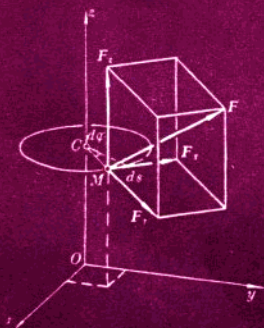
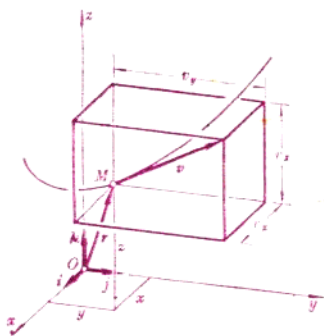
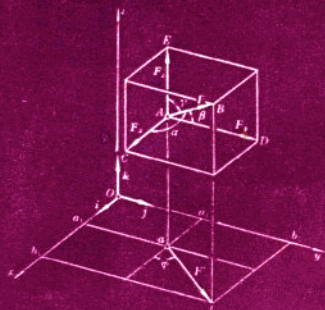


高等学校教材

理论力学

浙江大学理论力学教研组 编

高等教育出版社



高等学校教材

理论力学

(第二版)

浙江大学理论力学教研组 编

高等教育出版社

高等学校教材

理论力学

(第二版)

浙江大学理论力学教研组 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 1/2 字数 266,000

1961年6月第1版 1983年5月第2版 1983年10月第1次印刷

印数 00001—21,500

书号 15010·0481 定价 1.30 元

前 言

本书初版于一九六一年出版。

为了适应教学的需要,我们在总结多年来教学实践的基础上,根据高等学校工科力学教材编审委员会理论力学编审小组一九八〇年审订的《工程力学教学大纲》(草案)中理论力学部分(60学时)的要求,并参照理论力学编审小组一九八二年召开的扩大工作会议的精神,对本书进行了修订,作为第二版出版。

本书适用于高等学校工科冶金、地质、化工、轻纺、加工、材料、石油等类专业的少学时理论力学课程。

本书的内容,除个别部分以外,都是基本内容,是教学大纲所要求的。考虑到学生在学习本课程时已经学过矢量导数,所以书中叙述了矢量形式的动量矩定理,相应地将“力对点的矩矢”列为基本内容。

为了适应某些院校和专业的需要,本书在基本内容以外增加了一些加深加宽的内容,以供选用。这些内容包括:空间力偶的等效·力偶矩矢、空间力偶系的合成和平衡条件、空间一般力系向一点的简化、牵连运动为平动时的加速度合成定理、平面图形内各点的加速度、刚体作平面运动时惯性力系的简化等。加深加宽内容的章节号和习题号前都注有“*”号,少数未单独成章节的加深加宽内容则用小号字排印。当然,加深加宽内容的讲授务须在确保基本内容的基础上进行。

对有些已经在普通物理中讲授的内容,本书中只作简要叙述,作为必要的衔接,而侧重于从理论力学课程的性质、任务和要求出发,应用这些内容的理论和方法去分析工程实际中的力学问题,达

到巩固、深化和提高的目的。

本书修订时增加了习题部分。鉴于解题是理论力学课程的重要教学环节,本书所列习题数量较多,可供教学时选用。

参加本书修订工作的为浙江大学理论力学教研组费学博、蔡承文和黄纯明。

本书承哈尔滨工业大学王铎、谈开孚、洪敏谦同志和天津大学李骊同志主审,华东化工学院陈维新、陆钟瑞同志复审。参加审稿会的还有西安交通大学、华中工学院和重庆大学的同志。审稿的同志对本书提出了许多宝贵的意见,特向他们表示衷心的感谢。浙江大学理论力学教研组的同志十分关心本书的修订工作,汪家诩同志热心地作了指点,恽馥同志给予了有力的支持,谨向他们致以谢意。

