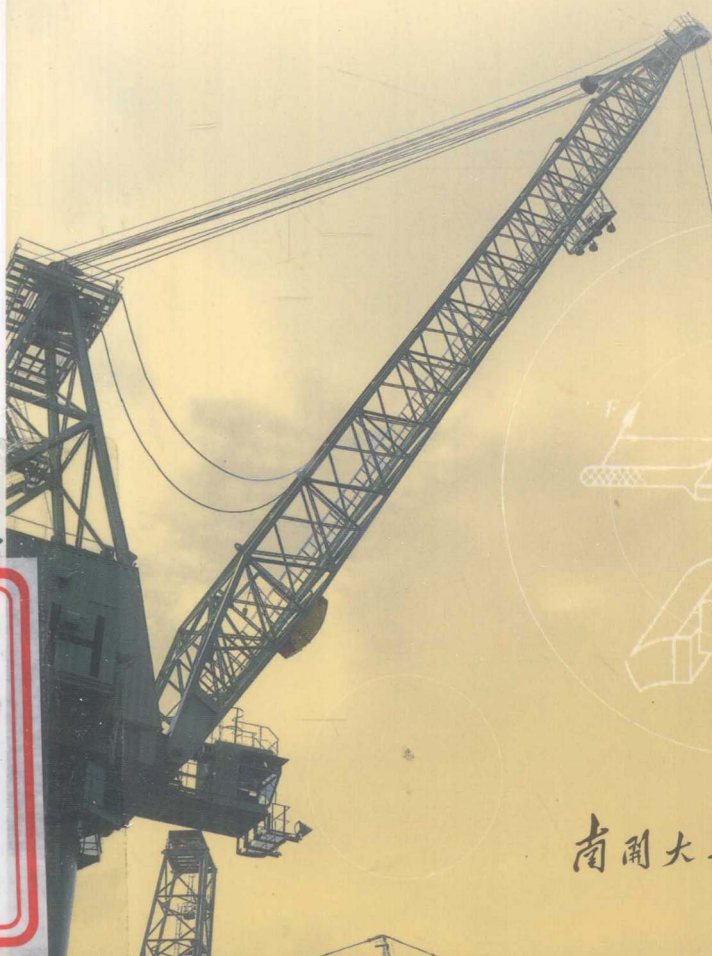




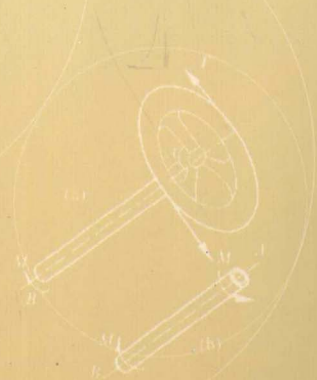
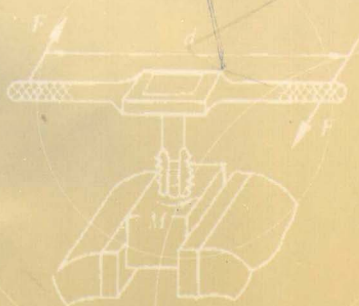
二十一世纪高职高专精品规划教材

# GONG CHENG LI XUE 工程力学

刘永强 王欣 主编



南开大学出版社





二十一世纪高职高专精品规划教材

# 工程力学

主 审 宋正和

主 编 刘永强 王 欣

副主编 郑春禄 金 莹 章志芳

李春明

参 编 杨俊通 张小粉 周淑辉

马彬彬

南开大学出版社出版

地址：天津市南开区卫津路24号 邮编：300071

电话：(010) 28603906 传真：(010) 28603906

(010) 28603906

(010) 28603906

南开大学出版社

## 内容简介

本教材本着高职教育的特色和“必需够用”的原则,对教材的内容作了精心的选择和安排,适应了高职教育强化实践课时的需要。

本书分静力学和材料力学两个模块,模块一包括:画物体受力图、平面力系的简化、平面力系的平衡、考虑摩擦时的平衡问题空间力系的平衡等五个课题;模块二包括:求拉(压)杆横截面上的内力、拉(压)杆强度计算、剪切和挤压的实用计算、绘制圆轴扭转时的扭矩图、圆轴扭转时的强度计算、绘制梁的弯矩图、弯曲强度计算、组合变形的强度计算、压杆的稳定性和构件的疲劳破坏等。

本书可作为高职院校机械、建筑、化工等专业工程力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 刘永强,王欣主编. — 天津:南开大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-310-03535-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第148786号

