

任宝生

理论

THEORETICAL MECHANICS

力学

西安交通大学出版社

理论力学

任宝生

西安交通大学出版社

内容简介

本书是按照国家教委于1987年批准实行的“高等工业学校理论力学课程教学基本要求”(参考学时范围:70~80学时),并参照1993年11月通过的“工科理论力学教学基本要求(修改稿)”编写的。带“*”号内容为非基本要求。

全书内容分为静力学、运动学和动力学三大部分。并附有思考题和习题,书末附录部分给出了习题答案。

本书理论系统完整、概念清晰、层次分明、内容丰富、简明易懂。可作为高等工业院校有关专业理论力学课程的教材;内容经删减后,可供少学时类型专业使用;本书可供电大、夜大、函大、职工大学等用作教材,也可供有关工程技术人员自学和参考。

(陕)新登字 007 号

理论力学

任宝生

责任编辑 郑丽芬

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路28号 邮政编码 710049)

陕西省轻工业厅印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:12.375 字数:313千字

1995年12月第1版 1995年12月第1次印刷

印数:1——6000

ISBN7-5605-0731-X/O·120 定价:11.00元

前 言

一本好的教材,既要汲取长期优良教学经验之精髓,不断精雕细刻,去伪存真、删繁就简、充实内容,又须根据教学发展,推陈出新,刻意改进,这对于发扬优良教学传统,保证教学质量是十分重要的。

本书是在原教材《理论力学》(1982年西安交通大学理论力学教研室编)的基础上,按照1987年起实行的“高等工业学校理论力学课程教学基本要求”(参考学时范围:70~80学时),并参照1993年11月全国工科理论力学教学指导小组第三次会议通过的“工科理论力学教学基本要求(修改稿)”而重新编写的。编写时,发扬交大的优良教学传统,力求保持原教材的优点,做到理论完整、层次分明、概念清晰、简明易懂。同时适当增加了深度和广度。本书在保证理论体系完整的条件下,突出理论力学课程的基本内容,尽量减少与大学物理中有关内容的重复。书中选编了大量的例题、思考题和习题,部分例题的叙述较为详细,注重分析,以便于自学。书中带“*”号部分为加深加宽内容。本书内容按教学基本要求做适当删减后,也可供少学时类型(参考学时范围:50~60学时)课程教学使用。

本书由西安交通大学党锡淇教授主审,并得到了党教授的悉心指导。西安交通大学理论力学教研室郑丽芬副教授和张义忠副教授仔细阅读了书稿,提出了许多宝贵意见。没有他们的支持和帮助,本书是不可能顺利完成的。郑丽芬副教授还担任了书稿的编辑加工工作,付出了许多心血,在此表示衷心的感谢。

囿于编者水平,错误及疏漏在所难免,还盼使用本书的教师和学生不吝赐教。

任宝生

1994.10.25

目 录

前言 绪论

静力学

第1章 静力学基础

§ 1-1 静力学基本概念	(5)
§ 1-2 静力学公理	(7)
§ 1-3 力的分析表示法	(9)
§ 1-4 约束和约束反力	(12)
§ 1-5 受力图	(17)
思考题	(19)
习题	(20)

第2章 力偶

§ 2-1 力偶的概念	(25)
§ 2-2 力偶的性质	(26)
§ 2-3 力偶矩矢量	(28)
§ 2-4 力偶系的合成与平衡	(29)
思考题	(31)
习题	(31)

第3章 平面力系

§ 3-1 力对点之矩	(35)
§ 3-2 力的平移定理	(36)
§ 3-3 平面力系向一点简化 主矢与主矩	(37)
§ 3-4 平面力系的简化结果	(40)

