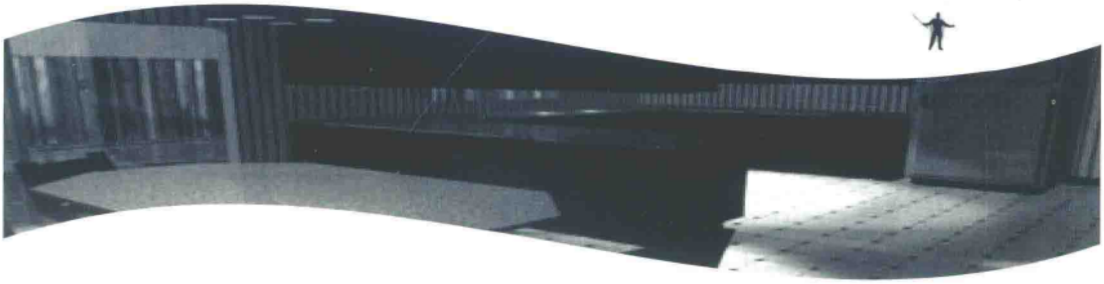


驾驶专业等效培训教材

工 程 力 学

裴小英　主编

邢伟　　主审

广东交通职业技术学院

驾驶专业等效培训教材

工 程 力 学

裴小英　主编

邢伟　　主审

广东交通职业技术学院

前　言

根据中华人民共和国海事局海船员[2005]199 号的文件精神，为提高内河船舶船员技术素质，保障水上人命和财产安全，满足《中华人民共和国内河船舶船员适任考试发证规则》第五条第四款和第十四条第一款的规定要求，对不具备规定学历的船员进行等效培训，使其文化知识和专业技能符合国家海事部门对船员在文化素质方面的要求，其实际水平达到中等职业教育内河船舶驾驶、轮机管理专业学历水平。

按照《中华人民共和国内河船舶船员适任考试发证规则》过渡办法的通知要求，安排课程和学时数；依据船员考试大纲和船员应知应会要求组织课程内容，注重基础，强调应用，提高船员在分析问题和解决问题方面的能力。

在本书的编写过程中，得到了邢伟副教授、岑富伟副教授、黄林雄老师的大力支持，并由邢伟副教授担任主审。

限于编者水不的经验，书中错误与欠妥之处在所难免，恳请广大读者批评反证。

编者

2008 年 3 月 1 日

目　录

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第 1 章 静力学基本概念与物体的受力图

1.1 基 本 概 念

1.1.1 力的概念

力是物体间相互的机械作用。物体间相互的机械作用大致可分为两类:一类是物体直接接触的作用，另一类是场的作用。这种作用使物体的运动状态或形状尺寸发生改变。物体运动状态的改变称为力的外效应或运动效应，物体形状尺寸的改变称为力的内效应或变形效应。

实践证明，力对物体的效应取决于力的三要素， 即力的大小、 方向和作用点。

在国际单位制中，力的单位为 **N** 或 ***k*N**，**1 kN=103 N**。

力是一个既有大小又有方向的量，称为矢量。矢量可用一具有方向的线段来表示，如图 **1.1** 所示。线段 **AB** 的起点（或终点）表示力的作用点，线段 **AB** 的方位和箭头指向表示力的方向，沿力的方向画出的直线，称为力的作用线，而线段 **AB** 长度则按一定的比例表示力的大小。本书中用黑体字母表示矢量，如 $\boldsymbol{F}$，用普通字母表示力的大小，如 F。

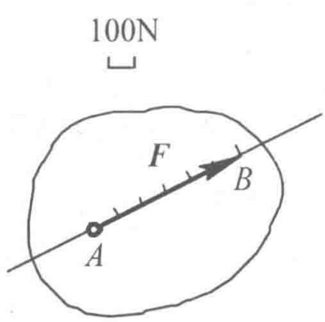


图 **1.1**

若力 $\boldsymbol{F}$ 在平面 Oxy 内，其矢量表达式为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}x+\boldsymbol{F}y=Fxi+Fyj \qquad (1.1)$$

式中，$\boldsymbol{F}x$ 、$\boldsymbol{F}$y 分别表示力 $\boldsymbol{F}$ 沿平面直角坐标轴 x、y 方向上的两个分量；Fx 和 Fy 分别为力 F 在平面直角坐标轴 x、y 上的投影；i、 j 分别为直角坐标轴 x、y 上的单位矢量。

