

化工 设备 设计基础

周志安 尹华杰 魏新利 编

化学工业出版社

TQ06
Z85

386161

化工设备设计基础

周志安 尹华杰 魏新利 编



TQ06
Z85

化学工业出版社
· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

DU39/01

图书在版编目(CIP)数据

化工设备设计基础/周志安,尹华杰,魏新利编,--北京:
化学工业出版社, 1996

ISBN 7-5025-1603-4

I. 化… II. ①周… ②尹… ③魏… III. 化工
设备-机械设计 IV. TQ050.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17315 号

出版发行: 化学工业出版社 (北京市朝阳区惠新里 3 号)

社长: 俸培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所

印 刷: 北京昌平振南印刷厂

装 订: 三河市影集装订厂

版 次: 1996 年 1 月第 1 版

印 次: 1996 年 1 月第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 29 1/2

字 数: 742 千字

印 数: 1—5000

定 价: 39.50 元

前 言

本书是根据化工工艺类专业对学习化工设备的基本要求,按照“少而精”的原则编写而成。其目的是使学生获得必要的机械基础知识,初步具有压力容器和化工设备的设计能力。内容注重加强基础、联系实际和设计能力的训练,力求符合专业培养目标的要求,适应当前教育改革的需要。

本书在精选内容上进行了大胆尝试,突破了现有同类教材的体系。全书分为工程力学基础、薄壁容器设计和典型化工设备设计三篇,与常规教材相比,删去了机械传动,而增加了典型化工设备设计内容。但机械传动部分又不是简单地删除,而是将其内容与第三篇中反应设备的传动装置部分紧密结合起来,按选型需要,予以简要介绍。根据我们多年来的教学实践表明,这样处理教材内容,有利于学生进行课程设计,培养工程设计能力,而且可以大大压缩篇幅,解决当前高等工科院校实行学分制后,课时少与现有教材内容多的矛盾。

本书理论联系实际,实用性强。每一章节在理论叙述之后,都有较多的例题和习题,以帮助学生理解基本概念与基本理论,培养学生分析问题和解决问题的能力。学完此课后,应安排一次典型化工设备的课程设计。该设计最好与化工原理课程设计结合起来,以便综合运用所学知识,起到学以致用效果。

本书内容简明扼要,深入浅出,便于自学。考虑到不同层次的教学需要,本书对一些内容打了“*”,作为选学和自学内容。

本书采用国际单位制(SI)。书中所引用的标准和规范采用最新颁布的国家标准、行业标准和部颁标准。

本书第一篇由周志安编写,第二篇由尹华杰编写,第三篇由魏新利编写。另外,刘宏、张彩云、王学生、王定标、闫乃威、樊光福、郭涛、王艳明、杨建州、郭茶秀、刘丽萍、马文峥等参加了部分章节例题、习题的编写及有关资料的收集。在分篇审校的基础上,全书由周志安统稿。

由于编者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,望读者批评指正。

编者

1995年8月

内 容 提 要



本书主要阐述化工设备设计中有关的机械基础知识。全书分为三篇，共14章。第一篇工程力学基础，主要讨论构件的受力分析，构件的变形与破坏的规律，以及构件的强度、刚度和稳定性计算；第二篇薄壁容器设计，主要介绍化工设备常用材料，压力容器筒体、封头的类型、特点及设计计算方法；第三篇典型化工设备设计，主要介绍化工生产中几种常用设备——换热设备、塔设备、反应设备的结构特点、选型和机械设计方法。

本书可作为高等院校化工工艺、轻工类等少学时（80~90学时）本科专业教材，也可作为高等院校相应专业函授或自学教材，还可供有关工程技术人员学习和参考。

目 录

第一篇 工程力学基础

第一章 构件的受力分析	1
§ 1-1 力的概念及性质	1
§ 1-2 约束与约束反力	5
§ 1-3 受力图	8
§ 1-4 平面汇交力系的合成与平衡条件	9
§ 1-5 平面力偶系的合成与平衡条件	13
§ 1-6 平面一般力系的合成与平衡条件	18
习 题	24
第二章 直杆的拉伸与压缩	29
§ 2-1 构件变形的基本形式	29
§ 2-2 轴向拉伸或压缩时的内力	30
§ 2-3 轴向拉伸或压缩时的应力	33
§ 2-4 轴向拉伸或压缩时的强度条件	35
§ 2-5 轴向拉伸或压缩时的变形	38
§ 2-6 轴向拉伸或压缩时材料的机械性能	40
* § 2-7 轴向拉伸或压缩时的超静定问题	45
* § 2-8 应力集中的概念	50
习 题	51
第三章 直梁的弯曲	54
§ 3-1 平面弯曲的概念	54
§ 3-2 直梁弯曲时的内力分析	55
§ 3-3 纯弯曲时梁横截面上的正应力	64
§ 3-4 截面惯性矩和抗弯截面模量	68
§ 3-5 梁的弯曲强度计算	71
* § 3-6 弯曲剪应力计算公式简介	74
§ 3-7 提高梁弯曲强度的主要途径	76
§ 3-8 梁的弯曲变形与刚度校核	79
* § 3-9 超静定梁	86
习 题	88
第四章 剪切与圆轴的扭转	92
§ 4-1 剪切	92
§ 4-2 扭转变形的概念	98
§ 4-3 圆轴扭转时的外力和内力	99

