

848376

高等学校教材

理论力学

王景涌 杨敬祥 史希陶 编

史希陶 主编

8821

1068

高等教育出版社

内 容 简 介

本书为适应教育改革的需要,考虑到目前大学生的实际水平,根据多年的教学实践,对体系进行了改革,使理论的阐述具有更严谨的科学性和系统性,提高了理论的讲授起点、较好地处理了与物理课程重复的内容。

本书系统地讲述了静力学、运动学及动力学的基本概念、基本理论,并通过例题示范,训练学生分析问题、解决问题的能力。各章附有习题和答案,重点章节附有小结。

本书采用国际单位制(SI)。

本书的内容符合高等学校工科力学教材编审委员会理论力学教材编审小组一九八〇年五月审订的《理论力学教学大纲》(90学时)的要求,可作为高等学校工科电机、动力、采矿、仪表等类专业的理论力学课程的教材,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

高等学校教材

理 论 力 学

王景涌 杨敬祥 史希陶 编

史希陶 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

787×1092 1/32 印张16.75 字数400 000

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数 0001—4,930

ISBN 7-04-000863-7/TB·49

定价 3.35元

序

在本书的编写和修改中，参照了一九八〇年五月在南京召开的教育部高等学校工科力学教材编委会审订的《理论力学教学大纲》(草案)(90学时)和一九八三年十一月在重庆召开的高等学校工科理论力学教材编审小组扩大工作会议通过的“理论力学教学大纲(90学时)的补充说明书”(草案)。本书适用于电机、动力、勘探、采矿、铸造及仪表制造等专业的中学时理论力学课程，也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

考虑到教育体制改革的不断发展，前期课程内容的加强，以及学生入学水平的逐年提高，本书在体系上作了较大改革，提高了理论讲述的起点，加强了基本概念、基础理论和基本方法。

一、静力学部分，在讲述了公理、两种基本力系（空间汇交力系和力偶系）之后，接着讲空间一般力系向一点简化的理论，然后推得各种力系的平衡条件。动力学部分，增设了“质点系动力学的基本概念”一章，在这一章中集中讲述质点系的质量几何性质（质量中心、转动惯量）、动力学特征量（动量、动量矩、动能）和作用于质点系上的力之分类及其作用量（冲量、功）。这样既加强了基本概念，为动力学普遍定理的讲述奠定了基础，又使教学体系紧凑，增加了理论的系统性。

二、提高了理论讲述的起点。在这方面大致可分为三种情况：
1. 将学生在前期课程中已学过的某些内容不再编入书中。例如二平行力的合成，质点的动量定理等。
2. 考虑到本课程的系统性和便于学生学习，将前期课程已学过的某些内容简要地编入本书。例如“点的运动学”中的矢径法和直角坐标法、刚体的基本运动、

动力学基本定律等。对这部分内容，在教学中根据实际情况可以总结性地讲授，也可以完全不讲，作为学生自学的材料。3. 适当采用从一般到特殊、从矢量到代数量的讲述次序。例如，由空间一般力系向一点简化的结果推得各种力系的平衡条件；先讲空间的力对点之矩和力偶矩用矢量表示，在特殊情况下得到平面问题中的力对点之矩和力偶矩用代数量表示；在悬索中，先讲载荷沿索长均匀分布的情况，得到悬索的形状、长度及任一截面上的张力均为双曲函数，然后将双曲函数展成幂级数，当垂度较小时取其近似值，便得载荷沿水平线均匀分布情况下的相应公式；先推得计算质点系动能的柯尼希定理，然后再得出不同形式运动刚体的动能计算公式，等等。这样不仅具有严密的理论系统，而且减少了篇幅，节省了讲授学时。

三、突出了矢量的应用。在讲述物理量和推导定理中尽量采用了矢量，并将矢量向一点简化的理论应用于始终（包括力系的简化、质点系的动量和动量矩的定义、惯性力系的简化），这样既显示了某些物理量的物理意义和矢量性，又有利于学生对这些内容的系统理解和记忆，还使学生学到了处理矢量问题的一种基本方法。

