

L I L U N
L I X U E

高等学校教材

理论力学

L I L U N

L I X U E

马友发 陈 炎 刘逸平 编著

华南理工大学出版社

高等学校教材

理论力学

马友发 陈炎 刘逸平 编著

华南理工大学出版社

· 广州 ·

内 容 简 介

本书是广东省省级精品课程教材,由静力学、运动学和动力学三部分内容组成。

静力学部分包括静力学基础、平面汇交力系和平面力偶系、平面任意力系、空间力系和重心、摩擦等五章。运动学部分包括点的运动学、刚体的简单运动、点的合成运动、刚体的平面运动等四章。动力学包括质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理等六章。为便于学习,每章后均附有思考题与习题,并在附录中给出了参考答案。

本书可作为高等学校工科本科机械类、土木类各专业理论力学课程的教材,也可供高职高专、成人高校师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/马友发,陈炎,刘逸平编著. —广州:华南理工大学出版社,2009.8
ISBN 978-7-5623-3180-3

I. 理… II. ①马…②陈…③刘… III. 理论力学—高等学校—教材 IV..031

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 127424 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学17号楼 邮编510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail: z2cb@scut.edu.cn http://www.scutpress.com.cn

策划编辑:赖淑华

责任编辑:赖淑华 何小敏

印刷者:佛山市浩文彩色印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:22 字数:550千

版次:2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

印数:1~3000册

定价:37.00元

版权所有 盗版必究

前 言

《理论力学》是广东省省级精品课程建设的系列教材之一。课程体现“强能力、宽适应”的人才培养指导思想，注重学生能力的培养，力求能更好地适应当前的教学要求。

本课程是工科院校很多专业的重要的技术基础课，也是第一门衔接理论基础与工程实际的课程。通过本课程的学习，旨在培养学生分析问题、解决问题的能力，以及把简单工程问题抽象为力学模型的能力，进而为后续课程的学习打下良好的基础。

本书体系完整、系统性强、逻辑清晰、由浅入深，适用于工科院校各专业的教学需求。本书根据现代高等教育的要求，注重基本概念、基本理论的阐述，尽量避免冗长繁琐的理论推导；注重对学生智能结构和能力体系的形成以及综合素质的提高；注重培养学生逻辑思维能力、解决工程实际问题的能力，符合教学大纲的要求。

为了加强“三基”（基本概念、基本理论、基本方法）训练，教材配置了大量的练习题。习题由浅入深，由简单计算到综合运用，符合认知规律。其中部分习题从工程实际简化而得，反映了近代科学技术的发展和力学在工程中的应用，可培养学生的工程意识和学以致用能力。

每章还配有一定量的思考题，有助于读者理解、运用本章的理论和知识。

本书可作为高等学校工科本科机械、土木、车辆、船舶、矿冶等专业的力学课程教材，也可供高职、高专和成人高校师生及有关工程技术人员参考。

本书第1~6章由刘逸平执笔编写，第7~10章由马友发执笔编写，第11~15章由陈炎执笔编写。全书由马友发统稿。

华南理工大学罗龙开教授审阅了全稿并提出了不少建设性的意见，在此表示衷心的感谢！在本书的编写过程中，得到华南理工大学教务处、华南理工大学土木与交通学院和华南理工大学出版社的大力支持，在此一并致谢！

限于编者的水平，错讹之处难免，敬请读者批评指正。

编 者
2009年5月

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第 1 篇 静力学

第 1 章 静力学基础	(3)
1.1 力的概念	(3)
1.2 静力学公理	(4)
1.3 约束与约束力	(6)
1.4 物体的受力分析和受力图	(11)
附:亚里士多德	(15)
思考题	(18)
习题	(19)
第 2 章 平面汇交力系和平面力偶系	(21)
2.1 平面汇交力系合成和平衡的几何法	(21)
2.2 平面汇交力系合成和平衡的解析法	(22)
2.3 平面力对点的矩的概念及计算	(26)
2.4 平面力偶系	(27)
思考题	(30)
习题	(31)
第 3 章 平面任意力系	(35)
3.1 力的平移定理及平面任意力系的简化	(35)
3.2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	(40)
3.3 静定和超静定的概念 物体系的平衡	(43)
3.4 平面静定桁架的内力分析	(46)
思考题	(49)
习题	(50)
第 4 章 空间力系和重心	(56)
4.1 空间汇交力系	(56)
4.2 力对点的矩和力对轴的矩	(58)

