

 普通高等教育规划教材



飞行性能力学基础

Flight Mechanics Performance Basis

谷润平 韩红蓉 温瑞英 编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



普通高等教育规划教材

飞行性能力学基础

Flight Mechanics Performance Basis

谷润平 韩红蓉 温瑞英 编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书分为理论力学、材料力学和飞机结构与受力分析三篇,共 23 个章节。主要讲述了静力学,运动学,动力学,杆件的基本变形,动载荷和疲劳失效,作用在飞机上的载荷,飞机典型机翼、尾翼、机身、起落架和增压舱的结构和受力特点。

本书内容注重对基本概念和基本方法的阐述,兼顾知识的系统性和逻辑性,理论性和实用性并重。本书旨在使学生掌握力学的基本原理和基本方法,进而能够运用这些原理和方法,并对飞机结构有基本的了解和认识。

本书可以作为民用航空交通运输专业本科学生的教材,也可供民航类高职高专相关专业使用,同时可作为航空爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞行性能力学基础/谷润平,韩红蓉,温瑞英编.
—北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.8
ISBN 978-7-114-12284-2

I. ①飞… II. ①谷… ②韩… ③温… III. ①飞行力学—教材 IV. ①V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 120945 号

书 名:飞行性能力学基础

著 作 者:谷润平 韩红蓉 温瑞英

责任编辑:吴燕伶 王景景

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:19.25

字 数:440 千

版 次:2015 年 6 月 第 1 版

印 次:2015 年 6 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12284-2

定 价:48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

随着我国民航事业的不断发展,近年来除了引进大量现代喷气运输机外,我国的航空工业也逐步开始研制、生产民航支线和干线飞机。一方面,伴随航空科学技术的不断进步,现代喷气飞机能够载运更多的旅客、货物、行李和邮件,飞行更远的距离,具有良好的飞行性能;同时,为了保证飞行安全和提高运行的经济性,也对飞机性能工作人员、飞行签派人员和空中交通管制员提出更多和更高的要求。飞机的飞行性能研究是一项复杂的系统工程,要准确地理解和把握飞机的飞行性能,掌握飞行性能的基本研究方法,必须具备基本的力学基础知识,为此,我们特意编写了本教材,希望通过该教材的学习,使交通运输专业学生掌握必要的工程力学基础和飞机结构相关知识。

本教材主要内容包括理论力学、材料力学、飞机结构与受力分析三个部分。理论力学部分主要讲解了力的合成和移动、刚体运动学、刚体动力学等内容;材料力学部分主要讲解了结构强度和刚度的基本理论、应力和应变、杆件的基本变形、疲劳失效的基本原理等内容;飞机结构与受力分析部分主要讲解了作用在飞机上的外载荷,传力的基本原理,机翼、尾翼、起落架和机身的结构特点及受力分析等内容。除理论分析内容外,教材还给出适量的例题,便于学生自学掌握。扎实的力学功底是进行飞机性能计算和分析的基础,也是学习飞机性能工程等后续课程的基础。

本书第一部分一、二、四、六章,第三部分的十八、十九章由谷润平编写,第一部分的三、五、七、八章,第二部分的十六、十七章由韩红蓉编写,第一部分的九、十、十一、十二章,第二部分的十三、十四、十五章,第三部分的二十、二十一、二十二、二十三章由温瑞英编写。全书由谷润平统一定稿。本教材承南京航空航天大学丁松滨教授、中国民航大学赵巍飞教授审阅,提出了很多中肯的意见。在编写过程中,还得到中国民航大学空管学院许多老师的支持与帮助,在此一并致谢。

在本教材的编写过程中,编者参考了大量国内外的文献资料和兄弟院校的有关教材,在此,对原作者深表感谢。编者力求阐述全面、系统、准确,论述简练,通俗易懂,但由于本书涉及面广,并且时间仓促,加之编者水平有限,书中错误和欠缺在所难免,诚心地希望读者和专家批评指正。

