

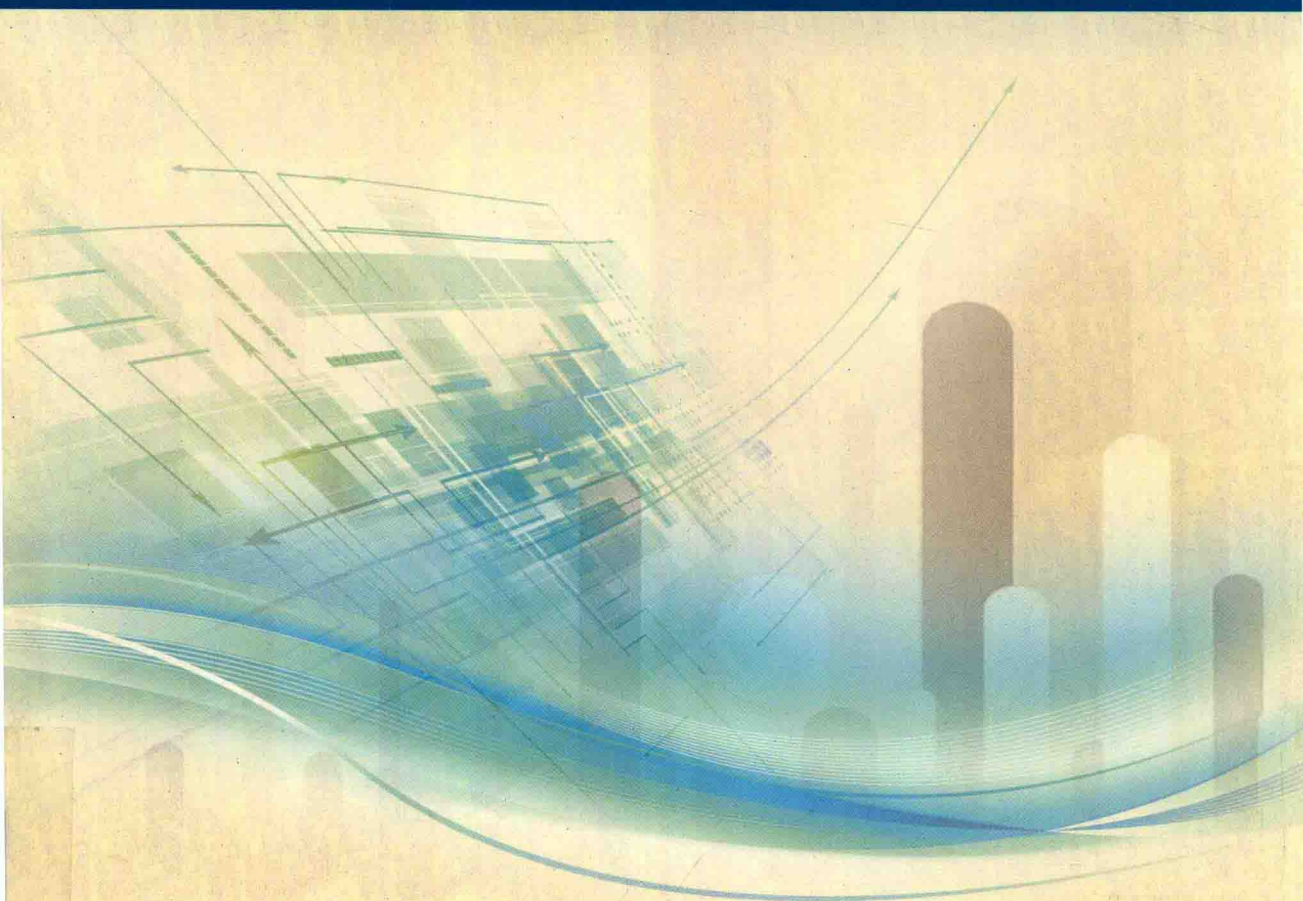
高等教育“十三五”规划教材



工程力学

Gongcheng Lixue

主 编 郭兴明
副主编 王 东



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

“五”规划教材

工 程 力 学

主 编 郭兴明

副主编 王 东

参 编 康小平 赵 丽

中国矿业大学出版社

内 容 提 高

本书是高等教育“十三五”规划教材之一,以应用型人才培养为目标,力求在讲清基本概念、基本理论和原理的基础上,加强理论与实践的联系,重在培养学生分析和解决问题的能力。

