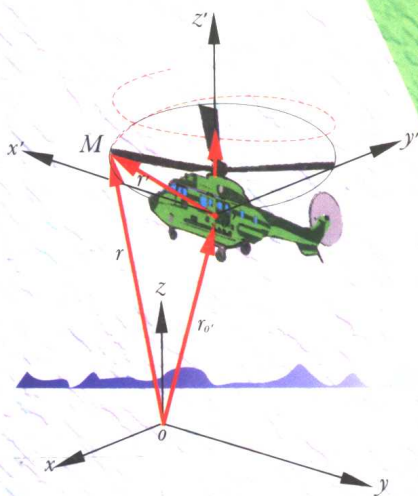




全国基础力学课程教学基地系列教材

理论力学

工程静力学



☆ 西北工业大学理论力学教研室 编

☆ 和兴锁 主编

西北工业大学出版社

全国基础力学课程教学基地系列教材

理 论 力 学

(工 程 静 力 学)

西北工业大学理论力学教研室 编

主 编 和兴锁

副主编 刘小洋

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据教育部高等工业学校理论力学课程教学的基本要求编写的。它是全国基础力学课程教学基地系列教材《理论力学》的工程静力学部分。全书共六章,分别讲述了静力学的基本概念与公理,力系的简化、合成与平衡,考虑摩擦时的平衡问题等。本书注重分析问题、解决问题的思路及方法,适用于课堂教学。

本书可作为高等工业学校机械、航空、航天、航海、土建、机电和动力等类专业理论力学课程的教材,也可供夜大学、函授大学相关专业及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学:工程静力学、工程动力学、高等动力学/和兴锁主编. —西安:西北工业大学出版社,2001.6

ISBN 7-5612-1331-X

I. 理... II. 和... 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 15160 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号,邮编:710072 电话:029-8493844

网 址:<http://www.nwpup.com>

印刷者:西安电子科技大学印刷厂

开 本:850 毫米×1 168 毫米 1/32

印 张:5.375

字 数:125 千字

版 次:2001 年 8 月 第 1 版 2001 年 8 月 第 1 次印刷

印 数:1~2 000 册

定 价:8.00 元

前 言



本书是以西北工业大学理论力学教研室历年来编写的各种学时《理论力学》教材为基础编写的。它是全国基础力学课程教学基地模块式《理论力学》教材的静力学模块,可作为机械、航空、航天、航海、土建、机电、动力等各专业的理论力学课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

在编写过程中,我们参照了国家教育部制订的高等工业学校理论力学教学的基本要求,优化了课程内容,注意了课程的系列化问题,精简了课程的重复部分。在内容选材方面,我们力求保持理论力学体系的完整性和严密性,定理证明和逻辑推理的严谨性,尽量做到叙述恰当,思路清晰,富于启发性,便于自学;同时坚持理论联系实际,加强了各专业的通用性。书中引伸和加选内容用“*”号标出。

此次编写是在西北工业大学理论力学教研室统一规划和组织下完成的,参加编写工作的有(按章节的顺序)和兴锁(绪论),刘小洋(第一~四章),侯美丽(第五章),韩小平(第六章)。全书由和兴锁统稿并任主编,刘小洋任副主编。

全书由蔡泰信教授主审,吕茂烈教授对本书的编写提出了不少宝贵意见,西北工业大学教材建设科、出版社的领导和编辑们给予许多关心和帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2001 年 1 月

目 录



绪论	1
第一章 工程静力学基础	6
§ 1-1 静力学的基本概念	6
§ 1-2 静力学公理	8
§ 1-3 约束和约束反力	12
§ 1-4 受力分析和受力图	16
习题一	20
第二章 基本力系	23
§ 2-1 力系的基本类型	23
§ 2-2 共点力系合成与平衡的几何法	23
§ 2-3 力的投影·力沿坐标轴的分解	28
§ 2-4 共点力系合成与平衡的解析法	31
§ 2-5 两个平行力的合成	36
§ 2-6 力偶及其性质	38
§ 2-7 力偶系的合成与平衡	42
习题二	45
第三章 平面任意力系	51
§ 3-1 力对点之矩	51
§ 3-2 力线平移定理	52

