

THEORETICAL MECHANICS

理论力学

胡佳芬
王世庆

主编

上册

学院 上

内 容 提 要

本书是根据高等工科学校三年制机械类和土建类专业的教学要求编写的,内容包括静力学、运动学和动力学三部分,分上、下两册出版。上册为静力学和运动学,下册为动力学。根据不同专业的要求,讲授本书的学时数可控制在72~90学时。本书采用国际单位制(SI)每章后附有习题,书末附有答案。

本书可用作高等工科学校、职业大学三年制机械类和土建类各专业的教材,也可作职工大学、业余大学、夜大学相应专业的教材,并可供有关工程技术人员和自学者参考。

理 论 力 学

上 册

胡佳芬 王世庆 主编

南京工学院出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 工程兵工程学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/32印张10.4375字数226千字

1987年5月第1版 1987年7月第1次印刷

印数: 1—8500

ISBN 7-81023-020-(4)/O·20

统一书号: 13409·010 定价: 1.65元

前 言

本书是根据高等工科学校三年制机械类专业和土建类专业的教学要求编写的。根据不同专业的要求,讲授本书的学时数可控制在72~90学时之间。本书可用作高等工科学校、职业大学三年制机械类和土建类各专业的教材,也可作职工大学、业余大学、夜大学相应专业的教材,并可供有关工程技术人员和自学者参考。

本书由胡佳芬、王世庆主编。参加编写的人员有:苏州大学陆鸿森,洛阳大学钱天虹,唐山大学李曼,济南职业大学李盛铎,连云港职业大学周小庚,南通职业大学姚惟壤,江南大学殷汝桓,江汉大学王世庆、夏宜凉,金陵职业大学胡佳芬、柳涛、梁传印等;在编写过程中,金陵职业大学力学教研室蒋燕等同志参与了部分审校工作。

本书由河海大学吴永祯教授主审,并于一九八六年六月在南京召开的审稿会上通过。参加审稿会的人员有南京工学院鲍恩湛教授、河海大学吴永祯教授和其他兄弟院校的代表。他们对书稿进行了认真的审阅,并提出了宝贵的意见和建议,对本书的定稿做出了贡献。在此,谨向他们表示深切的感谢。

由于水平所限,编写时间比较仓促,书中不妥和错谬之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1986年6月

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

第一篇 静 力 学

第 一 章 静力学基础	(6)
-------------	-------

§ 1-1 静力学基本 概念	(6)
----------------	-------

§ 1-2 静力学公理	(8)
-------------	-------

§ 1-3 约束与约束反力	(13)
---------------	--------

§ 1-4 受力分析与受力图	(19)
----------------	--------

习 题	(23)
-----	--------

第 二 章 平面汇交力系	(29)
--------------	--------

§ 2-1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	(29)
-----------------------	--------

§ 2-2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	(35)
-----------------------	--------

习 题	(46)
-----	--------

第 三 章 力矩和平面力偶理论	(52)
-----------------	--------

§ 3-1 力对点之矩	(52)
-------------	--------

§ 3-2 平面力偶理论	(53)
--------------	--------

§ 3-3 平面力偶系的合成与平衡	(56)
-------------------	--------

§ 3-4 力线平移定理	(58)
--------------	--------

习 题	(60)
-----	--------

第 四 章 平面一般力系 摩擦	(64)
-----------------	--------

§ 4-1 平面一般力系的简化	(65)
-----------------	--------

§ 4-2 平面一般力系简化结果的讨论 合力矩定理	(68)
---------------------------	--------

§ 4-3 平面一般力系的平衡条件与平衡方程	(70)
------------------------	--------

§ 4-4 物体系统的平衡 静定与静不定的概念	(79)
-------------------------	--------

§ 4-5 平面静定桁架的内力计算	(87)
-------------------	--------

§ 4-6	摩擦	(92)
	习 题	(104)
第 五 章	空间力系	(119)
§ 5-1	空间汇交力系	(119)
§ 5-2	空间力偶理论	(125)
§ 5-3	力对轴之矩和力对点之矩	(129)
§ 5-4	空间一般力系	(134)
§ 5-5	重心的概念与计算	(142)
§ 5-6	用实验法确定重心的位置	(150)
	习 题	(152)