4.3 空间力偶	(61)
4.4 空间任意力系向一点简化	(64)
4.5 空间任意力系的平衡方程	(67)
4.6 重心	(69)
附:“给我一个支点,我就能撬起地球”——阿基米德	(75)
思考题	(77)
习题	(77)
第5章 摩擦	(82)
5.1 滑动摩擦	(82)
5.2 摩擦角和自锁现象	(84)
5.3 考虑滑动摩擦的平衡问题	(85)
5.4 滚动摩擦简介	(88)
思考题	(91)
习题	(92)
 第2篇 运动学 	
第6章 点的运动	(94)
6.1 矢量法	(94)
6.2 直角坐标法	(95)
6.3 自然法	(97)
思考题	(102)
习题	(103)
第7章 刚体的简单运动	(106)
7.1 刚体的平行移动	(106)
7.2 刚体的定轴转动	(107)
7.3 转动刚体内各点的速度和加速度	(108)
7.4 以矢积表示点的速度和加速度	(110)
7.5 定轴转动轮系的传动比	(111)
思考题	(112)
习题	(113)
第8章 点的合成运动	(117)
8.1 绝对运动、相对运动和牵连运动	(117)
8.2 点的速度合成定理	(118)
8.3 点的加速度合成定理	(121)
附:科里奥利和科里奥利效应	(126)

思考题	(127)
习题	(128)
第9章 刚体的平面运动	(135)
9.1 平面运动方程及平面运动的分解	(135)
9.2 求平面图形内各点速度的基点法	(137)
9.3 求平面图形内各点速度的瞬心法	(139)
9.4 用基点法求平面图形内各点的加速度	(142)
9.5 平面机构的运动分析	(147)
思考题	(153)
习题	(156)
第3篇 动力学	
第10章 质点动力学	(165)
10.1 质点动力学基本方程	(165)
10.2 质点的运动微分方程	(166)
附:伟大的英国物理学家、数学家、天文学家牛顿(1642—1727)	(172)
思考题	(174)
习题	(175)
第11章 动量定理	(179)
11.1 动量与冲量	(179)
11.2 动量定理	(181)
11.3 质心运动定理	(187)
附:伽利略(1564—1642)	(189)
思考题	(191)
习题	(193)
第12章 动量矩定理	(199)
12.1 质点和质点系的动量矩	(199)
12.2 动量矩定理	(200)
12.3 刚体绕定轴的转动方程	(206)
12.4 刚体对轴的转动惯量	(208)
12.5 质点系相对于质心的动量矩定理	(214)
12.6 刚体的平面运动微分方程	(219)
附:开普勒(1571—1630)	(225)
思考题	(225)
习题	(227)

第 13 章 动能定理	(234)
13.1 质点和质点系的动能	(234)
13.2 力的功	(237)
13.3 势力场和势能	(242)
13.4 动能定理	(244)
13.5 动力学普遍定理的综合应用	(252)
附:约瑟夫·拉格朗日	(259)
思考题	(261)
习题	(263)
第 14 章 达朗贝尔原理	(269)
14.1 惯性力、质点的达朗贝尔原理	(269)
14.2 质点系的达朗贝尔原理	(272)
14.3 刚体惯性力系的简化	(274)
14.4 绕定轴转动刚体的轴承动约束力	(282)
附:达朗贝尔	(286)
思考题	(288)
习题	(289)
第 15 章 虚位移原理	(295)
15.1 约束、自由度和广义坐标	(295)
15.2 虚位移、虚功和理想约束	(298)
15.3 虚位移原理及应用	(302)
附:约翰·伯努利	(311)
思考题	(312)
习题	(315)
综 合 习 题	(320)
习 题 答 案	(326)
综合习题答案	(340)
参 考 文 献	(342)

