

高等院校“十一五”规划教材

化工过程设备 机械基础

李多民 俞惠敏 主编
江楠 审阅

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

化工过程设备机械基础

李多民 俞惠敏 主编
江楠 审阅

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是为了适应石油化工高等院校石油化工类专业的教学需要所编写的,涉及范围广,知识面宽,具有较强的系统性和实用性。

全书共8章。第1章工程力学基础,主要介绍了力学的基本概念、分析方法以及受力构件常见的变形形式,针对实际给出了相关的计算;第2章化工过程设备材料,主要介绍了石油化工过程设备常用的材料,包括金属材料、非金属材料等的性能以及用途;第3章机械传动与联接,主要包括带传动、齿轮传动、蜗轮蜗杆传动以及轴、联轴器、轴承和常见的减速器的结构与用途等;第4章化工过程设备通用零部件,介绍了化工过程设备中常用的法兰等通用标准件等;第5章压力容器,主要包括内外压力容器的结构与设计等知识;第6章塔设备,主要介绍了典型的板式塔和填料塔结构;第7章换热设备,主要介绍了常用换热器的基本结构;第8章搅拌反应设备,主要介绍了搅拌反应釜的结构、零部件和简单设计过程等。

本教材适用于石油化工高等院校石油化工工艺类专业本科教材,也可作为相近本科专业和专科教材以及石油化工企业工程技术人员阅读参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程设备机械基础/李多民,俞惠敏主编.
—北京:中国石化出版社,2006
ISBN 978-7-80229-016-7

I.化… II.①李… ②俞… III.①化工设备-基本知识②化工机械-基本知识 IV.TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 028888 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 304 千字

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

定价:22.00 元

前 言

本书是按照 2003 年石油化工高等院校教材编写工作会议精神而编写的。

编写本书的基本思想是：适用于目前石油化工高等院校教学内容改革的需要，体现石油化工专业特色和我国石油化工企业发展要求；突出化工过程设备的基本机械知识与理论。

本书因受专业和时数的限制，重点介绍了目前石油化工企业生产过程中所使用的典型化工过程设备以及相关的机械基础。主要包括工程力学基础，化工过程设备常用的材料，常见的化工过程机械传动与联接，常用的化工机械零部件以及典型的石油化工设备等。

本书的特色在于：突出化工设备基本知识系统化，避免复杂的设计，从学生认识、了解、学习、掌握的层次出发考虑，介绍基本的理论和简单分析设计计算等；另外，选编的化工过程设备内容具体、全面，重点突出典型化工过程设备的结构与作用。

在编写的过程中，我们力求做到反映的内容较全，内容力求深入浅出，避免繁琐的数学与力学推导，力争内容精炼，且内容便于教学和学生自学；在内容组织和章节编排上进行了调整，减少了章数。

本书共分 8 章，全书由李多民教授和俞惠敏副教授主编。龙志勤老师编写了第 1 章，李多民教授编写了第 2 章，俞惠敏副教授编写了第 3 章，魏耀东教授编写了第 4 章和第 7 章，陈华豪老师编写了第 5 章，王大成副教授编写了第 6 章和第 8 章。全书由李多民教授统稿。

本书由江楠教授审阅，她对本书进行了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵意见和建议，编者对此谨表衷心感谢。西安石油大学的老师专家也对本书提出了宝贵意见和建议，在此一并致以谢意。

因编者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 工程力学基础	(1)
1.1 受力分析	(1)
1.2 应力与应变	(10)
1.3 拉伸与压缩	(13)
1.4 扭转	(15)
1.5 平面弯曲	(18)
1.6 强度理论	(21)
1.7 压杆稳定	(28)
习题	(32)
第2章 化工过程设备材料	(37)
2.1 金属材料的主要性能	(37)
2.2 钢的热处理	(38)
2.3 碳钢	(40)
2.4 合金钢	(43)
2.5 铸铁	(46)
2.6 有色金属及其合金	(48)
2.7 非金属材料	(51)
习题	(53)
第3章 机械传动与联接	(54)
3.1 带传动	(54)
3.2 齿轮传动	(60)
3.3 蜗杆传动	(69)
3.4 轴	(72)
3.5 键联接与传动	(76)
3.6 联轴器	(78)
3.7 轴承	(81)
3.8 减速机	(87)
习题	(90)
第4章 化工过程设备通用零部件	(93)
4.1 法兰连接	(93)
4.2 容器支座	(99)

4.3 容器的开孔与补强	(101)
4.4 容器的安全泄放装置	(102)
习题	(104)
第5章 压力容器	(106)
5.1 概述	(106)
5.2 内压薄壁容器的应力分析	(108)
5.3 内压薄壁容器的设计计算	(111)
5.4 外压容器	(124)
5.5 储存设备	(131)
5.6 简单容器设计举例	(133)
习题	(140)
第6章 塔设备	(141)
6.1 概述	(141)
6.2 填料塔	(141)
6.3 板式塔	(148)
6.4 塔设备附件	(156)
习题	(162)
第7章 换热设备	(163)
7.1 固定管板式换热器	(163)
7.2 浮头式换热器	(164)
7.3 U形管式换热器	(165)
7.4 管壳式换热器的主要零部件	(165)
习题	(170)
第8章 搅拌反应设备	(171)
8.1 概述	(171)
8.2 搅拌釜体的设计	(171)
8.3 传热装置	(174)
8.4 搅拌装置	(177)
8.5 传动装置	(182)
8.6 轴封装置	(187)
习题	(192)
参考文献	(193)

