



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

主编 于新奇



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

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

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



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书系统全面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 1~7 章)、第 2 部分机械传动基础(第 8~10 章)、第 3 部分过程装备材料(第 11 章)、第 4 部分容器设计基础(第 12~15 章)和第 5 部分典型过程设备(第 16~18 章)。各章由工程实例引出主要内容, 突出实用特色, 注重深度和广度的关系, 适度反映学科前沿知识。

本书可作为高等学校化学工程与工艺类专业及相近专业(石化、生化、制药、冶金、环保、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。

### 图书在版编目(CIP)数据

过程装备机械基础/于新奇主编. —北京: 北京大学出版社, 2009.8

(全国高等院校过程装备与控制工程专业系列规划教材)

ISBN 978-7-301-15651-3

I. 过… II. 于… III. 化工过程—化工设备: 机械装备—高等学校—教材 IV. TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 137502 号

书 名: 过程装备机械基础

著作责任者: 于新奇 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-15651-3/TH·0155

出版者: 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> <http://www.pup6.com>

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

电子邮箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.5 印张 547 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 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

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

本书根据化学工程与工艺类专业对学习过程装备课程的基本要求,总结长期教学实践经验,在参考国内其他同类教材的基础上,结合过程装备的特点编写而成。其目的是使学生获得必要的机械基础知识,对过程设备有较深的认识,为以后走上工艺类技术人员与设备类技术人员的工作岗位打下良好基础。

本书注重理论与工程应用的有机结合,实用性强。每章均以工程实例引出主要内容,期望提高学生的学习兴趣;通过例题、思考题和习题,帮助学生理解基本概念和基本理论,培养学生分析问题和解决问题的能力。除作为教材外,本书还可供相关专业的读者和工程技术人员参考。

本书共分5部分:第1部分工程力学基础(第1~7章),重点介绍平衡物体的受力分析、拉伸与压缩、剪切及扭转、弯曲及组合变形的基本概念与计算;第2部分机械传动基础(第8~10章),主要介绍带传动,齿轮传动,轴、轴承和联轴器等常用传动的结构与应用;第3部分过程装备材料(第11章),包括材料的机械性能,过程装备常用金属、非金属等材料的牌号、性能与应用,材料的腐蚀与防腐等内容;第4部分容器设计基础(第12~15章),在阐明基本概念的基础上,根据现行国家标准,介绍容器的设计计算方法、监察与检验;第5部分典型过程设备(第16~18章),主要介绍换热设备、塔设备和搅拌反应设备的工作原理、结构形式及提高其工作效率的方法。

本书编写分工为:第1、5章由齐安宾编写;第2、3章由朱海荣、朱玉峰编写;第4、11、15、18章由于新奇编写;第6、7章由朱玉峰编写;第8~10章由赵志广编写;第12、13章由彭培英编写;第14、16、17章由郭彦书编写。全书由于新奇统稿并最终定稿。

