



普通高等教育工程力学类“十二五”规划教材

FOUNDATIONS OF THEORETICAL MECHANICS

理论力学基础

孙保苍 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014003013

031-43
88

普通高等教育工程力学类“十二·五”规划教材

理论力学基础

孙保苍 主编



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1688649

031-43
88

810800410

内 容 简 介

本书是作者根据多年从事理论力学教学的经验,在充分调研各类工程技术专业学生培养计划的基础上,本着抽象问题具体化,复杂问题简单化,语言上力争通俗易懂,讲解问题上力争深入浅出的原则编写的。

本书内容为理论力学的基本内容,分为静力学、运动学和动力学三篇。静力学篇包括静力学基本公理、物体的受力分析、平面力系分析及空间力系简介;运动学篇包括点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动和刚体的平面运动;动力学篇主要介绍动力学的普遍定理及其应用、动静法。

本书是按 50~70 学时的理论力学课程教学要求编写的,可用于一般工科院校工程技术类专业的理论力学教材。由于本教材通俗易懂,编写过程中充分考虑了培养应用型人才的需要,故特别适用于培养应用型人才为主的理工科院校(包括独立学院)的机械、动力、交通等工程技术类专业的理论力学教材。对于高职高专类院校相近专业的理论力学教学也有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学基础/孙保苍主编. —北京:国防工业出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-118-08772-7

I. ①理… II. ①孙… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 163002 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 18 1/4 字数 353 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

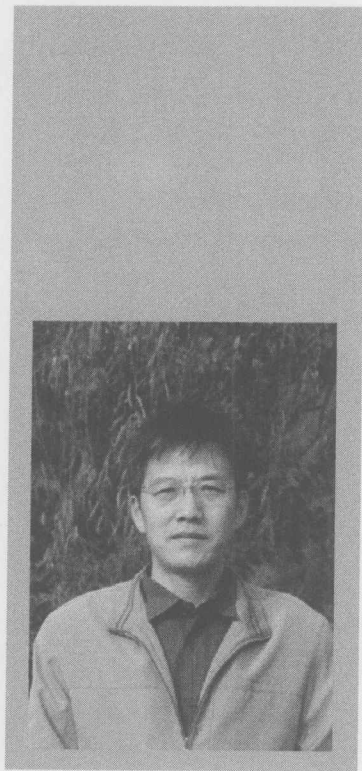
(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717



作者简介

孙保苍 男,1965 年 5 月生,山东东明人,南京航空航天大学博士,江苏大学土木工程与力学学院教授,江苏大学工程力学课程(江苏省精品课程)负责人。目前从事的研究方向为旋转机械动力学、振动及控制、工程中的关键力学问题。近几年参加或主持国家自然科学基金、国防基础研究项目、教育厅基金等纵向课题多项,发表科研及教学论文 40 多篇。

前言

理论力学课程是机械、土木、动力、航空航天等工程技术类专业的重要技术基础课,是工程技术科学的理论基础之一。它既是一门理论系统完整、理论和实践并重、理论密切联系实际学科,又是工科学生开始学习处理工程问题的第一门课程。理论力学课程除了要教给学生力学的基本理论之外,更重要的是培养学生的工程技术观点和分析处理工程问题的能力,因此本课程在高等工程教育中具有特殊和重要的地位。科学技术的不断进步,对人才的综合素质及工作的适应性要求越来越高,在这方面,理论力学课程的学习有不可替代的作用,因而对理论力学课程的改革也提出了新的更高的要求。近 20 年来,理论力学课程的改革取得了一系列成果,很多教学研究的课题组编写了相应的教材,这些教材中的一部分也具有较高的水平。本书是在参考大量同类教材,并充分调查工程技术类专业的培养计划与要求的基础上,结合作者参与教学改革的体会,总结作者多年来教学工作的经验,特别是针对以培养应用型人才为主的工程技术类专业的特点与学生培养的要求编写的。编写过程中同时参照了教育部基础力学教学指导委员会针对机械、动力等专业制定的理论力学教学基本要求。编写本书的基本思想是既考虑课程的系统性和完整性,又要充分考虑相关专业学生培养的需要,重在知识点的讲授和学生对基本概念的理解。既考虑到学生创新能力的培养,更注重培养学生规范化做事的良好习惯。讲解问题深入浅出,更方便学生的自学。

