

新世纪高级应用型人才培养系列教材

主 编 汪 丽
副主编 李华志
吕晓军
段跟定

工程力学

GONGCHENGLIXUE



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

目录

第一章 绪论 1
第一节 工程力学的研究对象 1
第二节 工程力学在工程中的应用 2
第三节 工程力学的发展 3
第四节 工程力学与其他学科的关系 4
第五节 工程力学在工程中的地位 5
第六节 工程力学在工程中的作用 6
第七节 工程力学在工程中的发展 7
第八节 工程力学在工程中的未来 8
第九节 工程力学在工程中的挑战 9
第十节 工程力学在工程中的机遇 10
参考文献 11
附录 12
索引 13

新世纪高级应用型人才培养系列教材

主 编 汪 丽
副主编 李华志
吕晓军
段跟定

工程力学

GONGCHENGLIXUE

内 容 提 要

本书主要阐述工程力学的基础理论及其应用。全书共两篇:第一篇是静力学,主要介绍物体在力系作用下的平衡规律及其工程应用,由静力学基础、平面力系的平衡、空间力系、摩擦共4章构成;第二篇是材料力学,主要介绍构件在外力作用下发生变形时的承载能力问题,对实际工程中的构件进行强度、刚度和稳定性等方面的计算,由材料力学基础、轴向拉伸与压缩变形、剪切变形、扭转变形、弯曲变形、应力状态及强度理论、组合变形、压杆稳定共8章内容构成。

本书可作为高等院校应用型本科土建类、机械类、机电类、近机械类专业的“工程力学”课程教材,也可作为相关专业的教师及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 汪丽主编. —上海:同济大学出版社,
2018.8

ISBN 978-7-5608-7844-7

I. ①工… II. ①汪… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 077435 号

新世纪高级应用型人才培养系列教材

工程力学

主 编 汪 丽 副主编 李华志 吕晓军 段跟定
责任编辑 马继兰 责任校对 徐逢乔 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
排 版 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 17.25
字 数 430 000
版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-7844-7

定 价 49.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

工程力学是高等院校土建类、机械类、机电类、近机械类专业必修的一门重要技术基础课,在基础课和专业课之间起着桥梁和纽带的作用。通过工程力学课程的学习,为后续专业课的应用和拓展奠定了理论基础,也为大学生和工程技术类人员在实际工作中正确分析和解决生产中相关的力学问题提供了知识上的保证。

目前市场上《工程力学》教材很多,主要分为本科和专科两种类型,本科教材内容详细、系统、全面,理论知识讲解比较深入;专科教材内容精炼简单,易于理解和学习。随着高等教育大众化、普及化的进程,应用型本科院校越来越多,对于应用型本科院校的学生来讲,专科教材太简单,传统本科教材又有些偏难,所以编者根据新形势下应用型本科院校教学的实际情况,结合当前应用型本科专业规划建设需要,并考虑近年来教师进行授课时选择教材难的情况,编写了本教材。

本教材编写的主要目的在于贴合培养应用型人才的培养要求,借鉴国内外同类教材的优点,在保持基本理论、基本概念的同时突出应用性,通过工程力学的系统学习,培养读者养成理性的思维方法,并使之具有较好的实际应用能力,着眼点不在于繁杂的推导及论证,而是在有限的学时内,尽量增大教材的信息量、实用性及适用范围。

本教材共有12章,第1章至第4章由李华志编写并完成电子教案,第5章至第9章由汪丽编写并完成电子教案,第10章至第12章由吕晓军编写并完成电子教案,汪丽和段跟定负责统稿和审阅。

在编写教材的过程中,编者翻阅了大量的工程力学、理论力学、材料力学课程的教材和资料,在此,对这些教材和资料的编者表示衷心的感谢。由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者和同行专家批评指正,以期今后改进提高。

