

高等职业技术教育机电类系列教材

Gaodeng Zhiye Jishu Jiaoyu Jidianlei Xilie Jiaocai

工程力学

夏琼 钱红 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等职业技术教育机电类系列教材

工 程 力 学

主编 夏 琼 钱 红

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书分三篇,共十四章。第一篇静力学,包括静力学基础、平面力系、空间力系;第二篇材料力学,包括材料力学的基本概念、轴向拉伸和压缩、剪切与挤压、圆轴扭转、梁的弯曲、组合变形时杆件的强度计算、压杆稳定;第三篇运动学与动力学,包括质点的运动力学、刚体的运动力学、动能定理、动静法。

本书可作为机电一体化、机械制造等工科专业师生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/夏琼,钱红主编. —徐州:中国矿业
大学出版社,2011.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0983 - 2

I. ①工… II. ①夏…②钱… III. ①工程力学
IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037776 号

书 名 工程力学

主 编 夏 琼 钱 红

责任编辑 郭 玉

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮政编码 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 淮安市亨达印业有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 15 字数 371 千字

版次/印次 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价 29.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

《工程力学》教材编审委员会

主 编 夏 琼 钱 红

副主编 王 锐 管 明 迟彩芬

郭慧洁 关兆麟

参 编 杨春红 李明相 张 敏

陶 勇 涂祖蕾

主 审 李寿昌

前 言

本书是依据教育部最新制定的“高职高专教育机械类专业力学课程教学基本要求”编写的,参照了现有教材体系,总结了多年的教学经验,以基本知识、基本理论和基本技能为主要内容。编写时,针对高职高专教育培养高素质技能型专门人才的培养目标,充分吸取各校近年来的力学课程教学改革的经验,并针对目前课程学时数逐渐减少的实际情况,改变了传统的理论力学和材料力学体系,将内容重新整合,力求体现高职高专的办学特色。在内容选择上,以必需和够用为度,力避不必要的理论推导,加强与工程实际的联系,突出基本技能训练,强化动手能力和创新意识的培养;在内容编排上,为便于教师执教、易于学生自学,每章后均附有小结、思考题和足够数量的习题,以供选用。

参加本书编写的有夏琼(绪论、第二章),钱红(第九章、第十章),王锐(第七章),管明(第一章),迟彩芬(第十一章),郭慧洁(第十三章),关兆麟(第八章),涂祖蕾(第四章),张敏(第六章),陶勇(第十二章),杨春红(第三章、第十四章及附录),李明相(第五章)。

本书由夏琼、钱红担任主编,王锐、管明、迟彩芬、郭慧洁、关兆麟担任副主编。本书由夏琼、钱红统编修改,由李寿昌担任主审。

限于编者的水平,书中缺点和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2011 年 3 月

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 静 力 学

第一章 静力学基础	2
第一节 静力学的基本概念	2
第二节 静力学公理	3
第三节 约束与约束反力	5
第四节 受力图	9
本章小结	11
思考题	11
习题	11
第二章 平面力系	13
第一节 力在坐标轴上的投影	13
第二节 力对点之矩	15
第三节 力偶	16
第四节 平面任意力系	18
第五节 几种特殊平面力系的平衡方程	24
第六节 考虑摩擦时物体的平衡	28
本章小结	32
思考题	33
习题	33
第三章 空间力系	37
第一节 力在空间直角坐标轴上的投影	37
第二节 力对轴之矩	39
第三节 空间力系的平衡方程及其应用	41
第四节 重心	45
本章小结	48
思考题	49
习题	49

第二篇 材料力学

第四章 材料力学的基本概念	53
第一节 变形固体及其基本假设	53
第二节 外力及其分类	53
第三节 内力、截面法和应力的概念	54
第四节 杆件及其变形的基本形式	55
本章小结	56
思考题	57
第五章 轴向拉伸与压缩	58
第一节 轴向拉伸与压缩的概念及实例	58
第二节 内力——截面法、轴力与轴力图	58
第三节 横截面上的应力	60
第四节 轴向拉压杆件的变形与胡克定律	62
第五节 材料在拉伸和压缩时的力学性质	64
第六节 轴向拉压杆的强度计算	68
第七节 拉压超静定问题简介	70
第八节 应力集中的概念	71
本章小结	72
思考题	73
习题	74
第六章 剪切和挤压	76
第一节 剪切与挤压的概念及实例	76
第二节 剪切与挤压的实用计算	77
第三节 剪应变、剪切胡克定律	81
本章小结	82
思考题	83
习题	84
第七章 圆轴扭转	85
第一节 圆轴扭转的概念	85
第二节 圆轴扭转的扭矩与扭矩图	86
第三节 圆轴扭转时的应力与强度计算	88
第四节 圆轴扭转时的变形与刚度计算	93
本章小结	95
思考题	96