---

### 南开大学出版社出版发行

出版人:肖占鹏

地址:天津市南开区卫津路94号 邮政编码:300071

营销部电话:(010) 58697906

营销部传真:(010) 59003964 邮购部电话:(010) 59003964

\*

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

787×1092毫米 16开本 10.5印张 230千字

定价:21.00 元

如遇图书印装质量问题,请与本社营销部联系调换,电话(010) 58697906

版权所有 侵权必究

# 前 言

本教材本着高职教育的特色和“必需够用”的原则，对教材的内容作了精心的选择和安排，适应了高职教育中强化实践课时的需要。主要体现在以下几个方面：

1. 突出“以任务为导向”，进一步体现了实用性。尽可能地省略了烦琐的推导过程和无实用价值的内容。

2. 对于其他课程也涉及过的内容进行重新组织，既保证了内容体系的完整性，又避免了不必要的重复。

3. 对平面力系理论进行了重组，即先讲授任意力系，给出静力学力系化简和平衡分析的理论和方法，再把平面汇交力系、平面平行力系等作为特殊情况来讲解，并弱化其中的理论讲解。

4. 强度理论只作简单介绍，应力分析也只作定性分析和简单计算，以便于进行组合变形的强度计算。

本书由泰州职业技术学院刘永强、王欣任主编，沧州职业技术学院郑春禄、咸阳职业技术学院金莹、漯河职业技术学院章志芳、郑州旅游职业学院李春明任副主编，山西财经职业技术学院杨俊通、咸阳职业技术学院张小粉、河北农业大学海洋学院周淑辉、泰州职业技术学院马彬彬任参编。泰州职业技术学院宋正和审阅全书。

本书可作为高职院校机械、建筑、化工等专业工程力学课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

编 者



# 目 录

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 模块一 静力学           | 1   |
| 课题一 画物体受力图        | 1   |
| 课题二 平面力系的简化       | 12  |
| 课题三 平面力系的平衡       | 25  |
| 课题四 考虑摩擦时的平衡问题    | 33  |
| 课题五 空间力系的平衡       | 41  |
| 模块二 材料力学          | 55  |
| 课题六 求拉(压)杆横截面上的内力 | 57  |
| 课题七 拉(压)杆强度计算     | 66  |
| 课题八 剪切和挤压的实用计算    | 72  |
| 课题九 绘制圆轴扭转时的扭矩图   | 79  |
| 课题十 圆轴扭转时的强度计算    | 85  |
| 课题十一 绘制梁的弯矩图      | 90  |
| 课题十二 弯曲强度计算       | 98  |
| 课题十三 组合变形的强度计算    | 112 |
| 课题十四 压杆的稳定性       | 120 |
| 课题十五 构件的疲劳破坏      | 134 |
| 课题十六 应力应变分析       | 147 |
| 附录 型钢表            | 155 |
| 参考文献              | 162 |

## ◎ 模块一 静力学 ◎

静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律，主要进行以下分析。

(1) 物体的受力分析 研究物体或物体系统受到哪些力的作用，以及每个力的大小、方向、作用点。

(2) 力系的简化(合成) 将物体所受的力系用一个力或一个最简单的力系去等效代替。

(3) 力系的平衡条件及应用 研究物体处于平衡时，作用在物体上的力系必须满足的条件，以及应用平衡条件所得到的平衡方程来解决工程实际问题。

### 课题一 画物体受力图

#### 【知识目标】

1. 正确理解力的概念以及静力学基本公理；
2. 掌握工程上常见的约束类型及其约束力的表示方法；
3. 熟练绘制物体的受力图。

#### 【任务介绍】

图 1-1 所示为曲柄冲压机构，分析其工作过程，并画出连杆、曲柄及滑块的受力图(各构件的自重不计)。

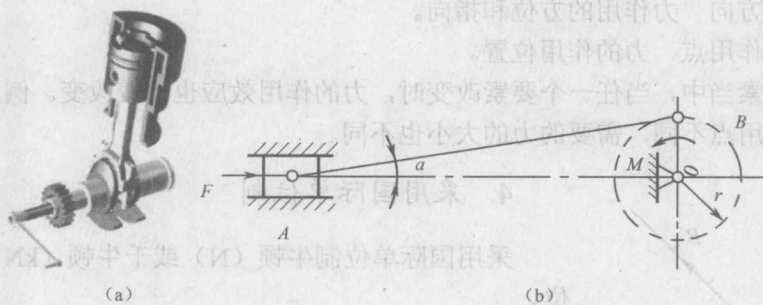


图 1-1 曲柄冲压机构

#### 【任务分析】

解决单缸内燃机中的曲柄滑块机构的力学问题时，首先要对曲柄滑块机构的工作过程进行分析，然后确定研究对象，并分析其受力情况，即进行受力分析，在受力分析时既要考虑外力对研究对象的作用力，还要考虑物体之间的相互力。

注意：在对物体受力分析之前，首要的是力学模型的建立。建立在力学模型时，只要能显示力的作用位置及约束类型，就可用简单的线条来表示，而不必考虑与真实物体的相似问题。

## 【相关知识】

### 一、静力学基本概念

#### 1. 力的概念

力是物体之间的相互机械作用。这种作用将使物体的机械运动状态发生变化。

(1) 外效应（运动效应） 力使物体运动状态发生改变的效应。它是静力学研究的主要内容。例如，足球受到力的作用后，运动状态发生了改变。人用手推小车，小车就从静止开始运动。

