

“十二五”普通高等教育本科规划教材

新 全国高等院校 **过程装备与控制工程** 专业系列规划教材

过程装备机械基础

(第2版)

主 编 于新奇

基础性、工程性、实用性并存
系统阐述了过程设备的基础知识
着力培养学生解决工程问题的能力



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

“十二五”普通高等教育本科规划教材
全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材

过程装备机械基础(第2版)

主 编	于新奇		
参 编	郭彦书	赵志广	彭培英
	朱玉峰	刘庆刚	齐安宾
	朱海荣	刘跃辉	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了化学工程与工艺类专业学生所应具备的机械基础知识, 内容主要包括 5 部分: 第 1 部分工程力学基础(第 1~6 章)、第 2 部分机械传动基础(第 7~9 章)、第 3 部分过程装备材料(第 10 章)、第 4 部分压力容器设计基础(第 11~13 章)和第 5 部分典型过程设备(第 14~16 章)。各章由工程实际案例引出主要内容, 突出实用特色, 通过实例阐明各类过程设备设计的具体步骤和方法, 各章后附有习题, 可供读者进一步复习和巩固相关知识使用。

本书可作为高等学校本科或专科化学工程与工艺类专业及相近专业(石化、生化、制药、环保、安全、冶金、能源等)的教材, 也可供有关科研、设计部门和生产单位的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

过程装备机械基础/于新奇主编. —2 版. —北京: 北京大学出版社, 2013.7

(全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材)

ISBN 978-7-301-22627-8

I. ①过… II. ①于… III. ①化工过程—化工装备—高等学校—教材 IV. ①TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 124156 号

书 名: 过程装备机械基础(第 2 版)

著作责任者: 于新奇 主编

策 划 编 辑: 童君鑫 黄红珍

责 任 编 辑: 黄红珍

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22627-8/TH · 0352

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京世知印务有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 441 千字

2009 年 8 月第 1 版

2013 年 7 月第 2 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

第2版前言

《过程装备机械基础》自2009年出版以来,深受高校师生和工程技术人员欢迎。近年来随着科学技术的发展,过程装备向大型化发展,新材料、新结构、新工艺、新方法不断出现,设计方法也进行了更新。为此,根据最新国家标准规范,对第1版《过程装备机械基础》进行了修订。

编写第2版时仍保留第1版的基础性、系统性、工程性和实用性特色,结合过程工业的特点,重点介绍了拉伸、剪切、扭转和弯曲的基本概念与计算,系统地阐述了常用机械传动装置和过程设备的结构特点、基本原理、设计方法和工程应用,以满足读者拓宽专业知识领域、加强基本技能训练,培养工程与应用能力的教学参考需要。编者在编写本版时,努力反映新的技术进展,如对压力容器、换热设备的设计及所用材料等内容均按照最新国家标准进行修订;另外本书对章节进行了调整和删减,将平面汇交力系和平面一般力系合并为平面力系,对压力容器的监察管理和定期检验内容进行适当删减,不再单独成章,而是与其他章节相关的内容安排在相应章节;本版还对例题和习题进行了优化调整,以更好地培养学生分析和解决工程实际问题的能力。

本次修订全书由于新奇担任主编,并编写了第3章和第16章。第1章、第4章由齐安宾、刘跃辉编写;第2章由朱玉峰、朱海荣编写;第5章和第6章由朱玉峰编写;第7~9章由赵志广编写;第10章由刘庆刚、于新奇编写;第13章由郭彦书、刘庆刚编写;第11章和第12章由彭培英编写;第14章和第15章由郭彦书编写。

