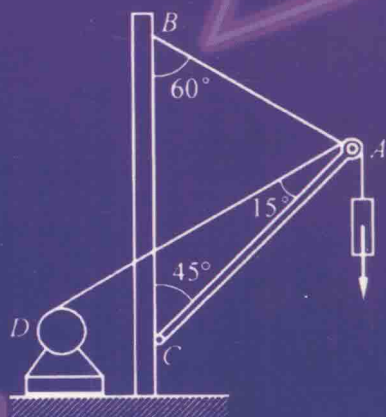


高职高专规划教材

工程力学简明教程 学习指导 (土建类)

张美元 编著

GONGCHENG LIXUE JIANMING
JIAOCHENG XUEXI ZHIDAO



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高职高专规划教材

工程力学简明教程学习指导

(土建类)

张美元 编著



机械工业出版社

本书是机械工业出版社出版的《工程力学简明教程》(张美元 编著)的配套学习指导书。本书主要内容包括:绪论、工程力学基础、力系的合成与平衡、杆件的内力与内力图、杆件的应力与强度计算、杆件的变形计算与刚度校核、压杆稳定、结构计算简图与几何组成分析、静定结构的内力与位移计算、超静定结构的传统解法、《平面直杆结构内力与位移计算》软件的应用以及影响线等。本书每章都由内容与要求、学习与理解、习题答案及选解、复习思考题等四部分组成。

本书可作为高职院校的水利水电、工业与民用建筑、给排水、道路桥涵等土建类专业和近土建类专业的工程力学课程的教学辅导书,也可作为土建类工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学简明教程学习指导·土建类/张美元编著.

—北京:机械工业出版社,2005.6

高职高专规划教材

ISBN 7-111-17062-8

I.工… II.张… III.工程力学-高等学校:技术学校-教学参考资料 IV.TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第086000号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:宋学敏 版式设计:张世琴 责任校对:魏俊云

封面设计:张静 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2005年9月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·7.125印张·277千字

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是与机械工业出版社出版的《工程力学简明教程》(张美元编著)(以后内容中均简称“主教材”)配套使用的课外读物。它的每一章都是与主教材对应的,除“第一章绪论”外,每章都由内容与要求、学习与理解、习题答案及选解、复习思考题等四部分组成。其中:

“内容与要求” 主要介绍该章的基本内容和学习基本要求,并指出了该章的学习重点和难点。

“学习与理解” 主要对重要理论、重要概念、基本且常用的方法进行归纳、综合,并作进一步的说明,通过针对性例题的分析,更有利于读者对该章的学习与理解。

“习题答案及选解” 给出了各章习题中除物体受力图部分外的习题答案,并对其中具有一定难度的习题给出了详细的解题过程,供读者学习时参考。

由于仓促和本人水平所限,书中难免有不足或错误之处,敬请各位同仁和广大读者批评指正。

本书中加“*.”部分为选学内容。

编者

目 录

前言

第一章 绪论	1
内容与要求	1
学习与理解	1
复习思考题	4
第二章 工程力学基础	5
内容与要求	5
学习与理解	5
习题答案及选解	14
复习思考题	15
第三章 力系的合成与平衡	18
内容与要求	18
学习与理解	18
习题答案及选解	37
复习思考题	48
第四章 杆件的内力与内力图	50
内容与要求	50
学习与理解	50
习题答案及选解	68
复习思考题	73
第五章 杆件的应力与强度计算	75
内容与要求	75
学习与理解	75
习题答案及选解	86
复习思考题	94

第六章 杆件的变形计算与刚度校核	98
内容与要求	98
学习与理解	98
习题答案及选解	106
复习思考题	112
第七章 压杆稳定	114
内容与要求	114
学习与理解	114
习题答案及选解	119
复习思考题	122
第八章 结构计算简图与几何组成分析	123
内容与要求	123
学习与理解	123
习题答案及选解	130
复习思考题	134
第九章 静定结构的内力与位移计算	135
内容与要求	135
学习与理解	135
习题答案及选解	150
复习思考题	162
第十章 超静定结构的传统解法	163
内容与要求	163
学习与理解	163
习题答案及选解	178
复习思考题	188
第十一章 《平面直杆结构内力与位移计算》软件的应用	190
内容与要求	190
学习与理解	190
习题答案及选解	202
复习思考题	211

