

化工设备机械基

北 京 化 工 学 院
唐尔钧 詹长福 合编

央 广 播 电 视 大 学 出 版 社

Q05
7

社

化工设备机械基础

北 京 化 工 学 院

唐尔钧 詹长福 合编

中央广播电视大学出版社

化工设备机械基础

北京化工学院
唐尔钧、詹长福 合编

中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张28.75 插页1 千字718

1985年3月第1版 1985年10月第1次印刷

印数 1—22,500

书号: 15300·18 定价: 5.40元

内 容 提 要

本书是中央广播电视大学化工类专业《化工设备机械基础》课程的教材（80学时）。

全书分为三篇，共十八章。第一篇——工程力学基础，讲解力学的基本概念，物体的受力分析及其平衡条件，材料的机械性质，杆件的拉（压）、剪、扭、弯以及组合变形时的强度与刚度条件。第二篇——薄壁容器设计，介绍了化工设备常用材料的各种性能，研究了化工设备壳体的类型、特点、设计计算方法，以及标准化工设备零部件的结构及其选用等。第三篇——机械传动，介绍了几种化工设备上常用的传动装置的工作原理、失效形式、使用维护等基本知识，讨论了传动零部件的结构和设计计算方法，以及减速器的结构与选用等。

书中每章均有例题和习题。书后附录中还编有夹套反应釜的机械设计，可供进行化工设备课程设计时参考。

本书除作为电大化工类专业的教材外，还可供化学和石油化学工业部门厂矿、设计单位的工人、技术人员以及高等院校化工类各专业师生参考之用。

前 言

本书是为中央广播电视大学化工工艺类专业80学时《化工设备机械基础》课程编写的教材。在编写中参照了1984年11月化工部教育司在西安召开的《化工设备机械基础》教材评审会审定的教材编写原则，在“打好基础、精选内容、结合实际、利于教学”等方面作了一些努力。在编写中我们根据自己的教学实践，并学习有关院校多年来对化工工艺类专业机械课改革的经验，突出了三基（基本理论、基本知识和基本技能）内容，注意了加强专业性，力求符合专业培养目标的要求。

本书讲述化工设备机械设计中的基础知识。考虑到内容多、学时少的矛盾，故只从有关的机械基础知识中精选了四部分内容，即：工程力学基础；化工设备常用材料；化工容器及其附件设计和机械传动设计基础知识。为给课程设计提供方便，在附录中编入了容器制造的技术要求和夹套反应釜机械设计基础知识。本书所提供的数据如不能满足课程设计的需要请参阅“化工设备设计手册”。

