



高等职业教育“十二五”规划教材

化工设备及技术

HUAGONG SHEBEI JI JISHU

王磊 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业教育“十二五”规划教材

化工设备及技术

主 编 王 磊

副主编 孙明华

参 编 王 敏

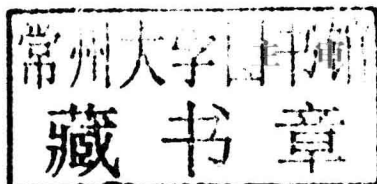
王叶萍

李业农

张鸿晨 蔡 凤

杨林娟 张爱娟

何晓春



机械工业出版社

本书根据教育部示范性高职院校建设项目要求,结合多年校企合作与工学结合人才培养经验编写而成。本书主要介绍了化工设备受力与承载能力分析,化工设备的类型和应用、常用材料、标准规范,压力容器的基本理论和工程计算,典型化工工艺设备及其主要零部件的结构类型、选择、使用和维护,其他常用化工设备的结构及用途,设备的安全运行及典型事故案例分析等内容,基本概括了化工设备设计、结构选型、使用维护所必需的机械基础知识和专业知识及技能要求,涉及面广、工程实践性强。

本书采用了近期颁布实施的国家及行业标准规范,内容丰富、层次清晰,采用项目导入、任务驱动的方法组织教学内容,深入浅出,适用性、实用性强。

本书适用于高职高专化工类专业及相关专业的教学用书,也可作为应用型本科、电大、各类成人院校的相关专业教材和企业员工的培训教材,还可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工设备及技术/王磊主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 10
高等职业教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-35930-2

I. ①化… II. ①王… III. ①化工设备—高等职业教育—教材 IV. ①TQ05

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第193646号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:王英杰 责任编辑:王英杰 武晋
版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽
封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦
北京京丰印刷厂印刷
2011年10月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·21印张·521千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-35930-2
定价:38.00元

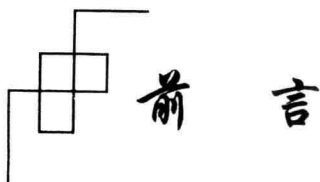
凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066
销售一部:(010) 68326294
销售二部:(010) 88379649
读者购书热线:(010) 88379203

门户网:<http://www.cmpbook.com>
教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版



前言

本书以教育部关于国家示范性高职院校建设精神为指导，以培养生产一线高技能型人才为目标，结合多年校企合作与工学结合人才培养经验编写而成。

全书共分九个单元，每个单元又由若干模块和项目任务组成，重点单元以综合性典型项目的实施为主线组织内容。为方便教学，每个单元开篇提出了本单元的学习要点和要达到的能力目标；每个模块又提出了具体的学习目标，以提出问题的方式引导本模块的学习。每个单元末编排了一定数量的具有工程实践性的思考与练习题，注重培养学生的职业岗位技能。

本书内容与工程实际紧密结合，突出了以下几点特色：

1) 根据国家示范性高职院校建设项目要求，结合校企合作人才培养经验，企业专家全程深度参与编写，紧紧围绕专业的职业能力安排内容。

2) 结合典型工作任务，针对实际工程项目的实施所需要的知识点和技能展开分析，工程实用性强，注重培养学生的工程概念，便于学生体验化工设备工作的全过程，有利于学生掌握职业技能和顺利就业。

3) 本着服务教学、与时俱进的原则，本书参考了近期颁布实施的国家及行业标准、规范，便于学生掌握新知识、新技术、新标准，尽快适应工作岗位。

4) 本书是为示范性建设重点专业精化专业的重点课程“化工设备及技术”而编写，同时也适用于应用化工、材料、环境、自动化设备等相关专业，因此本书叙述较为详尽，教师可根据具体情况进行删减，而且更适于自学。

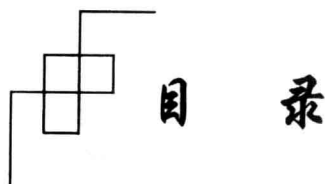
本书第三、四、五单元由南通职业大学王磊副教授编写；第七单元由企业专家孙明华高级工程师编写，他同时为全书提供了大量工程项目实例，并为全书内容设计提供了宝贵意见；第一单元、第二单元的模块一、二、四由南通职业大学张鸿晨副教授编写；第八单元由蔡凤副教授编写；第二单元的模块三由杨林娟教授编写，并负责新标准的采纳和更新工作；第九单元的模块一由王叶萍副教授编写，模块二由张爱娟副教授编写；第六单元由徐州工业职业技术学院王敏副教授编写。全书由王磊任主编，并负责统稿和最终定稿；孙明华、张鸿晨、蔡凤任副主编。本书由南通职业大学机械学院李业农教授、化工学院何晓春教授主审，两位教授详细审阅了本书初稿，提出了很有价值的修改意见，并对本书的出版给予了大力支持，在此表示衷心感谢！同时，对全体审稿人员以及所有对本书的出版给予支持和帮助的同志一并表示衷心的感谢！

