

高等学校教材

理论力学

罗特军 主编

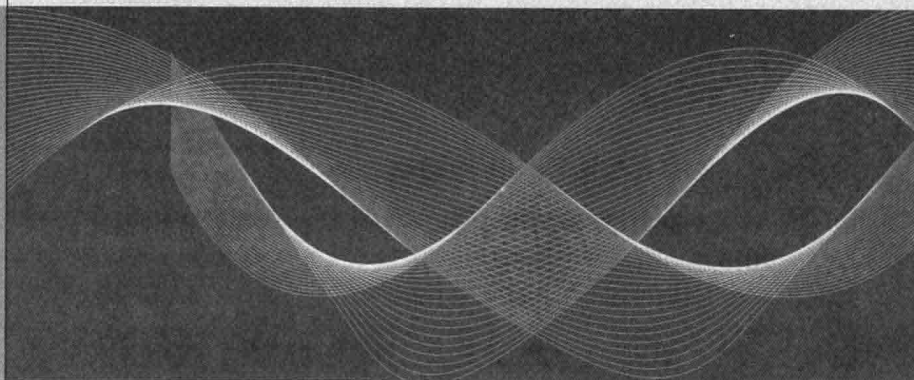
魏泳涛 副主编

高等教育出版社

高等
学校
教材

理论力学

Lilun Lixue



罗特军 主编

魏泳涛 副主编

高等教育出版社·北京

内容简介

本书为面向普通高等学校的理论力学教材。为适应当前教学改革的需要,本书对传统的理论力学体系进行了较大的改进,适当提高了起点,力求做到理论严谨、逻辑清晰、深入浅出、易于教学。

本书分静力学、运动学、动力学三个部分。静力学部分包括静力学基础、力系的简化和力系的平衡;运动学部分包括运动学基础、点的合成运动和刚体平面运动;动力学部分包括质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、动静法和分析力学基础。章后配有大量的思考题和习题。

本书可作为高等院校工科机械、土建、水利等专业的理论力学课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/罗特军主编. --北京:高等教育出版社,
2015.2

ISBN 978-7-04-041665-7

I. ①理… II. ①罗… III. ①理论力学-高等学校-
教材 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 296633 号

策划编辑 黄 强	责任编辑 周 冉	封面设计 于文燕	版式设计 王艳红
插图绘制 杜晓丹	责任校对 刘娟娟	责任印制 尤 静	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 三河市华润印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 24.5
字 数 460 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2015 年 2 月第 1 版
印 次 2015 年 2 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 41665-00

前 言

本教材是在多项省部级工科基础力学教改项目研究成果的基础上,结合四川大学工科理论力学教学组的教学经验,由长期在教学一线的教师编写而成的。

编写本教材的主要目的在于满足当前教学改革的需要,用较少的学时讲授理论力学的基本内容,同时又不降低课程的基本要求,以适应当前课程学时普遍压缩较多的现实。因此,本教材重点讲述理论力学的基本概念、基本理论和基本方法。包括:静力学基础、力系的简化、力系的平衡;运动学基础、点的合成运动、刚体平面运动;质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、动静法、分析力学基础。其篇幅大体能满足工科大多数专业的理论力学课程教学的需要。

本教材在内容体系上进行了多方面的尝试。首先,在静力学部分,用力系等效原理代替了传统的静力学公理,并采用从一般到特殊的体系,加大了知识的跨度。这样不但减少了学时,又使静力学部分内容的主线比较清晰。多年的教学实践表明,采用该体系,学生更容易对静力学的力、投影、力矩、平衡方程等基本概念有更完整的了解。其次,本教材尽量使用矢量、微积分等高等数学方法,使理论推导表达得更加简洁和准确。对于理论力学与其他课程重叠的部分,进行了弱化处理,尽量避免低层次的重复,重点介绍最具理论力学课程特点的基础内容。最后,在分析力学基础部分,将虚位移原理及分析力学的其他内容作了较好的切分,便于对此部分要求不多的专业可仅讲授适量表达的虚位移原理而不用涉及更复杂的内容。

针对理论力学课程的特点,本教材坚持“精讲多练”的原则。基本概念力求讲清、讲透;例题及习题安排遵循由易到难,注意在题目中体现基本概念的分析 and 基本方法的应用。适度增加综合性练习,特别注重将其分解为一系列基本问题,引导并培养学生用所学力学知识分析和解决问题。