鉴于老的理论力学教材在引导学生自学方面的优越性,全书在内容的编排上仍然将理论力学的内容分为静力学、运动学和动力学三部分,共计 14 章。在讲授过程中,作者力求做到抽象问题具体化,复杂问题简单化。语言上力争通俗易懂,讲解问题深入浅出。在例题的编排上,通常是要求学生先通过一个简单的例题掌握基本的理论与方法,然后通过若干个有一定难度的例题加深对基本概念、基本方

法的理解与掌握。在例题与习题的编排上考虑了基本概念、方法和工程实际应用三种类型的合理搭配。

全书由江苏大学孙保苍教授编写。在编写过程中,笔者从与柳祖亭教授等老师的讨论中得到了很多有益的启发,在此表示诚挚的谢意。

本书承蒙江苏大学柳祖亭教授审阅,他在百忙之中提出了许多宝贵意见,在此表示深深的感谢。

本书的编写参考了部分同类教材,在此向这些教材的编写者表示真诚的谢意。

限于编者水平,书中定有不少不足之处,殷切希望广大师生和读者指正。

编者

2013年2月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静力学

引言	5
----------	---

第 1 章 静力学公理与物体受力分析	6
--------------------------	---

1.1 力的基本概念	6
------------------	---

1.2 静力学基本公理	7
-------------------	---

1.3 约束及分类	9
-----------------	---

1.4 物体的受力分析	12
-------------------	----

思考题	15
-----------	----

习题	16
----------	----

第 2 章 平面简单力系	19
--------------------	----

2.1 平面汇交力系分析的几何法	19
------------------------	----

2.2 平面汇交力系分析的解析法	21
------------------------	----

2.3 力对点的矩	25
-----------------	----

2.4 力偶与平面力偶系	27
--------------------	----

思考题	31
-----------	----

习题	32
----------	----

第 3 章 平面一般力系	35
--------------------	----

3.1 平面一般力系的简化	36
---------------------	----

3.2 平面一般力系的平衡方程	41
-----------------------	----

3.3 静定与超静定问题、物体系统的平衡	44
----------------------------	----

3.4 平面平行力系	48
------------------	----

3.5 平面简单桁架	49
------------------	----

思考题	52
-----------	----

习题	53
----------	----

第 4 章 摩擦	59
----------------	----

4.1 滑动摩擦	59
----------------	----

4.2 考虑摩擦时物体的平衡	62
----------------------	----

4.3 滚动摩擦简介	65
------------------	----

思考题	67
-----------	----

习题	68
----------	----

第 5 章 空间力系简介	72
--------------------	----

5.1 空间汇交力系	72
------------------	----

5.2 力对点的矩与力对轴的矩	74
5.3 空间一般力系的平衡	76

5.4 平行力系的中心、重心 ...	78
思考题	85
习题	86

第二篇 运动学

引言	90
----------	----

第6章 点的运动	91
----------------	----

6.1 矢量表示法	91
6.2 直角坐标表示法	92
6.3 自然表示法	96
思考题	105
习题	105

第7章 刚体的基本运动	108
-------------------	-----

7.1 刚体的平行移动	108
7.2 刚体的定轴转动	110
7.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	112
7.4 定轴轮系的传动比	115
思考题	117
习题	117

第8章 点的合成运动	121
------------------	-----

8.1 合成运动的概念	121
-------------------	-----

8.2 点的速度合成定理	124
8.3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	129
8.4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	134
思考题	136
习题	137

第9章 刚体的平面运动	142
-------------------	-----

9.1 刚体的平面运动方程 ...	143
9.2 平面图形各点的速度分析	145
9.3 平面图形各点的加速度分析	154
思考题	158
习题	159

第三篇 动力学

引言	165
----------	-----

第10章 质点动力学	167
------------------	-----

10.1 动力学基本定律	167
--------------------	-----

10.2 质点运动微分方程	168
思考题	175
习题	176

第 11 章 动量定理	179	13.3 动能定理	238
11.1 动量和冲量	179	13.4 功率 功率方程 机械效率	245
11.2 动量定理	183	13.5 势力场的概念 机械能守恒定律	248
11.3 质心运动定理	190	13.6 动力学普遍定理的综合应用	252
思考题	194	思考题	256
习题	195	习题	257
第 12 章 动量矩定理	199	第 14 章 动静法(达朗伯原理)	265
12.1 质点动量矩定理	199	14.1 质点惯性力的概念	265
12.2 质点系动量矩定理	202	14.2 质点的动静法	266
12.3 刚体的转动惯量、平行移轴公式	207	14.3 质点系的动静法	267
12.4 刚体绕定轴转动微分方程	210	11.4 刚体惯性力的简化	268
12.5 质点系相对于质心的动量矩定理	215	14.5 转子的静平衡与动平衡	274
12.6 刚体平面运动微分方程	217	思考题	275
思考题	221	习题	276
习题	222	部分习题参考答案	279
第 13 章 动能定理	230	参考文献	289
13.1 功	230		
13.2 动能	235		