考虑到电视授课的特点，本书在文字叙述上力求便于自学。为照顾教材内容的系统性和连贯性，但又不加重学员学习负担，本书对一些内容打了“*”号，作为选学和自学内容。

本书各章之后均安排了习题，有的章后习题较多，可以选作。

本书采用国际单位制(SI)。但鉴于现行有关标准规范实用单位情况，在薄壁容器设计篇采用了SI和MKS单位制，二者换算关系书内已加以说明。

本书所用符号，照顾到学科习惯，各篇自成体系，同一符号在不同章节代表不同意义时均已作了相应说明。

本书的绪论、第一篇、第二篇的概述和第七、八、九等三章由唐尔钧编写；第二篇的第六、十、十一等三章、第三篇以及附录由詹长福编写。

在本书编写过程中，河北工学院董大勤同志、北京化工学院刘谟菊同志和冯庭瑞同志，曾对书中部分章节提出了一些宝贵意见，在此致以谢意。

限于编者水平，加之编写时间仓促，书中一定存在不少缺点和错误，殷切期望读者批评指正，特先致以谢意。

编 者

1985年3月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-------

第一篇 工程力学基础

概 述	(2)
-----------	-------

第一章 物体的受力分析及其平衡条件	(3)
-------------------------	-------

§ 1-1 物体的受力分析	(3)
---------------------	-------

§ 1-2 平面汇交力系的简化与平衡	(12)
--------------------------	--------

§ 1-3 力矩 力偶 力的平移定理	(18)
--------------------------	--------

§ 1-4 平面一般力系的简化与平衡	(24)
--------------------------	--------

习 题	(32)
-----------	--------

第二章 直杆的拉伸与压缩	(38)
--------------------	--------

§ 2-1 轴向拉伸与压缩的概念	(39)
------------------------	--------

§ 2-2 拉伸与压缩时的内力 截面法	(40)
---------------------------	--------

§ 2-3 拉伸与压缩时的应力	(42)
-----------------------	--------

§ 2-4 轴向拉伸与压缩时的变形 虎克定律	(44)
------------------------------	--------

§ 2-5 拉伸与压缩时材料的机械性质	(47)
---------------------------	--------

§ 2-6 拉伸与压缩时的强度条件	(53)
-------------------------	--------

• § 2-7 热应力的概念	(58)
----------------------	--------

§ 2-8 应力集中的概念	(60)
---------------------	--------

习 题	(61)
-----------	--------

第三章 剪切与圆轴的扭转	(63)
--------------------	--------

§ 3-1 剪切	(63)
----------------	--------

§ 3-2 扭转的概念	(69)
-------------------	--------

§ 3-3 扭转时外力和内力的计算	(70)
-------------------------	--------

§ 3-4 圆轴扭转时的应力	(75)
----------------------	--------

§ 3-5 圆轴扭转时的变形	(79)
----------------------	--------

§ 3-6 圆轴扭转时的强度和刚度计算	(80)
---------------------------	--------

习 题	(83)
-----------	--------

第四章 直梁的弯曲	(87)
-----------------	--------

§ 4-1 平面弯曲的概念 梁的类型	(87)
--------------------------	--------

§ 4-2 梁弯曲时的内力	(89)
---------------------	--------

§ 4-3 弯矩图	(91)
-----------------	--------

§ 4-4 纯弯曲时梁横截面上的正应力	(97)
---------------------------	--------

§ 4-5 截面的轴惯性矩和抗弯截面模量	(101)
----------------------------	---------

§ 4-6 弯曲正应力的强度条件	(105)
------------------------	---------

§ 4-7 梁截面合理形状的选择	(108)
------------------------	---------

§ 4-8 梁的弯曲变形	(110)
--------------------	---------

习 题	(116)
第五章 组合变形时杆件的强度计算	(120)
§5-1 组合变形的概念	(120)
§5-2 弯曲与拉伸(或压缩)的组合	(121)
§5-3 弯曲与扭转的组合	(125)
习 题	(129)

第二篇 薄壁容器设计

概 述	(131)
第六章 化工设备常用材料	(136)
§6-1 化工设备常用金属材料的基本性能	(136)
§6-2 金属材料的腐蚀及防护	(138)
§6-3 化工设备常用材料介绍	(145)
§6-4 提高和改善碳钢机械性能和加工性能的途径	(148)
习 题	(151)
第七章 内压薄壁容器的应力分析	(152)
§7-1 回转壳体的应力分析——薄膜应力理论	(152)
§7-2 薄膜应力理论在典型壳体中的应用	(159)
§7-3 边缘应力的概念	(167)
习 题	(172)
第八章 内压薄壁圆筒与球壳的设计	(174)
§8-1 内压薄壁圆筒与球壳的强度计算	(174)
§8-2 设计参数的确定	(176)
§8-3 容器的最小壁厚	(184)
§8-4 容器的压力试验	(185)
习 题	(188)
第九章 内压薄壁容器的封头设计	(189)
§9-1 凸形封头	(190)
§9-2 锥形封头	(200)
§9-3 平板封头	(205)
习 题	(210)
第十章 外压容器设计	(212)
§10-1 外压容器的稳定性	(212)
§10-2 外压圆筒的简化公式设计法	(214)
§10-3 外压圆筒的图算设计方法	(217)
§10-4 外压圆筒加强圈的设计	(225)
§10-5 外压封头	(232)
习 题	(233)
第十一章 容器附件	(235)
§11-1 法兰联接	(235)

§11-2	容器与设备的支座	(246)
§11-3	容器的开孔及其附件	(254)
习 题		(279)

第三篇 机械传动

第十二章	机械传动设计概论	(280)
§12-1	机械传动的组成及传动系统示意图	(280)
§12-2	机械传动的基本参数及其计算	(282)
§12-3	机械传动零部件设计概述	(284)
习 题		(289)
第十三章	带传动	(290)
§13-1	概述	(290)
§13-2	三角带传动的设计计算	(295)
§13-3	三角带论的结构	(302)
§13-4	三角带传动的张紧和维护	(304)
习 题		(307)
第十四章	齿轮传动	(308)
§14-1	齿轮传动的特点和类型	(308)
§14-2	齿廓啮合基本定律	(309)
§14-3	渐开线齿论	(310)
§14-4	齿轮的各部分名称及渐开线标准齿轮的基本尺寸	(311)
§14-5	渐开线标准齿轮的啮合传动	(314)
*§14-6	齿轮的切削加工	(316)
§14-7	齿轮传动的失效形式和齿轮材料	(319)
§14-8	直齿圆柱齿轮的强度计算	(321)
§14-9	齿轮的构造	(329)
习 题		(330)
第十五章	蜗杆传动	(332)
§15-1	概述	(332)
§15-2	蜗杆传动的主要参数和几何尺寸计算	(334)
§15-3	蜗杆传动的主要失效形式、选材和结构	(337)
§15-4	蜗杆传动装置的维护	(338)
习 题		(339)
*第十六章	轮系和减速器	(340)
§16-1	轮系	(340)
§16-2	减速器	(343)
习 题		(348)
第十七章	轴与联轴器	(349)
§17-1	概述	(349)
§17-2	轴的材料及其草图设计步骤	(349)