如图 1.2 所示，由力 F 的起点 A 和终点 B 分别作 x 轴的垂线， 垂足分别为 a、b，线段 ab 冠以适当的正负号称为力 F 在 x 轴上的投影，用 Fx 表示，即

$$Fx=\pm ab \qquad (1.2)$$

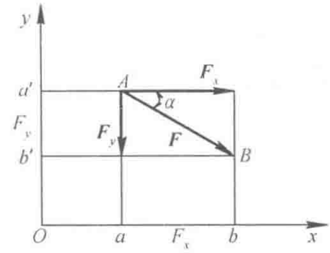


图 1.2

投影的正负号规定如下：若从 a 到 b 的方向与 x 轴正向一致，则取正号；反之则取负号。同样，力 F 在 y 轴上的投影为

$$F_y=\pm a'b' \qquad (1.3)$$

如图 1.2 所示，力 F 在 x 轴和 y 轴的投影分别为

$$\left.\begin{aligned}F_x&=F\cos\alpha\\F_y&=-F\sin\alpha\end{aligned}\right\} \qquad (1.4)$$

由此可见，力在坐标轴上的投影是代数量。

若已知力 F 在平面直角坐标轴上的投影 Fx 和 Fy，则该力的大小和方向为

$$\left.\begin{aligned}F&=\sqrt{F_x^2+F_y^2}\\\tan\alpha&=\left|\frac{F_y}{F_x}\right|\end{aligned}\right\} \qquad (1.5)$$

式中，α 表示力 F 与 x 轴所夹的锐角，F 的指向由 Fx 和 Fy 的正负来确定。

作用于一个物体上的若干个力称为力系。若两个力系对物体的作用效应完全相同，则这两个力系称为等效力系。如一个力与一个力系等效，则此力称为该力系的合力，而该力系中的各力称为合力的分力。把各分力等效代换成合力的过程称为力系的合成，把合力等效代换成各分力的过程称为力的分解。

平衡是指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态。

如果物体在一力系作用下处于平衡状态，则该力系称为平衡力系。

工程力学的研究对象往往比较复杂，在对其进行力学分析时，首先必须根据研究问题的性质，抓住其主要矛盾，忽略其次要因素，对其进行合理的简化，科学地抽象出力学模型。

在分析物体的运动规律时，如果物体的形状和大小与运动无关或对运动的影响很小，则可把物体抽象为质点。质点是指具有质量而形状、大小可忽略不计的力学模型。

在研究物体的平衡问题时，若物体的微小变形对平衡问题影响很小，则可把物体当作刚体。刚体是指受力时保持形状、大小不变的力学模型。

在分析强度、刚度和稳定性问题时，由于这些问题都与变形密切相关，因此即使是极其微小的变形也必须加以考虑，这时就必须把物体抽象为变形体这一力学模型。

1.1.2 力的基本性质

人们在长期的生活和生产活动中， 经过实践-认识-再实践-再认识的过程，总结出了许多力所遵循的规律，其中最基本的性质有以下几条。这些性质的正确性已被实践所验证，为大家所公认，所以也称为静力学公理。

性质一 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： 这两个力大小相等、方向相反，且作用在同一条直线上，如图 **1.3** 所示。用矢量表示，即为

$$\boldsymbol{FA}=-\boldsymbol{FB}$$

对于变形体，这个条件是必要的，但不是充分的。

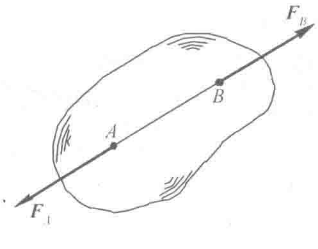


图 **1.3**

工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件，称为二力构件或二力杆。根据上述性质，二力构件上的两个力必沿两力作用点的连线，且等值反向，如图 **1.4** 所示

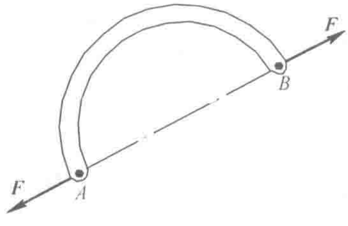


图 **1.4**

性质二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意力系上，加上或者减去一个平衡力系， 都不会改变原力系对刚体的作用效果。由此可得如下推论:

推论 1 力的可传性

刚体上的力可沿其作用线移到该刚体上的任意位置，并不改变该力对该刚体的作用效应。

如图 **1.5** 所示，作用于小车 **A** 点的推力 **F** 沿其作用线移到 **B** 点， 得拉力 F' ，虽然推力变为拉力，但对小车的作用效应是相同的。 由此可见，力的作用点对刚体来说已不是决定力作用效应的要素。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。

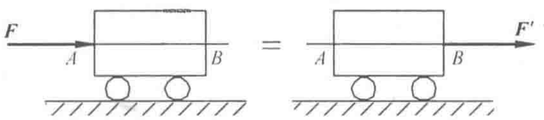


图 **1.5**

性质三 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，合力的作用点仍在该点，合力的大小和方向由这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来确定，如图 **1.6(a)**所示。其矢量表达式为

$$FR=F1+F2 \qquad (1.7)$$

为方便起见，在利用矢量加法求合力时，可不必画出整个平行四边形，而是从 *A* 点作矢量 ***F*1**，再由 ***F*1** 的末端 ***B*** 作矢量 ***F*2**，则矢量 **AC** 即为合力 ***FR***。这种求合力的方法称为力的三角形法则，如图 **1.6(b)**所示。显然，若改变 ***F*1**、***F*2** 的顺序，其结果不变，如图 **1.6(c)** 所示。

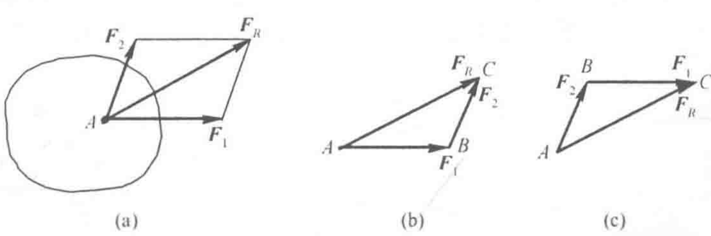


图 **1.6**

为方便起见，在利用矢量加法求合力时，可不必画出整个平行四边形，而是从 **A** 点作

矢量 F1，再由 F1 的末端 B 作矢量 F2，则矢量→AC 即为合力 FR。这种求合力的方法称为力的三角形法则，如图 1.6（b）所示。显然，若改变 F1、F2 的顺序，其结果不变，如图 1.6（c）所示。

力的平行四边形法则是力系合成的法则，也是力系分解的法则。该法则表明了最简单力系简化的规律，它也是复杂力系简化的基础。

由上可推出 n 个力作用的情况。设一刚体上有 ***F*1,*F*2**，…,***Fn*** 共 ***n*** 个力作用，力系中各力的作用线共面且汇交于同一点（称为平面汇交力系），根据性质三和式（1.7）将此力系合成为一个合力 ***FR***，此合力应为

$$FR=F1+F2+\ldots+Fn=\sum Fi \qquad (1.8)$$

可见，平面汇交力系的合力矢量等于力系各分力的矢量和。

将式（1.8）分别向 x、y 轴投影可得

$$FRx=F1x+F2x+\ldots+Fnx=\sum Fx$$

$$FRy=F1y+F2y+\ldots+Fny=\sum Fy \qquad (1.9)$$

式（1.9）表明，力系的合力在某一直角坐标轴上的投影等于力系中各分力在同一轴上投影的代数和，此即为合力投影定理。

合力的大小和方向为

$$\left.\begin{aligned} F_R &= \sqrt{(F_{Rx})^2+(F_{Rx})^2} = \sqrt{(\sum F_x)^2+(\sum F_x)^2} \\ \tan\alpha &= \left|\frac{\sum F_y}{\sum F_x}\right| \end{aligned}\right\} \qquad (1.10)$$

式中，α 表示力 ***FR*** 与 x 轴所夹的锐角，***FR*** 的指向由 $\sum Fx$ 和 $\sum Fy$ 的正负来确定。

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，此三力必汇交于一点。

此定理说明了不平行的三力平衡的必要条件，而且，当两个力的作用线相交时，可用来确定第三个力的作用线方位。

证明 刚体上 ***A***、***B***、***C*** 三点，分别作用着使该刚体平衡的三个力 ***F*1**、***F*2**、***F*3**，它们的作用线都在一个平面内但不平行，***F*1**、***F*2** 的作用线交于 ***O*** 点。根据力的可传性原理，将此两个力分别移至 ***O*** 点，则此两个力的合力 ***FR*** 必定在此平面内且通过 ***O*** 点，而 ***FR*** 必须和 ***F*3** 平衡，由二力平衡的条件可知，***F*3** 与 ***FR*** 必共线，所以 ***F*3** 的作用线亦必过 ***F*1**、***F*2** 的交点 ***O***，即三个力的作用线汇交于一点。如图 1.7 所示。