目录

静力学 林 林

前言

绪论	1
----	---

静力学篇

1 静力学基础	7
1.1 静力学基本概念	7
1.2 静力学公理	8
1.3 约束与约束反力	10
1.4 物体的受力图	17
思考题与习题	20
2 平面力系的平衡	22
2.1 力矩及合力矩	22
2.2 力偶及力偶矩	24
2.3 平面汇交力系的平衡	26
2.4 平面力偶系的平衡	33
2.5 平面任意力系的平衡	36
2.6 物体系统的平衡	48
2.7 平面简单桁架的内力计算	51
思考题与习题	55
习题参考答案	65
3 空间力系	67
3.1 空间汇交力系	67
3.2 空间力对点之矩和力对轴之矩	71
3.3 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	75
思考题与习题	77
习题参考答案	79

4 摩擦	81
4.1 滑动摩擦.....	81
4.2 摩擦角和自锁现象.....	83
4.3 考虑摩擦时物体的平衡问题.....	84
4.4 滚动摩阻的概念.....	89
思考题与习题	91
习题参考答案	93

材料力学篇

5 材料力学基础	97
5.1 变形固体及其基本假定.....	97
5.2 杆件变形形式及其分析方法.....	98
5.3 平面图形的几何性质	101
思考题与习题.....	110
习题参考答案.....	111
6 轴向拉伸与压缩变形	112
6.1 轴向拉压杆的内力	113
6.2 轴向拉压杆的应力	116
6.3 轴向拉压杆的变形	119
6.4 材料在拉伸和压缩时的力学性能	123
6.5 轴向拉压杆的强度计算	129
6.6 轴向拉压杆的超静定问题	133
思考题与习题.....	134
习题参考答案.....	137
7 剪切变形	139
7.1 剪切变形与强度计算	140
7.2 挤压变形与强度计算	141
思考题与习题.....	145
习题参考答案.....	147
8 扭转变形	148
8.1 圆轴扭转变形时的内力	149
8.2 圆轴扭转变形时的切应力	151
8.3 圆轴扭转的强度计算	156
8.4 圆轴扭转时的变形及刚度计算	159
思考题与习题.....	163

习题参考答案	165
9 弯曲变形	167
9.1 梁的弯曲内力	168
9.2 梁的弯曲应力	182
9.3 梁的强度计算	188
9.4 梁的变形及刚度计算	192
思考题与习题	197
习题参考答案	202
10 应力状态及强度理论	203
10.1 平面应力状态分析	204
10.2 广义胡克定律	209
10.3 强度理论	210
思考题与习题	215
习题参考答案	217
11 组合变形	218
11.1 弯曲与压缩(拉伸)组合变形的强度计算	219
11.2 斜弯曲变形的强度计算	223
11.3 弯曲与扭转组合变形的强度计算	228
思考题与习题	231
习题参考答案	233
12 压杆稳定	235
12.1 细长压杆的临界力	236
12.2 压杆的临界应力	238
12.3 压杆的稳定计算	243
思考题与习题	249
习题参考答案	253
附录 常用型钢规格表	255
参考文献	267

绪论

工程力学是研究物体机械运动规律的学科。机械运动,是指物体在空间的位置随时间的变化,固体的运动和变形、气体和液体的流动等都属于机械运动。机械运动是最简单的运动形式之一,此外,还有发热、发光、电磁现象、化学过程,以及更高级的人类思维活动等各种不同的运动形式。力学不具有某些工程学科的经验基础,即不依赖于经验和独立观测;力学严谨,强调演绎,看上去更像是数学,但是力学不是抽象的纯理论学科。力学研究物理现象,其目的是解释和预测物理现象,并以此作为工程应用的基础。

力学可以追溯到古希腊亚里士多德和阿基米德时代,我国古代也有关于力学研究的文献记载。17世纪,牛顿提出三大定律和万有引力定律,后来达朗贝尔、拉格朗日和哈密顿给出了这些原理的其他形式。讨论固体材料的力学也起源于17世纪,当时的研究对象主要是木材和石料,伽利略研究了梁横截面上的正应力分布规律。19世纪中叶,研究对象转变为以钢材为主体的金属材料。钢材的特点,使连续均匀、各向同性等基本假设以及线弹性问题的胡克定律成为当今变形体材料力学的基础。

