

化工设备 设计基础

主编 谭蔚 主审 聂清德

CHEMICAL



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

化工设备设计基础

(第2版)

主编 谭 蔚
编者 陈 旭 许 莉
安 钢 于新奇
主审 聂清德



内容提要

本书根据国家和相关部委颁布的最新标准在《化工设备设计基础》第1版基础上修改、补充和完善而成。内容包括工程力学、化工设备材料、容器设计、塔设备、管壳式换热器和搅拌反应釜等6章。每章均安排了适量的例题,通过实例阐明各类化工设备设计的具体步骤和方法,各章后附有的练习题可供读者进一步复习和巩固相关知识使用。

本书可供各高等理工院校本科或专科化工类各专业及成人教育化工类专业作为教材使用,也是化工企业与科研院所工程技术人员的实用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工设备设计基础/谭蔚主编.陈旭,许莉编.—2版.

—天津:天津大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-5618-2427-6

I.化… II.①谭…②陈…③许… III.化工设备—设计

IV.TQ050.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 028223 号

出版发行 天津大学出版社
出版人 杨 欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
短信网址 发送“天大”至 916088
印 刷 河北省昌黎县第一印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 210mm×297mm
印 张 14.25
字 数 483 千
版 次 2007 年 3 月第 2 版
印 次 2007 年 3 月第 1 次
印 数 1-4 000
定 价 25.00 元

再版前言

《化工设备设计基础》自2000年10月出版以来,深受高校师生和工程技术人员欢迎,并曾多次印刷。随着科学技术的发展和化工装置设备的大型化,化工设备在材料和结构等方面都在不断地改进与提高。为此,本书根据最新国家标准规范,对第1版的《化工设备设计基础》进行了修订与增补。

本次修订和增补的内容主要有:

(1)根据国家或部委的最新标准对材料、容器设计等相关内容进行了更新与修订;

(2)在换热器中增加了管壳式废热锅炉和列管式石墨换热器;

(3)在反应器部分修改了夹套的结构型式和搅拌器的选型;

(4)增加了搅拌釜内的流型内容介绍。

本次修订与增补的编写情况是:第一章由天津大学陈旭、许莉编写,第二、第三、第四章由天津大学谭蔚编写,第五章由天津理工大学安钢编写,第六章由河北科技大学于新奇编写。附录由天津大学谭蔚编写。全书由天津大学聂清德教授主审。

本书适合于高等理工院校本科或专科化工类各专业及成人教育化工类专业作为教材使用,也是化工类企业与科研院所专业人员的实用参考书。

由于编者水平有限,书中如有不完善或欠妥之处,衷心希望读者予以指正。

编者

2006年12月

前 言

化工容器与设备是化工、石油、轻工、冶金等生产中的重要生产装置。它的设计包括工艺设计和机械设计两部分。工艺计算是根据设计任务提供的原始数据和生产工艺要求确定设备的主要尺寸;机械设计是根据工艺尺寸设计容器与设备的结构、选择结构材料及进行强度、刚度和稳定性计算,给出设备与零部件的施工图。虽然我国化工类专业人员主要是进行工艺设计,但工艺与设备联系紧密,因此也经常会遇到许多机械设计问题。这就要求必须加强和提高化工类专业人员的机械知识和设计能力。

根据面向 21 世纪化工类专业的教学要求,本书包括工程力学、化工设备材料、容器设计等机械设计基础知识,并以塔设备、换热器及反应器为例,阐明基本结构、材料选择及设计计算方法。书中涉及的材料、计算方法及结构设计尽量与现行国家标准和部委标准一致,编写中注重加强工程概念,采用法定计量单位。

本书共分 6 章。第一章工程力学,重点介绍拉伸、剪切、弯曲和扭转等基本概念与计算;第二章化工设备材料,包括常用的碳钢、合金钢及特殊性能钢、有色金属材料、低温用钢、非金属材料、化工材料防腐等内容;第三章容器设计,在阐明基本概念基础上,根据现行的国家标准介绍零部件的设计计算方法;第四章塔设备,重点对板式塔和填料塔的结构进行分析与讨论,阐明塔设备的强度计算方法;第五章管壳式换热器,主要介绍管壳式换热器的结构与零部件尺寸的决定方法,以及特殊工况用的换热器及换热器强化传热的内容;第六章搅拌反应釜,在介绍釜体结构之后,还对搅拌装置与传热装置、传动装置以及轴封装置进行了重点阐述。

本书第一章由天津大学陈旭编写,第二、三章由天津大学谭蔚编写,第四章由天津大学谭蔚、河北科技大学翟建华编写,第五章由天津理工大学安钢编写,第六章由河北科技大学于新奇编写,附录由天津大学谭蔚编写。全书由天津大学聂清德教授主审。

由于编者水平有限,书中如有错误或欠妥之处,衷心希望读者予以指正。

编者

2000 - 04

目 录

第一章 工程力学	(1)
第一节 物体的受力分析及其平衡条件	(1)
第二节 直杆的拉伸和压缩	(11)
第三节 直梁的弯曲	(21)
第四节 剪切	(35)
第五节 圆轴的扭转	(37)
第六节 压杆稳定	(45)
习题	(48)
参考文献	(52)
第二章 化工设备材料	(53)
第一节 概述	(53)
第二节 材料的性能	(53)
第三节 碳钢与铸铁	(56)
第四节 合金钢	(61)
第五节 有色金属材料	(65)
第六节 非金属材料	(66)
第七节 化工设备的腐蚀及防腐措施	(69)
第八节 化工设备材料选择	(73)
习题	(74)
参考文献	(75)
第三章 容器设计	(76)
第一节 概述	(76)
第二节 内压薄壁容器设计	(82)
第三节 外压圆筒设计	(89)
第四节 封头的设计	(100)
第五节 法兰连接	(109)
第六节 容器支座	(117)
第七节 容器的开孔与附件	(122)
第八节 容器设计举例	(126)
习题	(129)
参考文献	(130)
第四章 塔设备	(131)
第一节 概述	(131)
第二节 板式塔及其结构设计	(131)
第三节 填料塔及其结构设计	(137)
第四节 其他结构设计	(141)
第五节 塔体和裙座的强度计算	(143)
习题	(154)
参考文献	(154)
第五章 管壳式换热器	(155)

第一节	概述	(155)
第二节	管壳式换热器的结构形式	(155)
第三节	管壳式换热器的构件	(159)
第四节	管壳式换热器的温差应力计算	(175)
第五节	管壳式换热器设计的有关标准	(180)
第六节	用于特殊工况的管壳式换热器	(182)
第七节	管壳式换热器的强化传热	(186)
	习题	(188)
	参考文献	(189)
第六章	搅拌反应釜	(190)
第一节	概述	(190)
第二节	釜体与传热装置	(191)
第三节	反应釜的搅拌装置	(196)
第四节	传动装置	(201)
第五节	轴封装置	(204)
	习题	(207)
	参考文献	(207)
附录		(208)
附表 1	钢板许用应力	(208)
附表 2	钢管许用应力	(210)
附表 3	锻件许用应力	(212)
附表 4	筒体的容积、面积及质量(钢制)	(214)
附表 5	以内径为公称直径的椭圆形封头的尺寸、内表面积和容积(JB/T4337—95)	(215)
附表 6	以内径为公称直径的碳素钢、普通低合金钢、复合钢板制椭圆形封头的质量	(217)
附表 7	无缝钢管的尺寸范围及常用系列	(218)
附表 8	法兰垫片宽度	(219)
附表 9	长颈法兰的最大允许工作压力	(220)

