

等教育工学类课程规划教材

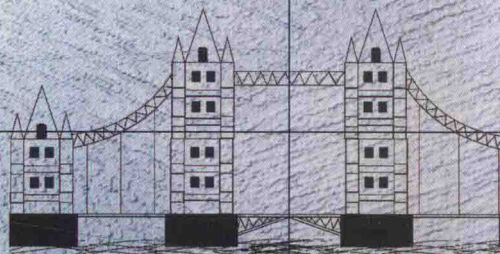
(第三版)

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主 编 邹建奇 李 妍 周显波

主 审 董云峰



大连理工大学出版社

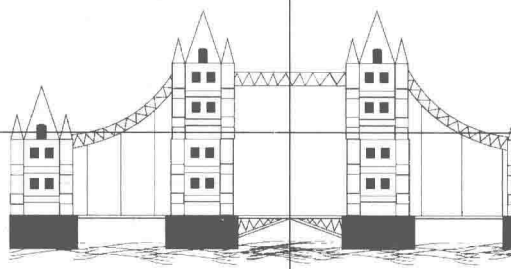
教育工学类课程规划教材

(第三版)

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主 编 邹建奇 李 妍 周显波
副主编 崔亚平 田 伟 郑训臻
主 审 董云峰



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 邹建奇, 李妍, 周显波主编. — 3 版
— 大连 : 大连理工大学出版社, 2018. 7
新世纪应用型高等教育工学类课程规划教材
ISBN 978-7-5685-1649-5

I. ①工… II. ①邹… ②李… ③周… 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(2018)第 168384 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84708943 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://dutp.dlut.edu.cn>

大连理工印刷有限公司印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm	印张: 20	字数: 485 千字
2009 年 8 月第 1 版		2018 年 7 月第 3 版
2018 年 7 月第 1 次印刷		

责任编辑: 王晓历

责任校对: 李建博

封面设计: 张莹

ISBN 978-7-5685-1649-5

定 价: 48.80 元

本书如有印装质量问题, 请与我社发行部联系更换。

《工程力学》(第三版)是新世纪应用型高等教育教材编审委员会组编的工学类课程规划教材之一。

《工程力学》(第三版)是根据国家教育部高等学校力学指导委员会 2014 年 4 月颁布的《理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》,以及国家《关于地方本科高校转型发展的指导意见》的文件要求,保留原来注重基本理论、基本方法和基本计算的掌握,突出应用型人才培养目标,注重工程应用,培养创新能力的基础上,对书中的部分内容进行了修改和补充。比如,在每一章都增加了与章节内容相关的资料阅读,部分例题和习题也做了完善和补充。

为了推进应用型人才培养目标的实现,本教材主要做了如下几个方面的修改:

本教材注重理论联系实际工程,为了扩大学生的力学知识面、加深对于著名工程和力学人物的了解,在每章末结合章节内容增加了资料阅读部分,注重加强学生对工程概念的理解,增添教材的趣味性,激发学生学习力学的兴趣。

教材中第 2 章力系的简化与平衡是工程力学课程的基础,是本教材中非常重要的一章,对学生的掌握要求较高,因此习题部分应注重循序渐进,由浅入深,所以增加了对于单跨静定梁支座处约束力求解的习题。

本教材在上版的基础上将部分章节的文字叙述、解题过程进行了完善,对发现的错误进行了改正。

本教材由长春建筑学院邹建奇、吉林建筑大学李妍、长春建筑学院周显波任主编;吉林建筑大学崔亚平、田伟,长春建筑学院郑训臻任副主编,长春建筑学院李静瑶参与了编写。具体编写分工如下:田伟编写第 1、2 章;邹建奇编写第 3、4、5、6 章;董云峰编写第 7、8 章;郑训臻编写第 9、10 章;崔亚平编写第 11、12 章;李妍编写第 13、14 章;李静瑶授负责附录的校对工作及习题的修改与完善,周显波负责全书的校对工作。



本教材由邹建奇负责统稿和定稿。吉林建筑大学董云峰教授审阅了全书,并提出了修改建议。

本教材在修订的过程中,得到了长春建筑学院和吉林建筑大学领导和教师的大力支持,在此表示感谢。

本教材在修订的过程中,参阅了国内外、网络上的一些文献、资料、图片,向这些资源的作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中也许仍有错误,望读者不吝赐教,我们深表谢意。