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的学科。物体在空间的相对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运动。

工程力学是一门与机械、动力、能源、土木、材料、交通、航空航天等众多工程技术领域有密切关系的技术基础学科,它是近代工程技术的理论基础之一,而理论力学是工程力学学科最基础的课程之一。20 世纪以前,推动近代科学技术进步的蒸汽机、内燃机、铁路、船舶等工程技术的重要装备,大都是在力学知识的积累、应用和完善的基础上逐渐形成和发展起来的。

当今工程技术领域的很多高新技术,如大跨度桥梁、高层建筑、石油化工设备、大型水利设施、高速铁路与列车等也都是在工程力学的指导下完成,并不断完善和发展起来的。另外,计算机硬盘驱动器、工业机器人的操作系统、各类航空航天器的发射与运行、雷达跟踪器、航空母舰舰载飞机的发射装置等都与理论力学的理论密切相关。工程力学与理论力学的应用实例如图 1~图 6 所示。



图 1 江苏润扬长江大桥

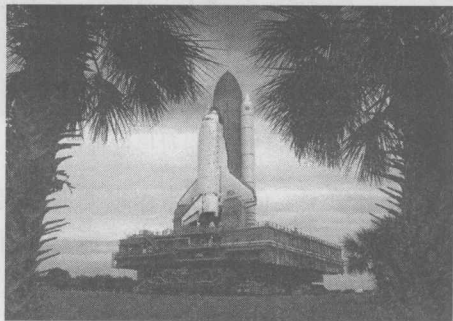


图 2 美国航天飞机

理论力学以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,以速度远小于光速的宏观物体的机械运动为研究对象,属于经典力学的范畴。这种宏观物体的机械运动是日常生活及实际工程中最常遇到的。理论力学就是研究这些运动中最基本、最普遍的规律。因此,理论力学有着非常广泛的应用,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决。

理论力学的内容包括静力学、运动学、动力学三个部分。



图3 中国三峡大坝



图4 航空母舰

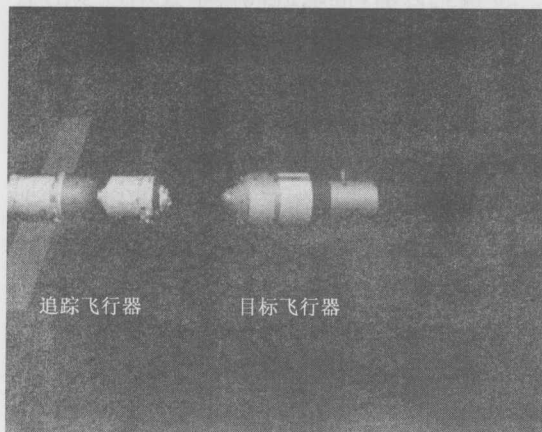


图5 航天器对接过程

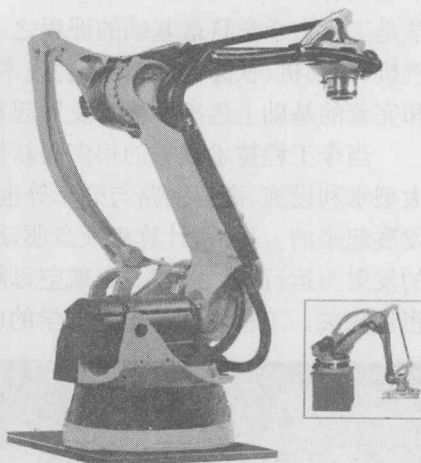


图6 工业机械手

静力学主要研究物体在平衡时的受力分析,包括研究物体在平衡时所受作用力应满足的条件、分析方法等;运动学主要从几何的角度来研究物体的运动规律;动力学主要研究物体的运动与作用力之间的关系。

