

教育部高职高专规划教材

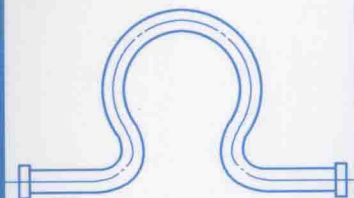
JIAOYUBU GAOZHI GAOZHUAN GUIHUA JIAOCAI

工程力学

第二版

● 吴玉亮 主编

GONGCHENG
LIXUE



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

工 程 力 学

第二版

吴玉亮 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书的内容分三篇。第一篇为静力分析，以力系的简化及力系的平衡为主线，介绍如何求解约束反力的问题；第二篇为强度、刚度和稳定性分析，以强度、刚度为主线，介绍杆件的拉伸（压缩）、剪切、扭转、弯曲的强度、刚度计算问题；第三篇为运动和动力分析，介绍质点和刚体的运动及动力问题。本书突出高职高专“以应用为目的”，“以能力为本位”的教育理念，体现“以必需、够用为度”的原则。每章开头新增加了学习目标，以指导学生学习的。

本书的特点是：突出应用、简化推导，体现高职高专教育的特点；简洁精练，难易适度；精选内容，融会贯通，方便学习和应用。

本书可作为高职高专机械类学生教材，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/吴玉亮主编. —2版. —北京：化学工业出版社，2004.6

教育部高职高专规划教材

ISBN 978-7-122-09982-2

I. 工… II. 吴… III. 工程力学-高等学校：技术学院-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 058246 号

责任编辑：高 钰

文字编辑：李 娜

责任校对：战河红

装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13¼ 字数 328 千字 2011 年 2 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：24.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

本教材自 2004 年出版以来,已印刷六次,受到了广大读者的欢迎,并被一些省市教育部门确定为高职高专院校“专接本”考试的指定用书。本教材是根据高等职业技术教育机械类专业力学课程教学要求编写的,同时还兼顾到了化工机械专业的专业特点及其他近机械类专业的教学需求。本书严格把握高职高专教学定位,对教学内容精心选择、合理安排,注重“以应用为目的”、“以就业为导向”,贯彻“以必需、够用为度”的精神,体现了高职高专的教育特色。

“梁”、“轴”、“柱”、“杆”等是工程力学的重点研究对象,它的强度问题、刚度问题、稳定性问题,影响到人们生产和生活的许多方面,尤其在“安全可靠”与“经济性”的统一方面。因此工程力学的教学过程必须紧密联系实际,紧紧围绕工程中、生活中的实际问题来开展。

本教材在编写过程中,对问题的阐述,对例题、习题的选择,都尽量采用工程中、生活中鲜活的实例。融“知识”与“能力”为一体,适于“任务驱动”、“项目导向”等教学模式。为专业课程的学习,奠定了坚实的基础。

本次教材由吴玉亮主编。引言、各章节学习目标要求、第六章由吴玉亮编写,第一章、第九章由高朝祥编写,第二章由李俊仙编写,第三章由庞思红编写,第四章、第五章由郭晓霞编写,第七章由边秀娟编写,第八章由穆凤芸编写,第十章、第十一章、第十二章由何国旗编写。由于编者水平所限,书中不妥之处诚望读者指正。

编 者
2010 年 11 月

第一版前言

本教材是根据高等职业技术教育机械类专业力学课程教学要求编写的，同时也兼顾了过程装备及其他近机械类专业的教学需求。本书严格把握读者定位，对教学内容精心选择、合理安排，注重“以应用为目的”，“以就业为导向”，贯彻“以必需、够用为度”的精神，体现了高职高专教育特色。

本教材引言、第一章（第一、二节）、第二章（第一、二、三节）、第六章、第九章由吴玉亮编写，第一章、第二章其他部分由李俊仙编写，第三章由庞思红编写，第四章、第五章由郭晓霞编写，第七章由边秀娟编写，第八章由穆凤芸编写，第十章、第十一章、第十二章由何国旗编写。全书由吴玉亮主编并统稿，由梁正主审。参加审稿的还有王绍良、颜惠庚、赵玉奇等。由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，诚望读者指正。

