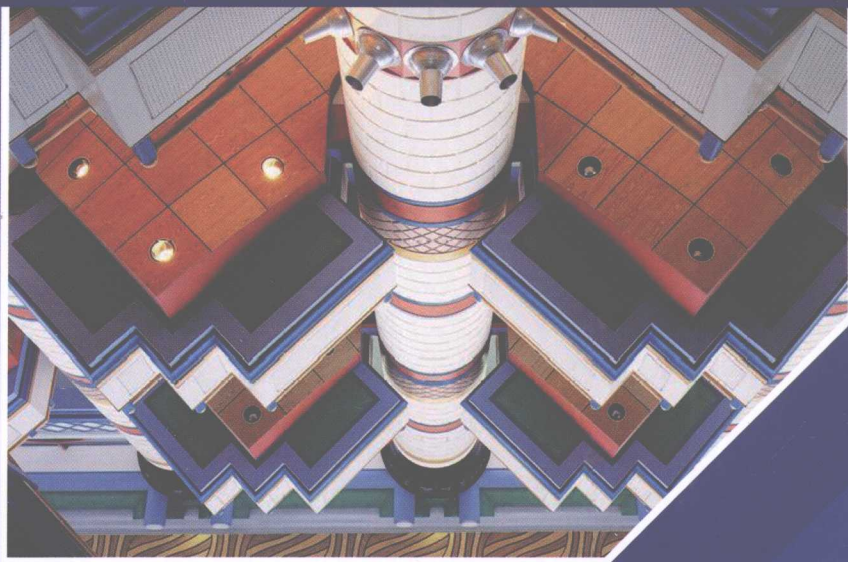


人 高等学校教材

# 理论力学

主编 税国双 主审 汪越胜



清华大学出版社  
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

# 理论力学

主 编 税国双  
主 审 汪越胜

清华大学出版社  
北京交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本教材适用于高等院校工科各专业(如土建、机电等)较多学时的“理论力学”课程教学,内容涵盖了2007年7月底在贵州举行的“高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会第二次工作会议暨全国基础力学教学负责人联席会议”上所讨论制定“理论力学课程教学基本要求(A类)”中的全部“基本部分”以及部分“专题部分”的教学内容。全书共分为10章,包括:绪论、静力学基本概念、力系的简化、力系的平衡方程及其应用、点的运动学及刚体的简单运动、点的合成运动、刚体的平面运动、虚位移原理、达朗贝尔原理、质点系动力学普遍定理、动力学普遍方程、拉格朗日方程以及附录,重点介绍最具有理论力学课程特点的基本内容,以不同层次和角度论述了基本概念、基本公式和基本方法。本教材也可用于高职高专各专业的理论力学课程使用,同时也可供相关的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

理论力学/税国双主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2008.12

ISBN 978-7-81123-460-2

I. 理… II. 税… III. 理论力学-高等学校-教材 IV. O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第184555号

责任编辑:黎丹

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京东光印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:19.75 字数:493千字

版 次:2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-460-2/O·59

印 数:1~5 000册 定价:29.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

# 前 言

多年来,作为教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”项目中“力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”的主持院校之一,我校力学系列课程的教学进行了一系列的探索和改革,取得了丰硕的教学成果,为我校的力学系列课程的教学打下了坚实的基础。本书就是在此背景与基础上完成的。

本教材适用于土建、机电等专业较多学时的理论力学课程教学,内容涵盖了 2007 年 7 月底在贵州举行的“高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会第二次工作会议暨全国基础力学教学负责人联席会议”上所讨论制定“理论力学课程教学基本要求(A类)”中的全部“基本部分”以及部分“专题部分”的教学内容。全书分为 10 章,按绪论、静力学基本概念、力系的简化、力系的平衡方程及其应用、点的运动学及刚体的简单运动、点的合成运动、刚体的平面运动、虚位移原理、达朗贝尔原理、质点系动力学普遍定理、动力学普遍方程和拉格朗日方程以及附录的顺序编排。

在编写中,本教材考虑了以下问题。

1. 静力学部分,在力系的简化一章中,从平面力系的简化开始,分别介绍了平面力系的简化与空间力系的简化;在力系的平衡方程及其应用一章中,也是从平面力系开始,先后介绍了平面力系、空间力系的平衡方程形式及其在分析刚体、刚体系约束力中的应用。将桁架内力的计算、考虑摩擦的平衡问题也放到该章中。就静力学部分的教学内容来说,目前的主流教材主要采用了两种方法:或先讲平面力系的简化、平衡,再讲空间力系的简化、平衡;或采用直接先讲空间力系的简化、平衡,把平面力系的平衡作为空间力系的特殊情况来处理。这两种做法都有其合理性:前一种讲法采用由简单到复杂的方法,符合学习的认知规律,学习起来比较容易理解和接受。但是,这种方法存在与物理课程部分内容重复的问题,特别是在教学学时有所减少的情况下,达不到理想的教学效果;对后一种直接先讲空间力系的简化、平衡的方法,其优点是概念性强,比较节约学时,符合压缩学时的要求。但是,这种讲法与前面物理课程相比较,跳跃幅度较大,对力学基础不是很扎实的同学来说,掌握起来有一定的困难。因此,本教材的这种安排可以综合各自的优势,达到教学内容的安排比较容易理解和接受的同时,又能注意知识的系统性,压缩教学学时。