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  
2009年5月

# 目 录

第 1 章 静力学基础 .....	1	3.1.2 力偶与力偶矩 .....	21
1.1 静力学的基本概念 .....	1	3.2 平面一般力系的简化 .....	22
1.2 静力学公理 .....	3	3.2.1 力的平移定理 .....	22
1.2.1 静力学公理一——二力 平衡公理 .....	3	3.2.2 平面一般力系的简化实例 .....	23
1.2.2 静力学公理二——加减 平衡力系公理 .....	3	3.2.3 固定端约束 .....	24
1.2.3 静力学公理三——力的 平行四边形公理 .....	4	3.3 平面一般力系的平衡条件和 平衡方程 .....	24
1.2.4 静力学公理四——作用与 反作用公理 .....	4	本章小结 .....	27
1.3 约束与约束反力 .....	5	思考题 .....	28
1.3.1 基本概念 .....	5	习题 .....	28
1.3.2 约束类型 .....	5	第 4 章 直杆的拉伸与压缩 .....	31
1.4 受力分析和受力图 .....	7	4.1 构件变形的基本形式 .....	31
本章小结 .....	9	4.2 直杆拉伸与压缩时的力与变形 .....	32
思考题 .....	10	4.2.1 工程实例 .....	32
习题 .....	10	4.2.2 直杆拉伸与压缩时横截面上的 内力 .....	33
第 2 章 平面汇交力系 .....	12	4.2.3 直杆拉伸与压缩时横截面上的 应力 .....	34
2.1 平面汇交力系的合成 .....	13	4.2.4 直杆拉伸与压缩时的变形 .....	36
2.1.1 平面汇交力系的分类 .....	13	4.3 材料拉伸与压缩的力学性能 .....	38
2.1.2 平面汇交力系的合成方法 .....	13	4.3.1 拉伸试验及材料的力学性能 .....	38
2.2 平面汇交力系的平衡条件 .....	15	4.3.2 材料压缩时的力学性能 .....	41
2.2.1 平面汇交力系平衡的 几何条件 .....	15	4.4 直杆拉伸与压缩时的强度条件 .....	42
2.2.2 平面汇交力系平衡的 解析条件 .....	16	4.4.1 许用应力与安全系数 .....	42
本章小结 .....	18	4.4.2 直杆拉伸与压缩时的 强度条件 .....	42
思考题 .....	18	4.5 热应力 .....	44
习题 .....	18	本章小结 .....	46
第 3 章 平面一般力系 .....	20	思考题 .....	46
3.1 力矩与力偶 .....	20	习题 .....	47
3.1.1 力矩 .....	20	第 5 章 剪切及扭转 .....	49
3.1.2 力偶与力偶矩 .....	21	5.1 剪切与挤压 .....	49
3.2 平面一般力系的简化 .....	22	5.1.1 剪切变形 .....	49
3.2.1 力的平移定理 .....	22		
3.2.2 平面一般力系的简化实例 .....	23		
3.2.3 固定端约束 .....	24		
3.3 平面一般力系的平衡条件和 平衡方程 .....	24		
本章小结 .....	27		
思考题 .....	28		
习题 .....	28		

5.1.2 剪切及其强度计算 .....	50	思考题 .....	86
5.1.3 剪切胡克定律 .....	51	习题 .....	86
5.1.4 挤压及其强度计算 .....	51		
5.2 圆轴扭转时的外力和内力 .....	53	<b>第 7 章 复杂应力状态与强度理论</b> .....	89
5.2.1 扭转实例 .....	53	7.1 应力状态的概念 .....	89
5.2.2 外力偶矩 .....	53	7.1.1 直杆受轴向拉伸或压缩载荷时 斜截面上的应力 .....	90
5.2.3 扭转时的内力——扭矩 .....	53	7.1.2 一点的应力状态与单元体 .....	91
5.3 圆轴扭转时的应力 .....	56	7.1.3 主平面与主应力 .....	91
5.4 圆轴扭转时的强度计算和刚度计算 .....	58	7.1.4 应力状态分类 .....	92
5.4.1 强度计算 .....	58	7.2 二向应力状态分析 .....	93
5.4.2 圆轴的变形及刚度计算 .....	58	7.2.1 二向应力状态下斜截面上 应力的计算 .....	93
本章小结 .....	60	7.2.2 二向应力状态下主应力和 最大剪应力的计算 .....	94
思考题 .....	61	7.3 三向应力状态与广义胡克定律 .....	95
习题 .....	61	7.3.1 三向应力状态下的应力计算 .....	95
<b>第 6 章 梁的弯曲</b> .....	63	7.3.2 广义胡克定律 .....	95
6.1 梁的弯曲实例与梁的类型 .....	63	7.4 强度理论 .....	96
6.1.1 梁的弯曲变形实例 .....	63	7.4.1 强度理论的概念 .....	96
6.1.2 受弯杆件受力及变形的特点 .....	64	7.4.2 强度理论内容 .....	97
6.1.3 梁的分类及梁上的载荷 .....	64	7.5 组合变形时的强度计算 .....	100
6.2 梁弯曲时的内力 .....	65	7.5.1 组合变形实例 .....	100
6.2.1 横截面内的内力 .....	66	7.5.2 弯曲与拉伸(压缩)的 组合变形 .....	101
6.2.2 剪力与弯矩的求取 .....	66	7.5.3 弯曲与扭转的组合变形 .....	104
6.2.3 剪力图和弯矩图 .....	68	本章小结 .....	106
6.3 梁弯曲时的正应力 .....	70	思考题 .....	107
6.3.1 实验观察和假设推论 .....	71	习题 .....	108
6.3.2 弯曲正应力计算公式的推导 .....	72	<b>第 8 章 带传动及链传动</b> .....	111
6.3.3 轴惯性矩和抗弯截面模量的 计算 .....	74	8.1 带传动类型、特性和应用 .....	111
6.4 梁的强度计算 .....	75	8.1.1 带传动的组成和传动原理 .....	112
6.5 提高梁强度的措施 .....	77	8.1.2 带传动的特点 and 设计参数 .....	112
6.5.1 梁的合理截面形状 .....	77	8.1.3 带传动的应用 .....	113
6.5.2 梁的合理工作位置 .....	78	8.1.4 V 带及带轮的结构 .....	114
6.5.3 梁的合理支座位置 .....	79	8.1.5 带传动的使用和维护 .....	115
6.6 梁的变形 .....	79	8.2 带传动的工作特性 .....	117
6.6.1 梁的挠度和转角 .....	79	8.2.1 带传动的受力 .....	117
6.6.2 梁的挠度和转角的求取 .....	80		
6.6.3 梁的刚度校核及提高梁弯曲 刚度的措施 .....	84		
本章小结 .....	85		