加“*”的章节为选学内容,可根据不同专业的需要进行选择。

本书由罗特军担任主编,魏泳涛担任副主编。参加编写的有李斌、易丽清、张应迁和邱清水。罗特军负责总体计划和全书统稿,魏泳涛对全书的主要内容进行了校核。各章节编写分工为:罗特军(绪论、第1章、第2章和附录I);张应迁(第3章、第11章);易丽清(第4章、第5章);邱清水(第6章、第7章);李斌(第8章、第9章);魏泳涛(第10章、第12章)。

承蒙同济大学王斌耀教授审阅本书,并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。

在本书的编写过程中参考了有关书籍,并从中引用了部分例题和习题,特此致谢。

限于编者水平,疏漏在所难免,欢迎读者惠正。

编者

2014年8月

主要符号表

a	加速度
a^*	平均加速度
a_a	绝对加速度
a_c	科氏加速度
a_e	牵连加速度
a_n	法向加速度
a_t	切向加速度
A	面积,自由振动振幅
C	质心
d	微分符号
d	直径
e_b	副法线基矢量
e_n	法线基矢量
e_t	切线基矢量
E	总机械能
f	动摩擦因数,频率
f_s	静摩擦因数
F	力
F_l	达朗贝尔惯性力
F_{lc}	科氏惯性力
F_{le}	牵连惯性力
F_N	法向约束力
F_p	主动力
F_R	力系的主矢,全反力
F_s	桁架中杆的内力
F_T	绳的张力
g	重力加速度
h	高度
i	x 轴的基矢量

I 冲量

j y 轴的基矢量

J_z 刚体对 z 轴的转动惯量

k 弹簧刚度系数

k z 轴的基矢量

l 长度

L_C 刚体对质心的动量矩

L_O 刚体对点 O 的动量矩

m 质量

M 力偶矩

M_1 惯性力系的主矩

$M_O(\mathbf{F})$ $\mathbf{F}$ 对点 O 的矩

$M_z(\mathbf{F})$ $\mathbf{F}$ 对 z 轴的矩

n 质点数目

p 动量

q 载荷集度

r 半径

r 矢径

r_C 质心的矢径

r_M 点 M 的矢径

R 半径

s 弧坐标

t 时间

T 动能, 周期

T_r 相对运动动能

U 势力函数

v 速度

v^* 平均速度

v_a 绝对速度

v_C 质心速度

v_e 牵连速度

v_r 相对速度

V 势能, 体积

W 力的功

W 重力

x, y, z 直角坐标
 α 角加速度
 α, β, γ 方位角
 θ, φ 常用角
 δ 滚阻系数
 δ 变分符号
 Δ 增量符号
 κ 曲率
 κ^* 平均曲率
 λ 弹簧的变形
 ρ 密度, 曲率半径
 ρ 相对矢径
 ρ_c 质心的相对矢径
 φ_m 摩擦角
 ω_0 固有角频率
 ω 角速度

目 录

绪论	1
----------	---

第一部分 静 力 学

第 1 章 静力学基础	5
1.1 力和力矩	5
1.2 力系等效原理	13
1.3 力偶与力偶矩	21
1.4 物体的受力分析	24
思考题	33
习题	34
第 2 章 力系的简化	40
2.1 汇交力系与力偶系的简化	40
2.2 任意力系的简化	41
2.3 平行力系的简化	47
思考题	52
习题	53
第 3 章 力系的平衡	57
3.1 力系的平衡方程	57
3.2 平衡方程的应用	60
3.3 刚体系统的平衡问题	65
3.4 考虑摩擦时的平衡问题	75
思考题	84
习题	85

第二部分 运 动 学

第 4 章 运动学基础	100
4.1 点的运动学	100

4.2 刚体的基本运动	115
思考题	123
习题	124
第5章 点的合成运动	129
5.1 绝对运动、相对运动和牵连运动	129
5.2 速度合成定理	131
5.3 加速度合成定理	137
思考题	144
习题	145
第6章 刚体平面运动	151
6.1 刚体平面运动的分解	151
6.2 平面图形上各点的速度分析	154
6.3 平面图形上各点的加速度分析	161
6.4 刚体绕平行轴转动的合成	165
*6.5 运动学综合应用问题	167
思考题	173
习题	174

