

世纪高等院校创新教材

海军院校重点教材

工程力学教程

◎章向明 施华民 主编



科学出版社

www.sciencep.com

114

2007

· 21 世纪高等院校创新教材 ·

· 海军院校重点教材 ·

工程力学教程

章向明 施华民 主编



科学出版社

北京

内 容 简 介

本教材涵盖理论力学、材料力学等“必需”、“够用”的基本理论知识、基本原理和基本算法。全书共 17 章,包括:静力学的基本概念、受力图;基本力系;平面任意力系;运动学基础;点的合成运动;刚体平面运动;动量定理与动量矩定理;动能定理;材料力学基本概念;简单应力;截面几何性质;圆轴的扭转;弯曲内力;弯曲应力;弯曲变形;应力状态和强度理论及其应用;动载荷;压杆稳定。每章后有习题,并附有习题答案。

本教材借鉴了国内外一些优秀教材的长处和精髓,在作者多年教学实践的基础上编写而成。以力学的基本概念和原理为主线,优化课程体系,重组教学内容,对工科力学课程进行了整合,突出应用能力的培养。

本书可作为军队和地方高校机械类、力学类和一些交叉型专业的工程力学课程教材,也可作为科研人员和有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学教程/章向明,施华民主编. —北京:科学出版社,2007
(21 世纪高等院校创新教材)
ISBN 978-7-03-018448-1

I.工… II.①章…②施… 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(2007)第 005629 号

责任编辑:王雨舸/责任校对:董丽

责任印制:高嵘/封面设计:苏波

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

湖北北京山德新印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 2 月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—5 000 字数:450 000

定价:28.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

工程力学是一门研究物体机械运动一般规律和有关构件的强度、刚度、稳定性理论的学科,它包括静力学、材料力学、运动学、动力学等有关内容。

物体在空间的位置随时间的变化称为机械运动。机械运动是人们在日常生活和生产实践中最常见的一种运动形式。在本书第一篇静力学中,研究机械运动的特殊情况——物体处于平衡的问题,包括如何将工程实际中比较复杂的力系加以简化以及物体平衡的条件。静力学是学习材料力学和运动力学的基础。

工程实际中,对有些仪器或自动装置,主要是解决它的运动符合特定的要求,而受力分析较为次要。在第二篇运动学中,从几何方面研究物体的运动(如运动方程、速度和加速度等),暂不考虑影响物体运动的物理因素。

工程实践中,高速转动机械的动力分析、高层结构和桥梁结构的风载与地震响应分析、火箭的发射与发行的控制、车辆运动的稳定性计算以及机器人的动态特性研究等,都需要应用动力学理论。在第三篇动力学中,研究作用于物体上的力与物体运动状态变化之间的关系。

工程上的机械、设备、结构都是由构件组成的。构件工作时要承受载荷的作用。为了使构件在载荷作用下正常工作而不破坏,也不发生过度的变形,同时又能保持原有的平衡状态而不丧失稳定,要求构件具有一定的强度、刚度和稳定性。在第四篇材料力学中,研究构件的强度、刚度和稳定性的问题,在既安全又经济的条件下,为合理设计和使用材料提供理论依据。

观察和实验是认识力学规律的重要实践环节。在观察和实践中,抓住主要因素,忽略次要因素,有助于理解问题的本质。同时,在抽象化的过程中,将研究对象转化为力学模型,通过数学演绎,得出工程上需要的力学公式。例如,在研究物体的运动和平衡规律时,将物体抽象为刚体;在运动力学中,有时将物体抽象为点、质点;在材料力学中,用变形体来代表真实的物体等。

工程力学是一门技术基础课程,它在基础课程和专业课程之间起桥梁作用,为专业设备的机械运动分析和强度分析提供必要的理论基础。

学习工程力学,应在理解工程力学的基本概念和基本理论的基础上,学会应用所学的定理和公式去解决具体问题,所以,演算一定数量的习题,是巩固和加深理解所学知识的重要途径。

