

高等学校教材

工程力学

主编 顾致平
主审 史永高
编者 顾致平 刘金涛
刘新龙 李三庆 胡桂梅

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书根据教育部高等学校工科工程力学教学的基本要求,并参照理论力学和材料力学课程的教学基本要求编写而成,以适应 21 世纪科学技术的发展和教学改革的要求。

全书分为三篇,共十五章,外加三个附录。第一篇为静力分析,第二篇为静应力与静变形分析,第三篇为动应力分析,内容前后衔接,形成完整、层次清晰且结构紧凑的体系。其中附录 I 介绍计算机在工程力学中的应用,附录 II 为型钢表,附录 III 为工程名词英汉对照表。另外,书后还配有工程力学多媒体学习测试系统的软件光盘,方便学生自学。

本书主要面向非机械类、非土建类各专业本科学生,也可作为普通高等工科学校和成人专科工程力学、材料力学课程的教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/顾致平主编. —西安:西北工业大学出版社,2004.10

ISBN 7-5612-1840-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 100286 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072 电话:029-88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:20.25

字 数:492 千字

版 次:2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

定 价:22.00 元

31.00 元(含光盘)

前 言

工程力学是高等工科大学开设的一门重要的技术基础课。本书是作者在近几年取得的教学改革成果的基础上,结合多年的教学经验,依据教育部高等学校工科工程力学教学的基本要求并参照理论力学和材料力学教学的基本要求,在原有教材基础上编写而成的,以适应 21 世纪科学技术的发展和教学改革的要求。

全书分为三篇,共十五章,外加三个附录。第一篇为静力分析,第二篇为静应力与静变形分析,第三篇为动应力分析,内容前后衔接,形成了一个比较完整、协调且层次清晰的体系。本书的指导思想是,提高起点、论述简明、避免重复和注重应用。其主要体现在以下几个方面:①删减与物理学的某些重复内容和教学与应用中较少采用的内容,强调工程技术的应用;②对基本概念、方法的论述力求严谨、透彻而又简明、扼要;③尽量避免前后内容或阐述的重复,加强论述的系统性和综合性;④通过强调各种理论方法的特点、应用实例和步骤,加强各部分的联系和综合应用;⑤加注了有关专业名词或术语的英文对照,便于在科技研究中阅读有关英文文献;⑥在内容的选定上,紧密结合工程实践,加强工程概念的培养,使读者通过本书的学习能解决一些工程实际中的力学问题,并为学习其他相关课程打下基础;⑦考虑到当今工程技术中复杂力学问题的解决已离不开电子计算机,故在本书附录 I 中增加了“计算机在工程力学中的应用”的内容,专门介绍计算机分析工程力学问题的方法,其目的是使学生初步具有利用计算机解决工程实际问题的能力,从而兼备专业基础和计算机知识。另外,为提高学生素质,加强学生能力的培养,方便学生自学,本书配有工程力学多媒体学习测试系统的软件光盘。这一方面可以作为计算机辅助教学的工具,加深对所知识的理解,另一方面引导学生在学工程力学时充分利用计算机来解决工程问题,这是本书的主要特色之一。

本书可作为 70~80 学时工程力学课程的教材,适用于工科非机械类、非土建类各专业本科、专科,也可供继续教育学院的学生、电大学生和自学者以及工程技术人员参考。本书由西安工业学院顾致平教授主编,史永高教授主审,参加全书编写的有李三庆(第一至四章)、胡桂梅(第五、八章,附录 I、II)、刘金涛(第六、七、九章)、顾致平(第十章、附录 III)、刘新龙(第十一至十五章)。全书由顾致平教授统稿并担任主编。书后所配的“工程力学