2. 将动力学普遍定理的教学内容列为一章,按照质点动力学普遍定理、质点系动力学普遍定理、刚体平面运动微分方程、普遍定理的综合应用以及碰撞的顺序编排。与传统的分章介绍动量定理、动量矩定理和动能定理的做法相比,这样安排的优点在于突出“刚体平面运动微分方程”这一动力学中较有特色和重要的教学;密切碰撞与动力学普遍定理的联系;避免给学生一种该部分教学内容是重复《普通物理》教学内容的错觉。

3. 注重数学知识在力学课程中的应用,加强解析法及相关原理的数学推导,适当地补充、复习数学知识。同时,还注重培养结合计算机解决力学问题的能力,适当引入了利用

MATLAB 求解力学问题的内容，并在附录中简要介绍了相关的基础知识。

4. 在绪论部分，选编了大量有关力学体系介绍以及力学发展简史的内容，以期加强对力学的更深层次了解，亦可提高学生的学习兴趣。

在本教材的编写中，还参考了由哈尔滨工业大学理论力学教研室、清华大学范钦珊教授等主编的理论力学系列教材，在此表示衷心的感谢。编者还要对北京交通大学土建学院、土建学院力学系各位领导和同事在本教材编写中给予的关心与帮助表示诚挚的谢意。

编者  
2008年10月

# 目 录

绪论 .....	(1)
第 1 章 静力学基本概念 .....	(7)
1.1 刚体和力的概念 .....	(7)
1.2 静力学公理 .....	(10)
1.3 力的解析表示 .....	(13)
习题 .....	(18)
第 2 章 力系的简化 .....	(19)
2.1 力矩的计算 .....	(19)
2.2 力偶理论 .....	(27)
2.3 力系的简化 .....	(38)
2.4 重心——空间平行力系的简化 .....	(46)
习题 .....	(51)
第 3 章 力系的平衡方程及其应用 .....	(55)
3.1 刚体及刚体系的受力分析 .....	(55)
3.2 平面任意力系的平衡方程及其应用 .....	(69)
3.3 空间力系的平衡方程 .....	(75)
3.4 刚体系的平衡问题 .....	(84)
3.5 平面简单桁架的内力计算 .....	(91)
3.6 考虑摩擦的平衡问题 .....	(96)
习题 .....	(107)
第 4 章 点的运动学及刚体的简单运动 .....	(114)
4.1 描述点的运动的方法 .....	(114)
4.2 刚体的平动 .....	(122)
4.3 刚体绕定轴的转动 .....	(123)
习题 .....	(130)
第 5 章 点的合成运动 .....	(133)
5.1 点的合成运动的几个基本概念 .....	(133)
5.2 三种运动方程间的关系 .....	(134)
5.3 三种运动速度间的关系——点的速度合成定理 .....	(138)
5.4 三种运动加速度间的关系——点的加速度合成定理 .....	(143)
5.5 分类例题 .....	(147)
习题 .....	(157)

<b>第 6 章 刚体的平面运动</b> .....	(160)
6.1 刚体平面运动方程式 .....	(160)
6.2 平面运动的分解 .....	(161)
6.3 平面运动刚体上各点的速度分析 .....	(162)
6.4 平面运动刚体上各点的加速度分析 .....	(166)
6.5 刚体绕平行轴转动的合成 .....	(174)
6.6 运动学综合例题 .....	(177)
习题 .....	(183)
<b>第 7 章 虚位移原理</b> .....	(187)
7.1 分析力学的基本概念 .....	(187)
7.2 虚位移原理 .....	(191)
7.3 以广义坐标表示的平衡条件 .....	(198)
习题 .....	(203)
<b>第 8 章 达朗贝尔原理</b> .....	(205)
8.1 质点的达朗贝尔原理 .....	(205)
8.2 质点系的达朗贝尔原理 .....	(206)
8.3 刚体惯性力系的简化 .....	(209)
8.4 绕定轴转动刚体的轴承动反力 .....	(216)
习题 .....	(218)
<b>第 9 章 质点系动力学普遍定理</b> .....	(220)
9.1 质点动力学普遍定理 .....	(220)
9.2 质点系动力学普遍定理 .....	(222)
9.3 刚体平面运动微分方程 .....	(239)
9.4 普遍定理的综合应用 .....	(263)
9.5 碰撞 .....	(271)
习题 .....	(275)
<b>第 10 章 动力学普遍方程与拉格朗日方程</b> .....	(281)
10.1 动力学普遍方程 .....	(281)
10.2 拉格朗日方程 .....	(283)
10.3 拉格朗日方程的初积分 .....	(288)
习题 .....	(290)
<b>附录 A 空间约束的类型及其约束反力举例</b> .....	(292)
<b>附录 B 刚体对轴的转动惯量</b> .....	(293)
<b>附录 C MATLAB 基础</b> .....	(301)
<b>附录 D 例题 MATLAB 程序</b> .....	(309)
<b>参考文献</b> .....	(310)