《工程力学教程》是为适应机械类或近机械类专业和一些交叉类型专业的少学时(80学时)工程力学教学需要,参照高等院校理论力学、材料力学课程教学基本要求而编写的教材。

本书由章向明、施华民主编。参加编写人员:章向明(第1、2、3、9、10、11、12、13章),施华民(第7、8章),彭彪(第14、15章),郑波(第16、17章),李竹影(第6章)、曾晓玲(第5章)、杨少红(第4章)。

承蒙王安稳、朱世玮两位教授认真、细致地审阅了全书,提出许多宝贵意见,在此我们谨致以深切的谢意。

在本书编写过程中,还得到海军工程大学理学院以及装备处的热情帮助,在此我们一并表示谢意。

限于编者的水平,书中难免有缺点和不妥之处,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2006年12月

目 录

第一篇 静 力 学

第1章 静力学的基本概念、受力图	3
§ 1.1 力与平衡的基本概念	3
§ 1.2 静力学公理	4
§ 1.3 约束与约束反力	5
§ 1.4 物体的受力分析——受力图	8
习题1	10
第2章 基本力系	12
§ 2.1 力的合成与分解	12
§ 2.2 平面汇交力系的合成与平衡条件	13
§ 2.3 力矩	18
§ 2.4 力偶	19
§ 2.5 平面力偶系的合成与平衡	20
习题2	21
第3章 平面任意力系	24
§ 3.1 力线平移定理	24
§ 3.2 平面任意力系向一点简化	25
§ 3.3 平面任意力系的平衡条件与平衡方程	27
§ 3.4 静定与静不定的概念	31
§ 3.5 刚体系的平衡	32
习题3	36

第二篇 运 动 学

第4章 点的运动与刚体的基本运动	41
§ 4.1 点的运动的矢量法	41
§ 4.2 点的运动的直角坐标法	42
§ 4.3 点的运动的自然坐标法	45
§ 4.4 刚体的平行移动	49
§ 4.5 刚体的定轴转动	50
习题4	53
第5章 点的合成运动	56
§ 5.1 点的绝对运动·相对运动·牵连运动	56
§ 5.2 速度合成定理	59

§ 5.3 加速度合成定理	62
习题5	67
第6章 刚体平面运动	72
§ 6.1 刚体平面运动的运动方程	72
§ 6.2 求平面图形内各点速度的基点法	73
§ 6.3 求平面图形内各点速度的瞬心法	75
§ 6.4 平面图形内各点的加速度	78
习题6	81

第三篇 动力学

第7章 动量定理与动量矩定理	87
§ 7.1 动量定理	87
§ 7.2 质点系动量矩定理	95
§ 7.3 刚体平面运动微分方程	101
附 转动惯量的计算	104
习题7	106
第8章 动能定理	111
§ 8.1 力的功	111
§ 8.2 动能	115
§ 8.3 动能定理	117
§ 8.4 动力学普遍定理综合应用	121
习题8	127

第四篇 材料力学

第9章 简单应力	135
§ 9.1 轴向拉伸与压缩的概念	135
§ 9.2 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力	135
§ 9.3 直杆轴向拉伸与压缩时横截面上的应力	138
§ 9.4 拉伸与压缩杆的强度计算	139
§ 9.5 拉(压)杆的变形·胡克定律	141
§ 9.6 拉伸和压缩时材料的力学性能	144
§ 9.7 应力集中的概念	150
§ 9.8 拉、压超静定问题	150
§ 9.9 剪切和挤压的实用计算	153
习题9	157
第10章 截面几何性质	162
§ 10.1 静矩和形心	162
§ 10.2 惯性矩	164
§ 10.3 平行移轴公式	167

