

化工设备 机械设计基础

唐尔钧 詹长福 合编

机械工业出版社

81.18
420

化工设备机械设计基础

唐尔钧 詹长福 编

机械工业出版社

前 言

本书是为高等院校化工工艺类专业80~90学时《化工设备机械设计基础》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，本着“打好基础、精选内容、结合实际、利于教学”的精神编写而成。在编写中我们根据自己多年的教学实践，并学习有关院校对化工工艺类专业机械课程改革的经验，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。为贯彻学以致用原则，在本课程授完之后，要进行一次典型化工设备的课程设计。为给课程设计提供方便，我们还编写了《化工设备机械基础课程设计指导书》，作为本教材的配套教材。

本书在文字叙述上力求简练，便于自学，在内容的取舍上详略得当。为照顾教材内容的系统性和连贯性，但又不致加重学员学习负担，本书对一些扩展性的内容采用小号字排印（例题和习题除外），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）。

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、十一等三章和第三篇由詹长福编写。

在本书编写过程中得到许多化工企业、兄弟院校、机械工业出版社和北京化工学院的有关领导的大力支持和帮助，在此向他们致以诚挚的谢意。

《化工设备机械设计基础》课程是化工工艺专业机械类课程改革的产物，虽已经历了近30年的反复实践和探索，积累了一些经验，但总的说来，还不够成熟，不够完备。加之编者水平有限，编写时间又较仓促，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1993年9月