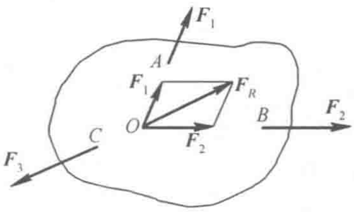


图 1.7

性质四 作用与反作用定律

两物体间的作用力与反作用力，总是大小相等，方向相反， 沿同一条直线，分别作用在这两个物体上。

此定律概括了自然界中物体间相互作用关系，表明一切力总是成对出现的，揭示了力的存在形式和力在物体间的传递方式。

特别要注意的是，必须把作用与反作用定律、二力平衡公理严格地区分开来。作用与反作用定律是表明两个物体相互作用的力学性质，而二力平衡公理则说明一个刚体在两个力作用下处于平衡时两力满足的条件。

1.2 力矩与力偶

1.2.1 力矩

人们从生产实践活动中得知，力不仅能够使物体沿某方向移动，还能够使物体绕某点产生转动。例如人用扳手拧紧螺母时， 施于扳手的力 **F** 使扳手与螺母一起绕转动中心 **O** 转动，由经验可知，转动效应的大小不仅与 F 的大小和方向有关， 而且与转动中心点 O 到 F 作用线的垂直距离有关，因此，在 F 作用线和转动中心点 O 所在的同一平面内(如图 1.8 所示)我们将点 O 称为矩心，点 O 到 **F** 作用线的垂直距离 d 称为力臂，力使物体绕转动中心的转动效应，就用力 F 的大小与力臂 d 的乘积并冠以适当的正负号来度量，该量称为力对 O 点之矩，简称力矩，记作 $MO(F)$，

$$MO(F)=\pm Fd \qquad (1.11)$$

平面内的力对点之矩是一个代数量，其正负号规定为：若力使物体绕矩心逆时针方向转动时，则力矩为正；反之，力矩为负。力矩的常用单位为 N·m 或 kN·m。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

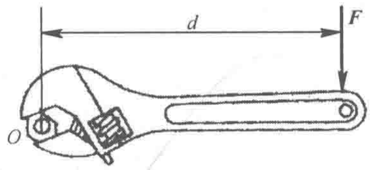


图 1.8

由力矩的定义可知， 力矩有以下性质:

（1）力对点之矩的大小，不仅取决于力的大小, 还与矩心的位置有关。

（2） 力对任意点之矩的大小， 不因该力的作用点沿其作用线移动而改变。

（3） 力的大小为零或力的作用线通过矩心时， 力矩为零。

（4） 互成平衡的二力对同一点之矩的代数和为零。

设物体上作用有一个平面汇交力系 ***F*1, *F*2, …,*Fn*** 其合力为 ***FR***。由于合力与力系等效，因此合力对平面内任意点之矩等于力系中所有分力对同一点之矩的代数和，即

$$MO(FR) = MO(F1) + MO(F2) +\ldots+ MO(Fn) = MO(Fi) \qquad (1.12)$$

这就是合力矩定理。

对于有合力的其他力系，合力矩定理同样成立。

当力矩的力臂不易求出时，常将力正交分解为两个易确定力臂的分力， 然后应用合力矩定理计算力矩。

【例 1.1】 如图 1.9 所示，力 ***F*=150 N**, 作用在锤柄上，柄长 ***l*=320mm**，试求(a)、 (b)两种情况下力 ***F*** 对支点 ***O*** 的力矩。

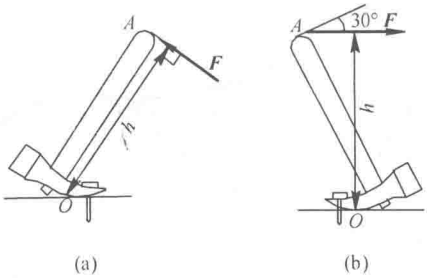


图 1.9

解　在(*a*)种情况下，支点 ***O*** 到力 ***F*** 作用线的垂直距离 ***h*=*l***，力 ***F*** 使锤柄绕 ***O*** 点逆时

