

工程力学

● 主编 刘 星 卜铁伟

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

工 程 力 学

主 编 刘 星 卜铁伟

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/刘星, 卜铁伟主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2085 - 9

I. ①工… II. ①刘… ②卜… 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 (2017) 第 017133 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 290 千字

版 次 / 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 孟雯雯

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

前 言

随着教学改革的发展，对人才的培养也提出了更高的要求。本教材充分考虑当前高等学校学生的生源特点及专业需求，严格把握读者定位，结合当前力学教学改革的需要，对内容进行精选并做了适当组织调整。在编写过程中学习、吸收了相关院校力学教学内容的改革成果，结合了编者在教学中积累的经验和体会，并得到了出版社的大力帮助。

本教材内容主要包括刚体的静力学受力分析、力系的简化、摩擦、平衡方程及应用、材料的四种基本变形以及压杆稳定、强度理论、组合变形、动载荷和交变应力等内容。本教材由刘星（项目一、二、九、十）、卜铁伟（项目五、六、七、八）、苏炳玲（项目三、四）和张力（项目十一）编写。

由于编者水平所限，书中难免存在错误与不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

项目一 受力分析模块	(1)
任务一 学习基本概念	(2)
任务二 熟悉静力学公理	(3)
任务三 学习约束和约束反力	(5)
一、基本概念	(6)
二、工程中常见的约束类型和约束力方向	(6)
三、对物系进行受力分析及画受力图	(8)
项目二 平面力系	(13)
任务一 力系等效定理	(14)
一、力的投影	(14)
二、力系的主矢	(15)
三、力矩	(16)
四、力系等效定理	(18)
任务二 平面汇交力系	(19)
一、平面汇交力系的合成	(19)
二、平面汇交力系的平衡	(20)
任务三 平面力偶系	(22)
一、平面力偶系的合成	(24)
二、平面力偶系的平衡	(24)
任务四 平面一般力系	(25)
一、平面一般力系的简化	(25)
二、平面一般力系的平衡条件	(28)
三、物体系统的平衡	(31)
项目三 摩擦	(41)
任务一 摩擦基本知识	(42)
一、滑动摩擦	(42)
二、摩擦角和自锁现象	(44)
任务二 考虑摩擦时物体的平衡	(46)
项目四 空间力系和重心	(50)
任务一 空间力系	(51)
一、力在空间直角坐标轴上的投影	(51)
二、力对轴之矩	(52)

三、空间力系的平衡	(53)
任务二 物体的重心	(56)
一、重心坐标公式	(57)
二、物体重心与形心的计算	(58)
项目五 轴向拉伸与压缩	(63)
任务一 轴向拉伸和压缩的轴力与轴力图	(64)
一、轴向拉伸(压缩)时横断面上的内力——轴力	(65)
二、轴力图	(66)
任务二 轴向拉伸与压缩的应力	(68)
任务三 轴向拉伸和压缩时的变形—胡克定律	(70)
一、纵向变形及胡克定律	(70)
二、横向变形及泊松比	(71)
任务四 材料拉伸和压缩时的力学性质	(73)
一、材料在拉伸时的机械性质	(74)
二、材料压缩时的力学性质	(76)
任务五 构件在拉伸(压缩)时的强度计算	(77)
一、许用应力及安全系数	(77)
二、构件在拉伸(压缩)时的强度计算	(78)
项目六 连接件的剪切与挤压	(84)
任务一 剪切与挤压概念认知	(84)
任务二 剪切和挤压实用计算方法	(86)
一、剪切实用计算方法	(86)
二、挤压实用计算方法	(87)
三、连接件的剪切与挤压实用计算	(88)
四、剪切胡克定律	(90)
项目七 圆轴的扭转变形	(93)
任务一 圆轴扭转变形的内力及内力图	(94)
一、扭矩	(95)
二、扭矩图	(96)
任务二 圆轴扭转时的应力及强度条件	(97)
一、圆轴扭转时的应力	(97)
二、圆轴扭转时的强度条件	(100)
任务三: 圆轴的扭转变形及其强(刚)度计算	(100)
一、圆轴扭转时的变形及刚度条件	(101)
二、圆轴扭转时的强(刚)度计算	(101)
项目八 弯曲变形分析	(106)
任务一 梁的内力	(107)
一、梁的概念	(107)
二、梁的剪力与弯矩	(108)

