



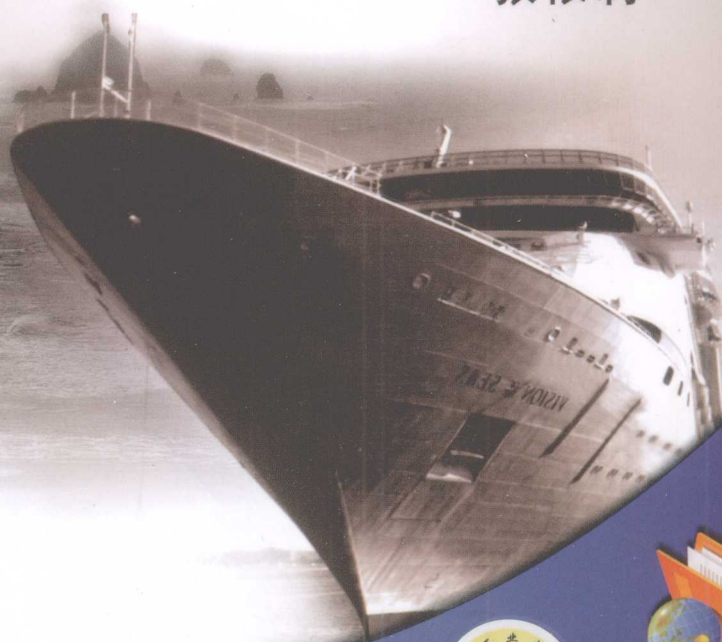
职业教育船舶工程类规划教材

C *huanbo gongcheng jixie sheji jichu*

船舶工程机械

设计基础

张依莉 主编



赠电子教案

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书包括两部分：工程力学知识和机械应用知识。全书共分为七章，内容包括刚体静力学、材料力学、工程材料、机构基础、机械传动、流体机械基础和典型机械。全书根据船舶工程类专业需要的机械基础知识、使用的典型机械，结合生产实际进行编写；在内容的选择和安排上作了一些新的尝试，删减了理论性较强的内容，突出了实践性、实用性。为便于教学，本书另配备了电子教案，选择本书作为教材的教师可来电索取（010 - 88379201），或登录 www.cmpedu.com 网站注册、免费下载。

本书可作为职业院校船舶工程类专业的“机械设计基础”课程教材，也可作为有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

船舶工程机械设计基础/张依莉主编. —北京：机械工业出版社，2009.12

职业教育船舶工程类规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 28945 - 6

I. 船… II. 张… III. 船舶—机械—职业教育—教材

IV. F788

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 135178 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：齐志刚 责任编辑：齐志刚 版式设计：霍永明

封面设计：赵颖喆 责任校对：张晓蓉 责任印制：洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2010 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.5 印张 · 406 千字

0001 - 3000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 28945 - 6

定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者服务部：(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

“机械设计基础”是加工制造类专业的一门技术基础课，目前针对职业技术教育有多种版本的《机械设计基础》教材，船舶工程类专业曾一直选用这类教材。

从专业大类而言，船舶工程类专业往往归于加工制造类，但它又明显区别于一般的加工制造类专业，因此，作为技术基础课的“机械设计基础”课程内涵应有所不同。本书根据船舶工程类专业需要的机械基础知识、使用的典型机械，结合生产实际组织内容，大量选用了与船舶工程类专业有关的实例、资料、图片，力求突出实践性、实用性。全书共分为七章，内容包括刚体静力学、材料力学、工程材料、机构基础、机械传动、流体机械基础和典型机械。

本书可作为职业院校船舶工程类专业的“机械设计基础”课程教材，建议学时为180~190，在实际教学中教师可根据专业方向和教学计划适当取舍。为便于教学，本书另配备了电子教案，其中包括教学经验、课后习题答案及综合训练。选择本书作为教材的教师可来电索取（010-88379201），或登录 www.cmpedu.com 网站注册、免费下载。

本书由张依莉担任主编，王竹平担任副主编，第一章由张瑜编写，第二章由陈妍编写，第三章、第四章由周志华编写，第五章由张依莉编写，第六章由王建平编写，第七章由王竹平编写。王竹平、周志华、滕玮晔负责校对及统稿。

由于编者水平有限、时间仓促，编写中疏漏和错误之处在所难免，敬请各位专家和读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

第一章 刚体静力学	1
第一节 刚体静力学的基本概念与公理	1
第二节 约束与约束反力	4
第三节 受力分析与受力图	6
第四节 平面汇交力系	7
第五节 力矩与力偶	12
第六节 平面任意力系	16
第七节 重心及稳定性	22
第八节 摩擦	25
小结	30
习题	30
第二章 材料力学	34
第一节 弹性材料及其力学性能	34
第二节 杆的轴向拉伸和压缩	36
第三节 剪切和挤压	42
第四节 圆轴的扭转	47
第五节 梁的平面弯曲	52
第六节 压杆稳定性	70
第七节 组合变形基本概念	72
小结	74
习题	74
第三章 工程材料	81
第一节 金属材料的主要性能	81
第二节 钢铁材料	85
第三节 船用金属材料	88
第四节 船舶舾装常用材料及配件	92
小结	95
习题	95
第四章 机构基础	96
第一节 机构简图及机构的自由度	96
第二节 平面铰链连接四杆机构及其演变	104
第三节 平面凸轮机构	112
第四节 棘轮机构	115
第五节 螺旋机构	118

