

吴 镇 著

理论力学

上海交通大学出版社

理论力学

(上册)

吴镇 编著

上海交通大学出版社

简 介

这是一本按照高等院校工科多学时的《理论力学教学大纲》编写的教材，分上下两册，上册为静力学和运动学，下册为动力学和分析力学基础。全书共 24 章，约 50 万字，其中包括例题约 120 道，习题约 600 道。

这本教材在内容的取舍，例题的分析，习题的编排等各方面充分反映了编者 30 多年来在上海交通大学教学实践的经验。

这本教材在正式出版前，已作为交流讲义多次修订重版，并有不少院校采用，颇多好评。认为本教材系统完整，内容充实，文字精炼，详略恰当；所选例题和习题尤多新意，是一本有一定特色的、较好的教材，既适用教学，也便于自学。在这次正式出版前，编者又作了一次修订。

这本教材除去若干章节后，也可以作为学时数较少的理论力学课程的教材。

理 论 力 学 (上)

吴 镇 编著

上海交通大学出版社出版

(淮海中路 1984 弄 19 号)

新华书店上海发行所发行

常熟文化印刷厂排版印装

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 10.75 字数 239000

1989 年 1 月第 1 版 1989 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—6,400

ISBN 7—313—00193—2/EO·31

科技书目：177—283

定价：2.10 元

前 言

这是为高等工科院校理论力学课程编写的教材。这本教材的初稿写于1962年。当时,由上海交通大学印刷厂铅印后作为交流讲义内部发行。此后,除去动乱的年代,在不到10年的时间内曾4次修订重版。其中,1979年的那一版,编进了习题,改了单位制,使这本教材基本上定型。1980年和1983年的两版,主要增加了数量较多的习题。

自这本教材印行以来,得到很多兄弟院校同行们的鼓励 and 关注。但由于种种原因,一直没有得到正式出版的机会。现在,终于由上海交通大学出版社审订出版了。如果从1962年的那一版算起,这已经是第6版了。

这一版与1983年版比较,在内容上并没有多大变动,只是作了一些调整。例如,在运动学的刚体平面平行运动一章中,原来有一些习题要求计算当牵连运动为平面一般运动时的速度和加速度,但没有给出相应的例题;这次,补充了一个例题,并把它写成了一节。在动力学部分,质点的运动微分方程一章中也增加了一节:质点相对运动的微分方程。情况也是一样。所以,从表面上看,增加了两节,但实际上只是补充了两个例题。

此外,在这一版中,又增加了一些习题。这些习题,大部分是近几年来在教学中的测验题和考试题。现在,习题的总数超过了600个。在这600多个习题中,基本题约占三分之二,其余的三分之一属于加深题。这些加深题安排在每一章后面的复习题中,有一定的难度。它可以作为较好学生的加选题,也可以作为课堂讨论时的讨论题。对于一般水平的学生来说,能独立完成基本题中的一半,也就可以了。

为了使全书的篇幅不因加进了一些新的例题和习题后有较大的增加,除了某些章节在文字上有所精简外,还删去了运动学中变矢量的导数这一节。考虑到学生现在的数学基础,估计不会有什么影响。

在以前的几版中,都出现一些错误,特别是有几个习题的答案错了。这一次,把所有给出的答案都进行了校核,希望不再有错。同时,在排印中出现的一些错字,这次也希望能把它彻底消灭掉。

最后,乘这个机会,向过去采用这本教材的同志,向过去对于这本教材给予鼓励的同志,向过去关心这本教材出版的同志一并表示衷心的感谢,并恳切希望今后能继续得到大家的支持。

吴 镇

1988年2月26日

理 论 力 学

上 册 目 录

绪 论.....	1
-------------	---

第 1 篇 静 力 学

第 1 章 静力学基本概念及公理.....	3
§ 1-1 力的概念	3
§ 1-2 刚体的概念	5
§ 1-3 静力学公理	6
§ 1-4 物体受力分析 受力图	13
§ 1-5 三力平衡定理	16
第 2 章 共点力系.....	23
§ 2-1 共点力系合成的几何法	23
§ 2-2 共点力系平衡的几何条件	25
§ 2-3 理想铰链约束	32
§ 2-4 两力杆及其内力	35
§ 2-5 力的分解	40
§ 2-6 共点力系合成的分析法	41
§ 2-7 共点力系平衡的分析条件	42
第 3 章 力偶系.....	55
§ 3-1 两平行力的合成	55

