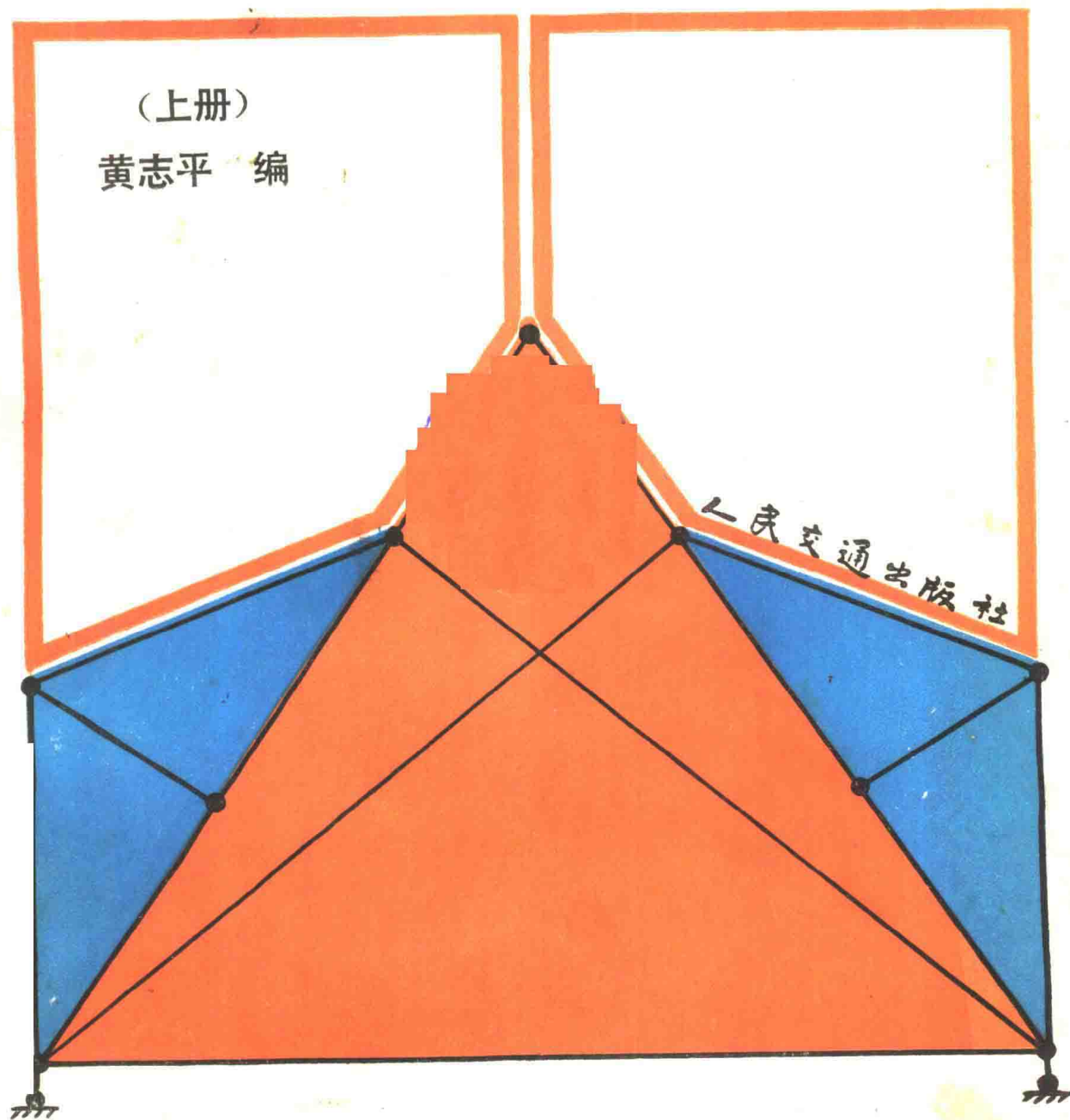


工程力学

(上册)

黄志平 编

人民交通出版社



Gongcheng Lixue

工 程 力 学

(上 册)

黄 志 平 编

人 民 交 通 出 版 社

(京)新登字 091 号

内 容 提 要

本书分上、下两册,上册为静力学部分,下册为材料力学部分。上册共八章,主要阐述静力学公理、物体的受力分析、平面汇交力系、力偶和力矩、平面一般力系、摩擦、空间力系以及重心等方面的基础内容。

本书为交通系统电视中专教材,也可供土建工程系统技工、干部自学或培训班使用,也可供其它类型中专相同或相近专业教学使用。

工 程 力 学

(上 册)

