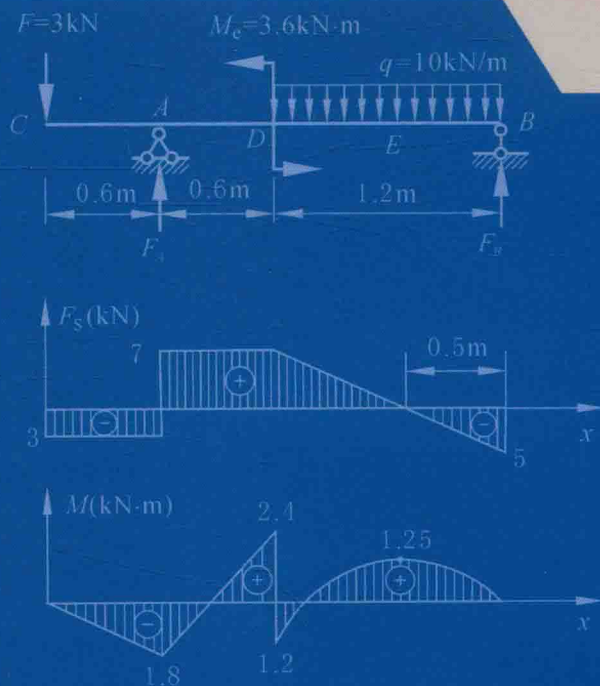


普通高等教育规划教材

GONGCHENG LIXUE

工程力学

主编 侯作富 胡述龙
张新红 夏成宇
主审 朱四荣



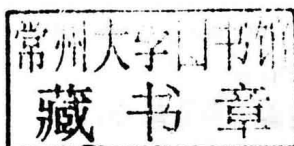
武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press

普通高等教育规划教材

工程力学

主 编	侯作富	胡述龙	张新红	夏成宇
副主编	许福东	黄和祥	梅 超	
主 审	朱四荣			



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内容简介

本书根据高等学校工科本科工程力学(中、少学时)基本要求和各高校多年来工程力学教学改革成果改编而成,对相关教学内容进行了重新编排和调整,注重理论联系实际,适当引入和更新了部分教学内容。全书共分13章:静力学公理与物体的受力分析、平面力系、空间力系、材料力学基本概念、轴向拉压与剪切、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定、动荷应力与交变应力。附录包括截面的几何性质、型钢表、索引和力学性能名词及符号新旧标准对照表。

本书力求做到结构紧凑,语句简明,通俗易懂,便于教学和自学。

本书适用于普通高等学校石油、地矿、冶金、化工、水利、船舶、海洋等专业中、少学时工程力学的教学,也可供高职高专与成人高校师生及相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/侯作富等主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.2

ISBN 978-7-5629-5712-6

I. ①工… II. ①侯… 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 314796 号

项目负责人:吴正刚

责任编辑:吴正刚

责任校对:丁冲

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社

社址:武汉市洪山区珞狮路122号

邮编:430070

网址:<http://www.wutp.com.cn>

经销:各地新华书店

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本:787×1092 1/16

印张:18.75

字数:480千字

版次:2018年2月第1版

印次:2018年2月第1次印刷

印数:1—3000册

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87785758 87391631 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

目前,我国高等教育已从精英教育过渡到了大众教育。为适应新的形势,教材根据高等学校工科本科工程力学(中、少学时)基本要求,在突出基本概念、基本原理、基本方法的前提下,注重理论联系实际。在学生开始由基础课学习过渡到专业基础课学习的阶段,对实际问题还不是很了解的情况下,在教材中引入了大量的工程实例及图表,力图使学生掌握从工程实际结构或构件中建立力学模型并进行计算分析的能力,为相关专业课的学习打下良好基础。

教材包含了理论力学中静力学和材料力学的基础内容,是长江大学机械工程学院的力学教师在多年讲授理论力学和材料力学课程的基础上精心改编而成。由侯作富、胡述龙、张新红、夏成宇担任主编。分别由侯作富(第4章、第5章、第10章)、黄和祥(第2章、第6章)、张新红(第8章、第9章)、胡述龙(第7章、第11章、第12章)、许福东(第13章)、夏成宇(第3章)、梅超(第1章、附录I和附录II)执笔。最后由侯作富和夏成宇统稿。

为满足教学一线的要求,我们还编写了与之配套的习题册,便于课后的练习。

本书的内容安排,为教师的教学留有较大的选择余地。若安排8个学时左右的相关实验,可适用于课程总学时为80学时左右的教学要求。如果不讲书中打“*”的内容,减少实验学时,也可满足一些专业64学时的教学要求。

本书由武汉理工大学朱四荣教授主审,朱四荣教授对全书进行了仔细审阅,提出了许多中肯的意见,编者在此表示由衷的感谢。同时在编写的过程中,参考了兄弟院校工程力学、理论力学或材料力学教材中的部分内容和习题,在此也一并表示感谢!

