



工程力学(engineering mechanics)是一门研究物体机械运动的一般规律和相关构件的强度、刚度、稳定性理论的学科。

生产实践中的各种机械或工程结构,通常是由各种构件装配组合而成的。当机械或工程结构工作时,其构件会受到其他物体或构件的机械作用,这种机械作用称为**力**(force)。构件在力的作用下,通常会产生两种类型的效应:一是整个构件的位置将随时间而发生变化,即使得构件的机械运动状态发生了改变,这称为力的**运动**(motion)效应(或外效应);二是构件的形状、尺寸将发生变化,即引起了构件的变形,这称为力的**变形**(deformation)效应(或内效应)。因此,工程力学主要研究两方面的内容,即与运动效应有关的物体机械运动的一般规律(通常称为**理论力学**(theoretical mechanics)),以及与变形效应有关的构件强度、刚度和稳定性问题(通常称为**材料力学**(mechanics of materials))。

工程力学的研究对象往往比较复杂,在实际力学分析中,必须抓住一些实质性的主要因素,舍弃次要因素,从而将物体抽象化为理想的力学模型。质点、质点系、刚体、变形固体等即是各种不同的力学模型,它们是工程力学的主要研究对象。

研究力的运动效应,就是分析受力构件的机械运动规律,包括研究构件平衡时作用力之间的关系、运动的几何特性以及力与运动之间的关系。这分别对应于本书的前三篇,即第1篇**静力学**(statics),第2篇**运动学**(kinematics)和第3篇**动力学**(dynamics)的内容。

研究力的变形效应,就是研究受力构件的变形规律,这对应于本书的第4篇,即材料力学部分的内容。为保证机械或工程结构能够正常工作,其各个组成构件必须具备足够的承载能力。构件的承载能力通常需满足三个方面的基本要求:

(1) 强度要求。**强度**(strength)是指构件在载荷(外力)作用下抵抗破坏的能力。满足强度要求就是要求构件在正常工作时不发生破坏。

(2) 刚度要求。**刚度**(rigidity)是指构件在载荷作用下抵抗变形的能力。满足刚度要求就是要求构件在正常工作时产生的变形不超过允许范围。

(3) 稳定性要求。**稳定性**(stability)是指构件保持原有平衡状态的能力。满足稳定性要求就是要求构件在正常工作时不失稳。

在设计结构或构件时,除应满足上述三项基本要求外,还应尽可能地合理选用材料与节省材料,从而降低制造成本并减轻构件重量。工程力学的任务之一就是研究构件在载荷作用下的受力、变形与破坏或失效的规律,为合理设计构件提供有关强度、刚度与稳定性分析



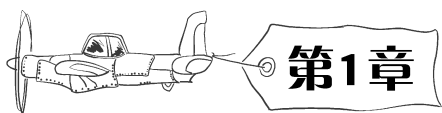
的基本原理和方法,以保证构件和结构按设计要求正常工作,并充分发挥材料的性能,使设计的结构既安全可靠又经济合理。

工程力学是现代工程技术的重要理论基础之一,它已被广泛应用于各种工程领域,如机械、土建、水利水电、航空航天、船舶、矿业、石油、交通、材料、电子电气、自动控制、生物医学等领域,解决了很多工程实际问题。同时工程力学也是学习相关后续课程(如弹性力学、结构力学、流体力学、机械原理及机械设计等)的基础,因此,工程力学是工科类各专业所需完整知识体系的一个重要组成部分,学好工程力学对于学生后续学习其专业知识及以后从事工程技术工作具有深远的影响。

工程力学是一门理论性较强的技术基础课,在学习上要准确理解基本概念,熟悉基本理论,掌握分析问题的基本思路和方法。以便培养正确分析问题和求解问题的能力,为今后解决生产实践问题、从事科学研究工作打下良好的基础。



静 力 学



静力学基础

静力学(statics)主要研究物体平衡(equilibrium)时,其上作用力所满足的条件。本章首先介绍刚体与力的概念及静力学公理,然后阐述工程中常见的约束和约束反力,最后介绍物体的受力分析和受力图。

1.1 刚体和力

1. 刚体

刚体(rigid body)是在外力作用下形状和尺寸都不改变的物体。物体在力的作用下,实际都会产生不同程度的变形。有时变形相对物体尺寸来说比较微小,且对研究的问题不起主要作用,可以略去不考虑,从而简化了问题。因此,刚体是抽象化的理想力学模型。例如,研究房屋结构受力问题时,柱和梁可视为刚体。本书第 1~3 篇主要研究力的运动效应(外效应)而非变形效应(内效应),通常可忽略其研究对象(质点、质点系等)的变形,因此可将其研究对象视为刚体处理。