本书编写过程中参阅了大量教材、书刊、标准规范以及网络资源，并引用了部分内容，在此谨向相关作者表示衷心谢意！

由于编写时间仓促，书中难免存在错漏之处，敬请读者提出批评指正。

编者





前言

第一单元 化工设备受力状况与 承载能力分析

模块一 构件的受力状况分析与 平衡计算	1
任务1 受力分析与受力图的绘制	2
任务2 各种平面力系的平衡计算	6
模块二 直杆拉伸和压缩的强度计算	11
任务1 拉伸与压缩时的强度计算	11
任务2 实验——材料在轴向拉伸和 压缩时的力学性能	14
模块三 剪切与挤压的实用计算	19
任务1 剪切的实用计算	19
任务2 挤压的实用计算	20
模块四 圆轴扭转的实用计算	21
任务1 圆轴扭转的特点	21
任务2 圆轴扭转的应力和强度计算	22
模块五 直梁的弯曲	23
任务1 认识直梁的弯曲变形	23
任务2 弯曲应力和弯曲强度计算	25
任务3 提高梁的抗弯强度的主要措施	27
知识扩展	29
模块六 组合变形和强度理论	29
任务1 认识组合变形和复杂应力状态	29
任务2 强度理论及应用	31
模块七 压杆稳定	33
任务1 认识压杆失稳及稳定	33
任务2 细长压杆的临界压力和 临界应力	34
任务3 压杆稳定性计算	37
任务4 提高压杆稳定性的措施	37
思考练习题	38

第二单元 化工设备基本常识

模块一 化工生产及化工设备	42
任务1 了解化工生产的特点	43
任务2 了解化工生产对化工设备的 基本要求	43
模块二 压力容器的结构与分类	45
任务1 压力容器的总体结构认知	45
任务2 压力容器的介质和分类	48
模块三 压力容器相关标准简介	52
任务1 了解国外的标准规范	52
任务2 熟悉国内的主要标准规范	55
模块四 化工设备常用材料	58
任务1 化工设备常用材料及选用	58
任务2 化工设备的腐蚀与防护措施	62
思考练习题	66

第三单元 压力容器设计

模块一 压力容器的应力分析	69
任务1 回转薄壳的薄膜应力分析	70
任务2 回转薄壳的边缘应力及其处理	75
模块二 内压薄壁圆筒和球壳的 强度计算	78
任务1 确定强度条件与计算壁厚	78
任务2 设计参数的确定	80
任务3 实验——容器压力试验	86
模块三 内压容器封头的设计	90
任务1 认识常用封头的结构形式	90
任务2 常用封头的强度计算及选用	91
模块四 外压容器	101
任务1 认识外压容器的稳定性并 计算临界压力	102
任务2 外压圆筒图算法	106

任务3 外压封头图算法	110	模块二 板式塔结构	196
任务4 实验——外压容器的压力试验	112	任务1 熟悉板式塔的类型及结构特点	196
任务5 提高外压容器稳定性的途径	113	任务2 选用板式塔的主要内部构件	201
典型项目实施	114	模块三 填料塔结构	210
思考练习题	115	任务1 熟悉填料类型及其支承结构	210
第四单元 容器主要零部件	119	任务2 液体分布装置	213
模块一 容器设计的标准化	119	任务3 板式塔与填料塔的性能比较及 选用	217
模块二 法兰连接	121	模块四 塔设备的载荷分析	219
任务1 认识法兰连接的结构与分类	121	任务1 塔设备的使用工况和危险截面 确认	219
任务2 认识法兰连接的密封	123	任务2 不同截面上的载荷分析	220
任务3 法兰的标准及其选用	126	模块五 塔设备的使用与维护	222
模块三 容器的支座	134	任务1 塔设备的操作——塔的开工和 停工	222
任务1 卧式容器支座的类型及选用	135	任务2 塔设备的常见故障及处理	223
任务2 立式容器支座的类型及选用	138	典型项目实施	226
模块四 容器的开孔与补强结构	143	思考练习题	226
模块五 容器安全装置	147	第七单元 反应设备	228
任务1 认识及选用安全阀	148	模块一 反应设备的应用及类型	228
任务2 认识及选用爆破片	149	模块二 机械搅拌釜式反应器	232
任务3 认识及选用安全装置的其他附件	151	任务1 总体结构认知	233
模块六 容器其他附件	153	任务2 釜体及传热装置的结构认知与 选型	234
典型项目实施	155	任务3 搅拌装置的结构认知与选型	241
思考练习题	160	任务4 传动装置的结构认知与选型	250
第五单元 换热设备	163	任务5 轴封装置的结构认知与选型	253
模块一 换热设备的应用及类型	163	模块三 反应设备的使用与维护	257
模块二 管壳式换热器的结构分析与 选型	170	任务1 搅拌釜式反应器的操作	257
任务1 认识管壳式换热器的总体结构与 基本类型	170	任务2 固定床反应器的操作	258
任务2 认识管壳式换热器的主要零部件 结构	172	典型项目实施	261
模块三 换热设备的使用与维护	183	知识扩展	261
模块四 换热器的标准化及选用	188	思考练习题	263
任务1 熟悉管壳式换热器标准	188	第八单元 其他化工常用设备	265
任务2 熟悉换热设备的选用方法	189	模块一 干燥设备的结构认知与选型	265
典型项目实施	190	任务1 认识固体物料的干燥机理	265
知识扩展	191	任务2 干燥设备的选型	266
思考练习题	192	模块二 过滤设备的结构认知与选型	272
第六单元 塔设备	193	任务1 液-固过滤设备的认知	273
模块一 塔设备的应用及类型	193	任务2 液-固过滤设备的类型及选用	274