在内容安排上,以静力学和材料力学内容为主,全书共 11 章,教学时数 72 学时。

本书适用于采矿工程、安全工程、采矿工程(煤层气专业方向)、材料成型与控制工程、建筑环境与能源应用工程等专业学生用书,也可供相关专业工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 郭兴明主编. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018. 2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3784 - 2

I. ①工… II. ①郭… III. ①工程力学 IV.

①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 279963 号

书 名 工程力学

主 编 郭兴明

责任编辑 杨 洋

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 邮编 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 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 17 字数 425 千字

版次印次 2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书依据高等教育“十三五”规划教材建设工作会议指导思想和原则,并结合教育部最新教改精神和人才培养实际编写而成。

在编写过程中汲取了传统教材理论力学、材料力学的精华,目的是为本科专业学生提供一本既有理论指导作用,又有实用价值的比较系统地介绍工程中常用到的力学方面基础知识的教材。在内容体系组织上,根据应用型本科人才培养目标,并结合目前课程学时逐渐减少的情况,以必需和够用为度,力避不必要的理论推导,加强理论与工程实际的联系,突出基本技能的训练,强化动手能力和创新意识的培养,达到既易于教师教,又易于学生自学的宗旨,其意图是专门为从事工程技术的人员提供一本专业基础教材。

全书共计2篇11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,包括变形固体基本概念、轴向拉伸和压缩、剪切与扭转、弯曲、应力状态、强度理论及压杆稳定。

参加本书编写的有山西能源学院康小平(第一、二章)、山西能源学院赵丽(第三、五章);山西大同大学王东(第七、八、九、十、十一章)、山西大同大学郭兴明(绪论、第四、六章、附录)。全书由郭兴明担任主编并统稿,王东担任副主编。

由于编者水平所限,书中不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2017年8月

目 录

绪论	1
----	---

第一部分 静 力 学

第一章 静力学公理	5
第一节 静力学公理	5
第二节 约束和约束力	8
第三节 物体受力分析	11
思考题	13
习题	14

第二章 平面力系	17
第一节 平面汇交力系	17
第二节 平面力对点之矩与平面力偶	22
第三节 平面任意力系的简化	28
第四节 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	32
第五节 物体系统的平衡和超静定问题	36
第六节 摩擦	39
思考题	42
习题	43

第三章 空间力系	48
第一节 空间汇交力系	48
第二节 力对点之矩与力对轴之矩	52
第三节 空间任意力系的平衡方程	55
第四节 重心与形心	61
思考题	66
习题	67

第二部分 材 料 力 学

第四章 变形固体的基本概念	75
第一节 变形固体及其基本假设	75

第二节	内力和应力的概念	76
第三节	位移和应变的概念	78
第四节	杆件变形的基本形式	79
思考题		80
习题		80
第五章	轴向拉伸和压缩	82
第一节	轴向拉伸和压缩的概念	82
第二节	轴向受拉(压)杆的内力	83
第三节	轴向受拉(压)杆的应力	86
第四节	轴向受拉(压)杆的变形	89
第五节	材料在拉(压)时的力学性能	92
第六节	轴向受拉(压)杆的强度计算	97
第七节	简单的拉(压)超静定问题	102
第八节	应力集中的概念	107
思考题		108
习题		109
第六章	剪切和扭转	115
第一节	剪切与挤压的实用计算	115
第二节	扭转、扭矩和扭矩图	119
第三节	等直圆杆扭转时的应力和变形	122
第四节	扭转时强度与刚度的计算	125
第五节	扭转超静定问题	128
思考题		129
习题		130
第七章	弯曲	136
第一节	弯曲的概念	136
第二节	弯曲内力	138
第三节	剪力图和弯矩图	142
第四节	剪力、弯矩和荷载集度之间的关系	147
第五节	弯曲正应力	151
第六节	弯曲正应力强度计算	156
第七节	弯曲切应力强度计算	159
第八节	弯曲变形	164
第九节	提高梁承载能力的措施	171
第十节	简单的超静定梁	174
思考题		175
习题		176