2. 力

力是物体间相互的机械作用。按照其产生方式,大致可分为两类:一类是直接接触产生,例如手抓球,手对球产生力的作用;另一类是“力场”对物体的作用,例如:地球引力场对物体的引力。

力的三个要素:大小,方向,作用点。

可用矢量来表示力的三个要素,如图 1.1 所示。矢量 $\mathbf{AB}$ 的长度按一定的比例尺表示力的大小;矢量的方向表示力的方向;矢量的起点(或终点)表示力的作用点;矢量 $\mathbf{AB}$ 指向(图 1.1 上的虚线)表示力的作用线。力的矢量常用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示,而用普通字母 F 表示力的大小。单位为牛(N)或千牛(kN)。

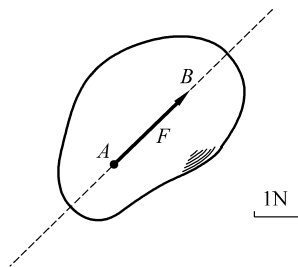


图 1.1



1.2 静力学公理

1. 力的平行四边形法则

作用在刚体上同一点的两个力,可以合成为一个合力(resultant force)。合力的作用点不变,合力的大小和方向,由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定(图 1.2(a)),即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

此公理亦可表述为三角形法则:平行移动其中一个力,使两个力首尾相接(图 1.2(b)、(c))。合力矢 $\mathbf{F}_R$,从起点 O 指向终点,与 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 形成三角形。

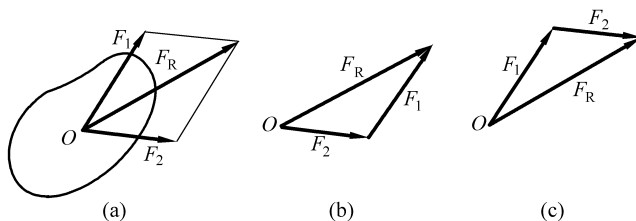


图 1.2

2. 二力平衡公理

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的充要条件是这两个力的大小相等、方向相反,且在同一直线上(图 1.3),即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1.2)$$

工程中经常遇到两个作用点上各作用一个力而平衡的构件,称为二力构件(two-force member)。根据二力平衡公理,这两个力的作用线必然沿着两个作用点连线,大小相等、方向相反,如图 1.4 中的 BC 杆。

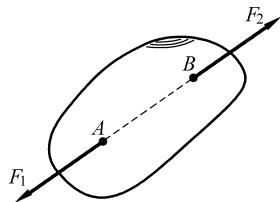


图 1.3

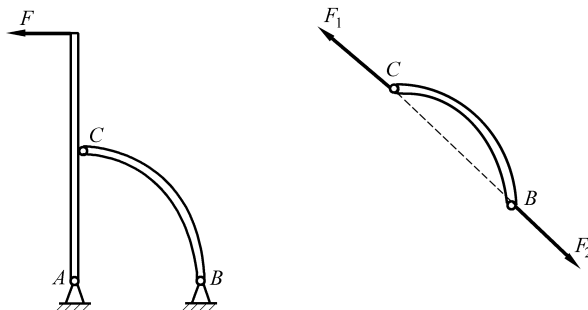


图 1.4

3. 加减平衡力系公理

在某一力系上加上或减去任意的平衡力系,得到的新力系不改变对刚体的作用效应,因此可以等效替换原力系。



根据上述公理可以导出下列推理。

推理 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可以沿着其作用线移到刚体内任意一点,不改变力对刚体的作用效应。

证明: 设有力 F 作用在刚体上的点 A (图 1.5(a))。根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B ,并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_1 = -F_2$ (图 1.5(b))。由于力 F 和 F_2 也是一个平衡力系,故可除去,这样只剩下一个力 F_1 (图 1.5(c))。于是,原来的这个力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_1 均等效,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

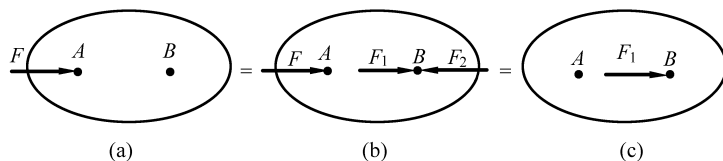


图 1.5

可见,力的作用线是决定力作用效应的要素。

推理 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三个力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明: 如图 1.6 所示,在刚体的 A 、 B 、 C 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性,将 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形规则,得合力 F_{12} ,则 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线,所以 F_3 必定与 F_1 和 F_2 共面,且通过 F_1 与 F_2 的交点 O 。于是定理得证。

