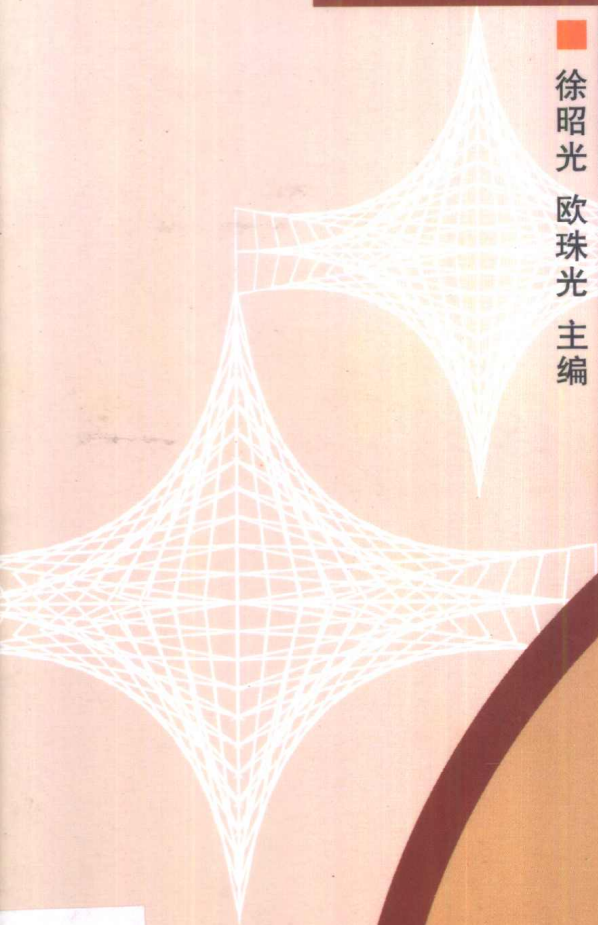


力学系列课程教材之一

理论力学

徐昭光 欧珠光 主编



3 武汉大学出版社

力学系列课程教材之一

理论力学

武汉大学土木建筑工程学院
力学系列课程教材编写组 编
徐昭光 欧珠光 主编

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/徐昭光, 欧珠光主编. — 武汉: 武汉大学出版社, 2001. 8
力学系列课程教材之一

ISBN 7-307-03240-6

I. 理… II. ①徐… ②欧… III. 理论力学—高等学校—教材
IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 00990 号

责任编辑: 李汉保 责任校对: 张 昕 版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: epd@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 湖北省京山县印刷厂

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.625 字数: 323 千字

版次: 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-03240-6/O·235 定价: 19.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 提 要

本书系统地叙述了质点、质点系和刚体机械运动(包括平衡)的基本规律和研究方法,包含原国家教委组织审订的《理论力学课程教学基本要求》多学时所规定的主要内容,并增加了计算机应用等新内容。是土木水利类力学系列课程第一分册。

全书共十二章:静力学基本概念,平面一般力系,空间一般力系,运动学基础,点的复合运动,刚体平面运动,质点动力学,动力学普遍定理,达朗伯原理,虚位移原理,拉格朗日方程及单自由度系统的振动。每章后附有习题与答案,并在书末附有两个计算机源程序。

本书是土木水利、机械类各专业使用的教材,也可供其它层次相关专业使用和工程技术人员参考。

序

教材建设是一项长期艰巨而且意义重大的工作。要编写出合格的好教材,编写者一定要对本门课程同时具备比较深广的理论和丰富的实际教学经验,并且能够注意在继承的基础上不断创新。武汉大学(原武汉水利电力大学)土木建筑工程学院的工程力学(现应用力学)、材料力学(现计算力学与材料强度)、结构力学等教研室的同志们,从 1958 年开始一直非常重视这项工作,四十多年以来,虽然人员更新多批,但对教材改革始终坚持不懈,除公开出版过《材料力学》、《结构力学》、《工程力学》等多种版本外,还出版过《建筑力学》、《工程力学与工程结构》等多套综合性教材,为我国高等学校工科力学教材的建设作出了贡献。

本系列课程教材是在进入 21 世纪的新形势下,编写者吸取了历次教材改革的经验和教训,立足于土木水利类各专业的力学基本要求,按系列课程考虑,从体系到内容都作了必要的调整和扬弃,并且特别注意了克服重复脱节、淘汰陈旧内容、适当增加新的内容及增强计算机的应用等问题,因而较大的压缩了篇幅,提高了质量。全书是在经历了两轮教学试点使用之后定稿的,现在仍暂按过去通用的名称:理论力学、材料力学、结构力学,按力学系列课程三个分册出版。

