

高等工科院校教材

理论力学

樊勇坚 主 编

中南工业大学出版社

高等工科院校教材

理论力学

樊勇坚 主编

中南工业大学出版社

内 容 提 要

本书内容分静力学、运动学和动力学三部分。与同类教材相比,理论体系和叙述方式均有所变动。内容涉及范围较宽,可根据专业要求决定取舍。全书后面附有各章的思考题与习题以及习题答案。本书可作为各类工科院校有关专业理论力学课程的教材;也可供职业大学,职工大学、电大、函大、夜大用作教材和参考书,以及有关工程技术人员自学和参考。

理 论 力 学

樊勇坚 主 编

责任编辑:刘道德

*

中南工业大学出版社出版发行

湖南省望城县湘江印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 15.25 字数: 356千字

1987年6月第1版 1987年6月第1次印刷

印数: 00001—11000

*

ISBN7—81020—053—4/O·008

统一书号: 13442·022 定价: 3.20元

编者的话

本书是根据高等工科院校本科中、少学时专业以及高等工业专科学校的土木、机械等多学时专业的要求编写的。可作为各类工科院校有关专业理论力学课程的教材；也可供职业大学、职工大学、电大、函大、夜大用作教材或参考书，以及有关工程技术人员自学和参考。

在吸取国内外同类教材经验的基础上，本书力图体现下列特点：（1）对理论体系和叙述方式，作了不少变动，使之更为合理和便于教学。（2）适当提高了起点，对于较易接受和曾在先修课程中学习过的内容，分别采用由一般到特殊和复习性的叙述方式。（3）精选了一些较新的例题、思考题和习题；有些理论是在例题之后引伸的，这既使学生易于接受，又能启发和开拓学生的思路。（4）除定理、推论等都给予尽可能简明的论证外，同时，又注意到结合工程实例阐明理论的应用以培养学生解决工程实际问题的能力。

参加本书编写工作的有：樊勇坚（绪论、第一、八章），李克安（第二、三、四章），韦世钊（第五、六、七章），李自修（第九、十、十一章），刘浔江（第十二、十三、十四章和该三章的习题），徐克家（第一、二、三、四、八、九、十章思考题与习题），贺尧其（第五、六、七、十一章思考题与习题），谢元勋参加了第八、十二、十三、十四章的思考题与习题的初选工作。

全书由樊勇坚主编。由中南工业大学伍洪泽、国防科学

技术大学刘文林、湖南大学黎邦隆分别主审静力学、运动学与动力学。他们既对全书细纲和初稿提出了许多宝贵意见，黎邦隆、伍洪泽二位同志还参加了部分改稿工作。韦世钊同志任编写组组长，做了许多组织工作。湖南省力学学会对本书的诞生自始至终给了多方面的关心和支持。在此一并表示感谢。

限于编者水平，缺点与错误在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1987.春

目 录

绪论	(1)
----	-----

第一篇 静力学

第一章 静力学基础	(4)
§ 1-1 静力学基本概念	(5)
§ 1-2 静力学公理	(6)
§ 1-3 力的效应的度量及其相关定理	(9)
§ 1-4 刚体受力的定性分析——约束反力的确定	(20)
§ 1-5 刚体受力的定性分析——受力图	(25)
第二章 力系的简化	(29)
§ 2-1 两种基本力系的简化	(29)
§ 2-2 空间任意力系向一点的简化	(36)
§ 2-3 特例——平面任意力系的简化	(42)
§ 2-4 平行力系中心 重心	(47)
第三章 平面力系的平衡	(55)
§ 3-1 平面力系的平衡条件和平衡方程	(55)
§ 3-2 刚体系统的平衡	(63)
§ 3-3 考虑摩擦时的平衡问题	(66)
§ 3-4 平面静定桁架的内力计算	(77)
第四章 空间力系的平衡	(82)
§ 4-1 空间力系的平衡方程	(82)
§ 4-2 力学计算简图	(89)

第二篇 运动学

第五章 运动学基础 (96)

§ 5-1 点的运动学 (一) (96)

§ 5-2 例题——点的运动学 (一) (107)

§ 5-3 刚体运动学(一)——刚体的平动和定轴转动 (114)

§ 5-4 例题——刚体运动学(一) (121)

第六章 点的运动学 (二) ——点的运动的分解与合成

..... (126)

§ 6-1 概述 (126)

§ 6-2 动系为平动的情形 (128)

§ 6-3 例题——牵连运动为平动时的速度和加速度

分析..... (129)

§ 6-4 动系为定轴转动的情形 (136)