8.2.2 带的弹性滑动 .....	117	9.6.2 直齿锥齿轮传动 .....	143
8.3 V带传动的设计计算及选用 .....	118	9.7 蜗杆传动简介 .....	144
8.3.1 带传动的失效形式及 设计准则 .....	118	9.7.1 蜗杆传动的组成和特点 .....	144
8.3.2 普通V带传动的设计计算 .....	118	9.7.2 蜗杆传动的主要参数 .....	145
8.4 链传动简介 .....	124	9.7.3 蜗杆传动的几何尺寸计算 .....	147
8.4.1 链传动的基本构成和 几何参数 .....	124	本章小结 .....	147
8.4.2 滚子链条和链轮的结构 .....	125	思考题 .....	148
本章小结 .....	126	习题 .....	149
思考题 .....	127	<b>第10章 轴、轴承和联轴器</b> .....	150
习题 .....	127	10.1 轴 .....	151
<b>第9章 齿轮传动</b> .....	128	10.1.1 轴的分类 .....	151
9.1 概述 .....	129	10.1.2 轴的材料 .....	152
9.1.1 齿轮传动的分类 .....	129	10.1.3 轴的结构设计 .....	152
9.1.2 齿轮传动的特点 .....	130	10.1.4 轴的强度校核 .....	154
9.2 齿轮传动基本定律与渐开线齿廓 .....	130	10.2 轴承 .....	154
9.2.1 齿廓啮合基本定律 .....	130	10.2.1 轴承的功用和分类 .....	154
9.2.2 渐开线及渐开线齿廓 .....	131	10.2.2 滑动轴承 .....	155
9.2.3 渐开线齿轮的啮合特点 .....	132	10.2.3 滚动轴承 .....	158
9.3 标准直齿圆柱齿轮各部分名称与 尺寸 .....	133	10.3 联轴器 .....	164
9.3.1 齿轮各部分的名称 .....	133	10.3.1 联轴器的类型 .....	164
9.3.2 标准直齿圆柱齿轮基本 参数与几何尺寸 .....	134	10.3.2 联轴器的选择 .....	167
9.4 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合 传动特性 .....	136	本章小结 .....	168
9.4.1 渐开线齿轮正确啮合的 条件 .....	136	思考题 .....	168
9.4.2 渐开线齿轮连续传动的 条件 .....	137	<b>第11章 过程装备材料</b> .....	170
9.4.3 渐开线齿轮传动的中心距 .....	137	11.1 材料的性能 .....	171
9.5 齿轮的失效形式与齿轮材料 .....	138	11.1.1 力学性能 .....	171
9.5.1 齿轮的失效形式 .....	138	11.1.2 物理性能 .....	173
9.5.2 设计准则 .....	139	11.1.3 化学性能 .....	173
9.5.3 齿轮的材料 .....	139	11.1.4 加工工艺性能 .....	174
9.6 其他齿轮传动简介 .....	141	11.2 碳钢和铸铁 .....	174
9.6.1 平行轴斜齿圆柱齿轮传动 .....	141	11.2.1 金属的晶体结构 .....	174
		11.2.2 铁碳合金的基本组织 .....	175
		11.2.3 铁碳合金状态图 .....	175
		11.2.4 碳钢 .....	177
		11.2.5 钢的热处理 .....	180
		11.2.6 铸铁 .....	182
		11.3 合金钢 .....	183

