

工程力学

电机专业用

(上册)

上海机械学院

一九七六年十月

目 录

第一篇	构件的平衡与静力分析	1
绪 言		1
第一章	力的概念及其基本性质	2
§ 1	力的概念	2
§ 2	力的平行四边形定律	3
§ 3	作用与反作用定律	7
§ 4	约束与约束反力	9
§ 5	受力图	15
习 题		21
第二章	平面力系	23
§ 1	力在坐标轴上之投影及合力投影定理	23
§ 2	力矩及合力矩定理	27
§ 3	力 偶	29
§ 4	力的平移	34
§ 5	构件在平面一般力系作用下的平衡条件	37
习 题		49
第三章	空间力系	58
§ 1	构件在空间力系作用下的平衡条件	58
§ 2	重 心	61
习 题		65
第四章	摩 擦	67
§ 1	滑动摩擦	67
§ 2*	摩擦角和自锁	73

§ 3	滚动摩擦	75
习 题		77
第二篇	构件的强度与刚度	79
第五章	绪 论	79
§ 1	本篇任务和研究对象	79
§ 2	内力、截面法	82
§ 3	杆件变形的基本形式	87
第六章	轴向拉伸与压缩	90
§ 1	轴向拉(压)概念	90
§ 2	拉压杆件的内力、横截面上的应力 及其强度条件	91
§ 3	受拉(压)杆件的变形、虎克定律、 横向变形系数	100
§ 4	拉伸时材料的机械性质	103
§ 5	许用应力、极限应力及安全系数	113
§ 6	应力集中概念	115
习 题		117
附:	拉伸试验	121
第七章	剪 切	127
§ 1	剪切的基本概念	127
§ 2	剪切的实用计算	129
§ 3	挤压的实用计算	133
习 题		137

第八章	圆轴的扭转	140
§ 1	扭转的概念及外力偶矩之计算	140
§ 2	圆轴扭转时的应力及强度条件	142
§ 3	圆轴扭转时扭转角公式及刚度条件	154
习 题		157
第九章	梁的弯曲	160
§ 1	弯曲的概念	160
§ 2	梁的内力计算、弯矩图	163
习 题		173
§ 3	梁弯曲时的正应力	176
习 题		190
§ 4	梁的变形	192
§ 5	阶梯轴的变形	206
习 题		212
第十章	组合变形下构件的强度计算	214
§ 1	组合变形的基本概念	214
§ 2	轴在弯—扭组合时的应力及强度计算	215
习 题		223
*第十一章	复杂应力状态下的强度条件	226
§ 1	金属材料的破坏现象	226
§ 2	直杆拉伸时的应力分析	228
§ 3	圆扭扭转时的应力分析	231
§ 4	二向应力状态分析	234
§ 5	复杂应力状态下的强度条件	237
§ 6	薄壁容器的计算	240

第十二章	交变应力下构件的强度计算	246
§ 1	在交变应力下构件破坏的概念	246
§ 2	应力循环及其循环特征	249
§ 3	钢试件的持久极限及其测定方法， 影响持久极限的因素	250
§ 4	对称循环时构件的强度计算	256

第一篇 构件的平衡与静力分析

绪 言

毛主席教导我们：“无论什么事物的运动都采取两种状态，相对地静止的状态和显著地变动的状态。”在工程中，我们经常遇到许多相对地球处于静止状态的物体，如房屋、桥梁等建筑物；有的虽相对地球有运动，但却按惯性运动着，如起重机吊起重物匀速直线上升的运动以及电机轴的匀速转动等等。在力学中，我们把这些状态称为平衡状态。本篇的任务就是要研究构件的平衡规律，以及构件在平衡状态下的受力分析（称静力分析）。研究构件的平衡规律及静力分析，在工程中有很重要的意义。例如电机轴的设计，首先要进行静力分析，然后合理地选择轴的尺寸。所以本篇是工程力学中的基础。

