

“十二五”规划大学教材

GONGCHENGLIXUE

工程力学

王宏志◎主编



东北师范大学出版社

NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

工 程 力 学

王宏志 主编

东北师范大学出版社

长 春

.....
图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学 / 王宏志主编. —长春: 东北师范大学出版社, 2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5602 - 7698 - 4

①工… Ⅱ. ①王… 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 (2011) 第 277809 号
.....

责任编辑: 王宏志 封面设计: 魔弹文化

责任校对: 汲明 责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

电话: 010-82920765

传真: 010-82920765

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbcs@mail.jl.cn

北京魔弹文化制版

北京市彩虹印刷有限责任公司印装

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 16.25 字数: 416 千字

定价: 29.90 元

前 言



本书主要遵循“以就业为导向，工学结合”的原则，以实用为基础，突出培养应用型人才解决实际问题的能力。根据专业实际需要进行课程体系设置和教材内容的选取，注重提高案例教学的比重，强化实际应用。特色鲜明，集高质量与实用性于一体。

为了适应高等教育改革要求，体现培养应用性人才的特点，组织教师进行了深入的调研，在编写上力求体现大学特色。在内容上以“应用”为导向，基础理论以“必须、够用”为度，以渗透“现代力学思想，讲清概念，减少理论推导，强化生活和工程实际应用”为重点。力求做到知识面适度，内容简明，实用性强。结构上遵循循序渐进、承上启下的规律；文字上力求语言精练、通俗易懂，坚持少而精，做到重点突出，理论联系实际，增强应用性。

本书根据课程教学的基本要求编写，本书在每章后都附有练习题，旨在指导学生学学习、启发思考，巩固和训练应用工程力学知识的能力。

编 者



目 录

第一章	静力分析基础	1
第一节	力和力系	2
第二节	力偶和力矩的基本知识	5
第三节	力系的简化	8
第四节	约束和约束力	15
第五节	物体的受力分析	19
第二章	平面一般力系	27
第一节	力在直角坐标轴上的投影	28
第二节	平面力系的简化	31
第三节	平面力系的平衡和应用	36
第四节	物体系统的平衡问题	43
第三章	平面力偶理论	48
第一节	力对点的矩	49
第二节	力偶和平面力偶系	51
第三节	力的平移定理	54
第四章	空间力系简介	57
第一节	力在空间坐标轴上的投影	58
第二节	力对轴之矩	59
第三节	空间力系的平衡方程	60

第五	章	静定结构的内力分析	66
第一	节	内力计算基础	67
第二	节	轴向拉(压)杆的内力分析	68
第三	节	单跨静定梁的内力分析	70
第四	节	平面静定结构的内力	79
第六	章	失效分析基础	91
第一	节	应力、应变和构件失效	92
第二	节	轴向荷载作用下的材料力学性能和材料失效	98
第三	节	安全储备、强度条件和强度失效判别	105
第七	章	应力、强度计算	109
第一	节	平面图形的几何性质	110
第二	节	轴向拉压时横截面上的应力和强度计算	117
第三	节	剪切、挤压变形时构件的应力和强度条件	120
第四	节	连接件的强度计算	123
第五	节	梁弯曲时的应力与强度	128
第六	节	提高梁抗弯强度的途径	136
第七	节	组合变形杆件的强度计算	140
第八	章	结构的位移计算与刚度校核	150
第一	节	静定结构的位移计算概述和轴向拉(压)杆的变形	151
第二	节	虚功原理	154
第九	章	压杆的屈曲失效和稳定条件	166
第一	节	压杆的屈曲失效	167
第二	节	压杆稳定的概念及临界力计算	169

第三节	压杆稳定的条件和计算方法	178
第四节	提高压杆稳定性的措施	181
第十章	超静定结构	185
第一节	超静定结构概述	186
第二节	采用力法解超静定结构	189
第十一章	平面体系的集合组成分析	195
第一节	结构组成的集合规则和分析方法	196
第二节	体系的几何组成与静定性的关系	201
第十二章	实 验	204
实验一	质心与转动惯量实验	204
实验二	拉伸性实验	208
实验三	扭转实验	213
实验四	工字梁弯曲实验	216
附 录		219
附录 I	平面图形的几何性质	219
附录 II	构件的疲劳强度概述	230
附录 III	型钢表	234
表附 IV	热轧不等边角钢 (GB 9788—88)	240
表附 V	热轧普通槽钢 (GB707—88)	245
表附 VI	热轧普通工字钢 (BG706—88)	248
参考文献		251

