

GONGCHENG LIXUE

工程力学

主编 © 刘 宇 姜雄基

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

工程力学

主 编 刘 宇 姜雄基
副主编 张玉欣 张聚贤 李东侠
参 编 满吉芳 张 佳 李 辉
主 审 徐光华 解宝柱



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书共分13章,基本涵盖了静力学和材料力学的主要内容,包括:静力学公理和物体的受力分析、平面汇交力系和平面力偶系、平面任意力系、空间力系、轴向拉伸和压缩、剪切和挤压、圆轴扭转、截面几何性质、平面弯曲内力、弯曲强度和刚度、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定等。

本书主要作为高等院校铁道工程专业、道路桥梁工程专业、建筑工程技术专业、其他土建类及相关专业的工程力学课程教材,也可供有关工程技术人员参考使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 刘宇, 姜雄基主编. — 北京: 北京理工大学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5640-7444-9

I. ①工… II. ①刘… ②姜… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第030544号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1 / 16

印 张 / 13.5

字 数 / 285千字

版 次 / 2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

印 数 / 1~1500册

定 价 / 38.00元

责任编辑 / 李志敏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前言

Preface

为满足高等教育教学第一线的需要,适应高等教育改革的形势,编者结合交通土建工程技术专业的建设与改革,在借鉴各高等院校近年来在力学课程内容和体系改革成果的基础上编写了本书,希望做到用有限的学时,使学生既掌握工程力学中最基本的知识、技能,又了解其在工程中的应用方法以及力学的最新进展,同时还具备一定的综合分析能力,为后续专业课程的学习打下良好的基础。

本书主要分为两篇:第一篇为静力学,介绍静力分析基础、平衡方程及其应用,培养学生对工程实体进行受力分析和受力分类计算的基础能力;第二篇为材料力学,介绍工程材料失效和结构构件失效的概念、构件的强度和刚度条件及其应用,使学生能够初步掌握工程构件承载能力的计算方法及其应用。

本书针对高等教育的特点,力求通俗易懂,突出实用性、典型性和可操作性,注重学生应用能力的培养。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评改正。

• 编者

目录

Contents

第1篇 静力学

1

第1章 静力学公理和物体的受力分析 / 1

- 1.1 静力学的基本概念 / 1
- 1.2 静力学公理 / 3
- 1.3 约束和约束力 / 6
- 1.4 物体的受力分析和受力图 / 9

2

第2章 平面汇交力系和平面力偶系 / 15

- 2.1 平面汇交力系的合成和平衡 / 15
- 2.2 力矩和力偶 / 19

3

第3章 平面任意力系 / 28

- 3.1 平面任意力系的简化 / 28
- 3.2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程 / 32
- 3.3 物体的平衡、静定和超静定问题 / 34
- 3.4 考虑摩擦时物体的平衡问题 / 36

4

第4章 空间力系 / 48

- 4.1 空间力系在直角坐标轴上的投影 / 48
- 4.2 空间汇交力系的合成和平衡 / 49
- 4.3 空间一般力系的合成和平衡 / 51
- 4.4 物体重心和形心的坐标公式 / 54

第2篇 材料力学

5

第5章 轴向拉伸和压缩 / 67

- 5.1 轴向拉伸和压缩的概念与实例 / 67
- 5.2 轴向拉伸和压缩的内力及内力图 / 68
- 5.3 轴向拉伸和压缩的应力和应力集中 / 71
- 5.4 轴向拉伸和压缩的变形计算 / 74
- 5.5 轴向拉伸和压缩的强度计算 / 77

6

第6章 剪切和挤压 / 83

- 6.1 剪切的观念和实用计算 / 83
- 6.2 挤压的观念和实用计算 / 84
- 6.3 纯剪切和剪切胡克定律 / 86

7

第7章 圆轴扭转 / 88

- 7.1 扭转轴的内力和内力图 / 88
- 7.2 圆轴扭转时应力和强度计算 / 91
- 7.3 圆轴扭转时的变形和刚度条件 / 95

8

第8章 截面几何性质 / 99

- 8.1 静矩 / 99
- 8.2 惯性矩 / 101
- 8.3 惯性矩的平行移轴公式 / 103
- 8.4 组合截面惯性矩的计算 / 104

9

第9章 平面弯曲内力 / 108

- 9.1 工程中常见的弯曲问题 / 108
- 9.2 梁的内力 / 111
- 9.3 梁的剪力图和弯矩图 / 117
- 9.4 弯矩、剪力、荷载集度间的关系 / 121
- 9.5 简易法作剪力图和弯矩图 / 125
- 9.6 叠加法作梁的弯矩图 / 127
- 9.7 影响线 / 128

