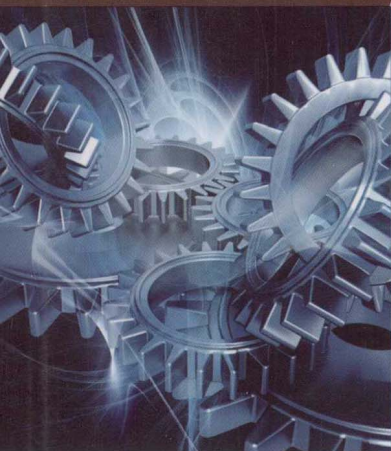




普通高等教育“十二五”规划教材



工程力学

GONGCHENG LIXUE

主编 郭 玲 副主编 赵 侠



中国轻工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工 程 力 学

郭 玲 主 编
赵 侠 副主编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/郭玲主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2012. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5019 - 8550 - 0

I. ①工… II. ①郭… 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 (2011) 第 241275 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 宋振全 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 吴京一

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 河北高碑店市德裕顺印刷有限责任公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 13

字 数: 320 千字

书 号: ISBN 978 - 7 - 5019 - 8550 - 0 定价: 26.00 元

邮购电话: 010 - 65241695 传真: 65128352

发行电话: 010 - 85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

120030J2X101ZBW

前 言

《工程力学》是高职高专机械类及近机类各专业的一门技术基础课，其理论性和实践性皆较强。本教材根据教育部制定的《高职教育工程力学课程教学基本要求》，结合高职办学特点及教学改革的发展编写而成。

本教材在编写过程中力求突出以下特点：

一、内容简练、结构清晰。在满足教学基本要求的前提下，立足“少学时”，以“够用，适度”为原则，简化公式推导，删去了以往教材一些偏难、偏深的内容，强调概念与理论的严谨与完整，传授最基本的知识与方法，增强了教学适用性。

二、实用性与创新兼顾。在例题和习题的选择上尽量贴近工程实际，增强工程概念，又不过多地涉及具体结构细节，通过对工程实例的简化和比较，培养学生建立力学模型和解决实际问题的能力，使学生能够学以致用，突出了高等职业教育的特色。并结合相关内容提出一定数量的有一定难度的思考题，以培养学生独立思考问题的能力和创新能力。

本教材由辽宁石油化工大学职业技术学院机械基础教研室组织编写，郭玲主编，赵侠副主编，卜建新主审。其中，第1、3章由郭玲编写，第2、4、6章和附录由赵侠编写，第5、7章由王莹编写，第8、9、10章由龚雪编写。

本教材在编写过程中查阅和参考了大量文献，受益匪浅，为此，编者对这些文献的作者表示衷心的感谢！

本书可作为高职高专机械类及近机类各专业少学时工程力学课程的教材，也可供工程技术人员参考使用。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1篇 静力学	1
第1章 静力学基础	2
1.1 静力学的基本概念	2
1.2 静力学公理	2
1.3 约束与约束反力	4
1.4 受力分析与受力图	7
小 结	9
思考题	10
习 题	11
第2章 平面力系	14
2.1 平面汇交力系的合成	14
2.2 力矩	16
2.3 力偶	18
2.4 力的平移定理	20
2.5 平面任意力系的简化	21
2.6 平面力系的平衡方程及其应用	24
2.7 物体系统的平衡	33
2.8 考虑摩擦时的平衡问题	37
小 结	42
思考题	43
习 题	44
第3章 空间力系	49
3.1 力在空间直角坐标轴上的投影	49
3.2 力对轴之矩	50
3.3 空间力系的平衡方程及应用	53
3.4 重心和形心	55
小 结	58
思考题	58
习 题	58