第八章 应力状态分析	183
第一节 应力状态的概念	183
第二节 平面应力状态下的应力分析	185
第三节 应力圆	189
第四节 三向应力状态下的应力分析	191
思考题	194
习题	195
第九章 强度理论与组合变形	198
第一节 强度理论的概念	198
第二节 几种主要的强度理论	199
第三节 组合变形的概念	202
第四节 弯曲与拉伸(压缩)组合	203
第五节 弯曲与扭转组合	207
思考题	211
习题	212
第十章 压杆稳定	216
第一节 压杆稳定的概念	216
第二节 压杆的临界力	217
第三节 压杆的稳定计算	222
第四节 提高压杆稳定性的措施	225
思考题	227
习题	228
第十一章 交变应力与疲劳强度	230
第一节 交变应力及其循环特征	230
第二节 疲劳破坏和持久极限	232
第三节 构件的持久极限与疲劳强度计算	234
思考题	236
习题	236
附录	238
附录 I 平面图形的几何性质	238
附录 II 型钢表	240
附录 III 简单荷载作用下梁的挠度和转角	259
参考文献	261

绪 论

一、工程力学的研究对象和内容

工程力学是研究有关物质宏观运动规律及其应用的科学。工程力学涉及众多力学学科分支与广泛的工程技术领域,是一门理论性较强,与工程技术联系极为密切的技术基础学科。工程力学的定理、定律和结论广泛应用于各行各业的工程技术中,是解决工程实际问题的重要基础,其最基础的部分包括静力学和材料力学。

静力学部分,主要研究刚体的受力与平衡的规律,也就是根据所研究构件与周围物体之间的联系,确定该构件受到哪些力的作用,力的大小和方向如何;材料力学部分,主要研究变形固体在力的作用下的变形规律,也就是依据构件所产生的变形,找出产生变形时内力、应力变化情况,判定构件在力或应力达到何种程度,构件将会失去工作能力。

二、工程力学的研究方法

工程力学研究的手段有理论分析、数值计算和实验研究。在本课程中,随研究问题的不同,研究对象可以是刚体(如在静力学中把所有物体都视为刚体),也可以是变形固体,比如在研究工程中的构件时,均视其为变形固体。

在解决工程实际问题时,首先将实际结构抽象为力学模型,根据力学理论建立方程,并运用数学工具求解,做出定性和定量分析结论,再通过实验或实践验证其结果的正确性。因此,抽象化是工程力学研究的重要手段。所谓抽象化就是分析影响工程实际问题的各种因素时,抓住起决定性作用的主要因素,略去次要因素,得到反映问题本质的力学模型。

三、学习工程力学的目标

通过本课程的学习,使学生比较系统地了解工程力学基本知识,初步掌握在工程中的应用,培养学生工程实践能力和创新能力,为后续专业课程的学习奠定必要的基础。

学习本课程要达到的基本目标有:

- (1) 具有把简单工程实际问题抽象化为力学模型,并能从简单的物体结构中恰当地选取研究对象,画出受力图。
- (2) 熟练运用力系的平衡方程求解一般结构的平衡问题(包括考虑摩擦问题)。
- (3) 能够分析杆件在各种基本变形时的内力并作出相应的内力图。
- (4) 初步获得与本课程有关的工程概念,培养相应的运算、绘图、文字表达等方面的能力。

四、工程力学发展概述

力学是研究物质机械运动规律的科学。它与数学、物理一样揭示的是自然科学的普遍规律,因此说力学是基础科学,同时,在许多工程技术领域可以直接应用,力学又是技术科学,是沟通自然科学基础理论和工程技术实践的桥梁。

力学作为自然科学七大学科中最古老的学科之一,其发展两个重要标志:一是 1687 年牛顿的《自然哲学的数学原理》发表;二是 1900 年普朗克的量子力学及 1905 年爱因斯坦的狭义相对论提出。从发展历史的角度看,19 世纪以前,力学是整个物理学的主导,称为经典力学;20 世纪,力学从物理学中分化,研究宏观世界的运动规律,称为现代力学。