10

▶ 第10章 弯曲强度和刚度 / 139

- 10.1 梁弯曲时横截面上的正应力 / 139
- 10.2 梁弯曲时正应力强度计算 / 143
- 10.3 弯曲切应力简介 / 148
- 10.4 梁的变形和刚度 / 150
- 10.5 提高梁的强度和刚度的措施 / 152

11

▶ 第11章 应力状态和强度理论 / 156

- 11.1 应力状态概述 / 157
- 11.2 平面应力状态分析 / 159
- 11.3 三向应力状态分析 / 165
- 11.4 广义胡克定律 / 167
- 11.5 强度理论及其应用 / 169

12

▶ 第12章 组合变形 / 175

- 12.1 组合变形概述 / 175
- 12.2 斜弯曲 / 176
- 12.3 偏心压缩(拉伸) / 179

13

▶ 第13章 压杆稳定 / 186

- 13.1 压杆稳定的概念 / 186
- 13.2 细长压杆临界力的欧拉公式 / 187
- 13.3 压杆稳定性计算 / 189

▶ 附录 热轧型钢常用参数表 / 194

- 附表1 等边角钢截面尺寸、截面面积、理论重量及截面特性 (GB/T 706—2008) / 194
- 附表2 不等边角钢截面尺寸、截面面积、理论重量及截面特性 (GB/T 706—2008) / 200
- 附表3 工字钢截面尺寸、截面面积、理论重量及截面特征 (GB/T 706—2008) / 203
- 附表4 槽钢截面尺寸、截面面积、理论重量及截面特性 (GB/T 706—2008) / 206

▶ 参考文献 / 208

第 1 篇 静力学

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析

本章描述

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。静力学的研究对象是刚体。所谓刚体，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，是一个理想化的力学模型。本章将阐述静力学的基本概念、静力学基本公理，并介绍工程中常见的约束和约束力的分析及物体的受力图。

教学目标

1. 能力目标

熟练进行受力分析并正确绘制受力图。

2. 知识目标

了解静力学的研究对象、内容。

了解刚体、平衡、力及力系的概念

掌握静力学五大公理。

掌握常见约束及约束力。

掌握受力图的绘制方法和步骤。

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力

1. 力的作用效应及分类

力是物体间的相互作用。其作用效应有两种：一种使物体的运动状态发生改变，即使物体的运动速度大小或运动方向发生改变，称为力的运动效应或外效应，如踢球，由于人对球施加了力，使球的速度大小或运动方向发生了改变；另一种使物体的形态发生改变，称为力的变形效应或内效应，如打铁，由于人对铁施加了力，使铁的形态发生了改变。一般而言，这两种效应是同时存在的，但为了简化研究问题，通常将二者分开来研究。本章

主要研究力的外效应。

根据力的作用范围，力可分为集中力和分布力两大类。

(1)集中力。集中力是指作用于物体上某一点的力。事实上，任何两个物体间的相互作用不可能局限于一个无面积的点上，即力不可能作用于一点上，而是作用于一块面积上，当作用面积相对于物体尺寸很小时，可近似看作一点。如列车车轮作用于钢轨上的压力，轮轨接触实际上属于面一接触，但相对于钢轨尺寸而言，因接触面积很小，可等效为一个点，即车轮压力可视为集中力。