习题	96
第八章 梁的弯曲	99
第一节 平面弯曲的概念与梁的类型	99
第二节 梁平面弯曲内力——剪力与弯矩	100
第三节 剪力图与弯矩图	103
第四节 剪力图与弯矩图的规律作图	109
第五节 常用截面二次矩和平行移轴公式	112
第六节 纯弯曲时梁的正应力	114
第七节 梁弯曲正应力强度计算	117
第八节 弯曲切应力强度计算简介	120
第九节 梁的弯曲变形概述	122
第十节 用叠加法求梁的变形	124
第十一节 提高梁的强度和刚度的措施	127
本章小结	129
思考题	130
习题	130
第九章 组合变形的强度计算	134
第一节 弯曲与拉伸(压缩)组合变形的强度计算	134
第二节 弯曲与扭转组合变形的强度计算	138
本章小结	140
思考题	141
习题	141
第十章 压杆稳定	143
第一节 压杆稳定的概念	143
第二节 临界力和临界应力	144
第三节 压杆的稳定计算	148
第四节 提高压杆稳定性的措施	149
本章小结	150
思考题	150
习题	150

第三篇 运动学与动力学

第十一章 质点的运动力学	152
第一节 用矢量法表示点的位置、速度和加速度	152
第二节 用直角坐标法表示点的位置、速度和加速度	152

第三节 用自然坐标法表示点的位置、速度和加速度	154
第四节 点的合成运动	159
第五节 质点动力学基本方程	164
本章小结	169
思考题	170
习题	170
第十二章 刚体的运动力学	172
第一节 刚体的平移	172
第二节 刚体的定轴转动	173
第三节 刚体的平面运动	177
第四节 刚体定轴转动微分方程	181
本章小结	185
思考题	185
习题	187
第十三章 动能定理	189
第一节 功	189
第二节 动能定理	193
第三节 功率和机械效率	198
本章小结	200
思考题	201
习题	201
第十四章 动静法	204
第一节 惯性力	204
第二节 质点的达朗贝尔原理	204
第三节 质点系的达朗贝尔原理	206
本章小结	210
思考题	211
习题	212
附录 I 型钢规格表	214
附录 II 部分习题答案	225
参考文献	227

绪 论

一、工程力学的研究内容

工程力学是一门研究物体机械运动和构件承载能力的科学。机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化;而构件承载能力则是指机械零件和结构部件在工作时安全可靠地承担载荷的能力。工程力学包括静力学、材料力学、运动学与动力学的有关内容。

第一篇静力学,主要研究物体的受力与平衡规律,即根据所研究的物体与周围物体之间的联系,确定作用在所研究物体上的力有哪些,它们的大小、方向如何。第二篇材料力学,主要研究构件在外力作用下的强度、刚度和稳定性等问题的基本原理和计算方法,即研究构件变形时其内部将产生哪些力,这些力达到何种限度时构件将会失去正常的工作能力。第三篇运动学与动力学,是从几何角度来研究物体运动的规律,分析物体运动改变的原因,建立物体的运动与其上的作用力之间的关系。

二、工程力学的学习目的

工程力学是工科机械类或近机械类专业的一门重要的技术基础课。工程力学中讲述的基础理论和基本知识,在基础课与专业课之间起到桥梁作用。它为专业设备及机器的机械运动分析和强度分析提供必要的理论基础。一些日常生活中的现象和工程技术问题,可直接运用工程力学的基本知识去分析研究。所以,学好工程力学知识,可为解决工程实际问题打下基础。

