

高等学校试用教材

理论力学

西安交通大学理论力学教研室编

人民教育出版社

高等学校试用教材

理论力学

西安交通大学
理论力学教研室编

人民教育出版社

本书适用于高等工业学校理论力学课程在 80—100 学时左右的机械、电机、动力类各专业。

为了使适用较多的专业,本书在内容上注意照顾各专业的较高要求,选用了较多的例题和习题并附有答案,各专业在使用中,可根据自己的实际情况酌情取舍。

本书采用国际单位制。

高等学校试用教材
理 论 力 学
西安交通大学
理论力学教研室编

*

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 18 字数 433,000

1979 年 3 月第 1 版 1979 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—50,000

书号 15012·0116 定价 1.45 元

编 者 的 话

本书按照1977年12月镇江力学教材会议审议并经78年9月西安审稿会修改的大纲编写,适用于高等工业学校理论力学课程在80—100学时左右的机械、电机、动力类各专业。

为了能适应较多专业的需要,本书内容注意照顾各专业的较高要求。对于学时较少的专业,建议在静力学中不选用滚动摩擦与空间力系的平衡;第二、三章中共点力系与力偶理论中的空间部分;以及运动学中点的加速度合成定理、刚体平面运动,亦可作适当削减;动力学中可不讲授质点系动量与动量矩定理,仍可单独讲授质心运动定理与刚体定轴转动微分方程;其它如势力场、轴承动反力、转子的静平衡与动平衡、阻尼对自由振动与受迫振动的影响等都可作适当删减。第十七章质点的相对运动、第十八章虚位移原理系作为专题部分供学时较多的有关专业选用。

为了帮助学生自学并适应不同专业的要求,本书结合工程技术基本知识选用了偏多的例题与习题,可供教师选用。其中有*号为较难题;有**号者可作为结合工程实际的大型作业题。书后附有全部答案。

按照我校的教学习惯,静力学的第二、三章中平面与空间统一讲授。为了适应不同学校的要求,本书将平面与空间分节叙述。

本书初稿于78年9月在西安审稿会议上由华中工学院吕佩珊、尹肃秋、浙江大学恽薇,黄志强同志负责主审;有清华大学、天津大学、南京航空学院,上海交通大学、华南工学院、河北工学院、山东工学院、上海铁道学院、东北林学院、武汉水利电力学院、淮南煤炭学院、大庆石油学院、西南石油学院等校代表以及特别邀请的

上海交通大学吴镇、西北工业大学吕茂烈同志等参加审稿,提出了许多宝贵的修改意见。由于编者水平的限制,书中势必还存在许多不足之处,望广大读者批评指出。

本书由毛祖德、徐健学同志负责主编工作;许庆余、陈守五、党锡淇、陈韵笙、张义忠同志参加了编写工作。最后由施明诚同志统一校订定稿。

西安交通大学理论力学教研室

一九七八年十一月

目 录

绪论	1
理论力学的研究对象与内容	1
学习理论力学课程的任务	2
力学的发展与理论力学的研究方法	2

静 力 学

第一章 静力学的基本概念和公理	5
§ 1-1 静力学研究对象 刚体与平衡	5
§ 1-2 力的概念	6
§ 1-3 静力学公理	8
§ 1-4 约束及约束反力	12
§ 1-5 受力图	23
习题	29
第二章 共点力系	34
§ 2-1 平面共点力系合成的几何法	34
§ 2-2 平面共点力系平衡的几何条件	38
§ 2-3 力沿平面直角坐标轴的分解和投影	42
§ 2-4 平面共点力系合成与平衡的分析法	43
§ 2-5 空间共点力系的合成与平衡条件	50
§ 2-6 简单平面桁架与悬索的简易求法	58
习题	63
第三章 力偶理论	72
§ 3-1 力偶与力偶矩	72
§ 3-2 平面力偶的等效 平面力偶系的合成与平衡条件	75
§ 3-3 力偶矩的矢量表示法	79
§ 3-4 空间力偶系的合成与平衡条件	83
习题	87
第四章 平面力系	92
§ 4-1 力对点之矩	92