# 绪 论

## 1. 力学

力学是研究物质机械运动规律的科学。自然界物质有多种层次，从宇观的宇宙体系，宏观的天体和常规物体，细观的颗粒、纤维、晶体，到微观的分子、原子、基本粒子。通常理解的力学以研究天然的或人工的宏观对象为主，但由于学科的互相渗透，有时也涉及宇观或细观，甚至微观各层次中的对象及有关的规律。机械运动，即力学运动，是物质在时间、空间中的位置变化，包括移动、转动、流动、变形、振动、波动、扩散等，而平衡或静止则是其中的一种特殊情况。机械运动是物质运动的最基本形式。物质运动的其他形式还有热运动、电磁运动、原子及其内部的运动和化学运动等。机械运动并不能脱离其他运动形式独立存在，只是在研究力学问题时突出地考虑机械运动这种形式罢了。如果其他运动形式对机械运动有较大影响或者需要考虑它们之间的相互作用，便会在力学同其他学科之间形成交叉学科或边缘学科。力是物质间的一种相互作用，机械运动状态的变化是由这种相互作用引起的。静止和运动状态不变，都意味着各作用力在某种意义上的平衡。力学，可以说是力和（机械）运动的科学。

力学在汉语中的意思是力的科学。汉语“力”字最初表示的是手臂使劲，后来虽又含有他义，但都同机械或运动没有直接联系。“力学”一词译自英语“mechanics”。在英语中，“mechanics”是一个多义词，既可释作“力学”，也可释作“机械学”、“结构”等。在欧洲其他语种中，此词的语源和语义都与英语相同。汉语中没有同它对等的多义词。“mechanics”在19世纪50年代作为研究力的作用的学科名词传入我国时，译作“重学”，后来改译作“力学”，一直使用至今。“力学的”和“机械的”在英语中同为“mechanical”，而现代汉语中“机械的”又可理解为“刻板的”。这种不同语种中词义包容范围的差异，有时引起国际学术交流中的周折。例如，机械的（mechanical）自然是指用力学解释自然的观点，而英语“mechanist”是指机械师，不是指力学家。

## 2. 力学的发展简史

力学知识最早起源于对自然现象的观察和在生产劳动中的经验。人们在建筑、灌溉等劳动中使用杠杆、斜面、汲水器具，逐渐积累起对平衡物体受力情况的认识。古希腊的阿基米德对杠杆平衡、物体重心位置、物体在水中受到的浮力等作了系统研究，确定它们的基本规律，初步奠定了静力学即平衡理论的基础。古代人还从对日、月运行的观察和弓箭、车轮等的使用中了解一些简单的运动规律，如匀速的移动和转动。但是对力和运动之间的关系，只是在欧洲文艺复兴时期以后才逐渐有了正确的认识。伽利略在实验研究和理论分析的基础上，最早阐明自由落体运动的规律，提出加速度的概念。牛顿继承和发展了前人的研究成果（特别是开普勒的行星运动三定律），提出了物体运动三定律。伽利略、牛顿奠定了动力学的基础。牛顿运动定律的建立标志着力学开始成为一门科学。此后力学的进展在于它所考虑的对象由单个的自由质点转向受约束的质点和受约束的质点系，这方面的标志是达朗贝尔提出



的达朗贝尔原理和拉格朗日建立的分析力学。欧拉又进一步把牛顿运动定律推广,用于刚体和理想流体的运动方程。欧拉建立理想流体的力学方程可看作是连续介质力学的肇端。在此以前,有关固体的弹性、流体的黏性、气体的可压缩性等物质属性方程已经陆续建立。运动定律和物性定律这两者的结合,促使弹性固体力学基本理论和黏性流体力学基本理论孪生于世,在这方面做出贡献的是纳维、柯西、泊松、斯托克斯等人。弹性力学和流体力学基本方程的建立,使得力学逐渐脱离物理学而成为独立学科。另一方面,从拉格朗日分析力学基础上发展起来的哈密顿体系,继续在物理学中起作用。从牛顿到哈密顿的理论体系组成了物理学中的经典力学或牛顿力学。在弹性和流体基本方程建立后,所给出的方程一时难以求解,工程技术中许多应用力学问题还须依靠经验或半经验的方法解决,这使得19世纪后半叶在材料力学、结构力学同弹性力学之间,水力学和水动力学之间一直存在着风格上的显著差别。到20世纪初,在流体力学和固体力学中,实际应用同数学理论的上述两个方面开始结合,此后力学便蓬勃发展起来,创立了许多新的理论,同时也解决了工程技术中大量的关键性问题,如航空工程中的声障问题和航天工程中的热障问题。这种理论和实际密切结合的力学的先驱者是普朗特和卡门。他们在力学研究工作中善于从复杂的现象中洞察事物本质,又能寻找合适的解决问题的数学途径,逐渐形成一套特有的方法。从20世纪60年代起,计算机应用渐广,力学无论在应用上或理论上都有了新的进展。力学继承它过去同航空和航天工程技术结合的传统,在同其他各种工程技术及同自然科学的其他学科的结合中,开拓了新的应用领域。