第一章 工程力学

生产中使用的任何机器或设备的构件应该满足适用、安全和经济 3 个基本要求。经验和实验表明,任何机器或设备在工作时都要受到各种各样的外力作用,而机器或设备的构件在外力作用下都要产生一定程度的变形。如果构件材料选择不当或尺寸设计不合理,则在外力作用下是不安全的。当外力达到某一定值时,构件可能产生过大变形,也可能突然失去原来的形状,使设备不能正常工作;也可能使构件发生破坏,从而使整个设备毁坏。因此,为了使机器或设备能安全正常工作,在设计时必须使构件满足三方面要求:①要有足够强度,以保证构件在外力作用下不致破坏;②要有足够刚度,以保证构件在外力作用下不致发生过大的变形;③要有足够稳定性,以保证构件在外力作用下不致突然失去原来的形状。

工程力学的任务就是研究构件在外力作用下的变形和破坏规律,为设计构件选择适当的材料和尺寸,以达到强度、刚度和稳定性要求,使设备满足适用、安全和经济的原则,而提供必要的基础理论知识。本章的主要内容可以归纳为两方面:①研究构件受力的情况,进行受力大小的计算;②研究材料的力学性能和构件的受力变形与破坏规律,进行构件强度、刚度或稳定性计算。

化工机械设备构件,既有杆件,也有平板和回转壳体。杆件的变形与应力分析较简单,但它是分析平板与回转壳体的基础,所以作为力学问题中的基础内容。本章将讨论等截面直杆的应力分析、强度计算与变形计算,以便为平板、回转壳体及传动零件的强度计算准备必要的理论基础。

第一节 物体的受力分析及其平衡条件

一、力的概念和基本性质

(一)力的概念

人们对于力的感性认识最初是从推、拉、举、掷等肌肉活动中得来的。例如推小车时,手臂上的肌肉紧张,有用力的感觉,同时还观察到小车由静止变为运动的速度由慢变快,或者使运动的方向有了改变。又如用手拉一根弹簧时,手臂的肌肉也有用力的感觉,还会看到弹簧伸长产生变形。进一步的实践又观察到不仅人对物体能有这样的作用,物体对物体也能产生这种作用。如在弹簧上挂一重锤,同样会使弹簧伸长。归纳各种受力的例子发现:物体与物体间的相互作用既会引起物体运动状态的改变,也会引起物体的变形,其程度与物体间相互作用的强弱有关。人们为了度量上述物体间相互作用所产生的效果,就把这种物体间的相互作用称为力。

由此可见,力是通过物体间相互作用所产生的效果体现出来的。因此,我们认识力、分析力、研究力都应该着眼于力的作用效果。上边谈到的力使物体运动状态发生改变的现象,称为是力的外效应;而力使物体发生变形的作用,则被称为是力的内效应。

单个力作用于物体时,既会引起物体运动状态改变,又会引起物体变形。两个或两个以上的力作用于同一物体时,则有可能不改变物体的运动状态而只引起物体变形。当出现这种情况时,称物体处于平衡状态。这表明作用于该物体上的几个力的外效应彼此抵消。

力作用于物体时,总会引起物体变形。但在正常情况下,工程用的构件在力的作用下变形都很小。这种微小的变形对力的外效应影响也很小,可以忽略。这样,在讨论力的外效应时,就可以把实际变形的物体看成是不发生变形的刚体。所以,当称物体为刚体时,就意味着不去考虑力对它的内效应。本节研究的对象都是刚体,讨论的是力的外效应。

对力的概念的理解应注意两点:①力是物体之间的相互作用,离开了物体,力是不能存在的;②力既然是物体之间的相互作用,可见,力总是成对地出现于物体之间。相互作用的方式可以是直接接触,如人推小车;也可以不直接接触而相互吸引或排斥,如地球对物体的引力(即重力)。因此,在分析力时,必须明确以哪一个物体为研究对象,分析其他物体对该物体的作用。

实践证明,对物体作用的效果取决于 3 个要素:①力的大小;②力的方向;③力的作用点。其中任何一个有

了改变,力的作用效果也必然改变。力的大小表明物体间机械作用的强弱程度。

力有集中力和分布力之分。按照国际单位制,集中力的单位用“牛顿”(N),“千牛顿”(kN);分布力的单位是“牛顿/米²”(N/m²),又称帕斯卡(Pa)和兆帕斯卡(MPa)。MPa 相当于 N/mm²。

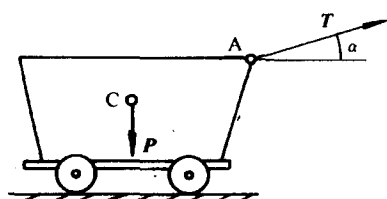


图 1-1 小车受力图

力是具有大小和方向的物理量,这种量叫做矢量,与常见的仅用数量大小就可以表达的物理量如体积、温度、时间等不同。只有大小而无方向的量叫做标量。矢量用黑体斜体字母或字母上加一横表示,例如 $\mathbf{F}$ 或 $\vec{F}$ 表示力。在图示中通常用带箭头的线段来表示力。线段的长度表示力的大小,箭头所指的方向表示力的方向,线段的起点或终点画在力的作用点上,如图 1-1 中作用在小车上的重力 P 与拉力 T 。

(二)力的基本性质

1. 作用与反作用定律

物体间的作用是相互的,作用与反作用定律反映了两个物体之间相互作用力的客观规律。如图 1-2 所示,起吊重物时,重物对钢丝绳的作用力 P 与绳对重物的反作用力 T 同时产生,且大小相等、方向相反,作用在同一条直线上。力既然是两个物体之间的相互作用,所以就两个物体而言,作用力与反作用力必然永远是同时产生,同时消失,而且一旦产生,它们的大小必相等,方向必相反,而作用线必相同。这就是力的作用与反作用定律。成对出现的这两个力分别作用在两个物体上,因而它们对各自物体的作用效应不能相互抵消。

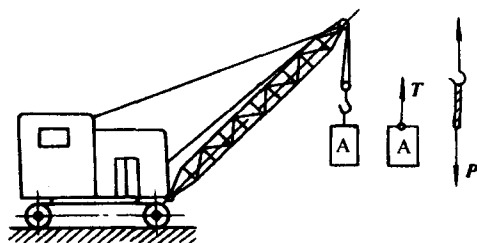


图 1-2 起吊重物受力图

2. 二力平衡定律

任何事物的运动都是绝对的,静止是相对的、暂时的、有条件的。在力学分析中,把物体相对于地球表面处于静止或匀速直线运动的状态称为平衡状态。当物体上只作用有两个外力而处于平衡时,这两个外力一定是大小相等、方向相反,并且作用在同一直线上。

仍以起吊重物为例,重物 A 受两个力作用,向下的重力 P 和向上的拉力 T ,它们方向相反,沿同一直线,如图 1-3 所示。当物体停止在半空中或作匀速直线运动时,这时物体处于平衡,即 $T = P$ 。由此可知,作用于同一物体上的两个力处于平衡时,这两个力总是大小相等、方向相反,并且作用在同一直线上。这就是二力平衡定律。