三、剪力、弯矩和载荷集度的微分关系	(109)
任务二 弯曲时横截面上的正应力	(111)
一、弯曲试验和变形特点	(112)
二、对称弯曲正应力一般公式	(113)
三、截面的静矩和惯性矩	(114)
任务三： 弯曲时横截面上的切应力	(117)
一、矩形截面梁的弯曲切应力	(117)
二、工字形截面梁的弯曲切应力	(118)
三、圆形截面的弯曲切应力	(119)
任务四： 弯曲强度条件及应用	(119)
一、弯曲正应力强度条件	(119)
二、弯曲切应力强度条件	(121)
任务五： 梁的弯曲变形	(121)
一、挠曲线近似微分方程	(121)
二、积分法求挠曲线及转角方程	(122)
三、叠加法求弯曲变形	(125)
项目九 强度理论和组合变形	(133)
任务一 四种常用强度理论	(134)
任务二 组合变形的分析方法	(135)
一、组合变形的定义	(135)
二、组合变形形式	(135)
三、组合变形的研究方法——叠加原理	(135)
四、解题步骤	(135)
任务三 拉（压）弯组合变形的强度计算	(136)
一、怎样判断杆件发生的是拉伸（压缩）与弯曲组合变形？	(136)
二、强度条件	(136)
任务四 斜弯曲的强度计算	(137)
任务五 弯曲与扭转的组合变形	(139)
项目十 压杆稳定	(145)
任务一 压杆稳定的概念	(145)
任务二 细长压杆临界压力的欧拉公式	(147)
一、两端铰支压杆的临界载荷	(147)
二、欧拉公式的一般表达式	(148)
任务三 压杆的稳定校核	(150)
一、细长压杆的临界应力	(150)
二、欧拉公式的适用范围	(151)
三、稳定条件	(151)
项目十一 动载荷和交变应力	(157)
任务一 动载荷	(158)

一、概述	(158)
二、构件作匀变速运动时的应力与变形	(159)
三、使用能量原理计算受冲击构件的动应力、变形	(161)
任务二 交变应力与疲劳失效	(163)
一、交变应力与疲劳失效	(163)
二、交变应力的基本参数—疲劳极限	(164)
三、构件的疲劳强度计算	(166)
附录 常用型钢规格表	(172)
参考文献	(189)

项目一 受力分析模块

项目描述 ○○○

物体在力的作用下的机械运动和变形机理构成了工程力学的研究范畴。而静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律，包括三个方面的问题：物体的受力分析、力系的等效与简化和力系的平衡条件。

知识目标 ○○○

1. 了解学习工程力学课程的原因，理解本课程的性质、任务和学习的主要内容；
2. 明确工程力学在机械类专业中的地位及应用；
3. 掌握研究对象即刚体的性质；
4. 掌握常用的几个静力学基本公理。

能力目标 ○○○

能对机构进行受力分析，并准确地画出受力图。

引导案例 ○○○

分析图 1-1 所示夹紧机构各构件的受力，并画出受力图。

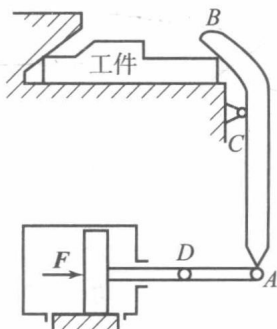


图 1-1

任务一 学习基本概念

任务描述:

生活和生产中处处皆力学。宇宙万物的运动、生活中所发生的日常现象、生产过程中工程技术问题的解决都离不开力学知识和方法的支撑。本任务将从力学的基本概念入手学习力学。

知识准备:

动动手:

请动手做一下下面的小实验:将一铅笔(未削)放在左右两手的食指上,当两手向中间靠拢时,铅笔能同时在两食指上滑动吗?最终两食指会在铅笔的何处相遇?为什么?