工程力学的理论既抽象又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,系统性、逻辑性强。这些特点,对于培养辩证唯物主义世界观、逻辑思维和分析问题的能力,也起着重要作用。

三、工程力学的研究方法

工程力学有较强的系统性,各部分内容之间联系较紧密,学习中要循序渐进,要认真理解基本概念、基本理论和基本方法;要注意所学概念的来源、含义、力学意义及其应用;要注意有关公式的根据、适用条件;要注意分析问题的思路、解决问题的方法。在学习中,一定要认真研究,独立完成一定数量的思考题和习题,以巩固和加深对所学概念、理论、公式的理解、记忆和应用。

工程实际问题往往比较复杂,为了使研究的问题简单化,通常抓住问题的本质,忽略次要因素,将所研究的对象抽象为力学模型。如研究物体平衡时,用抽象化的刚体这一理想模型取代实际物体;研究物体的受力与变形规律时,用变形固体模型取代实际物体;对构件进行计算时,将实际问题抽象化为计算简图等。所以,根据不同的研究目的,将实际物体抽象化为不同的力学模型,是工程力学研究中的一种重要方法。

工程力学来源于实践又服务于实践。在研究工程力学时,现场观察和实际应用是认识力学规律的重要实践环节。在学习课程时,观察实际生活中的力学现象,学会用力学的基本知识去解释这些现象,通过实验验证理论的正确性,并提供测试数据资料作为理论分析、简化计算的依据。

第一篇 静力学

引 言

静力学是研究物体在力的作用下的平衡规律的科学。

静力学主要研究的问题是：

- ① 物体的受力分析；
- ② 力系的简化；
- ③ 物体在各力系作用下的平衡条件及其应用。

静力学是进行受力分析的基础，在机械设计方面，往往应用静力学理论分析其零部件的受力情况。可见，静力学理论在工程实际中有着广泛的应用。

第一章 静力学基础

第一节 静力学的基本概念

一、平衡的定义

平衡是物体机械运动的一种特殊形式，是指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态。例如，静止放在桌面上的书，房子、建筑，在直线轨道上匀速行驶的火车等，都处于平衡状态。它的特点是物体的运动状态不发生变化。

二、刚体的概念

刚体是指在力的作用下大小和形状保持不变的物体。实际上，真正的刚体是不存在的，它只是一个理想化的力学模型。一个物体能否被看成刚体要由所研究问题的性质决定。若物体的微小变形对研究的问题影响很小，或物体变形的大小与研究的问题无关，则可把物体当做刚体。

三、力的概念

1. 力的定义

力是物体间相互的机械作用。这种作用使物体的运动状态或形状发生改变。力的作用方式为直接接触的作用和间接作用（如磁场、电场、重力场等）。力的效应有两种：一是外效应，二是内效应。外效应是指改变物体运动状态的效应，也称为运动效应；内效应是指引起

物体变形的效应,也称为变形效应。在分析物体受力情况时,必须分清受力物体和施力物体。

2. 力的三要素

确定力必须要有三个要素:力的大小、方向和作用点。这三个要素称为**力的三要素**。力的大小是指物体间相互作用的强弱。力的方向包含方位和指向两个含义。力的作用点是指力对物体作用的位置。

3. 力的单位

在国际单位制中,力的单位是牛顿,简称牛,符号是 N,有时也用 kN 表示, $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$ 。

4. 力的图示法

力是矢量,既有大小又有方向。通常用一条带箭头的有向线段来表示力。线段是按一定比例画出的,它的长短表示力的大小,它的指向表示力的方向,箭头或箭尾表示力的作用点。这种表示力的方法叫做力的图示法。如图 1-1 力的图示,表示作用在小车上的力为 80 N,方向向右。有时只需要画出力的示意图,即只画出力的方向,只表示物体在这个方向上受到的力。本书中用黑斜体字母表示矢量,如 $\boldsymbol{F}$,用普通斜体字母表示力的大小,如 F 。