习题 10	168
第 11 章 圆轴的扭转	171
§ 11.1 圆轴扭转的概念	171
§ 11.2 扭转时的外力和内力	171
§ 11.3 圆轴扭转的应力和强度条件	174
§ 11.4 圆轴扭转的变形和刚度条件	178
习题 11	180
第 12 章 弯曲内力	183
§ 12.1 梁弯曲的概念	183
§ 12.2 剪力和弯矩	185
§ 12.3 剪力图和弯矩图	187
§ 12.4 剪力图和弯矩图的画法	188
习题 12	195
第 13 章 弯曲应力	199
§ 13.1 梁横截面上的正应力	199
§ 13.2 梁横截面上的剪应力	203
§ 13.3 梁的强度计算	206
§ 13.4 提高梁抗弯能力的措施	209
§ 13.5 拉伸与弯曲同时作用时横截面上的正应力	213
习题 13	215
第 14 章 弯曲变形	219
§ 14.1 引言	219
§ 14.2 挠曲线的近似微分方程	220
§ 14.3 用积分法计算梁的变形	220
§ 14.4 叠加法确定梁的挠度与转角	221
§ 14.5 弯曲刚度条件和提高弯曲刚度的措施	223
§ 14.6 简单静不定梁	224
习题 14	226
第 15 章 应力状态和强度理论及其应用	229
§ 15.1 应力状态理论简介	229
§ 15.2 平面应力状态分析	230
§ 15.3 三向应力状态下的最大应力·广义胡克定律	234
§ 15.4 强度理论简介	236
§ 15.5 弯扭组合与弯拉(压)扭组合	240
习题 15	243
第 16 章 动载荷	247
§ 16.1 引言	247
§ 16.2 构件作等加速直线运动或等速转动时的动应力计算	247
§ 16.3 构件受冲击载荷作用时动应力的计算	249

§ 16.4 交变应力和疲劳破坏的概念·····	253
§ 16.5 交变应力的特性和疲劳极限·····	254
习题16 ·····	256
第17章 压杆稳定 ·····	259
§ 17.1 压杆稳定的概念·····	259
§ 17.2 细长压杆的临界力·····	260
§ 17.3 压杆的临界应力·····	262
§ 17.4 压杆的稳定计算·····	264
§ 17.5 提高压杆承载能力的措施·····	266
习题17 ·····	268
习题答案·····	270
附录·····	276

第一篇 静力学

静力学是研究物体在力的作用下平衡规律的科学。静力学主要研究以下三个问题：

1. 物体的受力分析

分析物体所受的已知力和未知力，并在受力图上标明每个力的作用位置和方向。

2. 力系的等效替换

利用简化中心法，将作用在物体上的一个复杂力系用另一个与它等效的简单力系进行替换。

3. 建立力系的平衡条件

研究作用在物体或物体系统上的力系所需满足的平衡条件，并应用这些条件解决工程实际问题。力系的平衡条件是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。

因此，静力学在工程中有着十分广泛的应用。

第1章 静力学的基本概念、受力图

§ 1.1 力与平衡的基本概念

一、力

力是物体间的相互作用。力的作用效果是使物体的运动状态发生变化(力的外效应),或使物体发生变形(力的内效应)。理论力学只研究力的外效应,而材料力学研究力的内效应。

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向、作用点。三要素中的任何一个改变,力的作用效果就不同。

力是一个既有大小又有方向的量,是矢量。矢量可以用一个带有方向的线段表示,线段的起点表示力的作用点,箭头指向表示力的方向,线段的长度(按一定的比例)表示力的大小。本书中,力矢量用黑斜体字母表示,如 \boldsymbol{F} ;而力的大小用普通字母表示,如 F 。力是定位矢量。