(2)分布力。当力的作用面积相对较大而不能简化为集中力时，作用于构件上的外力应简化为分布力。当荷载连续作用于整个物体的体积上时，称为体荷载，如物体的重力；当荷载连续作用于物体的某一表面上时，称为面荷载，如风、雪、水对物体的压力；当分布荷载可以简化为沿物体中心线分布的平行力时，称为线荷载，如梁的自重，即可简化为沿梁轴线分布的线荷载。单位长度上所受的力，称为分布力在该处的荷载集度，可用符号 q 表示，若 q 为一常数，则该荷载称为均布荷载，反之，若 q 为非常数，则该荷载称为非均布荷载。体荷载的荷载集度单位是 N/m^3 或 kN/m^3 ；面荷载的荷载集度单位是 N/m^2 或 kN/m^2 ；线荷载的荷载集度单位是 N/m 或 kN/m 。

2. 力的三要素

(1)力的大小。力的大小是指物体间相互作用的强弱程度。

(2)力的方向。力的方向包括方位和指向两个含义。如重力的方向是“铅垂向下”的，“铅垂”是力的方位，“向下”是力的指向。

(3)力的作用点。力的作用点是指物体受力作用的位置。

以上三个因素，称为力的三要素。要确定一个力，就必须说明它的大小、方向及作用点。因此，力是一个既有大小又有方向的量，即矢量。通常用一个带有箭头的线段表示力，如图 1-1 所示。线段的长度表示力的大小，线段的方位和指向表示力的方向，线段的起点(或终点)表示力的作用点。线段所在的直线称为力的作用线。本书中，用黑体字母 \mathbf{F} 、 \mathbf{P} 表示力矢量，而用普通字母 F 、 P 表示矢量的大小。

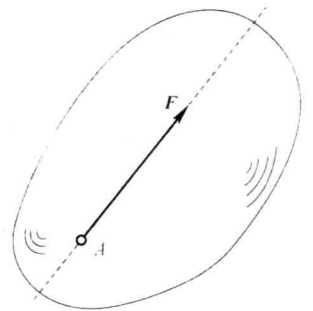


图 1-1

1.1.2 力系

力系是指作用于物体上的一组力。在不改变作用效果的前提下，用一个简单力系代替一个复杂力系，称为力系的简化或力系的合成。对物体作用效果相同的力系，称为等效力系。如果一个力和一个力系等效，则称此力为该力系的合力，而力系中各个力都是其合力的分力。

按照作用线分布情况，力系可分为以下几种：

1. 平面力系

所有力的作用线在同一平面内的力系称为平面力系。平面力系又可分为：

- (1)平面汇交力系。平面汇交力系是指所有力的作用线汇交于同一点的平面力系。
- (2)平面平行力系。平面平行力系是指所有力的作用线都相互平行的平面力系。
- (3)平面任意力系。平面任意力系是指所有力的作用线既不汇交于同一点，又不相互平行的平面力系。

2. 空间力系

所有力的作用线不在同一平面内的力系称为空间力系。空间力系又可分为：

- (1)空间汇交力系。空间汇交力系是指所有力的作用线汇交于同一点的空间力系。
- (2)空间平行力系。空间平行力系是指所有力的作用线都相互平行的空间力系。
- (3)空间任意力系。空间任意力系是指所有力的作用线既不汇交于同一点，又不相互平行的空间力系。

由于平面力系是空间力系的特殊情况，而汇交力系和平行力系又是任意力系的特殊情况，因此，空间任意力系是最复杂、最普遍、最一般的形式，其他各种力系都是它的一种特殊情况。

1.2 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，又经过实践的反复检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 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。合力的作用点也在该点，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确定，如图 1-2(a)所示。也可做一力的三角形，求两汇交力合力的大小和方向，即合力矢，如图 1-2(b)、(c)所示。换言之，作用于物体上同一点的两个力的合力，等于这两个力的矢量和，即

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

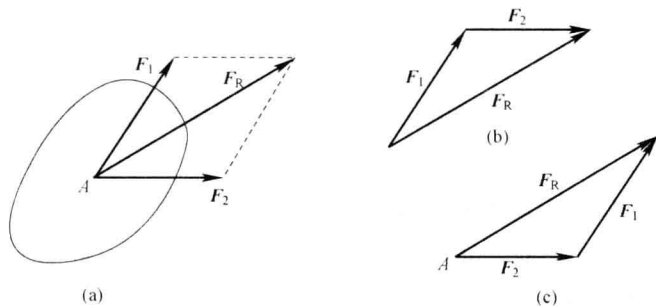


图 1-2

公理 2 二力平衡公理

刚体在两个力作用下保持平衡的充分必要条件是：这两个力大小相等，方向相反，作用在同一直线上。这个公理说明了刚体在两个力作用下处于平衡状态时应满足的条件，如图 1-3 所示。