黄 志 平 编

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各 地 新 华 书 店 经 销

北京市怀柔黄坎印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.5 字数: 252 千

1993年5月 第1版

1993年5月 第1版 第1次印刷

印数: 0001~7730册 定价: 6.00 元

ISBN 7-114-01590-9

UDC 69028

序 言

本书为交通系统电视中专公路与桥梁工程专业编写的,亦可作为其它类型中专相同或相近专业教学参考。全书分为上、下两册,上册为静力学,下册为材料力学。如作为教材,总教学时数约130学时。

本书原系交通部电视中等专业学校内部教材,1986年付印。此次出版,由编者根据新教学大纲和几年来的使用情况,对全书作了修订。修订时参照了国家教委1987年审定的全日制中专土建类专业建筑力学教学大纲和现行有关中专教材。

考虑到成人教育的特点,本书在内容、文字、体例等方面,力求重点突出、深入浅出、便于教学,并尽量符合工程实际需要。书中每至复习思考题和习题为一个单元,每一单元的教学时数大致为2或3学时。

工程力学是一门技术基础课,理论性、系统性较强。学员在听完每个单元的讲课后,应及时阅读教材相应部分的内容,掌握有关概念、理论和方法,并在此基础上回答复习思考题和完成必需的作业。

本书已由交通部电视中专录制教学录像带,上册录像40学时,下册录像70学时。相配套的教学辅导用书(含习题答案和复习思考题、习题选解)随后亦将付印。

限于编者水平,书中的缺点错误,请读者批评指正。

编 者

1992年9月

绪 论

(一) 静力学的内容

物体在空间的位置随时间的改变,称为**机械运动**。机械运动是人们生活和生产实际中最常见的一种运动,例如星球的运行、机器的运转、车辆船只的行驶等。研究物体机械运动一般规律的学科称为**理论力学**。

物体相对于周围物体保持静止或作匀速直线运动,称为**平衡**。生活里和工程上所说的平衡,一般都是相对于地面而言的。公路、桥梁、房屋、水坝等建筑物,以及被起重机吊着匀速直线升起的构件,都是平衡的实例。

静力学研究物体在力系作用下的平衡条件。

所谓**力系**,是指作用于同一研究对象上的一群力。平衡是机械运动的特殊形式。物体处于平衡状态时,加速度等于零。研究物体平衡条件的静力学是理论力学的一个组成部分。

静力学讨论的主要问题有:

1. 物体的受力分析

即分析某个物体总共受哪几个力作用,以及每个力的大小、方向、作用点位置如何。

物体受力分析的结果常用物体的受力图来表示。受力图是物体力学计算的依据。

2. 力系的简化

即讨论如何将作用在物体上的较复杂的力系,用一个等效的简单力系或力来代替。

力系的简化问题实际上就是力系的合成问题。研究力系的简化主要是为了导出力系的平衡条件。

3. 建立各种力系的平衡条件

即研究物体平衡时,作用在物体上的各种力系所需满足的条件。

力系的平衡条件也常称为**物体的平衡条件**,它在工程实际中有着十分重要的意义。在设计建筑物的构件、作匀速转动的机械零件和工程结构时,需要先分析物体的受力情况,再应用平衡条件计算其中的未知力,最后按照材料的力学性能确定它们的截面尺寸。在公路与桥梁工程、房屋建筑工程、水利工程等施工中,也有许多问题需要应用静力学知识来解决,例如构件运输、吊装等。静力学是工程结构设计和施工时进行力学计算的基础。

由静力学和材料力学两部分内容组成的工程力学课程,是土建类专业一门比较重要的技术基础课。它不仅可直接用于解决工程实际问题,还为学习结构力学、土力学、地基和基础、结构设计原理、桥梁工程等课程奠定必须的基础。每个学习这门课程的学员,都应努力把这门课学好。

(二) 静力学的研究对象

静力学的研究对象是刚体。

理论力学的静力学将自己所研究的物体抽象为**刚体**。所谓**刚体**,是指在任何外力作用下大小和形状保持不变的物体。实际上,自然界里并无刚体存在,所有的各种真实物体在力的作

用下总会或多或少地发生变形。但是实践表明，工程结构和构件的变形通常都极为微小。例如建筑物中的梁，其中央处最大的下垂一般只有梁长度的 $\frac{1}{250} \sim \frac{1}{300}$ ，这样微小的变形，对物体平衡问题的研究影响不大。我们略去这些微小变形，把受力物体视作刚体，就能使静力学问题大为简化。

刚体是一种理想化的力学模型。

出于习惯，以后我们仍经常将刚体称为物体。因为理论力学的静力学所研究的物体只限于刚体，所以它又称为**刚体静力学**，以区别于其它静力学，如散体静力学、流体静力学等。以刚体为研究对象得出的力系的平衡条件，一般可以应用于变形很小的变形体的平衡情况。刚体静力学是研究变形体力学的基础。