编 者

2004 年 4 月

目 录

第一篇 静力分析

第一章 静力学基础	2
第一节 力 静力学公理	2
一、力的概念	2
二、平衡的概念	2
三、静力学公理	3
第二节 约束与约束反力	4
一、约束的概念	4
二、约束的类型	4
第三节 物体的受力分析与受力图	6
思考题	8
习题	9
第二章 平面力系的简化与平衡	11
第一节 平面汇交力系的简化与平衡	11
一、简化的几何法	11
二、简化的解析法	11
三、平衡方程	14
第二节 力矩与力偶	16
一、力对点之矩 合力矩定理	16
二、力偶及其性质	17
三、平面力偶系的简化与平衡	18
第三节 力的平移	20
第四节 平面一般力系的简化与平衡	20
一、平面一般力系向一点简化	21
二、固定端约束	22
三、平面一般力系的平衡方程	23
第五节 摩擦	26
一、摩擦定律	26
二、摩擦角和自锁现象	28
三、考虑摩擦的平衡问题	28
思考题	30
习题	31
第三章 空间力系及重心	33

第一节 空间一般力系的简化	33
一、力在空间直角坐标轴上的投影	33
二、力对轴之矩	34
三、力对点之矩与力对轴之矩的关系	36
四、空间力系的简化	37
第二节 空间力系的平衡问题	38
第三节 重心	40
一、重心的概念	40
二、重心坐标式	40
三、重心位置的求法	41
思考题	43
习题	43

第二篇 强度、刚度及稳定性分析

第四章 轴向拉伸和压缩	47
第一节 轴向拉伸和压缩的概念	47
第二节 拉、压杆内力 截面法	48
一、内力的概念	48
二、截面法、轴力和轴力图	48
第三节 拉、压杆横截面上的应力	50
一、应力的概念	50
二、拉、压杆横截面上的正应力	51
第四节 轴向拉伸与压缩变形	53
一、变形与应变	53
二、胡克定律	54
第五节 拉、压时材料的力学性能	55
一、低碳钢在拉伸时的力学性能	55
二、其他材料在拉伸时的力学性能	58
三、材料在压缩时的力学性能	59
第六节 轴向拉伸或压缩时的强度计算	60
一、极限应力、许用应力及安全系数	60
二、强度计算	61
三、应力集中的概念	64
第七节 轴向拉伸与压缩的静不定问题	65
一、静不定的概念	65
二、求解静不定问题的基本方法	65
三、温度应力	67
思考题	69
习题	69
第五章 剪切与扭转	73

第一节 剪切的概念与实用计算	73
一、剪切的概念	73
二、剪切的实用计算	73
三、剪切胡克定律	75
四、切应力互等定理	75
第二节 圆轴扭转的概念	76
第三节 圆轴扭转时的内力、转矩图	76
一、外力偶矩的计算	76
二、扭转时的内力——转矩	77
三、转矩图	77
第四节 圆轴扭转的应力和强度条件	79
一、圆轴扭转时的应力	79
二、极惯性矩和抗扭截面系数	82
三、圆轴扭转时的强度条件	82
第五节 圆轴扭转时的变形与刚度条件	86
一、圆轴的扭转变形	86
二、圆轴扭转时的刚度条件	87
思考题	89
习题	90
第六章 弯曲	93
第一节 平面弯曲的概念	93
第二节 梁的弯曲内力及弯矩图	94
一、剪力与弯矩	94
二、剪力图与弯矩图	95
第三节 梁的弯曲应力和强度条件	102
一、梁的纯弯曲	102
二、纯弯曲的梁横截面上的正应力	102
三、惯性矩	104
四、弯曲正应力的计算	105
五、弯曲正应力的强度条件	106
六、提高梁弯曲强度的主要措施	109
第四节 梁的弯曲变形和刚度条件	111
一、挠度和转角	111
二、梁变形的求法	112
三、梁的刚度条件	116
四、提高梁弯曲刚度的主要措施	116
思考题	116
习题	116
第七章 组合变形	120
第一节 拉伸、压缩与弯曲的组合变形	120

