

高等学校教学参考书

理论力学

(1965年修订本)

上册

哈尔滨工业大学理论力学教研室编

人民教育出版社

理 论 力 学

(修 订 本)

上 册

哈尔滨工业大学理论力学教研室编

人 民 教 育 出 版 社

本书上册包括静力学和运动学两部分，下册为动力学部分。本书内容力图贯彻“理论联系实际”的方针和“少而精”的原则，注意阐明物理概念和联系工程实际，文字也力求明了简练，篇幅较第二版删减了约三分之一。本书可作为高等工业院校教学参考。

简 装 本 说 明

目前 850×1168 毫米规格纸张较少，本书暂以 787×1092 毫米规格纸张印刷，定价相应减少20%。希鉴谅。

理 论 力 学

(修 订 本)

上 册

哈尔滨工业大学理论力学教研室编

人民教育出版社出版(北京沙滩后街)

北 京 印 刷 二 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

统一书号 13012·054 开本 850×1168 1/32 印张 6 4/16

字数 160,000 印数 165,001—265,000 定价 (5) ¥ 0.48

1961年6月第1版 1962年2月第2版

1965年12月第3版 1978年1月北京第14次印刷

绪 论

一、理論力学的研究对象与内容

理論力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

物体在空间的位置随时间的改变，称为机械运动。它是在日常生活和生产实践中最常见到的一种运动。平衡是机械运动的特殊情况，所以理論力学也研究物体的平衡规律。

在客观世界中，除机械运动外，还存在各种各样的其他形式的物质运动，例如发热、发光、发生电磁场等现象，化学变化，以至于人的思维活动等都是。在各种运动形式中，机械运动是最简单的一种运动形式。

本课程所研究的内容属于古典力学的范畴。它只适用于速度远小于光速的宏观物体的运动，而不适用于速度接近光速的物体运动或基本粒子的运动。后者属于相对论力学或量子力学的范畴。然而，在近代一般的工程实践中遇到的力学问题，用古典力学来解决，已足够精确，而且古典力学的应用也较方便，所以它仍具有很大的实用意义，并且还在不断发展着。

本课程的内容包括以下三部分：

靜力学——主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条件——平衡条件。同时也研究力的基本性质及力系简化的规律。

运动学——只从几何的角度来研究物体的运动(如轨迹、速度和加速度等)，而不研究引起运动的物理原因。

动力学——研究物体的运动与作用力之间的关系。

二、学习理论力学的任务

毛主席教导我们说：“……十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”^①学习理论力学的目的也正是这样。

学习理论力学有下述的任务。

首先，由于机械运动是工程专业一般都需要接触的问题，所以理论力学是解决工程技术问题的基础。有些工程实际问题可以直接应用理论力学的一些基本理论去解决，有些较复杂的工程实际问题则要结合其他的专门知识共同来解决。

同时，理论力学课程还是学习一系列后续的技术基础课程和专业课程的重要基础。因为理论力学是研究力学中最基本的普遍规律，很多工程专业的后续课，例如材料力学、机械原理、机械零件、结构力学、弹性力学、流体力学，等等，都要以理论力学为基础。很多专业课程也或多或少地要运用理论力学的知识。

此外，学习理论力学能够进一步培养分析问题和解决问题的能力，有助于学习其他的课程，也为今后解决生产实际问题打下基础。

三、理论力学的研究方法

研究科学的过程，也就是认识客观世界的过程，任何正确的科学研究方法，都必须符合毛主席所揭示的“实践——理论——实践”的认识规律。这是辩证唯物主义的认识事物的方法，理论力学也毫不例外。

^① 《毛泽东选集》第一卷，人民出版社，1952年第二版，第281页。

1. 在生产实践中的观察和实验是理论力学发展的基础

从力学发展的历史过程可以看出,理论体系的建立和形成的每一个阶段都是与人类在生产实践中的观察和实验分不开的。人们在长期的生产实践中,建立了力的概念,掌握了二力平衡规律和杠杆原理等一些力学规律。人们为了认识客观规律,不仅在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,人为地创造一些条件来突出影响事物发展的主要因素,又能定量地测定各个因素间的关系,因此实验也是理论形成的重要基础。理论力学中的动力学基本定律、摩擦定律等都是建立在大量的实验基础上的;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。

2. 经过抽象化建立力学模型

不断地观察和实验的结果,使人们对事物的感觉产生了多次的反复,再经过“去粗取精,去伪存真,由此及彼,由表及里”的过程就会形成概念,这个过程就是抽象化的过程。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后形成的理想模型。