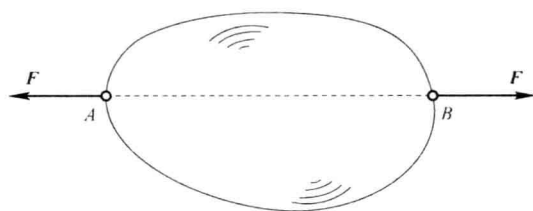


图 1-3

对于只受两个力作用而处于平衡状态的构件，称为二力构件，如图 1-4 所示。根据二力平衡条件可知：二力构件不论其形状如何，所受两个力的作用线必沿二力作用点的连线。若一根直杆只在两点受力作用而处于平衡，则此两力作用线必与杆的轴线重合，此杆称为二力杆件，如图 1-5 所示。

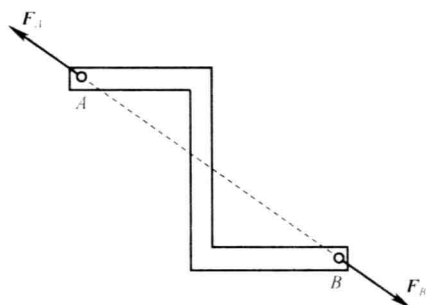


图 1-4

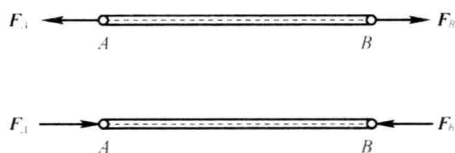


图 1-5

必须指出：二力平衡公理只适用于刚体，不适用于柔体，例如，绳索的两端受到大小相等、方向相反、沿同一直线作用的两个压力，是不能平衡的。

公理 3 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或减去任意平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效果。

根据上述公理可以导出下列推论：

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某一点的力，可以沿其作用线平移至刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用。

证明：(1) 设力 F 作用于刚体上的 A 点处，如图 1-6(a) 所示。

(2) 根据加减平衡力系公理，可在力的作用线上任取一点 B ，并加上一对平衡力系 F_1 和 F_2 ，使得 $F = F_1 = -F_2$ ，如图 1-6(b) 所示。

(3) 由于 F 和 F_2 是一个平衡力系，故可除去，这样只剩下作用于 B 点的力 F_1 ，如图 1-6(c) 所示。

(4) 力 F_1 和原力 F 等效，就相当于把作用于 A 点的力 F 沿其作用线移动到 B 点。

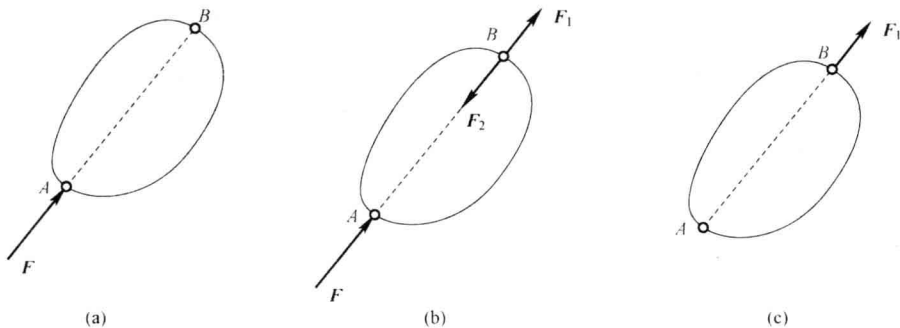


图 1-6

由此可见，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，它已被作用线所代替。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。

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个相互平衡的力，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。

证明：(1) 设刚体的 A、B、C 三点上，分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 和 F_3 ，如图 1-7(a) 所示。

(2) 根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O，并根据力的平行四边形法则，得合力 F_{12} 。则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。

