

高等学校“十三五”
应用型本科规划教材



理论力学

•主 编 屈钧利 刘向东 赵建会
•副主编 李现敏 黄耀光 邹彩凤

西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校“十三五”应用型本科规划教材

理论力学

主 编	屈钧利	刘向东	赵建会
副主编	李现敏	黄耀光	邹彩凤
参 编	王 静	崔 巍	屠冰冰

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是根据原国家教委审定的《高等工科院校理论力学课程教学的基本要求》编写的,由静力学、运动学、动力学3篇共14章内容组成。本书结合应用型专业的特点,按照课程的基本要求,精选内容。在内容的编写上循序渐进、由浅入深。力求突出重点、易于掌握。

本书可作为普通高等院校、独立学院、继续教育学院的机械类、土建类、地矿类等相关专业的理论力学课程教材或自学参考用书,也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/屈钧利,刘向东,赵建会主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.8
高等学校“十三五”应用型本科规划教材
ISBN 978-7-5606-4570-4

I. ①理… II. ①屈… ②刘… ③赵… 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(2017)第 193244 号

策划编辑 戚文艳

责任编辑 戚文艳 张 倩

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.5

字 数 500千字

印 数 1~3000册

定 价 36.00元

ISBN 978-7-5606-4570-4/O

XDUP 4862001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书是按照原国家教委审定的《高等工科院校理论力学课程教学的基本要求》，结合编者们多年来为工科相关专业讲授理论力学课程的教学经验和教改实践编写而成的。

本书注重加强课程内容与工程实际的结合，以工程实例为例题，培养学生的工程观念及将实际工程问题抽象化为力学模型的能力，如实际约束、荷载的简化，工程结构简化为系统计算简图等；注重加强分析问题能力的训练，如受力分析、运动分析和解题思路的分析等；注重加强综合应用方面的训练，如静力学平衡方程的应用、运动学相关定理、动力学普遍定理的综合应用等，培养学生分析和求解实际问题的能力。

本书按照 60~80 学时的教学要求编写，分为静力学、运动学、动力学 3 篇 14 章，各部分之间有一定的联系又相对独立。根据专业要求的不同，可选择本教材的全部或部分内容讲授。每章后均配有一定数量的思考题和习题。

本书由西安科技大学屈钧利、刘向东、赵建会任主编，李现敏(河北工程大学)、黄耀光(西安科技大学)、邹彩凤(西安科技大学)任副主编。参加编写的人员还有王静(西安科技大学高新学院)、崔巍(西安科技大学高新学院)和屠冰冰(西安科技大学)。具体分工如下：绪论以及第 2、7、11 章由刘向东编写；第 1、14 章由黄耀光编写；第 3、12 章由屈钧利编写；第 4 章由邹彩凤与屈钧利合编；第 5 章由王静编写；第 6 章由刘向东与邹彩凤合编；第 8 章由李现敏编写；第 9 章由崔巍编写；第 10、13 章由屠冰冰编写。

本书在编写的过程中，参阅了国内出版的一些同类教材、教辅资料，并得到西安电子科技大学出版社等单位的支持和帮助。作者在此对他们及对本书所引用文献的著作者表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 3 月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析	7
1.1 静力学公理	7
1.2 约束和约束反力	11
1.3 物体的受力分析及受力图	15
思考题	18
习题	20
第 2 章 平面汇交力系与平面力偶系	23
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	23
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	28
2.3 力对点之矩 合力矩定理	33
2.4 平面力偶系的合成与平衡	36
思考题	40
习题	42
第 3 章 平面一般力系	47
3.1 力线平移定理	48
3.2 平面一般力系的简化 主矢和主矩	49
3.3 平面一般力系的平衡条件 平衡方程	54
3.4 物体系统的平衡 静定与超静定问题的概念	60
3.5 平面简单桁架的内力分析	64
3.6 摩擦	66
思考题	73
习题	75
第 4 章 空间力系	84
4.1 空间汇交力系	84
4.2 力对点之矩及力对轴之矩	87
4.3 空间力偶系	89
4.4 空间力系向一点简化 主矢与主矩	92
4.5 空间力系的平衡方程及应用	94

