

# 工 程 力 学

张 力 主 编  
孟春玲 张 媛 编 著

清 华 大 学 出 版 社  
北 京

# 前 言

为适应高等院校教学改革的发展趋势,按照高等院校工科非机械类专业的教学大纲和要求,根据全面更新的工程力学课程教学内容和课程体系,依据高等院校加强基础、淡化专业、分流培养的教学方针,编者结合长期从事理论力学、材料力学、工程力学等课程的教学经验以及北京市高等学校教育教学改革项目的成果,有针对性地编写了这本工程力学教材。

编写本书时,我们对内容进行了精心挑选,注重力学系统的完整性和严密性,力求做到主次分明、详略恰当、难易适中、侧重基础,同时也结合新的工程应用实例,注重培养学生用力学知识解决工程实际问题的能力。实验部分在验证实验的基础上,增加了综合性实验,旨在培养学生理论联系实际和解决实际问题的能力。本书适合少学时工程力学教学,针对不同的专业,教师可酌情取舍。

本书可供高等院校的材料、环境、化工、冶金、地质等工科各专业学生使用,也可供相关专业教师、学生及自学者使用和参考。

由于时间仓促,书中难免有不当之处,请读者不吝赐教。

编 者

2006年1月于北京

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第 1 篇 静力学

第 1 章 物体的受力分析	4
1.1 静力学基本概念	4
1.2 静力学基本公理	5
1.3 约束和约束力	6
1.4 物体的受力分析	9
习题	14
第 2 章 平面汇交力系	16
2.1 力的分解和力的投影	16
2.2 平面汇交力系的合成与平衡	17
2.3 平面汇交力系的平衡条件和平衡方程	20
习题	24
第 3 章 平面力偶系	26
3.1 平面力对点的矩	26
3.2 平面力偶及其性质	27
3.3 平面力偶系的合成和平衡条件	29
习题	32
第 4 章 平面任意力系	35
4.1 平面任意力系的简化	35
4.2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	39
4.3 物系的平衡	44
4.4 静定与超静定的概念	49
习题	50

## 第 2 篇 材料力学

<b>第 5 章 材料力学导论</b> .....	54
5.1 材料力学的研究内容和基本假设 .....	54
5.2 外力及其分类 .....	57
5.3 内力、截面法和应力的概念 .....	58
5.4 位移与应变的概念 .....	61
5.5 杆件变形的基本形式 .....	63
习题 .....	64
<b>第 6 章 拉伸与压缩</b> .....	66
6.1 轴向拉伸与压缩的概念 .....	66
6.2 轴向拉压杆横截面上的内力和应力 .....	67
6.3 材料在拉伸时的力学性能 .....	72
6.4 材料在压缩时的力学性能 .....	78
6.5 失效、安全系数和强度计算 .....	79
6.6 轴向拉伸与压缩时的变形 .....	83
6.7 应力集中的概念 .....	86
习题 .....	87
<b>第 7 章 剪切与挤压的实用计算</b> .....	91
7.1 剪切 .....	91
7.2 挤压 .....	94
习题 .....	97
<b>第 8 章 扭转</b> .....	99
8.1 扭转的概念和实例 .....	99
8.2 外力偶矩的计算、扭矩和扭矩图 .....	100
8.3 剪应力互等定理、剪切虎克定律 .....	103
8.4 圆轴扭转时的应力和强度条件 .....	105
8.5 圆轴扭转时的变形和刚度条件 .....	112
习题 .....	115