第1章 工程力学基础

1.1 受力分析

1.1.1 概述

工程力学是一门研究物体机械运动以及构件强度、刚度和稳定性的科学。工程结构物、机器和设备都是由构件，即组成结构或机械的不能再拆卸的元件组成的，若要这些构件在外力的作用下能够安全可靠地进行工作，则需要满足以下力学条件。

(1) 强度条件 强度是指构件抵抗破坏的能力。构件在外力的作用下发生断裂属于强度失效。构件应具有足够的强度，以保证在外力作用下不致破坏。

(2) 刚度条件 刚度是指构件抵抗变形的能力。一些构件对变形有一定的要求，这些构件若存在较大变形会造成刚度失效。因此，构件要具有足够的刚度，以保证在外力作用下，其变形量不超过正常工作所允许的限度。

(3) 稳定性条件 稳定性是指构件保持原有平衡形态的能力。如细长直杆、薄壁外压力容器等构件，在所受压力过大时会突然压弯而失去原有的平衡形态。因此，构件要具有足够的稳定性。

工程力学包括静力学和材料力学两部分的内容。静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律。材料力学研究杆的强度、刚度和稳定性问题。

塔设备是化工、炼油厂主要的生产设备之一，见图1-1。通常作用在塔设备上的力一般有：塔设备自身的重量 W 、风力 q 、基础对塔底的反作用力 N_y 、基础螺栓对塔设备所产生的力矩 M 和横向阻力 N_x 。其中 W 、 q 可从设计条件估算或从设计规范查出，是已知量；而 N_x 、 N_y 和 M 是未知量。由于塔设备处于静置状态，根据静力学的知识可求解出这三个未知量。

分析清楚了作用在塔设备上的受力情况，就可以根据强度条件计算出塔底座圈的几何尺寸和基础螺栓的规格，以及校核塔体的厚度，还可根据条件计算出塔设备的稳定性。

通过这个例子对工程力学的基本内容和处理方法作了概略介绍，可以看出，有些工程问题可以直接应用工程力学的基本理论去解决，有些比较复杂的问题，则需要用工程力学和其他专门知识共同来解决。学习工程力学是为解决工程问题打下一定的基础。

1.1.2 基本概念

1. 力的概念

力是物体间相互的机械作用，作用在物体上的力会引起两种效应：一是引起物体机械运

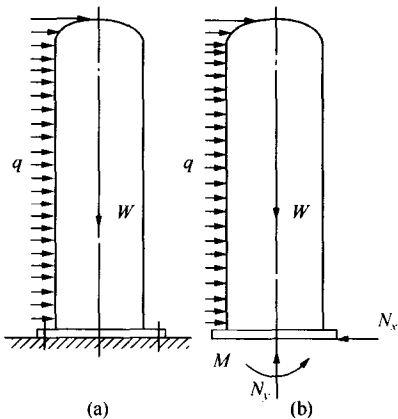


图1-1 塔设备受力分析

动状态的改变,称为外效应;二是引起物体的变形,称为内效应。力的大小、方向、作用点是力的三要素,改变三要素中的任何一个因素,力对物体的作用效应就不一样。

在国际单位制中,力的单位为牛顿(N)或千牛顿(kN)。力是既有大小又有方向的量,也就是说力是矢量,力可以用表示矢量的方法来表示。沿力的方位画出的直线(图1-2),称为力的作用线,线段的长度代表力的大小,线段末端A表示力的作用点。力矢常用黑体字母如 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{N}$ 表示,而非黑体字母 F 、 N 则表示力矢的大小。

作用在物体上的力按作用方式,可分为体积力和表面力两类。分布在物体内部各点的力是体积力,如重力、电磁力等,作用在物体表面上的力为表面力,如接触力、建筑物受到的风力、水坝受到的水压力等。

当力的作用面积很小时,可以近似认为力是作用在一点上,这种力称为集中力;如图1-3(a)、(b)。当力的作用范围比较大时称为分布力。如均质直杆的自重可简化为沿轴线作用的线分布力,其大小用分布力集度 $q(x)$ (单位长度力的大小)表示,如图1-3(b),单位为千牛/米(kN/m);当 $q(x)$ 为常数时称为均布力或均布载荷,如图1-3(b)。

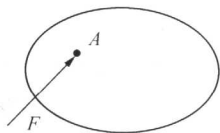


图1-2 力的表示

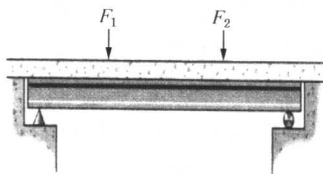
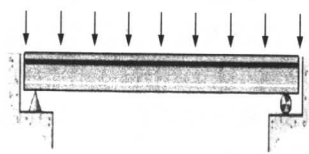


图1-3(a) 集中力



(b) 分布力

图1-3 力的分类

2. 刚体的概念

在研究物体受力的外效应时,为了使问题简化,可以忽略物体的变形,将原物体用一理想化的模型——刚体来代替。所谓刚体就是在力作用下不发生变形的物体。刚体是一抽象化的概念,应该指出,采用刚体模型时要注意研究问题的条件和范围。如果在研究的问题中,物体的变形成为主要因素时,就不能将物体看作刚体,而必须视为变形体。