第二节 应力状态	123
第三节 强度理论	127
第四节 圆轴弯曲与扭转的组合变形	129
思考题	133
习题	134
第八章 压杆稳定	136
第一节 压杆稳定的概念	136
第二节 计算临界力的欧拉公式	137
一、两端铰支压杆的临界力	137
二、杆端约束对临界力的影响	138
第三节 压杆的临界应力	139
一、细长压杆的临界应力	139
二、长压杆的临界应力经验公式	141
三、临界应力总图	141
第四节 压杆的稳定计算	142
第五节 提高压杆稳定性的措施	144
一、合理选择材料	144
二、减小压杆柔度	144
思考题	145
习题	145
第九章 构件的疲劳强度	147
第一节 交变应力与疲劳失效	147
一、交变应力的概念	147
二、循环特性、应力幅度和平均应力	148
第二节 疲劳破坏特点与原因	149
第三节 构件的疲劳极限	149
一、试样材料的疲劳极限	149
二、构件的疲劳极限	150
思考题	151

第三篇 运动和动力分析

第十章 质点运动与动力学基础	154
第一节 自然法求点的速度和加速度	154
一、运动方程	154
二、点的速度	155
三、点的加速度	155
第二节 直角坐标法求点的速度和加速度	158
一、运动方程	158
二、点的速度	159
三、点的加速度	160

第三节 质点动力学基本定律	161
一、第一定律(惯性定律)	161
二、第二定律(力与加速度关系定律)	161
三、第三定律(作用与反作用定律)	162
第四节 质点运动微分方程	162
一、质点运动微分方程的表达形式	162
二、质点动力分析的两类问题	163
思考题	166
习题	166
第十一章 刚体的基本运动与动力学基础	169
第一节 刚体的平动	169
第二节 刚体绕定轴转动	171
一、转动方程	171
二、角速度	172
三、角加速度	172
四、匀速、匀变速转动	173
五、定轴转动刚体内各点的速度和加速度	174
第三节 刚体绕定轴转动的动力分析基本方程	176
第四节 转动惯量	177
一、转动惯量	177
二、简单图形转动惯量的计算	178
三、回转半径	179
四、平行移轴定理	179
第五节 刚体绕定轴转动的动力分析方程及其应用	180
思考题	181
习题	181
第十二章 点和刚体的复合运动	184
第一节 点的合成运动	184
一、点的合成运动的概念	184
二、绝对运动、相对运动及牵连运动	185
三、点的速度合成定理	186
第二节 刚体的平面运动	188
第三节 平面图形上各点的运动分析	189
思考题	192
习题	192
附录 型钢表	195
参考文献	202

第一篇 静力分析

静力分析是工程力学的重要内容之一，它研究的是物体受力与平衡规律问题，即根据所研究的物体及其与周围物体之间的联系，确定作用在所研究的物体上有哪些力，以及这些力之间的数量关系。因此，静力分析涉及以下三方面的问题。

1. 物体的受力分析

即分析并给出作用于物体的力的全貌，包括主动力和约束反力。

2. 力系的简化

力系，可以由更简单的形式来等效替换，以实现简化之目的，从而更清楚地表达出它对物体的作用效果。

3. 力系的平衡条件

建立各种力系下的平衡方程，并据此由已知力求得未知力。这是静力分析最根本的任务。

静力分析中涉及的物体均抽象为刚体。

第一章 静力学基础

学习目标:

通过本章学习,掌握约束及约束反力的概念,清楚典型约束的特点及应用;重点是能够对物体进行正确的受力分析,并画出物体的受力图。

第一节 力 静力学公理

一、力的概念

力是力学中一个最基本的概念。在长期的生产和生活实践中,人类很早就对力有了感性认识。通过科学的抽象,力定义为:力是物体间的相互机械作用。这种作用,会使物体的运动状态发生变化,或使物体产生变形。