模块三 分离设备的结构认知与选型	279	任务 1 安全教育与培训	312
任务 1 离心沉降设备的认知	279	任务 2 化工设备的安全运行	313
任务 2 膜分离设备的认知	281	任务 3 压力容器的安全使用	316
任务 3 气-液/气-固分离器的认知	287	模块二 典型化工设备常见事故及	
任务 4 液-液分离（萃取）设备的认知	289	案例	320
模块四 混合与混炼设备	291	任务 1 压力容器、锅炉及压力管道常见	
任务 1 普通混合设备的认知与选型	292	事故及案例分析	320
任务 2 硅橡胶专用捏合机的认知与		任务 2 塔、槽、釜设备常见事故及	
选型	293	案例分析	326
任务 3 混炼设备的认知与选型	297	任务 3 换热设备常见事故及案例分析	328
思考练习题	311	思考练习题	329
第九单元 化工设备的运行管理	312	参考文献	330
模块一 化工设备的安全使用	312		

第一单元 化工设备受力状况与承载能力分析

学习要点：

- ◆ 熟悉力与力矩、力偶的基本概念和基本性质；掌握平衡状态下物体的受力和平衡计算。
- ◆ 熟悉杆件拉伸与压缩、剪切与挤压、圆轴扭转、直梁弯曲四种基本变形的受力特点；掌握构件受力时的应力与强度计算。
- ◆ 了解复杂应力状态下的应力特点和强度理论的内容。
- ◆ 了解压杆稳定的概念，熟悉压杆的稳定性计算。
- ◆ 熟悉典型材料的力学性能。

能力目标：

- ◆ 能对构件的受力状况和承载能力进行正确的分析和计算。

化工设备（过程设备）及其零部件大都是在各种载荷下工作，为了使它们安全可靠地工作，从力学角度，一般提出三个方面的要求：

1. 能抵抗载荷引起的破坏，即要有一定的强度。
2. 在载荷作用下不发生超出许可的变形，即要有一定的刚度。
3. 在载荷作用下构件不会突然失去自身的几何形状，即具有可靠的稳定性。

强度问题、刚度问题和稳定问题，都属于力学基础内容。

化工设备构件的几何形状，既有杆件，也有平板和回转壳体。杆件的变形与应力分析比较简单，但它却是分析平板与回转壳体的基础，所以是力学问题中的基础内容。此处讨论等截面直杆的应力分析、强度计算与变形计算。在复杂应力状态下工作的构件的强度问题，是平板、壳体等受压构件的强度计算所必需的理论基础。

模块一 构件的受力状况分析与平衡计算

【学习目标】 掌握力的基本概念、静力学公理、物体的受力分析，正确画出物体的受力图；掌握平面力系建立静力平衡方程并求解的方法，以建立静力平衡条件的方法解决静态或准静态化工机械及设备构件的受力求解问题。

【问题引导】

1. 静力学的基本概念和基本性质有哪些？什么是平衡？有何特点？
2. 工程上常见的约束类型有哪些？如何确定约束反力的方位？

3. 如何进行物体的受力分析？画受力图的步骤是什么？
4. 平面汇交力系、平面力偶系和平面任意力系的平衡方程各是什么？

任务1 受力分析与受力图的绘制

一、受力分析的基本概念

1. 力与力系的概念

力的概念是人们在长期生产、生活实践中通过观察和抽象而得到的。力是物体间的相互的机械作用，如推车、投射猎物等。

力作用于物体会产生力的外效应，即使物体的运动状态发生变化，如人用力划船时船由静止到运动；力作用于物体也会使其外形和尺寸发生改变，即产生力的内效应，如拉伸弹簧将使弹簧伸长。

工程上，集中作用在很小面积上的力可以近似看作是作用于该点的集中力，该很小的作用区域可简化为力的作用点。连续分布较大区域的力可简化为分布力，分布形式可以是沿某直线或曲线分布的线分布力，也可以是沿某构件表面分布的面分布力和或存在于工程构件形体各处的体分布力。

集中力的常用单位为 N 或 kN；线性分布力的常用单位为 N/m；面分布力的常用单位是 N/m^2 ；体分布力的常用单位是 N/m^3 。

力的大小、方向、作用点称为力的三要素。力的三要素中只要有一个改变，力对物体作用的效果随之改变。力的三要素可用带箭头的有向线段表示于物体作用点上，如图 1-1a 所示。线段的长度表示力的大小，箭头指向表示力的方向，力的作用位置可能是线段的起点也可能是线段的终点，称为力的作用点。力系是指作用在物体上的一组力。如图 1-1b 所示，以黄山挑山工为研究对象，则其左肩是挑担的主力系，而右肩则是为减轻左肩负荷的辅助力系。