限于编者的学识和水平,书中难免存在缺陷和不足之处,恳请广大读者对本书提出宝贵意见。

编者
2013年2月

目 录

第1章 静力学基础	1	3.2.1 工程实例	28
1.1 静力学的基本概念	1	3.2.2 直杆拉伸与压缩时 横截面上的内力	29
1.2 静力学公理	3	3.2.3 直杆拉伸与压缩时 横截面上的应力	30
1.3 约束与约束反力	5	3.2.4 直杆拉伸与压缩时的变形	32
1.3.1 基本概念	5	3.3 材料拉伸与压缩的力学性能	34
1.3.2 约束类型	5	3.3.1 拉伸试验及材料的力学性能	34
1.4 受力分析和受力图	7	3.3.2 材料压缩时的力学性能	36
本章小结	8	3.4 直杆拉伸与压缩时的强度	37
习题	9	3.4.1 许用应力与安全系数	37
第2章 平面力系	11	3.4.2 直杆拉伸与压缩时的 强度条件	38
2.1 平面汇交力系的合成	12	3.5 热应力	40
2.1.1 平面汇交力系	12	本章小结	41
2.1.2 平面汇交力系的合成方法	12	习题	42
2.2 平面汇交力系的平衡条件	14	第4章 剪切及扭转	44
2.2.1 平面汇交力系平衡的 几何条件	14	4.1 剪切与挤压	44
2.2.2 平面汇交力系平衡的 解析条件	14	4.1.1 剪切变形	44
2.3 力矩与力偶	16	4.1.2 剪切及其强度计算	45
2.3.1 力矩	16	4.1.3 剪切胡克定律	46
2.3.2 力偶与力偶矩	16	4.1.4 挤压及其强度计算	46
2.4 平面一般力系及其简化	18	4.2 圆轴扭转时的外力和内力	48
2.4.1 力的平移定理	18	4.2.1 扭转实例	48
2.4.2 平面一般力系的简化	18	4.2.2 外力偶矩	48
2.4.3 固定端约束	19	4.2.3 扭转时的内力——扭矩	48
2.5 平面一般力系的平衡条件和 平衡方程	20	4.3 圆轴扭转时的应力	51
本章小结	22	4.4 圆轴扭转时的强度计算和刚度计算	52
习题	23	4.4.1 强度计算	52
第3章 直杆的拉伸与压缩	27	4.4.2 圆轴的变形及刚度计算	53
3.1 构件变形的基本形式	28	本章小结	54
3.2 直杆拉伸与压缩的力与变形	28	习题	55

第5章 梁的弯曲	57	6.3 三向应力状态与广义胡克定律	84
5.1 梁的弯曲实例与梁的类型	57	6.3.1 三向应力状态下的应力计算 ...	84
5.1.1 梁的弯曲变形实例	57	6.3.2 广义胡克定律	85
5.1.2 受弯杆件受力及变形的特点 ...	58	6.4 强度理论	85
5.1.3 梁的分类及梁上的载荷	58	6.4.1 强度理论的概念	85
5.2 梁弯曲时的内力	59	6.4.2 常用强度理论	86
5.2.1 横截面内的内力	60	6.5 组合变形时的强度计算	87
5.2.2 剪力与弯矩的求取	60	6.5.1 组合变形实例	87
5.2.3 剪力图和弯矩图	61	6.5.2 弯曲与拉伸(压缩)的 组合变形	88
5.3 梁弯曲时的正应力	64	6.5.3 弯曲与扭转的组合变形	91
5.3.1 实验观察和假设推论	64	本章小结	93
5.3.2 弯曲正应力计算公式	65	习题	94
5.3.3 轴惯性矩和抗弯截面模量的 计算	67	第7章 带传动及链传动	97
5.4 梁的强度计算	68	7.1 带传动类型、特性和应用	97
5.5 提高梁强度的措施	70	7.1.1 带传动的组成和传动原理	98
5.5.1 梁的合理截面形状	70	7.1.2 带传动的特点 and 设计参数	98
5.5.2 梁的合理工作位置	71	7.1.3 带传动的应用	99
5.5.3 梁的合理支座位置	71	7.1.4 V带及带轮的结构	99
5.6 梁的变形	72	7.1.5 带传动的使用和维护	101
5.6.1 梁的挠度和转角	72	7.2 带传动的工作特性	102
5.6.2 梁的挠度和转角的求取	72	7.2.1 带传动的受力	102
5.6.3 梁的刚度校核及提高 梁弯曲刚度的措施	74	7.2.2 带的弹性滑动	103
本章小结	75	7.3 V带传动的设计	104
习题	76	7.4 链传动简介	104
第6章 复杂应力状态与强度理论	79	7.4.1 链传动的基本构成和 几何参数	104
6.1 应力状态的概念	79	7.4.2 滚子链条和链轮的结构	105
6.1.1 直杆受轴向拉伸或压缩 载荷时斜截面上的应力	80	本章小结	106
6.1.2 一点的应力状态与单元体	81	习题	106
6.1.3 主平面与主应力	81	第8章 齿轮传动	108
6.1.4 应力状态分类	82	8.1 概述	109
6.2 二向应力状态分析	83	8.1.1 齿轮传动的分类	109
6.2.1 二向应力状态下斜截面上 应力的计算	83	8.1.2 齿轮传动的特点	110
6.2.2 二向应力状态下主应力和 最大剪应力的计算	83	8.2 齿轮传动基本定律与渐开线齿廓	110
		8.2.1 齿廓啮合基本定律	110
		8.2.2 渐开线及渐开线齿廓	111
		8.2.3 渐开线齿轮的啮合特点	112

