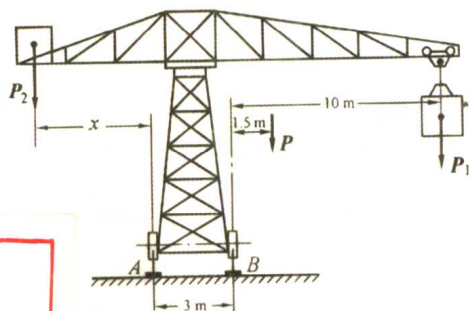
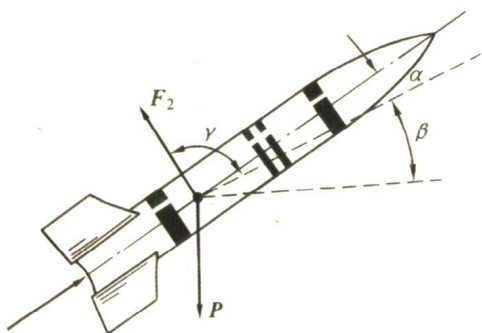


高等学校教材

静力学

程燕平 编

JINGLIXUE



哈尔滨工业大学出版社

高等学校教材

静力学

程燕平 编

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 简 介

我国高等工科院校一些专业开设有少学时理论力学课,一般只讲静力学部分,本教材是为适应这一需要而编写的。

本教材改变了过去理论力学教材对静力学部分从平面到空间的传统写法,均从空间讲起,平面问题作为空间问题的特殊情况处理。但作为练习,侧重点仍放在平面力系上。

由于改变了讲法,节省了学时,本教材除保留了原静力学教材的内容外,又增加了原属于材料力学的内力图的内容,把轴力图、扭矩图、剪力图、弯矩图归为一章讲授。因为动静法是用静力学方法求解动力学问题的,为使学生对动力学有所了解,增加了动静法一章的内容。

图书在版编目(CIP)数据

静力学/程燕平主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.8(2004.1重印)

ISBN 7-5603-1409-0

I. 静… II. 程… III. 静力学-高等学校-教材
IV. 0312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 119415 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂,

开 本 850×1168 1/32 印张 6.875 字数 172 千字

版 次 1999 年 8 月第 1 版 2004 年 1 月第 2 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1409-0/O·96

印 数 3 001~6 000

定 价 12.00 元

前 言

本教材是在两种情况的促使下决定编写的,一是为适应理论力学少学时教学的需要,二是为适应力学系列课程改革模块化教学的需要。我国高等工科院校一些专业开设有少学时的理论力学课,一般只讲静力学部分,但相应教材不多,起码在哈尔滨工业大学校内,多年来就没有与之相应的正式教材。随着力学系列课程改革设想的提出与实施,为了实行学分制而进行模块化教学,原来理论力学、材料力学及其它力学课程的几块要分为若干个小块,则与之相应的教材编写也提到实施阶段,此教材的编写正是在这种情况下产生的。

本教材的编写采用了两种新的做法,一是改变了传统写法,二是增加了内容。

改变了传统写法。多年来理论力学教材里对静力学的写法均是从平面到空间。随着学生基础知识的提高,新课程的增加又导致力学课程学时的减少,一些教师实际上的讲法已经改为从空间到平面。本教材正是在这一实践的基础上,采取了从空间到平面的写法,先得出空间问题的结论,然后将平面问题作为空间问题的特殊情况处理。但作为练习,侧重点仍放在平面力系上(主要指平面任意力系)。

增加了内容。由于改变了讲法,减少了从平面到空间讲法的重复,从而节省了学时。本教材在保持原静力学教材内容的基础上,打破原理论力学、材料力学课程的界限,把原属于材料力学的轴力图、扭矩图、剪力图、弯矩图的内容归为一章,称为“内力图”。又考虑到动静法是用静力学方法求解动力学问题的,学生应对动

力学内容,特别是动约束反力的概念与计算应该有些了解,所以又增加了“动静法”一章。这种写法在国内教材里尚属少见,但在国外一些教材里则并不少见。

本教材的写法在 1996 年前已形成思路,1996、1997 连续两年在两个系进行了两个循环的试点,1998 年春形成校内教材,1998 年秋、1999 年春哈工大校内三个系十余个小班少学时理论力学课均采用了该教材。在此基础上,现在正式出版。