力学的研究对象可划分:一般力学,其分支学科如理论力学、分析力学、刚体动力学等;固体力学,其分支学科如材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学等;流体力学,其分支学科如水力学、空气动力学、多相流体力学等;其他交叉学科,其分支学科如土力学、岩石力学、爆炸力学、复合材料力学、地质力学等。

工程力学由理论力学(含静力学、运动学和动力学)和材料力学构成,作为力学的一个分支,是 20 世纪 50 年代末首先由中国学者钱学森提出这一名称,并对这个学科做了开创性工作。工程力学虽然还处在萌芽阶段,很不成熟,而且继承有关老学科的地方较多,但作为力学的一个新分支,确有一些独具的特点。

工程力学注重从微观到宏观,它是建立在近代物理和近代化学成就之上,运用这些成就,建立起物质宏观性质的微观理论,这也是工程力学建立的主导思想和根本目的。工程力学主要研究平衡现象,着重于分析问题的机理,并借助建立理论模型来解决具体问题。

工程力学是研究有关物质宏观运动规律及其应用的科学。工程给力学提出问题,力学的研究成果改进工程设计思想,两者相辅相成,共同发展、成熟。随着科学技术的发展,力学的研究及其应用会有更加广阔的前景。

第一部分 静力学

静力学一词是由法国数学、力学家皮埃尔·伐里农于 1725 年引入的,从公元前三世纪开始发展,阿基米德是使静力学成为一门真正科学的奠基者。

静力学的两个基本物理量是力和力偶。

静力学主要研究的问题有:

- (1) 力系的简化;
- (2) 物体受力分析的基本方法;
- (3) 物体在力的作用下处于平衡的规律,以及如何建立各种力系的平衡条件。

第一章 静力学基本概念

学习目标:

掌握力和刚体的概念及静力学公理;掌握约束及约束反力的基本知识;初步掌握物体及简单物系的受力分析,合理选择分离体并画出受力图。

学习重点和难点:

重点是静力学公理、约束和约束反力、物体的受力分析和画受力图。

第一节 静力学公理

一、力、力系、刚体和平衡的概念

力是物体间的相互机械作用,力的概念是人们在长期的生产劳动和生活实践中逐步形成的,通过科学抽象而建立的。力的作用使物体的机械运动状态发生改变,或使物体产生变形。力使物体的运动状态发生改变的效应称为运动效应或外效应,而使物体发生变形的效应称为变形效应或内效应。在静力学中将物体视为刚体,只考虑力的外效应。

经验表明,力对物体的作用效应完全取决于以下三要素:

(1) 力的大小,描述物体间相互作用的强弱程度。在国际单位制中,力的单位用牛顿(N)或千牛顿(kN), $1\text{ kN}=10^3\text{ N}$ 。

(2) 力的方向,其包含力的方位和指向两方面的含义。如重力的方向是“竖直向下”,“竖直”是力作用线的方位,“向下”是力的指向。

(3) 力的作用点,指物体上承受力的区域。一般来说作用区域是一块面积或体积,称为分布力;而有些作用区域很小,可以近似看作一个点时,这样的力称为集中力。

只要改变了力的三要素中的任一要素,力的作用效应将随之改变。

力是矢量,且为定位矢量。可以用一带箭头的线段来表示,如图 1-1 所示,线段 AB 长度按一定的比例尺表示力 F 的大小,线段的方位和箭头的指向表示力的方向。线段的起点 A 或终点 B 表示力的作用点。线段 AB 的延长线(图中虚线)表示力的作用线。

本书书写中,用黑体字母表示矢量,如 $\mathbf{F}$,用对应字母表示矢量的大小,如 F 。

工程中,作用在物体上的力不止一个,把作用于物体上的若干个力总称为力系。如果作用于物体上的某一力系可以用另一力系来代替,而不改变原有的状态,这两个力系互称等效力系。如果一个力与一个力系等效,则称此力为该力系的合力,用一个等效力替换一个等效力系的过程称为力的合成;而力系中的各个力称此合力的分力,将合力代换

