



高等学校精品规划教材

理论力学

LILUN LIXUE

刘福胜 韩克平 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校精品规划教材

理论力学

主 编 刘福胜 (山东农业大学)
 韩克平 (内蒙古农业大学)
副主编 戚乐磊 (甘肃农业大学)
 王蔚书 (宁夏大学)
 郑九华 (山东农业大学)
参 编 赵淑红 (东北农业大学)
 刘 燕 (河北农业大学)
 姜德贵 (山东农业大学)



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是按照教育部关于工科理论力学的教学基本要求而编写的教材,是高等学校精品规划教材之一。本书分为三篇:静力学、运动学和动力学。静力学部分主要讲述物体受力分析的方法和力系的简化与平衡;运动学部分主要从几何的观点论述质点和刚体的运动规律;动力学部分讨论物体的运动及其受力的关系。

本书适合高等院校工程类专业师生使用;也可作为相关专业的电大、夜大和函授的自学教材,并可供其他专业学生和技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

理论力学 / 刘福胜, 韩克平主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

高等学校精品规划教材

ISBN 7-5084-3446-3

I. 理... II. ①刘... ②韩... III. 理论力学—高等学校—教材 IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 020247 号

书 名	高等学校精品规划教材 理论力学
作 者	刘福胜 韩克平 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 16 印张 379 千字
版 次	2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	26.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是按照教育部关于工科理论力学的教学基本要求编写，是《高等学校精品规划教材》之一，适合高等院校工程类专业师生使用。教材内容分为三篇：静力学、运动学和动力学。为适应我国高等教育培养学生的综合能力和素质的需要，教材适当提高了起点，减少了与普通物理学等课程的重复内容。本教材可以作为 50~80 学时的理论力学课程教学用书，也可以作为工程力学课程的理论力学部分教学的教材。还可作为相关专业的电大、夜大和函授的自学教材，并可供其他专业学生和技术人员参考。

本书由山东农业大学刘福胜教授和韩克平教授任主编。本教材集中了多所大学老师们的多年教学经验和智慧。

本教材编写分工如下：第一章、第二章由郑九华编写；第三章、第四章由刘福胜编写；第五章由刘燕编写；第六章、第七章由韩克平编写；第八章由姜德贵编写；第九章由赵淑红编写；第十章、第十一章、第十二章由戚乐磊编写；第十三章、第十四章由王蔚书编写。

由于作者水平所限，教材中不妥之处，敬请读者指正。

作 者

2006 年 2 月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一篇 静力学

第一章 力的基本概念和物体受力分析	3
-------------------	---

第一节 基本概念和公理	3
-------------	---

第二节 约束与约束反力	7
-------------	---

第三节 受力分析和受力图	10
--------------	----

小结	14
----	----

思考题与习题	14
--------	----

第二章 平面汇交力系与平面力偶系	18
------------------	----

第一节 力在坐标轴上的投影	18
---------------	----

第二节 平面汇交力系的简化与平衡	19
------------------	----

第三节 力矩与力偶	21
-----------	----

第四节 平面力偶系的简化与平衡	23
-----------------	----

小结	24
----	----

思考题与习题	25
--------	----

第三章 平面一般力系	30
------------	----

第一节 平面力系的简化	31
-------------	----

第二节 平面一般力系的平衡	36
---------------	----

第三节 物体系统的平衡	40
-------------	----

第四节 静定平面桁架	43
------------	----

小结	47
----	----

思考题与习题	48
--------	----

第四章 摩擦	55
--------	----

第一节 滑动摩擦	55
----------	----

第二节 摩擦角与自锁现象	57
--------------	----

第三节 考虑摩擦时的物体平衡	58
----------------	----

第四节 滚动摩擦的概念	61
-------------	----

小结	62
----	----

思考题与习题	62
--------	----

第五章 空间力系	66
第一节 空间汇交力系	67
第二节 空间力偶系	71
第三节 空间任意力系	74
第四节 物体的重心	83
小结	87
思考题与习题	87

