变形,是变形体,通常结构物各部件的变形很小,在研究某些问题时,可以忽略这些微小的变形而把物体看成刚体。静力学的研究对象主要是刚体。

力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化或使物体产生变形。前者称为力的运动效应或外效应,后者称为力的变形效应或内效应。

实践表明,力对物体的作用效果决定于三个要素:①力的大小;②力的方向;③力的作用点。力的三要素表明,力是一个具有固定作用点的定位矢量。常用黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。在国际单位制中,力的单位是牛[顿],符号是 N。

学习静力学时,一方面要巩固与深化这些概念,更重要的另一方面是掌握新的理论与方法。

静力学公理和物体的受力分析

静力学的基本概念、公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将介绍力、力矩和力偶的概念及静力学公理,并阐述工程中常见的约束和约束力的分析。最后介绍物体的受力分析及受力图,它是解决力学问题的重要环节。

1.1 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结,又经过实践反复检验,被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 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,如图 1-1 所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的几何和,即

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

这个公理是复杂力系简化的基础。

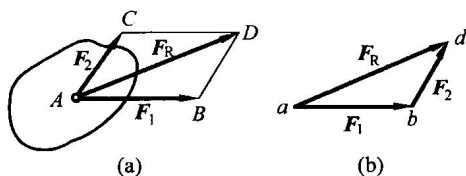


图 1-1

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

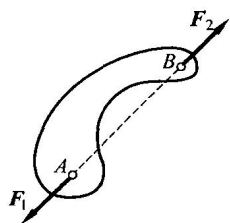


图 1-2

这个公理表明了作用于刚体上的最简单力系平衡时所必须满足的条件。

只在两个力作用下平衡的构件,称为二力构件,简称二力杆。如图 1-2 所示,刚体平衡时只在 A, B 两处受力,这两个力必定沿两力作用点的连线,且等值、反向。二力杆在工程实际中经常遇到,有时也把它作为一种约束。

公理 3 加减平衡力系原理

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。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。

这个公理是研究力系等效替换的重要依据。

根据上述公理可以导出下列推理。

推理 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

证明 在刚体上的点 A 作用力 F ,如图 1-3(a)所示。根据加减平衡力系原理,可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 $F = F_2 = -F_1$,如图 1-3(b)所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系,故可除去,这样只剩下一个力 F_2 ,如图 1-3(c)所示。于是,原来的这个力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 均等效,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

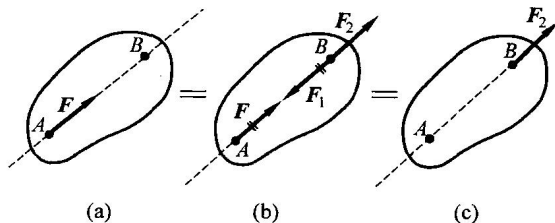


图 1-3

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效应的要素,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

推理 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明 如图 1-4 所示,在刚体的 A, B, C 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形法则,得

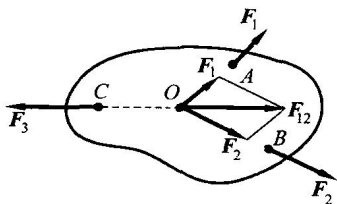


图 1-4

合力 F_{12} , 则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线, 所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面, 且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。于是定理得证。

公理4 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在, 两力的大小相等, 方向相反, 沿着同一直线, 分别作用在两个相互作用的物体上。若用 F 表示作用力, 用 F' 表示反作用力, 则

$$F = -F' \quad (1-3)$$

这个公理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的。由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上, 因此, 不能认为是平衡力系。

公理5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡, 如将此变形体刚化为刚体, 其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看成刚体的条件。例如绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡, 如将绳索刚化为刚体, 其平衡状态保持不变。反之则不能成立, 若绳索在两个等值反向的压力作用下就不能平衡。

由此可见, 刚体的平衡条件只是变形体平衡的必要条件, 而非充分条件。在刚体静力学的基础上, 考虑变形体的特性, 可进一步研究变形体的平衡问题。

静力学理论都可以由上述公理推证而得到, 这既能保证理论体系的完整和严密性, 又可以培养逻辑思维能力。

1.2 力的投影 力矩 力偶

1. 力在坐标轴上的投影

力 F 的作用点为 A , 在力线平面内取坐标系 Oxy , 如图 1-5 所示。设 F 与 x, y 轴的夹角分别为 α, β , 则 F 在 x, y 轴上的投影分别为

$$\begin{cases} F_x = F \cos \alpha \\ F_y = F \cos \beta \end{cases} \quad (1-4)$$

力的投影是代数量, 投影的指向 ab 与轴的正向相同时为正值, 反之为负值。

如已知力 F 在平面内两正交轴上的投影为 F_x 和 F_y , 则该力的大小和方向余弦为

$$\begin{cases} F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \cos(F, i) = \frac{F_x}{F}, \quad \cos(F, j) = \frac{F_y}{F} \end{cases} \quad (1-5)$$

力 F 沿 x, y 轴的分力为 F_x, F_y 。只有在直角坐标系中, 力在轴上的投影和力沿该轴的分力的大小相等。因此, 力 F 用投影表示的解析表达式为

$$F = F_x + F_y = F_x i + F_y j \quad (1-6)$$

其中 i, j 为沿 x, y 轴正向的单位矢量。

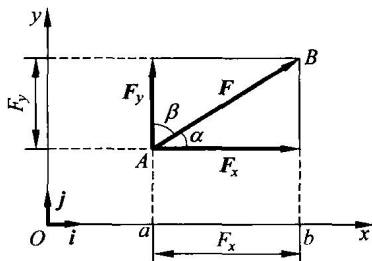


图 1-5