目 录

绪 论	1
第一章 静力学公理	1
§ 1-1 力和力系	1
§ 1-2 静力学公理	2
复习思考题	6
习题	7
学习指导	8
第二章 物体的受力分析	10
§ 2-1 主动力、约束和约束反力	10
§ 2-2 物体的受力分析和受力图	15
复习思考题 2-1	18
习题 2-1	19
习题课一 画分离体的受力图	20
复习思考题 2-2	24
习题 2-2	25
学习指导	26
第三章 平面汇交力系	28
§ 3-1 平面汇交力系合成的几何法	28
§ 3-2 平面汇交力系平衡的几何条件	31
复习思考题 3-1	35
习题 3-1	36
§ 3-3 平面汇交力系合成的解析法	37
§ 3-4 平面汇交力系平衡的解析条件	42
复习思考题 3-2	44
习题 3-2	44
习题课二 解平面汇交力系的平衡问题	45
复习思考题 3-3	52
习题 3-3	52
学习指导	54
第四章 力偶和力矩	56
§ 4-1 力偶的概念	56
§ 4-2 平面力偶系的合成与平衡	58
复习思考题 4-1	61
习题 4-1	62

§ 4-3 力对点的矩	63
§ 4-4 力的平移定理	67
复习思考题 4-2	69
习题 4-2	69
学习指导	71
第五章 平面一般力系	72
§ 5-1 平面一般力系向作用面内任一点简化	72
§ 5-2 平面一般力系简化结果的讨论	74
复习思考题 5-1	77
习题 5-1	78
§ 5-3 平面一般力系的平衡方程	79
复习思考题 5-2	86
习题 5-2	87
§ 5-4 平面平行力系的平衡方程	88
§ 5-5 静定与静不定问题	91
复习思考题 5-3	92
习题 5-3	93
§ 5-6 物体系的平衡	94
复习思考题 5-4	99
习题 5-4	99
§ 5-7 平面静定桁架的内力计算	101
复习思考题 5-5	105
习题 5-5	106
习题课三 解析法解平面一般力系的平衡问题	107
复习思考题 5-6	110
习题 5-6	111
学习指导	112
第六章 摩擦	114
§ 6-1 工程中的摩擦现象	114
§ 6-2 滑动摩擦	115
§ 6-3 考虑摩擦时物体的平衡问题	116
复习思考题 6-1	119
习题 6-1	120
§ 6-4 摩擦角和自锁现象	121
§ 6-5 滚动摩擦	124
复习思考题 6-2	126
习题 6-2	126
学习指导	127
第七章 空间力系	129
§ 7-1 力在空间直角坐标轴上的投影	129

§ 7-2 力沿空间直角坐标轴的分解	132
§ 7-3 空间汇交力系的合成与平衡方程	132
复习思考题 7-1	134
习题 7-1	134
§ 7-4 力对轴的矩	136
§ 7-5 空间一般力系的平衡方程	138
复习思考题 7-2	142
习题 7-2	142
学习指导	143
第八章 重心	145
§ 8-1 平行力系中心	145
§ 8-2 重心和形心	146
复习思考题 8-1	151
习题 8-1	151
§ 8-3 用组合法求形心	152
§ 8-4 用实验法测定重心位置	154
复习思考题 8-2	155
习题 8-2	156
学习指导	157

第一章 静力学公理

§1-1 力和力系

(一) 力

1. 力和力的两种作用效果

物体间的相互推、拉、掷、举、撞等，称为**机械作用**。经过长期反复地观察、实验和分析，人们把力的概念概括为：**力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的运动状态发生改变，或使物体发生变形。**

力使物体的运动状态发生改变，称为力的**运动效果**或**外效应**。所谓物体的运动状态发生改变，是指物体的运动速度的大小或运动方向发生了变化。理论力学(包括静力学)研究力的运动效果。

力使物体的大小和形状发生改变，称为力的**变形效果**或**内效应**。材料力学研究力的变形效果。

自然界里物体间相互的机械作用是多种多样的，因此力也就有很多种，例如地球吸引物体使物体具有的**重力**，物体因弹性变形而产生的**弹力**，运动或有运动趋势物体接触面上的**摩擦力**等。

力既然是一个物体对另一个物体的作用，因此它不能脱离物体而单独存在。在分析物体的受力情况时，要注意**有力必有施力物体**。

2. 力的三要素

实践证明，力对物体的作用效果取决于三个因素：1)力的大小；2)力的方向；3)力的作用点。这三个因素通常称为**力的三要素**。三要素中任何一个要素发生改变，力对物体的作用效果也随之改变。例如，用扳手拧螺母(图 1-1)，作用在扳手上的力，或大小不同，或方向不同，或作用点位置不同，产生的效果就不一样。因此，在描述一个力时，必须全面表明力的三个要素。