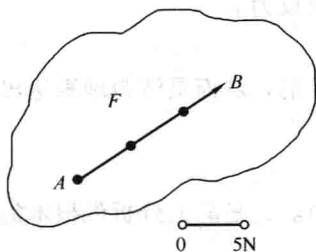


图 1-1 力的图示

力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点,力的大小、方向和作用点称力的三要素。

力为矢量,通常可用一段有向线段来表示,如图 1-1 所示。有向线段的长度(按比例)表示力的大小,箭头指向表示力的方向,线段的起点或终点表示力的作用点。力矢量一般用黑体字母 F 、 P 等表示。力的国际单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。

若物体受一组力的共同作用,称这一组力为力系。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。若一个力与一个力系等效,则这个力称为该力系的合力。

物体受到力的作用后,产生的效应表现在两个方面。

- ① 外效应(运动效应)——使物体的运动状态发生变化。
- ② 内效应(变形效应)——使物体的形状发生变化。

本篇研究的是物体的外效应。在这一研究领域内,将物体视为刚体。即在任何情况下,物体均不变形。刚体是对实际物体经过科学的抽象和简化而得到的一种理想模型,它抓住了问题的本质,也是实际所许可的。

然而当变形这一因素在所研究的问题中跃居主要地位时(例如本书第二篇,强度、刚度分析),一般就不能再把物体看作是刚体了。

二、平衡的概念

所谓平衡是指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态。显然,平衡是机械运动的特殊形式。如果作用于物体上的力系满足一定条件,则物体可以处于平衡状态,但当物体所受的力发生变化,平衡条件被破坏时,物体就由平衡状态转化为不平衡状态。作用在刚体上使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系,平衡力系应满足的条件称为平衡条件。

静力分析即研究刚体的平衡规律,研究作用在刚体上的平衡条件。

三、静力学公理

人类经过长期的实践、认识、再实践、再认识的过程，不仅建立了力的概念，而且还概括出力的各种性质。它们是从实践中总结出来的客观规律，也称静力学公理。

1. 二力平衡公理

受两个力作用的刚体，处于平衡状态的充分和必要条件是：这两个力大小相等、方向相反、作用线相同（称等值、反向、共线）。这就是二力平衡公理，如图 1-2 所示。

对于变形体来说，二力平衡条件只是必要条件而非充分条件。如柔体受等值、反向、共线的两个拉力时，处于平衡；但若受到等值、反向、共线的两个压力时，就不能平衡了（见图 1-3）。

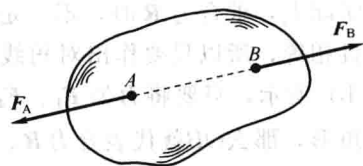


图 1-2 二力平衡条件

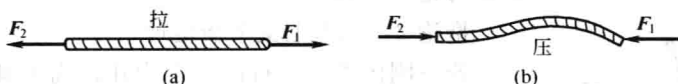


图 1-3 二力作用于柔体

在两个力作用下处于平衡的物体称为二力体。由二力平衡公理可知，作用在二力体上的两个力，它们必定通过两个力作用点的连线，而与其形状无关，且等值、反向，如图 1-4 所示。

2. 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上，加上或减去任何平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效果。

推论 1：力的可传性原理

作用于刚体上某点的力，可以沿其作用线移到刚体内任意点，并不改变此力对刚体的作用效果。如图 1-5 所示，作用于小车 A 点的推力 F ，可以沿着力的作用线移到 B 点，变为作用于 B 点的拉力 F' ($F=F'$)。虽然推力变为拉力，但小车的运动状态不会改变，即效果相同。