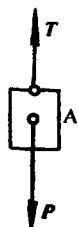


图 1-3
起吊重物
受力分析

应当注意,在分析物体受力时,不要把二力平衡同作用与反作用混淆,前者是同一物体上的两个力的作用;后者是分别作用于两个物体上的两个力,它们的效果不能互相抵消。

3. 力的平行四边形法则

力的平行四边形法则反映同一物体上力的合成与分解的基本规则。作用在同一物体上的相交的两个力,可以合成为一个合力。合力的大小和方向可以由这两个力的大小为边长所构成的平行四边形的对角线表示,作用线通过交点,这个规则叫做力的平行四边形法则。

如图 1-4 所示,作用于物体上 A 点的两个力 F_1 与 F_2 的合力为 R 。按照平行四边形法则进行合成的方法叫做矢量加法,写作

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

从力的平行四边形法则中不难看出,一般情况下,合力的大小不等于两个分力大小的代数和。它可以大于分力,也可以小于分力,有时合力还可以等于零。

作用于同一物体上的若干个力叫做力系。力系中各个力的作用线汇交于一点的叫做汇交力系。对于汇交力系求合力,平行四边形法则依然适用,只要依次两两合成就可以求得最后合力 R 。现假设作用于某物体 A 点上有 3 个力 F_1 、 F_2 与 F_3 ,可以先求得 F_1 与 F_2 的合力 R_1 ,然后再将 R_1 与 F_3 合成为合力 R ,如图 1-5。

力不但可以合成,根据实际问题的需要还可以把一个力分解为两个分力。分解的方法仍是应用力的平行

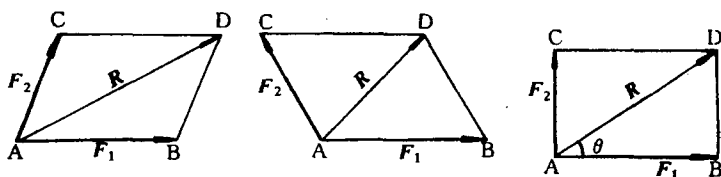


图 1-4 力的平行四边形法则

四边形法则。例如搁置在斜面上的重物,它的重力 P 就可以分解为与斜面平行的下滑力 P_x ,与斜面垂直的正压力 P_y ,如图 1-6。正是这个下滑力 P_x 使得物体有向下滑动的趋势。

对于多个力的合成,用矢量加法作图求解不很方便。如果应用力在直角坐标轴上投影的方法,将矢量运算转化为代数运算,则可较方便地求出合成的结果。下面介绍力在直角坐标轴上的投影,即解析法。

图 1-7 表示物体上 A 点受 F 力的作用, Oxy 是任意选取的直角坐标系。设力 F 与 x 轴的正向夹角为 α 。由图可以看出,力 F 在 x 轴与 y 轴上的投影分别为:

$$F_x = F \cos \alpha, F_y = F \sin \alpha \quad (1-2)$$

力在 x 轴上的投影等于力的大小乘以力与投影轴所夹锐角的余弦,如果投影的方向与坐标轴的正向相同,投影为正;反之则为负。力的投影是代数量。显然,当 $\alpha = 0^\circ$ 或 180° 时,力 F 与 x 轴平行,则力 F 在 x 轴上的投影 $F_x = F$ 或 $-F$;当 $\alpha = 90^\circ$ 时,力 F 与 x 轴垂直, $F_x = 0$ 。

设物体上某点 A 受两个力 F_1 、 F_2 作用,如图 1-8。为了求它的合力,可以先分别求出它们在某一坐标轴上的投影,然后代数相加,就可以得到合力在坐标轴上的投影:

$$\begin{aligned} R_x &= \sum F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 \\ R_y &= \sum F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (1-3)$$

合力在某一坐标轴上的投影等于所有分力在同一坐标轴上投影的代数和。这个规律叫做合力的投影定理,对于多个力的合成仍然适用,有了合力在坐标轴上的投影,就不难求出合力的大小和方向:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{R_y}{R_x} = \frac{|\sum F_y|}{|\sum F_x|} \end{aligned} \quad (1-4)$$

二、力矩与力偶

(一) 力矩的概念

在生产实践中,人们利用了各式各样的杠杆,如撬动重物的撬杠、称东西的秤等。这些不同的杠杆都利用了力矩的作用。由实践经验知道,用扳手拧螺母时,扳手和螺母一起绕螺栓的中心线转动。因此,力使物体转动的效果,不仅取决于力的大小,而且与力的作用线到 O 点的距离 d 有关,如图 1-9 所示。

这样,就有了力矩定义:力对 O 点的矩是力使物体产生绕 O 点转动的效应度量。它可以用一个代数量表示,其绝对值等于力矢的模与力臂的乘积,它的正负分别表示该力矩使物体产生的逆时针和顺时针的两种转向。 O 点叫做力矩中心;力的作用线到 O 点的垂直距离 d 叫做力臂;力臂和力的乘积叫做力对 O 点的力矩。可以表示为:

$$M_O(F) = \pm F \cdot d \quad (1-5)$$

式中正负号表示力矩转动的方向,一般规定:逆时针转动的力矩取正号;顺时针转动的力矩取负号。力矩的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

显然,力的大小等于零,或力的作用线通过力矩中心(力臂等于零),则力矩为零。这时不能使物体绕 O 点转动。如果物体上有若干个力,当这些力对力矩中心的力矩代数和等于零,即

$$\sum M_O(F) = 0$$

时,原来静止的物体,就不会绕力矩中心转动。

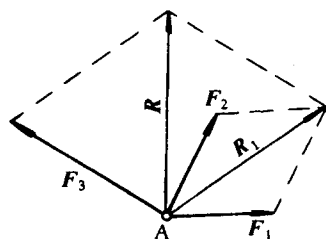


图 1-5 力的合成

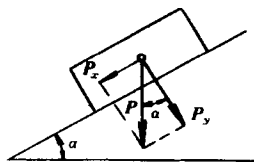


图 1-6 力的分解

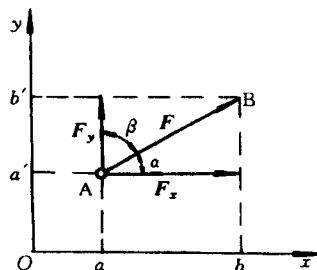


图 1-7 力的投影

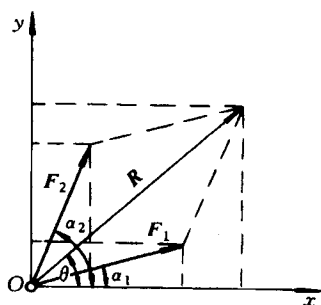


图 1-8 两力的合成

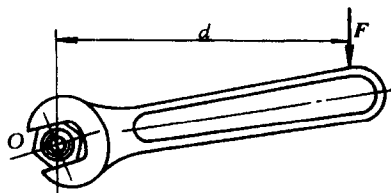


图 1-9 力矩示意图

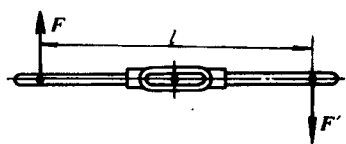


图 1-10 力偶示意图

(二) 力偶

力偶就是受到大小相等、方向相反、互相平行的两个力的作用时,它对物体产生的纯转动效应(即不需要固定转轴或支点等辅助条件)。例如,用丝锥攻螺纹(图 1-10)、用手指旋开水龙头等都是常见的力偶实例。力偶记为 (F, F') 。力偶中二力之间相距的垂直距离(图 1-10 中 l)称为力偶臂。力偶对物体产生的转动效应应该用构成力偶的两个力对力偶作用平面内任一点之矩的代数和来度量,人们称这两个力对某点之矩的代数和为力偶矩。