在国际单位制中，力的单位为**牛顿**(牛，N) 或**千牛顿**(千牛，kN)。1kN=10³N。

力的方向通常包含**方位**和**指向**两个涵义。我们说重力的方向是竖直向下，这“竖直”即表明方位，而“向下”则表明指向。

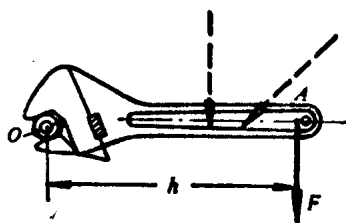


图 1-1

力的作用点是力对物体作用的位置。当力的作用范围与物体相比很小时，可以认为力作用在物体的一个“点”上。

3. 力的表示

在数学、力学等学科里，既有大小又有方向的量称为**矢量**，只有大小没有方向的量称为**标量**。力不仅有大小，而且有方向，所以是矢量，力的运算服从**矢量运算法则**。

在图 1-1 上,力可以用带箭头的线段来表示。选取适当的比例(规定 1 cm 长代表多少牛顿)画一线段,线段的长度表示力的大小;线段与某定直线的夹角表示力的方位,箭头的方向表示力的指向;带箭头的线段的起点或终点表示力的作用点。例如,图 1-2a 所示小车受 50N 水平推力作用,则该作用力可用图 1-2b 所示带箭头的线段来表示。通过力的作用点,按力的作用方位所画的直线,称为力的作用线。

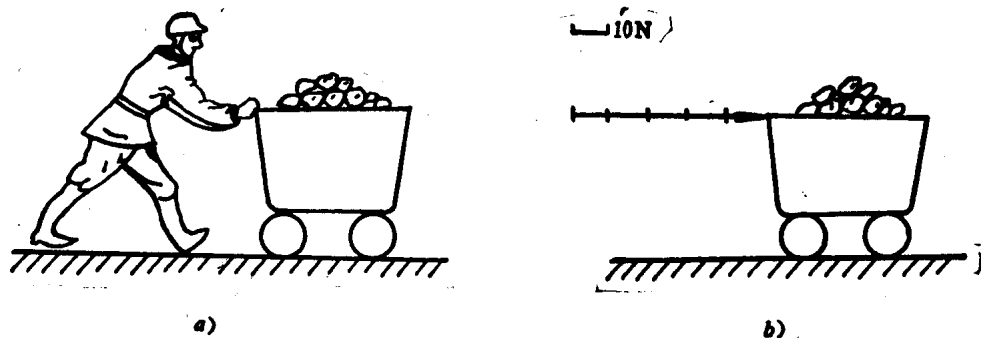


图 1-2

在书写时,力矢量常用上方加一横线的字母符号表示,如 $\vec{F}$ 、 $\vec{P}$ 等。在教材里(如本书的静力学部分),力矢量则多用黑体字母表示,如 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{P}$ 等。而相对应的非黑体字母 F 、 P 等只表示力矢量的大小。等式 $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_2$ 不仅表示 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 两个力矢量大小相等,而且表示它们的方向相同;等式 $F_1 = F_2$ 则仅表示 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 两个力矢量的大小相等。

(二) 力 系

1. 平面力系和空间力系

前已指出,作用于同一研究对象上的一群力称为力系。最简单的力系只包含两个力。力系可按其各力作用线的分布情况进行分类,凡各力的作用线都在同一平面内的力系称为平面力系;凡各力的作用线不在同一平面内的力系称为空间力系。在平面力系中,各力作用线汇交于一点的力系称为平面汇交力系;各力作用线相互平行的力系称为平面平行力系;各力作用线任意分布的力系称为平面一般力系。

2. 等效力系

对物体作用效果相同的力系,称为等效力系。等效力系可以相互代换。

如果一个力 $\mathbf{R}$ 对物体的作用效果和一个力系的作用效果相同,则力 $\mathbf{R}$ 称为该力系的合力,力系中的每一个力都称为合力 $\mathbf{R}$ 的分力。由已知力系求合力的过程称为力系的合成,反之称为力的分解。

3. 平衡力系

单独一个力作用在物体上,会使物体的运动状态发生变化;但是受力系作用的物体,其运动状态却可能并不发生改变,这是因为在有些力系中,各力对物体的作用效果恰好是相互抵消的。如果物体在一个力系作用下不改变运动状态(即处于平衡状态),则该力系称为平衡力系。平衡力系的合力等于零;反之,合力等于零的力系必为平衡力系。