第二篇 运 动 学

第六章 点的运动学	93
第一节 点的运动方程	93
第二节 点的速度与加速度	95
第三节 点的速度与加速度的直角坐标法	96
第四节 点的速度和加速度在自然轴上的投影	97
小结	102
思考题与习题	103
第七章 刚体的基本运动	105
第一节 刚体的平行移动	105
第二节 刚体的定轴转动	106
第三节 转动刚体上各点的速度和加速度	107
第四节 轮系的传动比	109
第五节 以矢量表示角速度和角加速度 以矢积表示点的速度和加速度	111
小结	113
思考题与习题	113
第八章 点的合成运动	118
第一节 绝对运动、相对运动和牵连运动	118
第二节 点的速度合成定理	119
第三节 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	123
第四节 牵连运动为定轴转动时点的加速度合成定理	126
小结	131
思考题与习题	132
第九章 刚体的平面运动	138
第一节 概述	138
第二节 平面图形内各点的速度	140
第三节 平面图形内各点的加速度	144
小结	149
思考题与习题	150

第三篇 动力学

第十章 质点动力学基本方程	158
第一节 动力学基本定律	158
第二节 质点运动微分方程	159
第三节 质点动力学的两类问题	160
第四节 相对运动动力学方程	163
小结	165
思考题与习题	165
第十一章 动量定理	169
第一节 动量与冲量	169
第二节 质点系的动量定理	171
第三节 质心运动定理	175
小结	180
思考题与习题	181
第十二章 动量矩定理	188
第一节 质点系的动量矩定理	188
第二节 定轴转动微分方程	192
第三节 刚体的转动惯量	195
第四节 质点系相对于质心的动量矩定理	200
第五节 刚体平面运动微分方程	201
小结	204
思考题与习题	205
第十三章 动能定理	212
第一节 功、势力场和势能	212
第二节 质点系的动能定理	218
第三节 机械能守恒定律	224
第四节 普遍定理的综合应用	225
小结	228
思考题与习题	230
第十四章 达兰贝尔原理	236
第一节 惯性力与达兰贝尔原理	236
第二节 刚体惯性力系的简化及应用	239
小结	243
思考题与习题	244
参考文献	248

绪 论

一、理论力学的研究对象

理论力学是研究物体机械运动的一门学科。机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化，它是生活和生产实际中最常见的一种运动形式，平衡或静止只是它的特例。本课程主要研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动，它以伽利略和牛顿的基本定律为基础，属于古典力学的范畴。

二、理论力学的研究内容

本课程的内容包括三篇：

(1) 静力学：主要研究物体受力的分析方法，力系的简化与平衡以及平衡规律的应用。

(2) 运动学：从几何的角度研究物体在空间的运动规律（如运动方程、速度和加速度），而不涉及引起物体运动变化的物理原因。

(3) 动力学：主要研究物体的运动与作用在物体上的力之间的关系。

以上三篇中，动力学是核心，这是因为静力学是动力学的特例，运动学除其运动分析的独立意义外，是动力分析的基础。

三、理论力学的研究方法

本课程具有严密的逻辑性，首先建立起研究对象的力学模型和基本概念、公理，然后运用数学演绎方法推导出一系列定律、方程或公式，建立一套完整的知识系统，经实践检验其真理性并修正后，最后形成理论力学的内容体系。因此，理论力学的研究方法可概括为抽象化、数学演绎和理论联系实际三种方法。

四、理论力学的特点和学习方法

理论力学课程对理工科的学生既有基础性又有应用性。基础性是指理论力学以一般质点系为力学模型建立起的基本定理和方程具有普遍意义，是材料力学、结构力学、机械设计基础以及流体力学等许多后继课程的基础；应用性是指动力学基本规律在工程实际中的广泛应用性，无论是历史较久的土木、水利、建筑、机械、船舶等工程，还是后起的航空航天、核技术、生物医学等工程，都直接或间接地涉及到理论力学的基本概念、定律和方法。因此理论力学是理工科的一门重要专业基础课。