(3) 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 和 F_2 的交点 O，如图 1-7(b) 所示。

于是推论得证。

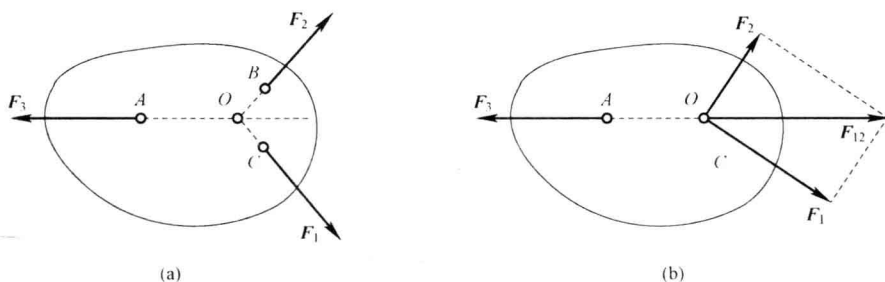


图 1-7

公理 4 作用力和反作用力公理

作用力和反作用力总是同时存在，它们大小相等、方向相反、沿同一条直线分别作用在两个相互作用的物体上。若用力 F 表示作用力，又用力 F' 表示反作用力，则

$$F = -F'$$

该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。由于作用力和反作用力分别作用在两个不同的物体上，因此，不能将其视作平衡力系。如地面上

有一个处于静止状态的物体(图 1-8)，物体对地面有一个作用力 N 作用在地面上，而地面对物体有一个反作用力 N' 作用在物体上，力 N' 和 N 大小相等、方向相反，沿同一条直线分别作用在地面和物体上，是一对作用力和反作用力。物体在力 G 和力 N' 作用下处于平衡，因此，力 G 和力 N' 是一对平衡力。

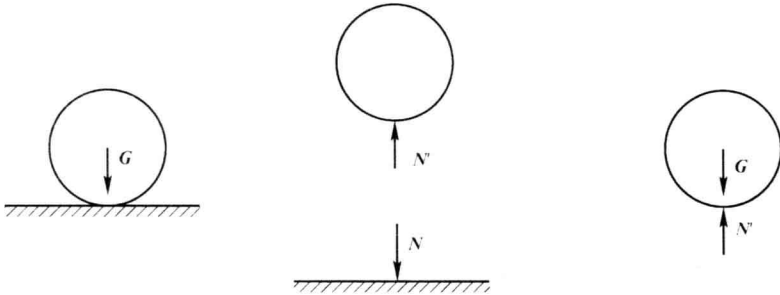


图 1-8

公理 5 刚化原理

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。

该公理提供了变形体刚化的条件。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，如将绳索刚化为刚体，其平衡状态保持不变。反之则不一定成立。如刚体在两个等值反向的压力作用下平衡，而绳索则无法平衡。

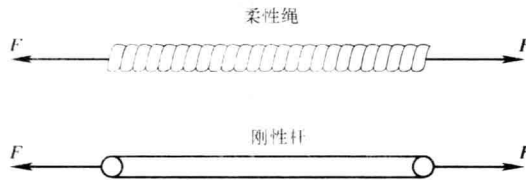


图 1-9

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。

静力学全部理论都可以由以上五个公理推证而得，这既能保证理论体系的完整性和严密性，又能培养读者的逻辑思维能力。

1.3 约束和约束力

在工程中，将空间位移不受任何限制的物体称为自由体，如空中自由飞行的飞机、炮弹和火箭等。相反，将空间位移受到一定限制的物体称为非自由体，如机车受钢轨的限制，只能沿轨道运行；重物由钢索吊住，不能下落等。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束，如上面提到的钢轨对于机车，钢索对于重物都是约束。

当物体沿着约束所限制的方向运动或有运动趋势时，约束会对该物体产生力的作用，以阻止物体的运动，这种力称为约束力。约束力的作用点为约束与被约束物体的接触点，

方向与该约束所能阻止的位移方向相反。

与约束力相对应，凡能主动引起物体运动或使物体有运动趋势的力，称为主动力，如重力、引力及荷载等。主动力与约束力不同，其大小和方向一般是已知的。而约束力的大小通常是未知的，取决于主动力的大小和方向，是一种被动力，需要根据平衡条件确定。