4. 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。如图 1.7 所示,用绳吊住的灯, T 和 T' 互为作用力和反作用力用,用相同字母表示,作用反力在字母上方加“'”。

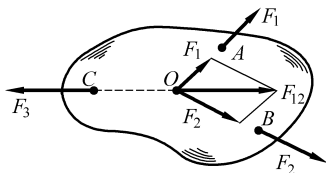


图 1.6

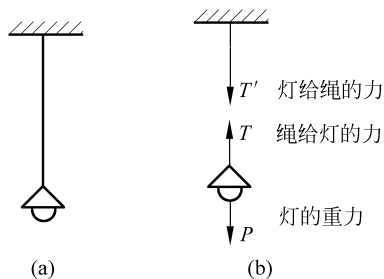


图 1.7

5. 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体视为刚体,其平衡状态保持不变。

如图 1.8 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化成刚



体,其平衡状态保持不变。绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下不能平衡,这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

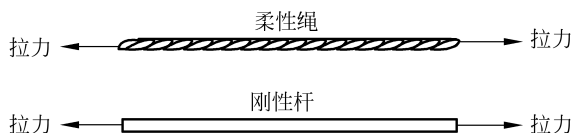


图 1.8

由此可见,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。

1.3 约束和约束反力

位移不受限制的物体称为自由体,例如:空中自由飞行的飞机。物体在空间的位移受到一定限制,如机车只能在轨道上行驶,为非自由体。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为**约束**(constraint)。例如,轨道对于机车是约束。

约束阻碍着物体的位移,约束对物体的作用,是通过力来实现,这种力称为**约束反力**(constraint reaction),简称反力。约束反力有三个特征:

- (1) 大小通常未知,由主动力决定;
- (2) 方向与物体被约束限制的位移方向相反;
- (3) 作用点在约束与物体的接触点。

下面是几种在工程中常遇到的约束类型及其约束反力的确定方法。

1. 光滑接触面约束

物体间相互触碰,例如,物体放置在固定面(图 1.9(a)、(b)),两个齿轮相互啮合(图 1.9(c)),接触面上的摩擦力忽略不计时,属于光滑接触面约束。

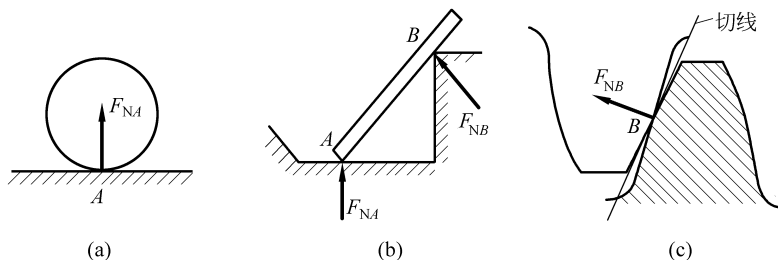


图 1.9

这类约束阻碍物体沿接触面公法线方向运动。因此,光滑接触面对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿接触面公法线,指向物体,通常用 F_N 表示。

2. 柔体约束

细绳吊住重物(图 1.10(a)),由于柔软的绳索本身只能承受拉力(图 1.10(b)),所以它给物体的约束反力只可能是拉力(图 1.10(c))。因此,绳索对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿着绳索背离物体。通常用 T 或 F_T 表示这类约束反力。



链条或运输皮带也都只能承受拉力。当它们绕在轮子上时,对轮子的约束反力沿轮缘的切线方向(图 1.11)。

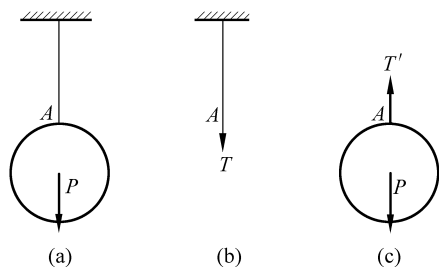


图 1.10

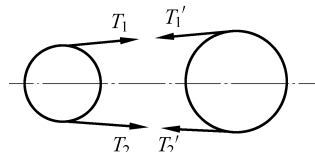


图 1.11

3. 光滑铰链约束

圆柱铰链是由圆柱销钉将两个带相同孔洞的构件连接在一起而成,简称铰链(图 1.12(a))。圆柱铰链的简易画法见图 1.12(b)。销钉与孔洞之间可以认为是光滑接触面约束,销钉对构件的约束反力应沿接触点的公法线方向且通过孔洞中心。接触点的位置由主动力决定,通常不能预先确定,所以可以用一对正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 来表示(图 1.12(c)),指向通常假设沿坐标轴正向。

