

中等专业学校教材

理论力学

张子义



华中理工大学出版社

内容简介

本书按照中专电子机械类专业教材编审委员会基础课教材编审小组制定的理论力学教材基本内容要求，在讲义的基础上编写而成，是中专电子机械类专业的教科书和业余中专、职业学校该专业的教学参考用书。

全书内容有：静力学基础、平面力系的简化、平面力系的平衡、摩擦、空间力系的平衡、重心、点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动、质点动力学基本方程、刚体转动动力学基本方程、动静法、功能原理及机械振动基础。为巩固所学知识，各章均有适量的思考题和相当数量的习题。

本书改变了静力学的传统体系，突出了静力学的重点；选择最佳方案求解物体系统的平衡问题；内容主次分明，详略恰当，联系工程实际。

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的7个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由中专电子机械类专业教材编审委员会基础课教材编审小组征稿,推荐出版,责任编委为全沅生同志。

本教材由无锡无线电工业学校张子义编写,天津无线电机械学校李旭明担任主审。

本课程的参考学时数为110学时,其主要内容为:物体的受力分析和在各种力系作用下的平衡条件;点的运动,刚体的平动、定轴转动和平面运动;质点动力学基本方程,刚体转动动力学基本方程,动静法,功能原理和机械振动基础。本教材适用于招收初中毕业生、学制为四年的中专电子机械类各专业。在内容编排上,改变了静力学的传统体系,按静力学的任务划分章节,减少了内容的重复繁琐,突出了静力学的重点。对物体系统的平衡问题,提出了选择最佳方案解题的要求和方法。根据中专培养目标,适当简化了某些定理、结论的推导,侧重于理论的应用。对有些已经在物理学中讲授了的内容,本书仅作简要叙述,作为必要的衔接。每章前有内容提要,其后有适量的思考题和一定数量的习题,例题、习题类型多,且紧密联系工程实际。大多数章节有解题方法和步骤的小结,有助于提高学生应用理论解题的能力。全书内容精到,坚持少而精的原则,一些内容力求做到主次分明,重点章节和重要的基本概念写得较为详细,这对帮助学生理解基本概念和重点是很有益的。

使用本教材时应注意：本书大多数章节为基本内容，个别注有“*”号的章节为选学内容，可根据专业要求取舍。鉴于解题是理论力学课程的重要教学环节，本书所列的例题和习题数量较多，可供教学时选用或根据有关专业的特殊需要，另加选题。

使用本教材时还请注意：本书例题中出现的带有数字运算的方程均为数方程，其它不带数字运算的方程和式子均为量方程。这一点文中不再说明。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

结论	(1)
----------	-------

第一篇 静 力 学

引言	(1)
----------	-------

第一章 静力学基础	(3)
-----------------	-------

§ 1-1 力的概念	(3)
------------------	-------

§ 1-2 静力学公理	(4)
-------------------	-------

§ 1-3 约束和约束反力	(8)
---------------------	-------

§ 1-4 受力分析和受力图	(14)
----------------------	--------

§ 1-5 力对点的矩·合力矩定理	(20)
-------------------------	--------

§ 1-6 力偶和力偶的基本性质	(24)
------------------------	--------

思考题	(27)
-----------	--------

习题	(30)
----------	--------

第二章 平面力系的简化	(35)
-------------------	--------

§ 2-1 平面汇交力系的合成	(36)
-----------------------	--------

§ 2-2 平面力偶系的合成	(42)
----------------------	--------

§ 2-3 力线平移定理	(43)
--------------------	--------

§ 2-4 平面一般力系的简化	(45)
-----------------------	--------

思考题	(51)
-----------	--------

习题	(53)
----------	--------

第三章 平面力系的平衡	(56)
-------------------	--------

§ 3-1 平面汇交力系的平衡条件	(56)
-------------------------	--------

§ 3-2 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	(65)
------------------------------	--------

§ 3-3 平面一般力系平衡方程的应用	(69)
---------------------------	--------

§ 3-4 物体系统的平衡	(79)
---------------------	--------

§ 3-5 静不定问题的概念	(89)
思考题	(90)
习题	(92)
第四章 摩 擦	(104)
§ 4-1 滑动摩擦基本规律简述	(101)
§ 4-2 摩擦角和自锁现象	(106)
§ 4-3 考虑摩擦时物体的平衡问题	(109)
§ 4-4 滚动摩擦的概念	(118)
思考题	(121)
习题	(123)
第五章 空间力系的平衡	(128)
§ 5-1 力沿空间直角坐标轴的分解和投影	(129)
§ 5-2 力对轴的矩	(134)
§ 5-3 空间力系的平衡方程及其应用	(139)
§ 5-4 空间力系平衡问题的平面解法	(150)
思考题	(156)
习题	(157)
第六章 重 心	(163)
§ 6-1 重心坐标的公式	(164)
§ 6-2 求重心位置的几种方法	(168)
思考题	(174)
习题	(174)