第三部分 动力学

第7章 质点动力学	183
7.1 惯性参考系中的质点动力学	183
*7.2 非惯性参考系中的质点动力学	191
思考题	195
习题	196
第8章 动量定理	201
8.1 质点系的动量定理	201
8.2 质心运动定理	207
思考题	212
习题	214
第9章 动量矩定理	217
9.1 质点系对固定点(轴)的动量矩定理	217
9.2 刚体的定轴转动微分方程	220
9.3 质点系对质心的动量矩定理	230
9.4 刚体的平面运动微分方程	234

* 9.5 碰撞	238
思考题	244
习题	245
第 10 章 动能定理	252
10.1 质点系和刚体的动能	252
10.2 力的功	255
10.3 动能定理	260
* 10.4 机械能守恒定律	265
10.5 动力学普遍定理的综合应用	267
思考题	276
习题	277
第 11 章 动静法	284
11.1 达朗贝尔原理	284
11.2 刚体惯性力系的简化	286
11.3 动静法	289
思考题	296
习题	297
第 12 章 分析力学基础	302
12.1 约束及其分类 虚位移	303
12.2 虚位移原理	308
* 12.3 广义坐标形式的虚功原理	316
* 12.4 拉格朗日方程	324
* 12.5 拉格朗日方程的首次积分	332
思考题	335
习题	336
附录 I 矢量代数基础	343
附录 II 简单均质几何体的质心和转动惯量	347
附录 III 习题参考答案	353
附录 IV 索引	367
参考文献	377

绪 论

理论力学研究物体机械运动的一般规律。所谓机械运动是指物体在空间的位置随时间而变化。机械运动是自然界中最普遍的运动,包括移动、转动、流动和变形等,而静止则是它的特殊情况。理论力学既是各门力学学科的基础,也是与机械运动密切相关的工程技术学科,如土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等的基础。

理论力学以理想化的力学模型——质点、质点系和刚体为研究对象。当物体的运动范围比它的几何尺度大得多的时候,如果物体的形状对我们所研究的物体运动的影响足够小,就可以把它简化为一个具有一定质量而大小和形状可以忽略不计的几何点,称为**质点**。由若干个相互有一定联系的质点所组成的系统称为**质点系**。质点系所含的质点数目可以是有限的也可以是无限的。一般情况下,任何物体都可以看成为一个质点系。

刚体是一个特殊的质点系,在这个质点系中任意两个质点间的距离都保持不变,换句话说,刚体是在力的作用下不变形的物体。由若干个刚体组成的系统称为**刚体系**。在实际生活中,完全不变形的物体并不存在,刚体不过是实际物体和构件的抽象和简化。简化的条件除了要求物体的变形不大之外,更重要的是这种变形对我们所研究的问题的结果产生的影响要足够小。例如建筑物中的梁在载荷和自重的作用下会发生弯曲,但其轴线下垂的位移与梁的跨度比较起来是很微小的,这种小变形对于两端支承力的影响是微不足道的,因此在计算两端的支承力时,梁可简化为刚体。但是在研究梁的强度和变形问题时,显然就不能再将它简化为刚体了。

概括起来讲,理论力学的研究对象是由质点和刚体组成的离散系统。

为了描述物体的机械运动,必须选取一个适当的物体作为标准,这个被选作标准的物体称为**参考体**,与参考体固结的坐标系称为**参考系**。同一物体相对不同的参考系的运动学特征通常并不相同,即物体运动的描述具有相对性。因此,谈及物体的运动总是指相对某个指定参考系的运动。在常见的工程技术问题中,通常选取与地球表面固结的坐标系作为参考系。

理论力学属于以伽利略和牛顿建立的力学基本定律为基础的经典力学的范畴,但是必须注意的是牛顿定律并不是相对任何参考系都成立。牛顿定律严格成立的参考系称为**惯性参考系**,反之则称为**非惯性参考系**。日心系(以太阳中心

为原点,各坐标轴指向恒星的参考系)已被证实是非常精确的惯性参考系。对于大多数地表附近的工程实际问题,选取固结于地球表面的参考系作为惯性参考系,已有足够的精确度。今后在动力学中提及速度、加速度等运动学量时,除非特别申明,都是相对惯性参考系而言的。而且,通常都采用固结于地球表面的参考系作为惯性参考系。