第十二章 影响线	212
内容与要求	212
学习与理解	212
习题答案及选解	217
复习思考题	221
参考文献	222

第一章 绪 论

内容与要求

1. 基本内容

本章的基本内容有工程力学的研究对象和主要任务、变形固体的基本假设、杆件变形的基本形式。

2. 基本要求

学习本章的基本要求是：

- 1) 了解建筑物、结构、构件三者的涵义及其相互关系，明确工程力学课程的研究对象。
- 2) 了解杆件和杆件结构的强度、刚度、稳定性的涵义，明确工程力学的主要任务。
- 3) 了解杆件基本变形的形式，以及每种变形的受力与主要变形特征。

学习与理解

1. 杆件和杆件结构

工程力学的研究对象是杆件和杆件结构。

杆件是指长度远远大于横向尺寸的构件。轴线是直线的杆件称为直杆，轴线是曲线的杆件称为曲杆。杆件的横截面可以有各种不同的形状，常见的截面形状有矩形、圆形、圆环形、工字形及 T 形等几种。

杆件结构是指由杆件（或杆件系统）与基础相联构成的结构。结构中的杆件与杆件之间的联结，称为结点。如果杆件在结点处不能有任何的相对转动，则称此结点为刚性结点；若可以作相对转动（即使是微小的转动），则称此结点为铰结点。结构中基础联结并起支承作用的部分（或构造），称为支座。结构中支座有多种不同的形式，每种形式的支座所起的作用也各不相同。常见的支座形式有固定铰支座、可动铰支座、固定端支座等。

杆件结构有多种形式,常见的杆件结构有:梁、刚架、桁架、拱等基本形式以及由基本形式的结构组成的组合结构。最简单的杆件结构是只有一根杆件的结构,如单跨梁。

杆件结构是通过对实际受力物体或建筑物进行简化后而得到的结构计算简图,即结构的力学模型。

2. 强度、刚度、稳定性

工程力学的任务是研究杆件或杆件结构自身的承载能力。承载能力主要是指杆件承受外力的能力。对于结构基础的承载能力将在有关的专业课程中研究。承载能力具体体现在强度、刚度和稳定性三个方面。

强度——反映杆件抵抗破坏能力的量度。强度问题是指当杆件受外力作用后,会不会产生断裂、破碎等问题。

刚度——反映杆件抵抗变形能力的量度。刚度问题是指杆件受力后产生的变形会不会超出允许范围的问题。当杆件变形超过允许范围时,虽然结构不至于破坏,但却不能正常使用,同样属于失去了承载能力。

稳定性——反映轴向压杆保持原有直线平衡状态的能力。研究证明,对于细而长的轴向压杆,其承载能力突出地反映在稳定性问题上。如果稳定性满足要求,则该杆件的强度和刚度都会满足要求。

杆件的强度、刚度和稳定性,不仅与作用于杆件上的外力有关,还与杆件的几何尺寸、截面形状、杆件材料的性质等因素密切相关。

3. 变形固体的三个假设

实际物体的物理性质是比较复杂的,当分析物体的受力和变形时,只要抓住主要的影响因素,就可使分析结果满足计算精度要求,而且还可以使分析过程和解决问题的表达形式十分简捷。基于此,工程力学中,对变形固体的材料作出了三点假设,即均匀连续性假设、各向同性假设和小变形假设。

均匀连续性假设,是假设组成固体材料的晶体在固体内无任何间隙地均匀分布在整个固体的几何空间内。

各向同性假设,是假设固体材料在三维空间的任何方向上的物理或力学性能都相同。

通过这两条假设,可以根据从固体内取出的任何一个微分体的受力和变形情况,定义其在各个方向的受力和变形规律,使问题得以简化。

小变形假设,就是认为或限定材料的变形必须是弹性变形范围内的小变形。有了这个假设,可以在考虑物体的整体或局部平衡时忽略小变形的影响,即在变形前后均取相同的几何尺寸。

4. 杆件的四种基本变形

实际工程结构中的杆件在外力或其他各种因素作用下的变形形式有很多种,但经分析表明,无论杆件的变形形式如何复杂,其基本的变形形式只有四种,即轴向拉伸和压缩、剪切、扭转和平面弯曲等。其他任何变形形式都是这四种基本形式的不同组合。

轴向拉伸和压缩:当杆件受到沿轴线方向的拉力或压力作用时,杆件的变形为轴线的伸长或缩短,如图 1-1a、b 所示。

剪切:是指杆件(或构件)受一对等值、反向、作用线平行但相距很近的外力作用时,杆件位于此二力作用线之间的横截面会产生沿各自作用力方向平行错动的变形或破坏,如图 1-2 所示。工程中的剪切构件主要是结构或机构中的联接件,如铆钉、螺栓、销钉等物件。