§17-3 轴的强度校核	(355)
§17-4 联轴器	(359)
习 题	(364)
第十八章 轴 承	(365)
§18-1 概述	(365)
§18-2 非液体摩擦滑动轴承	(369)
§18-3 滚动轴承	(375)
习 题	(385)
附录 I 容器制造的基本知识与技术要求	(387)
§I-1 钢板卷(冲)焊容器制造工序	(387)
§I-2 钢板的选择与处理加工	(387)
§I-3 筒节的弯卷及其制造误差	(389)
§I-4 封头的冲压成型和技术要求	(392)
§I-5 容器的组焊	(393)
§I-6 受压容器的整体检验	(398)
§I-7 钢制和不锈钢耐酸钢焊接容器技术要求在总装配图上的标注内容和格式	(398)
附录 II 夹套反应釜机械设计	(400)
§II-1 夹套反应釜机械设计的内容和步骤	(400)
§II-2 釜体设计	(400)
§II-3 反应釜的搅拌装置	(403)
§II-4 反应釜的传动装置	(409)
§II-5 反应釜的轴封装置	(414)
§II-6 带有搅拌器的反应釜的技术要求	(420)
§II-7 夹套反应釜设计举例	(421)
附录 III 数据表	(427)
附表 III-1 型钢规格表	(427)
附表 III-2 钢管选用表	(437)
附表 III-3 钢管许用应力表	(438)
附表 III-4 钢板和钢管的机械性能表	(439)
附表 III-5 钢材弹性模数值表	(441)
附表 III-6 筒体的容积、面积及重量	(442)
附表 III-7 以内径为公称直径的椭圆形封头的尺寸、内表面积、容积	(443)
附表 III-8 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重量	(446)
附表 III-9 法兰垫片的使用情况	(448)
附表 III-10 法兰垫片选用摘要	(449)
附表 III-11 国产非金属垫片规格	(450)
附表 III-12 单列向心轴承的额定动载荷 C 和额定静载荷 C ₀	(451)
附表 III-13 向心推力球轴承的额定动载荷 C 和额定静载荷 C ₀	(451)
附表 III-14 单列圆锥滚子轴承的额定动载荷 C 和额定静载荷 C ₀	(452)
附表 III-15 滚动轴承的温度系数 f _t	(452)

绪 论

在现代化工生产中,广泛使用着各种化工机器和设备。如进行化学反应的反应器,加热或冷却用的换热器,分离物料用的塔器,贮存物料的贮罐等,这些都是静止的设备;还有输送物料用的各种泵,压缩气体用的压缩机,分离液固相物料用的离心机等,则都是运转的机器。有的静设备上也带有具有运动的传动装置,如带搅拌的夹套反应釜、带刮板的薄膜蒸发器等即是。这些化工机器和设备是化工生产中的重要技术装备,它们质量的优劣是直接影响化工生产技术水平的重要因素。

大量事实证明,对于从事化工工艺设计和生产的工艺技术人员来说,除了应该精通化工生产工艺技术外,还必须掌握一定的机械知识,才能搞好设计,搞好生产。但机械知识的内容十分广泛,他们至少应该掌握哪些必须的机械知识呢?我们认为主要是:工程力学方面的基础知识;化工设备常用材料方面的基本知识;化工容器和设备方面的机械知识;以及机械传动方面的基础知识。因此《化工设备机械基础》课程的内容主要包括以下几个部分:

一、工程力学基础 研究构件受力的情况,进行受力大小的计算;研究材料的机械性质和构件受力变形与破坏的规律,进行构件强度、刚度和稳定性的计算。

二、薄壁容器设计 了解化工设备常用材料的各种性能;研究化工容器及设备壳体的类型、特点,设计计算方法和标准零部件的结构及其选用等问题,为常用的常低压化工设备的设计提供基础知识。

三、机械传动 研究几种典型的常用的传动装置的工作原理、失效形式、承载能力计算;了解机械通用零部件的设计方法、结构和标准选用等问题,为选择、使用和维护化工生产常用的机械传动装置提供基础知识。

上述三个部分彼此独立又互相密切联系。特别是工程力学基础知识,它是容器设计和机械传动的必备基础。

归纳起来,通过本课程的学习,化工工艺技术人员应获得对常见的、典型的常低压化工设备进行设计的初步能力和必要的机械基础知识。这也就是本课程的设课目的和要求。

本课程是一门实践性较强的技术基础课。在学习这门课程时,既要认真理解基本概念、定律、定理和公式的意义;又要通过分析例题和完成一定数量的习题,来提高运用基本理论分析问题和解决问题的能力。此外,在重视基础理论、基本计算方法及基本知识学习的同时,也要注意实际知识的积累。有条件的还应进行一次典型化工设备的课程设计,综合运用在本课程中所学到的知识,起到学以致用作用。