编者
2014年12月

第一篇 理论力学

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析	3
第一节 静力学基本概念	3
第二节 静力学基本公理	4
第三节 约束与约束力	6
第四节 物体的受力分析	10
第二章 平面力系	12
第一节 力在轴上的投影与力的分解	12
第二节 力对点之矩	13
第三节 力偶	15
第四节 平面力系的简化	16
第五节 平面力系的平衡	20
第六节 物体系统的平衡	24
第七节 摩擦	28
第三章 空间力系	34
第一节 空间力的分解与投影	34
第二节 力对点之矩与力对轴之矩	36
第三节 力偶矩矢	40
第四节 空间力系的简化	41
第五节 空间力系的平衡	44
第六节 重心	46
第四章 点的运动学	54
第一节 点的运动方程	54
第二节 点的速度和加速度	56
第五章 刚体的基本运动	63
第一节 刚体的平动	63
第二节 刚体的定轴转动	65
第六章 点的合成运动	71
第一节 相对运动、绝对运动和牵连运动	71

2 飞行性能力学基础

第二节	点的速度合成定理	74
第三节	点的加速度合成定理	77
第七章	刚体的平面运动	83
第一节	平面运动的概述和分解	83
第二节	平面图形上各点的速度	85
第八章	质点动力学	90
第一节	动力学基本定律	90
第二节	质点运动微分方程	91
第九章	动量定理	97
第一节	动量与冲量的概念	97
第二节	动量定理	99
第三节	质心运动定理	103
第十章	动量矩定理	107
第一节	动量矩的概念	107
第二节	转动惯量	108
第三节	动量矩定理	110
第十一章	动能定理	114
第一节	动能的概念和计算	114
第二节	功的概念和计算	116
第三节	动能定理	119
第四节	功率、功率方程、机械效率	124
第五节	势力场、势能、机械能守恒定律	126
第十二章	达朗伯原理	129
第一节	质点惯性力的概念	129
第二节	质点的达朗伯原理	129
理论力学学习题集及解析		131

第二篇 材料力学

第十三章	绪论	153
第一节	引言	153

第二节	变形固体的基本假设	154
第三节	内力和应力的概念	155
第四节	变形与应变	156
第五节	杆件变形的基本形式	157
第十四章	拉伸、压缩和剪切	160
第一节	轴向拉伸或压缩时横截面上的内力和应力	160
第二节	直杆轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力	163
第三节	材料在拉伸时的力学性能	164
第四节	材料在压缩时的力学性能	167
第五节	拉压的强度条件及其应用	167
第六节	轴向拉伸或压缩时的变形	169
第七节	温度应力和装配应力	170
第八节	应力集中的概念	171
第九节	剪切和挤压的实用计算	172
第十五章	扭转	175
第一节	扭转的概念和实例	175
第二节	外力偶矩的计算、扭转和扭矩图	175
第三节	纯剪切	177
第四节	圆轴扭转时的应力	179
第五节	圆轴扭转时的变形	183
第十六章	弯曲	186
第一节	弯曲内力	186
第二节	弯曲应力	194
第三节	弯曲变形	205
第十七章	动载荷和交变应力	210
第一节	动载荷	210
第二节	交变应力	218
第三节	持久极限曲线	223
第四节	不对称循环下构件的疲劳强度计算	224
第五节	提高构件疲劳强度的措施	225
材料力学习题集及解析		227

第三篇 飞机结构与受力分析

第十八章	飞机的外载荷	239
第一节	飞机的外载荷	239
第二节	过载和载荷系数	240
第三节	载荷系数的物理意义和实用意义	246
第四节	安全系数与设计载荷	248
第五节	飞行包线	249
第十九章	飞机结构分析与设计基础	255
第一节	静不定结构	255
第二节	真实结构与结构分析模型	256
第三节	结构传力分析的基本方法	258
第二十章	机翼、尾翼结构特点及受力分析	264
第一节	翼面的载荷与内力	264
第二节	翼面主要受力构件的用途和结构	266
第三节	气动载荷的传力分析	271
第四节	后掠翼结构受力及其分析	275
第五节	飞机尾翼的结构与受力分析	278
第二十一章	机身结构特点及受力分析	283
第一节	机身上的主要载荷	283
第二节	总体受力特点与载荷平衡	284
第三节	机身基本承力构件	285
第二十二章	起落架结构特点及受力分析	287
第一节	起落架的外载荷	287
第二节	典型起落架的结构和受力分析	288
第二十三章	飞机的增压座舱	291
第一节	座舱的增压载荷	291
第二节	增压舱结构特点	292
飞机结构与受力分析习题集及解析		295
参考文献		298