古代人们使用杠杆、斜面和滑轮进行简单的建筑施工,制造推车用作长途运输,制造船舶用以进行航运等。这些生产工具的制造和使用,使得人类对于机械运动有了初步的认识。但是,在很长的一段时期内,人类的认识仅仅限于经验的积累,而未形成理论知识。

关于力学理论最早的记述当推我国战国时期的墨子。他在所著的《墨经》里,对于力和运动给出了合适的定义,并对杠杆平衡问题进行了理论叙述。阿基米德则较系统地论述了杠杆平衡学说,从而奠定了静力学的基础。

15 世纪中叶到 18 世纪下半期,是欧洲的封建社会向资本主义社会转化时期,为了适应当时的社会与工业发展,力学与其他自然科学一样得到了发展。例如:

达·芬奇提出的力矩概念;芬兰物理学家史蒂芬在进行斜面问题研究时提出了力的合成与分解定律;潘索提出了力偶的概念及有关的理论等,这些使得静力学理论得到了进一步的发展。哥白尼提出了太阳中心学说后,在科学界引起了宇宙观的大革命;开普勒根据哥白尼的学说以及其他一些天文学家的观测资料,得出了行星运动三大定律,成为牛顿万有引力的基础;伽利略观察了落体运动并试验了物体沿斜面的运动,从而提出了落体在真空中的运动定律,并引出了加速度的概念,奠定了动力学的基础,他是用实验及演绎的方法研究动力学的创始人。力学发展的新阶段是从牛顿开始的。他总结了以前无数科学家的成就,发表了著名的运动定律学说,创立了现代的经典力学。

由此可见,运动学与动力学的理论研究可以认为是从哥白尼提出的太阳中心学说开始、由伽利略奠基而由牛顿总结而成,并由此形成了理论力学的理论框架与体系。理论力学的发展过程充分反映了人们不断经过科学实验、分析、综合和归纳,并总结出力学中最基本规律的认识过程。

理论力学所研究的对象是运动的物体,是一种具体的、复杂的客观存在,它们随时间而改变其空间的相对位置。为了探索物体在机械运动中的基本规律,必须首先对物体作必要的简化,以建立力学模型。这也是理论力学课程的重要任务。

例如,研究航天飞机的运动时,虽然航天飞机本身体积较大,但与它的运动轨迹相比则要小得多,因此,可将航天飞机简化为一个质点模型。这样,有利于研究航天飞机的运动规律。再如,在研究汽缸内活塞的运动时,活塞在在外力作用下使自身产生微小变形,但为了研究活塞的运动规律,则忽略它的微小变形,将活塞建立为受力不变形状的刚体模型。又如,活塞与连杆之间的机械运动是相互制约的,为了研究它们之间的相互作用力,需要将它们的连接简化为理想约束模型。

这些力学模型有一个共同的特点:抓住研究对象的主要因素,忽略其次要因素,以建立抽象化的模型。但是,任何抽象化的模型都是相对的。当条件改变时,必须考虑影响事物的新的因素,建立新的模型。例如:要分析物体内部的受力状态时,则刚体模型是不适用的,必须考虑到物体的变形,建立弹性体的模型。这些内容将在材料力学、弹性力学等课程中进行介绍。

由此可见,通过合理简化以建立力学模型,是进行理论分析计算的基础。我们不仅要掌握一些基本的、典型的力学模型的建立方法,而且要善于将较复杂的研究对象合理简化为分析模型,这将有助于提高我们的抽象思维和创新思维能力。

在建立力学模型的基础上,运用归纳和演绎的方法,从少量的基本规律出发,得到从多方面揭示机械运动规律的定理、定律和公式,建立严密而完整的理论体系。这就是理论力学的基本研究方法。归纳与演绎是两种不同的推理和认识现实的科学方法。一般来说,归纳是从特殊推到一般,演绎是由一般推到特殊。

当对一个具体机械装置进行研究时,通常先采用演绎的方法,利用一般的定

理、定律和公式进行演绎分析计算,获得该机械装置的运动规律。同时,我们还应该对这一具体物体的研究成果进行归纳,寻找出具有普遍性的规律和结论,并获得触类旁通的分析方法。