3. 平衡的概念

如物体相对于地球静止或作匀速直线运动,则称该物体处于平衡状态,并将作用于该物体上的力系称为平衡力系。显然,平衡是物体机械运动的特殊情形。

4. 力的基本性质

(1) 二力平衡原理 若刚体只受两个力的作用而处于平衡状态,其必要且充分条件是:这两个力一定大小相等,方向相反,并作用在同一直线上(简称等值、反向、共线)。如图1-4,刚杆受到两个力 F_1 和 F_2 处于平衡状态时,则一定有 $F_1 = -F_2$ 。 F_1 、 F_2 称为作用在同一物体上的一对平衡力。

只受两个力作用而处于平衡的构件称为二力构件。根据二力平衡原理可以断定,这两个力的方向必定沿两个作用点的连线(如图1-5),与二力构件的形状无关。

(2) 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。合力的作用点仍在该点,合力的大小和方向,由这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线确定。如图1-6所示。

反之,一个力也可以分解为两个分力,分解也按力的平行四边形法则来进行。工程中常

把一个力分解为方向已知且互相垂直的两个分力，这种分解称为正交分解，所得的两个分力称为正交分力。

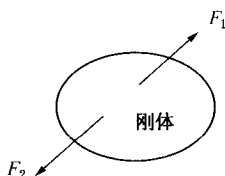


图 1-4 二力平衡

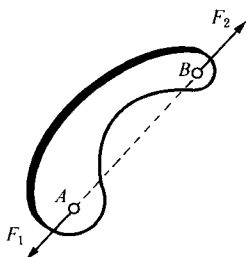


图 1-5 二力构件

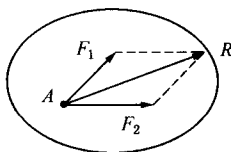


图 1-6 力的合成

(3) 作用和反作用定律 力是物体间的相互机械作用。设有两个相互作用的物体 A 和 B ，物体 A 对物体 B 有一作用力时，物体 B 对物体 A 必有一反作用力。作用力和反作用力必定同时出现，且大小相等、方向相反、作用于同一条直线上。这就是作用和反作用定律。应当注意，作用力与反作用力不是作用在同一物体上，不能与二力平衡原理中的一对平衡力相混淆。

作用和反作用定律是一个普遍性的定律，对刚体和非刚体系统均适用。在研究由几个物体构成的系统的受力时，常常要用到这一定律。

5. 力的投影

从力矢量 F 的两端 A 、 B 分别向 x 轴、 y 轴作垂线得垂足，两垂足之间的线段分别称为力 F 在 x 轴和 y 轴上的投影。用 X 、 Y 表示，如图 1-7 所示， x 轴、 y 轴称为投影轴。若力 F 与 x 轴正向夹角为 α ，则

$$X = F \cos \alpha \quad (1-1a)$$

$$Y = F \sin \alpha \quad (1-1b)$$

力在轴上的投影是代数量，其正负符号可直观判断。投影的指向与投影轴正向一致时投影为正，反之为负。

由力在轴上的投影还可看出：

- (1) 一力在互相平行且同向的轴上投影相等；
- (2) 将力平行移动，此力在同一轴上的投影值不变。

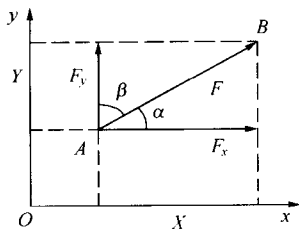


图 1-7 力的分解

6. 力矩

作用在刚体上的一个力除了引起物体的移动外，在一定的条件下(例如作用力不通过刚体的质心、刚体上有固定支点等)，力还可以使刚体产生转动。以图 1-8 拧动螺母的扳手为例，在平面问题中，当在扳手上施加一个力 F 来拧紧螺母时，扳手绕螺母的轴线转动(即螺母的中心 O)。实践证明，力 F 使扳手转动的效应不仅取决于力的大小，而且和 O 点到该力作用线的距离 d 有关。因此，可以用乘积 Fd 来度量力 F 使物体绕 O 点的转动效应，称之为力 F 对 O 点的矩，简称力矩，记作 $M_o(F)$ ，即

$$M_o(F) = \pm Fd \quad (1-2)$$

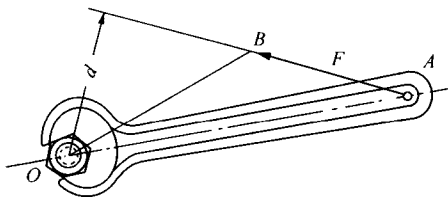


图 1-8 力矩

O 点称为力矩中心, 简称矩心, d 称为力臂。

在平面问题中, 力对点的矩为代数量, 其绝对值等于力的大小与力臂的乘积, 其正负号规定为: 力使物体绕矩心作逆时针方向转动时力矩为正; 反之为负。力矩的单位是牛顿米 ($\text{N}\cdot\text{m}$) 或千牛顿米 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)。