第一章 力的概念及其基本性质

§ 1 力的概念

毛主席教导我们：“社会实践的继续，使人们在实践中引起感觉和印象的东西反复了多次，于是在人们的脑子里生起了一个认识过程中的突变（即飞跃），产生了概念。”

我们在生产和生活实践中，经常观察到物体在相互作用后发生运动状态的改变或产生变形。例如推车，由于手对车子的作用而使车子由静止转入动、或由慢转快、转弯等；又如齿轮系的传动，由于主动轮对被动轮的作用而使被动轮从静止开始转动，或加速转动；又如铁锤对锻件的锻压，由于铁锤的冲击，锻件发生变形。在力学上，小车及齿轮的由静止转入运动，或运动由慢转快等称为运动状态的改变。通过长期实践，于是人们建立起这样的力的概念：力是一物体对另一物体之作用而使其运动状态改变（趋于改变）或使之变形。

实践表明，力对物体的作用决定于力的大小、方向和作用点这三个要素。其中任一要素改变时，力的作用效果就因之而改变。

力的大小表示物体间机械作用的强烈程度，它的工程单位是公斤或吨，可用弹簧秤或弹簧测力计测定。力的方向表示物体相互作用的方向，如用绳索从不同方向去拉同一物体，则物体运动的方向也就不同，因此力是具有方向性的量。力的作用点表示物体相互作用的地方，当作用的地方是一块较大的面积时，就形成了分布力，如作用于蒸汽机活塞上的蒸汽压力，作用于水坝上的水压力以及作用在屋顶上的风压力等等。当作用的地方是一块很小的面积，可近

似地看成作用于一个点时，就形成了集中力，这个点称为力的作用点。同样大小与方向的力，如果作用点的位置不同，也可产生不同的效果，例如用杠杆起重物时，着力点离支点愈远就愈容易起动。

力的大小、方向与作用点这三要素可以用一个有方向的线段来表示。表示的方法，用线段的长度按一定的比例尺表示力的大小；用线段的末端所附的箭头表示力的方向，用线段的起点或终点表示力的作用点。这种表示方法叫做力的图示法。

在力学中要区别两种量：矢量和标量。如果在确定某种量时，只要考虑它的大小就够了，这种量称为标量。例如体积、面积、时间等。如果在确定某种量时，不但要考虑它的大小，还要考虑它的方向，则这种量称为矢量。例如速度、加速度等。力是一种矢量。

在工程中，经常遇到一个构件同时受几个作用力的问题。这种作用于同一物体的一群力称为力系。若力系中各力的作用线分布在同一平面内，则这种力系称为平面力系，反之称为空间力系。在平面力系和空间力系中，根据各力作用线位置的不同，又可分为汇交力系、平行力系和一般力系。如力系中各力的作用线都汇交于一点，称为汇交力系；如各力的作用线相互平行，称为平行力系；如各力的作用线既不汇交又不平行，称为一般力系。

如果一物体受一力系作用下而处于平衡，则此力系称为平衡力系。

§ 2 力的平行四边形定律

列宁教导我们：“一切科学的（正确的、郑重的、非瞎说的）抽象，都更正确、更完全地反映着自然”。

实践告诉我们，作用于物体上的几个力，它们对物体的作用，往往可以用一个力来代替而效果相同，这个力称为前面那几个力的合力，而前面那几个力称为分力。将几个分力等效地合并为一个合力，称为力的合成，反之，将一个力等效地分为几个分力，称为力的分解。从实践中，人们归纳出了分力与合力的关系，此关系称为力的平行四边形定律。

力的平行四边形定律：作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力，此合力用以两分力为邻边所作成的平行四边形的对角线来表示。

例如，两人分别用力 F_1 和 F_2 拉压路滚子（图 1-1），画出力 F_1 与 F_2 。以 F_1 与 F_2 为邻边作平行四边形，其对角线 AD 就代表力 F_1 与 F_2 的合力 R 。合力 R 对滚子的作用，与分力 F_1 与 F_2 对滚子的合作用相同。

