

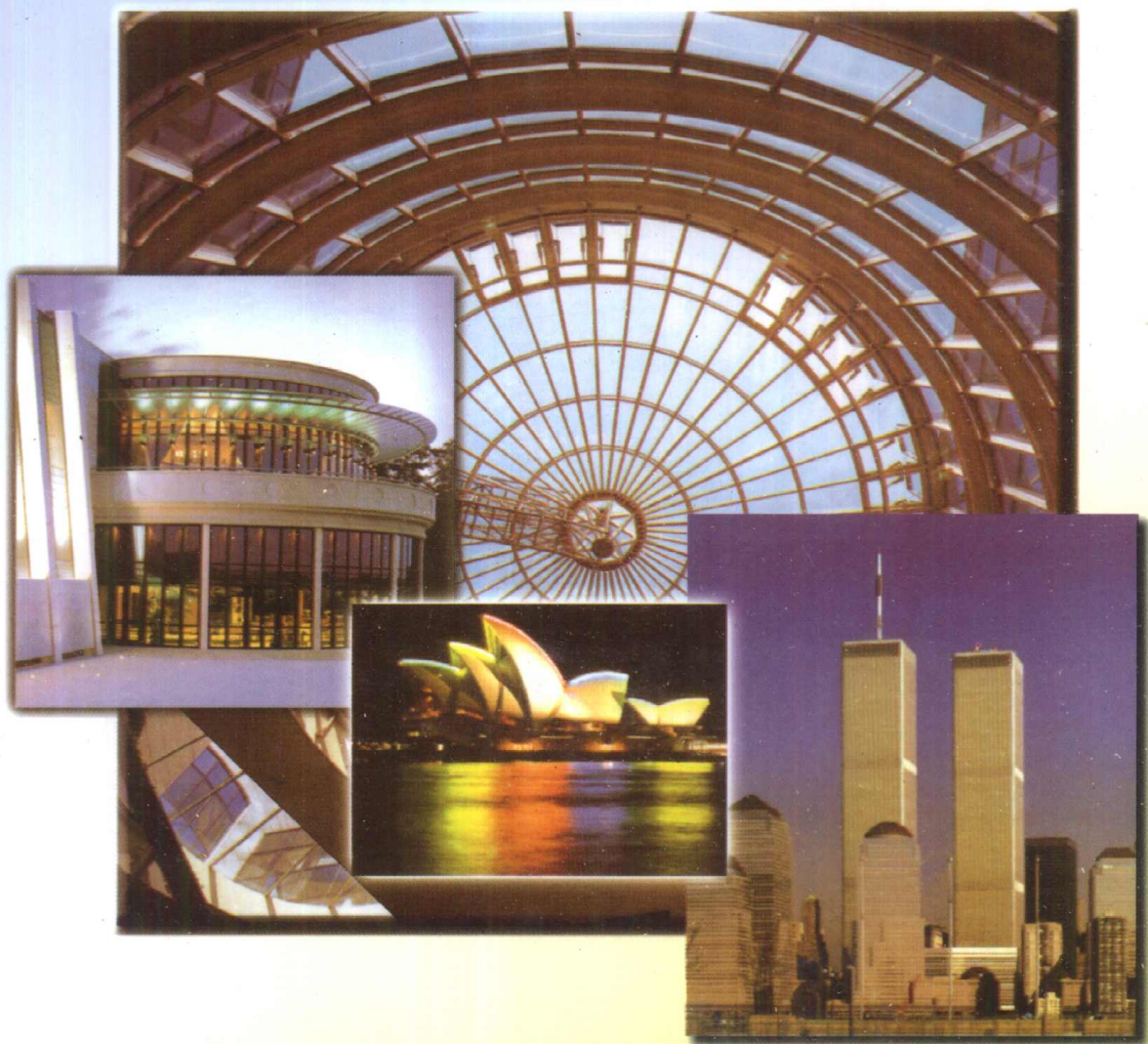
21 世纪 高等学校本科系列教材

总主编 罗固源

理论力学

(11)

张祥东 主编



重庆大学出版社
新疆大学出版社

670

670
Z45

理论力学

张祥东 主 编

重庆大学出版社
新疆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/张祥东主编. —乌鲁木齐:新疆大学出版社;重庆:重庆大学出版社,2002.2
土木工程专业本科系列教材
ISBN 7-5631-1382-7

