



高等学校教材

TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

© 刘延强 杨秀娟 主编

理论力学

第2版



中国石油大学出版社

理论力学

第 2 版

刘延强 杨秀娟 主编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/刘延强,杨秀娟主编.—2版.—东营:
中国石油大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5636-3256-5

I. ①理… II. ①刘… ②杨… 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(2010)第 183989 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名:理论力学
作 者:刘延强 杨秀娟

责任编辑:袁超红 穆丽娜

封面设计:九天设计

出版者:中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印刷者:青岛锦华信包装有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0532—86981532,0546—8392563)

开 本:180×235 印张:24 字数:517 千字

版 次:2011 年 3 月第 2 版第 1 次印刷

定 价:36.00 元

理论力学是工程力学中一门与工程实际密切相关且理论性较强的基础课程,其基本理论既可以直接用于解决许多工程实际问题,也是学习许多相关专业知识必备的基础。随着科学技术和高等教育的发展,作为工程基础学科,理论力学教材的内容体系有必要相应做出调整。基于此,在长期实践和研究的基础上,作者编写了本书。

本书是在 2003 年出版的《理论力学》(刘延强、仝兴华、尹莉)教材的基础上修订而成的,并在此次编写中对教材进行了一些有益的尝试。由于相关专业设置和教学计划的演变,学时有所缩减,教学内容和要求亦有所调整,从而使初版《理论力学》与教学要求出现了不适之处。作者在多年教学实践中,经过不断综合、调整和优化理论论述方法,广泛听取各方意见,对动力学部分的内容进行了修改并重新编写了静力学与运动学的内容。此版教材的编写思想是提高起点、精简论述、避免重复、注重应用,主要体现在:

(1) 删减与相关物理学课程中重复的内容和教学过程中较少采用的内容,突出工程技术应用方面的内容。

(2) 对理论论述力求简练和准确,加强前后内容阐述的系统性和综合性。例如,静力学中采用演绎推理和强调重点应用的叙述思路,减少了重复;运动学中通过矢量法推证,加强理论的前后逻辑关系,使论述更加系统、简练、严密,强化并扩展了应用和综合应用。

(3) 强调概念方法的联系和对应性,以有利于读者掌握和综合应用。例如,动力学普遍定理与达朗伯原理的联系、虚位移原理与静力学的联系、静动法与动静法的对应性,等等。

(4) 强调理论方法的特点、应用及应用步骤,加强各部分的联系、应用和应用的综合。

(5) 适当保留部分加深和扩展内容,用于选讲和自学,以便提高与扩充知识,适应不同专业和层次的教学要求;保留章后小结,以便读者复习参考;加注部分名词术语的英文对照,便于有关文献阅读;适当增加例题、思考题,丰富习题类型,加强启发性与独立思考能力的培养和解决实际问题能力的训练,加强工程概念的培养,也有利于课堂讨论、自学、研究生入学考试复习训练。

本书内容分为静力学、运动学和动力学三大部分,共 17 章,动力学部分包括矢量动力学、分析力学基础和动力学专题。从静力学至矢量动力学(可不包括动静法)是本书最基本的部分,分析力学和动力学专题(可包括动静法)可根据专业要求和学时选授。本书

适用于 100 学时以内的工程力学课程以及相关工科专业不同学时和层次的理论力学课程,也可作为工程应用、自学或考研复习训练的参考用书。

本书中标记 * 内容为选授内容。

本书静力学部分由杨秀娟编写,绪论、运动学和动力学部分由刘延强编写,全书由刘延强统稿。

本次修订得到了各方面的支持和帮助,王魁喜先生对书稿进行了悉心校正并提出了诚恳的意见,钮瑞艳老师参与了动力学部分的纠错工作,王育平和侯密山教授审阅了书稿并提出了宝贵的意见,作者在此一并向他们表示感谢。

限于水平,望读者对书中错误和不妥之处不吝指正。

作 者

2010 年 5 月

Contents

目 录

绪 论	1
第一篇 静力学	
第一章 静力学分析基础	5
第一节 静力学的基本概念	5
第二节 力在直角坐标轴上的投影	6
第三节 力矩的概念与计算	7
第四节 力 偶	13
第五节 静力学公理	15
第六节 约束与受力分析	17
小 结	27
思考题	28
习 题	28
第二章 力系的简化	31
第一节 汇交力系的简化	31
第二节 力偶系的简化	33
第三节 任意力系的简化	34
第四节 平行力系的合成	42
小 结	51
思考题	51
习 题	52
第三章 力系的平衡条件及平衡方程	54
第一节 空间一般力系的平衡条件及平衡方程	54
第二节 平面一般力系的平衡条件及平衡方程	56
第三节 平衡方程应用举例	58
第四节 物体系统的平衡 静定与超静定问题	66
小 结	73
思考题	74
习 题	74