力的作用线通过矩心时, 力矩为零。

7. 力偶与力偶矩

作用在同一物体上等值、反向、不共线的一对平行力称为力偶, 记作 (F, F') 。力偶中两力所在平面称为力偶作用面, 两力作用线之间的垂直距离称为力偶臂。图 1-9 中的双手操纵方向盘和用丝锥攻丝等都可以近似看作力偶作用。

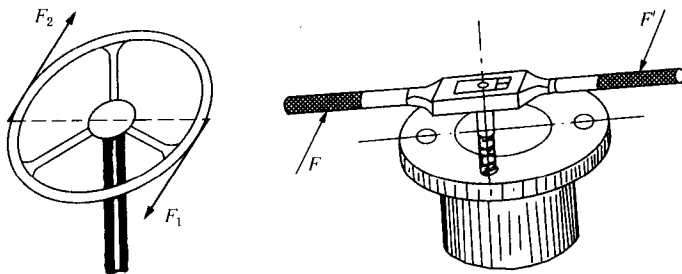


图 1-9 力偶

力偶对刚体只产生转动效应而没有移动效应, 这与一个力单独作用是不同的。因此, 力偶不能与一个力等效, 也就不能与一个力平衡。力和力偶是静力学的两个基本要素。

力偶的转动效应分别与力偶中力 F 的大小、力偶臂 d 的大小成正比。力偶中任一力的大小与力偶臂的乘积 Fd , 称为力偶矩, 记作 $M(F, F')$, 或简记为 M 。

$$M(F, F') = M = \pm Fd \quad (1-3)$$

在平面问题中, 力偶矩为代数量, 并规定: 力偶转向为逆时针时, 其力偶矩为正; 反之为负。力偶矩的单位同力矩的单位。

力偶在任何坐标轴上的投影恒为零。力偶中两力对其作用面内任一点的矩的代数和恒等于力偶矩。读者可自行证明。

如果作用在刚体上的两个力偶的力偶矩的大小和转向完全相同, 则这两个力偶称为等效力偶。于是, 可以推知作用在刚体上的力偶有如下特性:

(1) 只要保持力偶矩的大小和转向不变, 力偶可在作用面内任意移动, 而不改变对刚体的作用效果;

(2) 在保持力偶矩大小和转向不变的条件下, 可以任意改变力偶中两力的大小和力偶臂长短, 而不改变对刚体的作用效果;

(3) 力偶可以移到与其作用面平行的平面内, 而不会改变对刚体的作用效果。

由上可知, 力偶也有三要素, 即力偶矩的大小、力偶的转向和力偶的作用面。因此, 可用旋转符号来表示力偶。如图 1-10, 旋转符号旁注明力偶矩的大小 M , 符号中的箭头即表示力偶的转向。

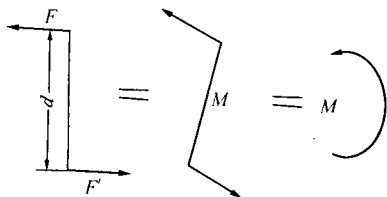


图 1-10 力偶矩

8. 力的平移

力的平移就是把作用在刚体上的一个力，从原位置平行移到该刚体上另一位置。

力线平移定理：作用在刚体上的力 F 可以平行移动到刚体上任一点，但同时必须附加一个力偶，其力偶矩等于原力 F 对新作用点的矩。即

$$M = M_0(F) = \pm Fd \quad (1-4)$$

1.1.3 约束和约束反力

凡能主动引起物体运动状态改变或使物体有运动状态改变趋势的力，称为主动力。例如物体所受的重力、风力等。工程中常把主动力称为载荷。

能在空间不受限制任意运动的物体称为自由体。如果物体受到某些条件的限制，在某些方向不能运动，则这种物体称为非自由体。限制非自由体运动的装置或设施称为约束。例如钢轨是火车的约束，支座是桥梁的约束，起重钢索是起重物的约束等。

由于约束阻碍了物体在某些方向的运动，受主动力作用的物体在其运动受阻方向就要对约束产生作用力。根据作用和反作用定律，约束就会对被约束物体产生反作用力，称为约束反力。约束反力的大小取决于主动力的作用情况，约束反力的方向则与它所阻碍的物体运动方向相反，而约束反力的作用点为物体与约束的接触点。常见的典型平面约束有以下几种。

1. 柔索约束

绳子、链条、皮带、钢丝等柔性物体，只能阻止物体沿柔索伸长方向的运动，而不能阻止其他任何方向的运动。所以柔索约束反力为沿着其中心线而背离物体的拉力，图 1-11 表示吊索对重物的反力 T 。

2. 理想光滑面约束

这种约束只能阻止物体沿接触点的公法线而趋向支承面的运动，而不限制物体离支承面以及沿其切线的运动。所以约束反力应通过接触点沿该点的公法线方向指向所研究物体，简称为法向压力，如图 1-12 中的 N 、 N_A 、 N_B 等。