力学在我国的发展经历了一个特殊的过程。与古希腊几乎同时,我国古代对平衡和简单的运动形式就已具备相当水平的力学知识,所不同的是未建立起像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,而我国科学技术的综合性成果堪称卓著,其中有些在当时世界居于领先地位。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,我国科学技术已显著落后于欧洲。经过曲折的过程,到19世纪中叶,牛顿力学才由欧洲传入我国。以后,我国力学的发展便随同世界潮流前进。

### 3. 力学的学科性质

力学原是物理学的一个分支,物理科学的建立则是从力学开始的。在物理科学中,人们曾用纯粹力学理论解释机械运动以外的各种形式的运动,如热、电磁、光、分子和原子内的运动等。当物理学摆脱了这种机械(力学)的自然观而获得健康发展时,力学则在工程技术的推动下按自身逻辑进一步演化,逐渐从物理学中独立出来。20世纪初,相对论指出牛顿力学不适用于速度接近光速或者宇宙尺度内的物体运动;20世纪20年代,量子论指出牛顿力学不适用于微观世界。这些反映了人们对力学认识的深化,即认识到物质在不同层次上的机械运动规律是不同的。通常理解的力学只以研究宏观的机械运动为主,因而有许多带“力学”名称的学科,如热力学、统计力学、相对论力学、电动力学、量子力学等在习惯上被认为是物理学的分支,而不属于力学的范围。但由于历史上的原因,力学和物理学仍有着特殊的亲缘关系,特别是在以上各“力学”分支和牛顿力学之间,许多概念、方法、理论都有不少相似之处。

力学与数学在发展中始终相互推动,相互促进。一种力学理论往往和相应的一个数学分支相伴产生,如运动基本定律和微积分、运动方程的求解和常微分方程、弹性力学及流体力

学的基本方程和数学分析理论、天体力学中运动稳定性和微分方程定性理论等。有人甚至认为力学是一门应用数学。但是力学和物理学一样，还有需要实验基础的一面，而数学寻求的是比力学更带普遍性的数学关系，两者有各自的研究对象。

力学同物理学、数学等学科一样，是一门基础科学，它所阐明的规律带有普遍的性质。

力学又是一门技术科学，它是许多工程技术的理论基础，同时又在广泛的应用过程中不断得到发展。当工程学还只分民用工程学（即土木工程学）和军事工程学两大分支时，力学在这两个分支中已起着举足轻重的作用。工程学越分越细，各个分支中许多关键性的进展都有赖于力学中有关运动规律、强度、刚度等问题的解决。力学和工程学的结合促使了工程力学各个分支的形成和发展。现在，无论是历史较久的土木工程、建筑工程、水利工程、机械工程、船舶工程等，还是后起的航空工程、航天工程、核技术工程、生物医学工程等，都或多或少有工程力学的活动场地。力学作为一门技术科学，并不能代替工程学，只能指出工程技术中解决力学问题的途径，而工程学则从更综合的角度考虑具体任务的完成。同样地，工程力学也不能代替力学，因为力学还有探索自然界一般规律的任务。

力学既是基础科学，又是技术科学这种二重性，有时难免会引起侧重基础研究一面和侧重应用研究一面的力学家之间的不同看法，但这种二重性也使力学家感到自豪，他们为沟通人类认识自然和改造自然两个方面做出了贡献。

#### 4. 力学的研究方法

力学研究方法遵循认识论的基本法则：实践—理论—实践。力学作为基础科学和作为技术科学从不同侧面反映这个法则。力学家们根据对自然现象的观察，特别是定量观测的结果，根据生产过程中积累的经验和数据或者根据为特定目的而设计的科学实验的结果，提炼出量与量之间定性的或数量的关系。为了使这种关系反映事物的本质，力学家要善于抓住起主要作用的因素，摒弃或暂时摒弃一些次要因素。力学中把这种过程称为建立模型。质点、质点系、刚体、弹性固体、粘性流体、连续介质等就是各种不同的模型。在模型的基础上可以运用已知的力学的或物理学的规律（必要时作一些假设）及合适的数学工具进行理论上的演绎工作，导出新的结论。在理论演绎中，为了使理论具有更高的概括性和更广泛的适用性，往往采用一些无量纲参数，如雷诺数、马赫数、泊松比等。这些参数既反映物理本质，又是单纯的数字，不受尺寸、单位制、工程性质、实验装置类型的牵制。采用上述无量纲参数及通过有关的量纲分析，使得这种验证能在更广泛的范围内进行。对一个单独的力学课题或研究任务来说，这种实践和理论环节不一定能分得很清，也可能和其他课题或任务的某个环节相互交叉，相互影响。课题或任务中每一项具体工作又可能只涉及一个环节或者一个环节的一部分。因此，从局部看来，力学研究工作方式是多样的：有些只是纯数学的推理，甚至着眼于理论体系在逻辑上的完善化；有些着重数值方法和近似计算；有些着重实验技术；有些着重在天文观测和考察自然现象中积累数据；而更大量的则是着重在运用现有力学知识来解决工程技术中或探索自然界奥秘中提出的具体问题。每一项工程又都需要具备自身有关的知识和其他学科的配合。数学推理需要各种现代数学知识，包括一些抽象数学分支的知识；数值方法和近似计算要了解计算技术、计算方法和计算数学；现代的力学实验设备，诸如大型的风洞、水洞，它们的建立和使用本身就是一个综合性的科学技术项目，需要多工种、多学科的协作；应用研究更需要对应用对象的工艺过程、材料性质、技术关键等有清楚的了解。在力学研究中既有细致的、独立的分工，又有综合的、全面的协作。从力学研究和