绪 论

什么是“力学”？学习力学的意义何在？相信不少人心存困惑。中国著名的力学专家谈镐生先生认为：物理科学是认识自然，工程技术是改造自然，力学既是物理学的基础，也是工程技术的基础。谈先生一语道出了力学的深刻内涵，的确称得上真知灼见。

力学是最早获得发展的学科之一。早在远古时代，人类的祖先就在生产实践中发现、积累了一些经验，用于建造简单的机械和工具（如斜面、杠杆、滑车等）。后人通过反复实践，从这些经验中获取知识，逐渐形成力学的规律。因此人们往往把力学和数学、物理、化学、天文、地理、生物这些与人类共同发展的学科并称为七大自然学科。

在资本主义出现之前，建筑和机械一直是人类社会的两大主要工程，而建筑更被认为是衡量人类文明的重要标志。历史告诉我们，力学与建筑、机械的关系均异常密切，从秦代的万里长城到汉代张衡的浑天仪、地动仪，从隋朝李春的赵州桥到明朝郑和下西洋的航海巨船……这些力学史上的不朽丰碑即便用今天的眼光来看也堪称人类发展史上的里程碑。

可以毫不夸张地说，力学发展史就是科学发展史、社会发展史的一个缩影。社会的发展、生产的需求推动着科学和力学的发展，而科学和力学的发展又促进了社会和文明的发展。15 世纪后期，随着商业资本的兴起，诞生了很多新兴的工程，加快了力学的发展。特别是 18 世纪西方工业革命后，天文、军事、建筑、航海、机械、仪器等许多工业的迅速发展给力学提出了很多新问题，更促进了力学向深度和广度发展，因此马克思和恩格斯在抨击“资本”罪恶的同时却对力学发出由衷的赞叹：“力学是大工业的基础”。

科学总是与时俱进的。在 20 世纪，力学不仅推动和促进了航空、航天等许多新产业的发展，自身也经历了由简单到复杂、由线性到非线性的拓展，开辟了众多新领域。计算机的出现更使力学如虎添翼，现在力学已经有了很多分支和边缘学科：断裂力学、爆炸力学、生物力学、统计力学、计算力学……力学不仅深刻地影响着各种工业和技术，深刻地影响着人类的生活，也深刻地影响着人类文明的进程。从航空航天到摩天大楼，从隐形飞机到仪器仪表，从芭蕾舞到各项体育运动，无不和力学密切相关。因此钱伟长先生满怀深情地说：“几乎所有的工程问题都有力学问题。”人们在工程实践中认识到，哪里有技术难题，哪里就有力学难题，很多原本不能认识、不能解决的问题最终都归结为力学问题。力学与工程的关系竟是如此的密切，人们正在从科学和工程的角度重新审视力学的地位和重要性。

“江山代有才人出，各领风骚数百年。”古往今来，无数的科学家前赴后继，为力学的发展作出了巨大的贡献；而科学的巨匠更是以其非凡的睿智和胆略为后人指引着前进的方向。中国最早对力学的认识载于春秋时期伟大学者墨翟（约公元前 468—前 384）学派的代表作《墨经》中，对力、杠杆及平衡等提出了正确的见解，约晚一个世纪的古希腊科学家阿基米德（公元前 287—前 212）总结了前人积累的静力学知识，在其著作《论比重》中，建立了有关杠杆、重心及浮体平衡等理论，奠定了静力学的基础。在总结众多前人经验的基础上，科学巨