感谢长江大学机械工程学院的领导在这本教材的编写、出版中提供的支持和帮助。

由于水平所限,书中疏漏与不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2018年1月于长江大学

目 录

第一篇 静力学

引言	(1)
1 静力学公理与物体的受力分析	(3)
1.1 静力学公理	(3)
1.2 约束和约束力	(5)
1.3 受力图	(9)
习题	(11)
2 平面力系	(13)
2.1 平面汇交力系	(13)
2.2 平面力对点的矩 平面力偶	(17)
2.3 平面任意力系	(22)
2.4 物体系统的平衡	(31)
2.5 简单平面桁架的内力计算	(35)
习题	(38)
3 空间力系	(45)
3.1 空间汇交力系	(45)
3.2 空间中力对点的矩和力对轴的矩	(48)
3.3 空间力偶系	(52)
3.4 空间任意力系	(53)
习题	(56)

第二篇 材料力学

4 材料力学基本概念	(58)
4.1 材料力学的任务	(58)
4.2 材料力学的发展简况	(59)
4.3 变形固体及其基本假设	(60)
4.4 内力、截面法和应力	(62)
4.5 变形与应变	(64)

4.6 杆件的基本变形形式·····	(66)
习题·····	(67)
5 轴向拉伸、压缩与剪切 ·····	(68)
5.1 工程实际中的轴向拉伸或压缩问题·····	(68)
5.2 轴向拉伸或压缩时的内力·····	(69)
5.3 轴向拉伸或压缩时的应力·····	(71)
5.4 材料拉伸或压缩时的力学性能·····	(74)
5.5 轴向拉伸或压缩时的强度计算·····	(79)
5.6 轴向拉伸或压缩时的变形·····	(83)
*5.7 应变能的概念·····	(86)
5.8 拉伸或压缩超静定问题·····	(87)
*5.9 应力集中的概念·····	(92)
5.10 剪切与挤压的实用计算·····	(93)
习题·····	(98)
6 扭转 ·····	(103)
6.1 工程实际中的扭转问题·····	(103)
6.2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图·····	(103)
6.3 薄壁圆筒的扭转·····	(106)
6.4 圆轴扭转时的应力 强度计算·····	(108)
6.5 圆轴扭转时的变形 刚度计算·····	(114)
*6.6 非圆截面杆扭转的概念·····	(117)
习题·····	(119)
7 弯曲内力 ·····	(123)
7.1 工程实际中的弯曲问题·····	(123)
7.2 剪力和弯矩·····	(125)
7.3 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图·····	(127)
7.4 剪力、弯矩和分布载荷集度间的关系·····	(131)
习题·····	(134)
8 弯曲应力 ·····	(138)
8.1 横截面上的正应力·····	(138)
8.2 梁的弯曲正应力强度条件·····	(142)
8.3 梁的弯曲切应力及其强度计算·····	(145)
8.4 提高梁弯曲强度的措施·····	(148)
习题·····	(150)

9 弯曲变形	(155)
9.1 工程实际中的弯曲变形问题	(155)
9.2 梁的挠曲线近似微分方程	(155)
9.3 积分法求梁的变形	(157)
* 9.4 叠加法求梁的变形	(160)
9.5 梁的刚度计算 提高梁弯曲刚度的措施	(165)
* 9.6 简单超静定梁	(167)
习题	(170)
10 应力状态与强度理论	(174)
10.1 应力状态概述	(174)
10.2 二向应力状态	(176)
10.3 三向应力状态	(181)
10.4 应力与应变的关系	(183)
10.5 材料的破坏形式	(187)
10.6 常用强度理论	(188)
习题	(193)
11 组合变形	(197)
11.1 概述	(197)
11.2 拉伸(或压缩)与弯曲的组合	(198)
11.3 扭转与弯曲的组合	(203)
习题	(208)
12 压杆稳定	(213)
12.1 压杆稳定的概念	(213)
12.2 细长压杆的临界力	(215)
12.3 欧拉公式的适用范围 临界应力总图	(220)
12.4 压杆的稳定计算	(223)
12.5 提高压杆稳定性的措施	(226)
习题	(228)
* 13 动荷应力与交变应力	(233)
13.1 概述	(233)
13.2 动荷应力计算	(233)
13.3 交变应力简介	(242)
13.4 提高构件抗冲击与疲劳的措施	(251)
习题	(252)