§ 4-2	平面力系向已知点简化	96
§ 4-3	平面力系的合成	101
§ 4-4	平面力系的平衡条件	105
§ 4-5	平面平行力系的平衡条件	112
§ 4-6	刚体系统的平衡 静不定问题的概念	117
习题		125
第五章 摩擦		142
§ 5-1	滑动摩擦定律	142
§ 5-2	考虑具有滑动摩擦时的平衡问题	145
§ 5-3	滚动摩擦阻	156
习题		159
第六章 空间力系平衡和重心		168
§ 6-1	力对轴之矩与力对点之矩	168
§ 6-2	空间力系的简化	176
§ 6-3	空间力系的平衡方程	179
§ 6-4	平行力系中心与重心的坐标公式	191
§ 6-5	确定物体重心的简易方法	197
习题		203

运 动 学

第七章 点的运动学		213
§ 7-1	运动学导言	213
§ 7-2	点的直线运动	214
§ 7-3	点的曲线运动 运动方程	223
§ 7-4	用直角坐标法表示点的速度和加速度	225
§ 7-5	用自然法表示点的加速度、切向加速度和法向加速度	232
习题		240
第八章 刚体的基本运动		246
§ 8-1	刚体的平动	246
§ 8-2	刚体绕定轴转动	248
习题		263
第九章 点的合成运动		271
§ 9-1	点的绝对运动、相对运动与牵连运动	271

§ 9-2 速度合成定理	273
§ 9-3 加速度合成定理	281
习题	290
第十章 刚体的平面运动	299
§ 10-1 平面运动的概念	299
§ 10-2 平面运动分解为平动和转动	300
§ 10-3 平面运动刚体上各点的速度	303
§ 10-4 瞬时速度中心	310
习题	316

动 力 学

第十一章 动力学基本方程	325
§ 11-1 动力学的任务	325
§ 11-2 动力学基本定律	326
§ 11-3 牛顿定律的适用范围和惯性坐标系	329
§ 11-4 质点运动微分方程	330
习题	340
第十二章 动量定理	347
§ 12-1 质点动量定理	347
§ 12-2 质点系动量定理	355
§ 12-3 质点系质心运动定理	362
习题	368
第十三章 动量矩定理	375
§ 13-1 质点动量矩定理	375
§ 13-2 质点系动量矩定理	379
§ 13-3 刚体定轴转动微分方程	384
§ 13-4 转动惯量	389
习题	397
第十四章 动能定理	408
§ 14-1 力的功	408
§ 14-2 质点动能定理	415
§ 14-3 质点系动能定理	417
§ 14-4 功率	426

§ 14-5 势力场 机械能守恒定律	432
习题	439
第十五章 动静法	449
§ 15-1 动静法	449
§ 15-2 刚体作基本运动时惯性力系的简化	455
§ 15-3 用动静法求轴承反力	461
§ 15-4 转子的静平衡与动平衡	464
习题	467
第十六章 机械振动的基础	476
§ 16-1 质点的自由振动	476
§ 16-2 转盘的扭转振动	486
§ 16-3 阻尼对单自由度系统自由振动的影响	487
§ 16-4 单自由度系统的受迫振动 共振现象	492
§ 16-5 阻尼对单自由度系统受迫振动的影响	502
§ 16-6 消除和抑制振动的基本途径	505
习题	507
专 题	
第十七章 质点相对运动	513
§ 17-1 相对运动微分方程	513
§ 17-2 考虑地球自转时物体的相对静止与运动	518
习题	522
第十八章 虚位移原理	523
§ 18-1 约束的分类	523
§ 18-2 虚位移	527
§ 18-3 理想约束	529
§ 18-4 虚位移原理	530
§ 18-5 动力学普遍方程	536
习题	539
附录 I 示范实验——电测测振法简介	542
附录 II 国际单位制(SI)表	547
习题解答	550

绪 论

理论力学的研究对象与内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。 物体在空间的相对位置随时间而发生的改变，称为机械运动。它是人们在日常生活中的最常见的，亦是最简单、最初级的一种基本的物质运动形式，例如天体的运行、气体与液体的流动、各种机器的运转等等。相对的、暂时的平衡状态是物体机械运动的一种特殊情况，亦是理论力学的研究对象。