§ 1-2 静力学公理

在生活和生产中,经过长期的经验积累和实践验证,人们认识了力所遵循的许多规律,其

中最基本的规律归结为以下四条静力学公理,它们是研究力系的简化和平衡条件的基础。

公理 1 作用与反作用公理

一物体对另一物体有作用力的同时,另一物体对此物体必有反作用力。作用力与反作用力大小相等、方向相反、作用线相同,分别作用在两个相互作用的物体上。

如图 1-3 所示,若物体 A 对物体 B 施作用力 F ,则与此同时,物体 A 也受到物体 B 对它的反作用力 F' 的作用,且这两个力大小相等、方向相反,作用线在同一直线上。

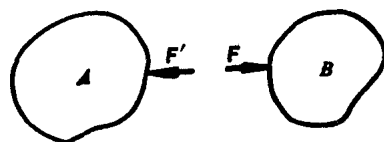


图 1-3

这个公理概括了自然界里物体之间相互作用的关系,表明作用力与反作用力总是成对出现的。早在 17 世纪,牛顿所归纳的力学基本定律中就提出了这一著名的力学原理。

这一公理是从研究单个物体的力学问题过渡到研究物体系的力学问题的桥梁。

在应用这个公理时,必须注意作用力和反作用力虽然大小相等、方向相反、作用线相同,但它们分别作用在两个物体上。

公理 2 二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力,使刚体处于平衡状态的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

这个公理总结了作用于刚体上的最简单力系平衡时所必须满足的条件。对于刚体,这个条件是既必要又充分的;但是对于变形体,这一条件则是不充分的。例如,软绳受两个等值反向且位于同一直线上的拉力作用可以平衡,而受两个满足同样条件的压力作用就不能平衡。

要注意公理 1 和公理 2 的区别。二力平衡公理中的两个力作用在同一物体上;而作用与反作用公理中的两个力则分别作用在不同物体上,虽然它们大小相等、方向相反、作用在同一直线上,但不能平衡。在图 1-4 中,重力 G 和吊钩对重物的作用力 T 是一对平衡力,按照二力平衡公理有: $G = T$; 吊钩对重物的作用力 T 和重物对吊钩的作用力 T' 是一对作用力和反作用力,虽然按照公理 1 也有 $T = T'$,但它们分别作用在两个物体上,不能相互平衡。 G 和 T 之间不是作用力和反作用力关系。 G 是地球对重物的引力,其反作用力 G' 即重物对

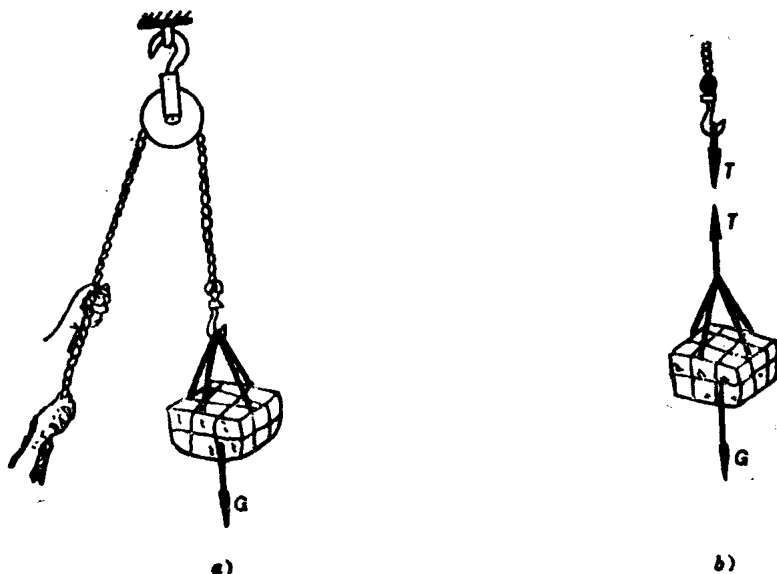


图 1-4

地球的引力作用在地心上(图中未画出)。

只受两个力作用(或只在两点受力作用)且处于平衡状态的物体称为二力构件。根据公理2, 二力构件上两力的方向必在两力作用点的连线上(图1-5a)。对于只在两点受力作用而处于平衡状态的直杆, 在力学里常特称为二力杆(图1-5b)。识别二力构件(或者二力杆)是结构和构件受力分析中很重要的一环。

应用二力杆的概念, 可以很方便地判定结构中某些杆件所受作用力的方向。如图1-6所示的起重架, 其中斜撑杆BC若不计自重, 它只可能在B、C两点受力, 故为二力杆。因此, 作用于B、C点的两力必沿B、C点连线方向。至于BC杆是受拉还是受压, 则常用切断法来判别。假想将BC杆切断, 若切断后B、C两点靠拢, 则杆件受压; 反之, 若B、C两点分离, 则为受拉。图1-6中BC杆受压, 作用于两端的力为压力。

