



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

主 编 余 斌

副主编 胡红玉 郭 磊

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

工 程 力 学

主 编	余 斌	
副主编	胡红玉	郭 磊
参 编	王路珍	蔡中兵
主 审	崔清洋	

机 械 工 业 出 版 社

前 言

本书是根据教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会编制的《理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》(试行)(2008年版)中《理论力学课程教学基本要求》(B类)中的静力学部分和《材料力学课程教学基本要求》(B类)中的基本部分编写而成的,内容精练,讲解详细,以适用、够用为度,适用于应用型本科材料、纺织、环境工程等专业中、少学时的工程力学课程的教学。

本书由静力学和材料力学两部分组成。

静力学部分包括静力学基础、平面力系、空间力系三章;材料力学部分包括轴向拉伸与压缩、剪切与挤压的实用计算、圆轴扭转时的强度和刚度计算、梁弯曲时的强度计算、梁弯曲时的刚度计算、组合变形时的强度计算、压杆的稳定问题七章。为了方便读者理解基本概念,每节之后都安排了少量的自测题,书后附有自测题参考答案。同时每章都附有习题,书后附有习题参考答案。

为了方便教师使用,本书配有用 Power Point 制作的课堂教学课件,可向机械工业出版社索取。

讲授全书约需 64 学时,其中理论课约 56 学时,实验课约 8 学时。为了方便 48 学时(理论课约 44 学时,实验课约 4 学时)工程力学课程的教学,只需去掉第 3 章和第 9 章中的第 4~7 节,选做约 4 学时的实验即可。

本书的编写和出版得到了盐城工学院教材出版基金的资助,机械工业出版社给予了大力的协助,在此表示诚挚的谢意。在编写过程中,编者查阅和参考了大量文献,谨向这些文献的作者表示衷心的感谢。在大纲制定和教材编写过程中,徐文宽、王永廉等老师给予了具体的指导和帮助,特此致谢。

本书由余斌编写绪论、第 2 篇引言、第 9 章、附录 B(其中实验 1 和实验 2 由程鲲鹏编写)和附录 C;胡红玉编写第 1 篇引言、第 1 章、第 2 章和第 3 章;郭磊编写第 7 章和第 8 章;王路珍编写第 6 章和第 10 章;蔡中兵编写第 4 章和第 5 章。全书由余斌统稿、担任主编,主审崔清洋教授认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见。

由于编者水平的限制,书中难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2010 年 12 月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第1篇 静 力 学

引言	2
自测题 1	2
第 1 章 静力学基础	3
1.1 静力学的基本概念	3
自测题 2	4
1.2 静力学的公理	4
自测题 3	6
1.3 约束与约束力	7
自测题 4	11
1.4 物体的受力分析和受力图	11
自测题 5	15
习题 1	16
第 2 章 平面力系	18
2.1 平面力的投影与分解	18
自测题 6	20
2.2 平面力对点之矩的概念和计算	20
自测题 7	23
2.3 平面力偶理论	24
自测题 8	26
2.4 平面力系的简化	27
自测题 9	31
2.5 平面任意力系的简化结果分析	31
自测题 10	34
2.6 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	35
自测题 11	41
2.7 物体系统的平衡 静定和静不定概念	42
自测题 12	45

习题 2	46
第 3 章 空间力系	50
3.1 空间力的投影与分解	50
自测题 13	51
3.2 力对点之矩和力对轴之矩	52
自测题 14	56
3.3 空间力系的平衡	56
自测题 15	61
3.4 重心	61
自测题 16	65
习题 3	66

第 2 篇 材料力学

引言	69
自测题 17	71
第 4 章 轴向拉伸与压缩	72
4.1 轴向拉伸与压缩的概念与实例	72
自测题 18	73
4.2 轴力和轴力图	73
自测题 19	76
4.3 轴向拉压杆横截面上的应力	76
自测题 20	82
4.4 轴向拉压杆的变形与胡克定律	82
自测题 21	86
4.5 材料在拉伸与压缩时的力学性能	87
自测题 22	92
4.6 轴向拉压杆的强度计算	93
自测题 23	97
习题 4	98
第 5 章 剪切与挤压的实用计算	101
5.1 剪切与挤压的概念与实例	101
自测题 24	102
5.2 剪切和挤压的实用计算	102
自测题 25	107
习题 5	107
第 6 章 圆轴扭转时的强度和刚度计算	109
6.1 圆轴扭转的概念和实例	109
自测题 26	109

