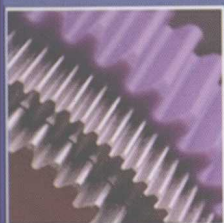


21世纪高校机电类规划教材

工程力学



(上册)

主编：刘申全 黄 璟

GONGCHENGLIXUE

兵器工业出版社

21 世纪高校机电类规划教材

工 程 力 学

(上册)

主 编	刘 申 全	黄 璟	
参 编	李 峰	田 静	高丽红
主 审	崔小朝		

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书分《工程力学》上、下两册,为应用型本科机电类规划教材。

上册为理论力学部分,内容包括:静力学、运动学、动力学三篇。静力学主要讲述了质点和刚体静力学的受力分析、力系的简化、摩擦、平衡方程及应用;运动学主要讲述了点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动和刚体的平面运动。动力学主要讲述了动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理和虚位移原理。

下册材料力学部分,内容包括:材料的基本变形即拉伸和压缩、剪切和挤压、扭转、弯曲,以及应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定,用能量法计算变形、超静定系统的解法、动载荷和交变应力等内容。

本书主要作为高等学校应用型本科机电类专业用书。也适用于近机类、非机类专业学生。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/刘申全,黄璟主编. —北京:兵器工业出版社, 2007.7

ISBN 978 - 7 - 80172 - 845 - 6

I. 工… II. ①刘…②黄… III. 工程力学—高等学校—教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 035228 号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596, 68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟10号

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市登峰印刷厂

版 次:2007年7月第1版第1次印刷

印 数:1—3050

责任编辑:常小虹

封面设计:李 晖

责任校对:郭 芳

责任印制:赵春云

开 本:787×1092 1/16

印 张:31.5

字 数:694千字

定 价:50.00元(上、下册)

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

本书是根据原国家教委审定的高等学校机械类工程力学课程的基本要求, 结合参编学校多年来教学改革的实践, 并吸收兄弟院校教学改革的成功经验而编写的。

全书分上、下两册。上册包括三篇: 第一篇静力学, 包括静力学基础、平面力系平衡、摩擦、空间力系; 第二篇运动学, 包括点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动; 第三篇动力学, 包括质点运动微分方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理。下册包括拉伸和压缩、剪切与挤压、扭转、梁弯曲时内力和应力、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定和压杆设计、按能量法计算变形、超静定系统、动载荷和交变应力、平面图形的几何性质。

全书既有较强的理论性、实践性, 又有较强的综合性, 并根据工科高等教育的特点, 在内容上加强了针对性和应用性, 力求把传授知识和思维能力的培养有机地结合起来, 特别注意了对学生分析问题和解决问题能力的培养。本书的内容和体系在保持学科规律性的基础上, 以达到理论联系工程应用实际, 学用结合的目的。

本书在编写过程中采用了最新国家标准和法定计量单位。全书尽量做到思路清晰, 文字简明, 便于教学使用。

本书可作为高等学校机械类专业工程力学的教学用书。也可供其他专业教学使用, 还可以供从事机械设计的工程技术人员参考。

参加本书编写的有: 上册 太原工业学院刘申全(绪论、第1、3、5章)、黄璟(第8、10、11、12、13章)、田静(第6、7、9、14、15章), 太原科技大学李峰(2、4章)。下册 太原工业学院刘申全(绪论、第1、3、4、11章)、黄璟(第2、10章)、高丽红(6、12章)、太原科技大学李峰(5、7、8、9章)。由刘申全、黄璟任主编。全书由刘申全统稿。

主审太原科技大学崔小朝教授详细审阅了本书, 并提出了宝贵意见, 在此表示衷心的感谢。

限于作者水平, 书中难免错误, 敬请读者指正。

主编刘申全 E-mail: Lsq19620316@163.com

编 者

2007年2月

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 静 力 学

第一章 静力学基础	7
第一节 静力学基本概念与公理	7
第二节 约束与约束反力	10
第三节 物体的受力分析与受力图	12
习题	14
第二章 平面汇交力系	17
第一节 平面汇交力系合成的几何法	17
第二节 力的分解 力在轴上的投影	19
第三节 平面汇交力系合成的解析法 平衡条件	21
习题	25
第三章 平面一般力系	27
第一节 力对点的矩 合力矩定理	27
第二节 平面力偶 平面力偶系的合成与平衡	29
第三节 平面一般力系的简化	32
第四节 平面一般力系的平衡方程及应用	36
第五节 刚体系统的平衡问题	40
第六节 平面静定桁架的内力计算	45
习题	49
第四章 摩擦	54
第一节 滑动摩擦	54
第二节 摩擦角与自锁	56
第三节 考虑摩擦时的平衡问题	58
第四节 滚动摩擦简介	64
习题	66