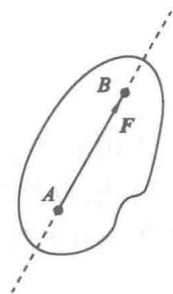


图 1-1

成分力的过程为力的分解。在研究力学问题时,为方便地显示各种力系对物体作用的总体效应,用一个简单的等效力系(或一个力)代替一个复杂力系的过程称为力系的简化。力系的简化是刚体静力学的基本问题之一。

工程实际中的许多物体,在力的作用下,它们的变形一般很微小,对所研究问题影响也很小,为了简化分析,我们把物体视为刚体。所谓刚体,是指在任何外力的作用下,物体的大小和形状始终保持不变的物体。静力学的研究对象仅限于刚体,所以又称为刚体静力学。

平衡是指物体相对于惯性参考系(如地球)处于静止或者匀速直线运动。例如,在地面上静止的建筑物,作匀速直线运动的车辆等都处于平衡状态。平衡时物体机械运动的一种特殊情况。

如果物体在一力系的作用下处于平衡状态,这个力系叫做平衡力系。平衡力学必须满足的条件称为平衡条件。

二、静力学公理

公理是人类在长期的生活和生产实践中,经过反复的观察和实验总结出来的客观规律,不需要证明。静力学公理是力系简化和平衡条件的依据,是静力学全部理论的基础。

公理一 二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力平衡的必要与充分条件是:力的大小相等,方向相反,作用线在同一直线上。可以表示为: $F = -F'$ 或 $F + F' = 0$ 。

此公理给出了作用于刚体上的最简力系平衡时所必须满足的条件,是推证其他力系平衡条件的基础。在两个力作用下处于平衡的物体称为二力体,若物体是构件或杆件,也称为二力构件或二力杆件,简称二力杆。

公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系中,加上或减去平衡力系,并不改变原力系对刚体作用效应。

推论一 力的可传性原理

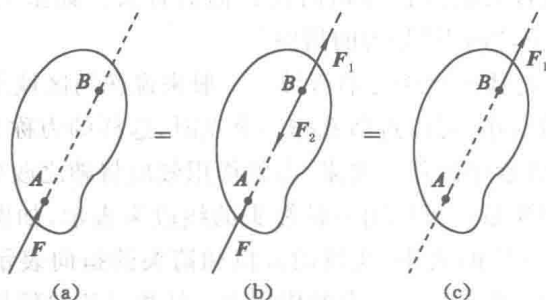


图 1-2

作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内任意一点,而不改变该力对刚体的效应。

证明:设力 F 作用于刚体上的点 A ,如图 1-2 所示。在力 F 作用线上任选一点 B ,在点 B 上加一对平衡力 F_1 和 F_2 ,使

$$F_1 = -F_2 = F$$

则 F_1 、 F_2 、 F 构成的力系与 F 等效。将平衡力系 F 、 F_2 减去,则 F_1 与 F 等效。此时,相当于力 F 已由点 A 沿作用线移到了点 B 。

由此可知,作用于刚体上的力是滑移矢量,因此作用于刚体上力的三要素为大小、方向和作用线。

公理三 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力可以合成为作用于该点的一个合力,它的大小和方向由以这两个力的矢量为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示。如图 1-3(a)所示,以 F_R 表示力 F_1 和力 F_2 的合力,则可以表示为: $F_R = F_1 + F_2$ 。即作用于物体上同一点两个力的合力等于这两个力的矢量和。

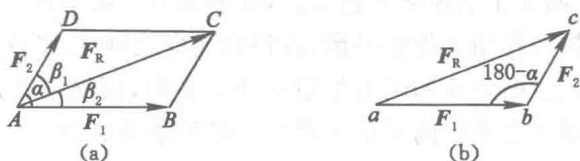


图 1-3

在求共点两个力的合力时,常采用力的三角形法则,如图 1-3(b)所示。从刚体外任选一点 a 作 ab 代表力 F_1 ,然后从 b 的终点作 bc 代表力 F_2 ,最后连起点 a 与终点 c 得到 ac ,则 ac 就代表合力矢 F_R 。分力矢与合力矢所构成的三角形 abc 称为力的三角形。这种合成方法称为力三角形法则。

