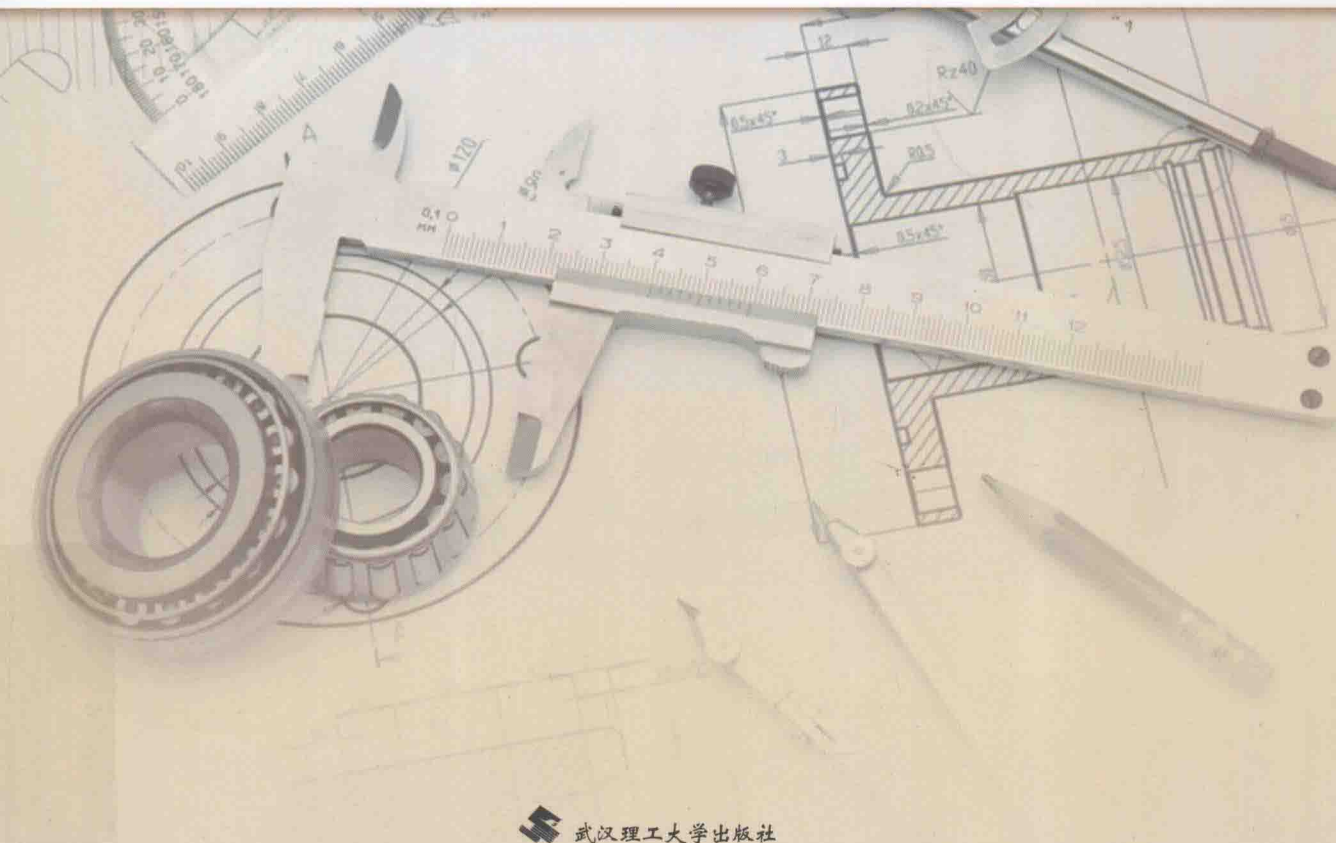


安徽省“十二五”规划教材

# 工程力学

GONGCHENG LIXUE

经来旺 刘丹丹 主编



武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press

安徽省“十二五”规划教材

# 工程力学

主 编 经来旺 刘丹丹  
副主编 刘文震 江向阳 董春亮  
崔智丽 冯彧雷

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

## 内 容 提 要

本书是安徽省“十二五”规划教材,读者对象主要包括工程管理专业、土木工程专业、非机械类制造类专业、工程地质专业、材料类专业、安全工程专业、资源与环境专业等的本科学学生。