1. 刚体

刚体,即在力的作用下,其内部任意两点间的距离始终保持不变的物体。

实际物体在力的作用下都会产生变形,只是变形大小不同,例如人在浮桥上走,浮桥会产生明显的弯曲变形;而在石墩桥上走时,肉眼是看不到变形的,但可测。刚体是不存在的,是抽象的,能否看作刚体要看研究问题,例如飞机整体运行时,可看作刚体,但研究局部零部件时,就不能将其看作刚体。理论力学只研究刚体,物体的变形在后续研究中讨论,例如材料力学、弹性力学。

2. 平衡

平衡是物体机械运动的一种特殊状态。

在静力学中,若物体相对于地面(或地球)保持静止或做匀速直线平动,则称物体处于平衡(如静止的建筑物、机器、沿直线匀速运动的汽车等)。一切物体无不处在永恒的运动之中,所谓平衡都是相对的、暂时的,是运动的一种特殊形式。

3. 力和力系

(1) 力:物体之间的相互机械作用。其作用效果可使物体的运动状态发生改变和使物体产生变形。前者称为力的运动效应或外效应,后者称为力的变形效应或内效应,理论力学只研究力的外效应。内效应会使物体产生变形。

力对物体作用的效应取决于力的大小、方向和作用点这三个要素,且满足平行四边形法则,故力是定位矢量。常用一个带箭头的有向线段来表示力的三要素,如图1-2所示。

(2) 力的分类:集中力、分布力、主动力、约束反力(被动力)。

(3) 力系:同时作用于物体上的一群力称为力系。按其作用线所在的位置,力系可以分为平面力系和空间力系;按其作用线的相互关系,力系分为共线力系、平行力系、汇交力系和任意力系,等等。

(4) 等效力系:分别作用于同一刚体上的两组力系,如果它们对该刚体的作用效果完全相同,则此两组力系互为等效力系。

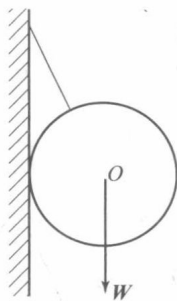


图 1-2

(5) 平衡力系：若物体在某力系作用下保持平衡，则称此力系为平衡力系。

(6) 力的合成与分解：若力系与一个力 F_R 等效，则称力 F_R 为力系的合力，而力系中的各力称为合力 F_R 的分力。力系用其合力 F_R 代替，称为力的合成；反之，一个力 F_R 用其分力代替，称为力的分解。

回归任务：

1. 力能否脱离周围物体而单独存在？
2. 刚体是抽象化的力学模型，自然界中真的有刚体存在吗？
3. 工程中所遇到的平衡问题，绝大部分相对于地球是静止的，这种说法对吗？

任务二 熟悉静力学公理

任务描述：

在学习了静力学的入门知识后，想要更好地解决静力分析的有关问题，还需要打好一定的理论基础，也就是要学好、用好本任务要介绍的几个基本公理及其推论。

知识准备：

静力学公理是人类从长期的生活和生产实践中所积累起来的经验，加以抽象、归纳和总结建立起来的。它揭示了关于力的最根本的规律，是研究静力学的基础。

公理 1：力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向由以这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-3 所示。

