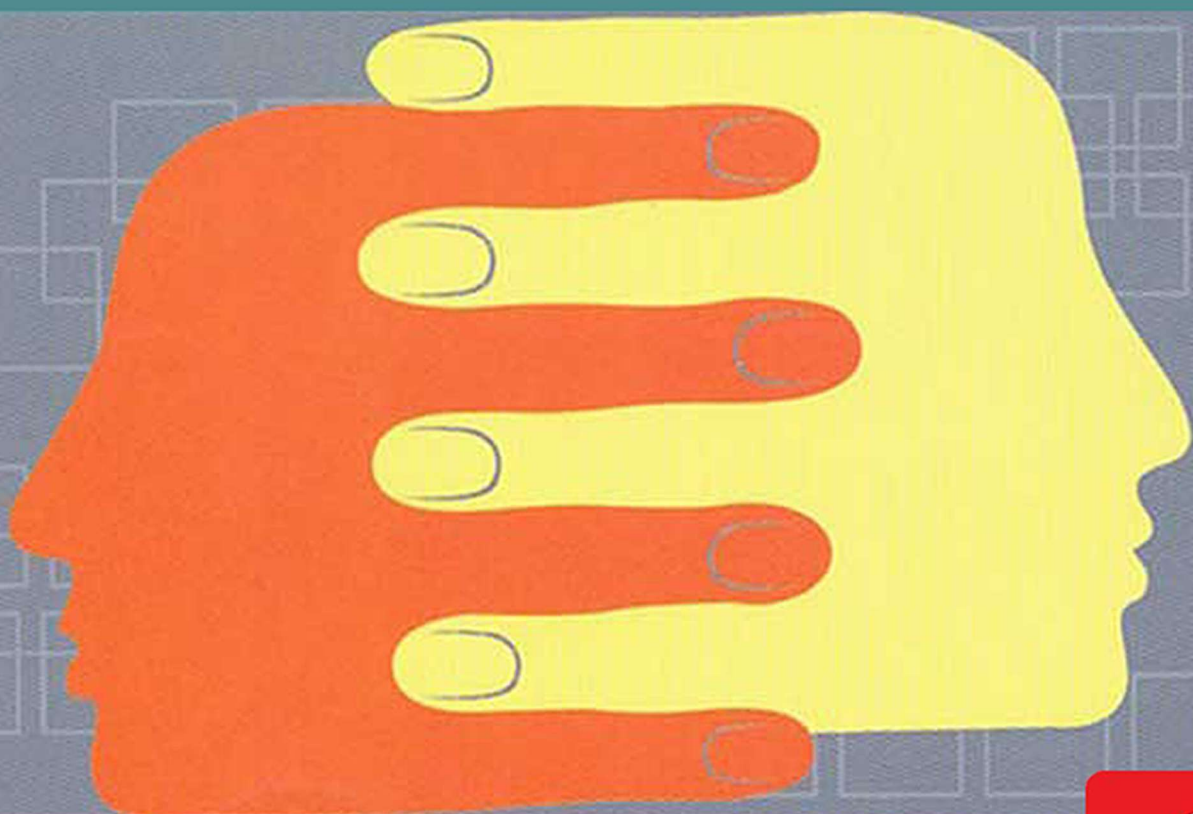


理论力学

闫安志 主编



郑州大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

理论力学/闫安志主编. —郑州:郑州大学出版社,2016.8

(河南省“十二五”普通高等教育规划教材)

ISBN 978-7-5645-1723-6

I. ①理… II. ①闫… III. ①理论力学-高等学校-教材
IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 154066 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:张功员

全国新华书店经销

郑州龙洋印务有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:24.5

字数:565 千字

版次:2016 年 8 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2016 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1723-6

定价:49.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

本书作者

Authors

主 编 闫安志

副 主 编 蔺海晓 陈亚娟

编 委 (以姓氏笔画为序)

王钦亭 闫安志 陈亚娟

韩宪军 蔺海晓

前言

Preface

理论力学是高等理工院校普遍开设的一门技术基础课,是后续力学课程和其他相关专业课程的基础。本教材适用于机械、土建、采矿类专业。

本书是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会最新颁布的《高等学校工科理论力学课程教学基本要求》(A类)编写的多学时理论力学教材。作者根据多年来在理论力学教学中积累的经验,按照其内容的内在联系及特点,打破一般理论力学教材将所研究的内容划分成静力学、运动学和动力学三部分的传统模式,将全部内容整合成4篇共16章,4篇内容分别为刚体静力学、运动学、动力学和分析力学基础。