目 录

绪论 1

第一篇 工程力学基础

概述 3

第一章 物体的受力分析及其平衡条件 4

第一节 物体的受力分析 4

一、力的概念及其性质 4

二、约束与约束反力 8

三、分离体和受力图 11

四、小结 13

第二节 平面汇交力系的简化与

平衡 14

一、平面汇交力系简化与平衡的几何法 14

二、平面汇交力系简化的解析法 16

三、平面汇交力系平衡的解析条件 17

第三节 力矩 力偶 力的平移

定理 20

一、力对点之矩 20

二、力偶与力偶矩 21

三、力的平移定理 26

第四节 平面一般力系的简化与

平衡 27

一、平面一般力系的简化 28

二、平面一般力系简化结果的讨论

合力矩定理 30

三、平面一般力系的平衡条件和平衡

方程 32

习题 36

第二章 直杆的拉伸和压缩 42

第一节 轴向拉伸与压缩的概念 43

第二节 拉伸和压缩时的内力

截面法 44

一、内力 44

二、截面法 45

第三节 拉伸和压缩时的应力 47

一、应力的概念 47

二、轴向拉伸(压缩)时横截面上的
正应力 48

第四节 轴向拉伸和压缩时的变
形 虎克定律 49

一、纵向变形 49

二、横向变形 50

三、虎克定律 50

第五节 拉伸和压缩时材料的力
学性能 52

一、低碳钢拉伸时的力学性能 52

二、其它材料在拉伸时的力学性能 55

三、材料在压缩时的力学性能 56

第六节 拉伸和压缩的强度计算 57

一、许用应力与安全系数 57

二、拉伸和压缩时的强度条件 58

第七节 热应力的概念 62

第八节 应力集中的概念 64

习题 65

第三章 剪切与圆轴的扭转 67

第一节 剪切 67

一、剪切的概念 切应力 67

二、挤压的概念 挤压应力 68

三、剪切与挤压的实用计算 70

四、切应变 剪切虎克定律 72

第二节 扭转的概念 73

第三节 扭转时外力和内力的计算 74

一、外力偶矩的计算 74

二、扭转时的内力——扭矩的计算 75

第四节 圆轴扭转时的应力 79

一、利用几何关系求切应变分布规律 79

二、利用物理关系求切应力的分布规律 81

三、利用静力学关系求切应力的大小 81

四、圆截面的 I_p 和 W_p 的计算 82

第五节 圆轴扭转时的变形 83

第六节 圆轴扭转时的强度计算 和刚度计算	83	四、主平面和主应力	130
一、圆轴扭转时的强度条件	83	五、三种应力状态	131
二、圆轴扭转时的刚度条件	84	第二节 平面应力状态分析	131
习题	87	一、平面应力状态下斜截面上的应力 公式	131
第四章 直梁的弯曲	91	二、应力圆	132
第一节 平面弯曲的概念 梁的 类型	91	三、应力圆的作法	132
第二节 梁弯曲时的内力	93	四、应力圆与单元体之间的对应关系	133
第三节 切力图 and 弯矩图	96	五、确定主应力和最大切应力	133
一、切力图 and 弯矩图	96	第三节 强度理论	138
二、举例	97	一、强度理论的概念	138
三、一般规律	101	二、基本强度理论	139
第四节 纯弯曲时梁横截面上的 正应力	101	第四节 组合变形的强度计算	140
一、实验观察和假设推论	102	一、组合变形的概念	140
二、弯曲正应力公式的推导	103	二、弯曲与拉伸（或压缩）的组合	141
三、弯曲正应力公式的适用范围	105	三、弯曲与扭转的组合	145
第五节 截面的轴惯性矩和抗弯 截面模量	106	习题	149
一、常用截面的轴惯性矩和抗弯截面 模量	106	附录	153
二、组合截面的惯性矩	108	第二篇 压力容器设计基础	
第六节 弯曲正应力的强度条件	109	概述	163
第七节 梁弯曲时横截面上的切 应力	113	一、压力容器的结构与分类	163
第八节 梁截面合理形状的选择	114	二、压力容器机械设计的基本要求	164
第九节 梁的弯曲变形	116	三、压力容器零部件的标准化	165
一、梁的弹性曲线、挠度和转角	116	第六章 化工设备常用材料	167
二、弹性曲线的近似微分方程	117	第一节 化工设备常用金属材料 的基本性能	167
三、用叠加法求梁的变形	121	一、力学性能	167
四、梁的刚度校核和提高梁弯曲刚度 的措施	121	二、材料的耐腐蚀性能	169
习题	122	三、材料的物理性能	169
第五章 应力状态和强度理论及组 合变形的强度计算	126	四、材料的加工工艺性能	169
第一节 应力状态概念	126	五、化工设备设计选材原则	169
一、直杆受轴向拉伸或压缩时斜截面 上的应力	126	第二节 金属材料的腐蚀与防护	169
二、一点应力状态的概念	128	一、常见金属腐蚀的现象及分类	170
三、单元体概念	128	二、防止和减缓腐蚀的方法	171
		第三节 化工设备常用材料	173
		一、碳钢的分类、牌号及用途	173
		二、合金钢的分类、牌号及用途	174
		三、钢材的品种及规格	175
		四、铸铁的分类、牌号及用途	176
		五、有色金属及其合金	177
		六、非金属材料及其应用	178