第五章 空间力系	70
第一节 空间汇交力系	70
第二节 空间力偶理论	74
第三节 力对轴的矩	76
第四节 力对点的矩	78
第五节 空间一般力系的简化 主矢和主矩	79
第六节 空间一般力系的平衡	83
第七节 平行力系中心	86
第八节 重心和形心	87
习题	92

第二篇 运 动 学

第六章 点的运动	97
第一节 运动学的基本概念	97
第二节 点的运动方程	98
第三节 点的速度和加速度	100
第四节 点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影	102
第五节 点的切向加速度和法向加速度	105
习题	109
第七章 刚体的基本运动	111
第一节 刚体的平行移动	111
第二节 刚体的定轴转动	112
第三节 转动刚体上各点的速度和加速度	114
第四节 角速度矢量和角加速度矢量	117
习题	119
第八章 点的合成运动	122
第一节 点的合成运动的概念	122
第二节 点的速度合成定理	123
第三节 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	128
第四节 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	131
习题	138
第九章 刚体的平面运动	142
第一节 刚体平面运动的简化及平面运动方程	142
第二节 求平面图形内各点速度的基点法	144
第三节 用速度瞬心法求平面图形上各点的速度	146

第四节 用基点法求平面图形上各点的加速度·····	149
习题·····	152

第三篇 动 力 学

第十章 动力学基本定律和质点运动微分方程 ·····	157
第一节 动力学基本定律·····	157
第二节 质点运动微分方程·····	158
第三节 质点动力学的两类问题·····	159
习题·····	162
第十一章 动量定理 ·····	164
第一节 动量和冲量·····	164
第二节 动量定理·····	165
第三节 质心运动定理·····	170
习题·····	172
第十二章 动量矩定理 ·····	175
第一节 动量矩·····	175
第二节 动量矩定理·····	176
第三节 刚体的转动惯量·····	180
第四节 刚体定轴转动微分方程·····	182
第五节 刚体平面运动微分方程·····	184
习题·····	185
第十三章 动能定理 ·····	189
第一节 力的功·····	189
第二节 作用于质点系与刚体上的力系的功·····	191
第三节 动能·····	193
第四节 动能定理·····	195
第五节 功率和功率方程·····	199
第六节 势力场 势能 机械能守恒定律·····	201
习题·····	204
第十四章 达朗贝尔原理 ·····	207
第一节 惯性力和质点的达朗贝尔原理·····	207
第二节 刚体运动时惯性力系的简化·····	209
第三节 刚体绕定轴转动时轴承的附加动反力·····	215
习题·····	219

第十五章 虚位移原理	222
第一节 约束及其分类.....	222
第二节 虚位移的概念及计算.....	224
第三节 虚功 理想约束.....	226
第四节 虚位移原理.....	228
习题.....	232

绪 论

由于工程力学包含着极其广泛的内容，人们对于工程力学的理解不尽相同。本书所论之工程力学由理论力学和材料力学两大部分组成。本书上册主要论述理论力学部分，材料力学部分在下册论述。

一、理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械是人类进行生产和生活的主要工具。**机械是机器与机构的总称**，常把执行机械运动、用来变换或传递能量、物料与信息的装置称为**机器**；把用来变换或传递运动与动力的、用运动副连接的且有一个构件为机架的构件系统称为**机构**。在现代社会，人们运用各种类型机械，以改善劳动条件，提高劳动生产率 and 产品质量。同时，随着经济的发展，人们也越来越多地利用机械，以提高自身的生活质量。

运动是物质存在的形式，是物质的固有属性，自然界中存在各种各样的物质，都处在永恒不停的运动中。物质运动的形式是多种多样、极其复杂的。正如恩格斯所说：“运动，就一般的意义来说，就它被理解为存在的方式、被理解为物质的固有属性来说，它包括宇宙中发生的一切变化和过程，从单纯的位置移动起直到思维。”