§ 3-2 力偶的概念	57
§ 3-3 力偶系的合成及平衡	62
第 4 章 力矩	68
§ 4-1 力对轴之矩	68
§ 4-2 力对点之矩	71
§ 4-3 力对于点之矩与对于通过该点的任意轴之矩的 关系	73
§ 4-4 有关力矩的两个定理	76
第 5 章 平面一般力系	83
§ 5-1 平面一般力系的简化	83
§ 5-2 平面一般力系简化后可能得到的结果	86
§ 5-3 平面一般力系的平衡方程	91
§ 5-4 平面一般力系平衡方程的形式	96
§ 5-5 平面平行力系的平衡方程	101
§ 5-6 几个物体组成的系统的平衡方程	105
§ 5-7 平面桁架	114
第 6 章 摩擦	137
§ 6-1 滑动摩擦现象	137
§ 6-2 滑动摩擦阻力	138
§ 6-3 极限摩擦阻力 摩擦系数	139
§ 6-4 摩擦角	143
§ 6-5 摩擦锥 平衡范围	149
§ 6-6 有摩擦阻力时的翻倒问题	156
§ 6-7 滚动阻力	160
第 7 章 空间一般力系	172
§ 7-1 空间一般力系的简化	172

§ 7-2	空间一般力系简化后可能得到的结果	175
§ 7-3	空间平行力系简化的结果	178
§ 7-4	空间一般力系的平衡方程	179
第 8 章	重心和形心	192
§ 8-1	平行力系中心	192
§ 8-2	重心和形心的普遍公式	193
§ 8-3	重心或形心计算举例	194

第 2 篇 运 动 学

第 9 章	点的运动	201
§ 9-1	动点位置的确定	201
§ 9-2	点的速度	203
§ 9-3	点的加速度	208
§ 9-4	自然轴系	209
§ 9-5	加速度在自然轴上的投影	211
§ 9-6	点的直线运动	218
§ 9-7	简谐运动	222
第 10 章	刚体的基本运动	229
§ 10-1	刚体的平行移动	229
§ 10-2	刚体绕固定轴的转动	232
§ 10-3	定轴转动刚体内点的速度与加速度	235
§ 10-4	角速度矢量与角加速度矢量	237
§ 10-5	泊桑公式	239
第 11 章	点的合成运动	245
§ 11-1	合成运动的概念	245

§ 11-2	速度合成	248
§ 11-3	加速度合成	253
第 12 章	刚体的平面平行运动	278
§ 12-1	刚体平面平行运动的定义及其运动方程	278
§ 12-2	平面运动的分解	281
§ 12-3	平面运动图形上点的速度	285
§ 12-4	瞬时速度中心	286
§ 12-5	速度投影定理	293
§ 12-6	平面运动图形上点的加速度	296
§ 12-7	刚体绕平行轴转动的合成	305
§ 12-8	当牵连运动为平面一般运动时的速度和加速度 计算	311
第 13 章	刚体绕固定点的转动及刚体的一般运动	324
§ 13-1	刚体绕相交轴转动的合成	324
§ 13-2	刚体绕定点转动的方程 欧拉角	326
§ 13-3	定点转动刚体的角速度与角加速度	328
§ 13-4	定点转动刚体内点的速度与加速度	329
§ 13-5	刚体的一般运动 螺旋运动	332

绪 论

力学是研究物体机械运动的科学。所谓机械运动，就是物体位置的变动。日、月、地球的运行，车辆、船只的行驶，机器的运转，空气、河水的流动，等等，都是机械运动。

就最一般的意义来说，运动是物质的存在形式，是物质的固有属性，它包括了在物质世界中所发生的一切变化与过程。因此，物质的运动形式是多种多样的。物体的机械运动则是物质的运动形式中最低级、最简单的一种。

机械运动不仅广泛地出现在我们的周围，而且在其他高级形式的运动中，都包含有或者说伴随着机械运动。因此，对于机械运动的研究，不仅可以解释我们周围的许多现象，而且是进一步研究其他高级运动形式的基础。这也就决定了研究机械运动的科学——力学在自然科学中的地位。对于我们来说，更重要的还在于：力学是现代工程技术的重要理论基础。在现代工程技术的各个领域里，都有大量的力学问题。要解决这些问题，必须具备广博而且深厚的力学理论知识。