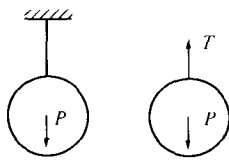


图 1-11 柔索约束

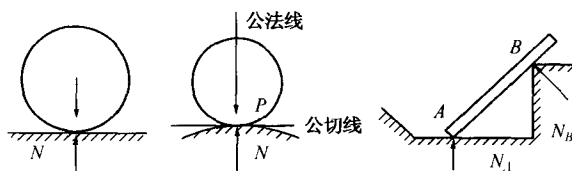


图 1-12 理想光滑面约束

3. 圆柱铰链约束

圆柱形铰链简称圆柱铰或中间铰。它是将两个物体各钻一个圆孔，中间用圆柱形销钉联接而成，如图 1-13 中的 C 铰。当忽略摩擦时，销钉只限制两构件间相对移动，而不限制相对转动。因此，圆柱铰链可以产生通过销钉中心、沿接触点公法线方向的约束反力。通常将其分解为沿水平和垂直方向的约束反力，用 X 、 Y 表示，如图 1-14 所示。

用圆柱铰将构件与底座连接起来，即构成铰支座，通常有固定铰支座和可动铰支座两种。

(1) 固定铰支座 底座固定在支承面上的铰支座称为固定铰支座，如图 1-15 中的 A 支座所示。图 1-16(a) 为固定铰支座的简图及反力表示法。

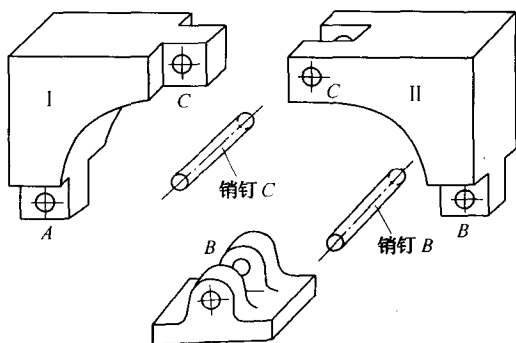


图 1-13 圆柱铰链约束

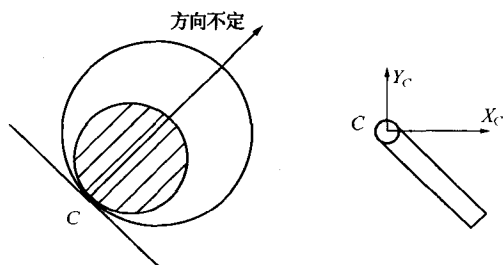


图 1-14 圆柱铰链约束反力

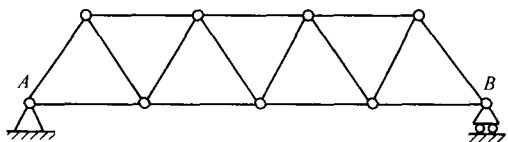


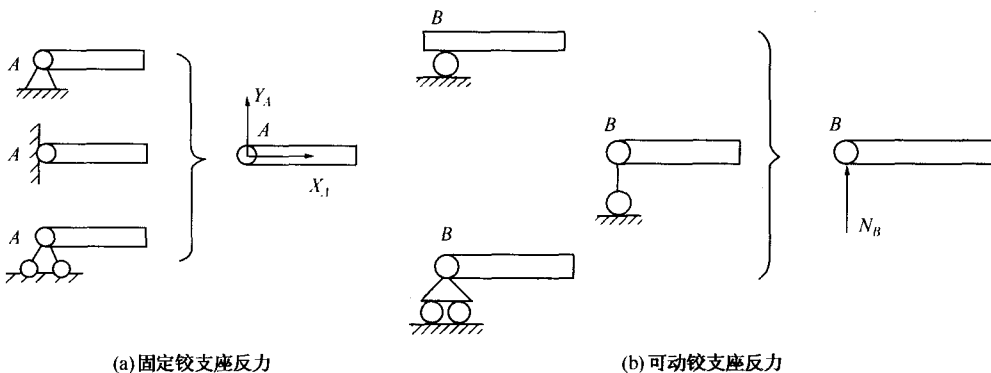
图 1-15 铰支座

(2) 可动铰支座 底座下面安放辊轴的铰支座称为可动铰支座, 如图 1-16 中的 B 支座所示。其特点是只能限制物体沿支承面法线方向的运动而不限制沿支承面的运动。所以约束反力的方向垂直于支承面。图 1-16(b) 为可动铰支座及反力的简图。

圆柱铰链在工程上应用很广。如径向轴承与轴的接触、连杆之间的连接、梁的支座等。

4. 固定端约束

物体的一部分固嵌于另一物体所构成的约束称为固定端约束。例如车床卡盘对工件的约束、基础对电线杆的约束、刀架对车刀的约束等都可以简化为固定端约束, 如图 1-17 所示。这种约束把物体牢牢固定, 既限制物体沿任意方向的移动, 又限制物体在约束处的转动。显然, 固定端的约束力有三个: 限制移动的反力 X_A 、 Y_A 与限制绕嵌入点转动的反力偶 m_A , 如图 1-18 所示。



(a) 固定铰支座反力

(b) 可动铰支座反力

图 1-16 铰支座反力

1.1.4 分离体和受力图

解决力学问题首先要选取研究对象。研究对象确定后, 就要对研究对象进行受力分析, 首先将研究对象从与其有联系的物体中分离出来, 使之成为自由体, 称之为分离体。然后将

所受的全部主动力和约束反力画在分离体上。表示分离体及其受力的图形称为受力图。画受力图是解决工程力学问题的一个重要步骤，对此应熟练掌握。下面通过例题说明受力图的画法。