对力学规律认识的整体来说,实践是检验理论正确与否的唯一标准。以上各种工作都是力学研究不可缺少的部分。

### 5. 力学的学科分类

力学可粗分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究力的平衡或物体的静止问题;运动学只考虑物体怎样运动,不讨论它与所受力的关系;动力学讨论物体运动和所受力的关系。

力学也可按所研究对象区分为固体力学、流体力学和一般力学三个分支。流体包括液体和气体。固体力学和流体力学可统称为连续介质力学,它们通常都采用连续介质的模型。固体力学和流体力学从力学分出后,余下的部分组成一般力学。一般力学通常是指以质点、质点系、刚体、刚体系为研究对象的力学,有时还把抽象的动力学系统也作为研究对象。一般力学除了研究离散系统的基本力学规律外,还研究某些与现代工程技术有关的新兴学科的理论。一般力学、固体力学和流体力学这三个主要分支在发展过程中又因对象或模型的不同而出现一些分支学科和研究领域。属于一般力学的有理论力学(狭义的)、分析力学、外弹道学、振动理论、刚体动力学、陀螺力学、运动稳定性等;属于固体力学的有早期形成的材料力学、结构力学,稍后形成的弹性力学、塑性力学,近期出现的散体力学、断裂力学等。流体力学是由早期的水力学和水动力学这两个风格迥异的分支汇合而成的,现在则有空气动力学、气体动力学、多相流体力学、渗流力学、非牛顿流体力学等分支。各分支学科间的交叉结果又产生粘弹性理论、流变学、气动弹性力学等。

力学也可按研究时所采用的主要手段区分为三个方面:理论分析、实验研究和数值计算。实验力学包括实验应力分析、水动力学实验和空气动力实验等。着重用数值计算手段的计算力学是广泛使用电子计算机后才出现的,其中有计算结构力学、计算流体力学等。对一个具体的力学课题或研究项目,往往需要理论、实验和计算这三方面的相互配合。

力学在工程技术方面的应用结果形成工程力学或应用力学的各种分支,诸如土力学、岩石力学、爆炸力学、复合材料力学、工业空气动力学、环境空气动力学等。

力学和其他基础科学的结合也产生一些交叉性的分支,最早的是和天文学结合产生的天体力学。20世纪60年代以来,出现了更多的这类交叉分支,其中有物理力学、物理-化学流体力学、等离子体动力学、电流体动力学、磁流体力学、热弹性力学、理性力学、生物力学、生物流变学、地质力学、地球动力学、地球构造动力学、地球流体力学等。

力学分类的这种错综复杂情况是自然科学研究中综合和分析这两个不可分割的方面在力学发展过程中的反映。科学的发展总是分中有合,合中有分。

### 6. 理论力学

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。机械运动是人们生活和生产实践中最常见的一种运动。平衡是机械运动的特殊情况。在客观世界中,存在各种各样的物质运动,如发热、发光和发生电磁场等物理现象,化合和分解等化学变化,以及人的思维活动等。在物质的各种运动形式中,机械运动是最简单的一种。物质的各种运动形式在一定的条件下可以相互转化,而且在高级和复杂的运动中,往往存在着简单的机械运动。本书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和基本粒子的运动,则必须用相对论和量子力学的观点才能完善地予以解释。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遇到的，古典力学有着最广泛的应用。理论力学所研究的则是这种运动中最一般、最普遍的规律，是各门力学分支的基础。本书的内容包括以下三个部分：静力学——主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条件；同时也研究物体受力的分析方法，以及力系简化的方法等；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），而不研究引起物体运动的物理原因；动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。

理论力学的研究方法的过程，就是认识客观世界的过程，任何正确的科学研究方法，一定要符合辩证唯物主义的认识论。理论力学也必须遵循这个正确的认识规律进行研究和发展的。

① 通过观察生活和生产实践中的各种现象，进行多次的科学实验，经过分析、综合和归纳，总结出力学的最基本的规律。远在古代，人们为了提水，制造了辘轳；为了搬运重物，使用了杠杆、斜面和滑轮；为了利用风力和水力，制造了风车和水车，等等。制造和使用这些生活和生产工具，使人类对于机械运动有了初步的认识，并积累了大量的经验，经过分析、综合和归纳，逐渐形成了如“力”和“力矩”等基本概念，以及如“二力平衡”、“杠杆原理”、“力的平行四边形规则”和“万有引力定律”等力学的基本规律，并总结于科学著作中。我国的墨翟（公元前468—前382年）所著的《墨经》，大概是一部最早记述有关力学理论的著作。人们为了认识客观规律，不仅在生活和生产实践中进行观察和分析，还要主动进行实验，定量地测定机械运动中各因素之间的关系，找出其内在规律性。例如，伽利略（公元1564—1642年）对自由落体和物体在斜面上的运动做了多次实验，从而推翻了统治多年的错误观点，并引出“加速度”的概念。此外，如摩擦定律、动力学三定律等，都是建立在大量实验基础之上的。实验是形成理论的重要基础。

