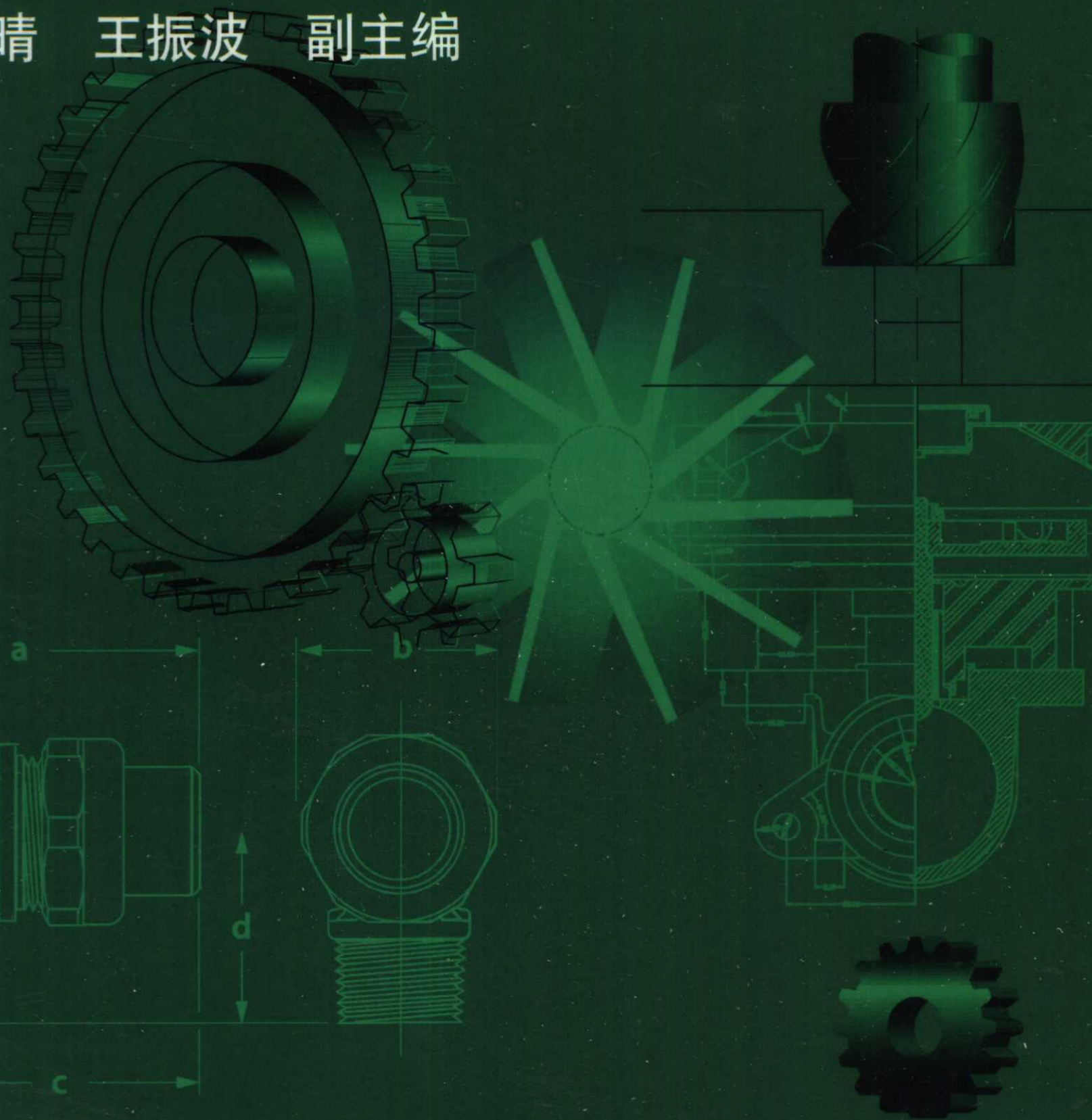


普通高等教育机电类规划教材

理论力学

朱炳麒 主编

赵 晴 王振波 副主编



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

理 论 力 学

主 编 朱炳麒
副主编 赵 晴 王振波
参 编 顾 乡 余 斌 陈启东
陈家骏 诸伟新 黄海燕
主 审 董正筑



机 械 工 业 出 版 社

本书是为适应普通工科院校机电类专业理论力学(50~76学时)的教学需要而编写的教材。

全书除绪论外分为三部分内容,共15章。第一部分为静力学,内容包括静力学基本概念和物体的受力分析、平面力系、空间力系、虚位移原理;第二部分为运动学,内容包括点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体平面运动;第三部分为动力学,内容包括质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗伯原理、机械振动基础及拉格朗日方程。

本书可作为工科院校机电类各专业的理论力学课程教材,也可作为非机电类专业(如土建、水利、岩土等)的教材,同时可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/朱炳麒主编. —北京:机械工业出版社,
2001.7

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-09028-4

I. 理… II. 朱… III. 理论力学-高等教育-教材
IV. 031

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第035595号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:郑丹 版式设计:张世琴 责任校对:孙志筠

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年8月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·11.25印张·435千字

0 001—4 000册

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677—2527

普通高等教育机电类规划教材编审委员会