需要加以指出的是：我们一般所说的力学，属于古典力学的范畴。

在 20 世纪以前很长的历史时期内，我们人类事实上对于机械运动的研究，只局限于以宏观物体为对象，并且它的速度远小于光速。在这个范围内所建立起来的力学，一般称为“古典力学”，以区别于从 20 世纪才开始的近代力学。古典力学是以 17 世纪牛顿（1642~1727）所总结的几条基本定律为基础的，有时也就称为“牛顿力学”。近代力学以爱因斯坦（1879-1955）的相对论为基础，一般称为“相对论力学”。相对论力学的建立，标志着力学的

发展进入了一个新的、重要的阶段。但是，应该知道，应用古典力学和相对论力学的理论所得到的结果，只有当物体的速度接近光速时，才会有显著的差别。因此，相对论力学的建立，并没有使古典力学失去任何实际意义。

在我们这门课程——理论力学中，将概括地研究物体机械运动的普遍规律。

我们知道，所有的宏观物体，根据它们存在的状态可以分为固体和流体，流体又可分为液体和气体。不论是固体还是流体，它们运动时将遵循某些共同的规律。这些共同的规律，就是我们这门课程研究的对象。只有当这些普遍规律研究清楚之后，我们才有可能进一步根据具体物体的性质，研究它们运动的特殊规律。也就是说，在理论力学的基础上，才有可能进一步研究固体力学和流体力学。固体力学中包括材料力学、弹性力学、塑性力学等；流体力学中包括水力学、空气力学等。

此外，应用机械运动的规律来解决从生产实际中提出来的专题，则建立了各种应用力学。在工程技术的领域内，土木建筑、机器制造以及造船、航空等各个方面，几乎都有自己的力学。

因此，理论力学在我们工科大学中是一门重要的基础理论课程，它为以后学习一系列后继课程和解决将来实际中遇到的力学问题奠定基础。

理论力学，就其包含的内容来说，可以分为三部分：

- (1) 静力学 研究物体平衡的规律；
- (2) 运动学 研究物体运动的几何性质；
- (3) 动力学 研究物体的运动与物体上所受力的关系。

在这本教材的第四部分，还将介绍一些“分析力学”的基本内容，包括“虚位移原理”和“拉格朗日方程”。

第1篇 静力学

第1章 静力学基本概念及公理

静力学研究物体平衡的普遍规律;或者说,研究物体平衡时作用于物体上的力所应满足的条件。

所谓物体的平衡,就是说物体的运动状态不变,它包括静止与匀速直线运动两种情况。在静力学中,这两种情况,都假定是相对于地球而说的。

研究物体的平衡条件,是从一个经过抽象化了的理想模型——刚体的平衡开始的。

作为静力学的第1章,我们要先讲一下:

- (1) 静力学中的两个基本概念:力的概念与刚体的概念;
- (2) 作为静力学理论基础的五个公理;
- (3) 物体的受力分析。

§ 1-1 力的概念

在很早的时候,力仅仅是人类劳动时由于肌肉的紧张收缩而产生的生理上的感觉。只是在后来,当人类仔细观察和分析了物体间相互的作用,以及研究了物体动态改变的原因以后,才建立起力的科学的定义。力是物体之间的机械作用,这种作用将使物体的动态和形态发生改变。

物体间机械作用的形式是多样的,大体上可以分为两类:一类是通过物质的一种形式——场而起作用的,如重力;一类是由两个

物体直接接触而发生的,如两物体间的压力、摩擦力等。

一个力对物体产生的效果,一般来说,可以分为两方面:一方面是物体运动状态的改变,另一方面是物体形状大小的改变。有时候,把动态的改变称为力对物体的外效应,而形态的改变称为内效应。由经验知道,力对物体的效应,包括外效应和内效应,决定于力的大小、方向和作用点。这三者称为力的三要素。

力的大小,在本书采用的国际单位制中,以牛顿为单位。牛顿简称牛(N),1000 牛顿简称千牛(kN)。

力的方向,就是力作用的方位和指向。

力的作用点,就是力作用的部位。实际上,当两个物体直接接触而产生力的作用时,力是分布在一定的面积上的。如手推车时,力分布在手与车相接触的面积上。只是当接触面积相对地较小的时候,可以抽象地看作集中于一点。这样的力称为集中力,不能看作集中力的称为分布力。分布力又可以分为面分布力和体分布力。面分布力分布于两物体相接触的表面上,而体分布力则分布于物体内部的每一点上。地球吸引物体的重力就是体分布力的具体例子。