附录 I 截面的几何性质.....	(256)
I.1 静矩和形心.....	(256)
I.2 惯性矩和极惯性矩 惯性积.....	(258)
I.3 平行移轴公式.....	(261)
习题.....	(263)
附录 II 型钢表.....	(265)
附录 III 索引.....	(275)
附录 IV 力学性能名词及符号新旧标准对照表.....	(279)
习题参考答案.....	(281)
参考文献.....	(289)

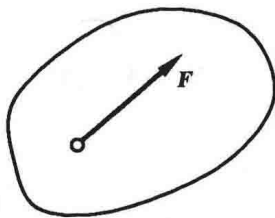
第一篇 静力学

引 言

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。物体相对于惯性参考系(如地面)处于静止或作匀速直线运动的状态,称为平衡。

力是物体间的相互机械作用,这种作用可使物体的运动状态发生改变(外效应)和形状发生改变(内效应)。所谓机械作用是指物体间的接触或场(例如重力场)的作用。力对物体的作用效应取决于力的三要素,即力的大小、方向和作用点。力的大小即物体之间机械作用的强度。在我国法定采用的国际单位制中,力的计量单位是牛顿,记为 N ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$)。力的方向即物体之间机械作用的方向。力的作用点,即物体之间机械作用的部位。一般情况下物体之间的接触都不可能是点接触,因此,力作用的区域抽象为点是一种力学简化,此时称为集中力。当不能这样简化时,就成为分布力。

力是矢量。几何上表示为带箭头的有向线段,用黑体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示,如图引-1 所示。



图引-1

作用在物体上的一群力,称为力系。根据力系中诸力作用线的位置,首先可分为平面力系、空间力系。而具体根据力系中诸力作用线的相互关系,又可分为汇交力系、力偶系、平行力系、任意力系。

若作用在物体上的一力系可用另一力系来代替而不改变它对物体的作用效应,则称这两个力系为等效力系或互等力系。所谓力系的简化,就是用一个简单的等效力系,来代替作用在物体上的一个复杂力系。研究力系简化的目的,是为了简化物体的受力情况,以便于进一步分析和研究物体在力系作用下的平衡条件或运动规律。

在研究力对物体的外效应时,一般把物体抽象为刚体。所谓刚体是指在任何力作用下都不发生变形的物体,或者说其内任意两点间的距离始终保持不变的物体。显然,这是一个抽象化的模型,实际上并不存在这样的物体。因为任何物体受力后都会或多或少地发生变形。然而工程实际中很多物体的变形都非常微小,当研究它们的平衡和运动时可忽略不计,从而使研究的问题大为简化。如果在所研究的问题中,物体的变形成为主要因素时,就不能再把物体看成是刚体,而要看成是可变形体。因此将物体抽象为刚体是有条件的,这与所研究问题的性质有关。

在本书的静力学部分中,所研究的物体只限于刚体,因此,静力学又称为刚体静力学。而

在本书的材料力学部分中,将以可变形体为研究对象。但当研究可变形体的平衡问题时,也是以刚体静力学的理论为基础的。

静力学的研究途径是:首先,把受载的平衡构件从其所在位置隔离出来,用力取代周围物体对它的作用,简化为受力系作用的平衡刚体;其次,运用矢量知识及静力学公理将力系简化,研究力系的整体特征,推演出作用在平衡刚体上的全部外力组成的平衡力系所满足的平衡条件;最后,应用这些条件,由已知载荷,求出构件所受的未知力。

静力学主要研究以下三个方面的问题:

- (1) 物体的受力分析;
- (2) 力系的简化;
- (3) 力系的平衡。

静力学的内容是设计结构、构件和机械零件的重要基础。



图 1-1

1 静力学公理与物体的受力分析

本章主要介绍刚体静力学的基本公理、常见约束形式及约束力的表示方法、物体受力分析的步骤与方法等内容。

1.1 静力学公理

所谓公理,就是人们在生产和生活实践中长期积累的经验总结,且经过大量实验检验,证明是符合客观实际的普遍规律。静力学中所有定理和结论都是由以下几个基本公理推演出来的。