6.2 外力偶矩的计算和扭矩	110
自测题 27	112
6.3 切应力互等定理与剪切胡克定律	113
自测题 28	114
6.4 圆轴扭转时横截面上的应力与强度计算	115
自测题 29	120
6.5 圆轴扭转变形与刚度计算	121
自测题 30	123
6.6 圆轴受扭破坏分析	123
自测题 31	125
习题 6	125
第 7 章 梁弯曲时的强度计算	128
7.1 梁弯曲的概念与计算简图	128
自测题 32	129
7.2 梁的内力与内力方程	129
自测题 33	133
7.3 梁的内力图-剪力图和弯矩图	133
自测题 34	137
7.4 截面的几何性质	138
自测题 35	144
7.5 梁平面弯曲时横截面上的正应力、正应力强度计算	144
自测题 36	151
7.6 梁平面弯曲时横截面上的切应力、切应力强度计算	151
自测题 37	154
7.7 提高梁强度的措施	154
自测题 38	158
习题 7	158
第 8 章 梁弯曲时的刚度计算	163
8.1 梁的变形与位移的概念	163
自测题 39	163
8.2 挠曲线近似微分方程	164
自测题 40	165
8.3 计算梁位移的积分法	165
自测题 41	170
8.4 计算梁位移的叠加法	170
自测题 42	174
8.5 梁的刚度计算	174
自测题 43	175

8.6 提高梁刚度的措施	175
自测题 44	176
习题 8	176
第 9 章 组合变形时的强度计算	177
9.1 组合变形的概念与实例	177
自测题 45	178
9.2 杆件承受拉(压)与弯曲组合变形时的强度计算	179
自测题 46	183
9.3 梁斜弯曲时的强度计算	183
自测题 47	188
9.4 平面应力状态应力分析	189
自测题 48	196
9.5 广义胡克定律	197
自测题 49	200
9.6 强度理论和相当应力	201
自测题 50	205
9.7 圆轴承受弯扭组合变形时的强度计算	206
自测题 51	208
习题 9	209
第 10 章 压杆的稳定问题	214
10.1 压杆稳定的概念	214
自测题 52	215
10.2 两端铰支细长压杆的临界力	215
自测题 53	217
10.3 其他支承细长压杆的临界力	217
自测题 54	218
10.4 欧拉公式的适用范围 临界应力总图	218
自测题 55	221
10.5 压杆稳定条件 压杆的合理设计	221
自测题 56	224
习题 10	224
附录	227
附录 A 型钢规格表	227
附录 B 实验指导	243
实验 1 拉伸实验	243
实验 2 压缩实验	246
实验 3 扭转实验	247
实验 4 梁纯弯曲正应力实验	249

实验 5 弯扭组合变形时主应力测量实验	251
附录 C 电测法简介	253
附录 D 自测题参考答案	256
附录 E 习题参考答案	267
参考文献	274

绪 论

工程力学是应用于工程实际的各门力学学科的总称，内容极其广泛。本书所指的工程力学仅由静力学和材料力学两部分内容组成。

工程力学是研究物体宏观运动规律及其应用的科学。工程给力学提出问题，而力学的研究成果又改进工程设计思想。随着现代科学技术的发展，力学的应用已渗透到许多学科领域。

静力学的研究对象为刚体。静力学是研究力的基本性质、力系的简化方法及力系平衡的理论，并用于对物体进行受力分析和计算，是工程力学的基础部分。

材料力学的研究对象为可变形固体。它研究构件在外力作用下的变形、受力与破坏的规律，为合理设计构件截面形状和尺寸，选择适当的材料提供有关强度、刚度与稳定性分析的基本理论和方法。

工程力学是一门技术基础课程。它所介绍的力学基本概念、基本理论和基本方法，既可以直接用于解决工程实际问题，又是学习后续课程的重要基础。因此，学好工程力学课程非常重要。

学习工程力学要着重掌握其科学的思维方法，培养发现问题、分析问题和解决问题的综合素质。在学习过程中，既要注意每部分在研究对象、内容和方法上的区别，又要注意后面部分对前面部分的理论和方法的应用，还要尽可能地联系工程和生活实际，在实际中发现力学问题，细心体会力学原理。

第1篇 静力学

引言

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学。

力系是指作用于物体上的一群力。

如果作用在物体上的两个力系对物体的作用效果相同，则这两个力系互为等效力系。

如果力系作用在物体上，物体仍保持平衡状态，则称这个力系为平衡力系。

在静力学中所说的物体是指刚体。刚体是理想化的力学模型，是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的物体。一般情况下物体受力后都会有变形，如果变形比较小，在研究平衡问题或运动规律时可以忽略，则可以把研究对象视为刚体。静力学中，研究的物体只限于刚体，故又称为刚体静力学，它也是研究材料力学的基础。