工程中实际约束的类型各种各样，接触状况也千差万别，经过合理简化，主要可以概括为以下几类典型的约束模型。

1.3.1 光滑面约束

若物体与约束的接触面光滑，即二者之间的摩擦力可以忽略不计时，称此约束为光滑面约束。这种约束不能限制物体沿接触面切线的位移，只能限制物体沿接触面公法线且指向接触面的位移。因此，光滑面对物体的约束力，作用在接触点处，方向沿接触表面的公法线并指向被约束的物体。这种约束力称为法向约束力，通常用 F_N 表示，如图 1-10 所示。

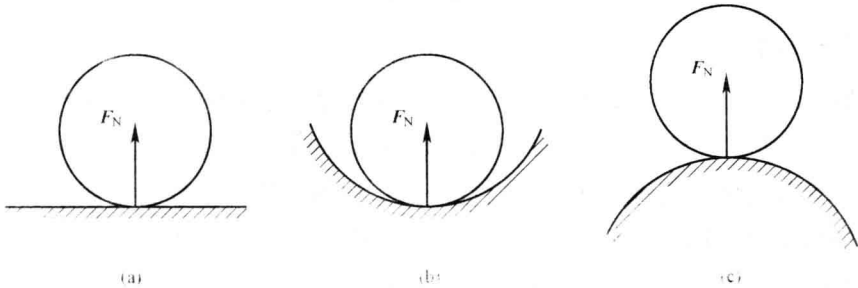


图 1-10

1.3.2 柔体约束

绳索、链条、皮带等柔体用于阻碍物体的运动时，称为柔体约束。由于柔体只能承受拉力，而无法承受压力，因此，柔体对物体的约束力，作用在接触点处，方向沿着柔体中心线背离物体，通常用 F_T 表示，如图 1-11(a)所示；在皮带轮传动系统中，皮带对轮子的约束力沿轮缘的切线方向，且背离轮子，如图 1-11(b)所示。

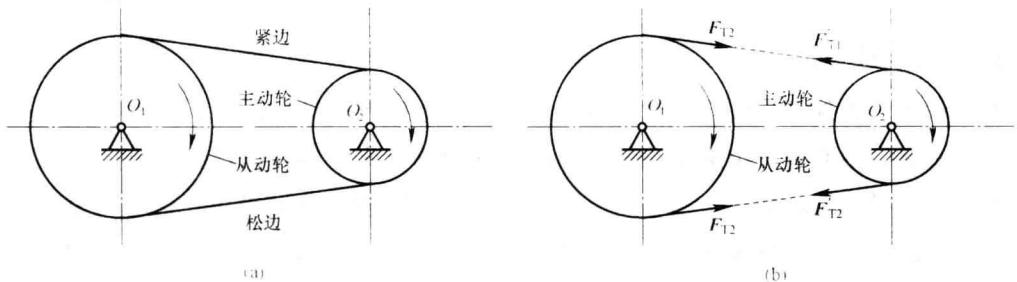


图 1-11

1.3.3 光滑圆柱形铰链约束

1. 链杆约束

两端用光滑铰链与物体连接，中间不受力(包括自重)的刚性直杆称为链杆。链杆属二力杆，既能受拉，又能受压。链杆约束只能限制物体沿着链杆中心线的运动。因此，链杆的约束力沿其中心线，指向未定，通常先假设其受拉，再由计算值的正负号确定其实际受力情况，一般用符号 S 表示，如图 1-12 所示。



图 1-12

2. 固定铰链支座

通过圆柱形销钉将物体与固定在地基或机器上的支座连接起来，这种连接方式称为固定铰链支座，简称固定铰支，如图 1-13(a)所示。固定铰链支座是物体的一种约束，图 1-13(b)所示为其简图。这种支座约束的特点是：物体只能绕铰轴转动而不能发生任何垂直于铰轴的移动。因此，这种铰支座的约束力在垂直于圆柱形销钉轴线的平面内，并通过圆柱形销钉中心，方向不定，通常表示为相互垂直的两个分力，分别用 F_x 和 F_y 表示，如图 1-13(c)所示。