物理学的近代发展揭示出了经典力学的局限性。20 世纪初,爱因斯坦创立的相对论指出经典力学不适用于运动速度接近于光速或宇宙尺度内的物体运动。量子力学则表明经典力学对原子、分子等微观粒子运动的描述并不适用。这反映出人们对力学认识的深化,认识到物质在不同层次上的机械运动规律是不相同的。由于一般工程技术中所涉及的物体机械运动都满足宏观和低速的条件,众多的工程实践问题都属于理论力学的研究范围,采用理论力学的基本理论和研究方法可以得到足够高的精度。

理论力学的研究内容在工科基础力学中通常包括:静力学、运动学和动力学三大部分。其中:

静力学研究力系的等效替换和简化,以及物体在力系作用下平衡的规律;

运动学研究物体在空间的位置随时间变化的几何规律,而不考虑引起运动的物理原因;

动力学研究物体的运动与其受力之间的定量关系。

理论力学是工科基础力学的第一门力学课,通过讲解力学的基本概念和基本理论以及它们的应用,来介绍处理力学问题的基本方法,培养初步的力学直感,无论是对于后续课程的学习,还是今后的工程实践都具有重要意义。

大多数读者在不同层次的物理学课程学习中,不只一次地接触到了牛顿力学的基础内容,对理论力学的理解似乎并不感到困难。但是“做题难”却常常令每一位初学者感到头痛,这充分说明了理论力学并不是在低层次上与物理学的重复,对此应有足够的认识。

准确理解基本概念,熟悉基本定理和计算公式是灵活应用的基础。在学习过程中,适量的习题是必不可少的,只有通过反复练习才可能真正熟练掌握理论力学的基本概念、基本理论和基本方法。

第一部分 静 力 学

静力学研究物体在力系的作用下相对于惯性系静止的力学规律。静力学在工程中有广泛的应用,同时也是学习其他力学分支的基础。

理论力学中的静力学以理想化的力学模型——刚体和刚体系为研究对象,也称为**刚体静力学**。

刚体静力学主要研究以下三个基本问题:

1. 物体的受力分析

研究工程中的力学问题,首先要选取一个适当的研究对象(可以是一个物体或者是由几个相互联系的物体所组成的一个系统),并将其从周围物体中分离出来,周围物体对它的作用用力来代替。分析研究对象所受的全部力并将其表示在受力图中,这样一个过程就是物体的受力分析。

显然,物体的受力分析是研究力学问题最基本的步骤,正确的受力分析对于研究任何力学问题都是至关重要的。

2. 力系的等效替换及简化

作用于物体上的一组力称为**力系**。力系中各力的作用线都在同一平面内的力系称为**平面力系**,平面力系是工程应用中最常见的力系,是静力学研究的重点。如果两个不同的力系对同一刚体产生同样的作用,则称此二力系互为**等效力系**,与一个力系等效的力称为该力系的**合力**。

如何判断任意两个力系是否等效,怎样寻求一个已知力系的更简单的等效力系,对于工程实践中力学问题的简化显然具有十分重要的意义。力系的简化是静力学要研究的基本问题之一。

3. 力系的平衡条件及其应用

使刚体的原有运动状态不发生改变的力系称为**平衡力系**,平衡力系所要满足的数学条件称为**平衡条件**。显然,刚体在平衡力系的作用下并不一定处于静止状态,也可能处于某种惯性运动状态,例如作匀速直线平移或绕固定轴作匀速转动。因此,力系平衡仅仅是刚体处于静止状态的必要条件。但在静力学中它

