

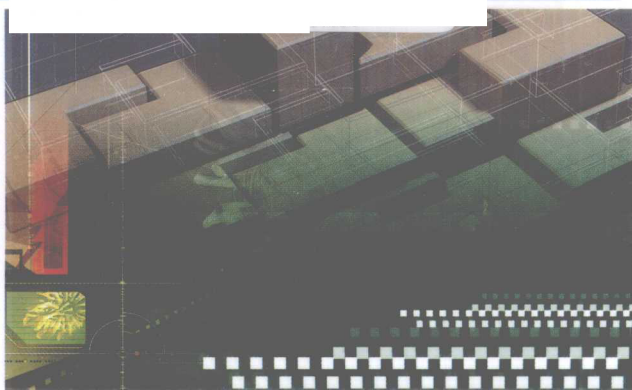


面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

# 工程力学

GONGCHENG LIXUE

◎ 主 编 张明影



TD12

## 面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

本书以“十二五”期间教育部立项的“面向‘十二五’高等教育课程改革项目”研究成果为基础，结合编者多年的教学经验和研究成果，编写而成。本书可作为高等院校工科专业工程力学课程的教学用书，也可供从事工程力学工作的工程技术人员参考。

# 工程力学

主 编 张明影  
副主编 安 宏  
参 编 马桂荣

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

全书分为四个模块。第一模块静力学：研究物体在力作用下的平衡规律。第二模块材料力学：研究构件在外力作用下的受力、变形和破坏规律，解决构件的强度、刚度和稳定性问题。第三模块运动学：研究物体的空间位置随时间的变化规律。第四模块动力学：研究物体运动与力之间的关系。

全书在理论、概念论述上，准确、严谨，层次清晰，在每章后均有小结，便于读者学习掌握主要内容。

本书可作为高等院校机械类及近机械类工程力学课程的教材。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学 / 张明影主编. —北京：北京理工大学出版社，2010. 7

ISBN 978 - 7 - 5640 - 3507 - 5

I. ①工… II. ①张… 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 (2010) 第 146163 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 / 北京慧美印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 16

字 数 / 284 千字

责任编辑 / 葛仕钧

版 次 / 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

梁铜华

印 数 / 1 ~ 1500 册

责任校对 / 王 丹

定 价 / 35.00 元

责任印制 / 边心超

---

图书出现印装质量问题，本社负责调换

# 面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

## 机电系列编委会

主任：翟瑞波

副主任：徐秀娟 王核心 李稳贤 侯会喜 袁世先

编委（按姓氏笔画为序）：

卜养玲	孔 敏	王颖娴	王亚平	王 兰
王周让	王保华	王从钗	牛方方	邓小君
邓树君	代美泉	石 枫	白娟娟	冯秀萍
孙鹏涛	李 俊	李 宁	李 燕	李俊涛
李妍缘	李丽娟	吕栋腾	朱劲松	朱敬超
朱永迪	闫存富	刘书群	刘 峙	刘 畅
刘光定	刘龙江	安 宏	许云兰	宋 芳
宋志峰	宋述林	宋育红	张运真	张俊勇
张保丰	张志军	张 俊	张怀广	张明颖
张 峰	张文革	冶君妮	时 寸	辛小丽
辛 梅	罗亚军	宗一妮	房贯军	赵亚英
赵东辉	赵章吉	赵 斌	庞应周	杨 辉
杨 琳	杨 维	杨汉嵩	杨 爽	郭新民
侯晓芳	徐 铭	徐雅娟	徐家忠	高 凯
高 葛	唐志祥	符林芳	黄明惠	黄金磊
曾 霞	雷伟斌	蒋爱云	蔺国民	潘爱民
薛媛丽				

# 前 言

工程力学是机械类专业的一门专业技术基础课程，是一门研究物体机械运动一般规律和有关构件的强度、刚度、稳定性理论的科学，它包括静力学、材料力学、运动学和动力学的有关内容，内容极其广泛，在工农业生产、建筑、交通运输、航空、航天、日常生活等领域均有广泛的应用。本书所述的是工程力学的基础内容。