编 者

2018年7月

所有意见和建议请发往:dutpbk@163.com

欢迎访问教材服务网站:<http://www.dutpbook.com>

联系电话:0411-84708462 84708445



第 1 篇 理论力学

第 1 章 静力学基本知识	3
1.1 力的概念	3
1.2 静力学公理	4
1.3 约束与约束力	5
1.4 物体的受力分析和受力图	8
本章小结	10
习 题	11
第 2 章 力系的简化与平衡	13
2.1 平面汇交力系	13
2.2 平面力偶系	18
2.3 平面任意力系	21
2.4 空间任意力系	31
2.5 考虑滑动摩擦时的平衡问题	38
本章小结	40
习 题	45
第 3 章 运动学基本知识	50
3.1 点的运动学	50
3.2 刚体的基本运动	57
本章小结	63
习 题	65
第 4 章 点的合成运动	68
4.1 点的运动合成	68
4.2 点的速度合成定理	71
4.3 点的加速度合成定理	74
本章小结	79
习 题	80
第 5 章 刚体的平面运动	83
5.1 刚体平面运动概述	83
5.2 平面图形内各点的速度	85
5.3 平面图形内各点的加速度——基点法	89
本章小结	91
习 题	92

第 6 章 质点和质点系动力学	95
6.1 质点动力学	95
6.2 动量定理	98
6.3 动量矩定理	102
6.4 动能定理	109
本章小结	121
习 题	124
第 7 章 达朗贝尔原理	129
7.1 达朗贝尔原理概述	129
7.2 刚体惯性力系的简化	132
本章小结	136
习 题	137
第 8 章 虚位移原理	139
8.1 约束·自由度·广义坐标	139
8.2 虚位移原理概述	141
本章小结	149
习 题	150

第 2 篇 材料力学

第 9 章 拉伸与压缩变形	155
9.1 轴向拉伸与压缩的概念	155
9.2 内力、轴力及轴力图	155
9.3 拉(压)杆内的应力	158
9.4 拉(压)杆的变形	162
9.5 材料在拉伸(压缩)时的力学性质	165
9.6 许用应力与强度条件	171
9.7 拉(压)杆的超静定问题	173
本章小结	175
习 题	176
第 10 章 扭转与剪切变形	179
10.1 扭转的概念及实例	179
10.2 扭矩的计算和扭矩图	180
10.3 圆轴扭转时的应力与强度条件	182
10.4 圆轴扭转时的变形与刚度条件	188
10.5 剪切的概念及实例	190
10.6 连接件的强度计算	190
本章小结	193
习 题	194

第 11 章 弯曲变形	199
11.1 平面弯曲的概念及梁的计算简图	199
11.2 弯曲内力	200
11.3 弯曲应力	207
11.4 梁横截面上的切应力	213
11.5 梁的合理设计	216
11.6 弯曲变形概述	217
本章小结	227
习 题	229
第 12 章 应力状态和强度理论	234
12.1 概 述	234
12.2 平面应力状态下的应力分析	235
12.3 空间应力状态下的应力分析	243
12.4 广义胡克定律	245
12.5 强度理论	250
本章小结	254
习 题	256
第 13 章 组合变形	259
13.1 组合变形的概念	259
13.2 斜弯曲	260
13.3 拉伸(压缩)与弯曲	262
13.4 偏心拉伸(压缩)	264
13.5 弯曲与扭转	267
本章小结	271
习 题	272
第 14 章 压杆稳定	274
14.1 压杆稳定的概念	274
14.2 理想压杆临界力的计算	275
14.3 欧拉公式的适用范围	278
14.4 压杆的稳定计算	280
14.5 压杆的合理截面设计	285
本章小结	286
习 题	287
参考文献	290
附 录	291
附录 A 刚体对轴转动惯量的计算	291
附录 B 截面的几何性质	296
附录 C 型钢表	303
附录 D 简单荷载作用下梁的挠度和转角	310