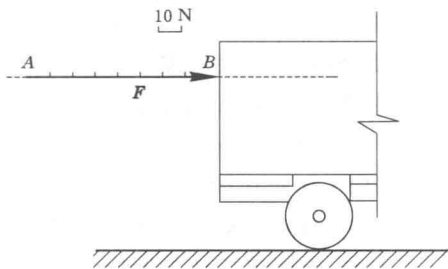


图 1-1 力的图示法

5. 力系与等效力系

通常,一个物体所受的力不止一个,而有若干个。作用于一个物体上或一个物体上的一组力,称为**力系**。使物体在作用下处于平衡状态的力系,称为**平衡力系**。对物体作用效果相同的两个力系,称为**等效力系**。如果一个力与一个力系等效,则该力称为**力系的合力**。

第二节 静力学公理

所谓**公理**,是经过人们长期实践检验、不需要证明同时也无法去证明的客观规律。静力学中最基本的性质有几条,它们称为静力学公理。

一、二力平衡公理

二力平衡公理:作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡状态的充要条件是:这两个力大小相等、方向相反且作用于同一直线上(简称这两个力等大、反向、共线)。

不论物体形状如何,只要物体只受两个力作用而平衡,这两个力一定要满足二力平衡公理。例如,图 1-2 中吊车上形状弯曲的吊钩,在绳索对它的拉力 $\boldsymbol{F}$ 和重物对它的作用力 $\boldsymbol{W}$ 作用下处于平衡状态,这两个力一定大小相等、方向相反,且作用于一条直线上。

受两个力的作用并处于平衡状态的物体称为**二力件**。如果该物体是杆件,也可称为二力杆。二力件(杆)上的两个力的作用线必为这两个力作用点的连线。例如,图 1-3 所示的杆件 AB。二力件(杆)在工程上经常能见到。

二、加减平衡力系公理

加减平衡力系公理:在作用在刚体上的任意力系上,增加或减少任何一个平衡力系,不

会改变原力系对刚体的作用效应。

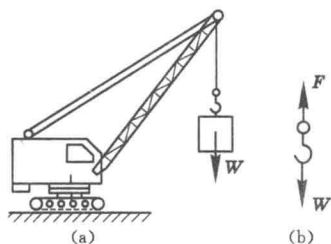


图 1-2 吊钩的二力平衡

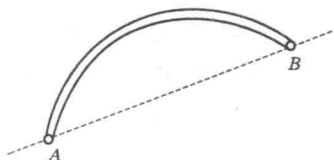


图 1-3 二力件

推论 1:作用在刚体上的力的作用点可沿作用线任意移动,而不改变该力对刚体的作用效应,即力的可传性原理。

证明:设力 F 作用在刚体的 A 点[图 1-4(a)],在其作用线上任取一点 B ,并在 B 点加上一对平衡力 F_1 和 F_2 ,让 $F_2 = -F_1 = F$ 且共线[图 1-4(b)]。再根据加减力系平衡公理,可将 F 和 F_1 所组成的平衡力系去掉,刚体上仅剩 F_2 ,且 $F_2 = F$ [图 1-4(c)]。由此推论得证。

因此,对刚体来说,力的三要素为:力的大小、方向和作用线。

注意:力的可传性只能用于单个刚体。

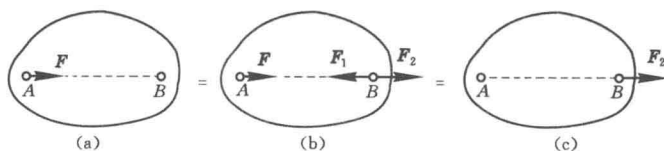


图 1-4 力的可传性

三、力的平行四边形公理

力的平行四边形公理:作用于物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力,合力也作用于该点,合力的大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来确定。

如图 1-5(a)所示,作用于物体 A 点上的两个力 F_1 、 F_2 ,合力为 F_R 。 F_1 、 F_2 合成为合力 F_R 的矢量表达式:

$$F_R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

为方便起见,在利用矢量加法求合力时,可从 A 点作矢量 F_1 ,再由 F_1 的末端 B 点作矢量 BC 表示矢量 F_2 ,则矢量 AC 即为合力 F_R 。这种求合力的方法称为力的三角形法则,如图 1-5(b)所示。