I.理... II.张... 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(2002)第 053490 号

理 论 力 学

张祥东 主 编

责任编辑 彭 宁

*

重庆大学出版社 出版发行
新疆大学出版社

新 华 书 店 经 销
重庆华林印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:25.5 字数:636 千
2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷
印数:1—4 000

ISBN 7-5631-1382-7/O·6 定价:29.00 元

前言

本教材参照《高等学校工科本科理论力学课程教学基本要求》组织编写。可作为高等学校中土木工程类的土建、水利、道路桥梁、矿井建设等专业理论力学教材,也可供机械等专业选用及有关工程技术人员参考。

在编写中,仍沿用原有的公理体系,对定理、推论等都给予简明的数学推导或相应的说明。在论证、说理之中,力求注意力学现象的物理概念和内在联系,以及思路的严密性和逻辑性,以期在培养学生的思维能力上有一定的作用。

另一方面,为使该教材能够满足 21 世纪教育改革和发展的需要,对传统体系和内容也作了一些调整,力求提高起点,减少相关内容的重叠,精简理论篇幅,加强结合专业和工程应用的内容。例如,在静力学中,采用由基本力系到一般力系,由空间到平面的讲法;动力学中,动力学普遍定理直接从质点系讲起,质点只作为特例略加说明。并在相关章节内容编写中,选编一定数量的联系专业和工程实际的例题、习题,使其能够很好地和前后课程保持衔接,并培养学生学会应用力学理论与方法分析解决工程实际问题的能力。

本书由张祥东任主编。具体编写分工为:张祥东(绪论、第 1、4、15、17 章);程光均(第 11、12、13、14 章);胡文绩(第 7、8、16 章);寸远鹏(第 2、5、10 章);阿肯江·托乎提(第 6、9、18 章);向长奎(第 3 章)。

本书在书稿的形成中充分反映了各位编写人员的多年教学经验和体会,是集众家之长的结晶。但由于时间和编者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请广大读者批评指正。衷心希望大家对本书提出修改意见和建议,以便今后提高和改进。

编者

2001 年 7 月

目 录

绪 论	1
-----------	---

第1篇 静力学

第1章 静力学基本知识与物体的受力分析	4
1.1 静力学基本概念	4
1.2 静力学基本公理	6
1.3 约束和约束反力	8
1.4 物体的受力分析和受力图	12
思考题	16
习 题	17
第2章 汇交力系	20
2.1 汇交力系合成与平衡的几何法	20
2.2 力在坐标轴上的投影	21
2.3 汇交力系合成与平衡的解析法	23
思考题	28
习 题	29
第3章 力偶理论	33
3.1 力对点之矩	33
3.2 力对轴之矩	38
3.3 力偶及其性质	41
3.4 力偶系的合成与平衡	46
3.5 力的平移定理	50
思考题	51
习 题	52
第4章 一般力系	56
4.1 空间一般力系的简化	56
4.2 平面一般力系的简化	60
4.3 空间一般力系的平衡	63
4.4 平面一般力系的平衡	64
4.5 一般力系平衡方程应用举例	65

4.6 物体系统的平衡	71
4.7 静定与超静定问题的概念	79
4.8 物体的重心	80
思考题	85
习 题	86
第5章 摩擦	98
5.1 摩擦现象	98
5.2 滑动摩擦和摩擦定理	99
5.3 摩擦角与自锁现象	101
5.4 考虑滑动摩擦时的平衡问题	102
*5.5 滚动摩阻	108
思考题	110
习 题	111

第2篇 运动学

第6章 点的运动学	116
6.1 运动学基本概念	116
6.2 用矢量法研究点的运动	117
6.3 用直角坐标法研究动点的运动	119
6.4 用自然法研究点的运动	124
*6.5 用极坐标或柱坐标研究点的运动	130
思考题	132
习 题	133
第7章 刚体的基本运动	137
7.1 刚体的平动	137
7.2 刚体的定轴转动	138
7.3 定轴转动刚体上各点的速度和加速度	139
7.4 角速度矢量和角加速度矢量 定轴转动刚体上 点的速度和加速度的矢积表达式	143
思考题	145
习 题	145
第8章 点的合成运动	149
8.1 点的合成运动的概念	149
8.2 速度合成定理	151
8.3 牵连运动为平动时的加速度合成定理	156
8.4 牵连运动为定轴转动时的加速度合成定理	160
思考题	165
习 题	165