第2篇 材料力学	60
第4章 轴向拉伸与压缩	63
4.1 轴向拉伸与压缩的概念	63
4.2 截面法、轴力与轴力图	64
4.3 轴向拉压杆横截面上的应力	66
4.4 轴向拉压杆斜截面上的应力	68
4.5 轴向拉压杆的变形 胡克定律	70
4.6 材料在轴向拉压时的力学性能	72
4.7 应力集中的概念	76
4.8 轴向拉压杆的强度计算	77
4.9 拉压静不定问题	80
小 结	81
思考题	82
习 题	82
第5章 剪切与挤压的实用计算	86
5.1 剪切与挤压的概念	86
5.2 剪切与挤压的实用计算	87
小 结	92
思考题	92
习 题	92
第6章 扭转	94
6.1 扭转的概念	94
6.2 扭矩与扭矩图	94
6.3 圆轴扭转时横截面上的应力与强度计算	96
6.4 圆轴扭转时的变形及刚度计算	101
小 结	103
思考题	103
习 题	104
第7章 弯曲内力	106
7.1 平面弯曲的概念	106
7.2 剪力与弯矩	108
7.3 剪力图与弯矩图	111
7.4 剪力、弯矩与载荷集度间的关系	116
7.5 纯弯曲时梁的正应力	119
7.6 常用截面二次矩 平行移轴公式	124

7.7 弯曲正应力强度计算	126
7.8 弯曲切应力简介	129
7.9 梁的变形和刚度计算	133
7.10 提高梁的强度和刚度的措施	138
小 结	141
思考题	141
习 题	142
 第8章 应力状态与强度理论	149
8.1 应力状态的概念	149
8.2 二向应力状态下的应力分析	150
8.3 广义胡克定律	154
8.4 强度理论	155
小 结	158
思考题	159
习 题	159
 第9章 组合变形的强度计算	162
9.1 弯曲与拉伸（压缩）组合变形的强度计算	162
9.2 弯曲与扭转组合变形的强度计算	166
小 结	169
思考题	169
习 题	170
 第10章 压杆稳定	173
10.1 压杆稳定的概念	173
10.2 细长压杆的临界力	174
10.3 压杆的临界应力与临界应力总图	177
10.4 压杆的稳定性计算	179
10.5 提高压杆稳定性的措施	180
小 结	181
思考题	182
习 题	182
 附录1 习题参考答案	185
附录2 型钢规格表	190
 参考文献	199

第1篇 静力学

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。对平衡规律的研究不仅对材料力学、结构力学的学习有较大的作用,而且对各种动力学和运动学的研究也具有非常重要的意义。

静力学研究内容主要包括以下三个方面。

(1) 物体的受力分析

分析物体受力的数量,各个力作用线的位置、大小和方向。

(2) 力系的等效与简化

将作用在物体上的一个力系用另一个与它等效的力系来代替,则称这两个力系互为等效力系。用简单力系等效地替换复杂力系,称为力系的简化。在研究力系等效替换的问题时,物体并不一定处于平衡状态,我们可以暂不考虑物体的运动,而仅研究作用力的替换。例如:一架飞行的飞机,受到风力、重力、空气阻力等作用,这群力错综复杂地分布在飞机的各部位,每个力都会影响它的运动。要想确定飞机的运动规律,必须分析这个力系的总的作用效果,这就需要用简单的等效力系来代替这个复杂的力系,然后再进行运动的分析。

(3) 力系作用下的平衡条件及其应用

力系平衡条件是指物体平衡时,作用在物体上的各种力系必须满足的条件。所谓力系平衡条件的应用是指根据力系的平衡条件,解决工程实际问题。力系的平衡条件在工程实际中有着十分重要的意义。在设计建筑物的构件和机械零件时,需要应用静力学平衡条件计算所受的未知力,然后依据材料力学和弹性力学的强度、刚度和稳定性条件,对构件和零件的材料选取、尺寸确定进行分析计算。所以,静力学在工程实际中有着广泛的应用。

第1章 静力学基础

1.1 静力学的基本概念

1.1.1 刚体的概念

静力学的研究对象是刚体。所谓刚体,就是在力的作用下,其内部任意两点之间的距离不变,即形状和大小保持不变的物体。在实际工程中,刚体是不存在的。任何物体在力的作用下,或多或少都要发生变形,我们称之为变形体。在一些工程问题中,一些微小的变形对研究物体的平衡问题不起主要作用,这样的物体,我们把它抽象为刚体,这对于研究问题来说是非常有必要的。刚体是抽象化的力学模型,静力学研究的对象仅限于刚体。