第 1 篇 理论力学

1. 理论力学的研究对象和主要内容

结构物通常分为建筑结构和机械结构两种形式,它们通常都受到各种外力的作用,例如,行驶的汽车受到重力、摩擦力和动力的作用,房屋受到来自自然界的风力、自身重力的作用,吊车梁承受吊车和起吊物的重力作用等,力学是研究工程中的结构物及一些自然现象中的物体受力后所表现的力学性质。理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械运动是指物体在空间的位置随时间变化而变化的过程,例如,行驶的汽车、飞行中的飞机、航行中的轮船、地球的公转和自转、机床的旋转、建筑物的沉陷等都是机械运动。平衡是机械运动的特例。理论力学是经典力学,也称古典力学,它是以牛顿三大定律为基础建立起来的,所谓“古典力学”指的是它仅适合于运动速度远小于光速的宏观物体的运动。若物体的速度接近光速,则由相对论力学来研究;若是微观粒子的运动,则由量子力学来研究。因此理论力学的研究范畴是宏观低速物体,在现代科技和工程中绝大多数物体运动都属于这个领域,所以理论力学一直发挥着它所应有的作用。

理论力学的研究内容由三部分组成:静力学(包括静力学基本知识、平面力系的简化与平衡),运动学(包括运动学基本知识、点的合成运动、刚体的平面运动),动力学(包括动力学普遍定理、达朗伯原理、虚位移原理)。

2. 理论力学的研究方法和学习理论力学的目的

理论力学的研究方法和其他学科一样,遵循辩证唯物主义的客观规律,即从实践到认识,再从认识到实践的过程。通过对生产和自然现象中物体所做机械运动的认识,建立起相应的力学模型,经过分析、归纳和综合,上升到理性认识,通过数学演绎形成反映机械运动规律的定理,再回到实践中去检验,这样反复进行的过程,形成了理论力学的理论体系。

理论力学属于经典力学的范畴,它与人类科学实践和对自然的认识是密不可分的。牛顿根据前人长期对机械运动的研究成

果,总结出了牛顿三定律,奠定了经典力学的基础。18世纪,随着欧洲工业革命的爆发,出现了更复杂的机械运动,在经典力学的基础上,达朗贝尔提出了研究非自由质点系动力学的新方法——动静法;拉格朗日提出了用广义坐标描述非自由质点系的运动,使所描述体系的变量大大地减少,并将物体运动的机械能与作用在物体上的力所做的功联系起来,用能量法研究平衡问题——虚位移原理,从而拓宽了求解非自由质点系问题的途径。

理论力学是建筑工程和机械工程等专业必修的一门专业基础课程之一,学习理论力学一方面可以直接解决工程中的一些力学问题,另一方面更重要的是为后继课程打基础。理论力学的研究对象是研究不变形的物体——刚体,因此理论力学也称为“刚体力学”。

理论力学是一门较强的数学演绎和逻辑推理的课程,通过理论力学的学习,可以提高我们对机械运动的认识,为学习后继课程打下坚实的理论基础。锻炼和提高逻辑思维的能力,同时也为人们如何用科学的方法解决工程实际问题提供了方法和手段,增强解决问题的能力。

第 1 章

静力学基本知识

静力学是研究物体在力的作用下平衡规律的科学。

静力学的研究对象主要是刚体,因此,静力学又称刚体静力学。刚体是指在力的作用下不变形的物体,它是理论力学理想化的力学模型。事实上,在力的作用下不变形的物体是不存在的,物体或多或少地要产生变形,但当其变形较小而不影响所研究问题的性质时,可以忽略其变形,这就是抓住问题的主要矛盾、忽略次要矛盾的辩证唯物主义的观点。

本章学习力的概念、静力学公理、约束与约束力、物体的受力和受力图。正确画出物体的受力图是研究物体平衡与运动的基础,也是本章学习的重点。

1.1 力的概念

力是物体间的相互作用,这种作用可以使物体的运动状态或形状发生改变。

物体间相互作用的形式很多,大体可分两类,一类是直接作用,例如物体所受的拉力或压力;另一类是“场”的作用,例如,地球引力场。力有两种效应:一是力的运动效应,即力使物体的机械运动状态发生变化,例如,静止在地面的物体,当用力推它时,便开始运动;二是力的变形效应,即力使物体形状发生变化,例如,钢筋受到的横向压力过大时,将产生弯曲。