第9章 刚体的平面运动	172
9.1 刚体的平面运动及其分解	172
9.2 平面图形上各点的速度	175
9.3 平面图形内各点的加速度	182
思考题	186
习 题	186

第3篇 动力学

第10章 质点运动微分方程	191
10.1 动力学基本定律	191
10.2 质点运动微分方程	193
10.3 质点动力学的两类基本问题	195
*10.4 质点在非惯性系中的运动	201
思考题	205
习 题	205
第11章 质心运动定理 动量定理	210
11.1 质点系的质心 质心运动定理	210
11.2 动量与冲量	214
11.3 动量定理	216
*11.4 变质量质点运动微分方程	220
思考题	222
习 题	223
第12章 动量矩定理	227
12.1 转动惯量	227
12.2 动量矩	231
12.3 动量矩定理	233
12.4 质点系相对于质心的动量矩定理 刚体平面 运动微分方程	238
思考题	245
习 题	246
第13章 动能定理	253
13.1 功和功率	253
13.2 动能	257
13.3 动能定理	259
13.4 势力场 势能 机械能守恒定律	263
13.5 动力学普遍定理的综合应用	266
思考题	269
习 题	270

第 14 章 动静法	280
14.1 质点和质点系的达朗伯原理	280
14.2 刚体惯性力系的简化及其应用	283
14.3 绕定轴转动刚体的轴承动反力	289
思考题	292
习 题	292
第 15 章 虚位移原理	297
15.1 约束 自由度与广义坐标	297
15.2 虚位移	300
15.3 理想约束	303
15.4 虚位移原理	304
*15.5 广义力表示的质点系平衡条件 保守系统 平衡的稳定性	311
思考题	315
习 题	315
第 16 章 动力学普遍方程和拉格朗日方程	320
16.1 动力学普遍方程	320
16.2 拉格朗日方程	322
16.3 拉格朗日方程的初积分	327
思考题	330
习 题	330
第 17 章 工程微振动基础	334
17.1 单自由度系统的自由振动	334
17.2 单自由度系统的衰减振动	340
17.3 单自由度系统的强迫振动	345
17.4 隔振理论简介	350
*17.5 两个自由度系统的自由振动	352
*17.6 两个自由度系统的强迫振动 动力减振器	355
思考题	358
习 题	359
第 18 章 碰 撞	365
18.1 碰撞现象 碰撞力和碰撞冲量	365
18.2 用于碰撞过程中的基本定理	366
18.3 恢复因数	367
18.4 碰撞冲量对绕定轴转动刚体的作用 碰撞中心	373
思考题	375
习 题	375
习题答案	380
参考文献	399

绪 论

1. 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科学,是以伽利略和牛顿所总结的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。

机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。它是所有运动形式中最简单和最常见的一种。平衡是机械运动的特殊情况,也包括在理论力学研究的内容之中。

由于近代物理的发展,发现许多力学现象不能用古典力学的定律加以解释,因而在 20 世纪初就产生和发展了以研究高速物体运动规律的相对力学和研究微观粒子运动规律的量子力学。在这些新的研究领域中,古典力学已不再适用,这说明古典力学是有局限性的。但对于研究远小于光速($3 \times 10^5 \text{ km/s}$)的宏观物体的运动,特别是一般工程中的力学问题,古典力学是足够准确的,即使是在一些尖端科学技术(如火箭、宇宙航空等)领域的研究中,所考察的物体都是宏观物体,其运动速度也都远小于光速,所以也仍然可采用古典力学的原理去解决有关力学问题。同时,在古典力学基础上诞生的各种近代力学也正在迅速发展。因此,无论是在现代科学技术的研究中,还是在大量的工程实际问题中,理论力学作为一门基础学科,都具有非常重要的作用,并显现出勃勃生机。

理论力学包括静力学、运动学和动力学三部分内容。

静力学研究物体在力系的作用下的平衡规律,力的一般性质和力系的简化方法。

运动学从几何学的角度来研究物体的运动规律而不涉及引起物体运动变化的物理原因,即不研究力的作用。

动力学研究物体的机械运动及其受力之间的关系。

2. 理论力学的研究方法

观察与实践是理论力学发展的基础,抽象化和数学演绎这两种方法是形成理论力学的概念和理论系统的主要方法。

通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行多次的实验,经过分析、综合和归纳,总结出力学的最基本的规律。