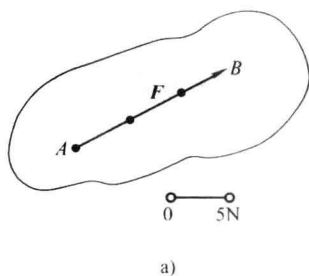


图 1-1 力与力系

a) 力的表示 b) 实际工作中多种力系的综合作用

2. 刚体的概念

在静力学研究中,着重于分析力的大小而非构件的变形,在力作用下很多构件的变形量与构件本身的尺寸相比显得很小,略去变形不会影响力学研究的结果,这时近似地认为物体在力作用下形状和大小都保持不变,这种物体称为刚体。在静力分析中,将实际物体理想化为刚体,更能简单而准确地反映待求问题的本质。

3. 平衡的概念

物体的平衡,是指物体相对于地球或固结在地球上的物体保持静止或作匀速直线运动的状态。平衡是相对的、有条件的、暂时的,是物体机械运动的一种特殊形式。

刚体在一个力系作用下处于平衡状态,则此力系称为平衡力系。

二、受力分析的基本规律

力的基本性质由静力学公理来说明。

公理1 二力平衡公理 刚体受两力作用时的平衡的充要条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上,如图1-2所示,此时 $F_1 = -F_2$ 。

工程中当构件自重与构件受力相比很小时,可不计自重。对不计自重并只受两个力作用而平衡的构件,称为二力构件。当构件呈杆状时,则称为二力杆。图1-2所示的曲杆AB、图1-3所示的杆AB和杆BC均是二力杆。在结构中找到二力构件会大大简化工程结构的受力分析。

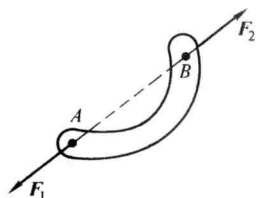


图 1-2 二力平衡

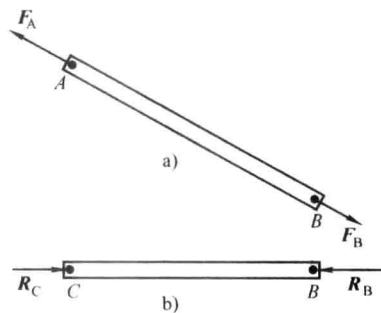


图 1-3 二力构件

公理2 加减平衡力系公理 在刚体的原有力系中,加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效果。

这个公理常被用来简化已知力系。由公理2可得到下面的推论。

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,这称为力的可传性原理。

例如,实践中用力推小车,与用等量同方向的力拉小车,二者的作用效果是相同的。应注意,该公理及其推论只适用于刚体,而不适用于变形体。

公理3 力的平行四边形公理 作用于物体上同一点的两个力,其合力也作用于该点,合力的大小和方向,由以这两个分力为邻边所作的平行四边形的对角线确定。如图1-4所示,合力矢 R 可用矢量式来表示

$$R = F_1 + F_2$$

该公理说明了力的可加性,可根据工程的需要而简化力系。

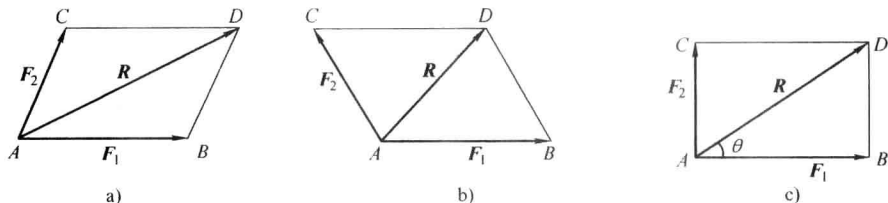


图 1-4 力的合成

推论 三力汇交定理 如果刚体受同一平面内的三个互不平行的力作用而平衡，设其中两力的作用线相交于某点，则第三力的作用线必定也通过这个点，这称为三力平衡汇交定理，如图 1-5 所示。

公理 4 作用与反作用公理 两个构件间存在力的作用时，作用力与反作用力总是同时出现，并且大小相等、方向相反、沿同一直线分别作用在两个构件上。

作用力与反作用力不是一对平衡力，不能互相抵消，而是分别作用在两个物体上。两个物体间互为施力体和受力体。

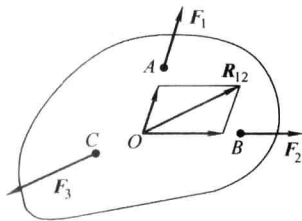


图 1-5 三力汇交

三、约束与约束反力

在工程中，当一个构件的运动受到周围构件的限制时，即称周围构件是该构件的约束。

促使物体运动的力称为主动力，如地球的引力、拉力等。而约束限制了被约束构件的运动，就有力的作用，这种力称为约束反力。约束反力的作用点就是约束与被约束物体的相互接触点；约束反力的方向总是与约束所能限制的构件运动趋势相反。

工程上常见的约束有四种类型。

1. 柔性约束

绳索、传动带、链条等都可以简化为柔性约束，该约束的特点是只能承受拉力。如图 1-6 所示，约束反力的作用点在两物体的接触点，约束反力的方向沿柔性约束体轴线，背离被约束物体。