扭转:杆件受到与横截面平行且绕杆件轴线转动的外力偶作用时,杆件在外力偶作用面之间的各横截面均绕杆件轴线产生相对转动,如图 1-3 所示。工程中的扭转变形杆件主要是机械(机器)的传动轴。

弯曲:当杆件受到与杆轴线垂直的外力作用时,杆件的轴线会由原来的直线变为曲线(称为曲轴线)。这时,杆件轴线一侧的纤维相对伸长,另一侧的纤维则相对缩短,如图 1-4 所示。工程中的弯曲变形杆件是最常见的受力构件,工程结构中的梁和刚架中的杆件都是弯曲构件。

关于这四种基本变形的特征,在主教材^①和本书的第四、五、六章中都有详细讲述。

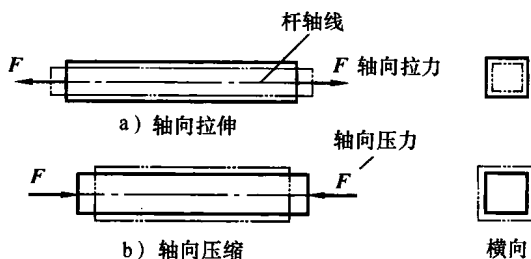


图 1-1

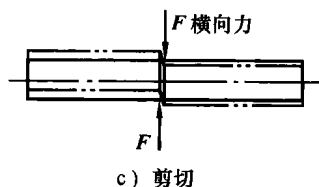


图 1-2

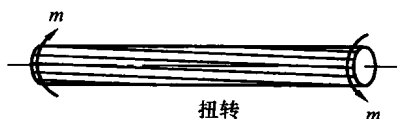


图 1-3

① 本书中所提及“主教材”均是指由机械工业出版社出版的《工程力学简明教程》(张美元 编著)。

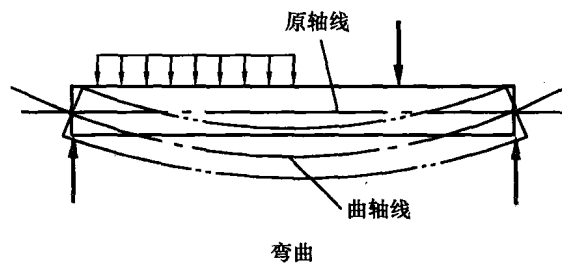


图 1-4

复习思考题

1. 工程力学的学科性质是什么?
2. 何谓结构? 何谓杆件结构?
3. 杆件的几何特征是什么?
4. 结点在结构中起何作用?
5. 支座在结构中起何作用?
6. 强度、刚度、稳定性分别反映了杆件哪个(或哪些)方面的能力?
7. 假设工程材料符合均匀连续性、各向同性和小变形的目的是什么?
8. 作用于四种基本变形杆件上的外力各有什么特征?

第二章 工程力学基础

内容与要求

1. 基本内容

- 1) 七个概念：力、平衡、刚体、投影、力矩、力偶、约束等。
- 2) 四个公理：二力平衡公理、加减平衡力系公理、力的平行四边形公理、作用与反作用公理。
- 3) 两个定理：合力投影定理、合力矩定理。
- 4) 物体的受力分析与受力图。

本章的重点有：力的概念，力的投影计算和力矩的计算以及物体的受力图。画物体体系的受力图是本章的难点。

2. 基本要求

- 1) 充分理解和掌握上述概念，熟练掌握力的投影和力对点之矩的计算方法。
- 2) 弄清四个公理的涵义和各自的适用条件。
- 3) 弄清两个定理及其表达式的意义，熟练掌握合力的投影和合力矩的计算，会对墙体进行抗倾覆稳定性校核。
- 4) 弄清并熟练掌握常见约束的功能及约束力特征。
- 5) 熟练掌握作物体受力图的方法和要点，高度重视作物体的受力图。

学习与理解

1. 力矢量

力的概念是工程力学最基本最重要的概念。物体的相互接触（或作用）是产生力的原因，物体的运动或变形是力作用的结果。力是有大小和方向的量，故力是矢量。力在物体上的作用位置是力的作用点。对于不同形式的力有不同的单位和量纲。