§ 4-4 圆轴扭转时横截面上的应力	102
§ 4-5 圆轴扭转时的强度和刚度条件	105
习 题	109
第五章 复杂应力状态下的强度计算	112
§ 5-1 应力状态的概念	112
§ 5-2 二向应力状态分析	114
§ 5-3 广义虎克定律	119
§ 5-4 强度理论	120
§ 5-5 组合变形时杆件的强度计算	123
习 题	129
第六章 压杆的稳定性	132
§ 6-1 压杆稳定性的概念	132
§ 6-2 压杆的临界力及临界应力	133
§ 6-3 压杆的稳定性计算	137
§ 6-4 提高压杆稳定性的措施	141
习 题	143
主要参考文献	144

第二篇 薄壁容器设计

第七章 化工设备常用材料	148
§ 7-1 金属材料的基本性能	148
§ 7-2 碳钢及其热处理	152
§ 7-3 合金钢	156
§ 7-4 有色金属及其合金	159
§ 7-5 非金属材料	160
§ 7-6 金属材料的腐蚀理论和防腐措施	163
§ 7-7 化工设备材料的选材原则与实例	167
习 题	167
第八章 内压薄壁容器的应力理论	169
§ 8-1 回转薄壳的薄膜应力理论	169
§ 8-2 薄膜应力理论的应用	172
§ 8-3 边缘应力及其特点	175
习 题	177
第九章 薄平板应力理论	178
§ 9-1 圆平板的应力理论	178
* § 9-2 矩形平板的应力与挠度	183
习 题	184
第十章 内压容器设计	185
§ 10-1 内压圆筒的强度计算	185
§ 10-2 内压球壳的强度计算	186

§ 10-3 设计参数的确定	187
§ 10-4 凸形封头的强度计算	191
§ 10-5 锥形封头的强度计算	197
§ 10-6 平板封头的强度计算	202
习 题	203
第十一章 外压容器	205
§ 11-1 外压容器的稳定性	205
§ 11-2 外压圆筒的公式设计法	206
§ 11-3 外压圆筒的图算设计法	209
§ 11-4 外压圆筒加强圈的设计	216
§ 11-5 外压封头设计	223
§ 11-6 内压凸形封头的失稳	225
§ 11-7 外压容器设计举例	225
习 题	227
第十二章 压力容器开孔与接管	229
§ 12-1 容器壳体开孔时的应力集中	229
§ 12-2 开孔接管处应力集中系数的计算	233
§ 12-3 开孔补强设计	240
习 题	245
第十三章 容器零部件标准的选用	246
§ 13-1 法兰	246
§ 13-2 支座	263
§ 13-3 人孔和手孔	276
§ 13-4 安全装置	278
§ 13-5 其他附件	280
习 题	283
* 第十四章 压力容器的应力分类及分析设计法	283
§ 14-1 压力容器的应力分类	283
§ 14-2 分析设计法对各类应力强度的限制	284
§ 14-3 压力容器其他设计法简介	288
习 题	289
* 第十五章 容器设计举例	291
主要参考文献	296

第三篇 典型化工设备设计

第十六章 换热设备	297
§ 16-1 概述	297
§ 16-2 管壳式换热器的结构设计	308
§ 16-3 管壳式换热器的强度计算	321
§ 16-4 管壳式换热器设计与选型步骤	327

§ 16-5 管壳式换热器机械设计举例	332
习 题	334
第十七章 塔设备	335
§ 17-1 概述	335
§ 17-2 填料塔结构设计	336
§ 17-3 板式塔结构设计	348
§ 17-4 塔体及裙座的机械设计	359
§ 17-5 塔设备机械设计举例	371
习 题	378
第十八章 反应设备	380
§ 18-1 概述	380
§ 18-2 罐体设计	382
§ 18-3 搅拌器及附件	388
§ 18-4 传动装置	392
§ 18-5 搅拌轴的支承及设计	420
§ 18-6 搅拌轴的密封	424
§ 18-7 搅拌反应器机械设计举例	428
习 题	433
主要参考文献	433
附录 I 型钢规格表	435
附录 II 压力容器零部件附表	443

第一篇 工程力学基础

化工设备及其零部件（统称为构件或物体）工作时都要受到各种外力作用。例如安装在室外的塔设备，要承受风力的作用；压力容器法兰联接的螺栓，要承受拉力作用；搅拌轴工作时承受物料阻力的作用等。如果构件的尺寸过小或形状不合理，选材不当，则在外力作用下，就可能发生破坏。为了保证设备安全可靠地工作，构件必须满足以下三方面要求：

- (1) 构件要有足够抵抗外力破坏的能力，即要有足够的强度。
- (2) 构件在外力作用下不发生超出许可的变形，即要有一定的刚度。
- (3) 构件在外力作用下能保持它原有的几何形状而不致突然失去原形，即应具有充分的稳定性。