进入 21 世纪以后,我国高等学校的各项改革正方兴未艾,继续全面地展开教材改革任重而道远。希望编写者们展望未来,联系实际,不断实践,再接再厉地在这一战线上取得更为丰硕的成果。

粟一凡

2000 年 9 月

前 言

随着科学技术的飞速发展和新材料、新结构、新方法及新工艺的不断问世,以及我国高等学校专业结构的重大调整,面向信息时代,工科力学系列课程的改革已势在必行。

从 1995 年湖北省《工科力学系列课程教学内容和体系改革研究》立项以来,我们针对土木水利类四门主要专业基础课:理论力学、材料力学、结构力学和弹性力学进行综合调研。总结历次教材改革的经验和教训,按专业的力学要求,从体系到内容进行了调整和充实,克服重复脱节,淘汰陈旧内容,在确保国家教育部批准执行的基本要求的基础上,增加新的内容和计算机应用,配合 CAI (计算机辅助教学)等现代化教学手段和方法,按照循序渐进的认识规律,将教材内容优化组合,组建工科力学教程三个模块:作为必修的基础教材模块,供不同专业选修的专题教材模块,供个人选修的选修教材模块,编出后在校内水利水电建筑工程专业 96 级和 97 级两个年级试用,取得了可贵的经验和预期的效果。

这次出版的本系列教材,考虑到现实状况,仍称理论力学、材料力学、结构力学等当前通用名称。它们是在试用教材基础上,参照近年新的教学计划,按照提高起点、保证基础、压缩篇幅、精选内容、系列考虑和增强后劲的精神,作了必要的修改。随着教学改革的逐步深入,我们今后将不断进行充实和提高。

本系列课程教材编写者:

《理论力学》:徐昭光(第一、二、三章),欧珠光(第七、八章),边翠英(第四、五、六章),韩立朝(第九、十、十一、十二章和附录);

《材料力学》:邓训(第二、十、十三章),徐远杰(第六、十一章和附录Ⅱ),张青梅(第一、五章和附录Ⅰ),彭华(第四、八章),乐运国

(第三、七、九、十二章);

《结构力学》:章监才(第六、七、八章),何文娟(第一、九章),曾又林(第二、四章),刘礼华(第三章),周剑波(第五章),袁文阳(第十章)。

本书得到我校工程力学(现应用力学)、材料力学(现计算力学与材料强度)和结构力学等教研室全体教师的支持和帮助,在此表示衷心地感谢。

本书中不妥之处,热忱欢迎批评指正。

章监才 邓 训 徐昭光
2000 年 9 月

目 录

第一篇 工程静力学	1
第一章 静力学的基本概念和受力分析	2
第一节 刚体和变形固体的概念	2
第二节 力的概念及荷载分类	3
第三节 力矩和力偶	7
第四节 约束和约束反力	11
第五节 物体的受力分析和受力图	18
第二章 平面一般力系	29
第一节 平面一般力系的简化	30
第二节 平面一般力系的平衡	36
第三节 物体系统的平衡	44
第四节 考虑摩擦时的平衡问题	50
第五节 平面静定桁架的内力	60
第三章 空间一般力系	74
第一节 力对轴的矩、力对点的矩与力对轴的矩的关系	74
第二节 空间一般力系的简化与平衡	79
第三节 用截面法求杆件的内力	90
第四节 重心、形心	92
第二篇 工程动力学	107
第四章 运动学基础	108

第一节	点的一般运动	108
第二节	刚体的基本运动	118
第五章	点的复合运动	131
第一节	绝对运动、相对运动和牵连运动	131
第二节	点的速度合成定理	134
第三节	点的加速度合成定理	139
第六章	刚体的平面运动	162
第一节	刚体平面运动的运动方程	162
第二节	平面运动分解为平动和转动	164
第三节	平面图形上各点的速度	166
第四节	平面图形上各点的加速度	178
第七章	质点动力学	193
第一节	质点的运动微分方程	193
第二节	质点的相对运动微分方程	200
第八章	动力学普遍定理	208
第一节	动量定理	208
第二节	质心运动定理	215
第三节	动量矩和转动惯量	221
第四节	动量矩定理	231
第五节	刚体平面运动微分方程	238
第六节	动能定理	247
第七节	机械能守恒定律	256
第八节	动力学普遍定理的综合应用	262
第九章	达兰贝尔(D'Alembert)原理	286
第一节	惯性力的概念	286
第二节	达兰贝尔原理	287
第三节	刚体惯性力系的简化	290
第十章	虚位移原理	308
第一节	基本概念	308