8.3 标准直齿圆柱齿轮各部分名称与尺寸	113	10.1.1 力学性能	139
8.3.1 齿轮各部分的名称	113	10.1.2 物理性能	139
8.3.2 标准直齿圆柱齿轮基本参数与几何尺寸	114	10.1.3 化学性能	140
8.4 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动特性	115	10.1.4 加工工艺性能	140
8.4.1 渐开线齿轮正确啮合的条件	115	10.2 碳钢和铸铁	140
8.4.2 渐开线齿轮连续转动的条件	116	10.2.1 碳钢	140
8.4.3 渐开线齿轮转动的中心距	117	10.2.2 铸铁	144
8.5 齿轮的失效形式与齿轮材料	117	10.3 低合金钢与合金钢	145
8.5.1 齿轮的失效形式	117	10.3.1 合金元素对钢材性能的影响	145
8.5.2 设计准则	118	10.3.2 低合金钢、合金钢的分类与牌号	146
8.5.3 齿轮的材料	118	10.3.3 普通低合金结构钢	147
8.6 其他齿轮传动简介	119	10.3.4 不锈钢	148
8.6.1 平行轴斜齿圆柱齿轮传动	119	10.4 有色金属	150
8.6.2 直齿锥齿轮传动	120	10.4.1 铝及铝合金	150
8.6.3 蜗杆传动	120	10.4.2 铜及铜合金	151
本章小结	121	10.4.3 钛及钛合金	152
习题	122	10.5 非金属材料	152
第 9 章 轴、轴承和联轴器	123	10.5.1 无机非金属材料	152
9.1 轴	124	10.5.2 有机非金属材料	153
9.1.1 轴的分类	124	10.5.3 复合材料	154
9.1.2 轴的材料	125	10.6 过程装备的腐蚀与防腐措施	154
9.1.3 轴的结构设计	125	10.6.1 金属腐蚀的原理	154
9.1.4 轴的强度校核	127	10.6.2 金属腐蚀破坏的形式	157
9.2 轴承	127	10.6.3 金属设备的防腐措施	158
9.2.1 轴承的功用和分类	127	本章小结	160
9.2.2 滑动轴承	128	习题	160
9.2.3 滚动轴承	130	第 11 章 内压力容器设计基础	162
9.3 联轴器	133	11.1 概述	163
9.3.1 联轴器的类型	133	11.1.1 压力容器基本结构	163
9.3.2 联轴器的选择	136	11.1.2 压力容器分类	164
本章小结	136	11.2 内压力容器设计理论基础	167
习题	137	11.2.1 回转壳体的几何概念	167
第 10 章 过程装备材料	138	11.2.2 无力矩理论的基本方程	168
10.1 材料的性能	139	11.2.3 无力矩理论的应用	170
		11.3 边缘应力	174
		11.3.1 边缘应力的概念	174
		11.3.2 边缘应力的特性	175

11.3.3 边缘应力的处理	175	13.2.1 卧式容器支座	217
11.4 内压容器设计	176	13.2.2 立式容器支座	220
11.4.1 弹性失效设计准则	176	13.3 容器开孔与补强	221
11.4.2 内压圆筒和内压球壳的 设计	177	13.3.1 容器的开孔与接管	221
11.4.3 设计参数	179	13.3.2 开孔补强	223
11.4.4 内压封头	186	13.4 容器的焊接结构	225
11.5 容器的压力试验	190	13.4.1 焊接接头的形式	225
11.5.1 压力试验的目的与对象	190	13.4.2 坡口形式	225
11.5.2 试验方法	190	13.4.3 压力容器焊接结构设计的 基本原则	226
11.5.3 试验压力及应力校核	190	本章小结	227
本章小结	193	习题	228
习题	194	第 14 章 管壳式换热设备	229
第 12 章 外压容器设计	196	14.1 概述	229
12.1 概述	197	14.2 管壳式换热器的形式	230
12.1.1 外压容器失稳	197	14.2.1 固定管板式换热器	230
12.1.2 临界压力	198	14.2.2 浮头式换热器	231
12.2 外压圆筒的稳定性计算	199	14.2.3 填料函式换热器	231
12.2.1 长圆筒的临界压力	199	14.2.4 U 形管式换热器	232
12.2.2 短圆筒的临界压力	200	14.3 管壳式换热器的结构设计	232
12.2.3 临界长度	200	14.3.1 换热管的选用	232
12.2.4 加强圈	200	14.3.2 换热管在管板上的排列	233
12.3 外压圆筒的设计计算	201	14.3.3 换热管与管板的连接	233
12.3.1 解析法	201	14.3.4 管板与壳体的连接	235
12.3.2 图算法	202	14.3.5 管箱与管束分程	236
12.4 外压封头的设计计算	207	14.3.6 折流板	238
本章小结	209	14.3.7 导流筒与防冲挡板	239
习题	210	14.3.8 膨胀节	239
第 13 章 压力容器零部件	212	14.4 管壳式换热器的强化传热	240
13.1 法兰	212	14.4.1 强化传热的原理	240
13.1.1 法兰连接的结构及密封 原理	213	14.4.2 管内放置强化传热元件	241
13.1.2 法兰类型	213	14.4.3 异型管强化传热	242
13.1.3 影响法兰密封的因素	214	14.4.4 壳程强化传热	245
13.1.4 压力容器法兰与管法兰 标准	216	本章小结	246
13.2 容器支座	217	习题	247
		第 15 章 塔设备	248
		15.1 概述	249