在本书的编写过程中,编者力求做到:概念准确,论述清楚,便于理解;注意汲取同类教材的精华,试图用现代和实用的观点阐述理论力学的核心内容和方法,既保持了本课程的基本要求,又注意与先修的高等数学、大学物理的衔接及向材料力学等后续课的过渡;在优化教学内容的同时,加强学生能力的培养。并在此基础上,例题选择尽量结合工程实际,以帮助读者准确理解概念,正确掌握理论,以提高分析问题和解决问题的能力。本书各章还配有思考题、习题及其答案,可帮助读者及时总结和加强训练。

本书由河南理工大学闫安志担任主编,河南理工大学蔺海晓和陈亚娟担任副主编。

参加本书编写的人员有:河南理工大学蔺海晓(第1、2、3章),河南理工大学陈亚娟(第4、5、9章),河南理工大学王钦亭(第6、16章),河南理工大学闫安志(第7、11、14、15章),河南理工大学韩宪军(绪论、第8、10、12、13章)。全书由闫安志教授进行了校阅。

本教材的编写参考了大量的国内外优秀教材,在此表示衷心的感谢。书稿承蒙河海大学武清玺教授审阅,并提出许多宝贵的意见和建议,编者在此表示诚挚的谢意。



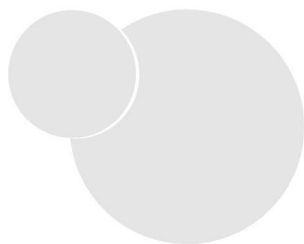
由于编者水平所限,书中难免存在不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2016 年 3 月

绪论	1
----	---

第一篇 刚体静力学

引 言	8
第一章 静力学基本概念、公理和受力分析	9
第一节 基本概念	9
第二节 静力学公理	11
第三节 约束和约束力	15
第四节 物体的受力分析和受力图	20
本章小结	24
第二章 汇交力系的合成与平衡	30
第一节 平面汇交力系的合成与平衡——几何法	30
第二节 平面汇交力系的合成与平衡——解析法	32
第三节 空间汇交力系的合成与平衡	37
本章小结	41
第三章 力偶系的合成与平衡	48
第一节 平面力对点之矩的概念及计算	48
第二节 力偶及平面力偶系的合成与平衡	50
第三节 力对点之矩和力对轴之矩	55
第四节 空间力偶系的合成与平衡	62
本章小结	65
第四章 平面任意力系的平衡问题	72
第一节 力线平移定理	72
第二节 平面任意力系的简化	73
第三节 平面任意力系平衡方程	77
第四节 物体系统的平衡·静定和静不定问题	83
第五节 平面简单桁架的内力计算	87
本章小结	92
第五章 空间任意力系的简化和平衡条件	101
第一节 空间任意力系的简化结果分析	101



第二节	空间任意力系的平衡方程·····	104
第三节	空间约束类型举例·····	105
第四节	空间力系平衡问题举例·····	107
第五节	重心·····	110
	本章小结·····	116
第六章	摩擦·····	121
第一节	滑动摩擦·····	121
第二节	摩擦角和自锁现象·····	123
第三节	考虑摩擦时物体的平衡问题·····	126
第四节	滚动摩阻·····	132
	本章小结·····	135

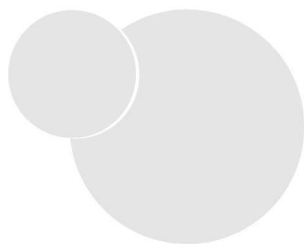
第二篇 运动学

引 言·····	142
第七章 质点运动学基本方程·····	143
第一节 矢量法·····	143
第二节 直角坐标法·····	145
第三节 自然法·····	150
* 第四节 柱坐标系中质点的速度和加速度·····	157
* 第五节 球坐标系中质点的速度和加速度·····	159
	本章小结····· 160
第八章 刚体的简单运动·····	166
第一节 刚体的平行移动·····	166
第二节 刚体的定轴转动·····	168
第三节 转动刚体内各点速度和加速度·····	170
第四节 轮系传动问题·····	174
第五节 角速度(角加速度)矢量和速度(加速度)矢量关系·····	176
	本章小结····· 180
第九章 点的合成运动·····	185
第一节 相对运动·牵连运动·绝对运动·····	185

