

理论力学

林敬圣 编著 吕茂烈 审校



上海科学技术文献出版社

14
L 48

理 论 力 学

林敬圣 编著
吕茂烈 审校

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字 301 号

理 论 力 学

林敬圣 编著

吕茂烈 审校

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路 2 号 邮政编码 200031)

全 国 各 书 店 经 销

商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 11.5 字数 278,000

1993 年 8 月第 1 版 1993 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1—1,500

ISBN 7-5439-0218-4/O·081

定 价: 8.60 元

《科技新书目》292-322

01-6-12

内 容 提 要

本书是根据国家教委新制订的高等工业学校 70~80 学时《理论力学课程教学基本要求》，采用以研究方法带研究对象的结构体系进行编写，分静力学、运动学和动力学三篇共七章。书末还附有理论力学学习指导，每章结束后均有习题和答案，便于学生学习时参考。本书可作为高等工业学校“中学时”理论力学课程的教材；除去某些章节和某些较深的内容后还可作为“少学时”理论力学教材；也可兼作函授教育、职工业余教育的通用教材；此外，还可作为有关工程技术人员自学用书和硕士生复习迎考的参考书。

序 言

近年来高等学校在改革开放的形势下，教材建设呈现一派繁荣景象。涌现了一批具有闯新精神的新教材。这本《理论力学》一书便是其中之一。

本书符合大学工科中类型理论力学课程的教学基本要求，适合于广泛的专业。既可作为大学本科的教材，也可为相关的函授、业余大学所选用。有志于自学成材和硕士研究生考试的青年也可以由本书得到教益。

理论力学重视三基内容，即基本概念、基本理论和基本方法。本书用新的观点合理妥善地处理三基内容的协调问题。全书体系简明易懂，内容紧凑充实，特别加强了理论的应用。各章后均有一定数量的习题，书末还附有配套使用的理论力学学习指导，便于读者自学时参考。

本书在出版前曾经作者多次使用，效果较好。相信正式出版后本书定能为广大读者所乐于选用。

西北工业大学 吕茂烈

1991年12月

编者说明

理论力学是一门重要的专业基础课，其特点是理论性较强又涉及工程技术领域的广泛应用。长期以来，在理论力学教学中普遍存在“理论易懂做题难”的问题。当前，学时紧，教学矛盾突出，学生对现行大多经典教材已不能很好消化。为此，我们在吸取传统教材精华的基础上，改革原有教材的结构系统，采用以研究方法带研究对象的结构体系编写了本书，从而有利于全面掌握理论，提高解题能力，缓解当前学时不足的矛盾。

在本书编写的过程中，曾广泛参阅了现有教材和有关资料，因难于随文说明，在此一并致谢。

本书曾经西北工业大学吕茂烈教授、浙江大学汪家诤教授审阅，并提出了不少宝贵意见。浙江大学费学博教授、浙江工学院施燮九副教授为本书的出版也提出不少好的意见和建议，在此一并致谢。

由于编者水平有限，特别是对教材系统作了较大修改，缺点和错误在所难免，恳请广大读者给予指正，恳请广大师生和教学研究人员在使用过程中对本书提出宝贵意见。

编 者

1991 年 9 月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第一章 静力学的基本概念和基本力系	3
§ 1-1 力的基本性质和汇交力系的合成	3
§ 1-2 力偶的性质和力偶系的合成	10
§ 1-3 约束和约束反力	14
§ 1-4 构件的受力分析和受力图	21
§ 1-5 基本力系平衡的几何条件	26
习题	31
第二章 一般力系	37
§ 2-1 力在轴上和平面上的投影	37
§ 2-2 力矩	43
§ 2-3 空间一般力系向一点简化	51
§ 2-4 平行力系的中心和物体的重心	54
§ 2-5 一般力系的平衡条件及其应用	59
§ 2-6 摩擦时的平衡问题	72
习题	82