全书共分为 13 章,第 1 章为静力学部分,第 2~11 章为材料力学部分,第 12 章为运动学部分,第 13 章为动力学部分。具体内容包括:静力学基本理论、材料力学基础知识、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法、点和刚体的运动和动力学基本理论。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学/经来旺,刘丹丹主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2015. 8  
ISBN 978-7-5629-4941-1

I. ①工… II. ①经… ②刘… III. ①工程力学 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 163124 号

项目负责人:陈军东  
责任校对:梁雪姣  
出版发行:武汉理工大学出版社  
社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号  
邮 编:430070  
经 销:各地新华书店  
印 刷:湖北丰盈印务有限公司  
开 本:787×1092 1/16  
印 张:22.75  
字 数:548 千字  
版 次:2015 年 8 月第 1 版  
印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷  
印 数:2000 册  
定 价:42.00 元

责任编辑:张莉娟  
装帧设计:兴和设计



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

# 前 言

本书是安徽省“十二五”规划教材,主要适用于工程管理专业、非机械类制造类专业、化学工程类专业、工程地质专业、材料类专业、安全工程专业、资源与环境专业等的本科学生,对现场工程技术人员同样具有很高的参考价值。

与以往的《工程力学》教材相比,本书在教学内容与结构方面做了一些调整,例如把静力学、运动学和动力学的基本理论归为一个章节,删除了与物理学中完全重复的内容,对能量方法进行了一定程度的补充,以适应相关工科专业的需要,在例题和习题的选择方面,更加注重与工程实例的结合,使学生更清楚地了解本门课程与工程实践的相关性与基础性。

本书由经来旺教授和刘丹丹副教授主编,副主编有刘文震、江向阳、董春亮、崔智丽和冯彧雷。本书编写分工如下:崔智丽编写了第1、2章和附录I、II,董春亮编写了第3、4、11章,江向阳编写了第5、6、7章,冯彧雷编写了第8、9、10章,刘文震编写了第12、13章,全书由经来旺教授和刘丹丹副教授审核和定稿。

本书在编写过程中得到了安徽理工大学理学院领导、力学系领导及全体教师的大力支持,在此一并致谢!

本书还受到了安徽省教育厅教学改革与质量提升计划重大教学改革研究项目“基础力学教改中的‘以赛促进’”、安徽省支持本科高校发展能力提升计划项目“工程力学专业综合改革项目”、“安徽理工大学工程力学特色专业”和“卓越工程师计划”等的支持,在此深表感谢!

由于编者水平有限,时间仓促,书中恐仍有疏漏和欠妥之处,希望使用本书的广大教师和读者对发现的问题多提宝贵意见和建议,以利于今后再次修订时使之更臻完善。

编 者

2015年7月20日

# 目 录

## 第一篇 静 力 学

<b>1 静力学基本理论</b> .....	(2)
1.1 静力学的基本知识 .....	(2)
1.1.1 静力学公理 .....	(2)
1.1.2 约束与约束反力 .....	(4)
1.1.3 物体的受力分析和受力图 .....	(7)
1.2 力系的简化 .....	(9)
1.2.1 力系简化的基本概念 .....	(9)
1.2.2 力系的简化方法 .....	(13)
1.2.3 任意力系的简化结果分析 .....	(14)
1.3 力系的平衡 .....	(16)
1.3.1 平衡条件与平衡方程 .....	(16)
1.3.2 物体系统的平衡 .....	(19)
本章小结 .....	(26)
复习思考题 .....	(26)

## 第二篇 材料力学

<b>2 材料力学基础知识</b> .....	(33)
2.1 材料力学的任务 .....	(33)
2.2 变形固体的基本假设和条件 .....	(34)
2.3 外力及其分类 .....	(34)
2.3.1 按作用方式分类 .....	(35)
2.3.2 按荷载随时间变化的特点分类 .....	(35)
2.4 内力和截面法 .....	(35)
2.4.1 内力 .....	(35)
2.4.2 截面法 .....	(36)
2.5 应力和应变 .....	(36)
2.5.1 应力 .....	(36)
2.5.2 应变 .....	(37)
2.6 杆件变形的基本形式 .....	(38)