第四节 提高和改善碳钢力学性能 能和加工性能的途径.....179	第九章 内压薄壁容器的封头设计.....220
一、调整、控制钢的化学成分和合金元 素的含量.....179	第一节 凸形封头.....221
二、进行热处理.....180	一、半球形封头.....221
三、冷热加工可以改变碳钢零件或材料 的力学性能.....182	二、椭圆形封头.....221
习题.....182	三、碟形封头.....223
第七章 内压薄壁容器的应力分析.....184	四、无折边球形封头.....224
第一节 回转壳体的应力分析——薄 膜应力理论.....184	第二节 锥形封头.....226
一、回转壳体的几何特性.....185	一、无折边锥形封头的设计计算.....228
二、薄膜应力理论的应力方程式.....186	二、折边锥形封头的设计计算.....228
三、薄膜应力理论的应用条件.....190	第三节 平板封头.....230
第二节 薄膜应力理论在典型壳 体中的应用.....191	习题.....235
一、受气体内压的圆筒形壳体.....191	第十章 外压容器设计.....236
二、受气体内压的球形壳体.....192	第一节 外压容器的稳定性.....236
三、受气体内压的椭球壳.....193	一、外压圆筒的失效和设计准则.....236
四、受气体内压的锥形壳体.....195	二、临界压力的影响因素.....236
五、承受液体静压作用的圆柱壳.....196	第二节 外压圆筒的简化公式设 计法.....238
第三节 边缘应力的概念.....199	一、钢制长圆筒.....238
一、边缘应力的产生.....199	二、钢制短圆筒.....238
二、边缘应力的特性.....201	三、刚性圆筒.....238
三、控制边缘应力结构上应采取的措施.....203	四、临界长度.....239
习题.....204	五、应用简化公式设计外压圆筒的步骤.....239
第八章 内压薄壁圆筒与球壳的设计.....205	第三节 外压圆筒的图算设计方法.....239
第一节 内压薄壁圆筒与球壳的 强度计算.....205	一、算图的理论依据及其绘制方法.....239
一、关于弹性失效的设计准则.....205	二、算图的使用方法.....243
二、内压薄壁圆筒的强度计算公式.....206	第四节 外压圆筒的加强圈设计.....245
三、球壳的强度计算公式.....207	一、加强圈的间距.....246
第二节 设计参数的确定.....207	二、加强圈尺寸.....246
一、设计压力.....207	三、加强圈与筒体的联接.....250
二、设计温度.....208	第五节 外压封头.....251
三、许用应力.....208	一、外压凸形封头.....251
四、焊缝系数.....211	二、外压锥形封头.....252
五、厚度附加量.....211	第六节 轴向压缩下圆筒的稳定性.....253
第三节 容器的最小厚度.....215	习题.....253
第四节 容器的压力试验.....216	第十一章 容器附件.....255
习题.....219	第一节 法兰联接.....255
	一、法兰联接的组成和密封原理.....255
	二、法兰的结构与类型.....255
	三、法兰联接的密封性设计.....257
	第二节 容器与设备的支座.....259
	一、卧式容器的支座.....259

二、立式容器支座	262	习题	309
第三节 容器的开孔及其附件	265	第十四章 齿轮传动	311
一、容器的开孔及其补强	265	第一节 齿轮传动的特点和类型	311
二、容器的接口管与凸缘	270	一、齿轮传动特点	311
三、人孔、手孔和视镜	276	二、齿轮传动的类型	311
四、液面计	281	第二节 齿廓啮合基本定律	313
习题	282	第三节 渐开线齿轮	313
		一、渐开线的形成和特性	313
		二、渐开线齿廓满足齿廓啮合基本定律	314
		第四节 齿轮的各部分名称及渐开线标准齿轮的基本尺寸	315
		第五节 渐开线标准齿轮的啮合传动	317
		一、渐开线齿轮的正确啮合条件	317
		二、渐开线齿轮连续传动条件	318
		第六节 齿轮的切削加工	318
		一、齿轮轮齿的加工方法	318
		二、根切现象、最少齿数及变位齿轮概念	320
		三、齿轮的加工精度	321
		第七节 齿轮传动的失效形式和齿轮材料的选择	322
		一、齿轮传动的失效形式	322
		二、齿轮材料及其选择	323
		第八节 直齿圆柱齿轮的强度计算	324
		一、齿轮强度设计准则	324
		二、直齿圆柱齿轮的受力分析	325
		三、齿轮强度设计的计算载荷	325
		四、直齿圆柱齿轮轮齿的抗弯强度计算	325
		五、轮齿的接触疲劳强度计算	328
		第九节 斜齿圆柱齿轮简介	330
		一、斜齿轮啮合传动的共轭齿廓曲面的形成	330
		二、斜齿轮各部分名称和几何尺寸计算	331
		三、斜齿轮的当量齿数	332
		四、斜齿轮轮齿的受力分析	333
		第十节 齿轮的结构	333
		习题	334
		第十五章 蜗杆传动	336
		第一节 概述	336
		一、蜗杆传动的形成、分类及特点	336
第二篇 机械传动			
第十二章 机械传动设计概论	283		
第一节 机械传动的组成及其参数计算	283		
一、机械传动的组成和作用	283		
二、传动系统的示意图	283		
三、机械传动的的基本参数	283		
第二节 机械传动零部件的失效分析	285		
一、零件的失效形式	285		
二、强度分析中的基本概念	286		
三、零件工作表面的疲劳点蚀	288		
四、高温条件下零件的蠕变失效	290		
第三节 零件设计的工艺性、标准化及设计方法步骤简介	290		
一、零件的工艺性及其标准化	290		
二、零件的设计方法和步骤	291		
习题	291		
第十三章 带传动	293		
第一节 概述	293		
一、带传动的组成、类型及特点	293		
二、V带传动的几何参数和胶带的结构尺寸	294		
第二节 带传动工作情况分析	297		
一、带传动受力分析与不打滑条件	297		
二、带传动应力分析与疲劳强度	298		
三、带传动中的弹性滑动与速度损失	299		
第三节 V带传动的设计计算	299		
一、带传动设计准则和单根V带的许用功率	299		
二、V带设计方法、步骤	301		
第四节 V带轮设计	305		
第五节 V带传动的张紧和维护	306		