主任委员：邱坤荣

副主任委员：黄鹤汀

左健民 高文龙

王晓天 蔡慧官

秘 书：周骥平

委 员：(排名不分先后)

沈世德 周骥平

徐文宽 唐国兴

韩雪清 戴国洪

李纪明 吴建华

鲁屏宇 王 钧

赵连生

序

人类满怀激情刚刚跨入充满机遇与挑战的 21 世纪。这个世纪是经济全球化、科技创新国际化的世纪，是新经济占主导地位的世纪，是科学技术突飞猛进、不断取得新突破的世纪。这个世纪对高等教育办学理念、体制、模式、机制和人才培养等各个方面都提出了全新的要求，培养的人才必须具备新思想、新观念、不断创新、善于经营和开拓市场、有团队精神等素质。

高等工程教育是我国高等教育的重要组成部分，21 世纪对它的挑战同样是严峻的。随着现代科学技术的迅猛发展，特别是微电子技术、信息技术的发展，它们与机械技术紧密结合，从而形成传统制造技术、信息技术、自动化技术、现代管理技术等相互交融、渗透的先进制造技术，使制造业和制造技术的内涵发生了深刻的变化。面向 21 世纪的机械制造业正从以机器为特征的传统技术时代迈向以信息为特征的系统技术时代。制造技术继续沿着 20 世纪 90 年代展开的道路前进。制造技术和自动化水平的高低已成为一个国家或地区经济发展水平的重要标志。而目前我国制造技术与国际先进水平还有较大差距，亟需形成我国独立自主的现代制造技术体系。面对这一深刻的变化和严峻的形势，我们必须认真转变教育思想，坚持以邓小平同志提出的“三个面向”和江泽民同志提出的“四个统一”为指导，以持续发展为主题，以结构优化升级为主线，以改革开放为动力，以全面推进素质教育和改革人才培养模式为重点，以构建新的教学内容和课程体系、加大教学方法和手段改革为核心，努力培养素质高、应用能力与实践能力强、富有创新精神和特色的应用性的复合型人才。

基于上述时代背景和要求，由国家机械工业局教编室、机械工业出版社、江苏省教育厅（原江苏省教委）、江苏省以及部分省外高等工科院校成立了教材编审委员会，并组织编写了机械工程及自动化专业四个系列成套教材首批 31 本，作为向新世纪的献礼。

这套教材力求具有以下特点：

(1) 科学定位。本套教材主要用于应用性本科人才的培养。

(2) 强调实际、实践、实用，体现“浅、宽、精、新、用”。所谓“浅”，就是要深浅适度；所谓“宽”，就是知识面要宽些；所谓“精”，就是要少而精，不繁琐；所谓“新”，就是要跟踪应用学科前沿，跟踪技术前沿，推陈出新，反映时代要求，反映新理论、新思想、新材料、新技术、新工艺；所谓“用”，就是要理论联系实际，学以致用。

