

SPT 21世纪高等院校教材

理工类

# 工程力学

王振发 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

21 世纪高等院校教材(理工类)

# 工 程 力 学

王振发 主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书系作者根据多年的教学实践,本着既要缩短学时,又要培养出适应时代要求,放眼于未来的高素质人才的精神,精心编写而成的。

全书分静力学和材料力学两大篇,共十六章,主要包括平面和空间物体系统的平衡、考虑摩擦时的平衡、轴向拉伸与压缩、平面弯曲的强度和变形、应力状态和强度理论、组合变形时的强度计算几个方面的内容。

本书可作为高等院校理工科类非机械专业本科(及专科、成教)30~80学时工程力学课程教材,也可作为工程技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学/王振发主编. —北京:科学出版社,2003.2

ISBN 7-03-008768-2

I.工… II.王… III.工程力学-高等学校-教材 IV.TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009079 号

责任编辑:鄢德平/责任校对:钟 洋

责任印制:安春生/封面设计:槐寿明

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

德海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2003年2月第一次印刷 印张:25 1/2

印数:1—7 000 字数:467 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

## 前 言

本书是作者根据多年的教学实践,本着既要缩短学时,又要培养出适应时代要求,放眼于未来的高素质人才的精神,在广泛征求了全国众多高等院校建议的基础上,参考国家教委颁发的“理论力学课程教学基本要求”和“材料力学课程教学基本要求”,精心编写而成的。

在编写过程中,力求语言精炼严谨,内容繁简得当,深广度适宜,通用性强.为避免与先行课大学物理学内容的重复,较大幅度地提高了起点,并注意了与后续课程的有机衔接。

全书分静力学和材料力学两大篇,共十六章,其中静力学篇七章,28节;材料力学篇九章,50节.重点讲述了平面和空间物体系统的平衡、考虑摩擦时的平衡、轴向拉伸与压缩、平面弯曲的强度和变形、应力状态和强度理论、组合变形时的强度计算几方面主要内容。

考虑到全国各类院校各类专业对力学知识的需要和培养目标的的不同,在保证力学系统的完整性和章节的独立性的前提下,作者做了细致的编排,使得不论教学时数多少,均可选用有关章节进行组合,方便了教师的授课,也方便了学生的自学。

本书编入了大量有关基本概念、分析运算方法和工程实际应用的例题和习题,书末附有全部习题答案.每章习题的排序与讲授内容排序一一对应,由易至难,由简单到复杂.同时也引入了一定数量的较难题目,供师生选用。

本书采用国家法定计量单位,对量、单位和符号均执行国家标准的一系列规定。

本书由王振发担任主编;张进国、原方、刘福胜、杨茂荣、王远任副主编;刘军、魏高峰、王亮任编委.全书由王振发定稿执笔。

本书承蒙山东大学张方春教授和孙树勋教授主审,在此致深深的谢意。

限于作者水平,书中难免有不妥之处,诚望广大师生和读者指正,不胜感激。

作 者

2002年6月

# 目 录

## 第一篇 静 力 学

<b>第一章 静力学的基本概念·公理·受力图</b> .....	2
§ 1-1 力·刚体 .....	2
§ 1-2 静力学公理 .....	3
§ 1-3 约束与约束反力 .....	5
§ 1-4 物体的受力分析·受力图 .....	10
习题 .....	15
<b>第二章 平面汇交力系</b> .....	20
§ 2-1 平面汇交力系合成的几何法和平衡的几何条件 .....	20
§ 2-2 平面汇交力系合成的解析法和平衡的解析条件 .....	22
习题 .....	24
<b>第三章 力对点的矩·平面力偶系</b> .....	28
§ 3-1 力对点的矩 .....	28
§ 3-2 力偶与力偶矩 .....	28
§ 3-3 力偶的性质 .....	29
§ 3-4 平面力偶系的合成和平衡条件 .....	31
习题 .....	33
<b>第四章 平面一般力系</b> .....	37
§ 4-1 平面一般力系向其作用面内一点的简化 .....	37
§ 4-2 平面一般力系简化结果的分析 .....	41
§ 4-3 平面一般力系的平衡条件和平衡方程 .....	44
§ 4-4 平面平行力系 .....	49
§ 4-5 静定与静不定问题的概念 .....	51
§ 4-6 物体系统的平衡 .....	51
§ 4-7 平面简单桁架 .....	58
习题 .....	62