1.1.2 力的概念

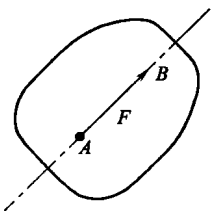


图 1-1 力的三要素

力是物体间的相互机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生变化,或者使物体发生变形。力的三要素如图 1-1 所示。

(1) 力的大小 表示物体的机械作用的强弱,用线段的长度按一定的比例尺表示。在国际单位制中,力的单位是“牛顿”或“千牛顿”,符号为 N 或 kN, $1\text{kN} = 1000\text{N}$, $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。

(2) 力的方向 表示物体的机械作用具有方向性,通常用箭头表示。力的方向包括力的作用线在空间的方位和力沿作用线的指向。

(3) 力的作用点 作用点是力作用在物体上的部位。

力是矢量,有大小、方向,力的合成遵循平行四边形法则。力对物体的作用效应,取决于力的大小、力的方向和力的作用点位置。

1.1.3 平衡的概念

从惯性定律的观点看,物体相对于惯性系统保持静止或做匀速直线运动,这两种状态没有本质上的不同,并把这两种状态统称为平衡状态。如地面建筑物、房屋中的家具、做匀速直线行驶的火车都是处于平衡状态。平衡是物体运动的一种特殊形式。

静力学研究刚体的平衡规律,即研究作用在刚体上的力系的平衡条件。

力系是指作用于物体上的一组力。若一个力系作用于物体上并使其保持平衡状态,则称此力系为平衡力系。

1.2 静力学公理

静力学公理是人们在长期生活实践中总结概括出来的。静力学的全部理论,都是建立

在这些公理的基础之上。

1.2.1 公理一 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。合力的作用点仍在该点,合力的大小和方向用以这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线来表示,如图1-2(a)所示。力的平行四边形法则在应用时也可简化为图1-2(b)所示,称为三角形法则。

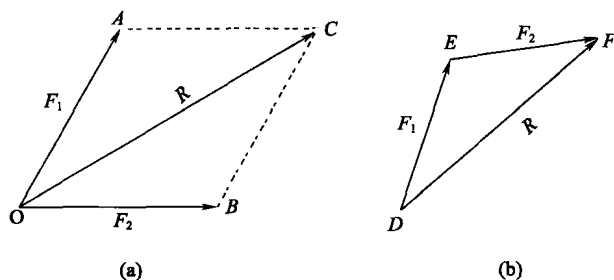


图 1-2

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (1-1)$$

公理一总结了最简单的力系简化规律,是较复杂力系简化的基础。

1.2.2 公理二 二力平衡公理

刚体在两个力作用下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,并且作用在同一条直线上,如图1-3所示。

$$F_1 = -F_2 \quad (1-2)$$

公理二揭示了作用于刚体上的最简单力系的平衡条件。对于刚体来说,这个条件是充分和必要的;但对于变形体来说,这个条件是非充分的。例如绳索在等值、反向、共线拉力作用时可以平衡,但在等值、反向、共线压力作用时就不能保持平衡。

工程中将不计自重、只受两个力作用而处于平衡的刚体称为二力体,在结构分析中又称为二力构件。

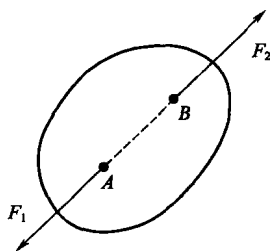


图 1-3

1.2.3 公理三 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任一个力系上,加上或减去任一平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应,即新力系与原力系的作用效应相同。这个公理是研究力系等效替换的重要依据。

由此可得如下推论。

推论一 力的可传性原理

刚体上的力可沿其作用线移到该刚体内的任意位置,并不改变该力对该刚体的作用效应。

证明 如图 1-4 所示,设力 F 作用在刚体上的 A 点,在力 F 的作用线上任选一点 B ,在 B 点加上一对平衡力系 F_1 和 F_2 ,使 $F_1 = -F_2 = F$,将平衡力系 F_1 和 F_2 减去,则 F_1 和 F 等效,即力 F 由 A 点沿作用线移到 B 。