15.1.1 塔设备的应用	249	16.2 釜体与传热装置	269
15.1.2 对塔设备的要求	249	16.2.1 釜体几何尺寸的确定	269
15.1.3 塔设备的分类及总体结构 ...	249	16.2.2 夹套的结构与尺寸	271
15.2 板式塔	251	16.2.3 蛇管的结构与尺寸	274
15.2.1 整块式塔盘的板式塔	251	16.2.4 工艺接管	275
15.2.2 分块式塔盘的板式塔	256	16.3 搅拌装置	277
15.3 填料塔	257	16.3.1 搅拌器的形式与选用	277
15.3.1 填料的支承装置	257	16.3.2 流型	279
15.3.2 液体分布装置	258	16.3.3 搅拌附件	280
15.3.3 液体再分布装置	262	16.3.4 搅拌轴	281
15.4 塔设备的附件	262	16.4 传动装置	283
15.4.1 除沫器	262	16.5 轴封装置	286
15.4.2 裙座	263	16.5.1 填料密封	286
本章小结	265	16.5.2 机械密封	289
习题	265	16.5.3 机械密封与填料密封的 比较	290
第 16 章 搅拌反应设备	267	本章小结	291
16.1 概述	268	习题	291
16.1.1 搅拌的目的	268	参考文献	293
16.1.2 搅拌反应釜的基本结构	268		

第 1 章 静力学基础

教学目标

通过本章的学习，掌握静力学中的基本概念、公理；熟练掌握工程上常见典型约束的类型、约束反力及其特点；学会对构件进行受力分析，掌握构件受力图的绘制方法。

教学要求

能力目标	知识要点	权重	自测分数
了解力、刚体的基本概念，掌握静力学公理及推论	力的概念、静力学公理	40%	
了解常见的约束类型和约束性质，能够熟练画出各类约束的约束反力	约束的概念、约束反力	30%	
掌握物体受力分析的方法，能够正确画出受力分析图	物体的受力分析步骤及受力图	30%	



引例

当一个刚体受两个力作用而处于平衡状态时，其充分与必要条件是：这两个力大小相等，方向相反，作用在同一直线上，这就是二力平衡公理。它在日常生活中有着广泛的应用。

案例：杂技演员的“顶缸”表演就是二力平衡的一个例子。演员随着缸的不断晃动，不时变换身体的位置，其目的就是始终使缸的重力作用线与头顶缸的力的作用线重合，以保持缸体的相对平衡。

1.1 静力学的基本概念

静力学是研究物体平衡的科学。所谓平衡，是指物体相对于地球保持静止状态或者作匀速直线运动状态。处于平衡状态下的物体所受若干力的作用效果相互抵消，因此物体的运动状态保持不变。

静力学中研究物体平衡时通常会把物体简化为刚体。所谓刚体，是指在力作用下不变形的物体，即刚体内部任意两点之间的距离保持不变。这是一个理想化的力学模型，在实际生产中，物体受力时其内部各点间的相对距离都要发生改变，这些微小的

改变累积起来可使物体的形状和尺寸发生改变。如果物体的变形很小,变形对物体的运动和平衡的影响甚微,则在研究力的作用效应时,变形可以忽略不计,此时该物体可抽象为刚体。

力的概念产生于人类从事的生产劳动过程中。当人们用手握、拉、掷及举起物体时,由于肌肉紧张而感受到力的作用,这种作用广泛存在于人与物及物与物之间。例如,奔腾的水流能推动水轮机旋转,锤子的敲打会使烧红的铁块变形等。

1. 力的定义

力是物体之间相互的机械作用,这种作用将使物体的机械运动状态发生变化,或者使物体产生变形。前者称为力的外效应,后者称为力的内效应。

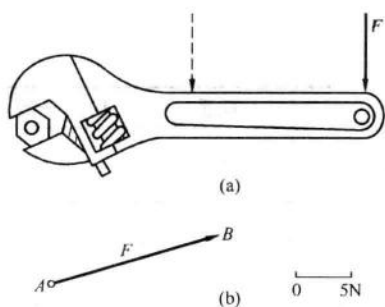


图 1.1 力的三要素

2. 力的三要素

实践证明,力对物体的作用效应,取决于力的大小、方向(包括方位和指向)和作用点的位置,这3个因素就称为力的三要素。在这三个要素中,如果改变其中任何一个,也就改变了力对物体的作用效应。例如,用扳手拧螺母时,作用在扳手上的力,因大小不同,或方向不同,或作用点不同,它们产生的效果就不同,如图 1.1(a)所示。