抽象化的方法,就是在一定的研究范围内,根据问题的性质,抓住起决定作用的主要因素,

忽略次要的、局部的和偶然的因素,深入事物的本质,明确事物间的内在联系的方法。例如,在研究物体机械运动时,忽略物体受力要变形的性质,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,得到质点的概念。正确的抽象,不仅简化了所研究的问题,并且更深刻地揭示了事物的本质。

数学演绎的方法是指在经过实践证明为正确的理论基础上,经过严密的数学推演,得到的一系列定理和公式构成系统理论的方法。理论力学中的许多定理都是以牛顿定律为基础,经过严密的数学推导得到的。但是应当注意,任何研究对象的抽象化模型都是相对的,有条件的,当研究问题的条件改变了,原来的模型就不一定适用,必须再考虑影响问题的新因素,建立新的模型。因此,必须注意在其限制条件下的“科学抽象”,数学演绎的结果也应该注意其成立的范围,不能绝对化。同时,通过数学演绎所得到的定理和公式,还必须回到实践中去,经过实践的检验,证明所得的定理和公式的正确性才能成立。所以,对数学演绎既要重视,又不可将其绝对化,把力学理论看做仅是数学演绎的结果而忽视实践的作用。

将实际工程问题抽象化为力学问题,然后用已有的力学理论为依据,运用数学工具进行演绎求得解决,然后将所得结果运用到实践中去检验其正确性。如此循环往复使认识不断深化,理论不断发展,这就是力学发展的道路,也是所有科学的发展道路。

3. 学习理论力学的目的

机械运动现象十分普遍,在我们周围的生活中和工程上处处可见,如机器的运转,车辆的行驶,水的流动,建筑物的振动等等,都是机械运动。理论力学是一门重要的技术基础课,学习理论力学,了解机械运动规律,就不仅能理解机械运动现象,而且还能用这些理论去解决一些简单的工程实际问题,也可以与其他专业知识结合起来共同解决较为复杂的问题。

理论力学还是学习一系列后继技术基础课和专业课的重要基础课程。例如材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学和振动理论等工科院校学生的后继课程,都要以理论力学的基本理论为基础。所以学习理论力学这门课程,不仅有助于培养学生解决工程实际问题的能力,也为后继课程的学习打下必要的基础。

4. 理论力学的发展简史

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,又在对日、月运行的观察和弓箭、车轮等的使用中认识了一些简单的运动规律,形成了力学学科的起点。

在中世纪一千多年漫长岁月里,虽然力学在应用方面也有一些进展,但由于封建统治,生产力和科学的发展都受到严重的阻碍,因而一切科学的发展都十分缓慢,力学也不例外。直到欧洲进入文艺复兴时期,商业资本兴起,手工业、航海工业、城市建筑和军事工业等领域都得到了空前的发展,从而促进了力学和其他科学的迅速发展,人们对力和运动之间的关系才逐渐有了正确的认识。

在16到17世纪,力学开始形成一门独立的系统的学科。哥白尼的太阳中心说引起了宇宙观的大革命,开普勒根据哥白尼的学说和大量的天文观测资料,得出了行星运行三大定律,成为后来万有引力定律的基础。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,于1687年在《自然哲学

的数学原理》这本书中,完整地提出了动力学的三大定律,并以这些定律为主要内容系统地阐述了动力学,使动力学成为严密的理论科学。牛顿定律是整个古典力学的基础。

18、19 世纪是理论力学发展的成熟时期。这一时期,伯努利以普遍形式表述了虚位移原理,欧拉建立并提出了质点及刚体的运动微分方程,达兰贝尔建立了著名的达兰贝尔原理,拉格朗日更以其名著《分析力学》而成为分析力学的奠基人,并使得分析力学成为理论力学的重要组成部分。19 世纪上半叶,由于大量使用机器形成了功和能的概念,发现了能量守恒和转化定律。该定律不仅对工程技术问题具有重大意义,而且沟通了机械运动和其他形式的运动之间的联系。同时,刚体动力学、运动稳定性和变质量动力学等方面都有许多重要的成就。