4.6 物体的重心	99
思考题	104
习题	104

第二篇 运 动 学

第5章 点的运动学	111
5.1 点的运动的矢量表示法	111
5.2 点的运动的直角坐标表示法	112
5.3 点的运动的自然坐标表示法	115
思考题	120
习题	121
第6章 刚体的基本运动	124
6.1 刚体的平行移动	124
6.2 刚体的定轴转动	125
6.3 转动刚体内各点的速度和加速度	127
6.4 定轴转动刚体的传动问题	130
6.5 刚体的角速度和角加速的矢量表示 点的速度和加速度的矢积表示	132
思考题	135
习题	135
第7章 点的复合运动	140
7.1 复合运动的概念	140
7.2 速度合成定理	142
7.3 牵连运动为平动时的加速度合成定理	147
7.4 牵连运动为转动时的加速度合成定理	150
思考题	155
习题	157
第8章 刚体的平面运动	165
8.1 刚体平面运动的概述	165
8.2 刚体平面运动的分解 平面运动方程	165
8.3 平面图形上各点的速度	167
8.4 平面图形上各点的加速度	173
思考题	176
习题	178

第三篇 动 力 学

第 9 章 质点运动微分方程	184
9.1 动力学的基本定律	184
9.2 质点运动微分方程及应用	185
思考题	190
习题	190
第 10 章 动量定理	199
10.1 动量和冲量	199
10.2 质点、质点系的动量定理	197
10.3 质点系的质心运动定理	200
思考题	202
习题	203
第 11 章 动量矩定理	207
11.1 质点和质点系的动量矩	207
11.2 动量矩定理	209
11.3 刚体对轴的转动惯量	213
11.4 刚体的定轴转动微分方程	217
11.5 质点系相对质心的动量矩定理 刚体的平面运动微分方程	220
思考题	227
习题	227
第 12 章 动能定理	234
12.1 力的功	234
12.2 质点 质点系的动能	239
12.3 质点与质点系的动能定理	241
12.4 功率 功率方程	245
12.5 势力场 势能及机械能守恒定理	247
12.6 动力学普遍定理及综合应用	250
思考题	254
习题	255
第 13 章 达朗伯原理	261
13.1 达朗伯原理	261
13.2 刚体惯性力系的简化	264
13.3 绕定轴转动刚体的动反力	268
思考题	269

习题.....	270
第 14 章 虚位移原理	273
14.1 约束与约束方程 虚位移与虚功	273
14.2 自由度和广义坐标	276
14.3 虚位移原理	276
思考题.....	281
习题.....	282
参考文献	287

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。它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。例如,日、月、星辰的运行,车辆、船只的行驶,机器的运转等,都是机械运动。平衡是指物体相对于惯性系保持静止或匀速直线运动的状态(如相对地球处于静止状态),它是机械运动的一种特殊形式。除机械运动外,物质还有发光、发热和产生电磁场等物理现象,化合和分解等化学过程,以及人脑的复杂思维活动等。这些较复杂的物质运动形式都与机械运动存在着或多或少的联系。所以,理论力学的概念、规律和方法在一定程度上也被应用于自然科学的其他领域,对它们的发展起了积极的作用。

理论力学属于以伽利略和牛顿定律为基础的经典力学范畴。近代物理学的发展说明了经典力学的局限性:经典力学仅适用于低速、宏观物体的运动。当物体的速度接近于光速时,其运动应当用相对论力学来研究;当物体的大小接近于微观粒子时,其运动应当用量子力学来研究。而对于速度远低于光速的宏观物体,由经典力学推得的结果具有足够的精确度。在现代科学技术中,经典力学仍然起着重大作用,并且还在不断地发展着。例如,工程技术中所处理的对象一般都是宏观物体,而且其速度也远低于光速,所以其力学问题仍以经典力学的定律为依据。