工程力学的任务就是研究构件的强度、刚度和稳定性问题。这些问题是设计化工设备所必须掌握的力学基础知识，也是本篇所要讨论的基本内容。

本篇分为六章，其主要内容可以概括为两部分。(1)研究构件的受力情况及平衡条件，进行受力大小的计算；(2)研究构件的受力变形与破坏的规律，进行构件的强度、刚度和稳定性计算。我们以强度问题为重点，着重讨论构件的强度计算。

第一章 构件的受力分析

为了使构件在外力作用下不发生过大的变形或断裂，保证构件既能安全可靠地工作，又能满足经济合理的要求，就需要选择适当的材料、确定构件的合理形状和尺寸。但要解决这些问题，首先必须弄清构件上受到哪些外力作用，它们的大小、方向或方位如何？因此，构件的受力分析是进行构件强度、刚度和稳定性计算的前提。

本章所要研究的构件是处于平衡状态下的构件。所谓“平衡状态”，就是构件在外力作用下相对于地面保持静止或匀速直线运动状态。因此，构件的受力分析是指构件处在平衡状态下的受力情况分析。主要讨论构件受力分析的基本方法和构件的受力平衡条件。

§ 1-1 力的概念及性质

一、力的概念

人们从长期生产和生活实践中，透过力的各种现象，逐步认识了力的本质，建立了力的概念：力是物体之间的相互机械作用。这种机械作用产生两种效应。

(1) 使物体的运动状态发生改变。如静止的小车，用力推它时能使它运动；行驶的汽车在刹车时，靠摩擦力能使它停止下来。有时力作用在物体上并不改变它的运动状态，这是因为作用在物体上的力相互平衡，它们的运动效果相互抵消的缘故。这种使物体运动状态发生改变的效应称为力的外效应。

(2) 使物体产生变形。如弹簧受拉力作用会伸长；桥式起重机的横梁在起吊重物时要弯

曲；锻压加工时工件会变形等。这种使物体产生变形的效应称为力的内效应。

应当指出，力的外效应和力的内效应总是同时产生的。但在一般情况下，工程上用的构件大都是用金属材料制成的，它们都具有足够的抵抗变形的能力，即在外力作用下，它们产生的变形是很微小的，可以忽略不计。因此，在研究力的外效应时，可近似把构件看作为不变形的物体。这种在外力作用下不变形的物体称为刚体。在本章中，我们研究的对象都视为刚体，只考虑力的外效应。显然，刚体是实际物体的一种抽象化模型，它表示在外力作用下，物体保持原有形状和尺寸不变的性质。但是，不能把刚体绝对化，如果在所研究的问题中，

物体的变形成为主要因素时（即使变形很微小），就不能把物体看成刚体而应看成变形体。例如，以一定方式支承并承受一定载荷的梁，在计算支承对梁的反作用力时可视梁为刚体。但在计算梁的强度，确定梁的截面尺寸时又必须视梁为变形体。

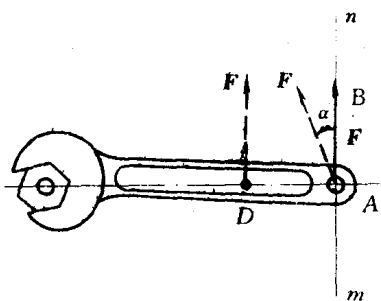


图 1-1 力的三要素

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点三个要素。例如，用扳手拧松螺母时，若在图 1-1 所示的 A 点施加一个大小适当、方向与手柄垂直的力 F ，就能平稳地拧松螺母。如果所加的力 F 的方向不与手柄垂直（图中虚线所示位置），则拧起来就费劲些。另外，如果把同样大小

和方向的力 F 作用在靠近螺母的 D 点，则拧起来就更费劲。这说明力的作用效果不仅与力的大小、方向有关，而且还与力的作用点的位置有关。这三个要素中，改变其中任一要素，力的作用效果就随之改变。

力的三要素表明力是一个矢量，它与只有大小而无方向的标量不同。为了区别起见，矢量用黑体字或在白字体上加一箭头表示，如 $\mathbf{F}$ 或 $\vec{F}$ 。力矢量的三要素可以用一个带箭头的有向线段表示，如图 1-1 中所示的 AB。线段的长度表示力的大小（按一定比例）；线段的方位和箭头所指的方向表示力的方向；线段的起点 A 或终点 B 表示力的作用点；通过力的作用点沿力的方向的直线 mn 称为力的作用线。

按照国际单位制，力的单位用“牛顿”（N）或“千牛顿”（kN）。

二、力的基本性质

为了阐明力的基本性质，先介绍几个概念。

力系——指作用在同一物体上的两个或两个以上的力。

平衡力系——若物体在某力系作用下处于平衡状态，则这样的力系称为平衡力系。显然，平衡力系中的各力对物体作用的外效应彼此抵消。因此，平衡力系是对物体作用的外效应等于零的力系。由此可见，并不是任何力系都能成为平衡力系，要成为平衡力系必须具备一定条件，这个条件称为平衡条件。