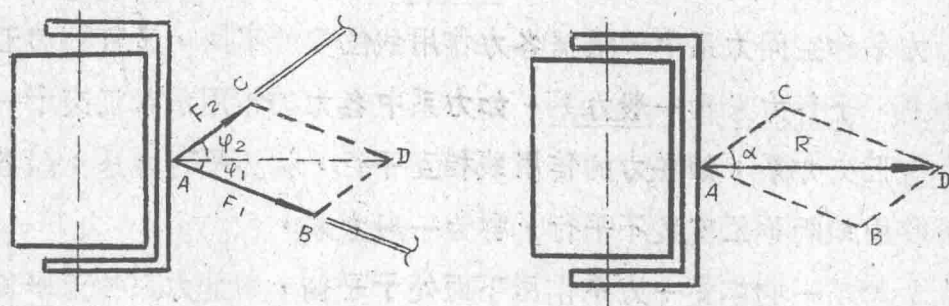


图 1-1

力的平行四边形定律告诉我们，两个力之相加（合成）须按照矢量加法，用数学式子表示，即

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

在图 1-1 中，设 F_1 与 F_2 之间之夹角为 α ，则 $\angle ABD = 180^\circ - \alpha$ 。对 $\triangle ABD$ 应用余弦定律，得

$$\begin{aligned} R^2 &= F_1^2 + F_2^2 - 2F_1 F_2 \cos(180^\circ - \alpha) \\ &= F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \alpha \end{aligned}$$

所以，合力 R 的大小为

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \alpha} \quad (1-2)$$

设 R 与 F_1 、 F_2 之间之夹角为 φ_1 、 φ_2 。对 $\triangle ABD$ 应用正弦定理得

$$\frac{F_1}{\sin \varphi_2} = \frac{F_2}{\sin \varphi_1} = \frac{R}{\sin(180^\circ - \alpha)} = \frac{R}{\sin \alpha} \quad .$$

由此得

$$\sin \varphi_1 = \frac{F_2}{R} \sin \alpha, \quad \sin \varphi_2 = \frac{F_1}{R} \sin \alpha \quad (1-3)$$

例 1-1：设 $F_1 = 50$ 公斤， $F_2 = 40$ 公斤，两拉力 F_1 与 F_2 间之夹角 $\alpha = 30^\circ$ ；则

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \alpha} \\ &= \sqrt{50^2 + 40^2 + 2 \cdot 50 \cdot 40 \cdot \cos 30^\circ} \\ &= \sqrt{7564} = 87.2 \text{ 公斤} \end{aligned}$$

由公式 (1-3)，

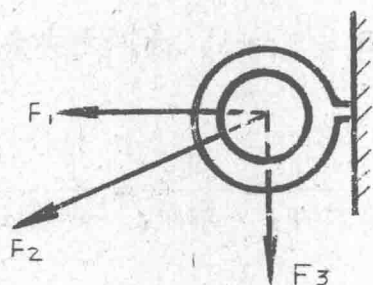
$$\sin \varphi_1 = \frac{F_2}{R} \sin \alpha$$

$$= \frac{40}{87.2} \sin 30^\circ = 0.23$$

查三角函数表得： $\varphi_1 = 13^\circ 18'$ 。

由此可见：一个50公斤的力与一个40公斤的力相加得到的合力不一定等于90公斤，应根据具体方向而决定。

如果一构件同时受二个以上之力的作用，如图1-2所示，则可依次对 F_1 、 F_2 、 F_3 ，应用平行四边形定律来求出合力 R 。用数学式子表示为



$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3,$$

或简写为

图 1-2

$$\vec{R} = \sum \vec{F} \quad (1-4)$$

根据力的平行四边形定律，既然可以把作用在物体上的两个力合为一个力；反过来，也可以根据力的平行四边形定律，把作用在物体上的一个力分解为两个力。在工程实际中，通常我们总是把一个力沿两直角方向分解。举例说明如下。

