

绪 论

1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。机械运动是人们生活、生产与工程实际中最常见的一种运动。例如,机器的运转、车辆的行驶、人造卫星的飞行、建筑物的振动等等,都是机械运动。平衡是机械运动的特殊情况。

物体的机械运动存在着一般规律,这些一般规律就是理论力学的研究对象。

工科理论力学中的研究对象主要是从实际工程机械与结构中简化出来的简单机构与结构,这在本书中的大量习题中可以见到。

理论力学研究的内容是远小于光速的宏观物体的机械运动。它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。古典力学的规律不适用于接近光速的宏观物体的运动,也不适用于微观粒子的运动(前者用相对论力学、后者用量子力学研究),这说明古典力学有其局限性。但是,在一般工程技术问题中所研究的物体,都是运动速度远小于光速的宏观物体。因此,用古典力学来解决,不仅方便,而且能够保证足够的精确性。所以,古典力学至今仍有很大实用意义。

理论力学起源于物理学的一个分支,但它的内容已大大超过了物理学的内容。理论力学不仅要求建立与力学有关的各基本概念和理论,而且要求能运用理论知识对于从实际问题中抽象出来的力学模型进行分析和计算。

研究物体机械运动的普遍规律有两种基本方法,从而形成理论力学的两大体系:一是用矢量的方法研究物体机械运动的普遍规律,称为矢量力学;二是用数学分析的方法进行研究,称为分析力学。本书以矢量研究方法为主。

理论力学的内容包括 3 部分:

静力学——主要研究物体的受力分析、力系的简化与力系的合成以及力系平衡条件及应用。

运动学——研究物体机械运动的几何性质(即物体运动的描述,建立物体的运动方程,求其速度与加速度等),而不研究引起物体运动的原因。

动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。



2. 理论力学的研究方法

与一切科学相同,对于力学基本规律的研究起源于对实际现象的观察和归纳。人类在生产活动中很早就开始积累经验并逐渐形成初步的力学知识。随着生产活动的深入,为了提高效率,并使工具与建筑物能够长久地使用,人们开始进行研究并形成了相应的方法。力学就是从实践出发,通过观察与实验,经过科学的抽象、综合、归纳,建立力学模型,建立公理或定律,再用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论,然后再通过实践来检验定理或结论的正确性,从而指导人们在实践中正确运用力学知识。其中观察和实验是理论发展的基础,而“抽象化”和“数学演绎”则是研究的主要方法。

3. 学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课,是工科各类专业的重要技术基础课之一。工程专业一般都要接触机械运动的问题,这些问题中有的可以直接应用理论力学的基础理论解决,有些比较复杂的问题则需要用理论力学和其他专门知识来解决,所以学习理论力学是解决、分析工程问题所必须掌握的基础知识。

理论力学讲述力学中最普遍、最基本的规律,是现代工程技术的重要基础之一。对于机械、汽车、航天、建筑等专业尤为重要。这些工程专业的课程以理论力学知识为基础,理论力学在基础课与专业课之间起着桥梁作用。

理论力学的理论既抽象而又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,系统性、逻辑性强。学生要充分理解、掌握理论力学这门课程的研究方法与解决问题的步骤,通过学习理论力学课程,在掌握这门课程知识的同时培养正确分析问题与解决问题的能力。



ARTICLE 第 I 篇

静 力 学

静力学主要是研究物体在力系作用下力系的合成与简化以及平衡规律的问题。

力系是指作用于物体上的一群力。

平衡是指物体相对于惯性坐标系(即适用牛顿运动定律的坐标系)处于静止或做匀速直线运动,它是机械运动的特殊情况。物体的平衡总是相对的,暂时的。在一般工程问题中,所谓平衡是指物体相对于地面的平衡,特别是指相对于地面的静止。

能使刚体保持平衡状态的力系称为平衡力系。构成一个平衡力系所满足的条件称为力系的平衡条件。研究物体的平衡问题,就是研究作用于物体力系的平衡条件及其应用。

静力学将主要讨论 3 个问题:

1. 物体的受力分析

分析某物体共受几个力作用,以及每个力的作用位置和方向。

2. 力系的简化与合成

若两组不同的力系分别作用同一物体,使这一物体的运动状态完全相同,称这两个力系等效。如果用一个简单的力系等效地替换一个复杂的力系,这个过程称为力系的简化。如果一个力与一个力系等效,则此力称为该



力系的合力,而该力系的各力称为此力的分力。

3. 力系的平衡条件及其应用

通过对各种力系简化结果的讨论来推出各力系简化计算的方法以及平衡时各力系所应满足的条件,即力系的平衡条件。利用力系的平衡条件来解决简单的工程静力学问题,并掌握解决问题的方法。

物体的受力分析非常重要,是进行力系简化与合成、平衡分析的基础,学生务必十分重视。

工程中存在着大量的静力学问题。例如,飞机在飞行中受到升力、发动机的推力、重力、空力阻力等作用,这些力错综复杂地分布在飞机的各部分,每个力都影响飞机的运动。要想确定飞机的运动规律,必须了解这些力总的作用效果,这就需要用简单的等效力系来代替这些复杂的力,然后再进行运动的分析。除此之外,动力学也可在形式上变换成为平衡问题,应用静力学理论求解。力系的平衡条件是设计构件结构和机械零件时进行静力计算的基础。由此可知,静力学在工程实际中有着广泛的应用,积累了丰富的内容,在力学理论中非常重要,因而成为一个相对独立的部分。



静力学公理与物体的受力分析

本章讲述刚体、力、约束等基本概念以及静力学的几个公理,它们是静力学的基础。

1.1 静力学的基本概念

1.1.1 刚体的概念

所谓**刚体**是指受力时保持其形状和大小不变的物体,或是物体受力时,物体内任意两点间的距离保持不变。在静力学中所指的物体都是刚体。

实际物体在受力时总是会变形的,只是物体的受力变形很小,或者忽略变形不会影响所研究问题的实质。这样就可以把该物体抽象为刚体,使所研究的问题大大简化,又符合工程精度要求。刚体是客观实际物体的科学抽象。

1.1.2 力的概念

力是物体之间相互的机械作用。它可使物体的运动状态发生变化,也可使物体的形状发生变化。

力使物体的运动状态发生变化的效应称为力的运动效应(外效应),力使物体形状变化的效应称为变形效应(内效应)。理论力学只研究力的运动效应,力的变形效应将在以后的材料力学等课程中讨论。

应当指出,既然力是物体之间的相互作用,所以力不能脱离物体而存在。有一个力,就必然有一个施力体和一个受力体,离开了物体之间的相互作用是不能进行受力分析的。

力对物体的作用效果取决于**力的三要素:力的大小、方向和作用点**。力是矢量,符合矢量运算法则。在本书中用黑斜体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。力的方向是指它在空间的方位和指向。力的作用点是指力在物体上的作用位置。过力的作用点沿力的方向画出的直线(图 1-1 中的 KL),称为力的作用线。

在学生作业中的受力图上就用字母 F 上方加一箭头来表示矢量,即 $\vec{F}$ 。

度量力的大小通常采用国际单位(SI)制,力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。使质量为 1kg 的物体产生 1m/s^2 加速度的力定义

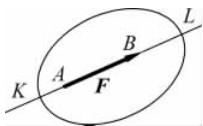


图 1-1



为 1N。

力作用位置的理想情况可视为集中力或分布力。当力的作用面积小到可以不计其大小时,就可把该力抽象为一个点,这个点就是力的作用点,而这种作用于一点的力称为集中力;当作用力分布在有限面积上或体积内时,称为分布力。分布力的分布规律一般比较复杂,需要简化。实际上,集中力是分布力的理想化模型。

1.2 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结,又经过实践反复检验,被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1-1 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的充分必要条件是:这两个力的大小相等,方向相反,且作用线在同一直线上。