要学好理论力学课程，首先要准确地理解基本原理和方法，对典型例题进行分析计算、深入思考，并通过一定的习题演算掌握所学的知识；其次是要加强应用基本原理解决

工程问题的实践练习，学习对工程实际问题的简化方法和建模的原理以及求解工程实际问题的模式；最后要养成独立思考、自己研究问题的良好习惯，可按章节写出小结，也可按专题撰写研究报告，做到在学习中研究，在研究中学习，逐步提高自己提出问题、分析问题和解决问题的能力。

第一篇 静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下的平衡问题。平衡是物体机械运动的特殊情况。若物体相对于地面保持静止或做匀速直线运动，则称物体处于平衡状态。

在静力学中主要研究以下三个主要问题：

- (1) 物体的受力分析。
- (2) 力系的简化。
- (3) 物体在力系作用下的平衡条件。

静力学是力学体系的基础部分，在工程实际中有着广泛的应用。例如，机械设计中零部件的受力计算，土木工程中房屋、桥梁、水坝、闸门和船体、车体的强度设计等，都需要先分析构件的受力情况，然后应用静力学的平衡条件求出未知力，再进一步考虑选择什么样的材料，设计构件的几何尺寸等。不仅如此，静力学中的力系简化理论和物体的受力分析方法，还是研究动力学问题的基础。

第一章 力的基本概念和物体受力分析

静力学的基本概念和公理是从长期的生产实践和科学实验中总结概括出来的，是研究力系的简化和平衡的基础。本章将介绍静力学中的一些基本概念和静力学公理，以及物体的受力分析和受力图。

第一节 基本概念和公理

一、基本概念

1. 刚体的概念

在静力学中，常把所研究的物体抽象化为刚体。所谓刚体，是指在力的作用下不变形的物体，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。刚体是一个抽象化的力学模型。实际的物体在力的作用下，都会产生程度不同的变形。但是，如果物体的变形很小，而不影响所研究问题的实质，就可以忽略变形，把这物体看成刚体。这种抽象化的方法，在研究问题时是非常必要的。因为只有忽略一些次要的、非本质的因素，才能充分揭露事物的本质。

一个物体能否看成刚体，不仅取决于变形的大小，而且与所研究问题的性质有关。如果在所研究的问题中，物体的变形成为主要因素时，就不能把物体看成是刚体，而要看成变形体。例如，在研究飞机的平衡或飞行规律时，我们可以把飞机看成是刚体；可是在研

究飞机的颤振问题时，机翼等的变形虽然微小，但必须把飞机看成变形体。

在静力学中，所研究的物体只限于刚体，故又称为刚体静力学，它是研究变形体力学（材料力学、结构力学）的重要基础。

2. 力的概念

力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的运动状态和形状发生改变。力使物体的运动状态发生改变的效应称为外效应，而使物体的形状发生改变的效应则称为内效应。对于刚体，只需要考虑力的外效应。

力的作用效果取决于三个要素，即大小、方向和作用点。力是矢量，用 F 表示。力的国际单位是牛顿或千牛顿，其代号为牛（N）或千牛（kN）。

同时作用于物体上的一组力称为力系。物体处于平衡状态时，作用于物体上的力系称为平衡力系。此时力系所满足的条件称为平衡条件。如果作用于物体上的力系可以用另一个力系代替，而不改变物体的原有状态，则称这两个力系等效。如果一个力与一个力系等效，则这个力称为该力系的合力。如果用一个简单的力系等效地代替一个复杂的力系，则称为力系的简化。