第二篇 运 动 学

第 六 章	点的运动	(165)
§ 6-1	点的运动的矢量表示法	(165)
§ 6-2	点的运动的直角坐标表示法	(169)
§ 6-3	点的运动的自然表示法	(181)
	小 结	(195)
	习 题	(199)
第 七 章	刚体的基本运动	(207)
§ 7-1	刚体的平行移动	(207)
§ 7-2	刚体的定轴转动	(209)
§ 7-3	转动刚体上各点的速度和加速度	(217)
	小 结	(230)
	习 题	(232)
第 八 章	点的复合运动	(238)
§ 8-1	相对运动、绝对运动和牵连运动	(238)
§ 8-2	点的速度合成定理	(240)
§ 8-3	牵连运动为平动时点的加速度合成定理	(248)
§ 8-4	牵连运动为转动时点的加速度合成定理	(253)

习 题.....	(267)
第 九 章 刚体的平面运动	(275)
§ 9-1 刚体平面运动的概述.....	(275)
§ 9-2 刚体平面运动方程 平面运动分解为 平动和转动.....	(277)
§ 9-3 平面图形上各点的速度.....	(279)
§ 9-4 平面图形上各点的加速度.....	(291)
§ 9-5 刚体绕平行轴转动的合成.....	(297)
习 题.....	(305)
习题答案	(314)

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科。

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、最普遍、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。例如机械和土建结构的设计，以及航天技术等，都以本学科的理论为基础。

理论力学研究的内容是速度远小于光速的宏观物体的机械运动，它以牛顿定律为基础，属于古典力学的范畴。至于速度接近于光速的物体和基本粒子的运动，则必须用相对论和量子力学的观点才能解决。然而，在现代一般工程中所遇到的物体，大都是宏观物体，而其运动速度也远远小于光速。所以，有关的力学问题仍然用古典力学的原理来解决。古典力学至今仍然具有很大的实际意义，并且还在不断地发展着。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。通过本课程的学习，能够培养学生分析问题和解决问题的能力，并为学习材料力学、结构力学、机械原理等有关后继课程打下基础。同时，理论力学的分析问题和研究问题的方法有助于培养学生的辩证唯物主义的世界观。

本书内容分为**静力学**、**运动学**和**动力学**三篇。

静力学主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条

件；物体受力分析方法以及力系简化的方法等。

运动学只从几何观点研究点和刚体的运动，而不考虑作用其上的力的因素。

动力学研究物体的运动与作用其上的力之间的关系。

力学是一门历史悠久的学科。早在公元前468~376年，我国古代伟大学者墨子在《墨经》中就对力的概念和杠杆（秤）平衡作了论述。后来，古希腊学者亚里斯多德（公元前384~322）也曾作过有关力的研究。杰出的古代学者阿基米德（公元前287~212）给出了杠杆平衡问题的正确解答，并创立了有关重心的学说，他为静力学莫立了基础。此后，直到公元十四世纪的漫长岁月里，由于封建与神权的统治，生产力受到束缚，一切科学的发展，包括力学，都陷入了停顿状态。直到十五世纪末，欧洲进入文艺复兴时期。由于当时商业资本的兴起，手工业、城市建筑、航海造船和军事技术等各方面提出的许多迫切的问题，刺激了科学的迅速发展。著名的意大利艺术家、物理学家和工程师达·芬奇（1452~1519）就是这个时期的杰出代表。他认识到实验和运用数学解决力学问题的重要性。在力学范围内，他研究了物体沿斜面运动和滑动摩擦，得出了滑动摩擦力与物体间接触面大小无关的结论。同时，还提出了力矩的概念。

不久以后，波兰学者哥白尼（1473~1543）造立了宇宙的太阳中心学说。这学说推翻了托勒密的地球中心学说，引起了宇宙观的根本变革。这一发现促进了天体力学的发展。约翰·开普勒（1571~1630）根据哥白尼的学说及大量的天化观测，发现了行星运动三大定律。这些定律是后来牛顿发现万有引力定律的基础。

伟大的意大利学者伽俐略（1564~1642）认识到实验作为力学论证的必要性，创立了科学的研究方法。他根据大量的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。他把抛射体的运动看成是水平匀速运动和铅直匀变速运动的合成，这就是力的独立作用原理的萌芽。伽俐略的工作开辟了科学史上的新时代，他对奠定动力学基础作出了卓越的贡献。