例如，从汽车上卸货时，在汽车后放一斜板，使货物沿斜面下滑，如图1-3。若货物重量为 Q ，板倾角为 α 。根据力的平行四

边形定律，从 Q 力的始点作斜面的垂线和平行线，从而作出平行四边形。此平行四边形的两邻边即代表与斜面平行的分力 F 和垂直于斜面的分力 N 。力 N 的大小即为货物对斜面的压力，力 F 即为使货物下滑的力。

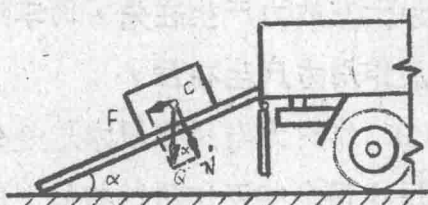


图 1-3

§ 3 作用与反作用定律

日常生活经验告诉我们：当我们推车前进时就感到车对手有一个向后作用的力。钢丝绳吊货上升时，货物也同时拉钢绳，把它拉紧。手压弹簧时，反过来弹簧也压手，车刀切削工件时，工件也使车刀磨损。大量事实说明：力是物体间的相互作用，而且总是成双出现的。也就是说，甲物体对乙物体有作用力时，乙物体对甲物体也必定有反作用力。正如毛主席在《矛盾论》中指出的：“矛盾着的各方面，不能孤立地存在。假如没有和它作对的矛盾的一方，它自己这一方就失去了存在的条件。”

通过人们长期的生活和生产实践，总结归纳出如下的规律，即任何力作用时必有等值，反向且在同一直线上之反作用力存在。这个规律称之为作用与反作用定律。作用与反作用定律是力学中的一个基本定律。它在力学中的应用极广，尤其是在受力分析中经常要应用到它。为了正确地运用此定律，特别应注意以下几点：

- (1) 作用力与反作用力必同时产生同时消失。比如当人推车时

(图 1-4)，在人施力于车的同时必受到车的反作用力。绝不能认为人加于车的力产生在先，而车给人的反作用力产生在后。

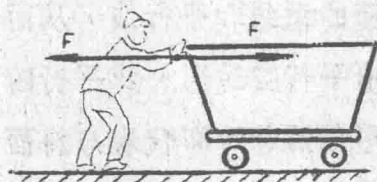


图 1-4

(2) 作用力与反作用力总是分别作用在两个相互作用的物体上的，因此不可能相互抵消。能够相互抵消而平衡的两个力必须是作用于同一物体上。

例 1-2：设有一物体置于地面上(图 1-5)，其重量为 Q 。 Q 是地球对物体的作用力，其反作用力 Q 系作用于地球上。另外，物体在地面上，要给地面一个压力 N ，方向竖直向下，根据作用与反作用定律，地面亦必给物体一个反作用力 N ，此 N 力方向竖直向上。这一对力 N 和 N 是作用与反作用力。不要把物体所受到的重力 Q 和地面给它的力 N 误解为一对作用与反作用力。

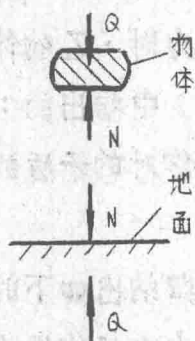
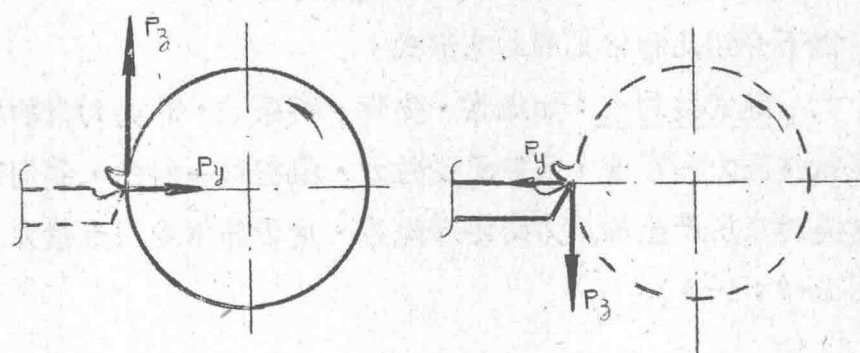