(3) 强调特色。就是要体现一般工科院校的特点、特色,符合一般工科院校的实际教学要求,不盲目追求教材的系统性和完整性。

(4) 以学生为本。本套教材尽量体现以学生为本、以学生为中心的教育思想,不为教而教,要有利于培养学生自学能力和扩展、发展知识能力,为学生今后持续创造性学习打好基础。

当然,本套教材尽管主观上想以新思想、新体系、新面孔出现在读者面前,但由于是一种新的探索以及其他可能尚未认识到的因素,难免有这样那样的缺点甚至错误,敬请广大教师和学生以及其他读者不吝赐教,以便再版时修正和完善。

本套教材的编审和出版得到了国家机械工业局教编室、机械工业出版社、江苏省教育厅以及各主审、主编和参编学校的大力支持和配合,在此,一并表示衷心感谢。

普通高等教育机械工程及自动化专业机电类规划教材编审委员会

主任 邱坤荣

2001年元月于南京

前 言

本书为普通高等教育机电类规划教材，是为适应普通高等工科院校培养应用性人才的需要，按工科机电类专业理论力学（50~76学时）的教学要求而编写的教材。

本书除绪论外分为三部分内容。第一部分为静力学，主要研究物体的平衡规律，同时也研究力的一般性质及其合成法则，内容包括静力学基本概念和物体的受力分析、平面力系、空间力系、虚位移原理；第二部分为运动学，研究物体运动的几何性质，而不考虑物体运动的原因，内容包括点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体平面运动；第三部分为动力学，研究物体的运动变化与它所受的力之间的关系，内容包括质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗伯原理、机械振动基础、拉格朗日方程。

本书在编排上将虚位移原理作为静力学的最后一章，有利于在运动学和动力学中应用自由度和广义坐标的概念说明问题。

作者根据多年来在理论力学教学实践中积累的基本经验，注重内容的取材与合理组织、基本理论的阐述，突出了“浅、宽、精、新、用”的特色。在基本概念和基本理论的阐述上，力求既严谨、透彻又简明、扼要；在内容的选定上，紧密结合工程实践，便于培养学生的工程概念，使读者通过本书的学习能解决一些工程实际中的力学问题，并为学习其他相关课程打下基础。

书中的例题绝大多数为精选的典型题目，有较为广泛的代表性，有些例题还给出了多种解法，以利于读者开阔思路，融会贯通所学的内容；有些例题让读者自行分析另外的解题方法，以留有思考的余地。每章后均附有思考题和习题，对于深入领会与理解基本概念、基本理论，更好地掌握解题方法和技巧，提高分析问题和解决问题的能力有所帮助。

本书采用国际单位制（SI），有关量、符号和单位均执行国家技术监督局发布的国家标准《量和单位》（GB3100~3102—1993）中的规定。

本书也可供近机类专业和非机电类专业（如材料、土建、水利、岩土专业等）使用。由于各专业的要求和学时数相差较大，故在使用本书时，教师可根据实际情况对书中内容作必要的取舍。

参加本书编写工作的有朱炳麒、赵晴、王振波、顾乡、余斌、陈启东、陈家骏、诸伟新、黄海燕。全部习题由张迅炜、陈家骏验算核对。全书由朱炳麒担任主编，赵晴、王振波任副主编，并由朱炳麒负责统稿。

承蒙中国矿业大学董正筑教授担任本书的主审，董教授认真、细致地审阅了全书，并在本书编写的整个过程中，提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

本书得到了江苏省教委、国家机械工业局教编室和机械工业出版社的大力支持，在编写过程中，还得到了周建方教授、黄鹤汀教授和其他教师的热情帮助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中缺点和不妥之处在所难免，敬请广大教师和读者批评指正。