抽象化的方法就是在研究复杂的客观事物中,抓住起决定性作用的主要因素,舍弃次要的、局部的和偶然的因素,深入现象的本质,明确事物间的内在联系。例如,在研究物体的机械运动时,忽略了物体受力变形的性质,得到了刚体的模型;忽略了摩擦的影响,得到了理想约束的模型;忽略了物体的几何尺寸,得到了质点的模型;等等。这种抽象化的方法一方面简化了所研究的问题,另一方面也更深刻地反映了事物的本质。列宁说过:“物质的抽象,自然规律的抽象,价值的抽象等等,一句话,那一切科学的(正确的、郑重的、不是荒唐的)抽象,都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”^①但是也要注意,任何抽象化的模型都是有条件的、相对

^① 列宁:《黑格尔“逻辑学”一书摘要》,人民出版社,1965年版,第101页。

的。在研究问题的条件改变以后,原来的模型就不一定适用,必须再考虑影响问题的新的因素,建立新的模型。例如在研究物体内部的受力情况和它的变形时,再用刚体的模型就会得出非常荒谬的结果,这时就需要建立材料力学中所研究的理想弹性体的模型。

3. 经过分析、综合和归纳,总结出力学中最基本的规律

人们在长期的生产实践中积累了大量的经验知识,经过分析、综合,就会从个别具体的特殊规律中归纳出更普遍的规律。理论力学中的一些基本规律就是这样逐渐形成的。这些基本规律的形成,反映了人类从特殊到一般的认识过程,然后这些基本规律又在更高的水平上指导着实践,推动生产的发展。

4. 理论的进一步完善

生产实践中的问题是复杂的,往往不是几条基本规律所能直接解决的。这就要求理论进一步地完善起来,更好地指导实践。人们在积累指导生产实践的规律时就开始注意到数学演绎和推理的方法。理论力学中的基本规律是根据大量的事实经过分析、综合和归纳而建立的,人们又从这些基本规律出发,结合生产实践或自然界中的物理现象,用数学演绎和推理的方法得出某些具有深刻物理意义和应用极为方便的定理和结论。因此在理论力学这门课程中,数学这一有效的科学工具不但广泛地运用在逻辑推理方面,而且也运用于量的计算方面。通过数学语言,有助于更进一步揭示物理量间的内在联系,且使本课程的内容能够更直接地解决复杂的实际问题。但是,因此认为单靠数学推导就可以发展新的理论则是完全错误的。因为一方面,数学演绎不能脱离所研究的实际问题,另一方面,更重要的是科学的发展主要是依赖于生产发展的需要。

5. 由理论回到实践,被实践所检验,又在实践中发展

毛主席说:“而无产阶级认识世界的目的,只是为了改造世界,

此外再无别的目的。”^①因此理论应该回到实践中去，实现认识过程的第二个飞跃。实践是认识的唯一目的，也是检验认识是否正确的唯一标准。理论力学的内容，适用于速度远小于光速的宏观物体，已为人类长期的生产实践所证实。反过来，将理论力学的基本理论应用到生产实际中去，又会使这门学科得到不断丰富、不断发展。

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，再回到实践，如此不断地循环往复，每一循环都比原来的提高一步，这是每门科学发展的共同道路，理论力学也是沿着这条道路向前发展的。

^① 毛泽东：《人的正确思想是从哪里来的？》，人民出版社，1964年版，第2页。

目 录

第三版序	v
第一版序	vi
绪论	vii

静 力 学

第一章 静力学的基本概念	1
§ 1-1. 静力学的任务	1
§ 1-2. 力的概念	2
§ 1-3. 约束和约束反力	6
§ 1-4. 物体受力分析、受力图	9
第二章 平面汇交力系	11
§ 2-1. 平面汇交力系的合成	12
§ 2-2. 平面汇交力系平衡的几何条件	15
§ 2-3. 力的分解	20
§ 2-4. 求合力的分析法	22
§ 2-5. 平面汇交力系的平衡方程	24
第三章 力对点的矩·平面力偶	26
§ 3-1. 力对点的矩	26
§ 3-2. 力偶	27
§ 3-3. 平面力偶系的合成和平衡条件	31
第四章 平面任意力系	33
§ 4-1. 平面任意力系的简化	34
§ 4-2. 平面任意力系的平衡条件	42
§ 4-3. 平面任意力系平衡问题的解法	45
§ 4-4. 物体系的平衡·静定问题	48
§ 4-5. 桁架	51
第五章 摩擦	57
§ 5-1. 滑动摩擦	57
§ 5-2. 考虑摩擦时的平衡问题举例	62
§ 5-3. 滚动摩擦	68
第六章 图解静力学	70
§ 6-1. 平面任意力系合成的图解求法	70