力的三要素是力的大小、方向和作用点。力的大小表示物体间相互作用的强弱程度,一般采用国际单位制,力的单位是牛顿(N,简称牛)或者千牛顿(kN,简称千牛), $1\text{ kN}=10^3\text{ N}$ 。力的方向表示物体间的相互作用具有方向性,它包括方位和指向。力的作用点表示物体间相互作用的位置。一般说来,力的作用位置不是一个几何点而是有一定大小的一个范围,例如,重力是分布在物体整个体积上的,称体积分布力;水对池壁的压力是分布在池壁表面上的,称面分布力;分布在一条直线上的力,称线分布力;当力的作用范围很小时,可以将它抽象为一个点,此点便是力的作用点,此力称为集中力。

由力的三要素可知,力是矢量,记作 $\boldsymbol{F}$ 。本教材中的黑体均表示矢量,矢量可以用一有向线段表示,如图 1-1 所示。有向线段 AB 的长度表示力的大小;有向线段 AB 的指向表示力的方向;有向线段 AB 的起点或终点表示力的作用点。

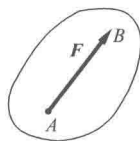


图 1-1 力的矢量表示

1.2 静力学公理

静力学公理是指人们在生产和生活实践中长期积累和总结出来并通过实践反复验证的具有一般规律的定理和定律。它是静力学的理论基础,并且无须证明。

1. 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,此合力的大小和方向由此二力矢量所构成的平行四边形对角线来确定,合力的作用点仍在该点。如图 1-2(a) 所示, F 为 F_1 和 F_2 的合力,即合力等于两个分力的矢量和。

$$F = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

也可采用三角形法则确定合力,即二力依次首尾相接,其三角形的封闭边即为该二力的合力,如图 1-2(b) 所示。力的平行四边形法则和三角形法则是简单的力系简化法则,同时此法则也是力的分解法则。

2. 公理 2: 二力平衡原理

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:此二力必大小相等、方向相反,并且作用在同一条直线上,即 $F_1 = -F_2$,如图 1-3 所示。

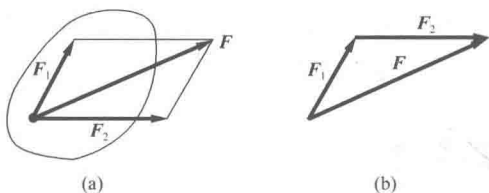


图 1-2 力的平行四边形法则和三角形法则

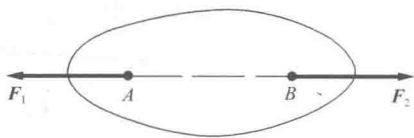


图 1-3 二力平衡原理

应当指出:二力平衡原理适用于刚体,对变形体则只是必要条件,但不是充分条件。

利用此公理可以确定力的作用线位置,例如,刚体在两个力的作用下平衡,若已知两个力的作用点,则此作用点的连线即为二力的作用线。同时,二力平衡力系也是最简单的平衡力系。