② 在对事物观察和实验的基础上，经过抽象化建立力学模型，形成概念，在基本规律的基础上，经过逻辑推理和数学演绎，建立理论体系。客观事物都是具体的、复杂的，为找出其共同规律性，必须抓住主要因素，舍弃次要因素，建立抽象化的力学模型。例如，忽略一般物体的微小变形，建立受力不变形状的刚体模型；抓住不同物体间机械运动的相互限制的主要方面，建立一些典型的理想约束模型；为分析复杂的振动现象，建立了弹簧质点的力学模型等。这种抽象化、理想化的方法，一方面简化了所研究的问题，另一方面也更深刻地反映出事物的本质。当然，任何抽象化的模型都是相对的。当条件改变时，必须再考虑到影响事物的新的因素，建立新的模型。例如，在研究物体受外力作用而平衡时，可以忽略物体形状的改变，采用刚体模型；但要分析物体内部的受力状态或解决一些复杂物体系的平衡问题时，必须考虑到物体的变形，建立弹性体的模型。生产实践中的问题是复杂的，不是一些零散的感性知识所能解决的。理论力学成功地运用逻辑推理和数学演绎的方法，由少量最基本的规律出发，得到了从多方面揭示机械运动规律的定理、定律和公式，建立了严密而完整的理论体系，这对于理解、掌握及应用理论力学都是极为有利的。数学方法在理论力学的发展中起了重大的作用。近代计算机的发展和普及，不仅能完成力学问题中大量的繁杂的数值计算，而且在逻辑推演、公式推导等方面也是极有效的工具。

③ 将理论力学的理论用于实践，在解释世界、改造世界中不断得到验证和发展。实践是检验真理的唯一标准，实践中所遇到的新问题又是促进理论发展的源泉。古典力学理论在现实生活和工程中，被大量实践验证，并在不同领域的实践中得到发展，形成了许多分支，如

刚体力学、弹塑性力学、流体力学、生物力学等。大到天体运动，小到基本粒子的运动。古典力学理论在实践中又都出现了矛盾，表现出真理的相对性。在新条件下，必须修正原有的理论，建立新的概念，从而能正确指导实践，改造世界，并进一步地发展力学理论，形成新的力学分支。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。学习理论力学的目的如下。

① 工程专业一般都要接触机械运动的问题，有些工程问题可以直接应用理论力学的基本理论去解决，有些比较复杂的问题则需要用理论力学和其他专门知识共同来解决。所以，学习理论力学为解决工程问题打下了一定的基础。

② 理论力学是研究力学中最普遍、最基本的规律。很多工程专业的课程，如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、飞行力学、振动理论、断裂力学及许多专业课程等，都要以理论力学为基础。所以，理论力学是学习一系列后续课程的重要基础。随着现代科学技术的发展，力学的研究内容已渗入到其他科学领域，如固体力学和流体力学的理论被用来研究人体内骨骼的强度、血液流动的规律，以及植物中营养的输送问题等，形成了生物力学；流体力学的理论被用来研究等离子体在磁场中的运动，形成电磁流体力学；还有爆炸力学、物理力学等都是力学和其他学科结合而形成的边缘科学，这些新兴学科的建立都必须以坚实的理论力学知识为基础。

③ 理论力学的研究方法，与其他学科的研究方法有不少相同之处，因此充分理解理论力学的研究方法，不仅可以深入地掌握这门学科，而且有助于学习其他科学技术理论，有助于培养辩证唯物主义世界观，培养正确的分析问题和解决问题的能力，为今后解决生产实际问题、从事科学研究工作打下基础。

# 第 1 章

## 静力学基本概念

### 1.1 刚体和力的概念

#### 1. 刚体的概念

实际物体受力时，其内部各点间的相对距离都要发生改变，这种改变称为位移 (displacement)。各点位移累加的结果，使物体的形状和尺寸改变，这种改变称为变形 (deformation)。所谓刚体 (rigid body)，是指这样的物体，在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。这是一个理想化的力学模型，实际物体在力的作用下都会产生程度不同的变形。但是，这些微小的变形对研究物体的平衡问题不起主要作用，可以略去不计，这样可使问题的研究大为简化。例如，在图 1-1 中，吊车梁的弯曲变形  $\delta$  一般不超过跨度 (A、B 间距离) 的  $1/500$ ，水平方向变形更小。因此，研究吊车梁的平衡规律时，变形是次要因素，可略去不计。