这个公理表明了作用于刚体上的最简单力系平衡时所必须满足的条件,是研究力系平衡条件的理论基础。

只受两个力作用而平衡的物体,称为二力体,也称为二力构件。根据二力平衡条件可知:二力构件不论其形状如何,其所受的两个力的作用线必是沿两力作用点的连线。这一特性在对二力体进行受力分析时,常常是很有用的。如图 1-2(a)中的三铰拱,在力 F 作用下处于平衡,若不计自重,则 BC 部分就是二力构件,作用于 B 、 C 两点的力的作用线必沿这两点的连线, B 、 C 两点受力如图 1-2(b)所示。

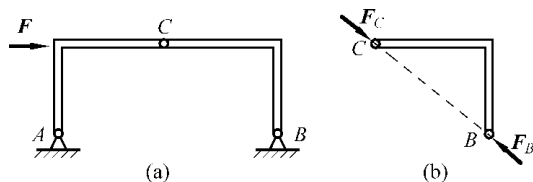


图 1-2

公理 1-2 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;合力的大小和方向可以用以这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线矢量来表示,如图 1-3(a)所示。或者说,合力矢等于这两个力的矢量和(几何和),即

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

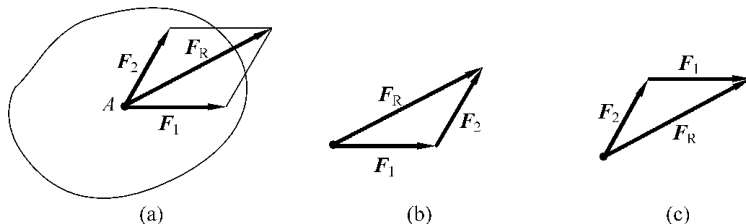


图 1-3



这种合成方法称为**矢量加法**,合力 F_R 为这两个力的**矢量和(几何和)**。用矢量加法求合力时往往不必画出整个力的平行四边形,而只要如图 1-3(b)、(c)那样画出力的三角形,即可求得合力 F_R 的大小和方向。这种求合力的方法,称为**力的三角形法则**。力的三角形法则只表明各力的大小和方向,它不表示力的作用点或作用线的位置。应用力的三角形法则求解各力的大小和方向时,可应用数学中的三角公式、正弦定理与余弦定理。

应该指出, $F_R = F_1 + F_2$ 是矢量等式,它与代数等式 $F_R = F_1 + F_2$ 的意义完全不同,不能混淆。

力的平行四边形法则是复杂力系合成的基础。

公理 1-3 加减平衡力系原理

在已知力系上再加上或减去任意一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用。

这个公理常用于力系的简化,是力系等效变换的重要依据。

根据上述公理可以导出下列推论:

推论 1-1 力的可传性原理

作用于刚体上某点的力,可沿着其作用线移至刚体内任意一点,而不改变该力对刚体的作用。

证明: 如图 1-4(a),力 F 作用于刚体上的点 A 。根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B ,并加上一对平衡的力 F' 和 F'' ,使 $F = F' = -F''$,如图 1-4(b)所示。由于力 F 和 F'' 也是一个平衡力系,故可除去,这样只剩下一个力 F' ,图 1-4(c)所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

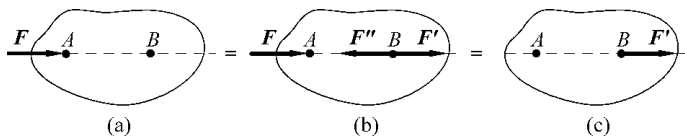


图 1-4

作用于刚体上的力可以沿作用线移动,这种矢量称为**滑移矢量**。力的可传性只适用于同一刚体,不适用于变形体。

推论 1-2 三力平衡汇交定理

刚体受不平行的 3 个共面力作用而平衡,则该三力的作用线必汇交于同一点。

本定理可利用前述力基本性质和推论来证明。证明留给读者自行完成。

公理 1-4 作用与反作用定律

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。若用 F 表示作用力, F' 表示反作用力,则

$$F = -F'$$

机械运动的传递总是通过相互作用实现的,作用力与反作用力总是相互依存,同时产生,同时消失。掌握这一规律,对我们进行物体的受力分析是非常重要的。每一个力都要从物体的相互作用的关系上去分析,明确其施力体和受力体,否则就容易发生错误。