学好这门课程,无疑将对从事化工工艺的技术人员掌握一定的机械知识起到有益的作用,从而有可能满足用人部门希望化工工艺技术人员要“加强点机械”的要求。而一旦他们既精通工艺又懂机械,那在工作中将如虎添翼,必能在实现祖国四个现代化的伟大征途中作出更大的贡献。

第一篇 工程力学基础

概 述

化工厂中使用的机器和设备都是在各种外力的作用下进行工作，如果组成机器和设备的零部件（通称为构件）的材料选择不当，或因尺寸和形状设计不合理，则在外力的作用下可能发生破坏，从而导致整台机器或设备停止运转。为了使机器和设备能安全可靠地工作，从力学角度，构件必须满足以下几方面的要求：

- 一、要能抵抗外力对它的破坏，即构件要有一定的强度；
- 二、要不发生超出许可的变形，即构件要具有必要的刚度；
- 三、要能保持自身的几何形状，即在外力作用下构件不致突然失去原形。构件失去原形叫丧失稳定性，简称“失稳”。构件必须具有充分的稳定性。

因此，强度问题、刚度问题和稳定问题，是本篇所要研究的基本内容。但为教学方便，本篇将只讨论强度问题和刚度问题，稳定问题将在第二篇第十章外压容器设计中去研究。对强度问题和刚度问题，我们是以强度问题为重点，着重讨论构件的强度计算。

化工生产用的机器与设备，其构件的几何形状是各式各样的，但就其几何特征归纳起来，大致可分为杆件、平板和回转壳体三类。杆件的变形和应力分析比较简单，但它却是分析平板与回转壳体的基础，也是整个工程力学中最基础的内容。本篇就只研究等截面直杆的应力分析、强度计算与变形计算。关于回转壳体与平板，我们将在第二篇中讨论。

本篇包括两部分内容：第一部分是讨论物体的受力分析及其平衡规律，以解决构件所受的外力问题；第二部分主要是研究杆件的四种基本变形（拉压、剪切、扭转和弯曲）和组合变形时的应力与变形计算以及材料的机械性质，从而解决这类构件的强度计算与刚度计算问题。这两部分内容将为后两篇压力容器和机械传动零部件的设计计算打下力学方面的重要基础。

第一章 物体的受力分析及其平衡条件

本章所研究的构件是处于平衡状态下的构件。所谓“平衡状态”，就是构件受到外力作用，而相对于地面保持静止或作匀速直线运动的一种状态。显然，这是物体机械运动的一种特殊情形。本章将研究构件在外力的作用下处于平衡状态应遵循的规律。这包括两方面的问题：其一，是构件在平衡状态下受力情况的分析；其二，是在全面分析清楚构件在哪些外力作用的前提下，通过构件的受力平衡条件来进行未知力大小的计算。所以“受力分析”和“平衡条件”是这一章所要讨论的两个基本问题。本章的第一节将论述第一个问题，后三节则论述第二个问题。

通过这一章的学习，搞清作用于构件上的全部外力（包括它们的个数，它们的作用方位和大小），从而为对构件进行强度计算和刚度计算提供了前提。

§1-1 物体的受力分析

一、力的概念及其性质

1. 力的概念

力是人们从长期的观察和实践中经过抽象而得到的一个概念。人们通过推、拉、提、掷等活动，由于肌肉的紧张收缩，感受到了人对物体施加了力。后来人们进一步观察到物体与物体之间也有这样的相互作用。相互作用的结果是会引起物体运动状态的改变，也会引起物体的形状发生变化。例如，人推小车，小车由静止变为运动，运动的速度由慢变快，或者使运动方向有了改变；空中落下的物体，由于地心引力作用而越落越快；铁匠打铁，由于锻锤对锻件的冲击，使锻件改变了形状，等等。人们正是通过大量的实例和亲身感受，逐渐建立了力的概念：力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的运动状态改变，或使物体发生变形。因此，力不能脱离实际物体而存在。

由此可知，物体受力后产生的效应有两种：一种是运动状态的变化，另一种是变形。前者称为力的外效应，后者称为力的内效应。

力作用于物体，总会引起物体的变形，但是在一般情况下，工程上用的构件大都是用钢、铸铁、有色金属等材料制作的，它们都有足够的抵抗变形的能力，即在力的作用下，它们发生的变形是很微小的。这种微小的变形对研究力的外效应影响很小，可以忽略不计。因此，当对构件进行受力分析时，我们就可将原构件当作不变形的物体，即刚体来处理。所谓刚体就是在外力的作用下，形状和大小都保持不变的物体。显然，刚体是一个抽象化的概念，这种科学的抽象，将能更容易，更深刻地揭示物体受力平衡的客观规律。这样，当我们称物体或构件为刚体时，就意味着我们不去考虑力对它的内效应。在这一章，我们研究的对象都视为刚体，讨论的也只是力的外效应。如果在研究的问题中，物体的变形成为主要因素（虽然变形仍然很微小）时，就不能再把物体视为刚体。这种情形将在以后的各章中见到。