本教材以培养学生解决问题能力为目的，简化理论推导，注重实际应用为指导思想，将教学内容分为四个模块：静力学、材料力学、运动学和动力学；通过这些教学内容，使学生掌握物体的受力分析及平衡条件，掌握构件的强度、刚度、稳定性问题，掌握物体运动的基本规律，能够分析物体产生运动的原因，建立物体的运动与物体所受力之间的关系。为学习后续课程及培养分析和解决基本的工程力学问题打下良好的基础。

本书可作为高等院校机械类及近机械类工程力学课程的教材，推荐教学学时数为 72 ~ 90 学时，教师可根据具体情况选择讲授。

本教材在内容选择上做了些努力，较以往有一定的突破。力求够用、实用为原则，培养学生良好的学习能力和解决问题的能力。由于编者水平有限，时间仓促，教材中难免会存在一些疏漏和不妥之处，恳请使用者提出宝贵意见和建议，以便以后改进。

全书由张明影主编，安宏老师担任副主编，马桂荣老师参与编写。

# 目 录

绪 论 .....	1
第一模块 静力学 .....	3
第一章 静力学的基本概念和受力分析 .....	5
第二章 平面基本力系 .....	19
第三章 平面一般力系 .....	34
第四章 空间力系 .....	43
第二模块 材料力学 .....	57
第五章 材料力学的概念 .....	59
第六章 拉压与剪切 .....	67
第七章 圆轴的扭转 .....	98
第八章 梁的弯曲 .....	114
第九章 梁的变形 .....	142
第十章 压杆稳定 .....	152
第三模块 运动学 .....	169
第十一章 点的运动 .....	171
第十二章 刚体的基本运动 .....	182
第十三章 点的合成运动 .....	189
第十四章 刚体的平面运动 .....	196
第四模块 动力学 .....	207
第十五章 质点动力学基础 .....	209
第十六章 动力学普遍定理 .....	216
附录 .....	235
附表 A 几种常见简单形状均质物体的转动惯量 .....	235
附表 B 热轧等边角钢 (GB/9787—1988) .....	237
附表 C 热轧不等边角钢 (GB/T 9788—1988) .....	241
附表 D 热轧槽钢 (GB/T 707—1988) .....	244
附表 E 热轧工字钢 (GB706—1988) .....	246
参考文献 .....	248

# 绪 论

工程力学是一门研究物体机械运动一般规律和有关构件的强度、刚度、稳定性理论的科学，它包括静力学、材料力学、运动学和动力学的有关内容，内容极其广泛，在工农业生产、建筑、交通运输、航空、航天、日常生活等领域均有广泛的应用。本书所述的是工程力学的基础内容。

## 1. 实际工程中的力学问题

在工农业生产、建筑、交通运输、航空航天等工程中，广泛地运用各种机械设备和工程结构，各种机械设备和工程结构都是由若干个基本的零、部件按照一定的规律组成的，这些零、部件称为构件。当机械工作时，组成机械的各构件都会受到来自外部和内部的力的作用。这些力在工程上称为载荷。

在载荷的作用下，如图 0-1 所示，构件可能处于平衡或运动的状态，同时构件也发生变形，这些变形可能是伸长或缩短，可能是弯曲，甚至是断裂等。由于构件的尺寸、材料等不同，构件的承载能力也不同。例如，起重机的横梁，若载荷过大，则横梁会断裂，起重机无法工作；机床的主轴若变形过大，将造成齿轮间不能正常啮合，从而影响加工精度等。这些问题就是我们将在本书中解决的构件的承载能力问题。此外，在机械工程中我们也需要分析物体运动状态，分析力与运动状态改变的关系。本书将为分析和解决这些问题提供必要的知识和方法。