<b>3 轴向拉伸与压缩</b> .....	(40)
3.1 概述.....	(40)
3.2 截面上的内力.....	(41)
3.2.1 内力.....	(41)
3.2.2 截面法、轴力、轴力图.....	(41)
3.3 截面上的应力.....	(42)
3.3.1 应力.....	(42)
3.3.2 轴向拉(压)杆横截面上的正应力.....	(43)
3.3.3 拉(压)杆斜截面上的应力.....	(43)
3.3.4 圣维南原理.....	(44)
3.4 轴向拉伸与压缩变形的计算.....	(45)
3.4.1 轴向变形及横向变形.....	(45)
3.4.2 胡克定律.....	(45)
3.5 轴向拉伸和压缩时材料的力学性能.....	(48)
3.5.1 轴向拉伸试验.....	(48)
3.5.2 材料在压缩时的力学性能.....	(51)
3.6 失效、安全因数与强度计算.....	(52)
3.6.1 极限应力、许用应力和安全系数.....	(52)
3.6.2 拉(压)杆的强度计算.....	(52)
3.7 应力集中的概念.....	(54)
3.8 轴向拉伸与压缩静不定问题.....	(55)
3.8.1 静不定的概念及解法.....	(55)
3.8.2 装配应力.....	(57)
3.8.3 温度应力.....	(59)
3.9 剪切和挤压的实用计算.....	(60)
3.9.1 工程实例.....	(60)
3.9.2 剪切的实用计算.....	(60)
3.9.3 挤压的实用计算.....	(62)
本章小结.....	(63)
复习思考题.....	(64)
<b>4 扭转</b> .....	(69)
4.1 概念与实例.....	(69)
4.2 外力偶矩计算、扭矩与扭矩图.....	(70)
4.2.1 外力偶矩的计算.....	(70)
4.2.2 扭矩与扭矩图.....	(71)
4.3 薄壁圆筒的扭转.....	(72)

4.3.1	薄壁圆筒扭转时的切应力计算	(72)
4.3.2	切应力互等定理	(73)
4.3.3	切应变与剪切胡克定律	(73)
4.4	圆轴扭转时的应力	(74)
4.4.1	圆轴扭转时的应力	(74)
4.4.2	强度条件	(77)
4.4.3	强度计算	(77)
4.5	圆轴扭转时的变形和刚度条件	(79)
4.5.1	圆轴扭转时的变形	(80)
4.5.2	刚度条件	(80)
	本章小结	(82)
	复习思考题	(82)
<b>5</b>	<b>弯曲内力</b>	(85)
5.1	平面弯曲的概念	(85)
5.2	受弯杆件的简化	(86)
5.3	剪力与弯矩	(87)
5.4	剪力图与弯矩图	(90)
5.4.1	剪力方程和弯矩方程	(90)
5.4.2	剪力图和弯矩图	(90)
5.5	剪力、弯矩和分布荷载集度之间的微分关系	(94)
5.5.1	荷载集度、剪力和弯矩之间的微分关系	(94)
5.5.2	几种常见荷载作用下梁的内力图特征	(95)
5.6	按叠加原理作弯矩图	(97)
5.7	平面曲杆的弯曲内力	(98)
	本章小结	(99)
	复习思考题	(100)
<b>6</b>	<b>弯曲应力</b>	(105)
6.1	概述	(105)
6.2	平面图形的几何性质	(106)
6.2.1	静矩和形心	(106)
6.2.2	惯性矩、惯性积、惯性半径	(109)
6.2.3	平行移轴公式	(112)
6.2.4	转轴公式	(114)
6.2.5	主惯性轴、主惯性矩、形心主惯性轴及形心主惯性矩	(115)
6.3	纯弯曲时的正应力	(118)
6.3.1	变形几何关系	(118)