多媒体学习测试系统”的软件光盘由西安工业学院和西安理工大学联合研制,黎明安、顾致平主编,参编人员有刘金涛、刘新龙、李三庆、胡桂梅、张文荣。

在编写本书过程中曾参考了有关书籍、资料,并从中引用了部分习题和例题。本教材的编写出版得到了西安工业学院有关领导和老师们的支持与帮助,在此一并致谢。

书中如有错误和不妥之处,敬请读者不吝指正。

编 者

2004 年 7 月

目 录

第一篇 静力分析

引 言	1
第一章 静力分析基础	3
§ 1-1 静力分析的基本概念	3
§ 1-2 静力分析公理	4
§ 1-3 约束与约束反力	5
§ 1-4 受力分析与受力图	8
思考题	10
习题一	10
第二章 汇交力系	13
§ 2-1 汇交力系合成的几何法	13
§ 2-2 汇交力系合成的解析法	14
§ 2-3 汇交力系的平衡条件	16
思考题	21
习题二	22
第三章 力偶理论	26
§ 3-1 力对点之矩 汇交力系的合力矩定理	26
§ 3-2 力偶及其性质	28
§ 3-3 力偶系的合成与平衡	30
思考题	33
习题三	34
第四章 平面一般力系	37
§ 4-1 力的平移定理	37
§ 4-2 平面一般力系向已知点简化	38
§ 4-3 简化结果分析	40
§ 4-4 平面一般力系的平衡条件及平衡方程	43

§ 4-5 物体系统的平衡	47
§ 4-6 考虑摩擦时的平衡问题	52
思考题	60
习题四	62
第五章 空间一般力系和重心	71
§ 5-1 力对轴之矩	71
§ 5-2 力对轴之矩与力对点之矩的关系	73
§ 5-3 空间力系向任意点的简化及其结果的讨论	73
§ 5-4 空间一般力系的平衡条件及其应用	76
§ 5-5 平行力系的中心和重心	80
思考题	84
习题五	85

第二篇 静应力与静变形分析

引 言	91
第六章 轴向拉伸与压缩	94
§ 6-1 轴向拉伸与压缩的概念	94
§ 6-2 轴向拉伸与压缩时的内力	95
§ 6-3 轴向拉伸与压缩时的应力	97
§ 6-4 材料在拉伸与压缩时的力学性能	99
§ 6-5 轴向拉伸与压缩时的强度计算	103
§ 6-6 轴向拉伸与压缩时的变形	105
§ 6-7 拉压静不定问题	108
§ 6-8 应力集中的概念	111
思考题	112
习题六	114
第七章 剪 切	120
§ 7-1 剪切的观念	120
§ 7-2 剪切和挤压的实用计算	121
§ 7-3 计算实例	122
思考题	125
习题七	126

第八章 扭 转	128
§ 8-1 扭转的概念	128
§ 8-2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	129
§ 8-3 薄壁圆筒的扭转 剪应力互等定理 剪切胡克定律	130
§ 8-4 圆轴扭转时的应力和变形	133
§ 8-5 圆轴扭转时的强度和刚度计算	137
§ 8-6 非圆截面杆扭转简介	139
思考题	140
习题八	141
第九章 弯曲应力分析与强度计算	144
§ 9-1 弯曲的概念	144
§ 9-2 弯曲时的内力——剪力和弯矩	145
§ 9-3 弯曲时的正应力	153
§ 9-4 弯曲正应力强度条件	159
§ 9-5 弯曲剪应力简介	162
§ 9-6 提高梁弯曲强度的主要措施	165
思考题	167
习题九	169
第十章 弯曲位移分析与刚度计算	179
§ 10-1 引 言	179
§ 10-2 挠曲线近似微分方程及其积分	182
§ 10-3 计算弯曲位移的叠加法	186
§ 10-4 梁的刚度计算 提高梁刚度的主要措施	192
§ 10-5 弯曲静不定问题	195
思考题	198
习题十	200
第十一章 应力状态和强度理论	205
§ 11-1 应力状态的概念	205
§ 11-2 平面应力状态的应力分析 主应力概念	206
§ 11-3 三向应力状态的最大应力	211
§ 11-4 广义胡克定律	212
§ 11-5 强度理论的概念	214
§ 11-6 常用的四个强度理论	215

思考题	220
习题十一	221
第十二章 组合变形时杆件的强度计算	224
§ 12-1 组合变形概述	224
§ 12-2 拉伸(压缩)与弯曲组合时杆件的强度计算	225
§ 12-3 弯曲与扭转组合变形时杆件的强度计算	230
思考题	233
习题十二	234
第十三章 压杆的稳定性问题	237
§ 13-1 压杆稳定性的概念	237
§ 13-2 细长压杆的临界力	239
§ 13-3 欧拉公式的应用范围 中长杆和粗短杆的临界应力	242
§ 13-4 压杆的稳定性计算	246
§ 13-5 提高压杆稳定性的一些措施	248
思考题	249
习题十三	250