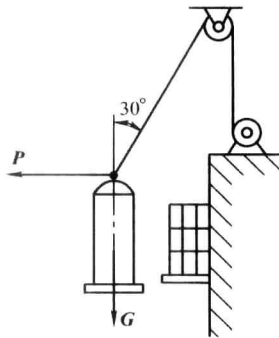


图 1-6 柔性约束

2. 光滑面约束

如果两个物体接触面之间的摩擦力很小，在工程上即可简化为光滑面约束。这种约束只能限制物体沿着接触点处的公法线朝接触面方向运动，约束反力方向必定沿接触面的公法线方向，并且指向物体，如图 1-7 所示。

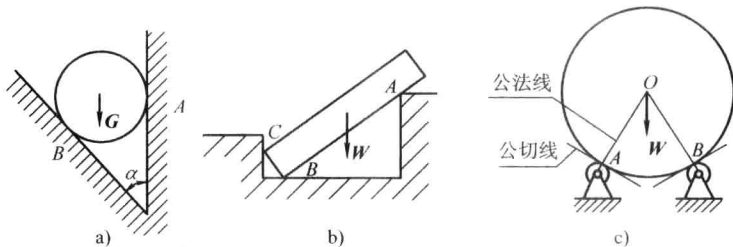


图 1-7 光滑面约束

3. 铰链约束

如图 1-8 所示, 两个带有圆孔的构件 A、B 的连接可通过圆柱销 C 来实现, 形成的约束称为铰链约束。这类约束只能绕销轴转动, 限制构件垂直于销轴方向的相对位移。铰链约束反力的特点是销钉对构件的约束反力应沿着接触点处的公法线方向, 且通过销钉的中心。

工程上常用的固定铰链支座如图 1-9 所示, 活动铰链支座如图 1-10 所示。

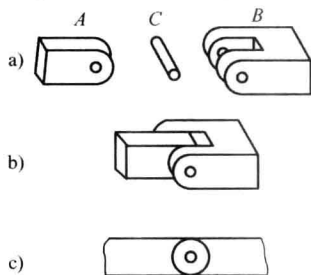


图 1-8 铰链约束

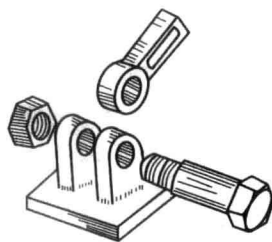


图 1-9 固定铰链支座

4. 固定端约束

如图 1-11 所示, 固定端约束经常位于工程构件的端部, 既限制构件任意方向的移动, 又限制全部转动, 使其不能产生任何相对运动。固定端约束的约束反力一般在平面力系中简化为三个分量, 即限制移动的反力 N_x 、 N_y 与限制转动的反力偶 m 。

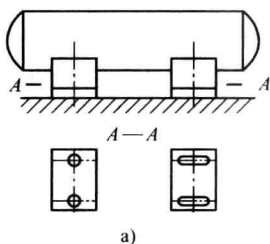


图 1-10 活动铰链支座

a) 活动铰链支座视图 b) 约束反力简图

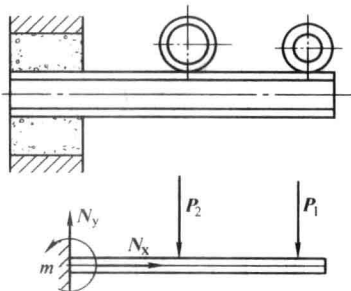


图 1-11 固定端约束

四、任务实施

任务内容: 分析构件受力状况并画出构件受力图。

任务分析: 为了具体算出所研究构件的受力大小, 需要把所研究的构件对象从周围机器体系的约束中分离出来, 单独画出构件分离体, 然后画出构件的受力 (而非构件对外的“施力”), 这包括构件所受的主动力和约束反力。画出分离体上所有“受力”的图, 称为构件的受力图。

实施步骤:

1) 明确具体的构件对象, 分析其所受的约束反力。

2) 解除约束, 取出分离体, 画分离体受主动力和约束反力作用的受力图。若机构中有二力杆, 应优先分析二力杆的受力。

【例1】重量为 G 的小球放置在光滑的斜面上，并用一根绳子拉住，如图 1-12a 所示。试画小球的受力图。

【解】

1) 取小球为研究对象，解除斜面和绳索的约束，画出分离体。

2) 作用在小球上的主动力为作用点在球心、方向为铅垂向下的重力 G 。作用在小球上的约束力包括绳索和斜面的约束力。绳索为柔性约束，对小球的约束力为过 O 点沿绳索的拉力 T 。斜面为光滑接触面约束，对小球的约束力为过球与斜面接触点 B 、垂直于斜面并指向小球的压力 N_B 。

3) 根据以上分析，在分离体相应位置上画出主动力 G ，约束反力 T 和 N_B ，如图 1-12b 所示。

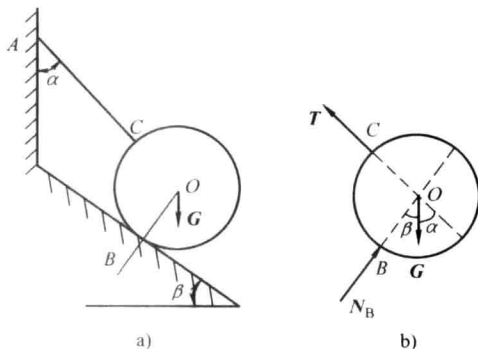


图 1-12 例 1 图

任务 2 各种平面力系的平衡计算

本任务主要完成机械设备的构件在平面力系作用下的平衡计算。

一、平面汇交力系的合成与平衡计算

作用于构件上各力的作用线均在同一平面内的力系，称为平面力系。各力的作用线全部相交于一点的平面力系称为平面汇交力系。如图 1-13 所示，滚筒、起重吊钩所受到的力组成的力系都是平面汇交力系。