6.3.2	物理关系 .....	(119)
6.3.3	静力学关系 .....	(120)
6.3.4	非对称梁的纯弯曲 .....	(121)
6.4	梁的横力弯曲的正应力及强度条件 .....	(123)
6.4.1	横力弯曲时的正应力 .....	(123)
6.4.2	横截面上的最大正应力 .....	(123)
6.4.3	梁的正应力强度条件 .....	(124)
6.5	梁的弯曲切应力 .....	(128)
6.5.1	矩形截面梁的切应力 .....	(128)
6.5.2	工字形截面梁的切应力 .....	(131)
6.5.3	薄壁圆环形截面梁的切应力 .....	(132)
6.5.4	圆形截面梁的切应力 .....	(133)
6.5.5	弯曲切应力的强度校核 .....	(134)
6.6	提高梁的承载能力的措施 .....	(136)
6.6.1	选择合理的截面形状 .....	(136)
6.6.2	合理安排梁的受力情况 .....	(137)
6.6.3	采用变截面梁或等强度梁 .....	(138)
	本章小结 .....	(140)
	复习思考题 .....	(140)
<b>7</b>	<b>弯曲变形 .....</b>	<b>(148)</b>
7.1	工程实例与基本概念 .....	(148)
7.1.1	工程实践中的弯曲变形问题 .....	(148)
7.1.2	弯曲变形的基本概念 .....	(148)
7.2	梁的挠曲线近似微分方程 .....	(149)
7.3	用积分法求梁的弯曲变形 .....	(151)
7.4	用叠加法计算梁的变形 .....	(158)
7.5	简单超静定梁 .....	(162)
7.5.1	静不定梁的基本概念 .....	(162)
7.5.2	用变形比较法求解静不定梁 .....	(162)
7.6	梁的刚度条件及提高梁刚度的措施 .....	(165)
7.6.1	梁的刚度条件 .....	(165)
7.6.2	提高梁刚度的措施 .....	(166)
	本章小结 .....	(167)
	复习思考题 .....	(167)
<b>8</b>	<b>应力状态和强度理论 .....</b>	<b>(172)</b>
8.1	应力状态的概念 .....	(172)



8.2	材料的破坏形式 .....	(173)
8.3	平面应力状态 .....	(174)
8.3.1	平面应力状态应力分析的解析法 .....	(174)
8.3.2	平面应力状态应力分析的图解法 .....	(177)
8.4	空间应力状态 .....	(179)
8.4.1	三向应力状态 .....	(179)
8.4.2	广义胡克定律 .....	(179)
8.5	强度理论 .....	(181)
8.5.1	第一强度理论——最大拉应力理论 .....	(181)
8.5.2	第二强度理论——最大伸长线应变理论 .....	(181)
8.5.3	第三强度理论——最大切应力理论 .....	(182)
8.5.4	第四强度理论——最大形状改变比能理论 .....	(182)
8.6	应用举例 .....	(183)
	本章小结 .....	(184)
	复习思考题 .....	(185)
<b>9</b>	<b>组合变形 .....</b>	<b>(189)</b>
9.1	组合变形与叠加原理 .....	(189)
9.2	斜弯曲 .....	(190)
9.2.1	斜弯曲的概念 .....	(190)
9.2.2	斜弯曲时杆件的内力、应力的计算 .....	(190)
9.3	拉伸(压缩)与弯曲组合变形 .....	(192)
9.3.1	横向力与轴向力共同作用 .....	(192)
9.3.2	偏心拉伸(压缩) .....	(194)
9.3.3	截面核心 .....	(195)
9.4	弯曲与扭转组合变形 .....	(196)
	本章小结 .....	(200)
	复习思考题 .....	(200)
<b>10</b>	<b>压杆稳定 .....</b>	<b>(205)</b>
10.1	工程实例 .....	(205)
10.2	细长压杆的临界压力 .....	(206)
10.2.1	两端铰支细长压杆的临界压力 .....	(206)
10.2.2	其他支座条件下细长压杆的临界压力 .....	(207)
10.3	欧拉公式的适用范围,中、小柔度杆的临界应力 .....	(209)
10.3.1	临界应力和柔度 .....	(209)
10.3.2	欧拉公式的适用范围 .....	(209)
10.3.3	中柔度压杆的临界应力公式 .....	(210)