---

<b>第 9 章 弯曲内力</b> .....	118
9.1 弯曲的概念和实例 .....	118
9.2 受弯杆件的简化 .....	119
9.3 剪力和弯矩 .....	121
9.4 剪力方程和弯矩方程、剪力图和弯矩图.....	123
习题.....	128
<b>第 10 章 弯曲应力</b> .....	129
10.1 纯弯曲梁的正应力 .....	129
10.2 常用截面的惯性矩、平行移轴公式.....	134
10.3 弯曲正应力的强度条件 .....	136
10.4 提高梁弯曲强度的措施 .....	139
习题 .....	140
<b>第 11 章 弯曲变形</b> .....	144
11.1 梁的挠度和转角 .....	144
11.2 弹性曲线的近似微分方程 .....	145
11.3 梁的刚度校核 .....	150
习题 .....	150
<b>第 12 章 组合变形</b> .....	153
12.1 组合变形与叠加原理 .....	153
12.2 组合变形的应力分析 .....	154
习题 .....	159
<b>第 13 章 交变应力</b> .....	161
13.1 交变应力与疲劳破坏 .....	161
13.2 交变应力的循环特征、应力幅和平均应力.....	163
13.3 对称循环下构件的持久极限 .....	165
13.4 影响构件持久极限的主要因素 .....	167
13.5 提高构件抗疲劳能力的措施 .....	171
习题 .....	172

## 实 验

实验一	材料的拉伸实验	174
实验二	材料的压缩实验	178
实验三	弹性模量 $E$ 的测定	181
实验四	材料的扭转实验	184
实验五	剪切弹性模量 $G$ 的测定	187
实验六	电测法	189
实验七	疲劳实验	194
部分实验设备的介绍		198

## 附 录

附录 I	型钢规格表	208
附录 II	几种主要材料的机械性能表	222
附录 III	习题参考答案	223
参考文献		227

# 绪 论

## 1. 工程力学的研究对象及任务

工程力学(engineering mechanics)是一门研究物体的机械运动及构件强度、刚度和稳定性的科学。它包括了所有理论力学和材料力学两门课程的主要经典内容和最基础部分。

理论力学是研究物体机械运动普遍规律的一门科学。所谓机械运动是指物体空间位置随时间的改变。

材料力学是研究工程构件在外力作用下的变形规律和承载能力的科学。具体研究构件的强度、刚度和稳定性等问题。

本教材的内容包括以下两篇。

第一篇：静力学——主要研究物体的受力分析,力系的简化和受力物体平衡时作用力所应满足的条件。这一篇亦是研究构件强度、刚度和稳定性问题的基础。

第二篇：材料力学——主要研究构件的强度、刚度和稳定性问题。为构件选取适当的材料、选择合理的截面形状及尺寸提供理论基础。

两篇内容并非完全孤立,它们之间有一些交叉。

## 2. 学习工程力学的目的

由于工程力学讲述了力学的基本理论和基本知识,工科专业中很多课程都需要有工程力学的知识,该课程在基础课和专业课之间起到了承上启下的作用。同时,通过对本课程的学习,还有助于提高读者分析问题、解决问题的能力,以指导人们认识自然界,科学地从事工程技术工作。

## 3. 工程力学的研究方法

本课程的实用性很强。教材中的基本概念、基本理论和计算方法,都是长期以来从生活和生产实践中观察得到的结果,利用抽象化方法,加以分析、综合、归纳、总结成最普遍的公理及定律,再通过严格的数学演绎和逻辑推理的方法,得出正确的具有物理意义和实用价值的一些定理和力学公式。随着计算机的飞速发展和广泛应用,工程力学的研究方法和手段也在更新和变革,将电子计算机应用于力学将成为工程设计新的主要手段,并占有重要的地位。

如需在线阅读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

# 第 1 篇 静 力 学

静力学是研究刚体在力系作用下的平衡问题。它包括：

## 1. 物体的受力分析

通过分析某个物体的受力情况,用受力图形式描述所有力的作用线的位置及方向。它是构件设计的基础。

## 2. 力系简化方法

用一个简单的力系等效地代替一个复杂力系。它是求得力系平衡条件的基础。

## 3. 刚体在力系作用下的平衡条件

刚体处于平衡时,作用在刚体上的各种力系所需要满足的条件。它是机械设计时进行力学计算的基础。

静力学在工程实际中有着广泛应用,同时也是本课程后续内容材料力学的基础。

# 第 1 章 物体的受力分析

本章主要介绍静力学的基础知识和受力分析的基本方法。在大学物理中大家所了解的一些概念和内容较浅,与工程实际问题还有一定的距离,所以在学习本章时应注意理论分析的合理性,掌握实际问题中受力分析的基本方法。