平衡是指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动状态。惯性参考系是指保持静止或匀速直线运动状态的参考系。平衡是运动的特殊情形。

在静力学这一篇中，将研究三个方面问题：

(1) 物体的受力分析：分析物体的受力情况，每个力的大小、方向和作用位置。

(2) 力系的简化：用一个简单力系等效地代替一个复杂的力系。

(3) 力系的平衡：研究作用在物体上的各种力系平衡时所需满足的平衡条件，并利用平衡条件解决静力学平衡问题。

自测题 1

自测题 1-1 静力学主要研究_____、_____和_____问题。

自测题 1-2 物体处于平衡状态一定是静止的。这一说法 ()。

(A) 正确； (B) 错误。

自测题 1-3 匀速运动的物体一定处于平衡状态。这一说法 ()。

(A) 正确； (B) 错误。

自测题 1-4 在任何情况下，其内任意两点距离保持不变的物体称为刚体。这一说法 ()。

(A) 正确； (B) 错误。

第1章 静力学基础

1.1 静力学的基本概念

力是物体间的相互机械作用。力对物体作用产生的效应可分为两个方面：一是物体机械运动状态的变化，称为力的运动效应；另一个是物体大小与形状的改变，称为力的变形效应。静力学研究力的运动效应。

力对物体的作用效应取决于力的三个要素：(1) 力的大小；(2) 力的方向；(3) 力的作用点。所以可用一个矢量来表示力的三个要素，如图 1-1 所示。按一定的比例尺画出的矢量长度 AB 表示力的大小；矢量的方向表示力的方向；矢量的始端点 A 表示力的作用点。矢量 $\overrightarrow{AB}$ 所沿的直线（图 1-1 上的虚线）表示力的作用线。我们常用黑斜体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量，而用普通字母 F 表示力的大小。若以 $\boldsymbol{F}^\circ$ 表示沿矢量 $\boldsymbol{F}$ 方向的单位矢量，如图 1-2 所示，则力矢量 $\boldsymbol{F}$ 可写成

$$\boldsymbol{F} = F\boldsymbol{F}^\circ$$

即力矢量可以用它的模（即力的大小）和单位矢量的乘积表示。

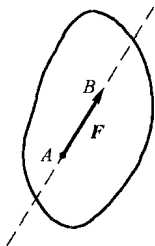


图 1-1 力的三要素



图 1-2 力矢量的表示

在国际单位制 (SI) 中，以 “N” 作为力的单位符号，称为牛 [顿]。有时也以 “kN” 作为力的单位符号，称为千牛 [顿]。

如果力系中各力的作用线都交于一点，则称此力系为汇交力系。

如果力系中各力的作用线都相互平行，则称此力系为平行力系。

如果力系中各力的作用线都在同一个平面内，则称此力系为平面力系，否则称为空间力系。

自测题 2

自测题 2-1 力的三要素是_____、_____和_____。

自测题 2-2 $F_1 = F_2$ 和 $F_1 = F_2$ 的区别是_____。

1.2 静力学的公理

公理是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。静力学中公理有五个。

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。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由以这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-3a 所示。就是说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

应用此公理求两共点力合力的大小和方向（即合力矢）时，可作力三角形来求解，可由任一点 O 起，依次画出力矢 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 为三角形的两个边，第三边 $\mathbf{F}_R$ 即代表合力矢，合力的作用点仍在点 A 。如图 1-3b、c 所示。

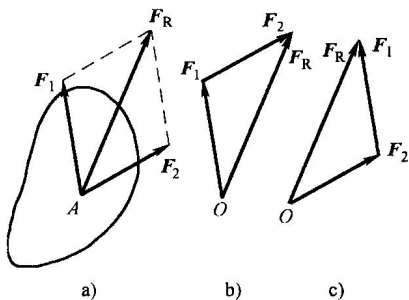


图 1-3 力的合成

这个公理表明了最简单力系的简化规律，它也是复杂力系简化的基础。

公理 2 二力平衡公理

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：这两个力的大小相等、方向相反，且在同一直线上，如图 1-4 所示，即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