四、加强了基本概念、基础理论和基本方法。例如，对一些重要的概念（如受力分析、基本物理量的计算等）提高了要求；对刚化原理在研究刚体系统的平衡问题中的作用作了专门说明；对组合物系平衡问题的求解、点的复合运动的分析（动点、动系的选取）以及动力学普遍定理的综合应用等重点内容作了小结。为了培养学生对基本概念的理解和提高分析问题、解决问题的能力，在例题的讲述中注意阐明分析问题的思路和解题的方法步骤，在各章的习题中编选了一定数量的基本概念题。

本书采用国际单位制（SI）。全书编选了427个习题，其中基本概念题和具有一定技巧的较难题各占15%左右。题末附有答

案。

本书由王景涌、杨敬祥、史希陶编写，由史希陶担任主编。本书是在山东工业大学中、少学时的理论力学讲义基础上经修改而成的。讲义由史希陶（静力学）、王景涌（运动学）、杨敬祥（动力学）执笔，由史希陶统稿；在实践的基础上，对教材的体系进行了改革、产生了二稿，由史希陶（绪论、第一章至第六章、第八章的小结、§9-4、第十章至第十二章、§14-4、第十五章）、王景涌（第七章至第九章、第十三章、第十四章）执笔，由史希陶统一修改定稿；本讲义二稿于1984年12月被教育部高等学校工科理论力学教材编审小组和高等教育出版社组织的教材评选小组选为中学时理论力学教材后，史希陶根据评选小组的意见对全书又进行了增删、修改，王景涌、杨敬祥选编了部分习题。另外，徐德山同志参加了讲义的编写和印制工作。山东工业大学理论力学教研室的全体同志在本书的编写、使用过程中，为提高其质量作了许多工作。山东海洋学院的丁履量、山东工业大学的孟广润、潘君瑞、周克行、高廷和同志阅读了初稿，提出了许多很好的意见，特向这些同志表示感谢。

本书由天津大学虞润禄、哈尔滨工业大学谈开孚同志主审。教材评选小组的同志在评阅初稿中，提出了许多宝贵意见，对此表示衷心感谢。

在本书的编写中，还得到许多兄弟院校的同志的关心和帮助，在此一并致谢。

限于编者水平、书中的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

一九八五年五月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

引言	5
----------	---

第一章 静力学公理·受力分析	7
----------------------	---

§ 1-1 力的概念	7
------------------	---

§ 1-2 静力学公理	9
-------------------	---

§ 1-3 约束与约束反力	14
---------------------	----

§ 1-4 受力分析——画受力图	21
------------------------	----

习题	29
----------	----

第二章 汇交力系·力偶系	36
--------------------	----

§ 2-1 汇交力系的简化	36
---------------------	----

§ 2-2 汇交力系的平衡条件	43
-----------------------	----

§ 2-3 力偶及其性质	48
--------------------	----

§ 2-4 力偶系的简化与平衡条件	52
-------------------------	----

习题	56
----------	----

第三章 空间力系向一点的简化·重心	65
-------------------------	----

§ 3-1 力矩	65
----------------	----

§ 3-2 力的平移定理	73
--------------------	----

§ 3-3 空间力系向一点的简化	75
------------------------	----

*§ 3-4 空间力系简化的最后结果	79
--------------------------	----

§ 3-5 重心	81
----------------	----

习题	91
----------	----

第四章 力系的平衡条件及其应用	98
§ 4-1 各种力系的平衡条件	98
§ 4-2 平面力系平衡方程的应用	101
§ 4-3 刚体系统的平衡·静定和静不定问题的概念	107
*§ 4-4 悬索	119
习题	124
第五章 摩擦	137
§ 5-1 滑动摩擦	138
§ 5-2 考虑摩擦时的平衡问题	145
§ 5-3 滚动摩擦阻	152
习题	154

第二篇 运 动 学

引言	160
第六章 点的运动学	162
§ 6-1 矢径法	162
§ 6-2 直角坐标法	165
§ 6-3 自然法	172
习题	180
第七章 刚体的基本运动	187
§ 7-1 刚体的平行移动	187
§ 7-2 刚体绕定轴转动	189
§ 7-3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	191
§ 7-4 角速度矢和角加速度矢· *以矢积表示点的速度和加速度	195
习题	200
第八章 点的复合运动	205
§ 8-1 复合运动的基本概念	205