小结	122
习题	122
第五章 机械传动	126
第一节 摩擦轮传动	126
第二节 带传动	127
第三节 齿轮传动基本概念	134
第四节 圆柱直齿轮传动	136
第五节 渐开线斜齿圆柱齿轮	147
第六节 两轴垂直相交的直齿锥齿轮传动	149
第七节 蜗杆传动	152
第八节 链传动	156
第九节 轮类零件构造	158
第十节 轴系零部件	161
第十一节 轴承	171
第十二节 机械传动中的螺纹联接	179
第十三节 机械传动系统简单分析	181
小结	186
习题	187
第六章 流体机械基础	190
第一节 液压系统的基本元件	190
第二节 典型液压系统	203
第三节 常用流体机械简介	210
小结	215
习题	215
第七章 典型机械	217
第一节 减速器	217
第二节 船用齿轮箱	220
第三节 起重机械	222
第四节 钣金机械	233
小结	239
习题	240
附录	241
附录 A 平键 键槽的剖面尺寸 (GB/T 1095—2003 摘录)、普通型平键 (GB/T 1096—2003 摘录)	241

附录 B 凸缘联轴器 (GB/T 5843—2003 摘录)	243	性能和特点	248
附录 C 弹性套柱销联轴器 (GB/T 4323—2002 摘录)	246	附录 F 常用液压元件图形符号 (GB/T 786.1—1993 摘录)	250
附录 D 带制动轮弹性套柱销联轴器 (GB/T 4323—2002 摘录)	247	附录 G 常用液压元件、水泵和空压机 图集	255
附录 E 常用滚动轴承的类型、主要		参考文献	257

第一章 刚体静力学

学习目标

掌握静力学基本公理和基本概念。

能熟练画物体受力图，进行受力和用平衡方程求约束反力。

了解物体重心、稳定性及摩擦问题。

第一节 刚体静力学的基本概念与公理

一、刚体静力学

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学，而静力学是理论力学的重要组成部分，主要研究物体机械运动的特殊形式，即物体在力系作用下的平衡规律。

二、刚体静力学的基本概念

1. 力的概念

(1) 力的定义 力是物体间的相互机械作用，其效应是使物体的运动状态发生变化，或者使物体产生变形。前者称为力的运动效应或外效应，后者称为力的变形效应或内效应。

(2) 力的要素 力对物体的作用取决于以下三个要素：

力的大小：指物体间相互作用的强度。在国际单位制（SI）中，力的单位是牛顿（N）。工程上有时还沿用工程单位公斤力（kgf）。牛顿和公斤力的换算关系为

$$1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$$

力的方向：方向的含义包括方位和指向。例如，重力的方向是“铅垂向下”，“铅垂”是指力的方位，“向下”是指力的指向。

力的作用点：指力对物体作用的位置。它实际上不是一个点，而是物体的某一部分面积。当作用面积较大时，就形成分布力；当作用面积较小时，就可近似地看成作用在一个点上，称为集中力，该点称为力的作用点。

以上三要素中，只要改变其中任何一个要素，力对物体的效应也就随之变化。所以要确定一个力，必须表明它的大小、方向和作用点。

(3) 力的表示方法 力是矢量，可用有向线段将三要素表示出来：有向线段的长度（按一定比例）表示力的大小，有向线段的方位和箭头的指向表示力的方向，有向线段的始点或终点表示力的作用点。有向线段所在的直线称为力的作用线。力矢量以黑体大写字母表示力矢量。

2. 刚体的概念

所谓刚体，是指在任何外力作用下，形状和大小始终保持不变的物体。也就是说，刚体内任意两点之间的距离永远保持不变。显然，自然界中任何物体在受力作用后都将发生变

形。刚体实际上是不存在的，它只是实际物体的抽象化。

3. 平衡的概念

平衡是物体运动的一种特殊形式，在工程上，一般是指物体相对于地球保持静止或作匀速直线运动的状态。

4. 刚体静力学的基本定义

为了便于以后的研究和叙述，首先要明确下列各有关定义：

- (1) 力系 同时作用在同一物体上的一系列力。
- (2) 等效力系 如果作用于物体上的某一力系，可用另一力系代替而不改变原力系的效果，则该二力系互为等效力系。
- (3) 平衡力系和平衡力 如果物体在某力系作用下处于平衡状态，则该力系称为平衡力系。平衡力系中任一个力是其余各力合力的平衡力。
- (4) 合力和分力 如果一个力与一个力系等效，则该力称为此力系的合力，而力系中的每一个力均可称为该合力的分力。
- (5) 力的合成和分解 由已知力系求其合力的过程称为力的合成。反之，由合力求其分力的过程称为力的分解。

5. 力系的分类

根据力系中各力的作用线是否处于同一平面内，可将力系分为两类：

- (1) 平面力系 力系中各力的作用线均处在同一平面内。
- (2) 空间力系 力系中各力的作用线不处在同一平面内。

在这两类力系中，根据各力作用线分布的特点，每类又可细分为汇交力系（包括共点力系）、平行力系、任意力系和力偶系。本章只研究平面力系问题。

三、静力学的基本公理

公理一（二力平衡公理）

作用在刚体上的两个力平衡的充分和必要条件是：这两个力的大小相等、方向相反并且作用在同一直线上。如果一个物体在两个力的作用下保持平衡称为二力构件。

公理二（加减平衡力系公理）

在作用于刚体上的任何一个力系中，加上或减去任何一个平衡力系，不会改变原力系对刚体的作用。

推论一（力的可传性原理）

作用在刚体上的力沿其作用线移到该刚体上任意一点，不会改变它对刚体的效应。

证明：设力 F 作用在小车的 A 点（图 1-1a），在其作用线上任取一点 B ，并在 B 点加上平衡力系 F_1 、 F_2 ，且使 $F_1 = -F_2 = F$ （图 1-1b）。由公理二可知，加上这一平衡力系后并不影响原来的力 F 对小车的效应。