11.3.1	合金元素对钢材性能的影响 .....	183	12.4.2	内压圆筒和内压球壳的设计 .....	221
11.3.2	合金钢的分类与牌号 .....	183	12.4.3	设计参数 .....	223
11.3.3	普通低合金结构钢 .....	184	12.4.4	内压封头设计 .....	229
11.3.4	不锈钢 .....	185	12.5	容器的压力试验 .....	237
11.4	有色金属 .....	188	12.5.1	压力试验的目的与对象 .....	237
11.4.1	铝及铝合金 .....	188	12.5.2	试验方法 .....	237
11.4.2	铜及铜合金 .....	189	12.5.3	试验压力及应力校核 .....	238
11.4.3	钛及钛合金 .....	191	12.6	常压容器设计 .....	240
11.5	非金属材料 .....	191	12.6.1	内压圆筒 .....	240
11.5.1	无机非金属材料 .....	191	12.6.2	内压封头 .....	246
11.5.2	有机非金属材料 .....	192	本章小结 .....		248
11.5.3	复合材料 .....	195	思考题 .....		249
11.6	过程装备的腐蚀与防腐措施 .....	195	习题 .....		249
11.6.1	金属腐蚀的原理 .....	195	<b>第 13 章 外压容器设计</b> .....		251
11.6.2	金属腐蚀破坏的形式 .....	198	13.1	概述 .....	251
11.6.3	金属设备的防腐措施 .....	199	13.1.1	外压容器失稳 .....	252
11.6.4	金属腐蚀的评定方法 .....	201	13.1.2	临界压力 .....	253
11.7	过程装备材料选择 .....	201	13.2	外压圆筒的稳定性计算 .....	254
11.7.1	过程装备材料选择的 一般要求 .....	201	13.2.1	长圆筒的临界压力 .....	254
11.7.2	按设备的使用温度和压力 选择材料 .....	202	13.2.2	短圆筒的临界压力 .....	255
11.7.3	按耐腐蚀性能选择材料 .....	202	13.2.3	临界长度 .....	255
11.7.4	按经济性选择材料 .....	203	13.3	外压圆筒的设计计算 .....	255
本章小结 .....		203	13.3.1	解析法 .....	256
思考题 .....		204	13.3.2	图算法 .....	256
<b>第 12 章 内压容器设计基础</b> .....		206	13.4	外压封头的设计计算 .....	262
12.1	概述 .....	207	13.4.1	外压凸形封头 .....	262
12.2	内压容器设计理论基础 .....	208	13.4.2	外压锥壳 .....	263
12.2.1	回转壳体的几何概念 .....	208	13.5	加强圈设计 .....	263
12.2.2	无力矩理论的基本方程 .....	210	13.5.1	加强圈的作用与结构 .....	263
12.2.3	无力矩理论的应用 .....	211	13.5.2	加强圈的设计方法及步骤 .....	264
12.3	边缘应力 .....	218	本章小结 .....		268
12.3.1	边缘应力的概念 .....	218	思考题 .....		268
12.3.2	边缘应力的特性 .....	219	习题 .....		269
12.3.3	边缘应力的处理 .....	219	<b>第 14 章 压力容器零部件</b> .....		270
12.4	内压容器设计 .....	220	14.1	法兰 .....	270
12.4.1	弹性失效设计准则 .....	220	14.1.1	法兰连接的结构及 密封原理 .....	271
			14.1.2	法兰类型 .....	271