第一章

静力分析基础



本章概述

学习静力学，首先必须弄清楚一些基本的力学概念和静力学公理，如力和力系、力矩与力偶的概念。此外，在熟悉工程中常见的典型约束，如柔索约束、光滑接触面约束、光滑铰链约束和滚动支座约束，及其约束反力的基础上，能对物体进行受力分析，并且能够画出物体的受力图，这是解决力学问题的基础环节。



教学目标

1. 了解力、力系、力矩、力偶的基本概念。
2. 掌握静力学公理，重点熟悉工程中常见的典型约束及其约束反力。
3. 了解常见的约束和约束力。
4. 能够简化简单的力系。
5. 在对物体进行受力分析时，能合理、灵活地应用静力学公理和典型约束的约束反力的特点，针对具体情况进行具体分析，熟练地画出物体的受力图。

第一节 力和力系

一、力与力的性质

1. 力的基本概念

力是物体间相互的机械作用。力的变形效应将在研究变形体力学问题的各学科中加以讨论，在理论力学中主要讨论力的外效应。

2. 力的性质

力是物体之间的相互作用，能使物体的运动状态发生改变，或使物体变形。在工程力学中讨论的主要对象为质点或刚体，力的作用效果只改变其运动状态。在我国法定计量单位中，力的单位为 N（牛）， $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。力具有如下性质：

(1) 力的作用效果取决于力的大小、方向与作用点。

此性质称为力的三要素。可用一个有向线段来描述力的方向和大小。用该有向线段的起点或终点描述其作用点。线段所在的直线称为力的作用线。

知识拓展

自然界中存在着各种各样的力，人们在生活和生产过程中逐渐产生了力的概念。在自然界中，力可以说是无处不在，如水压力、土压力、摩擦力、万有引力等。它们的物理本质虽然不同，却可以产生相同的效应，即力的效应。力使物体的运动状态发生改变的效应，称之为运动效应或外效应；力使物体产生变形的效应，称之为变形效应或内效应，如图 1-1 所示。

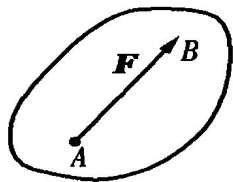


图 1-1 力的大小、方向和作用点

力的大小——物体间机械作用的强弱程度，采用国际单位制，力的单位是牛顿（N，简称牛）或者千牛顿（kN，简称千牛）；力的方向——物体间的机械作用具有方向性，它包括方位和指向；力的作用点——物体间机械作用的位置。

(2) 两个力作用于同一个点的效应可与作用点不变的另一个力等效。

该力称为两力和合力，该合力的大小与方向由以两力的有向线段为边构成的平行四边形的对角线确定。此性质称为力的平行四边形法则。

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力，此合力的大小和方向由此两力矢量所构成的平行四边形的对角线来确定，合力的作用点仍在该点。 F 为合力， F_1 与 F_2 为分力，即合力 F 等于分力 F_1 与 F_2 的矢量和，表达式为：