工业革命以来,由于科学发展和工程技术的需要,逐步形成了现代的力学学科,计算机技术的日益普及,更是推动了工程力学数值计算的发展,这对于工程力学的发展起到了巨大的推动作用。在力学理论分析中,人们可以借助计算机推导复杂公式,从而求得复杂的解析解;在实验研究中,计算机不仅可以采集和整理数据,绘制实验曲线,显示图形,还可以帮助人们选用最优参数。许多工程实例,如建筑工程、桥梁工程、水电工程、海洋工程、航空航天工程、机械工程等,研究和设计过程中都离不开工程力学的知识。

一、工程力学的研究内容

工程力学学科涉及众多的力学分支及广泛的工程技术内容,本课程只是其中最基础的部分,即静力学和材料力学的基础部分。

静力学是研究物体在力作用下的平衡规律及其在工程中的应用。

材料力学是研究构件在外力作用后发生变形时的承载能力问题,对实际工程中的构件做强度、刚度和稳定性等方面的计算。

二、工程力学的研究对象

工程中涉及机械运动的物体有时十分复杂,在研究物体的机械运动时,必须忽略一些次要因素的影响,对其进行合理的简化,从而抽象出力学模型。

工程力学的研究对象是由固体材料制成的构件,例如,机械中的转动轴、连杆(图0-1),供

暖系统中管道及管道支架(图 0-2),建筑结构中的梁、柱、楼板(图 0-3),桥梁工程中的桁架(图 0-4)等。这些构件在正常工作情况下,都要承受各种各样的力,如重力、风力、摩擦力等。受力后,构件的几何形状和尺寸都要发生改变,这种改变称为变形,而发生变形的这些构件称为变形体。

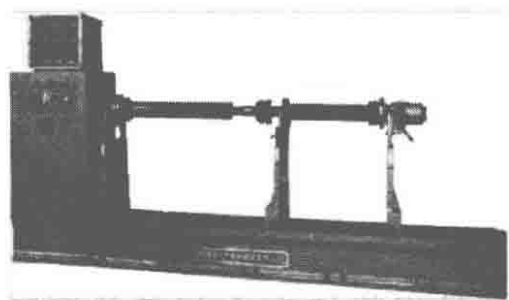


图 0-1 机械传动、连杆

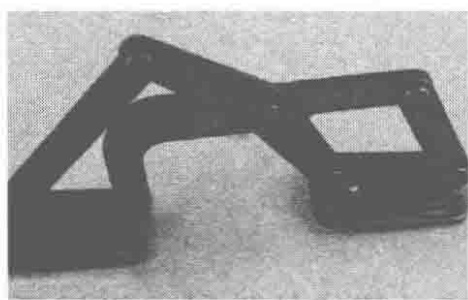


图 0-2 管道及支架



图 0-3 梁、柱、楼板

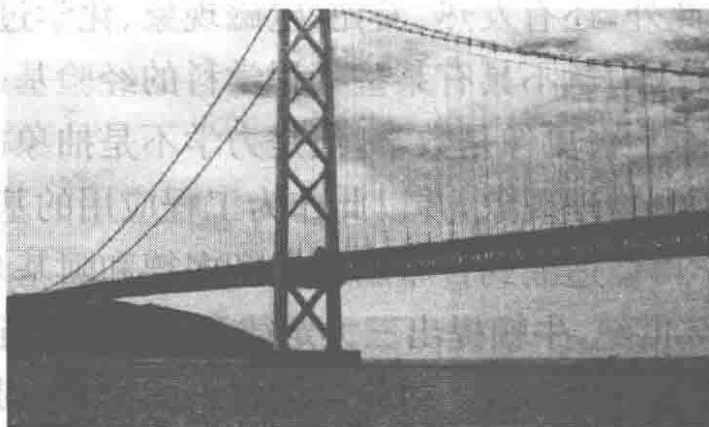


图 0-4 桥梁

当研究构件的受力时,在大多数情形下构件的变形都比较小,故可忽略这种变形对构件的受力分析产生的影响,即认为构件是不发生变形的,静力学中将此类变形体简化为不变形的刚体,即研究对象为刚体模型。