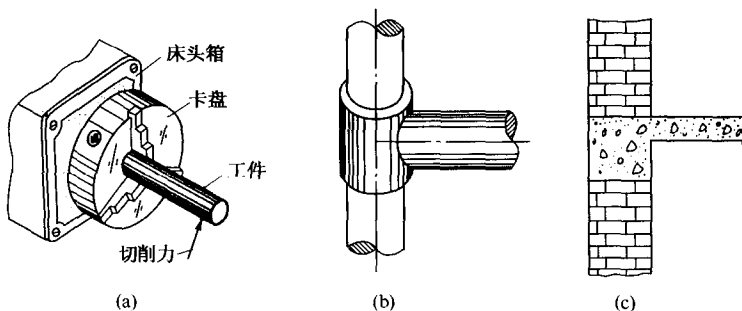


图 1-17 固定端约束

【例 1-1】 如图 1-19(a)所示，已知圆球重 P ，放置于光滑的墙和 AB 杆之间，不计 AB 杆和 BC 杆的自重，试分别画出圆球和 AB 杆的受力图。

解 取圆球为研究对象，图 1-19(b)，画主动力：有地球的引力 P 。画约束力：圆球与墙面和 AB 杆在接触处是光滑约束，故受墙面和 AB 杆的法向反力 N_1 和 N_2 作用，它们都沿着圆球上接触点的公法线而指向圆心。

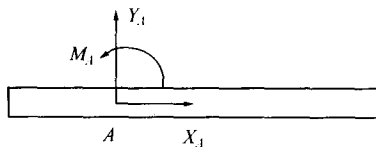


图 1-18 固定端约束反力

取 AB 杆为研究对象，图 1-19(c)，由于不计 AB 杆和 BC 杆的自重， BC 杆为二力杆，承受沿铰链中心 B 与 C 连线的压力作用，根据作用和反作用定律， AB 杆在 B 处受到 BC 杆给它的约束力 S_{BC} 的作用。 AB 杆与圆球在接触处是光滑约束，故在接触处受到圆球的法向反力 N_2 的作用。杆 AB 在 A 处受固定铰支座给它的约束力的作用，由于方向未知，可用两个大小未定的正交分力 X_A 和 Y_A 表示。

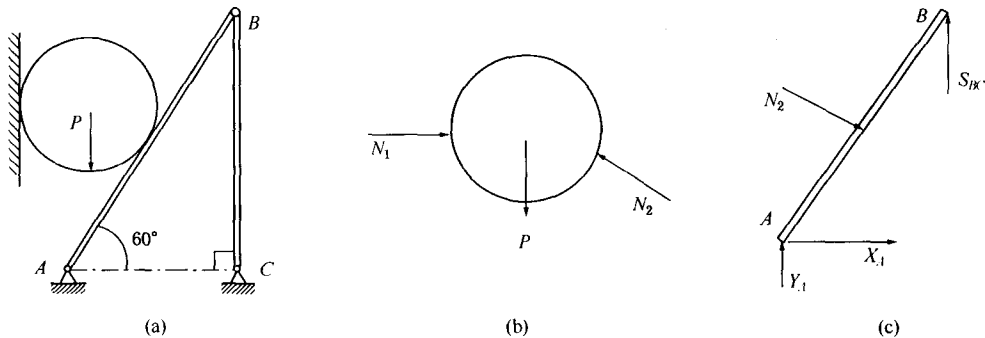


图 1-19 受力分析

下面将受力图的画法和注意事项概述如下：

- (1) 确定研究对象，解除约束，取分离体；
- (2) 先画作用在分离体上的全部主动力，再根据约束的性质在解除约束处画出约束

反力；

(3) 画物体系统中各物体的受力图时，要利用相邻物体间作用力和反作用力之间的关系。当作用力和反作用力其中的一个方向一经确定(或假定)，另一个亦随之确定。

1.1.5 平面力系的平衡方程

若力系中各力的作用线都处于同一平面内，它们既不汇交于一点，相互间也不全部平行，此力系即称为平面任意力系。物体在平面任意力系作用下处于平衡的解析条件是：所有各力在任选的直角坐标系中每一轴上投影的代数和等于零，以及各力对任一点力矩的代数和也等于零。即

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_0(F) = 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

上面三式即为平面任意力系的平衡方程，前两式为投影方程，说明力系对物体无任何方向的移动效应；第三式称为力矩方程，说明力系使物体绕任一点的转动效应为零。由于三个方程相互独立，故可用来求解三个未知量。

另外，平面任意力系的平衡方程还可采用其他形式，如二矩式

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum M_A(F) = 0 \\ \sum M_B(F) = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

其中矩心 A 、 B 连线不与 x 轴垂直。

由平面任意力系的平衡方程，可以推出几个平面特殊力系的平衡方程。

(1) 平面力系中所有力的作用线汇交于一点，称为平面汇交力系。若取各力的汇交点为力矩中心，则第三式力矩方程自然满足，平面汇交力系的平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

(2) 若平面力系中各力学量均为力偶，称该力系为平面力偶系。因为力偶不能简化为合力，则前两式投影方程自然满足，而第三式即为平面力偶系的平衡方程。

$$\sum M = 0 \quad (1-8)$$

(3) 若平面力系中所有力的作用线互相平行，则称该力系为平面平行力系。如果选择直角坐标轴时使其中一个与各力平行(如 y 轴)，则投影方程中的第一式自然满足，而后两式为平面平行力系的平衡方程，即