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

亦可用力三角形求得合力矢，还可采用三角形法则确定合力，力的平行四边形法则是最简单的力系简化，同时此法则也是力的分解法则，如图 1-2 所示：

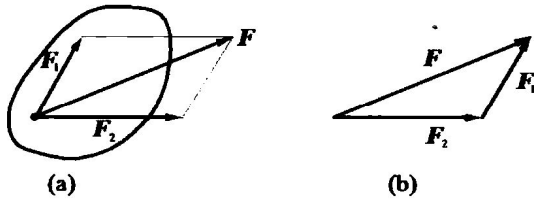


图 1-2 力的等效

3. 二力平衡

作用于同一物体的两个力使其平衡的充要条件是两力处在同一直线上，且大小相等，方向相反，如图 1-3 所示矢量表示为：

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1-2)$$

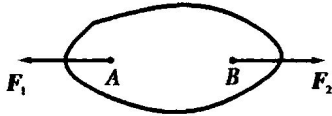


图 1-3 矢量

4. 力系平衡

在作用于物体的力系中加上或减去任意的平衡力系，并不改变原来力系对物体的作用。

将作用在刚体上的力沿其作用线任意移动到作用线的另一点，不改变它对刚体的作用效应，如图 1-4 所示：

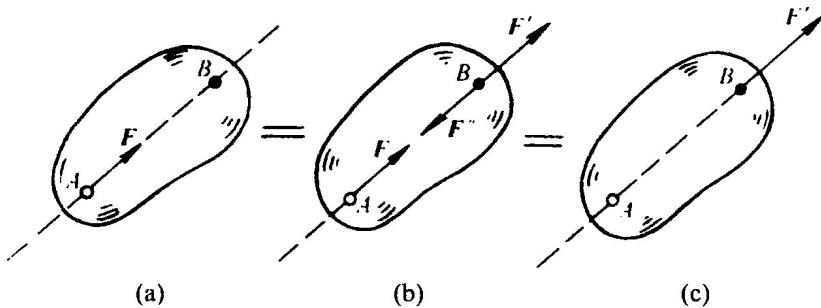


图 1-4 平衡力系

5. 作用力与反作用力

作用力与反作用力同时存在，大小相等，方向相反，沿同一作用线分别作用在不同的物体上：

注意，作用力与反作用力由于作用在不同的物体上，不构成上述所谓的平衡，如图 1-5 所示。

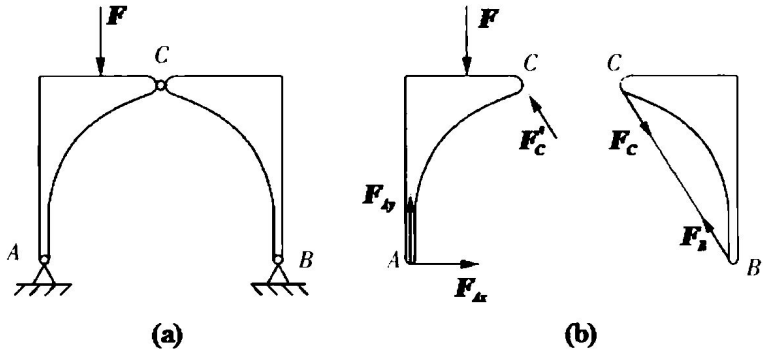


图 1-5 作用力与反作用力

二、力系

所谓平面力系是指各力的作用线都在同一平面内的力系。在平面力系中，若各力的作用线交于一点，则称为平面汇交力系，如图 1-6 所示；若各力的作用线相互平行，则称为平面平行力系，如图 1-7 所示；若各力的作用线既不完全交于一点也不完全相互平行，则称为平面一般力系，如图 1-8 所示。