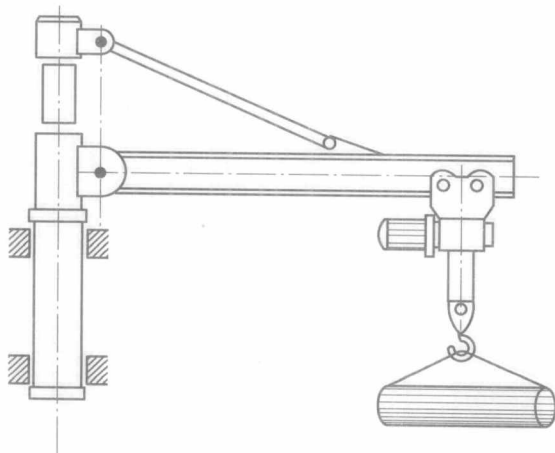


图 0-1 构件处于平衡状态

## 2. 工程力学的主要内容和任务

工程力学是研究构件在载荷的作用下的运动规律和平衡规律，以及构件的承载能力的一门学科，本课程的主要内容分为以下四个模块。

(1) 静力学。这一模块研究的是物体在力的作用下的平衡规律。即在物体平衡时，作用力应满足的条件和物体受力分析的方法。

(2) 材料力学。这一模块研究的是构件在外力作用下的受力、变形和破坏规律，并解决构件的强度、刚度和稳定性问题。

(3) 运动学。这一模块研究的是物体的空间位置随时间的变化规律，而不考虑引起位置变化的原因。要建立物体运动规律的描述方法，确定物体运动特征的量，如点的轨迹、速度、加速度，刚体转动的角速度和角加速度等。

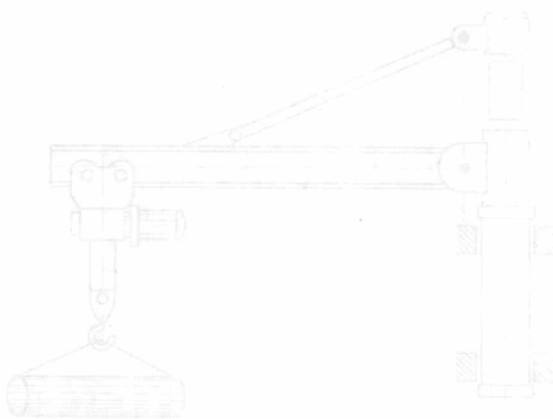
(4) 动力学。这一模块研究的是物体运动与力之间的关系，并解决两类动力学——已知力求运动和已知运动求力的问题。

## 3. 工程力学的研究对象及模型

实际问题中构件的形状多种多样，任何物体在外力的作用下都要发生形变。根据问题的不同角度，我们将实际问题简化为不同的模型，当我们研究物体整体的运动，它的大小和形状不影响我们所研究的问题时，我们可以将其视为质点，如地球绕太阳的公转运动。当我们研究物体平衡问题时，我们可将其视为刚体，如起重机横梁的平衡问题。而研究物体受力作用产生变形效果时，物体就不能视为刚体，这时我们将其视为变形固体，如起重机横梁的变形问题。质点、刚体、变形固体是理想化模型。有关概念将会在后面介绍。

## 4. 工程力学的研究方法

从实践出发或通过实验观察，经过抽象、综合、归纳，建立公理、提出基本假设，运用数学推理得到定理和结论，再回到实践中指导实践，即实践—理论—实践。





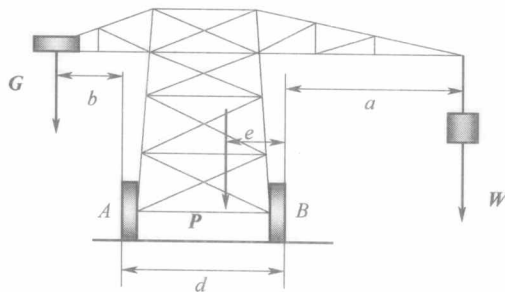
## 第一模块

# 静力学

这一模块主要研究物体在力系的作用下的平衡规律。

工程实例：塔吊的安全问题。

已知起重机重  $P = 300 \text{ kN}$ ，重物重  $W = 100 \text{ kN}$ ， $e = 0.5 \text{ m}$ ， $a = 5 \text{ m}$ ， $d = 2.5 \text{ m}$ ， $b = 4 \text{ m}$ ，求起重机在满载和空载时都不致翻倒的配重  $G$  应多大？