<b>第五章 摩擦</b> .....	75
§ 5-1 滑动摩擦 .....	75
§ 5-2 摩擦角和自锁现象 .....	77
§ 5-3 考虑摩擦时的平衡问题 .....	80
§ 5-4 滚动摩阻的概念 .....	89
习题 .....	93
<b>第六章 空间力系</b> .....	105
§ 6-1 空间汇交力系 .....	105
§ 6-2 空间力偶系 .....	107
§ 6-3 力对点的矩与力对轴的矩的关系 .....	112
§ 6-4 空间一般力系向一点的简化 .....	114
§ 6-5 空间一般力系简化结果的分析 .....	116
§ 6-6 空间一般力系的平衡条件和平衡方程 .....	119
习题 .....	128
<b>第七章 重心</b> .....	140
习题 .....	148

## 第二篇 材料力学

<b>第八章 材料力学的基本概念</b> .....	153
§ 8-1 变形固体及其基本假设 .....	153
§ 8-2 杆件及其变形的基本形式 .....	154
<b>第九章 拉伸与压缩</b> .....	156
§ 9-1 轴力 .....	156
§ 9-2 轴向拉伸与压缩时横截面上的应力 .....	160
§ 9-3 许用应力·强度条件 .....	163
§ 9-4 轴向拉伸与压缩时斜截面上的应力 .....	166
§ 9-5 轴向拉伸与压缩时的变形·胡克定律 .....	167
§ 9-6 材料在拉伸时的力学性质 .....	172
§ 9-7 材料在压缩时的力学性质 .....	179
§ 9-8 应力集中的概念 .....	180
§ 9-9 安全系数和许用应力的确定 .....	181
§ 9-10 简单拉压静不定问题 .....	182
习题 .....	187
<b>第十章 剪切</b> .....	198

§ 10-1 剪切的实用计算	199
§ 10-2 挤压和挤压的实用计算	200
§ 10-3 实例	201
习题	206
<b>第十一章 扭转</b>	<b>211</b>
§ 11-1 外力偶矩的计算	211
§ 11-2 扭矩和扭矩图	212
§ 11-3 圆轴扭转应力	214
§ 11-4 圆轴扭转变形	217
§ 11-5 极惯性矩与抗扭截面系数	218
§ 11-6 扭转强度和刚度条件	219
习题	222
<b>第十二章 弯曲强度</b>	<b>227</b>
§ 12-1 梁的基本形式	227
§ 12-2 剪力和弯矩	228
§ 12-3 剪力图和弯矩图	232
§ 12-4 载荷 剪力和弯矩间的关系	236
§ 12-5 弯曲正应力	239
§ 12-6 惯性矩与抗弯截面系数	244
§ 12-7 弯曲剪应力	248
§ 12-8 弯曲强度条件	251
§ 12-9 合理截面与等强度梁概念	257
习题	259
<b>第十三章 弯曲变形</b>	<b>270</b>
§ 13-1 挠曲线近似微分方程	270
§ 13-2 积分法求梁的变形	272
§ 13-3 叠加法求梁的变形	277
§ 13-4 弯曲刚度条件	281
§ 13-5 简单静不定梁的解法	282
习题	285
<b>第十四章 应力状态及强度理论</b>	<b>291</b>
§ 14-1 一点处的应力状态	291
§ 14-2 二向应力状态实例——薄壁容器的应力	293
§ 14-3 二向应力状态分析	295

§ 14-4 二向应力状态分析的图解法——应力圆	302
§ 14-5 三向应力状态的最大应力	309
§ 14-6 广义胡克定律	312
§ 14-7 复杂应力状态下的能密度	314
§ 14-8 强度理论	316
§ 14-9 强度理论的应用	320
习题	326
<b>第十五章 组合变形的强度计算</b>	<b>333</b>
§ 15-1 弯曲与拉伸或压缩的组合	333
§ 15-2 弯曲与扭转的组合	338
习题	344
<b>第十六章 压杆稳定性</b>	<b>351</b>
§ 16-1 细长压杆的临界压力	352
§ 16-2 临界应力和临界应力总图	355
§ 16-3 压杆稳定计算	357
§ 16-4 提高压杆稳定性的措施	360
习题	361
<b>习题答案</b>	<b>365</b>
<b>参考文献</b>	<b>381</b>
<b>附录</b>	<b>382</b>
I 型钢表	382
II 常用材料的力学性质表	397



# 第一篇 静力学

静力学主要研究两个问题：

## 一、力系的简化

所谓力系是指作用于同一物体(或同一物体系统)上的一群力.若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它对物体的效应,那么这两个力系互称为**等效力系**.如果一个力与一个力系等效,那么这个力称为该力系的**合力**,原力系的各力称为合力的**分力**.将一个复杂的力系用一个简单的等效力系来代替的过程,称为**力系的简化**或**力系的合成**.通过力系的简化可以使我们研究的复杂的力学问题大为简化.