3. 公理 3: 加减平衡力系原理

在作用于刚体的力系中加上或减去任意的平衡力系,并不改变原来力系对刚体的作用。

此公理表明平衡力系对刚体不产生运动效应,其适用条件只是刚体。根据公理 3 可得推论:力的可传性。

将作用在刚体上的力沿其作用线任意移动,而不改变它对刚体的作用效应,如图 1-4 所示。

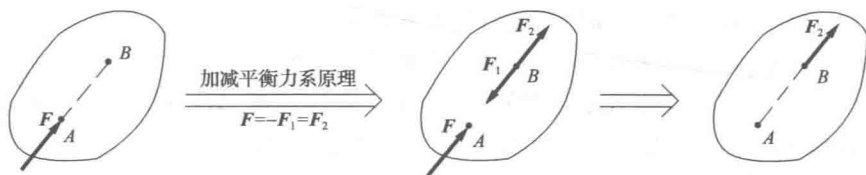


图 1-4 力的可传性

根据公理1、公理2可得推论:三力平衡汇交定理。

刚体在三力作用下处于平衡,若其中两个力汇交于一点,则第三个力必汇交于该点,如图1-5所示。

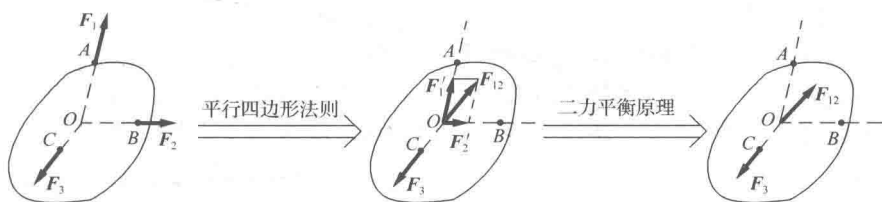


图1-5 三力平衡汇交定理

应当指出,三力平衡汇交定理的条件是必要条件,不是充分条件。同时它也是确定力的作用线的方法之一,即如果刚体在三个力的作用下处于平衡,若已知其中两个力的作用线汇交于一点,则第三个力的作用点与该汇交点的连线为第三个力的作用线,其指向由二力平衡定理来确定。

4. 公理4:作用与反作用定律

物体间的作用力与反作用力总是成对出现的,其大小相等,方向相反,沿着同一条直线,且分别作用在两个相互作用的物体上。如图1-6所示, C 铰处 F_N 与 F'_N 为一对作用力与反作用力。

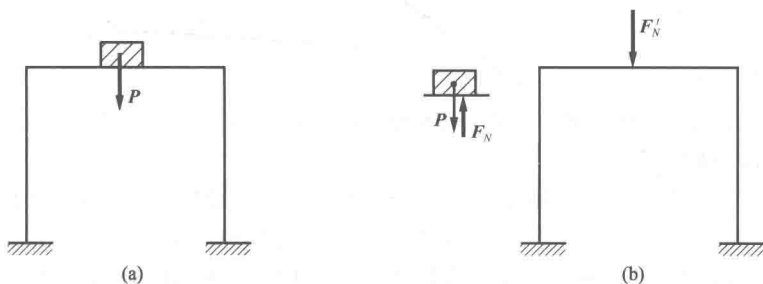


图1-6 作用与反作用定律

1.3 约束与约束力

从运动的角度将所研究的物体分为两类:一类是物体的运动不受它周围物体的限制,这样的物体称为自由体,例如飞行中的飞机、炮弹、卫星等;另一类是物体的运动受到它周围物体的限制,这样的物体称为非自由体,例如,建筑结构中的水平梁受到支撑它的柱子的限制,火车只能在轨道上行驶等。因此,我们将限制非自由体某种位置或运动的周围物体称为约束,如上述的柱子是水平梁的约束,轨道是火车的约束。约束是通过直接接触实现的,当物体沿着约束所能阻止的运动方向有运动或运动趋势时,对它形成约束的物体必有能阻止其运动的力作用于它,这种力称为该物体的约束力,即约束力是约束对物体的作用,确定约束力方向的准则是,约束力的方向恒与约束所能阻止的运动方向相反。事实上约束力是一种被动力,与之相对应的力是主动力,即主动地使物体有运动或有运动趋势的大小、方向已知的力称为主动力,例如,重力、拉力、牵引力等,工程中通常将主动力称为荷载。

工程中大部分研究对象都是非自由体,它们所受的约束是多种多样的,其约束力的形式也是多种多样的。因此在理论力学中,将物体所受约束的主要因素保留,忽略次要因素,得到下面几种工程中常见的约束及约束力。

1. 光滑接触面约束

若物体接触面之间的摩擦可以忽略时,认为接触面是光滑的,这种约束不能限制物体沿接触点公切面的运动,只能阻止物体沿接触点的公法线的运动。因此,光滑接触面约束的约束力特点是通过接触点、沿着公法线、指向被约束物体,用 N 或 F_N 表示,如图 1-7 所示。

