



职业教育基础课规划教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

(第2版)

韩向东 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



职业教育基础课规划教材

工 程 力 学

(第2版)

主 编	韩向东				
副主编	张福顺	王志刚	马 峻		
编 者	夏婉莉	耿 昕	高卫红	陈 超	
主 审	张小亮	夏策芳			

机 械 工 业 出 版 社

本书主要讲授物体静力平衡规律及杆件变形的一般规律,介绍了物体的静力分析及杆件的强度、刚度和稳定性问题等。全书共 12 章,包括静力分析基础,平面力系的简化与合成,平面力系的平衡,空间力系和重心,轴向拉伸和压缩,剪切,圆轴扭转,弯曲,组合变形,压杆稳定,交变应力,刚体的基本运动。本书在内容选择上以够用为原则,概念侧重理解公式、强化应用。本书采用了大量的实例引入知识点,使读者易于接受。为便于教学,本书配备了电子教案。

本书可作为职业院校教材或培训用书,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/韩向东主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2010. 1

职业教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-29507-5

I. 工… II. 韩… III. 工程力学—职业教育—教材
IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 003086 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:宋学敏 责任编辑:宋学敏 封面设计:王伟光

责任校对:申春香 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12.5 印张·241 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-29507-5

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

为适应职业教育发展的需要,贯彻教育部有关精神,根据职业教育的培养目标,我们对机械工业出版社出版的职业教育基础课规划教材《工程力学》进行了修订。修订后可作为职业院校工科机类、近机类 60~70 课时“工程力学”课程教材。

修订后的教材除保留第 1 版教材的优点外,还增加了以下特点:

1) 以服务为宗旨,增强了实用性。新版教材删去了原版教材中毕业生在工作实际中不常用的动力分析和动能定理。

2) 以能力为本位,增强了可接受性。新版教材中删去了原版教材中不适用的内容、例题和习题。

3) 文字叙述更加精炼。

4) 文中加“*”部分为选学内容。

本书还附有电子课件,可供教师授课和学生自学时使用。

此次修订由北京电子科技职业学院韩向东任主编,北京铁路电气化学校张福顺、北京电子科技职业学院王志刚、马峻任副主编,参加修订的还有北京电子科技职业学院陈超、海虹国际货运代理有限公司耿昕、北京铁路电气化学校夏婉莉、北京自动化工程学校高卫红。电子课件由张福顺制作。

本书由北京工业职业技术学院张小亮、北京电子科技职业学院夏策芳主审。在此表示衷心感谢。

因编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 分 析

第一章 静力分析基础	4	第一节 平面任意力系的平衡	30
第一节 力的概念	4	第二节 平面特殊力系的平衡	33
第二节 力的基本性质	5	第三节 简单物体系统的平衡	36
第三节 约束与约束力	6	* 第四节 考虑摩擦时物体的平衡	38
第四节 物体的受力分析 受力图	10	小结	40
小结	12	思考题	41
思考题	12	习题	42
习题	14	* 第四章 空间力系和重心	45
第二章 平面力系的简化与合成	16	第一节 力在空间直角坐标轴的 投影及分解	46
第一节 平面汇交力系的合成	16	第二节 力对轴之矩	48
第二节 力对点之矩	19	第三节 轮轴类零件平衡问题的 平面解法	48
第三节 力偶 平面力偶系的合成	21	第四节 重心和形心	51
第四节 平面任意力系的简化	23	小结	56
小结	25	思考题	57
思考题	26	习题	58
习题	27		
第三章 平面力系的平衡	30		

第二篇 构件的承载能力分析

引言	60	应力	66
第五章 轴向拉伸和压缩	63	第四节 轴向拉伸和压缩时的变形	68
第一节 轴向拉伸和压缩的概念	63	第五节 材料在拉伸和压缩时的 力学性能	71
第二节 轴向拉伸和压缩时横截 面上的内力	63	第六节 轴向拉伸和压缩时的 强度计算	80
第三节 轴向拉伸和压缩时横截面上的			