§ 8-2 点的速度合成定理	208
§ 8-3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	213
*§ 8-4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	217
小结	224
习题	231
第九章 刚体的平面运动	241
§ 9-1 刚体的平面运动方程·运动的分解	241
§ 9-2 平面图形上各点的速度	245
*§ 9-3 平面图形上各点的加速度	255
*§ 9-4 刚体绕平行轴转动的合成	259
习题	265

第三篇 动 力 学

引言	277
第十章 质点运动微分方程	278
§ 10-1 动力学基本定律	278
§ 10-2 质点运动微分方程	281
§ 10-3 质点的相对运动微分方程	293
习题	299
第十一章 质点系动力学的基本概念	309
§ 11-1 作用于质点系上的力及其作用量	309
§ 11-2 质点系的质量几何性质	326
§ 11-3 动力学特征量	336
习题	350
第十二章 动力学普遍定理	360
§ 12-1 动量定理	361
§ 12-2 动量矩定理	373
§ 12-3 动能定理	392

§ 12-4 普遍定理的综合应用	399
习题	402
第十三章 动静法	426
§ 13-1 动静法	426
§ 13-2 刚体惯性力系的简化	431
§ 13-3 静平衡和动平衡的概念	440
习题	441
第十四章 虚位移原理	452
§ 14-1 约束·自由度·广义坐标	452
§ 14-2 虚位移·理想约束	456
§ 14-3 虚位移原理	460
*§ 14-4 动力学普遍方程	468
习题	470
第十五章 振动的基本理论	478
§ 15-1 单自由度系统的自由振动	479
§ 15-2 单自由度系统的衰减振动	494
§ 15-3 单自由度系统的强迫振动	501
§ 15-4 减振与隔振的概念	508
习题	508
附录 I 约束类型及约束反力	517
附录 II 简单形体的重心	519
附录 III 均质物体的转动惯量	521

绪 论

一、理论力学的研究内容

辩证唯物主义告诉我们,世界是由永恒运动着的物质组成的。运动是物质的存在形式和根本属性,它包括宇宙中发生的一切变化和过程,从简单的位置移动直到复杂的思维和社会活动。

研究各种不同的物质运动形式的运动规律,便形成了各种不同的学科。理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科。所谓机械运动,是指物体在空间的位置随时间的变化,这是最简单、也是最常见的一种运动形式。任何较复杂、较高级的物质运动形式都与机械运动存在着一定的联系。按照循序渐进的认识规律,本书分静力学、运动学和动力学三部分依次进行叙述。

静力学主要叙述力的基本性质、力系的简化(合成)与力系的平衡条件;运动学是从几何方面描述物体机械运动的规律,而不考虑影响物体运动的物理因素如力和质量等;动力学则是研究物体的运动与所受作用力间的关系。

理论力学属于经典力学(或牛顿力学)的范畴,它以牛顿定律为基础,仅适用于运动速度远比光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)为小、尺寸远比单个原子为大的宏观物体。对于速度接近光速的物体的运动规律,需用爱因斯坦的相对论力学进行分析;对于微观物体(如原子、电子或基本粒子)的运动规律,则需用量子力学描述。显然,经典力学的适用范围有其局限性。但是,在现代科学技术中,包括一般工程技术和其它尖端科学技术中的有关力学问题,均受牛顿定律的制约,故可用经典力学来解决,这不仅方便,而

且具有足够的精确性。因而经典力学至今仍被广泛的应用着，并且还在继续发展着。

二、理论力学的研究方法

理论力学的产生、发展，与其它科学一样，经历了实践、理论、再实践的往复循环过程。概括地说，就是人们从日常生活和生产实际中进行观察、实验，积累了关于机械运动的丰富资料。通过对这些资料的分析，经过“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里”的抽象过程，得出其中的基本规律，并进一步上升为理论；再以这些理论为指导进一步认识客观事物，同时在实践中经受检验，形成更完善的理论。如此循环往复，每一循环都较前进到了高一级的程度。