(2) 内效应（变形效应） 力使物体的形状发生改变的效应。例如，弹簧受压后发生压缩变形。落锤锻压工件时，工件就会产生变形。

#### 2. 力的分类

(1) 分布力 当力的面积较大，而不能忽略时，被称为分布力。

(2) 集中力 当力的作用面积相对于物体的面积很小时，可以将微小的面积抽象为一个点。例如，汽车停在桥面上，通过轮胎作用在桥面上的力，其作用面积很小，视为集中力。

#### 3. 力的三要素

力对物体作用的效应取决于三个要素：力的大小、小方向和作用点。

(1) 力的大小 作用效应的强弱程度。

(2) 力的方向 力作用的方位和指向。

(3) 力的作用点 力的作用位置。

力的三要素当中，当任一个要素改变时，力的作用效应也随着改变。例如，手推门转动时，力的作用点不同，需要的力的大小也不同。

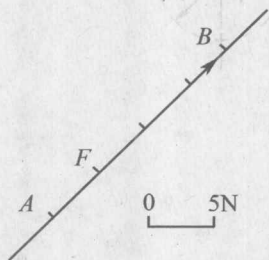


图 1-2 力的表示方法

#### 4. 采用国际单位制

采用国际单位制牛顿 (N) 或千牛顿 (kN) 作为力的单位。

#### 5. 力的表示方法

力在图示力时，常用一带箭头的线段来表示，如图 1-2 所示。线段的长度按一定的比例表示力的大小（图中  $F$  力的大小为 20N）；线段的方位和箭头的指向表示力的方向；线段的起点（或终点）表示力的作用点。过力的作用点沿力矢方向引出的直线称为力的作用线。

力是一个既有大小又有方向的物理量，所以力是矢量。

## 二、平衡及刚体的概念

(1) 平衡 指物体相对于周围物体保持静止或作匀速直线运动。

(2) 平衡的相对性 指在静力学中，平衡一般是指物体相对于地球（或机架）的平衡。

(3) 刚体 指在力的作用下形状和大小都保持不变的物体。即在受力分析时可以忽略由于受力而引起的形状和体积改变的理想模型。例如，弹簧、绳索、皮带受到拉力，发生明显的变形，不能认为刚体。

## 三、静力学公理

### 公理一 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的充要条件是：两力必须等值、反向、共线，即  $F_1 = -F_2$ 。如图 1-3 所示。

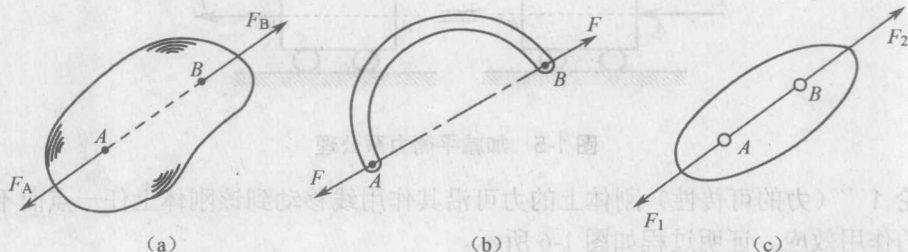


图 1-3 二力平衡定理

只受两力作用而处于平衡的构件称为二力构件，简称二力杆。二力杆的受力特点是：所受的两力必定是沿作用点的连线，而与其形状无关，并且等值、反向。工程上常根据这一特点来确定二力构件所受力的方向。

必须注意到，对于非刚体来说，二力平衡条件是必要非充分条件。例如，绳索的两端受到等值、反向、共线的两个拉力时处于平衡，但如受到等值、反向、共线的两个压力，就不能平衡了。所以对于像绳索一类的柔性体，只有在受拉的情况下，才能应用二力平衡公理。如图 1-4 (a) 所示的棘轮机构中的棘爪  $AB$ ，当不计其自重时就是二力杆。 $F_A$ 、 $F_B$  两力必定沿  $A$ 、 $B$  两点的连线如图 1-4 (b) 所示。