二、静力学公理

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，合力也作用于该点，合力的大小和方向，由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-1 (a) 所示，可表示为

$$F_R = F_1 + F_2$$

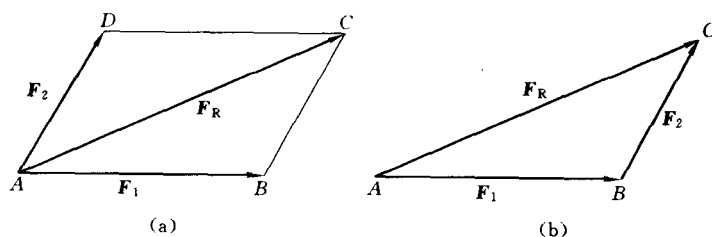


图 1-1

在用矢量加法求合力时，为了方便，可以不画出整个的平行四边形。如图 1-1 (b) 所示，从 A 点作一个与力 F_1 大小相等、方向相同的矢量 AB ，过 B 点作一个与力 F_2 大小相等、方向相同的矢量 BC ，连接 A 和 C 两点，则矢量 AC 即表示力 F_1 、 F_2 的合力 F_R 。这种求合力的方法，称为力三角形法则。但应注意，力的三角形只表明力的大小和方向，它不表示力的作用点或作用线。

应该指出，这一公理对刚体或变形体都是适用的。

公理 2 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力，使刚体处于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 1-2 所示，可表示为

$$F_1 = -F_2$$

这个公理总结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。对于刚体，这个条件既是必要的又是充分的，但对于变形体，这个条件是不充分的。如图 1-3 所示，软绳受两个等值反向的拉力作用可以平衡，而受两个等值反向的压力作用就不能平衡。

二力平衡公理只适用于刚体。

只在两个力作用下处于平衡的构件称为二力构件（或二力体）。二力构件的受力特点是：两个力必沿这两个力作用点的连线。在工程实际中经常遇到二力构件，例如，矿井巷道支护的三铰拱，如图 1-4 所示，忽略 BC 部分的自重时，就可把 BC 部分看成是二力构件。

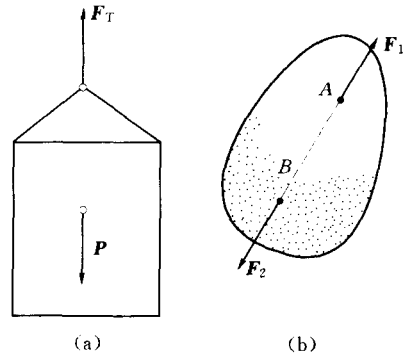


图 1-2

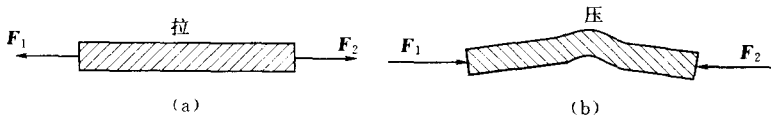


图 1-3

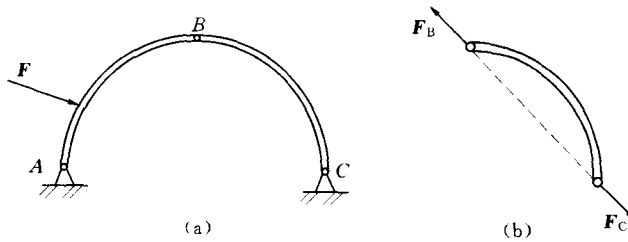


图 1-4

公理 3 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的任意力系中，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。

这个公理对于研究力系的简化很重要，它只适合于刚体，不适合于变形体。对于变形体，虽然不改变整个物体的运动状态，但将影响物体的变形。

根据上述公理可得如下推论。

推论 1 力的可传性原理。

作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线移动到刚体上的任意一点，并不改变该力对刚体的作用。

证明：设力 F 作用在刚体上 A 点，如图 1-5 (a) 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 ，在 B 点加上两个互相平衡的力 F_1 和 F_2 ，并且使力矢 F_2 等于 F ，即 $F = F_2 = -F_1$ 如图 1-5 (b) 所示。力 F 和 F_1 满足二力平衡条件组成平衡力系，