推论二 三力平衡汇交定理

刚体受同一平面内互不平行的三个力作用而平衡时,则此三力的作用线必汇交于一点。

证明:设在刚体上三点 A 、 B 、 C 分别作用有力 F_1 、 F_2 、 F_3 ,其互不平行,且为平衡力系,如图 1-4 所示,根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移至汇交点 O ,根据力的可传性公理,得合力 F_{R1} ,则力 F_3 与 F_{R1} 平衡,由公理一知, F_3 与 F_{R1} 必共线,所以力 F_1 的作用线必过点 O 。

公理四 作用与反作用公理

两个物体间相互作用力,总是同时存在,大小相等,指向相反,并沿同一直线分别作用在这两个物体上。

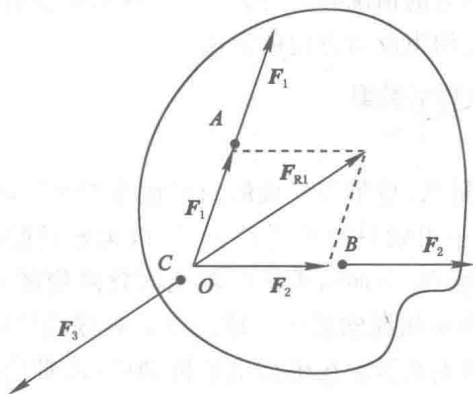


图 1-4

物体间的作用力与反作用力总是同时出现,同时消失。可见,自然界中的力总是成对存

在,而且同时分别作用在相互作用的两个物体上。这个公理概括了自然界任何两物体间的相互作用的关系,不论对刚体或变形体,不管物体是静止的还是运动的都适用。应该注意,作用力与反作用力虽然等值、反向、共线,但它们不能平衡,因为两者分别作用在两个物体上,不可与二力平衡公理混淆起来。

公理五 刚化原理

变形体在已知力系作用下平衡时,若将此变形体刚化为刚体,则其平衡状态保持不变。

此原理建立了刚体平衡条件与变形体平衡条件之间的关系,即关于刚体平衡条件是变形体平衡的必要条件。满足了刚体的平衡条件,变形体不一定平衡。例如一段软绳,在两个大小相等、方向相反的拉力作用下处于平衡,若将软绳变成刚杆,平衡保持不变。反过来,一段刚杆在两个大小相等、方向相反的压力作用下处于平衡,而绳索在此压力下则不能平衡。可见,刚体的平衡条件对于变形体的平衡来说只是必要条件而非充分条件。

第二节 约束和约束力

一、约束与约束反力的概念

工程上实际中的物体通常分两种:一种是可以任在空间作任意运动的物体,这一类物体称为自由体,如飞行器、宇宙间的日、月、星辰等;另一种是受到其他物体的限制,在空间的某些方位的运动受到限制,这一类物体称为非自由体,如悬挂的重物,因为受到绳索的限制,不能在绳索受拉方向运动是非自由体,将这种阻碍物体运动的限制称为约束。一般约束是通过物体间的直接接触形成的。

非自由体与约束之间的相互作用力,称为约束反力,简称反力。约束反力的方向总是与约束所阻碍物体的运动或运动趋势的方向相反,它的作用点就在约束与被约束的物体的接触点,大小可以通过计算求得。

工程实际中把能使物体主动产生运动或运动趋势的力称为主动力,如重力、风力、水压力等,通常主动力是已知的。一般情况下,约束反力是由主动力的作用下引起的,是未知的。经验表明约束力不仅与主动力的情况有关,同时也与约束类型有关。下面介绍工程实际中常见的几种约束类型及确定约束反力方向的方法。

二、工程中常见的几种约束类型

1. 柔性约束(柔索)