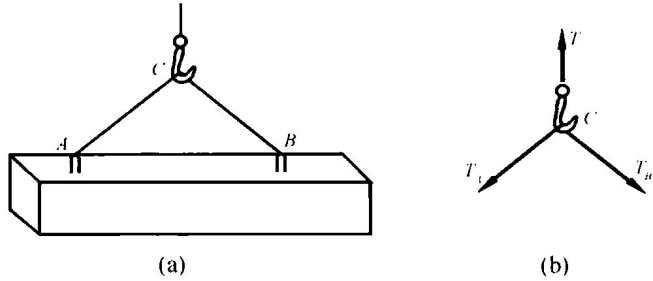


图 1-6 平面汇交力系

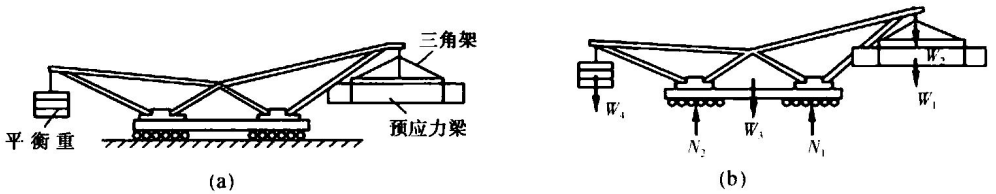


图 1-7 平面平行力系

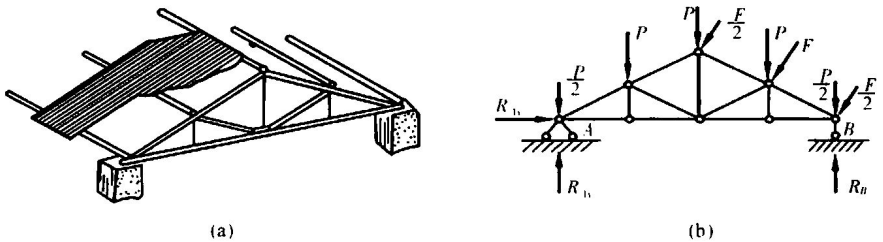


图 1-8 平面一般力系

第二节 力偶和力矩的基本知识

一、力对点的矩

从实践中知道，力对物体的作用效果除了能使物体移动外，还能使物体转动，力矩就是度量力使物体转动效果的物理量。

力的大小与力臂的乘积称为力 F 对点 O 之矩（简称力矩），记作 $m_o(F)$ ，计算公式可写为

$$m_o(F) = \pm F \cdot d \quad (1-3)$$

式中的正负号表示力矩的转向。在平面内规定：力使物体绕矩心作逆时针方向转动时，力矩为正；力使物体作顺时针方向转动时，力矩为负。因此，力矩是个代数量。

力矩的单位是 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

由力矩的定义可以得到如下力矩的性质：

- 力 F 对点 O 的矩，不仅决定于力的大小，同时与矩心的位置有关。矩心的位置不同，力矩随之不同。
- 当力的大小为零或力臂为零时，则力矩为零。
- 力沿其作用线移动时，因为力的大小、方向和力臂均没有改变，所以，力矩不变。
- 相互平衡的两个力对同一点的矩的代数和等于零。

知识拓展

现以扳手拧螺帽为例，如图 1-9 所示。手加在扳手上的力 F ，使扳手带动螺帽绕中心 O 转动。力 F 越大，转动越快；力的作用线离转动中心越远，转动也越快；如果力的作用线与力的作用点到转动中心 O 点的连线不垂直，则转动的效果就差；当力的作用线通过转动中心 O 时，无论力 F 多大也不能扳动螺帽，只有当力的作用线垂直于转动中心与力的作用点的连线时，转动效果最好。另外，当力的大小和作用线不变而指向相反时，将使物体向相反的方向转动。在建筑工地上使用撬杠抬起重物，使用滑轮组起吊重物等也是实际的例子。通过大量的实践总结出以下规律：

力使物体绕某点转动的效果，与力的大小成正比，与转动中心到力的作用线的垂直距离 d 也成正比，这个垂直距离称为力臂，转动中心称为力矩中心（简称矩心）。

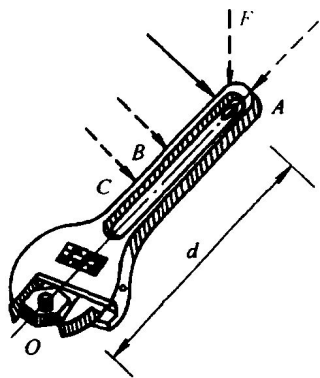
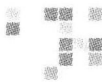


图 1-9 力矩



二、合力矩定理

在计算力对点的力矩时，有些问题往往力臂不易求出，因而直接按定义求力矩难以计算。此时，通常采用的方法是把这个力分解为两个或两个以上便于求出力臂的分力，再由多个分力力矩的代数和求出合力的力矩。这一有效方法的理论根据是合力矩定理，即：

如果有 n 个平面汇交力作用于 A 点，则平面汇交力系的合力对平面内任一点之矩，等于力系中各分力对同一点力矩的代数和，即：

$$M_o(F_R) = M_o(F_1) + M_o(F_2) + \cdots + M_o(F_n) = \sum M_o(F) \quad (1-4)$$

式 (1-4) 称为合力矩定理。

合力矩定理一方面常常可以用来确定物体的重心位置；另一方面也可以用来简化力矩的计算。这样就使力矩的计算有两种方法：在力臂已知或方便求解时，按力矩定义进行计算；在计算力对某点之矩，力臂不易求出时，按合力矩定理求解，可以将此力分解为相互垂直的分力，如两分力对该点的力臂已知，即可方便地求出两分力对该点的力矩的代数和，从而求出已知力对该点的力矩。

三、力偶的相关知识

1. 力偶和力偶矩

在生产实践和日常生活中，为了使物体发生转动，常常在物体上施加两个大小相等、方向相反、不共线的平行力，如钳工用丝锥攻丝时两手加力在丝杠上，如图 1-10 所示。

(1) 力偶。

当大小相等、方向相反、不共线的两个平行力 F 和 F' 作用在同一物体时，它们的合力 $F_R = 0$ ，即 F 和 F' 没有合力。但因两力不共线，所以也不能平衡。它们的作用效果是使物体发生转动。力学上把这样大小相等、方向相反、不共线的两个平行力叫做力偶，用符号 (F, F') 表示。两个相反力之间的垂直距离 d 叫做力偶臂，如图 1-11 所示，两个力的作用线所在的平面称为力偶作用面。力偶不能再简化成比力更简单的形式，所以力偶与力一样被看做组成功系的基本元素。