# 第一章 静力学的基本概念和受力分析

静力学是研究物体平衡的科学，重点解决刚体在满足平衡条件的基础上如何求解未知力的问题。为了研究这个问题，现介绍静力学的一些基本概念，以及力对物体作用的最基本性质。



## 1.1 静力学的基本概念

### 一、刚体的概念

刚体是指在力的作用下，大小和形状都不变的物体。刚体是真实物体抽象化的模型。在实际问题中，物体在力的作用下都会产生不同程度的变形。但当物体的变形很小或变形对研究的问题没有实质的影响时，则物体可抽象为刚体。一个物体能否视为刚体，因问题而作决定。如在研究起重机横梁的平衡问题时，可将其视为刚体，但是在研究起重机横梁的承载能力时则必须考虑其变形问题。

### 二、平衡的概念

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或做匀速直线平移的状态。在工程技术问题中，常把固定于地球上的参考系视为惯性参考系，这样，平衡就是物体相对于地球静止或做匀速直线平移的状态。

### 三、力和力系的概念

#### 1. 力的概念

力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变化，或者使物体发生变形。

力使物体的运动状态发生变化的作用效应，叫做力的外效应；而使物体发生变形的效应，则叫做力的内效应。而力对物体的作用效应，取决于力的大小、方向和作用点，通常被称为力的三要素。

力的大小反映了物体相互机械作用的强度。力的单位（国际单位制）：牛顿（N）或千牛顿（kN）。力的方向指的是静止质点在该力作用下开始运动的方向。沿该方向画出的直线称为力的作用线。力的作用点是物体相互作用位置的抽象，

实际上力的作用位置一般并不是一个点，而是作用在物体一定的面积上。当作用面积很小时，可将其抽象为一个点，称为力的作用点，这时作用力称为集中力；反之，接触面积较大，不能抽象为一个点时，则将作用于这个面积上的力称为分布力。分布力作用的强度用单位面积上地力的大小  $q$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) 来度量，称为载荷集度。对于线分布载荷，其载荷集度的单位为  $\text{N}/\text{m}$ 。

力的三要素说明，力可以用一带箭头的线段来表示（见图 1-1）。线段  $AB$  的长度按一定比例表示力的大小，线段的方位和箭头指向（由  $A$  到  $B$ ）表示力的方向，线段的始端  $A$  表示力的作用点。力是矢量。

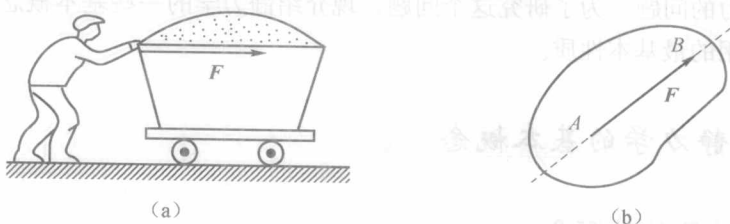


图 1-1 力

(a) 力的三要素示意图；(b) 力的三要素线段表示图

## 2. 力系的概念

工程中把作用于物体上的一群力称为力系。

根据力系中力的作用线是否在同一平面，力系可分为：平面力系和空间力系；根据力系中力的作用线特征，力系可分为：汇交力系、力偶系、平行力系和任意力系；根据力系的作用效果，即最简的等效力系，力系可分为：平衡力系、合力、合力偶和力螺旋。

等效力系：用一个力系代替另一个力系，而不改变原力系对刚体的效应，称此两力系为等效力系。

平衡力系：物体在力系作用下处于平衡，我们称这个力系为平衡力系。

合力：力系可等效为一个力。

合力偶：力系可等效为一个力偶。

力螺旋：力系可等效为一个力和一个力偶，这个力的作用线与此力偶的力偶矩方向平行。这在空间力系时才可能存在。

对力系研究的内容包括：各力系的简化、合成结果和力系的平衡条件。

## 1.2 静力学公理

### 一、二力平衡公理

刚体只受两个力作用而处于平衡状态时，当且仅当这两个力的大小相等，方

向相反，且作用在同一直线上，即二力平衡（简称等值、反向、共线）。

$$F_1 = -F_2$$

二力平衡公理是力学最简单力系平衡的必要和充分条件，是研究力系平衡的基础。但是它只适用于一个刚体（见图 1-2），对于非刚体或多个刚体（图 1-3、图 1-4），只是必要的，不是充分的，即并非满足受等值、反向、共线的作用力就平衡。