限于我们的水平,书中一定会有不少缺点,诚恳希望广大读者批评指正。

编 者

一九八三年四月

目 录

绪言	1
第一篇 静力学	1
第一章 静力学的基本概念和公理	1
§ 1-1 静力学基本概念	1
§ 1-2 静力学公理	6
§ 1-3 约束和约束反作用力	10
§ 1-4 分离体和受力图	16
习题	19
第二章 汇交力系	22
§ 2-1 汇交力系合成的几何法	22
§ 2-2 汇交力系平衡的几何条件	24
§ 2-3 汇交力系合成的解析法	30
§ 2-4 汇交力系平衡的解析条件	34
习题	38
第三章 力偶理论	44
§ 3-1 力偶·力偶矩	44
§ 3-2 平面内力偶的等效	45
§ 3-3 平面力偶系的合成和平衡条件	48
*§ 3-4 空间力偶的等效·力偶矩矢	51
*§ 3-5 空间力偶系的合成和平衡条件	53
习题	57
第四章 平面一般力系	59
§ 4-1 力对点的矩	59
§ 4-2 力线的平移	60

§ 4-3	平面一般力系向一点的简化	61
§ 4-4	平面一般力系的合成结果·合力之矩定理	64
§ 4-5	平面一般力系的平衡条件	67
§ 4-6	刚体系统的平衡	76
§ 4-7	考虑摩擦时的平衡问题	81
习题		89
第五章	空间一般力系	99
§ 5-1	力对轴的矩	99
§ 5-2	力对点的矩矢	100
*§ 5-3	空间一般力系向一点的简化	102
§ 5-4	空间一般力系的平衡条件	106
§ 5-5	平行力系中心·重心	111
习题		117
第二篇	运动学	123
第六章	点的运动	123
§ 6-1	运动学基本概念	123
§ 6-2	点的运动方程、速度和加速度的矢量表示	124
§ 6-3	点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影	126
§ 6-4	点的速度和加速度在自然轴系上的投影	129
§ 6-5	关于点的运动的例题	133
习题		140
第七章	刚体的基本运动	146
§ 7-1	刚体的平行移动	146
§ 7-2	刚体的定轴转动	148
§ 7-3	转动刚体上各点的速度和加速度	149
习题		156
第八章	点的合成运动	159
§ 8-1	合成运动的基本概念	159
§ 8-2	速度合成定理	161
*§ 8-3	牵连运动为平动时的加速度合成定理	166
习题		169

第九章 刚体的平面运动	175
§ 9-1 平面运动的基本概念.....	175
§ 9-2 平面运动分解为平动和转动.....	177
§ 9-3 平面图形内各点的速度.....	178
§ 9-4 平面图形的瞬时速度中心.....	181
*§ 9-5 平面图形内各点的加速度.....	188
习题.....	192
第三篇 动力学	199
第十章 动力学基本定律	199
§ 10-1 质点和质点系.....	199
§ 10-2 动力学基本定律.....	200
§ 10-3 质点运动的微分方程.....	203
§ 10-4 质点动力学的两类基本问题.....	205
§ 10-5 质点系运动的微分方程.....	215
习题.....	216
第十一章 动量定理	223
§ 11-1 动量和冲量.....	223
§ 11-2 质点的动量定理.....	225
§ 11-3 质点系的动量定理.....	226
§ 11-4 质心运动定理.....	231
习题.....	236
第十二章 动量矩定理	240
§ 12-1 动量矩.....	240
§ 12-2 质点的动量矩定理.....	241
§ 12-3 质点系的动量矩定理.....	244
§ 12-4 定轴转动刚体对转轴的动量矩·转动惯量.....	246
§ 12-5 刚体定轴转动的微分方程.....	251
习题.....	257
第十三章 动能定理	264
§ 13-1 功和功率.....	264

§ 13-2 一些常见情况下功的计算·····	267
§ 13-3 动能·····	272
§ 13-4 质点的动能定理·····	274
§ 13-5 质点系的动能定理·····	276
§ 13-6 关于动力学普遍定理的一些说明·····	282
习题·····	286
第十四章 动静法 ·····	294
§ 14-1 惯性力的概念·····	294
§ 14-2 质点的动静法·····	296
§ 14-3 质点系的动静法·····	299
§ 14-4 刚体惯性力系的简化·····	300
§ 14-5 刚体定轴转动时轴承的动反力·····	310
习题·····	314
附录一 习题答案 ·····	323
附录二 索引 ·····	337