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,可以合成为作用在该点的一个合力,合力的大小和方向由这两个力构成的平行四边形的对角线确定。

如图 1-1 所示,作用在图 1-1(a)中点 A 处的两个力 F_1 、 F_2 与作用在图 1-1(b)中点 A 处的一个力 F_R 等效。力 F_R 称为力 F_1 、 F_2 的合力,而力 F_1 和力 F_2 称为 F_R 的分力。

用矢量法可表示为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

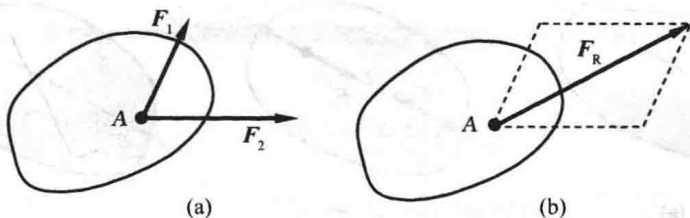


图 1-1

此外,从图 1-1(a)到(b)的过程可以视为两个力的合成,也可以将多个汇交力用一个合力表示,这就是力系简化的过程。力的平行四边形法则是力系简化的基础。而从图 1-1b 到 a 的过程可视为力的分解,力的分解过程是将一个力用两个分力表示。稍作研究可知,两个分力的方向可以任意选择。力的分解可在数学求解时带来方便,在研究静力学平衡问题时也经常用到。

公理 2 二力平衡条件

作用在一个刚体上的两个力使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用线在同一条直线上,即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$$

这个公理阐述了作用在刚体上最简单力系平衡时应满足的条件。需指出的是,此公理只适用于刚体。

仅受两个力作用而处于平衡状态的杆件或构件称为二力杆或二力构件,它所受的两个力

必沿两个力作用点的连线,且等值、反向,如图 1-2 所示。

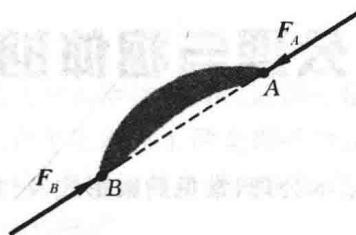


图 1-2

公理 3 加减平衡力系公理

在作用在刚体上的任何一个已知力系上加上或减去任意一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

由上述公理可导出以下两个重要的推论:

推论 1 力的可传性

作用在刚体上的力可沿力的作用线移至刚体内的任意一点,而不改变该力对刚体的作用效应。

此推论可由图 1-3 简单证明。设力 F 作用在刚体上的点 A , 点 B 为力作用线上任一点。根据加减平衡力系公理,在点 B 处加一对等值、反向、共线的力 F_1 和 F_2 , 且 $F = F_1 = -F_2$, 这样并未改变力 F 对刚体的作用效应,即图 1-3(a)、(b) 等效。而 F 与 F_2 可构成一对平衡力系,由上述公理可去掉这两个力,即图 1-3(b)、(c) 等效。这样就只剩下作用于点 B 的力 F_1 , 相当于把 F 由点 A 移到了点 B , 即图 1-3(a)、(c) 等效。

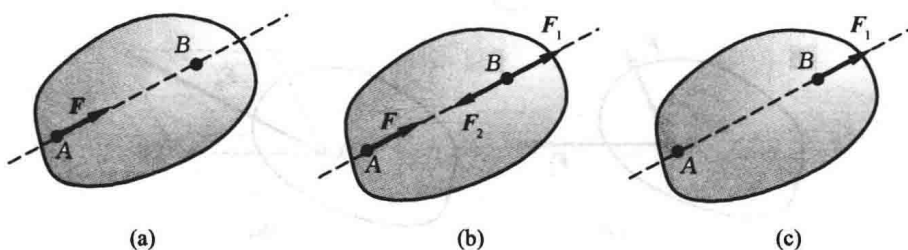


图 1-3

根据力的可传性,对于刚体而言,力的作用点可用力的作用线代替。因此,作用在刚体上的力的三要素就变为力的大小、方向和作用线。由于作用在刚体上的力可沿力的作用线移动,所以其是滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

刚体受三个力作用而处于平衡状态,若其中两力的作用线相交于一点,则此三力必位于同一平面内,且汇交于同一点。

证明: 设有互不平行的力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别作用在刚体上的 A 、 B 、 C 三点,使刚体处于平衡状态(见图 1-4)。延长 F_1 和 F_2 的作用线,得交点 O 。根据力的可传性,可将 F_1 及 F_2 移至点 O (图中用虚线表示其力矢),并按平行四边形法则求得其合力 F_R , 以代替 F_1 和 F_2 。根据二力平衡公理,力 F_3 和 F_R 必在同一直线上,且大小相等、方向相反,所以力 F_3 的作用线也必通过点 O , 且与 F_1 和 F_2 共面。