二、普通蜗杆传动与渐开线齿轮传动的比较	337	第一节 概述	356
三、蜗杆传动的齿面间滑动速度 v_s	337	第二节 轴的材料	356
第二节 蜗杆传动的主要参数及几何尺寸计算	338	第三节 轴的结构设计	357
一、主要参数	338	一、轴颈、轴头的直径尺寸	357
二、几何尺寸的计算	339	二、轴与相配零件的位置固定结构	357
第三节 蜗杆传动的主要失效形式、选材和结构	341	三、轴结构的工艺性	359
一、蜗杆传动的失效形式	341	第四节 轴的强度计算	359
二、蜗杆和蜗轮的材料	341	一、按扭转强度估算轴的最小直径	359
三、蜗杆、蜗轮的结构	342	二、按弯扭联合作用计算轴的强度	360
第四节 蜗杆传动的强度计算	342	第五节 平键联接	363
一、蜗杆传动的受力分析	342	一、普通平键的结构类型	364
二、蜗轮的转向	343	二、普通平键的验算	364
三、蜗杆传动的强度计算	343	第六节 联轴器	365
第五节 蜗杆传动的效率及其维护	344	一、联轴器的功能及类型	365
一、蜗杆传动的效率	344	二、联轴器的选择	368
二、蜗杆传动的维护	345	习题	370
习题	347	第十八章 轴承	371
第十六章 轮系和减速器	348	第一节 概述	371
第一节 轮系	348	一、轴承的功用和类型	371
一、轮系的功用和分类	348	二、滑动轴承中的摩擦状态	371
二、定轴轮系的传动比	349	三、润滑剂	372
三、周转轮系的传动比	350	第二节 非液体摩擦滑动轴承	374
第二节 减速器	351	一、滑动轴承的结构	374
一、减速器的类型	352	二、滑动轴承的材料	377
二、减速器的结构与润滑	352	三、非液体摩擦滑动轴承的计算	377
三、行星传动减速器简介	354	第三节 滚动轴承	380
习题	355	一、滚动轴承的结构、类型和代号	380
第十七章 轴、键和联轴器	356	二、滚动轴承的选择	383
		三、滚动轴承的组合设计	388
		习题	394
		主要参考文献	396

绪 论

在现代化工和石油化工生产中，广泛使用着各种化工机器和设备。如进行化学反应用的反应器，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运转的机器。有的静设备上也带有运动的传动装置，如带搅拌的反应釜、带刮板的薄膜蒸发器等即是。这些化工机器和设备是化工和石油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和石油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，我们认为，应该掌握的必需的机械知识主要是：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，“化工设备机械设计基础”课程的内容主要包括以下几个部分：

(1) 工程力学基础 研究构件受力的情况，进行受力大小的计算；研究材料的力学性能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。

(2) 压力容器设计基础 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，为常用的低中压化工设备的设计提供基础知识。

(3) 机械传动 分析几种典型的常用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，它是压力容器设计和机械传动的必备基础。

从上述本课程的内容亦可看出，本课程的研究对象并非是一台台具体的化工机器或设备，而是各种化工机器及设备中所共有的、通用的、典型的零部件，即设备通用零部件（如圆筒、封头、法兰、支座、人手孔等）和机械通用零部件（如带、齿轮、轴、轴承、联轴器等）两类零部件。