绪 言

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门科学。

所谓机械运动,就是物体在空间的位置随时间而发生的改变。机械运动是人们在日常生活和生产实践中最常见、最普遍的一种运动。平衡则是机械运动的一种特殊形式。宇宙间一切物质都在不停地运动。在客观世界中,存在着各种各样的物质运动。除机械运动外,物质还有表现为发热、发光、发生电磁现象,化学过程,以至于人的思维活动等各种不同形式的运动。在多种多样的运动形式中,机械运动是最简单的一种。而任何比较复杂的物质运动形式总是与机械运动存在着或多或少的联系。

物体的机械运动都服从某些一般规律。这些一般规律就是理论力学的研究对象。

理论力学属于以牛顿定律为基础的经典力学的范畴。近代物理学的发展说明了经典力学的局限性:经典力学仅适用于低速、宏观物体的运动。当物体的速度接近于光速时,其运动应当用相对论力学来研究;当物体的大小接近于微观粒子时,其运动应当用量子力学来研究。而对于速度远低于光速的宏观物体,由经典力学推得的结果具有足够的精确度。工程技术中所处理的对象一般都是宏观物体,而且其速度也远低于光速,所以其力学问题仍以经典力学的定律为依据。因而经典力学至今仍有很大的实用意义,并且还在不断发展着。

力学的发展历史表明,与任何一门科学一样,理论力学的研究方法也遵循认识过程的客观规律。概括地说,理论力学的研究方法是从观察、实践和科学实验出发,经过分析、综合和归纳,总结出

力学的最基本的概念和规律;在对事物观察和实验的基础上,经过抽象化建立起力学模型;并在建立力学模型的基础上,从基本规律出发,利用数学工具推理演绎,得出正确的具有物理意义和实用意义的结论和定理,从而将通过实践得来的大量感性认识上升为理性认识,构成力学理论。然后再回到实践中去验证理论的正确性,并在更高的水平上指导实践,同时从这个过程中获得新的材料,这些材料的积累又为力学理论的完善和发展准备了基础。

理论力学是现代工程技术的基础理论,它的定律和结论被广泛应用于各种工程技术中。各种机械、设备和结构的设计,机器的自动调节,机器和结构振动的研究,航天技术,等等,都要以理论力学的理论为基础。为了正确理解工程技术中出现的各种力学现象,并在必要时加以利用,或者予以防止和消除,也需要理论力学的知识。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。通过本课程的学习,我们要掌握物体机械运动的基本规律,初步学会运用这些基本规律去分析生产实际中的力学问题,并为学习材料力学、机械原理、机械零件等有关的后继课程准备条件。学习理论力学,也有助于学习其它的基础理论,掌握新的科学技术;有助于建立辩证唯物主义的世界观,培养正确的分析问题和解决问题的能力,为以后参加实际生产和从事科学研究打下基础。

本书将分为以下三篇进行叙述:

静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律;同时也研究力的一般性质以及力系的简化方法等;

运动学——研究物体机械运动的几何性质,而不涉及引起物体运动的物理原因;

动力学——研究物体的机械运动与所受的力之间的关系。

第一篇 静力学

第一章 静力学的基本概念和公理

本章将讨论静力学的基本概念、静力学公理和物体的受力分析。静力学公理是静力学理论的基础。物体的受力分析是力学中的重要基本技能。

§ 1-1 静力学基本概念

静力学(Statics)研究物体在力系作用下处于平衡的规律。

1. 平衡的概念

所谓平衡(Equilibrium)，是指物体相对于惯性参考系(参看§ 10-2)处于静止或作匀速直线运动的状态。显然，平衡是机械运动的特殊形式。在工程实际中，一般可取固连于地球的参考系作为惯性参考系。这样，平衡是指物体相对于地球静止或作匀速直线运动。运用静力学理论来研究物体相对于地球的平衡问题，其分析计算的结果具有足够的精确度。

2. 刚体的概念

实践表明，任何物体受力时多少总要产生一些变形。但是，工程实际中的机械零件和结构构件在正常工作情况下的变形，一般是很微小的，甚至只有用专门的仪器才能测量出来。例如一般机械中的轴，其允许的最大挠度都在轴承间距的万分之五以下，最大扭转角每米轴长不超过 $0.5\sim 1^\circ$ 。在许多情况下，这样微小的变形