在求两共点力的合力时，为了作图方便，只需画出平行四边形的一半，即三角形便可。这种作图法称为力的三角形法则，如图 1-4 所示。

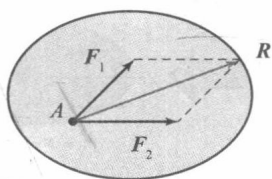


图 1-3

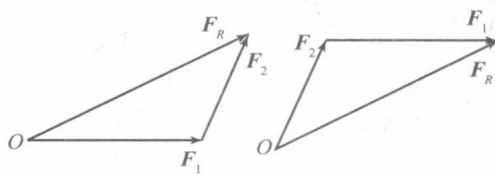


图 1-4

力的平行四边形法则给出了最简单的力系的简化规律，也是较复杂力系简化的基础。另外，它也给出了将一个力分解为两个力的依据。

推论：三力平衡汇交

作用于刚体上三个相互平衡的力，若其中两个力的作用线汇交于一点，则此三力必在同一平面内，且第三个力的作用线通过汇交点，如图 1-5 所示。

三力平衡汇交推论给出了三个不平行的共面力构成平衡力系的必要条件。当刚体受不平行的三力作用处于平衡时，常利用这个关系来确定未知力的作用线方位。

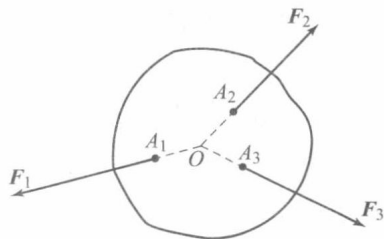


图 1-5

公理 2：二力平衡条件

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：两个力的大小相等、方向相反，且作用在同一直线上。

该公理指出了作用于刚体上最简单力系的平衡条件。对刚体而言，这个条件既必要又充分。

想一想：如图 1-6 和图 1-7 所示，公理 2 对于非刚体（变形体）或多体是否适用？



图 1-6

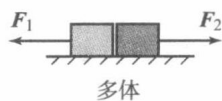


图 1-7

用一用：

二力构件：只在两个力作用下平衡的刚体叫二力构件。如果构件形状为杆件，则称为二力杆。因此，作用于二力构件上的两个力，必通过两个力作用点的连线（与杆件的形状无关），且等值、反向，如图 1-8 所示。

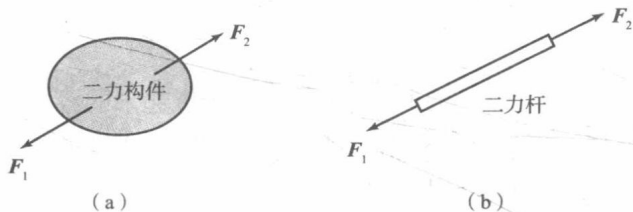


图 1-8

公理 3：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，并不改变原力系对刚体的作用，如图 1-9 所示。

此公理是研究力系等效变换的依据，同样也只适用于刚体而不适用于变形体。

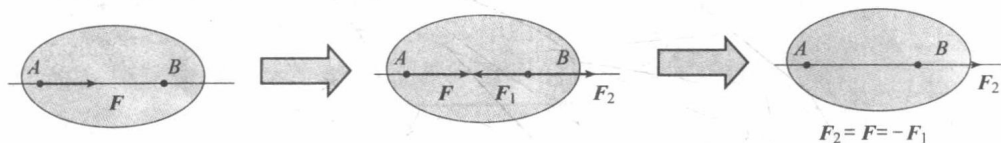


图 1-9

推论：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任意一点，且不改变该力对刚体的作用。

力的可传性推论表明作用于刚体上的力是滑动矢量，但对一般物体来说是定位矢量。

公理 4：作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在、同时消失，等值、反向、共线，作用在相互作用的两个物体上。

公理 4 揭示了物体之间相互作用力的定量关系，它是分析物体间受力关系时必须遵循的原则，也为研究多个物体组成的物体系统问题提供了基础。

公理 5: 刚化原理

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

公理 5 阐明了变形体抽象为刚体模型的条件, 并指出刚体平衡的必要和充分条件只是变形体平衡的必要条件。

回归任务:

请运用任务二中讲述的定理的知识完成以下练习。

1. 请分析如图 1-10 所示的二力杆, 并画出其受力。

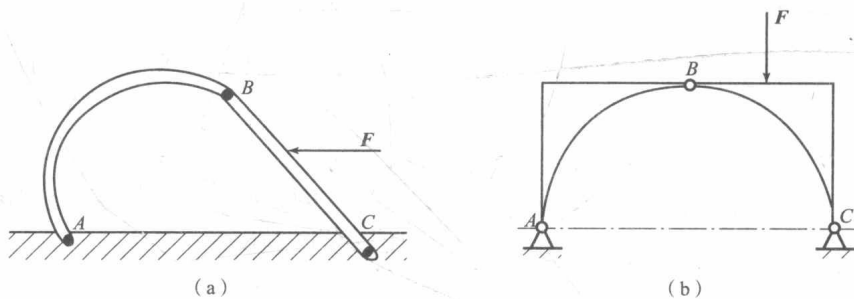


图 1-10

2. 请分析如图 1-11 所示吊灯和灯绳的受力。



图 1-11

任务三 学习约束和约束反力**任务描述:**

在掌握了静力学的基本概念和公理后, 对物体进行正确的受力分析并画出受力图, 既是解决力学问题的第一步, 也是关键的一步。否则, 后面的分析计算不可能有正确的结果。