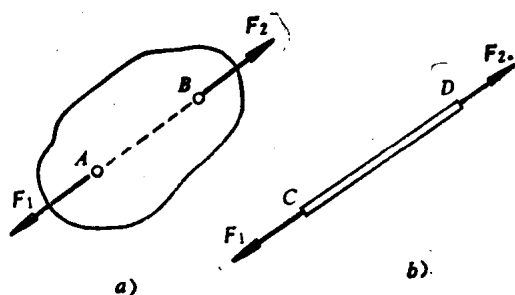


图 1-5

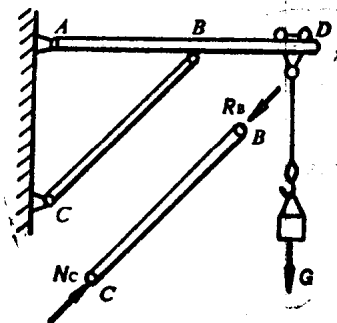


图 1-6

公理3 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系中, 加上或减去任何一个平衡力系, 不改变原力系对刚体的作用。

这是显而易见的。因为平衡力系不会改变刚体的运动状态, 即平衡力系对刚体作用运动效果等于零, 所以在刚体的原力系上加减一个平衡力系, 不会改变原力系对刚体的作用。这个公理常被用来简化某一已知力系。

推论 力的可传性原理

作用在刚体上的力, 可以沿其作用线移至刚体上的任意一点, 而不改变它对刚体的作用效果。

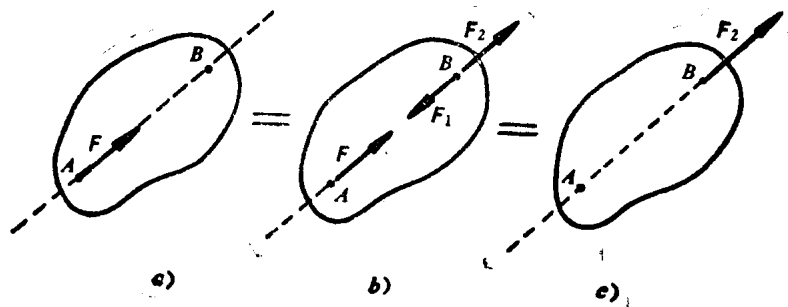


图 1-7

证明: 设力 F 作用于刚体的 A 点, 如图1-7a所示。在 F 的作用线上, 任取一点 B , 加上等值、反向、共线的一对平衡力 F_1 、 F_2 , 且使 $F_1 = F_2 = F$, 如图1-7b所示, 由公理3知,

力系 (F_1, F_2, F) 对刚体的作用效果与力 F 的作用效果相同。在此三力中, 力 F 与力 F_1 又组成一个平衡力系, 根据公理 3, 可以将它减去。于是, 只剩下作用在 B 点的力 F_2 , 如图 1-7c 所示。由于力 F_2 与原力 F 等效, 这就相当于将力 F 沿其作用线从 A 点移到了 B 点。

实践可以验证力的可传性原理。例如, 用绳索拉车, 或者沿同一直线以同样大小的力用手推车, 对小车产生的运动效果是相同的。

由此可见, 力对刚体的作用效果与力的作用点在作用线上的位置无关。因此, 对于刚体, 力的三要素可以改为: 力的大小、力的方向和力的作用线。

作用于刚体上的力矢可以沿着作用线移动, 这种矢量称为滑动矢量。

需要指出, 加减平衡力系公理和力的可传性原理只适用于研究力的运动效果, 而不适用于研究力的变形效果。例如, 一直杆在两端加一对大小相等、方向相反、沿杆轴线作用的拉力, 此时整个杆件受拉; 若将某一端的拉力沿作用线滑移至直杆的中点, 则变成半根杆件受拉, 另半根不受力。这两种情形的杆件变形显然是不一样的。所以在研究力的变形效果时, 力的作用点不能沿作用线任意移动。这种不能沿作用线移动的矢量, 称为定位矢量。

公理 4 力的平行四边形公理

作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力。合力的作用点就在该点, 合力的大小和方向, 由以这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定(图 1-8)。

这个公理总结了最简单力系的简化规律, 它是较复杂力系简化的基础。

力的平行四边形公理也常称为力的平行四边形法则。这种求合力的方法, 在数学里称为矢量加法(或几何加法)。合力矢称为这两个力矢的矢量和(或几何和)。矢量相加可用如下公式表示:

$$R = F_1 + F_2$$

上面所述是两个共点力合成为一个力的情形。反之, 一个已知力也可以分解为两个力。但将一个已知力分解为两个分力是个不定问题, 有无数解答。因为以一个力矢量为对角线的平行四边形, 可以作无数个。如图 1-9a 所示, 力矢 F 既可分解为 F_1 和 F_2 , 也可分解为 F_3 和 F_4 , 等等。要得到唯一解答, 必须给出附加条件, 如给定两个分力的方向, 或给定一个分力的方向和大小。