因此，力 F 与力系 F 、 F_1 、 F_2 等效。而根据公理一， F 、 F_2 也是一对平衡力，把它们去掉也不影响原力系对小车的效应（图 1-1c），即力系 F 、 F_1 、 F_2 与力 F_1 等效。所以力 F_1 与 F 等效。这样，原来的力 F 从 A 点沿其作用线移到了 B 点。

应该注意，运用力的可传性原理不改变力对物体的外效应，但会改变力对物体的内效应。力的可传性原理不能把力从一个刚体移到另一个刚体上。

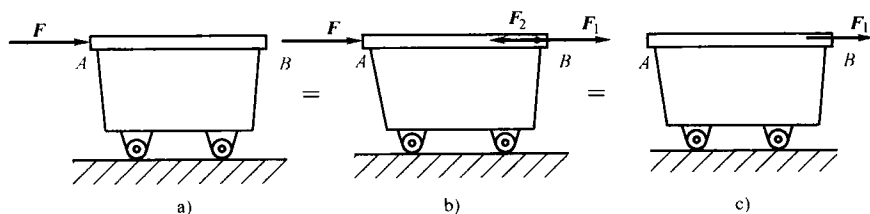


图 1-1 力的可传递性原理

根据力的可传性原理，力在刚体上的作用点已为它的作用线所代替，即力在其作用线上滑移不影响力对刚体的作用效应。

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作用于该点的一个合力，此合力的大小和方向可由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线表示（图 1-2）。这个公理也称为力的平行四边形法则。

如以 R 表示力 F_1 和 F_2 的合力，则可写为矢量表达式

$$R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

这一公理是力系合成和力的分解的基础。

应该注意，合力 R 等于两分力 F_1 、 F_2 的矢量和而并非代数和。

在实际作图时，可直接采用力的三角形法则，并且合力矢量与两个分力矢量的作图先后次序无关（图 1-3）。

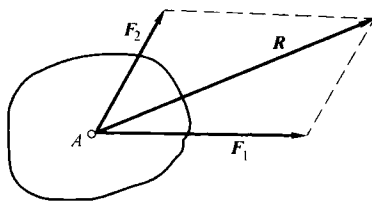


图 1-2 力的平行四边形法则

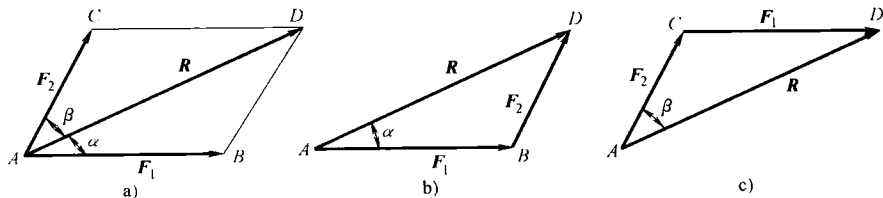


图 1-3 力的三角形法则

推论二（三力平衡汇交定理）

当刚体受到三个不平行的力作用而平衡时，则此三个力的作用线必定汇交于一点，且三个力的作用线在同一平面内。

证明：设力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别作用于刚体上的 A_1 、 A_2 、 A_3 三点（图 1-4）。

由力的可传性原理，将力 F_1 、 F_2 分别沿其作用线移至其交点 B ；由平行四边形法则，以合力 R 代替 F_1 、 F_2 ，且合力 R 的作用点也通过 B 点；由已知条件和公理一， F_3 与 R 必共线，所以 F_3 必通过交点 B ，

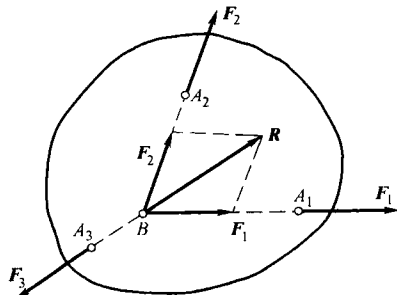


图 1-4 三力平衡汇交力系

且在 F_1 和 F_2 所构成的平面内。

三力平衡汇交定理是不平行的三个力平衡的必要条件, 利用这个定理可确定第三个力的作用线的方位。

公理四 (作用力与反作用力公理)

两个物体间的作用力与反作用力, 总是大小相等、方向相反并且在同一直线上, 并分别作用在这两个物体上。

这一公理是研究物体系统平衡问题的基础。

作用力与反作用力必须同时存在, 同时消失。有作用力, 必定有反作用力; 没有反作用力, 必定也没有作用力。

应该注意, 尽管作用力与反作用力等值、反向、共线, 但它们并不相互平衡。因为它们不是作用在同一物体上, 而是分别作用在两个相互作用的物体上。所以, 作用力和反作用力不是一对平衡力。

第二节 约束与约束反力

一、约束的概念

凡不受任何限制, 能在空间任何方向自由运动的物体, 称为自由体。如果物体处于某种限制下, 使其在某些方向的运动成为不可能, 则该物体称为非自由体。限制非自由体运动的物体, 成为该非自由体的约束。约束的是物体, 不是力, 如课桌是桌面上物品的约束等。

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, 在工程上, 主动力一般被称为载荷。非自由体在主动力的作用下, 将产生运动趋势。由约束引起的作用在物体上的力称为约束反力。显然, 主动力企图使物体产生运动, 而约束反力则限制物体产生运动。