理论力学由静力学、运动学、动力学三部分内容组成。

静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律;同时也研究力的一般性质,以及力系简化的方法等。

运动学——研究物体机械运动的几何性质(如轨迹、速度和加速度等),而不研究引起运动的物理原因。

动力学——研究物体的机械运动与它所受力之间的关系。

二、理论力学的研究方法

任何一门科学都会因研究对象的不同而有不同的研究方法。但是,通过实践发现真理,再通过实践证实真理并发展真理,是科学技术发展的正确途径。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) 观察和实验是理论力学发展的基础。人们可以通过观察生活和生产实践中的各种现象,分析、综合和归纳出力学的规律。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；为了长距离运输，制造了运输机械；为了利用水力和风力，制造了风车和水车等。这些实践活动使人类对机械运动有了初步的认识，并积累了宝贵的经验，经过分析、综合和归纳，逐渐上升到理论，形成了“力”和“力矩”等概念，以及“二力平衡”、“杠杆原理”、“力的平行四边形规律”和“万有引力定律”等力学的基本规律。

人们为了认识客观规律，除了在生活和生产实践中进行观察和分析外，还必须进行科学实验，人为地创造一些条件，从复杂的自然现象中，突出影响事物发展的主要因素，测定出各个因素间的关系。所以说，科学实验也是形成理论的重要基础。理论力学中的摩擦定律和惯性定律等都是直接建立在实验的基础上的。从近代力学的研究和发展来看，实验更是重要的研究方法之一。

(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。从观察和实验中获得的资料，必须经过认真的分析，去伪存真、去粗取精、由此及彼、由表及里地进行加工，才能上升为理论。这个过程就是抽象化的过程。

抽象化的方法就是在研究复杂的客观事物的过程中，抓住起决定性作用的主要因素，舍弃次要的、局部的和偶然的因素，从而深入到事物的本质，找出事物间的内在规律。例如，在研究物体的机械运动时，忽略物体受力总要变形的属性，得到刚体的模型；忽略摩擦对物体运动的影响得到理想约束的模型；忽略物体的几何尺寸，得到质点的模型。正确的抽象，不仅简化了所研究的问题，而且更深刻地反映了事物的本质。但是，任何抽象化的模型都是有条件的、相对的，如果客观条件改变了，原来的模型就不一定适用，必须再考虑新的主要因素，建立起适应新情况的模型，使它更接近于真实。

(3) 在建立力学模型的基础上，从基本规律出发，用数学演绎和逻辑推理的方法，建立起一些最基本的普遍定律，并将它作为本学科的理论基础。根据这些基本理论，借助于严密的数学工具进行演绎推理，得出了各种形式的定理和结论。理论力学广泛地应用数学这一有效的工具，且力学现象之间的关系也可以通过数量来表示。因此，计算技术对力学的应用和发展有着巨大的作用。当今电子计算机的日益发展，必将促进力学计算的现代化，使复杂的力学问题有可能逐步得到解决。但是，如果认为单靠数学推导就可以发展新的力学理论，这种想法则是完全错误的。只有将数学知识与力学现象的物理本质紧密地结合起来，才能得出符合实际的正确结论。

实践是检验真理的唯一标准。从实践中得到的结论，必须再用到实践中去，接受实践的检验。只有当理论正确地反映了客观实际时，才能认为这个理论是正确的。同时，通过实践进一步补充和发展理论，如此循环往复，在原来的基础上得到提高，理论力学也是沿着这条道路不断发展的。