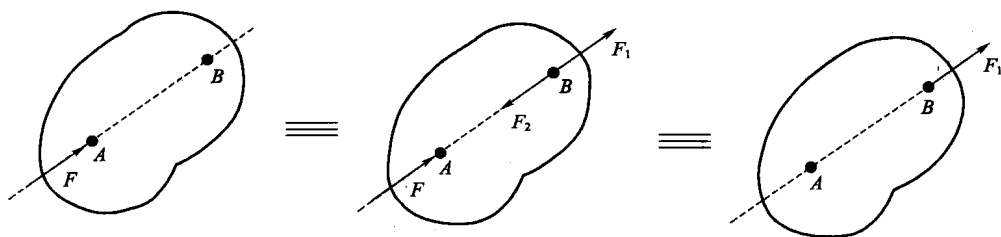


图 1-4

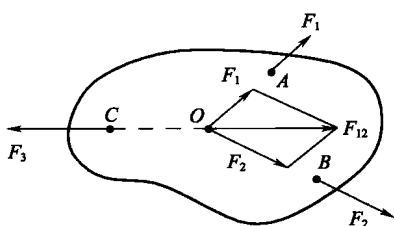


图 1-5

推论二 三力平衡汇交定理

刚体受不平行的三个力作用而平衡时,三个力的作用线必汇交于一点,并且三个力必作用在同一平面内。

证明 如图 1-5 所示,在刚体上的 A 、 B 、 C 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,根据力的平行四边形法则得合力 F_{12} ,则力 F_3 与 F_{12} 平衡。由于两个平衡力必须共线,所以力 F_3 必与力

F_1 、 F_2 共面,且通过力 F_1 、 F_2 的交点 O 。

1.2.4 公理四 作用与反作用定律

两物体之间的作用力与反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,分别作用在这两个物体上。若用 $\vec{F}$ 表示作用力,用 $\vec{F}'$ 表示反作用力,则

$$\vec{F}' = -\vec{F} \quad (1-3)$$

要强调指出的是:作用力与反作用力虽然等值、共线、反向,但并不作用于同一物体上。因此,不能误认为这两个力互成平衡。这与二力平衡公理有本质的区别。

公理四概括了物体间相互作用的关系,表明作用力与反作用力总是成对出现的。

1.3 约束与约束反力

工程力学将研究的物体分为自由体和非自由体。

位移不受任何限制的物体,称为自由体。如空中飞行的炮弹、飞机或火箭等。

对于轴承中的轴、绳子悬挂的重物、桌子上的书等,位移受某些限制的物体,称为非自由体。

1.3.1 约束与约束反力定义

限制非自由体某些位移的物体称为约束。例如轴承对轴、绳子对重物、桌子对书等都是约束。约束对物体的作用,实际上就是力,称为约束反力或约束力。

约束力是限制物体运动的,因此它的作用点应在约束与被约束物体的接触点,它的方向应与约束所能限制的方向相反。

1.3.2 几种常见类型的约束反力

约束力的特征取决于约束体与被约束体接触面的物理性质和连接方式。工程中的约束种类很多,为了方便研究问题,必须将物体间的连接方式抽象化,按其具有的特性,归纳为以下几种典型的理想约束模型。

1.3.2.1 柔性约束

属于这类约束的有绳索、链条、皮带等,柔性约束只能承受拉力。因此约束力作用在接触点,方向沿柔性约束构件的轴线方向,背离被约束物体。如图1-6所示,用 F_T 表示这类约束力。