第二节	点的速度合成定理·····	187
第三节	牵连运动为平动时点的加速度合成定理·····	192
第四节	牵连运动为转动时点的加速度合成定理·····	199
本章小结	·····	205
第十章	刚体的平面运动·····	211
第一节	刚体平面运动概述和运动分解·····	211
第二节	基点法确定刚体内各点速度·····	214
第三节	瞬心法确定刚体内各点速度·····	218
第四节	基点法确定刚体内各点的加速度·····	222
第五节	运动学综合应用举例·····	226
本章小结	·····	231

第三篇 动力学

引 言	·····	242
第十一章	动力学基本方程·····	243
第一节	动力学基本定律·····	243
第二节	质点的动力学基本方程·····	244
第三节	质点动力学的两类基本问题·····	246
本章小结	·····	250
第十二章	动量定理·····	254
第一节	动量和冲量·····	254
第二节	动量定理·····	255
第三节	质心运动定理·····	259
* 第四节	变质量质点系的运动微分方程·····	262
本章小结	·····	266
第十三章	动量矩定理·····	269
第一节	质点和质点系的动量矩·····	269
第二节	动量矩定理·····	270
第三节	刚体的定轴转动微分方程·····	275



第四节	刚体对轴的惯性度量·····	276
第五节	相对质心的动量矩定理·····	281
第六节	刚体的平面运动微分方程·····	283
*第七节	陀螺近似理论·····	286
本章小结	·····	290
第十四章	动能定理·····	296
第一节	力的功·····	296
第二节	刚体的动能计算·····	300
第三节	动能定理·····	303
第四节	功率与功率方程·····	308
第五节	机械能守恒定律·····	310
第六节	物体系统的动力学问题举例·····	314
本章小结	·····	319

第四篇 分析力学基础

引 言	·····	330
第十五章	达朗伯原理·····	331
第一节	惯性力和质点的达朗伯原理·····	331
第二节	质点系的达朗伯原理·····	333
第三节	刚体惯性力系简化·····	335
第四节	定轴转动刚体的轴承动反力·····	342
本章小结	·····	344
第十六章	虚位移原理·····	351
第一节	约束、自由度与广义坐标·····	351
第二节	虚位移与理想约束·····	354
第三节	虚位移原理·····	357
本章小结	·····	363
习题参考答案	·····	368
参考文献	·····	380



绪 论

一、理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的学科。

机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。例如车辆、船只的行驶,航天器的飞行,机器的运转,高耸结构的振动,大气和河水的流动等,都是机械运动。平衡则是机械运动的一种特殊运动形式。除机械运动外,物质的发声、发光、发热、化学过程、电磁现象,以至人类的思维活动、生命现象、历史文化的变革等事件中,也存在着物质(或思维)的运动变化。在多种多样的运动形式中,机械运动是人们在日常生活和生产实践中最常见、最普遍也是最简单的一种运动。

对于不同形态的机械运动的研究产生了不同的力学分支学科,理论力学的研究对象是速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它属于以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础的经典力学的范畴。至于物体的速度接近于光速的运动,则必须用相对论的理论进行研究,而基本粒子的运动,则须用量子力学的观点才能完善地予以解释。这固然说明了经典力学的局限性,但是,经过长期的实践证明,不仅在一般工程中,就是在一些尖端科学技术(火箭、宇宙航行等)领域中,所考察的物体都是宏观物体,运动速度也都远远小于光速,应用经典力学来解决不仅方便,而且能够保证足够的精确性,所以经典力学至今仍有很大的实用意义,并且还在不断地发展。

理论力学由以下四篇内容组成:

刚体静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律,同时还研究物体的受力分析及力系简化方法等。

运动学——从几何位置变化来研究物体的运动(如轨迹、速度和加速度等),而不考虑引起物体运动的原因(作用力和物体的质量)。

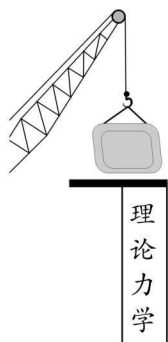
动力学——研究物体所受力与物体运动状态变化之间的关系。动力学是理论力学的精髓所在和最主要的组成部分。