这个公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。

工程上，将只受两个力作用而平衡的构件称为二力构件，简称二力杆。根据二力平衡公理，该两力必沿作用点的连线。

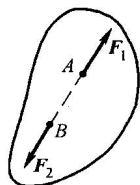


图 1-4 二力平衡条件

公理 3 加减平衡力系公理

在已知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，如图 1-5 所示。这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

根据上述公理可以导出下列两个推论。

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线滑移到刚体内该力作用线上任

意一点，并不改变该力对刚体的作用效应。

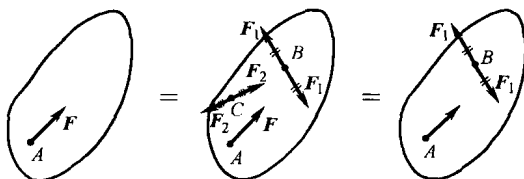


图 1-5 加减平衡力系公理

证明：设有力 F 作用在刚体上的点 A ，如图 1-6a 所示。根据加减平衡力系原理，可在力的作用线上任取一点 B ，并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F_2 = -F_1 = F$ ，如图 1-6b 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系，故可同时去除，这样只剩下一个力 F_2 ，如图 1-6c 所示。于是，原来的这个力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 均等效，即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

由此可见，对于刚体来说，力的作用线是决定力的作用效应的要素。因此，作用于刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动，这种矢量称为滑动矢量。

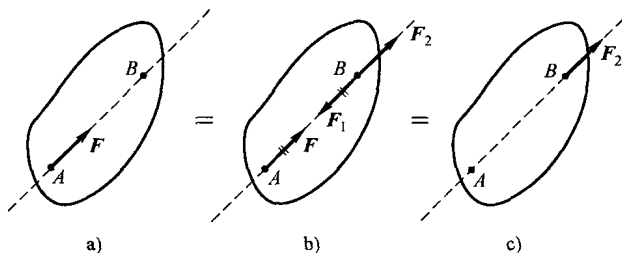


图 1-6 力的可传性

推论 2 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，则这三个力必在同一平面内，且第三个力的作用线通过汇交点。

如图 1-7 所示，在刚体的 A 、 B 、 C 三点上，分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 滑移到汇交点 O ，然后根据力的平行四边形规则，得合力 F_{12} ，则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线，所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。

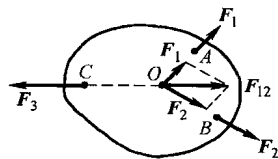


图 1-7 三力平衡汇交

公理 4 作用和反作用定律

作用力和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，分别作用在两个相互作用的物体上。

这个公理概括了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。

如图 1-8a 所示,放置在桌面上的重物,受重力 W 和桌面的支撑力 F_N 的作用(图 1-8b)。重力 W 是地球对重物的吸引力,作用在重物上;同时,重物对地球也有一个吸引力 W' 作用在地球上,这两个力是作用力和反作用力,两者等值、反向、共线,即 $W = -W'$ 。此外,重物对桌面也作用压力 F'_N ,其中力 F_N 与 F'_N 是作用力与反作用力关系,即 $F_N = -F'_N$ 。作用力和反作用力用同一字母表示,但其中之一在字母的上方加一“'”。

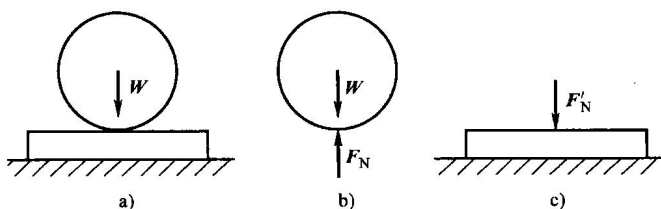


图 1-8 作用力和反作用力

注意,作用力与反作用力不是一对平衡力,因为作用力与反作用力分别作用在两个不同的物体上。

公理 5 刚化公理

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

如图 1-9 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。反之则不一定成立。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。

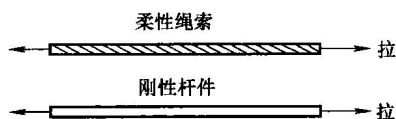


图 1-9 刚化公理

静力学的全部理论都建立在上述五个公理上。

自测题 3

自测题 3-1 $F_R = F_1 + F_2$ 和 $F_R = F_1 + F_2$ 的区别是_____。

自测题 3-2 在下列公理、法则、定律中,只适用于刚体的是()。

- (A) 力的平行四边形法则; (B) 加减平衡力系公理;
(C) 力的可传性; (D) 作用力与反作用力定律。

自测题 3-3 若刚体上作用的三个力其作用线在同一个平面内,且作用线交于一点,则此三个力一定处于平衡状态。这一说法()。

(A) 正确; (B) 错误。

自测题 3-4 两点受力的构件都是二力杆。这一说法 ()。

(A) 正确; (B) 错误。

自测题 3-5 如自测题 3-5 图所示的两个三角形中的三个力关系是一样的。这一说法 ()。

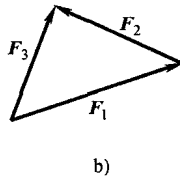
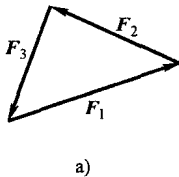
(A) 正确; (B) 错误。