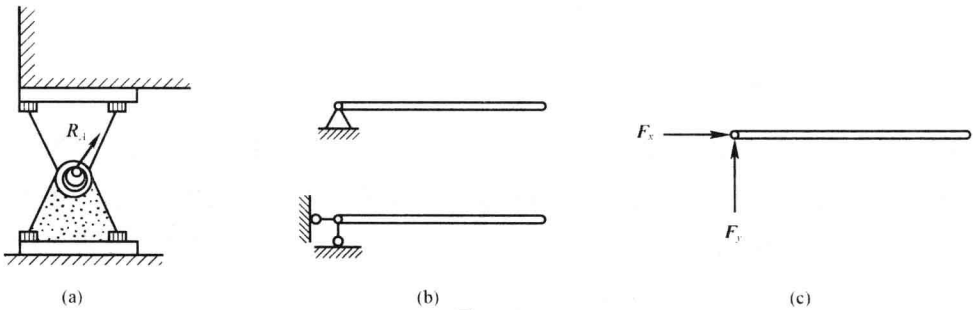


图 1-13

3. 滚动铰链支座

在工程中，为保证构件变形时不仅可绕某轴发生微小转动，还可以沿垂直于轴的方向发生微小平移，由此设计出滚动铰链支座，简称滚动支座，即在固定铰链支座与光滑支撑面之间安装一排滚轮，如图 1-14(a)所示。如图 1-14(b)所示为其简图。这种约束只限制物体沿支撑面法线指向支撑面的运动，类似于光滑面约束。滚动铰链支座约束力的作用点在铰链中心，方向沿支撑面法线，并指向物体，一般用符号 R 表示，如图 1-14(c)所示。

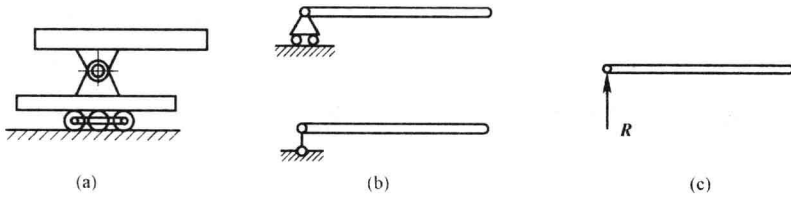


图 1-14

4. 固定端支座

既能限制物体沿任何方向的移动，又能限制其转动的约束称为固定端支座。如房屋中的挑梁，如图 1-15(a)所示；其计算简图如图 1-15(b)所示；固定端支座除了产生水平和竖向约束反力外，还会产生一个阻止转动的约束反力偶，如图 1-15(c)所示。

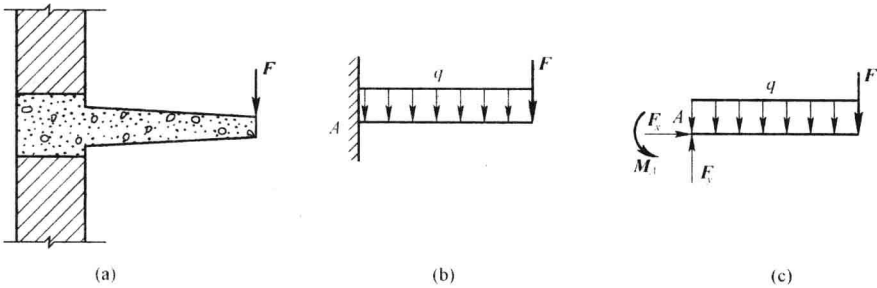


图 1-15

本节只介绍了了几种典型的约束，在实际工程中，约束的类型远不止这些，有的约束比较复杂，分析时需要进行简化和抽象，本书将在以后的章节中详细介绍。

1.4 物体的受力和受力图

在工程实际中，为了进行力学计算，首先要对物体进行受力分析，即分析物体受哪些力的作用，以及每个力的作用位置和力的作用方向。

为了清晰地表示物体的受力情况，我们首先需要单独提取研究对象，即将需要研究的物体(受力体)从周围的物体(施力体)中分离出来，单独画出其简图。取出研究对象后，画出研究对象所受的全部作用力(包括主动力和被动力)，这种表示物体的受力的简明图形称为受力图。