在学习理论力学时，要注意以下的三个环节：

1. 深刻理解基本概念，熟练掌握基本原理。

整个理论力学是建立在为数不多的几条公理和定律之上的。深刻理解、熟练掌握这些公理和定律是学好本课程的关键。由于这些公理和定律是来自实践的，其中有的是在生活和生产实践中与我们形影不离的，因而它们并不是抽象的和难以理解的。但是，另一方面也必须注意，我们已有的一些感性认识，有的是片面的，有的甚至可能是一种错觉，因而在学习过程中要勤于思考，不断提高自己的理论水平。

2. 应用力学原理把有关的力学问题书写成数学形式。

当我们解决力学问题时，一般需要选用适当的力学原理，将所研究的问题用数学方程表示出来，这对初学本课程者来说，是较为困难的。困难不在于数学，而在于较难确定应该选用哪一个力学原理。能否顺利地解决这一问题，与对基本原理的理解程度有关，反之，在解决这一问题的过程中又能加深对基本原理的理解。为此，在学习本课程中，必须解一定数量的习题，这也是为

将来解决实际力学问题时所作的一种基本训练。并且要注意：先看书、掌握基本理论，然后再动手做题；做题中遇到问题，再看书、加深对理论的理解；做完习题后，及时进行总结，找出失败的原因和成功的经验。

3. 将已知数据代入数学方程，得到所求的结果。

将已知数据代入数学方程，经过数学运算求得结果，这对一个大学生来说似乎不成问题。但是必须注意，熟练地、正确无误地进行数学运算也是工程技术人员必须掌握的一种基本训练。必要时，还应对所得结果进行讨论。

三、学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课，在工科院校各专业中占有重要的地位。学习本课程的目的可概括为以下三个方面：

1. 为学习后继课程奠定基础。

理论力学是以严密的数学方法为工具，定量地描述机械运动的一般规律。力学中的各学科和工程专业中的许多课程，例如材料力学、弹性力学、流体力学、断裂力学、振动理论、机械原理、机械零件以及许多专业课程，都要以理论力学为基础。另外，随着现代科学技术的发展，力学与其它学科相互渗透，形成了许多边缘学科，它们也都是以理论力学为基础的。可见，理论力学为许多后继课程的学习奠定了必不可少的基础。

2. 培养解决工程实际问题的能力。

理论力学的定律和结论被广泛应用于各种工程技术中。有些工程技术问题，例如各种机械、设备或结构的受力分析、各种机构的运动学分析等等，可直接应用理论力学的基本理论予以解决。至于某些较复杂的工程实际问题，则可以理论力学为基础，结合其它有关知识予以解决。另外，应用理论力学的知识可以正确认

识工程实际中所遇到的各种力学现象，通过定性或定量的分析以确定其存在的利弊，为制订更合理、更完善的方案指出方向。

3. 培养分析问题解决问题的能力。

如前所述，理论力学的研究方法遵循辩证唯物主义认识论的方法，故通过本课程的学习，有助于树立唯物主义的世界观和方法论，培养分析问题和解决问题的能力，从而为学习其它课程、解决实际问题以及从事科学研究打下良好的基础。

第一篇 静 力 学

引 言

理论力学的研究内容是物体的机械运动，这里所说的物体一般是真实物体的理想化模型——刚体。所谓刚体，是指在力的作用下形状和大小都保持不变的物体。实际上，任何物体在力的作用下总是要产生或大或小的变形。但是，当物体的变形很微小，并且对所研究的问题之实质不发生显著影响时，便可忽略其变形，把这物体看作刚体，从而使问题大为简化。

静力学研究以下两个基本问题：

1. 作用于刚体上的力系的简化。

所谓力系，是指作用于同一刚体上的一群力。对同一刚体作用效应相同的诸力系，称为等效力系。将较复杂的力系简化为与其等效的较简单的力系的过程，称为力系的简化或力系的合成。通过力系的简化，可以把对较复杂力系作用效果的研究转化为对较简单力系作用效果的研究，从而使问题得到简化。