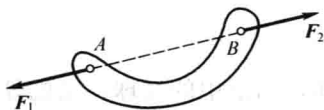


图 1-4 二力体的力间关系

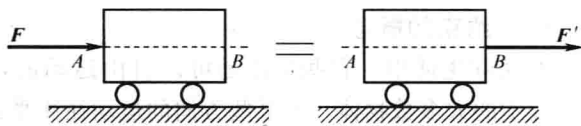


图 1-5 力的可传性

由此可见，作用于刚体上力的三要素可引申为：力的大小、方向和作用线。

3. 力的平行四边形公理

作用在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，其大小和方向由以这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线来表示，如图 1-6 (a) 所示。

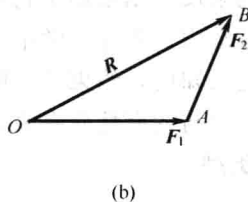
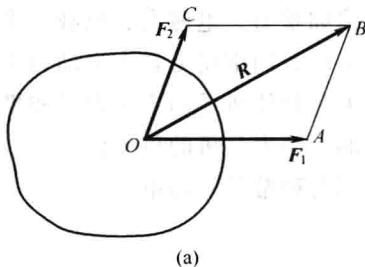


图 1-6 力的合成

实际上, 求合力 R 时, 不一定要作出整个平行四边形 $OABC$ 。因为平行四边形的对边平行且相等, 所以只要作出对角线一侧的一个三角形 ($\triangle OAB$ 或 $\triangle OCB$) 就可以了。如图 1-6 (b) 所示, 只要将力矢 F_1 、 F_2 首尾相接, 成一折线 OAB , 再用直线 $\overline{OB}$ 将其封闭成一个三角形, 那么 $\overline{OB}$ 就代表合力 R 。这一合成方法称为力的三角形法则。

故合力矢等于这两个分力矢的矢量和, 其矢量表达式为

$$F_1 + F_2 = R$$

利用力的平行四边形法则 (或力三角形法则), 也可以把作用在物体上的力分解为相交的两个分力, 分力与合力作用于同一点。在工程问题中, 特别有用的是分解为方向已知且相互垂直的两个分力, 这种分解称为正交分解, 所得的两个分力称为正交分力。

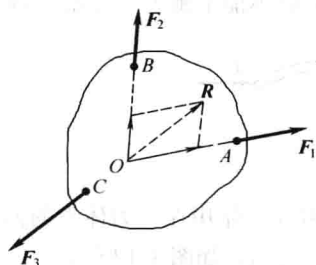


图 1-7 三力汇交平衡

推论 2: 三力汇交平衡定理

若一刚体受不平行的三个力作用而平衡时, 这三个力的作用线必汇交于一点。如图 1-7 所示。

4. 作用和反作用公理

两个物体间相互作用的一对力, 总是大小相等, 方向相反, 作用线重合, 并分别作用于这两个物体。这两个力互为作用力与反作用力。

要注意二力平衡公理与作用和反作用公理之间的区别, 前者叙述了作用在同一物体上两个力的平衡条件, 后者却是描述两物体间相互作用的关系。

第二节 约束与约束反力

一、约束的概念

在实际生活中, 有些物体是可以自由运动的, 称它为自由体, 如空气中的气球、飞机等。而工程中的大多数物体, 其某些方向的运动往往受到限制, 这样的物体称为非自由体, 如行驶中的火车和机器中的转轴等。火车只能沿钢轨运动, 转轴只能在相应的轴承中转动。通常把对非自由体起限制作用的周围物体称为约束, 如钢轨是火车的约束, 轴承是转轴的约束等。

当物体受到约束时, 物体与约束之间相互作用着力, 约束给被约束物体的力限制了物体的某些运动。约束对被约束物体的作用力称为约束反力, 简称约束力或反力。约束反力的方向总是与非自由体被约束所限制的运动方向相反, 这是用以确定各种约束反力方向的原则。

显然, 物体 (非自由体) 受到了主动力, 诸如重力、电磁力、风载、水压等的作用, 欲要产生运动, 而约束反力则限制了物体的这种运动。约束反力是由主动力引起的, 且与主动力相对应, 故称被动力。在静力学中, 约束反力和物体所受的主动力组成平衡力系。