§ 3-5 平面力系的平衡条件和平衡方程	(42)
----------------------------	------

§ 3-6 静不定概念 物体系统的平衡	(50)
---------------------------	------

思考题	(58)
-----------	------

习题	(60)
----------	------

第4章 摩擦

§ 4-1 滑动摩擦	(71)
------------------	------

§ 4-2 考虑滑动摩擦时的平衡问题	(75)
--------------------------	------

§ 4-3 滚动摩擦的概念	(80)
---------------------	------

思考题	(82)
-----------	------

习题	(82)
----------	------

第5章 空间力系

§ 5-1 力对点之矩矢量与力对轴之矩	(90)
---------------------------	------

§ 5-2 空间力系向一点简化 主矢和主矩	(94)
-----------------------------	------

§ 5-3 空间力系的平衡条件	(96)
-----------------------	------

§ 5-4 重心	(99)
----------------	------

思考题	(105)
-----------	-------

习题	(105)
----------	-------

运动学

第6章 点的运动

§ 6-1 矢量法	(113)
-----------------	-------

§ 6-2 直角坐标法	(115)
-------------------	-------

§ 6-3 自然法	(119)
-----------------	-------

思考题	(126)
-----------	-------

习题	(126)
----------	-------

第7章 刚体运动的基本形式

§ 7-1 刚体的平动	(131)
-------------------	-------

§ 7-2 刚体绕定轴转动	(132)
---------------------	-------

思考题.....	(139)
----------	-------

习题.....	(141)
---------	-------

第8章 点的复合运动

§ 8-1 复合运动基本概念	(145)
----------------------	-------

§ 8-2 速度合成定理	(147)
--------------------	-------

§ 8-3 牵连运动为平时点的加速度合成定理	(154)
------------------------------	-------

§ 8-4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	(157)
-------------------------------	-------

思考题.....	(163)
----------	-------

习题.....	(164)
---------	-------

第9章 刚体平面运动

§ 9-1 刚体平面运动方程	(174)
----------------------	-------

§ 9-2 平面运动分解为平动和转动	(175)
--------------------------	-------

§ 9-3 平面图形内各点的速度	(177)
------------------------	-------

§ 9-4 平面图形内各点的加速度	(187)
-------------------------	-------

思考题.....	(191)
----------	-------

习题.....	(192)
---------	-------

动力学

第10章 质点运动微分方程

§ 10-1 动力学基本定律	(202)
----------------------	-------

§ 10-2 力学的单位制和量纲	(204)
------------------------	-------

§ 10-3 质点运动微分方程	(205)
-----------------------	-------

思考题.....	(212)
----------	-------

习题	(213)
----------	-------

第11章 动量定理

§ 11-1 动量与冲量	(219)
--------------------	-------

§ 11-2 动量定理	(222)
-------------------	-------

§ 11-3 质心运动定理	(229)
---------------------	-------

思考题	(235)
习题	(236)
第 12 章 动量矩定理	
§ 12-1 动量矩	(242)
§ 12-2 动量矩定理	(244)
§ 12-3 转动惯量	(252)
§ 12-4 刚体定轴转动微分方程式	(256)
* § 12-5 相对于质心的动量矩定理	
刚体平面运动微分方程式	(259)
思考题	(264)
习题	(265)
第 13 章 动能定理	
§ 13-1 力的功 功率	(274)
§ 13-2 动能	(278)
§ 13-3 动能定理	(280)
§ 13-4 动力学普遍定理的综合应用	(289)
* § 13-5 碰撞	(294)
思考题	(302)
习题	(302)
第 14 章 达朗伯原理	
§ 14-1 达朗伯原理	(312)
§ 14-2 刚体惯性力系的简化	(316)
§ 14-3 转子的静平衡和动平衡	(324)
思考题	(326)
习题	(327)
第 15 章 虚位移原理	
§ 15-1 约束 自由度 广义坐标	(333)
§ 15-2 虚位移 虚功	(337)

§ 15-3 理想约束	(337)
§ 15-4 虚位移原理	(339)
习题	(345)
第 16 章 振动的基本理论	
§ 16-1 自由振动	(349)
§ 16-2 有阻尼自由振动	(356)
§ 16-3 受迫振动 共振	(359)
§ 16-4 振动的消减与隔离	(364)
习题	(365)
附录	

绪 论

理论力学是研究物体机构运动一般规律的科学。

在我们周围的物质世界里,万物皆处于运动和发展变化之中。运动是物质的存在形式,是物质的固有属性。物质运动的形式是多种多样的,它包括了宇宙中的一切现象和过程,从电子运动、化学反应、生物活动,直到人的思维、社会现象等等。理论力学所研究的机械运动指的是物体在空间的位置随时间发生的变化。这是物质运动中最普遍、最简单的形式,却又是自然界和工程技术中最常见的运动形式。物体的移动、天体运行、机器运转等都是机械运动。