实践表明，力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点三个要素。表示力的大小，

必须选择一个标准的力作为单位力。本书采用国际单位制(SI)，以牛顿(N)作为力的计算单位。牛顿的一千倍，称为千牛顿(kN)。力是有大小和方向的量，所以是矢量。上述三要素可以用一个带箭头的有向线段来表示，如图1-1所示。线段长度 AB

(按一定的比例，如1mm代表100N)代表力的大小；线段的方位和箭头指向表示力的方向；线段的始端 A 或末端 B 表示力的作用点。包含线段 AB 的直线 mn 称为力的作用线。为了区别矢量和标量，矢量用黑体字母表示，而白体的同一字母表示这个矢量的模(大小)。例如用 $\mathbf{F}$ 表示力的矢量， F 表示这个力的大小。 A 为始端， B 为末端的矢量也可记为 $\overrightarrow{AB}$ 。

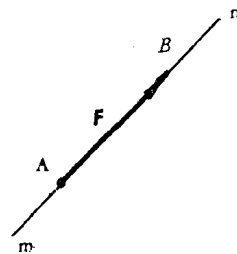


图1-1 力的三要素

2. 力的基本性质

人们通过长期的生活和生产实践，由感性到理性的认识，不仅建立了力的概念，而且还认识了力的各种性质。这些性质反映了力所遵循的客观规律，其中最基本的性质有以下四条。

(1) 二力平衡条件

如果刚体只受两个力的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(简称等值、反向、共线)。这就是二力平衡条件。

如图1-2，杆 AB 的两端分别受到 $\mathbf{F}_A$ 和 $\mathbf{F}_B$ 的作用而处于平衡状态时，则必须

$$\mathbf{F}_A = -\mathbf{F}_B$$

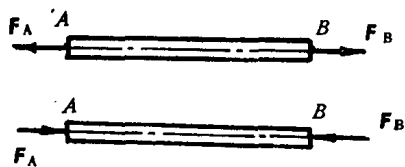


图1-2 二力平衡条件

即 $\mathbf{F}_A$ 和 $\mathbf{F}_B$ 必须等值、反向、共线。 $\mathbf{F}_A$ 和 $\mathbf{F}_B$ 称为作用在同一物体上的一对平衡力。

必须注意，对于非刚体来说，二力平衡条件只是必要条件而非充分条件，例如，象绳索一类的柔性体受两个等值、反向、共线的两个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。

只受两个力作用而处于平衡的构件，称为二力构件，当构件的形状为杆状时，则称二力杆。二力杆的受力特点是，所受的二力必定沿作用点的连线。

(2) 加减平衡力系原理和力的可传性原理

作用在同一物体上的两个或两个以上的力称为力系。如果物体在力系作用下处于平衡状态，这样的力系就称为平衡力系。显而易见，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的条件，这个条件就叫力系平衡条件。上述二力平衡中的一对平衡力就是最简单的一种平衡力系，二力平衡条件就是最简单的力系平衡条件。

由于平衡力系中各力对刚体作用的外效应是彼此抵消的(若各力的外效应不抵消，刚体的运动状态就要发生变化，刚体就不处于平衡状态，力系也就不成其为平衡力系)，所以对刚体而言，加上一个平衡力系或减去一个平衡力系，并不影响刚体的运动状态。这就是说，在作用于刚体上的任一力系中，加上或除去任一平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用。此即加减平衡力系原理。

应用二力平衡条件和加减平衡力系原理可得到下面的一个重要推论：作用在刚体上的力可沿其作用线移到该刚体上任一点，而不改变此力对该刚体的作用。力的这个可传递的性质称为力的可传性原理。例如，已知小车在 A 点受推力 $\mathbf{F}$ 的作用[图1-3(a)]，在 $\mathbf{F}$ 力作用线上的任一点 B ，沿 $\mathbf{F}$ 的作用线加一对平衡力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ ，并使它们的大小与 $\mathbf{F}$ 力的大小相等，如图

1-3(b)所示；再从图1-3(b)中除去一对平衡力 F 、 F_2 [图1-3(c)]；显然，这三种情况都是等效的。这样就将原来作用于 A 点的力 F ，沿着作用线移到了 B 点。经验也告诉我们，在 A 点推车与在 B 点拉车两者的外效应是完全相同的。

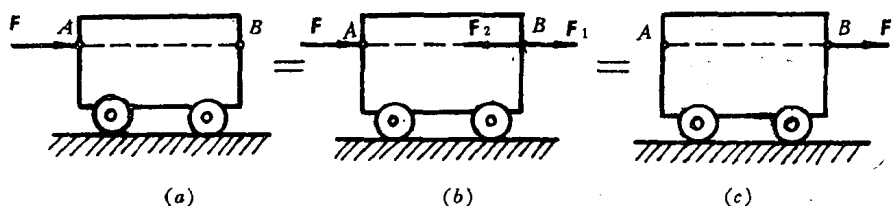


图1-3 力的可传性

对刚体而言，由于存在力的可传性原理，力的作用点已不是决定力的作用效果的要素，而已为力的作用线所代替。因此，在研究力对物体的外效应时，力可沿其作用线滑动，故将力视为滑动矢量。