自测题 3-6 物体在两个力的作用下保持平衡的必要与充分条件是: 这两个力等值、反向、共线。这一说法 ()。

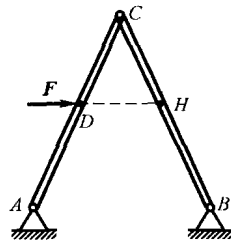
(A) 正确; (B) 错误。

自测题 3-7 如自测题 3-7 图所示, AC 和 BC 为刚杆, 根据力的可传性, 力可以由 D 点沿其作用线滑移到 H 点。这一说法 ()。

(A) 正确; (B) 错误。



自测题 3-5 图



自测题 3-7 图

1.3 约束与约束力

断线的风筝在空间的位移不受任何限制。位移不受限制的物体称为自由体。而牵线的风筝, 沿绳索方向向外的位移受到限制。位移受到限制的物体称为非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。例如, 绳索对于风筝、铁轨对于机车、轴承对于电机转子等, 都是约束。

约束阻碍了物体的位移, 是由于在限制的位移方向上产生了阻碍其运动的力, 这种力称为约束反力, 简称反力。因此, 约束反力的方向必与该约束所能够阻碍的位移的方向相反。应用这个准则, 可以确定约束反力的方向或作用线的位置。约束反力的大小则是未知的, 可用平衡条件求出未知的约束反力。

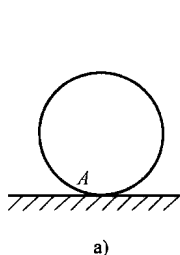
下面介绍几种在工程中常遇到的简单的约束类型和确定约束反力的方法。

1.3.1 具有光滑接触表面的约束

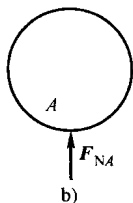
例如, 重物放置在光滑的固定支承面上 (图 1-10a)、啮合齿轮的齿面 (图 1-11a)、机床中的导轨接触面等, 当摩擦忽略不计时, 都属于这类约束。

这类约束不能限制物体沿约束表面切线的位移, 只能约束物体沿接触表面法

线并向约束内部的位移。因此,光滑支撑面对物体的约束反力作用在接触点处,方向沿接触表面的公法线,并指向受力物体。这种约束反力称为法向反力,通常用 F_N 表示,如图 1-10b 中的 F_{NA} 和图 1-11b 中的 F_{NB} 等。

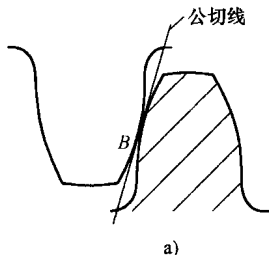


a)

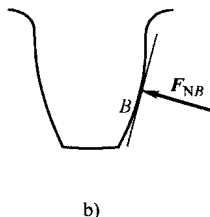


b)

图 1-10 固定接触表面约束



a)



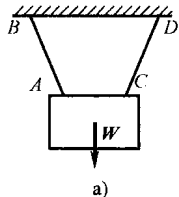
b)

图 1-11 齿轮接触表面约束

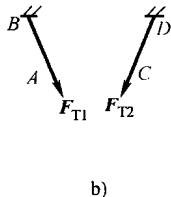
1.3.2 由柔软的绳索、链条或胶带等构成的约束

细绳吊住重物,如图 1-12a 所示。由于柔软的绳索本身只能承受拉力(图 1-12b),所以它给物体的约束反力也只能是拉力(图 1-12c)。绳索对物体的约束反力作用在接触点,方向沿着绳索背离物体。通常用 F 或 F_T 表示这类约束反力。

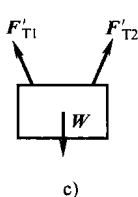
链条或胶带也都只能承受拉力。当它们绕在轮子上时,对轮子的约束反力沿轮缘的切线方向(图 1-13)。



a)



b)



c)