第三篇 动应力分析

引 言	255
第十四章 动荷应力	256
§ 14-1 引 言	256
§ 14-2 考虑惯性力时构件的应力计算	256
§ 14-3 冲击应力计算	258
§ 14-4 提高构件承受冲击能力的措施	261
思考题	262
习题十四	262
第十五章 交变应力	264
§ 15-1 交变应力的概念	264
§ 15-2 交变应力的循环特征	265
§ 15-3 对称循环交变应力下材料的持久极限	266
§ 15-4 影响构件持久极限的主要因素	267
§ 15-5 对称循环下构件的疲劳强度计算	271

思考题.....	272
习题十五.....	273
附录 I 计算机在工程力学中的应用.....	275
附录 II 型钢表.....	286
附录 III 工程名词英汉对照表.....	300
习题答案.....	304
参考文献.....	315

第一篇 静力分析

引言

静力分析是研究物体在力系作用下的平衡问题。

本篇主要讲述三个问题：

1. 物体的受力分析 研究一物体与周围其他物体之间的机械作用,将其从周围物体中分离出来,并分析其所受的力。这些力包括主动力(例如重力)和约束反力。约束反力取决于周围物体限制的性质,受力分析的关键在于约束反力的分析。

2. 力系的简化 力系指作用在物体上的一组力。如果作用在物体上的力系可用另一力系代替,而不改变原来力系对物体的效应,称为力系的等效替换。用简单的力系等效替换一个复杂的力系,称为力系的简化。

3. 力系的平衡条件及其应用 物体处于平衡状态时,将作用于其上的力系所必须满足的条件称为力系的平衡条件。应用这些平衡条件,即可解决工程实际中的静力平衡问题。

第一章 静力分析基础

§ 1-1 静力分析的基本概念

1. 平衡的概念

平衡(equilibrium)是物体机械运动的特殊形式,是指物体相对地球处于静止或作匀速直线运动的状态。一般工程技术问题取固结于地球的坐标系作为参考系来进行研究,实践证明,所得到的结果具有足够的精确度。

2. 刚体的概念

任何物体受力总要产生一些变形。但是,工程实际中的机械零件和结构件在正常情况下的变形,一般是很微小的。微小的变形对物体的机械运动影响极小,可以略去不计,即把物体看做是不变形的,从而使问题的研究得以简化。这种在受力情况下保持形状和大小不变的物体通常称为刚体(rigid body)。刚体是依据所研究问题的性质抽象出来的理想化的力学模型(mechanical modl)。当变形这一因素在所研究的问题中不可缺少时,就必须采用变形体作为力学模型。

3. 力的概念

人们在长期的生活和生产实践中,逐步形成了力的概念。力(force)是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化,并使物体产生变形。力使物体运动状态发生改变的效应,称为力的外效应(effect of motion)。力使物体变形的效应,称为力的内效应(effect of deformation)。在第一篇中仅研究力的外效应。

力对物体的作用效应取决于三个要素,即力的大小、力的方向和力的作用点。因此,力是矢量,且是定位矢量,可用有向线段表示,如图 1-1 所示。通过力的作用点,沿力的方向引直线,该直线表示力在空间的方位,称为力的作用线。在作用线上截取有向线段 AB ,线段的长度按一定比例表示力的大小;线段的起点 A (或终点 B)表示力的作用点。在本书中黑体字表示矢量,如 \mathbf{F} ;矢量的大小(模)则用同形的普通字母表示,如 F 。本书采用国际单位制。在国际单位制中,力的单位是牛[顿](N)或千牛[顿](kN)。

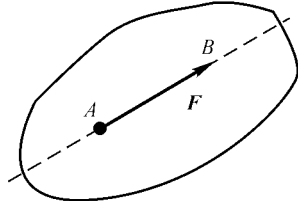


图 1-1

通常,作用在物体上的力不止一个,而是许多个,我们称作用在物体上的一组力为力系。若一力系作用于刚体并使其相对于地球处于静止或匀速直线运动状态,则认为刚体处于平衡状态,且该力系是平衡力系(force system of equilibrium)。如果作用在刚体上的一力系用另