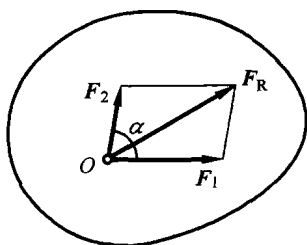
作用于物体上的若干个力称为力系，其合力就是该力系的等效力，力系中的

各力称为力系的分力。作用于物体上同一点的力系可以由平行四边形法则合成为一个仍作用于该点的合力，这合力是各分力的矢量和。图 2-1 中 F_R 是 F_1 和 F_2 的合力或等效力。

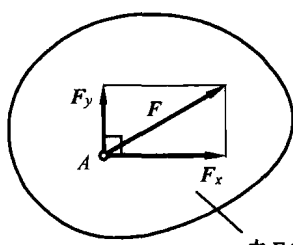
一个力可以分解为仍作用于该力作用点的两个分力，但若要惟一确定这两个分力，必须具备以下三个条件之一：

- 1) 已知一分力的大小和方向，求另一分力的大小和方向。
- 2) 已知两分力的大小，求其方向。
- 3) 已知两分力的方向，求其大小。

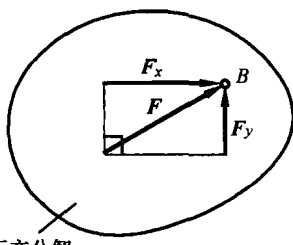
工程力学中通常将一个力分解为两个相互垂直的分力，即两分力的方向已知，只求大小，如图 2-2 所示。



力的合成



a)



b)

力 F 的正交分解

图 2-1

图 2-2

平衡状态是指平衡力系作用下物体所处的状态，即静止或匀速直线运动状态。本书中所研究的杆件和杆件结构都处于静止状态。或者说，作用于所研究物体上的力系，都是平衡力系。使得所作用的物体处于平衡状态时，力系必须满足的条件，称为该力系的平衡条件。平衡条件的数学表达式，称为平衡方程式。

2. 力的投影与力系合力的投影

力的投影表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \pm F \cos \alpha \\ F_y &= \pm F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

用式 (2-1) 计算力的投影时，要注意投影表达式中 α 的定义域。本书中将 α 限定为力作用线与 x 轴所夹的锐角。因此，力在某轴上投影的正负号取决于力沿投影轴分解时的分力方向：当分力与投影轴正向一致时，该投影取正号，反之取负号。

若将投影角 α 定义为力作用线与 x 轴正向的夹角，即投影的表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-2)^*$$

则投影的正负号取决于对应三角函数值的正负号。

力系合力在两个坐标轴上的投影，由合力投影定理计算，合力投影定理的表达式为

$$\left. \begin{aligned} F_{Rx} &= \sum F_{ix} \\ F_{Ry} &= \sum F_{iy} \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

此式表明：力系合力在某坐标轴上的投影，等于力系中各分力对同一坐标轴投影的代数和。力的投影及合力的投影都是代数量。计算时要特别注意投影的正负号。

3. 力矩与力系的合力矩

力矩是量度力对物体转动效应的物理量。在平面内，它是一个代数量，其表达式为

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (2-4)$$

式中，“ $\pm$ ”表示力使物体的转动方向，规定当力 F 使物体绕“矩心 O ”逆时针方向转动时，该力矩取“ $+$ ”，反之取“ $-$ ”； d 是力 F 的作用线与“矩心 O ”之间的垂直距离。

需要注意的是，在判定力矩的正负号时，由于所研究的物体处于静止平衡状态，所以物体的转动方向实际上是物体转动趋势的方向。

初学者在计算力矩时，往往难以确定“转动方向”。建议这时用实验的方法来确定物体的转向：像画图时一样，一手握圆规（视为要转动的物体），圆规针尖置于桌面上（视为矩心），圆规两腿连线视为力臂，用另一只手的食指当作力，并按力的方向去推动圆规的可动腿，则圆规的转向即该力作用时物体的转向。

当物体上受力系作用时，该力系对物体的转动效应可用该力系合力矩来量度：力系合力对某点的矩，等于该力系中各分力对同一点力矩的代数和，即

$$M_O(F_R) = \sum M_O(F_i) \quad (2-5)$$

该定理是力系合成与平衡计算的重要理论依据。同时，当在计算力矩的过程中遇到某力的臂长未直接给出或不易确定时，可以将该力进行垂直分解，然后用求合力矩的办法来求取该力的矩。