第二节	虚位移原理·····	320
第三节	动力学普遍方程·····	329
第十一章	拉格朗日(Lagrange)方程·····	338
第一节	广义力、以广义力表示的质点系的平衡条件·····	338
第二节	拉格朗日方程·····	342
第十二章	单自由度系统的振动·····	354
第一节	单自由度系统的自由振动·····	355
第二节	单自由度系统的有阻尼自由振动·····	363
第三节	单自由度系统的受迫振动·····	369
附录	理论力学问题中的计算机求解方法·····	384

第一篇 工程静力学

引 言

理论力学是研究物体机械运动一般规律的学科。所谓物体的机械运动是指物体在空间的位置随时间而变化。理论力学以牛顿定律为基础,属于古典力学的范畴,它研究速度远小于光速的宏观物体的运动规律。因此,古典力学的应用范围是有局限性的。但是,在现代科学技术中它仍占有十分重要的地位。因为,不仅一般工程技术问题,就是在一些高、新、尖的学科领域中,它们所研究的物体大多仍为宏观物体,运动速度也远小于光速,仍可用古典力学来解决。

理论力学的内容分为两大部分:工程静力学和工程动力学。

工程静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律及力系的简化。

工程动力学——从几何角度研究物体的机械运动以及研究物体运动变化与所受力之间的关系。

工程静力学的理论体系是在物理学中已熟悉的静力学公理的基础上建立起来的。如:二力平衡公理、加减平衡力系公理、力的平行四边形法则和作用力与反作用力定律等。

工程静力学在实际工程中有广泛的应用,如对框架、桥梁、闸、坝等建筑物及机械零、部件进行受力分析与求解未知反力,都是构件或结构强度、刚度计算的依据。此外,它也是研究工程动力学的基础。

第一章 静力学的基本概念和受力分析

第一节 刚体和变形固体的概念

静力学篇主要研究力系的简化和物体在力系作用下的平衡规律,所采用的力学模型主要是刚体。我们把作用于物体上的一群力称为力系。用另一个力系来替换已知的力系,而不改变原力系对刚体的运动效应,这称为力系的**等效替换**。如果用最简单的力系等效地替换较复杂的力系,则称为力系的简化。所谓平衡,在工程上,一般是指物体相对于地球(惯性参考系设在地球上)处于静止或作匀速直线运动状态。平衡规律是指物体处于平衡状态时作用于其上的各种力系所需满足的条件,它在工程中应用十分广泛。例如在设计各种工程结构的构件或机械零部件时,常先要进行受力分析,再应用平衡条件求出未知力,最后对构件或机械零、部件进行强度和刚度计算。

刚体是受任何力作用时其大小和形状始终保持不变的物体,即刚体内任何两点间的距离不因力的作用而改变。实际工程中的结构、构件及机械零件在力的作用下都会发生不同程度的变形。在研究力的运动效应和物体的平衡规律时可忽略物体的变形,从而抓住了事物的主要矛盾,撇开了其次要因素,可简化计算又保证足够的精度。这种科学的抽象是必要的,也为实际所许可的。

在后继的力学课程中,我们将研究杆件的强度、刚度和稳定性,静定结构的内力,超静定结构的解法。这些问题的研究,都与杆件、结构在荷载作用下或其他原因所产生的变形相联系。此时,物体的可变形性质在所研究的问题中就成为重要因素,不能再把

物体抽象化为刚体,而必须把它视为变形固体。但在第三章用截面法求杆件的内力研究中,仍将以刚体的平衡规律作为基础,应用平衡条件求杆件截面上的内力。

第二节 力的概念及荷载分类

2.1 力的投影

力是物体间相互的机械作用,其作用的结果是使物体机械运动的状态发生改变和形状产生变化。前者称为运动效应或外效应,后者称为变形效应或内效应。力的运动效应又可分为移动效应和转动效应。在一般情况下,一个力对物体作用时,既有移动效应,又有转动效应。