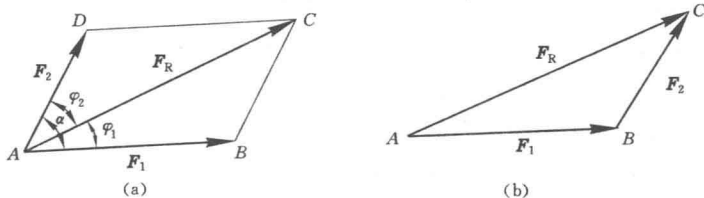


图 1-5 力的平行四边形公理

力的平行四边形公理是力系合成的法则,也是力系分解的法则。该公理表明了最简单力系简化的规律,也是复杂力系简化的基础。

由此可推广到 n 个力作用的情况。若刚体上作用有 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 共 n 个力,它们在同一平面且又汇交于一点,则这 n 个力也可合成为一个合力 F_R ,此合力为:

$$F_R = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum F \quad (1-2)$$

推论 2: 当刚体受到共面而又互不平行的三个力作用而平衡时,则此三个力的作用线必汇交于一点,即三力平衡汇交原理。

证明:如图 1-6(a)所示,处于平衡的刚体上作用了三个力, F_1 作用在 A_1 点, F_2 作用在 A_2 点, F_3 作用在 A_3 点, F_1, F_2 的作用线交于 O 点。根据力的可传性原理,将此两个力分别移至 O 点,则此两个力的合力 F_R 必定在此平面内且其作用线通过 O 点,而 F_R 必须和 F_3 平衡。由二力平衡的条件可知, F_3 与 F_R 必共线,所以 F_3 的作用线亦必过 F_1, F_2 作用线的交点 O ,即三个力的作用线汇交于一点,如图 1-6(b)所示。

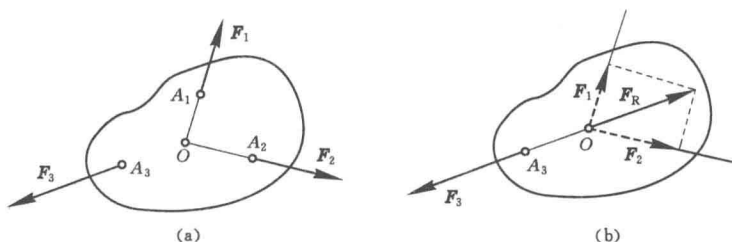


图 1-6 三力平衡汇交原理

四、作用力与反作用力公理

作用力与反作用力公理:任何两个物体间的相互作用力,总是大小相等、方向相反、沿同一直线,并同时分别作用在这两个物体上。

此定律概括了自然界中物体间相互作用的关系,表明一切力总是成对出现的,揭示了力的存在形式和力在物体间的传递方式。

特别要注意的是,必须把作用力与反作用力公理和二力平衡公理严格地区分开来。作用力与反作用力公理是表明两个物体相互作用的力学性质,力是作用在两个物体上,而二力平衡公理则说明一个刚体在两个力作用下处于平衡时两个力满足的条件,力是作用在一个物体上。

第三节 约束与约束反力

一、自由体和非自由体

在空中位移不受任何限制的物体称为**自由体**。位移受限制的物体称为**非自由体**。例如,空中飞行的飞机为自由体,受轴承限制的飞轮为非自由体,工程结构中的构件和机械中的零件都是非自由体。

二、约束与约束反力

非自由体的某些位移受到周围物体的限制时,这些周围物体称为该非自由体的**约束**。

约束通过力限制非自由体的运动,约束对被约束物体的反作用力,称为**约束反力**,简称**反力**。约束反力的方向总是和所限制的位移方向相反。

约束反力以外的能主动引起物体运动或使物体产生运动趋势的力,称为**主动力**。例如,重力、拉力、推力等都是主动力。主动力在工程中也称为**载荷**。

三、工程中几种常见的约束类型

1. 柔体约束

由绳索、链条、胶带等柔性物体所构成的约束称为**柔体约束**。柔体约束只能限制物体沿柔体伸长方向的运动,而不能限制其他方向的运动,所以柔体约束只产生沿绳索、链条、胶带受拉方向的约束反力。如图 1-7(a)中,灯由于重力作用有向下的运动趋势,绳子产生拉力约束它。同样图 1-7(b)、(c)中皮带也产生拉力约束轮子。约束反力通过接触点沿着柔体约束的中心线且背离物体,通常用符号 F_T 表示(图 1-7)。