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum M_0(F) = 0 \end{cases} \quad (1-9)$$

从上面可以看到，平面汇交力系独立的平衡方程只有两个，只能求解两个未知量，平面力偶系的平衡方程只可求解一个未知量，而平面平行力系的平衡方程可求解两个未知量。

【例 1-2】图 1-20(a) 所示构架， $P = 1\text{kN}$ ， $AE = BE = CE = DE = 1\text{m}$ ，求固定端 A 处

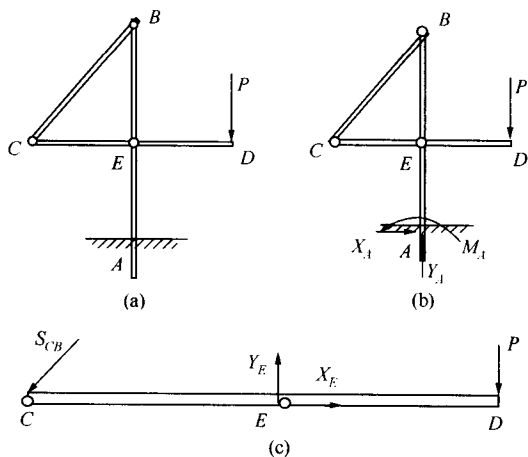


图 1-20 受力图

解得 $S_{CB} = 1.4141 \text{ kN}$

【例 1-3】如图 1-21 所示连续梁，已知 M 、 q 、 l ，求 A 、 B 、 C 三处的约束反力。

解 先取 BC 杆为研究对象，画受力图 1-22。

$$\sum F_x = 0, X_B = 0$$

$$\sum F_y = 0, Y_B + N_C - ql = 0$$

$$\sum M_B = 0, N_C l - ql^2/2 = 0$$

解得 $X_B = 0, Y_B = ql/2, N_C = ql/2$ 。

再取 AB 杆为研究对象，画受力图 1-23。

$$\sum F_x = 0, X_A - X_B = 0$$

$$\sum F_y = 0, Y_A - Y_B = 0$$

$$\sum M_A = 0, M_A + M - Y_B l = 0$$

解得 $X_A = 0, Y_A = ql/2, M_A = ql^2/2 - M$ 。

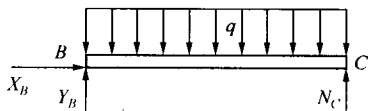


图 1-22 受力图

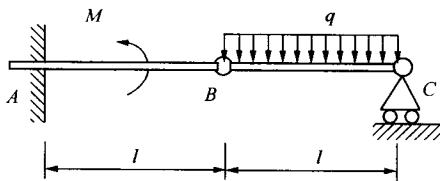


图 1-21 受力图

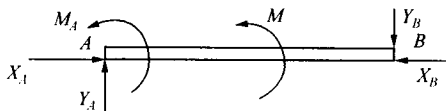


图 1-23 受力图

通过以上例子分析，可以得到求解物体平面问题的解题方法和步骤。

- (1) 确定研究对象，取分离体，画受力图。要注意刚体之间作用力和反作用力的关系。
- (2) 选取合适的坐标轴，列静力平衡方程。为便于计算，坐标轴的方位应尽量与较多的力平行或垂直；矩心尽量选在未知力作用线的交点上。
- (3) 解平衡方程，求出未知量。

的反力及 BC 杆的内力。

解 先取整体为研究对象，受力图如图 1-20(b)所示，列平衡方程

$$\sum F_x = 0, X_A = 0$$

$$\sum F_y = 0, X_A - P = 0$$

$$\sum M_A(F) = 0, M_A - P \times 1 = 0$$

解得

$$X_A = 0, Y_A = 1 \text{ kN}, M_A = 1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

BC 杆为二力杆，设其受压力作用。再取 CD 杆为研究对象，受力图如图 1-20(c)，以 E 点为矩心列力矩平衡方程

$$\sum M_E = 0, S_{CB} \times \sin 45^\circ \times 1 - P \times 1 = 0$$

1.2 应力与应变

1. 变形固体及其理想化假设

实际上,任何物体受力后都要发生变形。在静力学中从其研究任务出发,忽略了物体的变形,将研究对象视为刚体。而在材料力学中要研究构件的强度、刚度和稳定性,不能忽略

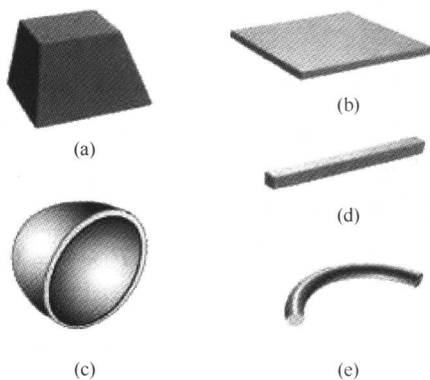


图 1-24 变形固体

物体的变形,将构件视为变形固体。变形固体按其几何形状分为块体[如图 1-24(a)所示]、板[见图 1-24(b)]、曲板或称壳体[见图 1-24(c)]以及杆件。轴线是直线的为直杆见图 1-24(d),是曲线的为曲杆见图 1-24(e),等截面的直杆为等直杆。