匠牛顿(1643—1727)以《自然哲学中的数学原理》一文完成了“古典力学”的理论体系,对人类的思想革命和工业革命都产生了难以估量的深远影响,被誉为“有史以来最伟大的天才”;拉格朗日(1736—1813)利用微积分这一科学手段,把力学问题数学化,在“分析力学”方面取得了辉煌的成就;而爱因斯坦(1879—1955)创立的相对论力学,否定了绝对空间和绝对时间的概念,为力学的发展作出了划时代的贡献。

尽管古典力学有其局限性,但工程上遇到的绝大多数问题都符合古典力学的应用条件,用古典力学求解的结果有其足够的精确性,因此古典力学在工程上得到广泛的应用,具有重大的现实意义。

在众多的力学学科中,理论力学是最基础的,同时理论力学又是第一门衔接理论与工程实际的课程。理论力学的概念、原理和方法在材料力学、结构力学、机械原理、振动等后续课程中有着广泛的应用,学习理论力学,不但可以培养工程意识和建模能力,还有助于提高分析问题和解决问题的能力,因此理论力学是工科院校一门重要的技术基础课。

第 1 篇 静力学

力是物体间相互的机械作用。物体受到力的作用时,其机械运动状态将发生变化,同时物体的形状也会发生改变。力使物体运动状态发生变化,称为力的运动效应或外效应;力使物体形状发生改变,称为力的变形效应或内效应。

力系是指作用在物体上的一群力。

静力学研究物体在力系作用下平衡的一般规律。平衡是物体运动状态的一种特殊情况,是指物体相对于惯性参考系(如地球)保持静止或作匀速直线运动。刚体是指物体在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体,这是一个理想化的力学模型。

静力学主要研究物体受力分析的基本方法、力系的简化、力系的平衡条件和平衡方程及其在工程中的应用。

第 1 章 静力学基础

1.1 力的概念

力对物体的作用效应取决于三要素:①力的大小;②力的方向;③力的作用点。用矢量 $\boldsymbol{F}$ 表示力的三要素,如图 1-1 所示。矢量的长度按一定的比例尺表示力的大小;矢量的方向表示力的方向;矢量的始端(或末端)表示力的作用点。力矢与力的作用线(图 1-1 中的虚线)重合。

力按其作用在物体上的作用面积大小可分为集中力和分布力。集中作用于一点的力,称为集中力,用 $\boldsymbol{F}$ 表示。作用力分布在有限的线段、面积或体积内时,称为分布力,对应地称为线分布力、面分布力和体分布力,如图 1-2 所示的是均匀分布的线分布力和面分布力。在国际单位制中,力的单位是 N 或 kN。线分布力、面分布力和体分布力的单位对应地用 N/m(或 kN/m)、N/m²(或 kN/m²)、N/m³(或 kN/m³)表示。

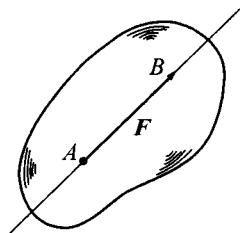
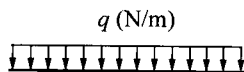
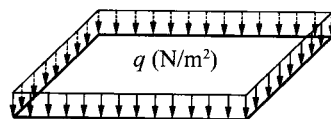


图 1-1



(a)



(b)

图 1-2

1.2 静力学公理

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力,合力作用在同一点,其大小和方向由这两个力为边的平行四边形的对角线确定,即合力矢等于这两个力矢的矢量和。如图 1-3 所示,即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

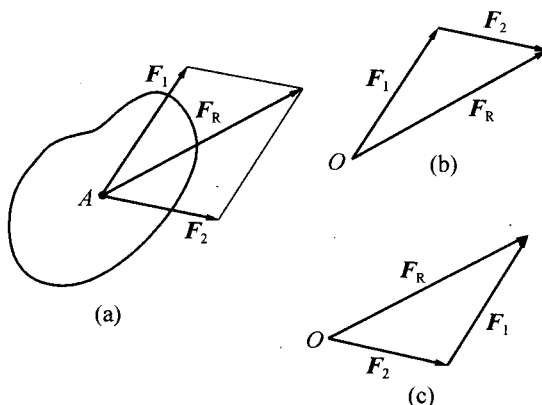


图 1-3

力的平行四边形法则亦可以理解为力的三角形法则,如图 1-3b,c 所示。

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等、方向相反,且作用在同一直线上。如图 1-4 所示,即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$$