二、约束的种类

下面介绍几种常见基本类型的约束及其约束反力的特性。

1. 柔性约束

由柔软的绳索、带、链条等物构成的约束, 称为柔性约束, 并将它们抽象为无重量和绝对柔软的理想物体。这类约束的特点是: 只能承受拉力, 不能承受压力和抵抗弯曲。因此, 柔性约束产生的反力, 方向必定沿着柔体的轴线 (即柔体本身的方向), 且只能是拉力 (图 1-5)。该反力常用字母 T 表示。

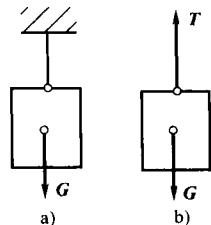


图 1-5 柔性约束

2. 刚性约束

(1) 光滑接触面约束 在所研究的问题中接触面视为理想光滑的。支承面不能限制物体沿其切线方向运动和离开支承面, 只限制物体沿公法线方向压入接触面。因此, 光滑接触面的约束反力作用在接触处, 方向沿着接触面的公法线而指向被约束的物体, 即只能是压力 (图 1-6)。该反力常用字母 N 表示。

(2) 光滑圆柱形铰链约束 铰链约束是由圆柱销插入两构件的圆孔中而构成。其约束

特点是：只能限制物体沿销钉的径向运动，而不能限制物体绕圆柱销轴线的转动，约束反力通过圆柱销中心，但方向不确定。下面介绍工程上常见的两种圆柱形铰链支座约束。

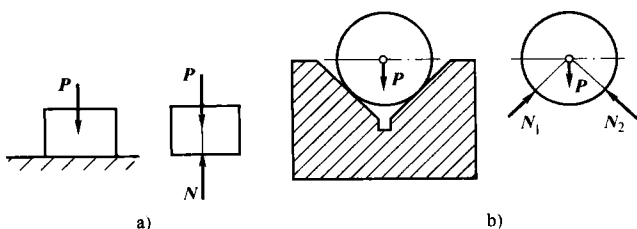


图 1-6 光滑接触面约束

1) 固定铰链支座约束。这种约束是由固定底座 1 和构件 2 并用一销钉 3 联接而成 (图 1-7a)。当构件受载荷作用时，销钉孔壁便压紧到销钉上的某处，这样，销钉将通过接触点给构件以一个反力 R ，这反力的作用线通过销钉的中心，因此，固定铰链支座约束反力的作用线必定通过销钉中心，垂直于销钉的轴线，而方向沿销与孔接触处公法线方向 (图 1-7b)。通常用两个相互垂直的且通过铰链轴线的分力 R_x 、 R_y 来代替 R (图 1-7c)。

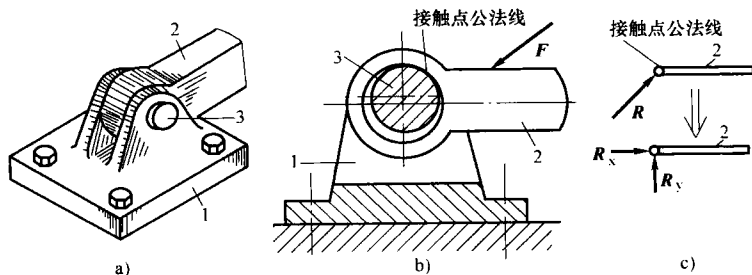


图 1-7 固定铰链支座约束

1—底座 2—构件 3—销钉

2) 可动铰链支座约束。可动铰链支座也称活动铰链支座或辊轴支座 (图 1-8a)。支座与支承之间加有圆柱形滚子 4，支座可沿支承面移动。支座只能限制构件沿支承面的垂直方向的运动，约束反力的作用线必定通过铰链的中心并垂直于支承面 (图 1-8b)。可动铰链支座的简图如图 1-8c~e 所示，其反力表示为 R 。

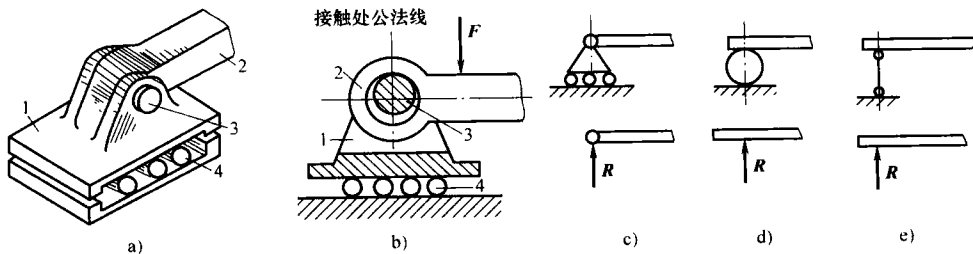


图 1-8 可动铰链支座约束

1—底座 2—构件 3—销钉 4—滚子

应该指出，上述各种约束类型，都是把实际约束加以抽象、简化后所得的理想力学模型。实际工程中遇到的约束情况很多，有的也很复杂，在分析时需从实际出发，分清主次，

略去一些次要因素，从而把约束归结为基本的理想模型。

第三节 受力分析与受力图

在研究刚体静力学问题时，要单独画出所研究物体的受力简图（称为分离体或研究对象），表示研究对象上所受全部外力，称为受力图。

画受力图的方法步骤及注意事项：

- 1) 明确研究对象，画出其分离体。即根据题意，确定要画哪个物体的受力图，将该物体从周围的约束中分离出来。
- 2) 画出分离体上所受的全部的力。先画主动力，再画约束反力。约束反力的方向一定要根据约束类型的特点来确定，而不能凭主观想象去画。
- 3) 要善于判别二力杆，并注意到三力平衡汇交定理，对于物体系统还要注意应用作用力与反作用力公理。