等效力系——若两个力系分别作用于同一物体，它们所产生的外效应相同，则这两个力系互为等效力系。

合成与分解——若一个力与一个力系等效，则这个力是该力系的合力，而该力系中的各个力为其合力的分力。由力系求合力的过程称为力的合成。而将合力转化成几个分力的过程称为力的分解。

力的性质反映了力所遵循的客观规律，它们是进行构件受力分析、研究力系简化和力系平衡条件的理论依据。其中最基本的性质有四条。

1. 力的成对性

力是由两个物体相互作用产生的，所以力总是成对出现。如用手推小车时，手对小车施加一个作用力，则手必受到小车的一个反作用力。这两个力大小相等、方向相反，分别作用在两个不同的物体上，这就是力的成对性，也称为作用与反作用定律。当我们应用作用与反作用定律分析物体的受力情况时，必须要分清谁是施力体，谁是受力体。作用力与反作用力永远是同时产生、同时消失，且分别作用在两个不同的物体上，因而它们对各自物体的作用效应不能相互抵消。

2. 二力平衡条件

如果刚体只受两个力作用而处于平衡状态，则这两个力必定是大小相等、方向相反，且作用在同一直线上。这就是二力平衡条件。



图 1-2 二力平衡条件

如图 1-2 所示，直杆 AB 的两端分别受到 F_A 和 F_B 作用而处于平衡状态时，则这两个力 F_A 和 F_B 必须等值、反向、共线，即 $F_A = -F_B$ 。 F_A 和 F_B 称为作用在同一刚体上的一对平衡力。这对平衡力与作用力和反作用力虽有相似之处，但实质是不同的。前者两力作用在同一物体上；后者两力分别作用在两个物体上。

必须指出，二力平衡条件对刚体是充分与必要条件，而对非刚体只是必要条件，而非充分条件。例如，象绳索一类的柔软体受两个等值、反向、共线的拉力作用时处于平衡，但受两个等值、反向、共线的压力作用时，就不能平衡。

工程上的构件，其几何形状多种多样，但只要构件是在二力作用下处于平衡，就称为“二力构件”。当构件的形状为杆状时，则称为“二力杆”。根据二力平衡条件可以断定，二力杆上的两力，其作用线必定沿作用点的连线。

3. 力的可传性

在作用于刚体上的任一力系中，增加或减去任一平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用。就是说，如果两个力系只相差一个或几个平衡力系，则它们对刚体的作用是相同的，因此可以等效代换，此即加减平衡力系原理。根据此原理可推出力的一个重要性质，即力的可传性：作用于刚体上某点的一个力，可以沿其作用线移动到该刚体上的任意一点，而不改变它对刚体的作用。

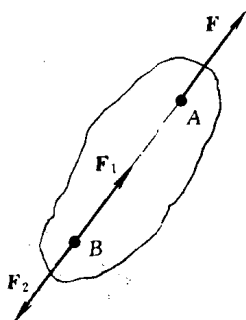


图 1-3 力的可传性

设力 F 作用于刚体上的 A 点，如图 1-3 所示。根据加减平衡力系原理，可在力的作用线上任取一点 B ，并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F_1 = F = -F_2$ 。由于力 F 和 F_2 也是一个平衡力系，故可除去，这样，刚体上只剩下作用于 B 点的一个力 F_1 。显然，力 F_1 与原来的力 F 等效，只是作用点已移动到了 B 点。

必须注意，力的这种可传递的性质只适用于刚体，而不适用于变形体。因为当把物体看成变形体讨论力的内效应时，力的移动常会引起变形性质的变化。由于力具有可传递性，且只适用于刚体，因此，对于刚体来说，力的作用点已不是决定力的作用效果的要素，它已为作用线所代替。因此，作用于刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。

4. 力的可合性与可分性

在不改变力对物体作用效应的前提下, 可以将作用在物体上同一点的两个力合成为一个力, 也可以将作用在物体上的一个力分解为相交的两个分力, 这就是力的可合性与可分性。

力的合成是按照力的平行四边形法则进行的, 即作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力, 合力的大小、方向和作用线的位置, 可由这两个力所构成的平行四边形的对角线来表示。

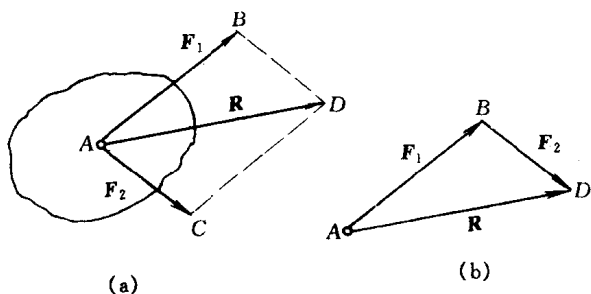


图 1-4 力的平行四边形法则和力三角形法

图 1-4 (a) 所示物体上 A 点作用有两个力 F_1 和 F_2 , 其合力按平行四边形法则合成为 R 。其矢量表达式为:

$$R = F_1 + F_2$$

力的平行四边形法则还可简化为力的三角形法则。如图 1-4 (b) 所示, 将第一个力 F_1 的终点 B 作为第二个力 F_2 的起点, 按第二个力 F_2 的大小和方向画出第二个力 F_2 , 则从第一个力 F_1 的起点 A 到第二个力 F_2 的终点 D 的连线所构成的矢量 AD 即为合力 R 。合力和分力所构成的三角形 ABD 称为“力三角形”, 用力三角形求两力合力的方法称为“力三角形法”。