14.1.3 影响法兰密封的因素 .....	272	16.2.4 U形管式换热器 .....	302
14.1.4 压力容器法兰与管法兰 标准 .....	274	16.3 管壳式换热器的结构设计 .....	302
14.2 容器支座 .....	275	16.3.1 换热管的选用 .....	302
14.2.1 卧式容器支座 .....	276	16.3.2 换热管在管板上的排列 .....	303
14.2.2 立式容器支座 .....	278	16.3.3 换热管与管板的连接 .....	304
14.3 容器开孔与补强 .....	279	16.3.4 管板与壳体的连接 .....	305
14.3.1 容器的开孔与接管 .....	279	16.3.5 管箱与管束分程 .....	306
14.3.2 开孔补强 .....	281	16.3.6 折流板 .....	308
14.4 容器的焊接结构 .....	283	16.3.7 导流筒与防冲挡板 .....	309
14.4.1 焊接接头的形式 .....	283	16.3.8 膨胀节 .....	309
14.4.2 坡口形式 .....	284	16.4 管壳式换热器的强化传热 .....	310
14.4.3 压力容器焊接结构设计的基本 原则 .....	284	16.4.1 强化传热的原理 .....	310
本章小结 .....	285	16.4.2 管内放置强化传热元件 .....	311
思考题 .....	285	16.4.3 异形管强化传热 .....	312
<b>第 15 章 压力容器的监察管理和 定期检验 .....</b>	<b>287</b>	16.4.4 壳程强化传热 .....	315
15.1 压力容器的监察管理 .....	287	本章小结 .....	316
15.1.1 对压力容器实施监察管理的 依据 .....	288	思考题 .....	317
15.1.2 压力容器分类 .....	288	<b>第 17 章 塔设备 .....</b>	<b>318</b>
15.1.3 压力容器的监察管理过程 ..	291	17.1 概述 .....	319
15.2 压力容器的定期检验 .....	295	17.1.1 塔设备的应用 .....	319
15.2.1 定期检验的目的 .....	295	17.1.2 对塔设备的要求 .....	319
15.2.2 定期检验的类别、周期和 内容 .....	296	17.1.3 塔设备的分类及总体结构 ..	319
15.2.3 检验程序 .....	297	17.2 板式塔 .....	321
15.2.4 检验报告 .....	297	17.2.1 整块式塔盘的板式塔 .....	321
本章小结 .....	298	17.2.2 分块式塔盘的板式塔 .....	326
思考题 .....	298	17.3 填料塔 .....	327
<b>第 16 章 管壳式换热设备 .....</b>	<b>299</b>	17.3.1 填料的支承装置 .....	328
16.1 概述 .....	299	17.3.2 液体分布装置 .....	328
16.2 管壳式换热器的形式 .....	300	17.3.3 液体再分布装置 .....	332
16.2.1 固定管板式换热器 .....	300	17.4 塔设备的附件 .....	332
16.2.2 浮头式换热器 .....	301	17.4.1 除沫器 .....	332
16.2.3 填料函式换热器 .....	301	17.4.2 裙座 .....	333
		本章小结 .....	335
		思考题 .....	335
		<b>第 18 章 搅拌反应设备 .....</b>	<b>336</b>
		18.1 概述 .....	337
		18.1.1 搅拌的目的 .....	337

18.1.2 搅拌反应釜的基本结构 .....	337	18.3.4 搅拌轴 .....	352
18.1.3 搅拌反应釜机械设计的 依据 .....	338	18.4 传动装置 .....	355
18.1.4 搅拌反应釜机械设计的 内容 .....	338	18.4.1 电动机 .....	355
18.2 釜体与传热装置 .....	339	18.4.2 减速机 .....	356
18.2.1 釜体几何尺寸的确定 .....	339	18.4.3 传动装置的机座 .....	356
18.2.2 夹套的结构与尺寸 .....	340	18.4.4 底座 .....	357
18.2.3 釜体和夹套壁厚的确定 .....	343	18.5 轴封装置 .....	358
18.2.4 蛇管的布置 .....	343	18.5.1 填料密封 .....	358
18.2.5 工艺接管 .....	345	18.5.2 机械密封 .....	360
18.3 搅拌装置 .....	347	18.5.3 机械密封与填料密封的 比较 .....	362
18.3.1 搅拌器的形式与选用 .....	347	本章小结 .....	363
18.3.2 流型 .....	350	思考题 .....	364
18.3.3 搅拌附件 .....	351	参考文献 .....	365

# 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，其充分与必要的条件是：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, 因而在研究力的作用效应时, 变形可以忽略不计, 这时的物体可抽象为刚体。