【例 1-1】在图 1-9a 中，已知球重为 G ，试画出球的受力图。

解：球的受力如图 1-9b 所示。

【例 1-2】图 1-10a 中，力 P 为已知。试画出简支梁 AB 的受力图。

解：画出 AB 梁的分离体；画上主动力 P ；支座 B 为可动铰链，故反力垂直于支承面，指向朝上；支座 A 为固定铰链，故其反力可用两种方法来表示，如图 1-10b、c 所示。

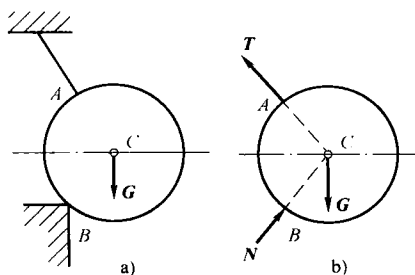


图 1-9 球的受力图

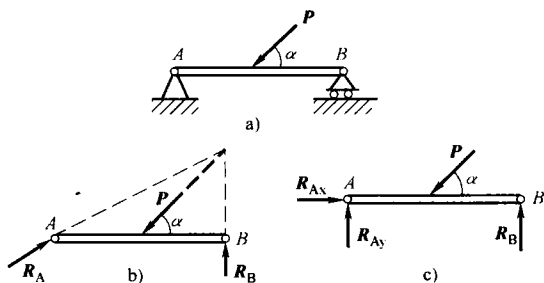


图 1-10 简支梁受力图

【例 1-3】三角架如图 1-11a 中 A 、 B 、 C 均为铰链，力 P 已知。试画 AB 、 BC 受力图。

解：分别取杆 AB 、 BC 为研究对象，并画出其分离体。

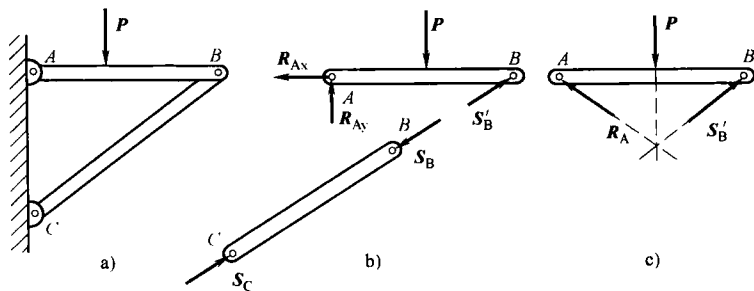


图 1-11 三角架的受力图

BC 杆为二力杆, 先画 BC 杆的受力图, 再画 AB 杆受力图, 如图 1-11b 所示。

AB 的受力图也可用三力平衡汇交定理来画, 如图 1-11c 所示。可知反力 R_A 实际上是 R_{Ax} 与 R_{Ay} 的合力。

受力图中若约束反力方向标错, 在后续平衡方程解题中将为负值, 可以修正。

第四节 平面汇交力系

平面汇交力系就是各力的作用线位于同一平面内且相交于一点的力系。

一、平面汇交力系的合成与平衡——几何法

1. 合成的几何法

设在刚体上作用一平面汇交力系 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 , 各力的作用线汇交于 A 点 (图 1-12a)。

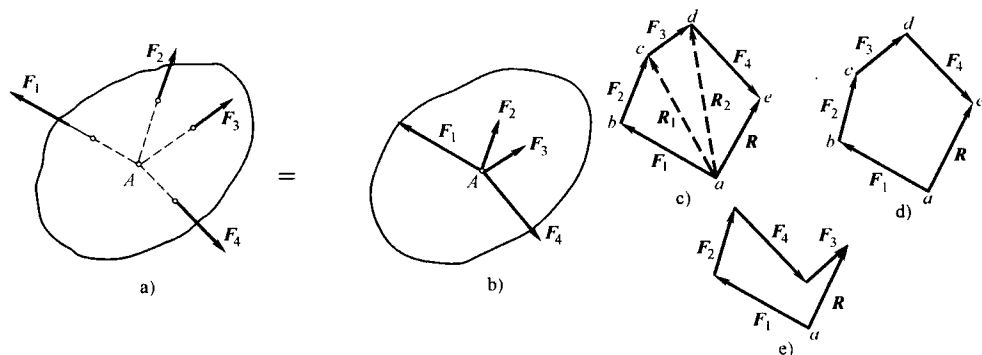


图 1-12 平面汇交力系合成的几何法

可将各力沿其作用线移至汇交点 A (图 1-12b), 则可连续应用力的三角形法则将各力依次合成 (图 1-12c)。

我们的目的是要求合力 R , 所以作图过程中表示 R_1 、 R_2 的虚线可以不画, 只要把力系中各力矢首尾相接, 连成折线, 然后连接折线的首末两点, 便得 R 。这称为力多边形 (图 1-12d)。合成的次序, 只影响多边形的形状, 不影响合力的大小和方向 (图 1-12e)。

上述方法可以推广到有 n 个力组成的平面汇交力系的情况: 平面汇交力系合力的作用线通过力系的汇交点, 合力的大小和方向等于力系的矢量和 (即力多边形的封闭边)。用矢量式表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum \mathbf{F} \quad (1-2)$$