## 1.1 静力学基本概念

### 1.1.1 力的概念

#### 1. 力

力是物体间的相互作用。这种作用对物体产生两种效应。

- 外效应(运动效应):使物体的运动状态发生变化。
- 内效应(变形效应):使物体产生变形。

#### 2. 力系

力系是指作用在物体上的一群力。它是一个集合的概念。

等效力系是指可以互相代替而不改变其对物体的作用效果的两个力系。

平衡力系是指作用于物体上使物体处于平衡状态的力系。

### 1.1.2 刚体的概念

所谓刚体,是指在力的作用下不发生变形的物体。它是一个理想化的力学模型。

实际上,物体受力时都会产生不同程度的变形,但是当物体变形很小且对研究物体平衡问题影响甚微时,这些变形即可忽略不计。此时的受力物体即可抽象为刚体。

建立正确的力学模型是用力学理论解决实际工程问题的重要一环。因此,必须学会正确地运用抓主要矛盾的方法进行符合实际问题的科学的、合理的抽象。例如,在研究飞机飞行的平衡问题时,可以将飞机看作刚体而忽略其中构件的变形;但是在研究飞机飞

行的颤振问题时,则必须将飞机视为弹性体而考虑其中部件的变形。因此,在使用刚体这一力学模型时,要格外注意所研究问题的范围。值得一提的是,刚体可以是单个工程构件,也可以是工程结构整体。

本篇的研究对象为刚体,因此又称为刚体静力学。

## 1.2 静力学基本公理

公理是人们生活和生产实际中的经验总结,并为客观实际所证实的规律。下面介绍静力学中的基本公理。

### 1.2.1 公理 1 二力平衡原理

作用于刚体上的两个力使刚体平衡的充分必要条件是:两个力大小相等、方向相反且作用在一条直线上。

工程上将承受二力作用且平衡的构件称为二力构件,又称二力体或二力杆。

如图 1-1 所示,若刚体平衡,则  $F_1 = -F_2$ 。该刚体即为二力体。

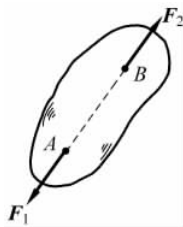


图 1-1

### 1.2.2 公理 2 加减平衡力系原理

加减平衡力系原理:在已知力系上加上或减去任意一个平衡力系并不改变原来力系对刚体的作用效果。

根据此原理,可以有以下推理。

推理 1 力的可传递性

作用于刚体上的力可以沿其作用线任意滑移而不改变该力对刚体的作用效果。

证明:

力  $F$  作用于刚体  $A$  点,如图 1-2(a)所示。

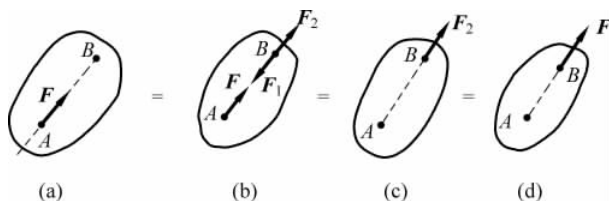


图 1-2

$B$  为力  $F$  作用线上任意一点。根据加减平衡力系原理,在  $B$  点加一由  $F_1$  和  $F_2$  组成的平衡力系,并使  $F_1 = F_2 = F$ ,如图 1-2(b)所示。由于  $F$  和  $F_1$  也组成一个平衡力系,所以再根据加减平衡力系原理在图 1-2(b)的基础上可以去掉平衡力系  $F$  和  $F_1$ ,即为图 1-2(c)所示。

比较图 1-2(a)和图 1-2(c)可见,力  $F$  的作用点由点  $A$  移至点  $B$ ,如图 1-2(d)所示。

由此可见作用在刚体上的力的三要素为:大小、方向、作用线。力矢量为一滑动矢量。

值得注意的是力矢量只可以在其作用的刚体内部传递,而不可以沿作用线传递到另一刚体上。

### 推理 2 三力平衡汇交原理

作用在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,则此三个力必在同一个平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明:

如图 1-3 所示,在刚体的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别作用了三个相互平衡的力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 。

根据力的可传递性,将力  $F_1$ 、 $F_2$  移至汇交点  $O$ 。利用力的平行四边形法则,得两力的合力  $F_{12}$ 。

由于  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  平衡,所以  $F_3$  也必与  $F_{12}$  平衡。

由二力平衡条件知:  $F_3$  和  $F_{12}$  必然共线,所以  $F_3$  一定与  $F_1$ 、 $F_2$  共面并通过  $F_1$ 、 $F_2$  的汇交点  $O$ 。

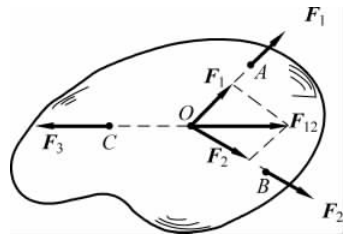


图 1-3

## 1.3 约束和约束力

### 1.3.1 约束的概念

位移不受限制的物体称为自由体。如飞机和人造卫星等,其运动没有受到任何制约,因此为自由体。相反,位移受到周围物体限制的物体称为非自由体。如火车的行驶受到铁轨的限制、电梯的运行受到钢索的限制,火车和电梯均为非自由体。

对非自由体的某些运动起限制作用的周围物体称为约束。如铁轨对火车、钢索对电梯都是约束。

约束之所以能起到限制非自由体运动的作用,实际上是因为其对被约束物体产生了力的作用,这种力即为约束力。约束力的方向一定与该约束阻碍的运动方向相反。

约束力和作用在物体上的主动力共同组成平衡力系。可通过求解平衡方程求得约束力的大小,并确定其方向。

首先介绍工程中常见的几种约束。

### 1.3.2 工程中常见的几种约束及约束力

工程中常见的约束种类很多。

根据约束与被约束物体接触面之间有无摩擦,约束可分为:

- 理想约束: 接触面间绝对光滑的约束。
- 非理想约束: 接触面间存在摩擦的约束。

我们讨论的主要为理想约束。

#### 1. 柔性约束

如图 1-4 所示,绳子吊一重物。绳子对重物的约束力  $F_T$  是作用在  $A$  点的拉力,如图 1-4(b)所示。此约束即为柔性约束。

由于柔性约束只能阻碍物体伸长方向的运动,所以其约束力的特点是沿着柔索方向,作用在接触点,而且只能是拉力。缆绳、链条、绳索等均可简化为柔性约束。其约束力用  $F_T$  或  $F$  表示。

#### 2. 光滑接触面约束

图 1-5(a)、(b)分别表示固定面对物体的约束,图 1-5(c)表示啮合齿轮间的相互约束。当不计接触面间的摩擦时,均属于光滑接触面约束。

光滑接触面约束的约束特点是:约束只能限制被约束物体沿接触面公法线方向的运动,而不能限制沿接触面切线方向的运动。因此,光滑接触面的约束力沿着接触面的公法线方向,作用在接触点,并指向被约束物体。通常用  $F_N$  表示,如图 1-5 所示。