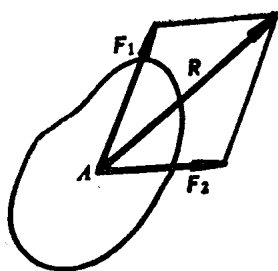


图 1-8

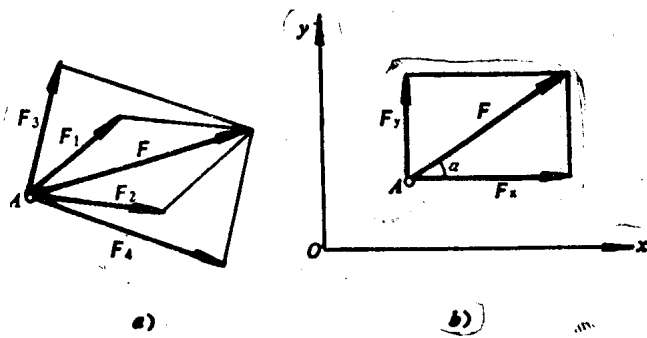


图 1-9

在工程实际问题中, 最经常遇到的是将一个力 F 沿直角坐标系两轴方向分解, 得出两个相互垂直的分力 F_x 和 F_y , 如图 1-9b 所示。 F_x 和 F_y 的大小可由三角公式求得:

$$F_x = F \cos \alpha$$

$$F_x = F \sin \alpha$$

式中 α 为力矢 F 与 x 轴间的夹角。

推论 三力平衡汇交定理

如果一刚体在三个共面而互不平行的力作用下处于平衡状态，则此三力必相交于一点。

证明：如图 1-10 所示，在刚体的 A 、 B 、 C 三点上，分别作用三个共面力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性原理，将 F_1 、 F_2 移至交点 O ，并根据公理 4，将 F_1 与 F_2 合成为 R ，此时刚体上只有力 F_3 与力 R 作用。根据公理 2， R 与 F_3 必在同一直线上，所以力 F_3 必通过 O 点，于是 F_1 、 F_2 、 F_3 均通过 O 点。

需要指出的是：这个定理的逆定理不成立，即三个汇交于一点的相互不平行的共面力不一定是平衡力系。这是显然的。

在力学里，只受同平面三个力作用(或只在三点受共面力作用)且处于平衡状态的物体称为三力构件。对于三力构件，若已知三个力中两个力作用线的交点 O 和第三个力的作用点，则可利用三力平衡汇交定理判断出第三个力作用线的方位：其作用线必定也通过 O 点。

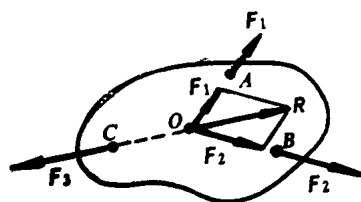


图 1-10

复习思考题

1. 何谓力系？何谓平衡？工程力学中的静力学研究哪些内容？
2. 何谓刚体？为什么静力学要把自己的研究对象假设为刚体？
3. 力的三要素是什么？两个力相等的条件是什么？图 1-11 所示的两个力矢量 F_1 与 F_2 相等，问这两个力对刚体的作用效果是否相同？