实践证明,力对物体的效应取决于力的大小,方向和作用点。这三者称为力的三要素。力是定位矢量,称为力矢量。可应用矢量运算法则进行计算。力在轴上的投影是代数量。

设任意力 F 和所选定的空间直角坐标系 $Oxyz$,如图 1-1 所示。通过力 F 的始端 A 作 x' 、 y' 、 z' 轴分别平行于 x 、 y 、 z 轴且同向,过力 F 的末端 B 作三个平面分别与各轴垂直,且相交于点 C 、 D 、 E ,则 AC 、 AD 和 AE 就是力 F 分别在 x 、 y 、 z 轴上的投影。若已知力 F 分别与 x 、 y 、 z 轴正向夹角为 α 、 β 、 γ ,则直接投影法的计算式为:

$$\begin{cases} X = F \cos \alpha \\ Y = F \cos \beta \\ Z = F \cos \gamma \end{cases} \quad (1-2-1)$$

有时,力 F 与 x 、 y 轴的夹角是未知的,或者是不易求出的,而与 z 轴的正向夹角 γ 是已知的,且已知力 F 在 Oxy 平面上投影 F_{xy} 与 x 轴正向夹角 θ ,如图 1-2 所示。这时,可先将力 F 投影到 Oxy 平面上,得投影矢量 F_{xy} ,其大小 $F_{xy} = F \sin \gamma$ 。然后,再将 F_{xy} 分

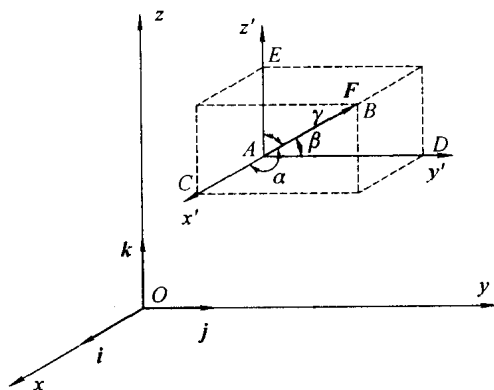


图 1-1

别在 x 、 y 轴上投影,得 X 、 Y 就是力 F 在 x 、 y 轴上的投影。因此,有

$$\begin{cases} X = F \sin \gamma \cos \theta \\ Y = F \sin \gamma \sin \theta \\ Z = F \cos \gamma \end{cases} \quad (1-2-2)$$

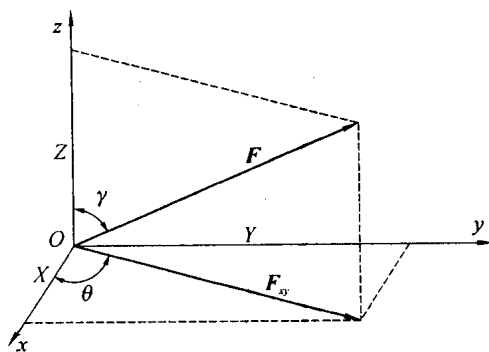


图 1-2

这种求力在空间直角坐标轴上投影的方法,称为二次投影法,在实际计算中应用较多。

如果已知力 F 在直角坐标轴上的投影 X 、 Y 、 Z ,由图 1-1 可

知,力 F 的大小和方向余弦分别为:

$$\begin{cases} F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \cos\alpha = \frac{X}{F}, \cos\beta = \frac{Y}{F}, \cos\gamma = \frac{Z}{F} \end{cases} \quad (1-2-3)$$

在计算时,也可将力 F 沿直角坐标轴 x 、 y 、 z 分解为三个分力 F_x 、 F_y 、 F_z ,分力的大小等于力 F 在相应坐标轴上投影的绝对值,即

$$F_x = |X|, F_y = |Y|, F_z = |Z|$$

如图 1-1 所示,用 i 、 j 、 k 分别表示沿 x 、 y 、 z 轴的单位矢量,则

$$F_x = Xi, F_y = Yj, F_z = Zk$$

由此可得力沿坐标轴的分解式:

$$F = Xi + Yj + Zk \quad (1-2-4)$$

必须指出,力的投影与力的分量(分力)是两个不同的概念,力的投影是代数量,而力的分量是矢量。矢量的投影计算在工程力学中十分重要。

2.2 荷载的分类

我们把作用在物体上的力分为两类,一类是能引起物体运动或使物体有运动趋势的力,称为主动力,如重力、风力、水压力等,在工程中,主动力又称为荷载。另一类是下一节要讨论的阻碍物体运动的力,称为约束反力,工程中常称为反力。