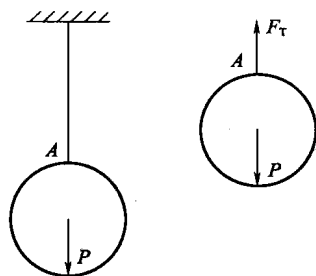


图1-6

1.3.2.2 光滑接触面约束

物体与约束的接触面是光滑的,即它们之间的摩擦可以忽略。约束不能阻止物体沿接触面切线方向的位移,只能限制沿接触面的公法线方向进入接触面的位移。所以光滑接触面约束反力的方向应沿接触面在接触点处的公法线,并指向被约束物体。

工程上常见的光滑接触面的约束,按接触形式可以简化为三种类型:点接触、线接触、面接触。如图1-7所示,用 N 表示约束力。

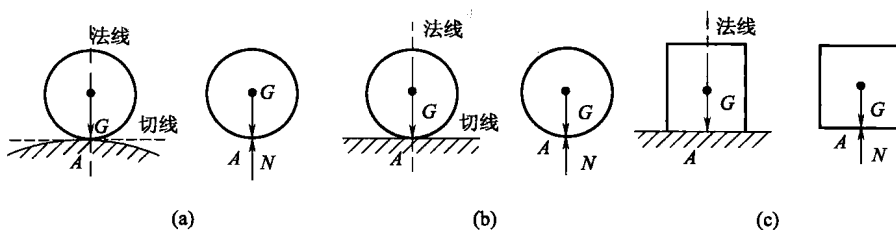


图1-7

1.3.2.3 光滑铰链约束

(1) 中间铰链约束 中间铰链连接是实际工程中两个构件间常用的连接形式。它是由两个带孔的活动构件用一个柱销连接而成,如图1-8(a)所示。

光滑铰链约束的特点是只能阻碍构件沿任意方向的移动,但不能阻碍其柱销的转动。在受到力的作用时,柱销和销孔之间是点接触,如图1-8(b)所示。忽略摩擦力时,那么柱销和销孔间的约束形式属于光滑接触面约束,约束反力沿接触点的公法线方向,即通过销孔

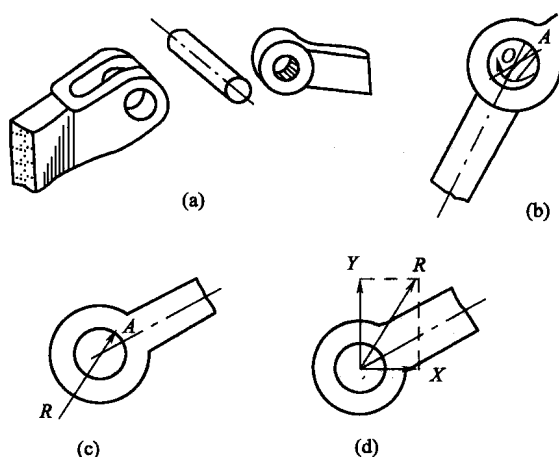


图 1-8

中心并作用于接触点 A , 如图 1-8(c) 所示。由于接触点的位置事先不能确定, 所以约束反力的方向是未知的, 通常采用作用于销孔中心的两个相互垂直的分力 X 和 Y 表示, 如图 1-8(d) 所示。当 X 和 Y 的大小确定后, 约束反力 R 的大小和方向随之确定。

(2) 固定铰链支座约束 如果光滑铰链约束中的一个构件是机架时, 称为固定铰链支座约束, 如图 1-9(a) 所示。固定铰链支座约束只能限制沿圆柱径向的相对移动, 不能限制绕圆柱轴线的转动。约束反力在垂直于转轴的平面内, 并通过铰链中心, 其方位和指向未定。固定铰链支座约束反力的确定与中间铰链相同, 如图 1-9(b) 所示。

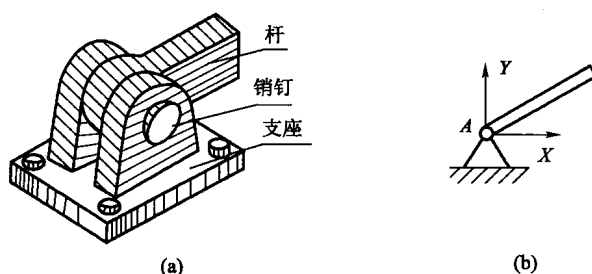


图 1-9

(3) 活动铰链支座约束 活动铰链支座约束又称为滚轴约束或滚轴支座。其实质是铰链支座不是固定在机架上, 而是光滑面与光滑圆柱约束的复合约束, 即用几个滚轴支承在光滑平面上, 就构成了滚动铰链支座, 如图 1-10(a) 所示。