现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,而且在数值模拟、逻辑推演、公式推导等方面也是很有有效的工具。因此,运用计算机方法,可以更有利于学好理论力学。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。首先,学习理论力学的目的是为后续课程(如材料力学、流体力学、机械原理、机械振动等)的学习做好必要的知识准备;其次,理论力学的理论和方法可以直接用于一些工程实际问题的解决,如机械系统、航空航天器的力学建模、运动及动力学分析等;再则,理论力学是人类长期进行科学实践的产物,它的研究方法具有一定的代表性。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,培养正确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良好的理论基础。

第一篇 静力学

引言

静力学主要研究物体在力系作用下的平衡问题。

静力学的研究对象是刚体。刚体是一个抽象的、理想化的力学模型,它是这样一种物体:在力的作用下,物体内部任意两点之间的距离始终保持不变;或者简单地说,刚体是在力的作用下不变形的物体。

平衡是指物体相对于惯性坐标系保持静止或匀速直线运动的状态,是物体机械运动的一种特殊形式。在一般的工程问题中,通常把固结于地球的参考系当作惯性参考系。

静力学主要研究以下两个问题。

1. 力系的简化

力系是指作用在物体上的一群力。若两个不同的力系对物体的作用效果相同,则该两力系为等效力系;用一个简单力系代替一个复杂的力系称为力系的简化。对力系进行简化的目的是为进一步分析研究物体的平衡与运动提供方便。

2. 力系的平衡条件

力系的平衡条件是指物体处于平衡状态时,作用在物体上的力系所应满足的条件。平衡是相对的,是物体机械运动的特殊形式。当物体在某力系作用下处于平衡状态时,则该力系称为平衡力系。

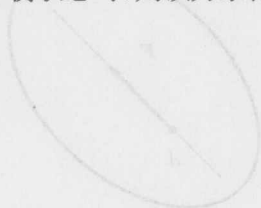


图 1-1

第 1 章 静力学公理与物体受力分析

1.1 力的基本概念

1. 力的定义

力是人们在长期的生产和生活实践中总结出来的一个科学概念,是力学的一个基本概念。人们对于力的认识最初是与推、举、投掷时肌肉的紧张与疲劳等主观感觉联系起来的。后来,人们在日常生产和生活中经过反复的观察、实验、分析逐步认识到,不论物体机械运动状态的改变是变形还是破坏,都是物体间相互作用的结果,如物体运动时的减速和加速、工程结构中构件的变形等。经过长期的总结和科学抽象,人们给出了力的定义:力是物体间的相互作用,这种作用的结果是使物体的运动状态发生改变,或使物体变形。

力对物体的作用效应可分为外效应和内效应。外效应是指物体在力的作用下机械运动状态的改变,也称为运动效应,如人们推动自行车的运动;内效应指在力的作用下物体形状的改变,也称为变形效应,如拉力器的变形、桥梁的变形等。理论力学只研究力的外效应,而力对物体的内效应则由材料力学部分研究。

2. 力的三要素

实践表明,力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点,此三者称为力的三要素。

力的三要素可用有向线段表示,如图 1.1 所示。线段的长度表示力的大小,力的大小代表了力对物体作用的强弱。力的法定标准计量单位是牛(顿),符号为 N ,有时也用千牛(顿),符号为 kN 。线段的方位和箭头的指向表示力的方向,线段的起始点(或终点)表示力的作用点。实际上,力总是作用在一定的面积上的,当力的作用面积与被作用物体的面积相比很小时,可以忽略作用面积的大小,近似看成作用在一个点上。作用于一点的力称为集中力。如果力的作用面积与被作用物体的面积相比较,则称这种力为分布力。通过力的作用点沿力的方位的线,称为力的作用线。

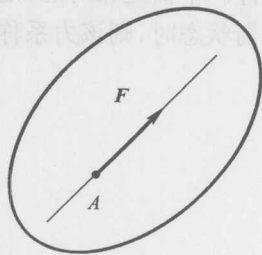


图 1.1

1.2 静力学基本公理

在生产和生活实践中,人们对物体的受力进行了长期的观察、试验和分析,对力的基本性质进行了概括和总结,得出了一些大家公认的且经过实践检验是正确的、毋须证明的正确的结论,这就是静力学公理。静力学理论就是建立在这些公理基础之上的。

公理一(力的平行四边形法则) 作用于刚体上一点的两个力可以合成为一个力,合力的大小与方向可以由两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示,如图 1.2(a)所示。用矢量表示为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