20 世纪以来,科学技术的发展变得更为迅速,现代工业、现代国防技术及其他新技术不断涌现和发展,各门学科都在不断充实、更新。同时,学科之间相互渗透,出现了一些新兴的边缘科学。就理论力学领域来说,振动理论、运动稳定性、飞行力学、变质量力学、多体动力学等许多方面都取得了巨大进展,并逐渐成为一些独立的分支。从 20 世纪 60 年代起,电子计算机应用的日益广泛,力学无论在其应用上或理论上都有了新的更大发展,力学研究出现勃勃生机。相信在新的世纪里,力学学科必将获得新的飞跃。

第 **I** 篇

静力学

第 **I** 章

静力学基本知识与物体的受力分析

1.1 静力学基本概念

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学。

1. 力学概念

力的概念是从劳动中产生,但其科学概念产生于牛顿定律。力是物体相互间的一种机械作用,它使物体的机械运动状态发生变化,同时还能使物体产生变形。物体相互间的机械作用形式多种多样,可归纳为两类。一类是物体相互间的直接接触作用,如弹力、摩擦力、流体压力和粘性阻力等;另一类是通过场的相互作用,如万有引力、静电引力等。力不能脱离物体出现,

而且有力必定至少存在两个物体。

尽管物体间相互作用力的来源和物理本质不同,但力对物体的作用效果,称为**力的作用效应**,主要有两个方面:①力能使物体的运动状态发生改变,称为力的**运动效应**或**外效应**;②力能使物体产生变形,称为力的**变形效应**或**内效应**。理论力学主要研究力的外效应。

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**,这三者称为力的**三要素**。力的大小反映物体相互间机械作用的强弱程度,它可以通过力的外效应和内效应的大小来度量。在国际单位制中,以“N”作为力的单位符号,称作牛,有时也可用“kN”作为力的单位符号,称作千牛。力的方向表示物体间的相互机械作用具有方向性,它包括力所顺沿的直线(称为**力的作用线**)在空间的方位和力沿其作用线的指向。力的作用点是物体间相互机械作用位置的抽象化。实际上物体相互作用的位置并不是一个点,而是物体的一部分面积或体积。如果这个面积或体积相对于物体很小或由于其他原因以致力的作用面积或体积可以不计,则可将它抽象为一个点,此点称为力的**作用点**,而作用于这个点上的力,称为**集中力**;如果力的作用面积或体积不能忽略,则称该力为**分布力**,例如水压力、风压力、重力等。

由力的三要素可知,力是**矢量**,可用一沿力的作用线的有向线段表示。此有向线段的起点或终点表示力的作用点,此线段的长度按一定比例尺表示力的大小,指向表示力的方向,故力是**定位矢量**。如果不在图中强调力的大小,线段的长度不须严格按照比例画出。如图1.1表示了物体在A点受到力 F 的作用。本书中用一个粗体字母表示力矢量,如 $\mathbf{F}$,而用普通字母表示力矢量的大小(又称为模),如 F 。而仅用符号 F 不能确定它所表示的力的作用点,这种只表示力的大小和方向,并可以从任一点画出的矢量称为**力矢**。

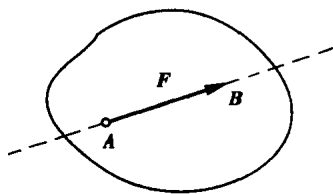


图 1.1

2. 刚体的概念

刚体是指在运动中和受力作用后,形状和大小都不发生改变,而且内部各点之间的距离不变的物体。刚体是从实际物体抽象得来的一种理想的力学模型,自然界中并不存在。实际上,任何物体在力的作用下都将发生变形,变形是物体的一个重要性质。但如果物体的变形尺寸与其原始尺寸相比很小,在所研究的力学问题中,忽略这种变形后不会引起显著的误差时,就可以把这个物体抽象化为刚体,从而使所研究的问题得到简化。当物体的微小变形在所研究的问题中转化为主要因素时,就不能再把此物体看做刚体,而必须视为变形体。