注意:

(1) 力是矢量。力是一个既有大小又有方向的量,满足矢量的运算法则。力常用一个带箭头的有向线段来表示,如图 1.1(b)所示。线段长度 AB 按一定比例代表力的大小,线段的方位和箭头表示力的方向,其起点或终点表示力的作用点。此线段的延伸称为力的作用线。用 F 代表力矢量,并以同一字母的非黑体字 F 代表力的大小。

(2) 力的单位。力的国际制单位是牛顿或千牛顿,其符号为 N 或 kN 。

3. 集中力、均布力(均布载荷)

(1) 集中力。当力的作用面积很小,可以看作力作用在一点上,这种力称为集中力,如图 1.2(a)所示。

(2) 分布力。当力的作用范围比较大时称为分布力,如图 1.2(b)所示。其大小用分布力集度 $q(x)$,即单位长度力的大小来表示,单位为 N/m 。当 $q(x)$ 为常数时又称为均布力或均布载荷,如图 1.2(c)所示。

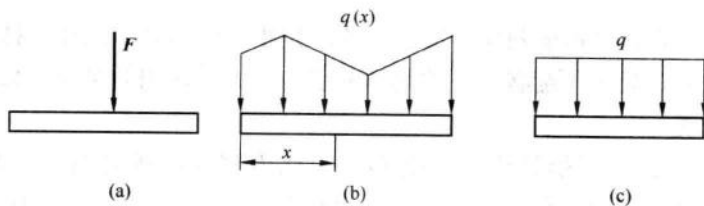


图 1.2 集中力与分布力

1.2 静力学公理

1. 二力平衡公理

当一个刚体受两个力作用而处于平衡状态时，其充分与必要条件是：这两个力大小相等，方向相反，作用在同一直线上，简称等值、反向、共线，如图 1.3 所示。

这个公理揭示了作用于物体上的最简单的力系在平衡时所必须满足的条件，它是静力学中最基本的平衡条件，是推证各种力系平衡条件的基础。

只受两个力作用而平衡的物体称为二力构件，如图 1.4(a)中的 AB 为二力构件。此二力构件所受的两个力必然沿两个作用点的连线，且等值、反向， AB 的受力如图 1.4(b) 所示。

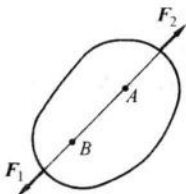


图 1.3 二力平衡

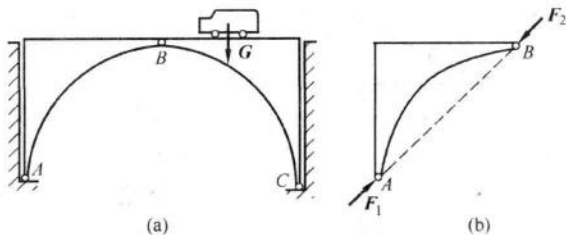


图 1.4 二力构件

2. 加减平衡力系公理

在刚体力系中，加上或减去任一平衡力系，不会改变原力系对刚体的作用效应。这个公理是力系简化的依据，因为一个平衡力系不会改变物体的原有状态。依据这一公理，可以得出一个重要推论，即力的可传性。

推论 力的可传性原理：作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内任一点，而不改变原力对刚体的作用效应。例如，图 1.5 中在车后 A 点加一水平力推车，与在车前 B 点加一水平力拉车，其效果是一样的。

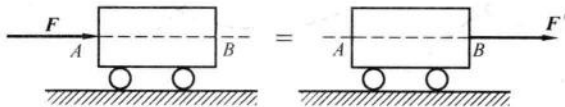


图 1.5 力的可传性(1)

证明：

(1) 如图 1.6(a)所示，刚体上有一力 F 作用于 A 点。

(2) 在力的作用线上任取一点 B ，并在 B 点加一平衡力系(F_1, F_2)，使 $F_1 = -F_2 = -F$ ；由加减平衡力系公理知，这并不影响原力 F 对刚体的作用效应，如图 1.6(b)所示。

(3) 再从该力系中去掉平衡力系(F, F_1)，则剩下的 F_2 与原力 F 等效，如图 1.6(c)所示。这样就把原来作用在 A 点的力 F 沿其作用线移到了 B 点。

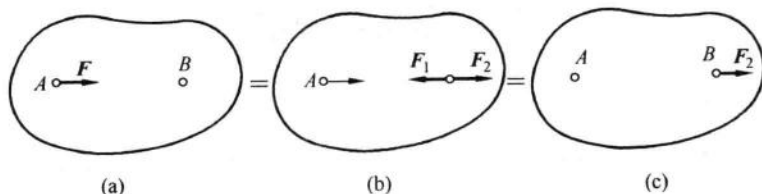


图 1.6 力的可传性(2)