## 二、力系的平衡条件

平衡是相对的,是运动的特殊形式.在工程上,物体相对于地球静止或作匀速直线运动的状态,称为**平衡**.如果物体在某力系的作用下处于平衡状态,则该力系称为**平衡力系**.力系平衡所需满足的条件称为**平衡条件**.根据平衡条件可以求解物体的平衡问题.

静力学研究的物体都是处于平衡状态的.

# 第一章 静力学的基本概念·公理·受力图

## § 1-1 力·刚体

### 一、力

力是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的运动状态发生变化和使物体变形.前者称为力对物体的外效应,后者称为力对物体的内效应.理论力学研究的是外效应,而材料力学研究的是内效应.

力对物体的效应决定于三个要素:(1)力的大小;(2)力的方向;(3)力的作用点.作用于物体上的力的大小、方向、作用点不同,则产生的效应不同.

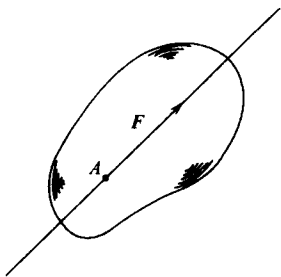


图 1-1

力是矢量,其三要素可用一有方向的线段来表示,如图 1-1 所示,线段的长度(按一定的比例)表示力的大小;线段的方位及箭头的指向表示力的方向,线段的始点(或终点)表示力的作用点;通过力的作用点沿力的方位的直线,称为力的作用线.本书理论力学部分用黑体字母(如  $\mathbf{F}$ )表示力矢量,手写时写成  $\vec{F}$  字样,而以白体字母(如  $F$ )表示力的大小;材料力学部分一律用白体表示.其他矢量同样表示.

力的法定计量单位是牛(顿),符号为 N;或千牛(顿),符号为 kN.

### 二、刚体

所谓刚体是指在力的作用下不变形的物体.事实上,物体受力作用时总是要变形的,若变形量很小,在研究物体的平衡和运动问题时是次要因素,就可以忽略不计,把它抽象简化为理想的模型——刚体.理论力学所研究的物体都视为刚体.静力学又称为刚体静力学.

但是,当变形是所研究问题的主要因素时,就不能将物体再视为刚体,而是把物体视为另一种理想模型——变形体了.这在材料力学章节中再作介绍.

## § 1-2 静力学公理

静力学的理论是建立在以下几个公理的基础上的。

### 公理一 二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力使刚体处于平衡状态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。

应当指出，这个公理只适用于刚体。对于非刚体来说，条件只是必要的，而不是充分的。例如一绳索两端受两个等值反向共线的力的作用时，若两力为拉力，绳索可以平衡；若两力为压力，则不能平衡。

受两个力的作用而处于平衡状态的构件称为二力构件，如图 1-2 所示。如果构件是杆件，又称为二力杆件。由二力平衡公理可知，这两个力必定沿两作用点的连线。

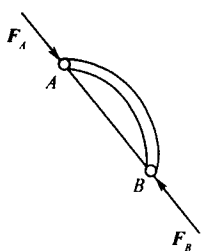


图 1-2

### 公理二 加减平衡力系公理

在力系中加上或减去任一平衡力系，并不改变原力系对刚体的效应。

这是因为平衡力系对刚体的平衡或运动状态的改变没有任何影响。这个公理对力系的简化起重要的作用。

### 推论 力的可传性原理

作用于刚体上的力可沿其作用线移到刚体上的任一点，而不改变它对刚体的效应。

证明 设力  $F$  作用于刚体上的  $A$  点，如图 1-3(a) 所示，今在力的作用线的任一点  $B$  上加一平衡力系  $F_1$ 、 $F_2$ ，使  $F_1 = -F_2 = F$ ，如图 1-3(b) 所示。由加减平衡力系原理可知，这并不改变力  $F$  对刚体的效应。不难看出  $F$ 、 $F_2$  也是一个平衡力系，故可减去。于是就只剩下  $F_1$  一个力，如图 1-3(c) 所示。这就证明了力  $F$  沿其作用线由  $A$  点移到任一点  $B$ ，而不改变它对刚体的效应。