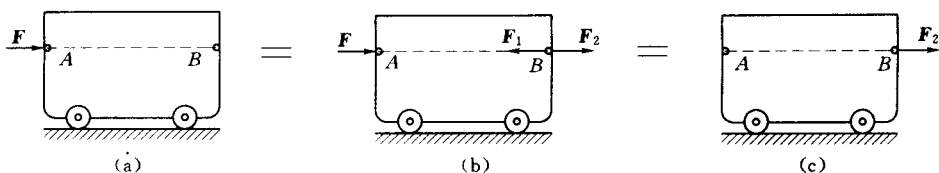


图 1-5

根据加减平衡力系原理，又可以把这两个力减去，这样只剩下力 F_2 ，如图 1-5 (c) 所示。原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 等效，而力 F_2 就是原来的力 F ，只是作用点已移到了 B 点。

由力的可传性可知，对于刚体来说，力的作用效应与力的作用点在其作用线上的位置无关。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。

作用于刚体上的力矢量可以沿着其作用线移动，这种矢量称为滑动矢量。

力的可传性原理只适用于刚体，而不适用于变形体。

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，则此三力必在同一平面上，且第三个力的作用线也通过该汇交点。

证明：如图 1-6 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 ， F_1 和 F_2 的作用线汇交于 O 点。根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ，然后根据力的平行四边形法则将其合成，得合力 F_{12} ，则力 F_3 与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线，所以力 F_3 必须与力 F_1 和 F_2 共面，且通过力 F_1 和 F_2 的交点 O 。定理得证。

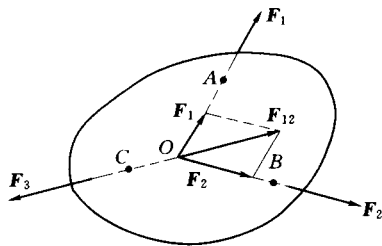


图 1-6

公理 4 作用与反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在，大小相等、方向相反，沿同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。

公理 4 指出，力总是成对出现的，有作用力必有一反作用力，但分别作用在两个不同的物体上，因此不是一对平衡力。

这一公理对刚体或变形体都是适用的。

公理 5 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，则平衡状态保持不变。

如图 1-3 所示，软绳在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡，若将此软绳刚化为刚体，其平衡状态保持不变。软绳在等值、反向、共线的两个压力作用下不能平衡，这时就不能将软绳刚化为刚体。

刚化原理提供了把变形体看作为刚体的条件。若变形体处于平衡状态，则作用其上的

力系一定满足刚体静力学的平衡条件。在刚体静力学的基础上，考虑变形体的特性，可进一步研究变形体的平衡问题。

第二节 约束与约束反力

在力学中，通常把所考虑的物体分为：自由体和非自由体。运动不受限制的物体称为自由体。例如：飞行的飞机、炮弹和火箭等，它们在空间的运动不受限制。而有些物体常受到周围物体对它的限制，使得某些方向的位移成为不可能。例如：吊在天花板上的电灯，受到链条的限制不能下落；机车受到铁轨的限制只能沿铁轨运动；机床转轴受到轴承的限制只能转动等等。运动受到限制的物体称为非自由体。

一、约束

对非自由体的某些运动起限制作用的周围物体称为约束。例如：限制电灯的链条，是电灯的约束；限制机车的铁轨，是机车的约束；限制转轴的轴承，是转轴的约束等等。

二、约束反力

约束限制了物体的运动，也就是说约束能够起到改变物体运动状态的作用，所以约束对物体的作用实际上是力，这种力是由于阻碍物体位移而引起的，属于被动力、未知力。我们把这种约束对物体的作用力称为约束反力，简称反力。