分析力学基础——包含达朗伯原理和虚位移原理。它们是后续分析力学(拉格朗日方程)研究的基础。

二、理论力学的研究方法

科学研究的过程,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。理论力学的研究和发展也必须遵循这个正确的认识规律。

(1)通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行无数次的科学实验,经过分析、



综合和归纳,总结出力学最基本的概念和定律。如“力”和“力矩”的概念,“加速度”的概念,摩擦定律以及动力学三定律等,都是在大量实践和实验的基础上经分析、综合和归纳得到的。

(2)在对事物观察和实验的基础上,通过抽象化建立力学模型。客观事物总是复杂多样的,当我们拥有大量来自实践的资料之后,必须根据所研究的问题的性质,抓住主要的、起决定作用的因素,撇开次要的、偶然的因素,针对事物的本质,了解其内部联系,建立抽象化的力学模型。这就是力学中普遍采用的抽象化方法。这种抽象化、理想化的方法,一方面简化了所研究的问题,另一方面也能更深刻地反映出事物的本质。

例如,在某些问题中忽略实际物体受力后的微小变形,建立形状大小均不改变的刚体模型。刚体的不变形,使得实际问题大大简化,刚体的力学问题,是理论力学的核心;在另一些问题中则忽略物体的大小和形状,得到质点的模型等。一个物体究竟应该作为质点还是作为刚体看待,主要决定于所讨论问题的性质,而不决定于物体本身的大小和形状。例如机器上的零件,尽管尺寸不大,当要考虑它的转动时,就需作为刚体模型看待。火车的长度虽然以百米计,当我们把列车作为一个整体来研究它沿铁路线运行的距离、速度和加速度时,却可以作为一个点来看待。同一个物体,随着研究问题性质的不同,有时可作为质点,有时则要作为刚体。例如,地球半径为 6370 km,当研究它在绕太阳公转的轨道上的运行规律时,可以当作质点,而当考察它的自转时,却必须当作刚体;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,建立新的力学模型。例如:分析物体内部的受力状态或解决一些复杂物体体系的平衡问题时,必须考虑到物体的变形,建立弹性体模型。例如,还是行驶的列车,在研究列车引起桥梁的复杂振动时,就需要把列车和桥梁分别看成质量-弹簧系统和弹性梁的耦合模型。

(3)在建立力学模型的基础上,从基本定律出发,用数学演绎和逻辑推理的方法,得出正确的具有明确物理意义和实用价值的定理和结论。

(4)通过实践验证理论的正确性,对定理和结论加以补充和完善,从而推动生产力和社会发展。

从实践到理论,再由理论回到实践,通过实践进一步补充和发展理论,然后再回到实践,如此循环往复,每一个循环都在原来的基础上提高一步。和所有的科学一样,理论力学正是沿着这条道路不断向前发展的。

三、学习理论力学的目的和方法

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有以下三个方面:

(1)为解决工程实际问题打好基础。工程中有些简单的机械、设备和结构的静力计算和设计,以及机构的运动分析等,可以直接应用理论力学的基本理论和方法去解决。而对于某些比较复杂的问题,例如机器的自动控制、稳定性及振动的研究等,则需要运用理论力学和其他专门知识共同来解决。所以,学好理论力学有助于解决工程实际中的有关力学问题。



(2)为后继课程的学习奠定基础。理论力学研究力学中最普遍、最基本的规律。很多工程专业的课程,例如材料力学、结构力学、弹塑性力学、流体力学、机械原理、机械设计、飞行力学、振动理论、断裂力学以及许多专业课程等,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。此外,随着现代科学技术的发展,理论力学的研究内容渗透到其他学科领域,形成了一些新的边缘学科,例如:理论力学用于研究人体的运动而形成运动力学;理论力学与固体力学、流体力学结合用来研究人体内骨骼的强度、血液流动的规律、人体的力学模型以及植物中营养的输送问题等,形成了生物力学;此外还有电磁流体力学、爆炸力学、物理力学等。总之,为了探索新的科学领域,必须打下坚实的理论力学基础。