编 者
2001年2月

目 录

序	
前言	
绪论	1

静 力 学

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析	5
第一节 静力学的基本概念	5
第二节 静力学的基本公理	6
第三节 约束与约束力	9
第四节 物体的受力分析	13
思考题	18
习题	18
第二章 平面力系	21
第一节 力在轴上的投影与力的分解	21
第二节 力对点之矩	23
第三节 力偶	25
第四节 平面力系的简化	28
第五节 平面力系的平衡	34
第六节 物体系统的平衡	41
第七节 有摩擦的平衡问题	48
思考题	57
习题	60
第三章 空间力系	70
第一节 空间力的分解与投影	70
第二节 力对点之矩与力对轴之矩	73
第三节 力偶矩矢	76
第四节 空间力系的简化	78
第五节 空间力系的平衡	83
第六节 重心	88
思考题	95
习题	95
第四章 虚位移原理	103

第一节	虚位移与虚功的概念	103
第二节	虚位移原理	106
第三节	自由度与广义坐标、广义力	109
思考题	.....	114
习题	.....	115

运 动 学

第五章	点的运动学	120
第一节	点的运动方程	121
第二节	点的速度和加速度	122
第三节	点的运动学问题举例	126
思考题	.....	128
习题	.....	129
第六章	刚体的基本运动	132
第一节	刚体的平动	132
第二节	刚体的定轴转动	134
第三节	轮系的传动比	140
思考题	.....	142
习题	.....	142
第七章	点的合成运动	146
第一节	相对运动、绝对运动和牵连运动	146
第二节	点的速度合成定理	150
第三节	牵连运动为平动时点的加速度合成定理	154
第四节	牵连运动为转动时点的加速度合成定理	157
思考题	.....	164
习题	.....	165
第八章	刚体的平面运动	171
第一节	平面运动的概述和分解	171
第二节	平面图形上各点的速度	173
第三节	平面图形上各点加速度分析的基点法	182
第四节	运动学综合问题举例	187
思考题	.....	193
习题	.....	195

动 力 学

第九章	质点动力学	203
第一节	动力学基本定律	203

第二节 质点运动微分方程	204
思考题	211
习题	211
第十章 动量定理	213
第一节 动量与冲量的概念	213
第二节 动量定理	215
第三节 质心运动定理	218
思考题	221
习题	221
第十一章 动量矩定理	225
第一节 动量矩的概念	225
第二节 转动惯量	227
第三节 动量矩定理	233
第四节 刚体定轴转动微分方程	237
第五节 质点系相对于质心的动量矩定理	241
第六节 刚体平面运动微分方程	243
思考题	246
习题	247
第十二章 动能定理	253
第一节 动能的概念和计算	253
第二节 功的概念和计算	255
第三节 动能定理	260
第四节 功率、功率方程和机械效率	265
第五节 势力场、势能和机械能守恒定律	267
第六节 动力学普遍定理的综合应用	269
思考题	274
习题	274
第十三章 达朗伯原理	281
第一节 达朗伯原理	281
第二节 刚体惯性力系的简化	284
第三节 达朗伯原理的应用	286
第四节 定轴转动刚体的轴承动反力	289
思考题	292
习题	293
第十四章 机械振动基础	297
第一节 概述	297
第二节 单自由度系统的振动	298
第三节 转子的临界转速	309

第四节 减振与隔振	311
思考题	316
习题	316
第十五章 拉格朗日方程	319
第一节 动力学普遍方程	319
第二节 拉格朗日方程	322
思考题	328
习题	328
习题答案	332
参考文献	346

绪 论

一、理论力学的研究内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

在客观世界中，存在着各种各样的物质运动，例如发声、发光等物理现象，化合和分解等化学变化，以及动、植物的生长和人的思维活动等。物体在空间的位置随时间的改变，称为机械运动。在所有的运动形式中，机械运动是最简单的一种。例如，车辆的行驶、机器的运转、水的流动、建筑物的振动及人造卫星的运行等，都是机械运动。平衡是机械运动的特例，例如物体相对于地球处于静止的状态。物质的各种运动形式在一定的条件下可以互相转化，而且在高级和复杂的运动中，往往存在着简单的机械运动。