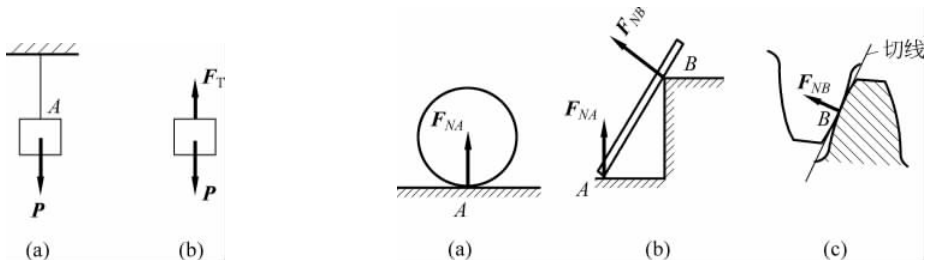


图 1-4

图 1-5

### 3. 光滑圆柱铰链约束

图 1-6(a)所示  $C$  处为光滑圆柱铰链约束,又称平面铰链约束。它是通过销钉将各有圆孔的两个物体 I、II 连接在一起。

光滑圆柱铰链约束的特点是:限制被约束物体在垂直于销钉轴线的平面内的任何方向的位移,而不能限制其绕销钉轴线的转动。因此,此类约束的约束力垂直于销钉的轴线并通过铰链中心,其具体方向受制于主动力。通常用通过轴心的两个大小未知的正交分量  $F_{Cx}$ 、 $F_{Cy}$  表示,如图 1-6(b)所示。其中  $F_{Cx}$ 、 $F_{Cy}$  的指向暂可任意假定,最后通过求解平衡方程确定。

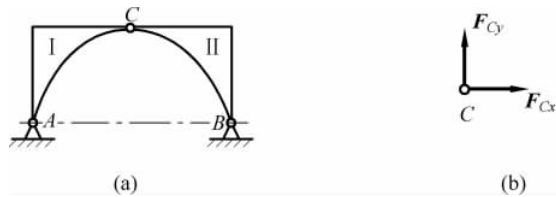


图 1-6

若此类连接中一个物体为固定支座,则称这种约束为固定铰链约束,简称固定铰链,如图 1-7(a)所示。图 1-7(b)为其力学简图。约束力也用两个正交分力  $F_{Ax}$ 、 $F_{Ay}$  表示,如图 1-7(c)所示。

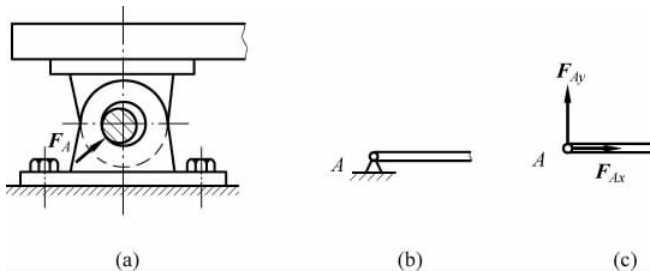


图 1-7

### 4. 滚动铰链约束

在铰链支座和光滑支撑面之间装有几个辊轴即构成滚动铰链约束,如图 1-8(a)所示。其力学简图如图 1-8(b)、图 1-8(c)、图 1-8(d)所示。

滚动铰链支座只能阻止物体沿着支撑面法线方向的运动(其中既包括限制被约束物体趋向支撑面的运动,也包括被约束物体背离支撑面的运动)而不能限制被约束物体沿着支撑面切线方向的运动。因此,在桥梁、屋架等建筑结构用滚动铰链支座通过辊轴作前后

方向的微小滚动,以适应由于温度的变化而引起的构件在该方向上的伸长或缩短。

这类约束的约束力为垂直于支撑面并通过铰链中心向上或向下,具体指向通过求解平衡方程确定。用  $F_A$  表示之,如图 1-8(e)所示。

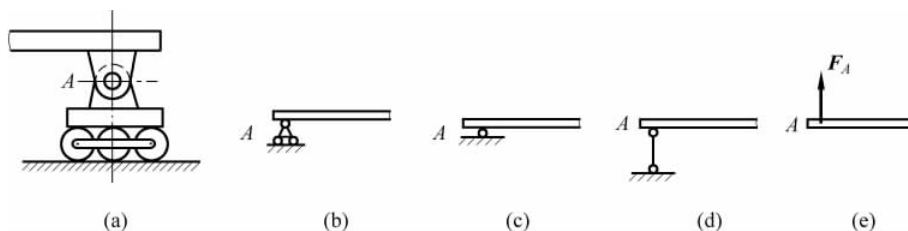


图 1-8

以上仅介绍了几种常见的、简单的约束。在工程中约束类型远远不止这些。读者在遇到实际工程问题时要进一步深入学习,根据具体物体进行符合实际的力学模型的抽象和简化。

## 1.4 物体的受力分析

### 1.4.1 物体的受力分析

物体的受力分析是构件设计的基础。它包括:

- 确定构件受力的性质和数目。
- 确定每个力的作用位置和方向。

作用在物体上的力包括主动力和约束力。通常主动力是外加载荷,为已知力;而约束力是由约束的性质决定并受制于主动力的被动力,为未知力。

### 1.4.2 力的分类

#### 1. 集中力

物体受力通常通过两物体间的接触产生,因此两物体间必然存在着一定的接触面积,力则分布在接触面积上,对于平面问题则是呈线性分布。

为了理论计算方便,将某些作用面积相对物体的尺寸很小的力理想化为作用于物体

的一点,即为集中力;而将分布在相对物体尺寸较大面积上的力视为分布力。

## 2. 常见的分布力

单位长度上分布力的大小称为集度。通常用  $q$  表示,单位为:  $\text{N/m}$ 。

常见的分布力有: ①均布力,如图 1-9(a)所示,如重力;②三角形分布力,如图 1-9(b)所示,如风力。通常用  $q$  表示三角形分布力最大处的集度值。

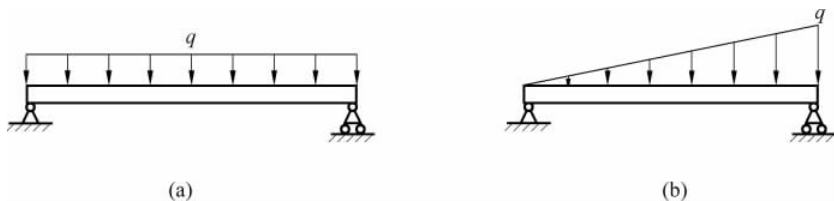


图 1-9

例如,重为  $P$  的物体放在一根梁上,如图 1-10(a)所示。由于重物相对于梁的尺寸很小,所以其对梁的压力可以视为集中力,如图 1-10(b)所示;而由于梁的重力分布在整根梁上,则为分布力,如图 1-10(c)所示。

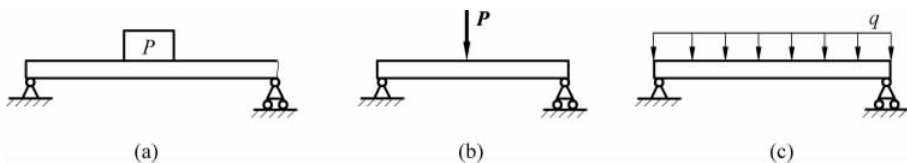


图 1-10

### 1.4.3 受力图

正确画出受力图在工程力学中具有重要的意义。

把所研究的物体从周围的物体中分离出来,得到的物体称为研究对象或隔离体,然后标出研究对象上所受到的力(包括主动力和约束力),即得到受力图。

画受力图的要点:

- 正确选择研究对象。研究对象可以为结构整体,也可以为其中几个物体的组合或单个物体。要将所选择的研究对象从周围物体中分离出来。
- 在研究对象上画出主动力。
- 在解除约束的地方画出约束力。在画约束力时,根据约束的性质确定约束力的方向,同时利用二力构件的概念和三力平衡汇交原理。当约束力的指向不能确定时,可以先假定一个指向。