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：

1. 为学习后继课程奠定基础

理论力学研究的是力学中最普遍的、最基本的规律。很多工程专业的课程,例如,材料力学、机械原理、机械零件、结构力学、弹塑性力学、流体力学、飞行力学、振动理论、断裂力学等,都要以理论力学为基础,所以理论力学是学习一系列后继课程的基础。另外,随着现代科学技术的发展,力学与其他学科相互渗透,形成了许多边缘学科,它们也都是以理论力学为基础的。例如,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,心、肺、肾和头颅的力学模型,以及植物中的营养的输送问题等,进而形成了生物力学;流体力学的理论被用来研究离子在磁场中的运动,进而形成了磁流体力学;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。想要探索新的科学领域,就必须打下坚实的力学基础。

2. 培养解决工程实际问题的能力

理论力学是现代工程技术的理论基础,它的定律和结论被广泛应用于各种工程技术中。各种机械、设备和结构的设计,机器的自动调节和振动的研究,航天技术等,都要以理论力学的理论为基础。另外,对于工程实际中出现的各种力学现象,也需要利用理论力学的知识去认识,必要时加以利用。因此,一般工程技术人员都必须具备一定的理论力学知识。

3. 培养分析问题解决问题的能力

因为理论力学的研究方法遵循着辩证唯物主义认识论的方法,故通过本课程的学习,有助于培养辩证唯物主义的世界观,提高正确分析问题和解决问题的能力,为以后参加生产实践和从事科学研究打下良好的基础。

四、理论力学发展简史

战国时代的墨子(公元前 468—前 376 年)在所著《墨经》中已对力的概念和杠杆(秤)的平衡原理有所论述,这是已发现的有关力学理论的最早记载。后来,希腊的阿基米德(公元前 287—前 212 年)以更明确的方式表述了杠杆平衡问题。意大利艺术家、物理学家和工程师列奥纳多·达·芬奇(1452—1519 年)提出了力矩的概念;法国科学家伐利农(1654—1722 年)提出了力矩定理,并首次提出了静力学一词;布安索(1777—1859 年)提出了力偶的概念,使静力学理论逐渐完善。

16 世纪到 17 世纪,力学开始形成一门独立的系统学科。伽利略(1564—1642 年)根据实验,提出了惯性定律的内容和加速度的概念。在这个基础上,牛顿(1643—1727 年)总其大成,于 1687 年在他的名著《自然哲学的数学原理》中,提出了动力学的三个基本定律。牛顿运动定律是整个经典力学的基础。

18 世纪、19 世纪是理论力学发展成熟的时期。由于工业革命和数学上的新成就,力学进入了一个新的发展时期。这一时期涌现了不少杰出的科学家。伊凡·伯努利(1667—1748 年)以普遍的形式表达了虚位移原理;欧拉(1707—1783 年)提出了质点及刚体的运动微分方程;达朗伯(1717—1785 年)建立了著名的达朗伯原理;拉格朗日(1736—1813 年)在 1783 年发表了名著《分析力学》,成为分析力学的奠基人;哈密顿(1805—1865 年)也对分析力学作出了卓越的贡献。

20 世纪以来,科学技术迅速发展,各门学科都在不断充实、更新,很多学科之间互相渗透,出现了一些边缘学科。就理论力学领域来说,它在振动理论、运动稳定性、飞行力学等许多方面都取得巨大进展,并逐渐形成一些独立的分支。理论力学还与其他学科结合,形成一些新的学科,如生物力学、地质力学和工程控制等。今后,随着生产和科学技术的发展,理论力学也必将获得新的成就。

第一篇 静 力 学

引 言

静力学研究力系的简化和力系作用下刚体的平衡条件及其应用。

力是物体之间相互的机械作用,这种作用使物体的运动状态和形状发生了改变,前者为力的运动效应(也称外效应),后者为力的变形效应(也称内效应)。

实践证明,力的效应取决于力的三个要素:力的大小、方向和作用点。

力是矢量,本书中,矢量均用黑体字母表示。力 $\mathbf{F}$ 的大小用非黑体字母 F 表示,即 $F = |\mathbf{F}|$ 。力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN),且 $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$ 。