这样,若刚体受三个互不平行的力作用而平衡,若知道其中任意两个力的方向,就可根据

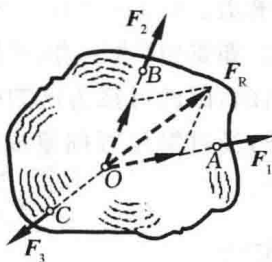


图 1-4

三力平衡汇交定理确定第三个力的方向。

公理 4 作用力和反作用力定律

两物体间相互作用的力总是大小相等,方向相反,沿同一条直线,分别作用在两个物体上。作用力和反作用力总是成对出现的,是作用在不同物体上的两个力。无论物体是处于平衡状态或运动状态该定律都普遍适用。

通常,如果作用力用 F 来表示,反作用力则用 F' 来表示。

公理 5 刚化原理

静力学中力的某些性质,如力的可传性、二力平衡条件等都只对刚体成立,而对于可变形体则在一定条件下成立。如果可变形体在某一力系作用下已处于平衡状态,则将此可变形体刚化为刚体时,其平衡状态不变(如将图 1-5 中的链条变成刚性杆)。这一性质被称为刚化原理,它提供了将可变形体看作刚体的条件。

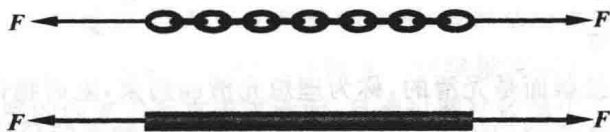


图 1-5

刚体静力学求解平衡问题的方法在研究可变形体平衡问题时也经常被采用。

1.2 约束和约束力

1.2.1 约束和约束力的概念

在分析和解决实际力学问题时,不仅要对象进行理想化,还要对物体的接触性质和受力进行理想化。

凡位移不受任何限制可以在空间作任意运动的物体称为**自由体**,如在空中飞行的飞机、火箭等。如果物体的位移受到了预先给定的条件的限制,使它沿某些方向的运动受阻,则此物体称为**非自由体**。

对非自由体的某些位移起限制性作用的周围物体称为**约束**。如机车受铁轨的限制,只能沿轨道运动,铁轨就是机车的约束。其他如钢索对吊起重物,轴承对电机转轴等都是约束。

约束对物体沿某些方向运动的阻碍作用是通过力的作用实现的,这种作用在被约束物体上的力,称为**约束力**或**约束反力**。约束力的方向总是与受约束物体的运动趋势方向相反。约束力的作用点就是物体上与作为约束的物体相接触的点。约束力的大小一般都是未知的,在

静力学中,需通过与已知力建立方程求出。

约束力以外的其他力称为**主动力**,如重力、水压力、风压力、电磁力等。工程中物体所受的主动力一般都是可测量或单独计算出的,因此可视为已知的。

工程实际中的约束形式复杂多样,经过简化可抽象成不同的约束类型。下面介绍工程实际中常见的几种约束及对应的约束力。

1.2.2 常见约束类型及约束力

(1) 柔索约束

理想化的柔索柔软且不可伸长,阻碍物体沿着柔索伸长的方向运动,因而只能承受拉力的作用,作用在接触点,方向背离物体,如图 1-6 所示。传动系统中的链条或皮带,也只能承受拉力,对轮子的约束力沿轮缘的切线方向,两边都产生拉力,如图 1-7 所示。这类约束的约束力通常用 F_T 来表示。

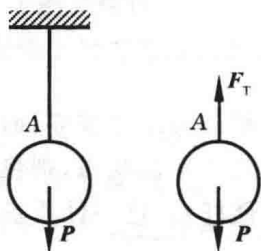


图 1-6

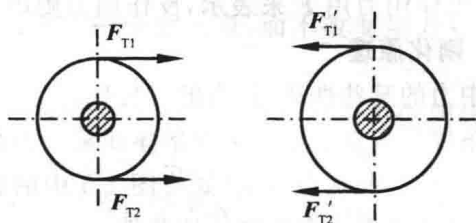


图 1-7

(2) 理想光滑面约束

当物体与约束间的接触面是光滑的,称为理想光滑面约束,阻碍物体在接触点处沿公法线方向朝接触面运动。物体受到的约束力在接触点,方向沿接触面的公法线,并指向物体,通常称为法向反力,记为 F_N ,如图 1-8 所示。