图 1-12 所示为一机械夹紧机构, 请分析各构件的受力, 并画出受力图。

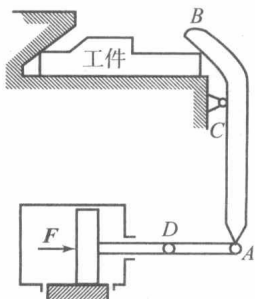


图 1-12

知识准备:

一、基本概念

1. 自由体

在空间的运动不受任何限制的物体。

2. 非自由体

在空间的运动受到限制的物体，也称被约束体。

3. 约束

对非自由体某些方向的位移起限制作用的周围物体（这里约束是名词，而不是动词）。

4. 约束反力

约束对非自由体施加的力称为约束反力。约束反力的方向总是与约束所能阻碍的物体的运动或运动趋势的方向相反，但其大小未知，作用点在接触位置。

约束反力的特点：

- (1) 大小是未知的，故称为被动力。
- (2) 方向总是与非自由体被约束所限制的位移方向相反。
- (3) 作用点在物体与约束相接触的那一点。

5. 主动力

约束反力以外的其他力，如重力。

二、工程中常见的约束类型和约束力方向

1. 光滑接触面

其约束反力沿接触点的公法线指向被约束物体，如图 1-13 所示。

2. 柔索约束

其约束反力为沿柔索方向的一个拉力，该力背离被约束物体（不计重的绳索、链条或皮带等），如图 1-14 所示。

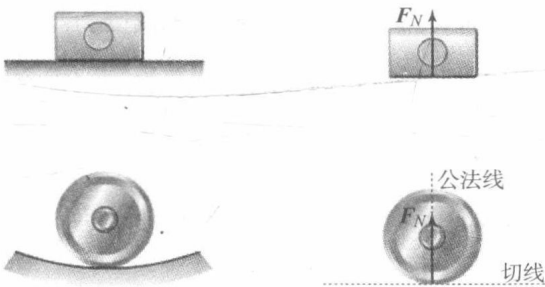


图 1-13

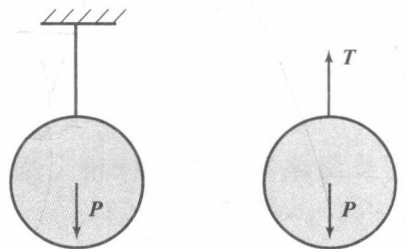


图 1-14

3. 光滑圆柱铰链约束

(1) 固定铰支座：约束反力一般用两个正交分量表示，如图 1-15 所示。

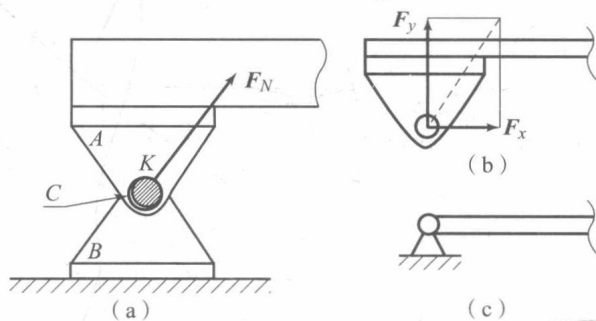


图 1-15

(2) 可动铰支座：其约束反力垂直于光滑支承面。被约束体可以绕销钉转动，可以沿销钉轴线移动，也可以沿支承面移动，即约束阻碍物体沿与支承面垂直的方向运动，其约束力通过销钉中心垂直于光滑支承面，指向待定，如图 1-16 所示。