2. 平衡的几何条件

如果合力等于零, 则物体将处于平衡。可得如下结论: 平面汇交力系平衡的充分 and 必要条件是力系的合力等于零。以矢量式表示为

$$\mathbf{R} = 0 \quad \text{或} \quad \sum \mathbf{F} = 0 \quad (1-3)$$

即力多边形自行封闭 (图 1-13)。

【例 1-4】 门式刚架 (图 1-14a) 中, 在 B

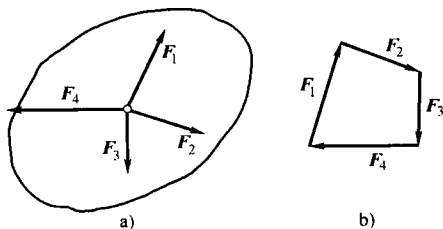


图 1-13 平面汇交力系平衡的几何条件

点受一水平力 P ，其大小 $P=20\text{kN}$ 。不计刚架自重，试求其支座 A 、 D 的约束反力。

解：取刚架为研究对象，画出其分离体。受力如图 1-14b 所示。

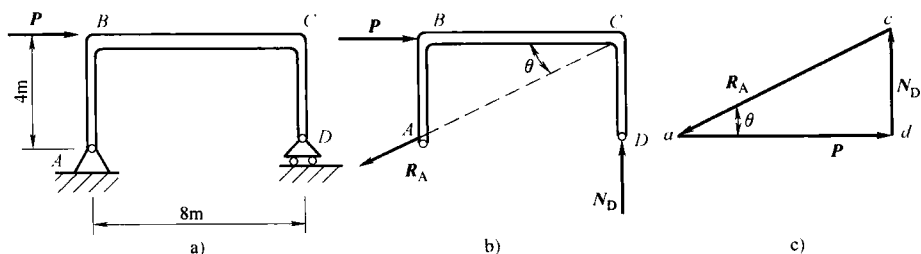


图 1-14 门架支座反力的几何法

选择适当的力的比例尺 μ (μ 的单位 kN/cm)，自 a 点作自行封闭的力三角形 adc ，两反力的指向按矢序规则确定 (图 1-14c)。从图中可量得： $N_D=10\text{kN}$ ， $R_A=22.5\text{kN}$ ， $\theta=26^\circ$ 。

几何法的优点是简便而直观，缺点是采用了几何度量，有一定误差。

二、力的分解

一个力可分解成无穷多解，如图 1-15 所示。要有唯一解必须补充适当条件。例如，规定两分力的方向或规定一个分力的大小和方向等。

常见问题是将一个已知力沿两个已知方向分解。例如，在图 1-16 直齿圆柱齿轮传动时，主动轮 1 施给从动轮 2 的力为 F_n ，计算中常将力 F_n (在不计摩擦的情况下 F_n 沿着齿面接触点公法线方向) 分解为沿齿轮圆周的切向分力 F_t 和齿轮直径的径向分力 F_r 。

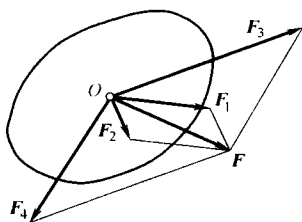


图 1-15 力的分解

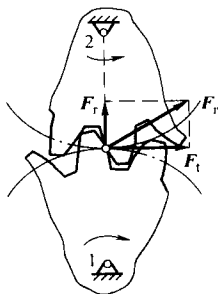


图 1-16 沿两个已知方向的分解

1—主动轮 2—从动轮

三、平面汇交力系的合成与平衡——解析法

几何法虽然比较直观简易，但作图时要细心准确，且图不能画得过小，否则将会引起较大的误差，所以在解决力学问题时，多用解析法。这种方法的基础就是力在坐标轴上的投影。

1. 力在坐标轴上的投影

设力 F 作用于 A 点 (图 1-17)，取直角坐标系 Oxy ，使力 F 的作用线处于 xy 平面内。力 F 的两端分别向 x 、 y 轴作垂线得线段 ab 和 a_1b_1 。其中， ab 称为力 F 在 x 轴上的投影，

以 F_x 表示; $a_1 b_1$ 称为力 F 在 y 轴上的投影, 以 F_y 表示。矢量 F 在坐标轴上的投影, 不是矢量而是代数量, 正负号规定如下:

投影的指向与坐标轴的正向相同时为正值; 反之, 为负值。则得

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= -F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中, α 为力 F 与 x 轴所夹之锐角。由图 1-17 可以得出以下结论: 力 F 的大小

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\tan \alpha = \left| \frac{F_y}{F_x} \right| \quad (1-5)$$

2. 合力投影定理

设刚体受一平面汇交力系 F_1 、 F_2 、 F_3 的作用 (图 1-18a)。用力多边形法则求该力系的合力 R (图 1-18b)。取坐标轴 Oxy , 将合力 R 及力系中各力 F_1 、 F_2 、 F_3 向 x 轴投影。则得

$$\left. \begin{aligned} R_x &= F_{1x} + F_{2x} + \cdots + F_{nx} = \sum F_x \\ R_y &= F_{1y} + F_{2y} + \cdots + F_{ny} = \sum F_y \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

合力在该轴上投影等于各分力在同一轴上投影代数之和。上述关系式对由 n 个力组成的平面汇交力系都成立, 这就是合力投影定理。

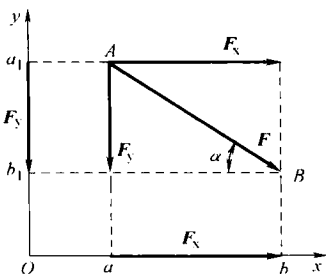


图 1-17 力的投影

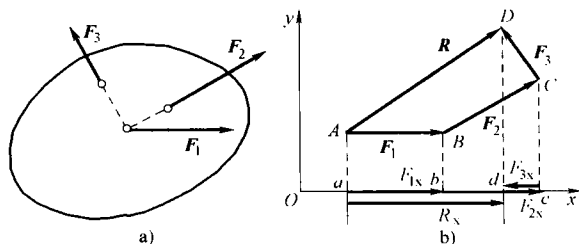


图 1-18 合力投影定理

3. 平面汇交力系合成的解析法

先由式 (1-6) 求出力系中各力在 x 、 y 两个坐标轴上的投影的代数和 R_x 、 R_y 。然后根据式 (1-5) 由 R_x 、 R_y 就可求得合力 R 的大小和方向 (图 1-19)。