第一篇 理论力学

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析

第二章 平面力系

第三章 空间力系

第四章 点的运动学

第五章 刚体的基本运动

第六章 点的合成运动

第七章 刚体的平面运动

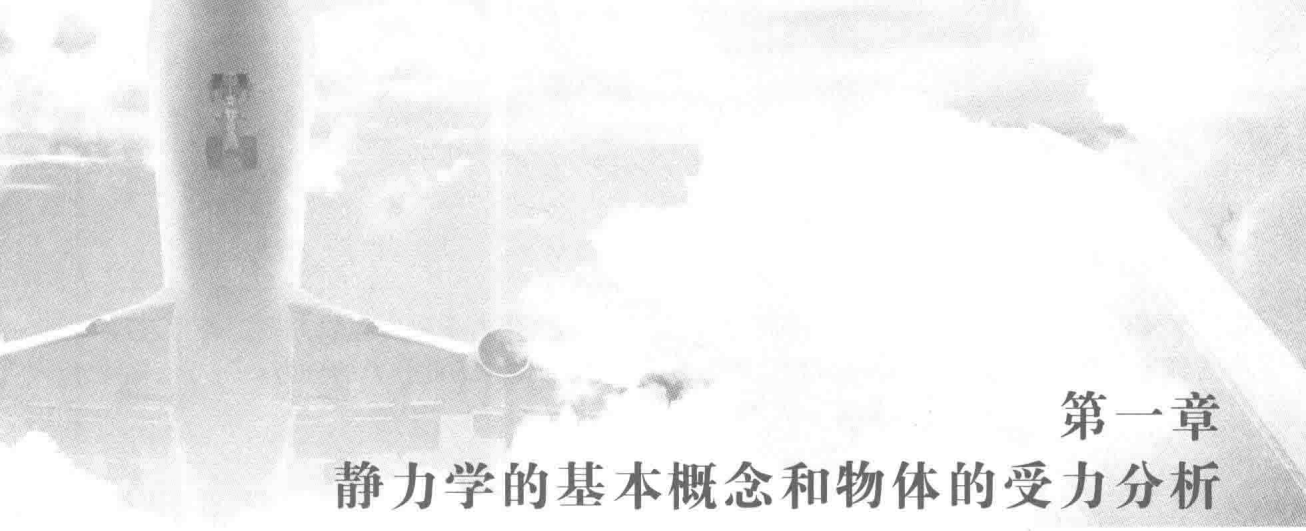
第八章 质点动力学

第九章 动量定理

第十章 动量矩定理

第十一章 动能定理

第十二章 达朗伯原理



第一章

静力学的基本概念和物体的受力分析

静力学的基本概念、公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将介绍力系的概念及静力学公理,并阐述工程中几种常见的典型约束和约束力,最后介绍物体受力分析的基本方法及受力图,它是解决力学问题的重要环节。

第一节 静力学基本概念

一、力系

静力学是研究刚体在力系作用下的平衡规律,同时也研究力的一般性质及其合成法则。

静力学中所指的物体都是刚体,是人们将各种各样的实际物体抽象化而得到的便于计算的理想模型。即指在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变。

力是物体间的相互作用,其效应是使物体的运动状态发生改变,同时使物体产生变形,前者称为外效应或运动效应,后者称为内效应或变形效应。理论力学只涉及力的外效应,力的内效应在材料力学中研究。力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点三个要素,力是一种矢量。在国际单位制中,力的单位是 N 或 kN。

同时作用在物体上的若干个力称为力系。力系按作用线位置不同可分为两种:当所有力的作用线在同一平面内时,称为平面力系;否则称为空间力系。又可按其作用线的相互关系不同分为三种:当所有力的作用线汇交于同一点时,称为汇交力系;而所有力的作用线都相互平行时,称为平行力系;否则称为任意力系。

二、平衡

平衡是指物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或匀速直线运动状态。如桥梁、地面的建筑物、作匀速直线飞行的飞机等,都处于平衡状态。平衡是物体运动的一种特殊形式。

三、平衡力系

若力系中各力对于物体的作用效应彼此抵消而使物体保持平衡或运动状态不变时,则这种力系称为平衡力系。平衡力系中的任一力对于其余的力来说都称为平衡力,即与其余的力相平衡的力。

四、等效力系

若两力系分别作用于同一物体而效应相同时,则这两力系称为等效力系。若力系与一力等效,则此力就称为该力系的合力,而力系中的各力,则称为此合力的分力。

五、力系简化

为了便于寻求各种力系对于物体作用的总效应和力系的平衡条件,需要将力系进行简化。用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,称为力系的简化。