- 物系中两物体间的作用力应遵循作用力和反作用力原理。

下面举例说明。

例 1-1 如图 1-11(a)所示,物体  $A$  重为  $P$ ,接触处均为光滑接触。试画出物体  $A$  的受力图。

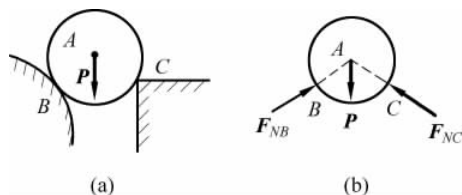


图 1-11

解: (1) 以物体  $A$  为研究对象。

(2) 画主动力: 重力  $P$ 。

(3) 画约束反力: 在  $B$ 、 $C$  两点为光滑面接触, 约束力  $F_{NB}$ 、 $F_{NC}$  均沿着接触面的公法线方向, 指向圆心。

(4) 物体  $A$  的受力如图 1-11(b)所示。

例 1-2 如图 1-12(a)所示结构中, 杆  $AB$  重为  $P$ , 重物重为  $W$ , 不计摩擦, 画出杆  $AB$  的受力图。

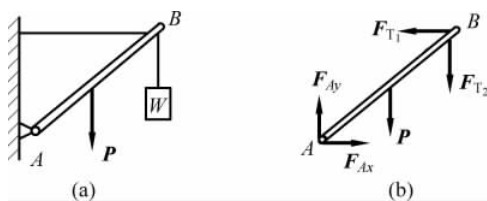


图 1-12

解: (1) 以杆  $AB$  为研究对象。

(2) 画主动力: 重力  $P$ 。

(3) 画约束力: 两段绳子对杆的拉力  $F_{T1}$ 、 $F_{T2}$ ; 固定铰链支座  $A$  处的约束力通过铰链中心, 但是方向不能确定, 用通过  $A$  点的两个正交分力  $F_{Ax}$ 、 $F_{Ay}$  表示。

(4) 杆  $AB$  的受力如图 1-12(b)所示。

例 1-3 画出 1-13(a)所示图中梁  $AC$  和  $CD$  的受力图。不计梁的自重, 所有约束均为理想约束。

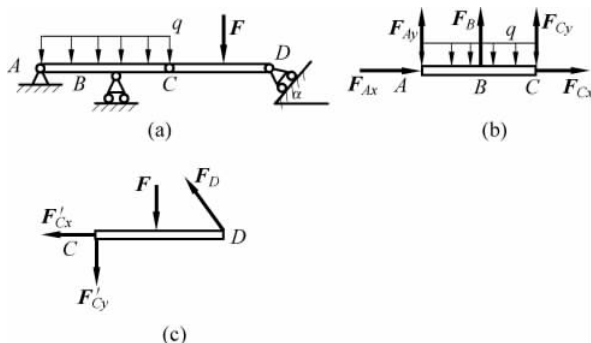


图 1-13

解：(1) 先画梁  $AC$  的受力图。

- ① 以梁  $AC$  为研究对象。
- ② 画主动力：集度为  $q$  的均布力。

③ 画约束力： $A$  处为固定铰链约束，约束力通过铰链中心，但是具体方向未知，用通过  $A$  点的两个正交分力  $F_{Ax}$ 、 $F_{Ay}$  表示； $B$  处为滚动铰链约束，约束力  $F_B$  通过铰链中心并垂直于支撑面； $C$  处为平面铰链约束，约束力同样通过铰链中心，而不知具体方向，用通过  $C$  点的两个正交分力  $F_{Cx}$ 、 $F_{Cy}$  表示。

- ④ 梁  $AC$  的受力如图 1-13(b) 所示。

(2) 再画梁  $CD$  的受力图。

- ① 以梁  $CD$  为研究对象。
- ② 画主动力：已知力  $F$ 。

③ 画约束力： $C$  处圆柱铰链的约束力  $F'_{Cx}$ 、 $F'_{Cy}$  是梁  $AC$  在  $C$  处所受的约束反力  $F_{Cx}$ 、 $F_{Cy}$  的反作用力； $D$  处为滚动铰链约束，约束力  $F_D$  通过铰链中心并垂直于支撑面。

- ④ 梁  $CD$  的受力如图 1-13(c) 所示。

例 1-4 在图 1-14(a) 所示结构中，水平杆  $AD$  用杆  $BC$  支撑， $A$ 、 $B$ 、 $C$  三处均为光滑铰链连接。在杆  $AD$  上作用一铅直向下的载荷  $F$ 。若不计两杆的自重，试分别画出杆  $AD$ 、 $BC$  的受力图。

解：(1) 先画杆  $BC$  的受力图。

- ① 以杆  $BC$  为研究对象。
- ② 画主动力：杆  $BC$  上无主动力作用。

③ 画约束力：由于杆  $BC$  在无主动力的情况下只在  $B$ 、 $C$  两点受到约束，所以其为二力杆。则杆  $BC$  受到了作用在  $B$ 、 $C$  两点并沿  $BC$  连线的力  $F_B$ 、 $F_C$  的作用，具体指向暂假定， $F_B = F_C$ 。