荷兰学者惠更斯（1620~1695）继承了伽俐略力学方面的成就，创立了物理摆的理论，把加速度的概念推广到质点的曲线运动中去，并建立了离心力的概念。惠更斯还写了许多与刚体碰撞有关的著作。建立动力学基本定律的工作是由伽俐略开始的，而由伟大的英国学者伊萨克·牛顿（1643~1727）所完成。牛顿在其名著《自然哲学的数学原理》（1687年出版）一书里完备地建立了古典力学的基本定律，并且从这些定律出发，将动力学理论作了系统的叙述。牛顿运动定律是整个古典力学的基础。为了建立质量的概念，牛顿曾利用单摆做过大量的精密实验。牛顿发现了万有引力定律，这个定律给后来天体力学的发展奠定了基础。此外，牛顿还解决了许多新的数学和力学问题，创立了物体在阻尼介质中运动的理论。

在力学史上，十七世纪被看作是建立动力学基础的时期。从十七世纪到十九世纪初，静力学进一步发展成熟。由达·芬奇提出的力矩概念，经法国学者伐里农（1654~1722）的发展，最后建立了完整的力矩定理。法国学者布安索（1777~1895）创立了完整的力偶理论，他制定了静力学的现代形式，他的工作使力学中的几何法得到巨大进展。

十八世纪转入动力学的发展时期。德国学者莱伯尼兹（1646~1716）和牛顿建立了微积分原理，对十八世纪力学朝分析方向发展提供了基础。伊·伯努里（1667~1784）最先提出了虚位移原理。欧拉（1707~1783）把牛顿第二定律表达为分析形式的微分方程。达朗伯（1717~1785）建立了解决动力学问题的著名的达朗伯原理，从而奠定了非自由质点系动力学的基础。拉格朗日（1736~1813）于1783年发表了著名的《分析力学》一书，为分析力学的发展作出了极大贡献。拉格朗日还把虚位移原理与达朗伯原理相结合，得出了非自由质点系的运动微分方程——拉格朗日方程。

到十九世纪中叶，技术的飞速进展使“功”、“能”概念普遍形成。在这个时期发现了能量守恒和转化定律。这个定律不仅对技术应用有着重大意义，而具在力学和其它学科之间，在物质运动的各种形式之间架起了桥梁。

廿世以来，科学技术的发展更为迅速，与此紧密相联系的许多力学专门分支，如弹塑性理论、流体与气体力学、非线性振动、运动稳定性理论和飞行力学等都取得了巨大的进展。而具，许多学科之间互相渗透，力学正在越来越多地渗入其它有关学科中去，出现了一些新的边缘学科，如地质力学、化学流体力学、电磁流体力学、物理力学、生物力学、工程控制等等。可以预期，随着生产和科学技术的不断发展，力学也将获得更多的新的成就。

第一篇 静 力 学

静力学主要研究物体在力的作用下的平衡问题。具体地说，它将研究两个问题：（1）力系的简化，即将作用在一个物体上的许多力（称力系）用另一等效的最简单的力系来代替；（2）建立物体在力系作用下的平衡条件。

所谓平衡，是指物体相对于惯性坐标系（即适用牛顿定律的坐标系）保持静止状态或作匀速直线运动。平衡只是物体运动的一种特殊情形。在一般工程问题中，平衡规律有其广泛的应用。各种机器或建筑物，在设计时往往首先要进行静力学分析，以确定其各部件或零件的受力情况，从而选择合理的尺寸、形状和材料。而在具体进行静力分析时，通常都是假定物体处于平衡状态，然后讨论这时作用其上的力系必须满足的条件。在实际问题中所谓的平衡，通常是指相对于地球处于静止的情形。

此外，力在物体平衡时所表现的基本性质，也同样适用于物体作一般运动的情形。例如，静力学里关于力的合成、分解与简化等研究结果，就可直接应用于动力学。而且，动力学问题也可在形式上变换成静力学问题来处理。可见，静力学理论，不论在生产实践中还是在力学理论上，都具有很重要的意义。