研究力系等效并不限于分析静力学问题。例如:飞行中的飞机,受到升力、推力、重力、空气阻力等作用,这些力错综复杂地分布在飞机的各部分,每个力都影响飞机的运动。要想确定飞机的运动规律,必须了解这些力总的作用效果,为此,可以用一个简单的等效力系来代替这些复杂的力,然后再进行运动的分析。所以研究力系的简化不仅是为了导出力系的平衡条件,同时也是为动力学提供基础。在静力学中,我们将研究以下三个问题:

(1) 物体的受力分析:分析某个物体共受几个力,以及每个力的作用位置和方向。

(2) 力系的简化:研究如何把一个复杂的力系简化为一个简单的力系。

(3) 建立各种力系的平衡条件:研究物体平衡时,作用在物体上的各种力系所需满足的条件。

力系的平衡条件在工程中有着十分重要的意义,是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。因此,静力学在工程中有着最广泛的应用。

✈ 第二节 静力学基本公理

公理是人类经过长期的观察和经验积累而得到的结论,它可以在实践中得到验证,无须证明而为大家所公认。静力学公理是人们关于力的基本性质的概括和总结,是静力学全部理论的基础。静力学的所有定理都是从这些公理中推导出来的。

公理一 二力平衡公理

作用于刚体上的两力,使刚体保持平衡的充要条件是:该两力的大小相等、方向相反且作用于同一直线上。

公理一说明了作用于物体上最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对于刚体来说,这个条件是充分与必要的;而对于非刚体,该条件只是平衡的必要条件而非充分条件。工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件,如图 1-1 所示,BC 构件称为二力构件或二力杆。构件在 B 点、C 点受力的作用,根据公理一,该两力的作用线必定沿着作用点的连线。图 1-2 所示为桁架式起落架,它是由杆系组成的空间桁架结构,桁架中的杆在任何形式的载荷作用下只受拉压。这种桁架式起落架的缺点是结构较为笨重,不可收放,因此现代大型机上并不采用。

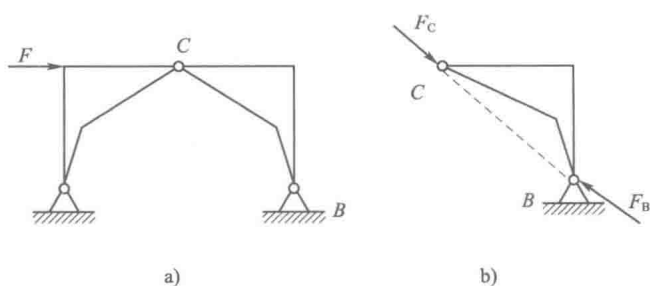


图 1-1 二力构件

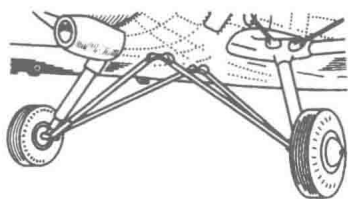


图 1-2 桁架式起落架

公理二 力的平行四边形法则

作用于物体某一点的两个力的合力,亦作用于同一点上,其大小及方向可由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示。

设在物体的 A 点作用有力 F_1 和 F_2 ,如图 1-3a)所示,若以 F_R 表示它们的合力,则可以写成矢量表达式

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

即合力 $\vec{F}_R$ 等于两分力 $\vec{F}_1$ 与 $\vec{F}_2$ 的矢量和。也可另作一力的三角形求合力矢,如图 1-3b)、图 1-3c)所示。

公理二是复杂力系简化的基础。

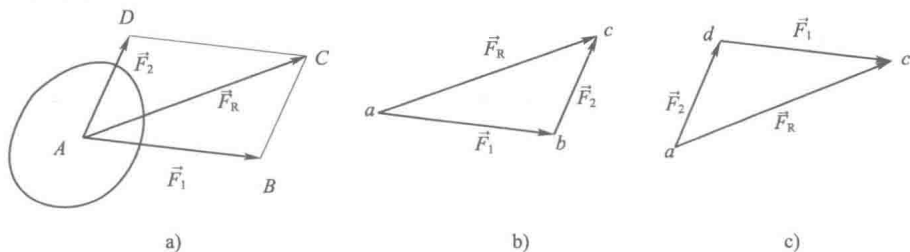


图 1-3 力的合成

公理三 加减平衡力系公理

在作用于刚体的力系上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应。

公理三是研究力系等效替换的重要依据。注意:此公理只适用于刚体,而不适用于变形体。

根据上述公理可以导出下列推论。

推论一 力的可传性原理

作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内的任一点,并不改变该力对刚体的作用。

因此,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效应的要素,它被作用线所代替。所以,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