二、物体的机械运动与平衡状态

物体在空间的位置随时间的改变,称为物体的机械运动。

物体相对于参考系处于静止或处于匀速直线运动状态,称为物体处于平衡状态。物体的平衡状态是物体机械运动的特殊情况,静力学主要研究物体的平衡问题。

在力的作用下,形状和大小都不改变的物体称为刚体。刚体内任意两点间的距离永远保持不变,刚体是一个理想的力学模型。工程实际中的构件,在外力作用下,都要发生形状和尺寸改变,因此,都是变形体。通常构件的变形与构件自身的尺寸相比是微小的。在理论力学中把所有的物体都看作是刚体。理论力学研究物体的平衡和运动规律等问题,把变形体看作刚体进行研究,结果的误差是微小的。如果研究变形体的平衡,问题将变得非常复杂,而且也没有必要。

三、力系与平衡力系

由多个力组成的一组力,称为力系。力或力系对物体的作用效果取决于它的特征。不同的力或力系的作用效果不同,能引起物体运动状态的不同变化。如果两个不同的力系对同一物体产生相同的效应,则这两个力系是等效的,称为等效力系。在保持对刚体作用效果不变的前提下,用一个简单力系代替一个复杂力系,称为力系的等效简化。静力学研究物体的平衡规律,同时也研究力的一般性质及力系的简化。一个力是一种最简单的力系。如果一个力与一个力系等效,则称这个力为该力系的合力。求合力的过程称为力系的合成,该力系中的各力称为其合力的分力或分量。

在一个力系作用下,物体处于平衡状态,这个力系必须满足一定的条件,这个条件称为力系的平衡条件,满足平衡条件的力系称为平衡力系。作用在物体上的一组力使物体处于平衡状态,这组力是平衡力系;在平衡力系作用下,物体处于平衡状态。

§ 1.2 静力学公理

静力学公理是人们关于力的基本性质的概括和总结,无须证明而为人们所公认。

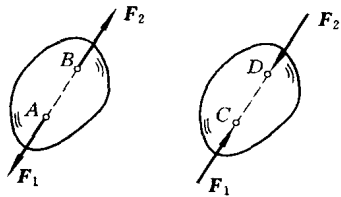


图 1-1

一、二力平衡公理

作用在刚体上的两个力平衡的必要和充分条件:这两个力大小相等、指向相反,并作用在同一直线上(图 1-1)。

二力平衡公理表明了作用在刚体上的最简单力系平衡时所必须满足的条件。

二、加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任何一个力系上添加或减去任一平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

加减平衡力系公理是研究力系简化的基本依据之一。

推论(力的可传性原理) 作用于刚体上的力,可以沿其作用线移至刚体内任意一点,而不改变它对刚体的作用效应。

如图 1-2 所示,设刚体上 A 点有一力 F ,根据加减平衡力系公理,在刚体上 B 点加上一个平衡力系 (F_1, F_2) ,此处,使 F_1, F_2 与 F 大小相等,即 $F_1 = F_2 = F$;再减去一个平衡力系 (F, F_2) 。显然, F_1 和 F 等效。由此可见,作用在刚体上的力是滑动矢量。

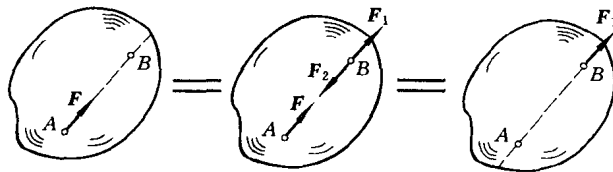


图 1-2

三、力的平行四边形法则(二力合成公理)

作用在物体上同一点的两个力,可以合成一个合力。合力的作用点仍在该点,合力的大小和方向是以这两个力为边构成的平行四边形的对角线来表示(图 1-3)。

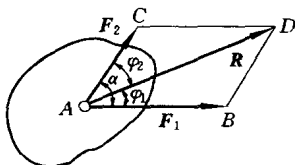


图 1-3

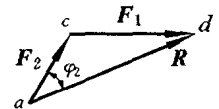
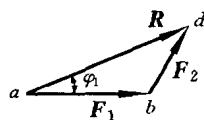