理论力学研究的内容是速度远小于光速的宏观物体的机械运动，它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础，属于古典力学的范畴。至于速度接近于光速的物体的运动，必须用相对论的理论进行研究；而基本粒子的运动，则用量子力学的观点才能予以完善的描述。宏观物体远小于光速的运动是日常生活及一般工程中最常见的，因此说，在现代科学技术中，古典力学仍然起着重大作用。

理论力学通常分为静力学、运动学和动力学三部分。

静力学 研究物体的平衡规律，同时也研究力的一般性质及其合成法则。

运动学 研究物体运动的几何性质，而不考虑物体运动的原因。

动力学 研究物体的运动变化与它所受的力之间的关系。

在理论力学中，力是一个很重要的概念。力是物体间的相互作用，这种作用使物体的机械运动状态或形状发生改变。力使物体机械运动状态发生变化的效应称为力的运动效应（也称外效应）；力使物体发生变形的效应称为力的变形效应（也称内效应）。在理论力学中只讨论力的运动效应。力是矢量，一般情况下，它有大小、方向和作用点三个要素。

二、理论力学的研究方法

实践，认识，再实践，再认识，这是科学技术发展的正确途径。理论力学的发展也遵循这一规律。具体地说，就是从实际出发，经过抽象化、综合、归纳而建立公理，再应用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论，形成理论体系，然后再通过实践来验证理论的正确性。

理论力学普遍采用抽象化和数学演绎的方法来研究物体的机械运动。

抽象化的方法是根据所研究问题的性质，抓住主要的、起决定作用的因素，

撇开次要的、偶然的因素，深入事物的本质，了解其内部联系。理论力学中，在研究物体的机械运动规律时，抓住影响物体运动的主要因素，忽略影响较小的次要因素，可把实际物体抽象为力学模型作为研究对象。理论力学中的力学模型有质点、质点系和刚体。

质点 只有质量而无大小的几何点。如果物体的尺寸和形状与所研究的问题关系不大，就可以把此物体抽象为质点。

质点系 由有限个或无限个质点组成的系统。质点系是最一般的力学模型。

刚体 在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体，即刚体在力的作用下不发生变形。刚体是质点系的一个特例，是对一般固体的理想化。当物体大小、形状的改变很小，对问题的研究影响不大时，可视其为刚体。

要强调的是，抽象应当以所研究的问题为前提条件。例如，对同一个物体，研究其机械运动规律时可视其为刚体，若研究其材料的内力分布与所受外力的关系等问题，必须视其为可变形固体。

数学演绎是建立理论力学体系的重要方法。经过抽象化，将长期实践和实验所积累的感性材料加以分析、综合、归纳，得到一些基本的概念、定律和原理之后，再以此为基础，经过严密的数学推演，得到一些定理和公式，构成了系统的理论力学理论。这些理论揭示了力学中一些物理量之间的内在联系，并经实践证明是正确的。在学习理论力学的过程中，注意到这门学科理论的系统性、严密性，对于理解、掌握这门课程很有帮助。

近代计算机的发展和普及，为解决复杂的力学问题提供了数值计算的方法。计算机已成为学习理论力学知识的有效工具，并在逻辑推演、公式推导、力学理论的发展中发挥重大作用。

三、学习理论力学的目的

理论力学研究的是力学中最一般、最基本的规律，它是机械、建筑类专业的技术基础课。许多后继课程，例如材料力学、机械原理、机械零件、结构力学、振动理论等，都要以理论力学的理论为基础。理论力学分析问题、解决问题的思路和方法，对学好后继课程也很有帮助。