§ 3-3	平面任意力系的简化·主矢与主矩	54
§ 3-4	平面任意力系简化结果的讨论·合力矩定理	57
§ 3-5	平面任意力系的平衡条件和平衡方程	60
§ 3-6	平面平行力系的平衡	66
§ 3-7	物体系的平衡与静不定问题的概念	68
§ 3-8	平面静力学在工程中的应用举例	76
习题三		81
第四章	摩擦	91
§ 4-1	滑动摩擦	91
§ 4-2	考虑滑动摩擦时的平衡问题	94
§ 4-3	滚动摩擦阻力的概念	98
习题四		100
第五章	空间任意力系	104
§ 5-1	力对点的矩和力对轴的矩	104
§ 5-2	空间任意力系向任一点的简化·主矢与主矩	110
§ 5-3	空间任意力系的各种合成结果·一般形式的合 力矩定理	113
§ 5-4	空间任意力系的平衡条件和平衡方程	116
§ 5-5	重心	121
习题五		130
第六章	转动惯量	135
§ 6-1	转动惯量的概念与计算	135
§ 6-2	刚体对任意轴的转动惯量·惯性积和惯性主轴	145

§ 6-3 质量对称分布刚体的惯性主轴方向的判定·····	148
· § 6-4 惯性椭球·····	150
习题六·····	152
习题参考答案·····	155
参考文献·····	160

绪 论



一、理论力学的研究对象

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

所谓机械运动,是指物体在空间的位置随时间的变化。它是人们日常生活和生产实践中最常见、最普通、最简单的一种运动。掌握物体机械运动的普遍规律,不仅能够解释许多发生在我们周围的机械运动的现象,而且理论力学的定律和结论广泛应用于工程技术之中。例如机械和建筑结构的设计,航空与航天技术等,都以本学科的理论为基础。

理论力学里只研究物体平衡问题的部分称为静力学。其余部分结合物理原因研究物体运动的变化,称为动力学。在动力学里只从几何观点出发去描述物体运动的进行方式及其特征,这个部分被独立出来后形成了所谓的运动学。

理论力学所研究的内容是以伽利略和牛顿所总结的关于机械运动的基本定律为基础的,它属于古典力学的范畴。在全部科学中,古典力学最能成功地把来自经验的物理理论,系统地表达成数学抽象的简明形式,它是人类财富和技术史上的伟大里程碑。实践表明,古典力学的定律有着极其广泛的适用性。这些定律就是这门课程的科学根据。

理论力学起源于物理学的一个独立分支,但它的内容大大超

过了物理学的内容。在 20 世纪初,由于物理学的重大发展,产生了相对论力学和量子力学,表明古典力学的应用范围是有局限性的。古典力学的规律不适用于速度接近光速的宏观物体的运动,也不适用于微观粒子的运动。这样,在 20 世纪初出现了较古典力学更为严谨的相对论力学和适用于微观粒子运动的量子力学。但是,在研究速度远小于光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) 的宏观物体的运动,特别是研究一般工程上的力学问题时,应用古典力学来分析所得的结果是足够精确的。

由于理论力学是工程技术的重要理论基础,所以,它在工科院校中是一门重要的技术基础课程。它为学习一系列后续课程提供基础知识。例如,材料力学、结构力学、弹塑性力学、流体力学、机械原理和振动理论等课程都要以理论力学为重要基础。在很多专业课程中,也要用到理论力学的知识。因此可以设想,如果没有扎实的、足够的理论力学知识,在学习阶段中很难顺利地学好一系列后继课程;在工作岗位上不可能成为一个有独立解决工程实际问题能力的工程师。

二、理论力学的研究方法

任何一门科学的研究方法都不能离开认识过程的客观规律。理论力学也毫不例外,它的研究方法是从实践出发,经过抽象化、综合、归纳,建立一些基本概念、定律或公理,再用数学演绎和逻辑推理得到定理和结论,然后再通过实践来证实并发展这些理论。

实验是理论力学研究的重要手段之一。在力学的萌芽时期,建立力学的基本概念及基本定律,都是以对自然的直接观察以及从生活和生产劳动取得的经验作为出发点的。之后,系统地组织实验,就成了科学研究的重要手段。从观察和实验中所得到的感觉经验上升到理性认识,必须抓住事物和现象的内部联系。这样,就必