图 1-5

例 1-3：设有一工件以车刀来切槽(或切断)，图 1-6，车刀作用于工件的切削力此时可分解为两个分力：切向力 P_z 和径向力 P_y 。根据作用与反作用定律，则可知车刀同时也必受到两个反作用力 P_z 和 P_y 。这两对作用与反作用力 P_z 与 P_z 、 P_y 与 P_y ，必定是大小相等、方向相反且在

同一直线上。



(a) 车刀作用于工件的力 (b) 工件作用于车刀的力

图 1-6

§ 4 约束与约束反力

毛主席教导我们：“世界上的事情是复杂的，是由各方面的因素决定的。”“每一事物的运动都和它的周围其他事物互相联系着和互相影响着。”就一台机器而言，它的每一构件都和周围的其他构件相联系着。因此，任一构件的运动都受到一定的限制。例如行车起吊重物，吊重受重力作用本要下落，但被吊索拉住，物体下落运动受到限制；又如行车只能沿轨道运动，轨道对行车的运动起了一定的限制作用；又如电机轴置于两端轴承中，轴受限制而只能有旋转运动。在力学中，凡在空中任何方向均能运动，而不受限制的物体称为自由体；凡在某些方向运动不可能而受到限制者称为非自由体。对非自由体运动限制的周围物体称为约束。约束施于物体的力称为约束反力，简称反力。约束反力的方向总与约束所限制的物体运动方向相反。

约束反力以外的力，即非约束反力，统称主动力。主动力例如重力、机床的切削力、蒸汽机的蒸汽压力等等。

低下介绍几种常见的约束形式。

一 绳索类约束：如绳索、皮带、链条等。这类约束的特点是不能抵抗压力和弯曲，只能承受拉力。根据这一特性，我们可以确定这类约束所产生的反力必沿着绳索、皮带等本身而为拉力。

(图 1-7；1-8)。

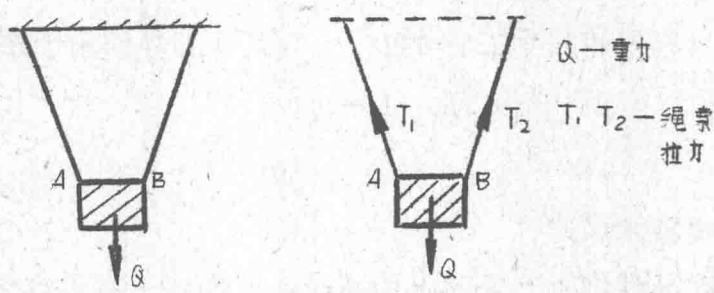


图 1 - 7

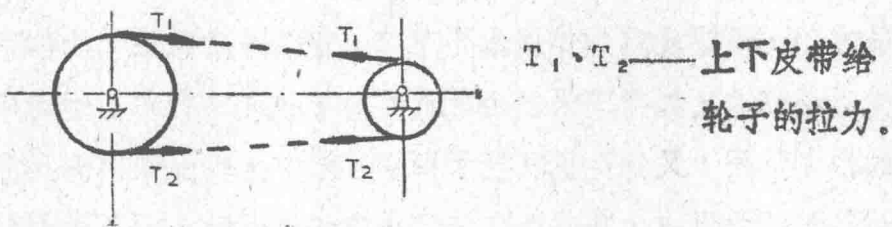


图 1 - 8

三 光滑面约束：在工程中，如果机器中各构件间的接触面比较光滑。摩擦可以忽略时，我们可以认为接触面是光滑的。例如，

发动机中汽缸和活塞之间的接触面（图 1-9），机床导轨和拖板之间的接触面（图 1-10）都可以认为是光滑接触面。对光滑接触面而言，物体可沿接触面自由滑动，但决不能沿接触面的公法线而压入接