图 1-4

显然,这种合成力的方法是矢量加法,合力是这两个力的矢量和: $R = F_1 + F_2$ 。也可画成矢量三角形,如图 1-4 所示。

根据本公理可知:两个力 F_1 和 F_2 组成的力系与力 R 等效。所以也可将一个力分解为作用于同一点的两个分力,分力有无穷多个组合。在工程问题中,常遇到将一个力分解为方向相互垂直的两个力。如图1-5所示,可将斜坡上物体的重力 P 分解为两个相互垂直的力,力 F 使物块沿斜坡滑动; N 与坡面对物体的反作用力相平衡。这两个力的大小分别为

$$F = P\sin\alpha, \quad N = P\cos\alpha$$

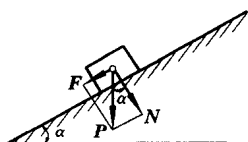


图 1-5

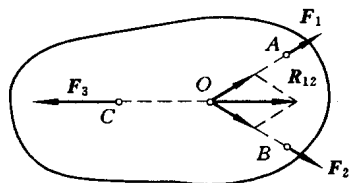


图 1-6

推论(三力汇交定理):刚体在不平行的三力作用下处于平衡,则三力作用线必交于一点,且位于同一平面内。

证 如图1-6所示,刚体在三力 F_1 、 F_2 、 F_3 作用下处于平衡状态。三力分别作用在 A 、 B 、 C 三点。根据力的可传性,将 F_1 、 F_2 移至二力的汇交点 O ,合成得合力 R_{12} ,则 F_3 与 R_{12} 平衡,由二力平衡公理, F_3 与 R_{12} 必共线。

三力汇交定理指明了三力平衡的必要条件。

四、作用与反作用公理

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,作用线为同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。若用 F 表示作用力,用 F' 表示反作用力,则

$$F = -F'$$

作用与反作用公理概括了物体之间的相互作用关系,表明物体间的作用力与反作用力总是成对出现的。但要注意到,作用力与反作用力分别作用在不同的物体上,不能视为平衡力系。

§ 1.3 约束与约束反力

一、主动力

作用在物体上的力可分为两类,主动力和约束反力。有一类力,如重力、风力、切削力、水压力、风压力、活塞的推力等,这些力是促使物体运动或使物体有运动趋势的力,称为主动力(或称载荷)。主动力一般是已知的,通常作为设计计算的原始数据。在静力学中认为主动力是已知的,在分析问题中给定。如何确定主动力的不在静力学研究范畴,工程中自有办法。另一类是约束反力,在下节中解释。

二、约束与约束反力

工程实际中的物体可分为两类,一类是在空间位置(或运动)不受任何限制的物体,称为自由体。自由体在空间可作任意移动,必无物体与之接触,如飞机、飞行中的炮弹、卫星、飞鸟等。

另一类是在空间位置(或运动)受到周围物体的限制或阻碍的物体,称为非自由体。非自由体必有周围物体与之接触,如火车的运动受到轨道的限制。例如,子弹在射出前运动受到枪膛和枪管的限制是非自由体;子弹在空中运动不受阻碍是自由体;落地后运动受到地面的限制是非自由体。

周围物体对非自由体运动的限制称为约束。约束是以物体间的相互接触的形式构成的,构成约束的周围物体是约束体。非自由体在主动力的作用下产生运动或有运动趋势,这种运动受到周围物体的约束,约束的作用是以力的形式表现出来的。因此,在非自由体和约束体间产生作用和反作用力,这种相互作用是非自由体在主动力作用下主动施加在约束体上的,约束体给非自由体的反作用力称为约束反力。

约束反力的大小是未知的,它与物体上所受的主动动力有关。静力学中要寻求约束反力的求解方法,可利用平衡条件求出未知的约束反力。

约束限制非自由体的运动,实际反映出的就是约束反力。约束反力的作用点在约束体和被约束体的接触点,它的方向与约束所能限制的运动方向相反,而约束反力的大小则是未知的。利用这个特点,可以确定约束反力的方向(方位)或作用线的位置。