们被认为是等同的,因为刚体静力学研究的是在惯性系中静止的物体在力系作用下继续保持静止的规律。

各种力系的平衡条件及其应用是静力学研究的重点内容,在工程实践中有十分广泛的应用。

第1章 静力学基础

物体静力学的基本概念、基本假设及物体的受力分析是静力学理论的基础,对于静力学研究的重要性是不言而喻的。

本章的基本内容包括:力的概念、力在坐标轴上的投影、力对点的矩和力对轴的矩、力系的主矢和主矩、力偶的概念、约束和约束力概念;力系等效原理及其推论;物体的受力分析。

1.1 力和力矩

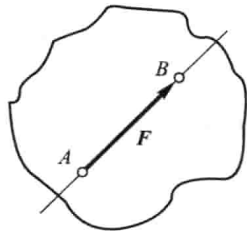
1.1.1 力的概念

力是物体间的相互作用,作用结果使物体的运动状态发生改变,或使物体产生变形。对刚体而言,力的作用只改变其运动状态。

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点,称为力的三要素。具有大小和方向,且其加法满足平行四边形法则的物理量称为**矢量**。由于力不但有大小和方向,而且两个共点力的合成满足平行四边形法则,因而**力是矢量**。考虑到力的作用效果与其作用点的位置有关,更确切地说,力是**定位矢量**。本书用粗斜体字母来标记矢量,例如 $\boldsymbol{F}$ 、 $\boldsymbol{P}$ 、 $\boldsymbol{r}$ 等,对应的细斜体字母 F 、 P 、 r 等表示同一矢量的模。当在书写中不使用粗斜体字母来表示矢量时,一般在字母上方加横线来表示,例如 $\overline{F}$ 、 $\overline{P}$ 、 $\overline{r}$ 等。必须注意矢量和标量是两类不同类型的物理量,在任何情况下标记的符号都应加以严格区别,不可混淆。

如图 1.1 所示,在图中通常用有向线段来表示力,箭头表示力的方向,线段的起点或终点为力的作用点,线段所在的直线 AB 称为力的作用线。

量度力的大小的单位,在国际单位制(SI)中用牛顿(N)或千牛顿(kN)。



力的另一重要性质是由**牛顿第三定律**所描述的作

图 1.1 力在图中的表示

用力和反作用力之间的关系,即两个物体之间的作用力与反作用力总是同时存在,且大小相等、方向相反、沿同一直线,并分别作用在两个不同的物体上。

物体之间的相互作用力有分布力和集中力两种,分布力又包括表面力和体积力。连续作用于物体的某一面积上的力称为**表面力**,例如立方体水池的底面和侧壁所受的水压力、建筑物外墙所受的风压力都是表面力;连续作用于物体的某一体积内的力称为**体积力**,例如物体的重力。作用于物体上一点的力称为**集中力**。实际上要通过一个几何点来传递作用力是不可能的,一切真实力都是分布力。集中力只是分布力在一定条件下的简化模型,能否进行这种简化主要取决于我们所研究的问题的性质。

应用我们所熟知的求合矢量的平行四边形法则可以求得两个共点力 F_1 和 F_2 的合力 F ,如图 1.2a 所示。为了方便计算,也可将其中任意一个分力平移到平行四边形的对边构成一个三角形,如图 1.2b 所示,这种求合力的方法称为力的三角形法则。但要注意应用力的三角形法则并不表示力(例如图中 F_1)的作用位置已经改变。

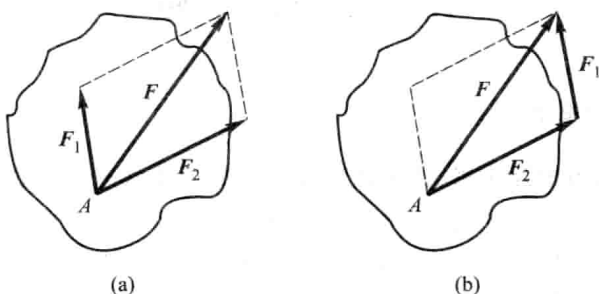


图 1.2 力的平行四边形法则和力的三角形法则

考虑平面力系中的任意力 F ,在力 F 所在的平面内任取直角坐标系 Oxy ,应用平行四边形法则将力沿 x 轴和 y 轴进行正交分解,如图 1.3 所示,可得

$$\mathbf{F} = F_x + F_y$$

设沿 x 轴和 y 轴的单位矢量分别为 $\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{j}$,则上式可写成

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} \quad (1.1)$$

式(1.1)为平面力系中力 F 的解析表达式,式中的 F_x 和 F_y 分别表示力 F 在 x 轴和 y 轴上的投影。为了求出式中的 F_x 和 F_y ,分别用单位矢量 $\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{j}$ 去点乘式(1.1)两边,即有

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{i} = F \cos \alpha \\ F_y &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{j} = F \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

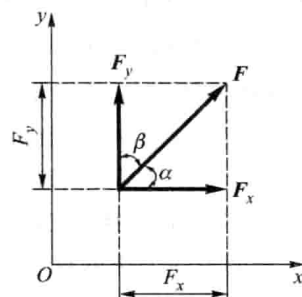


图 1.3 平面力系中力在坐标轴上的投影