力的分解与力的合成是相反的过程, 也应用平行四边形法则。如图 1-5 (a) 所示。作用

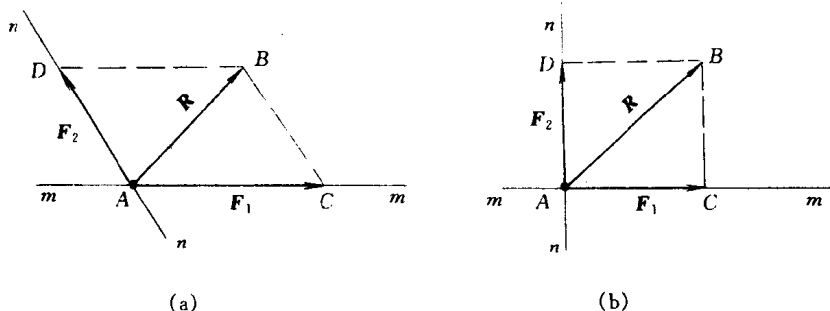


图 1-5 力的分解

在物体上的一个力 可以分解为相交的两个分力 F_1 、 F_2 , 分力和合力作用于同一点。一般来说, 一个力分解成为相交的两个分力可以有无穷多解。在工程问题中, 常遇到的是把一个力分解为方向已知 (mm , nn) 的两个分力, 特别有用的是分解为方向已知互相垂直的两个分力 (图 1-5 (b))。

利用力的平行四边形法则和二力平衡条件还可推导出一个重要定理, 即三力平衡汇交定理: 某刚体受三个力作用而处于平衡状态, 若其中两个力的作用线相交于一点, 则第三个力的作用线亦必交于同一点。

如图 1-6 所示, 刚体内 A_1 、 A_2 、 A_3 三点上分别作用三个共面但不平行的力 F_1 、 F_2 、 F_3 , 使刚体处于平衡状态。若已知 F_1 和 F_2 的作用线相交于 B 点, 根据力的可传性原理, 可将 F_1 和 F_2 移至交点 B , 并用力的平行四

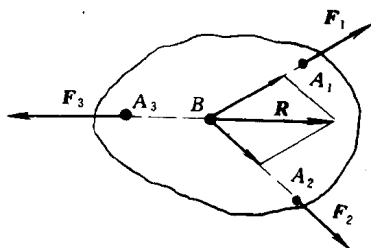


图 1-6 三力平衡汇交定理

边形法则求出其合力 R , 以代替 F_1 和 F_2 的作用。又根据二力平衡条件, R 应与 F_3 等值、反

向、共线, 所以 F_3 的作用线必与 R 的作用线重合而且通过 B 点。

当刚体受三个互不平行的共面力作用而平衡时, 常常利用这个定理来确定某个未知力的方向。

§ 1-2 约束与约束反力

若一物体在空间能沿任何方向、不受限制的自由运动, 则该物体称为自由体。反之, 如果物体的运动在某些方向上受到限制而不能完全自由运动, 那么该物体就称为非自由体或被约束体。在力学中把限制非自由体运动的物体称为“约束”。

如图 1-7 (a) 所示的塔设备, 被地脚螺栓固定在基础上, 因而是非自由体, 而地脚螺栓和基础即为塔设备的约束。前者阻止塔设备因风力 q 作用而向右移动或翻倒, 后者阻止塔设备因重力 Q 作用而向下运动。又如悬挂着的电灯, 受到电线的限制, 不能垂直向下运动。转轴受轴承的限制只能在轴承孔内转动, 而不能沿轴孔径向运动。显然, 电灯、转轴均为非自由体, 而限制它们自由运动的电线、轴承就分别是它们各自的约束。

约束之所以能限制物体的运动, 是由于约束有力作用在被约束的物体上。我们把约束作用在被约束物体上的力称为约束反力。简称反力。工程上把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。如塔设备上的重力 Q 、风力 q 就是主动力。而基础和地脚螺栓对塔设备的作用力 N_y 、 N_x 和 m 就是约束反力 (图 1-7 (b))。物体所受的主动力往往是已知的, 所以是已知的外力; 而物体所受的约束反力, 其大小一般是未知的, 要由力系的平衡条件来确定。其方向或方位需根据约束的性质确定。所以约束反力通常是未知外力。对物体进行受力分析就是要分析清楚物体上受到哪些外力作用, 其中哪些是已知的主动力, 哪些是未知的约束反力, 约束反力的方向或方位又如何? 这是解决工程力学问题的第一步, 也是关键的一步。