平面汇交力系可通过力的平行四边形公理最终合成得到一个合力，即汇交力系的简化结果是一个力，可用矢量 F_R 表示合力的大小和方向。

平面汇交力系平衡的充要几何条件是：力系中各力构成的力多边形自行封闭，用矢量式表示为

$$F_R = F_1 + F_2 + F_3 + \cdots + F_n = \sum F_i = 0 \quad (1-1)$$

1. 力在坐标轴上的投影

如图 1-14 所示，设力 F 作用于物体的 A 点。在力 F 作用线所在的平面内取直角坐标系 xoy ，从力 F 的两端 A 和 B 分别向选定坐标轴作垂线，垂足间的距离，即线段 ab 和线段 $a'b'$ 就是力 F 在该轴上的投影。用 F_x 表示力 F 在 x 坐标轴上的投影；同理，力 F 在 y 轴上的投影用 F_y 表示。其正负号规定如下：若从 a (a') 到 b (b') 方向与坐标轴的正方向一致时，力的投影取正值；反之，

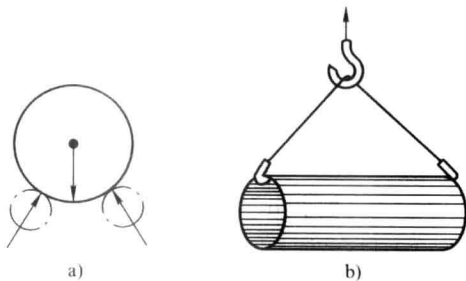


图 1-13 平面汇交力系

a) 作用于滚筒的平面汇交力系
b) 作用于起重吊钩的平面汇交力系

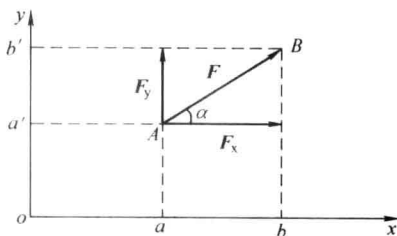


图 1-14 力在坐标轴上的投影

取负值。力在坐标轴上的投影的计算公式为

$$\begin{aligned} F_x &= \pm F \cos \alpha \\ F_y &= \pm F \sin \alpha \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 α ——力 F 与 x 轴正向所夹的角。

当力在坐标轴上的投影 F_x 和 F_y 均已知时, 力 F 的大小和它与 x 轴所夹锐角 α 可按下式计算

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \tan \alpha &= |F_y / F_x| \end{aligned} \quad (1-3)$$

力 F 的指向可根据其投影 F_x 和 F_y 的正负号决定。

可以证明, 合力在任一轴上投影, 等于各分力在同一轴上投影的代数和。这就是合力投影定理, 即

$$\begin{aligned} F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \cdots + F_{nx} = \sum F_{ix} \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \cdots + F_{ny} = \sum F_{iy} \end{aligned} \quad (1-4)$$

2. 平面汇交力系的平衡方程

平面汇交力系平衡的充要条件是力系的合力等于零。要使合力 $F_R = 0$, 必须是

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 说明, 平面汇交力系中所有分力在每个坐标轴上投影的代数和分别等于零。式 (1-5) 称为平面汇交力系的平衡方程, 它包括两个独立的方程, 可以求解两个未知量。当然, 这两个独立的未知量, 可以是某力的大小, 也可以是某力的角度等。

【例 2】 如图 1-15a 所示, 起重机用绕过滑轮 A 的钢绳吊起 $G = 20\text{kN}$ 的重物, 绞盘 D 固定在墙垛上, 已知 $\angle CAD = \angle ACB = 30^\circ$, $\angle ABC = 60^\circ$, 试求杆 AB 和 AC 所受的力。

【解】 建坐标系, 如图 1-15b 所示, 列平衡方程求解

$$\sum F_y = 0: T \sin 30^\circ + N_{AB} - G \sin 30^\circ = 0,$$

由 $T = G$ 得

$$N_{AB} = 0$$

$$\sum F_x = 0: N_{AC} = (T + G) \cos 30^\circ = 40 \times 0.866\text{kN} = 34.64\text{kN}$$

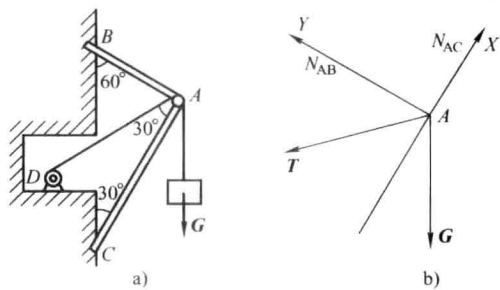


图 1-15 例 2 图

a) 机构简图 b) 受力分析简图

二、力矩及平面力偶系的平衡

(一) 力矩和合力矩定理

1. 力对点之矩

在生产实践中, 用扳手紧固螺母, 形成了力对点之矩这一概念。如图 1-16 所示, 平面上有一作用力 F , 在同平面内任取一点 O , O 点称为矩心, 其到力 F 的作用线的垂直距离 d