2. 柔体约束

工程中绳索、链条、皮带均属此类约束,约束特点是通过接触点,沿着柔体轴线、背离被约束物体,即柔体只承受拉力,用 F_T 表示,如图 1-8 所示。

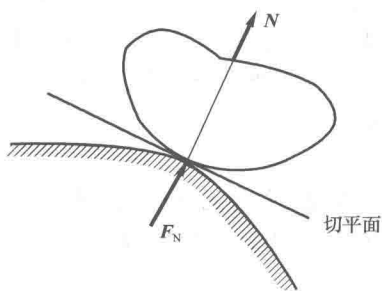


图 1-7 光滑接触面约束

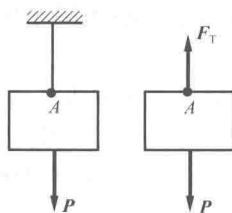


图 1-8 柔体约束

3. 光滑铰链约束

光滑铰链约束包括圆柱形铰链约束、固定铰支座约束、可动铰支座(滚动铰支座)约束三种。

(1) 圆柱形铰链约束

如图 1-9 所示,将两个物体穿成直径相同的圆孔,用直径略小的圆柱体(称销子)将两个物体连接上,形成的装置称圆柱形铰链,若圆孔间的摩擦忽略不计则为光滑圆柱形铰链,简称铰链。其约束特点是不能阻止物体绕圆孔的转动,但能阻止物体沿圆孔径向的运动,约束力作用点(作用线穿过接触点和圆孔中心,但由于圆孔较小,忽略其半径)在圆孔中心,指向不定,它取决于主动力的状态。如图 1-10(a)所示的 F_A ,通常用它的两个正交分量表示在铰链简图上,如图 1-10(b)所示的 F_{Ax} 、 F_{Ay} 。

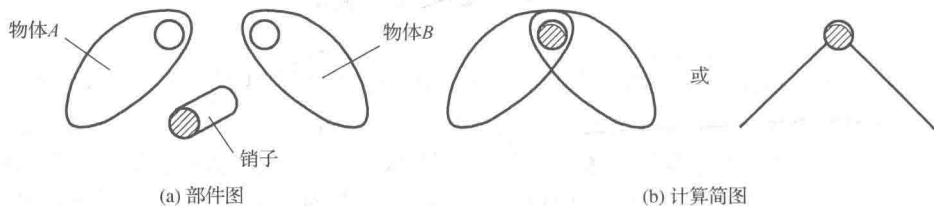


图 1-9 圆柱形铰链简图

(2) 固定铰支座约束

将上面的圆柱形铰链中的一个物体固定在不動的支撐平面上,这样形成的装置称为固定铰支座。其约束特点与圆柱形铰链一样,如图 1-11 所示。

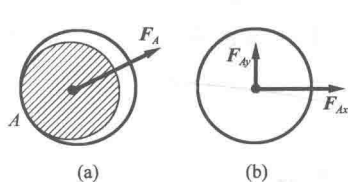


图 1-10 圆柱形铰链约束力

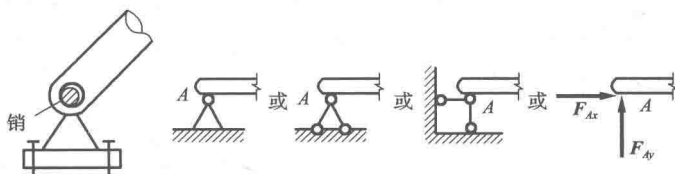


图 1-11 固定铰支座简图及约束力

(3) 可动铰支座(滚动铰支座)约束

将上面的圆柱形铰链中的一个物体下面放上滚轴,此装置可在其支撑表面上移动,且摩擦不计,这样的装置称可动铰支座或滚动铰支座。其约束特点是约束力沿支撑表面的法线,作用线通过铰链中心,指向被约束物体,如图 1-12 所示。