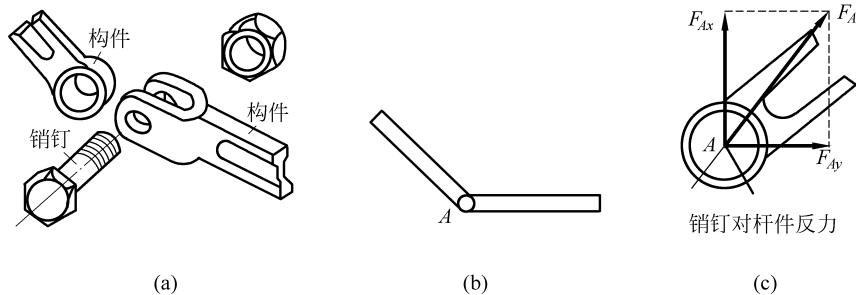


图 1.12

如果铰链连接中有一个固定在地面或机架上作为支座,则这种约束称为固定铰链支座,简称固定铰支(图 1.13)。分析铰链处的约束反力时,通常把销钉固连在其中任意一个构件上。当销钉上有集中力作用时,可以把集中力放在其中一个构件上来分析。

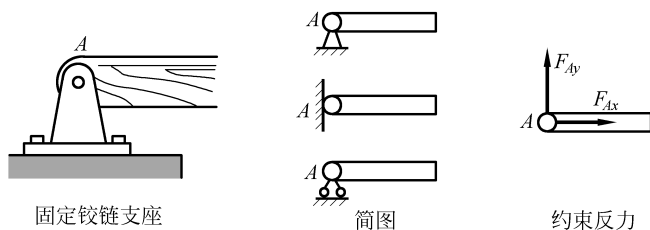


图 1.13



图 1.14 所示为向心轴承,只允许转轴沿轴线方向微小移动,因此,对转轴的约束反力可以看作与固定铰链支座相同。

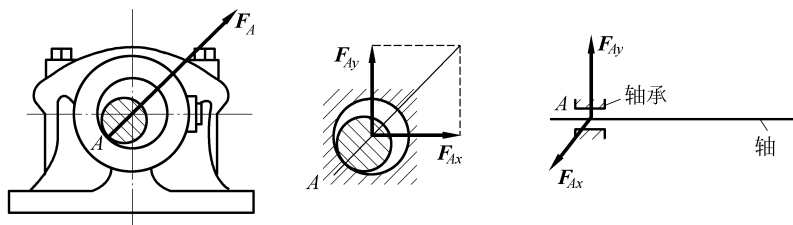


图 1.14

4. 滚动铰链支座

在铰链支座与光滑支承面之间,用几个滚柱连接,就是滚动铰链支座(图 1.15)。滚动铰链支座可以沿支承面移动,允许结构跨度在温度等因素作用下的自由伸缩。如桥梁、屋架等结构中经常采用滚动支座。其约束性质类似于光滑接触面约束,其约束反力必沿支承面法线方向,指向未定。

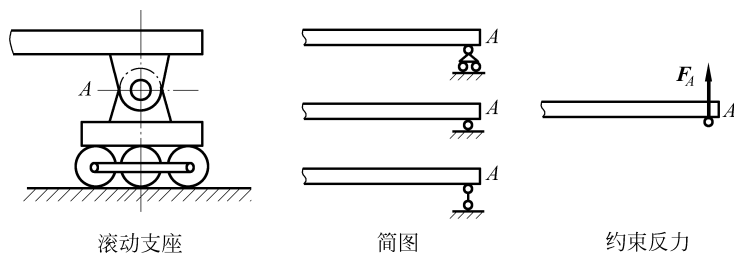


图 1.15

1.4 物体的受力和受力图

静力学研究刚体在力系作用下的平衡问题。首先要确定研究对象,分析物体受了几个力,每个力的作用点和作用线,即受力分析。为把研究对象的受力情况清晰地表示出来,要把研究对象和周围约束分开,受力分析,并单独画出简图,这样的图称为受力图(free body diagram)。