称为力臂，则在力的作用下物体的转动效应用力的大小乘以力臂即力矩来度量， F 与 d 的乘积越大，转动效应越强。

力对点之矩是一个代数量，其绝对值等于力的大小与力臂的乘积，正负号按下述方法确定：力使物体绕矩心逆时针转动时为正，反之为负。记作

$$m(F) = \pm Fd \quad (1-6)$$

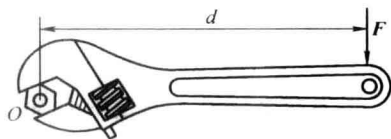


图 1-16 力矩的定义

力矩是相对于某一矩心而言的。当力沿作用线移动时，力对点之矩保持不变；当力的作用线过矩心，则它对矩心的力矩为零。

在国际单位制中，力矩的单位是 $N \cdot m$ 或 $kN \cdot m$ 。

2. 合力矩定理

合力对力作用平面内任一点的力矩等于该平面内各分力对同一点力矩的代数和。这称为合力矩定理，其表达式为

$$m_o(F_R) = \sum m_o(F_i) \quad (1-7)$$

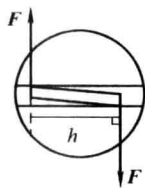
合力矩定理对平面汇交力系、平面一般力系均适用。

(二) 平面力偶理论

1. 力偶、力偶矩、等效力偶

力学上把一对大小相等、方向相反、作用线平行且不重合的力组成的力系称为力偶。力偶用符号 (F, F') 表示。工程中，钳工用螺钉旋具旋紧螺钉、汽车驾驶人用双手转动方向盘等，都是施加力偶的实例。

力偶中两力作用线所确定的平面称为力偶作用面，两力作用线之间的垂直距离称为力偶臂，用符号 h 表示，如图 1-17 所示。力偶只能使物体产生转动效应，用力偶矩来度量力偶对物体的转动效应。力学中，把力的大小与力偶臂的乘积并冠以正负号称为力偶矩，记作 $m(F, F')$ ，简记为 m ，即



$$m(F, F') = m = \pm Fh \quad (1-8)$$

图 1-17 旋紧螺钉时的力偶矩

力偶矩与力矩一样，也是代数量，正负号表示力偶的转向，规定逆时针为正，反之为负。其单位也和力矩相同。

可见，力偶的作用效应取决于力的大小和力偶臂的长短以及转向，而与矩心的位置无关。如果作用在同一平面内的两个力偶，它们的力偶矩大小相等、转向相同，则称此两力偶为等效力偶。

力偶具有如下性质：

- 1) 力偶无合力。一个力偶在任何情况下不能与一个力等效，也就不能与一个力平衡。
- 2) 力偶可以在其作用面内任意地移动和转动，而不会改变它对刚体的作用效应。
- 3) 同时改变力偶中力的大小和力偶臂的长短，但只要保持力偶矩的大小和转向不变，就不会改变力偶对刚体的作用效应，这称为力偶的等效性如图 1-18 所示。

2. 力偶的合成与平衡

作用于刚体上的一组力偶具有共同的作用面，则称这组力偶为平面力偶系。力偶既然没有合力，平面力偶系合成的结果只能是一个合力偶，其合力偶矩等于力偶系中各分力偶矩的代数和。

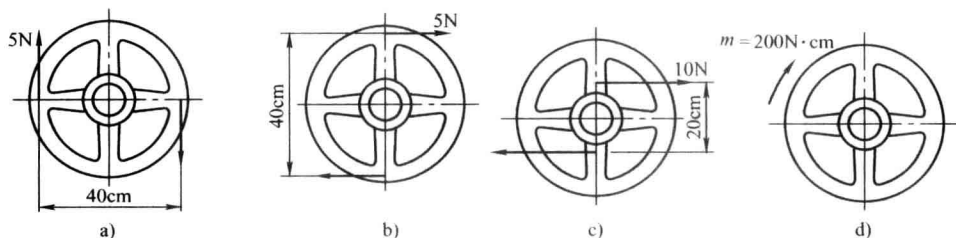


图 1-18 力偶等效性

由平面力偶系的合成结果可知，平面力偶系平衡的充分必要条件是：力偶系的合力偶矩等于零，即各分力偶矩的代数和等于零。有

$$M = m_1 + m_2 + \cdots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i = 0 \quad (1-9)$$

这就是平面力偶系的平衡方程。应用这个平衡方程可以求解一个未知量（力、力臂或者力偶矩）。

三、平面任意力系的平衡计算

1. 力线平移定理

作用在刚体上的力可以从原来的作用点平移到刚体内任一点，但须附加一个力偶，附加力偶的矩等于原来的力对新作用点的矩，如图 1-19 所示。

该定理指出，一个力可以等效为一个力和一个力偶的联合作用，或者说一个力可以分解为作用在同一平面内的一个力和一个力偶。

2. 平面任意力系向平面内任一点的简化

平面内各力的作用线既不汇交于一点又不都平行的力系称为平面任意力系或平面一般力系，如图 1-20a 所示。现将该力系向平面内某一点进行简化，可以得到一个力和一个力偶。这个力等于力系中各力的矢量和，作用于简化中心，称为原力系的合力或主矢；这个力偶的矩等于原力系中各力对简化中心之矩的代数和，称为原力系的主矩。