活动铰链支座约束只限制沿支承面法线方向的位移, 约束反力的作用线沿支承面的法线, 通过铰链中心, 并指向被约束物体。活动铰链支座的约束反力作用于铰链中心且垂直于支承面, 其简图和约束反力的表示方法, 如图 1-10(b)、图 1-10(c) 所示。

(4) 球铰链约束 球铰链约束简称球铰。能限制物体任何方向的线位移, 约束反力作用线通过球心, 可能指向任一方向, 如图 1-11 所示。

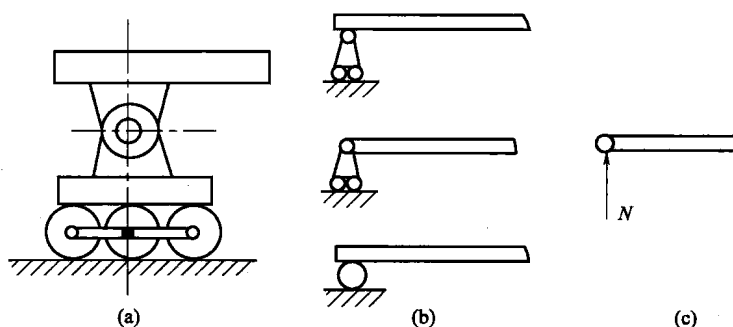


图 1-10

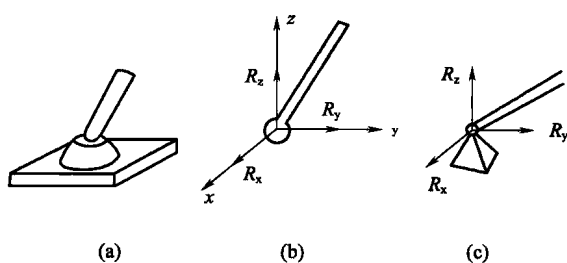


图 1-11

1.3.2.4 固定端(插入端)支座约束

构件的一端插入一固定物体所构成的约束,称为固定端(插入端)支座约束,如图 1-12(a)所示。这种约束既限制相对移动、又限制相对转动,约束反力是两个正交分力和一个约束反力偶,如图 1-12(b)所示。

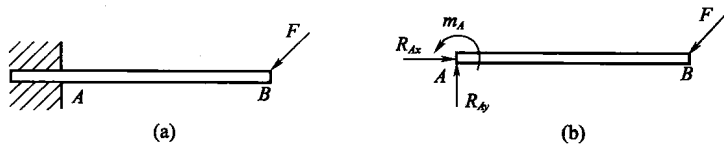


图 1-12

1.4 受力分析与受力图

静力学主要是研究一个物体或物体系统在力系作用下的平衡问题,即利用平衡条件根据已知力求出未知力。要进行这一过程必须要对物体或物体系统进行正确的受力分析。把研究对象从与它有联系的周围物体中分离出来,得到解除了约束的物体,称之为隔离体。在隔离体上,将其所受的所有的力(包括主动力和约束反力)画出来,这样得到的表明该物体受

力情况的简明矢量图称为物体的受力图。

正确进行受力分析和画出受力图是解决力学和工程问题的前提和基础。画受力图的步骤如下：

1) 根据求解问题的需要确定合适的研究对象。为了便于研究问题,可以选择整体,或者单个物体,或者选择几个物体的组合作为研究对象。

2) 取出分离体并画出全部的主动动力。主动力一般是已知力,例如物体自重和作用在物体上的荷载等。

3) 正确画出物体所受的约束反力。根据约束类型,画出所有的约束反力。

画受力图是力学中重要一环。画物体受力图时,首先要明确研究对象,即取隔离体。物体受力分为主动力和约束力。注意分清内力和外力,在受力图上只画研究对象所受外力。注意作用力和反作用力之间的相互关系,明确它们分别作用于不同的研究对象上。