这个公理表明了作用于刚体上最简单力系平衡时必须满足的条件。工程上通常把只受两个力作用而处于平衡的构件称为二力构件,如构件是杆,则称之为二力杆。

公理 3 加减平衡力系原理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系,不改变原力系对刚体的作用。

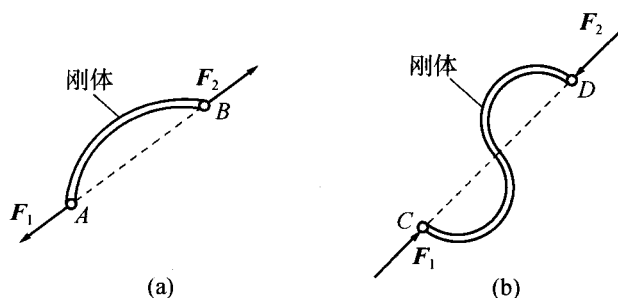


图 1-4

推论 1 力的可传性

作用在刚体上的力可沿其作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

设刚体上的点 A 作用有力 F ,如图 1-5a 所示,根据加减平衡力系原理,在力的作用线上任意点 B 加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,并使 $F_2 = -F_1 = F$ (图 1-5b),再减去 F_1 和 F 组成的平衡力系,如图 1-5c 所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

因此,对于作用于刚体上的力,其三要素为力的大小、方向和作用线。由于作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,因此称之为滑移矢量。

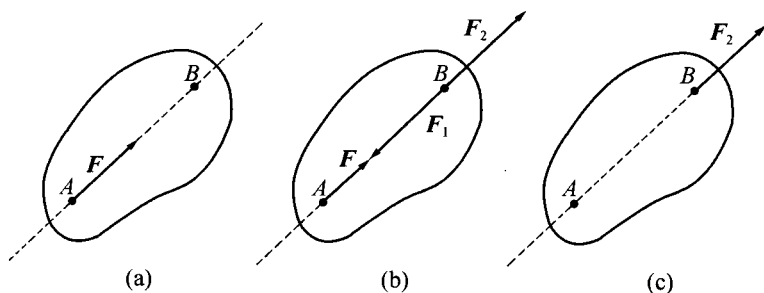


图 1-5

值得注意的是,力的可传性只适用于刚体,不适用于变形体。

推论 2 三力平衡汇交定理

刚体受到互不平行的三个力作用而处于平衡时,这三个力必在同一个平面内且汇交于同一点。

如图 1-6a 所示,在刚体的 A 、 B 、 C 三点分别作用三个作用线互不平行的力 F_1 、 F_2 、 F_3 ,此时刚体处于平衡。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 分别沿其作用线移到它们的汇交点 O 上,由力的平行四边形法则,将 F_1 和 F_2 合成为一个合力 F_{12} (图 1-6b)。由于刚体处于平衡,根据二力平衡条件, F_3 和 F_{12} 必共线。因此力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面,且通过力 F_1 和 F_2 的交点 O 。