一种力学模型的建立,是人们对实际物体科学地进行抽象化的结果,它反映了实际物体在力学问题中的本质属性,这不仅是客观现实所容许的,而且也是认识过程所必要的。

由于静力学所研究的物体主要是刚体,所以静力学也称为刚体静力学。

3. 平衡的概念

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或作匀速直线平动的状态。在一般的工程技术问题中,平衡常常都是指相对于地球表面而言的。例如静止于地面上的房屋、桥梁、水坝等建筑物,在直线轨迹上作匀速运动的列车等,都是处于平衡状态的。平衡是物体机械运动的特殊情况。一切平衡都是相对的、有条件的和暂时的,而运动是绝对的和永恒的。

4. 力系的概念

作用于物体上的一群力,称为力系。根据力系中诸力作用线的分布情况可将力系分为:诸力作用线位于同一平面内,称为平面力系;作用线不在同一平面内,称为空间力系;作用线汇交于一点,称为汇交力系;作用线互相平行,称为平行力系;作用线既不汇交于一点又不平行的,称为一般力系;全部由力偶组成的力系称为力偶系。如果某两个力系分别作用于同一物体,其效应相同,则这两个力系称为等效力系。如果一个力系作用于物体而使物体处于平衡状态,则该力系称为平衡力系。

5. 静力学研究的两个基本问题

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学,它可归结为主要研究两个基本问题:

(1) 作用在刚体上的力系的简化(或合成)

用一个比原来力系简单但作用效果相同的力系代替原力系的过程称为力系的简化。特别地,如果一个力就可以等效地代替原力系,则称该力为原力系的合力,而原力系中的诸力称为该力的分力。对力系进行简化有利于揭示力系对刚体的作用效应。研究力系的简化既有利于导出力系的平衡条件,又为动力学奠定必要的基础。

(2) 力系的平衡条件及应用

作用于物体的力系使物体处于平衡状态所应满足的条件称为平衡条件。研究力系的平衡条件,并应用这些平衡条件解决工程技术问题,是静力学的主要内容。

静力学在工程技术中有着广泛的应用,是设计结构、构件和机械零件时的受力分析和静力计算的基础,同时也是学习许多后继课程的基础。

1.2 静力学基本公理

静力学公理是人们在生活和生产实践中长期、反复的观察、实验和总结出来的客观规律,并被认为是无须再证明的真理。它们是人们关于力的基本性质的概括和总结,是研究静力学的基础。

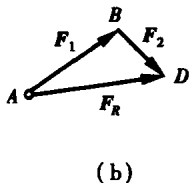
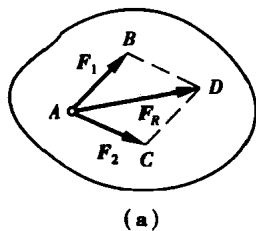


图 1.2

公理一 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力可以合成为作用于该点的一个合力,合力的大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定(图 1.2(a))。或者说,合力矢等于两个分力矢的矢量和,即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

为了简便,作图时可直接将力矢 $\mathbf{F}_2$ 移到力矢 $\mathbf{F}_1$ 的末端 B ,连接 A 、 D 两点即可求得合力矢 $\mathbf{F}_R$ (图 1.2(b))。这个三角形 ABD 称为力三角形,这样的作图方法称为力的三角形法则。

力的平行四边形法则是力系简化的基础。同时,它也是力分解的法则,根据这一法则可将

一个力分解为作用于同一点的两个分力。由于同一对角线可组成无穷多个不同的平行四边形,因此解答是不确定的,只有在另外附加足够条件的情况下,才能得到确定解答。

公理二 二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要充分条件是:这两个力大小相等、方向相反、作用线沿同一直线(图 1.3)。

这个公理揭示了作用于刚体上最简单力系平衡时所必须满足的条件,又称为二力平衡条件,它是推证力系平衡条件的基础。

仅在两点受力作用并处于平衡的构件称为二力构件,简称为二力体。二力体所受的二力必沿此二力作用点的连线,且等值、反向(图 1.4)。

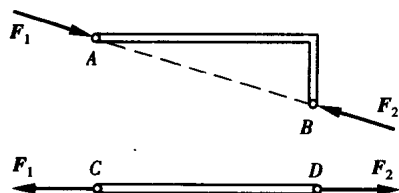


图 1.4

公理三 加、减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上,增加或减去一个平衡力系,而不改变原力系对刚体的作用效应。