归纳起来，通过本课程的学习，化工工艺技术人员应具备对常见的、典型的低中压化工设备和简单机械传动装置进行设计的初步能力和必要的机械基础知识。这也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，是既重理论，又重应用的课程。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。为此在学完本课程之后，要进行一次典型化工设备的课程设计（时间为两周）。课程设计是重要的实践性教学环节，可以起到综合运用本课程的知识，提高进行结构设计和读图绘图的能力，并为毕业设计打下良好

的基础，有效地达到学以致用目的。

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对化工工艺技术人员应扩大知识面，尤其要“加强机械知识”的要求。我们认为，倘若他们既精通工艺又懂机械，必将如虎添翼，并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

化工厂和石油化工厂中使用的机器和设备都在各种外力作用下进行工作，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：

- 1) 要能抵抗外力对它的破坏，即构件要有一定的强度。
- 2) 要不发生超出许可的变形，即构件要具有必要的刚度。
- 3) 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、刚度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。对强度和刚度，我们是以强度问题为重点，着重讨论构件的强度计算。

化工和石油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、回转壳体和平板三类。杆件的变形和应力分析比较简单，但它却是分析回转壳体与平板的基础，也是整个工程力学中最基础的内容。本篇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“压力容器设计基础”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力学性能，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作用下处于平衡应遵循的规律。这包括两个问题：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（构件平衡时，作用其上的外力应满足的条件称作平衡条件），所以“受力分析”和“平衡条件”是本章所要讨论的两个基本问题。该章的第一节将讨论第一个问题；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（包括外力的个数、作用方向和大小），从而为对构件进行强度计算和刚度计算提供了前提。

第一节 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。前者称为力的运动效应，或者称为力的外效应；后者称为力的变形效应，或者称为力的内效应。

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。为了度量力的大小必须先确定力的单位。在国际单位制（SI）中，力的单位是牛顿（牛，N），或千牛顿（千牛，kN）。牛顿和公斤力的换算关系为

$$1\text{kgf} = 9.8\text{N}$$

力是既有大小又有方向的量，所以力是矢量，按矢量运算规则进行运算。力的三要素可用一带箭头的有向线段来表示（图1-1）。线段的长度AB（按一定比例，

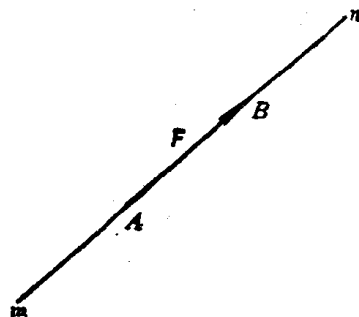


图1-1 力的三要素

如1mm代表100N)表示力的大小;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,在本章中力的矢量用符号 F 、 T 、 N 等表示,而其模(即力的大小)用符号 F 、 T 、 N 等表示,请注意两者的区别。

同时作用在同一物体上的两个或两个以上的力称为力系。作用于物体上的力系如果可以用另一个适当的力系来代替而效应相同,那么这两个力系互称等效力系。如果力系与一个力等效,则该力就称为此力系的合力。

2. 刚体的概念

一般而言,力的运动效应和变形效应是同时发生的。但在工程上,极大多数构件是用钢、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运动效应影响极小,可以忽略不计。因此,当对构件进行受力分析时,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,就意味着不去考虑力对它的变形效应。在这一章,我们研究的对象都视为刚体,讨论的也只是力的运动效应。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,就不能再把物体看作是刚体了,这将在以后的各章中见到。

3. 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,而且还概括出力的各种性质。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 作用于物体使其处于平衡的力系称为平衡力系,最简单的平衡力系由两个力组成。若刚体在两个力作用下处于平衡,其必要和充分的条件是:这两个力大小相等、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。

图1-2中的 $F_A = -F_B$, F_A 和 F_B 称为作用在同一刚体上的一对平衡力。二力平衡条件是最简单的力系平衡条件。

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(图1-3)。当构件的形状为杆状时,则称二力杆。二力构件的受力特点是,所受的二力必定沿作用点的连线。工程上常根据这一特点来定出二力构件所受力的方向。

(2) 加减平衡力系原理和力的可传性原理 因为一个平衡力系不会改变刚体的运动状态,所以,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运动效应,此即加减平衡力系原理。换言之,只相差一个平衡力系的两个力系,作用效果是相同的(简称等效),可以相互替换。