除机械运动外，物质运动形式还有热、光、电、磁等物理现象和化学变化与生命过程，以及人们的思维活动等等。恩格斯在《自然辩证法》中说：“运动，就最一般的意义来说，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。”各门科学就是以各种不同的物质运动形式作为自己的研究对象的。

机械运动的规律一般比较简单，更高级的运动形式常伴随着机械运动。理论力学所研究的物体机械运动的一般规律和研究方法曾渗透到其它自然科学的领域中去。随着近代科学技术的发展，在研究物质更为高级与更为复杂的运动形式时，形成了如地质力学、物理力学、化学流体力学与生物力学等边缘科学。

理论力学的内容包括静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究作用在物体上的力的平衡规律；运动学只从几何观点研究物体运动而不考虑引起物体运动变化的原因；动力学研究物体运动变化和作用力之间的关系。

理论力学研究的内容属于以伽利略和牛顿所归纳的基本定律

为经典的力学范围。20 世纪初在电动力学、相对论和量子力学等物理学的重大发现中表明经典力学的应用范围是有限制的,它的定律不适用于微观粒子的运动,也不适用于速度接近于真空中光速的物体的运动。但是,经典力学本身是随着生产与科学实践的发展而不断发展起来的,在研究宏观物体且速度远小于真空中光速的运动时,特别是一般工程技术科学中,它具有足够的精确度,所以经典力学仍然具有巨大的实用意义。

学习理论力学课程的任务

理论力学是现代工程技术科学的理论基础之一。它的定律、定理与结论被广泛地运用于各种技术科学之中。不论是建筑及结构,各种机械与电气设备,控制与自动化,航空与航天技术,航海、潜水以及地震科学等等,理论力学都是它们的理论基础之一。为了实现我国人民在社会主义新的发展时期的总任务,一般工程技术人员都必须具备一定的理论力学知识。

理论力学在高等工业院校各专业的教学计划中是一门技术基础课,学习本课程的目的为了掌握物体机械运动的基本规律及其研究方法,打好必要的力学的理论基础,并初步学会运用这些规律去分析解决工程技术中有关力学的问题,为学习后续的力学与其它机械设计等课程作好准备。同时,就研究对象与研究方法而言,理论力学又具有一般自然科学所共有的基础科学的特点,将有助于学生培养辩证唯物主义的世界观和科学的分析问题的方法。

力学的发展与理论力学的研究方法

力学的发展过程与其它科学一样是紧密地依附于社会生产力的发展的。从最古老的文字记载可知,公元前 468~382 年我国古代学者墨翟在《墨经》中就叙述了力的定义与杠杆平衡的原理。在西方,公元前 385~322 年古希腊学者亚里士多德的著作中也曾作过有关力学的研究。公元前 287~212 年古希腊自然科学家阿基

米德概括了劳动人民在实践中积累的有关静力学知识，奠定了静力学的基础。

十五世纪后半期，西方资本主义兴起，欧洲进入文艺复兴时期，手工业、航海、建筑及军事技术提出了一系列要求，推动了科学的迅速发展。恩格斯在《自然辩证法》中说：“这是一次人类从来没有经历过的最伟大的、进步的变革，是一个需要巨人而且产生了巨人——在思维能力、热情和性格方面，在多才多艺和学识渊博方面的巨人的时代。”波兰学者哥白尼在1473—1543年总结了天文观测的实践经验，创造性地提出了“太阳中心说”，接着德国学者刻卜勒(1571~1630年)发现了行星运动的三定律。在这个基础上，意大利学者伽利略(1564—1642年)开始建立动力学的基本定律，又经过荷兰学者惠更斯(1629—1695年)等人的努力，1687年英国学者牛顿(1643—1727年)在《自然哲学的数学原理》一书中完备地建立了经典力学的基本定律，对动力学作了系统的叙述。

十八世纪以来，西方工业革命，大工业逐步建立，天文、水利与建筑、航海与航空、机器与仪器制造等一系列新兴的工业部门的建立，提出了大量的力学问题，形成了许多力学分支学科。经典力学与数学分析相结合，使经典力学具备了较为完整与严密的理论体系。十九世纪能量守恒与转化定律的发现，使机械运动与其它物质运动形式之间架起了桥梁。