下面举例说明如何画物体的受力图。

例 1-1 电厂和矿山用的煤斗车,重量为 P 。用卷扬机牵引沿坡度角为 α 的轨道上升,如图 1-13(a) 所示。如果不计车轮与轨道间的摩擦力,试画出煤斗车的受力图。

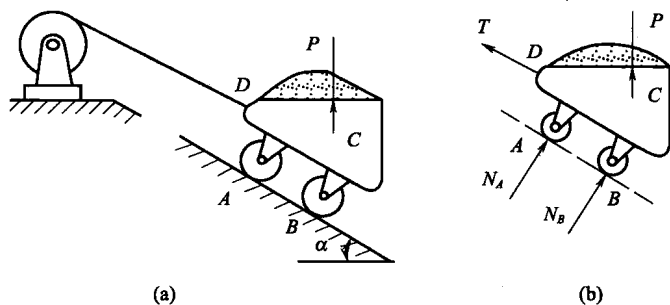


图 1-13

解 1) 确定研究对象,画出隔离体。

取煤斗车为研究对象,画出其轮廓图。

2) 在隔离体上画出全部主动力。

煤斗车所受的主动力是重力 P ,作用在重心 C 上。

3) 在隔离体上画出全部约束反力。

煤斗车所受的约束反力有:钢丝绳的拉力 T ,属于柔性约束,作用于 D 点且沿钢丝绳背离煤斗车;轨道给车轮的约束反力 N_A 、 N_B ,属于光滑接触面约束,沿接触点 A 和 B 的公法线指向煤斗车。将全部的作用力逐一画后,即得煤斗车的受力图,如图 1-13(b) 所示。

例 1-2 如图 1-14(a) 所示,连续梁 $ADCB$ 在 ADC 段受集中力 P 作用,在 CB 段受均布载荷 q ,忽略梁的自重,试分别画出 ADC 段、 CB 段和整体的受力图。

解 1) 取 $ADCB$ 为研究对象,画出其轮廓图。主动力有集中力 P 。约束反力有: A 处为固定铰链支座,约束反力通过铰链中心,但方向不能确定,可用两相互垂直的分力 X_A 和 Y_A 表示; D 处为活动铰链支座,约束反力垂直于接触面,用 N_D 表示; C 处为中间铰链,受到 CB 段的作用。其约束反力用两个相互垂直的分力 X_C 和 Y_C 表示。 ADC 段的受力图如图 1-14(b)

所示。

2) 取 CB 段为研究对象。主动力为均布载荷 q 。 B 处为活动铰链支座, 其约束反力用 N_B 表示。利用作用与反作用定律可确定 C 处的约束反力, ADC 段给 CB 段的反作用力 X'_C 和 Y'_C 应该与 CB 段给 ADC 段的作用力 X_C 和 Y_C 等值、反向。 CB 段的受力图如图 1-14(c) 所示。

3) 取整体为研究对象。主动力有集中力 P 和均布载荷 q 。约束反力有: A 处为固定铰链支座, 约束反力用 X_A 和 Y_A 表示; D 处和 B 处为活动铰链支座, 约束反力分别用 N_D 和 N_B 表示。整体受力图如图 1-14(d) 所示。