小结	83	主要措施	131
思考题	85	第七节 梁的变形及计算	134
习题	85	第八节 梁的刚度计算及提高 弯曲刚度的主要措施	141
第六章 剪切	88	小结	143
第一节 剪切的概念及其实用计算	88	思考题	144
第二节 挤压的概念及其 实用计算	90	习题	145
第三节 切应变 剪切胡克定律及 切应力互等定理	94	第九章 组合变形	149
小结	95	第一节 概述	149
思考题	96	第二节 弯曲与拉伸(压缩) 组合变形的强度计算	150
习题	96	第三节 圆轴弯曲与扭转组合变形的 强度计算	153
第七章 圆轴扭转	98	小结	157
第一节 扭转的概念	98	思考题	157
第二节 圆轴扭转时横截面上的 内力	98	习题	158
第三节 圆轴扭转时横截面上的 应力	101	第十章 压杆稳定	160
第四节 圆轴扭转时的变形	104	第一节 压杆稳定的概念	160
第五节 圆轴扭转时的强度和 刚度计算	105	第二节 临界力和临界应力	162
小结	108	第三节 压杆稳定校核与提高压杆 稳定性的措施	165
思考题	109	小结	169
习题	110	思考题	170
第八章 弯曲	113	习题	170
第一节 平面弯曲梁的计算简图	113	第十一章 交变应力	172
第二节 平面弯曲时横截面上的 内力	115	第一节 交变应力的概念	172
第三节 剪力图 弯矩图	118	第二节 材料在交变应力下的 疲劳破坏	174
第四节 纯弯曲时横截面上的 应力	125	第三节 材料的持久极限及构件的 持久极限	175
第五节 梁的正应力强度计算	126	小结	178
第六节 提高弯曲强度的		思考题	178
		习题	178

专 题

第十二章 刚体的基本运动	179	小结	185
第一节 刚体的平行移动	179	思考题	186
第二节 刚体绕定轴转动	180	习题	187
第三节 定轴转动刚体内各点的 速度和加速度	183	附录 型钢表	188

绪 论

一、工程力学的研究对象及主要内容

工程力学是一门研究物体机械运动以及构件强度、刚度和稳定性的科学。它包括静力分析、运动及动力分析和构件承载能力分析三部分。

机械运动是指物体在空间的位置随时间而变化的一种运动，它是人们生活及生产实践中最常见的运动形式。在一些较高级、复杂形式的运动中，也包含或伴随着机械运动。天体的运动、车辆的运行、水的流动、机器的转动等，都是机械运动。

静力分析主要研究力系的简化以及物体在力系作用下平衡的规律。

在结构的设计与施工中，经常要用到静力分析知识。例如，图 1 所示的起重绞车，为了合理地确定轴、齿轮等零件的尺寸，就必须分析它们在工作时的受力情况。又如图 2 所示，在设计一座厂房时，首先要对屋架、起重机梁、柱、基础等构件进行受力分析，再应用力系的平衡条件求出这些力中的未知量，这些都属于静力分析问题。

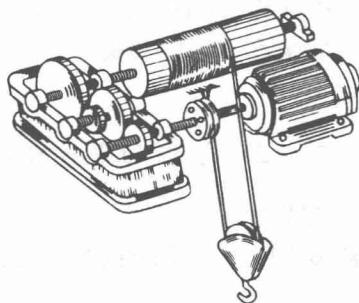


图 1

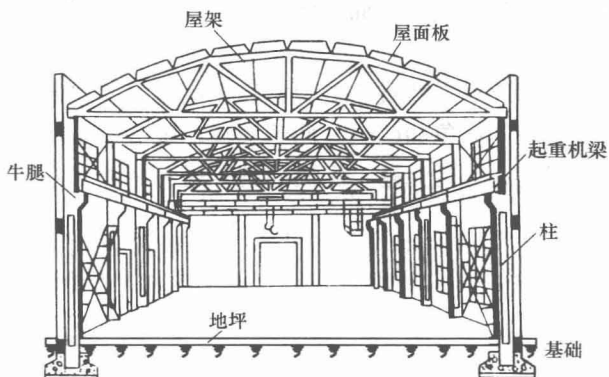


图 2

运动及动力分析是从几何的角度来研究物体运动的规律，以及物体的运动与其所受力之间的关系。

在机械传动设计时，要分析各部分之间的运动传递与转换，研究某些点的轨迹、速度和加速度。例如，在卷扬机作业时(图3)，已知电动机的转速，求重物的提升速度，这就属于运动分析问题。起重机开始起吊或重物下降时突然制动所发生的超重现象，属于动力分析问题。