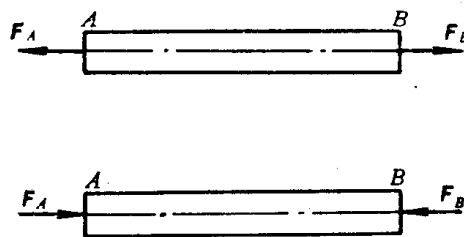


图1-2 二力平衡条件

利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运动效应。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 F 的作用（图1-4 a）；在 F 力作用线上的任一点 B ，沿 F 的作用线加上一对平衡力 F_1 、 F_2 ，并使 $F_1 = F_2 = F$ （图1-4 b）；再从图1-4 b 中除去一对平衡力 F 、 F_2 （图1-4 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 点用力 F 推车与在 B 点用力 $F_1 (= F)$ 拉车两者的运动效应是一样的。

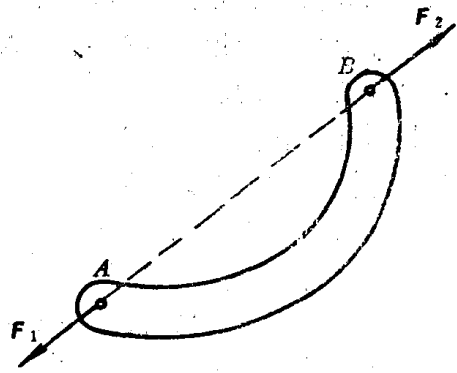


图1-3 二力构件

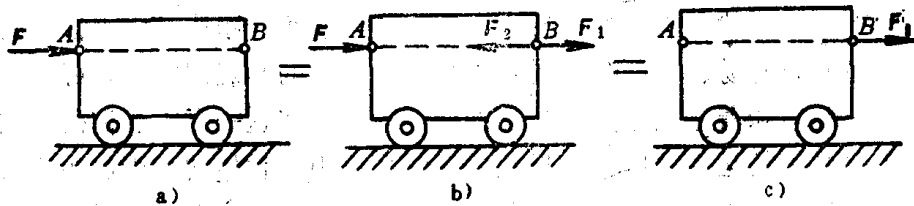


图1-4 力的可传性

由此可见，就力对刚体的运动效应来说，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，在研究力对物体的运动效应时，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力 F 和 F' 作用时，它将沿轴线伸长（图1-5 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1-5 b）。显然，伸长和缩短是两种不同的效应。所以在研究力对物体的变形效应时，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。

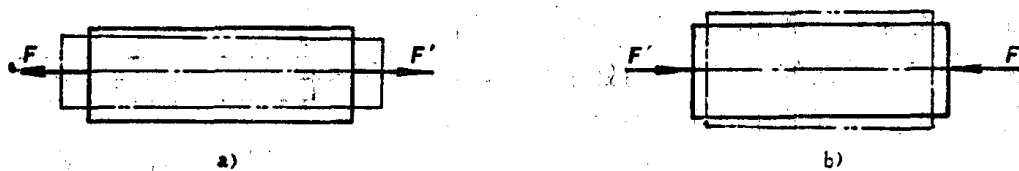


图1-5. 力的可传性原理不适用于变形体

显然，加减平衡力系原理也只适用于刚体。读者可自己论证。

(3) 力的平行四边形法则 力的平行四边形法则是：作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力，合力也作用于同一点，其大小和方向由以该两力为邻边所画出的平行四边形的对角线来表示（图1-6 a）。图中 F_1 、 F_2 两力称为合力 R 的分力。