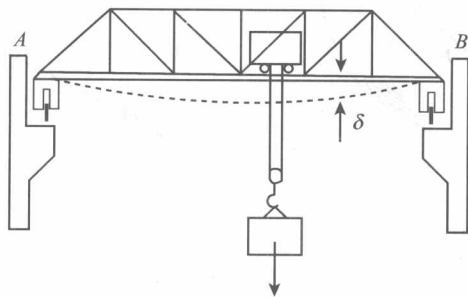


图 1-1

但是不应该把刚体的概念绝对化。例如，在研究飞机的平衡问题或飞行规律时，可以把飞机看作刚体；可是在研究飞机的颤振问题时，机翼等的变形虽然非常微小，但必须把飞机看作弹性体。还有，在计算某些工程结构时，如果不考虑它们的变形而仍使用刚体的概念，则问题将成为不可解的。

理论力学中，静力学研究的物体只限于刚体，故又称刚体静力学，它是研究变形体力学的基础。

## 2. 力的概念

力的概念是从劳动中产生的。人们在生活和生产中，由于肌肉紧张收缩的感觉，逐渐产生了对力的感性认识。随着生产的发展，又逐渐认识到：物体机械运动状态的改变（包括变形），都是由于其他物体对该物体施加力的结果。这样，逐步由感性到理性，建立了抽象的力的概念。

力 (Force) 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了变化。物体之间的机械作用大致可分为两类：一类是接触作用，如机车牵引车厢的拉力、物体之间的挤压力等；另一类是“场”对物体的作用，如地球引力场对物体的引力、电场对电荷的引力或斥力等。尽管各种物体间相互作用力的来源和性质不同，但在力学中将撇开力的物理本质，只研究各种力的共同表现，即力对物体产生的效应。力对物体产生的效应一般可分为两个方面：一是物体运动状态的改变，另一个是物体形状的改变。通常把前者称为力的运动效应 (effect of motion)，后者称为力的变形效应。理论力学中把物体都视为刚体，因而只研究力的运动效应 (effect of deformation)，即研究力使刚体的移动或转动状态发生改变这两方面的效应。

实践表明，力对物体的作用效果应决定于三个要素：力的大小、力的方向和力的作用点。可用一个矢量来表示力的三个要素，如图 1-2 所示。矢量的长度 (AB) 按一定的比例尺表示力的大小，矢量的方向表示力的方向，矢量的始端 (点 A) 表示力的作用点，矢量  $\overrightarrow{AB}$  沿着的直线 (虚线) 表示力的作用线。常用黑体字母  $\mathbf{F}$  或矢量符号  $\vec{F}$  (也可写为  $\bar{F}$ ) 表示力的矢量，而用普通字母  $F$  表示力的大小。

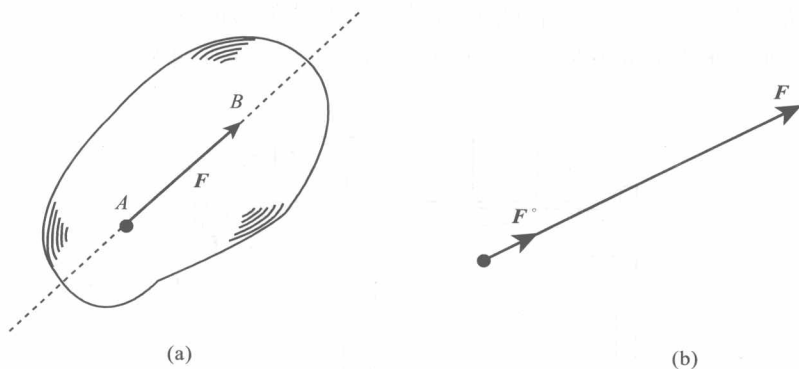


图 1-2

若以  $\mathbf{F}^\circ$  表示沿矢量  $\mathbf{F}$  方向的单位矢，则力  $\mathbf{F}$  可写成

$$\mathbf{F} = F \cdot \mathbf{F}^\circ$$

即力的矢量可以用它的模 (即力的矢量大小) 和单位矢量的乘积表示。

在国际单位制 (SI) 中，以“N”作为力的单位符号，称作牛 (顿)。有时也以“kN”作为力的单位符号，称作千牛 (顿)。

物体受力一般是通过物体间直接或间接接触进行的。接触处多数情况下不是一个点，而是具有一定尺寸的面积。因此无论是施力体还是受力体，其接触处所受的力都是作用在接触面积上的分布力 (distributed force)。在很多情形下，这种分布力比较复杂。例如，人的脚

掌对地面的作用力及脚掌上各点处受到的地面支撑力都是不均匀的。当分布力作用面积很小时，为了分析计算方便，可以将分布力简化为作用于一点的合力，称为集中力（concentrated force）。例如，如图 1-3 所示，静止的汽车通过轮胎作用在桥面上的力，当轮胎与桥面接触面积较小时，即可视为集中力；而桥面施加在桥梁上的力则为分布力。