须在被观察到的现象中抽出最主要的因素和特征,而撇开其余次要的东西。这就是力学中的抽象化方法。

通过抽象化,进一步把人类在长期生产中以及通过直接观察、实验所获得的经验加以分析、综合和归纳,建立起一些最基本的定律或公理,作为整个古典力学的理论基础,这些工作已由牛顿总结完成。建立起作为理论力学依据的定律或公理后,再根据这些定律或公理,借助于严密的数学工具进行演绎推理,考虑所研究问题的具体条件,从而得出了适用于各种形式的定理和结论,揭示了各个物理量的内在联系和变化规律。还要注意,力学现象之间的关系是通过数量来表示的。因此,计算技术在力学方面的应用和发展有着巨大的作用。现代电子计算机的出现,为数学在力学中的应用提供了方便,从而也促进了力学的发展。当然,数学工具的运用,决不能脱离具体的研究对象,只有将数学运算与力学现象的物理本质紧密联系起来,才能得出符合实际的正确结论。

在今后力学的研究中,还必须与研究对象更加深入地联系起来,以便更深入地探索力学现象的物理本质,进一步发掘事物的特征,从而建立起更符合实际的新模型和相当的力学规律。只有这样,力学的内容才能不断地丰富起来。科学的目的是不只在认识世界,更重要的是在于改造世界。实践既是认识的惟一目的,同时又是认识的惟一标准。任何科学理论,包括力学,都必须在它指导实践时加以验证。只有当它足够精确地符合客观实际时,才能被认为正确可靠,也只有这样的理论才有实际意义。

三、力学发展简史

一切科学的发展过程都是与社会生产力的发展紧密地联系着的。力学也和其它自然科学一样,是由生产实践的需要而得到发展的。由于力学所研究的机械运动是物质运动的最简单的形式,而且

它是人们在日常生活中最容易被直接觉察到的。因此,力学是最早获得发展的学科之一。

远古以来,人们在生产劳动中就积累了力学知识。古代在建造各种宏伟的建筑物时(如古埃及的金字塔和我国的万里长城),当时的建筑者已具备了许多得自经验的静力学知识,已能使用一些简单的机械装置(如斜面、杠杆、滑轮等)去提升和搬运巨大的重物。我国古代在很多书籍文献中,对于力的概念,杠杆的平衡,滚动摩擦阻,功的概念,乐器的振动以及材料强度等的力学知识都有相当的记载。由此可见,我国古代勤劳勇敢的劳动人民在很早就积累了丰富的力学知识。但是,在以后直到公元 14 世纪的漫长时期中,由于封建和神权的统治,生产力受到束缚,科学的发展陷于停顿状态,力学也和其它学科一样,得不到发展。

15 世纪后半期,由于商业资本的兴起,手工业、航海工业和军事工业等都得到了空前的发展,促进了力学和其它学科的突飞猛进。从 16 到 17 世纪,力学开始形成一门系统的、独立的学科。意大利学者伽利略(1564—1642 年)首先在力学中应用了有计划的科学实验,创立了科学的研究方法,他根据观察和实验,明确地提出了惯性定律的内容,得出了真空中落体运动的正确结论,引进了加速度的概念并解决了真空弹道问题。牛顿总结了前人的成就,建立了经典力学的基本定律。

18 世纪以后,随着工业与技术的蓬勃发展,向科学提出了许多新的问题,同时由于微积分的出现,更促进了力学进一步的发展。18 和 19 世纪是理论力学发展成熟的时期,相继提出了虚位移原理、达朗伯原理、动力学普遍方程,于是以动力学普遍方程为基础的分析力学发展起来了。19 世纪上半期,由于大量机器的使用,功和能的概念在科学技术中得到了发展,这时期发现了能量守恒和转化定律。使力学的发展在许多方面和理论物理紧密地交织在一起,沟通了机械运动与其它形式的运动之间的联系。

20 世纪以来,由于航空工业、现代国防技术和其它新技术的需要,力学的许多分支如弹塑性理论、流体和气体力学、运动稳定性理论、非线性振动理论、陀螺力学和飞行力学等方面都有很大的发展,并取得了巨大的成就。20 世纪中叶以后,航天工程的兴起又给力学提出了许多新的极为复杂的理论问题。依靠快速电子计算机的协助,已解决了宇宙火箭的发射、人造卫星轨道的计算、稳定性与控制等一系列重大问题。所有这些都充分说明了现代力学的高度水平。