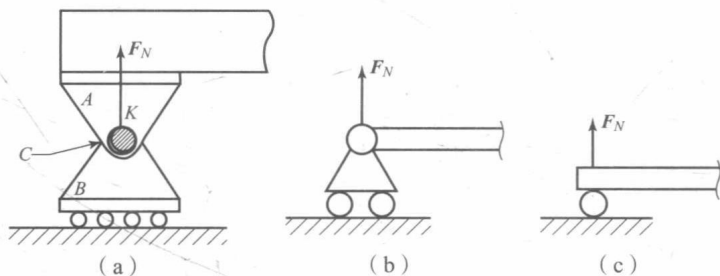


图 1-16

(3) 中间铰链：其约束反力一般用两个正交分量表示，如图 1-17 所示。

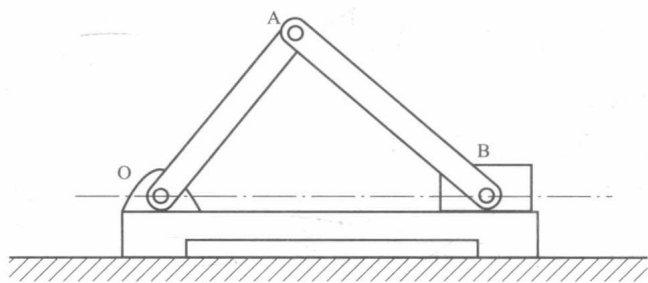


图 1-17

O—固定铰支座；A—中间铰链

4. 光滑球形铰链约束

构件 A 的球形部分嵌入构件 B 的球形窝内，就构成了球形铰链约束。这是一种空间的铰链约束。若两个球形表面之间无摩擦，则为光滑接触，构件 A 受到的约束反力必通过球心沿着半径方向，但它的方位不能预先确定。通常将球形铰链的约束反力表示为正交的三个分力。如图 1-18 所示。

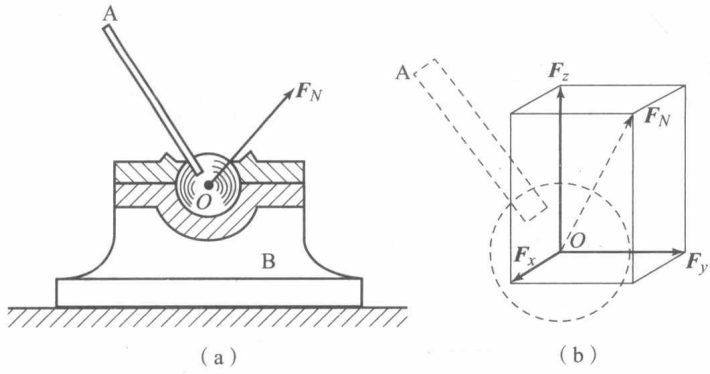


图 1-18

5. 固定端约束

固定端约束既阻碍被约束物体在该平面内沿任何方向移动，又阻碍被约束物体绕固定端在该平面内转动。其约束反力在平面情况下，通常用两正交分力和一个力偶表示；在空间情况下，通常用空间的三个正交分力和空间的三个正交分力偶表示。如图 1-19 和图 1-20 所示。