所谓机械运动，是指物体在空间的位置随时间的变化，如日月的运行、车船的行驶、机器的运转、河水的流动及物体的平衡，等等。工程中平衡一般是指物体相对于地球的运动保持不变，即相对于地球静止或匀速直线运动，它是机械运动的一种特例而且总是相对地、暂时地而且是有条件地存在的。

理论力学属于古典力学范畴，它是以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础的，它适用于研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动。当物体的速度接近光速时，其运动必须用相对论力学来研究。当物体的大小接近微观粒子时，其运动必须用量子力学来研究。但在一般工程问题中，应用古典力学的理论来解决问题，不仅方便，而且具有足够的精确度，古典力学在应用中仍不断有所发展。

为了便于解决工程实际问题及根据循序渐进的认识规律，本册分为三部分，即静力学、运动学和动力学。

静力学——研究力系的简化与物体在力系作用下的平衡规律。

运动学——从几何学的角度来研究物体的运动规律。

动力学——研究作用于物体上的力与物体的运动规律。

二、理论力学的研究方法

理论力学的研究方法离不开人们认识客观世界的共同规律，即“实践—理论—再实践”的认识过程，通过实践而发现真理，又通过实践去检验真理，这是任何科学发展的正确途径。具体地说，就是从实践出发，经过抽象、综合和归纳，总结出力学的基本规律，用数学演绎和逻辑推理形成理论，然后，再通过实践来验证理论。

对实践的观察是力学研究的起点，只有通过对生活与生产实践活动的仔细观察，才能发现力学现象，提出力学的研究课题。

远在古代，人们为了提水，制造了辘轳；为了搬运重物，使用了杠杆、斜面和滑轮；为了长距离运输，制造了简单的运输机械，等等。制造和使用这些生活和生产工具，使人类对于机械运动有了初步的认识，并积累了大量的经验，经过分析、综合和归纳，逐渐形成了如“力”和“力矩”等基本概念，以及如“二力平衡”、“力的平行四边形法则”等力学的基本规律，并总结于科学著作中。

人们为了认识客观规律，不仅在生活和生产实践中进行了观察和分析，而且还进行了实验。实验可以从复杂的自然现象中找出事物主要因素，并且能够定量地测定各个因素间的关系，因此实验也是形成理论的重要基础。例如，伽利略对自由落体和物体在斜面上的运动做了大量实验而引出加速度的概念；库仑通过实验得出滑动摩擦定律；牛顿三大定律也是建立在大量实验的基础之上的。从近代力学的研究和发展来看，实验更是重要的研究方法之一。

抽象化的方法是寻求真理的重要方法，事物总是复杂而且多样的，对大量来自实践的材料必须经过“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里”的制作与改造，舍去次要的、偶然的、局部的因素，抓住现象的本质，这就是抽象化的过程。理论力学中的力、刚体、质点和质点系等概念，都是经过抽象化而形成的理想模型。例如，研究物体的机械运动时，撇开物体受力时的变形而获得刚体的概念，略去摩擦而得光滑约束的概念，这些理想化的力学模型都是事物抽象化的结果，抽象可以使问题简化，但任何抽象化模型都是有条件地、相对地存在的。例如，在研究物体受力作用下平衡时，将物体视为刚体，但当讨论物体内部受力情况和它的变形时，则刚体模型不再适用，在材料力学中将建立另一种力学模型。

在建立力学模型的基础上，从基本规律出发，用数学演绎和逻辑推理的方法，得出正确的具有物理意义和实用价值的定理和结论，在更高的水平上指导实践，推动生产的发展。

从实践到理论，再由理论回到实践，通过实践进一步补充和发展理论，然后再回到实践，如此循环往复，每一循环都在原来的基础上提高一步。力学在发展过程中，由于研究的对象不同，从而形成许多分支，如刚体力学、弹性力学、塑性力学、结构力学等，每个分支建立了各自的力学模型，运用数学演绎、逻辑推理的方法，各自形成了完整的理论体系和科学的实验方法。

三、学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强、在工程技术领域中有着广泛应用的技术基础课。它是近代工程技术的重要理论基础之一，同时，它又为工科院校中一系列后续课程，如材料力学、机

械原理、机械设计等，提供必要的基础知识。

理论力学的分析和研究方法在科学研究中有一定的典型性，通过对本课程的学习，有助于培养辩证唯物主义的世界观，也有助于培养分析和解决实际问题的能力，为今后从事生产实践，从事科学研究打下良好的基础。生物力学、地质力学、爆炸力学、电磁流体力学等，都是力学与其他学科结合而成的边缘学科，为探索新的科学领域，力学也成为从事这些科学领域的工程技术与研究人员所必备的理论基础。