一力系来替换,并不改变刚体原来的运动状态,那么,此二力系是等效力系。当一力与一力系等效时,称此力为该力系的合力。

§ 1-2 静力分析公理

静力分析公理是人们在长期的实践活动和实验观察中总结出来的最基本的力学规律。它无须证明而为人们所公认。力系简化(reduction of force system)和力系的平衡是以公理为基础的。

公理一(二力平衡公理) 作用在刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要与充分条件是:两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

二力平衡公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所应满足的条件。它是推导力系平衡条件的基础。

工程中常有一些只受两个力作用而平衡的构件,称为二力构件(members subjected to the action of two forces)。根据公理一,该两力的方位,必定沿两力作用点的连线(见图 1-2)。

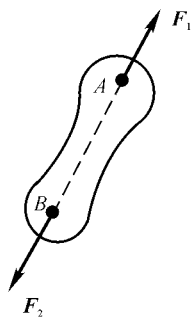


图 1-2

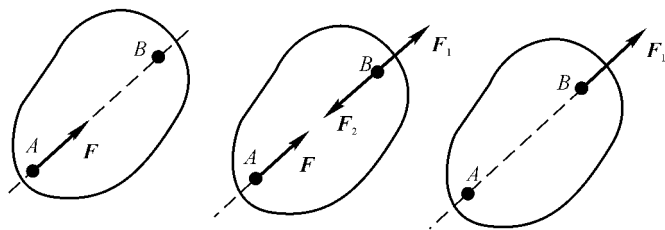


图 1-3

公理二(加减平衡力系公理) 在作用于刚体的力系上,加上或减去任一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的效应。

加减平衡力系公理是力系简化的重要依据。

推论 1(力的可传性原理) 作用于刚体的力可沿其作用线移至刚体内任一点,而不改变该力对于刚体的效应。

证明:如图 1-3 所示。设力 F 作用于刚体上 A 点。在刚体内力 F 作用线上任选一点 B , 在 B 点加一对平衡力 F_1 和 F_2 , 并使 $F_1 = -F_2 = F$ 。因为 (F_1, F_2) 是平衡力系,由公理二可知,力系 (F, F_1, F_2) 与力 F 等效。 F 与 F_2 二力等值、反向、共线,构成一平衡力系;减去该平衡力系,由公理二知,力 F_1 与力系 (F, F_1, F_2) 等效。从而有力 F 与力 F_1 等效。因为力 F_1 的大小、方向均与力 F 相同,且此二力等效,这相当于将力 F 沿其作用线从 A 点移至 B 点,而不改变原力对刚体的效应。

力的可传性原理指出,作用于刚体的力矢可沿其作用线任意滑动,因而对于刚体而言,力是滑动矢量(sliding vector)。力的三要素(three elements of a force)成为力的大小、方向、作用线。

公理三(力的平行四边形公理) 作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力,合

力也作用于该点,其大小和方向可由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的共点对角线确定。

在图 1-4(a)中,设力 F_1 和 F_2 作用于物体的 A 点,以 R 表示其合力,则有

$$R = F_1 + F_2$$

即合力矢 R 等于两个分力矢 F_1 和 F_2 的矢量和。

为求合力的大小和方向,在图 1-4(b)中,作矢量 \overrightarrow{ab} 表示力矢 F_1 ,再从力矢 F_1 的终点 b 作矢量 \overrightarrow{bc} 表示力矢 F_2 ,则矢量 \overrightarrow{ac} 即表示合力 R 的大小和方向。此种求合力矢的方法称为力的三角形法则。