第二篇 运 动 学

第三章 点和刚体的运动	94
§ 3-1 描述点的运动的基本方法	94
§ 3-2 用矢径法表示点的速度和加速度	97

§ 3-3 点的速度和加速度在坐标轴上的投影	99
§ 3-4 刚体的基本运动	108
§ 3-5 刚体平面运动的运动方程	117
习题	123
第四章 点和刚体的合成运动	129
§ 4-1 点的复合运动的概念	129
§ 4-2 点的速度合成定理	132
§ 4-3 点的加速度合成定理	137
§ 4-4 刚体平面运动的分解	143
§ 4-5 平面图形内各点的速度	145
§ 4-6 平面图形内各点的加速度	156
*§ 4-7 刚体绕平行轴转动的合成	164
*§ 4-8 刚体绕相交轴转动的合成	168
习题	171

第三篇 动 力 学

第五章 质点和刚体的运动微分方程及动力学普遍定理 ...	182
§ 5-1 动力学基本方程和质点运动微分方程	182
§ 5-2 质点相对运动的动力学基本方程	190
§ 5-3 动力学普遍定理概述	193
§ 5-4 动量定理和质心运动定理	194
§ 5-5 动量矩定理和刚体定轴转动微分方程	204
*§ 5-6 质点系相对于质心的动量矩定理	215
§ 5-7 刚体平面运动微分方程	217
§ 5-8 动能定理	219
§ 5-9 动力学普遍定理的综合应用	237
*§ 5-10 碰撞	239

习题	248
第六章 达朗伯原理和虚位移原理	260
§ 6-1 达朗伯原理	260
§ 6-2 质点系惯性力系的简化	262
§ 6-3 动静法及其应用举例	268
§ 6-4 定轴转动刚体对轴承的动压力、动平衡的概念 ...	275
§ 6-5 约束、自由度和广义坐标	282
§ 6-6 虚位移原理	286
§ 6-7 动力学普遍方程	297
习题	303
第七章 机械振动基础	310
§ 7-1 单自由度振动系统的力学模型	310
§ 7-2 有阻尼的自由振动	311
§ 7-3 有阻尼的强迫振动	320
§ 7-4 减振和隔振的概念	328
习题	332
附录 理论力学学习指导	336

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械运动表现为物体在空间的位置随时间的变化，这些变化也表现在物体的变形中。工程上常见的车辆运行、机器运转以及卫星航天飞行器的飞行等等都是机械运动的例子。机械运动的特殊形式是平衡。

本书的内容属于经典力学的范围，适用于物体运动速度远小于光速、物体尺寸远大于基本粒子的情况。现代工程技术中遇到的力学问题，绝大部分都属于这种情况。因此理论力学是现代工程技术的基础。物体运动接近光速时的研究属于相对论力学，基本粒子运动的研究则属于量子力学。

理论力学可分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究物体平衡的一般规律；运动学研究物体运动的几何性质，而不涉及产生运动的原因；动力学研究物体运动与作用力之间的关系。

理论力学是一门重要的、理论性较强的技术基础课。又是学生接触工程实际的第一门课程。因此，通过理论力学的学习，要求学生初步学会处理工程实际问题的基本方法，培养分析和解决问题的能力。通过本课程的学习，还能培养学生的逻辑思维、抽象化、数学计算等方面的能力。理论力学是大量力学学科的共同基础，学习理论力学将为学习一系列后继课程，如材料力学、振动理论、机械原理、机械设计、流体力学、结构力学等等，打下重要的基础，也为进一步探索高技术和新技术的现代科学领域准备好力学方面的条件。

第一篇 静力学

本篇主要研究物体在力作用下的平衡问题。研究的物体主要是刚体。所谓刚体是指在力作用下不变形的物体。刚体内任意两点间的距离保持不变。实际上物体受力时会变形，如果变形不大或对研究的问题没有实质影响，则可将物体抽象为刚体。以刚体为研究对象的静力学，称为刚体静力学。