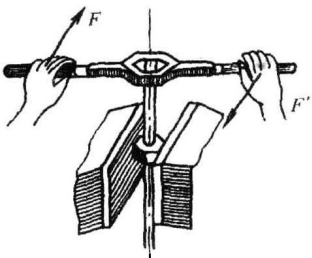


图 1-10 力偶和力偶矩

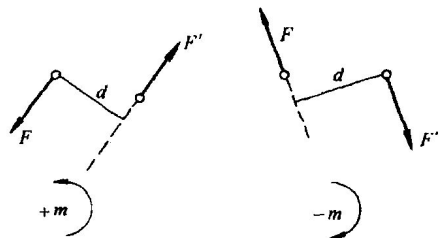


图 1-11 力偶与力偶矩的简化图

(2) 力偶矩。

实践可知,组成力偶的力越大,或力偶臂越大,则力偶使物体转动的效应越强;反之,就越弱。这说明力偶的转动效应不仅与两个力的大小有关,还与力偶臂的大小有关。与力矩类似,用力偶中一个力的大小和力偶臂的乘积并冠以适当的正负号(以示转向)来度量力偶对物体的转动效应,称为力偶矩,用 m 表示,即

$$m = \pm Fd \quad (1-5)$$

使物体逆时针方向转动时,力偶矩为正;反之为负,如图 1-11 所示,所以力偶矩是代数量。力偶矩的单位与力矩的单位相同,常用牛顿·米 ($N \cdot m$) 表示。

大量的实践证明,度量力偶对物体转动效应的三要素是:力偶矩的大小、力偶的转向、力偶的作用面。不同的力偶只要它们的三要素相同,对物体的转动效应是一样的。

2. 力偶的基本性质

(1) 力偶没有合力,所以力偶不能用一个力来代替,也不能与一个力平衡

从力偶的定义和力的合力的投影定理可知,力偶中的两个力在其作用面内的任意坐标轴上的投影的代数和恒为零,所以力偶没有合力,力偶对物体只能有转动效应,而一个力在一般情况下对物体有移动和转动两种效应。所以,力偶与力对物体的作用效应不同,所以其不能与一个力等效,也不能用一个力代替,也就是说力偶不能和一个力平衡,力偶只能和转向相反的力偶平衡。

(2) 力偶对其作用面内任一点之矩恒等于力偶矩,且与矩心位置无关

图 1-12 所示的力偶 (F, F'),其力偶臂为 d ,逆时针转向,其力偶矩为 $m = Fd$,在其所在的平面内任选一点 O 为矩心,与力 F' 的垂直距离为 x ,则它到 F 的垂直距离为 $x + d$ 。显然,力偶对 O 点的力矩是力 F 与 F' 分别对 O 点的力矩的代数和。其值为

$$m_O(F, F') = F(d + x) - F'x = Fd = m$$

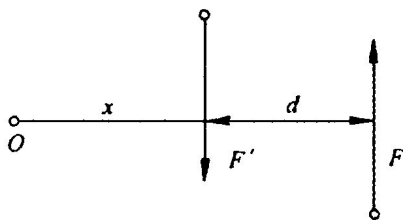


图 1-12 力偶

由于 O 点是任意选取的,所以性质 (2) 已得证。

(3) 在同一平面内的两个力偶,如果它们的力偶矩大小相等,转向相同,则这两个力偶等效,称为力偶的等效条件。

从以上性质可以得到两个推论:

- 力偶可在其作用面内任意转移,而不改变它对物体的转动效应,即力偶对物体的转动效应与它在作用面内的位置无关。

如图 1-13 (a) 所示,作用在转向盘上的两上力偶 (F_1, F_1') 与 (F_2, F_2'),

只要它们的力偶矩大小相等，转向相同，作用位置虽不同，转动效应是相同的。

• 在力偶矩大小不变的条件下，可以改变力偶中的力的大小和力偶臂的长短，而不改变它对物体的转动效应。

如图 1-13 (b) 所示，工人在利用丝锥攻螺纹时，作用在螺纹杠上的 (F_1, F_1') 或 (F_2, F_2') ，虽然 d_1 和 d_2 不相等，但只要调整力的大小，使力偶矩 $F_1 d_1 = F_2 d_2$ ，则两力偶的作用效果是相同的。