矿山机械中常用绳索、链条、皮带等形成的约束称为柔性约束。这类型约束的特点是不可伸长,只能承受拉力。由于柔索只能承受拉力,所以柔索只能限制物体沿其伸长方向运动,其约束反力作用点在接触点,方向沿柔索的轴线而背离物体,为拉力。柔性约束反力通常用 F 来表示。如图 1-5 所示用绳索悬吊一球。绳索对球的约束反力作用在接触点处,方向沿着绳索且背离球。如图 1-6 所示在机械皮带传动中,皮带传动过程中皮带对传动轮的约束反力作用在接触点处,方向沿着皮带背离传动轮。

2. 光滑接触面约束

两物体直接接触,且不计接触处的摩擦构成的约束,称为光滑接触面约束。这一类约束的特点是不论接触面是什么形状,只限制物体沿着接触面法向方向且指向接触面的运动。

所以光滑接触面对非自由体的约束反力作用在接触点,沿接触面的公法线且指向物体,为压力,如图 1-7 和图 1-8 所示。

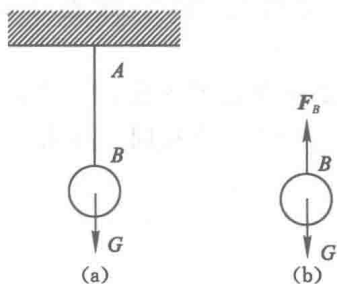


图 1-5

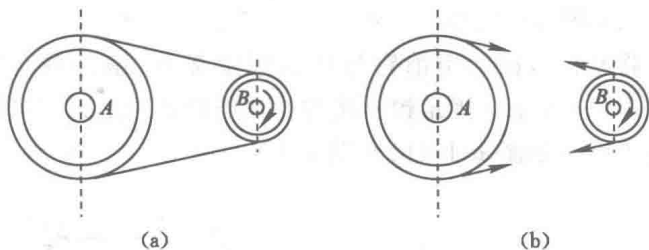


图 1-6

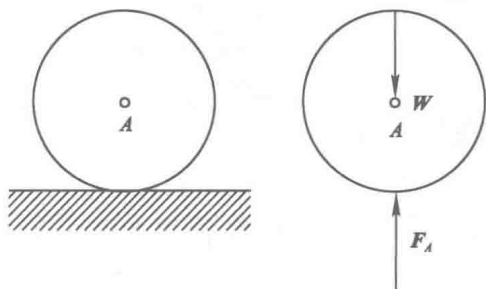


图 1-7

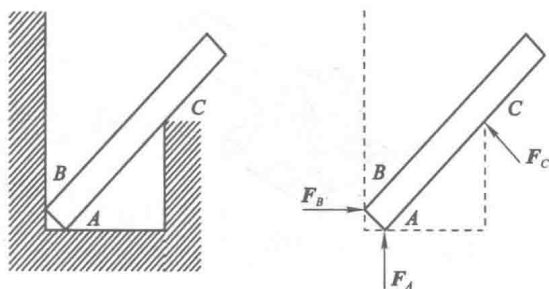


图 1-8

3. 光滑铰链约束

工程上常用销钉来连接构件或零件,两个带有相同孔的构件采用圆柱定位销连接,这种约束称为铰链约束,简称铰连接或中间铰,如图 1-9(a)所示。

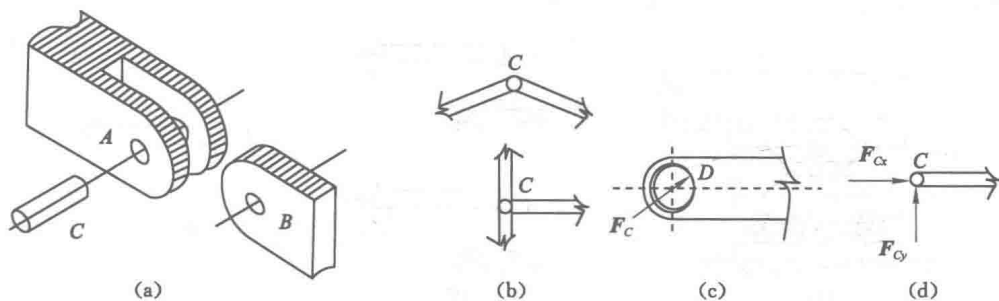


图 1-9

铰链所连接的两个构件互为约束,其特点是只限制沿圆柱销任意径向相对移动不限制绕圆柱销轴线的转动和平行于圆柱销轴向方向的移动,且忽略销钉与构件间的摩擦。铰链约束的约束反力用在销钉与物体的接触点 D ,沿接触面的公法线方向,并通过铰链中心,使被约束物体受压力。但由于销钉与销钉孔壁接触点与被约束物体所受的主动力有关,一般不能预先确定,所以约束反力 F_C 的方向也不能确定。因此,其约束反力作用在垂直于销钉