一些日常生活中的现象和工程技术问题，可直接运用理论力学的基本理论去分析研究。比较复杂的问题，则需要用理论力学知识结合其他专业知识进行研究。所以，学习理论力学知识，可为解决工程实际问题打下一定的基础。

理论力学的理论既抽象而又紧密结合实际，研究的问题涉及面广，而且系统性和逻辑性也很强。理论力学问题既灵活又有一定的规律可循。这些特点，对于培养辩证唯物主义世界观，培养逻辑思维和分析问题的能力，也起着重要作用。

伴随着科学技术的日益发展和我国现代化进程的加快，会不断提出新的力学问题。在机械行业，机械结构小型化、轻量化设计，复合材料的研制，机械人、

机械手的研究和应用等，给力学知识的发展和应用提供了新的机遇和天地。学好理论力学知识，将有利于我们去解决和理论力学有关的新问题，从而促进科学技术的进步，同时也推动理论力学不断向前发展。

四、力学的发展简史

力学本身的发展有着悠久的历史。它的发展是分析和综合相结合的过程，也是人类认识由简单到复杂逐步深化的过程。

牛顿运动定律的建立是力学发展史上的一个里程碑。牛顿定律建立以前，力学研究的历史大致可分为两个时期：古代，从远古到公元 5 世纪，对平衡和运动有了初步的了解；中世纪，从 6 世纪到 16 世纪，这个时期对力、运动的认识已有进展，为牛顿定律的建立做了准备。牛顿定律的建立及以后力学研究的历史大致可分为四个时期：从 17 世纪初到 18 世纪末，经典力学的建立和逐步完善；19 世纪，力学各主要分支的建立；从 1900 年到 1960 年为近代力学，它和工程技术特别是航空、航天技术密切联系；1960 年以后为现代力学，力学同计算技术和自然科学的其他学科广泛结合。

理论力学属于经典力学的范畴，于 1835 年正式分为静力学、运动学、动力学三个部分。

静力学 静力学发源于远古时期，人类在生产劳动和对自然现象观察的基础上积累了力学知识，逐渐形成一些概念，然后对一些现象的规律进行描述。这种描述先是定性的，而后是定量的。阿基米德（约公元前 287—前 212）是几何静力学（简称为静力学）的奠基人。阿基米德在研究杠杆平衡、平面图形的重心位置时，先建立一些公设，而后用数学论证的方法导出一些定理。阿基米德和力学有关的著作有《平面图形的平衡或其重心》、《力学（机械学）方法论》。伐里农（1654—1722）发展了古希腊静力学的几何学观点，提出力矩的概念和计算方法，并用以研究刚体平衡问题。潘索（1777—1859）首次提出力偶的概念，提出了任意力系的简化和平衡理论，约束的定义以及解除约束原理。他的《静力学原理》一书建立了静力学的体系。亚里士多德（公元前 384—前 322）是静力平衡条件的运动学方法的创始人。经过一千多年的发展，斯蒂文（1548—1620）在前人用运动学观点解释平衡条件的基础上，得出虚位移原理的初步形式，为分析静力学提供了依据。

运动学 伽俐略（1564—1642）对速度、加速度作了详尽研究并给出了严格的数学表达式。在此基础上，惠更斯（1629—1695）考虑了点在曲线中的加速度。刚体运动学的研究成果属于欧拉（1707—1783）和潘索。夏莱（1793—1880）给出了刚体一般运动可分解为平移和转动这一定理。科里奥利（1792—1843）指出旋转坐标系中存在附加加速度。物理学家安培提出“运动学”一词，并于 1834 年建议把运动学作为力学的独立部分。