主动力一般是已知的, 约束反力则是未知的。静力分析的重要任务之一就是确定未知的约束反力。约束反力与约束性质有关, 下面介绍几种常见的约束。

二、约束的类型

1. 柔体约束

工程上的钢丝绳、皮带、链条都可简化为柔体。一般情况下柔体只能承受拉力, 而不能

承受压力。当物体受到柔体的作用时，柔体只能限制物体沿柔体伸长方向的位移。故柔体的约束反力作用在柔体与物体的接触点，其方向一定沿着柔体，且必为拉力。图 1-8 (a) 所示的两根绳索悬吊重物，绳索的约束反力用 T_A 、 T_B 表示，是背离重物的拉力；图 1-8 (b) 所示为带传动装置，带对带轮的约束反力用 T_1 、 T_2 表示，是背离带轮的拉力。

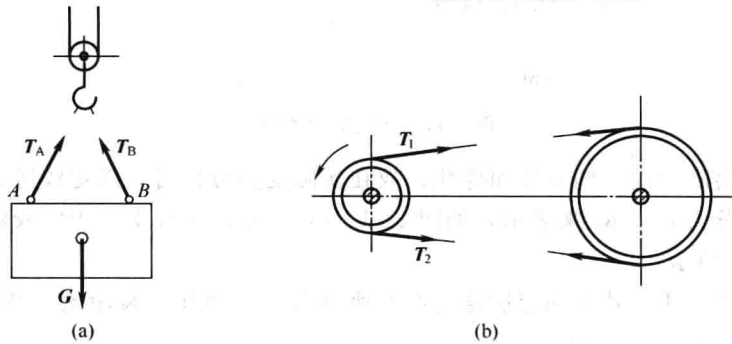


图 1-8 柔体约束反力

2. 光滑面约束

在所研究的问题中，若物体接触面之间的摩擦力远小于物体所受的其他各力，则摩擦力可略去不计而认为接触面是光滑的。光滑平面或曲面若构成对物体运动的限制时，称为光滑面约束。这种约束无论是平面还是曲面，都不能限制物体沿接触面切线方向的运动，而只能限制沿接触面公法线方向压入到接触面内部。因此，光滑面的约束反力应通过接触点，沿接触面公法线指向被约束物体。通常把这种光滑面约束反力称为法向反力，多用字母 N 表示，如图 1-9 所示。

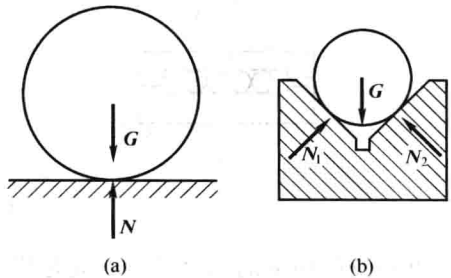


图 1-9 光滑面约束反力

3. 光滑铰链约束

光滑铰链是力学中一个抽象化的模型。凡是两个非自由体相互连接后，在不考虑摩擦的情况下，只限制彼此间的相对移动，而不会限制彼此间相对转动的约束，称为光滑铰链约束，如图 1-10 所示。

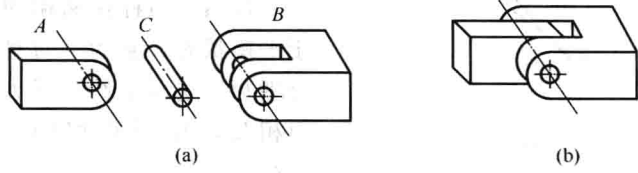


图 1-10 铰链连接

图中圆柱形销钉 C 将两个零件 A 、 B 连接在一起，构成铰链连接。

(1) 固定铰链支座 若构成圆柱铰链连接中的一个构件固定在地面或机架上作为支座，则称此为固定铰链支座，也称固定铰链约束，如图 1-11 所示。

依据光滑铰链约束的特点，圆柱销作用于构件 A 的约束反力 R 应沿接触点处的公法线方向，如图 1-11 (b) 所示。但由于接触点的位置一般不能预先确定，所以约束反力 R 的方