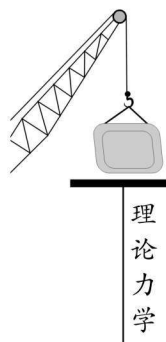
(3)为培养辩证唯物主义世界观和提高分析问题、解决问题的能力创造一定的条件。理论力学的理论来源于实践又服务于实践,既抽象而又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,而且系统性和逻辑性很强。这些特点,对培养辩证唯物主义世界观,培养逻辑思维能力和提高正确的分析问题、解决问题的能力,也起着重要作用,可为今后解决生产实际问题、从事科学研究工作打下良好的基础和创造一定的条件。

理论力学是一门理论严谨、概念抽象、系统性强的一门技术基础课程。准确理解和掌握基本概念,熟悉基本定理、基本定律和相关公式,并能正确、灵活地运用是学好理论力学的关键。为了加深对基本概念和基本理论的理解和掌握,必须按时并独立完成足够数量的习题,这是达到本课程教学大纲要求的重要环节。在习题解算过程中,必须运用所学的基本概念和有关理论,有理有据地按步骤进行,力求做到融会贯通、深化认识,达到应有的学习效果。此外,在学习的过程中注意做到理论联系实际也是提高理论力学课程学习成效的好方法。

四、理论力学发展简史

力学是最早获得发展的学科之一。在旧石器时代,所用的石器都是没有经过打磨的,所以狩猎和分割猎物都比较麻烦,到新石器时代,器具都被打磨出刃或尖,在刺猎物和分割时方便很多,压力和压强的基本概念有了相应的雏形,力学也开始发展起来了。在这个时期,限于时代文明的限制,力学研究的对象主要是简单的工具和机械(如斜面、杠杆和滑轮等),中国古代有很多有名的学者对力学进行了研究,如:春秋时墨翟(公元前468~前376)及其学派的著作《墨经》、汉朝时张衡(78~139)创造的天文仪器浑天仪和测量地震的仪器地动仪、三国时马钧(235年左右)创造了采用差动齿轮传动的指南车、隋朝时李春(生卒年不详)建造的赵州桥等。在15世纪以前,中国的力学成果一直处于世界领先地位,表现的形式仍然与工程技术、生产应用紧密结合,未能作逻辑分析推理,特别是未能做出数学角度的分析。

在西方,古希腊的亚里士多德(Aristotle,约公元前384~前322)和阿基米德(Archimedes,约公元前287~前212)总结了一些关于杠杆平衡等力学规律。在这之后很长一段时期里,西方的力学发展缓慢,一直15世纪文艺复兴时期,发展速度才开始加快;意大利的达·芬奇(Leonardo da Vinci,1452~1519)研究了物体沿斜面的运动和滑动摩擦问题,并在研究物体平衡时给出了力矩的概念;波兰的尼古拉·哥白尼



(Nicolaus Copernicus, 1473 ~ 1543) 创立了宇宙“日心说”;德国的约翰·开普勒(Johannes Kepler, 1571 ~ 1630)根据哥白尼的工作和第谷·布拉赫(Tycho Brache, 1546 ~ 1601)所积累的二十多年天文观测资料提出了行星运动三定律;荷兰的斯蒂芬(Simon Stevin, 1548 ~ 1620)从“永久运动不可能”公设出发论证了力的平行四边形法则;意大利的伽利略(Galileo Galilei, 1564 ~ 1642)确定了自由落体运动定律,并明确提出了惯性定律和加速度的概念等等。

力学作为一门“精确”学科是由艾萨可·牛顿(Isaac Newton, 1643 ~ 1727)奠基的,牛顿在他的旷世著作《自然哲学的数学原理》(1687)中,系统地总结了当时所了解到的力学规律,引入了质量、向心力等概念,阐述了引力定律和运动定律(牛顿三定律),并利用这些理论解释了太阳系的行星以及行星的卫星、彗星的运行规律。《自然哲学的数学原理》一书出版后,有一系列的事实证明了这一理论的正确性,其中包括:哈雷彗星的回归(英国的哈雷,Edmond Hally, 1656 ~ 1742)、万有引力常数的测定(英国的卡文迪许, Henry Cavendish, 1731 ~ 1810)、海王星的发现(英国的亚当斯, John Couch Adams, 1819 ~ 1892, 法国的勒威耶, Urbain Le Verrier, 1811 ~ 1877)等。