酝酿本教材的思路与写法,参加试点、编写与使用的有赵经文、陈明、孙兆伟、王刚等教师。

长期在理论力学课教学第一线的博士生导师程靳教授对全书进行了审阅,提出了许多很好的意见,编者在此表示衷心的感谢。

本教材可能有疏漏之处,诚恳希望读者批评指正。

编 者

1999 年 5 月于哈尔滨

目 录

引 言	(1)
第一章 静力学公理和物体的受力分析	(4)
§ 1-1 静力学公理	(4)
§ 1-2 约束和约束反力	(9)
§ 1-3 物体的受力分析和受力图	(15)
小结	(21)
思考题	(22)
习题	(25)
第二章 汇交力系	(28)
§ 2-1 汇交力系合成与平衡的几何法	(28)
§ 2-2 汇交力系合成与平衡的解析法	(33)
小结	(40)
思考题	(41)
习题	(42)
第三章 力矩和力偶	(46)
§ 3-1 力对点的矩与力对轴的矩	(46)
§ 3-2 力偶·力偶矩·力偶的性质	(53)
§ 3-3 力偶系的合成与平衡	(60)
小结	(65)
思考题	(67)
习题	(70)
第四章 任意力系	(76)
§ 4-1 任意力系向一点的简化·主矢和主矩	(76)

§ 4-2	任意力系简化的最后结果·合力矩定理	(83)
§ 4-3	空间任意力系的平衡条件和平衡方程	(86)
§ 4-4	平面任意力系的平衡条件和平衡方程	(93)
§ 4-5	物体系的平衡·静定和静不定问题	(96)
§ 4-6	物体的重心	(104)
小结		(112)
思考题		(113)
习题		(115)
第五章	摩擦	(124)
§ 5-1	概述	(124)
§ 5-2	滑动摩擦	(127)
§ 5-3	考虑滑动摩擦时物体的平衡问题	(129)
§ 5-4	摩擦角和自锁现象	(136)
§ 5-5	滚动摩擦	(140)
小结		(146)
思考题		(147)
习题		(149)
第六章	内力图	(155)
§ 6-1	概述	(155)
§ 6-2	轴力图与扭矩图	(158)
§ 6-3	剪力图与弯矩图	(166)
§ 6-4	外力、剪力、弯矩间的关系及其在作剪力、 弯矩图中的应用	(172)
小结		(177)
思考题		(178)
习题		(179)
第七章	动静法	(183)
§ 7-1	质点与质点系的动静法	(183)
§ 7-2	刚体惯性力系的简化	(187)

§ 7-3 绕定轴转动刚体的轴承动反力	(198)
小结.....	(203)
思考题.....	(205)
习题.....	(206)

引 言

静力学是研究物体的受力分析、力系的等效替换(或简化)和各种力系的平衡条件的科学。

物体的受力分析 工程中存在各种各样的结构和机构,它们的受力状态如何,是人们关心的问题之一。静力学就是要对物体进行受力分析,首先定性地给出物体的受力情况,画出物体的受力图,然后才能给以定量的求解。物体的受力分析是静力学主要研究的问题之一。

力系的等效替换(或简化) 实际当中存在各种各样的力系,其实际分布比较复杂,如何用一个比较简单的力系去等效代替一个比较复杂的力系,进而确定复杂力系对物体的总效应,并为建立各种力系的平衡条件打基础,是静力学主要研究的问题之二。

各种力系的平衡条件 实际当中存在各种各样的力系,其平衡时均应满足一定的条件,究竟应满足什么样的条件?研究与建立各种力系的平衡条件,并应用这些条件去解决实际问题,是静力学主要研究的问题之三。

力的概念 力的概念来自于实践,在很早的时期,人们对力有了一定的认识。战国时期墨家的哲学与科学著作《墨经》中说“力,形之所以奋也”,当是见诸文字的人们最早对力的描述。从现代宏观观点看,力是一个物体对另一个物体的作用,是造成运动变化的原因。但这种作用可以是机械作用,化学作用,电磁作用等。从现代微观观点看,力是基本粒子间的相互作用,可分为强相互作用,弱相互作用。人们对力的认识还处在发展中,因此,目前包含各学科各方面的对力的一个比较完善的描述或定义尚不存在。