公理 4 作用与反作用定律

作用力与反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,分别作用

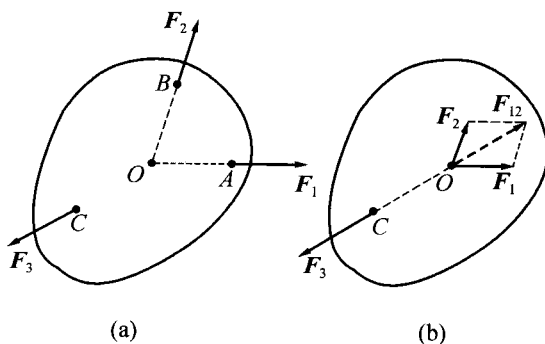


图 1-6

在两个相互作用的物体上。若用 $\mathbf{F}$ 表示作用力,用 $\mathbf{F}'$ 表示反作用力,则

$$\mathbf{F} = -\mathbf{F}'$$

这一定律也称为牛顿第三定律,不论物体静止还是运动,这一定律都成立。作用力与反作用力虽然大小相等、方向相反、作用在同一条直线上,但它们绝不是一对平衡力,因为它们分别作用在两个物体上。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡,若将此变形体刚化为刚体,其平衡状态不变。

反之,如果刚体在某一力系作用下处于平衡,如将此刚体变成变形体,其平衡状态不一定能保持。

刚化原理表明,如果变形体处于平衡,就可以用刚体的平衡条件去研究它的平衡问题。

1.3 约束与约束力

可在空间作任意运动的物体称为自由体,如在空中可以自由飞行的飞机、小鸟等。有些物体受周围物体的限制,在某些方向不能运动,这些物体称为非自由体。例如,用绳子悬挂而不能下落的重物,支承于墙上而静止不动的屋架等,阻碍物体运动的周围物体则称为约束。约束是以物体相互接触的方式构成的,上述绳索对于所悬挂的重物和墙对于所支承的屋架都构成了约束。

约束对物体的作用称为约束力或约束反力。与约束力相对应,有些力主动地使物体运动或使物体有运动趋势,称为主动力。如重力、风力、水压力、土压力等等都是主动力,工程上也常称作荷载。

主动力一般是已知的,而约束力则是未知的。但是,约束力的方向总是与约束所能阻碍的运动方向相反。在静力学问题中,非自由体在已知主动力作用下处于平衡,主动力和约束力组成平衡力系,根据力系的平衡条件可求解未知的约束力。

下面介绍工程中常见的几种约束类型。

1) 柔索

绳索、链条、皮带等属于柔索类约束。由于柔索只能承受拉力,所以柔索给予所系物体

的约束力作用于接触点,方向沿柔索中心线而背离物体,如图 1-7 所示。

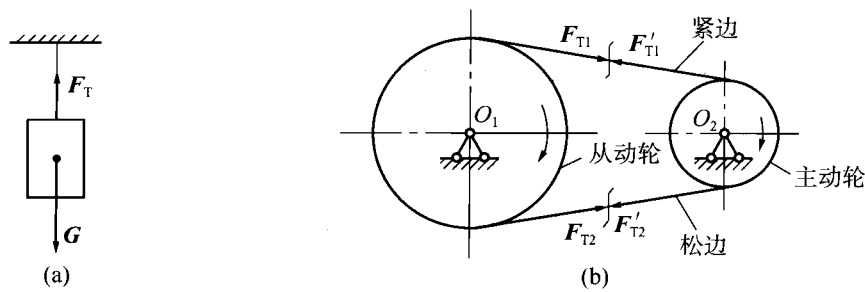


图 1-7

2) 光滑接触面

当两物体接触面上的摩擦力可以忽略时,即可看作光滑接触面。这时,不论接触面形状如何,只能阻止物体沿着通过接触点的公法线趋向于接触面的运动。所以,光滑接触面的约束力通过接触点,沿接触面在该点的公法线,指向被约束物体,并只能为压力,如图 1-8 所示。