第二篇 运 动 学

引言	(177)
第七章 点的运动	(179)
§ 7-1 确定动点位置的方法·运动方程	(179)
§ 7-2 用自然法表示点的速度和加速度	(183)
§ 7-3 用直角坐标法表示点的速度和加速度	(195)
思考题	(203)

习题.....	(204)
第八章 刚体的基本运动	(203)
§ 8-1 刚体的平动	(203)
§ 8-2 刚体的定轴转动	(209)
§ 8-3 定轴转动刚体上各点的速度和加速度	(216)
思考题.....	(224)
习题.....	(225)
第九章 点的合成运动	(229)
§ 9-1 合成运动的基本概念	(230)
§ 9-2 点的速度合成定理	(233)
思考题.....	(242)
习题.....	(244)
第十章 刚体的平面运动	(248)
§ 10-1 刚体平面运动的概述	(248)
§ 10-2 平面运动分解为平动和转动	(249)
§ 10-3 速度合成法和速度投影法	(251)
§ 10-4 速度瞬心法	(256)
思考题.....	(268)
习题.....	(270)

第三篇 动 力 学

引言.....	(275)
第十一章 质点动力学基本方程	(276)
§ 11-1 动力学基本定律	(276)
§ 11-2 质点运动微分方程及其应用	(277)
思考题.....	(287)
习题.....	(288)
第十二章 刚体转动动力学基本方程	(293)
§ 12-1 刚体转动动力学基本方程	(293)
§ 12-2 转动惯量	(296)

§ 12-3 刚体转动动力学基本方程的应用	(304)
思考题	(309)
习题	(311)
第十三章 动静法	(315)
§ 13-1 质点的动静法	(315)
§ 13-2 质点系的动静法·刚体惯性力系的简化	(321)
* § 13-3 静平衡和动平衡的概念	(332)
思考题	(334)
习题	(335)
第十四章 功能原理	(341)
§ 14-1 力的功	(341)
§ 14-2 功率和机械效率	(350)
§ 14-3 质点动能定理	(356)
§ 14-4 质点系动能定理	(363)
思考题	(371)
习题	(372)
* 第十五章 机械振动基础	(380)
§ 15-1 单自由度系统的自由振动	(382)
§ 15-2 单自由度系统有阻尼的强迫振动	(393)
§ 15-3 减振与隔振的概念	(403)
思考题	(405)
习题	(405)

第一篇 静 力 学

引 言

静力学研究物体在力系作用下处于平衡状态时的规律。所谓力系，是指作用于物体上的一群力。平衡一般是指物体相对于某惯性参考系（如地球）处于静止或作匀速直线运动的状态。显然，平衡是物体机械运动的一种特殊形式。必须指出，在宇宙中绝对的平衡是没有的，平衡只是相对的、暂时的和有条件的。

在静力学中将研究以下两个基本问题：

（1）力系的简化。若两个力系对物体的作用效应相同，则此两力系彼此称为等效力系；若一个力与一力系等效，则此力称为力系的合力；用一个力或一个简单力系等效代替复杂力系的方法称为力系的简化。

（2）力系的平衡条件及其应用。若作用于物体上的力系，使物体处于平衡状态，则此力系称为平衡力系。可见，平衡力系就是对物体的作用效果等于零的力系。平衡力系中的任意一个力称为其余各力的平衡力。一个力系只有满足一定的条件才能成为平衡力系，此条件称为力系的平衡条件。研究物体平衡的规律，就是研究作用于物体上的力系的平衡条件。在静力学中，将对力系进行简化，导出力系的平衡条件，然后应用平衡条件，求出作用于物体上的一些未知力，这是静力学所要解决的主要问题。

静力学所研究的物体仅限于刚体，故又称为刚体静力学。所谓刚体，是指在力的作用下不发生变形的物体。事实上，绝对的刚体是不存在的，任何物体在力的作用下都将产生不同程度的变形。但是在正常情况下，工程中许多物体的变形是很微小的。这种微小的变形，对于研究物体的平衡问题来说影响是极小的，可以略去不计，而认为物体是不变形的刚体。所以刚体是理论力学中将实际物体经过抽象简化所得的一种理想模型。这种抽象化的方法，在研究问题时是非常必要的。因为只有忽略了一些次要的、非本质的因素，才能充分地揭露事物的本质。