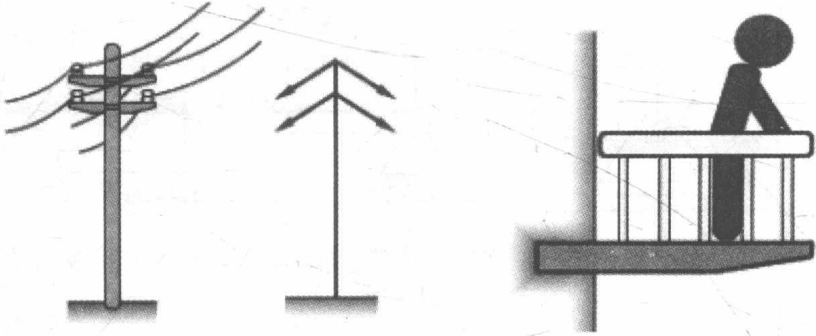


图 1-19

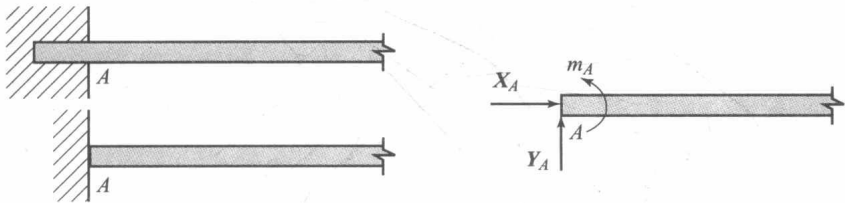


图 1-20

三、对物系进行受力分析及画受力图

受力分析：确定物体受了几个力、每个力的作用位置和作用方向的过程称为受力分析。

受力图：表示物体受力的简明图形。

正确地进行物体的受力分析并画其受力图，是分析、解决力学问题的基础。画受力图时必须注意以下几点：

(1) 明确研究对象。根据求解需要，可以取单个物体为研究对象，也可以取由几个物体组成的系统为研究对象。不同的研究对象的受力图是不同的。

(2) 正确确定研究对象受力的数目。由于力是物体间相互的机械作用，因此，对每一

个力都应明确它是哪一个施力物体施加给研究对象的，绝不能凭空产生。同时，也不可漏掉某个力。一般可先画主动力，再画约束反力。凡是研究对象与外界接触的地方，都一定存在约束反力。

(3) 正确画出约束反力。一个物体往往同时受到几个约束的作用，这时应分别根据每个约束本身的特性来确定其约束反力的方向，而不能凭主观臆测。

(4) 当分析两物体间的相互作用时，应遵循作用、反作用关系。作用力的方向一经假定，则反作用力的方向应与之相反。当画整个系统的受力图时，由于内力成对出现，组成平衡力系。因此不必画出，只需画出全部外力。

回归任务：

图 1-21 (a) 所示为一机械夹紧机构，请分析各构件的受力，并画出受力图。

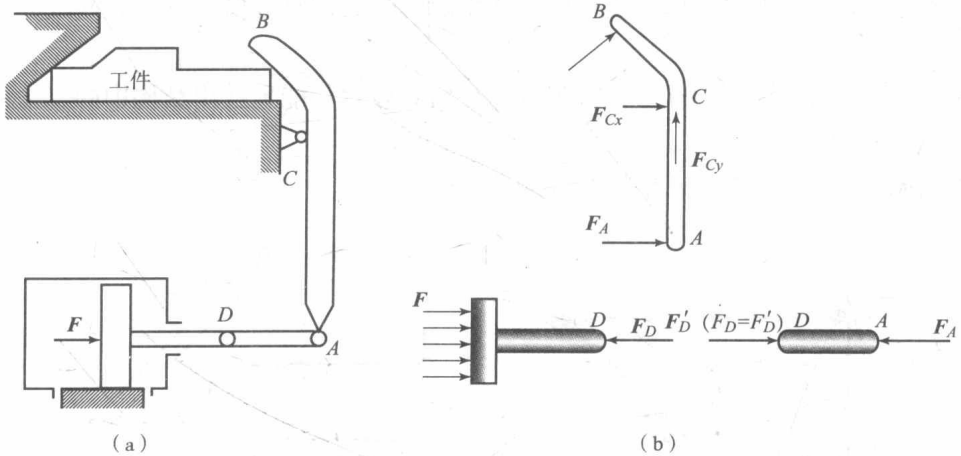


图 1-21

解答分析：

- (1) 首先寻找二力杆， DA 为二力杆。
- (2) 与 DA 杆件相互作用的其他两杆件在 D 处和 A 处分别存在作用力与反作用力。
- (3) C 点为固定铰链约束。
- (4) B 点为光滑接触面约束。

受力分析图如图 1-21 (b) 所示。

课堂巩固练习

图 1-22 所示为曲柄连杆机构，自重不计，所有接触处都光滑，机构在 M 作用下平衡，画出整体及各部件受力图。

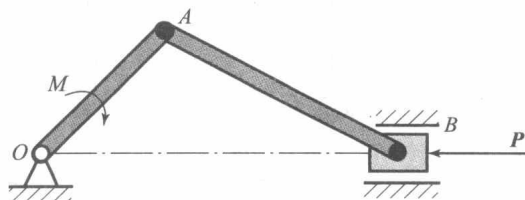


图 1-22