力的平行四边形公理是力系简化的重要依据。

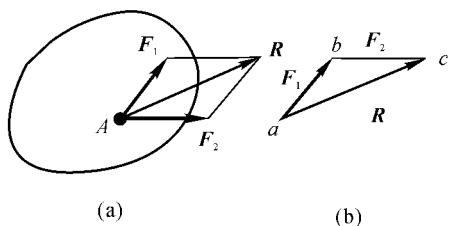


图 1-4

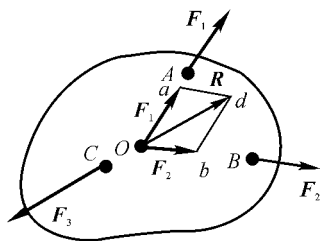


图 1-5

推论 2(三力平衡汇交原理) 当刚体受三力作用而平衡时,若其中任何两力的作用线相交于一点,则此三力必然共面,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明:如图 1-5 所示。设互不平行的力 F_1, F_2, F_3 分别作用于刚体的 A, B, C 三点,力 F_1, F_2 的作用线相交于 O 点;刚体在此三力作用下处于平衡状态。将力 F_1, F_2 移至 O 点,合并成为一力 R ,于是力系 (F_1, F_2, F_3) 与力系 (R, F_3) 等效。因为力系 (F_1, F_2, F_3) 是平衡力系,故力系 (R, F_3) 必为平衡力系。根据公理一, R 与 F_3 在同一直线上,即力 F_3 的作用线也通过汇交点 O;由力的平行四边形公理可知,力 F_3 与力 F_1, F_2 共面。

公理四(作用与反作用定律) 两个物体间的相互作用力,总是大小相等,作用线相同,指向相反,且分别作用在这两个物体上。

在分析多个物体组成的物体系统的受力时,这个公理是从一物体受力过渡到另一物体受力的依据。

公理五(刚化公理) 如果变形体在某力系作用下平衡,若将此物体刚化为刚体,其平衡不受影响。

工程实际中的物体是变形体,变形体能否使用刚体的平衡条件?刚化原理回答了这个问题。只要变形体受力后处于平衡,作用于其上的力系一定满足刚体的平衡条件。需要注意的是,对于变形体而言,刚体的平衡条件只是必要的,而不是充分的。例如,一段绳子在两端受到等值、反向、共线两拉力而不是两压力的作用时才会处于平衡。

§ 1-3 约束与约束反力

不受任何限制,可以自由运动的物体称为自由体(free body),例如在空中飞行的飞机。在

某些方向的运动受到限制的物体称为非自由体(nonfree lody)。在轨道上行驶的火车是非自由体,因为它受轨道的限制,所以只能沿轨道运行。阻碍物体运动的限制条件称为约束(constraint)。约束总是由被约束物体周围与之相连接或相接触的其他物体构成的,因而往往又把与被约束物体相连接或相接触的周围的物体称为约束。约束对被约束物体的作用力,称为约束反力(reactions of constraint),或称为约束力(constraint force)。约束反力作用在被约束物体与约束的接触处,其方向总是与约束所能限制的被约束物体的运动方向相反。

下文介绍几类常见的约束及其约束反力的特点。

1. 柔性约束

工程实际中的柔软缆绳、皮带、钢丝绳、链条等类物体统称为柔索(flexible cable)。由它们构成的约束称为柔性约束。柔索只能承受拉力,因而只能阻止物体沿柔索伸长方向的运动;于是,柔性约束的约束反力作用于连接点,其方向沿着柔索而背离物体(见图 1-6)。

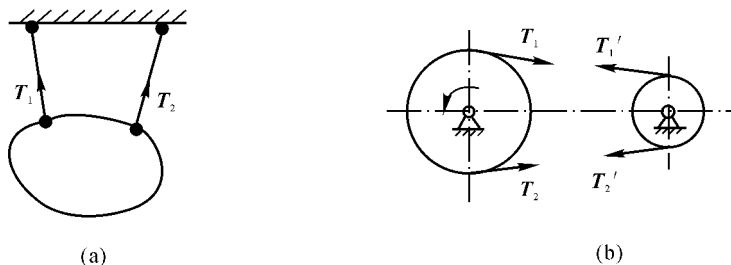


图 1-6

2. 理想光滑接触构成的约束

当两物体接触面之间的摩擦力小到可以忽略不计时,就把接触面(线)看做是理想光滑的。光滑接触面(smooth surface)约束只能阻止物体沿接触处公法线指向约束的运动。于是,光滑接触的约束反力通过接触点,沿着接触点处的公法线,指向被约束的物体(见图 1-7)。