### 公理二 加减平衡力系公理

对于作用在刚体上的任何一个力系，可以增加或去掉任一平衡力系，并不改变原力系对于刚体的作用效应。

这一公理的正确性是显而易见的，因为一个平衡力系是不会改变物体的原有状态的。这个公理常被用来简化某一已知力系。依据这一公理，可以得出一个重要推论：



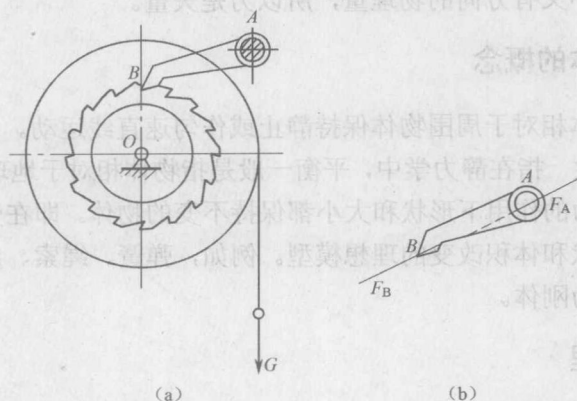


图 1-4 二力构件上的两个力

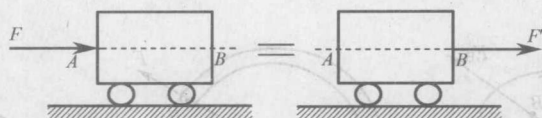


图 1-5 加减平衡力系公理

**推论 1 (力的可传性)** 刚体上的力可沿其作用线移动到该刚体上任一点而不改变力对刚体的作用效应。证明过程如图 1-6 所示。

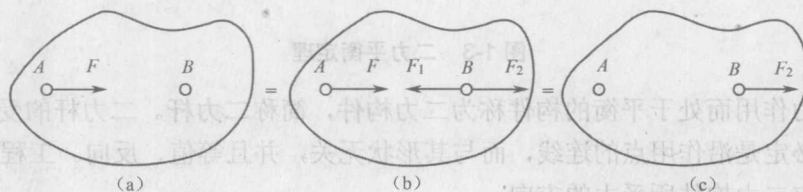


图 1-6 力的可传性

- (1) 设力  $F$  作用于刚体上  $A$  点如图 1-6 (a) 所示。
- (2) 在力  $F$  的作用线上任选一个  $B$  点，并在  $B$  点加一对沿  $AB$  线的平衡力  $F_1$  和  $F_2$ ，且使  $F_2 = F = -F_1$ 。如图 1-6 (b) 所示。
- (3) 除去  $F$  与  $F_1$  所组成的一对平衡力，刚体上只剩下  $F_2$ ，且  $F_2 = F$ 。 $F_2$  与  $F$  的作用效果是相同的，如图 1-6 (c) 所示。

对力的可传性原理使用时，应注意以下两点：

- (1) 力在移动过程中必须沿着作用线移动。
- (2) 力在移动后必须作用在原刚体上，不能移动到其他刚体上去。

由力的可传性原理可知，力对刚体的作用取决于力的大小、方向和作用线三大要素。这样的力矢量称为滑移矢量。

必须指出，力的可传性原理仅适用于刚体。对于需要考虑变形的物体，力不能沿其作

用线移动, 因为移动后将改变物体内部的受力和变形情况。例如, 图 1-7 所示的  $AB$  杆, 原来受两拉力作用而产生拉伸变形如图 (a) 所示; 若将两力沿着作用线分别移至杆的另一端如图 (b) 所示, 杆将受压而产生压缩变形, 因此, 力的可传性原理不适用变形体。

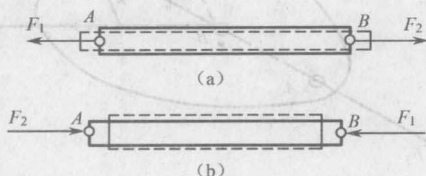


图 1-7 力的可传性原理必须考虑变形的物体的不适用性

### 公理三 力的平行四边形公理

作用于物体上同一点的两个力, 可以合成为一个合力。合力也作用于同一点, 其大小和方向由以两力所构成的平行四边形的对角线来表示, 如图 1-8 所示。图中  $F_1$ 、 $F_2$  称为合力  $F_R$  的分力。

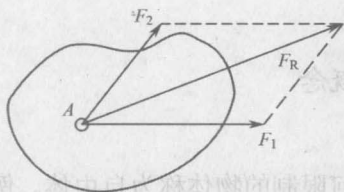


图 1-8 力的平行四边形公理

上述法则说明, 两个共点力的合成不能简单地将其数值大小相加, 而应遵循平行四边形法则相加。这种力的合成的方法称为矢量加法。合力等于两分力的矢量和。可用矢量式表示为