静力学是从宏观方面看问题的,从现代宏观方面看,力是一个物体对另一个物体的作用,其作用效果使物体的运动状态发生改变或者使物体产生变形。前者被称为外效应(运动效应),后者被称为内效应(变形效应)。实践表明,力对物体的作用效果由三个要素——力的大小、方向、作用点来确定,称为力的三要素。从数学角度看,具有大小和方向的量被称为矢量,所以力是矢量。在正式出版的印刷物上,矢量用斜黑体字母表示,如 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{P}$ 等;在手书上,曾有 $\vec{F}$ 、 $\vec{F}$ 、 $\vec{F}$ 、 $\vec{F}$ 等写法,国标规定用 $\vec{F}$ 表示。矢量 $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$ 与代数量 $c = a + b$ 是完全不同的两个概念,在手书上一定要加以区分。

力系 作用于物体上的一群力称为力系。力是矢量,力矢所在直线称为力的作用线。从力系的作用线分布情况来看,有共点、汇交、平行、任意力系之分。若各力作用线都作用在同一平面内,称为平面力系;若各力作用线是空间分布,称为空间力系。这样就有平面共点、汇交、平行、任意力系,空间共点、汇交、平行、任意力系之分。此外还有力偶系。静力学的主要任务之一就是要建立这些力系的平衡条件。

平衡 由物质组成的物体处于永恒的运动中,平衡是物体运动的一种特殊形式。若物体相对于惯性参考系静止或作匀速直线运动,则称此物体处于平衡。虽然从理论上讲,惯性参考系在宇宙中并不存在,但对大多数工程问题,把固连在地球上的参考系作为惯性参考系,所得结果可以满足工程上的要求,所以静力学中一般把固连在地球上的参考系作为惯性参考系。

变形体与刚体 实际问题往往比较复杂,依据所研究的目的不同,需要按哲学的观点抓住一些带本质性的主要矛盾或矛盾的主要方面,而撇开一些影响不大的次要因素,提炼出称之为力学模型的物体进行研究。对同一个物体,由于研究的目的不同,往往给以不同的看待。一列火车,当我们只关心它的位置与速度时,其运动的范围比其自身的尺寸要大得多,就可以作为一个数学上的几

何点考虑。当我们关心它的牵引力与总的阻力,载重及整体运动的加速度时,可以做为一个质点来考虑。当我们设计或研究火车由什么样的零部件组成及火车各个零部件如何运动时,就分别作为刚体与刚体系来考虑。而当我们考虑各零部件在力的作用下的承受能力及是否安全时,就必须作为变形体来处理。对同一列火车,依据研究的目的不同,分别可以作为点、质点、刚体、刚体系与变形体来考虑。任何物体在力的作用下都要产生变形,称为变形体。当物体的变形可以不考虑或暂时可以不考虑的情况下,就可以把物体作为刚体来处理。所谓刚体就是绝对不变形的物体,或者说,物体内任意两点间的距离不改变的物体称为刚体。刚体是一种抽象的力学模型,在实际中并不存在。但在处理一些实际问题时,这种抽象不仅是合理的,而且是必需的。当然,这种抽象也不是绝对的,在任何情况下都允许的。在静力学中,我们主要涉及到的是刚体与变形体。

按照有关规定,本书采用国际单位制,力的单位用牛[顿]或千牛[顿],分别以符号“N”与“kN”表示。其它单位不一一列举。

第一章 静力学公理和物体的受力分析

本章介绍静力学的五条公理,约束和约束反力的概念,物体的受力分析方法,并对画物体的受力图进行练习。

§ 1-1 静力学公理

任何一门科学都要有一些公理作为基础。公理,简言之,即为公认的道理(或真理)。如果一门科学没有几条公认的道理作为基础,此门科学也就很难称其为科学。公理,《辞海》中的解释为,“在一个理论中已为反复的实践所证实而被认为不需证明的命题。可作为证明中的论据。”公理是有层次性的,在本门课程中,在已学过的知识的基础上,一般以下述五条命题作为公理。

公理一 力的平行四边形公理(法则)

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点仍在该点,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 所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的矢量和,以数学公式表示,为