所以力偶矩是力偶对物体转动效应的度量。若用 $m(F, F')$ 表示力偶 (F, F') 的力偶矩,则有

$$m = \pm F \cdot l \quad (1-6)$$

力偶矩和力矩一样,也可以用一个代数量表示,其数值等于力偶中一力的大小与力偶臂的乘积,正负号则分别表示力偶的两种相反转向,若规定逆时针转向为正,则顺时针为负。这是人为规定的,做与上述相反的规定也可以。

力偶具有以下 3 个主要性质。

(1) 只要保持力偶矩的大小及其转向不变,力偶的位置可以在其作用平面内任意移动或转动(图 1-11(a)、(b)),还可以任意改变力的大小和臂的长短(图 1-11(c)),而不会影响该力偶对刚体的效应。基于力偶的这一性质,当物体受力偶作用时,图中可不必像图 1-11(c)那样画出力偶中力的大小及作用线位置,只需用箭头示出力偶的转向,并注明力偶矩的简写符号 m 即可,如图 1-11(d)所示。

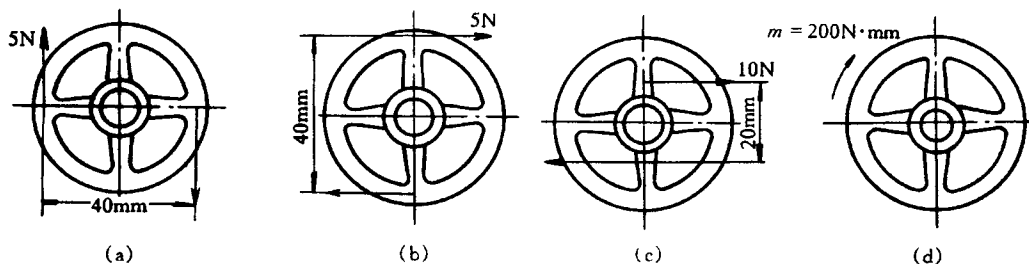


图 1-11 力偶性质示意图

(a)受力图之一;(b)受力图之二;(c)受力图之三;(d)受力图之四

(2) 组成力偶的两个力既不平衡,也不能合成为一个合力。因此,力偶的作用不能用一个力代替,只能用力偶矩相同的力偶代替;力偶只能用力偶平衡。

(3) 组成力偶的两个力对作用面内任意点的力矩之和等于力偶矩本身。因此,力偶也可以合成。在同一平面内有两个以上力偶同时作用时,合力偶矩等于各分力偶矩的代数和,即 $M = \sum m$ 。如果静止的物体不发生转动,则力偶矩的代数和为零,即 $\sum m = 0$ 。

(三) 力的平移

前边曾提到力和力偶都是基本物理量,在力与力偶之间不能互相等效代替,也不能相互抵消各自的效应。但是这并不是说力与力偶之间没有联系。下面要讨论力的平移定理,正是要揭示这种联系。

力的平移方法可用来分析力对物体作用的效果。图 1-12 为侧面附有悬挂件的蒸馏塔,悬挂件的总重量为 Q ,与主塔中心线间有一偏心距 e , Q 力对主塔支座所起的作用效果可用力的平移方法来分析。为此在主塔中心线上加上 2 个力 Q' 与 Q'' ,使它们大小相等,并令 $Q' = Q'' = Q$, Q' 与 Q'' 方向相反,与 Q 互相平行。不难看出 Q' 与 Q'' 符合二力平衡条件。从整体而言,加上这 2 个力后,由 Q 、 Q' 与 Q'' 3 个力组成的力系的作用与 Q 力单独作用效果相等。但从另一角度分析,可以看成是把 Q 力平移了 1 个偏心距 e 成为 Q' ,与此同时附加了 1 个力偶 (Q, Q'') ,其力偶矩 m 的大小等于 $Q \cdot e$ 。因此,有偏心距的力 Q 对支座的作用,相当 1 个力 Q' 和 1 个力偶矩 m 的共同作用,力

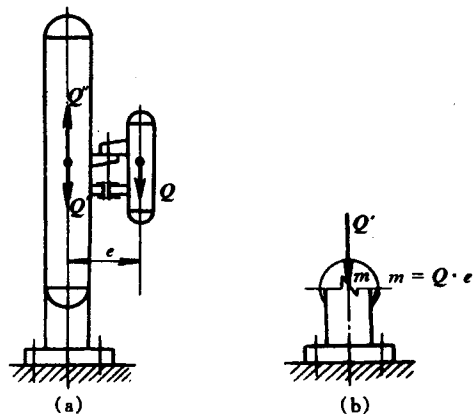


图 1-12 力的平移

(a)结构图;(b)受力图

Q' 压向支座, 力偶矩 m 使塔体弯曲, 支座承受了压缩和弯曲的联合作用。

可以从“等效代替”的观点理解力的平移定理: 虽然力与力偶都是基本物理量, 这二者不能相互等效代替, 但是一个力却可以用一个与之平行且相等的力和一个附加力偶来等效代替。反之, 一个力和一个力偶也可以用另一个力来等效代替。

三、物体的受力分析及受力图

物体的受力分析, 就是具体分析某一物体上受到哪些力的作用, 这些力的大小、方向、位置如何? 只有在对物体进行正确的受力分析后, 才有可能根据平衡条件由已知外力求出未知外力, 从而为进行设备零部件的强度、刚度等设计和校核打下基础。

已知外力主要指作用在物体上的主动力, 按其作用方式有体积力和表面力两种。体积力是连续分布在物体内各点处的力, 如均质物体的重力, 单位是 N/m^3 或 kN/m^3 ; 表面力常是在接触面上连续分布的力, 如内压容器的压力和塔器表面承受的风压等, 单位是 N/m^2 或 kN/m^2 ; 如果被研究物体的横向尺寸远远小于长度尺寸, 则度量其体积力和表面力大小均用线分布力表示, 单位是 N/m 或 kN/m 。两个直接接触的物体在很小的接触面上互相作用的分布力, 可以简化为作用在一点上的集中力, 如化工管道对托架的作用力, 单位是 kN 或 N 。

未知外力主要指约束反力。如何分析约束反力是本节讨论的重点。

(一) 约束和约束反力

如果物体只受主动力作用, 而且能够在空间沿任何方向完全自由地运动, 则称该物体为自由体。如果物体的运动在某些方向上受到了限制而不能完全自由地运动, 那么该物体就称为非自由体。限制非自由体运动的物体叫约束。例如轴只能在轴承孔内转动, 不能沿轴孔径向移动, 于是轴就是非自由体, 而轴承就是轴的约束。塔设备被地脚螺栓固定在基础上, 任何方向都不能移动, 地脚螺栓就是塔的约束; 重物被吊索限制使其不能掉下来, 吊索就是重物的约束, 等等。可以看到, 无论是轴承、基础, 还是吊索, 它们的共同特点是直接和物体接触, 并限制物体在某些方向的运动。