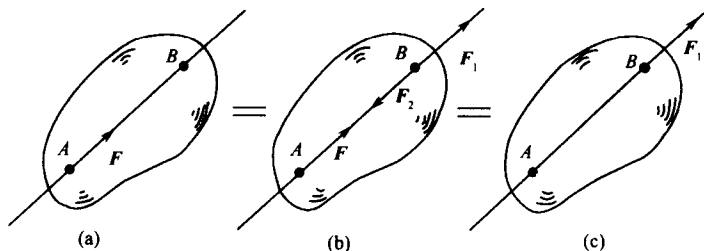


图 1-3

应当指出,加减平衡力系公理和力的可传性原理只适用于刚体.对于非刚体来说,加减平衡力系或将力作任何移动,都会改变力对物体的变形效应.

根据力的可传性原理,对于刚体而言,力的三要素可改为大小、方向和作用线.这样,力可以从它的作用线上的任何一点画出.可见,作用于刚体上的力是滑动矢量.

### 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一个合力,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 1-4(a)所示.用矢量表示为

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

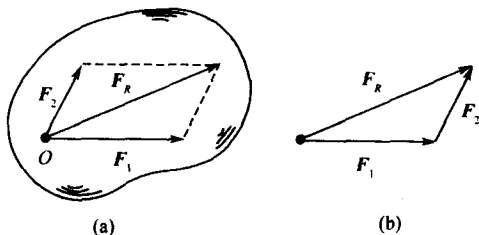


图 1-4

当然也可用力三角形法求合力,如图 1-4(b)所示.

这个公理是力系简化的重要基础.

### 推论 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个互不平行的平衡力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力的作用线必在同一平面内,且汇交于该点.

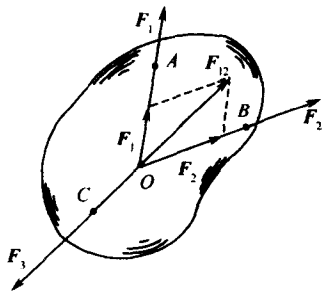


图 1-5

**证明** 设在刚体  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点分别作用三个互不平行的平衡力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  如图 1-5 所示. 根据力的可传性原理,将力  $F_1$  和  $F_2$  移到汇交点  $O$ ,并应用力的平行四边形法则求得合力  $F_{12}$ . 力  $F_{12}$  与力  $F_3$  仍应平衡,则由二力平衡公理知,二力必共线. 这就证明了三力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  必共面且汇交于一点.

此定理的逆定理不成立.

### 公理四 作用与反作用定律

两物体间的作用力和反作用力总是同

时存在,大小相等,方向相反,作用线相同,分别作用在这两个物体上.

#### 公理五 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,其平衡状态保持不变.

这个公理提供了把变形体可看作为刚体的条件.应该指出,刚体的平衡条件对于变形体来说,只是必要条件,而不是充分条件,例如图 1-6 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化为刚杆,其平衡状态保持不变;若绳索受的是两个等值、反向、共线的压力作用,则绳索不能处于平衡状态,这时绳索就不能刚化为刚杆.

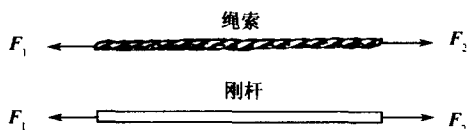


图 1-6

刚化原理扩大了刚体静力学的应用范围.

### § 1-3 约束与约束反力

位移不受任何限制,在空间可以自由运动的物体称为**自由体**,如空中的飞机,自由下落中的物体等.有些物体,它们的位移受到某些限制,如用绳子悬吊的重物,受绳子的限制而不能下落;光滑桌面上的物体,受桌面的限制而不能向下运动;电机转子受轴承的限制只能绕轴线转动,而不能沿径向运动等,这些物体称为**非自由体**.对非自由体的某些位移起限制作用的物体称为**约束**,如上述的绳子、桌面、轴承分别是重物、物体、转子的约束.

若被约束物体沿着约束所能限制的运动方向有运动趋势时,约束就以一定的力作用在被约束物体上阻碍这种可能的运动,这个力称为**约束反力**,简称**反力**.约束反力的大小和方向取决于物体所受的其他力(如重力、电磁力、风压力、水压力等,统称为主动力)的作用情况和约束的形式.约束反力的方向总是与约束所能阻碍的运动方向相反.约束反力的作用点就是物体上与约束相接触的那一点.