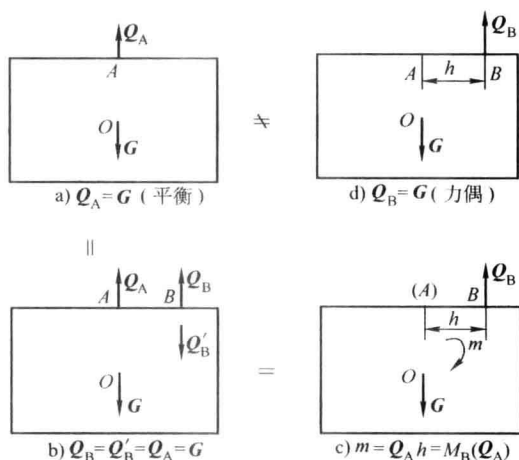


图 1-19 力线平移定理

设刚体上有分别作用在 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 四点的既不汇交又不平行的四个力 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ，构成平面一般力系，如图 1-20a 所示。选取物体上任意一点 O 作为简化中心，如图 1-20b 所示，根据力线平移定理，将此四个力同时向 O 点平移，则把原来的平面一般力系等效变换成一个汇交于 O 点的平面汇交力系和一个平面附加力偶系。将平面汇交力系和平面力偶系分别合成，就得到作用于 O 点的合力 R_O 和合力偶矩 M_O ，如图 1-20c 所示， R_O 和 M_O 分别称为该力系的主矢和主矩。

利用解析法求主矢，可通过简化中心建立直角坐标系 xOy ，则主矢 R_O 的大小和方向为

$$R_0 = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(\sum F_{ix})^2 + (\sum F_{iy})^2} \quad (1-10)$$

$$\tan \alpha = \left| \frac{\sum F_{iy}}{\sum F_{ix}} \right|$$

力系各力平移时得到的四个附加力偶矩，分别等于原力系中各力对简化中心的力矩。四个附加力偶矩合成后的合力偶矩 M_0 被称为原力系的主矩，可写为

$$M_0 = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m_0(F_1) + m_0(F_2) + m_0(F_3) + m_0(F_4) = \sum m_0(F_i) \quad (1-11)$$

将得到的主矢 R_0 和主矩 M_0 反过来应用力的平移定理，可求得合力 R (图 1-20d、e)。

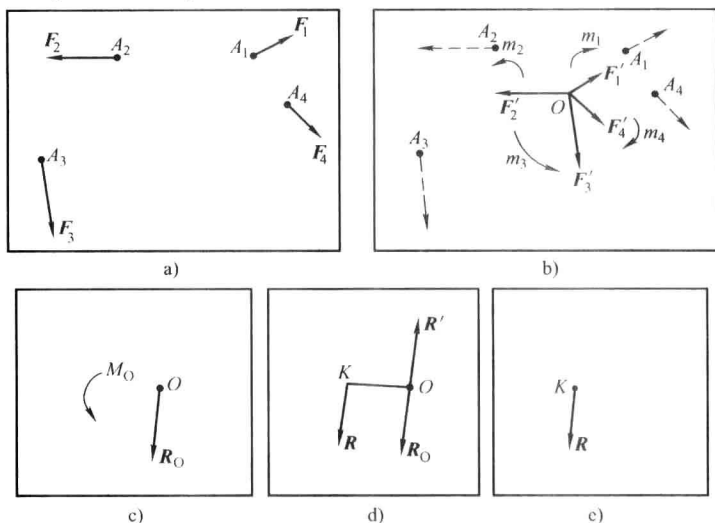


图 1-20 平面一般力系的简化

3. 平面任意力系的平衡条件和平衡方程 平面任意力系平衡的充分必要条件是力系的主矢和主矩均为零，即式 (1-10) 及式 (1-11) 均为零。于是平面一般力系的平衡方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0 \\ \sum m_0(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

四、任务实施

平面任意力系平衡问题的解析法求解主要步骤如下：

- 1) 选取适当的物体作为研究对象，将其独立出来，正确地画出其受力图，对于指向未定的未知力，可先假设其方向画出。
- 2) 根据式 (1-12)，正确地列出平衡方程，注意代数量的正负号。
- 3) 正确地求解平衡方程，并根据结果判断实际的力的方向。

【例 3】 悬臂吊车如图 1-21a 所示，横梁 AB 长 $l = 2.5\text{m}$ ，自重 $G_1 = 1.2\text{kN}$ ，拉杆 BC 的倾角为 $\alpha = 30^\circ$ ，不计自重。电葫芦连同重物共重 $G_2 = 7.5\text{kN}$ ，求其在图示位置 $a = 2\text{m}$ 时，拉杆的拉力和铰链 A 处的约束反力。

【解】 选横梁 AB 为研究对象。 BC 杆为二力杆， BC 作用于梁 AB 的力方向沿 BC 杆轴