对物体的机械运动影响甚微,可以略去不计,从而使问题的研究得以简化。这样,通过对实际物体进行抽象简化,在理论力学中提出了物体的一种理想模型——刚体 (Rigid body)。刚体是在任何情况下保持其大小和形状不变的物体。静力学中所研究的物体只限于刚体,所以又称刚体静力学,它是研究变形体力学的基础。

3. 力的概念

力(Force)的概念是从劳动中产生的。人们在长期的生活和生产中,当推、拉、提、掷物体时,从肌肉的紧张收缩中,感觉到人对物体施加了作用,影响了物体的运动。进一步的观察发现,物体与物体之间也有这样的相互作用。这种作用就是力。通过长期的生产实践和科学实验,人们建立起力的概念:力是物体间的相互机械作用,这种作用使物体的运动状态发生变化(包括变形)。例如,人用力拉车可使车的速度增大;地球对月球的引力使月球不断改变运动方向而环绕地球运转;锻锤作用于锻件的冲击力使锻件变形,等等。早在两千多年前,墨翟(公元前 468~376 年)在他的著作《墨经》中就提出了:“力,形之所以奋也。”这是世界上关于力的概念的最早记载。

力对物体的效应表现在物体运动状态的改变和变形。我们把力使物体整体的运动状态发生变化的效应称为外效应,而把力使物体变形的效应称为内效应。若将物体看作是刚体,就意味着不考虑力的内效应。

力对物体的效应取决于以下三个要素:(1) 力的作用点;(2) 力的方向;(3) 力的大小。在国际单位制中,力的大小的单位为牛顿(N)。本书采用国际单位制。目前工程实际中采用的工程单位制,其力的单位为公斤力(kgf)。两者的换算关系为

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}.$$

力的三要素(Three elements of a force)可用有向线段来表

示。通过力的作用点 A 、沿着力的方向引出的直线，称为力的作用线，它表示力的方位。在作用线上截取有向线段 AB ，线段的始端表示力的作用点。在线段末端所画的箭头应符合力的指向。线段的长度按一定比例代表力的大小，如图 1-1 所示。力是有大小和方向的量，而且力的相加服从矢量加法规则(参看 § 1-2)，因此力是矢量。本书中用黑体字母(如 $\mathbf{F}$)来标记矢量。矢量的大小称为它的模，矢量的模用对应的普通字母(如 F)来表示。

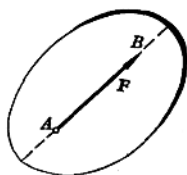


图 1-1

作用在物体上的一群力，称为力系(System of forces)。

在一定条件下，刚体受到力系作用时可以保持运动状态不变，即处于平衡状态。作用于刚体上使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系；平衡力系应满足的条件称为平衡条件。静力学中研究刚体的平衡规律，就是研究作用于刚体的力系的平衡条件。

为了弄清已知力系对刚体的效应，静力学中还研究力系的简化。所谓简化就是将作用于刚体的力系代换为与它等效的比较简单的力系。通过力系的简化，就可进一步探求力系的平衡条件。

综上所述，静力学研究的基本问题为：(1) 力系的简化 (Reduction of force system)；(2) 力系的平衡 (Equilibrium of force system)。在这一篇中，将按照力系中各力作用线在空间的分布情况，由特殊到一般，逐步深入地讨论这两个基本问题。

静力学在工程实际中有广泛的应用。许多机械零件和结构构件如机床主轴和梁、屋架等，它们在工作时都处于或近似处于平衡状态。设计这些零件、构件时，需要运用静力学的知识进行受力分析，并根据平衡条件来确定其所受的某些未知力。力系简化的理论不仅是推导平衡条件的依据，而且在动力学和其它力学学科

中也有应用。

§ 1-2 静力学公理

人们通过长期的观察和实验,根据大量的客观事实,对力的基本性质进行了概括和总结,得出了静力学公理。这些公理是静力学的基本规律,它们构成了静力学理论的基础。静力学公理的正确性为大量的实践所证实。

公理一(二力平衡公理)

作用于刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要与充分条件是:此两力大小相等、指向相反且沿同一作用线。

公理一阐明了作用于刚体上的最简单力系的平衡条件。它是推证平衡条件的基础。必须注意,这里说的是刚体的平衡;对于变形体来说,以上所述只是必要条件而不是充分条件。例如,软绳的两端受到等值、反向、共线的两力拉伸时处于平衡;但如改为受压,则即使两力仍等值、反向、共线,软绳也将蜷曲而不能平衡。