三、常见约束反力的方向

1. 柔性约束

如图1-7所示,绳索、胶带、铰链等柔性体约束,只能限制物体沿其轴线离开柔性体的运动,柔性体的约束反力只能是拉力。柔性体的约束反力作用点在连接点,其方向沿柔性体的轴线而背离物体。

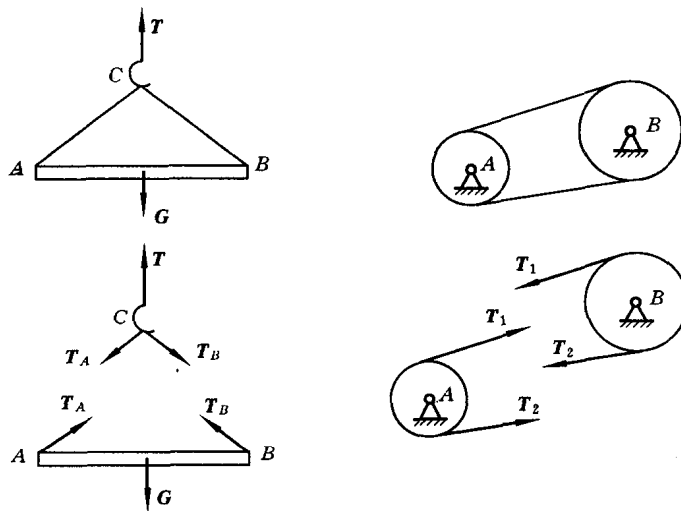


图 1-7

2. 光滑面约束

支撑物体的固定面、啮合齿轮的齿面等,如果接触面摩擦力很小,可忽略摩擦的影响,认为接触面是绝对光滑的,都可归类为光滑面约束。此类约束不能限制物体沿接触面切线方向的运动,只能限制物体沿接触面法线方向且指向接触面方向的运动。

如图 1-8 所示,光滑面的约束反力作用在接触点,方向沿公法线且指向物体。

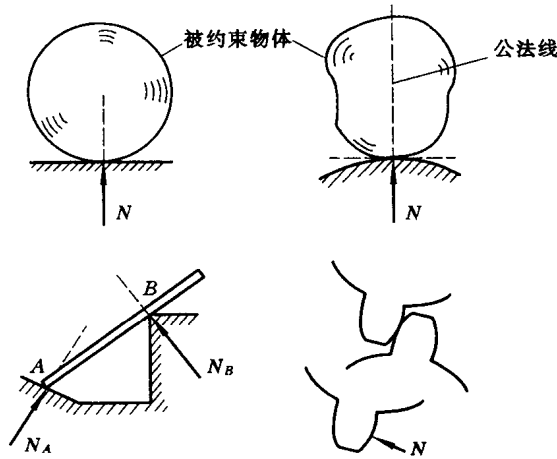


图 1-8

3. 固定铰链约束、中间铰链约束

将构件和固定支座在连接处钻上圆孔,再用圆柱形销子串联起来,使构件只能绕销钉的轴线转动。这种约束称为固定铰链约束,或固定铰链支座。如图 1-9 所示。

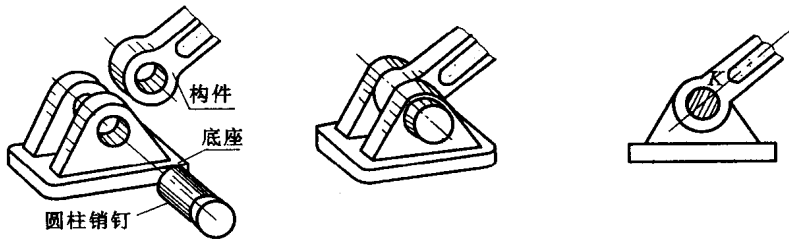


图 1-9

忽略接触处的摩擦,销钉与构件间的接触是两个光滑圆柱面接触,按光滑面约束,销钉给构件的约束反力 R 方向应沿圆柱面在接触点 K 处的公共法线,显然 R 通过铰链中心 O 。但接触点 K 的位置不能预先确定。固定铰链约束的约束反力通常用两个正交分力 X 和 Y 表示(图 1-10)。