本公理的正确性是显而易见的,但这个公理只对刚体才成立。

这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

推论一 力在刚体上的可传性

作用于刚体上的力,可以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。

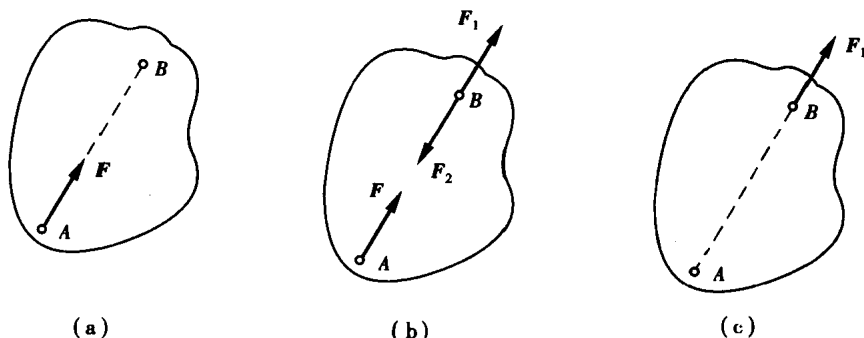


图 1.5

证明 设力 F 作用于刚体的 A 点(图 1.5(a))。在力 F 的作用线上任取 B 点,并且在 B 点加一对沿 AB 线的平衡力 F_1 和 F_2 ,且使 $F_1 = -F_2 = F$ (图 1.5(b))。由加减平衡力系公理知, F 、 F_1 、 F_2 三力组成的力系与原力 F 等效。再从该力系中去掉由 F 和 F_2 组成的平衡力系,则剩下的力 F_1 (图 1.5(c))与原力 F 等效。即把原来作用在 A 点的力 F 沿作用线移到了 B 点。证毕。

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效应的要素,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿其作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

推论二 三力平衡汇交定理

刚体在不平行的三个力作用下平衡时,此三力的作用线必共面且汇交于一点。

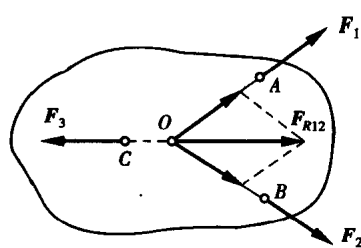


图 1.6

证明 设在刚体 A, B, C 三点上, 分别作用不平行的三个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 (图 1.6)。根据力的可传性, 将力 F_1, F_2 移到其汇交点 O , 然后根据力的平行四边形法则, 得合力 F_{R12} , 则力 F_3 应与 F_{R12} 平衡。由二力平衡公理知, F_3 与 F_{R12} 必共线, 由此知 F_3 的作用线必通过 O 点并与力 F_1, F_2 共面。证毕。

三力平衡汇交定理只说明了三力平衡的必要条件, 而不是充分条件。它常用来确定刚体在不平行三力作用下平衡时, 其中某一未知力的作用线方位。

公理四 作用与反作用定律

两物体间相互作用的力总是大小相等、方向相反、沿同一直线, 分别且同时作用在这两个物体上。

这个公理概括了任何两个物体间相互作用的关系。有作用力, 必定有反作用力, 两者总是同时存在, 又同时消失。

但须注意, 由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上, 因此不能认为作用力与反作用力相互平衡。

公理五 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡, 如将此变形体刚化为刚体, 其平衡状态不变。

这个公理指出, 刚体的平衡条件, 对于变形体的平衡也是必要的。因此, 可将刚体的平衡条件, 应用到变形体的平衡问题中去, 从而扩大了刚体静力学的应用范围, 这对于弹性体静力学和流体静力学都有着重要的意义。

必须指出, 刚体的平衡条件, 只是变形体的必要条件, 而非充分条件。例如, 绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡, 如将绳索刚化为刚体, 其平衡状态保持不变; 若绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡, 此时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力的作用下都是平衡的。这说明对于变形体的平衡来说, 除了满足刚体平衡条件之外, 还应满足与变形体的物理性质相关的附加条件 (如绳索不能承受压力)。

1.3 约束和约束反力

凡能在空间自由运动的物体称为**自由体**。例如空中飞行的飞机、火箭等。如果物体的运动受到一定的限制, 使其在某些方向的运动成为不可能, 则这种物体称为**非自由体**。例如, 用绳索悬挂的重物, 搁置在墙上的梁, 沿轨道运行的火车等。