建筑物、设备和机器等都是由构件组成的。构件在工作时，总要受到外力的作用。为了使构件在外力的作用下能正常工作而不损坏，也不发生过度的变形，不丧失稳定，就要求构件具有一定的强度(外力作用下构件抵抗破坏的能力)、刚度(构件抵抗变形的能力)和稳定性(保持原有平衡状态的能力)。

构件的承载能力分析就是研究构件在外力作用下的强度、刚度和稳定性等基本理论和计算方法。

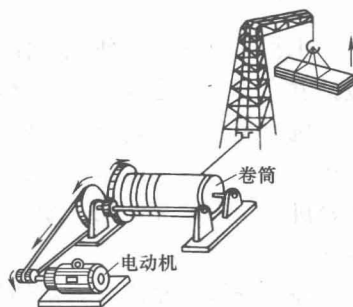


图 3

二、工程力学在工程技术中的地位和作用

工程力学是工科类专业中一门重要的技术基础课程，在基础课及专业课中起桥梁作用，是后继课程(如机械原理、机械零件、结构力学、建筑结构等)的重要基础。

在进行课程设计时，首先要运用静力分析知识对机构整体及各零部件进行受力分析；用运动分析知识进行转速计算；用动力分析知识进行轴的转矩与转速、功率的计算；在选择材料、确定截面形状及尺寸时，则需要用构件的承载能力分析知识。

力学理论的建立是以对自然现象的观察和生产实践的经验为主要依据的，它来源于实践，经过科学的抽象和归纳又回到实践，服务于实践。因此，工程力学对于我们今后研究问题、分析问题、解决问题有很大帮助。

第一篇 静 力 分 析

静力分析是工程力学的基础。工程实际中存在着大量静力分析问题。例如图 I-1 所示的油压夹紧装置,为了使压板始终压紧而不松脱,就必须分析压板的受力情况。又如桥式起重机(见图 I-2),它由桥架 1、横梁 2、起重机 3 和钢丝绳 4 等构件所组成。为了保证起重机能正常工作,设计时必须分析各构件所受的力。

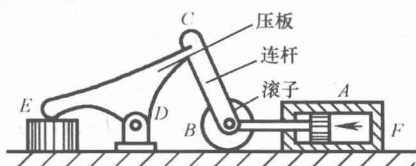


图 I-1

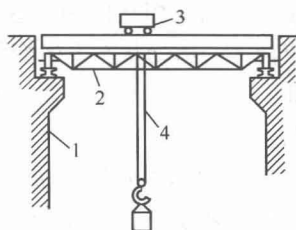


图 I-2

静力分析是研究物体在力的作用下平衡规律的科学。

所谓平衡,是指物体相对于地面处于静止或匀速直线运动的状态。

在静力分析时,我们将所研究的物体看成是刚体。刚体是指在外力作用下任何尺寸和形状都不发生变化的物体。在讨论物体受力分析及平衡问题时,这些变形如果可以忽略不计,将物体看成是刚体。刚体在现实中是不存在的,是理想化了的模型。

在构件的承载能力分析中,讨论物体受力时的变形以及破坏情况时,变形成为一个主要的因素。必须将物体看成是变形体。静力分析关于刚体的平衡条件,对于变形体来说也是必要的。

第一章 静力分析基础

第一节 力的概念

一、力

力是物体间的相互作用。这种作用使物体的运动状态发生改变或形状发生改变。力使物体的运动状态发生变化，称为力的外效应。例如，物体加速下落，汽车制动等都属运动状态发生变化。力使物体的几何尺寸和形状发生变化，称为力的内效应。例如，弹簧伸长，机器的轴变弯，混凝土被压碎等都属于力的内效应。

力对物体的作用效果取决于三个要素：力的大小、力的方向、力的作用点。这三个要素中，有任何一个要素改变，力的作用效果就会改变。

力是矢量，用有向线段表示。有向线段（按一定比例尺）的长度表示力的大小，箭头指向表示力的方向，矢量的始端或终端表示力的作用点，如图 1-1 所示。本书中用黑体字母表示矢量，如 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ ；用明体字母表示该矢量的大小，如 F 、 G ；书写时则可在符号上加个箭头表示矢量，如 $\vec{F}$ 、 $\vec{G}$ 。