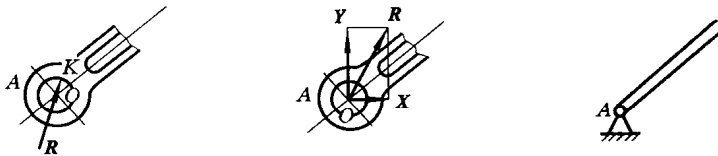


图 1-10

如图 1-11 所示,两个构件用圆柱形光滑销钉连接,称为中间铰。中间铰的销钉对构件的约束与固定铰链支座销钉对构件的约束相同。

4. 辊轴支座

在固定铰支座与支承面之间安装几个辊轴,就成为辊轴支座,或称活动铰支座(图 1-12)。这种支座的约束特点是只能限制垂直于支承面方向的运动,而不能限制物体绕铰轴的转动和

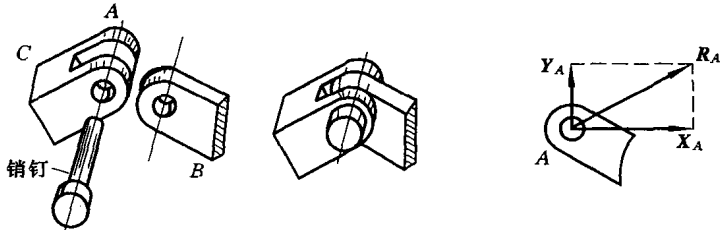


图 1-11

沿支承面移动。因此，活动铰支座的约束反力垂直于支承面，且通过铰链中心，指向不能确定。

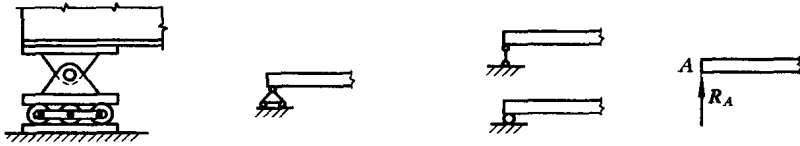


图 1-12

§ 1.4 物体的受力分析 —— 受力图

在对某个物体对象进行工程计算时，首先要对所研究的物体(研究对象)进行受力分析，即分析它的受力情况，分析研究对象所承受的所有主动力和约束反力。为了清晰和便于计算，单独画出研究对象的轮廓图形(简图)，并将其所受的所有主动力和所有约束反力全部画在简图上，这就是物体的受力简图。

例 1-1 绞车通过钢丝绳牵引重为 P 的矿车沿斜坡运动(图 1-13(a))，画出矿车的受力图。

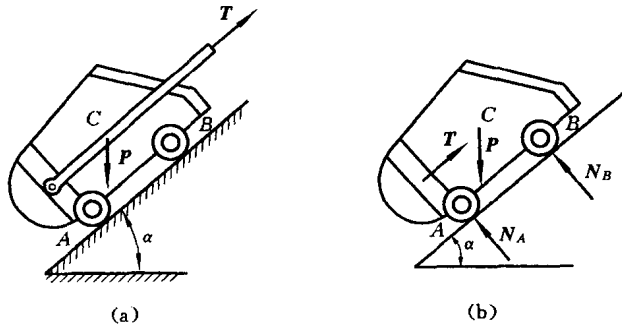


图 1-13

解 取矿车为研究对象，画出矿车的轮廓图；画主动力——地球给矿车的重力 P ；画钢丝绳给矿车的约束反力 T (柔性约束)；画斜坡给矿车的约束反力 N_A, N_B (光滑面约束)。如图 1-13(b) 所示。