当研究作用在构件上的力与变形规律时,即使变形很小,也不能忽略,材料力学的研究对象即为变形体,且仅限于杆、轴、梁等物体,其几何特征是纵向尺寸远大于横向尺寸,大多数工程结构的构件或机器的零部件都可以简化为杆件。

三、工程力学的任务

先确定构件的受力大小、方向,再分析这些构件能否承受这些力,能否在外力作用下安全可靠地工作。为确保正常工作,必须满足以下三个方面的基本要求:

(1) 构件应具有足够的抵抗破坏的能力,即具有足够的强度。例如,支撑管道的支架不允许折断,吊起重物的钢索不能被拉断,飞机的机翼不能断裂等。

(2) 构件应具有足够的抵抗变形的能力,即具有足够的刚度。例如,厂房的吊车梁,如果出现过大的弯曲变形,将会影响吊车的平稳运行,使其不能正常工作。

(3) 构件应具有足够的抵抗失稳的能力,即具有足够的稳定性。例如,千斤顶的螺杆、内燃机的挺杆等,工作时应始终保持原有的直线平衡状态。

为保证上述的承载能力,就需要构件具有较大的截面尺寸和较好的材料。但是,构件又必须符合经济的要求,即所用的材料尽可能得少,造价尽可能得低。显然,安全性和经济性是矛盾的。

工程力学的任务就是:①为构件提供受力和静力计算的方法;②研究构件的强度、刚度、稳定性和材料的力学性质;③提供计算方法和实验方法,在保证构件安全可靠及经济合理的前提下,选择合适的材料、确定合理的截面形状和尺寸。

工程力学的研究方法有理论方法、实验方法和计算机数值分析方法,在解决实际工程中的力学问题时,首先从实践出发,经过抽象化、综合、归纳,运用数学推演得到定理和结论,对于复杂的工程问题往往借助计算机进行数值分析和公式推导,最后通过实验验证理论和计算结果的正确性。

工程力学是一门实用性很强的专业基础课,通过本课程的学习,可为后继专业课程(如流体力学、结构力学、建筑结构、机械基础、管道材料、锅炉管道安装及施工等)的学习打下必要的基础,同时,通过学习,能初步运用力学理论和方法解决工程实践中的技术问题,培养我们正确分析问题和解决问题的能力。

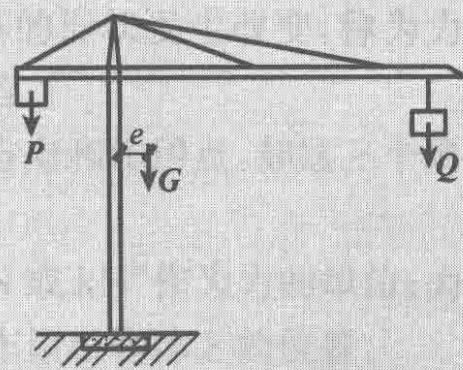
静力学篇

静力学是研究物体在力系的作用下处于平衡的规律,即研究物体平衡时作用在物体上的力应该满足的条件。静力学主要研究三方面的问题:①物体的受力分析;②力系的简化与等效;③力系的平衡条件及应用。

力系是指作用于物体上的一群力。平衡是指物体相对于地球保持静止或作匀速直线运动的状态。例如,房屋、桥梁、在直线轨道上匀速行驶的火车、沿直线匀速起吊的构件等,都是平衡的实例。

静力学的理论和方法在工程中有着广泛的应用,土木工程中房屋、桥梁、水坝、闸门中的许多机器零件和结构件,如机器机架、传动轴、起重机的起重臂、车间天车的横梁等(右图),正常工作时处于平衡状态或可以近似地看作平衡状态。为了合理设计这些零件或构件的形状、尺寸,选用合理的材料,往往需要首先进行静力学分析计算,然后对它们进行强度、刚度和稳定性计算。例如,塔吊起吊重物(右图),需根据平衡条件确定塔吊的起重量。进行力学计算时,首先要进行受力分析,即分析研究对象受到哪些力的作用,以及每个力的作用位置和方向,然后根据平衡条件求出未知力。