静力学在工程技术中有着广泛的应用。许多机器的零件和工程结构的构件，如机床中的主轴、起重机的吊臂等，它们在工作时都处于或近似处于平衡状态。对它们进行设计计算时，首先要运用静力学知识进行受力分析，并根据平衡条件求出它们所受的某些未知力。因此，静力学是许多工程设计计算的基础。静力学中力系的简化理论和物体的受力分析方法，也是学习动力学和许多后继课程的基础。

第一章 静力学基础

本章将阐述力、力矩和力偶的概念，以及有关力矩的基本定理、力偶的基本性质，并介绍静力学公理和物体的受力分析及受力图的画法。静力学的全部理论是在几个公理的基础上加以扩展、推论及演绎而成。物体的受力分析是力学中的重要基本技能，也是分析和解决力学问题的前提。因此，本章的内容是静力学的基础。

§ 1-1 力的概念

人类在长期的生活和生产实践中，通过反复观察、实验和分析概括，逐步建立了力的概念：力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的运动状态或形状发生改变。例如，人推车的力，使车由静到动或由慢到快运动，其运动状态发生了变化；锻锤作用于锻件的力使锻件发生变形等。

力使物体的运动状态发生变化的效应，称为力的外效应；而力使物体产生变形的效应，称为力的内效应。理论力学只研究力的外效应，力的内效应将在材料力学中研究。

实践表明，力对于物体的作用效应，决定于力的大小、方向和作用点，即通常所称的力的三要素。这三个要素中，任何一个改变时，力的作用效应也随之改变。例如，用扳手拧螺母时，作用在扳手上的力，或大小不同、或方向不同、或作用点位置不同，它产生的效果就不一样。

力的三要素表明，力是矢量，通常用一有向线段来表示，

如图1-1所示。线段的长度按所选比例表示力的大小，线段的方位和箭头的指向表示力的方向，力的始端 A 或末端 B 表示力的作用点，通过作用点沿力的方向的直线称为力的作用线。

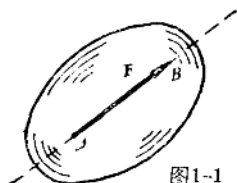


图1-1

本书用黑体字母（如 $\mathbf{F}$ ）表示矢量，而用同一非黑体字母（如 F ）表示力的大小。某个力矢量如冠以负号，则表示取相反方向。如力 $-\mathbf{F}$ 是一个与力 $\mathbf{F}$ 大小相等但方向相反的力。

本书采用国际单位制（SI）。在国际单位制中，力的单位为牛〔顿〕（N）。

§ 1-2 静力学公理

静力学公理是人类在长期的生活和生产实践中总结和归纳出来的关于力的最基本的规律，是被人们所公认的，其正确性也久为无数实践所证实，它们是静力学全部理论的基础。

公理 1（二力平衡条件） 作用于同一刚体上的两个力，使刚体处于平衡的必要和充分条件是：此两力大小相等、方向相反，且沿同一直线（简称等值、反向、共线），如图1-2所示。

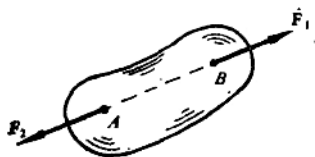


图1-2

此公理表达了最简单的力系平衡（二力平衡）的必要和充分条件，它是研究力系平衡的基础。必须指出，对刚体来说，此条件是必要和充分的，但对于变形体来说，此条件只是必要条件而非充分条件。例如，软绳的两端受两个等值、反向、共线的拉力作用时可以平衡，但如受两个等值、反向、共线的压力作用时，软绳将卷曲而不能平衡了。

公理 2（加减平衡力系原理） 在作用于刚体上的力系中，加上或除去任一平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效应。

此公理指出，作用于刚体上的已知力系与加上（或除去）任一平衡力系后的力系等效。必须指出，公理 2 只适用于刚体，而不适用于变形体。

推论 1（力的可传性原理） 作用于刚体上某点的力，可以沿其作用线移至刚体上任意一点，而不改变它对刚体的作用效应。

这个原理可以从实践中来验证。例如，人在车后的 A 点推车（图 1-3(a)），与用同一力在车前的 B 点拉车（图 1-3(b)），两者的效果是一样的。

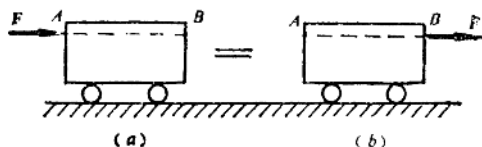


图 1-3

力的可传性原理表明，力对刚体的作用效应与力的作用点在作用线上的位置无关。因此，对于刚体来说，力的三要素可改为：力的大小、方向和作用线。

必须指出，力的可传性原理只适用于刚体，而不适用于变

形体，否则将会改变物体的变形性质。

公理 3 (力的平行四边形法则) 作用于物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力也作用于该点，其大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线表示。如图1-4所示。