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。

### 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, 这三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。

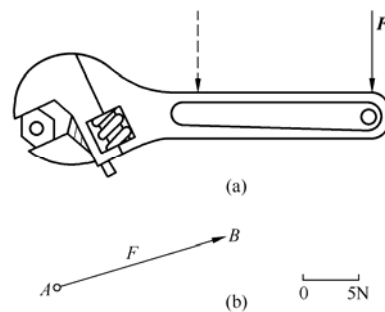


图 1.1 力的三要素

**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、分布力(均布载荷)

(1) 集中力。当力的作用面积很小, 可以看作作用在一点上时, 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。

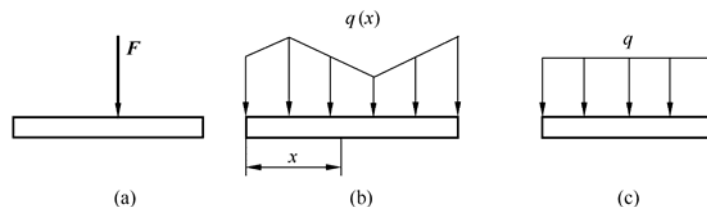


图 1.2 集中力与分布力

## 1.2 静力学公理

### 1.2.1 静力学公理一——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，其充分与必要的条件是：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)中所示的  $AB$  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。

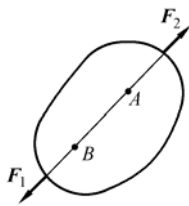


图 1.3 二力平衡

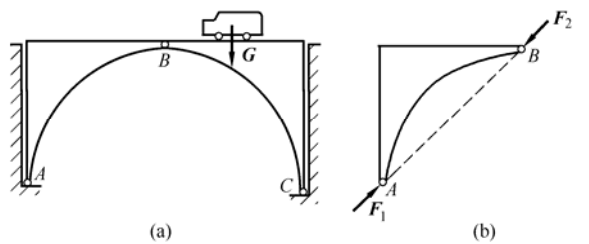


图 1.4 二力构件

### 1.2.2 静力学公理二——加减平衡力系公理

在刚体的原有力系中，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。

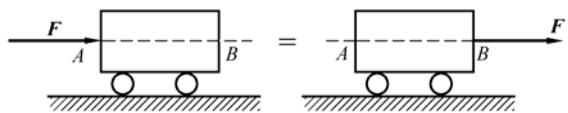


图 1.5 力的可传性

**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。

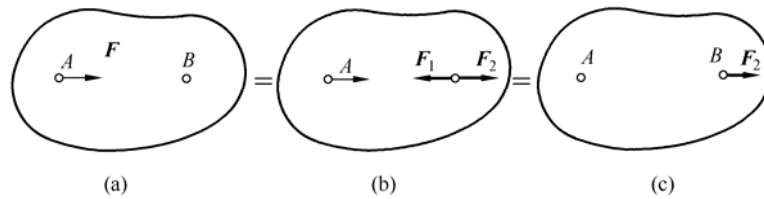


图 1.6 力的可传性

### 1.2.3 静力学公理三——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。

其矢量表达形式为

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

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。

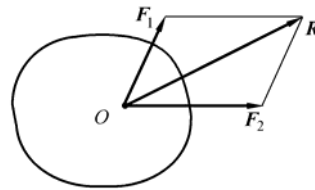


图 1.7 力的合成

**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。

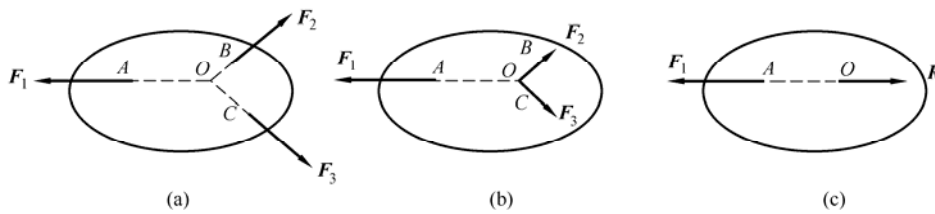


图 1.8 三力汇交定理证明

### 1.2.4 静力学公理四——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，决不能认为这两个力相互平衡，这与两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；电动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；轴承是电动机转子的约束。