推论二 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

公理四 作用力与反作用力公理

两物体间相互作用的力总是同时存在,且大小相等、方向相反,沿同一直线分别作用在两个物体上。

公理四概括了自然界中物体间相互作用的关系,表明作用力与反作用力总是同时存在同时消失,没有作用力也就没有反作用力。根据这个公理,已知作用力则可知反作用力,它是分析物体受力时必须遵循的原则,为研究由一个物体过渡到多个物体组成的物体系统提供了基础。

必须注意,作用与反作用力是分别作用在两个物体上的,不能错误地与二力平衡公理混同起来。图 1-4 所示为喷气式飞机发动机尾喷管气体和飞机之间的作用力与反作用力。

喷气发动机使燃料燃烧产生的气体加速排出,依据公理四,气体给飞机一个大小相等、方向相反的反作用力,此即飞机推力。

公理五 刚化公理

变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看作为刚体模型的条件。如图 1-5 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化成刚体,其平衡状态保持不变。绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡,这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

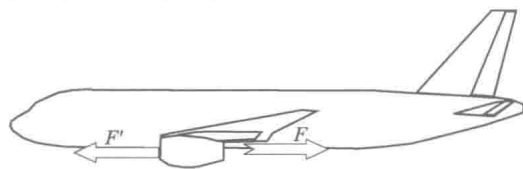


图 1-4 喷气发动机推力的产生



图 1-5 刚化公理

由此可见,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力学的基础上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

✈ 第三节 约束与约束力

如果一个物体不受任何限制,可以在空间自由运动(例如可在空中自由飞行的飞机),则此物体称为自由体;反之,如一个物体受到一定的限制,使其在空间沿某些方向的运动成为不可能(例如在跑道上滑行的飞机),则此物体称为非自由体。

如前所述,力是物体间的相互作用,因此,当人们用力学定律解决实际问题时,必须了解

有关物体之间的相互接触和联系方式,从而分析它们的受力情形。非自由体之所以不能在空间任意地运动,是由于它们总是以某种形式与周围其他物体相联系,使其在空间沿某些方向的运动受到周围这些物体的限制。在力学中,把这种事先对于物体的运动(位置和速度)所施加的限制条件称为约束。约束是以物体相互接触的方式构成的,构成约束的周围物体称为约束。例如,沿轨道行驶的车辆,轨道事先限制车辆的运动,它就是约束;摆动的单摆,绳子就是约束,它事先限制摆锤只能在不大于绳长的范围内运动,而通常是以绳长为半径的圆弧运动。

约束限制物体的自由运动,改变了物体的运动状态,因此约束必须承受物体的作用(力或力偶),同时给予物体以等值、反向的反作用(力或力偶),这种力称为约束反力,简称约束力。停在机坪上的飞机,对于飞机而言,机坪是约束,它阻止飞机向下的运动,因而,机坪给飞机的约束反力向上。约束反力取决于约束本身的性质、主动力和物体的运动状态。约束反力阻止物体运动的作用是通过约束与物体间相互接触来实现的,因此它的作用点应在相互接触处,约束反力的方向总是与约束体所能阻止的运动方向相反,这是我们确定约束反力方向的准则。至于它的大小,在静力学中将由平衡条件求出。

我们将工程中常见的约束理想化,归纳为几种基本类型,并根据各种约束的特性分别说明其反力的表示方法。

一、柔索

属于这类约束的有绳索、皮带、链条、钢索等。这类约束的特点是只能限制物体沿着柔索伸长的方向运动,它只能承受拉力,而不能承受压力和抗拒弯曲。所以柔索的约束反力只能是拉力,作用在连接点或假想截割处,方向沿着柔索的轴线而背离物体,一般用 F 或 F_T 表示,如图 1-6 所示。