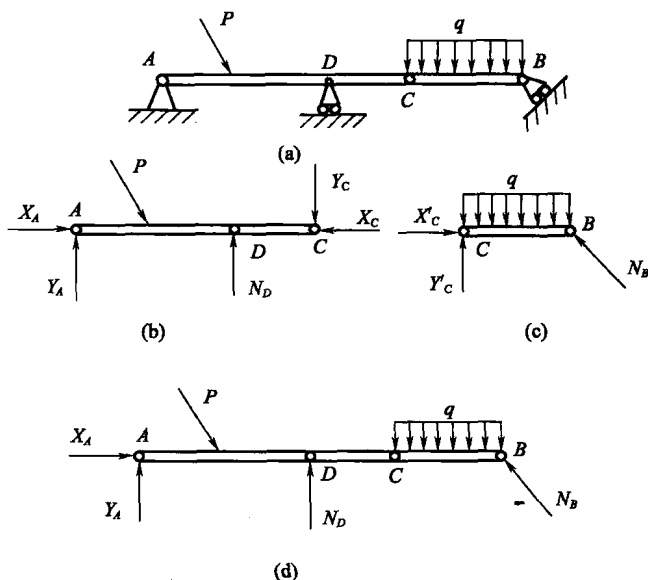


图 1-14

小 结

(1) 静力学是研究物体在力系作用下平衡的科学。工程意义上的平衡指物体相对地面静止或做匀速直线运动。刚体是受力不变形的物体, 是理想化力学模型。力是物体间的相互机械作用, 力的作用效应有外效应——运动; 内效应——变形, 静力学只研究外效应。

(2) 静力学基本公理

公理一 力的平行四边形法则;

公理二 二力平衡公理;

公理三 加减平衡力系公理;

公理四 作用与反作用定律。

(3) 约束及约束类型 限制非自由体某些方向位移的周围物体称为约束。约束是对物体运动(或运动趋势)的限制, 约束反力是这种限制作用的度量。

常见约束类型有柔索、光滑接触面、光滑圆柱铰链(中间铰)、固定铰支座、可动铰支座。

(4) 物体的受力分析和受力图 画受力图是力学中重要一环。画物体受力图时,首先要明确研究对象,即取隔离体。物体受力分为主动力和约束力。注意分清内力和外力,在受力图上只画研究对象所受外力。注意作用力和反作用力之间的相互关系,明确它们分别作用于不同的研究对象上。

需要注意的是:画受力图时,每解除一个约束,就必须加上该约束能够产生的约束反力,而不要事先判断该约束在此时有没有这些约束反力,以免引起不必要的错误。

思考题

1-1 二力平衡公理与作用反作用公理都说二力等值、反向、共线,两者有什么不同?

1-2 力的可传性原理适用的前提是什么?

1-3 判断下列命题是否正确,如果命题错误,那么说明其理由,并把不正确的命题改写成正确的命题。

(1) 在一个物体上作用着两个等值、反向、共线的力,则这个物体一定平衡。

(2) 一个刚体受三个力作用而平衡,则这三个力一定汇交于一点。

(3) 合力一定比分力大。

(4) 二力平衡公理、加减平衡力系公理和力的可传性原理都只适用于刚体,力的平行四边形法则和作用与反作用定律也只适用于刚体。

(5) 汽车可在地面上随意运动,因此汽车是自由体;自由落体只能沿铅直方向下落,因此自由落体是非自由体。

1-4 什么叫二力构件? 分析二力构件受力时与构件的几何形状有无关系? 凡是两端用光滑铰链连接的直杆是否都是二力杆?

1-5 试判断图 1-15 中所画出的各物体的受力图是否正确,若有错误,试将其改正过来。

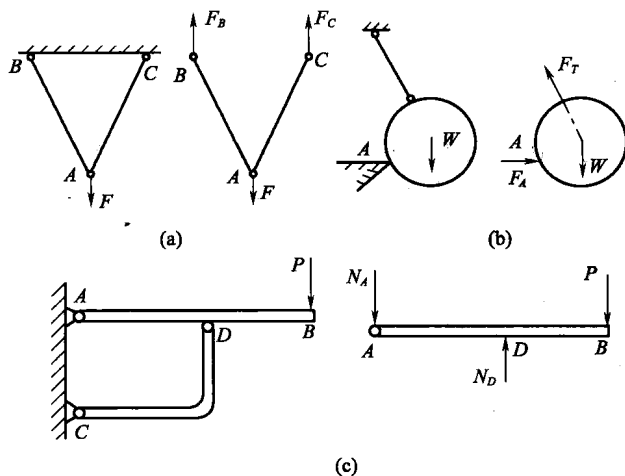


图 1-15