力的方向包括力所顺沿的直线在空间的方位和力沿其作用线的指向。

力的作用点是力作用位置的抽象。实际上力的作用位置不是一个几何点,而是一部分面积或体积。譬如,两物体接触时,其相互间的压力分布在整個接触面上,重力分布在整個体积上等,这样的力称为分布力。但当力的作用面积或体积相对于物体的几何尺寸很小以致可忽略其大小时,则可抽象或简化为点,称为力的作用点。作用于该点上的力称为集中力,过力的作用点表示力方位的直线称为力的作用线。

通常,一个物体总是受到许多力的作用,我们把作用在物体上的一群力称为力系。如果作用于某一物体的力系用另一个力系来代替,而不改变物体的运动状态,则称此二力系为等效力系。如果一个力与一个力系等效,则称此力为该力系的合力,而力系中的各力为其合力的分力。合力对物体的作用效应等效于各分力作用效应之和。用一个简单力系等效地替换一个复杂力系称为力系的简化。

平衡是物体机械运动的一种特殊形式,即物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或者做匀速直线运动的情形。例如,地面上的各种建筑物、桥梁,在直线公路上匀速行驶的汽车、做匀速直线运动的飞机等,都处于平衡状态。物体处于平衡状态时,作用于物体上的力系称为平衡力系,该力系所应满足的条件称为平衡条件。研究物体的平衡问题,实际上就是研究作用于物体的力系的平衡条件及其应用。

刚体是指在力的作用下,其内部任意两点间的距离都不会改变的物体。或者说,其大小和形状始终保持不变的物体。刚体是真实物体的一种抽象化的力学模型,在自然界中是不存在的。事实上,任何物体在力的作用下都将产生不同程度的变形,只是许多物体在力的作用下变形很小,以致在所研究的问题中可忽略此变形。其实,此变形并不影响该问题的实质,而且还可使问题大为简化。静力学中所研究的物体都是刚体,所以静力学亦称为刚体静力学。

静力学研究以下三个问题：

- (1) 物体的受力分析。
- (2) 力系的简化。
- (3) 力系的平衡条件及其应用。

在实际工程中有着大量的静力学问题。例如，在土木工程中，作各种结构设计时，需要对其进行受力分析，而静力学理论是结构受力分析的基础；在机械工程中，进行机械设计时，往往要应用静力学理论分析机械零部件的受力情况，并以此作为其强度设计的依据。即便是工程上的动力学问题也可将其化成静力学问题来求解。……。因此，静力学在实际工程中有着广泛的应用。

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析

本章将介绍静力学几个公理以及工程上常见的约束和对物体进行受力分析的方法。

1.1 静力学公理

公理是人类经过长期生产实践积累的经验总结,又反复经过实践检验,被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。静力学公理阐述了力的一些基本性质,是研究力系简化和平衡条件的理论基础和基本依据。

公理 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这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-1(a)所示。这种合成方法称为力的平行四边形法则。合力矢等于这两个力矢的几何和,即

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

合力 $\mathbf{F}_R$ 与二力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的共同作用等效。有时,为了方便,可以不必作出整个平行四边形,而是由点 O 作矢量 $\mathbf{F}_1$,再由 $\mathbf{F}_1$ 的末端作矢量 $\mathbf{F}_2$ (见图 1-1(b)),或者由点 O 作矢量 $\mathbf{F}_2$,再由 $\mathbf{F}_2$ 的末端作矢量 $\mathbf{F}_1$ (见图 1-1(c)),则力三角形的封闭边即为合力矢 $\mathbf{F}_R$ 。这种求合力的方法称为力的三角形法则。