必须注意，力的可传性原理只适用于刚体，而不适用于变形体。例如一根直杆受到一对平衡拉力 F 和 F' 作用时，它将沿轴线伸长 [图1-4(a)]；若将二力沿作用线互相易位，则杆将受压力作用而沿轴向缩短 [图1-4(b)]。显然，伸长和缩短是两种完全不同的效应。所以在研究力对物体的内效应时，力的可传性原理便不成立，此时力的作用点是决定力的作用效果的要素，必须将力视为固定矢量。

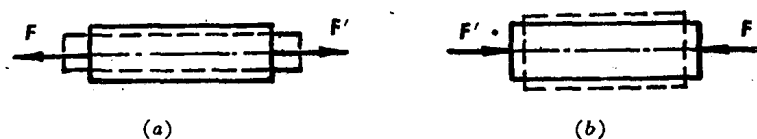


图1-4 力的可传性原理不适用于变形体

显然，加减平衡力系原理也只适用于刚体。读者可自己证明之。

(3) 力的平行四边形法则

作用于刚体上的力系如果可以用一个力代替而不改变对刚体的效应，那么这个力称为力系的合力，而力系中的各个力称为分力。由各分力求合力叫做力的合成。两共点力的合成符合下述规律：作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力，合力也作用于该点，合力的大小和方向由以两分力为邻边所画出的平行四边形的对角线来表示 [图1-5(a)]。这就是力的平行四边形法则。图中 R 表示合力， F_1 、 F_2 表示分力。

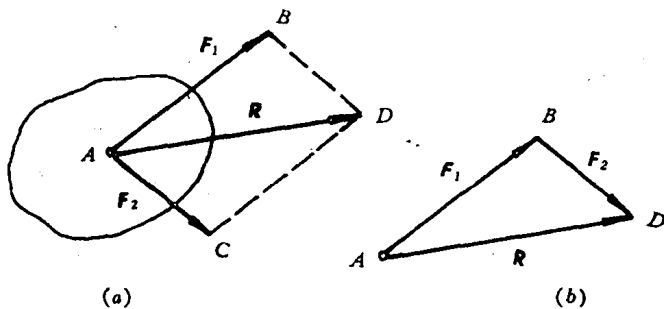


图1-5 力的平行四边形法则和力三角形法

必须注意，两个力相加(合成)不能简单地求代数和，而要用平行四边形法则求几何和，即矢量和。其矢量表达式为

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

由图1-5 (b) 可见，求合力 R 时，实际上不必作出整个平行四边形，只要以力 F_1 ($\overrightarrow{AB}$) 的末端 B 作为力 F_2 ($\overrightarrow{AC}$) 的始端画出 F_2 (即两分力首尾相接)，那么矢量 $\overrightarrow{AD}$ 就代表合力 R 。合力和分力所构成的三角形 ABD 称为力三

角形。

角形，用力三角形求两力的合力的方法，称为力三角形法。

利用力的平行四边形法则，也可以把作用在物体上的一个力分解为相交的两个分力，分力与合力作用于同一点。由于用同一条对角线可以作出无穷多个不同的平行四边形，所以如不附加其它条件，一个力分解为相交的两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的两个分力 [图1-6(a)]，特别有用的是分解为方向已知互相垂直的两个分力 [图1-6(b)]。这种分解称为正交分解，所得的两个分力称为正交分力。

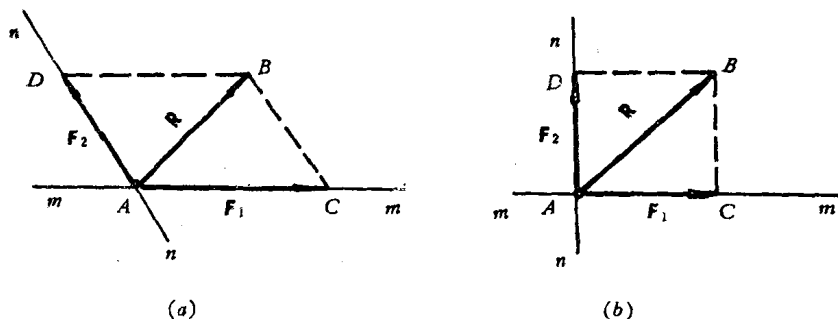


图1-6 力的分解

应用上述几个力的基本性质，可以推导出关于三力平衡时作用线相交的定理，即：如果一物体受三个力作用而处于平衡时，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。这就是三力平衡定理。