静力学的理论和计算方法是土木工程、机械零件和结构件静力设计的基础,同时,静力学是动力学的特例,是研究动力学的基础。



塔吊图

静力学基础

学习目标与要求

- ❖ 了解力、质点和刚体、平衡的概念。
- ❖ 理解静力学的 5 个公理和 2 个推论。
- ❖ 了解约束的概念,掌握工程中常见的约束类型及其相应约束反力的画法。
- ❖ 熟练掌握受力分析的方法,准确地画出研究对象的受力图。

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力的概念

力是物体之间相互的机械作用,这种机械作用可使物体的运动状态或形状发生改变。力使物体的运动状态发生改变,称为力的外效应或运动效应;力使物体的形状发生改变,称为力的内效应。前者是静力学研究的内容,而后者是材料力学研究的内容。

实践表明,力对物体的作用效应取决于力的三要素:力的大小、方向和作用点,如这三个要素任何一个发生改变,力的作用效果就会改变。

力的大小表示物体间相互作用的强弱程度,国际单位制中,以“N 或 kN”作为力的单位;力的方向通常包含力的方位和力的指向两个含义;力的作用点表示力作用在物体上的位置。

根据力的三要素可知,力是定位矢量,我们可用图示法表示力的矢量,即用一带箭头的有向线段表示力的三要素。有向线段的长度按选定比例尺表示力的大小,线段的方位(与某定直线的夹角)和箭头的指向表示力的方向,线段的起点或终点表示力的作用点(图 1-1)。本书用黑体字母如 $\mathbf{F}$, $\mathbf{P}$ 等表示力的矢量,而用对应的细体字母如 F , P 等表示力矢量的大小,手写时,用上方加一横线的细体字母如 $\bar{F}$, $\bar{P}$ 等表示力的矢量。第二篇“材料力学”部分中涉及力,一般只研究力的大小,故用细体字母如 F , P 等表示。

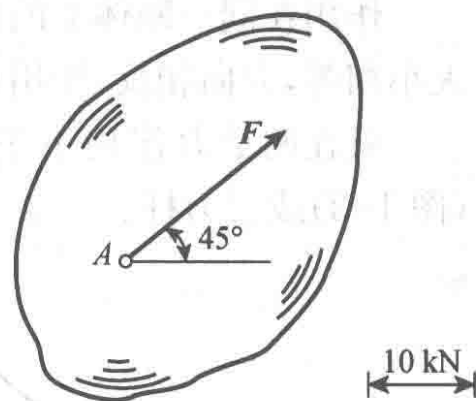


图 1-1 力的矢量表示法

力系是指作用在物体上的一群力;如果作用在物体上的一个力系可以用另外一个力系代替,而不改变原力系对物体所产生的运动效应,那么这两个力系互为等效力系;如果一个力与一个力系等效,则这个力称为该力系的合力。

1.1.2 质点和刚体的概念

当所研究物体的运动范围远远超过其本身的几何尺度时,物体的形状和大小对运动的影响很小,这时可将其抽象为只有质量而没有体积的质点。由若干质点组成的系统,称为质点系。

任何物体在外力的作用下都要发生几何形状的改变,均为变形体。但是,在一般情况下所发生的变形与物体的几何尺寸相比较都很微小,我们在研究物体的平衡或运动时,就可忽略微小变形,认为物体是不发生变形的,即刚体。静力学中所研究的物体均视为刚体。

同一个物体在不同的问题中,有时可看作质点,有时可看作刚体,有时则必须看作变形体。例如,当讨论地球绕太阳运动时,视地球为质点;当讨论地球自转时,视地球为刚体;当讨论地震时,必须将地球看作变形体。同样,当研究车辆离出发点距离时,车辆可看作质点;当研究车辆转弯时,车辆可看作刚体;当研究车辆振动时,车辆的一些部件则要看作变形体。