当非自由体的运动受到它的“约束”限制时, 在非自由体与其约束之间就要产生相互作用的力, 这时约束作用于非自由体上的力就称为该约束的约束反力。当一个非自由体同时受到几个约束作用时, 那么该非自由体就会同时受到几个约束反力作用。如果这个非自由体处于平衡, 那么这几个约束反力对该非自由体所产生的联合效应必正好抵消主动力对该物体所产生的外效应。所以约束反力的方向, 必定与该约束限制的运动方向相反。应用这个原则, 可以确定约束反力的方向或作用线的位置。至于约束反力的大小, 则需要用平衡条件求出。

工程中的各种约束, 可以归纳为以下几种基本形式。

1. 柔性体约束

这类约束由柔性物体如绳索、链条、皮带、钢丝绳等构成。这种约束的特点是: ①只有当绳索被拉直时才能起到约束作用; ②这种约束只能阻止非自由体沿绳索伸直的方向朝外运动, 而限制不了非自由体在其他方向的运动。所以, 代替这种约束的约束反力的作用线应和绳索伸直时的中心线重合, 指向应该是离开非自由体朝外。例如图 1-13 中的均质杆, 若将两根限制它运动的绳子用约束反力表示, 则两个约束反力 T_A 和 T_B 的力线方向应与绳子的中心线重合。图 1-13(b) 是以约束反力表示均质杆的受力图。从受力图可清晰看出, 均质杆在重力 G 、绳索约束反力 T_A 和 T_B 这 3 个外力的作用下处于平衡。其中 G 是已知力。图 1-14 是另一个柔性体约束实例, 图 1-14(b) 是被起吊设备的受力图, 读者可自行分析。

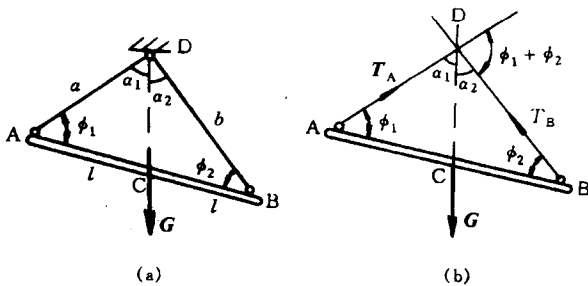


图 1-13 柔性体约束示意图
(a) 结构图; (b) 受力图

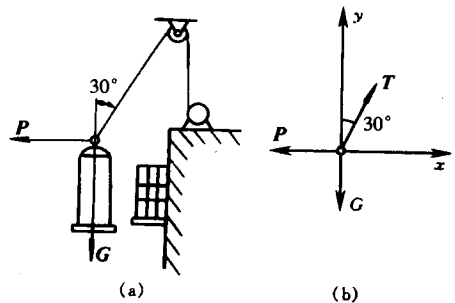


图 1-14 柔性体约束示意图
(a) 结构图; (b) 受力图

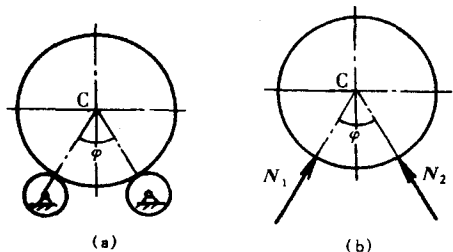


图 1-15 光滑接触面约束

(a)结构图;(b)受力图

2. 光滑接触面约束

这类约束是由光滑支撑面如滑槽、导轨等构成。支撑面与被约束物体间的摩擦力很小,可以略去不计。它的特点是只能限制约束物体沿接触面公法线方向向着支撑面内的运动。因此这种约束的约束反力方向是沿着接触面的公法线方向指向被约束物体。如图 1-15 为托轮对滚筒的约束反力 N_1 、 N_2 , 图 1-16 为滑块所受的滑槽的约束反力 N 沿滑槽的法线方向。

3. 铰链约束

圆柱形铰链约束是由两个端部带有圆孔的构件用一销钉连接

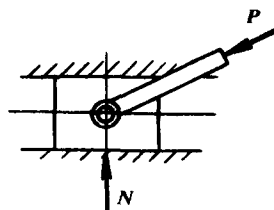


图 1-16 光滑接触面约束

而成的,如图 1-17。常见的有下列两种。

1) 固定铰链支座约束

图 1-18(a)由固定支座 1 和杆 2 并用销钉 3 连接而成。它的特点是被约束物体只能绕销钉的轴线转动,而不能上下左右移动。约束反力的方向随主动力的变化而变化,通过铰链中心,可以用它的两个分力 N_x 与 N_y 表示,如图 1-18(b)。

在机械传动中,轴承对轴的约束作用,也可以简化为固定铰链约束。图 1-19(a)为滑动轴承简图。轴在轴承中可以转动,摩擦力不计。轴承对轴的约束反

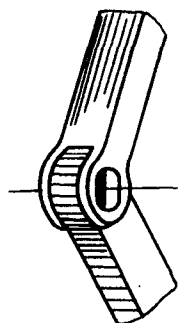


图 1-17 圆柱形铰链约束

力 N 应通过转轴中心,但方向不定,用两个分力 N_x 与 N_y 表示;如图 1-19(b)。只能承受径向载荷的向心球轴承和向心滚子轴承的约束反力,可以用垂直于转轴的平面内的两个分力 N_x 与 N_y 表示,如图 1-20(a)与(b)。

化工厂中立式容器上用的吊柱,是用支撑板 A 和球面支撑托架 B 支撑的,吊柱可借转杆转动,如图 1-21(a),支撑板圆孔对吊柱的作用可简化为颈轴承;球面支撑托架可简化为止推轴承,对吊柱的约束反力分析如图 1-21(b)所示。

2) 活动铰链支座约束

如图 1-22(a),支座下面有几个圆柱形滚子,支座可以沿支撑面滚动。桥梁、屋架上经常采用这种活动铰链支座,当温度变化引起桥梁伸长或缩短时,允许两支座的间距有微小变化。又如化工厂的卧式容器的鞍式支座,左端是固定的,右端是可以活动的,如图 1-22(b),也可以简化为活动铰链支座。这类支座的特点是只限制被约束物体沿垂直支撑面方向的运动,因此约束反力的方向必垂直于支撑面,并通过铰链中心。活动铰链支座简图如图 1-22(c)。

4. 固定端约束

固定端约束的特点是限制被约束物体既不能移动,又不能转动,被约束的一端完全固定。如塔器的基础对塔底座是固定端约束。其约束反力除有 N_x 与 N_y 外,还应有阻止塔体倾倒的力偶矩 m ,如图 1-23;悬管式管道托架,一端插入墙内,另一端为自由端,墙对托架也起到固定端约束的作用,如图 1-24。固定端约束反力由力与力偶组成,前者阻止被约束物体移动,后者阻止转动。

(二) 受力图

为了清晰地分析与表示构件的受力情况,需要将研究的构件(研究对象)从与它发生联系的周围物体中分离出来,把作用于其上的全部外力(包括已知的主动力和未知的约束反力)都表示出来。这样做成的表示物体受力情况的简图称为受力图。

正确地画出受力图,是进行力学计算的重要前提。下面通过一些实例来说明画受力图的方法。

例 1-1 某化工厂的卧式容器如图 1-25(a)所示,容器总重量(包括物料、保温层等)为 Q ,全长为 L ,支座 B 采用固定式鞍座,支座 C 采用活动式鞍座。试画出容器的受力图。