下面介绍几种工程上常见的约束类型,并进行约束反力的分析.

### 一、柔性体约束

属于这类约束的有绳索、链条、胶带等。如图 1-7(a)所示,由于绳索本身只能承受拉力,因此它只限制重物沿绳索伸长方向运动。故绳索对重物的约束反力是拉力,作用在连接点,方向沿绳索背向重物,如图 1-7(b)中  $F_A$  所示。

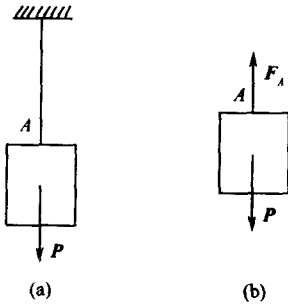


图 1-7

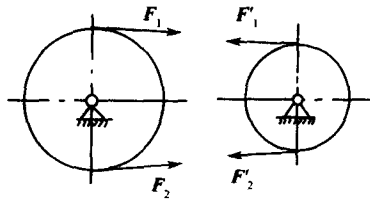


图 1-8

同样,绕过轮子的皮带和链条,约束反力是沿轮缘切线方向的拉力,如图 1-8 所示。

### 二、光滑面约束

如图 1-9(a)、(b)所示的支持物体的固定面,图 1-10 所示的啮合齿轮的背面等,若物体与约束接触面间的摩擦力很小,可以忽略不计时,这样的约束就看作是光滑面约束。这类约束只能限制物体沿接触面在接触点处的公法线朝向约束运动,所以光滑面约束的约束反力是压力,作用在接触点处,方向沿接触面的公法线指向被约束物体,如图 1-9(a)、(b)和图 1-10 中的  $F_{NA}$ 、 $F_{NB}$  和  $F_{ND}$ ,这种约束反力也称为法向反力。

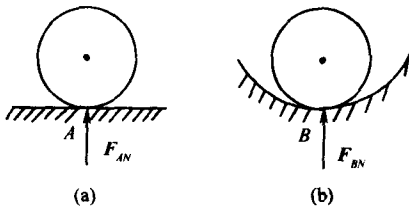


图 1-9

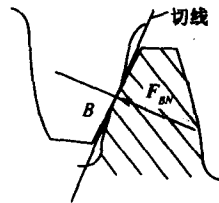


图 1-10

### 三、光滑铰链约束

#### 1. 圆柱铰链(中间铰)

如图 1-11(a)所示,它是将销钉插入两构件的圆孔,把两构件连接起来而成,销钉和圆孔是光滑的.销钉限制两构件在垂直于销钉轴线平面内的相对移动,但不能限制它们绕销钉轴线的相对转动,这种约束称为圆柱铰链,简称铰链,其简图如图 1-11(d)所示.

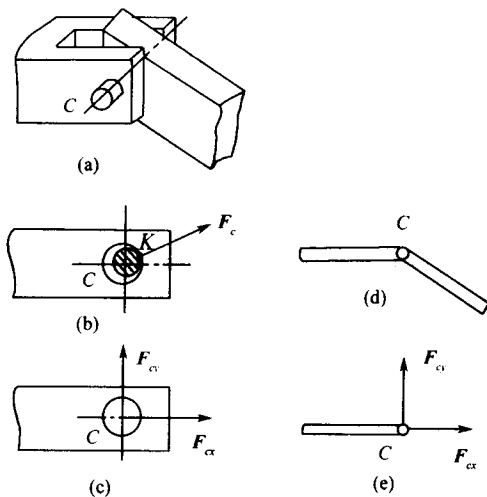


图 1-11

销钉与构件是以两光滑圆柱面相接触的,如图 1-11(b)所示,因此销钉给构件的约束反力是作用在接触点  $K$  处,方向沿接触面的公法线,即通过圆孔中心  $C$ ,指向构件,见图中  $F_c$ .由于接触点的位置一般不能预先确定,所以约束反力的方向也不能预先确定.通常用过圆孔中心的两个正交分力来表示,如图 1-11(c)中的  $F_{cx}$ 、 $F_{cy}$ .两分力的方位和指向可任意假设,假设与实际是否一致,由计算结果来判定.图 1-11(e)是约束反力的简化表示法.

#### 2. 固定铰链约束

上述圆柱铰链的两个构件中,有一个是被固定不动的,则这种约束就称为固定铰链约束,又称固定铰链支座,如图 1-12(a)所示,图 1-12(b)为其简图,图 1-12(c)是其约束反力的简化表示法.