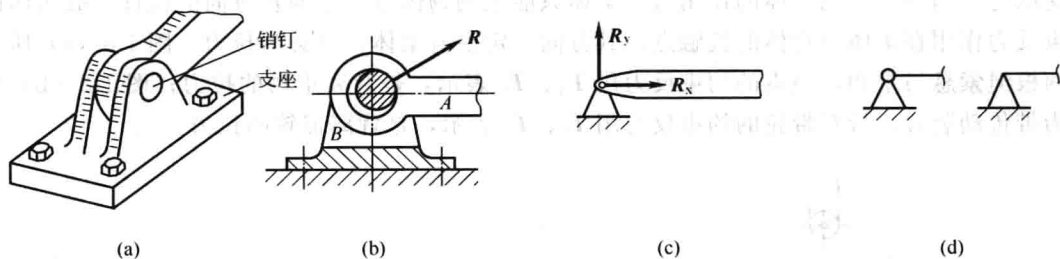


图 1-11 固定铰链约束

向也不能确定，会随主动力的变化而变化。故在实际受力分析时，固定铰链支座的约束反力一般用两个正交分力 R_x 、 R_y 来表示，如图 1-11 (c) 所示。工程上，固定铰链支座的简化画法如图 1-11 (d) 所示。

(2) 可动铰链支座 若在固定铰链支座的座体与支承面间加装滚轮（或辊轴等），就构成可动铰链支座，如图 1-12 所示。

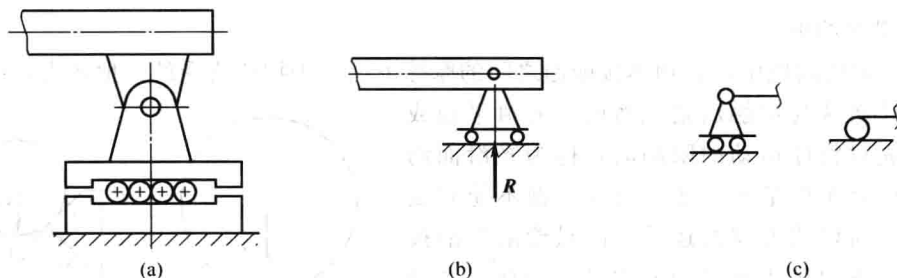


图 1-12 可动铰链约束

可动铰链约束的约束反力方向是确定的，即垂直于光滑支承面，且通过圆柱销中心，如图 1-12 (b) 所示，其工程简图如图 1-12 (c) 所示。

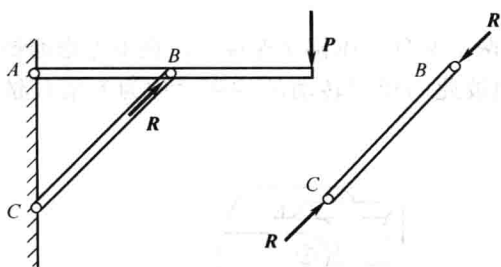


图 1-13 二力杆

在工程中，两端用铰链与其他物体相连，中间不受力的杆件（不计自重）称二力杆，如图 1-13 中的 BC 杆。

显然二力杆在两端约束反力的作用下处于平衡状态，必为一对平衡力。由二力平衡公理知，这两个约束反力必然大小相等，方向相反，作用线相同，且沿两端铰链的连线。

第三节 物体的受力分析与受力图

在研究静力问题时，必须根据已知条件和待求量，从相关的许多物体中，选择某一物体（或物系）作为研究对象，对它进行受力分析。这时可设想将所选择的对象从周围的约束（物系）中分离出来，即解除其约束而代之以相应的约束反力，此称为取分离体。画有分离