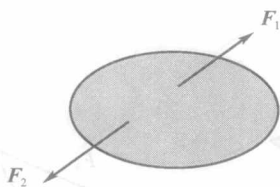


图 1-2 刚体二力平衡示意图



图 1-3 一对平衡力作用于变形体



图 1-4 一对平衡力作用于多体

二力构件：只在两个力作用下平衡的刚体叫二力构件，如图 1-5、图 1-6 所示。

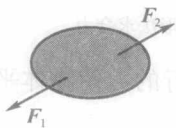


图 1-5 二力构件平衡力



图 1-6 二力杆平衡力

## 二、增减平衡力系公理

增减平衡力系公理：作用在已知力系的刚体上，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果。

推论 1：作用于刚体上某点的力，可沿其作用线移到刚体上任意一点，而不改变该力对刚体的作用效果，即力的可传原理（只适用于刚体），如图 1-7 所示（ $F_2 = -F_1 = F$ ）。

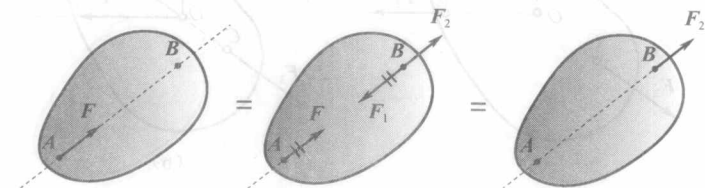


图 1-7 力的可传递性原理示意

因此，对刚体来说，力的三要素为：大小、方向、作用线。

力是滑移矢量。

### 三、力的平行四边形法则和三角形法则

作用于物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力也作用于该点上。合力的大小和方向，用这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-8 (a) 所示。合力（合力的大小与方向）：

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \text{ (矢量和)}$$

亦可用力三角形求得合力矢，见图 1-8 (b)、(c)。

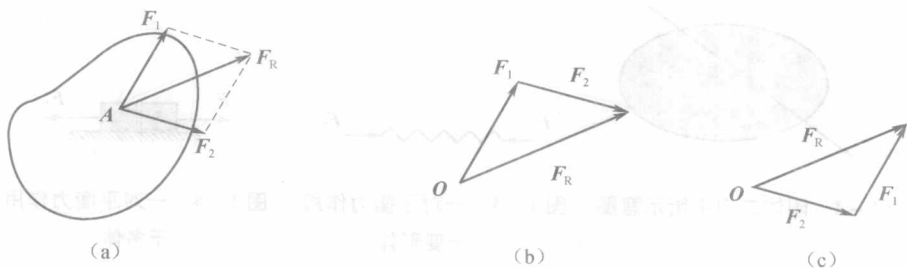


图 1-8 合力

(a) 平行四边形法求合力；(b)，(c) 力三角形法求合力

**推论 2：**若作用于物体同一平面上的三个互不平行的力使物体平衡，则它们的作用线必汇交于一点，即三力平衡汇交定理。

**证明：**

(1) 如图 1-9 所示，物体的 A、B、C 三点有共面且互不平行的三个力  $F_1$ ， $F_2$ ， $F_3$  作用，使物体平衡。

(2) 根据力的可传递性原理，将其中任意二力分别沿其作用线移到他们的交点 O 上，然后求两力  $F_1$  和  $F_2$  的合力  $F$ ，由力的平行四边形法则

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

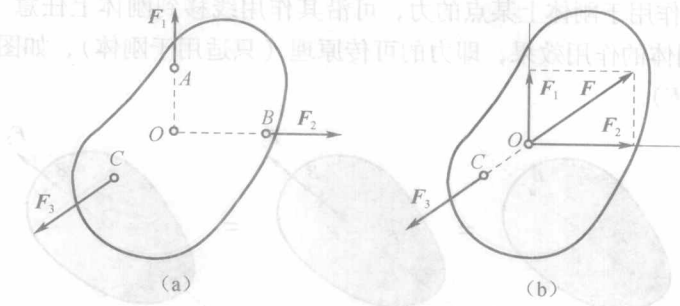


图 1-9 使物体平衡的三个共面且不平行的力

(3) 根据二力平衡公理， $F$  与  $F_3$  必在同一直线上，所以  $F_3$  必通过点 O，于是  $F_1$ ， $F_2$ ， $F_3$  均通过点 O。