图 1-12 绳索约束

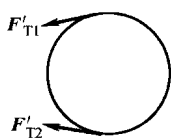
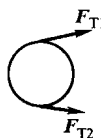


图 1-13 胶带约束

1.3.3 光滑铰链约束

光滑铰链约束有向心轴承、圆柱铰链和固定铰链支座等。

(1) 向心轴承(径向轴承)

图 1-14a 所示为轴承装置,简图如图 1-14b 所示。轴可在轴承孔内任意转动,也可沿轴承孔的中心线移动。但是,轴承阻碍轴沿径向向外的位移。忽略摩擦,当轴和轴承在某点 A 光滑接触时,轴承对轴的约束反力 F_A 作用在接触点 A,且沿公法线方向指向轴心,其受力如图 1-14b 所示。

但是,随着轴所受的主动力的不同,轴和孔的接触点位置也随之不同。所以,当主动力尚未确定时,约束反力的方向并不能确定。然而,无论约束反力朝向何方,它的作用线必垂直于轴线并通过轴心。因此,约束反力 F_A 通常可用通过轴心的两个大小未知的正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示,如图 1-14c 所示, F_{Ax} 、 F_{Ay} 的指向可任意假定。

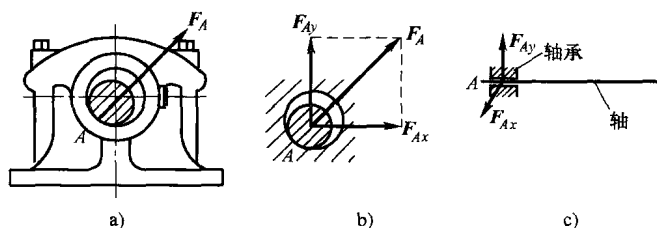


图 1-14 径向轴承约束

(2) 圆柱铰链和固定铰链支座

图 1-15a 所示的拱形结构由两个拱形构件通过圆柱铰链 C 以及固定铰链支座 A 和 B 连接而成。圆柱铰链简称铰链，构件 I 和构件 II 上有同样大小的孔，两个构件由销钉 C 连接在一起（图 1-15c），其简图如图 1-15a 所示的铰链 C 。如果铰链连接中有一个构件固定在地面或机架上作为支座，则这种约束称为固定铰链支座，简称固定铰支座，如图 1-15c 中所示的支座 B 。其简图如图 1-15a 所示的固定铰链支座 A 和 B 。

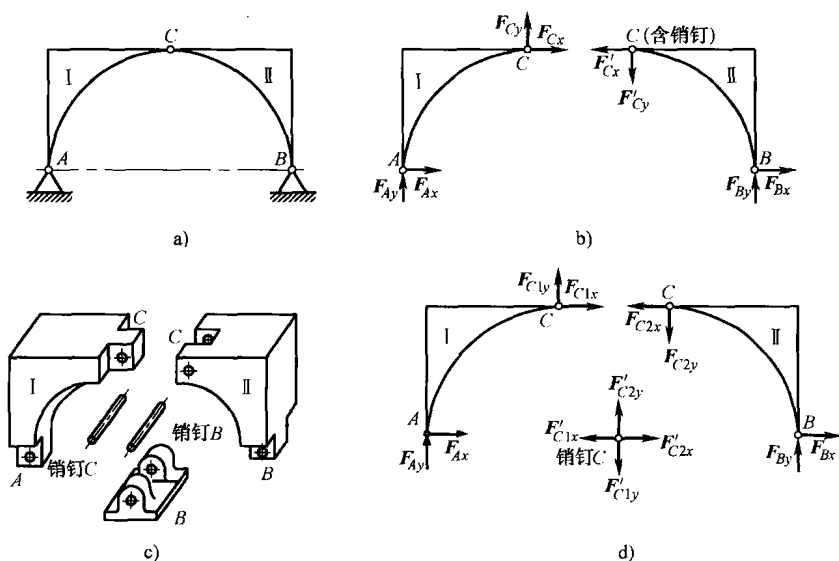


图 1-15 圆柱铰链约束

在分析铰链 C 处的约束反力时，可以把销钉 C 固连在其中任意一个构件上，也可单独研究。如把销钉 C 固连到构件 II 上，则构件 I、II（含销钉 C ）互为约束。显然，当忽略摩擦时，构件 II（含销钉 C ）上的销钉与构件 I 的结合实际上是轴与光滑孔的配合问题。因此，它与轴承具有同样的约束性质，即约束反