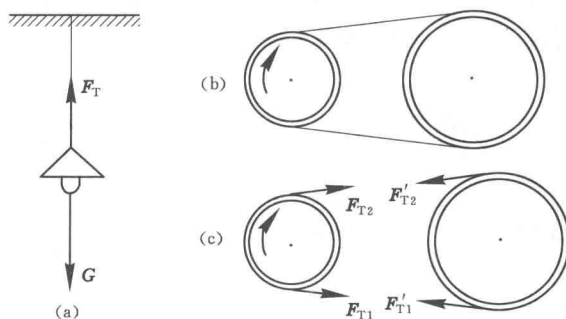


图 1-7 柔体约束

2. 光滑接触面约束

两个相互接触的物体接触面上的摩擦力可略去不计时所构成的约束,称为**光滑接触面约束**。光滑接触面不限制公切面内任意方向的运动和沿接触面处的公法线离开接触面的运动,仅限制被约束物体沿接触面处公法线方向挤压接触面的运动。所以光滑接触面的约束反力通过接触点,其方向沿着接触面的公法线且指向被约束的物体,通常用 F_N 表示(图 1-8)。

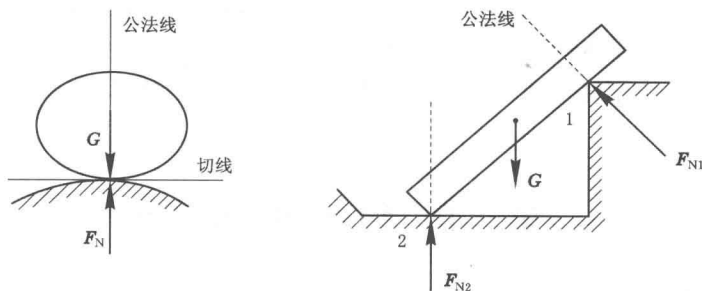


图 1-8 光滑接触面约束

3. 圆柱铰链约束

由一个光滑圆柱形销钉插入两个物体的光滑圆孔中而构成的约束,称为**圆柱铰链约束**,简称**铰链约束**。铰链约束不限制绕销钉轴线的转动,限制沿垂直于销钉轴线的径向运动。

圆柱铰链约束可分为以下几种形式。

(1) 中间铰链约束

中间铰链如图 1-9(a)、(b)所示,其计算简图如图 1-9(c)所示。中间铰链本质上属于光滑面约束。销钉给构件的约束反力 F 沿接触点的公法线并指向构件,由于接触点的位置不确定,所以约束反力在垂直于销钉轴线的平面内通过销钉中心,而方向未定。在受力分析时,圆柱铰链的约束反力可表示为单个力 F 和未知角 α 或两个正交分力 F_x 和 F_y , F 是 F_x 和 F_y 的合力,如图 1-9(d)所示。力的指向是假设的,假设的指向正确与否,可由计算结果判定。

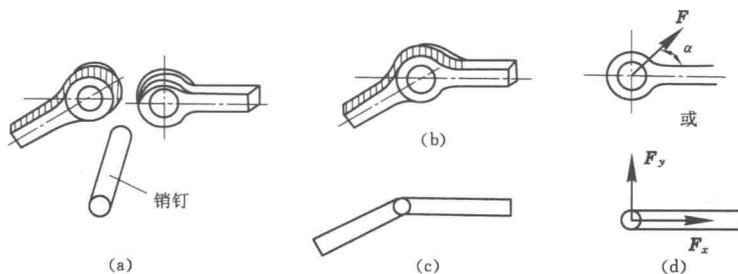


图 1-9 中间铰链

(a)、(b) 结构示意图; (c) 计算简图; (d) 约束反力

(2) 固定铰支座约束

工程上常用一种叫做支座的部件。将构件用光滑的圆柱形销钉与固定支座连接,则构成**固定铰支座约束** [图 1-10(a)]。固定铰支座约束的计算简图如图 1-10(b)所示。