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

显然, 上述矢量等式不能与代数等式  $F_R = F_1 + F_2$  相混, 因为两者的含义不同。

应用力的平行四边形法则或力的三角形法则, 在一定条件下也可以将一个力分解为两个力。一般是沿着两个已知方向 (如互相垂直的方向) 分解为两个分力。

### 推论 2 三力平衡汇交定理

刚体受三个共面但互不平行的力作用而平衡时, 三力必汇交于一点。

各力的作用线都在同一平面内且各力作用线汇交于一点的力系称为平面汇交力系, 如图 1-9 所示。平面汇交力系平衡的充要条件是力系的合力等于零。

### 公理四 作用与反作用公理

两物体间相互作用力总是同时存在, 并且两力等值、反向、共线, 分别作用于两个物体上。这两个力互为作用与反作用的关系。

作用与反作用定律概括了自然界中物体间相互作用的关系, 表明力总是成对出现的, 有作用力就有反作用力, 两者同时存在、同时消失。

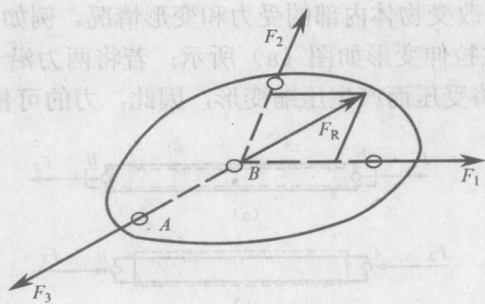


图 1-9 平面汇交力系

作用力与反作用力虽然等值、共线、反向，但并不作用于同一物体上，因此，不能误认为这两个力互成平衡。这与二力平衡公理有本质的区别。

应用：例如人在划船离岸时，常把桨向岸上撑，这就是利用了作用力与反作用力的原理。

## 四、约束与约束反力

### 1. 约束与约束反力的概念

#### (1) 自由体

能在空间任意运动不受任何限制的物体称为自由体。例如飘在空中的气球。

#### (2) 非自由体

在空间的运动受到某些限制的物体称为非自由体。例如各种机器或结构中的构件，都与周围的其他构件相联系（接触），某些方向的运动受到限制。

#### (3) 约束

某个物体的运动受到周围其他物体的限制，这种限制条件称为约束。例如绳子是小球的约束，钢轨是火车车轮的约束，轴承是转轴的约束。

#### (4) 约束反力

约束既然限制了物体的自由运动，它就必然要受到物体对它的作用力，与此同时，它也给予该物体反作用力。例如，绳索阻止了重球的下落，它就必定受到重球对它的向下的作用力，同时它也给重球以向上的反作用力。这种由约束作用在被约束物体上的力称为约束反力，简称反力。约束反力的方向与物体被该物体所限制的运动方向相反。图 1-10 中，力  $T$  就是绳索对重球的约束反力。

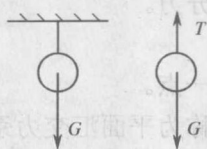


图 1-10 约束反力

#### (5) 主动力

使物体产生运动或运动趋势的力称为主动力。例如物体的重力、水压力、机械零件中的弹簧力等。主动力的特点：通常是已知的（即其大小、方向、作用点均为已知，或可先求出）。

一般情况下约束反力是由主动力引起的，且随主动力的变化而变化，在静力学中可通

过平衡条件求得。约束力的方向总是与约束所能限制的运动方向相反，约束力的作用点在约束与被约束物体的接触处。

## 2. 常见的约束类型及其约束力的特点

### (1) 柔性约束

在工程中，由绳索、链条、皮带、链条等柔性物体形成的约束称为柔性约束。这类约束只能承受拉力，不能承受压力，其特点是只能限制物体沿柔索伸长方向的运动。约束反力的方向沿柔索的中心线作用，离开被约束物体。通常用符号  $F$  表示。如下图 1-11 所示，皮带对带轮的拉力均属于柔性约束力。

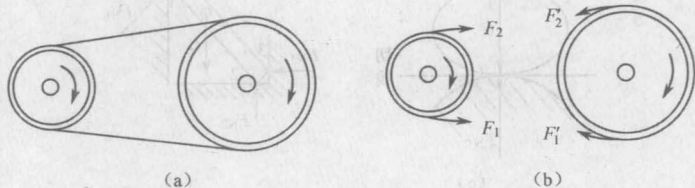


图 1-11 柔性约束

### (2) 光滑面约束

当两物体直接接触，并可忽略接触处的摩擦时，即构成光滑接触面的约束。此时约束只能限制物体沿接触面的公法线方向压入接触面，而不能限制物体沿接触面切线方向的运动，故约束反力必过接触点沿接触面的公法线，并指向被约束体，是压力，通常用  $F_N$  表示。如果是点与平面接触，则约束反力垂直于平面。如果是与圆弧接触则约束反力指向圆心。

约束在工程应用的实例：物体放置在光滑的地面或搁置在光滑的槽体内。如 1-12 图所示。

### (3) 光滑圆柱铰链约束

用圆柱销钉联接的两构件称为铰链。例如，门所用的活页、铡刀与刀架、起重机的动臂与机座的连接等，都是常见的铰链连接，如图 1-13 所示。

光滑圆柱形铰链是由两个（或更多个）带相同圆孔的构件，并将圆柱形销钉穿入各构件的圆孔中而形成。一般根据被连接物体的形状、位置及作用，可分为以下几种形式。

#### ① 中间铰

若各联接构件均不固定，即构成中间铰，又称为中间铰链。如果不计摩擦，那么销钉只限制两构件在垂直于销钉轴线的平面内相对移动，而不限制两构件绕销钉轴线的相对转动。约束反力应通过铰链中心，但由于接触点不能确定，因此反力的方向无法确定。所以这种约束反力通常是用两个正交分力  $F_x$ 、 $F_y$  来表示，这两个分力通过销孔中心，指向可预先假设，假定指向的正确性，可由计算结果判定，如图 1-14 所示。