【例 2-1】 计算作用于图 2-3a 所示物体上 A 点的力 F 对 B 点的矩，设图 2-3a 中 l 、 α 、 β 为已知。

【解】 对于图 2-3a，计算力 F 对 B 点的矩有两种方法：

(1) 先由几何关系计算出力作用线到 B 点的垂直距离 d ，然后才能计算该力对 B 点的矩。由图中几何关系可知

则

$$d = l \sin(\beta - \alpha)$$

$$M_B(F) = Fd = Fl \sin(\beta - \alpha)$$

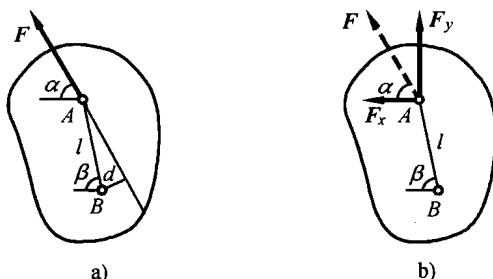


图 2-3

(2) 若将力作如图 2-3b 所示的分解, 则该力矩显然为

$$M_B(F) = M_B(F_x) + M_B(F_y) = Fl \cos \alpha \sin \beta - Fl \sin \alpha \cos \beta = Fl \sin(\beta - \alpha)$$

这两种方法的计算结果是完全一致的, 但在实际计算中, 多采用第 (2) 种方法。

力对物体的作用, 一般说来, 既会产生平动效应, 又会产生转动效应; 前者可用力在轴上的投影来量度, 后者则用力对点的矩来量度。从这种意义上讲, 合力投影定理从平动效应方面揭示了合力与分力之间的等效关系, 而合力矩定理则从转动效应方面揭示了合力与分力之间的等效关系, 因此可以说, 它们是静力学的两个基本定理。

在土建工程中, 通常需要对挡土墙、重力坝等仅以地基为约束条件的墙体结构进行抗倾覆和抗滑动稳定性校核。抗倾覆稳定性校核的基本方法是: 分别计算出“抗倾力矩 M_1 ”和“倾覆力矩 M_2 ”后, 对这两种力矩进行比较, 当

$$M_1 > M_2$$

或

$$K = \frac{M_1}{M_2} > 1 \quad (2-6)$$

时, 墙体不会倾覆。如果在一个墙体上促使其倾覆的力或者阻止其倾覆的力有几个时, 则式 (2-6) 中 M_1 等于各抗倾力矩之和, M_2 等于各倾覆力矩之和。

若不能确定哪些力是抗倾力, 哪些力是倾覆力, 则建议采用下面的方法校核抗倾覆稳定性: 以墙体的可能倾覆方向 (墙体绕指定点的可能转动方向) 作为力矩的正号方向, 计算出作用于墙体上各力对指定点的合力矩

$$M_O = \sum M_O(F_i) \quad (2-7)$$

则当 M_O 为正时, 墙体会绕 O 点倾覆; M_O 为负时, 墙体不会绕 O 点倾覆。

【例 2-2】 求图 2-4a 所示杆 AB 上平行力系的合力及其作用位置。

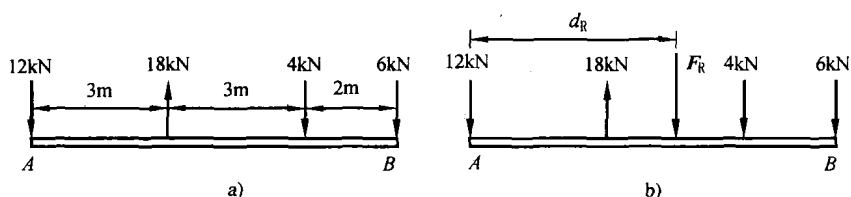


图 2-4

【解】 对于平行力系，由于它的合力作用线必定与各分力的作用线平行，故其合力的大小等于各分力的代数和，其作用位置可由合力矩定理确定。设合力 F_R 向下为正，其作用线距 A 点的距离为 d_R ，如图 2-4b 所示，则

$$F_R = \sum F = 12\text{kN} - 18\text{kN} + 4\text{kN} + 6\text{kN} = 4\text{kN}$$

$$\text{由 } M_A(F_R) = \sum M_A(F)$$

$$\text{有 } F_R \times d_R = 4\text{kN} \times 6\text{m} + 6\text{kN} \times 8\text{m} - 18\text{kN} \times 3\text{m} = 72\text{kN} \cdot \text{m} - 54\text{kN} \cdot \text{m} = 18\text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{解得 } d_R = \frac{18\text{kN} \cdot \text{m}}{F_R} = \frac{18\text{kN} \cdot \text{m}}{4\text{kN}} = 4.5\text{m}$$