1.1.3 平衡的概念

物体相对于地面保持静止或匀速直线运动的状态称为平衡。例如,桥梁、机床的床身、高速公路上匀速直线行驶的汽车等,都处于平衡状态。物体的平衡是物体机械运动的特殊形式,平衡规律远比一般的运动规律简单。

如果物体在某一力系作用下处于平衡状态,则此力系称为平衡力系。力系使物体平衡时所满足的条件称为平衡条件。力系的平衡条件,在工程中有着十分重要的意义。

1.2 静力学公理

人们在长期的生活和生产活动中,经过实践、认识、再实践、再认识的过程,不仅建立了力的概念,而且总结出力所遵循的许多规律,它们是静力学的基础,是分析问题和解决问题的重要依据。

公理 1:二力平衡条件

作用在同一刚体上的两个力(图 1-2),使刚体处于平衡的必要和充分条件是:这两个力的大小相等,方向相反,作用在同一条直线上。

只在两个力作用下平衡的刚体称为二力体,若刚体是构件或杆件,也称为二力构件(图 1-3)或二力杆。

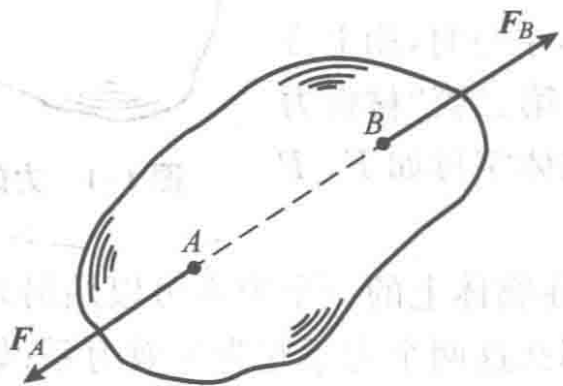


图 1-2 二力平衡条件

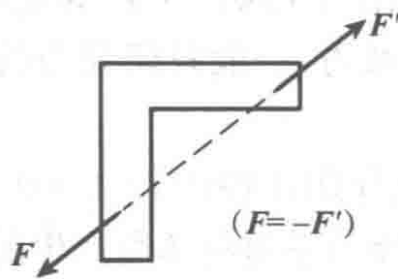


图 1-3 二力构件

公理 2: 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的原有力系中, 加上或减去任意一个平衡力系, 并不改变原力系对刚体的作用效应。因为平衡力系不会改变物体的运动状态, 如图 1-4 所示。这个公理是研究力系的简化问题的重要依据。

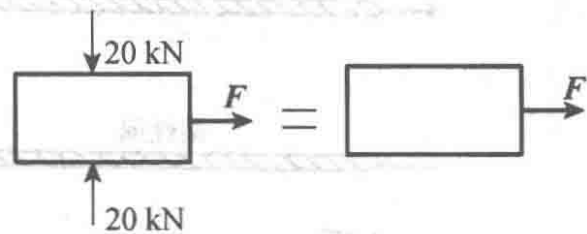


图 1-4 加减平衡力系

公理 3: 力的平行四边形法则

作用于刚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, 合力的大小和方向可由以这两个分力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定, 如图 1-5 所示。即合力的矢量等于两个分力的矢量和:

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

这个公理是复杂力系简化的基础。在力学计算中, 经常将一个已知力分解为两个互相垂直的分力, 如图 1-6 所示, 两个分力的大小为

$$F_x = F \cos \alpha$$

$$F_y = F \sin \alpha$$

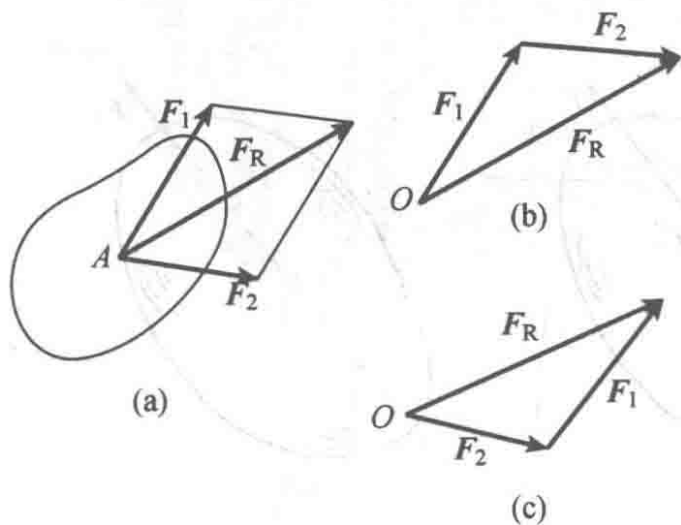


图 1-5 力的平行四边形法则

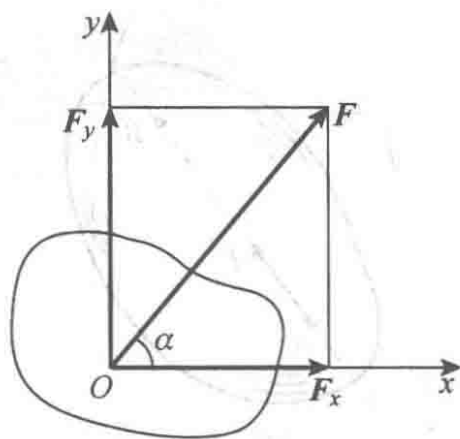


图 1-6 力的分解

公理 4: 作用与反作用定律

两个物体间的作用力和反作用力, 总是大小相等, 方向相反, 沿同一直线, 并分别作用在这两个物体上。若用 $\mathbf{F}$ 表示作用力, 又用 $\mathbf{F}'$ 表示反作用力, 则 $\mathbf{F} = -\mathbf{F}'$ 。

物体间的作用力与反作用力总是同时出现, 同时消失。这个公理概括了任何两物体间的相互作用的关系, 不论对刚体或变形体, 不管物体是静止的还是运动的都适用。应该注意, 作用力与反作用力分别作用在两个物体上, 因此, 不能将作用与反作用定律与二力平衡条件混淆起来。

公理 5: 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, 其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看作为刚体模型的条件。如图 1-7 所示, 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。而绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡, 这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

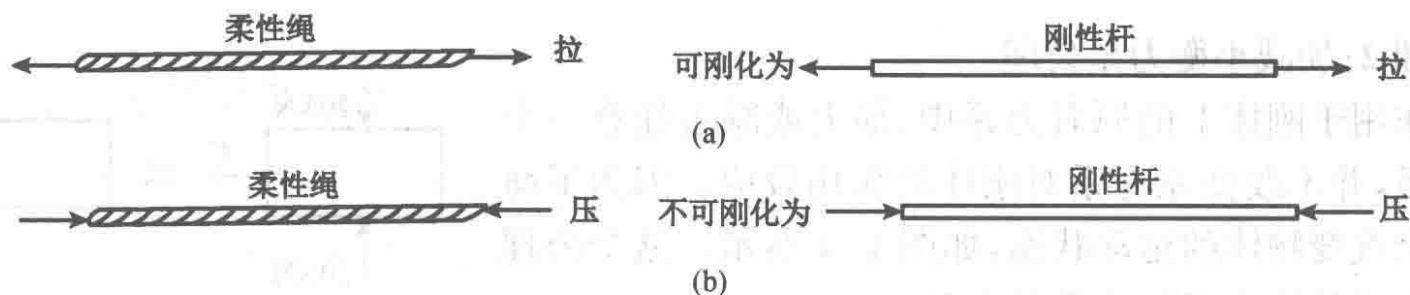


图 1-7 刚化原理

由此可见,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力学的基础上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