力的单位是牛(N)或千牛(kN)， $1\text{kN} = 1000\text{N}$ 。

二、力偶

力学中，把作用在同一物体上，大小相等、方向相反，但不共线的一对平行力称为力偶，它使物体转动。例如，用两个手指拧动水龙头，开门锁所施加的都是力偶。有关内容将在第二章详述。

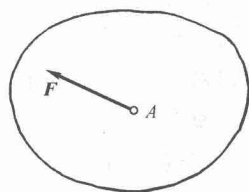


图 1-1

三、力系

作用在物体上的一群力称为力系。

如果一个力系的作用能用另一个力系来代替，而不改变对物体的作用效果，则说这两个力系是等效的，它们互为等效力系；否则，即是非等效力系。如果一个力的作用等效于一个力系的作用，则这个力称为原力系的合力。力系中的每一个力都是其合力的分力。

物体处于平衡状态的力系称为平衡力系。物体处于平衡状态必须满足的条

件,称为力系的平衡条件。

依据力的作用线是否共面可分为空间力系与平面力系。力的作用线在一个平面上的力系为平面力系;力的作用线不共面,则为空间力系。按力的作用线交点情况可分为汇交力系、平行力系与任意力系。作用线相互平行的力系为平行力系,如屋面板所受重力即为平行力系;力的作用线相互交于一点的力系是汇交力系(或共点力系),如起吊重物时吊钩的受力;力的作用线既不相互交于一点也不相互平行的力系叫做任意力系,如行驶中列车的受力和机器转动中轴的受力。

按力的作用范围可分为集中力(集中载荷)、分布力(分布载荷)当力的作用面积相对于结构或构件的尺寸很小时,可以将其简化为作用在结构或构件某一点上,即集中力。而连续分布在物体上的力叫做分布力。分布在整个构件内部各点上的力是体分布力,如重力;分布在构件表面上的力是面分布力,如土、水、风雪压力等。分布载荷有些是均匀分布的,称为均布载荷,如工字梁自重(图 1-2)。

分布力的大小用载荷集度 q 来表示。体分布力的单位为牛/米³(N/m³)或千牛/米³(kN/m³),面分布力的单位为牛/米²(N/m²)或千牛/米²(kN/m²)。

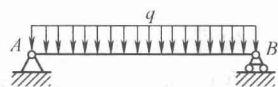


图 1-2

工程设计中,常常需要将体、面分布力简化为连续分布在某一段长度(如杆件轴线)上的力,称为线分布力,单位为牛/米(N/m)或千牛/米(kN/m)。

第二节 力的基本性质

力的基本性质由静力分析中的公理来说明。

公理一 二力平衡公理

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等、方向相反,且作用在同一直线上。

凡是不计自重只在两点受力而处于平衡状态的构件,称为二力构件。二力构件的形状可以是直杆也可以是曲杆或折杆,因只有两个受力点,故力的方向必在两受力点连线上。在结构中找出二力构件,对物体的受力分析至关重要。

公理二 力的平行四边形公理

作用于物体上同一点的两个力,其合力也作用在该点上,合力的大小和方向由这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线确定。由矢量合成法,有

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

如图 1-3 所示, $\mathbf{F}_R$ 即为 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 的合力。 $\mathbf{F}_R$ 的大小可以由余弦定理计算, $\mathbf{F}_R$ 的方向可以用它与 $\mathbf{F}_1$ (或 $\mathbf{F}_2$) 之间的夹角 α (或 β) 来表示。

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\theta(180^\circ - \theta)}$$

$$\tan\alpha = \frac{F_2 \sin\theta}{F_1 + F_2 \cos\theta} \quad (1-2)$$

由两个力求合力,解是唯一的;反过来由合力求两个分力,有无穷多个解。通常将合力沿两个互相正交的方向分解为两个分力,即合力的正交分解。如图 1-4 所示,常将力 F 沿水平方向及垂直方向分解为 F_x 、 F_y 两个分力, $F_x = F \cos\alpha$ 、 $F_y = F \sin\alpha$ 。