与约束反力相对应，能主动引起物体位移或使物体有运动趋势的力称为主动力（或荷载）。例如：重力、水压力、风力等。

因为约束反力是限制物体位移的，所以它的作用点应在约束与被约束物体相互接触之处，它的方向应与约束所能限制的位移方向相反。应用这个准则，可以确定约束反力的方向或作用线的位置。至于约束反力的大小，将由平衡条件求出。

在静力学中，主动力往往是给定的，而约束反力是未知的。因此，对约束反力的分析，就成为受力分析的重点。

下面介绍几种常见的约束类型和确定约束反力方向的方法。

三、约束的基本类型

1. 柔性约束

属于这类约束的有绳索、链条和皮带等。绳索如图 1-7 (a) 所示，绳索只能限制物

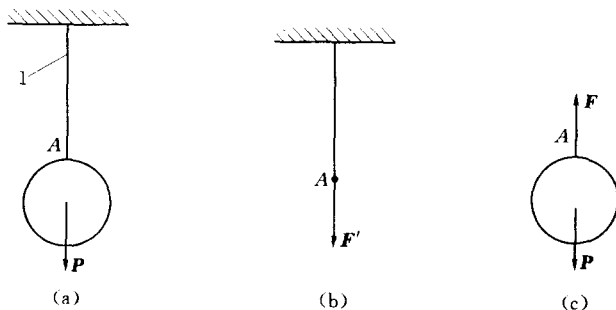


图 1-7

体沿着它的中心线离开的位移，而不能限制其他方向的位移，所以它对物体的约束反力只能是拉力。因此，绳索对物体的约束反力，作用在接触点，方向沿着绳索中心线而背离物体，常用 F 或 F_T 表示，见图 1-7 (c)。

链条或皮带也都只能承受拉力。当它们绕过轮子时，约束反力沿着轮缘的切线方向，如图 1-8 所示。

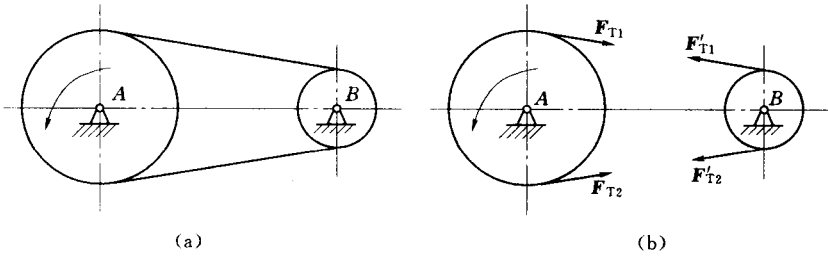


图 1-8

2. 光滑面约束

当物体与固定约束或活动约束间的接触表面非常光滑，摩擦可以忽略不计时，就可简化为光滑面约束。这类约束只能限制物体沿接触面公法线而朝向约束内部的位移。因此，光滑面约束的约束反力作用在接触点，沿接触面的公法线指向被约束物体。这种约束反力又叫法向反力，常用 F_N 表示。见图 1-9 中的 F_{NA} 和图 1-10 中的 F_{NB} 。