3. 力的平行四边形公理

作用在刚体上同一点的两个力,可以合成为作用于该点的一个合力,它的大小和方向由这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来表示,如图 1.7 所示。

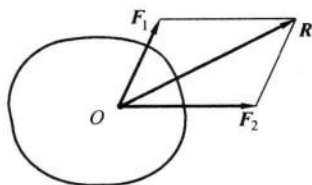


图 1.7 力的合成

其矢量表达式为

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

即作用在物体上同一点的两个力的合力等于两分力的矢量和。

推论 三力平衡汇交定理:刚体在三个力作用下平衡,若其中任意两个力的作用线相交于一点,则第三个力的作用线也必然交于同一点。

证明: 设在刚体上的 A 、 B 、 C 三点分别作用有力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 、 $\mathbf{F}_3$, $\mathbf{F}_2$ 和 $\mathbf{F}_3$ 的作用线交于 O 点,如图 1.8 所示。根据力的可传性原理,将 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 分别移动到 O 点,然后用平行四边形公理求合力 $\mathbf{R}$ 。用 $\mathbf{R}$ 代替 $\mathbf{F}_2$ 和 $\mathbf{F}_3$ 的作用,显然刚体在 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{F}_1$ 作用下平衡。由二力平衡公理知, $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{F}_1$ 必然大小相等、方向相反,且作用在同一直线上。可见, $\mathbf{F}_1$ 的作用线必与 $\mathbf{R}$ 的作用线重合,而且通过 O 点。

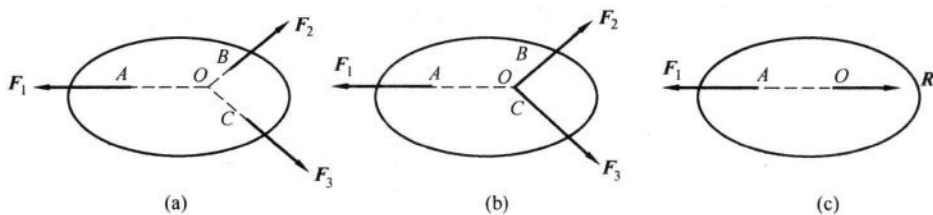


图 1.8 三力汇交定理证明

4. 作用与反作用公理

两物体间的作用力和反作用力,总是大小相等、方向相反,沿同一直线分别作用在这两个物体上。这个公理概括了自然界的物体相互作用的关系,表明了作用力和反作用力总是成对出现的。必须强调指出,作用力和反作用力分别作用于两个不同的物体上,因此不能认为这两个力相互平衡,这与二力平衡公理中的两个力有着本质上的区别。

1.3 约束与约束反力

1.3.1 基本概念

1. 自由体和非自由体

凡是可以在空间任意运动的物体都称为自由体，例如在空中飞行的飞机、炮弹等。凡是受到周围物体的限制，不能在某些方向上运动的物体，称为非自由体。例如在轨道上行驶的火车，受到钢轨的限制，只能沿轨道方向运动；电机转子受轴承的限制，只能绕轴线转动。工程实际中大多数物体都是非自由体。

2. 约束与约束反力

对非自由体的某些方向的位移起到限制作用的周围物体称为约束。上述例子中，钢轨是火车的约束；轴承是电机转子的约束。

约束作用于被约束物体上的力称为约束反力。约束反力总是作用在被约束体与约束体的接触处，其方向也总是与该约束所能限制的运动或运动趋势的方向相反。据此，即可确定约束反力的位置和方向。

1.3.2 约束类型

从工程实际出发，可将常见的约束归纳为以下几种基本类型。

1. 柔性约束

由绳索、胶带和链条等形成的约束称为柔性约束。这类约束只能限制物体沿柔性物体伸长方向的运动，因此这类物体的特点是柔软易变形，不能抵抗压力，只能承受拉力。约束反力的作用点在柔性物体与被约束物体的连接点上，力的作用线沿柔性物体，指向背离物体。约束反力通常用字母 T 来表示，如图 1.9(b) 所示。

在带传动中，当带绕过轮子时，常假想在带的直线部分处截开，与轮接触的带和带轮一起作为考察对象，这样就可不考虑带与带轮间的内力，那么作用于轮子的拉力就沿轮缘的切线方向，如图 1.10(b) 所示。