正确地画出研究对象的受力图不仅是解决力学问题的关键，而且也是进行力学计算的依据。画受力图一般应按以下步骤进行：

- (1) 提取研究对象，提取研究对象，解除约束，单独画出其简图；
- (2) 画出所有主动力(一般为已知力)；
- (3) 画出约束力，并根据约束的性质画出相应的约束力。

【例 1-1】 梁 A 端为固定铰支座，B 端为滚动铰支座，滚动平面与水平面呈 30° 夹角，梁中点 C 处作用有集中力 F_C ，如图 1-16(a) 所示。如不计梁的自重，试画出其受力图。

解 (1) 确定梁 AB 为研究对象，解除 A、B 两处的约束，单独画出其简图，如图 1-16(b) 所示。

(2) 画主动力。在梁的中点 C 处画出主动力 F_C 。

(3) 画约束力。A 端为固定铰支座，其约束力可用两个相互垂直的分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示；B 端为滚动铰支座，其约束力 F_B 垂直于滚动平面并指向 AB 梁。于是，梁的受力图如图 1-16(c) 所示。

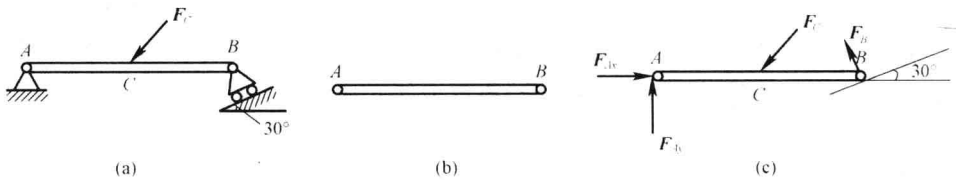


图 1-16

【例 1-2】 用力 F 拉动碾子以压平地面，重为 P 的碾子受到一石块的阻碍，如图 1-17(a) 所示。若不计摩擦，试画出碾子的受力图。

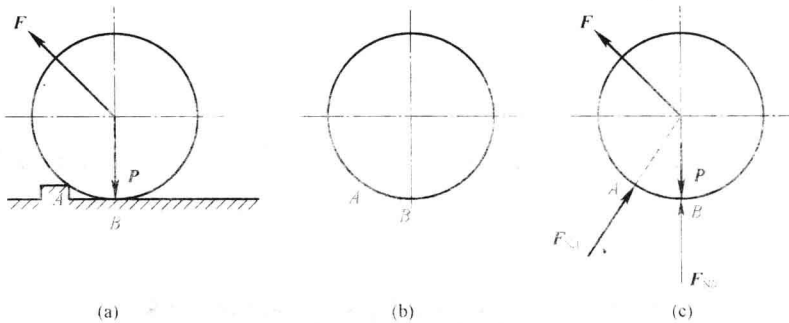


图 1-17

解 (1) 确定碾子为研究对象，解除 A、B 两处的约束，单独画出其简图，如图 1-17(b) 所示。

(2) 画主动力。在碾子的重心处画出重力 P 和拉力 F 。

(3) 画出被动力。由于碾子在 A、B 处受到石块与地面的光滑约束，故在 A、B 处分别受到石块与地面的法向反力 F_{NA} 和 F_{NB} 的作用，它们均沿公法线方向而指向圆心。于是，碾子的受力图如图 1-17(c) 所示。

【例 1-3】 梯子的两部分 AB 和 AC 在点 A 铰接，又在 D、E 两点用水平绳连接。梯子放在光滑的水平面上，不计自重，但点 H 处作用一竖直荷载 F ，如图 1-18(a) 所示。试分别画出绳子 DE 和梯子的 AB、AC 部分以及整个系统的受力图。

解 (1) 整体受力分析。整体是由 AB 杆、AC 杆及绳子 DE 构成，取整体为研究对象，作用在其上的外力有：主动力 F ，光滑接触面处的约束力 F_B 和 F_C ，其受力如图 1-18(b) 所