必须注意，按此法则两力相加（合成）不能简单地求算术和，而要用平行四边形法则求

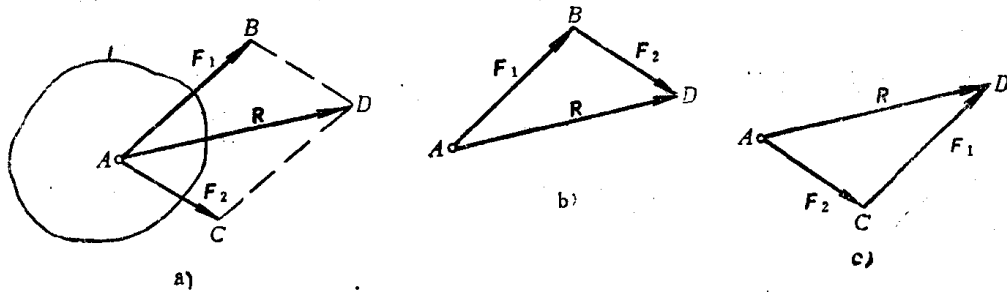


图1-6 力的平行四边形法则和力三角形法

几何和，即矢量和。其矢量表达式为

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

由图1-6 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 (AB) 的末端 B 作为力 F_2 (AC) 的始端画出 F_2 (即两分力首尾相接)，那么矢量 AD 就代表合力 R 。合力和分力构成的三角形 ABD 称为力三角形，用力三角形求两力的合力的方法称为力三角形法。显然，如果先画 F_2 ，后画 F_1 (图1-6 c)，也能得到相同的合力 R 。可见画分力的先后次序不同，并不影响合力 R 的大小和方向。

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1-7 a)，特别有用的是分解为方向已知且互相垂直的两个分力(图1-7 b)。这种分解称为正交分解，所得的两个分力称为正交分力。

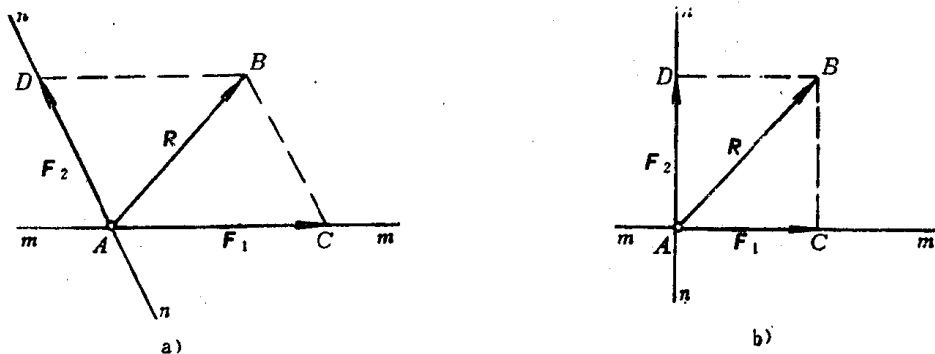


图1-7 力的分解

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：如果一物体在三个互不平行的共面力作用下而处于平衡时，则三个力的作用线必交于一点。这就是三力平衡汇交定理。

此定理很容易证明，设有三个共面、互不平行的力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别作用于物体的 A 、 B 、 C 三点，使物体处于平衡(图1-8)。延长 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点。根据力的可传性，可将 F_1 及 F_2 移至 O 点，并按平行四边形法求得其合力 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。

若物体受三个互不平行的共面力作用而平衡，则根据三力平衡汇交定理，通常只要知道

二个力的方向，第三个力的方向便可推知。因而在解力系平衡问题时，常可利用这个定理来确定某未知力的方向。

(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。此定律表明，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。

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构成平衡力系。这与二力平衡条件有本质区别。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1-9），则根据作用与反作用定律，与此同时A也必以与 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也称静力学公理，是静力学的基础，在后面进行物体的受力分析、力系的简化以及研究物体受力平衡的规律时经常用到，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。分析清楚构件在相互联接或接触处存在的力往往是对构件进行受力分析的关键。为此，要引入约束与约束反力的概念。

若一物体能够在空间沿任何方向，不受限制地自由运动，则称该物体为自由体（如飞机、气球等）。如果物体的运动在某些方向上受到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；轨道上行驶的汽车，受到钢轨的限制，只能沿轨道运动；转轴受轴承限制，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、轨道、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、拉杆、绳索以及一些其它物体。如图1-10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