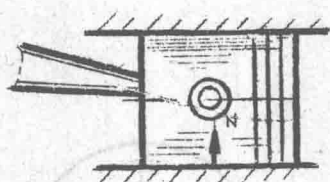


图 1-9

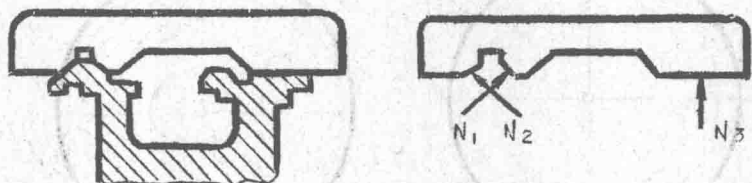


图 1-10

触面。因此，光滑面的约束反力必沿此面的法线而为压力（图 1-9；1-10；1-11）。

图 1-11 代表一对啮合齿轮。当我们研究主动齿轮时，从动轮就成为主动齿轮的约束。从动轮牙齿给主动轮牙齿的约束反力，沿着齿廓曲面啮合点 A 的公法线方向，用 P_n 表示。由齿轮原理知道，此公法线与节圆切线 $t-t$ 所夹的角 α 就是压力角，我国标准齿轮的压力角 $\alpha = 20^\circ$ 。分析力时，往往把力 P_n 分解为切向力 P_t 与径向力 P_r 。从图中可知

$$P_t = P_n \cos \alpha, \quad P_r = P_n \sin \alpha$$

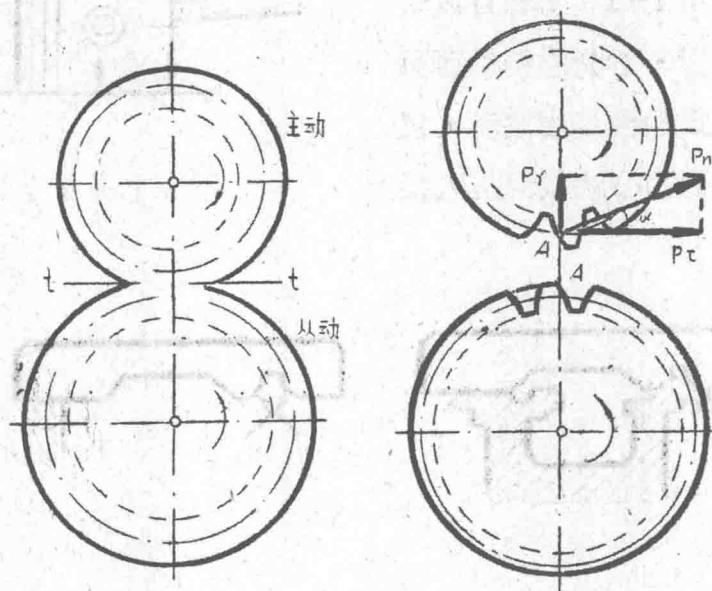


图 1-11

三 铰接支座或铰接的约束：所谓铰接支座即用圆柱销将活动构件和支座联结在一起，如图 1-12(a)，图 (b) 是它的简化图。铰接支座在工程中应用极广，如门窗铰链等皆是。这种约束使构件只能绕销钉轴线转动，而不能在垂直于销钉轴线的平面内有任何方向的移动，也就是说它限制了构件在垂直于销钉轴线平面内沿铅垂方向及水平方向的移动。因此，铰接约束的约束反力通常可用过销钉中心沿铅垂方向与水平方向的两个分力 R_x 、 R_y 来表示。如图 1-12(b)。

在工程中，常常用销钉将两构件联接，这种联接称为铰接，