§ 6-5 例题——牵连运动为转动时的速度和加速度

分析..... (138)

第七章 刚体运动学 (二) ——刚体的平面运动 (147)

§ 7-1 刚体的平面运动概述 (147)

§ 7-2 刚体平面运动的整体描述 (149)

§ 7-3 平面图形上各点的速度 (151)

§ 7-4 例题——平面图形上各点的速度分析 (154)

§ 7-5 平面图形上各点的加速度 (161)

§ 7-6 例题——平面图形上各点的加速度分析 (162)

第三篇 动力学

第八章 动力学基础 (169)

§ 8-1 动力学基本定律 (169)

§ 8-2 质点运动微分方程 (171)

§ 8	质点动力学两类基本问题举例	(172)
第九章	动量定理	(183)
§ 9-1	动量定理	(183)
§ 9-2	动量守恒定理	(190)
§ 9-3	质心运动定理	(190)
* § 9-4	碰撞	(197)
第十章	动量矩定理	(201)
§ 10-1	动量矩定理	(201)
§ 10-2	刚体定轴转动微分方程	(206)
§ 10-3	刚体转动惯量的计算	(208)
§ 10-4	动量矩定理应用举例	(213)
* § 10-5	碰撞对定轴转动刚体的作用	(221)
第十一章	动能定理	(224)
§ 11-1	动能定理	(224)
§ 11-2	刚体动能的计算	(226)
§ 11-3	功的计算	(228)
§ 11-4	动能定理应用举例	(234)
§ 11-5	势力场 势能 机械能守恒定理	(240)
§ 11-6	功率 机械效率	(243)
§ 11-7	动力学普遍定理的综合应用	(244)
第十二章	达朗伯原理	(252)
§ 12-1	达朗伯原理	(252)
§ 12-2	动静法	(254)
§ 12-3	刚体惯性力系的简化	(257)
§ 12-4	定轴转动刚体对轴承的动压力	(269)
第十三章	虚功原理	(272)
§ 13-1	约束及其分类	(272)
§ 13-2	虚功与理想约束 · 虚功原理	(278)

§ 13-3 虚功原理应用举例	(280)
* 第十四章 机械振动基础	(289)
§ 14-1 质点的自由振动 (无阻尼情况)	(289)
§ 14-2 质点的自由振动 (有阻尼情况)	(294)
§ 14-3 单自由度系统的强迫振动	(299)
§ 14-4 振动的利用与抑制	(307)
思考题与习题	(310)
附录——习题答案	(460)

注：带*号的章节为选学内容。

绪 论

任何物质皆处于永恒的运动中，而运动形式多种多样。

机械运动——物体在空间的位置随时间的变化——是其中最基本、最简单的一种形式。理论力学是研究物体机械运动的规律及其应用的科学。它属于经典力学(牛顿力学)。经典力学是以十七世纪伽利略和牛顿总结的基本定律为基础而发展起来的。它只适用于宏观物体且速度远小于光速的运动。而微观粒子的运动和接近光速的运动分别属于二十世纪初诞生的量子力学和相对论力学(统称近代力学)研究的范围。实际中的工程问题，一般都是宏观物体，且其运动速度远比光速小，故经典力学仍有广泛的用途，并在不断地发展。

学习理论力学的意义有三：(一)理论力学是现代工程技术的重要基础之一。没有一项工程技术能够离开力学而存在。例如土建、水利工程，机械、兵器工程，桥梁、船舶工程，宇航、航空工程等等，都是需要大量理论力学知识的部门。(二)理论力学是学好一系列后继课程的基础。例如材料力学、结构力学、机械原理、机械零件、振动学、流体力学以及其它相关的专业科目，都常常用到理论力学的原理和方法。(三)学习理论力学有助于培养辩证唯物主义世界观，培养学生认识事物和处理问题的能力。由此可见，对于工科学生来说，理论力学既是理论基础课，又是技术基础课。

根据工科学生的特点和客观要求，本教材分为如下三篇来叙述：一、静力学，二、运动学，三、动力学。各篇的研究内容和任务将在以后分别加以说明。

第一篇 静力学

静力学研究的主要问题是：①研究作用于物体上的力系的等效代换与简化的规律。所谓力系，就是作用于物体上的若干个力。为了便于研究问题，在不改变对物体作用效果的前提下，用另一个力系去代换原来的力系，称为力系的等效代换；如用一个力或一个较简单的力系去等效代换原有的较复杂的力系，称为力系的简化。学习它既为动力学奠定基础，也有其独立的意义。②研究力系的平衡条件及其应用。平衡是机械运动的一种特殊状态。作用于物体而使它处于平衡状态的力系称为平衡力系。平衡力系所应满足的条件称为平衡条件。力系的平衡条件在工程实际中有着广泛的应用。例如设计任何机器和建筑物时，常常要求预先根据平衡条件进行静力分析。