平衡是指物体相对于惯性参考系的静止或作匀速直线平动。在工程技术问题中，常把固连地球的参考系视为惯性参考系。这时平衡就指物体相对于地球的静止或匀速直线平动状态。

具体地说，静力学将研究以下两个问题：

- ① 物体的受力和简化；
- ② 力系的平衡条件及其应用。

本篇分别用几何法和解析法研究基本力系和一般力系的简化与平衡问题。

第一章 静力学的基本概念和基本力系

本章用几何法研究基本力系，即汇交力系和力偶系的合成与平衡问题。与此同时简要地介绍静力学的基本概念和力的基本性质，突出了约束反力的分析。

§ 1-1 力的基本性质和汇交力系的合成

在力的概念形成的同时，人们从大量实践中总结出力的几个基本性质，这些性质被表达为原理和法则（通常称为公理），便于应用。它们是静力学的理论基础。

1. 力的概念

力是物体间的相互机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生改变（力的外效应），同时使物体发生变形（力的内效应）。

实践证明，力对物体作用的效应取决于力的三要素，即力的大小、方向、作用点。例如搬动木箱，在拉力的作用点较低时，可使箱子往前移；如果力的作用点太高，箱子便会翻倒，两者效果不同。

沿力的方向画出的直线称为力的作用线，力的方向包含力的作用线在空间的方位（例如与水平线的夹角 α ）及指向。

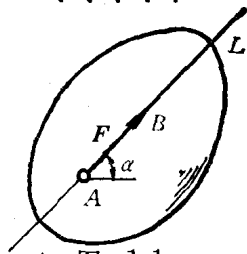


图 1-1

力可用一带箭头的线段 $\overline{AB}$ 来表示(见图 1-1), 长度 AB 按一定比例表示力的大小, 由 A 指向 B 表示力的方向, 始端 A 表示力的作用点。力是矢量。(本书中矢量的符号用粗体字母表示, 如 $\mathbf{F}$ 矢量的模则用普通字母 F 表示。)在国际单位制(SI)中力的单位是 N, 在工程单位制中力的单位是 kgf, 两者存在下列关系

$$1 \text{ kgf} \approx 9.80 \text{ N}$$

2. 作用力和反作用力

当一物体受到另一物体的作用力时, 必给予后者以反作用。两物体相互作用的作用力和反作用力大小相等, 作用线相同, 指向相反。力这个性质的表达称为作用与反作用定律。在分析物体间所受力时, 经常要用到作用与反作用定律。分析时必须明确何者为施力体, 何者为受力体。注意每一对作用力总是分别作用在两个不同的物体上。刚体内部各部分间也有作用与反作用, 但从整个刚体来说, 这些是内力, 不产生效应, 故不必画出。

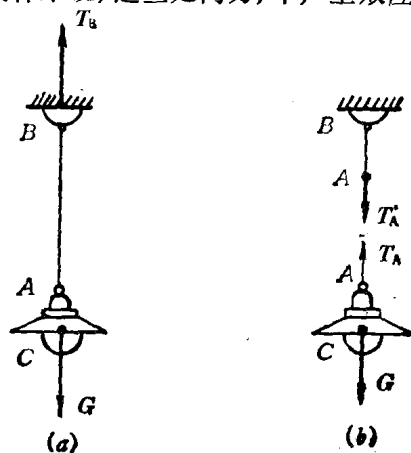


图 1-2

例如, 图 1-2(b) 重 G 的灯头对电线有作用力 T_A , 电线对灯上 A 点有反作用力 T_A , 这两力分别作用于电线和灯头上, 但 $T_A = -T_A$ 。如把灯头与电线看成刚体, 则上述两力成为内力, 不必画出(见图 1-2(a))。

3. 汇交力系合成的几何法

力的合成问题广泛地出现在生产实践中, 例如吊起重物时, 挂钩受到左右两段绳子拉力的作用, 这两个力合成为合力。可以直观地判断, 合力与重物的重力是相等的, 作用在挂点上, 其合成结果由下述法则给出。