#### 四、作用力与反作用力公理

两个物体间的作用力与反作用力总是成对出现，且大小相等，方向相反，沿同一直线，分别作用在这两个物体上，即作用力与反作用力公理，如图 1-10 所示。

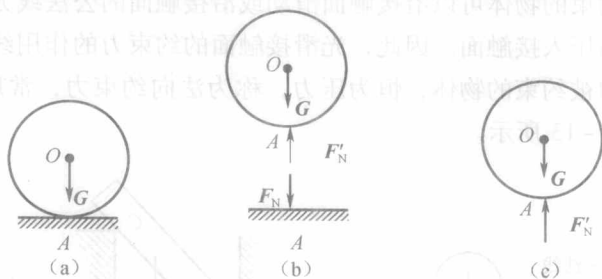


图 1-10 作用力与反作用力

### 1.3 约束与约束力

**约束：**限制某物体运动的其他物体称为该物体的约束。工程中常见的约束类型有柔性体约束、光滑面约束、铰链约束和固定端约束。

**约束力：**约束必然对物体有力的作用，这种力称为约束力。约束力属于被动力。

- (1) 约束力的作用点就是约束与被约束物体的相互接触点。
- (2) 约束力方向总是与约束所能限制的被约束物体的运动方向相反。

#### 一、柔性体约束

由线绳、链条、传动带等所形成的约束称为柔性体约束，柔性体本身只能承受拉力，不能承受压力。其约束特点是：限制物体沿柔性体伸长的方向运动，只能给物体提供拉力，用符号  $F_T$  表示。

如图 1-11 (a) 中用两条绳索吊住一只球，绳索分别作用于球的拉力，为  $F_{T1}$ ， $F_{T2}$ ，它和球的重力  $G$  平衡。图 1-11 (b) 中胶带对胶带轮的拉力为  $F_{T1}$ ， $F'_{T1}$ ， $F_{T2}$ ， $F'_{T2}$  均属于柔性约束力。

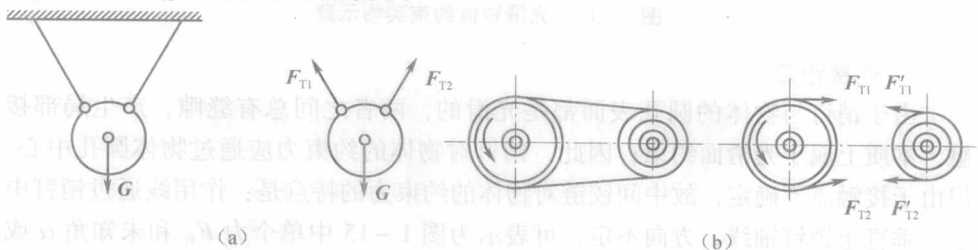


图 1-11 柔性体约束

## 二、光滑约束面约束

两个相互接触的物体，摩擦不计，这种光滑面所构成的约束称为光滑面约束。此时，被约束的物体可以沿接触面滑动或沿接触面的公法线方向脱离，但不能沿公法线方向压入接触面。因此，光滑接触面的约束力的作用线，沿接触面公法线方向，指向被约束的物体，恒为压力，称为法向约束力，常用  $F_N$  表示，如图 1-12 和图 1-13 所示。

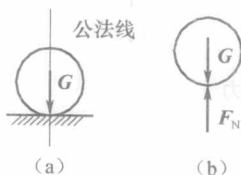


图 1-12 光滑接触面约束 (一)

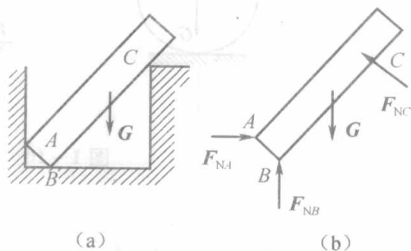


图 1-13 光滑接触面约束 (二)