理论力学以牛顿提出的基本定律为理论依据,属于经典力学的范畴。所谓经典力学,是相对于 19 世纪末和本世纪初产生的相对论力学和量子力学而言的。相对论力学揭示了时间、空间和物质运动以及能量和质量之间的关系;而量子力学则揭示了微观粒子的运动规律。这些新的研究成果表明,经典力学的应用范围是有局限性的。它不适用于速度接近光速的物体的运动,也不适用于微观粒子的运动。尽管如此,由于一般工程问题的研究对象是尺度远大于微观粒子的宏观物体,而且其速度远小于光速,实践表明,对于这样的问题,应用经典力学理论可以达到足够的精确度;另一方面,经典力学的理论和方法又简单方便得多,所以,目前仍然以经典力学为依据来研究一般工程技术中的力学问题。

随着现代科学技术的迅猛发展,经典力学也获得了长足的进步,产生了许多分支学科,就理论力学领域而言,有振动力学、运动稳定性理论、变质量力学等。同时,经典力学与其它学科相结合,又产生了许多边缘学科和交叉学科,如生物力学、地质力学、电磁流体力学、物

理力学、爆炸力学等。经典力学具有强大的生命力,在科学技术现代化的今天,学习经典力学仍然具有极其重要的现实意义。

在工科高等教育中,理论力学是一门重要的技术基础课。它的任务是使学生了解和掌握物体机械运动的基本规律及其研究方法,并能初步运用这些规律解决工程实际问题。

理论力学研究力学的最基本、最普遍的规律,它是各门力学的基础,为一系列后续课程,如材料力学、结构力学、机械原理、流体力学、振动力学等提供了理论基础,同时,许多专业课程的理论推导和分析,也都需要应用理论力学的概念、定理和方法。另一方面,理论力学在很多工程技术领域中有着广泛的应用。机械、动力、建筑、化工、电气工程等传统学科的创新与进步,航天技术、机器人、工业自动控制等新兴学科的发展,都对力学提出了更多更高的要求。对于许多工程技术领域的新型高级技术人员来说,广博的力学知识是不可缺少的。理论力学已不仅仅只是一门基础学科,它已成为现代工程技术的重要的理论基础之一。

理论来自实践。人类的生产实践是力学发生、形成和发展的源泉。人们在长期的生活和生产实践中,通过观察和实验,获取了大量关于机械运动的感性知识,经过科学的抽象思维和分析综合,得到了有关机械运动的概念,并从而建立了一些最基本的公理或定律,构成这门科学的基础,再经过数学推演,得出各种运用于不同情形的定理和结论。观察和实验是人们获取感性认识的主要手段,抽象化和数学演绎法则是理论力学研究中广泛应用的方法。

生产实际中的力学现象是错综复杂的。为了揭示现象之间的本质联系,必须暂时舍弃次要的、表面的因素,抓住起决定作用的主要因素,深入事物的本质,这就是力学研究中的抽象化方法。例如,物体的质量是与运动速度有关的,但是,对于速度远小于光速的物体,可以略去速度对物体质量的微小影响,认为质量与速度无关。又如,在研究物体的静平衡问题时,根据问题的性质,有时可以略去微小变形

的影响而得到了刚体这一抽象化的力学模型。质点、质点系和刚体是理论力学的研究对象,它们都是在一定条件下,由实际物体抽象得到的力学模型。当然,任何抽象都是有条件的。当所研究问题的条件发生改变时,就必须考虑新的因素,建立新的模型。这种抽象化的方法,在科学研究中具有普遍的意义。

数学演绎法在理论力学理论的形成过程中起着重要的作用。人们为了更深入地认识机械运动,需要把机械运动规律中的变化定量地表达出来,因此,经常借助于数学推演以进一步理解各力学量之间的内在联系和变化规律。理论力学的所有定理和结论都是由一些公理或定律出发,用数学演绎的方法得到的。事实上,数学本来就是人们在生产实践的基础上形成和发展起来的一门研究现实世界的量的关系和空间形式的科学。力学和其它科学一起为数学提供了各种有关量的关系的资料,从而推动了数学的发展。反过来,数学的发展又促进了力学与其它科学的进步。因此,我们在学习理论力学时,不可仅仅满足于数学推导,而忽视了对力学规律本质的理解。