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。

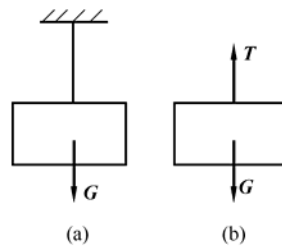


图 1.9 柔性约束

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，这样就可不考虑柔索与轮子间的内力，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。

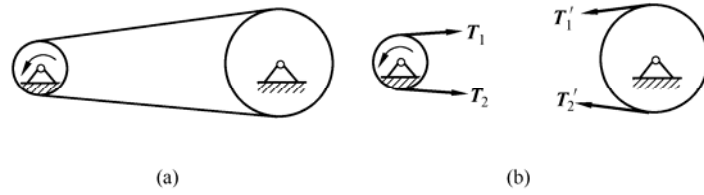


图 1.10 带约束

### 2. 理想光滑面约束

当两物体直接接触，并可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。

如图 1.11(b)所示，直杆与方槽在  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点接触，三处的约束反力沿二者接触点的公法线方向作用。

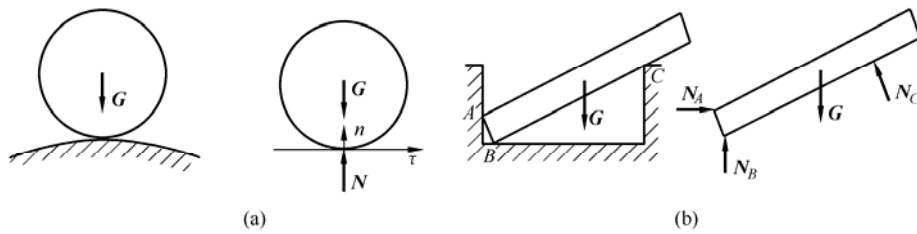


图 1.11 理想光滑面约束

### 3. 圆柱铰链约束

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。

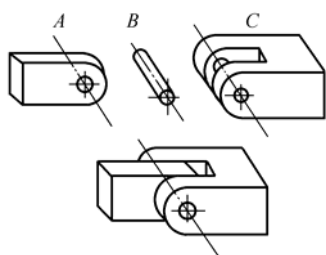


图 1.12 铰链连接

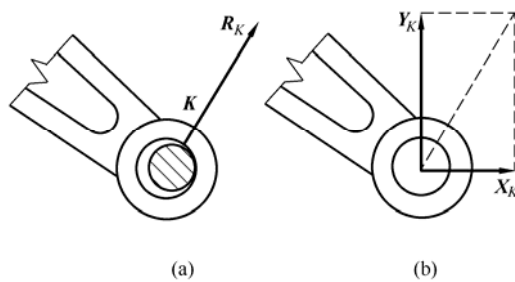
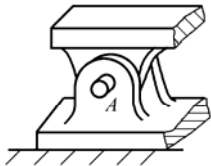


图 1.13 铰链约束反力

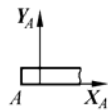
圆柱铰链约束在工程上应用广泛,可分为两种类型:

(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,简称铰支座,如图 1.14(a)所示。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。

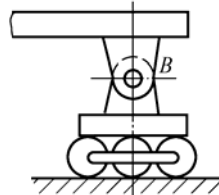
(2) 可动铰链支座约束。在桥梁、屋架等结构中,除了使用固定铰支座外,还常使用一种放在几个圆柱形滚子上的铰链支座,这种支座称为可动铰支座,如图 1.15(a)所示,这种支座常用于桥梁、屋架或天车等结构中。可动铰链支座只能限制构件沿支撑面垂直方向的移动,因此其约束反力方向垂直于支撑面,且通过铰链中心,如图 1.15(b)所示。



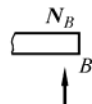
(a)



(b)



(a)



(b)

图 1.14 固定铰链支座约束

图 1.15 可动铰链支座约束

## 1.4 受力和受力图

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,单独画出简图,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。绘构件的受力图的步骤如下:

- (1) 选定研究对象,将研究对象作为分离体单独画出;
- (2) 在分离图上标出主动力(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  $T_B$ ,  $T_B$  沿绳索且背离物体;墙壁的约束反力  $N_D$ ,  $N_D$  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。