10.3.4	小柔度压杆的临界应力公式	(211)
10.3.5	临界应力总图	(211)
10.4	压杆的稳定性计算	(213)
10.5	提高压杆稳定性的措施	(217)
	本章小结	(218)
	复习思考题	(218)
<b>11</b>	<b>能量法</b>	(222)
11.1	概述	(222)
11.2	杆件应变能的计算	(222)
11.2.1	杆件在基本变形下的应变能	(222)
11.2.2	杆在组合变形下的应变能	(224)
11.2.3	应变能的普遍表达式	(225)
11.3	互等定理	(226)
11.4	卡氏定理	(228)
11.5	单位荷载法(莫尔定理)	(230)
11.6	用能量法求解超静定结构	(233)
11.6.1	用卡氏定理求解挠度	(233)
11.6.2	用莫尔定理求解挠度	(234)
	本章小结	(235)
	复习思考题	(236)

### 第三篇 运 动 学

<b>12</b>	<b>点和刚体的运动</b>	(241)
12.1	点的运动	(241)
12.2	刚体的简单运动	(244)
12.2.1	刚体的平行移动	(244)
12.2.2	刚体的定轴转动	(245)
12.2.3	转动刚体内各点的速度和加速度	(246)
12.2.4	轮系的传动比	(249)
12.3	点的合成运动	(250)
12.3.1	概述	(250)
12.3.2	点的速度合成定理	(251)
12.3.3	牵连运动为平动时的加速度合成定理	(253)
12.4	刚体的平面运动	(255)
12.4.1	刚体平面运动的概述和运动分解	(255)
12.4.2	求平面图形上各点速度的基点法	(257)

12.4.3 求平面图形上各点速度的瞬心法·····	(261)
12.4.4 用基点法求解平面图形上各点的加速度·····	(265)
本章小结·····	(267)
复习思考题·····	(268)

## 第四篇 动力学

<b>13 动力学基本理论</b> ·····	(273)
13.1 质点动力学的基本方程·····	(273)
13.1.1 动力学基本方程·····	(273)
13.1.2 质点的运动微分方程·····	(273)
13.2 动力学普遍定理·····	(274)
13.2.1 动量定理·····	(274)
13.2.2 动量矩定理·····	(281)
13.2.3 动能定理·····	(290)
13.3 达朗贝尔原理·····	(298)
13.3.1 质点的达朗贝尔原理·····	(298)
13.3.2 质点系的达朗贝尔原理·····	(299)
13.3.3 刚体惯性力系的简化·····	(300)
本章小结·····	(303)
复习思考题·····	(304)
附录一 习题答案·····	(308)
附录二 型钢表·····	(316)
附录三 材料力学型钢表·····	(331)
参考文献·····	(351)

# 第一篇

# 静 力 学

## 静力学基本理论

### 1.1 静力学的基本知识

力是物体之间相互的机械作用。如果物体上作用有若干个力,则它们构成一个力系。静力学研究的是物体在力系作用下的平衡规律,其研究的力学模型是**刚体**。所谓刚体,就是在力的作用下,形状和大小都保持不变的物体,是将实际物体理想化的模型。在研究刚体的平衡之前,需要了解一些静力学的基本知识。

#### 1.1.1 静力学公理

静力学公理是人们在长期生产实践中总结概括出来的,这些公理无须证明而为大家所公认,是静力学的全部理论基础。

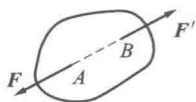


图 1.1

**公理一 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大小相等,方向相反,且作用在同一直线上,如图 1.1 所示。

公理一揭示了作用于刚体上的最简单力系的平衡条件。对于刚体来说,这个条件是充分和必要的;但对于变形体来说,这个条件是非充分的。例如绳索在受等值、反向、共线拉力作用时可以平衡,但在受等值、反向、共线压力作用时就不能保持平衡。

工程中把只受两个力作用而平衡的物体称为**二力体**或**二力构件**。当二力构件的长度尺寸远大于横截面尺寸时,称为**二力杆**。如图 1.2、图 1.3 所示,二力体(杆)不论其形状如何,两个力的作用线必须与该二力作用点的连线重合,且两力大小相等,方向相反。