总而言之,理论力学来源于实践又服务于实践,既具有严密而完整的理论体系,又密切结合工程实际。学习理论力学,对于培养我们的唯物主义世界观和科学方法论,提高逻辑思维和分析问题的能力,对于以后学习新科学技术,都是十分重要的。

为了便于学习,通常把理论力学分为三部分,即静力学、运动学和动力学。这样的叙述方法是符合从简单到复杂的认识过程的,同时也大体上反映了力学的发展过程。

静力学研究力的合成规律和在力系作用下刚体的平衡条件。

运动学从几何的观点研究物体的机械运动,而不考虑作用于其上的力。

动力学研究作用于物体上的力和机械运动变化之间的关系。

静 力 学

静力学研究力的合成规律和力系的平衡条件。

一般而言,作用在物体上的力往往是比较复杂的。为了便于研究,通常先把这个复杂力系简化为易于讨论的简单力系,再通过简单力系分析物体平衡时力系应该满足的条件,即平衡条件。因此,静力学着重研究两个基本问题:

1. 力系的简化。
2. 力系的平衡条件。

静力学在工程中的应用非常广泛。机械和工程结构的设计都是要求应用静力学理论分析受力情况。另外,力在物体平衡时所表现的基本性质、力系的简化理论以及受力分析的方法等,也同样适用于物体运动时的情形,所以,静力学也为研究动力学问题提供了基础。

第 1 章 静力学基础

本章阐述静力学的基本概念,介绍静力学公理,讨论力的分析表示法、约束的概念和受力分析的方法。本章是静力学以及全部理论力学的重要基础。

§ 1-1 静力学基本概念

平衡、刚体和力是静力学最重要的基本概念。

平衡

平衡是物体机械运动的一种特殊形式。如果物体相对于惯性参考系保持静止或作匀速直线平动,则称该物体处于平衡状态。惯性参考系的定义将在动力学中给出。一般工程问题中,可以把固连于地球的参考系近似地认为是惯性参考系,所以,静力学中的平衡可以理解为物体相对于地球保持静止或作匀速直线平动。

刚体

实践表明,任何物体受到力的作用时都将产生程度不同的变形。有时,这种变形非常微小。例如,机床在高速切削时,主轴的最大挠度不允许超过轴承间距的万分之二。在许多问题中,这种微小变形的影响很小,以致于可以将它略去不计,从而得到刚体这一抽象化的力学模型。所谓刚体,是指在力的作用下永不变形的物体。换句话说,刚体是在任何情况下其内部任意两点之间的距离都不会改变的物体。至于在一个问题中能否将物体视为刚体,不仅取决于变形的大小,还取决于问题的要求。

本篇以刚体和刚体系统为研究对象,所以也称为刚体静力学。在

材料力学、结构力学等课程中将会看到,对变形体平衡问题的研究是以刚体静力学为基础的。

力

力的概念产生于劳动之中。早在 2 400 年以前,我国古代科学家墨翟(公元前 468~376 年)就已在其著作《墨经》中指出:“力、形之所以奋也。”这是世界上关于力的概念的最早记载。

力是物体间相互的机械作用,这种作用的结果使物体的运动状态和形状发生改变。力使物体的运动状态(包括平衡状态)发生改变的效应称为力的运动效应,或称外效应;力对物体变形的影响则称为力的变形效应或内效应。理论力学只研究力的外效应。

由观察和实验得知,力对物体的作用,完全决定于力的大小,力的方向和力的作用点三个因素(通常称为力的三要素),因而力是一个有大小和方向的物理量,以后将说明,力是服从矢量相加运算法则的,所以力是矢量。可以表示如 $\vec{F}$ 或 F 。本书中,表示力矢量的字母均采用黑体。作图时,则将力矢量表示为一带有箭头的有向线段,其方向表示力的方向,其长度按照选定的比例尺表示力的大小。