下面介绍工程上常见的几种约束类型和确定约束反力方向或方位的方法。

1. 柔软体约束

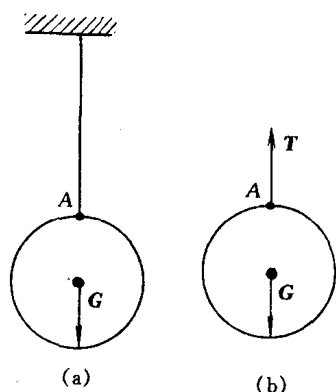


图 1-8 柔软体的约束

由绳索、胶带、钢丝绳等柔性物体产生的约束称柔软体约束。这种约束的特点是只能承受拉力, 不能承受压力, 也就是说, 只有当它们被拉直时才能起到约束作用。如图 1-8 (a) 所示用绳子悬挂一重物 G , 绳子只能阻止重物向下运动, 而不能限制重物其他方向运动, 所以它所产生的反力 T 竖直向上 (图 1-8 (b))。因此, 这类柔软体约束反力的方向一定沿着柔软体的中心线且背离被约束的物体。

2. 光滑面约束

一些光滑支承表面 (如导轨、托轮等) 产生的约束称为光滑面约束。由于光滑面与被约束物体之间的摩擦力很小, 可以忽略不计, 因此, 这种约束只能阻止物体沿着接触点的公法线

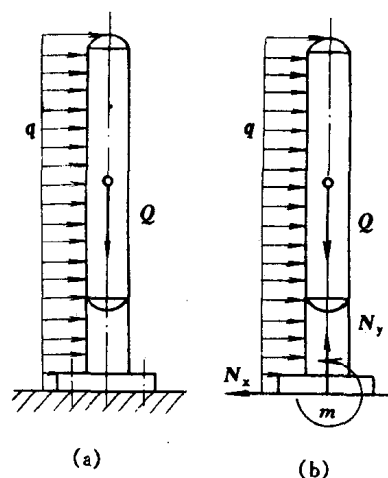


图 1-7 塔设备的约束及约束反力

朝向支承面的运动,而不能限制其离开支承面和沿其切线方向的运动。所以光滑面约束反力的方向应沿着接触点的公法线,并指向被约束的物体。如图 1-9 (a) 所示车轮与轨道接触,若不计钢轨的摩擦,则钢轨可视为光滑面约束,车轮在主动动力 G 作用下有向下运动的趋势,而约束反力 N 则沿接触点 A 的法线铅直向上。又如图 1-9 (b) 表示圆筒形容器在组装时搁置在托轮上,容器与托轮分别在 A 、 B 处接触,托轮作用于容器的约束反力 N_A 和 N_B 分别沿接触点的公法线,即沿圆筒形容器的半径方向、指向圆心。

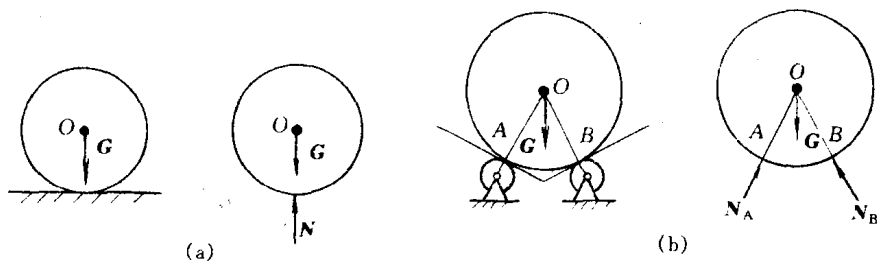


图 1-9 光滑面约束

3. 圆柱铰链约束

图 1-10 (a) 所示是一种最常见的圆柱铰链结构。它是由两个带圆孔的构件 A 、 B , 孔中插入一个光滑的圆柱形销钉 C 组成。销钉与销孔的接触可认为是光滑的, 这时, 无论是在构件 A 、 C 之间, B 、 C 之间, 或者在 A 、 B 之间都只能发生相对转动, 而不能产生相对移动。具有这种特点的约束就称为圆柱铰链约束。若把构成圆柱铰链约束中的一个构件 (如 B) 固定在基础或机架上, 这样的圆柱铰链约束叫做固定铰链支座。