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

这个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和充分

条件是,这两个力的大小相等、方向相反、且在同一直线上,如图1-2所示。简言之,这两个力等值、反向、共线。这是一个最简单的平衡力系(不受力除外)。

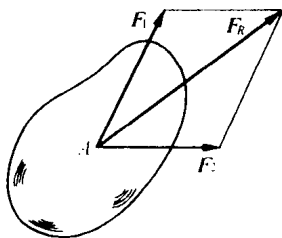


图 1-1

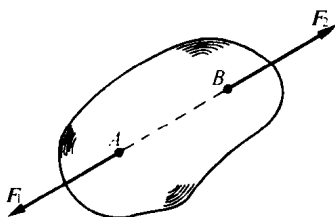


图 1-2

刚体在两个力作用下平衡,两个力等值反向共线,对刚体是充分必要条件。对变形体,这个条件是不充分的。如,软绳受两个等值反向共线的拉力作用可以平衡,而受两个等值反向共线的压力就不能平衡。

在后面对物体进行受力分析时,常遇到只受两个力作用而平衡的构(杆)件,工程上称为二力构件或二力杆,其判别依据就是二力平衡公理,根据公理二,该两力必沿作用点的连线。

公理三 加减平衡力系公理

一个平衡力系不会改变刚体的运动状态,也就是说,平衡力系对刚体的作用效果为零,因而有,在已知力系上加上或减去任意的平衡力系,新力系与原力系对刚体的作用效果相同。

这个公理是研究力系等效替换的重要依据和主要手段。

根据上述公理,可以导出下述推理:

推理一 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内此作用线上任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

证明: 设有力 F 作用在刚体上的点 A , 如图 1-3(a) 所示, 根据加减平衡力系公理, 在力的作用线上任取一点 B , 并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 , 且使三个力的大小相等, 方向如图 1-3(b) 所示, 则(a)、(b)图中两个力系等效。由于力 F 与 F_1 也是一个平衡力系, 减去此平衡力系, 则(b)、(c)图中两个力系等效, 也即(a)、(c)图中两个力等效, 力 F 沿其作用线“传递”到了刚体内此力作用线上任意一点 B , 两个力作用效果相同。推理一得证。

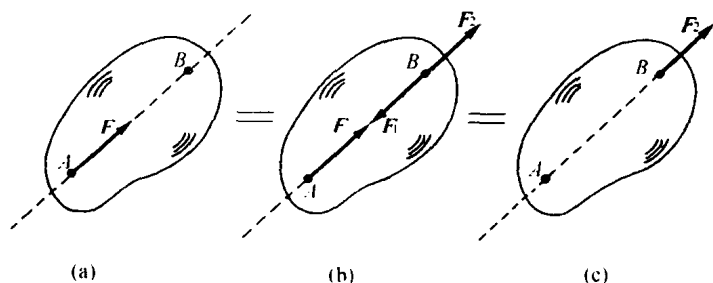


图 1-3

由此可见, 对于刚体来说, 力的三要素已变为: 力的大小、方向和作用线。像作用于刚体上的力矢可以沿着作用线移动的矢量称为滑动矢量。

公理三及推理一只适用于刚体而不适用于变形体。例如, 在图 1-4(a) 中直杆受平衡力 F_1 与 F_2 作用, 产生拉伸变形。如果将此二力沿作用线移动到图(b)所示位置, 直杆将产生压缩变形。如果从杆上减去平衡力系 (F_1 、 F_2), 则杆的变形将消失, 如图(c)。因此, 在研究物体的变形时, 是不能应用公理三与推理一的。

对变形体来说, 力的三要素仍为: 力的大小、方向和作用点。这种只能固定在某一点的矢量称为定位矢量。

推理二 三力平衡汇交定理

如果刚体在三个力作用下平衡, 其中两个力的作用线汇交于

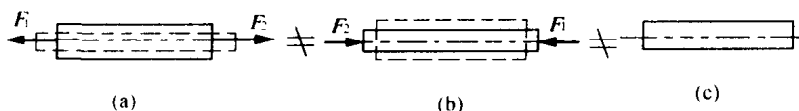


图 1-4

一点,则第三个力的作用线必通过此汇交点,且三个力共面。习惯称此推理为定理。

证明: 如图 1-5 所示,在刚体的 A 、 B 、 C 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 ,其中 F_1 、 F_2 两力的作用线汇交于 O 点,根据推理一,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形公理,得合力