通过力的作用点并与力的方位相同的直线称为力的作用线。



图 1-1

象力这样具有大小与方向的物理量,总是可以用一个几何图像“矢”来表示。“矢”是带有箭头的线段,如图 1-1 所示,线段的长度,按一定的比例尺表示这个

量的大小,线段的方位以及箭头指向表示它的方向。具有大小、方向的物理量还有很多,已为大家熟悉的如物体运动时的速度、加速度等。研究和分析了这些物理量的共同性质,加以归纳、抽象,建立了“矢量”的概念。所谓矢量,第一,具有大小和方向两重意义,可以具体地用一个“矢”来表示;第二,按一定的规则进行运算,其中最基本的就是矢量的加法规则。矢量的运算规则,在“矢量代数”和“矢量分析”中详细研究,我们以后也将就有关的简略提到。

由于在我们理论力学中所涉及的主要物理量多数是矢量，所以必须熟悉矢量的性质以及有关的运算规则。

大小与方向是矢量的普遍性质，也就是所谓“共性”。但根据具体物理量的“个性”，矢量可以分为：

(1) 定位矢量 除大小方向外，它还具有一定的作用点。

(2) 滑动矢量 除大小方向外，还具有一定的作用线。它的作用点可以在作用线上任意选定。

(3) 自由矢量 它只具有大小和方向，而没有作用点或作用线的意义。它的作用点的位置，可以任意选定。

就力对物体的全部效应而言，力是定位矢量。滑动矢量和自由矢量的例子，以后可以看到。

§ 1-2 刚体的概念

我们已经指出，物体受力作用后可以产生动态改变和形态改变两方面的效应。对于固体来说，这两方面的效应是可以区别得很清楚的。

当物体处于平衡状态时，物体的动态不变，亦即作用于物体上所有的力对物体的外效应相互抵消。但是，不论物体的动态是否改变，只要有力作用，物体的形态总是有所改变的；只是物体形态的改变往往十分微小，甚至在很多情况下，要用精密的仪器才能觉察出来。因此，对于受力作用后变形微小的物体来说，在研究它动态改变的规律时，特别是研究它平衡的规律时，可以把形态的改变看作次要因素而忽略不计。这样，将使问题的研究大为简化；也只有在这样的基础上，才有可能进一步研究物体的变形。至于物体变形的研究，将是材料力学的任务。

忽略了物体的微小变形，我们得出刚体的概念。刚体，就是受力作用后不变形的物体。真正不变形的物体实际上是不存在的。所以，刚体，只是在力学中研究物体的运动或平衡规律时被抽象化

了的理想模型。由于这一抽象是科学的，在这个基础上得到的结论将具有普遍的意义。在以后的具体问题中，不论是桥梁、起重机、任何建筑物、任何机器或者是它的某一个构件，等等，都可以看成是刚体。

§1-3 静力学公理

静力学的全部理论，建立在下面五个公理的基础上。

1. 两力平衡公理

在叙述这个公理之前，先说明两个有关的定义。我们把某些力组成的系统称为力系。如果某一力系作用到原来平衡的任一刚体上，而刚体仍然处于平衡，则此力系称为平衡力系。显然，最简单的平衡力系，至少由两个力组成。从实践中得到这两个力所应满足的条件，建立了两力平衡公理。

当两个力组成平衡力系时，这两个力所应满足的必要而且充分的条件为：等值，反向，共线。

设一刚体受到 F_1 、 F_2 两个力作用而平衡，如图 1-2 所示，则这两个力的作用线必定与两力作用点 A 、 B 的连线重合；此外，这两个力的大小相等，指向相反，而可以用矢量式表示为