§ 6-2. 平面任意力系平衡的情况	74
第七章 空间力系	77
§ 7-1. 空间汇交力系的合成与平衡条件	77
§ 7-2. 空间力偶系的合成与平衡条件	80
§ 7-3. 力对轴的矩和力对点的矩	84
§ 7-4. 空间任意力系的合成	89
§ 7-5. 空间任意力系的平衡方程	90
第八章 重心	96
§ 8-1. 重心的公式	96
§ 8-2. 用重心的坐标公式求重心位置	100
§ 8-3. 用图解法求重心	104
§ 8-4. 用实验方法测定重心位置	104
运 动 学	
第九章 点的运动学	107
§ 9-1. 运动学的任务与基本概念	107
§ 9-2. 点的直线运动	108
§ 9-3. 点的曲线运动	116
§ 9-4. 切向加速度和法向加速度	127
第十章 刚体的简单运动	133
§ 10-1. 刚体的平动	133
§ 10-2. 刚体绕定轴的转动	136
§ 10-3. 转动刚体内各点的速度和加速度	138
§ 10-4. 轮系的传动比	141
*§ 10-5. 角速度以矢量表示 • 以矢积表示点的线速度	145
第十一章 点的复合运动	147
§ 11-1. 相对运动、牵连运动和绝对运动	147
§ 11-2. 点的速度合成定理	150
§ 11-3. 牵连运动是平动时点的加速度合成定理	154
§ 11-4. 牵连运动是转动时点的加速度合成定理	157
第十二章 刚体的平面运动	164
§ 12-1. 刚体平面运动的概述	164
§ 12-2. 平面图形内各点的速度	167
§ 12-3. 瞬时速度中心	173
§ 12-4. 平面图形内各点的加速度	179
§ 12-5. 刚体绕平行轴转动的合成	182

静力学

第一章 静力学的基本概念

§ 1-1. 静力学的任务

静力学是研究物体受力作用下的平衡条件的科学。

需要解释一下，甚么是平衡？物体相对于地面作匀速直线运动或静止，这种状态称为平衡。例如桥梁、机床的床身、作匀速直线飞行的飞机等等，都是处于平衡状态。

在本课程的静力学中，所研究的物体只限于刚体。所谓刚体就是不变形的物体。或者更确切地说，刚体是这样的物体，在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。当然，在自然界和工程中，一切物体都要变形。但是，长期的实践证明：工程中构件的变形，通常都非常微小，在许多情况下，这些微小的变形，对平衡问题的研究不起主要作用，可以忽略不计，因此，可认为物体是不变形的，从而建立了刚体的模型。

为了便于研究作用在刚体上各种力系的总的作用效果和力系的平衡条件，需要将力系进行简化，所以在刚体静力学中，要研究以下两个问题：

1. 力系的等效替换 即将作用在刚体上的一个力系用另一个与它作用效果相等的力系来代替。所谓力系，是指作用于同一物体上的一群力。如果两个力系对刚体的作用效果相等，则它们互为等效力系。在研究力系等效替换的问题时，物体并不一定处于平衡状态，不过我们暂不考虑物体的运动，而仅研究作用力的替

换。例如,飞行中的飞机,受到升力、牵引力、重力、空气阻力等作用,这群力错综复杂地分布在飞机的各部分,每个力都影响飞机的运动。要想确定飞机的运动规律,必须了解这群力的总的作用效果,这就需要用一個最简单的等效力系来代替这群复杂的力,然后再进行运动分析。由于平衡是运动的特殊情况,所以研究力系的等效替换,可以导出力系的平衡条件,同时也是为了今后动力学的需要。

2. 力系的平衡条件 即刚体平衡时,作用在刚体上的力系所需满足的条件。在设计任何建筑物的构件、工程结构和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出所受的未知力,最后,按照材料的性能确定几何尺寸或选择适用的材料品种。有时当机械零件的运动虽非匀速、但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建筑结构和机械零件时进行静力计算的基础。由此可知,静力学是理论力学在工程实际中应用较广泛的一部分。