第一篇 静力学

静力学研究物体在力系作用下平衡的普遍规律，即研究物体平衡时作用在物体上的力应该满足的条件。

作用于物体上的一群力称为力系。如两个力系对物体的作用效应相同，则此两个力系互为等效力系，彼此间可相互替换。若一力系对物体的作用使物体处于平衡状态，则此力系称为平衡力系。一个力系必须满足一定的条件才能构成平衡力系，此条件即为力系的平衡条件。在本篇静力学分析中，我们将物体视为刚体。静力学主要研究三方面的问题：①刚体的受力分析；②力系的等效与简化；③力系的平衡条件及应用。

静力学的理论和方法在工程实际中有着广泛的应用，在设计建筑物件、工程结构和作匀速运动的机械零件时，需要先分析物体的受力情况，再应用平衡条件计算所受的未知力，最后根据材料的性能确定几何尺寸或选择材料。有时机械零件的运动虽非匀速，但当速度较低或加速度较小时，也可近似地应用平衡条件进行计算。因此，力系的平衡条件是设计构件、结构和机械零件时进行静力计算的基础。由此可知，静力学在工程中有着广泛的应用。

第一章 静力学基础

第一节 静力学基本概念与公理

一、静力学基本概念

1. 力的概念

力是物体间相互机械作用，这种作用使物体的运动状态和形状发生改变。力使物体的运动状态发生变化的效应称为力的外效应，力使物体产生变形的效应称为力的内效应。

物体间的相互机械作用大致有两种形式：一种是通过场起作用的，如重力；另一种是通过物体间的相互接触而产生的，如压力、摩擦力、切削力，等等。实践证明，力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点。这三者称为力的三要素。

力的作用点是指在刚体上的作用位置。当两物体相互接触产生力的作用时，接触处有一定的面积。当受力区域很小，不影响问题的研究，可认为力作用于一个几何点，这时的作用力称为集中力；不能看成集中力的称为分布力（或称为分布载荷）。若单位面积（或单位长度）上力的分布是均匀的，则称为均布载荷。

力是矢量，可用一有向线段 AB 来表示，如图 1-1 所示。线段 AB 的长度按选定的比例表示力的大小，线段的方位与箭头指向表示力的方向，作用点可用线段的起点或终点表示。本书中，用黑体字母如 $\mathbf{F}$ 表示力矢量，并以同字母的非黑体字表示这个矢量的模，常用单位为 N 或 kN。

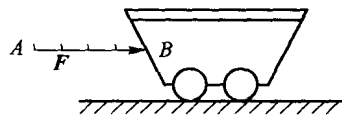


图 1-1 用有向线段表示力

2. 刚体的概念

刚体是指在力的作用下保持其形状和大小不变的物体。或者说，在力的作用下其内部任意两点之间的距离保持不变的物体。这是一个理想化的力学模型。实际上物体受力后总会产生程度不同的变形。如果某物体受力后的变形很小，又不影响研究问题的实质，那么就可以忽略变形，把它看成刚体。有若干个刚体组成的系统称为刚体系统或物系。但不应将刚体的概念绝对化，当物体的变形成为研究问题的主要因素时，就不能再视物体为刚体了。

关于变形体的力学问题，将在本书下册材料力学中研究。但是，只要变形体受力后变形已经终止，并处于平衡状态，就可以将刚体静力学的结论延伸应用到变形体上，这就是刚化原理。

二、静力学公理

静力学公理是研究力系的平衡和简化中总结出来的最基本的力学规律。这些规律是人类在自身的历史长河中,通过长期的观察、实验再加以抽象、归纳、总结而建立的。这些规律的正确性已为实践证明,是符合客观实际的普遍规律。

公理一 二力平衡公理

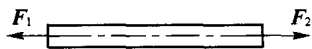


图 1-2 二力平衡

作用在刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要和充分条件是:这两个力等值、反向且作用于同一直线上,如图 1-2 所示。

即

$$F_1 = -F_2$$

这个公理总结了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对于变形体,这个条件不是充分的,但它是必要的。如柔索受两个等值反向的拉力作用可以平衡,而受两个等值反向的压力作用就不能平衡。