$$F_1 = -F_2.$$

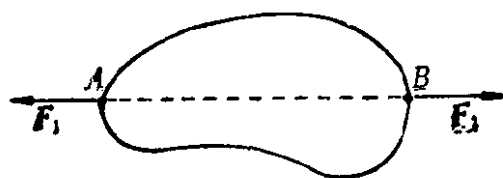


图 1-2

例如一重量可以忽略不计的直杆，只在它两端的中点有力作用而平衡，则这两个力必定沿着杆的中心线（或称轴线），而使这直杆受到拉力或压力，如图 1-3 所示。

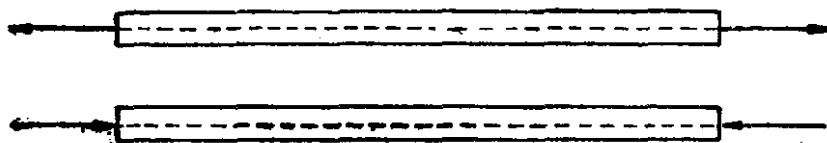


图 1-3

又如当起重机吊起重物时,重物受到两个力作用:一个是地球吸引它的重力 W , 作用于重物的重心 C ①; 一个是钢索吊住它的拉力 T , 作用于重物与钢索相接触的一点 A 。当平衡时,由于 W 是铅垂向下的,所以 A 、 C 的连线必须与铅垂线重合,亦即重物的重心必须在钢索的延长线上。此外, T 铅垂向上,大小等于 W , 即

$$T = -W.$$

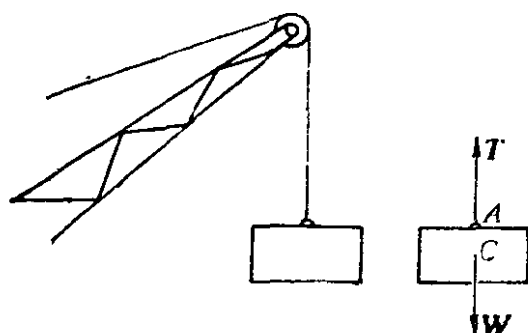


图 1-4

2. 两力合成公理

先给出“力系的等效”与“力系的合力”的定义。如果两个力系对同一刚体的效应相同,则称这两力系为等效。如果一个力系与一个力等效,则这个力称为该力系的合力。

从实践知道,在最简单的情况下,即当两个力作用于刚体上同一点时,其合力由“平行四边形定律”决定。这一定律就是两力合成公理。

作用于同一点的两个力的合力,其作用线、大小、指向,由两已知力的“矢”为边所组成的平行四边形的对角线决定。

① 重心的概念见第 8 章,对于刚体来说,分布于体内各点的重力可以集中地作用于它的重心。

设在刚体上A点作用有 F_1 、 F_2 两个力，其交角为 α 。以 F_1 、 F_2 为边作出平行四边形 $ABCD$ ，如图1-5所示，则 F_1 、 F_2 的合力 R 沿着对角线 AC ，由A指向C，其大小由 AC 的长度按比例尺决定。

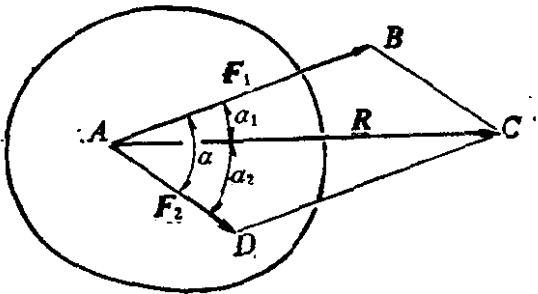


图 1-5

如果用式子来表示合力 R 的大小和方向，那么，根据余弦和正弦定律，我们有

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

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

其中 α_1 、 α_2 分别为 R 与 F_1 、 F_2 的交角。

事实上，如果只要确定合力 R 的大小、方向，那末，作出“力三角形”就可以了。在作力三角形时，可以先画 F_1 ，再画 F_2 ；也可以先画 F_2 ，再画 F_1 ，如图1-6所示。当然，在力三角形上的每一个力矢，只具有大小、方向的意义，并不表示这个力的作用线位置。

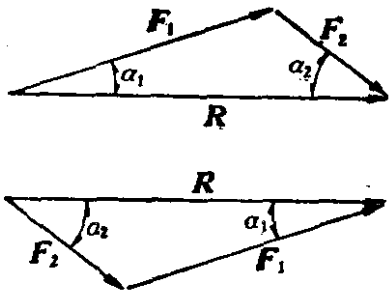


图 1-6

上述两力合成的平行四边形规则或三角形规则，也就是矢量最基本的运算规则——加法规则。矢量 R 称为矢量 F_1 与 F_2 的矢量和或几何和。

以式子表示，即

$$R = F_1 + F_2 \text{ 或 } R = F_2 + F_1.$$

应该指出，在这个式子以及以后所有的矢量式子中，每一矢量只表示具体物理量的大小与方向。