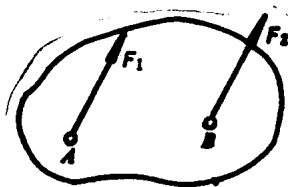


图 1-11

4. 说明下列三个“等于”的区别：

1) $F_1 = F_2$; 2) $F_1 = F_2$; 3) 力 F_1 等于力 F_2 。

5. 何谓等效力系、合力、分力和平衡力系？

6. 作用与反作用公理和二力平衡公理都是说二力等值、反向、共线，问二者有什么不同？

7. 拔河比赛双方的力是不是作用力与反作用力？为什么？

8. 小球 A 静止于水平面 B 上(图 1-12) 下列说法哪一句是正确的？

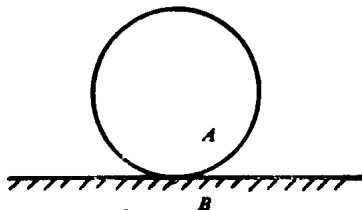


图 1-12

- 1) A 对 B 的正压力大小等于 A 的重力, 这两个力实际上是同一个力;
 - 2) B 对 A 的支持力大小等于 A 的重力, 这两个力是一对作用力与反作用力;
 - 3) B 对 A 的支持力大小等于 A 对 B 的正压力, 这两个力是一对平衡力;
 - 4) A 对 B 的正压力大小等于 B 对 A 的支持力, 这两个力是一对作用力与反作用力。
9. 试区别 $R = F_1 + F_2$ 和 $R = F_1 + F_3$ 两个等式所代表的意义; 若 $R = F_1 + F_2$, 是否必有 $R = F_1 + F_3$?
10. 何谓二力构件和三力构件? 它们的受力情况各有什么特点?
11. 设在物体的 A 点上作用 F_1 、 F_2 、 F_3 三个力, 如图 1-13 所示, 若三个力的大小都不等于零, 且其中 F_1 、 F_2 共线, 问此三力能否保持平衡?

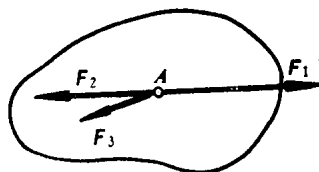


图 1-13

12. 小球在光滑斜面上的位置如图 1-14 所示, 问该球在这一位置能否保持平衡? 为什么?

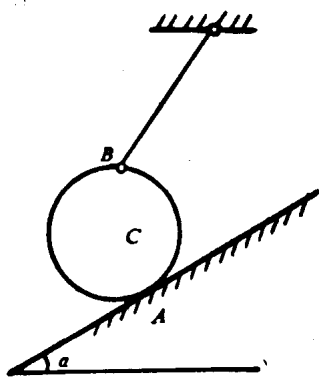


图 1-14

习 题

1. 试求图 1-15 所示 F_1 和 F_2 两个力的合力。

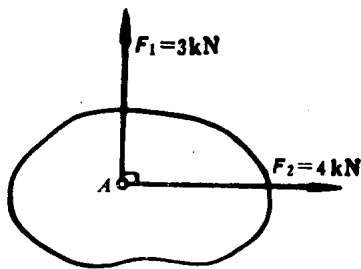


图 1-15

2. 试求图 1-16 所示 P_1 和 P_2 两个力的合力。

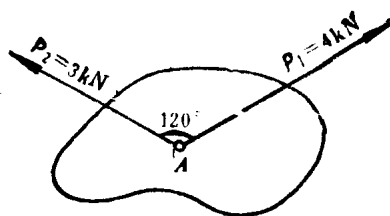


图 1-16

3. 试求图 1-17 所示力 F 沿 x, y 坐标轴方向的分力 F_x 和 F_y .

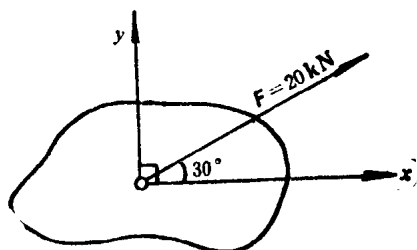


图 1-17

4. 试求图 1-18 所示力 P 沿 k, l 坐标轴方向的分力 F_k 和 F_l .

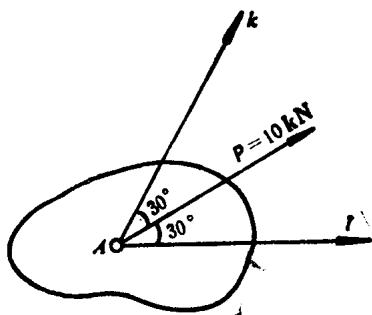


图 1-18

5. 指出图 1-19 所示结构中哪些杆件是二力构件？哪些构件是三力构件？不计杆件自重。

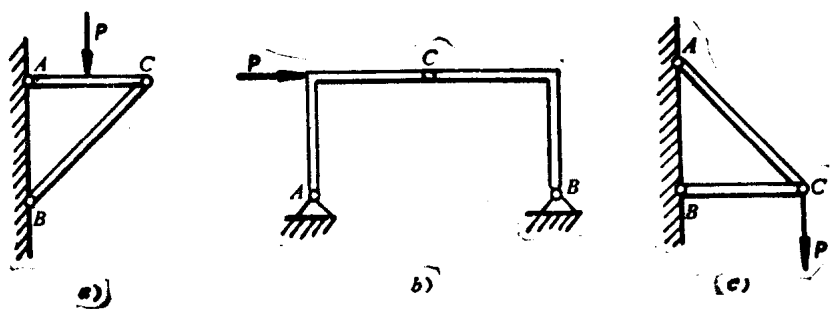


图 1-19

学习指导

绪论和第一章主要讨论了两个问题：1) 静力学的内容及其研究对象；2) 静力学公理及其