这种力的合成方法，称为矢量加法。合力是这两个力的矢量和（或几何和）。可用公式表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

应当指出，上式是矢量等式，它与代数等式 $R = F_1 + F_2$ 的意义完全不同，不能混淆。只有当两力共线时，其合力才等于两力的代数和，即共线的两力同向时相加，反向时相减。

力的平行四边形法则是两个共点力的合成法则，也是力的分解的法则。将一个力按此法则分解，可得无穷多个解。在工程上，通常将一个力按已知方向分解为两个分力，特别是分解为互相垂直的两个分力（称为正交分力）。

公理 2 和公理 3 是进行力系简化的重要理论根据。

推论 2 (三力平衡汇交定理) 若刚体在三个共面而又互不平行的力作用下处于平衡，则此三力的作用线必汇交于一点。

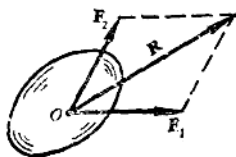


图1-4

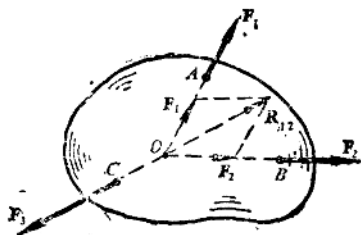


图1-5

证明 设同平面内的三个力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别作用于刚体上 A 、 B 、 C 三点，使刚体处于平衡，其中 F_1 、 F_2 的作用线相交于 O 点，如图1-5所示。根据力的可传性原理，将力 F_1 和 F_2 沿作用线移到 O 点，并按力的平行四边形法则，将它们合成为一合力 R_{12} ， R_{12} 与 F_3 和原三个力等效。由于原三个力是平衡的，故 R_{12} 和 F_3 也平衡。由二力平衡条件可知，力 F_3 必定与 R_{12} 共线，所以 F_3 必通过 F_1 和 F_2 的交点 O 。可见，力 F_1 、 F_2 、 F_3 的作用线必汇交于一点。

公理4（作用与反作用定律） 两物体间相互作用的力，总是大小相等、方向相反、且沿同一直线，分别作用在这两个物体上。此两力互称为作用力和反作用力。

此公理表明，物体间相互作用的力总是成对出现的，有作用力就必有反作用力，它们总是同时产生，同时消失。但必须注意，虽然作用力与反作用力等值、反向、共线，但绝不可认为这两个力互相平衡。因为这两个力，并不作用于同一物体，而是分别作用于两个不同的物体上。这个公理与公理1有本质的区别，不能混同。例如，电灯用电线悬挂在天花板下（图1-6），电灯受到重力 G 和电线的拉力 T 的作用而处于平衡。

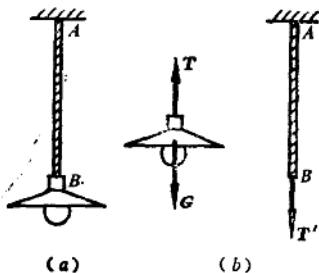


图1-6

这两个力都作用在电灯上，故它们不是作用力与反作用力关系，而是一对平衡力。电线既以力 T 作用于电灯上，电灯就必以反作用力 T' 作用于电线的 B 端。 T 和 T' 总是等值、反向、共线，但它们分别作用于电灯和电线上，因此，它们不是一对平衡力，而是一对作用力与反作用力。

§ 1-3 约束和约束反力

自然界中的一切事物总是以各种形式与周围事物互相联系、互相制约的。在工程上，大多数物体的运动都被与它相联系的周围物体所限制。例如，放置在光滑水平桌面上的重物受到桌面的限制，使它不能产生铅直向下的运动；火车受到铁轨的限制，只能沿铁轨行驶等。这些对物体的运动起限制作用的周围物体称为约束。如在上述两例中，桌面就是重物的约束；铁轨就是火车的约束。

由于约束在某些方向上限制了物体的运动，因此，当物体沿约束所能限制的运动方向有运动趋势时，约束就对物体产生作用。这种约束作用在物体上的力，称为约束反作用力，简称约束反力或反力。不难理解，约束反力总是作用在约束与物体的接触处，其方向总是与约束所能限制的物体运动方向相反。这是确定约束反力方向的准则。

一般将物体受到的力分为两类：一类是能使物体产生运动的力，称为主动力，如作用于物体上的重力、气体压力、电磁力等等；另一类是对物体的运动起限制作用的约束反力。在所研究的问题中，主动力的方向和大小通常是给定的或可预先独立地测定其大小，而约束反力是由主动力所引起的，其大小需根据力系的平衡条件来求得，其方向一般可根据约束类型来确