## 三、光滑铰链约束

由铰链构成的约束，称为铰链约束。两个带有圆孔的物体，用光滑圆柱形销钉相连接。受约束的两个物体都只能绕销钉轴线转动，此时，销钉便对被连接的物体沿垂直于销钉轴线方向的移动形成约束，称为圆柱形铰链约束，见图 1-14。一般根据被连接物体的形状、位置及作用的不同，可分为以下几种形式。

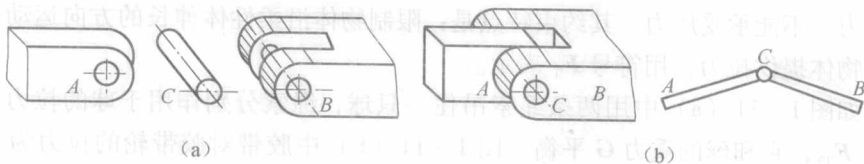


图 1-14 光滑铰链约束实物示意

### 1. 连接铰链

由于销钉与物体的圆孔表面都是光滑的，两者之间总有缝隙，产生局部接触，本质上属于光滑面约束；因此，销钉对物体的约束力应通过物体圆孔中心。但由于接触点不确定，故中间铰链对物体的约束力的特点是：作用线通过销钉中心，垂直于销钉轴线，方向不定，可表示为图 1-15 中单个力  $F_R$  和未知角  $\alpha$  或两个正交分力  $F_{Rx}$ 、 $F_{Ry}$ 。 $F_R$  与  $F_{Rx}$ 、 $F_{Ry}$  为合力与分力的关系。



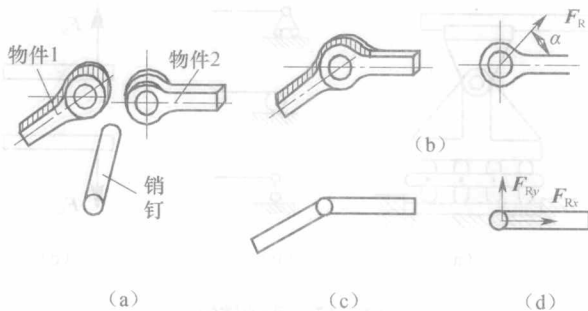


图 1-15 连接铰链

### 2. 固定铰链约束

两个构件中，有一个是固定的，称为支座，将构件用作圆柱形销钉与支座连接，并将支座固定在支承物上，就构成了固定铰链支座，如图 1-16 (a) 所示，简图如图 1-16 (b) 所示。构件可以绕销钉转动，但不能在垂直于销钉轴线平面内的任何方向移动。当构件有运动趋势时，构件与销钉将在某处接触，约束力通过销钉与构件的接触点。这个接触点的位置随构件受力情况的不同而不同，约束力的方向是未知的。所以，固定铰支座的约束力在垂直于销钉轴线的平面内，通过销钉中心，方向不定，如图 1-16 (c) 中的  $F_A$  可以分解为两个互相垂直的分力  $F_{Ax}$  和  $F_{Ay}$  来表示。

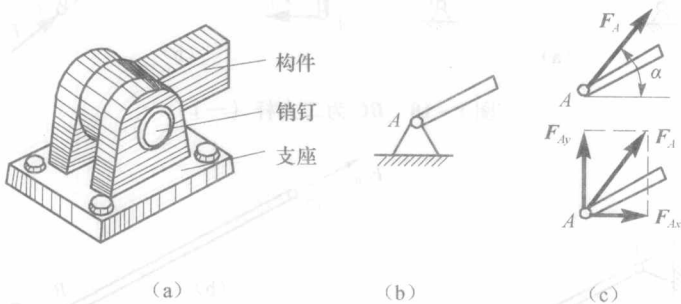


图 1-16 固定铰链

### 3. 活动铰链约束

支座可以移动，将固定铰链支座底部安放若干滚子，并与支承面接触，则构成活动铰链支座，又称辊轴支座 [图 1-17 (a)]。这类支座常见于桥梁、屋架等结构中，通常用简图 1-17 (b) 表示。活动铰链支座只能限制构件沿支承面垂直方向的移动，不能阻止物体沿支承面的运动或绕销钉轴线的转动。因此活动铰链支座的约束力通过销钉中心，垂直于支承面，指向不定，如图 1-17 (c) 所示。