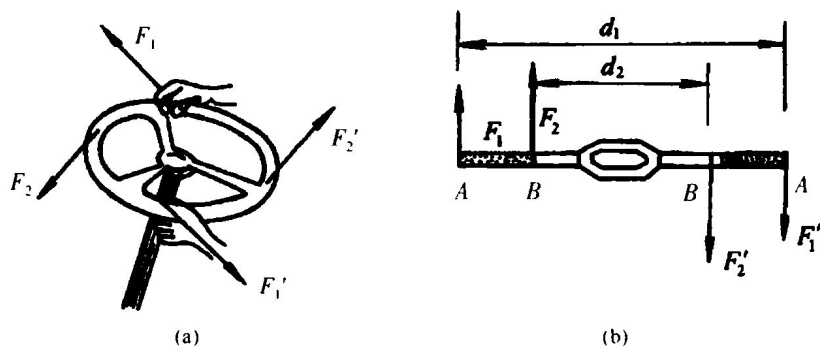


图 1-13 丝锥攻螺纹

从上面两个推论可知，在研究与力偶有关的问题时，不必考虑力偶在平面内的作用位置，也不必考虑力偶中力的大小和力偶臂的长短，只需考虑力偶的大小和转向。所以常用带箭头的弧线表示力偶，箭头的方向表示力偶的转向，弧线旁的字母 m 或者数值表示力偶矩的大小，如图 1-14 所示。

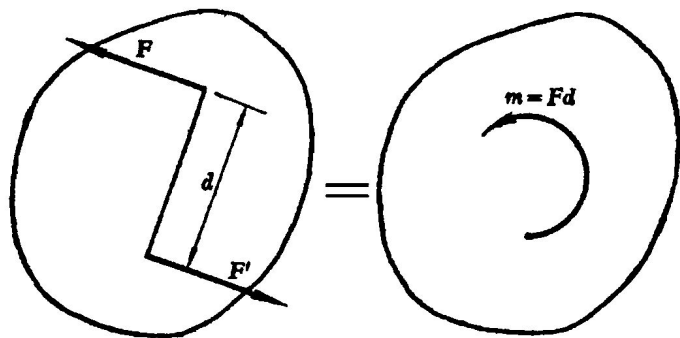


图 1-14 力 偶矩

第三节 力系的简化

一、力的平移定理

如图 1-15 (a) 所示，在刚体的 A 点作用着一个力 F ， B 点为刚体上的任一指定

点。在 B 点加上大小相等、方向相反且与力 F 平行的两个力 F' 和 F'' ，并使 $F = F' = F''$ ，如图 1-15 (b) 所示。显然 F'' 和 F 组成一力偶，称为附加力偶，其力偶臂为 d 。作用于 A 点的力 F 可以用由作用于 B 点的力 F' 及附加力偶 $m (F', F)$ 来替代，如图 1-15 (c) 所示。其中附加力偶矩为 $F'd$ ；

由此可知，作用于刚体上的力均可以从原来的作用位置平行移至刚体内任一指定点。欲不改变该力对于刚体的作用效应，则必须在该力与指定点所决定的平面内附加一力偶，其力偶矩等于原力对于指定点之矩。这就是力的平移定理。

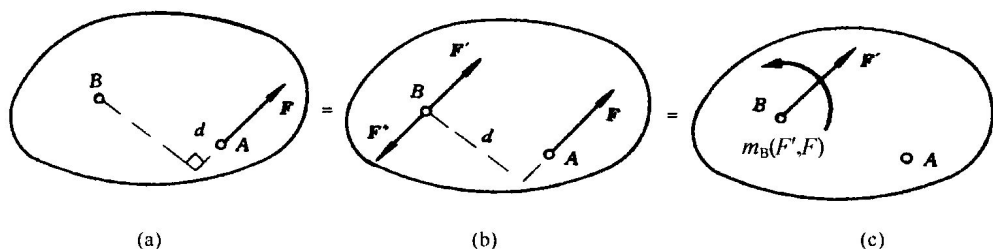


图 1-15 移动作用于刚体的力

另外，将作用于刚体上的力偶矩为 m 的力偶 (F', F) 与作用于同一平面内的 B 点的力 F' 合成为一个作用于 A 点的力 F 。

知识拓展

力的平移定理既是力系向一点简化的理论基础，同时也可直接用来分析和解决工程实际中的力学问题。例如图 1-16 (a) 中厂房柱子受偏心荷载 F 的作用，为观察 F 的作用效应，可将力 F 平移至柱的轴线上成为 F' 与矩为 m 的力偶，如图 1-16 (b) 所示，轴向力 F' 使柱子压缩，而矩为 m 的力偶将使柱弯曲。