第一章 静力学基础

§ 1—1 静力学基本概念

(一) 力的概念

在物理学中已经讨论过力的概念，即：力是物体间的相互机械作用，这种作用使物体的运动状态或形状发生改变。力使物体的运动状态发生改变的效应称为力的外效应；力使物体的形状发生改变的效应称为力的内效应。理论力学只研究力的外效应。

力对物体作用的效应决定于力的大小、方向和作用点，通常称为力的三要素。

在国际单位制 (SI) 中，力的单位是牛顿 (N) 或千牛 (kN)。在工程单位制中，力的单位是公斤力 (kgf) 或吨力 (tf)。两者的换算关系是：

1 公斤力 (kgf) $\approx$ 9.8 牛顿 (N)。

本书一律采用国际单位制。

力是矢量。在图上它可用一有向线段 (矢线) 来表示，如图 1-1 中 $\overline{AB}$ 。其中有向线段的长度按一定的比例尺表示力的大小，线段的方位 (与水平线成夹角 θ) 和箭头的指向表示力的方向，而线段的起点或终点则表示力的作用点。通过力的作用点沿力的方位的直线 (如图 1-1 中 KL) 称为 力的作用线。

本书用普通字母表示矢量的模，用黑体字母表示矢量。如图 1-1 中，**F** 表示力的矢量。F 表示力的模，即力的大小。

一般情况下，作用于物体上的力不一定是一个而是几个，同时作用在一个物体上的几个力称为力系。如果作用在某个物体上的力系可用另一个适当的力系来代替而作用效应相同，则此二力系互称等效力系。若作用于某个物体上的力系可用一个力代替而不改变作用效应，那么这个力称为该力系的合力，而力系中的各力称为这个力的分力。

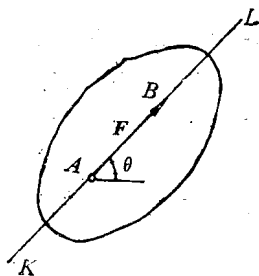


图 1-1

(二) 刚体的概念

所谓刚体，就是在任何情况下都不变形的物体。刚体内任意两点间的距离永远保持不变。刚体是一个理想化的力学模型。实际上宇宙间并无刚体存在。任何物体，在力的作用下都将发生不同程度的变形。但在许多情况下，这种变形是极其微小的。理论力学在研究物体的平衡或运动时，将这种微小的变形忽略不计，从而认为物体是不变形的。显然，这种抽象简化是必要的，合理的，也是实际所许可的。以后，除特别指明需要考虑物体变形的问题外，所有物体都视为刚体。

当物体的变形在所研究的问题中不可忽略时，就不能再把物体看成刚体了。这种问题将在变形体力学(如材料力学，弹性力学及流体力学等)中研究。

(三) 平衡的概念

平衡是机械运动的一种特殊形式。在一般工程技术问题

中所说的平衡，是指物体相对于地面保持静止或作匀速直线运动，即指物体相对于地面的平衡。

应当指出，物体的运动是绝对的，而平衡则是相对的。如果一个力系作用于物体上而使物体保持平衡，则该力系称为**平衡力系**，力系所满足的条件称为**平衡条件**。静力学就是研究力系的平衡条件及其应用。

§ 1—2 静力学公理

公理是人们通过长期的观察和反复的实践得到的结论，已为实践所证实，并为大家所公认。静力学公理是静力学的基本规律，它们构成了静力学理论的基础。

公理一——二力平衡公理

作用在同一刚体上的两

个力，使刚体平衡的充分必要条件是：这两个力大小相等、方向相反并作用于同一直线上（简称等值、反向、共线）。如图 1-2 所示，
 $S = -P$ 。

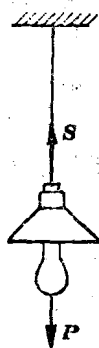


图 1-2

必须指出，二力平衡条件对刚体来说是充分必要条件；对变形体来说则只是必要条件而不是充分条件。例如如图 1-3 所示，绳索的两端如果受的是等值、反向、共线的拉力则处于平衡（图 1-3a），但若受到等值、反向、共线的压力就不会平衡了（图 1-3b）。