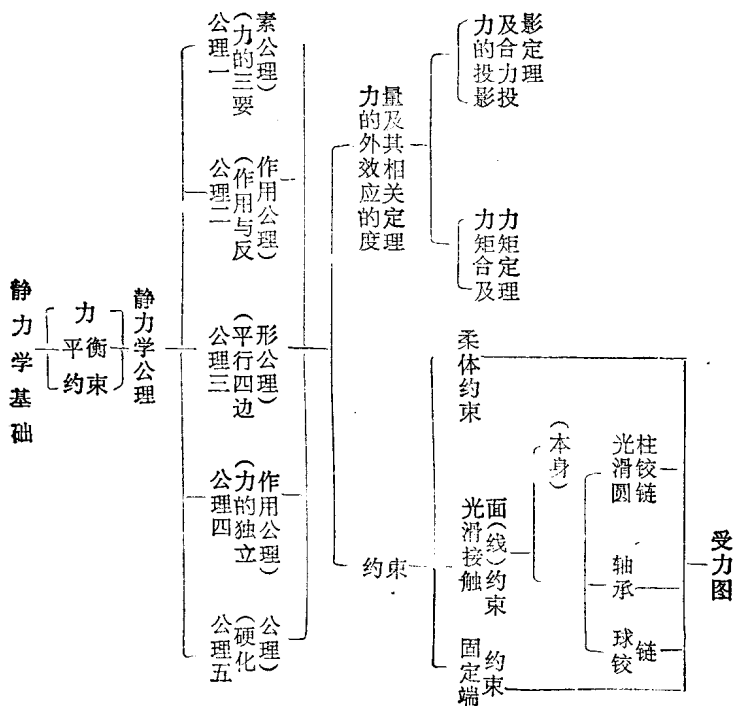
刚体，是在力作用下不发生变形的物体。它是理论力学的模型之一。实际上，物体受力时总会发生或大或小的变形。但在很多情况下，物体的变形不仅很小，而且对静力学研究的问题来说，略去物体的变形而把它看成刚体，不会给研究结果造成显著的误差，却可使问题大为简化。这也是科学研究中常用的抽象化方法。它就是从具体事物的复杂现象中抓住起决定性作用的主要因素，略去其次要因素，从而用一个较简单的模型来代替原来的具体事物。刚体、质点和理想弹性体，都是对现实物体采用抽象化方法得到的理想化模

型。

应该强调指出，运用抽象化方法时，不仅要考虑变形的大小，还必须考虑所研究的问题的性质和条件。有时变形虽小，如不考虑变形而会妨碍问题的解决时，就不能把这种物体抽象化为刚体。

第一章 静力学基础

本章着重阐明四个问题：（1）静力学的基本概念，（2）静力学公理，（3）力作用外效应的度量及其相关定理，（4）刚体受力的定性分析。



§ 1—1 静力学基本概念

为了使一门学科的理论系统避免循环论证，必须选取少数几个原始概念作为基本概念，对它们不加定义。其它概念则通过基本概念或已经由基本概念解释过的概念来定义。本章讨论的基本概念有力、平衡和约束。

力的概念 当人们挑担、推车、抛物时，都会感觉到必须给物体一种作用。这种作用不同于电磁、化学等作用，而是机械作用，人们称之为力。力是物体间相互的机械作用，它使物体发生运动状态的变化或变形。力作用于物体而使物体的运动状态发生变化，称为力的外效应；力作用于物体而使物体的形状发生变化，称为力的内效应。力的外效应又分移动效应和转动效应。

两个大小相等，方向相反，作用线平行的力，组成一个既简单又特殊的力系（图1-1），称为力偶。关于力偶的性质及其作用效果的度量，将在§ 1—3中阐述。

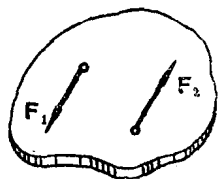


图 1-1

如一个力与一力系等效，则此力称为该力系的合力。

为了表明力的大小，必先确定度量的单位。根据我国法

定计量单位，本书采用国际单位制中的牛顿(N)作为力的单位。(在工程单位制中，力的单位是公斤力(kgf)， $1(\text{kgf}) = 9.80(\text{N})$)。