第四章 工程中的静力学问题	81
第一节 平面桁架	81
第二节 摩 擦	85
小 结	95
思考题	95
习 题	96

第二篇 运动学

第五章 点的运动学	103
第一节 概 述	103
第二节 描述点的运动的矢径形式	103
第三节 描述点的运动的直角坐标形式	104
第四节 描述点的运动的自然坐标形式	106
第五节 点的运动学的应用	108
小 结	112
思考题	112
习 题	113
第六章 刚体的基本运动	115
第一节 刚体的平动	115
第二节 刚体的转动	116
小 结	121
思考题	122
习 题	122
第七章 刚体的平面运动	125
第一节 刚体平面运动的描述	125
第二节 平面图形内各点的运动分析	127
第三节 刚体平面运动分解为转动和转动及其应用	136
小 结	139
思考题	140
习 题	140
第八章 点的合成运动	144
第一节 概 述	144
第二节 点的三种运动概念	144
第三节 点的合成运动定理	147
第四节 运动学综合应用	157
小 结	161
思考题	162

习 题	162
运动学综合习题	167
第三篇 动力学	
第九章 质点运动微分方程	173
第一节 惯性坐标下质点运动微分方程	173
* 第二节 非惯性坐标系下质点运动微分方程	181
小 结	186
思考题	186
习 题	187
第十章 动量定理	192
第一节 动量和冲量	192
第二节 动量定理	194
第三节 质心运动定理	198
小 结	201
思考题	201
习 题	202
第十一章 动量矩定理	206
第一节 动量矩	206
第二节 刚体对轴的转动惯量	207
第三节 动量矩定理	211
* 第四节 刚体平面运动微分方程	217
小 结	221
思考题	222
习 题	223
第十二章 动能定理	228
第一节 功和功率	228
第二节 动 能	233
第三节 动能定理	235
第四节 动力学普遍定理的综合应用	243
小 结	254
思考题	255
习 题	256
动力学普遍定理综合习题	262
第十三章 动静法	266
第一节 惯性力与刚体惯性力系的简化	266
第二节 动静法	268

* 第三节 轴承动反力 静平衡与动平衡	276
小 结	280
思考题	281
习 题	281
第十四章 虚位移原理	288
第一节 虚位移原理的有关概念	288
第二节 虚位移原理	290
* 第三节 保守系统平衡的稳定性	297
小 结	298
思考题	299
习 题	299
第十五章 动力学普遍方程	303
第一节 动力学普遍方程	303
第二节 第二类拉格朗日方程	305
小 结	310
习 题	310
第十六章 碰 撞	315
第一节 碰撞与碰撞力	315
第二节 对心正碰撞 恢复系数与能量损失	316
第三节 碰撞对定轴转动刚体的作用与撞击中心	320
* 第四节 碰撞对平面运动刚体的作用	323
小 结	326
思考题	327
习 题	327
第十七章 机械振动基础	331
第一节 机械振动概述	331
第二节 单自由度系统的有阻尼自由振动	332
第三节 单自由度系统的无阻尼自由振动	337
第四节 单自由度系统的强迫振动	343
第五节 减振隔振	348
第六节 转轴的临界转速	351
小 结	353
思考题	354
习 题	355
习题参考答案	360
参考文献	375

绪 论

自然界中各种物质都在不停地运动着,运动的形式多种多样,包括发光、发热、发声、电磁现象等物理运动、化学过程、思维活动等,其中最简单、最常见的运动形式是机械运动。机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。平衡则是机械运动的特殊情况,是相对的、暂时的。机械运动与人们日常生活和工程技术密不可分,例如人行、车驶、飞机飞行、机器转动、流体流动等都属于这种运动。理论力学正是研究机械运动一般规律的科学。

理论力学的理论基础是牛顿定律,属于古典力学范畴。20 世纪初量子力学和爱因斯坦相对论的创立对牛顿定律的普遍性提出了质疑,指出:牛顿定律不适用于速度接近光速的物体和微观粒子的运动。也就是说,理论力学的适用范围是宏观物体的低速运动,宏观物体和低速分别相对于微观粒子和光速而言。不过这并不影响理论力学研究的重要意义,因为绝大多数日常生活与工程技术问题都属于这一范畴。