图 1-12 可动铰支座简图及约束力

4. 链杆约束

两端用铰链与其他物体相连,中间不受力的直杆称为链杆。其约束特点是约束力的作用线沿链杆轴线,且指向不定,如图 1-13 所示。

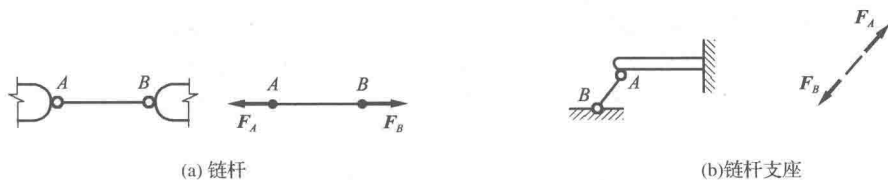


图 1-13 链杆及约束力

5. 轴承约束

轴承包括向心轴承和止推轴承两种形式。

(1) 向心轴承

向心轴承是工程中常见的约束,其约束特点与圆柱形铰链约束相同,常用正交分量表示,如图 1-14 所示。

(2) 止推轴承

用一光滑的面将向心轴承的一端封闭而形成的装置,称止推轴承。其约束特点是除了具有向心轴承的受力特点以外,还受沿封闭面的法线方向的力,如图 1-15 所示。

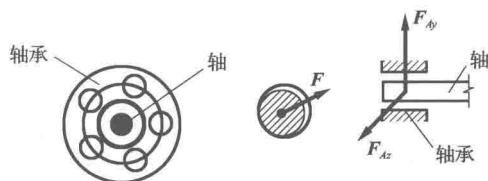


图 1-14 向心轴承及约束力

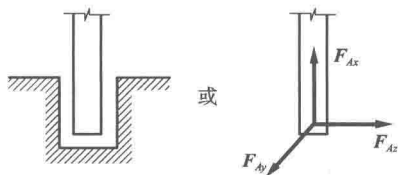


图 1-15 止推轴承及约束力

以上是工程中几种常见的约束及约束力,这些情况只是工程中的理想约束。在工程实际的具体问题中,应根据实际的受力特点,将复杂约束通过保留其主要因素、忽略次要因素加以简化来实现。

1.4 物体的受力分析和受力图

在对力学问题的分析和计算中,首先要分析物体受到哪些力的作用,每个力的作用位置如何,力的方向如何,这个过程称为对物体进行受力分析,将所分析的全部力用图表示出来称为受力图。

正确地对物体进行受力分析和画受力图是力学计算的前提和关键,其画图步骤及注意事项如下:

(1)确定研究对象,将其从周围物体中分离出来,并画出其简图,称为画分离体图。研究对象可以是一个,也可以由几个物体组成,但必须将它们的约束全部解除。

(2)画出全部的主动力和约束力。主动力一般是已知的,故必须画出,不能遗漏,约束力一般是未知的,要从解除约束处分析,不能凭空捏造。

(3)不画内力,只画外力。内力是研究对象内部各物体之间的相互作用力,对研究对象的整体运动效应没有影响,因此不画。但外力必须画出,一个也不能少,外力是研究对象以外的物体对该物体的作用,它包括作用在研究对象上全部的主动力和约束力。

(4)要正确地分析物体间的作用力与反作用力,当作用力的方向一经假定,反作用力的方向必须与之相反。当研究对象由几个物体组成时,物体间的相互作用力是内力,也不必画,若想分析物体间的相互作用力必须将其分离出来,单独画受力图,内力就变成了外力。

【例 1-1】 重为 P 的混凝土圆管,放在光滑的斜面上,并在 A 处用绳索拉住,如图 1-16(a)所示,试画出混凝土圆管的受力图。

解 (1)取混凝土圆管为研究对象,将它从周围物体中分离出来。

(2)混凝土圆管所受的主动力和约束力为重力 P ,约束力为绳索拉力 F_{TA} 和斜面 B 点的法向约束力 F_{NB} ,如图 1-16(b)所示。

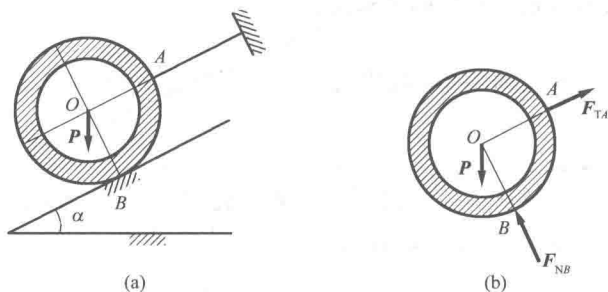


图 1-16 例 1-1 图

(3)画出混凝土圆管的受力图。

【例 1-2】 水平梁 AB 受均匀分布的荷载 q (N/m) 的作用,梁的 A 端为固定铰支座, B 端为滚动铰支座,如图 1-17(a)所示,试画出梁 AB 的受力图。