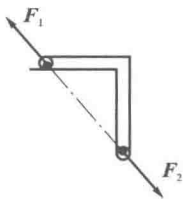


图 1.2

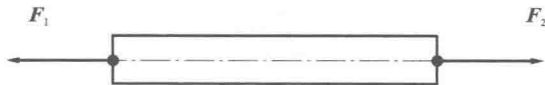


图 1.3

**公理二 加减平衡力系公理** 在作用于刚体的力系中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果。

公理二表明平衡力系对刚体不产生作用效果,是力系简化的重要理论依据。根据公理二,有下面的推论。

**推论一 力的可传性原理** 作用于刚体上某点的力可沿着它的作用线移到刚体内任一点,而不改变该力对刚体的作用。

**证明:** 设有力  $F$  作用在刚体上的  $A$  点,如图 1.4(a)所示。根据加减平衡力系公理,可在力的作用线上任取一点  $B$ ,在  $B$  点加上两个相互平衡的力  $F_1$  和  $F_2$ ,满足矢量关系  $F = F_2 = -F_1$ ,如图 1.4(b)所示。由于力  $F$  和  $F_1$  也是一个平衡力系,可以去掉,只剩下力  $F_2$ ,如图 1.4(c)所示。三个图的作用效果相同,相当于力  $F$  沿其作用线由  $A$  点移动到了  $B$  点。对于刚体来说,力的三要素是:力的大小、方向和作用线。故作用于刚体上的力是滑动矢量。

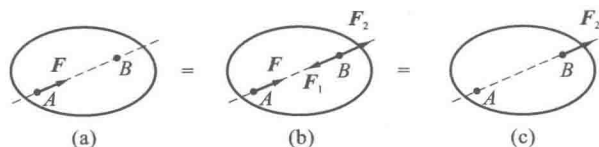


图 1.4

**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,它的大小和方向由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定,如图 1.5(a)所示。这种合成力的方法,称为矢量加法。合力等于这两个分力的矢量和,矢量表达式为:

$$F_R = F_1 + F_2$$

应用此法则求两共点力合力的大小和方向时,也可以作一个力的三角形,如图 1.5(b)所示,可以从  $A$  点作一个与力  $F_1$  大小相等、方向相同的矢量  $AB$ ,再过  $B$  点作一个与力  $F_2$  大小相等、方向相同的矢量  $BC$ 。则矢量  $AC$  就表示这两个力的合力  $F_R$ 。这种求合力的方法称为力的三角形法则。三角形法则可推广为力的多边形法则,如图 1.5(c)所示,可求  $n$  个共点力的合力。

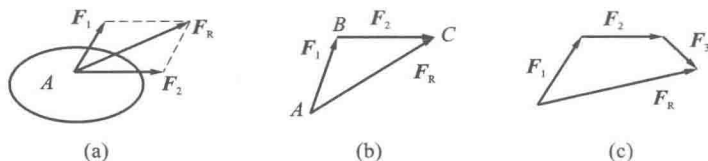


图 1.5

**推论二 三力平衡汇交定理** 刚体在三个力作用下平衡,若其中两个力的作用线交于一点,则第三个力的作用线必通过此交点,且三个力在同一平面内。

**证明:** 设在刚体上的三点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ,分别作用着力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ,它们构成平衡力系,其作用线都在平面  $ABC$  内,但不平行。假定力  $F_1$  和  $F_2$  的作用线相交于点  $O$ ,如图 1.6(a)所示,根据力的可传性原理,将力  $F_1$  和  $F_2$  沿各自作用线移到交点  $O$ ,然后根据力的平行四

边形法则可求出它们的合力  $F_R$ , 如图 1.6(b) 所示, 则力  $F_R$  与  $F_3$  平衡。由公理一可知力  $F_R$  和  $F_3$  必共线, 于是力  $F_3$  的作用线必通过点  $O$  且与  $F_1$ 、 $F_2$  在同一个平面内。

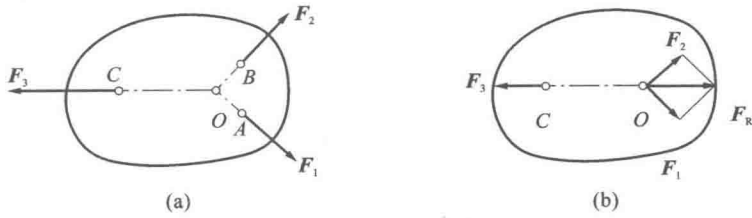


图 1.6

**公理四 作用与反作用定律** 两物体间相互作用的力总是成对出现, 它们大小相等、方向相反, 沿着同一直线, 分别作用在两个物体上。

公理四概括了任何两个物体之间相互作用力的关系, 一切力总是成对出现, 有作用力就必有反作用力, 它是受力分析时必须遵循的原则。该定律既适用于静力学, 也适用于动力学。