20 世纪的另一特点是出现了大批新的边缘学科,力学正在越来越多地渗入到其它有关学科中去;由于生产需要的促进和研究手段的改善,力学的模型也越来越复杂,能够更多地考虑各种因素。这样,就使得力学的领域不断扩大,从而形成一系列新的学科,如化学流体力学、电磁流体力学、物理力学、生物力学、系统力学、工程控制等。

力学的发展史内容极为丰富,以上仅简单地介绍了与本课程直接相关的部分。作为力学工作者,既要充分重视力学的基础理论研究,创造新概念、新理论,开拓新领域,又要充分重视力学的广泛应用,为实现四个现代化,赶超世界先进水平作出贡献。

第一章 工程静力学基础

§ 1-1 静力学的基本概念

静力学,主要是刚体静力学,研究的主要问题是:

(1) 作用于刚体上力的性质及其运算(包括合成、分解和简化)的方法;

(2) 作用于刚体上力系的平衡条件及其应用。

这里所谓平衡,是指物体相对于地面的静止或作匀速直线平动,这是物体运动的一种特殊情形。

静力学在工程中有广泛的应用,例如结构物的设计常常需先作静力分析。另外静力学关于力的性质及运算方法也是动力学研究的基础。因此本课程先学习静力学。

刚体和力都是力学中最基本的概念,现分别说明。

一、刚体

刚体是一个理想的力学模型。刚体是指在力的作用下形状和大小都始终保持不变的物体;或者说,受力时刚体内任意两点间的距离保持不变。实际物体在受力作用时总会有变形,但只要变形很小而不影响所研究问题的实质,就可以把这些物体看做刚体。或者说变形在所研究的力学问题中不起主要作用,则可以把变形后的物体看成刚体。本课程中的有关结论,有些是对刚体而言,有些则

是对实际物体而言,这些差别应予注意。

二、力

力是物体间相互的机械作用,这种作用使受力物体的形状和运动状态发生改变。

在理论力学里仅研究力所产生的效应,而不研究它的物理来源。同时约定,把引起物体变形的效应称为力的内效应,使物体运动状态变化的效应称为力的外效应。对于刚体则不显示力的内效应。

力的作用效应决定于力的三个要素:

- (1) 力的作用位置或作用点;
- (2) 力的方向;
- (3) 力的大小。

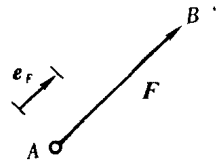


图 1-1

力的作用位置一般说是物体的一部分面积或体积。若作用面积或体积很小时可抽象为点,作用在此点的力称为集中力。否则称为分布力。

本书采用国际单位制(SI),用 N(牛顿)作为力的计量单位。

力是一种矢量。本书中矢量都用一个粗斜(黑)体字母表示,以同字母的细斜体字表示这矢量的模。有时也用顶上带箭头的两个并列的细体字母表示矢量,第一个字母表示这个矢量的始端,第二个字母表示这个矢量的末端。顶上不带箭头的两个并列字母表示这个矢量的模。例如力 $F = \overrightarrow{AB}$ 的模是 $F = AB$ (见图 1-1)。

代表矢量的有向线段称为矢。方向平行于某个矢量而模等于 1(无量纲,只表示方向)的矢,称为单位矢。设以 e_F 表示矢量 F 的单位矢,则力 F 可以写成 $F = Fe_F$ (见图 1-1)。

作用于同一物体或物体系的一群力称为力系。力系有各种分类,这将在后文分别介绍。

§ 1-2 静力学公理

力对物体的作用效果取决于它的特征。不同特征的力或力系的作用效果不同,能引起物体运动状态的不同变化。但是,由经验知道,也可以有这样的情形,两个不同的力系,能对同一物体产生相同的效应。这样的两个力系是等价的,彼此可以互相代替,并称为**等效力系**。静力学里首先要研究力系相互等效的条件。如果一个力系可以和一个力等效,则这个等效力就称为该力系的合力;而该力系中的各个力称为其合力的各分力。

在静力学里,为简明起见,规定刚体在受力之前都处于静止(相对于地面)。因此,在受力作用后,刚体能否维持这种平衡状态,完全决定于该力系的配置。能使刚体维持平衡的力系称为**平衡力系**。这种力系对刚体的外效应为零。习惯上说,平衡力系中的某几个力与其余各力互成平衡。这样,静力学的第二个任务可以改述为研究刚体上作用力间互成平衡的条件及其应用。