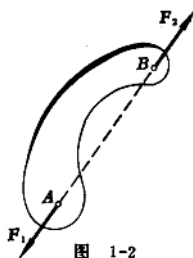


图 1-2

只受两个力作用并处于平衡的物体称为二力体(二力杆)。根据公理一,我们能够立刻确定这两个力的方位:必定沿着两力作用点的连线,如图 1-2 所示。

公理二(加减平衡力系公理)

在作用于刚体的已知力系中加上或减去任一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的效应。

作用于刚体上的力系如果可以用另一适当的力系来代替,而对刚体产生相同的效应,则该两力系互称等效力系(Equivalent force system)。公理二指出,作用于刚体的已知力系,与加上(或

减去)任一平衡力系后的力系等效。必须注意,此公理也只适用于刚体而不适用于变形体。对于实际物体,在它所受的已知力系中加減任一平衡力系后,力系对物体的外效应不变,但内效应一般将有所不同。

由公理一和公理二可以导出如下重要推论:

推论(力的可传性)(Transmissibility of force)

作用于刚体上的力可沿其作用线移至刚体的任一点,而不改变此力对刚体的效应。

证明: 设力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 1-3a 所示。在其作用线上任取一点 B ,在 B 点加上等值、反向、共线的一对力 F_1 、 F_2 ,并使 $F_1 = -F_2 = F$,如图 1-3b 所示。显然, (F_1, F_2) 是平衡力系。根据公理二,添加这一对力并不影响力 F 的效应,即力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 等效。但从另一角度看, (F, F_2) 也是一对平衡力,可将它们减去而不改变其效应,如图 1-3c 所示。即力系 (F, F_1, F_2) 又与力 F_1 等效。这样,力 F 与力 F_1 等效。图 1-3a 和 c 说明,力 F 可沿其作用线等效地移至任意点 B ,这就证明了力的可传性。

力的可传性指出,力对刚体的效应与力的作用点在作用线上

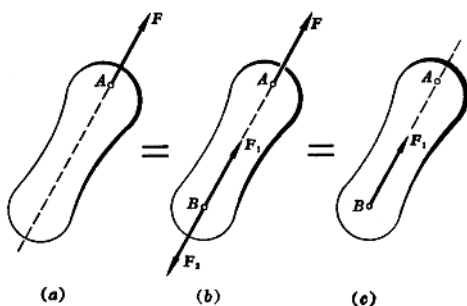


图 1-3

的位置无关。因此，对于刚体来说，力的三要素之一的作用点可代之以作用线。在这种情况下，力矢可沿其作用线任意滑动，成为滑动矢量(Sliding vector)。

必须注意，推证力的可传性时引用了公理一、二，因此力的可传性只适用于刚体而不适用于变形体，或者说只适用于力对物体的外效应，而不适用于力对物体的内效应。例如：直杆 AB 的两端受到一对平衡力 F_1 、 F_2 作用而处于平衡，如图 1-4a 所示。现将这两个力沿其作用线分别滑动到杆的另一端，如图 1-4b 所示。显然，直杆仍处于平衡，即力 F_1 、 F_2 对杆的外效应不变。但是，经过力矢的滑动，力 F_1 、 F_2 对杆的内效应却变得性质截然不同：直杆由产生拉伸变形转为压缩变形。因此，在考虑物体变形时，力矢不得离开其作用点，成为固定矢量(Fixed vector)。

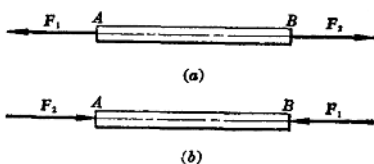


图 1-4

顺便指出，为了使表示物体受力情况的图画得清晰，如图 1-4b 那样，也可将力矢的末端取在力的作用点。

若已知力系与单个力等效，则此等效力称为该力系的合力(Resultant)。

公理三(力的平行四边形定律)

作用于物体上同一点的两个力可合成为一个力，此合力也作用于该点，合力的大小和方向由以原两力矢为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示。

图 1-5a 中，力 R 为力 F_1 、 F_2 的合力；力 F_1 、 F_2 为力 R 的分