力平行四边形法则: 作用于物体同一点的两个力可合成一个合力, 合力的大小和方向由这两个力矢为边的平行四边形的对角线决定(见图 1-3(a))。共点力 F_1 、 F_2 合成的矢量表达式为

$$R = F_1 + F_2$$

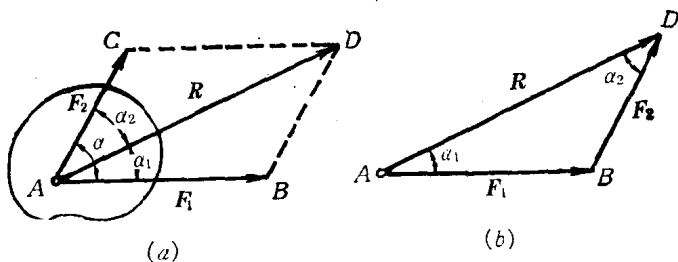


图 1-3

合力 R 的方向由作用点 A 指向 D , 合力的大小由 AD 的长度按比例尺决定, 也可以用余弦和正弦定理计算, 则有

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}$$

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{F_1}{\sin \alpha_2} = \frac{F_2}{\sin \alpha_1}$$

式中 α_1 、 α_2 分别为 R 与 F_1 、 F_2 的交角。

由图 1-3(b) 可见, 在求合力矢 $\mathbf{R}$ 时, 实际上只要以力矢 $\mathbf{F}_1$ 末端作为力矢 $\mathbf{F}_2$ 的始端而画出 $\mathbf{F}_2$, 即两分力矢的首尾相连, 则矢量 $\mathbf{AD}$ 就代表合力矢 $\mathbf{R}$ 。这样画成的三角形 ABD 称为力三角形。这一求合力的几何法称为力三角形法则。

作用在 A 点的三个非平面力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 、 $\mathbf{F}_3$, 亦可根据力平行四边形法则来合成。先将 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 合成为 $\mathbf{R}_1$, 再将 $\mathbf{R}_1$ 与 $\mathbf{F}_3$ 合成, 得其总的合力 $\mathbf{R}$ 。显然, $\mathbf{R}$ 为这三个力矢为边的平行六面体的对顶线。这个法则称为力平行六面体法则 (读者可自行练习作图)。

一群力构成一个力系。刚体上作用的各力作用线相交于一点的力系称为汇交力系, 这是一种基本力系。

如果要求 n 个力的汇交力系的合力。可以连续用力三角形法则, 将各力依次合成。例如, 先将 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 合成为力 $\mathbf{R}_1$, 然后再将 $\mathbf{R}_1$ 与 $\mathbf{F}_3$ 合成为力 $\mathbf{R}_2$, 依次类推, 各分力首尾相接构成开口多边形, 由起点指向终点的封闭边表示合力 $\mathbf{R}$, 这种求合力的几何法称为力多边形法则。总之, 汇交力系可以合成为一个作用线通过汇交点的合力, 合力矢等于诸分力矢的矢量和。写成矢量表达式为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \quad (1-1)$$

例 1-1 固定在墙内的螺钉上作用着三个力, 各力的分布如图 1-4(a) 所示, 各力的大小分别为 $F_1 = 3 \text{ kN}$, $F_2 = 4 \text{ kN}$, $F_3 = 5 \text{ kN}$, 试用几何法求其合力。

解 三个力构成平面汇交力系, 按力比例尺 $\mu_F = 2 \text{ kN/cm}$ 量值画出力多边形 $Oabc$ (见图 1-4(b))。在图上量得封闭边 Oc 长为 4.15 cm , 即合力的大小 $R = 8.3 \text{ kN}$, 量得合力矢 $\mathbf{R}$ 与水平线的偏角 $\alpha = 3.5^\circ$, 合力 $\mathbf{R}$ 的作用线必通过汇交点 O 。