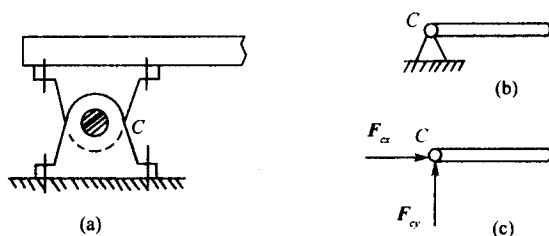


图 1-12

### 3. 活动铰链约束

上述固定铰链约束若不是被固定不动,而是在支座与支承面间装一排辊轴,则这种约束就称为活动铰链约束,又称活动铰链支座或辊轴支座,如图 1-13(a)所示,图 1-13(b)为其简图.约束反力的方向只能是垂直于支承面,并通过圆孔中心,根据约束的方向不同,或向上指或向下指.图 1-13(c)是其约束反力的简化表示法.

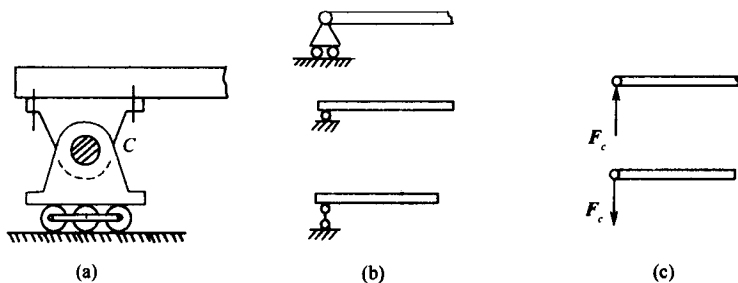


图 1-13

### 4. 向心轴承(径向轴承)

图 1-14(a)为向心滑动轴承,图 1-14(b)为向心滚动轴承.其中轴承是约束,轴是被约束物体.其约束反力的特征与铰链相同.因约束反力的方向不能预先确定,所以同样用两个正交分力来表示;图 1-14(c)是其约束反力的另外两种简化表示法.



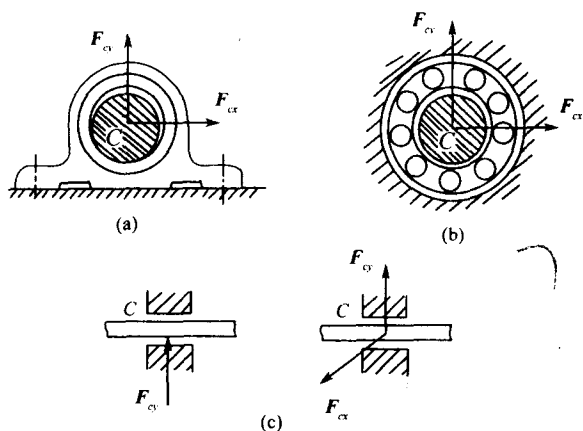


图 1-14

## 5. 球形铰链约束

球形铰链约束是将一构件上的圆球装在另一固定的球窝中而构成的约束,如图 1-15(a)所示,球与球窝的接触是光滑的.球形铰链不能限制构件作任何转动,但能限制构件沿空间任何方向的移动.仿照圆柱铰链的分析可知球窝对球的约束反力  $F_c$  必过接触点  $K$  和球心  $C$ ,指向球,但方向不能预先确定,因此用三个过球心的正交分力  $F_{cx}$ 、 $F_{cy}$ 、 $F_{cz}$  来表示.图 1-15(b)为球铰链简图,图 1-15(c)是其约束反力的简化表示法.

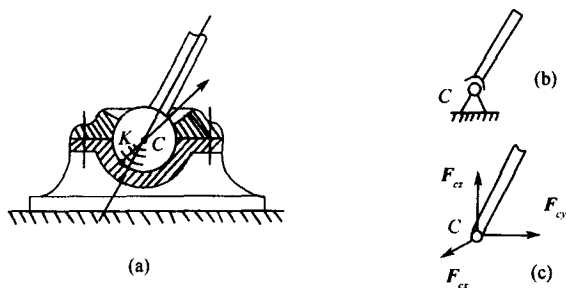


图 1-15

工程上常见的向心推力轴承(径向止推轴承)就可归为球形铰链约束,如图 1-16(a)所示,图 1-16(b)为其简图,图 1-16(c)为其约束反力的简化表示法.