对非自由体的运动所预加的限制条件称为**约束**。约束总是通过物体间的直接接触形成的, 构成约束的周期物体称为**约束体**, 有时也称为**约束**。如上述中绳索是重物的约束, 墙是梁的约束, 轨道是火车的约束。它们分别限制了各相应物体在约束所能限制的方向上的运动。

既然约束限制着物体的运动, 那么当物体沿着约束所限制的方向有运动趋势时, 约束对该物体必然有力作用, 以阻碍物体的运动, 这种力称为**约束反力**或**约束力**, 简称**反力**。约束反力的方向总是与约束所能阻止的物体的运动趋势的方向相反, 它的作用点就是约束与被约束物体的接触点, 而约束反力的大小是未知的。在静力学中, 约束对物体的作用, 完全取决于约束反力。

与约束反力相对应,凡能主动引起物体运动或使物体有运动趋势的力,称为主动力。如重力、土压力、水压力等。作用在结构物体上的主动力称为荷载。

通常主动力是已知的,约束反力是未知的。约束反力由主动力引起且随主动力的改变而改变。同时,约束的类型不同,约束反力的作用方式也不相同。工程中约束的构成方式是多种多样的,为了确定约束反力的作用方式,必须对约束的构成及性质进行具体分析,并结合具体工程,进行抽象简化,得到合理、准确的约束模型。下面介绍几种在工程中常见的约束类型及其约束反力的特性。

1. 柔体约束

由柔软而不计自重的绳索、胶带、链条等所构成的约束统称为柔体约束,简称柔索。由于柔索约束只能限制物体沿柔索中心线伸长方向的运动,而不能限制物体其他方向的运动,所以柔索的约束反力必定作用在接触点,沿着柔索的中心线且背离被约束的物体,表现为拉力,用符号 F_T 表示。如图 1.7 所示。

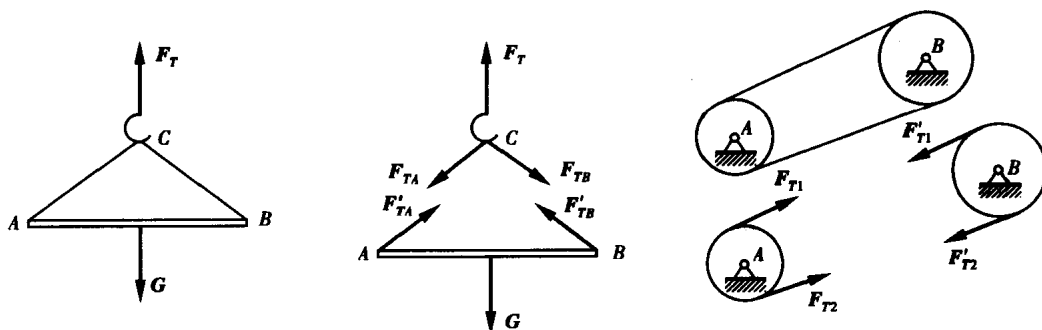


图 1.7

2. 光滑接触面约束

两物体直接接触,当接触面光滑,摩擦可忽略不计时,就属于光滑接触面约束。这种约束只能限制物体沿着接触面在接触点的公法线方向且指向约束体的运动,而不能限制物体沿接触处切面方向或离开接触面的运动。因此,光滑接触面约束的约束反力通过接触点,方向沿接触面的公法线并指向被约束的物体(即为压力)。通常用 F_N 表示。如图 1.8 所示。

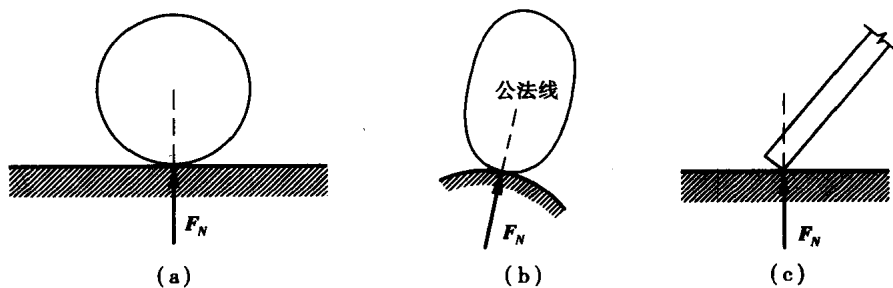


图 1.8