推理 1:力的可传性原理

作用于刚体上某点的力,可沿其作用线移动到同一刚体内任意一点,而不改变原力对刚体的作用效应。

证明:设在刚体上 A 点作用力 F ,如图 1-8(a) 所示。根据加减平衡力系公理,在力 F 的作用线上任一点 B 加上一对平衡力 F_1 与 F_2 ,且使 $F_1 = F = F_2$,如图 1-8(b) 所示。由于 F 和 F_2 是一个平衡力系,可以去掉,所以只剩下作用在 B 点的力 F_1 ,如图 1-8(c) 所示。显然力 F_1 和原力 F 是等效的,这就相当于把作用于 A 点的力 F 沿其作用线移到 B 点。值得注意的是,该推理只适用于同一刚体,不适用于变形体。

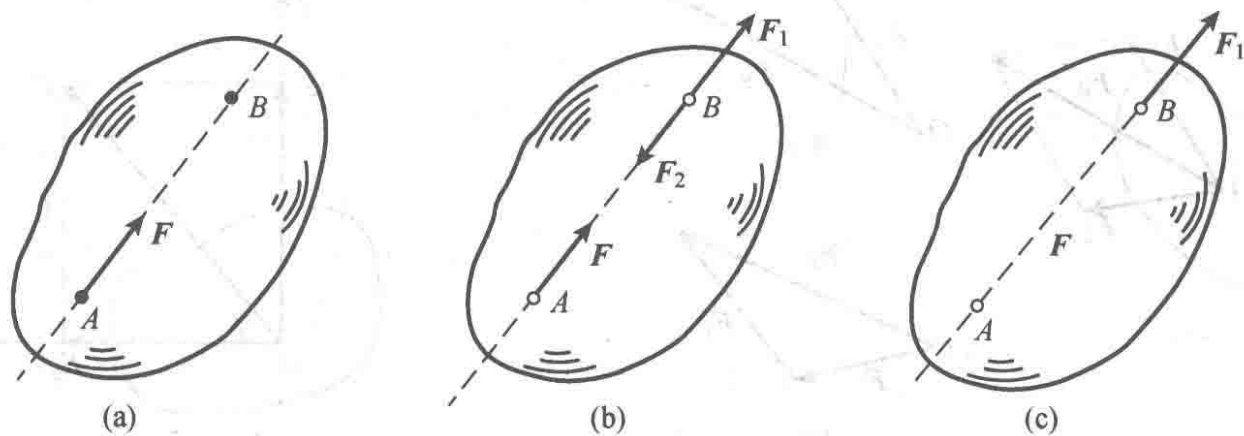


图 1-8 力的可传性原理

推理 2:三力平衡汇交定理

一刚体受共面不平行的三个力作用而处于平衡状态时,此三个力的作用线必定汇交于一点,如图 1-9 所示。证明过程:先用推理 1 的力的可传性原理把其中两个力交于一点,然后用公理 3 的力的平行四边形法则将这两个力合成为一个合力,把刚体由受三力作用转化为二力作用情况,最后利用公理 1 的二力平衡条件,即可得出此推理 2 的三力平衡汇交定理。通常用三力平衡汇交定理来确定未知力的方向。

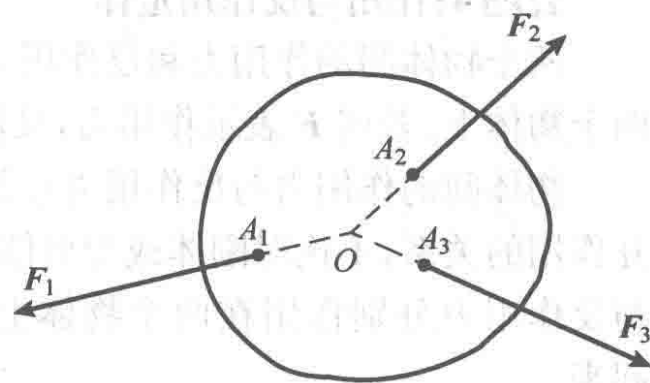


图 1-9 三力平衡汇交定理

1.3 约束与约束反力

当进行力学计算时,首先要进行受力分析,而力学模型的建立是分析的基础。在研究力学