需要注意的是, 公理四与公理一具有本质的区别: 作用力与反作用力是分别作用在两个不同物体上的力, 而公理一所描述的是作用在同一物体上的一对平衡力。

**公理五 刚化原理** 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时, 其平衡状态保持不变。

此公理建立了刚体平衡与变形体平衡的联系。根据刚化原理, 可以把研究刚体平衡的理论应用到处于平衡的变形体, 从而将刚体力学的研究范围扩大化。但刚体的平衡条件只是变形体平衡的必要条件, 而非充分条件。例如, 刚体受一对压力可以平衡, 而绳索受同样压力却不能平衡。

### 1.1.2 约束与约束反力

在力学研究中, 如果一个物体在空间的位移不受任何限制, 则称之为**自由体**; 反之, 如果一个物体的位移受到某些限制, 则称为**非自由体**。限制非自由体某些位移的物体称为**约束**。当物体在约束限制的方向上有运动趋势时, 受到约束的阻碍力称为**约束反力**或**约束力**。

由于约束反力是限制物体运动的, 因此它的作用点在约束与被约束物体的接触点, 其方向与约束所能限制的方向相反。工程中的约束种类很多, 为了便于研究, 需将物体间的连接方式抽象化, 按其具有的特性, 归纳为以下几种典型的理想约束模型。

#### (1) 光滑面约束

当物体与约束体间的接触面很光滑, 摩擦力相对于其他力可以忽略时, 可以简化为此类约束。它只能阻碍物体沿两接触面法线方向的运动, 不论接触面是平面还是曲面, 都不能阻碍它沿切线方向运动。因此, 光滑面约束的约束力作用在接触点, 方向沿两接触面在该点处的公法线且指向受力物体, 因此也称为**法向反力**, 通常用  $F_N$  表示, 如图 1.7 所示。

#### (2) 柔性体约束

由柔软而不计自重的绳索、皮带、链条等所构成的约束统称为**柔性体约束**。由于它们

被视为绝对柔软且不计自重,因而本身只能承受拉力而不能承受压力,因此,这类约束只能限制物体沿着柔性体伸长方向的位移。约束力作用在接触点,方向沿着柔性体而背离于受约束的物体,通常用  $F_T$  表示,如图 1.8 所示。

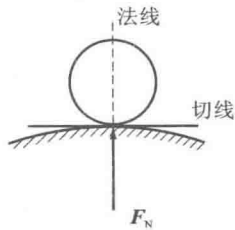


图 1.7

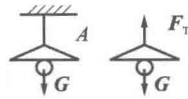


图 1.8

### (3) 光滑铰链约束

#### ① 圆柱铰链

两物体分别被钻上直径相同的圆孔并用销钉连接起来,不计销钉与销钉孔壁之间的摩擦,这类约束称为光滑圆柱铰链约束,简称为铰链约束,如图 1.9(a)所示。这类约束的特点是只限制物体在垂直销钉轴线和平面内沿任意方向的相对移动,但不能限制物体绕销钉轴线的相对转动和沿其轴线的相对滑动。若忽略掉销钉与构件上圆柱孔间的微小缝隙,则其约束反力作用在与销钉轴线垂直的平面内,并通过销钉中心,而方向待定。在针对具体问题时,通常用通过销钉中心的两个正交分力  $F_x$ 、 $F_y$  表示,如图 1.9(b)所示。