此定理很容易证明：设有互相平衡的三个力 F_1 、 F_2 和 F_3 分别作用于物体 A 、 B 和 C 三点上(图1-7)。已知力 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点。根据力的可传性原理，可将 F_1 及 F_2 移至 O 点，并用平行四边形法则求得其合力 R ，以代替 F_1 及 F_2 。又根据二力平衡条件， R 应与 F_3 等值、反向、共线，所以 F_3 的作用线也必通过 O 点。

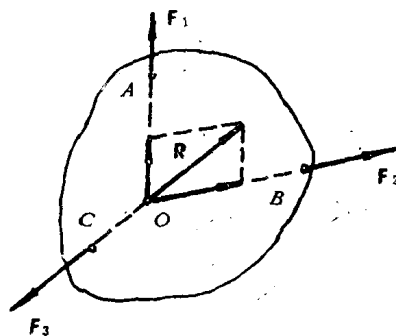


图1-7 三力平衡汇交

显然，这三个互相平衡的力是在同一平面内的，而且互不平行。当物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。

(4) 作用和反作用定律

力是物体之间的相互机械作用，当甲、乙两物体发生相互作用，甲物体对乙物体有一作用力时，乙物体对甲物体必有一反作用力。作用力与反作用力总是同时发生，其大小相等、方向相反，沿同一直线分别作用在两个互相作用的物体上。这就是作用和反作用定律。

作用与反作用定律是一个普遍性的定律，在研究几个物体构成的系统之受力关系时，常常要用到这个定律。这个定律表明，所有的力都是成对存在的，有作用力必有反作用力，两者同时出现，同时消失，单方面的作用是不存在的。

还应强调指出的是作用力与反作用力虽然大小相等、方向相反，沿同一作用线，但并不作用在同一物体上。因此，不能错误地认为这两个力互成平衡。这与二力平衡条件有本质的区别。二力平衡条件中的一对平衡力是作用在同一物体上的。例如，物体 A 受到地球的引力 G (图1-8)，则根据作用与反作用定律，与此同时物体 A 也必以与力 G 大小相等、方向相反且

沿同一作用线的力 G 吸引地球。 G 与 G' 虽也符合等值、反向、共线,但却作用在两个物体上,因此 G 与 G' 不是一对平衡力。

上述四条力的基本性质是静力学的基础,在后面进行刚体的受力分析,力系的简化以及研究刚体受力平衡的规律时经常要用到,故必须牢牢掌握。

二、约束与约束反力

机器设备和结构物中的每个构件,总是与它周围的其它构件相联接或接触的,在互相联接或接触的构件之间,相互作用着力。现在就是要来分析构件在互相联接或接触处存在的作用力。把此种力分析清楚往往是对构件进行受力分析的关键。

若一物体能够在空间沿任何方向,不受限制的自由运动,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。那些限制或阻碍非自由体运动的物体就称为约束。例如,悬挂着的电灯,受到电线的限制,不能垂直向下运动;轨道上行驶的火车,受到钢轨的限制,只能沿轨道运动;转轴受轴承的限制,只能在轴承孔内转动,不能沿轴孔径向移动。例中的电灯、火车和转轴均为非自由体,而限制它们自由运动的电线、钢轨、轴承就分别是它们各自的约束。约束可能是电线、轨道、轴承,也可能是地脚螺栓、基础、地面、拉杆、绳索以及一些其它物体。如图1-9所示的塔器,是用地脚螺栓固定在基础上的,塔器受到重力 G 和塔侧面上的风力 q (单位面积上的风力) 的作用。如以塔器为研究对象,那么地脚螺栓和基础即为塔器的约束,前者阻止塔器因风力作用而向右移动或翻倒,后者阻止塔器因自重而向下运动。

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;人们作用于物体上的拉力、推力;压力容器上所受的压力等等,都是主动力(工程上常称主动力为载荷)。当非自由体在主动力作用下沿着约束所限制的方向运动或有运动趋势时,则在非自由体与其约束之间必将产生相互作用的力,这时约束作用于非自由体上的力就称为约束反力,简称反力。显然,约束反力的方向,总是和该约束所能限制的运动方向相反。这是确定约束反力方向或方位的一个原则。

物体所受的主动力往往是给定的或可测定的,所以是已知外力;而物体所受的约束反力,其方向(或其作用线的方位)需根据约束的性质定出,其大小一般总是未知的,要由力系的平衡条件来确定。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哪些外力的作用,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,我们来讨论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. 柔性体约束

一些柔软物体,如绳索、胶带、链条、钢丝绳等产生的约束称为柔性体约束。这种约束的特点是,只有当它们被拉直时才能起到约束作用,故当非自由体受到柔性体约束时,它们只能阻止非自由体沿着柔性体中心线伸直方向的运动,而不能限制其它方向的运动。因此,