在国际单位制(SI)中,力的单位是牛顿(N)。在工程单位制中,力的单位是公斤力(kgf)。两者的换算关系为

$$1(\text{kgf}) = 9.8(\text{N})$$

物体往往受到许多力的作用。同时作用于物体的一群力称为力系。由力 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 组成的力系可以表示为 $(F_1, F_2, \dots, F_n)$ 。力系中所有力的作用线都在同一平面内的力系称为平面力系,反之则称为空间力系。各力作用线均汇交于一点的力系称为汇交力系,各力作用线都相互平行的力系称为平行力系。

如果作用在某一刚体上的力系可以用另一力系代替,而不会改变刚体在原力系作用下的运动状态,则此二力系称为等效力系。与一个力系等效的力称为该力系的合力,而力系中的各力称为合力的分力。如果一个力系作用于刚体能使其保持平衡,则称这个力系为平衡

力系。力系成为平衡力系时所必须满足的条件称为平衡条件。研究刚体的平衡问题,实际上就是研究作用于刚体的力系的平衡条件。

§ 1-2 静力学公理

人们在长期实践中,对力的基本性质不断进行概括和总结,得到下述静力学公理。公理无需证明而被公认,其正确性业已为大量的实验和观察所证实。静力学以这些公理为理论基础,它的所有定理和结论都是由这几个公理推演出来的。

公理一(二力平衡公理) 作用于同一刚体的两个力使刚体处于平衡的必要与充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

公理一阐明了作用于刚体的、由两个力组成的最简单力系的平衡条件。它是论证作用于刚体的力系的平衡条件的基础。

公理二(加减平衡力系公理) 可以在作用于刚体的力系中添加或去掉任何平衡力系,而不改变原力系对刚体的作用。

由上述两个公理,可以得到如下重要推论。

推论(力的可传性) 作用于刚体上的力,可沿其作用线在刚体(或刚体的延拓部分)内任意移动,而不改变对刚体的作用。

证明:设力 F 作用于刚体内的点 A ,如图 1-1(a)所示。在其作用线上任一点 B 添加一平衡力系 (F_1, F_2) ,并使 $F_1 = -F_2 = F$ (图 1-1(b))。根据公理二,力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 等效。另一方面,力 F 和 F_2 又构成一个新的平衡力系,可以将其从力系 (F, F_1, F_2) 中去掉(图 1-1(c)),于是,力 F_1 与 F 等效。由于 $F_1 = F$,这样就相当于将力 F 由点 A 沿其作用线移到了任意点 B ,而并未改变它对刚体的作用。推论得证。

力的可传性表明,力对刚体的作用与力的作用点在作用线上的位置无关,也就是说,作用在刚体上的力是滑动矢量,可沿其作用线

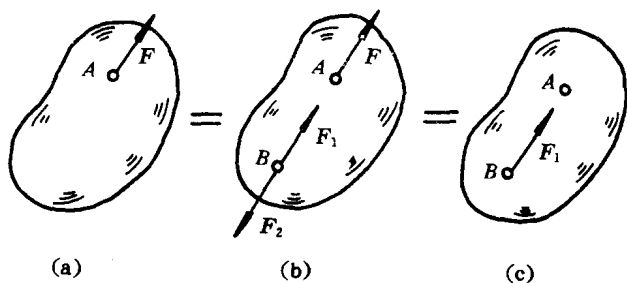


图 1-1

任意滑移。

公理三(力的平行四边形公理) 作用于物体同一点的两个力可以合成一个力,此合力也作用在该点,合力的大小和方向可以由以两力矢为邻边所构成的平行四边形的对角线表示。

图 1-2 中, R 是力 F_1 和 F_2 的合力。合力矢与分力矢之间的矢量关系可表示为

$$R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

公理三是研究力系的合成与力的分解的基础。

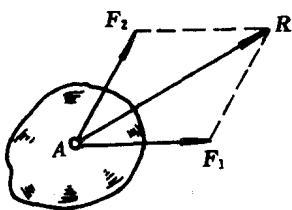


图 1-2

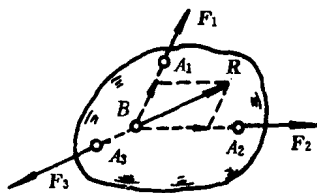


图 1-3

推论(三力平衡汇交定理) 刚体受三个力的作用而平衡,若其中两个力的作用线相交于一点,则这三个力必位于同一平面内,并且