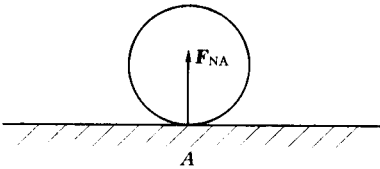


图 1-9

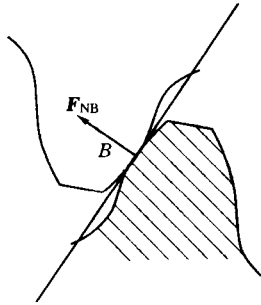


图 1-10

3. 光滑铰链约束

铰链是工程上常见的一种约束。它的构造是将构件在连接处钻上圆孔，再用圆柱形销子（又叫销钉）串联起来，使构件只能绕销钉的轴线转动，而不能相对移动。

(1) 固定铰链（固定铰链支座）。将构成铰链的一个构件固定在基础上，另一个构件可以绕销钉转动，这种铰链称为固定铰链或固定铰链支座，如图 1-11 (a) 所示。若略去销钉与构件之间的摩擦，则二者间的接触就是光滑面接触如图 1-11 (b) 所示。按照光滑面约束反力的特点，可知销钉给构件的约束反力应沿接触面在接触点的公法线，指向构件并通过铰链中心如图 1-11 (c) 所示。但因接触点的位置往往不能预先确定，所以约束反力的方向也就不能预先确定。因此，固定铰链约束反力的作用线通过铰链中心，大小、方向待定，为了研究问题方便，通常用两个正交的分量 F_x 、 F_y 表示，如图 1-11 (d) 所示。固定铰链支座的简图及约束反力如图 1-11 (e) 所示。

(2) 中间铰链（中间铰）。若构成铰链的两构件都可绕销钉转动，这种铰链称为中间

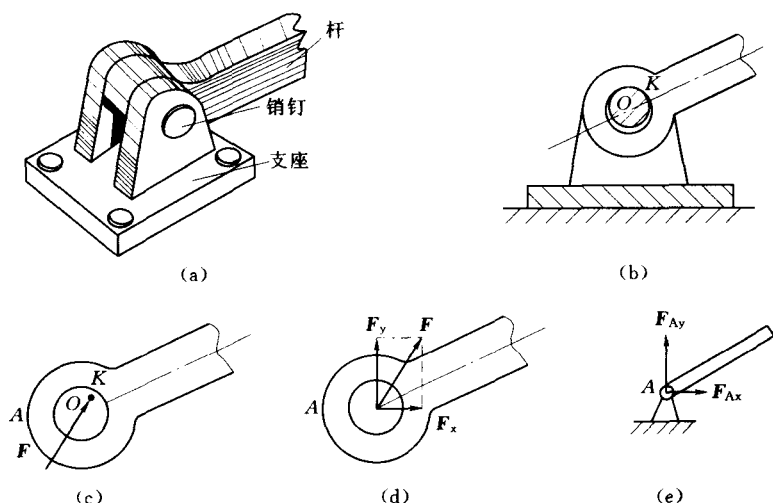


图 1-11

铰链，简称中间铰。如图 1-12 所示的四连杆机构中的铰链 A 、 B 都是中间铰链。中间铰的销钉对构件的约束，与固定铰支座的销钉对构件的约束相同，其约束反力通常也用两个正交的分量表示，如图 1-13 (a)、(b) 所示。

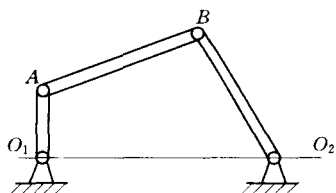


图 1-12

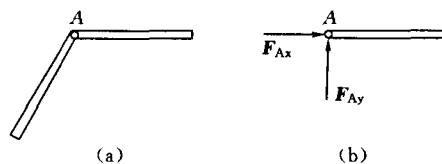


图 1-13

(3) 向心轴承。向心轴承可分为向心滑动轴承 [图 1-14 (a)] 和向心滚动轴承 [图 1-14 (b)]。转动轴可以在轴承孔内任意转动，也可以沿孔的中心线移动，但不能沿径向向外移动。这一约束与铰链相同，只不过此时圆轴本身是被约束体，向心轴承对轴的约束反力可用在垂直于轴线的平面内的两个分量来表示。其简图及约束反力如图 1-14 (c) 表示。