2. 刚体在力系作用下的平衡条件及其应用。

平衡是机械运动的特殊状态，在这里是指物体相对地球^①处于静止或作匀速直线运动的状态。当作用于刚体上的力系满足某些特定条件时，刚体将处于平衡状态。这些特定条件称为平衡条件。满足平衡条件的力系称为平衡力系。根据平衡条件可以求解刚体的平衡问题。

^① 严格说，应相对于惯性参考系。但对工程技术中的多数问题，可以把固结于地球上的参考系近似作为惯性参考系。

静力学在工程技术中有着广泛的应用。例如，在进行机械设计时，常要对构件进行静力分析，应用平衡条件确定其受力，以便作为构件强度和刚度设计的依据。另外，力系的简化理论和受力分析的方法也是研究动力学及其他后继课程的重要基础。

第一章 静力学公理·受力分析

§ 1-1 力的概念

人们在日常生活和生产实践中，当提、拉、推、抛物体时由肌肉的紧张便形成了力的初步概念，随着人类社会的发展，人们对事物的认识不断深化，逐步建立了力的科学概念：力是物体间的相互机械作用。力能改变物体的运动状态和形状。使物体运动状态发生改变的效应称为力的运动效应（或外效应）；使物体的形状发生改变的效应称为力的变形效应（或内效应）。显然，对作用于刚体的力，只需研究其运动效应。

力对物体的作用效果与哪些因素有关呢？下面以开门为例子以说明：当我们用垂直于门平面的力 F 将门推开时（图 1-1），由经验知，力 F 的作用点 M 至转轴 AB 的距离 d 愈大所需要的力愈小；而当力 F 的方向与转轴 AB 在同一平面（即门平面）内时，则无论多大的力都不会将门推开。可见，门的运动效果与所加力的大小、方向及其作用点位置有关。我们把力的大小、方向和作用点称为力的三要素。

力的大小表示物体之间机械作用的强度，其度量单位在国际单位制（代号为 SI）中是牛顿（N）；在工程单位

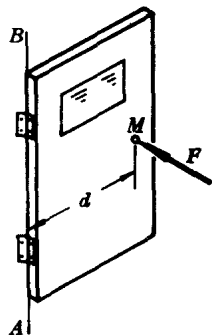


图 1-1

制中是公斤力 (kgf)。 $1\text{kgf} = 9.80\text{N}$ 。本书采用国际单位制。

力的方向表示物体机械作用的方向性, 它包括力的作用线在空间的方位和力沿作用线的指向。

力的作用点表示物体之间机械作用发生的位置, 据此, 可将力分为体积分布力、面积分布力、线分布力和集中力, 详见表 1-1。

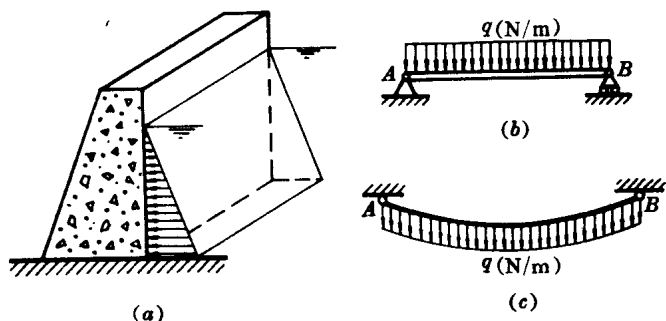


图 1-2

力的三要素表明力是矢量^①, 其几何表示法是用一有向线段来表示: 线段的长度按一定的比例表示力的大小, 线段的方位和箭头指向表示力的方向, 线段的始点 (或终点) 表示力的作用点 (图 1-3)。在印刷中通常以黑体字母 (如 $\boldsymbol{F}$ 、 $\boldsymbol{Q}$ 等) 表示力矢量, 以其对应的普通字母 (如 F 、 Q 等) 表示力的大小。

^① 矢量是既有数量又具有方向的量, 并且两个矢量的合成符合平行四边形法则。力的后一性质将在 § 1-2 中看到。