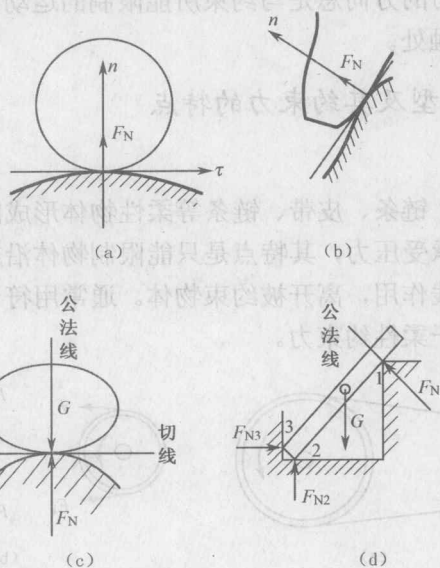


图 1-12 光滑面约束

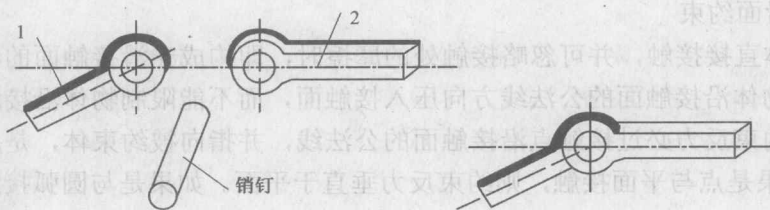


图 1-13 光滑圆柱铰链约束

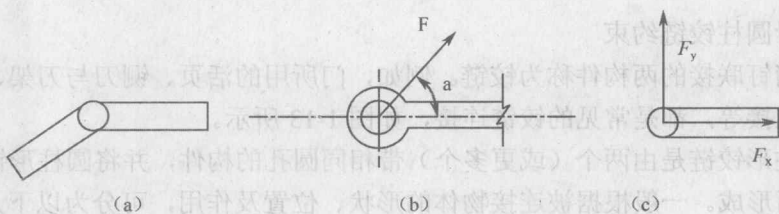


图 1-14 中间铰链约束

## ② 固定铰链支座约束

若用销钉与固定机架或支承面等连接起来，称为固定铰链支座。

机械中常见的向心轴承实际上也构成圆柱形铰链约束，可以断定轴承作用于轴颈的约束力  $F_A$  在垂直于轴线的横截面内，但不能预先确定其方向，可以有正交分力  $F_x$ 、 $F_y$  来表示轴承的约束力，如图 1-15 所示。

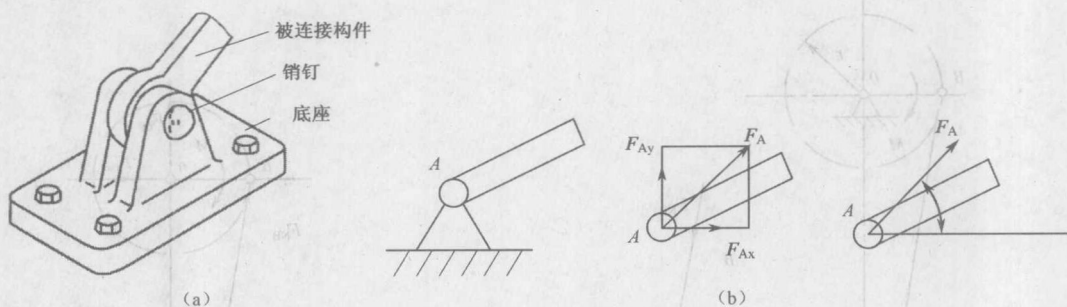


图 1-15 固定铰链支座约束

### ③ 活动铰链支座约束

在铰链支座与支承面之间装上辊轴，就成为活动铰链支座又称辊轴铰链支座，如图 1-16 (a) 所示。这种铰链约束只限制杆件沿支承面的垂直方向的运动，不限制沿支承面平行的方向的运动，当然也不限制绕中心转动。其约束反力垂直支承面，通过铰链中心，方向不定，如图 1-16 (b) 所示。