平衡概念 前已指出，平衡是机械运动的特殊形式，一般是指物体相对于惯性参考系静止或作匀速直线移动(无转动)的情形。通常把与地球固连的参考系作为惯性参考系，不能把相对于地球作变速运动的物体(例如正在启动或制动的火车)看成惯性参考系。

约束概念 在空间可以任意运动的物体称为自由体。如飞行的鸟、飞机或火箭等。反之，如电线吊着的电灯，轨道上运行的火车，嵌在墙里的雨篷板等等，它们的运动分别受到电线、铁轨、砖墙的限制，故称为非自由体。周围物体对于该物体的运动给予的限制条件，称为约束。有时也把构成约束的物体称为约束。故对于电灯来说，电线是约束。同理，铁轨是列车的约束，砖墙是雨篷板的约束。约束限制被约束物体的运动时作用于被约束物体的力，称为约束反力，简称约束力或反力。约束反力以外的力称为主动力，例如重力、液压力、弹簧力、电磁力等。这些力一般都可以预先独立确定。约束反力是由主动力引起的，一般是未知的力。

§ 1 — 2 静力学公理

为了使一门学科的理论系统避免循环论证，还必须选取少数几个原始命题作为基本命题，对它们不加证明；其它命题则通过基本命题或已由基本命题证明过的命题来证明。这些基本命题就是公理或定律。

公理一 力的三要素公理 力对物体作用的效应取决于力的三要素：力的大小、方向和作用点；对刚体来说，作用点可换为作用线。

该公理揭示了力的基本性质。它表明力可用一定位矢量表示。通常以一有向线段的长度、方向和始端（或末端）分别表示力的大小、方向和作用点。过力的作用点沿力的方向所画的直线，称为力的作用线。该公理指出，力的作用点可沿作用线移到刚体上的任意一点而不改变力对该刚体的作用效应。这一结论揭示了力的可传性。这条性质不适用于变形体。例如，决不能移动软绳两端所受的拉力而变为压力。因此，对刚体来说，力可用一滑动矢量表示。

公理二 作用与反作用公理 当这物体对那物体有作用时，那物体对这物体必有反作用；而且，作用力与反作用力大小相等，方向相反，作用线相同，分别作用于两个不同的物体上。若令 F_1 与 F_2 分别表示作用力与反作用力，则有 $F_1 = -F_2$ 。

由该公理可知，力总是成对出现的。它揭示了物体间的作用具有相互作用的本质。约束体与被约束体相互作用的力，实际上就是作用力与反作用力。不必去区分约束力是作用力还是反作用力。但必须注意，作用力与反作用力的关系，并不是主动力与约束反力的关系。

公理三 平行四边形公理 作用于物体上同一点的两个力，其合力仍作用于该点，合力的大小与方向由以这两力为边，其始端（或末端）相接而构成的平行四边形的对角线确定（图1-2）。若以 R 表示力 F_1 与 F_2 的合力，则

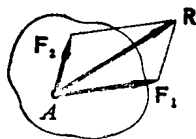


图 1-2

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

(1-1)

该公理表明了力是矢量，因而遵循平行四边形运算法则（其他带方向的量如有限角位移、电流强度等量并不如此）。它是力系简化的理论基础。

推论 1 二力平衡条件 作用于—刚体上的两个力平衡的充要条件是：两力大小相等，方向相反，作用线相同。

证明 设刚体上有任意二力 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 分别作用于点 A_1 和 A_2 （图1-3），据公理一将二力的作用点沿其作用线移至交点 A ，再依公理三求得其合力 $\mathbf{R}$ 。要使刚体平衡，则由平衡概念和力的概念可知该合力必须为零，即 $\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = 0$ ，

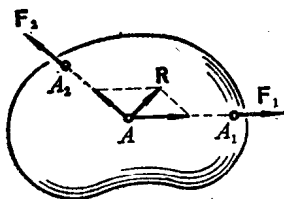


图 1-3

故 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 必须等值、反向、共线（必要性）。反之，若 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 等值、反向、共线，则其合力必为零，故按力和平衡的概念可知刚体必平衡（充分性）。

该推论对变形体来说只是必要的而非充分的。例如软绳受压时不能成立，除非二力共点。

推论 2 三力平衡汇交条件 若作用于—刚体上的三个不平行的力构成平衡力系，则它们的作用线必汇交于一点，且一定共面（自证）。

当—刚体受三个不平行力而处于平衡时，常用这个推论来确定未知力的方向。

公理四 力的独立作用公理 一力系作用于—刚体上所产生的外效应等于各力单独作用所产生的外效应的矢量叠加。