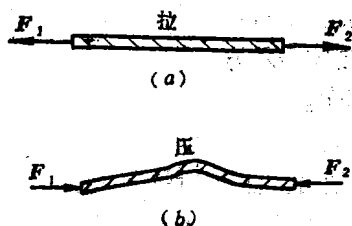


图 1-3

仅受二力作用而处于平衡状态的物体称为**二力体**（或**二力构件**）。二力构件的受力特点是：两个力必沿两力作用点的连线。图 1-4a 所示的托架处于平衡状态，其中 AB 杆若不计自重，则仅在 A、B 两点受力，是一个二力构件。因而，杆 AB 在 A、B 两点受到的力必沿 A、B 两点的连线，如图

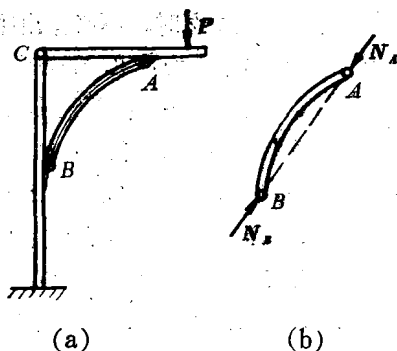


图 1-4

1-4b所示。

公理二——力的平行四边形法则

作用于刚体上同一点的两个力，可以合成为一个合力，合力也作用在该点；合力的大小和方位由两个力所构成的平行四边形的对角线来表示，合力的方向由该点指向平行四边形的另一顶点，如图1-5a所示。图中 R 表示合力， F_1 、 F_2 表示分力，可用公式表示为

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

(1-1)式表示合力等于两分力的矢量和(几何和)。当分力 F_1 和 F_2 为已知时，合力 R 的大小和方向可用几何作图法或利用几何关系计算出。

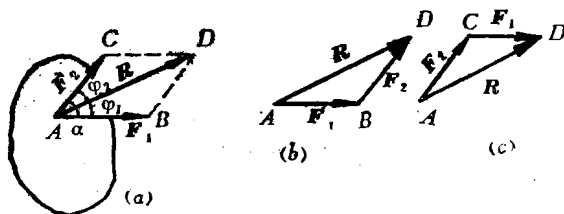


图 1-5

由图1-5b可知，求合力 R 时，不必作出整个平行四边形，只要以力 F_1 的末端 B 作为力 F_2 的始端画出 F_2 ，即两力 F_1 、 F_2 首尾相接，则从第一力矢的始端到第二力矢的末端所引的矢量 AD 就代表合力 R 。这样画出的三角形 ABD 称为力三角形，这种求合力的几何方法称为力三角形法则。分析图1-5b和1-5c可知，合力的大小和方向与画分力的先后次序无关。但应注意，力三角形只表明合力的大小和方向，并不表示合力的作用点或作用线，合力的作用点在两个分力的汇交点上。

公理二总结了最简单力系简化的规律，它是复杂力系简化的基础。

公理三——加减平衡力系公理

在作用于刚体的已知力系上加上或减去一个平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应。显而易见，加上或减去的平衡力系对刚体的平衡或运动状态毫无影响。这个公理常被用来简化某一已知力系。

推论 1——力的可传性原理

作用于刚体上的力，可沿其作用线移至刚体上任意一点，而不改变它对刚体的效应。

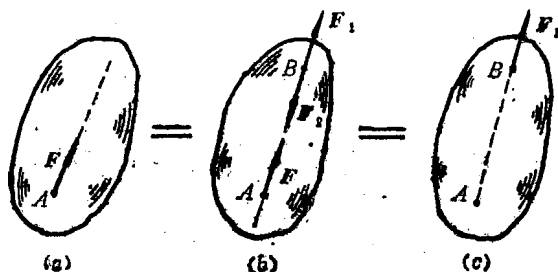


图 1-6

如图 1-6a 所示，力 F 作用于刚体上的 A 点，在其作用线上任取一点 B （ B 点在刚体上），在 B 点加一对平衡力 F_1 和 F_2 ，使 $F = F_1 = -F_2$ ，如图 1-6b 所示。根据公理三可知，力 F 与力系（ F 、 F_1 、 F_2 ）等效。而力 F 和 F_2 也是一对平衡力。可以减去，如图 1-6c 所示，即力系（ F 、 F_1 、 F_2 ）又与力 F_1 等效。这样力 F 与力 F_1 等效。对比图 1-6a 和图 1-6c，可见力 F 由 A 点沿其作用线等效地移至 B 点。