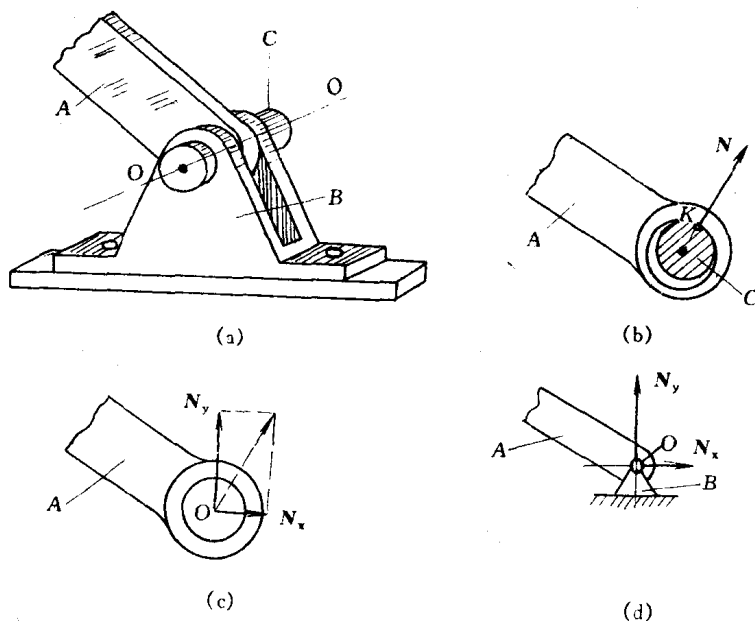


图 1-10 圆柱铰链约束

由图 1-10 (b) 看出, 销钉 C 的约束作用是阻止构件 A 在垂直于销钉轴线的平面内移动, 因此, 销钉 C 作用于构件 A 上的约束反力一定在该平面内, 其作用线 (即反力的方位) 必过接触点, 并通过销孔中心。但其方向应根据构件 A 的受力情况而定, 因为构件 A 可绕销钉 C 转动, 所以构件 A 与销钉 C 的接触点 K 的位置也是随着构件的受力情况不同而异, 因此, 约束反力 N 的方向也随之变化, 不能预先确定。为了便于分析, 通常用通过销钉 (或销孔) 中

心的相互垂直的两个分力 N_x 和 N_y 来代替约束反力 N ，如图 1-10 (c) 所示。 N_x 和 N_y 的方向可以任意假定，但大小未知。固定铰链支座及其约束反力的简化表示法如图 1-10 (d) 所示。

对于化工、石油装置中的一些管道，卧式容器及梁等，为了适应较大的温度变化使之能相应地伸长或收缩，常在其中的一个铰链支座下面装上辊轴，使该支座可以沿着支承面自由移动（图 1-11 (a)），这种铰链支座称为活动铰链支座。该支座的特点是只能阻止物体沿垂直于支承面的方向运动，因此其约束反力 N 的方向应垂直于支承面，且指向被约束物体。活动铰链支座及其约束反力的简化表示法如图 1-11 (b) 所示。

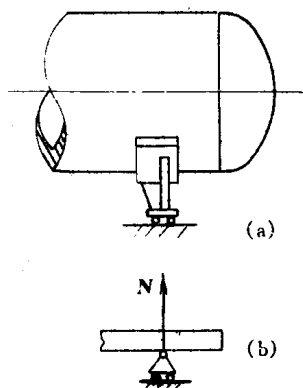


图 1-11 可动铰链支座

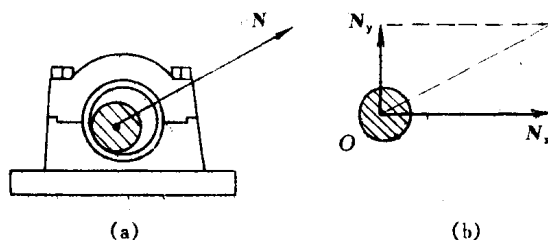


图 1-12 轴承约束

轴承是工程中常用的支承形式，它和轴颈所构成的约束称为轴承约束，其约束性质与圆柱铰链约束相同。图 1-12 (a) 为向心滑动轴承的示意图，若略去摩擦，则轴颈与轴承的接触是两个光滑圆柱面的接触，在受力分析上与圆柱铰链约束的受力分析相同。轴承的约束反力 N 应通过轴颈的中心，方向也不能预先确定，通常用两个相互垂直的分力 N_x 和 N_y 来表示，如图 1-12 (b) 所示。

4. 固定端约束

构件的一端嵌入另一构件的内部使之连成一体，这种约束称为固定端约束。如图 1-13 所示插入墙内的悬臂梁就属于这种情况；图 1-7 所示的塔设备的约束也属于固定端约束。这是使两构件牢固联接的形式，即两构件之间既不能产生任何方向的移动，也不能产生任何方向的转动。若研究的是空间力系，欲使构件不产生任何方向的移动和转动，固定端约束必须存在六个约束反力 N_x 、 N_y 、 N_z 、 m_x 、 m_y 、 m_z ，如图 1-14 (a) 所示。其中， N_x 、 N_y 、 N_z 用来限制构件沿三个坐标轴方向的移动，而 m_x 、 m_y 、 m_z 用来限制绕三个坐标轴方向的转动。若研究的是平面力系，则固定端约束只存在三个约束反力 N_x 、 N_y 、 m_A ，如图 1-14 (b) 所示。 N_x 和 N_y 用来限制构件沿水平方向和垂直方向的运动，而 m_A 用来限制构件绕 A 点的转动。