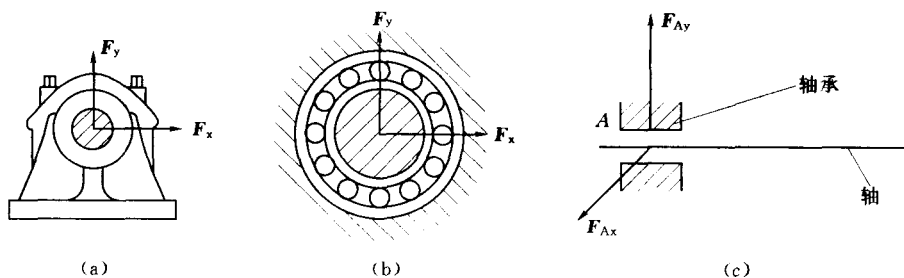


图 1-14

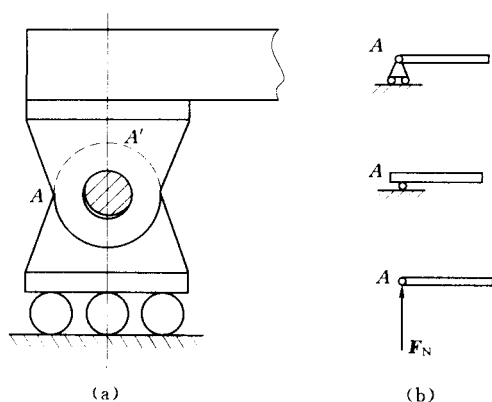


图 1-15

4. 辊轴支座

若将构成铰链的一个构件放在几个可滚动的滚柱上，滚柱支承在光滑的平面上，这就成为辊轴支座或称为滚动支座，如图 1-15 (a) 所示。辊轴支座只能限制物体沿与支承面垂直方向的位移，因此其约束反力垂直于支承面且通过铰链中心，其简图及约束反力如图 1-15 (b) 所示。

5. 球铰链约束

一根杆件，端部连一圆球，圆球放在支座的球窝里，杆件可绕过球心的任意轴转动，但不能移动，如图 1-16 (a) 所示，这种约束形式称为球铰链约束。若忽略摩擦，与固定铰链分析相似，其约束反力应是通过球心但方向不能预先确定的一个空间力，可用三个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 、 F_{Az} 表示，其简图及约束反力如图 1-16 (b) 所示。

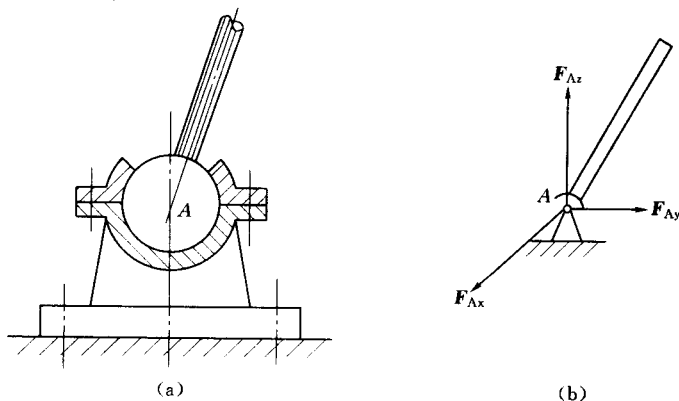


图 1-16

第三节 受力分析和受力图

无论是研究物体的平衡还是研究物体的运动规律，都需要分析物体的受力情况。分析物体受了几个力，每个力的作用位置和力的作用方向，这个过程称为物体的受力分析。

为了清晰地表示物体的受力情况，我们把所研究的物体，从周围物体中分离出来，单独画出它的简图，这个被分离出来的物体称为分离体或研究对象。这个步骤叫做选取研究对象或取分离体。在所得到的分离体上画上所有的主动力和约束反力，这样得到的图形称为受力图。

画受力图是对物体进行力学计算的重要步骤。如果受力图画错了，必将导致分析和计算的错误，故务必认真反复练习画受力图。