合力的大小为

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \quad (1-7)$$

合力的方向可用合力 R 与 x 轴所夹之锐角 θ 的正切来表示, 即

$$\tan \theta = \left| \frac{R_y}{R_x} \right| = \left| \frac{\sum F_y}{\sum F_x} \right| \quad (1-8)$$

利用式 (1-7)、式 (1-8) 计算合力的大小和方向的方法, 称为平面汇交力系合成的解析法 (或称为投影法)。这个方法的特点是用数学工具计算并加以几何图示。

【例 1-5】在平面内的三根绳索联结在一个固定环上 (图 1-20)。已知 $F_1 = 30\text{N}$, $F_2 = 60\text{N}$, $F_3 = 150\text{N}$, 试用解析法求各力的合力。

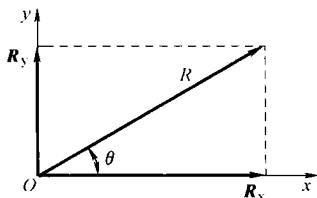


图 1-19 合力的大小和方向

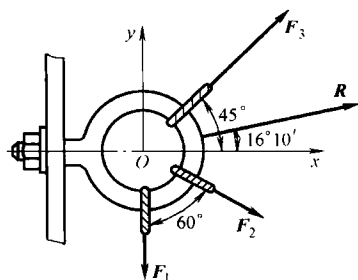


图 1-20 用解析法求平面汇交力系的合力

解：取坐标轴 x 、 y 如图 1-20 所示，分别求出各力在两个坐标轴上投影的代数和

$$\sum F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = 0 + F_2 \cos 30^\circ + F_3 \cos 45^\circ = 157.7 \text{ N}$$

$$\sum F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = -F_1 - F_2 \sin 30^\circ + F_3 \sin 45^\circ = 45.75 \text{ N}$$

由式 (1-7) 可得合力的大小为

$$R = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} = \sqrt{157.7^2 + 45.75^2} \text{ N} = 164.2 \text{ N}$$

合力的方向为

$$\tan \theta = \left| \frac{\sum F_y}{\sum F_x} \right| = \frac{45.75}{157.7} = 0.29$$

$$\theta = 16^\circ 10'$$

由于 $\sum F_x$ 、 $\sum F_y$ 均为正值，所以合力 R 在第一象限，其作用线通过三个力的汇交点。

四、平面汇交力系平衡的解析条件——平衡方程

前已述及，平面汇交力系平衡的充要条件是该力系的合力 R 等于零。由式 (1-7) 即得

$$\sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} = 0 \quad \text{即} \quad \left. \begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

上式表明，平面汇交力系平衡的条件是：力系中所有各力在作用面内两个任选的坐标轴上的投影代数和都等于零。式 (1-9) 称为平面汇交力系的平衡方程。这是两个独立的方程，用它可解具有两个未知数的问题。

【例 1-6】 图 1-21a 所示的物体 $G = 20 \text{ kN}$ ，不计杆和滑轮的重量，不计滑轮直径，试求杆 AB 和杆 BC 所受的力。

解：(1) 选取研究对象 由于杆 AB 与杆 BC 皆为二力杆，故可取滑轮 B 为研究对象。

(2) 对滑轮 B 画出受力图 滑轮受两边绳子的拉力 T_1 和 T_2 的作用，由于不考虑摩擦，于是 $T_1 = T_2 = G = 20 \text{ kN}$ ，杆 AB 与杆 BC 的反力 F_1 和 F_2 的方向都沿各杆两端铰链中心的连线，并假设两个力均为拉力，由于不计滑轮直径，故可认为这些力汇交

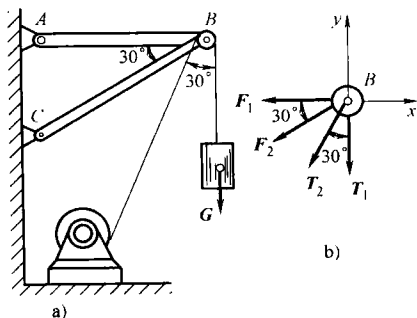


图 1-21 简易起重机

于 B 点 (图 1-21b)。

(3) 选坐标轴 (图 1-21b) 列平衡方程求解

$$\sum F_x = 0 \quad -F_1 - F_2 \cos 30^\circ - T_2 \sin 30^\circ = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad -F_2 \sin 30^\circ - T_2 \cos 30^\circ - T_1 = 0$$

联立两式解得

$$F_1 = 54.5 \text{ kN}, F_2 = -74.5 \text{ kN}$$

F_2 为负值, 表示假设的指向与实际指向相反, 即杆 BC 实际上是受压力。

【例 1-7】压榨机 ABC (图 1-22a), 在铰接点 B 作用一主动力 $P = 300 \text{ N}$, $\alpha = 8^\circ$, 不计各杆件的自重和接触处的摩擦。试求杆 AB 、杆 BC 及工件所受的力。