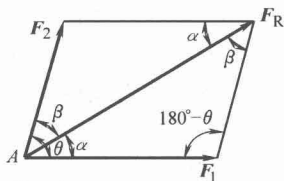


图 1-3

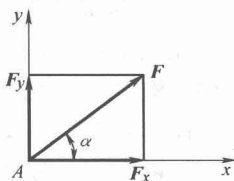


图 1-4

公理三 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系,不会改变原力系对刚体的效应。

力的可传性原理:作用在刚体上某点的力,沿其作用线移到刚体内任一点,不改变它对刚体的作用。例如,实践中用 F 力拉车及用等量的力去推车,效果是一样的。

由力的可传性原理可以看出,作用于刚体上的力的三要素为:力的大小、方向和力的作用线位置,不再强调力的作用点。

需要说明的是,公理一、三及推论,只对刚体适用,而不适用于变形体。

公理四 作用力与反作用力公理

当甲物体给乙物体一作用力时,甲物体也同时受到乙物体的反作用力,且两个力大小相等、方向相反、作用在一直线上。

第三节 约束与约束力

自然界中的一切事物总是以各种形式与周围事物互相联系而又互相制约的。在工程结构中,每一构件都根据工作要求以一定方式和周围其他构件联系着,它的运动因而受到一定的限制。例如,梁由于墙的支持而不致下落,列车只能沿轨道行驶,门、窗由于合页的限制只能绕固定轴转动等。

一、约束及约束力

凡是对一个物体的运动(或运动趋势)起限制作用的其他物体,就称为这个物体的约束。

能使物体运动或有运动趋势的力称为**主动力**，主动力往往是给定的或已知的。例如物体的重力、电磁力、水压力、土压力、风压力等。

约束既然限制物体的运动，也就给予该物体以作用力。约束作用在被约束物体上的作用力称为**约束力**。例如，梁压在墙上，给墙以压力，墙阻止梁下落而反作用于梁一向上的支承力，即墙给梁的约束力。约束力的方向总是与约束所阻止的物体运动趋势方向相反。

约束力的方向与约束本身的性质有关。下面介绍几种工程中常见的约束类型。

二、工程上常见的约束

1. 柔性约束

绳索、链、带等柔性物体形成的约束即为柔性约束。作为约束，它只能限制被约束物体沿其中心线伸长方向的运动，而无法阻止物体沿其他方向的运动。因此，柔性约束产生的约束力，是通过接触点沿着柔体中心线背离被约束物体的拉力。例如，图 1-5a 所示的一重物，用链、钢丝绳悬吊。现分析重物的受力情况（图 1-5b），链的约束力 F_{TA} 、 F_{TB} 应分别沿着链 AC 、 BC ；再分析吊钩 C （看作一个点）的受力情况（图 1-5c），链拉力 F'_{TA} 、 F'_{TB} 应分别沿 CA 、 CB ，背离 C 点，钢丝绳的约束力 F_T 应沿钢丝绳，向上。

当柔软的绳、链或带绕过轮子时，它们给轮子的力只能沿柔索的中心线，背离轮子。图 1-6a 所示为一差动滑轮，图 1-6b 画出了各段链分别给轮 I 和轮 II 的力 F 、 F'_{T1} 、 F'_{T2} 和 F_{T1} 、 F_{T2} 。

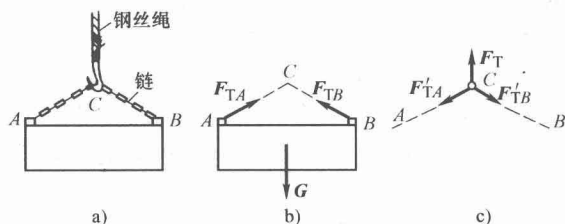


图 1-5

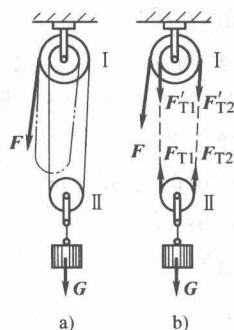


图 1-6

2. 光滑面约束

这种约束与被约束物体的接触处是光滑的。它只能限制物体沿接触处公法线方向的运动，而不能阻止物体沿光滑接触面切线方向的运动，故约束产生的力总是通过接触点沿接触面的公法线而指向被约束物体的压力。