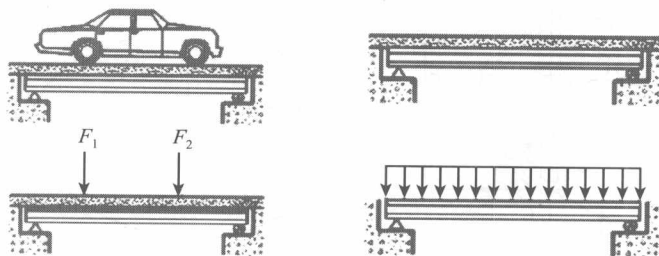


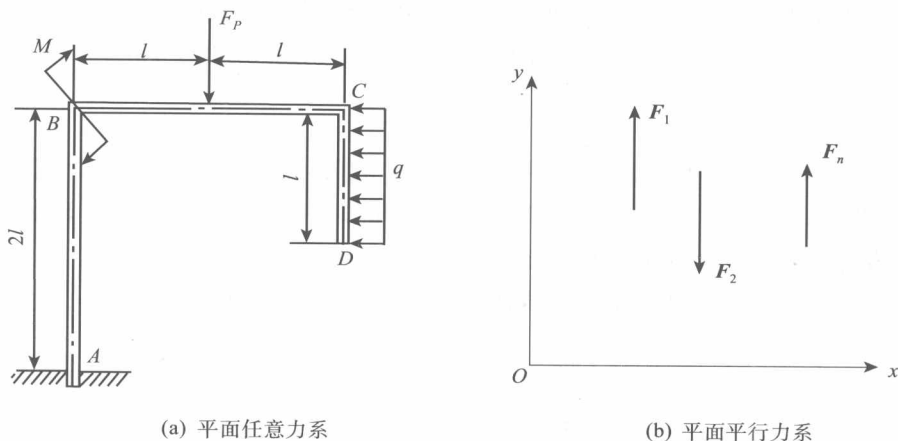
图 1-3

### 3. 力系 (force system)

力系是指作用在物体上的一群力。按力系作用线的空间位置，可将力系分为：平面力系和空间力系。

#### (1) 平面力系

力的作用线分布在同一平面内的力系称为平面力系。平面力系还可以分为平面汇交力系、平面平行力系和平面一般（任意）力系。力的作用线相交于平面内一点的力系称为平面汇交力系；力的作用线相互平行的力系称为平面平行力系；力的作用线既不相交于平面内一点，也不相互平行的力系称为平面一般（任意）力系，如图 1-4 所示。



(a) 平面任意力系

(b) 平面平行力系

图 1-4

#### (2) 空间力系

力的作用线不在同一平面内的力系称为空间力系。空间力系是物体受力最普遍和最一般的情形。空间力系还可以进一步分为空间汇交力系、空间平行力系和空间一般（任意）力系，如图 1-5 所示。



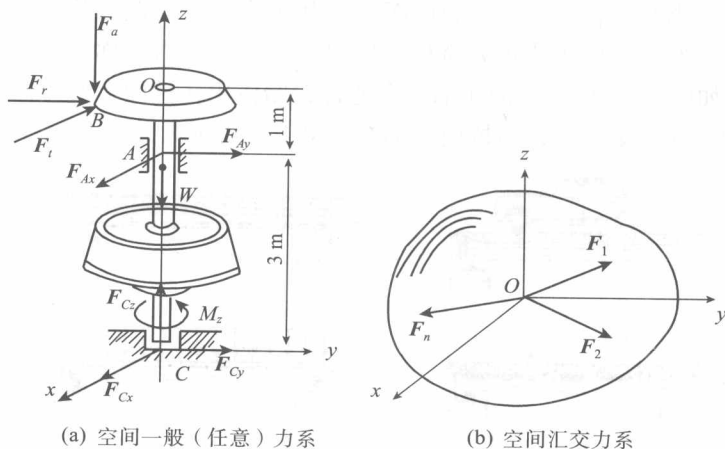


图 1-5

## 1.2 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，又经过实践反复检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

**公理 1-1 (力的平行四边形法则)** 作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力。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构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-6 (a) 所示。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

应用此公理求两汇交力合力的大小和方向（即合力矢）时，可由任一点  $O$  起，另作一个力三角形，如图 1-6 (b) 和 1-6 (c) 所示。力三角形的两个边分别为力矢  $\mathbf{F}_1$  和  $\mathbf{F}_2$ ，第三边  $\mathbf{F}_R$  即代表合力矢，而合力的作用点仍在汇交点  $A$ 。

这个公理表明了最简单力系的简化规律，它是复杂力系简化的基础。

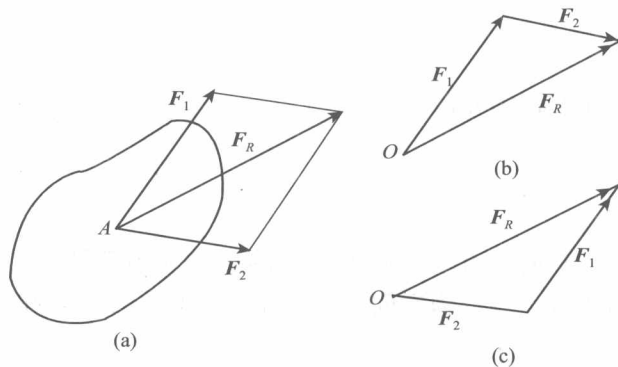


图 1-6