在诸如机械设计制造、装备过程控制、土木建筑、采矿、交通、航空航海、石油勘查开发与储运,以及材料成型等众多工程技术中,广泛存在着必须应用工程力学知识才可以解决的实际问题。理论力学是工程力学中最基础的科学。理论力学不仅是学习材料力学、流体力学、机械振动、机械原理等相关专业知识的重要理论基础,同时其基本理论也可以直接用于解决许多工程实际问题,故而也是工程技术的理论基础。学习理论力学还有利于培养学习者正确认识、分析和解决问题的能力。理论力学的研究目的就在于理解和掌握物体受力与运动之间的定量关系,培养正确认识、分析和解决实际问题的能力。

根据循序渐进的认识规律与科学体系,理论力学的研究内容通常分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学主要研究力的一般性质、力系的合成法则与物体的平衡规律;运动学主要研究物体运动的几何描述;动力学主要研究物体运动与受力之间的关系,是理论力学的主要部分。

与其他科学的研究和发展一样,理论力学的研究和发展也经历了一个长期反复实践、认识的辩证过程,即从长期、大量的实践经验和试验出发,在抽象、综合、归纳的基础上建立公理,再应用严格的数学演绎和逻辑推理得到定理和结论,形成理论体系,之后通过实践来验证理论的正确性,并应用经验证正确的理论体系来指导实践活动。

20 世纪以来,由于工业建设、现代国防技术、新材料、新能源和电子技术以及其他新技术的发展需要,加上研究工具和手段的日益完善,各类力学模型越来越复杂,力学应用的领域不断扩大,新的边缘学科不断涌现。分析力学、断裂力学、流体力学、电磁流体力学、生物力学、地质力学、渗流力学、管柱力学、爆炸力学、运动稳定性理论、非线性振动、陀螺理论以及飞行力学等学科的兴起和发展就是这方面的代表。可以预见,随着工程技术需求的迅速发展和新技术的不断涌现,力学科学也将进一步得到促进和发展,获得更丰富的应用成就。

第一篇 静力学

静力学(statics)主要研究物体平衡时作用在物体上的力系应满足的条件。物体平衡(equilibrium)是指物体相对惯性参考系保持静止或作匀速直线运动。在一般的工程技术问题中,惯性坐标系(inertial coordinate system)通常指固结在地面上的参考系。

静力学主要研究三方面的内容:

1) 物体的受力分析

物体的受力分析是研究静力学的基础,即分析所研究物体的受力情况并画出相应的受力图。

2) 力系的简化

在保持力系对刚体作用效应不变的条件下,用最简单力系等效替换原有较为复杂的力系,从而明确原力系对刚体的作用效果。

3) 力系的平衡条件及其应用

物体在力系作用下平衡时力系所必需满足的条件称为平衡条件。由平衡条件建立平衡方程,并应用平衡方程求解物体的平衡问题。

静力学在工程实际中具有广泛的应用。例如,在各种工程结构的构件或机械零部件的设计计算中就需要进行受力分析并计算未知力。

第一章 静力学分析基础

力的概念、静力学公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将介绍力和力系的概念、力在坐标系上的投影、力矩的概念与计算、力偶、静力学公理、工程中常见的约束和约束反力以及物体的受力分析。

第一节 静力学的基本概念

一、力的概念

力(force)是物体间的相互作用。力的作用形式分为两大类:一类是通过场的作用产生的作用力,如重力、电磁力等;另一类是通过物体间的直接接触作用产生的作用力,如压力、摩擦力等。

力对物体的作用效应有两种:使物体运动状态发生改变的效应称为外效应(external effect);使物体形状发生改变的效应称为内效应(internal effect)。理论力学只研究力的外效应,力的内效应将在材料力学等后续课程中介绍。

力的大小、方向、作用点称为力的三要素。力是矢量,如图1-1中 F 所示。矢量的模表示力的大小,矢量的方位和箭头的指向表示力的方向,矢量的起点表示力的作用点。过力的作用点沿力的矢量方向画的直线为力的作用线。

本书采用国际单位制,力的单位是牛顿(N)或千牛(kN)。

在书中通常用黑体字母表示矢量,例如力 F 。为方便书写,

常在普通字母上方加带箭头的横线表示矢量,例如力 $\vec{F}$,普通字母 F 仅表示矢量的大小。

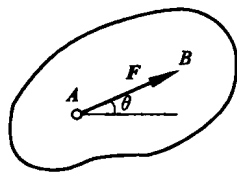


图 1-1

二、力系

作用在物体上的一群力称为力系(system of forces)。力系按其作用线的分布可分为下列几种:

各力的作用线分布在同一平面内的力系称为平面力系(coplanar force system);各力的作用线在空间分布的力系称为空间力系(three-dimensional force system);各力的作用线汇交于同一点的力系称为汇交力系(concurrent force system);各力的作用线相互平行的力系称为平行力系(parallel force system);各力的作用线既不平行也不相交的力系称

为任意力系或者一般力系(general force system)。

平面力系有平面汇交力系、平面平行力系和平面任意力系;空间力系有空间汇交力系、空间平行力系和空间任意力系。

如果作用于刚体上的力系并不改变刚体原有的运动状态,则称该力系为平衡力系(force system in equilibrium)。如果两个力系分别作用于同一个物体上而其作用效果相同,则这两个力系称为等效力系(equivalent force system)。

第二节 力在直角坐标轴上的投影

一、力在平面直角坐标轴上的投影

力矢的两端点向某轴作垂线,两垂足之间的距离冠以相应的正负号,称为力在该轴上的投影(projection of force on an axis)。

设力 F 作用在刚体上某一点 A , 在力的同平面内取 x 轴, 则力 F 在 x 轴上的投影记为 X (图 1-2)。如果由 a 到 b 的指向与 x 轴的正向一致, 则力 F 在 x 轴上的投影为正值; 反之为负值。设 F 与 x 轴的夹角为 α , 则

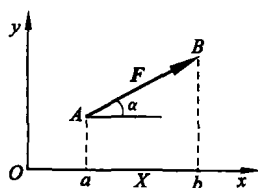


图 1-2

$$\left. \begin{aligned} X &= F \cos \alpha \\ Y &= F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

需要指出的是, 力的投影是一个代数量。

二、力在空间坐标系各轴上的投影

1. 直接投影法

已知力 F 与直角坐标系三个轴的夹角分别为 α, β, γ (图 1-3), 则力在三个坐标轴上的投影 X, Y, Z 分别等于力的大小乘以相应夹角的方向余弦, 即

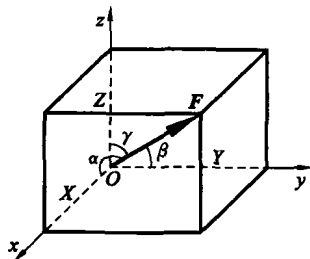


图 1-3

$$\left. \begin{aligned} X &= F \cos \alpha \\ Y &= F \cos \beta \\ Z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

2. 二次投影法

当力 F 与坐标轴 x, y, z 之间的某些夹角未知时, 可采用间接投影法。如图 1-4 所示, 若已知夹角 γ 和 φ , 先将力向 z 轴及 Oxy 坐标面分解, 得到力 F_{zy} , 再将 F_{zy} 投影到 x 轴和 y 轴上, 则力 F 在三个坐标轴上的投影为

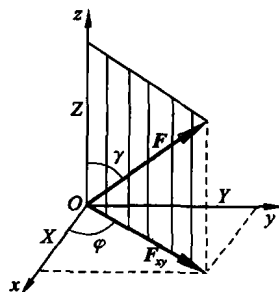


图 1-4

$$\left. \begin{aligned} X &= F \sin \gamma \cos \varphi \\ Y &= F \sin \gamma \sin \varphi \\ Z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

力 F 可表示为

$$\mathbf{F} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k} \quad (1-4)$$

式中, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴上的单位矢量。

力 F 的大小和方向可表示为

$$\left. \begin{aligned} F &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \cos \alpha &= \frac{X}{F}, \quad \cos \beta = \frac{Y}{F}, \quad \cos \gamma = \frac{Z}{F} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

第三节 力矩的概念与计算

一、力对点之矩

力对点之矩(moment of force about a point)是力对物体转动作用效应的一种度量。

1. 力对点之矩在平面问题中的表示方法

当用扳手转动螺钉时(图 1-5),螺钉的轴线固定不变,该轴线与图面交点为 O 点,在扳手上作用一力 F 使得扳手和螺钉绕 O 点转动。由经验可知,力 F 使扳手与螺钉绕 O 转动的效应既与力 F 的大小有关,也与力 F 的作用线到 O 点的垂直距离 d (即力臂)有关。

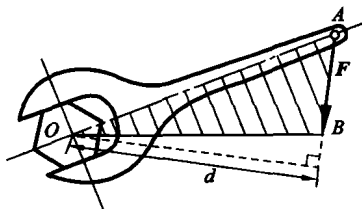


图 1-5

平面问题中力对点之矩定义如下:

力 F 对同一平面内 O 点的力矩为一代数量,用 $M_O(F)$

表示。力矩的绝对值等于力的大小 F 与力臂 d 的乘积;通常规定力使物体绕矩心逆时针方向转动时力矩取为正,反之为负。计算公式为

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (1-6)$$

力矩的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

图 1-5 中,点 O 为矩心, d 为力臂。由图 1-5 可以看出

$$M_O(F) = Fd = 2S_{\triangle OAB} \quad (1-7)$$

式中, $S_{\triangle OAB}$ 为 $\triangle OAB$ 的面积。

2. 力对点之矩在空间问题中的表示方法

在平面问题中,因为力的作用线和矩心在同一平面内,该平面在空间的方位保持不变,力矩使物体转动的效应只与力矩的大小和转向有关,所以力矩是代数量。在空间问题中,各力的作用线和矩心组成不同的平面。由于这些平面的方位不同,因而对物体作

用的效应也不同。力矩对物体的转动效应除了与力矩的大小和力矩在力矩平面内的转向有关外,还与力的作用线与矩心所决定的力矩作用面的方位有关。因此,在空间问题中力对点之矩由下列三个因素决定:

- (1) 力矩的大小,即力 F 的大小 F 与力臂 d 的乘积;
- (2) 力的作用线与矩心所决定的力矩作用面的方位;
- (3) 力矩在作用平面内的转向。

在空间问题中,力对点之矩必须用矢量表示。如图 1-6 所示,力矩矢 $M_O(F)$ 的大小为

$$M_O(F) = Fd = 2S_{\triangle OAB}$$

方位与平面 OAB 的法线方向一致,指向按右手螺旋法则确定。由于力对点之矩与矩心的位置有关,故力矩矢 $M_O(F)$ 一定要画到矩心 O 上,为定位矢量。

以 r 表示矩心 O 到力 F 作用点 A 的矢径。由于矢量积 $r \times F$ 的模等于 $|r \times F| = Fr \sin \alpha = Fd = M_O(F)$,方位由矢量 r 和 F 所决定的平面法线决定,矢量积的指向与力 F 对 O 点的矩的方向一致,故力 F 对 O 点之矩矢等于矩心到力的作用点的矢径与该力的矢量积 $r \times F$,即

$$M_O(F) = r \times F \quad (1-8)$$

设力 F 的作用点 A 的坐标为 (x, y, z) , 力 F 在直角坐标轴上的投影分别为 X, Y, Z , 则 $r = xi + yj + zk$, $F = Xi + Yj + Zk$, 于是力 F 对 O 点的矩的矢量表达式为

$$M_O(F) = r \times F = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x & y & z \\ X & Y & Z \end{vmatrix} = (yZ - zY)i + (zX - xZ)j + (xY - yX)k \quad (1-9)$$

因为

$$M_O(F) = [M_O(F)]_x i + [M_O(F)]_y j + [M_O(F)]_z k$$

所以 $M_O(F)$ 在直角坐标轴上的投影分别为

$$\begin{cases} [M_O(F)]_x = yZ - zY \\ [M_O(F)]_y = zX - xZ \\ [M_O(F)]_z = xY - yX \end{cases} \quad (1-10)$$

二、力对轴之矩

力对轴之矩(moment of force about an axis)是力使刚体绕某一轴转动效应的度量。

1. 力对轴之矩

设力 F 作用在可绕 z 轴转动的刚体上的 A 点(图 1-7), 现将力 F 分解为平行于 z 轴的分力 F_z 和垂直于 z 轴的分力 F_{xy} 。由经验可知, 力 F_z 不可能使刚体绕 z 轴转动, 即力 F_z 对 z 轴

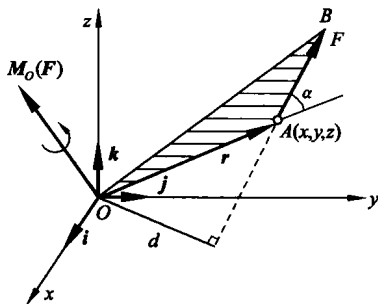


图 1-6

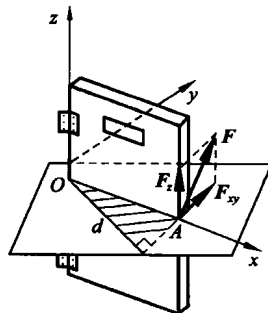


图 1-7