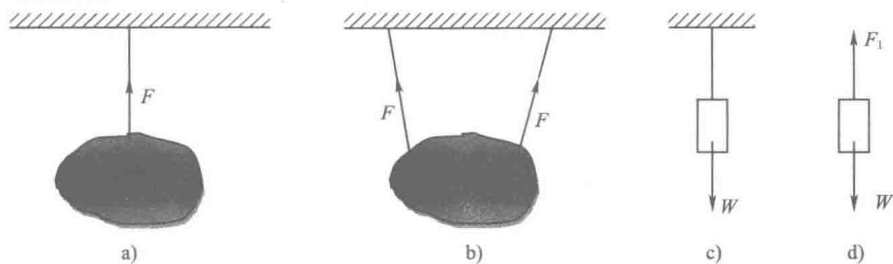


图 1-6 柔索约束

二、光滑接触面

对这类约束,我们忽略接触面间的摩擦,视为理想光滑。这类约束的特点是只能限制物体沿接触面的公法线进入约束,而不限制沿接触面在接触处的切线方向的滑动。所以光滑接触面的约束反力作用在接触处,方向沿着接触点处的公法线并指向被约束物体。光滑接触面的约束反力一般用 F_N 表示,如图 1-7 所示。

三、光滑圆柱铰链

圆柱形铰链是连接两个构件的圆柱形零件,通常称为销钉,又如机器上的轴承等。对这

类约束我们忽略摩擦以及圆柱销钉与构件上圆柱孔的余隙,如图 1-8a)和图 1-8b)所示,其计算简图如图 1-8c)所示。这类约束的特点是只能限制物体的任意径向移动,不能限制物体绕圆柱销钉轴线的转动,由于圆柱销钉与圆柱孔是光滑曲面接触,则约束反力应是沿接触线上的一点到圆柱销钉中心的连线且垂直于轴线,如图 1-8d)所示。因为接触线的位置不能预先确定,所以约束反力的方向也不能预先确定。光滑圆柱形铰链约束的反力只能是压力,在垂直于圆柱销钉轴线的平面内,通过圆柱销钉中心,方向不定。在进行计算时,为了方便,通常表示为沿坐标轴方向且作用于圆柱孔中心的两个分力 F_{Cx} 与 F_{Cy} ,如图 1-8e)所示。

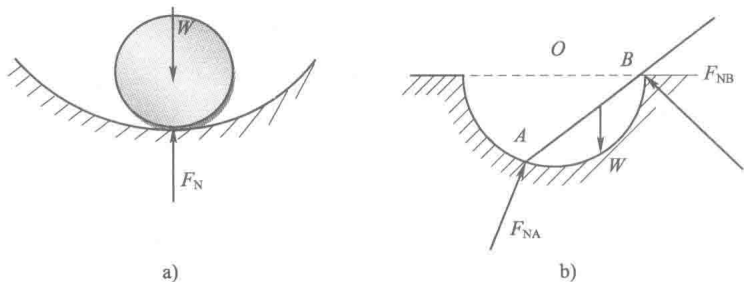


图 1-7 光滑接触面

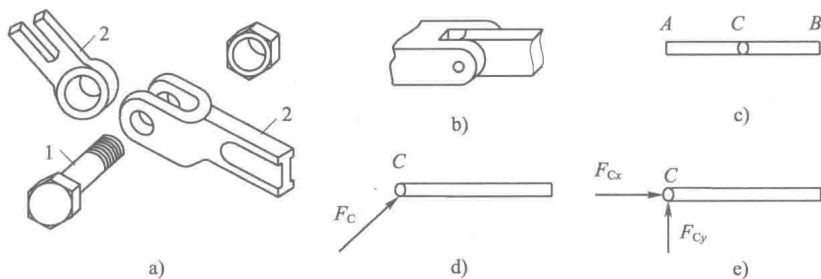


图 1-8 光滑圆柱铰接

1-销钉;2-构件

四、支座

支座是把构件支承在墙、柱、机身等固定支承物上面的装置,它的作用是把构件固定于支承物上,同时把所受的载荷通过支座传给支承物。

1. 固定铰支座

用光滑圆柱销钉把构件与底座连接,并把底座固定在支承物上而构成的支座称为固定铰支座,如图 1-9a)和图 1-9b)所示,计算时所用的简图如图 1-9c)~e)所示。这种支座约束的特点是物体只能绕铰链轴线转动而不能发生垂直于铰轴的任何移动,所以,固定铰支座的约束反力在垂直于圆柱销轴线的平面内,通过圆柱销中心,方向不定,通常表示为相互垂直的两个分力 F_{Ax} 与 F_{Ay} ,如图 1-9f)所示。