如图 1-7a 所示，二曲面接触， $\tau-\tau$ 为公切面（线），约束仅能限制球体沿接

触处公法线 $n-n$ 向约束体内的运动, 所以, 光滑面约束对球体产生的约束力为作用于 A 点的压力 F_{NA} 。

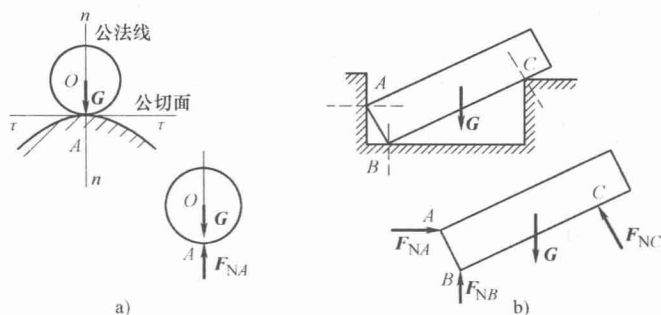


图 1-7

图 1-7b 为一矩形构件搁置在槽中的情况, 直杆有 A 、 B 、 C 三个点与固定的槽壁相接触, 三处的约束力 F_{NA} 、 F_{NB} 、 F_{NC} 均为公法线方向, 并且指向矩形直杆的压力。

图 1-8 为机械夹具中 V 形块的受力情况, 各接触处均为光滑接触。

3. 光滑的圆柱形铰链

圆柱形铰链是用一圆柱形销钉将两个构件联接在一起 (图 1-9a), 联接方式为用销钉插入两构件的圆孔中, 且认为销钉与圆孔的表面都是完全光滑的。门、窗用的合页, 起重机动臂与机座的连接等都是铰链约束的实例。

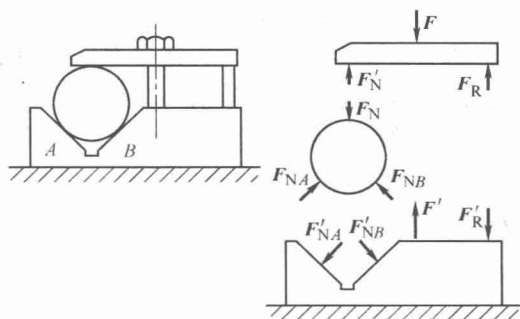


图 1-8

铰链简图如图 1-9b 所示。铰链连接中销钉只能阻止被约束的两构件的相对移动, 但不能限制构件绕圆孔中心的相对转动。其约束力 F_R 应沿接触点处的公法线, 过铰链中心 (销钉中心) 如图 1-9c 所示。但接触处的位置与被约束构件的受力情况有关, 不能预先确定, 因此 F_R 的方向未定, 常常用过销钉中心沿 x 、 y 轴正向的两个约束力 F_{Rx} 、 F_{Ry} 表示。

4. 支座

固定于基础或静止的支承面上的铰链支座称作固定铰支座。如图 1-10 所示的弧形闸门, 在 A 处将腿架末端与固定构件用圆柱销钉连接, 就是一

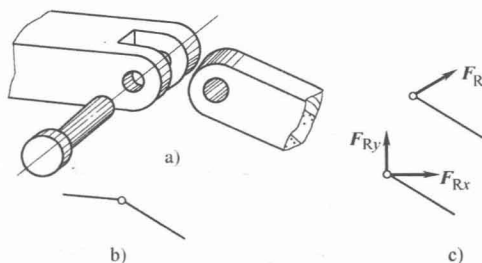


图 1-9

个固定铰支座的实例。

固定铰支座的基本构造如图1-11a所示，计算简图如图1-11b所示。由固定铰支座的构造特点不难看出，其约束力的表示方法和圆柱形铰链是相同的，因此可以用图1-11c表示约束力。



图 1-10

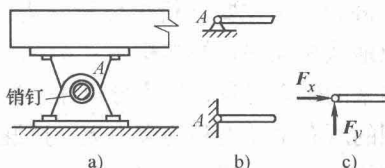


图 1-11

如果将构件与支座用光滑的圆柱形销钉连接起来，而支座又放在几个圆柱形辊轴上，则称为可动铰支座。这时支座可以在支承面上水平移动，但不能离开支承面(图1-12a)。显然这种支座只能限制构件沿支承面垂直方向的运动，故可动铰支座的约束力通过销钉中心，垂直支承面。图1-12b为可动铰支座简图，其约束力如图1-12c所示。例如，在桥梁中采用的弧形板支座，如图1-13所示，桥梁与桥墩是通过分别固定在梁上和墩上的两块钢板相互接触，从约束所能阻止的运动趋势来看，它与可动铰支座的作用相同。