动力学 伽俐略采用科学试验和理论分析相结合的方法,指出了传统的亚里士多德的运动观点的错误,研究了地面上自由落体、斜面运动、抛射体等运动,建立了加速度的概念并发现了匀加速运动的规律。他在1638年出版的《关于两门新科学的谈话和数学证明》是动力学的第一本著作。惠更斯在动力学研究中提出离心力、向心力、转动惯量、复摆的摆动中心等重要概念。开普勒(1571—1630)根据第谷的30年天文观察资料总结出行星运动的三定律。牛顿继承和发展了这些成果,提出了物体运动定律和万有引力定律。在《自然哲学的数学原理》一书中,他给出了牛顿运动三定律。牛顿运动定律是就单个自由质点而言的,达朗伯(1717—1785)把它推广到受约束质点系的运动,并提出了著名的达朗伯原理。欧拉于1758年建立了刚体的动力学运动方程。至此,以质点系和刚体的运动规律为主要研究对象的经典力学臻于完善。

由上述可见,理论力学学科建立时间早,理论性强,系统严密,是一门较为成熟的学科。

五、我国在力学方面的研究和成就

我国是世界上最古老的文明古国之一,生产和科学技术都发展得比较早。远在新石器时代,木架建筑已初具规模。中国西安半坡村遗址出土的汲水壶采取尖底的形式,利用重心,空壶在水面上会倾倒,壶满时会自动恢复竖直位置。世界上第一辆车子出现于我国的夏代。春秋战国时期,在墨翟及其弟子的著作《墨经》中,有涉及力的概念、杠杆平衡、重心、浮力、强度、刚度的叙述。春秋末期成书的《考工记》中有不少与力学有关的技术问题的记述。《庄子·逍遥游》中把风的举力和水的浮力作了类比。王充在《论衡·变虚》中描述了水波振荡随距离的衰减。

我国在力学方面也有很多发明创造。例如,西汉时期的指南车和记道车,东汉张衡制造的“地动仪”以及隋朝李春主持建造的赵州桥等。

“力学学科在中国的发展经历了一个特殊的过程,与古希腊几乎同时,中国古代对平衡和简单的运动形式就已具有相当水平的力学知识,所不同的是未建立起阿基米德那样的理论系统。在文艺复兴前的约一千年时间内,整个欧洲的科学技术进展缓慢,而中国科学技术的综合性成果堪称卓著,其中有些在当时居于世界领先地位。这些成果反映出丰富的力学知识,但终未形成系统的力学理论。到明末清初,中国科学技术已显著落后于欧洲。经过曲折的进程,到19世纪中叶,牛顿力学才由欧洲传入中国,此后,中国力学的发展便随同世界潮流前进,新中国成立后,尤其是改革开放以来,我国的科学技术和力学研究已发展到一个新的水平”。^①

① 摘自《中国大百科全书 力学》第307~308页

静 力 学

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析

静力学的基本概念、公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将介绍力系的概念与静力学公理，并阐述工程中几种常见的典型约束和约束力的分析，最后介绍物体受力分析的基本方法及受力图，它是解决力学问题的重要环节，必须予以充分重视。

第一节 静力学的基本概念

一、力系的概念

静力学既研究刚体在力系作用下的平衡规律，同时也研究力的一般性质及其合成法则。

刚体是静力学的研究对象，是人们将各种各样的实际物体抽象化为便于计算的理想模型。力是物体间的相互作用，作用在同一物体上的一群力，称为力系。

力系按作用线分布情况的不同可分为下列几种：当所有力的作用线在同一平面内时，称为平面力系；否则称为空间力系。当所有力的作用线汇交于同一点时，称为汇交力系；而所有力的作用线都相互平行时，称为平行力系；否则称为一般力系。

二、平衡的概念

平衡是指物体相对于惯性参考系（如地面）保持静止或匀速直线运动状态。如桥梁、机床的床身、作匀速直线飞行的飞机等，都处于平衡状态。平衡是物体运动的一种特殊形式。

三、平衡力系的概念

若力系中各力对于物体的作用效应彼此抵消而使物体保持平衡或运动状态不变时，则这种力系称为平衡力系。平衡力系中的任一力对于其余的力来说都称为平衡力，即与其余的力相平衡的力。

四、等效力系的概念

若两力系分别作用于同一物体而效应相同时，则这两力系称为等效力系。若