2. 可动铰支座(辊轴支座)

为了保证构件变形时既能发生微小的转动又能发生微小的移动,可将构件的支座用几个辊轴(滚柱)支承在光滑的支座面上,就成为辊轴支座,亦称为可动铰支座,如图 1-10a)所示,计算时所用的简图如图 1-10b)~d)所示。这种支座约束的特点是只能限制物体与圆柱

铰连接处沿垂直于支承面方向的运动,而不能阻止物体沿支承面切向的运动,所以可动铰支座的约束反力垂直于支承面,通过圆柱销中心,一般用 F_N 或 F 表示,如图 1-10e) 所示。

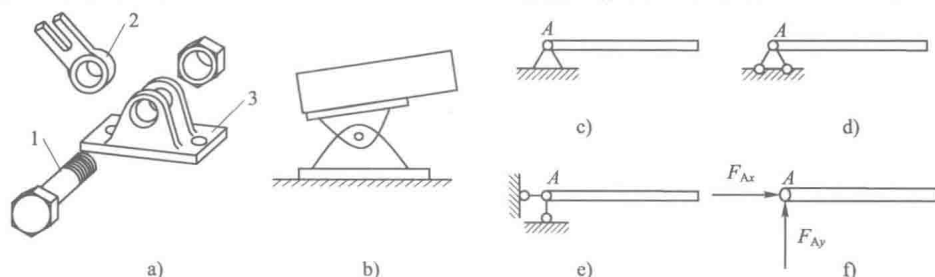


图 1-9 固定铰支座

1-销钉;2-被约束物体;3-固定部分

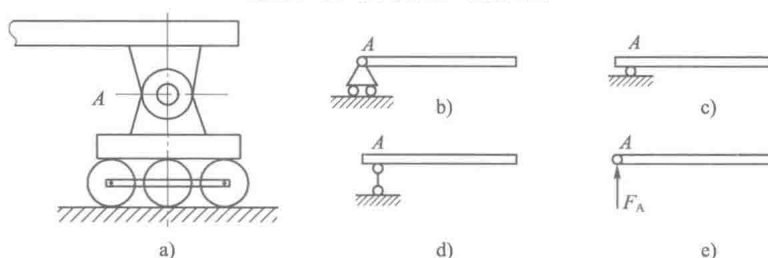


图 1-10 可动铰支座

五、链杆约束

两端用光滑铰链与其他构件连接且不考虑自重的刚杆称为链杆,常被用来作为拉杆或撑杆而形成链杆约束,如图 1-11a) 所示的 CD 杆。根据光滑铰链的特性,杆在铰链 C 、 D 处有两个约束力 F_C 和 F_D ,这两个约束反力必定分别通过铰链 C 、 D 的中心,方向暂不确定。考虑到杆 CD 只在 F_C 、 F_D 二力作用下平衡,根据二力平衡公理,这两个力必定沿同一直线,且等值、反向。由此可确定 F_C 和 F_D 的作用线应沿铰链中心 C 与 D 的连线,可能为拉力,如图 1-11b) 所示,也可能为压力,如图 1-11c) 所示。

由此可见,链杆为二力杆,链杆约束的反力沿链杆两端铰链的连线,指向不能预先确定,通常假设链杆受拉,如图 1-11b) 所示。图 1-2 所示桁架式起落架中的杆也是二力杆。

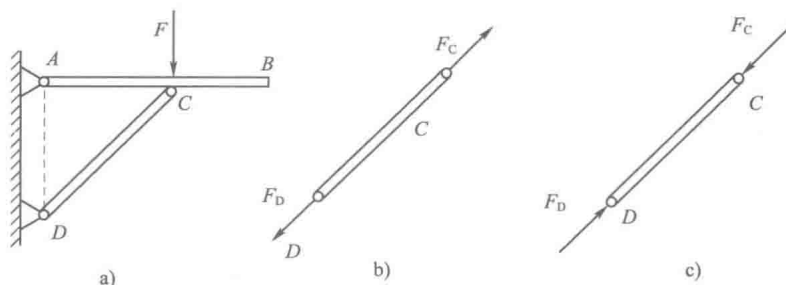


图 1-11 链杆

因此,固定铰支座也可以用两根不相平行的链杆来代替,而可动铰支座可用垂直于支承面的一根链杆来代替。