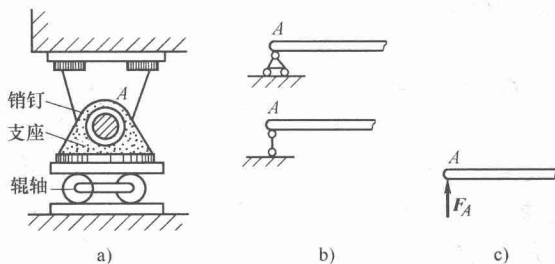


图 1-12

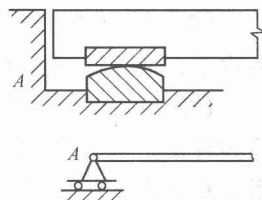


图 1-13

5. 固定端约束

固定端约束是指既能限制构件沿任何方向移动，又能限制构件转动的约束。如嵌在墙体内较深的支承阳台的悬臂梁(图1-14a)，墙即为该梁的固定端约束，图1-14b、c分别表示其计算简图和约束力。由于固定端受力较复杂，其约束力

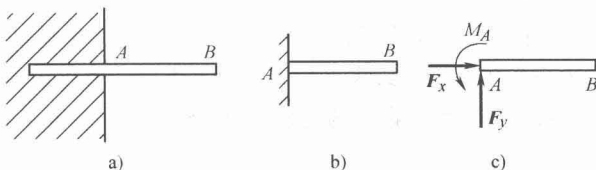


图 1-14

将在第二章详细研究。

第四节 物体的受力分析 受力图

静力分析主要分析物体所受力系的简化与平衡问题。为此,需将所研究物体假想地从相互联系的结构中“分离”出来,单独画出。这种从周围物体中单独隔离出来的研究对象,称为**分离体**(或**隔离体**)。分离体已解除其约束。将研究对象受到的所有主动力和约束力无一遗漏地画在分离体上,这样的图形称为**受力图**。取分离体、画受力图的过程即是对研究对象进行受力分析。受力分析是求解力学问题的一个基本环节,也是关键的一步,必须反复练习,熟练掌握。

画受力图的步骤如下:

- ① 明确研究对象,画出研究对象的分离体简图。
- ② 在分离体上画出全部主动力。
- ③ 在分离体解除约束处,画出相应的约束力。

下面举例说明受力分析的方法。

例 1-1 重力为 G 的小球放置在光滑的斜面上,并用一绳拉住,如图 1-15a 所示。试画小球的受力图。

解 (1) 以小球为研究对象,解除斜面和绳的约束,画分离体。

(2) 画主动力。小球受重力 G , 方向垂直向下, 作用于球心 O 。

(3) 画出全部约束力。小球受到的约束有绳和斜面。绳为柔性约束, 其约束力 F_T 为作用在 C 点的拉力; 小球与斜面为光滑接触, 斜面对小球的约束力 F_{NB} 为作用在 B 点、垂直于斜面的支持力。小球受力图见图 1-15b 所示。

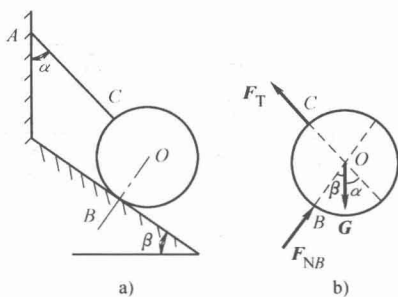


图 1-15

例 1-2 画图 1-16a 中杆件 AB 的受力图。墙面光滑。

解 (1) 以杆 AB 为研究对象, 解除约束, 画出分离体。

(2) 画出主动力 G 。

(3) 画出全部约束力。 B 处为光滑面约束, 约束力 F_{NB} 为通过 B 点、垂直于墙面的支持力。 A 端为固定铰支座, 约束力用 F_{Ax} 、 F_{By} 表示。受力图如图 1-16b 所示。

例 1-3 如图 1-17a 所示, 梁 A 端为固定铰支座, B 端为可动铰支座, 在 D 处作用一力 F 。画出 AB 梁受力图。

解 (1) 以 AB 梁为研究对象, 解除约束, 画出分离体。