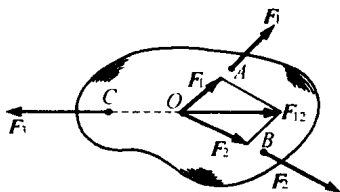


图 1-5

F_{12} 。由二力平衡公理,力 F_3 与力 F_{12} 平衡, F_3 与 F_{12} 共线,力 F_3 必通过汇交点 O ,且 F_3 必位于 F_1 与 F_2 两力所在的平面内,三力共面。推理二得证。

要注意此定理的表述条件,刚体在汇交于一点的三个共面力作用下,不一定平衡。

刚体只受同平面三个汇交力作用而平衡,有时称为三力构件。若三个力中已知两个力的交点及第三个力的作用点,即可判定出第三个力作用线的方位。在画一些物体的受力图 and 用几何法求此平面汇交力系的平衡问题时,此定理会带来一些方便。

公理四 作用反作用公理(定律)

作用力与反作用力总是同时同现,同时消失,两力等值、反向、共线,作用在相互作用的两个物体上。

作用反作用公理与二力平衡公理的描述有相同之处,两力均是等值反向共线,但作用力反作用力是作用在相互作用的两个物

体上,二力平衡公理中的二力是作用于同一个刚体上。不能认为作用力与反作用力相互平衡。

作用反作用公理概括了任何两个物体间相互作用力之间的关系。不论对刚体还是变形体,不论对静止的物体还是对运动的物体,不论是惯性参考系还是非惯性参考系,作用反作用公理都是适用的。

在画物体的受力图时,对作用力与反作用力一定要给予足够的重视。

公理五 刚化公理

变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体看作(刚化)为刚体,其平衡状态保持不变。

如图 1-6 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索看作(刚化)为刚体,其平衡状态保持不变。

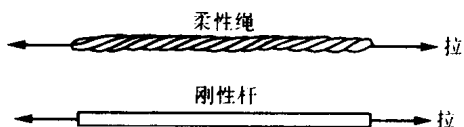


图 1-6

由此公理,如果一变形体在某一力系作用下处于平衡,一刚体在此力系作用下肯定平衡。在这种情况下,此力系无论是作用在刚体上还是变形体上,其所满足的平衡条件是一样的。所以,据此公理,建立各种力系的平衡条件时,均在刚体上推得,然后可推广应用于处于平衡的变形体上。在建立各种力系的平衡条件时,正是这样做的。

但要注意,变形体在一力系作用下平衡,此力系必为平衡力系。若变形体在一平衡力系作用下,则变形体未必平衡。也即在刚体上建立的力系的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。

§ 1-2 约束和约束反力

工程和日常生活中的物体位移大多都受到一定的限制,例如,钉子对于黑板、地板对于课桌、灯绳对于灯管、轴承对于轴、如此等等。钉子限制黑板的位移,地板限制课桌的位移,灯绳限制灯管的位移,轴承限制轴的位移,等等如此。我们把限制物体位移的物体称为约束。则钉子对于黑板,地板对于课桌,灯绳对于灯管,轴承对于轴均为约束。约束对被约束物体一般都有力作用,约束对被约束物体的力称为约束反力,简称约反力或反力,还可称为被动力。除约束反力外,物体上受到的各种载荷如重力、风力、切削力、发动机所产生的驱动力等,它们是促使物体运动或有运动趋势的力,称为主动力。在实际工作中,确定主动力是十分重要而且是比较复杂的工作,可根据实际情况确定。如设计要求(起重吨位,载重量等),进行调查研究(如风载、雪载、水压力等)或实验测定(如切削力、驱动力等),这涉及到较多的专业知识。因此,在静力学中主动力一般都作为已知条件给出。这样,作用于任何结构或机构上的力都可分为两类,主动力与约束反力。静力学求解的主要任务,就是根据力系的平衡条件,确定(求出)约束反力。

在实际中,存在着各种各样的约束,样式繁多,难以一一列举。我们根据抓主要矛盾和分类法的思想,对工程中一些常见的约束理想化,归纳为几种基本类型,并根据各种约束的特性定性地给出其约束反力的情况。

一、光滑(面、线、点)接触约束

当一物块放于地板上时(图 1-7(a)),接触处为一个面;当一圆柱放于地板上时,接触处为一条线(图 1-7(b));当一钢球放于钢板上时(图 1-7(b)),接触处为一个点。若接触处(面、线、点)的摩擦力可以忽略不计,则称为光滑接触约束。显然图 1-7(a)、(b)