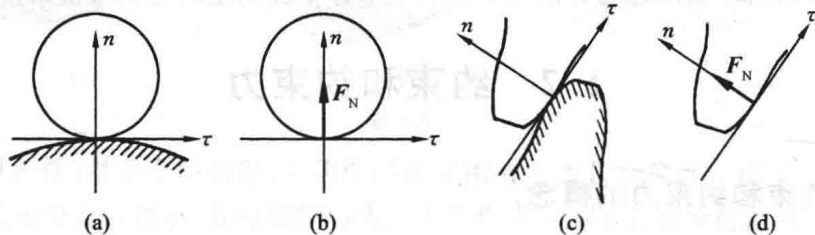


图 1-8

(3) 光滑圆柱铰链约束

圆柱铰链是工程结构中经常用来连接构件的一种结构形式,它的构造是将两个构件钻上同样大小的圆孔,并用圆柱销钉穿入圆孔将两个构件连接起来,这种约束简称为**铰链约束**(通常称为**中间铰**),如图 1-9(a)、(b)所示。若销钉和圆孔之间是光滑的,销钉将阻碍物体沿径向方向的位移,而不能阻碍物体绕销钉轴线的相对转动,构件受到的这种约束称为**光滑圆柱铰链约束**。

如果其中一个构件固定不动,另外一个构件受到的约束就称为**固定铰支座**,如图 1-9(c)所示。

由于销钉与孔的接触位置随外力的变化而变化,在平面图形上为一点,因而构件受到的约

束力通过圆孔中心,作用在垂直于销钉轴线的平面内,方向未知,如图 1-9(d)所示。一般以大小未知的正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 表示,图 1-9(e)为固定铰支座约束及其约束力的画法,中间铰约束力的画法与此类似。

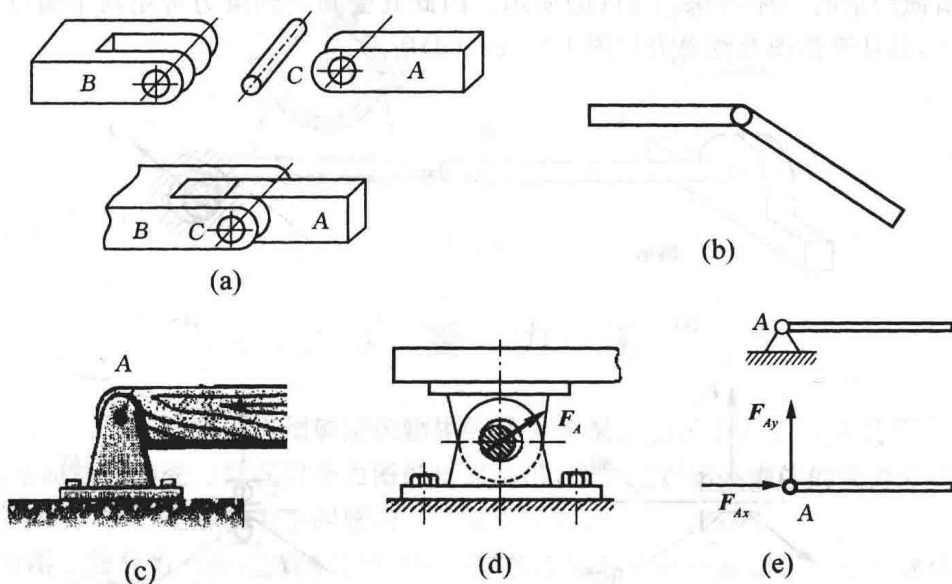


图 1-9

若支座以某种方式支承,可以沿支承面移动(忽略摩擦),允许由于温度变化或其他因素而引起结构跨度的自由伸长或缩短,这种约束称辊轴支座(或滚动铰支座)。在桥梁、屋架等结构中经常采用滚轴支座,如图 1-10(a)所示的几种情况。而辊轴支座的简图也有多种表示,如图 1-10(b)所示。滚轴支座的约束力垂直于支承面,且通过圆柱铰链中心,或沿图 1-10(b)中链杆方向,如图 1-10(c)所示。