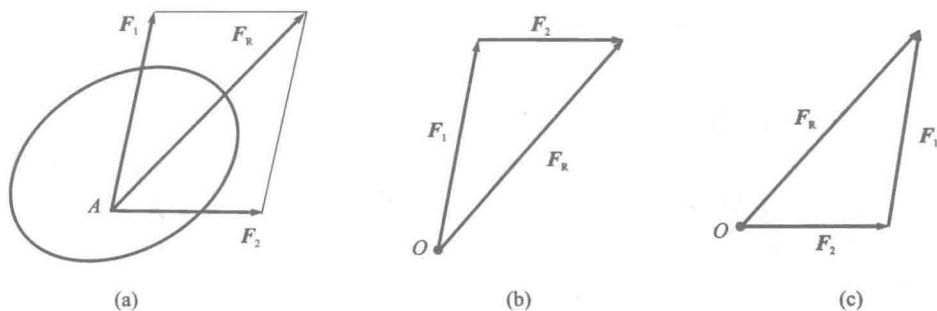


图 1-1

力的平行四边形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。

公理 2 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力,使刚体平衡的必要和充分条件是:这两个力的大小相等、方向相反,且在同一条直线上,如图 1-2 所示。即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

需要指出的是,该公理仅适用于刚体,对于非刚体该平衡条件是不充分的。例如,等值、反向、共线的两力作用于—绳索时,绳索受拉时可以平衡,反之则不能平衡。

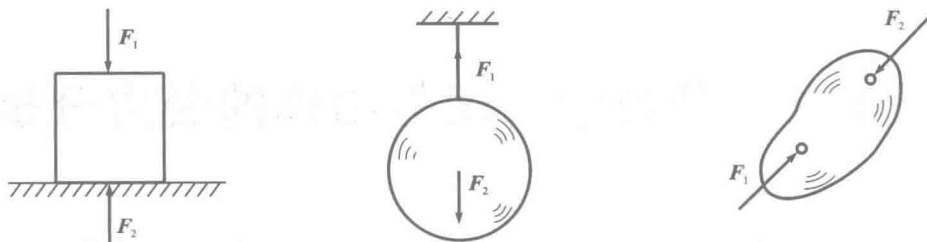


图 1-2

对于只受两个力作用而处于平衡的物体，称为二力体或二力构件，图 1-3 所示物体为一二力构件。由二力平衡条件可知，二力构件不论其形状如何，所受两个力的作用线必为沿二力作用点的连线。图 1-4 所示杆件仅受两力作用且处于平衡状态，该杆件亦称为二力杆。显然，二力的作用线与该杆件的轴线重合。

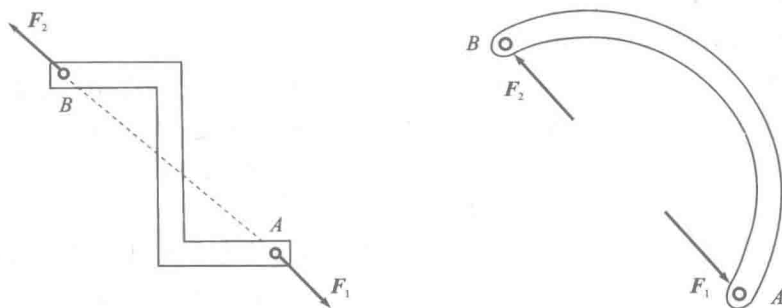


图 1-3



图 1-4

公理 3 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上，加上或减去任一平衡力系，不改变原力系对刚体的作用。也就是说，如果两个力系相差一个或几个平衡力系，那么它们对刚体的作用效果是完全相同的。该公理是研究力系等效替换的重要依据。

由加减平衡力系公理，可导出以下两个重要的推论：

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力，可沿其作用线移至刚体内任意一点，而不改变该力对刚体的作用效应。

证明：假设力 F 作用于刚体上的 A 点， B 是力的作用线上的任一点，如图 1-5(a) 所示。可在 B 点处加上一对平衡力 F' 、 F'' ，且 $F' = F$ ， $F'' = -F$ ，如图 1-5(b) 所示。由加减平衡力系公理可知， F 、 F' 、 F'' 三力所构成的力系与力 F 等效。将 F 、 F'' 构成的平衡力系减去之后得到作用于 B 点的力 F' ，如图 1-5(c) 所示， F' 与三力所构成的力系等效。根据等效的递推性质，力 F' 与力 F 等效。于是力 F 沿作用线由 A 点移到了 B 点。