此公理在应用时,可由任一点起,另作一个三角形,如图 1.2(b)所示。三角形的两边分别表示两个力,第三边表示合力。这一求两力合力的方法称为力的三角形法则。

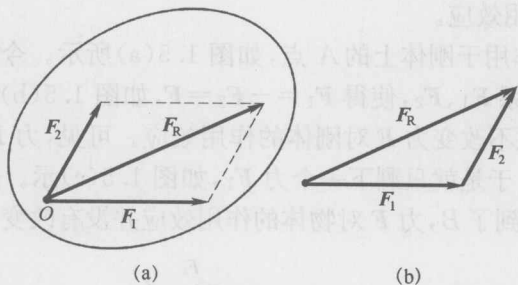


图 1.2

公理二(二力平衡公理) 作用在同一刚体上的两个力使物体保持平衡的充分必要条件是:这两个力大小相等、方向相反、作用在同一条直线上,或者说这两力等值、反向、共线。

此公理阐明了静力学中最简单力系(二力构成的力系)的平衡条件,是研究其他力系的基础。必须指出的是,此公理只适用于刚体。对于变形体,平衡条件是必要的,而不是充分的。如一根不计自重的刚性杆受一对大小相等、方向相反、作用在同一条直线上的力作用,无论这一对力是拉(图 1.3(a))还是压(图 1.3(b)),该刚

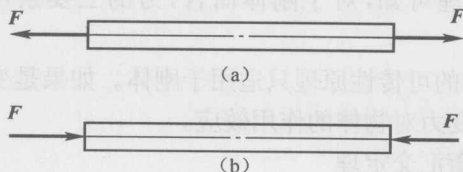


图 1.3

性杆均可保持平衡。如若将刚性杆换成柔索,那么在拉力作用下柔索可以保持平衡,而在压力作用下,平衡不能保持。

在不考虑自重的条件下,工程中有很多构件只受两个力的作用而处于平衡,这样的构件称为二力构件,如图 1.4 所示。如果二力构件是杆件,称为二力杆。对于二力构件,其所受两个力的作用线必然沿两力作用点的连线。二力杆可以是直杆,也可以是曲杆。

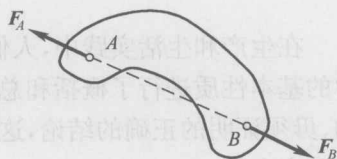


图 1.4

公理三(加减平衡力系公理) 在作用于物体上的力系上,加上或减去任意一个平衡力系,并不改变原力系对物体的作用效应。

该公理的正确性是显而易见的,这是因为平衡力系对物体的平衡或运动状态没有任何影响。此公理对力系的简化起着重要的作用。由该公理还可得出以下两个推论。

推论一(力的可传性原理) 作用在物体上的力可沿力的作用线任意移动而不改变力对物体的作用效应。

证明: 设力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 1.5(a)所示。今在力作用线上的一点 B 加一个平衡力系 F_1 、 F_2 ,使得 $F_1 = -F_2 = F$,如图 1.5(b)示。由加减平衡力系公理可知,这样做不改变力 F 对刚体的作用效应。可见,力 F 、 F_2 也构成一个平衡力系,故可减去。于是就只剩下一个力 F_1 ,如图 1.5(c)示。这就等于把力 F 沿其作用线从 A 移动到了 B ,力 F 对物体的作用效应并没有改变。推论一得证。

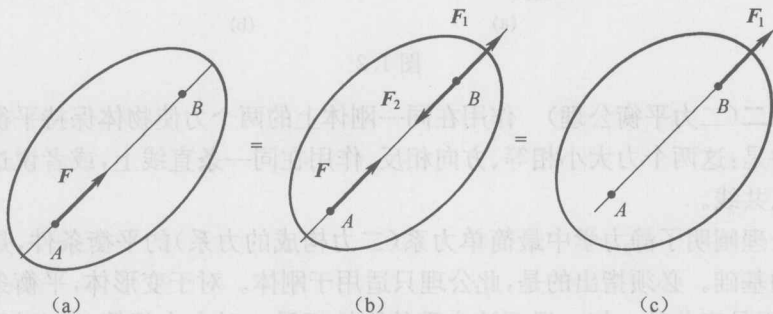


图 1.5

由力的可传性原理可知,对于刚体而言,力的三要素可改为大小、方向、作用线。

必须说明的是,力的可传性原理只适用于刚体。如果是变形体,力沿其作用线的任何移动都可能改变力对物体的作用效应。

推论二 三力平衡汇交定理