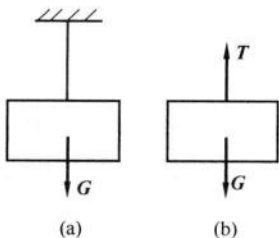


图 1.9 柔性约束

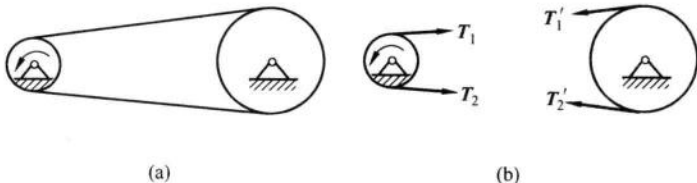


图 1.10 带约束

2. 理想光滑面约束

当两物体直接接触，且忽略接触处的摩擦时，该约束称为理想光滑面约束。这种约束

只能限制物体在接触点沿接触面的公法线方向的运动,不能限制物体沿接触面切线方向的运动,故约束反力必过接触点,沿接触面法向并指向被约束体。约束反力通常用字母 N 表示,如图 1.11(a)所示。

图 1.11(b)中,直杆与方槽在 A 、 B 、 C 3 点接触,3 处的约束反力沿二者接触点的公法线方向作用。

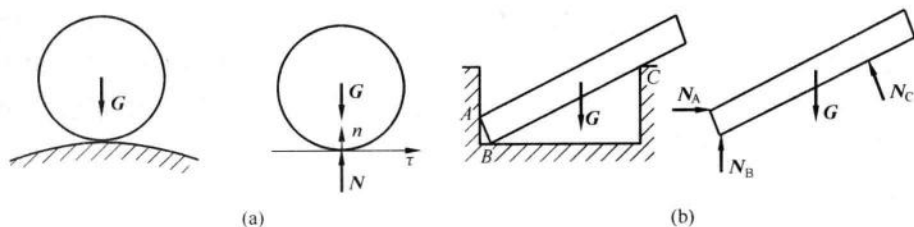


图 1.11 理想光滑面约束

3. 圆柱铰链约束

圆柱铰链是工程上常见的一种约束。它是在两个钻有圆孔的构件之间采用圆柱定位销所形成的连接,如图 1.12 所示。门窗所用的活页、铡刀与刀架、起重机的动臂与机座的连接等,都是常见的铰链连接。

圆柱铰链连接的约束反力通过接触点 K 沿公法线方向指向构件,如图 1.13(a)所示。这种约束反力通常是用两个通过铰链中心的大小和方向未知的正交分力 X_K 、 Y_K 来表示,两分力的指向可以任意设定,如图 1.13(b)所示。

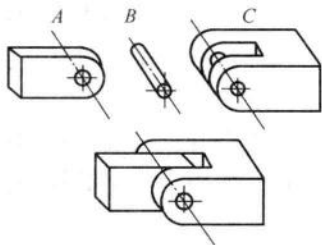


图 1.12 铰链连接

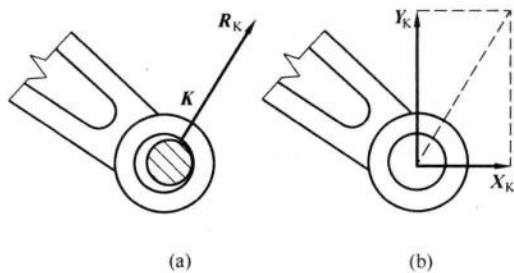
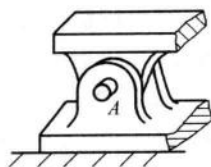


图 1.13 铰链约束反力

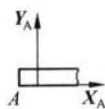
圆柱铰链约束在工程上应用广泛,可分为以下两种类型。

(1) 固定铰链支座约束。常用的圆柱铰链连接由一个固定底座和一个构件用销钉连接而成,简称固定铰支座,如图 1.14(a)所示。固定铰支座约束的约束反力通过圆柱销的中心,方向不能确定,通常用互相垂直的两个分力表示,如图 1.14(b)所示。

(2) 可动铰链支座约束。在桥梁、屋架等结构中,除了使用固定铰支座外,还常使用一种放在几个圆柱形滚子上的铰链支座,这种支座称为可动铰支座,如图 1.15(a)所示。可动铰链支座只能限制构件沿支撑面垂直方向的移动,因此其约束反力方向垂直于支撑面,且通过铰链中心,如图 1.15(b)所示。

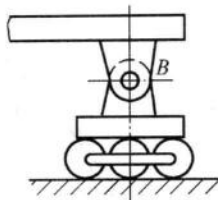


(a)



(b)

图 1.14 固定铰链支座约束



(a)



(b)

图 1.15 可动铰链支座约束

1.4 受力分析和受力图

研究构件的平衡问题时,首先要明确研究对象,然后分析研究对象上受哪些力的作用,这就是构件的受力分析。

对研究对象进行受力分析时,必须将所确定的研究对象从周围物体中分离出来,分离出来的物体称为分离体。单独画出分离体简图,然后将其他物体对它作用的主动力和约束反力全部表示出来,这样的图称为分离体的受力图,简称受力图。绘制构件受力图的步骤如下。