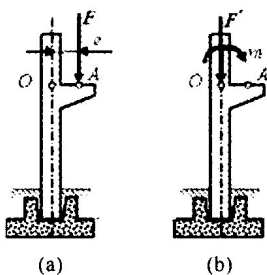


图 1-16 柱子受力示意图

又如图 1-17 中，用丝锥攻丝时，若仅用一只手加力，如图 1-17 (a) 所示，即只在 B 点有作用一力 F ，虽然扳手也能转动，但容易使丝锥折断。这是因为：根据力的平移定理，将作用于扳手 B 点的力 F 平行移动到丝锥中心 O 点时，需附加一个力偶矩为 $m = Fd$ 的力偶，如图 1-17 (b) 所示。这个力偶可使丝锥转动，但这个力是使丝锥折断的主要原因。可以考虑：为什么用两手握扳手，而且用力相等时，就不会出现折断的现象。

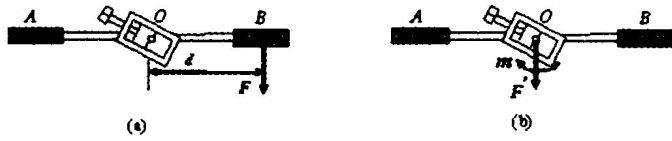


图 1-17 丝锥攻丝示意图

研究平面力系的简化及其平衡条件问题, 对于分析构件的受力和解决工程中相关的实际问题具有非常重要的意义。总可根据平行四边形法则将有 n 个力的平面任意力系依次合成为一个力; 但当合成过程中出现前面 $n-1$ 个力的合力与第 n 个力大小相等、方向相反且作用线不共线时, 这一对力就构成了一力偶。

所以平面任意力系的合成结果可能是一个力或一个力偶, 但这种合成方法在理论上是可行的, 实际应用起来非常不便:

- 当力的数目较多时太繁琐;
- 若两力的作用线接近平行时, 由于交点在较远处而难以做出其合力。

为此, 须采用一种较为简便且更具有普遍性的方法, 即将平面任意力系向已知点简化的方法, 这个方法的理论依据就是力的平移定理。

二、主矢和主矩

如图 1-18 (a) 所示, 设某刚体上受一平面任意力系 F_1, F_2, \dots, F_n 的作用, 各力的作用点分别为 A_1, A_2, \dots, A_n 。在力系所在的平面内任选一点 O , 称为简化中心, 求该力系向 O 点简化的结果。

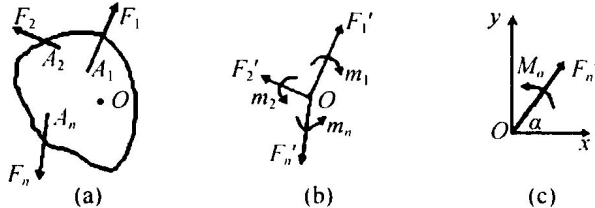


图 1-18 刚体受力简化示意图

应用力的平移定理, 将各力平移至简化中心 O 点, 同时加入相应的附加力偶。这样原力系就等效变换成为作用在 O 点的平面汇交力系 F'_1, F'_2, \dots, F'_n 和作用于汇交力系所在平面内的力偶矩为 m_1, m_2, \dots, m_n 的附加平面力偶系, 如图 1-18 (b) 所示。

这样, 平面任意力系被分解成了两个力系: 平面汇交力系和平面力偶系, 然后再分别合成这两个力系。

1. 主矢的基本概念

图 1-18 (c) 中, 平面汇交力系 F'_1, F'_2, \dots, F'_n 可合成为一作用于简化中心 O 的力 F'_R , 其大小和方向等于汇交力系的矢量和, 即

$$F_R = F'_1 + F'_2 + \dots + F'_n = \sum F'_i$$

而平面汇交力系中各力的大小和方向分别与原力系中对应的各力相同, 即