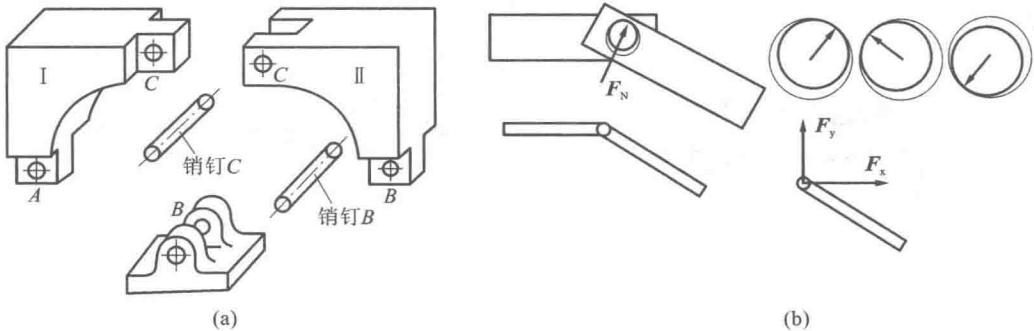


图 1.9

#### ② 固定铰支座

如果用铰链将结构物或构件与地面、墙、柱等固定物连接,则构成固定铰支座,如图 1.10(a)所示。这类约束是一个过销钉中心、大小和方向不确定的约束力,可以用相互正交的两个分力  $F_x$ 、 $F_y$  表示,简图如图 1.10(b)所示。

#### ③ 辊轴支座(可动铰支座)

在固定铰支座的底座与固定物之间安装几个辊轴,就构成了辊轴支座,也称为可动铰链支座。在桥梁、屋架等结构中,其一端常采用辊轴支座,以适应结构的热胀冷缩现象,如图 1.11(a)所示。这种支座的约束特点是只能限制物体上与销钉连接处沿垂直于支承面方向(通常为指向或背离支承面)的移动,而不能阻止物体沿着光滑支承面的运动或绕销钉的转动。辊轴支座的约束反力通过销钉中心,垂直于支承面,指向待定,如图 1.11(b)所示。



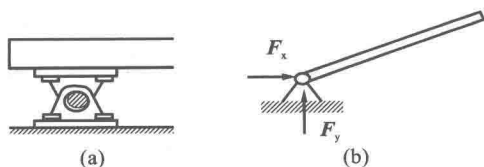


图 1.10

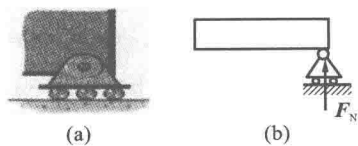


图 1.11

#### (4) 其他类型约束

##### ① 向心轴承约束(径向轴承)

向心轴承约束是工程中常用的一种轴承形式,其约束性质与柱铰约束相同,如图 1.12(a)所示。其约束特点及反力特征与铰链相同,力学简图如图 1.12(b)、图 1.12(c)所示。

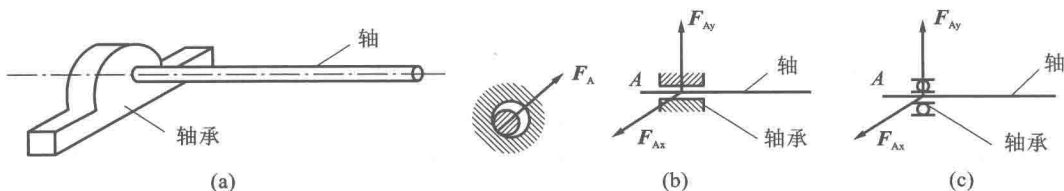


图 1.12

##### ② 止推轴承

止推轴承如图 1.13(a)所示,它除了能限制轴的径向移动外,还能限制轴沿轴向的移动,因此可用三个互相垂直的分力表示,如图 1.13(b)所示。

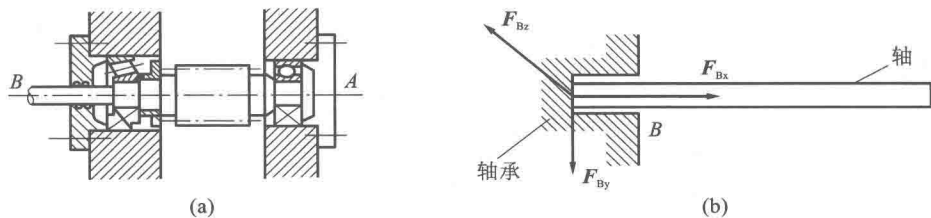


图 1.13

##### ③ 球铰链

将固结于物体一端的球体置于球窝形支座内,就形成了球铰链支座,如图 1.14(a)所示。这种约束只允许物体绕球心转动,但不允许在任何方向离开球心的运动。若忽略摩擦,对物体的约束反力必通过球心,指向待定。通常用过球心的三个正交力表示,如图 1.14(b)所示。



图 1.14