由固定铰支座的构造形式可知,它的约束性能与中间铰链相同,所以固定铰支座的约束反力与中间铰链的约束反力相同,如图 1-10(c)所示。

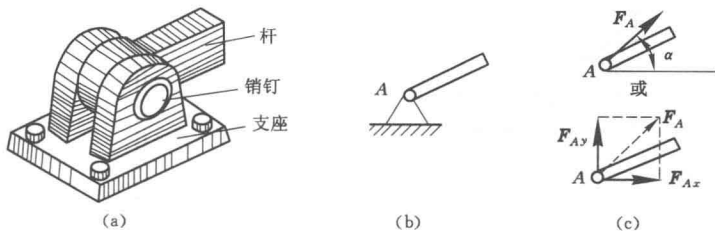


图 1-10 固定铰支座

(a) 结构示意图; (b) 计算简图; (c) 约束反力

(3) 可动铰支座约束

如果在固定铰支座与支承面之间加装轮子,则构成**可动铰支座约束**,如图 1-11(a)所示。可动铰支座的计算简图如图 1-11(b)、(c)所示。

可动铰支座不限制构件沿支承面的运动或者绕销钉轴线的转动,限制构件沿支承面垂直方向的运动。因此可动铰支座的约束反力通过销钉中心,垂直于支承面,指向未定,如图 1-11(d)所示,图中 F_A 的指向是假设的。

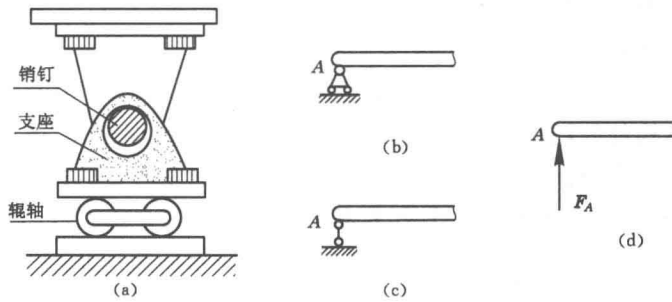


图 1-11 可动铰支座

(a) 结构示意图; (b)、(c) 计算简图; (d) 约束反力

(4) 链杆

不计自重, 两端用光滑销钉与其他物体连接而中间不受力的杆件, 称为**链杆**。图 1-12(a) 中的杆件 AB 即为链杆, 链杆的约束反力在沿着链杆两端铰链中心的连线上, 指向未定, 如图 1-12(b) 所示。图中 F_A 和 F_B 的指向是假设的。

4. 固定端约束

构件一端被固定的约束称为**固定端约束**, 也叫**插入端约束**, 是工程实际中常见的一种约束类型。如图 1-13 所示, 固定在车床卡盘上的车刀、立于路边的电线杆等都受到这种约束。它们有一个共同的特点: 既限制固定端任意移动, 又限制构件绕固定端随意转动。在研究平面问题时通常用简图 1-14(a) 表示, 其约束反力在外力作用面内可用简化了的两个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 和力偶矩 m_A 来表示, 如图 1-14(b) 所示。

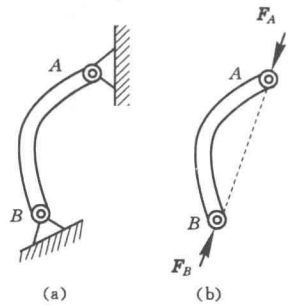


图 1-12 链杆

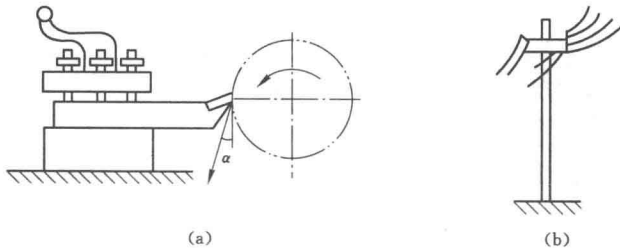


图 1-13 固定端约束

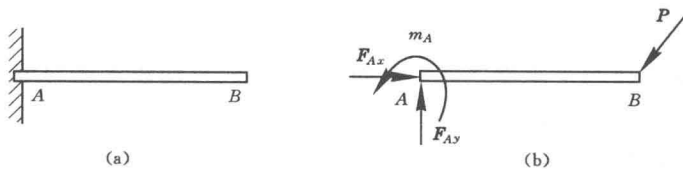


图 1-14 固定端约束反力