针转动，则力 **F** 对 **O** 点的力矩为

$$M_O(F)=Fh=150\times320=48\ 000\ \mathrm{N\cdot mm}=48\ \mathrm{N\cdot m}$$

在(b)种情况下，支点 **O** 到力 **F** 作用线的垂直距离 $h=l\cos30°$， 力 **F** 使锤柄绕 **O** 点顺时针转动，则力 **F** 对 **O** 点的力矩为

$$M_O(F)=-Fh=-150\times320\times\cos30°=-41\ 568\ \mathrm{N\cdot mm}=-41.568\ \mathrm{N\cdot m}$$

【例 1.2】 一齿轮受到与它相啮合的另一齿轮的法向压力 $F_n=1400\mathrm{N}$ 的作用，如图 1.10 所示，已知压力角（作用在啮合点的力与啮合点的绝对速度之间所夹的锐角）$\alpha=20°$，节圆直径 $D=0.12\mathrm{m}$，求法向压力 F_n 对齿轮轴心 **O** 之矩。

解　用两种方法计算。

(1) 用力矩定义求解， 如图 1.10(a)所示。

$$\begin{aligned}M_O(F_n)&=-F_nr_0=-F_n\frac{D}{2}\cos\alpha\\&=-1400\times\frac{0.12}{2}\cos20°\\&=-78.93N\cdot m\end{aligned}$$

(2) 用合力矩定理求解，如图 1.10(b)所示。

将力 F_n 在啮合点处分解为圆周力 $F_t=F_n\cos\alpha$ 和径向力 $F_r=F_n\sin\alpha$，由合力矩定理，得

$$\begin{aligned}M_O(F_n)&=M_O(F_t)+M_O(F_r)-F_t\times\frac{D}{2}+0\\&=-1400\times\cos20°\times\frac{0.12}{2}\\&=-78.93N\cdot m\end{aligned}$$

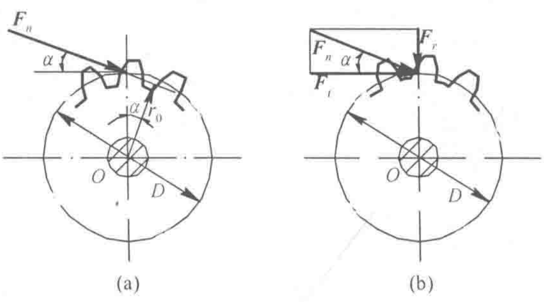
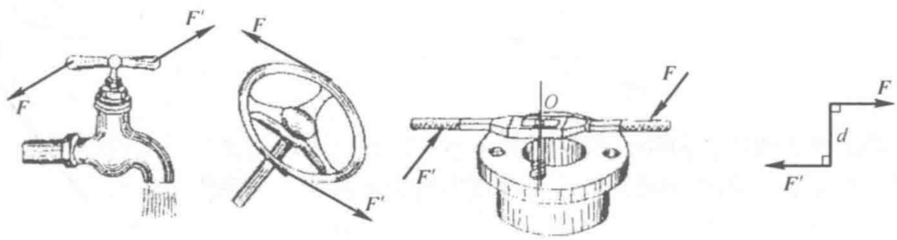


图 1.10

1.2.2 力偶

在日常生活和生产实践中，经常会遇到物体受大小相等、方向相反、作用线互相平行的两个力作用的情形。如人用手拧水龙头开关，如图 1.11（a）所示；司机用手转动方向盘，如图 1.11（b）所示；钳工用丝锥攻螺纹，如图 1.11（c）所示等。实践证明，这样的两个力（F, F'）对物体只产生转动效应，而不产生移动效应。



(a) (b) (c) (d)

我们把这一对等值、反向、不共线的平行力组成的特殊力系称为力偶，用符号(F, F')表示。力偶两力作用线之间的垂直距离 d 称为力偶臂，如图 **1.11**（**d**）所示，力偶的两力作用线所决定的作用面称为力偶作用面，力偶使物体转动的方向称为力偶的转向。力偶对物体的转动效应，可用力偶中的力与力偶臂的乘积再冠以适当的正负号来确定，称为力偶矩，记作 $M(F, F')$或简写为 M，即

$$M(F, F')=M=\pm Fd \qquad (1.13)$$

力偶矩与力矩一样是一个代数量。式中的正负号表示力偶的转向，通常规定，力偶的转向为逆时针时取正，反之取负。力偶矩的单位是 **N·m** 或 **kN·m**。力偶矩的大小、力偶转向和力偶作用面称为力偶的三要素，凡三要素相同的力偶彼此等效。