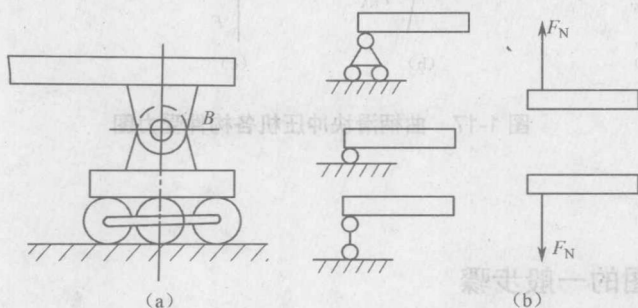


图 1-16 活动铰链支座约束

### 【任务实施】

首先分析曲柄滑块冲压机构的工作原理，分别取连杆  $AB$ 、滑块及曲柄为分离体，并单独画出其受力图。

(1) 连杆  $AB$  只在  $A$ 、 $B$  两点受到约束。仅在两点受力而平衡的构件，称为二力构件或二力杆。根据二力平衡公理，约束力必沿  $A$ 、 $B$  两点的连线，设为压力，如图 1-17 (b) 中  $F_{NA}$ 、 $F_{NB}$  所示。

(2) 滑块。滑块除受工件阻力  $F$  作用外，另有连杆  $AB$  对滑块施加的力  $F'_{NA}$ ，依作用力与反作用力公理，即  $F_{NA} = -F'_{NA}$ ，再有右侧导轨的约束反力  $F_N$ ，如图 1-17 (c) 所示。

(3) 曲柄  $BO$  曲柄除受转矩  $M$  作用外，另有连杆  $AB$  作用给曲柄的力  $F'_{NB}$ ，依作用力与反作用力公理，即  $F_{NB} = -F'_{NB}$ ， $O$  铰链处的约束力，可用二正交分力  $F_{Ox}$ 、 $F_{Oy}$  表示，如图 1-17 (d) 所示。

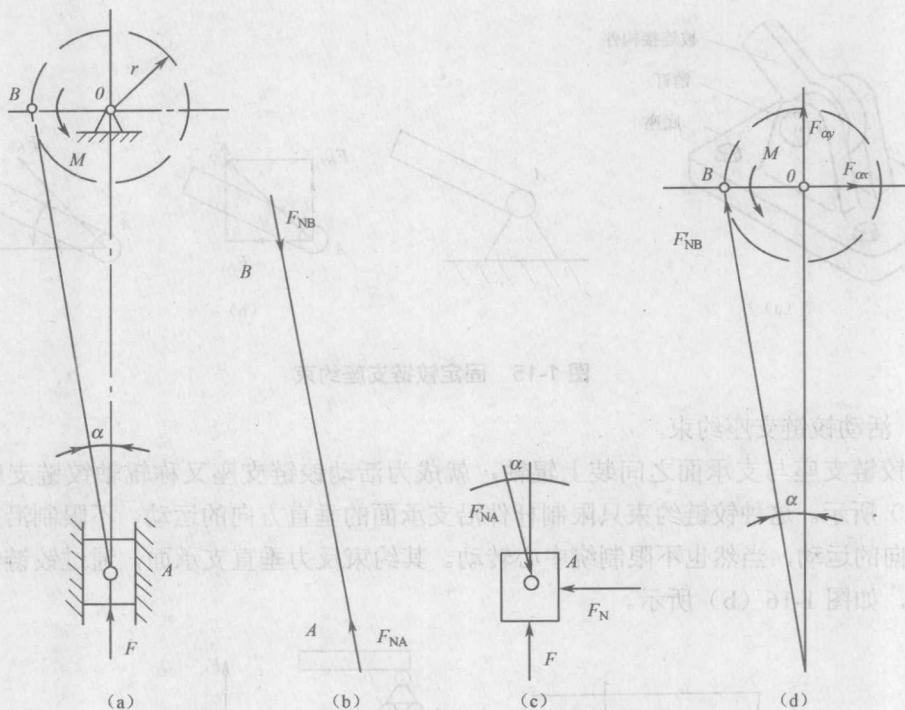


图 1-17 曲柄滑块冲压机各构件受力图

## 【归纳总结】

### 一、画受力图的一般步骤

在解决力学问题时，首先要根据问题的已知条件和待求量从有关物体中选择某一物体（或由几个物体组成的系统）作为研究对象，再考虑它的受力情况，然后用相应的平衡条件计算求解。工程中的结构和机构非常复杂，为了清楚的表达某个物体的受力情况，假象把它从有相联系的周围物体中分离出来，此过程就是解除约束的过程。在解除约束的地方用相应的约束力来代替约束的作用，被解除约束后的物体称为分离体。在分离体上画出全部的主动力和约束力，即为物体的受力图，整个过程就是对所研究对象进行的受力分析。