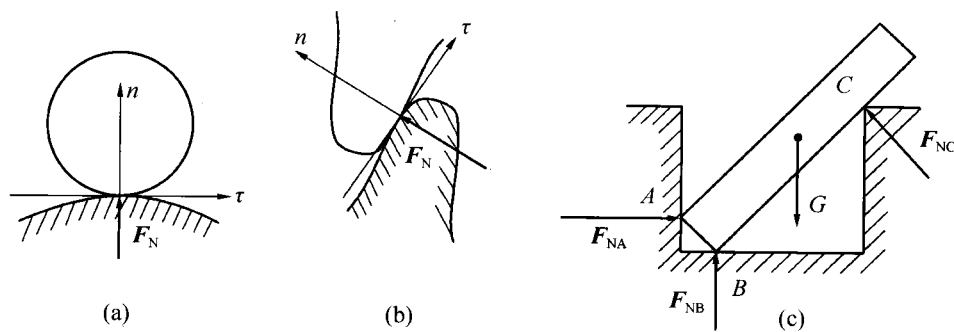


图 1-8

3) 光滑圆柱铰链

钻有同样大小的孔的两个构件用圆柱形销钉连接起来构成的约束称为圆柱铰链连接,简称为铰链,如图 1-9 所示。在铰链的约束下,构件只能绕铰链的轴线转动,如果接触面的

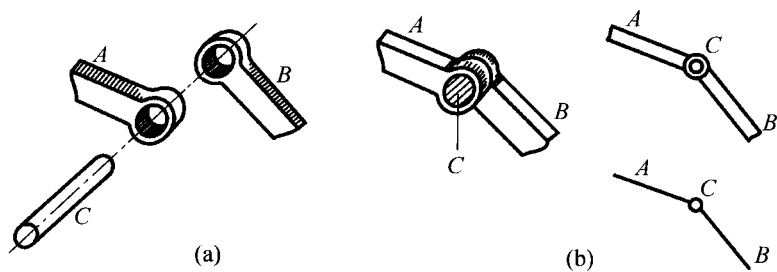


图 1-9

摩擦略去不计(以后如不加说明,铰链均视为光滑的),则圆孔和销钉是两个光滑圆柱面接触,销钉作用于构件的约束力通过接触点沿着接触面的公法线方向。由于接触点的位置一般难以预先确定,因此约束力常用通过铰链中心的两个正交分力表示,其指向可假设,如图 1-10 所示。

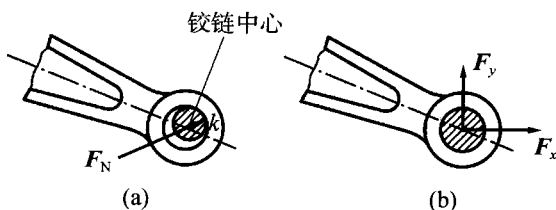


图 1-10

4) 固定铰链支座

如将圆柱铰链连接的两个构件中的一个固定在基础或另一静止的支承物上,该支座就成为固定铰链支座。图 1-11a、b 是构件与支座连接示意图,计算简图如图 1-11c、d 所示,其约束性质和铰链一样,销钉限制构件的径向运动,约束力用通过铰链中心的两个正交分力表示,指向可假设,如图 1-11c 所示。

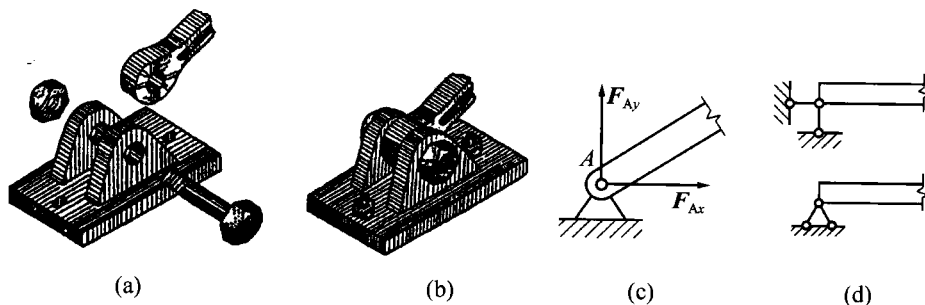


图 1-11

5) 辊轴铰链支座

将构件用销钉与支座连接,而支座可以沿着支承面运动,就成为辊轴铰链支座,简称滚动铰支座或可动铰支座。图 1-12a 是辊轴铰链支座的示意图,图 1-12b 为可动铰支座的常用简化表示法,图 1-12c 是链杆连接,其受力与可动铰支座类似。假设支承面是光滑的,可动铰支座就不能阻止沿着支承面的运动,而一般能阻止物体与支座连接处向着支承面或离开支承面的运动。所以,可动铰支座的约束力通过销钉中心,垂直于支承面(图 1-12b),指向可假定。