根据力偶的定义，力偶具有以下一些性质。

性质一 力偶在任意轴上投影的代数和为零，故不能合成为一个力，也不能与一个力等效。力偶的这一性质说明了力偶不能与一个力相互平衡，只能与一个力偶平衡。可见，力与力偶是静力学的两个基本要素。

性质二 力偶对其作用面内任意点之矩，恒等于其力偶矩，而与矩心的位置无关。如图 **1.12** 所示，已知力偶(F, F')的力偶矩为 $M(F, F')=Fd$，在力偶作用平面内任取一点 O 为矩心，设 O 点到力 F 的垂直距离为 x，则(F, F')对 O 之矩的代数和为

$$MO(F) + MO(F') = -Fx+F'(x+d) = Fd = M(F, F') \qquad (1.14)$$

显然，力偶矩 $M(F, F')$ 与 x 无关，即与矩心无关。

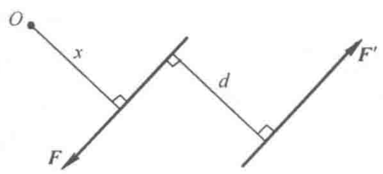


图 1.12

性质三 只要保持力偶的转向和力偶矩的大小不变，力偶可以在其作用面内任意转动和移动，而不改变它对刚体的作用效应。这一性质说明力偶对物体的作用与力偶在作用面内的位置无关。

性质四 只要保持力偶矩的大小和转向不变，可以同时改变力偶中力的大小和力偶臂的长短，而不会改变力偶对刚体的作用效应。这一性质说明了力偶中的力或力偶臂都不是力偶的特征量，只有力偶矩才是力偶作用的度量参数。因此，力偶常用一带箭头的折线或弧线来表示，其中折线弧线所在的平面代表力偶的作用面，箭头的指向表示力偶的转向，再标注力偶矩的大小， 如图 1.13 所示。

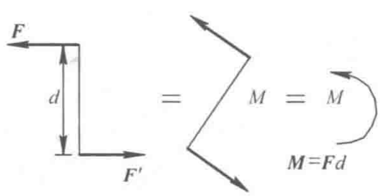


图 1.13

当物体在某平面内作用有两个或两个以上的力偶时即组成平面力偶系，从上面的力偶性质可知，力偶对刚体只产生转动效应，且转动效应的大小完全取决于力偶矩的大小和转向， 那么，力偶系可以简化，其简化结果也应是一个力偶。力偶系简化所得到的结果称为力偶系的合力偶。可以证明，合力偶矩的大小等于各个分力偶矩的代数和， 即

$$M=M1+M2+\ldots+Mn=\sum Mi \qquad (1.15)$$

1.3 约束与约束反力

在空间可以自由运动，其位移不受任何限制的物体称为自由体，如空中飞行的飞机、热气球、火箭等。而大多数物体某些方向的位移往往受到限制，这样的物体称为非自由体。如数控机床工作台受到床身导轨的限制只能沿导轨移动，铁路上的列车受钢轨的限制只能沿轨道方向运动。对非自由体某些方向的位移起限制作用的周围物体称为约束，例如，导轨是工作台的约束，钢轨是列车的约束。当物体沿着约束所限制的方向有运动趋势时，约束对物体必产生一作用力。约束对被约束物体的作用力称为约束反作用力，简称约束反力或约束力。约束反力总是作用在约束与被约束物体的接触处，其方向与该约束所能限制的运动方向相反。

促使物体产生运动或运动趋势的力，称为主动力，例如重力、电磁力、推力等。物体所受的主动力一般是已知的，而约束反力是由主动力的作用而引起的，它是未知的。因此，对约束反力的分析就成为十分重要的问题了。

下面介绍几种工程实际中常遇到的典型约束类型及其约束反力的确定方法。

1.3.1 柔索约束

由绳索、链条、胶带等柔性物体所构成的约束称为柔索约束。柔索约束只能限制物体沿柔索伸长的方向运动，而不能限制其他方向的运动，所以柔索约束反力的方向总是沿柔索中心线且背离被约束物体，即为拉力，通常用符号 ***F*T** 表示，如图 **1.14** 所示。