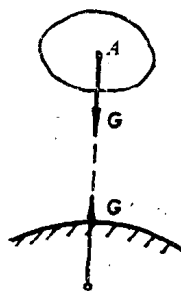


图1-8 作用与反作用

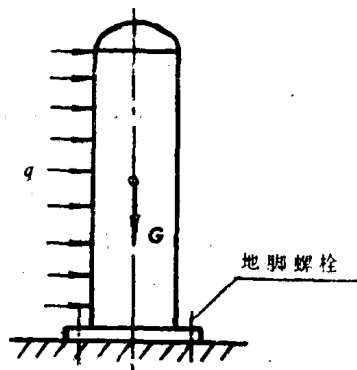


图1-9 地脚螺栓和基础是塔器的约束

柔性体约束反力的方向一定沿着柔性体的中心线，且背离被约束的非自由体。如图 1-10(a) 表示用绳子悬挂一重物。绳可阻止物体向下（即沿绳子伸直的方向）的运动，它所产生的约束反力 T 竖直向上 [图 1-10(b)]。又如图 1-11(a) 表示用钢丝绳起吊钢管，此时钢丝绳对钢管的约束反力为 T_1 与 T_2 [图 1-11(b)]，它们的方向是沿着绳子的中心线，且背离钢管。

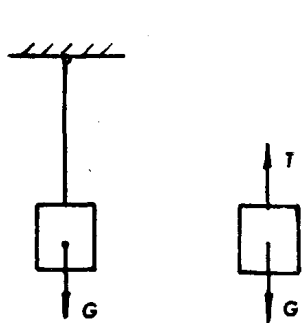


图 1-10 柔性体约束例 1

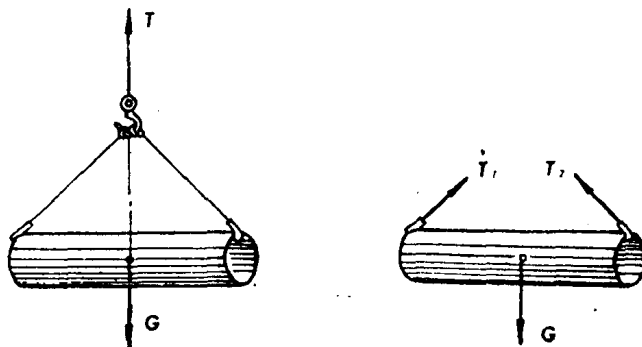


图 1-11 柔性体约束例 2

2. 光滑面约束

一些光滑支承表面，如导轨、托轮、齿轮轮齿侧面、汽缸壁等产生的约束便为光滑面约束。当非自由体受到光滑面约束时，在不计摩擦的情况下，这种约束只能阻止非自由体沿着接触点的公法线朝向支承面的运动，而不能限制其离开支承面和沿其切线方向的运动。因此，光滑面约束反力的方向应通过接触点，沿着公法线，并指向被约束的非自由体。图 1-12 表示车轮与轨道接触，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 则沿公法线铅直向上。图 1-13 表示圆筒形容器在拼装时搁置在托轮上，容器与托轮分别在点 A 、 B 接触，托轮作用于容器的约束反力 N_A 和 N_B 分别沿着接触点的公法线，即沿圆筒形容器的半径方向，指向圆心 O 。

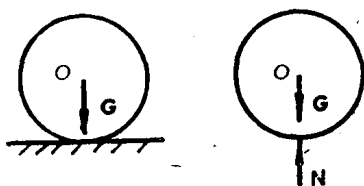


图 1-12 光滑面约束例 1

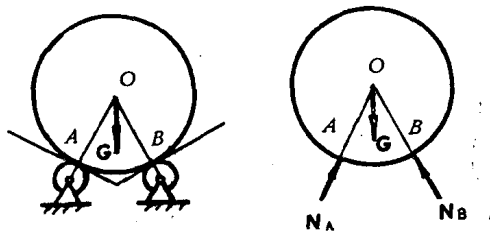


图 1-13 光滑面约束例 2

3. 圆柱铰链约束

图 1-14(a) 为一种圆柱铰链，其主要结构是将两个物体各钻圆孔，中间用圆柱形销钉 A 联接起来。销钉与销孔的接触可认为是光滑的，那么销钉只能阻止两物体的相对移动，而不能限制两物体的相对转动，具有这种特点的约束，就称为铰链。销钉 A 的约束作用，是阻止物体在与销钉 A 的轴线相垂直的平面内沿任何方向的移动。因此，销钉作用于被约束物体上的约束反力，可在该平面内过销钉（或销孔）中心的任意方向上产生。也就是说，约束反力一定在与销钉轴线相垂直的平面内，其作用线（即反力的方位）通过销孔中心，但其方向需根据其上的主动力的作用而定。通常就用两个正交分力 X_A 和 Y_A 来表示销钉的约束反力 [图 1-14(b)]。图 1-14(c) 是这种铰链的简化示意图，图 1-14(d) 是约束反力的简化表示法。

若把销钉联接的两个物体中的某一个固定于地面或机架，便成为铰链支座约束（简称铰