解:首先将容器简化成结构简图,为一外伸梁。根据鞍座的结构,B 端简化为固定铰链支座,C 端为活动铰

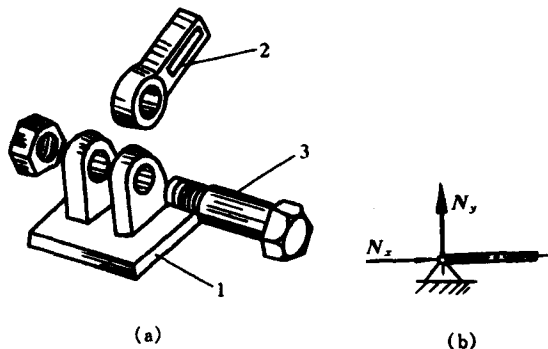


图 1-18 固定铰链支座约束

(a)结构图;(b)受力图

链支座。再以整个容器为研究对象,已知的主动力为总重 Q ,沿梁的全长均匀分布,因而梁上受均布载荷 $q(q = Q/L)$;按照约束的特性,画出支座反力 N_B 与 N_C ,图 1-25(b)就是容器的受力图。

例 1-2 图 1-26(a)为焊接在钢柱上的三角形钢结构管道支架,上面铺设 3 根管道,试画出结构整体及各构件的受力图。

解:首先对三角形管道支架的结构进行简化。当连接处的焊缝相对于构件长度很短时,受载荷后,连接处有一定变形,可以近似地看成铰链连接,而不看成是固定端约束。画出来的结构简图如图 1-26(b)。

BC 杆作为研究对象,当自重相对很小可不计,BC 杆只在 B、C 两

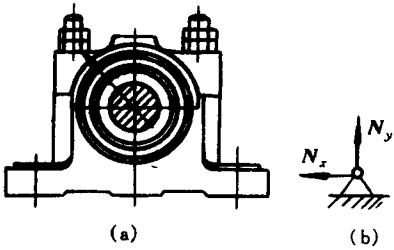


图 1-19 滑动轴承
(a)结构图;(b)受力图

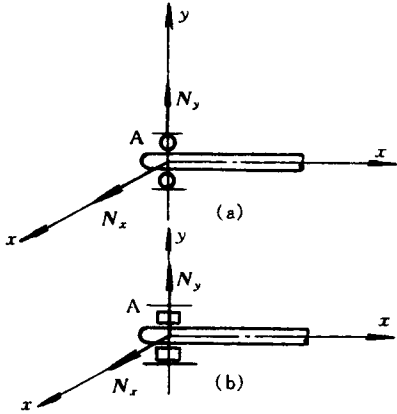


图 1-20 向心球轴承和向心滚子轴承

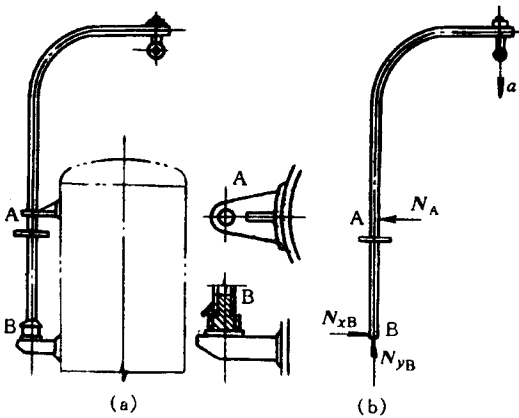


图 1-21 立式容器
(a)结构图;(b)受力图

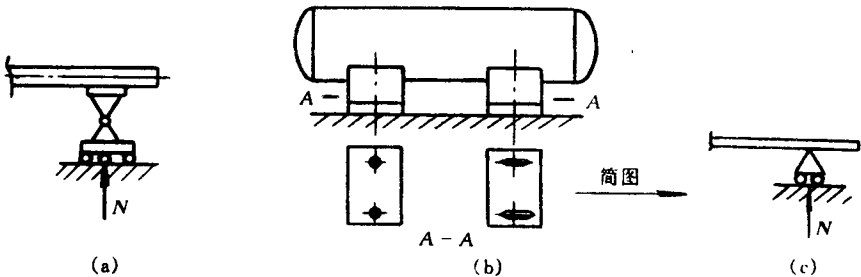


图 1-22 活动铰链支座约束示意图
(a)活动铰链支座;(b)结构图;(c)活动铰链支座简图

力的关系,因此 N_B 的方向与 N'_B 相反、大小与 N'_B 相等。AB 杆的受力图如图 1-26(d)。若以整体为研究对象,画出来的受力图如图 1-26(e)。这时 B 铰链处的力不画出是因为 AB 杆与 BC 杆通过铰链 B 连接,它们相互作用的力,从整体来看属于内力,由于是成对出现,所以不必画出。

由以上两例可以归纳画受力图的步骤:①简化结构,画结构简图;②选择研究对象,画出作用在其上的全部主动力;③根据约束性质,画出作用于研究对象上的约束反力。

四、平面力系的平衡方程式

作用在一个物体上的各力的作用线分布在同一平面内,或者可以简化到同一平面内的力系叫做平面力系;各力的作用线分布在空间的叫做空间力系。在工程实际中有很多结构的受力情况可以简化为平面力系。

例如图 1-27 所示的屋架,它的厚度相对于其余两个方向的尺寸要小得多,这种结构称为平面结构。图 1

端受 2 个力作用而处于平衡,这种杆件叫做“二力杆”。根据二力平衡条件, N'_B 与 N'_C 大小相等、方向相反,沿 BC 杆,它的受力图如图 1-26(c)。

取 AB 杆为研究对象。主动力有 P_1 、 P_2 、 P_3 ,铰链 A 的约束反力用 X_A 与 Y_A 两个分力表示;BC 杆对 AB 杆的约束反力 N_B 与 N'_B 是作用力与反作用