自牛顿之后,经典力学并没有停下发展的脚步,而是继续向前发展。法国的路易·布安索(Louis Poincaré, 1859 ~ 1942)在《静力学原理》(1901)一书中系统地讨论了力偶的性质、力系的简化和平衡的系统理论,提出了明确的静力平衡条件,即合力为零与合力矩为零。法国的夏莱(1793 ~ 1880)提出了刚体一般运动可分解为平移和转动这一定理。法国的科里奥利(Coriolis, Gustave Gaspard de, 1792 ~ 1843)指出旋转参考系中存在附加加速度(科氏加速度)。瑞士的欧拉(Leonhard Euler, 1707 ~ 1783)建立了刚体的运动微分方程。法国的达朗贝尔(d'Alembert Jean Le Rond, 1717 ~ 1783)建立了与牛顿第二定律等效的达朗贝尔原理。法国的拉格朗日(Joseph Louis Lagrange, 1736 ~ 1813)以达朗贝尔原理和最小作用能原理为出发点,将整个力学建立在变分原理的基础上,进而导出拉格朗日方程。爱尔兰的哈密顿(William Rowan Hamilton, 1805 ~ 1865)提出了其正则方程体系,建立了哈密顿方程。由拉格朗日方程和哈密顿方程构成了分析力学的框架。

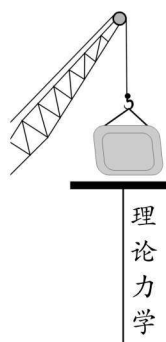
随着力学理论在机械工程中的广泛应用,动力机械、生产机械和机械工程理论都获得了飞跃性的发展。1806年,在法国巴黎首先建立了机构学的分支学科。1834年,法国物理学家安培(André-Marie Ampère, 1775 ~ 1836)把这一学科分支命名为机构运动学。按照他的意见,这一分支是研究机构中发生的运动,而不考虑产生这些运动的力。到此,力学明确分为了静力学、运动学、动力学三大部分,理论力学的经典体系得以确立。

值得说明的是,理论力学的研究范围并不仅仅局限于古典力学的范畴。19世纪末20世纪初,随着物理学和其他学科的发展,出现了许多以牛顿定律为基础的经典力学无法解释的问题。牛顿定律的普遍性受到了怀疑。著名的德裔美国物理学家阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein, 1879 ~ 1955)创立了相对论力学,否定了绝对时间和绝对空间的概念,为力学学科的近现代发展做出了贡献。

20世纪以来,随着科学技术特别是工业技术的大力发展,研究工具和手段日益完

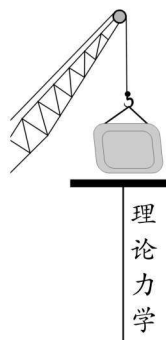


善,力学的研究领域不断扩大,出现了许多新的分支。分析力学、稳定性理论、非线性振动、陀螺理论等多个方面都有了很大的发展。与此同时,力学学科快速发展也为非线性科学提供了范例,如孤立波、混沌、分叉等。这些学科的发展丰富了力学学科的体系,也使力学成为众多工程和技术学科的重要基础之一。21 世纪,仍有许多重要的问题需要解决。这是工程技术发展的需要,同时这些问题的解决也必然会反过来促进力学学科的进一步发展,促进整个力学学科的进步。





第一篇 刚体静力学



引 言

刚体是理论力学的基本力学概念或模型。

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。

力系是指作用于研究物体上的一群力。

平衡是指物体相对于惯性坐标系处于静止或做匀速直线运动的状态。在一般工程问题中所谓平衡则是指相对于地球的平衡,特别是指相对于地球的静止。

在静力学中,主要围绕以下三个问题研究:

1. 物体的受力分析

即分析所关心物体的受力(主动力和约束力)情况,并画出物体的受力图。

2. 力系的等效替换与力系的简化

利用矢量合成法则和力线平移定理等,使物体受到的复杂力系可以用简单力系来代替。

3. 建立各种力系的平衡条件

由物体的平衡状态建立力系满足的平衡条件,计算物体受力,以便对构件进行初步的设计。

力系的简化理论和物体受力分析的方法也是研究动力学问题的基础。