力学科学的发展过程明显地告诉我们：实践同样是力学科学发展的源泉。在力学的萌芽时期，力学是以对自然现象的直接观察以及生产实践所取得的经验为主要依据的。在它的发展时期，由于生产实践迅速发展的推动，科学实验曾经作为总结实践经验、发现力学规律的重要手段。现在，经典力学虽已形成比较完整与严密的理论体系，但是力学的发展仍然离不开生产实践与科学实验的推动与检验。

经典力学在其发展过程中经历了不断的观察、实验和抽象、推理的过程。科学家们将大量由实践得来的感性认识和特殊规律，去粗存精、去伪存真、由此及彼、由表及里的加工制作，得出更为一般的规律与结论。在理论力学中舍去物体的各种表面现象和许多次要因素，建立了一系列理想的力学模型，又经过推理判断建立了一系列的普遍规律和结论。伟大的导师列宁在《黑格尔“逻辑学”一书摘要》中指出：“物质的抽象，自然规律的抽象，价值的抽象及其它等等，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。”力学中的抽象化方法正是为了更深刻、更正确地说明物体机械运动的最一般规律。

理论力学中采用了严密的数学演绎的方法，它既是推理的手段，又是正确反映力学量之间数量关系的计算工具。随着大型、高速电子计算技术的蓬勃发展，为分析解决技术科学中一系列力学问题及探索新的边缘的力学学科开辟了广阔的前景。

毛泽东同志在《整顿党的作风》一文中指出：“……他们接受这种知识是完全必要的，但是必须知道，就一定的情况说来，这种知识对于他们还是片面性的，这种知识是人家证明了，而在他们则还没有证明的。最重要的，是善于将这些知识应用到生活和实际中去。”我们一定要遵循毛主席的教导，结合自己的实践经验，努力掌握前人所积累的科学知识，培养与提高分析问题与解决问题的能力，为实现我国新时期的总任务而努力奋斗。

静力学

第一章 静力学的基本概念和公理

本章介绍作为静力学基础的几个公理，并阐述在研究静力学时首先要遇到的几个基本概念。最后，介绍约束的基本类型和物体的受力分析。

§ 1-1 静力学研究对象 刚体与平衡

在《绪论》中已经指出，静力学研究物体机械运动的特殊情况，即物体的平衡规律。也就是说，它研究作用在物体上的力使物体处于平衡时，必须满足的充分和必要的条件。在静力学里，若物体相对于地球(作为参考体)处于静止或作匀速直线运动时，就理解为该物体处于平衡。^[1]

静力学主要研究刚体受力平衡的问题，因而有时也称为刚体静力学。任何物体在受到力的作用以后，都将发生不同程度的变形。由于在很多情况下物体的变形对于研究该物体的平衡问题来说，影响甚微，所以我们在研究这类物体的平衡问题时，变形就可忽略不计，而近似地认为物体是不变形的。我们把无论受到怎么样的力的作用，形状都不会改变的物体，称为刚体。换句话说，刚体是指在任何情况下，物体内部任意两点间距离都不会改变的物体。显然，刚体是一个抽象化的理想模型，事实上刚体是不存在的。但

[1] 关于平衡更完备的定义，将留待在动力学中讨论。

是,这种科学的抽象将能更深刻地揭示物体受力平衡的客观规律,以后我们还将看到有关变形体平衡问题的研究亦将以刚体静力学作为基础。

在刚体静力学里将要研究以下两个基本问题。

(1) 力系的简化。

作用在物体上的力往往是复杂的,通常把作用在物体上的一群力称为一个力系。若一个力系可以用另一个力系代换而不改变物体的原有状态,则称这两个力系等效。若一个力与一个力系等效,就称这个力是该力系的合力。力系的简化就是将作用在物体上的力系代换为另一与它等效且较为简单的力系。