6) 光滑球铰支座

物体的一端做成球形,固定的支座做成一球窝,将物体的球形端置入支座的球窝内,则构成球铰支座,简称球铰(图 1-13a)。球铰支座是用于空间结构的约束。被约束物体只能绕球心转动但不能移动,若不计接触处的摩擦,球窝给予球的约束力必通过球心,但其方向一般不能预先确定,通常用三个正交分力表示(图 1-13b)。连接两根杆的球铰称为活动球铰。图 1-13c 分别为固定球铰支座和活动球铰的约束简图。

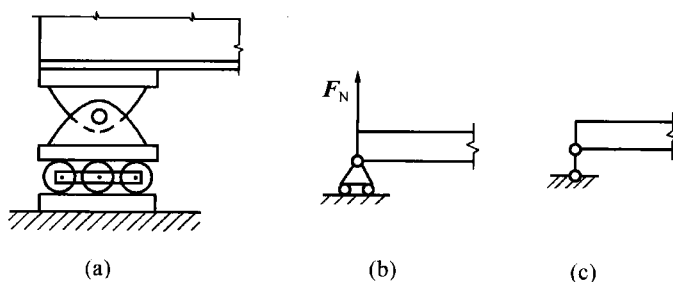


图 1-12

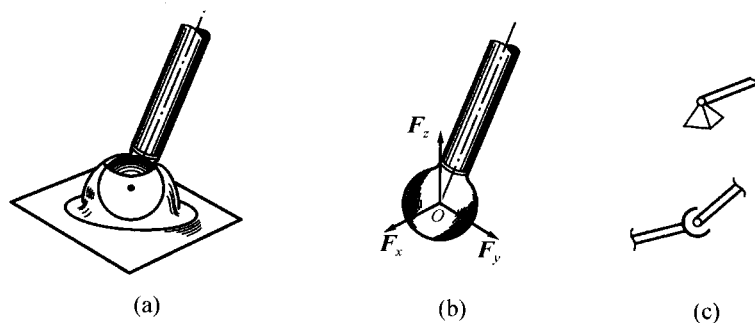


图 1-13

7) 固定端约束

将物体的一端嵌固于基础或其他静止的物体上,就构成了固定端约束(图 1-14a)。固定端既限制物体的移动又限制物体的转动,可用三个正交分力和三个正交分力偶矩矢量表示(图 1-14b),力的指向和力偶的转向可假设。

对于平面问题,固定端约束的约束力如图 1-15 所示。

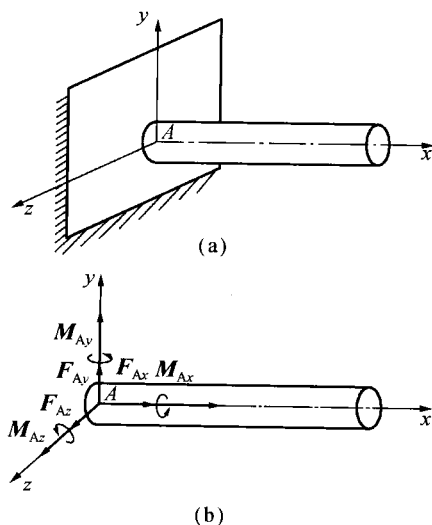


图 1-14

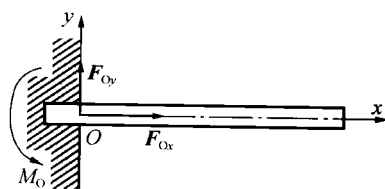


图 1-15