例 1.1 图 1.16(a)所示简支梁 AB,试画出 AB 梁的受力图。

解 (1) 取 AB 梁为研究对象(即取分离体),并单独画出其简图。

(2) 分析主动力,C 点有一主动力 F 。

(3) 分析约束反力,AB 梁与周围物体接触点在 A 点和 B 点,A 点固定铰链,方向不能预先确定,反力用一对正交 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示。B 点滚动铰链,约束反力 F_B 垂直于支承面,如图 1.16(b)所示。受力图还可以如图 1.16(c)所示,由于 A 点作用一个合力,AB 梁受到了三个力的作用,根据三力平衡汇交定理,可以确定 A 点合力的方向, F_A 作用线必然通过 F 与 F_B 的汇交点 D。

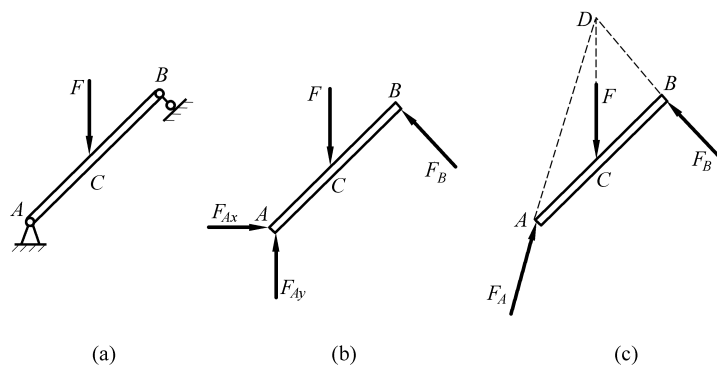


图 1.16

例 1.2 图 1.17(a)所示结构,画出整体及各结构中各个构件的受力图。

解 (1) 取整体为研究对象,先分析主动力,在 H 点有一主动力 F ;然后分析约束反力,整体与周围约束的接触点为 B 、 C 两点,均为光滑接触面约束,约束反力垂直于支承面(图 1.17(b))。

(2) 构件的分析顺序通常从受力简单的构件开始。 DE 杆与周围物体接触点有 D 、 E 两点,约束均为圆柱铰链,由于在两个力作用下而平衡,因此为二力杆, D 、 E 两点反力的方向可以确定,大小相等、方向相反。 AB 杆在 H 点作用主动力 F ,与周围物体有 A 、 B 、 D 三个接触点; A 点固定铰链,反力为一对正交 F_{Ax} 和 F_{Ay} ; D 点铰链,反力 F'_D 方向已确定与 F_D 互为作用力和反作用力; B 点为光滑接触面约束,反力垂直于支承面。 AC 杆与周围物体有 A 、 E 、 C 三个接触点; A 点铰链,反力 F'_{Ax} 、 F'_{Ay} 与 F_{Ax} 、 F_{Ay} 互为作用力和反作用力; E 点铰链,反力 F'_E 方向已确定与 F_E 互为作用力和反作用力; C 点为光滑接触面约束,反力垂直于支承面(图 1.17(c))。

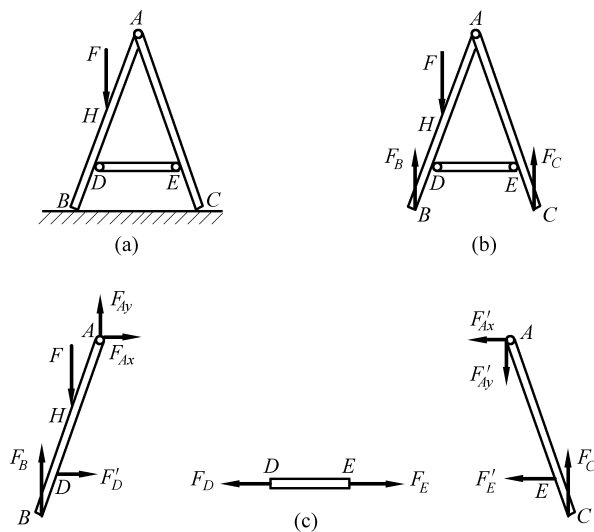


图 1.17

正确地画出物体的受力图,是分析、解决力学问题的基础。画受力图时必须注意以下几点:

(1) 复杂系统的单个构件分析,应从受力简单的构件开始。如有二力杆,应先画该杆受力图。