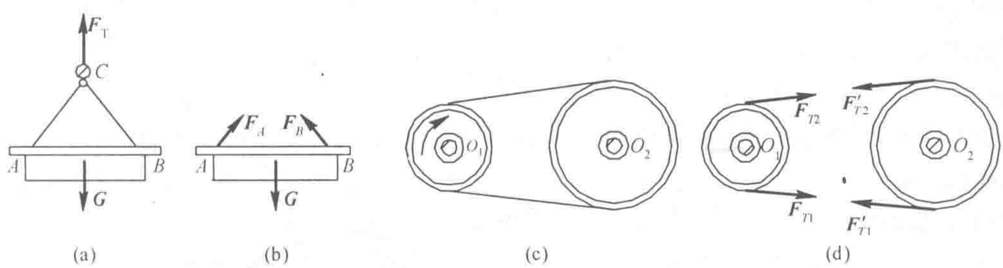


图 **1.14**

1.3.2 光滑接触面约束

当两物体接触面之间的摩擦很小，可以忽略不计时，则构成光滑接触面约束。光滑接触面对被约束物体在过接触点处的公切面内任意方向的运动不加限制，同时也不限制物体

沿接触面处的公法线脱离接触面，但阻碍物体沿该公法线方向进入约束内部，因此，光滑接触面约束的约束反力必沿接触面处的公法线指向被约束物体，即为压力，用符号 ***FN*** 表示，如图 **1.15** 所示。

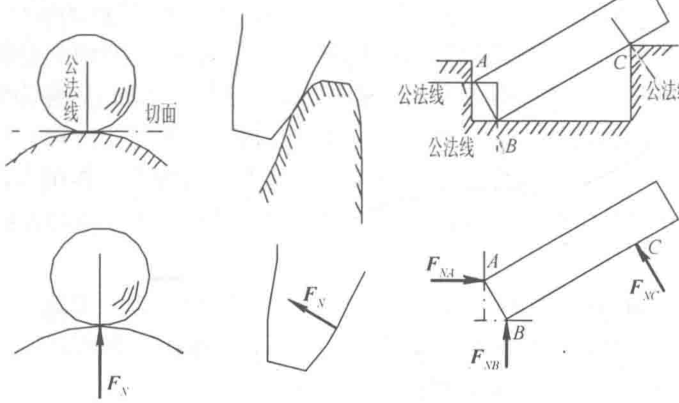


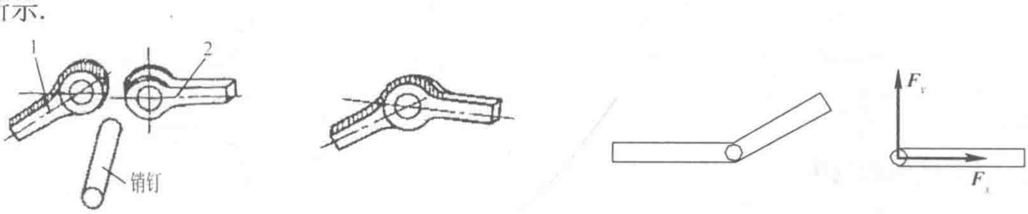
图 **1.15**

1.3.3 光滑圆柱铰链约束

光滑圆柱铰链由两个带有圆孔的构件用光滑圆柱销钉连接而成。如果销钉和圆柱是光滑的，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。这样的约束称为光滑圆柱铰链约束。它在工程实际中有以下几种应用形式。

1. 中间铰约束

如图 **1.16**（**a**）、（**b**）所示，用圆柱销钉穿入两个带有圆孔的构件 **1** 和 **2** 的圆孔中，即构成中间铰，通常用简图 **1.16**（**c**）表示。中间铰所连接的两构件互为其中一个的约束。当两个构件有沿销钉径向相对移动的趋势时，销钉与构件以光滑圆柱面接触，本质上相当于光滑面接触，但接触点不能确定，所以中间铰链约束反力的特点是：在垂直销钉轴线的平面内，通过铰链中心，方向待定。通常用单个力 **FR** 和未知角 a 或两个正交分力 **Fx** 和 **Fy** 来表示，两分力的指向是假定的。**FR** 于 **Fx**、Fy 为合力与分力的关系，如图 1.16（d）所示.



(a)　(b)　(c)　(d)

图 **1.16**

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com