当刚体只受两力作用而处于平衡时,此刚体即被称为二力构件。如图 1-3a、b 所示三铰拱桥梁中的右半拱 BC ,当不计自重时,是二力构件。

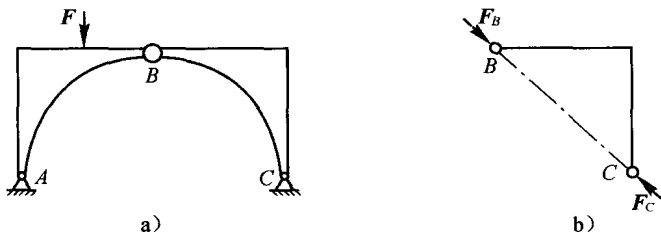


图 1-3 三铰拱桥梁

二力构件的受力特点是两力必沿两作用点的连线,大小相等,指向相反。具体指向由平衡条件决定。

公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上,加上或减去任意个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

推论 I 力的可传性原理

作用于刚体上的力,可沿其作用线在刚体内任意移动而不改变该力对刚体的作用效应。

如图 1-4 所示,作用于小车上 A 点的推力 F 可沿其作用线移动到 B 点,虽然推力变为拉力,但小车的运动不会改变,即效果相同。应用公理一、公理二即可证明推论 I。

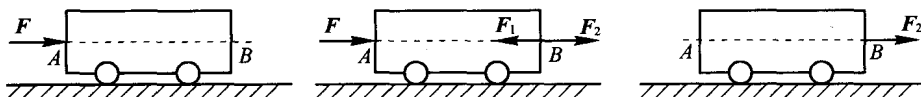


图 1-4 力的可传性

在小车 B 点加上一对平衡力 F_1 与 F_2 ，令 $-F_1 = F_2 = F$ ，由于 F_1 与 F 也是等值、反向、共线的，按公理一组成了另一个平衡力系，又按公理二可以除去。于是小车只剩下 F_2 。因为 $F_2 = F$ ，等于将力 F 从 A 点沿作用线搬移到了 B 点。由于上述过程均是等效替换，故未改变力对小车的作用。

由此可知，对刚体而言，力的作用点可以扩展为力的作用线。作用于刚体上的力的三要素是力的大小、方向和作用线的位置。作用于刚体上的力不再是定位矢量，而是滑动矢量。

公理三 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，合力的作用点也在该点，合力的大小和方向由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-5 所示。或者说，合力矢等于这两个分力矢的矢量和，即

$$F_R = F_1 + F_2$$

在求两共点力的合力时，为了作图方便，只需画出平行四边形的一半，即三角形便可。其方法是自点 O 先画出一力矢 F_1 ，然后再由 F_1 的终端画一力矢 F_2 ，最后由 O 点至力 F_2 的终端，作一矢量 F_R ，它就是 F_1 、 F_2 的合力。将这种作图法称为力的三角形法则。改变 F_1 、 F_2 的顺序，其结果不变。如图 1-6 所示。

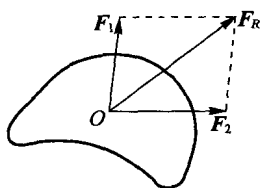


图 1-5 力的合成

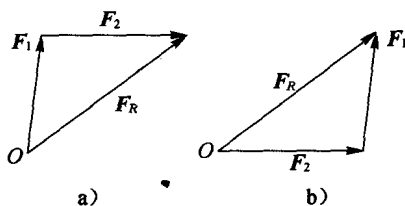


图 1-6 力的三角形

推论 II 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力，若其中两个力的作用线汇交于一点，则此三力必在同一平面内，且第三个力的作用线通过汇交点。

证明：如图 1-7 所示，在刚体的 A 、 B 、 C 三点上，分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 和 F_3 。根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移动到汇交点 O 。然后根据力的平行四边形法则得合力 F_{12} ，则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于二力平衡必须共线，所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。于是定理得证。

公理四 作用和反作用定律

作用力与反作用力总是同时存在，且两力的大小相等、方向相反、沿着同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。这两个力互为作用力与反作用力。借助于这个定律，可以从机器中一个零件的受力分析过渡到另一个零件的受力分析。

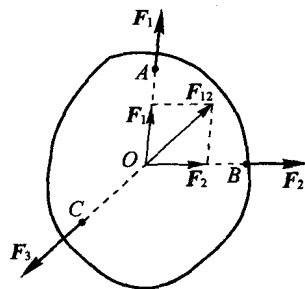


图 1-7 三力平衡汇交