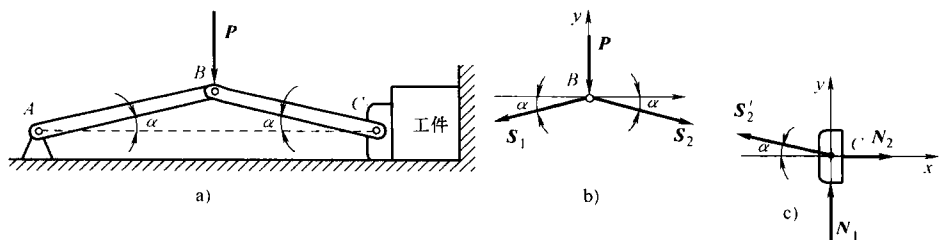


图 1-22 压榨机受力计算

解: 求解本题如仅选取一个物体作为研究对象显然是不够的, 必须考虑几个物体的平衡才能求出全部的解, 这称为物体系统的平衡问题。

(1) 先求杆 AB 、杆 BC 所受的力 取铰接点 B 为研究对象。对 B 点进行受力分析并画受力图 (图 1-22b)。选坐标轴, 列平衡方程并求解

$$\sum F_x = 0 \quad S_2 \cos \alpha - S_1 \cos \alpha = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad -S_1 \sin \alpha - S_2 \sin \alpha - P = 0$$

由上述第一个方程得

$$S_1 = S_2$$

由上述第二个方程得

$$S_1 = S_2 = \frac{-P}{2 \sin \alpha} = \frac{-300 \text{ N}}{2 \times 0.1392} = -1080 \text{ N}$$

负号说明假设方向与实际方向相反, 故杆 AB 、杆 BC 均受压力, 大小为 1080 N 。由上式可见, 在同一 P 值下, α 愈小, S_1 、 S_2 愈大。

(2) 再求工件受的力 取滑块 C 为研究对象; 由作用力与反作用力公理, 对 C 点进行受力分析并画受力图 (图 1-22c)。选坐标轴, 列平衡方程并求解

$$\sum F_x = 0 \quad -S_2' \cos \alpha + N_2 = 0$$

因为

$$S_2' = S_2 = -1080 \text{ N}$$

故得

$$N_2 = S_2' \cos \alpha = -1080 \text{ N} \times 0.9903 = -1070 \text{ N}$$

根据作用力与反作用力公理, 工件受到的压力也为 1070 N 。

阅读材料

图 1-23a 为船舶拖缆问题, 图 1-23b 是近似受力图。类似于例 1-7 可得拖缆内张力算式为: $T = G / (2 \sin \alpha)$, 当 $\alpha = 2^\circ$ 时, $\sin 2^\circ = 0.035$, $T = 14.3 \text{ G}$; 当 α 接近 0° 时, T 将趋向无穷大, 一旦发现拖缆快绷直了, 就意味着拖缆即将断掉。

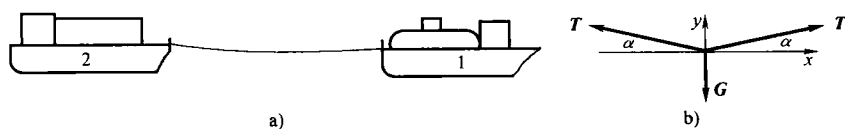


图 1-23 船舶拖缆

第五节 力矩与力偶

一、力对点的矩与合力矩定理

1. 力对点的矩

现以扳手拧螺母（图 1-24a）为例。用扳手拧螺母时，其效应可用积 Fh 衡量，再冠以适当的正负号，称为力 F 对 O 点的矩，简称力矩，即：力的大小乘以某点至力的作用线的垂直距离，称为力对该点的力矩。以符号 $M_o(F)$ 表示。

$$M_o(F) = \pm Fh \quad (1-10)$$

式中，点 O 称为力矩中心，简称矩心。 O 点到力的作用线的垂直距离 h 称为力臂。正负号规定：力使物体绕矩心逆时针转动为正；反之则为负。图 1-24a 所示力矩为正值。

图 1-24b、c 示出两个实例。讨论力矩时，必须指明矩心。另外，由式（1-10）可知，当力 F 或力臂 h 为零时，力矩等于零。力沿作用线移动时，力的大小、方向和力臂不变，它对某一点的力矩不变。

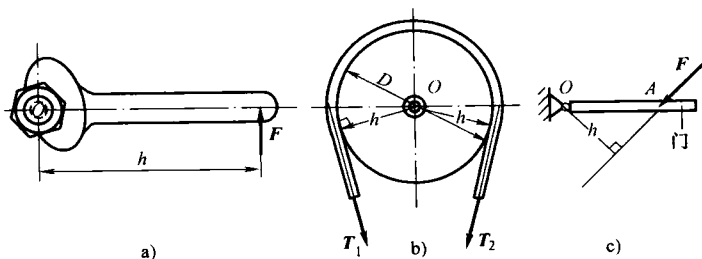


图 1-24 力矩实例

力矩的单位由力和力臂的单位来确定，即是力的单位与长度单位的乘积。在国际单位制中，力矩的单位是牛〔顿〕米（ $N \cdot m$ ）。

【例 1-8】在图 1-24b 中，设带轮直径 $D = 1200\text{mm}$ ，带紧边拉力 $T_1 = 5\text{kN}$ ，松边拉力 $T_2 = 2\text{kN}$ ，试计算力 T_1 与 T_2 对带轮中心 O 点之矩。

解：如前所述带拉力沿轮缘切线，所以 T_1 、 T_2 的力臂就是轮子的半径，即

$$h = \frac{D}{2} = 600\text{mm} = 0.6\text{m}$$

拉力 T_1 对 O 点之矩为

$$M_o(T_1) = T_1 \times \frac{D}{2} = 5000\text{N} \times 0.6\text{m} = 3000\text{N} \cdot \text{m}$$