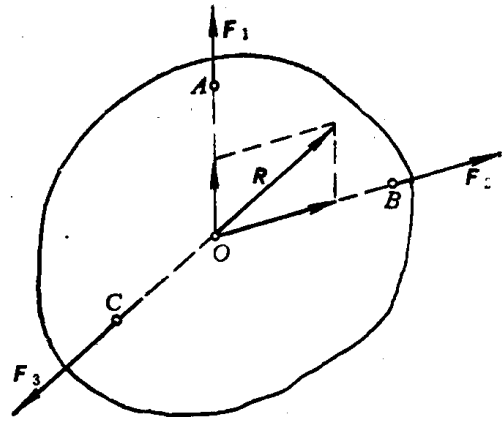


图1-8 三力平衡汇交

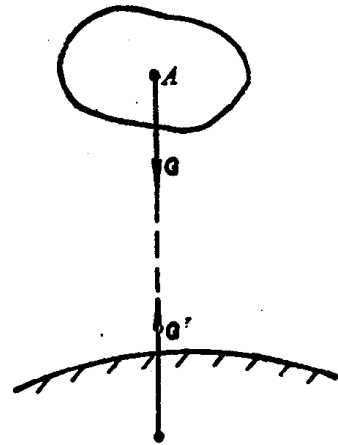


图1-9 作用与反作用

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；压力容器上所受的壓力，以及切削力、电磁力等，都是主动力。工程上常把主动力称为**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产生运动趋势时，则在非自由体与其约束之间必将产生相互作用的力，即：非自由体在其运动受到阻碍的方向上对约束产生作用力，而约束将对被约束物（非自由体）产生反作用力。我们把**约束作用于非自由体上的力称为约束反力**，简称**反力**。约束反力的大小和方向，取决于主动力的作用情况和约束的形式。**约束反力的方向，总是和该约束所能阻止的运动方向相反。**

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。显然，求约束反力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，**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1-11左：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1-11右）。又如图1-12左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1-12右），它们的方向是沿着钢丝绳的中心线，且背离钢管。需要注意，由绳子等柔性体产生的约束反力，只能是拉力，而不能是压力，因为柔性物体受压时不

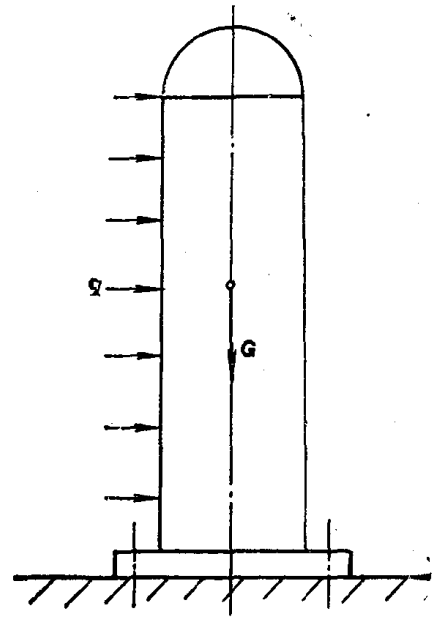


图1-10 塔器的约束

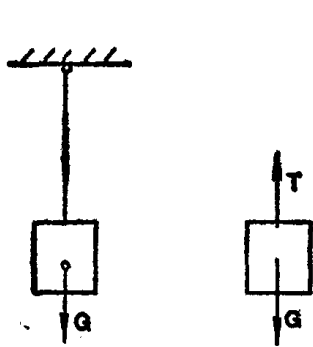


图1-11 柔性体约束例1

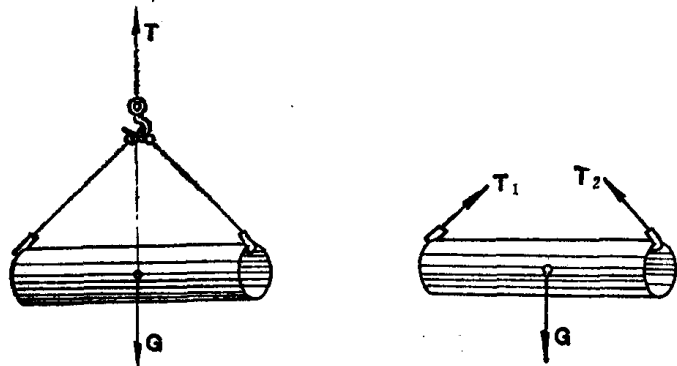


图1-12 柔性体约束例2