即合力 F_R 作用在距 A 点 4.5m 处。

【例 2-3】 重力式挡土墙如图 2-5 所示。已知墙上所受各力的大小分别为：墙体自重 $W_1 = 156.8\text{kN}$ 、 $W_2 = 141\text{kN}$ ，底板自重 $W_3 = 75\text{kN}$ ，墙后土压力的合力 $F = 240\text{kN}$ 。试问该挡土墙是否会绕墙的前趾点 A 向左倾覆？

【解】 依题意，这是一个墙体的抗倾覆稳定性校核问题。在图示各力中，促使墙体倾覆的力是墙后土压力的水平分量，其他力均为抗倾覆的力，则

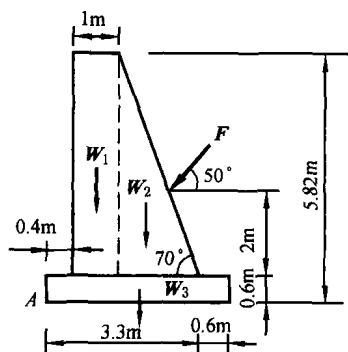


图 2-5

倾覆力矩为

$$\begin{aligned} M_2 &= F \cos 50^\circ \times 2.6\text{m} \\ &= 240\text{kN} \times 0.643 \times 2.6\text{m} \\ &= 401.23\text{kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

抗倾力矩为

$$\begin{aligned} M_1 &= F \sin 50^\circ \times (3.3\text{m} - 2\text{m} \cot 70^\circ) + W_1 \times 0.9\text{m} + W_2 \times 2.03\text{m} + W_3 \times 1.95\text{m} \\ &= 240\text{kN} \times 0.766 \times 2.57\text{m} + 156.8\text{kN} \times 0.9\text{m} + 141\text{kN} \times 2.03\text{m} + 75\text{kN} \times 1.95\text{m} \\ &= 472.47\text{kN} \cdot \text{m} + 141.12\text{kN} \cdot \text{m} + 286.23\text{kN} \cdot \text{m} + 146.25\text{kN} \cdot \text{m} \\ &= 1046.07\text{kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

因 $M_1 > M_2$, 故该墙体不会向左倾覆。

4. 力偶

力偶是由两个等值、反向、不共线的力所组成的特殊力系。力偶仅使物体产生转动, 并用力偶矩来量度力偶对物体的转动效应。组成为力偶的二力在任一轴上投影的代数和为零, 因而力偶没有合力, 也不能用一个力去平衡。组成为力偶的二力对任一点的力矩之和为一常量, 其值等于该力偶的力偶矩。

5. 静力学公理的应用问题

受二力作用的刚体处于平衡状态的条件, 即二力平衡的条件, 是这两个力等值、反向、共线。该条件虽然是针对刚体而言的, 但在实际应用中, 在研究除柔性体外的弹性变形固体的二力平衡问题时, 仍然使用这个条件, 因为平衡问题属于力对物体作用的外效应问题。

加减平衡力系公理、力的可传性都只适用于刚体, 在分析杆件内力及变形时切勿误用之。

在对物体系进行受力分析、对杆件或杆件结构进行内力和应力分析时, 经常应用到力的作用与反作用关系。两接触物体间的相互作用力是物体系的内力, 被截杆件两部分中截面间的相互作用力是杆件的内力。内力是成对出现的, 每对内力间的关系是作用与反作用关系。

6. 约束与受力图

(1) 约束 约束是阻止物体运动的装置, 是相对于受力分析对象 (即研究对象) 的其他物体。约束对被约束物体所作用的力, 称为约束力, 其方向始终与被约束物体在外力作用下的可能运动方向相反。约束力的作用点是与被约束物体的接触点 (工程中常见的约束的功能及约束力特征参见主教材 P₁₇表 2-1)。

(2) 受力图 受力图是反映物体或物体系承受力系作用状况的图形。作受力图的一般步骤为:

- 1) 确定研究对象, 并取此研究对象为脱离体。
- 2) 在该脱离体上画出其受到的全部主动力 (即荷载)。
- 3) 在其与所受各约束的接触处, 按约束类型及相应的约束力特征画出约束