(2) 力系的平衡条件。

如果作用于刚体上的某一力系,使刚体处于平衡状态,则这力系称为平衡力系。力系的平衡条件就是指刚体在各种不同类型的力系作用下处于平衡时,力系所应满足的条件。

在工程实际中,平衡规律有极其广泛的应用。各种机器和结构在设计时往往首先要根据平衡规律进行静力学的分析。

§ 1-2 力的概念

人们经过长期的生产实践与理论概括,逐步地形成与建立了力的科学概念:力是物体之间相互的机械作用,这种作用使这些物体的运动状态发生改变(包括形状改变)。

在自然界里存在由各种不同的物理原因所产生的力,如万有引力、带电体间的引力与斥力、气体与液体的压力等等。但是在理论力学里不研究力的物理来源,只研究它作用于物体所产生的效应,即力的效应。力使物体运动状态发生改变的效应称为力的外效应,使物体发生形状改变的效应称为力的内效应。在静力学里,

把物体抽象为刚体,这就意味着不研究力的内效应,只研究力的外效应。

人们长期的观察、试验与理论概括揭示了力的特征,力的效应完全决定于下述三个要素:

(1) 力的作用点; (2) 力的方向; (3) 力的大小。

力的效应,同时决定于上述三个要素,只要其中任何一个发生改变,都将改变力对物体的作用效应。

力的作用点是力作用位置的抽象。如果力的作用范围在一定的条件下可简化为一个点,这种力就称为集中力。例如图 1-2 中,钢丝绳拉力 T 常以集中力表示。而蒸汽压力、水压力连续分布地作用在容器上,则称为分布力。这种分布的力系,经过简化亦常以一个或几个与之等效的集中力来代替。

力的大小表示机械作用的强弱。本书采用的国际单位制(SI制)中,力的单位是牛顿,简称牛,以符号 N 表示。1 牛顿的力使 1 公斤(千克)质量的物体产生 $1 \text{ 米/秒}^2 (\text{m/s}^2)$ 的加速度。1 千牛顿简称千牛,以符号 kN 表示。工程技术科学中过去采用工程单位制,力的单位是公斤力,换算见附录 II。

如上所述,力是一个具有大小和方向的物理量,下节还将指出力的加法是服从矢量相加的法则的,因此力是矢量。可用一带有箭头的有向线段来表示,如图 1-1 所示。一般以矢量的起点(或终点)表示力的作用点,矢量的方向表示力的方向,矢量的长短按选定的比例尺表示力的大小。过作用点沿力的方向的直线称为力的作用线。与作用点有关的矢量称为定位矢量; 只与作用线有关而与具体作用点无关的矢量称为滑动

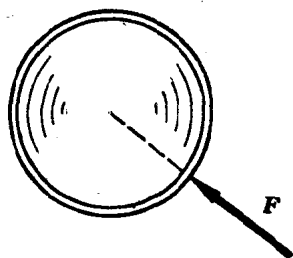


图 1-1

矢量；可以放在空间任意一点而与作用线无关的矢量称为自由矢量。

在本书中，矢量都用黑体斜楷字母代表，并以同文的白体斜楷字母代表这个矢量的大小（又称为模）。例如设用 F 代表某个力，则这个力的模以 F 表示。^[1]

代表矢量的有向线段，称为矢。与某个已知的矢量同方向，而模等于 1 的矢，称为该矢量的单位矢。例如设以 F^0 表示矢量 F 的单位矢，则矢量 F 可以写成

$$F = FF^0 \quad (1-1)$$

因此，任何矢量都可以用它的模和单位矢的乘积来表示。

§ 1-3 静力学公理

人们在长期的生产实践中，对机械运动的认识不断深化，对力学的认识也经历了不断的抽象与反复的实践，概括和归纳出最简单的、显而易见的、更深刻反映本质的一般规律，称为公理。公理被人们所公认，其正确性为无数实践所证实，是有关定理与推论的出发点。静力学公理是推证全部静力学理论的出发点，是静力学的基础。

公理一——二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的必要和充分条件是：这两个力大小相等，方向相反，并沿同一条作用线。

这是最简单的力系的平衡条件，是推证力系平衡条件的基础。大量实践经验使我们认识到这一公理。图 1-2 所示起吊电机，电机在重力 G 和钢丝绳拉力 T 作用下处于平衡，必满足等值、反向、共线即二力平衡公理所指出的平衡条件。

[1] 有时也用带短划的两个并列的白体字母如 $\overline{AB}$ 代表矢量，则它的模以不带短划的 AB 表示。