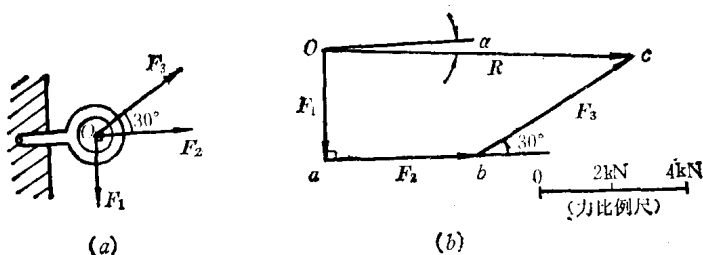


图 1-4

用几何法求合力, 主要限于平面汇交力系, 而且作图的精确度对所求结果有较大影响。作图时, 力的大小和方向都应力求准确, 否则达不到要求的准确度。

此外, 还应注意, 力的平行四边形法则, 不仅是力的合成法则, 而且也是力的分解法则。

例 1-2 图 1-5 所示的为曲柄连杆机构。设作用于活塞上的燃气压力为 $p=7.51 \times 10^6 \text{ Pa}$ ($1 \text{ Pa}=1 \text{ N/m}^2$), 活塞的直径 $d=105 \text{ mm}$, $\beta=5^\circ$ 。试求活塞加于连杆和汽缸壁的力。

解 燃气对活塞的推力为

$$P = pS = 7.51 \times 10^6 \times \frac{\pi}{4} (105 \times 10^{-3})^2 \\ = 65000 \text{ (N)}$$

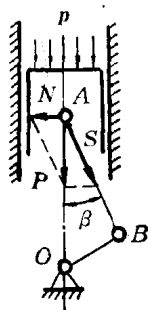


图 1-5

这个推力可以分解为一个沿连杆 AB 方向的分力 S 和一个垂直于汽缸壁的压力 N 。由力的平行四边形法则得

$$S = \frac{P}{\cos \beta}, \quad N = P \cdot \tan \beta$$

将已知数值 $\beta=5^\circ$ 和 $P=65000 \text{ N}$ 代入上式得

$$S = 65248 \text{ N}, \quad N = 5688 \text{ N}$$

即这两分力分别传给了连杆和汽缸壁。

空间受力情况，可用车刀切削工件为例。刀尖对工件的作用力 P 可按力平行六面体法则分解为切线切削力 P_z 、径向切削力 P_y 以及轴向切削力 P_x ，分别以平行六面体的三条棱边表示(读者可选 x 轴沿转轴作出长方体)。

4. 二力平衡原理

要使两个力作用的刚体平衡，必须也只需这两个力的大小相等，方向相反，且作用在同一直线上(见图 1-6(a)、(b))。

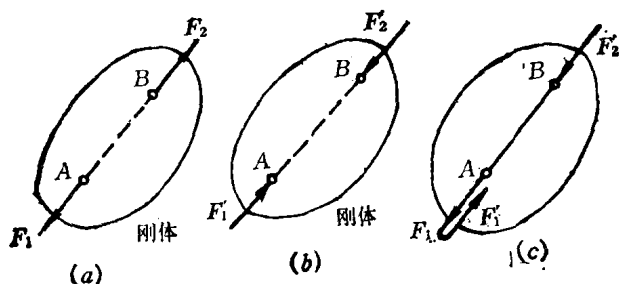


图 1-6

工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件，称为二力构件或二力杆，该两力必沿两作用点的连线。

例 图 1-7(a)所示的棘轮机构处于平衡，当不计棘爪 AB 的自重时，是二力杆。 F_A 、 F_B 两力必定沿 A 、 B 两点的连线(见图 1-7(b))。

满足本原理的一对力构成最简单的平衡力系。平衡力系对刚体不产生任何内、外效应。故在分析刚体所受的力时，可以任意去掉或叠加一个平衡力系，而不影响原来作用力的效应。

推论 力在刚体上的可传性。作用在刚体上的力，其作用点可沿作用线任意移动，而不改变该力对刚体作用的效应。

• 8 •