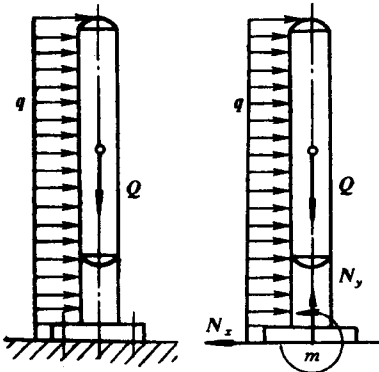


图 1-23 塔底座的固定端约束

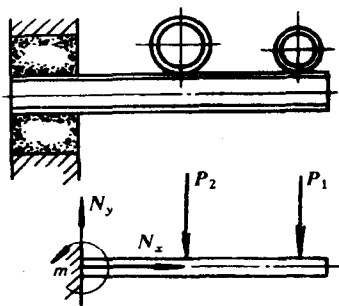


图 1-24 固定端约束的托架

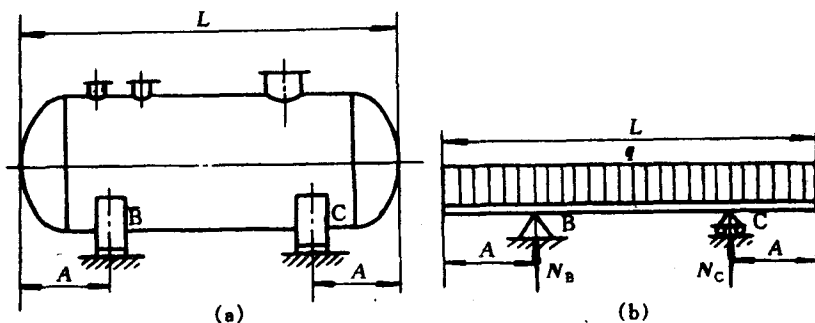


图 1-25 卧式容器受力图
(a)结构图;(b)受力图

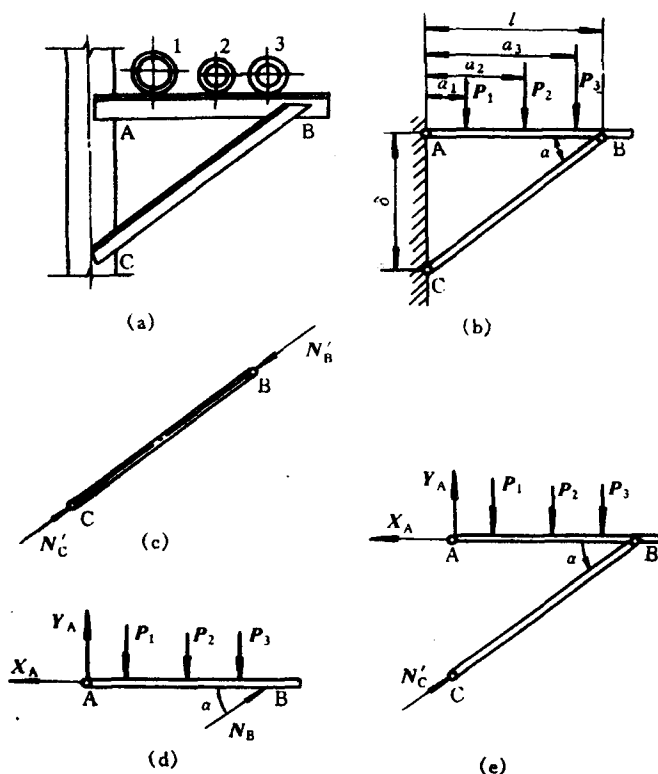


图 1-26 三角形钢结构管道支架受力图

(a)结构图;(b)结构简图;(c)BC杆受力图;(d)AB杆受力图;(e)整体受力图

等于零。因此平面力系平衡时必须满足下面 3 个代数方程式：

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_O(F) = 0 \quad (1-7)$$

这组方程的前 2 个，称为力的投影方程，它表示力系中所有力对任选的直角坐标系两轴投影的代数数和等于零。第 3 个式子称为力矩方程，它表示所有的力对任一点之矩的代数数和等于零。由于这 3 个方程相互独立，故可用来解 3 个未知量。

平面一般力系的平衡方程还可以写成其他形式，如

$$\sum M_A = 0, \sum M_B = 0, \sum F_x = 0 \quad (1-8)$$

其中 A 和 B 是平面内任意 2 个点，但 AB 连线不能垂直于 x 轴。

满足式(1-8)中的 $\sum M_A = 0$ ，即表示该平面力系向 A 点简化的主矩为零，就是说该力系简化结果不是力偶，如果是 1 个力的话，那么这个合力的作用线必过 A 点。同理，如果力系又满足 $\sum M_B = 0$ ，那么可断定，该力

-26 所示的管道支架也是平面结构。图 1-27 平面屋架上作用有载荷 P 与 Q ，支座反力为 X_A 、 Y_A 与 N_B 。这些力都作用在结构平面内，既不相交又不互相平行，构成平面力系。有的结构本身虽然不是平面结构，但具有结构对称、受力对称的特点，就可以把力简化到对称平面内，作为平面力系来处理。如化工设备中的塔器，由于结构对称，重力 Q 一定在对称面内；塔体上的风载荷本来是分布在塔体的迎风面积上按空间分布的，但由于受力对称，同样可以简化到对称面内，用沿塔体高度方向的分布力 q 来表示。加上支座反力 N_x 、 N_y 与力偶矩 m ，这些力组成平面力系，如图 1-28。

上述屋架、管道支架和塔器都是物体在平面力系作用下的实例。下面讨论物体在平面力系作用下平衡应满足的条件、平衡方程式及其应用。

物体在平面力系作用下处于平衡，就意味着物体相对于地球表面不能有任何运动产生，既不能移动，又不能转动。不能移动，就要求所有力在水平方向和铅垂方向投影的代数数和等于零；不能转动，就要求所有力对任意点的力矩的代数数和等于零。

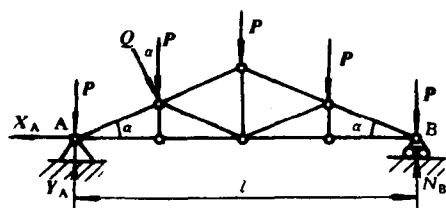


图 1-27 屋架受力图

系的简化结果如果有合力,则此力必过 A、B 点。但若同时又满足 $\sum F_x = 0$, 而且 AB 连线又不垂直于 x 轴,那就否定了该力系简化结果得合力的可能。于是可得结论:满足式(1-8)的平面,一般力系必是平衡力系。

此外,平面一般力系的平衡方程还可用第 3 种形式表达,即

$$\sum M_A = 0, \sum M_B = 0, \sum M_C = 0 \quad (1-9)$$

其中 A、B、C 是平面内不能共线的 3 个任意点。为什么满足这 3 个条件的力系必是平衡力系,请读者自证。

以下举例说明平面力系平衡方程式的应用。

例 1-3 加料小车用卷扬机 B 拉着沿斜坡道匀速上升,设小车与物料共重 P 吨,斜坡与水平面成 α 角,其他尺寸如图 1-29 所示。不计轨道与车轮之间的摩擦,试求钢丝绳的拉力与小车对轨道的压力。