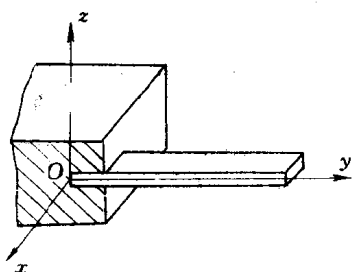


图 1-13 固定端约束

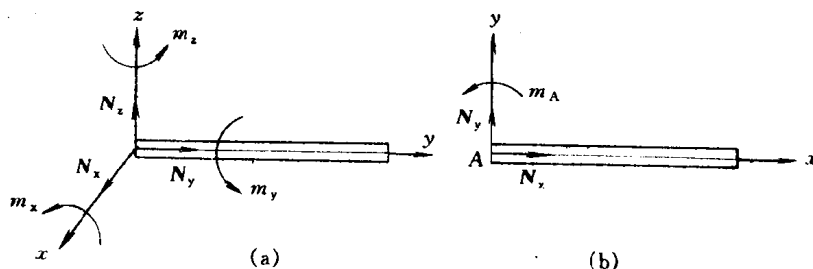


图 1-14 固定端的约束反力

§ 1-3 受力图

为了把构件的受力情况清晰地表达出来，需要把所分析的构件（即研究对象）从与它相联系的周围约束物体中分离出来，单独画出。这种被分离出来的研究对象称为分离体。为了不改变分离体的受力情况，将周围约束物体对分离体的作用用约束反力来代替，这就是所谓的“解除约束”。所以分离体也可以理解为解除约束后的研究对象。

在分析分离体的受力情况时，必须全面考虑作用在分离体上的全部外力，包括已知的主动力和未知的约束反力。表示分离体及其所受的全部外力图，就称为受力图。适当地选取分离体，正确地画出受力图是解决工程力学问题的基本环节，必须熟练掌握。下面通过实例来说明受力图的画法。

例 1-1 图 1-15 (a) 所示为两个油桶堆放在地下槽中，桶 I、II 的重力分别为 G_1 、 G_2 ，试作出每个桶的受力图。

解：(1) 先取桶 I 作为研究对象，解除约束成为分离体。作用在这个桶上的主动力只有自身的重力 G_1 。桶 I 在 A 和 B 两处受到约束，在 A 处有槽壁对桶 I 的约束反力 N_A ，在 B 处有桶 II 对桶 I 的约束反力 N_B 。这些力都通过桶 I 中心 O_1 ，其受力图如图 1-15 (b) 所示。

(2) 再取桶 II 为研究对象，并使其成为分离体。作用在这个桶上的主动力除自身重力 G_2 外，还有桶 I 传来的压力 N'_B 。在 C、D 两处受到约束，因而有约束反力 N_C 和 N_D 。这些力都通过桶 II 的中心 O_2 ，其中压力 N'_B 和桶 I 所受的约束反力 N_B 互为作用力和反作用力，即 $N'_B = -N_B$ 。桶 II 的受力图如图 1-15 (c) 所示。

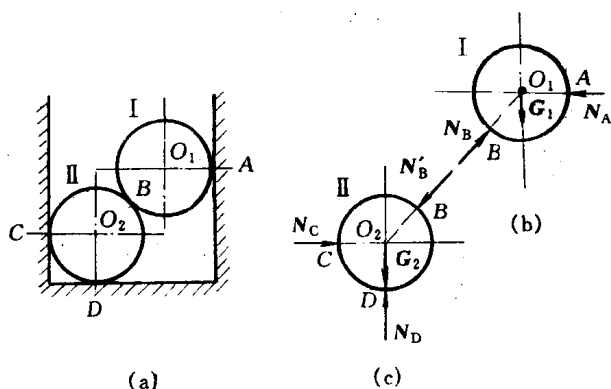


图 1-15 例 1-1 附图

例 1-2 水平梁 AB 用斜杆 CD 支撑，A、D、C 三处均为圆柱铰链连接(图 1-16(a))。水平梁的重力为 G ，其上放置一个重为 Q 的电动机。如不计斜杆 CD 的重力，试画出斜杆 CD 和水平梁 AB 的受力图。

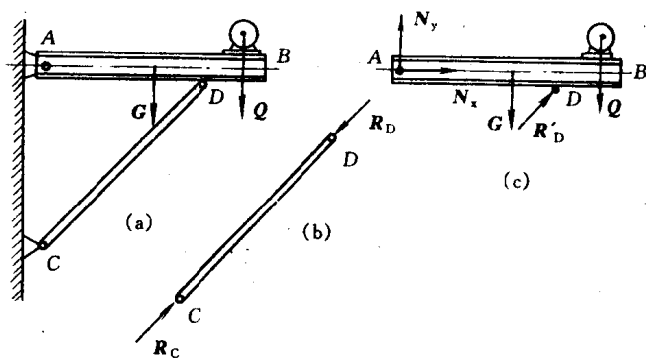


图 1-16 例 1-2 附图

解：(1) 斜杆 CD 的受力图。将斜杆解除约束作为分离体。该杆的两端均为圆柱铰链约束，在不计斜杆自身重力的情况下，它只受到杆端两个约束反力 R_C 和 R_D 作用而处于平衡状态，故 CD 杆为二力杆。根据二力杆的特点，斜杆两端的约束反力 R_C 、 R_D 的方位必沿两端点 C、D 的连线且等值、反向。又由图可断定斜杆是处在受压状态，所以约束反力 R_C 和 R_D 的方向均指向斜杆，如图 1-16