体及其所受的全部力（包括主动力和约束反力）的简图，称为受力图。
下面举例说明受力图的画法。

【例 1-1】 图 1-14(a) 所示为一压榨机构示意图，它有三个活动构件：杠杆 ABC 、连杆 CD 和滑块 D 。在杠杆的端部加一力 P ，不计各构件的自重和接触处的摩擦，试分别画出杠杆和滑块的受力图。

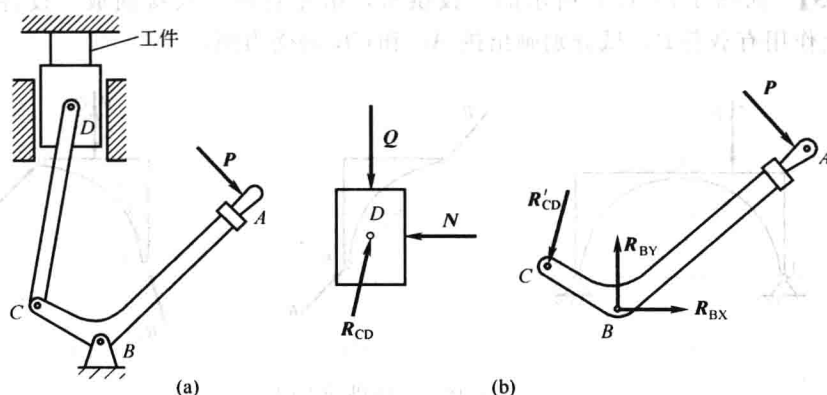


图 1-14 压榨机构受力图

解：因连杆 CD 是二力杆，所以它对杠杆和滑块的反力一定沿两端铰链中心的连线。

① 滑块 D 受到连杆的作用力 R_{CD} 、工件的反力 Q 以及导轨的法向反力 N 的作用。由力 R_{CD} 的方向可知，这时滑块 D 与导轨的右侧接触，所以反力 N 的方向垂直于导轨向左。

② 杠杆 ABC 受到主动力 P 、连杆的约束反力 R'_{CD} 以及固定铰链支座 B 的约束反力 R_{BX} 和 R_{BY} 的作用。

杠杆和滑块的受力如图 1-14 (b) 所示。

【例 1-2】 如图 1-15 (a) 所示，装饰施工用的人字梯在 A 点铰接，又在 D 、 E 两点用水平绳连接。梯子放在光滑的地平面上，人站在梯的 F 点处，重量为 P 。如不计梯重，试分析并画出人字梯整体及分体的受力图。

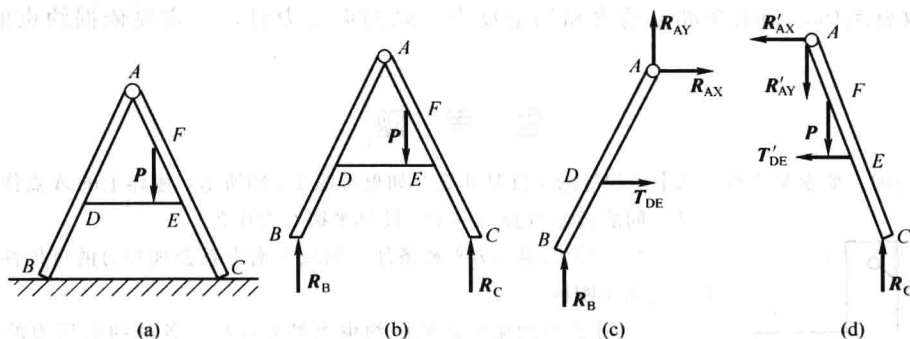


图 1-15 人字梯受力图

解：从整体考虑，人字梯所受的外力有铅垂力 P 与 B 、 C 处的约束反力。因梯子 B 、 C 端放在光滑的地面上，由光滑面约束可知，它的约束反力方向只能是沿接触面在接触处的公法线方向，并指向非自由体，所以 B 、 C 端受到地面垂直向上的约束反力 R_B 、 R_C 。图 1-15