§ 1-2. 力的概念

力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化。

力的概念是从劳动中产生的。劳动人民在生产中,由于筋肉紧张收缩的感觉,逐渐产生了对力的感性认识。后来,随着生产的发展,又逐渐认识到:物体的机械运动状态发生的变化(包括变形),都是由于其他物体对该物体施加力的结果。这种力,有的是直接作用,例如:机车牵引车厢,蒸汽推动汽缸的活塞,放在梁上的设备使梁发生弯曲等等;也有的是“场”和物体的作用,例如:地球的引力场对于物体的引力,电场对于电荷的引力和斥力等等。尽管物体间相互作用力的来源和物理本质不同,但是在研究物体的

运动或平衡规律时,可以撇开这些非本质的因素,将它们概括起来,加以抽象化而形成“力”的概念,提高到理性认识。

由实践总结知道,力的大小、方向和作用点的位置是决定力对物体作用效果的三个要素,其中任何一个有了改变,力的作用效果也就不同。通过力的作用点沿力的方向的直线,称为力的作用线。

上述力的三个要素可以用一个矢量表示,矢的长度等于力的大小(按一定的比例尺),矢的方向表示力的方向,矢所沿的直线表示力的作用线(图 1-1),至于矢的起点(图 1-1 中的点 A)则表示力的作用点。力的矢量用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示,而力的大小则用普通字母 F 表示,必须严加区别。例如,以绳子悬挂重物(图 1-2 a),在重物上作用有两个力:绳子的拉力 $\mathbf{T}$ 和重物本身的重力 $\mathbf{P}$,它们的矢量表示如图 1-2 b 所示。

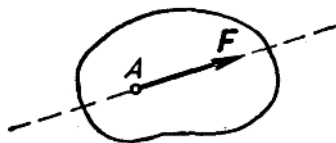


图 1-1

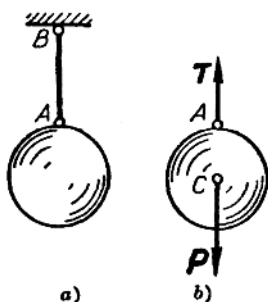


图 1-2

必须指出,作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到任意一点,而并不改变该力对刚体的作用效果。事实上,这个力的重要性质是我们所熟知的,例如,人们在车后推车,与在车前拉车,效果是一样的(图 1-3)。由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效果的要素,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

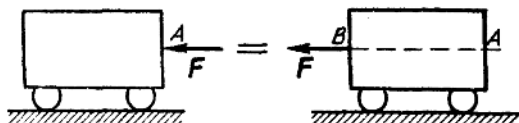


图 1-3

为了测定力的大小，必须选择一个标准来加以比较。在工程单位制中，力的大小是以 kg (公斤) 或 t (吨) 为计算单位。

在生活和生产中，经过长期的经验积累和实践的验证，人们认识了关于力所遵循的许多规律，其中最基本的规律可归纳总结为以下四条：

1. 二力平衡条件

要使作用于一个刚体上的两个力平衡，其必要和充分条件是：这两个力的大小相等，方向相反，且同在一一直线上(图 1-4)，即

$$F_1 = -F_2.$$

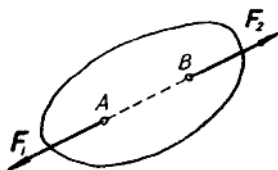


图 1-4

这条规律总结了作用于物体上的最简单的力系平衡时必须满足的条件。对于刚体来说，这个条件是既必要又充分的；但是对于非刚体，这个条件是不充分的。例如，软绳

受两个等值反向的拉力可以平衡，而受两个等值反向的压力就不能平衡。

2. 力的平行四边形规则

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由以这两个力为边所构成的平行四边形的对角线确定(图 1-5)。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$R = F_1 + F_2.$$

如果两个力是共线的，那么从力的平行四边形规则可推知：两个共线力的合力等于这两个力的代数和，就是说，两力同向时相加，反向时相减。这个推论还可推广到任意个力的共线力系。

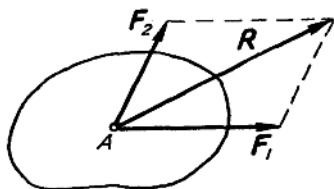


图 1-5

3. 可以等效替换的力系

可以在作用于刚体上的任何一个力系上，加上或除去任意的平衡力系，而并不改变原力系对刚体的作用效果。就是说只相差一个平衡力系的两个力系，作用效果相同，可以相互替换。

4. 作用与反作用定律

作用力与反作用力总是同时存在，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。

这个定律概括了自然界中物体相互作用的关系，表明作用的力总是成对出现的。当研究由几个物体组成的系统时，如果我们知道了其中一物体对另一物体的作用力的大小和方向，根据上述关系就可知道后一物体对前一物体的反作用力的大小和方向。