- (1) 选定研究对象,将研究对象作为分离体单独画出。
- (2) 在分离体上标出主动力(一般已知)。
- (3) 将分离体原来的约束用相应的约束反力代替。

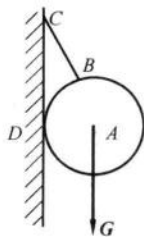
【例 1.1】如图 1.16(a)所示,一重力为 G 的球体 A ,用绳子 BC 系在光滑的铅垂墙壁上,试画出球体 A 的受力图。

解: (1) 取球体 A 作为研究对象,取分离体并画简图。

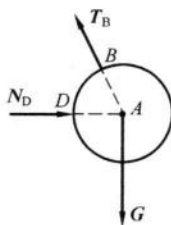
(2) 画主动力 G 。

(3) 画约束力。绳索的约束反力为 T_B , T_B 沿绳索且背离物体;墙壁的约束反力为 N_D , N_D 沿墙壁和球体接触点的公法线方向并指向球体。

(4) 由三力汇交定理可知, T_B 、 N_D 、 G 的作用线交于 A 点,如图 1.16(b)所示。



(a)



(b)

图 1.16 例 1.1 图

【例 1.2】如图 1.17 所示为三角形支架 ABC , AB 上作用铅垂力 F , 杆的自重不计,试分别画出杆 BC 和 AB 的受力图。

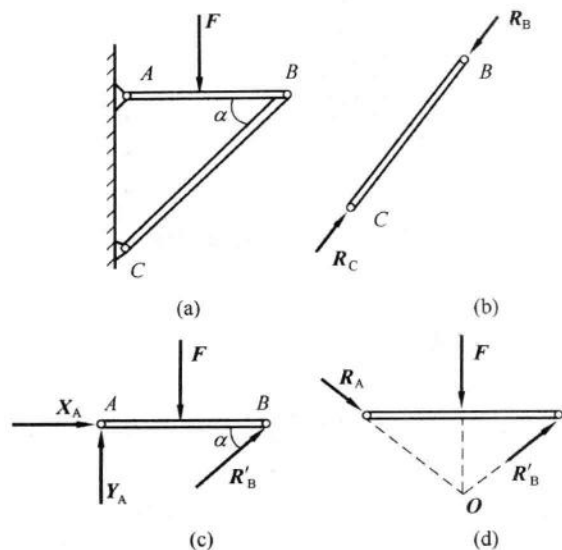


图 1.17 例 1.2 图

解: (1) BC 杆受力图。选定 BC 杆作为研究对象, B 、 C 两端均为铰链连接。由于不计 BC 杆自重, 杆仅在其两端的两个约束反力作用下处于平衡, 因此 BC 杆为二力杆。根据二力平衡公理, R_B 、 R_C 大小相等, 方向相反, 作用线在 B 、 C 的连线方向上, BC 杆受力图如图 1.17(b) 所示。

(2) AB 杆受力图。选 AB 为研究对象。它受主动力 F 的作用, 在 B 处有约束反力 R_B' , 该力与 R_B 互为作用力与反作用力; A 点为固定铰链支座, 约束反力的大小和方向未知, 用 X_A 、 Y_A 表示, AB 杆受力图如图 1.17(c) 所示。

AB 杆在 F 、 R_A 、 R_B' 3 个力的作用下处于平衡状态, 由三力平衡汇交定理可确定铰链 A 处所受约束反力 R_A 的方向, 如图 1.17(d) 所示。

本章小结

本章介绍了静力学的基本概念、公理, 引入了约束与约束反力的概念, 介绍了几种常见的基本约束及对物体受力分析与画受力图的方法步骤。

1. 基本概念

力、刚体、平衡是静力学的基本概念。

- (1) 力对物体有两种效应: 外效应和内效应。静力学只研究力的外效应。
- (2) 刚体是不变形的物体, 是实际物体的一种抽象化模型。
- (3) 平衡是指物体相对于地球作匀速直线运动或静止。

2. 静力学公理

- (1) 二力平衡公理是最简单力系平衡条件, 是推证力系平衡条件的理论依据。
- (2) 加减平衡力系公理是力系简化的重要理论依据。
- (3) 平衡四边形公理表示了最简单力系的合成法则, 也是力的分解法则。

三力平衡汇交定理阐明了刚体受不平行的三力作用而平衡时, 三力作用线之间的关系, 常用来确定未知反力作用线的方向。

(4) 作用与反作用公理表示了二个物体互相作用时的规律。作用力与反作用力虽然等值、反向、共线, 但是分别作用在二个物体上。它不是二力平衡公理中所指的两个作用在同一个刚体上的力, 因此, 不能认为作用力与反作用力互相平衡。