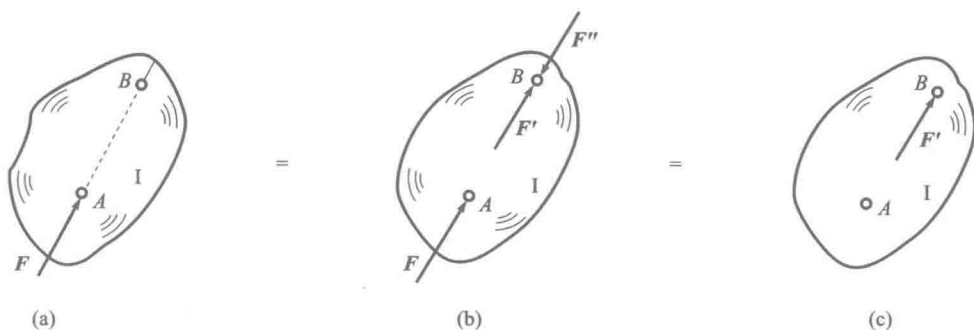


图 1-5

由此可见,对于刚体来说,力的作用点不是决定力的作用效应的主要因素,它已被力的作用线所取代。因此,作用在刚体上的力的三要素为:力的大小、方向和作用线。力矢量可以从它的作用线上的任一点画出,具有这种性质的矢量称为滑动矢量。

必须注意的是,力的可传性只能在刚体内部应用,不能沿作用线滑移到其他刚体上去。例如,图 1-6(a)所示作用于 A 物体上的力 F 不能沿作用线滑移到 B 物体上去,图 1-6(a)与图 1-6(b)所示两种情形显然并不等效。再如,图 1-6(c)所示作用于三铰拱的左半拱上的力同样不能滑移到右半拱上,图 1-6(c)与图 1-6(d)所示两种情形下 F 所引起的拱脚支座处的反力完全不同。

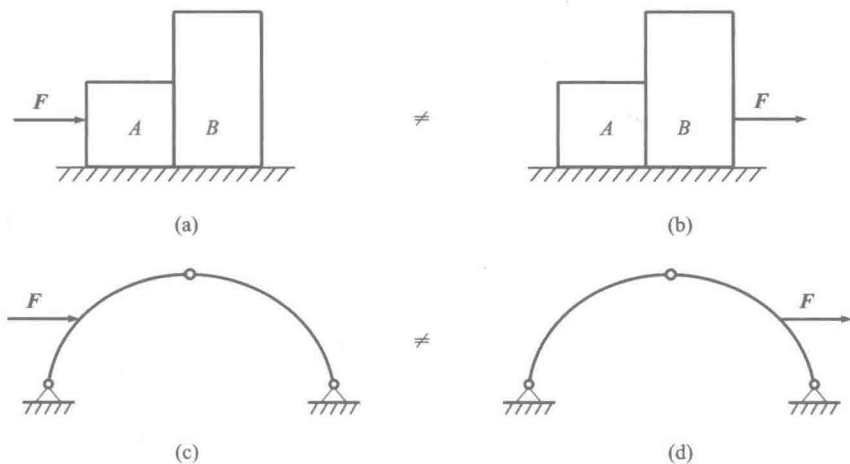


图 1-6

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明:在图 1-7(a)所示刚体的 A、B、C 三点处,分别作用了三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。依据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 沿其作用线移至汇交点 O,由力的平行四边形法则,得到力 F_1 和 F_2 的合力 F_{12} 。于是,三力的平衡简化为 F_{12} 与 F_3 的二力平衡。由二力平衡公理可知,力 F_3 的作用线与 F_{12} 重合而必过点 O,且三力作用线共面,如图 1-7(b)所示。