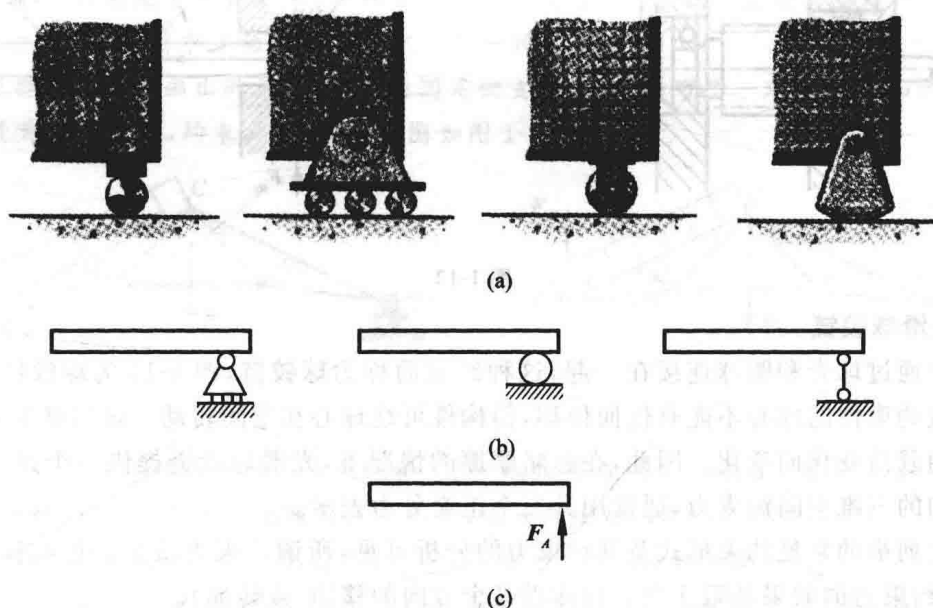


图 1-10

(4) 向心轴承与止推轴承

支撑传动轴的向心轴承也是一种固定铰链支座,轴为被约束体,如图 1-11(a)所示。如不考虑摩擦,轴可以在孔内任意转动,也可以沿轴向轻微移动,但不能沿孔径向移动,其约束可以看作是光滑面约束的一种,如图 1-11(b)所示。因此其受到的约束力可用两个通过轴心的正交分力表示,其计算简图及约束力如图 1-11(c)、(d)所示。

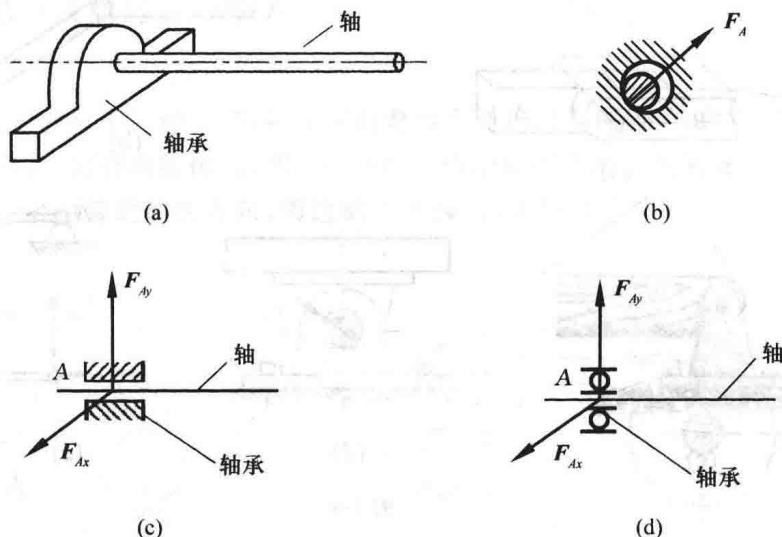


图 1-11

若轴的一端通过设计,限制了轴沿轴向的位移,这种约束叫止推轴承[如图 1-12(a)左端所示],它比向心轴承多了一个沿轴向的约束力,因此其计算简图及约束力如图 1-12(b)所示。