画受力图的步骤：

#### 1. 确定研究对象，取分离体

按问题的条件和要求，确定所要研究对象（它可以是一个物体，也可以是几个物体的组合或整个系统），解除与研究对象相连接的其他物体的约束，用简单几何图形表示出形状特性。

#### 2. 画主动力

在分离体上画出该物体所受到的全部主动力，如重力、风力、切削力、电磁力等。

### 3. 画约束力

在解除约束的位置, 根据约束的不同类型, 画出约束力。

(1) 约束反力的作用线与指向要根据约束的性质确定。

(2) 若约束反力的作用线可以确定, 而指向不能确定时, 可沿作用线方向假设一个指向, 假设的正确性, 可计算时判定。

### 二、画受力图时要注意事项

(1) 必须画出分离体图, 分离体的形状、方位应与原图保持一致。

(2) 画每个力都要有根据。画约束反力时, 必须严格按约束类型的性质去画, 不能凭空想象。

(3) 不能多画, 每画一个力都要考虑这个力的施力物体和受力物体各是什么, 只画研究对象所受的力, 不画研究对象作用于其他物体的力; 不能少画, 凡是解除约束的地方(研究对象与周围物体接触处)都要分析有无约束反力。

(4) 应准确地找出二力杆并从二力杆入手。

(5) 注意作用力与反作用力的关系。

画受力图可概括为: “据要求取构件, 主动力画上面; 连接处解约束, 先分析二力件。”

### 【拓展提高】

**例 1-1** 梯子的  $AB$ 、 $AC$  两部分在  $A$  处以铰链连接, 并在  $D$ 、 $E$  两处用水平绳索相连。在梯子的一边作用一垂直方向的载荷  $P$  如图 1-18 (a) 所示。不计梯子的自重与接触面间的摩擦, 试做出  $AB$ 、 $AC$  的受力图。

**解:**

(1) 先取  $AB$  为研究对象如图 1-18 (b) 所示, 作用于其上的主动力为  $P$ , 所受的约束反力可根据约束类型分析如下。

$B$  处为光滑接触面约束, 反力  $N_B$  垂直于支承面并指向  $AB$ ;  $D$  处为绳索约束, 反力  $T_1$  沿绳索背离  $AB$ ;  $A$  处为销钉连接, 其反力以两分力  $R_{AX}$ 、 $R_{AY}$  表示, 并假设  $R_{AX}$  向右,  $R_{AY}$  向上。

(2) 再取  $AC$  为研究对象 (图 1-17 (c))。由  $AB$  通过销  $A$  传给  $AC$  的力为  $R_{AX}'$ 、 $R_{AY}'$ , 它们与  $R_{AX}$ 、 $R_{AY}$  是作用力与反作用力关系, 故两者的指向应相反;  $C$ 、 $E$  两处的约束反力的分析方法同上。

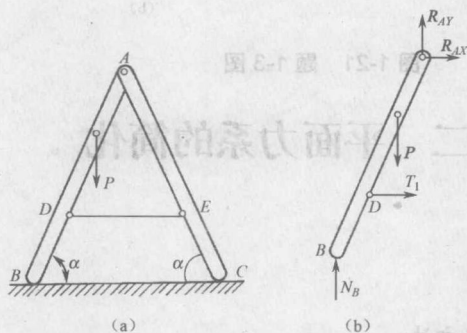


图 1-18 梯子的受力分析



## 习题训练

1-1 作出下列物体系统中杆  $AB$  的受力图。设接触面都是光滑的。

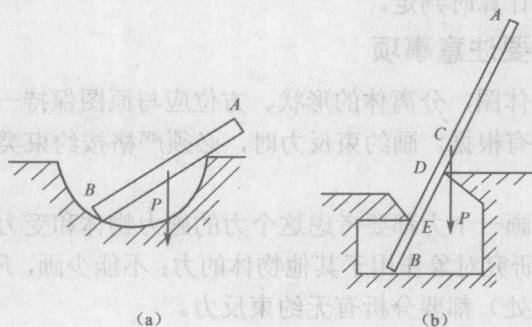


图 1-19 题 1-1 图

1-2 试画出下图中  $AB$  杆、轮  $C$  及整体的受力图。

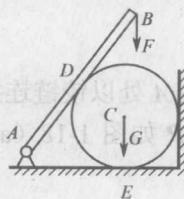


图 1-20 题 1-2 图

1-3 画出下列各构件的受力图。

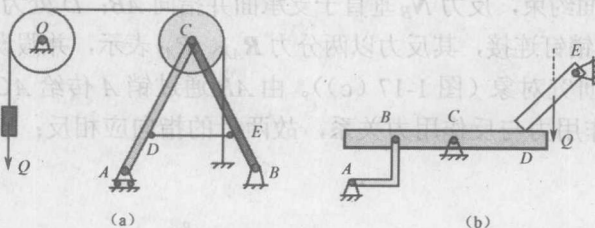


图 1-21 题 1-3 图

## 课题二 平面力系的简化

### 【知识目标】

1. 掌握投影及力矩的求法;
2. 理解力偶的概念及性质;
3. 掌握各种平面力系的简化方法;
4. 理解力的平移定理。