轴线平面内,通过销钉中心,方向不定。通常铰链约束的约束反力用过铰链中心两个大小未知的正交分力 F_{Cx} , F_{Cy} 来表示如图 1-9(d) 所示。

工程中使用的有铰链的支座,按照支座是否固定可分为固定铰链支座和可动铰链支座。

(1) 固定铰链支座

将结构或构件用销钉与地面固定部分(基座等)之间连接就构成了固定铰链支座,如图 1-10(a) 所示。固定铰链支座的约束简图及约束力的画法与铰链约束完全相同。简化记号和约束反力如图 1-10(b) 和图 1-10(c) 所示。

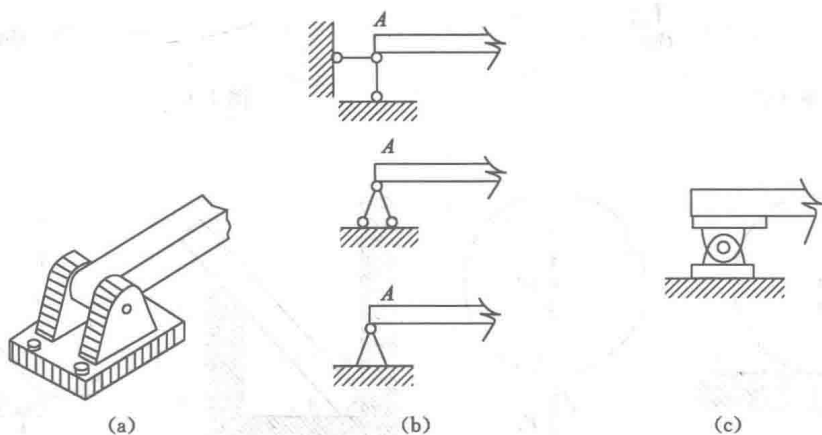


图 1-10

(2) 可动铰链支座

在固定铰链支座和支承面间装有圆柱形滚轮,就构成了可动铰链支座,或称为辊轴支座,如图 1-11(a) 所示。这种约束只能限制物体沿支承面法线方向运动,而不能限制物体沿支承面移动和相对于销钉轴线转动,所以其约束反力垂直于支承面,过销钉中心指向被约束的构件,如图 1-11(b) 和图 1-11(c) 所示。

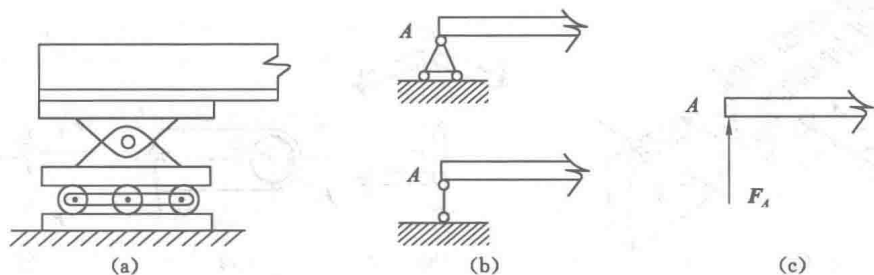


图 1-11

4. 向心轴承约束

轴承装置是工程中用的最常见的工程约束之一,其结构简图如图 1-12(a) 所示。轴承对轴进行约束,其约束特点是允许轴在孔内任意的转动,但限制轴在垂直于轴线任意方向的位移,不计摩擦。其约束反力可用通过轴心的两个相互垂直的分力表示,其简图和约束反力如图 1-12(b) 所示。