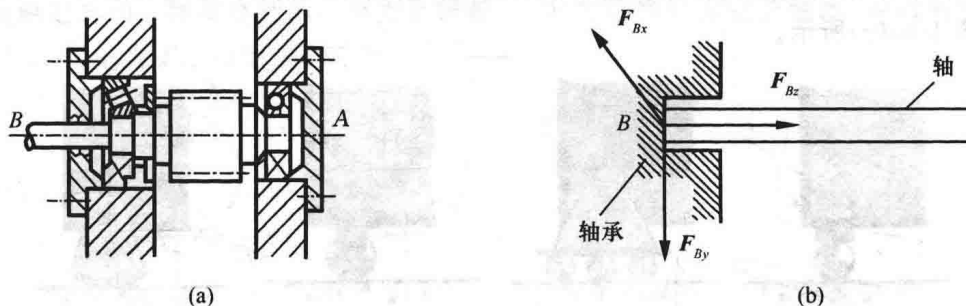


图 1-12

(5) 光滑球铰链

两构件通过球壳和圆球连接在一起,这种约束简称为球铰链,图 1-13 为球铰约束的示意图。它使被约束件的球心不能有任何位移,但构件可绕球心在空间转动。球与球窝为点接触,此点位置随载荷变化而变化。因此,在忽略摩擦的情况下,光滑球铰链提供一个过球心,大小方向均未知的三维空间约束力,通常用其三个正交分力表示。

从以上列举的常见约束形式及其约束力的分析可见,所谓约束力就是其他物体对受力物体的作用,约束力的效果是阻止受力物体沿某个方向的移动(或转动)。

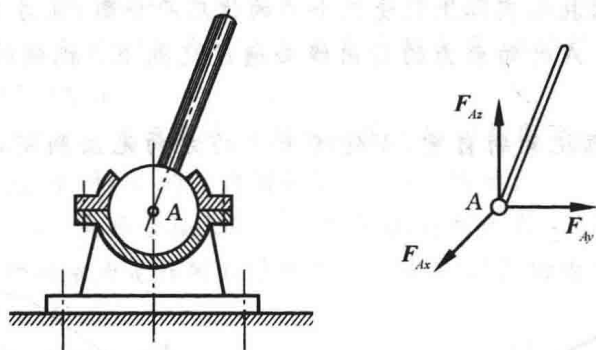


图 1-13

1.3 受力图

研究物体的平衡时,首先必须确定该物体的受力情况。为了直观的反映待研究物体的受力情况,通常将物体的受力情况以受力图的形式画出,这个过程称为物体的受力分析或画受力图。画物体的受力图,是解决力学问题的一个重要步骤。

画受力图一般分为三步:首先,将所研究物体的图形轮廓单独画出来。通常物体是与周围物体相联系的,此步骤要求将物体从周围环境中分离出来,不画出周围物体,因此也称为取分离体。其次,画作用在该物体上的所有已知力。一般将已知力画在作用点处,作用在其他物体上的力不画。最后,在有约束的地方画出所有约束力,约束力的作用点一般在约束与所研究物体的接触处。

【例 1-1】 屋架受均布风力 q (N/m),重量为 P , A 处为固定铰支座, B 处为滚动铰支座,如图 1-14(a)所示,画出屋架的受力图。

【解】 (1) 取屋架为研究对象,单独画出屋架的简图(A 、 B 处的支座不画)。

(2) 画主动力,本图中主动力有重力 P 和均布风力 q 。

(3) 根据约束性质画出约束力, A 处为固定铰支座,约束力可用一对大小未知的正交分力表示。 B 处为辊轴支座,约束力垂直,受力图如图 1-14(b)所示。

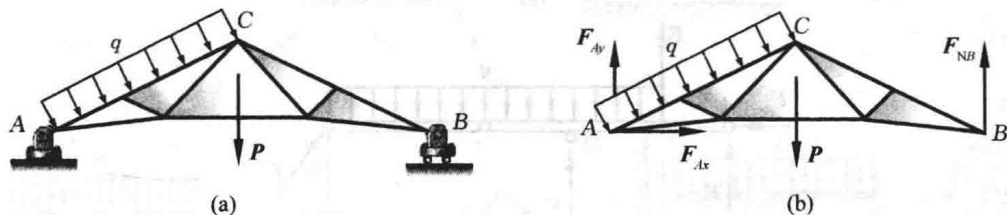


图 1-14

【例 1-2】 托架 AB 的一端用固定铰链、另一端用柔索固定在墙上,在 D 处挂一重物,其重量为 P ,如图 1-15(a)所示。托架的自重不计,试画出托架 AB 的受力图。

【解】 (1) 以托架 AB 为研究对象,单独画出其图形轮廓(取分离体)。

(2) 先画出主动力 P ,再画约束力。 A 处为固定铰支座,约束力可用正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 表示。解除柔索 BC 的约束后,可代之以沿 BC 方向的拉力 F_T ,托架的受力图可画成如图 1-15(b)的图形。