变形固体的性质是多方面的,在研究强度、刚度和稳定性时,忽略不计一些次要属性,即将变形固体理想化处理。

(1) 连续性假设 材料内部常存在砂眼、气孔等缺陷,组成物质的原子、分子间亦有空隙,因而介质是不连续的。但是,如果我们是从宏观角度来研究变形固体的力学性质,那么,就可以认为物质是没有空隙地充满整个体积,即变形固体是连续性介质。这样,就可以引入无穷小概念和微积分。

(2) 均匀性假设 材料总是包含着多种元素,例如,钢材由铁、碳等元素组成,不同元素或组分的性质是不同的,但是,从宏观角度认为是均匀性介质,即材料的性质各处都相同。

(3) 各向同性假设 各个方向上的力学性质均相同的材料称为各向同性材料;反之为各向异性材料。传统的金属材料由晶粒构成,就单一晶粒来说,不同方向上力学性质是不一样的。但金属材料中包含着许许多多晶粒,且又杂乱无章地排列,这样,从宏观意义上各个方向上性质都一样,为各向同性材料。

2. 外力

若载荷在其作用过程中,随着时间推移不发生变化或变化十分缓慢和微小,这样引起构件变形时各质点的加速度为零或小到可以忽略的程度,则称这样的载荷为静载荷。例如,重力、建筑物对地基的压力等都是静载荷。反之,若载荷在其作用过程中,随着时间推移发生明显变化,引起构件变形时各质点的加速度大到不能忽略程度,这样的载荷称为动载荷。譬如,锻锤对工件的打击力、内燃机气缸内的气体压力等都是动载荷。

材料在静载荷下和在动载荷下的性能颇不相同,分析方法也有差异。本篇主要研究静载荷问题。

3. 变形

变形固体在外力作用下发生变形。若载荷完全卸去后,变形能够消失,使构件又恢复到原来的形状和大小,称这种变形为弹性变形。反之,变形不能消失,被永远保留下来,称这种变形为塑性变形或残留变形。

实验表明,一般金属材料在一定受力限度内,力和变形成正比(线性)关系,这样的弹性

体称为线性弹性体, 简称线弹性体。

4. 应变

(1) 线应变

受力构件内各个点都受应力作用, 各个点处均要发生变形。构件各点或各部分的变形累积成构件整体变形。若要研究构件内某一点的变形, 可围绕该点取一个边长为无穷小的正六面体, 即单元体如图 1-25(a) 所示。

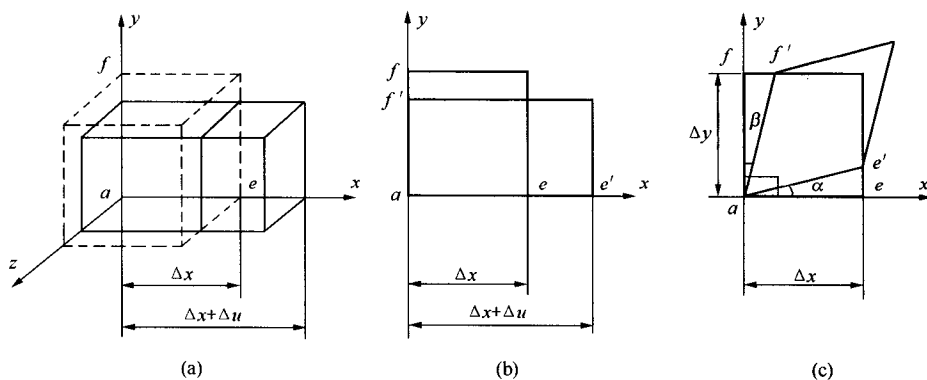


图 1-25 应变

为了描述该点处变形程度, 令

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (1-10)$$

称为该点在 x 方向的线应变或称为正应变。以伸长的线应变为正, 缩短的为负。

(2) 切应变

单元体除发生棱边长度改变的变形外, 还可能发生角度的改变, 即发生角变形, 如图 1-25(c) 所示。

$$\gamma_{xy} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} (\alpha + \beta) \quad (1-11)$$

称为该点在平面内的切应变或角应变, 并规定使直角减小时切应变为正, 反之为负。

综上所述, 通常情况下, 受力构件内某一点既有线应变又有切应变。线应变和切应变都没有量纲, 切应变用弧度表示。

5. 内力

(1) 内力的概念

内力是物体因受外力作用而变形, 其内部各部分之间因相对位置改变而引起的相互作用力。图 1-26(a) 所示杆件, 左端固定, 右端承受轴向拉伸载荷而发生伸长变形, 同时固定端处产生沿轴向方向的约束反力与之平衡, 见图 1-26(b)。若沿某一截面将杆件切开, 见图 1-26(c), 则在力作用下左右两部分就要分离, 固定端处也不会产生约束反力。在未切开而受拉时, 左右两部分不分离, 说明在截面上两部分间有相互作用力, 这个力完全由外力引起, 并随着外力改变而改变, 若超过了材料所能承受的极限值, 杆件就要在截面处断裂, 我们称此力为内力。内力反映了材料对外力有抗力, 并能将外力传递到其他地方。