解 (1)取水平梁 AB 为研究对象,将它从周围物体中分离出来。

(2) 水平梁 AB 所受的主动力为均匀分布的荷载 q (沿直线分布的荷载称为线分布荷载), 固定铰支座 A 端的约束力为正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} , 滚动铰支座 B 端的法向约束力为 F_B 。

(3) 画出梁 AB 的受力图, 如图 1-17(b) 所示。

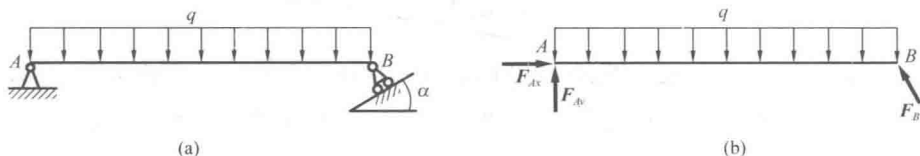


图 1-17 例 1-2 图

【例 1-3】 管道支架由水平梁 AB 和链杆 CD 组成, 如图 1-18(a) 所示, 其上放置一重为 P 的混凝土圆管。 A 、 D 为固定铰支座, C 处为铰链连接, 不计各杆的自重和各处的摩擦, 试画出水平杆 AB 、斜杆 CD 以及整体的受力图。

解 (1) 取斜杆 CD 为研究对象, 由于杆 CD 只在 C 端和 D 端受有约束而处于平衡, 其中间不受任何力的作用, 由二力平衡原理知, C 、 D 两点连线为杆 CD 受的约束力方向, 受力如图 1-18(b) 所示, 这样的杆称为二力杆。 若是有形的物体则称为二力构件 (即只受两点力的作用, 中间不受任何力作用的物体)。

(2) 取混凝土圆管和水平梁 AB 为研究对象, 所受的主动力为圆管的重力 P , 固定铰支座 A 端的约束力由三力平衡汇交定理确定, 即 F_A , 如图 1-18(c) 所示。 但在以后的计算中, 通常用两个正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 描述, 这样便于计算。 铰链 C 处的约束力有作用力与反作用力 $F'_C = -F_C$, 受力如图 1-18(c) 所示。

(3) 取整体为研究对象, 受力图只画外力, 不画内力, 因为内力在整体受力图中是成对出现的, 构成平衡力系, 对整体平衡不产生影响。 因此整体所受的力为重力 P , A 端的约束力 F_A , D 端的约束力 F_D , 受力如图 1-18(d) 所示。

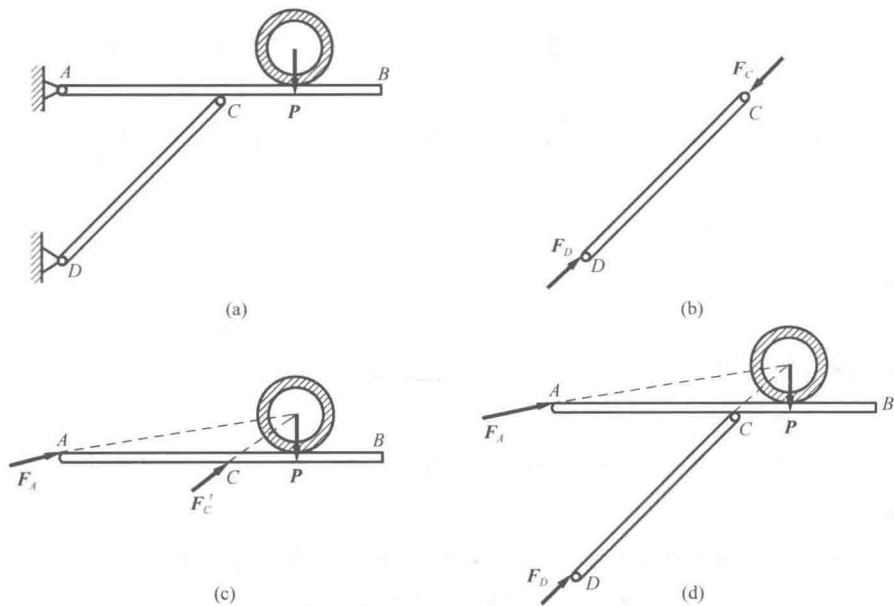


图 1-18 例 1-3 图