下面举例来分析。

放置在基础上的电动机(图 1-6 a)，受重力 P 和基座的反力 N 的作用(图 1-6 b)。重力 P 是地球对电动机的吸引力，作用在电动机上；同时，电动机对地球也有一个吸引力 P' 作用在地球上(图 1-6 c)，这两个力是作用力和反作用力，两者等值反向。此外，电动机对基座也作用一个压力 N' ，这个力和 N 是作用力和反作用力，两者等值反向。今后，作用力和反作用力都用同一字母表示，但其中之一，在字母的右上方加一“撇”。

必须强调指出，虽然作用力与反作用力大小相等，方向相反，但分别作用在两个物体上，因此，不能认为作用力与反作用力互为

平衡或组成平衡力系。

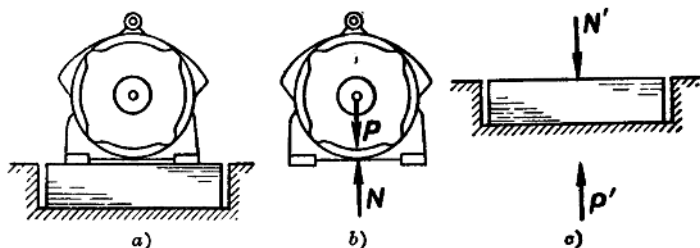


图 1-6

§ 1-3. 约束和约束反力

有些物体，例如：飞行的飞机、炮弹和火箭等，这些物体在空间的位移不受任何限制。位移不受限制的物体称为自由体。又例如：机车、电机转子、机床的刀具、桥梁的桁架和吊车钢索上悬挂的重物等，这些物体在空间的位移都受到一定的限制。如机车受铁轨限制，只能有沿轨道的位移；电机转子受轴承限制，只能绕轴线转动，而不能有其他的位移，等等。位移受到限制的这些物体称为非自由体。起限制位移作用的物体称为约束。例如，吊车钢索对于重物、铁轨对于机车、轴承对于电机转子等等，都是约束。既然约束能阻碍物体的运动，亦即能改变物体的运动状态，因此约束对物体的作用，实际上就是力，这种力称为约束反力，常简称为反力。

当物体处于平衡状态时，约束反力随物体受力情况而定。例如，在上述的例子中，吊车匀速吊起重物，钢索给重物的约束反力由重物的重量决定；重物的重量大，约束反力也大，重物的重量小，约束反力也小。因此，约束反力也称为被动力，其他已知力则称为主动力。在静力学问题中，约束反力和主动力组成平衡力系。

既然约束阻碍着物体的运动，而这种阻碍作用就是约束反力，

因此, 约束反力的方向必与该约束所能够阻碍的运动方向相反。应用这个准则, 可以确定约束反力的方向或作用线的位置。至于约束反力的大小总是未知的, 需要用平衡条件将它求出。

下面介绍几种在工程中常遇到的简单的约束类型和确定约束反力的方法。

1. 具有光滑接触表面的约束 图 1-7 所示的光滑支承面, 不能限制物体沿接触表面切线的位移, 只能阻碍物体沿法线向约束的内部运动, 因此, 光滑支承面的约束反力方向沿接触表面的公法线, 指向受力物体。这种约束反力称为法向反力, 用 N 表示。

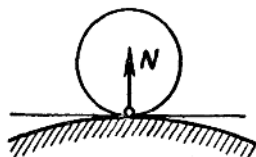


图 1-7

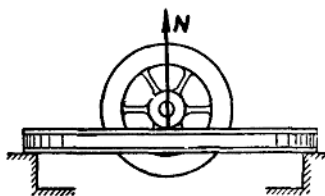
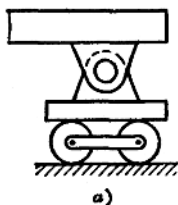
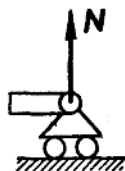


图 1-8

工程中常见的支持轮轴的导轨(图 1-8), 啮合齿轮的齿面(图 1-9), 以及桥梁的滚动支座(图 1-10, 其中 b 为表示的简图)等, 当表面非常光滑以致摩擦可以忽略不计时, 都属于这类约束, 约束反力沿接触表面的公法线。



a)



b)

图 1-9

图 1-10