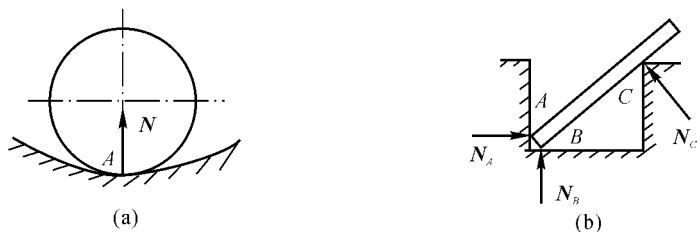


图 1-7

3. 光滑圆柱铰链约束

两个构件在连接处的相同圆孔中,通过插入圆柱形销钉连接起来,这样所形成的结构称为圆柱形铰链结构。在图 1-8(a)中,曲柄 OA 和连杆 AB 的连接,连杆 AB 和滑块 B 的连接,都是圆柱形铰链连接。图 1-8(b)说明了 A 处圆柱形铰链的构造。在铰链连接中,圆柱形销钉限制了构件的运动;如果忽略摩擦,销钉和圆孔成为光滑接触,于是便构成了光滑圆柱铰链(smooth cylindrical pin)约束。按照光滑接触约束的特点,销钉作用于构件的约束反力通过两者的接触点,沿接触处公法线指向构件。显然,约束反力在垂直于构件销孔轴线的横截面

内,且通过销孔中心。在图 1-8(c)中, R 表示销钉作用于构件的约束反力, A 为孔心, K 为构件与销钉的接触点。一般而言,由于接触点的位置无法预先确定,所以,铰链约束反力的方向不能预先确定。在受力分析中,将铰链约束反力用通过构件销孔中心的两个大小未知的正交分力来表示,如图 1-8(d)中所示的 X_A, Y_A 。

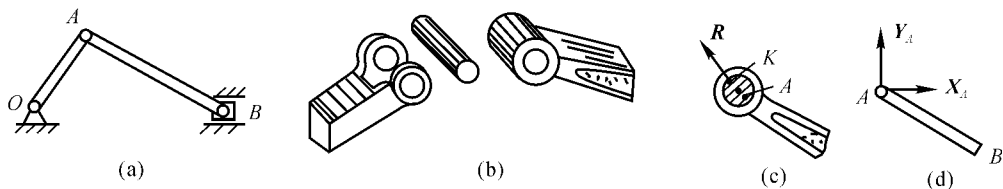


图 1-8

使用光滑圆柱销钉将构件或结构与固定支座连接,则该支座就称为固定铰支座,如图 1-9(a)所示。图 1-9(b),(c)是固定铰支座的两种简化表示。固定铰支座约束的性质与铰链连接中的铰链约束一样。通常将圆柱销钉的约束反力表示为相互正交的两个分力,如图 1-9(d)所示。

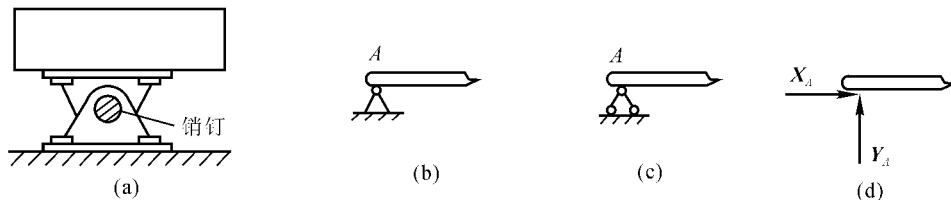


图 1-9

如果在铰链支座底部和支承面之间安装一排圆滚,就构成了辊轴支座,也称为活动铰支座,如图 1-10(a)所示。辊轴支座的几种简化表示分别示于图 1-10(b),(c),(d)。如果接触面是光滑的,辊轴支座不限制物体沿支承面的运动,只限制物体垂直于支承面方向的运动。因此,辊轴支座的反力通过销孔中心,且垂直于支承面,如图 1-10(e)所示。