杆件或结构受到的荷载是多种多样的,为便于分析,从不同的角度对荷载进行分类如下:

(1)根据荷载作用时间的久暂,可分为恒载和活载两类。恒载是长期作用在杆件或结构上的不变荷载,如自重或土压力等。构件的自重是由它的几何尺寸和容重(单位为 N/m^3)计算而得。活载是作用在杆件或结构上的可变荷载,如风荷载、雪荷载及人群荷载等。所谓可变荷载是指这种荷载有时存在,有时不存在,它们作

用的位置及范围可能是固定的,也可能是移动的。各种常用的活载,在《工业与民用建筑结构荷载规范》中都有详细规定。

(2)荷载按其作用分布情况可分为集中荷载和分布荷载两类。当荷载的分布面积远小于结构受荷面的面积时,则可认为集中作用在一点上,称为集中荷载或集中力;当荷载是分布作用于结构的体积内时,称为体力,如重力、万有引力等;当荷载是分布作用于结构的表面上,称为面力,如土压力、静水压力等。面力又常可简化成沿线分布的荷载,称为线分布力或线分布荷载,如作用在梁上的分布荷载,单位为 N/m 或 kN/m 。某一单位长度上所受的分布力,称为该处的线荷载集度。如果分布力的荷载集度处处相同,则该分布力称为均布力或均布荷载;否则就称为非均布力或非均布荷载。

体(或面、或线)力的集度是用单位体积(或面积、或长度)上的力来定义的。如以 ΔQ 表示作用在微体积 ΔV (或微面积 ΔA ,或微长度 Δl) 上的微荷载,则体力的集度 $q = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}$ (或面力的集度 $q = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A}$ 或线力的集度 $q = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta l}$), 其单位是 N/m^3 (或 N/m^2 , 或 N/m)。表示荷载集度分布的图形称为荷载集度图,简称荷载图。可以证明:线分布荷载(即线力)的合力大小等于荷载图的面积,方向与分布荷载的方向相同,作用线通过荷载图的形心。

图 1-3 所示梁的自重荷载为均布荷载,其集度为 q ,荷载图为矩形。图 1-4 所示水池侧壁受水压力的作用,水压力的大小与水深成正比,荷载连续作用但大小各处不相同,即为非均布荷载,荷载图为三角形。

(3)荷载按其作用的性质可分为静力荷载和动力荷载。静力荷载是指数值、方向和位置不随时间变化或变化极为缓慢,因而不使结构产生运动的荷载,简称静荷载,如结构的自重、一般的活

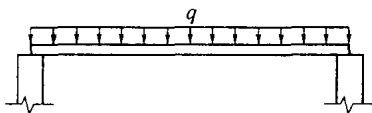


图 1-3

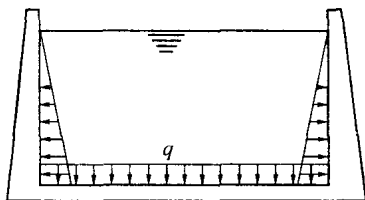


图 1-4

载等。动力荷载是指大小、位置及方向随时间而迅速变化的荷载，构件内各质点的加速度较大，以致对变形固体的影响不能忽略。如地震力、动力机械产生的荷载等。

以上是从三种不同的角度将荷载分类，它们不是孤立无关的，例如结构的自重，它既是恒载，又是分布荷载，也是静力荷载。

第三节 力矩和力偶

力对刚体作用将产生移动效应和转动效应，力的转动效应是用力矩来度量的。本节先讨论力对点的矩，即力矩的概念和计算，然后介绍力偶的基本概念和性质。

3.1 力矩

由物理学知，在平面力系问题中，力对点的矩视为代数量。力 F 对矩心 O 的矩(见图 1-5)为

$$m_O(F) = \pm Fh = \pm 2\triangle ABO \text{ 的面积} \quad (1-3-1)$$

式中 h 称为力臂。

通常规定：逆时针方向转动的力矩取正号，顺时针方向转动的力矩取负号。力矩的单位为牛·米($N\cdot m$)或千牛·米($kN\cdot m$)。

在平面力系问题中，力矩被看做代数量，这是因为各力和矩心所构成的平面(称为力矩平面)是同一平面，只要确定了力矩的大