解答上面所提的问题,是以下面几个公理(有的称为定律)为基础。

公理 1 (二力平衡公理) 要使刚体在两个力作用下维持平衡状态,必须也只须这两个力的大小相等、沿同一直线作用而指向相反。

对非刚体,这个公理的适用性受到限制。例如,软绳受大小相等、方向相反的两个拉力时可以平衡,但如变为受压,则不能平衡。由此可见,刚体平衡的充要条件,对于变形体来讲,仅仅是必要的,并不一定充分。

公理 2 (加减平衡力系公理) 可以在作用于刚体的任何一个力系上加上或去掉几个互成平衡的力,而不改变原力系对刚体的作用效果。

这个公理也只对刚体才成立；对于现实物体，加减某些平衡力系，就会影响物体的变形，甚至会引起它的破坏。因而，必须经常注意理想模型与现实物体间的差别。

由这两个公理可导出下面的重要推论。

推论（力在刚体上的可传性） 作用于刚体的力，它的作用点可以沿作用线在该刚体内前后任意移动，而不改变它对该刚体的作用。

证明 设在刚体上点 A 作用着力 F （见图 1-2(a)）。根据公理二，可以在力 F 的作用线上任意一点 B ，加上两个互成平衡的力 F_1 和 F_2 （见图 1-2(b)），令 $F_1 = -F_2 = F$ 。由公理一知，力 F 和 F_2 互成平衡，因而根据公理二，又可以将这两个力去掉（见图 1-2(c)）。这样，原来的力 F 既与力系 (F, F_1, F_2) 等效，也与力 F_1 等效，而力 F_1 就是原来的力 F ，只不过作用点已移到点 B 而已。

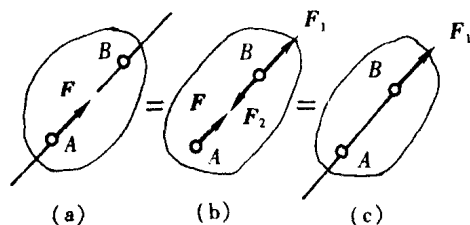


图 1-2

由此可见，对于作用在刚体上的力，其作用点已不再是决定其效应的要素，而为作用线所代替，故它是滑动矢量，可以从它的作用线上任一点画出。

公理 3（力的平行四边形定律） 作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力。合力也作用在同一点，并等于原来两个力的矢量和（几何和）。即，合力的矢可用原来两个力的矢为邻边而画出的平行四边形的对角线来表示。

这样,设在点A作用有两个力 F_1 和 F_2 (见图1-3(a)),用 R 代表它们的合力,则有矢量表达式

$$R = F_1 + F_2$$

为求合力 R ,只须画出平行四边形的一半例如ABD,矢 $\overrightarrow{AD}$ 就表示了合力 R (见图1-3(b)),三角形ABD称为力三角形,这种用三角形求合力的作图法则称为力的三角形法。

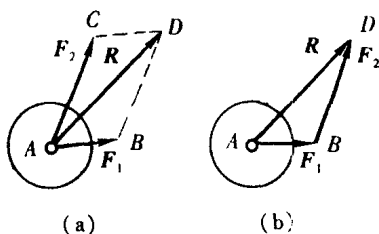


图 1-3

应用上述公理可推导出同平面不平行三力平衡时的汇交定理:

当刚体在不平行的三个力作用下平衡时,设其中两力的作用线相交于某点,则第三力的作用线必定也通过这个点。

设在刚体上的点 A_1 , A_2 和 A_3 分别作用着不平行但互成平衡的三个力 F_1 , F_2 和 F_3 (见图1-4(a))。已知力 F_1 和 F_2 的作用线相交于某点O;这两个力的合力 R_1 应和力 F_3 互成平衡,因而 R_1 和 F_3 必须沿同一作用线。但 R_1 的作用线通过点O,故 F_3 也一定通过点O(见图1-4(b))。

又由力的平行四边形定律可知,共点两个力的合力和这两个力是共面的,故这三个互成平衡的力,还一定是共面的。

分析刚体在三个力作用下平衡的问题时,如已知其中两个力的作用线的交点,常用这个定理来确定第三个力的方向。