此处忽略了斜坡对矿车的摩擦力。如果认为忽略摩擦力对所分析的问题影响较大则受力图上还需加上斜坡给矿车的摩擦力 F_f 。

例 1-2 简易起重架如图 1-14 所示， A, C, D 三处都是圆柱形铰链连接，被起吊重物的重量为 W ，绳端拉力为 T ，不计杆件自重，分别画出下列各研究对象的受力图：

- (1) 重物连同滑轮 B ;
- (2) 斜杆 CD ;
- (3) 横梁 AB ;
- (4) 结构的整体。

解 (1) 研究对象: 重物连同滑轮 B (包括一段绳子); 画出其轮廓图(图1-15(a)); 画重物所受的重力 W ; 画出绳子受到另外半节绳子的约束反力 T (柔性约束); 画出滑轮轴给滑轮的约束反力 X_B 和 Y_B (铰链约束)。

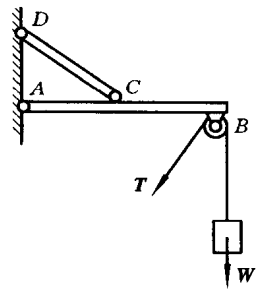


图 1-14

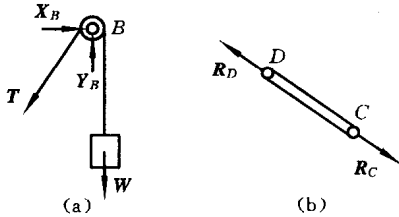


图 1-15

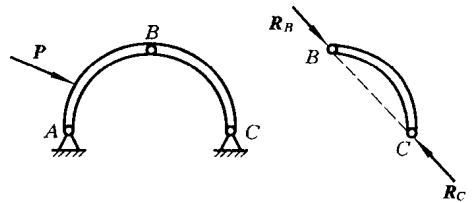


图 1-16

(2) 取 CD 杆为研究对象, 画出其轮廓图(图 1-15(b)); 认为 CD 杆的重量很小而忽略; 因 CD 杆只受到销钉 C 和销钉 D 所给的约束反力(铰链约束), 即 CD 杆只受到两个力的作用, 根据二力平衡公理, 此二力必大小相等、方向相反, 并作用于同一条直线上, 两个力必沿作用点的连线, 这样的杆件称为二力杆。至于 R_C 和 R_D 是画拉力还是压力无关紧要。例如, 图 1-16 中矿井巷道支护的三角拱的 BC 杆就是二力杆。

(3) 取 AB 梁为研究对象, 画出其轮廓图(图 1-17); 忽略梁 AB 自身的重量; 画出滑轮轴 B 给销钉孔 B 的约束反力(铰链约束), 与滑轮轴 B 给滑轮的约束反力(图 1-15(a))大小相等、方向相反; 画出固定铰支座 A 处的约束反力(固定铰链约束); 画出销钉 C 的约束反力(铰链约束), 与销钉 C 给 CD 杆的约束反力(图 1-15(b))大小相等、方向相反。

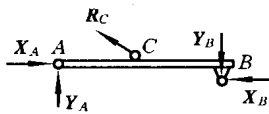


图 1-17

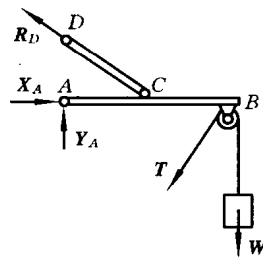


图 1-18

(4) 取整体为研究对象, 画出其轮廓图(图 1-18); 忽略各构件自身的重量; 画出重物所受的重力 W (主动力); 画出绳子的拉力 T (柔性约束); 画出铰链 A 的约束反力(固定铰链约束); 画出铰链 D 的约束反力(铰链约束且 CD 为二力杆)。