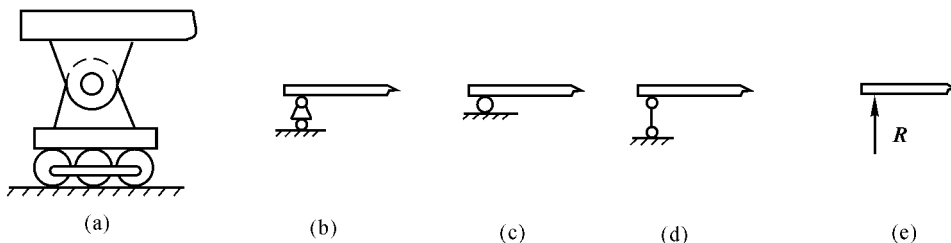


图 1-10

两端用光滑铰链与其他物体相连,并且中间不受任何外力作用的刚杆称为链杆。它常被用来作为撑杆或拉杆而形成链杆约束,如图 1-11(a)中所示的 BC 撑杆。显然,链杆是二力杆,所以,链杆约束的约束反力沿着两端铰链中心的连线,是拉力或者是压力,例如图 1-11(b)中的 BC 杆的受力。在图 1-11(c)中,链杆 BC 对所连接物 AB 的约束反力,也必定沿连线 BC 。

4. 光滑球形铰链约束

光滑球形铰链约束是一种空间类型的约束,其结构简图及简化表示分别如图 1-12(a), (b)所示。一个物体的球形窝内放入另一物体的球形部分,球窝和球的直径相差甚小,忽略摩擦,就构成了光滑球形铰链(smooth ball and socket joint)约束。根据光滑接触约束反力的特点,球窝作用于球的约束反力通过球心。由于球与球窝的接触点未定,约束反力的空间方位不定,因而,通常用通过球心的三个正交分力来表示,如图 1-12(c)所示。

除上述几类约束之外,还有其他类型的约束,例如固定端约束等,本书将在适当的章节予以介绍。

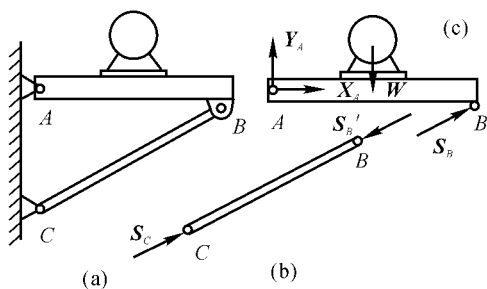


图 1-11

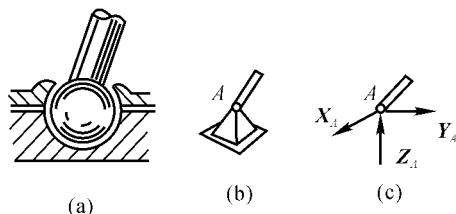


图 1-12

§ 1-4 受力分析与受力图

在受力分析时,需将受约束的物体(研究对象)从它周围的物体中分离出来,称为解除约束。在解除约束的同时,代之以相应的约束反力。约束反力是未知的。研究对象上除作用有约束反力外,通常还承受某些种类的载荷(loads),例如承受重力、油压力、风力等。这些载荷使物体产生运动或使物体产生运动趋势,称其为主动力(applied forces)。主动力一般是已知的。所谓受力分析就是分析被研究物体上所受的全部主动力和约束反力,并把分析结果用受力图(free-body diagram)清晰地表示出来。根据问题的已知条件和要求的内容,恰当地选择一个物体或几个物体组成的系统作为研究对象,并将研究对象从周围物体中分离出来,画出其外形简图,这个过程称为取研究对象或取分离体(isolated body)。研究对象与周围物体的连接关系确定了约束类型,也就确定了约束反力的特征。画有研究对象及其所受的全部力(包括主动力和约束反力)的简图,称为受力图。

静力平衡问题中,将依据受力图和平行条件,利用作用于研究对象上的主动力,确定作用于其上的未知约束反力的大小和指向。

例 1-1 重力为 G 的挂梯上端 A 铰接在楼板上,下端 B 可由 BC 绳吊起,梯子重心在 D 点,如图 1-13(a)所示。当绳子的拉力为 T 时, B 点尚未脱离地面,略去摩擦,画出该状态下梯子的受力图。

解 解除挂梯的约束,画分离体图。作用在挂梯上的主动力有重力 G ,铅直向下,作用于 D 点。挂梯在 A, B 两处被解除约束,应代以相应的约束反力。在 A 处,固定铰链支座约束反力方位不能预先确定,用两个正交分力 X_A, Y_A 表示,其指向可任意假设。在 B 处作用有两种