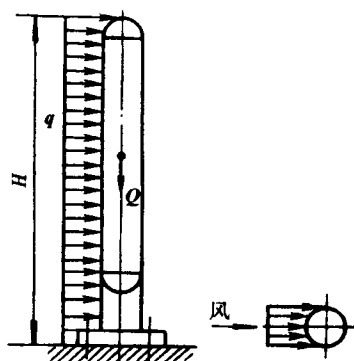


图 1-28 塔器受力图

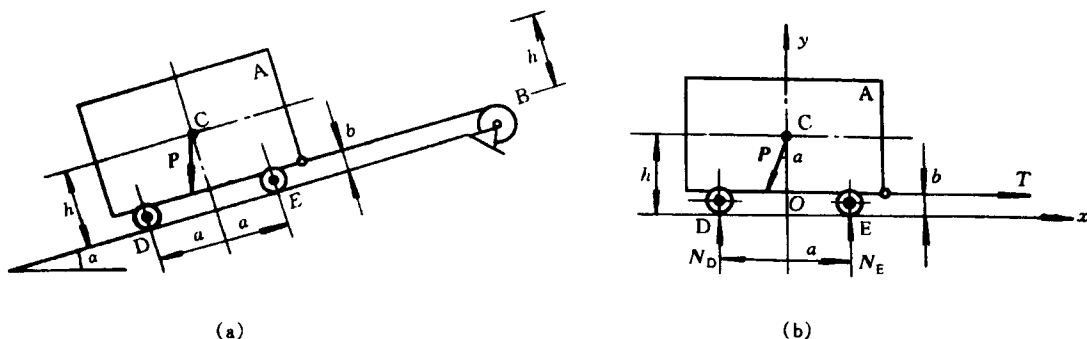


图 1-29 小车受力图

(a)结构简图;(b)受力图

解:第 1 步,了解题意,简化结构,画出结构简图。本题原属四轮小车,由于结构对称,受力对称,可简化为平面力系问题,如图 1-29(a)。

第 2 步,选取研究对象。原则上应考虑以作用有已知力和未知力的物体为研究对象,本题以小车 A 为对象,不以卷扬机为对象。

第 3 步,画受力图。画出主动力 P ,再根据约束的性质画出约束反力。钢丝绳为柔性体约束,约束反力沿绳长方向离开小车,用 T 表示;轨道对车轮为光滑支撑面,约束反力垂直于支撑面并指向小轮中心,用 N_D 和 N_E 表示。受力图如图 1-29(b)。所要求的小车对轨道的压力与 N_D 和 N_E 是作用与反作用关系,大小与它们相等。

第 4 步,选择坐标轴。以列出的平衡方程式运算是否简单为原则。本题选择的坐标轴如图 1-29(b)。

第 5 步,列平衡方程式,求解。

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0, T - P \sin \alpha &= 0, T = P \sin \alpha \\ \sum M_D(F) = 0, N_E \cdot 2a - T \cdot b + P \sin \alpha \cdot h - P \cos \alpha \cdot a &= 0 \\ N_E &= \frac{P \cos \alpha \cdot a - P \sin \alpha \cdot h + T \cdot b}{2a} \\ \sum F_y = 0, N_D + N_E - P \cos \alpha &= 0 \\ N_D = P \cos \alpha - N_E &= P \cos \alpha - \frac{P \cos \alpha \cdot a - P \sin \alpha \cdot h + T \cdot b}{2a} \\ &= \frac{P \cos \alpha \cdot a + P \sin \alpha \cdot h - T \cdot b}{2a} \end{aligned}$$

最后进行验算。选 E 点为力矩中心,写出力矩方程式

$$\begin{aligned} \sum M_E(F) = 0, P \cos \alpha \cdot a + P \sin \alpha \cdot h - T \cdot b - N_D \cdot 2a &= 0 \\ N_D &= \frac{P \cos \alpha \cdot a + P \sin \alpha \cdot h - T \cdot b}{2a} \end{aligned}$$

结果一致。

通过上例有以下 4 点补充。

(1)选投影坐标轴时没有局限于水平轴与垂直轴,而选用了与斜面平行的轴为 x 轴和与斜面垂直的轴为 y 轴。显然这一种选法投影较简单,因为所选的坐标轴与多数未知力平行或垂直,可使计算简化。

(2)列力矩方程式时,选多数未知力的交点为力矩中心最简单。本题当 T 力求出后,选 D 点或 E 点为力矩中心,列出的方程式中只有一个未知力,易于求解。用其他点如 C 或 O 为矩心,都包含 2 个未知力。

(3) P 力对 D 点或 E 点的力矩是通过它的 x 轴方向与 y 轴方向的分力来计算的。 $P_x = P \sin \alpha$; $P_y = P \cos \alpha$, P_x 到 D 或 E 点的垂直距离为 h ; P_y 到 D 或 E 点的垂直距离为 a 。直接计算 P 力到 D 点或 E 点的垂直距离比较难,所以才用它的两个分力取力矩。可以证明合力对某一点的力矩等于它的分力对同一点的力矩的代数和,叫做合力矩定理。这里直接应用了这一结论。

(4)平面力系平衡方程式只有 3 个,可以求出 3 个未知数。如未知数超过 3 个,单用平衡方程式就不能完全解出。

例 1-4 有一塔设备,见图 1-30(a),塔体自重 $P = 300$ kN,塔高 $h = 20$ m,塔体因受风压力而简化为平面均布载荷 $q = 400$ N/m。求塔设备在支座 A 处所受到的约束反力。

解:第 1 步,由于塔身与基础用螺栓连接很牢固,可将塔设备简化为具有固定端约束的悬臂梁。

第 2 步,画受力图。以塔体为研究对象,主动力有自重 P 和风载荷 q ;在计算支座反力时,分布力 q 可用其合力 Q 表示,合力的大小 $Q = hq$,合力的方向与均布的风力方向一致,合力的作用线在中间 $h/2$ 处,见图 1-30(b)。约束反力由固定端约束的特点分为 X_A 、 Y_A 和 M_A 3 部分,它们的指向与转向可以假设。

第 3 步,建立平衡方程。首先要建立适当的 A_{xy} 坐标系,该力系为平面力系,其平衡方程式为

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

得

$$X_A = -Q = -q \cdot h = -400 \times 20 = -8\,000 \text{ N} = -8 \text{ kN}$$

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

得

$$Y_A = P = 300 \text{ kN}$$

$$\sum M_A(F) = 0, M_A - Q \cdot \frac{h}{2} = 0$$

得

$$M_A = Q \cdot \frac{h}{2} = q \cdot \frac{h^2}{2} = \frac{1}{2} \times 400 \times 20^2 = 80\,000 \text{ N} \cdot \text{m} = 80 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

由第一式求得的 X_A 为负值,说明受力图上原先假设的方向与实际的方向相反,即 X_A 应指向左边。

平面力系中有两种经常遇到的特殊情况:平面汇交力系和平面平行力系。平面汇交力系中各力的作用线既分布在同平面内又汇交于一点,如果取汇交点为力矩中心 O ,则力系中所有力对 O 点之矩都等于零。因此,力矩方程式 $\sum M_O(F) = 0$ 一定能够满足。于是平面汇交力系的平衡方程式只有如下方程:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0 \quad (1-10)$$

满足以上 2 个方程式,就表示汇交力系的合力 R 等于零,物体在任何方向都不会移动。

平面平行力系中各力的作用线既分布在同一平面内又互相平行。如果选投影坐标轴 x 与力垂直,则所有力在 x 轴上的投影的代数和必然等于零。于是平面平行力系的平衡方程式只有 2 个方程:

$$\sum F_y = 0, \sum M_O(F) = 0 \quad (1-11)$$

满足以上 2 个方程,物体在任何方向都不会移动,也不会转动。应用平面汇交力系或平面平行力系的平衡方程式可解决两个未知力。

例 1-5 如图 1-31,锅炉半径 $R = 1$ m,重 $Q = 40$ kN,两砖座间距离 $l = 1.6$ m(略去摩擦力),试求锅炉在 A、B 两处对砖

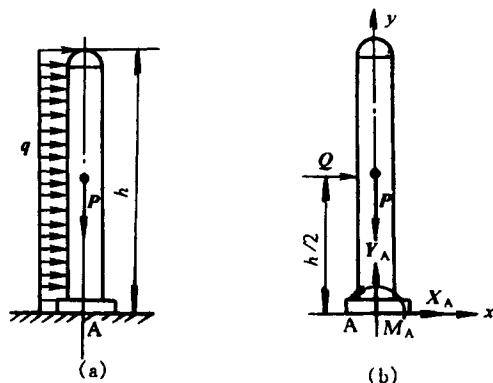


图 1-30 塔设备受力图
(a)结构图;(b)受力图