注意,分别作用在两个物体上的作用力和反作用力虽然等值、反向、沿同一直线,但不



定满足二力平衡条件,不是一对平衡力。

本定律对刚体和变形体都是适用的,无论它们是否处于平衡状态。

公理 1-5 刚化原理

若变形体在某力系作用下处于平衡,则将此变形体视为刚体(刚化)时,其平衡不受影响。

刚化原理是研究变形体平衡的理论依据。前面已指出,二力平衡条件只适用于刚体。因此,由它导出的其他力系的平衡条件也只适用于刚体。刚化原理告诉我们,只有当变形体处于平衡时,才能将刚体的平衡条件用于变形体。

注意,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力学的基础之上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

静力学全部理论都可以由上述 5 个公理推证而得到,这既能保证理论体系的完整和严密性,又可以培养读者的逻辑思维能力。

1.3 约束与约束力

1.3.1 自由体与非自由体,约束与约束力

在研究工程实际中的力学问题时,首先要对物体(工程构件或结构)进行受力分析,即分析物体受了哪些力的作用,以及每个力的作用点与方向,尤其是分析物体所受到的约束力。为此,我们先对约束力进行定性分析,即确定其作用点和作用线的方位。在后面章节中再进行定量计算分析,即通过平衡条件或动力学方程确定其大小及指向。

在力学中根据物体的运动是否受到预先设定的限制而将物体分为两类,一类是位移不受任何限制,可以在空间自由运动的**自由体**,例如在空中飞行的炮弹、飞机等;另一类是位移受到某种限制的非自由体,例如安装在基础上的机器受到基础与地脚螺钉的限制而不能移动。工程上把限制非自由体某些位移的周围物体称为该非自由体的**约束**。例如前述例子中,基础与地脚螺钉是机器的约束。

从力学观点看,约束是通过对被约束物体施加力来产生约束作用的,约束对被约束物体的作用称为**约束力**。

约束力的作用位置在约束与被约束物体的接触处或连接处。如果物体之间是点接触,则接触点处就是约束力的作用点。约束力的方向总是与约束所能阻止的物体运动方向相反。这是我们对约束力进行定性分析、确定约束力方向的准则。若受到的限制是沿坐标轴方向的位移,则约束力是沿该轴方向的力矢;若受到的限制是绕某坐标轴的转动,则约束力是沿该轴向的力偶矩矢。若能判定出某种运动受到了限制,但一时难以指明其方向时,则约束力(包括力和力偶)的指向可先行假设,然后利用平衡条件或动力学条件对其大小进行定量分析,进一步确定其真实指向。

在一般情况下,物体除受到约束力以外,还受到各种大小和方向与约束无关的力的作用。如重力、电机的驱动力、液体压力等等。由于这些力的作用促使物体运动或有运动趋势,故称为**主动力**。主动力在工程中也称为**荷载**,其大小通常可以预先独立地给定,往往是已知的,而约束力则是由主动力引起的,它是一种被动力,是未知的。当主动力不存在(或等



于零)时,则相应的约束力也不存在(或等于零)。

1.3.2 工程中常见约束的基本类型及其约束力

下面介绍工程上常见的几种基本类型的约束,并按上述原则定性分析其约束力的特点。

1. 柔索类约束

绳索、链条、皮带通常称为柔索。这类约束的特点是:只能承受拉力,所以它对物体的约束力也只能是拉力,如图 1-5 所示。因此,绳索对物体的约束力,作用在接触点,指向是沿绳索的中心线背离被约束物体。通常用 F_T 表示这类约束力。

当链条或皮带绕在轮子上,对轮子的约束力沿轮缘的切线方向,如图 1-6 所示。

2. 具有光滑接触面的约束

当两物体接触面上的摩擦力可以忽略时,即接触面可理想化为光滑接触面。这类约束的特点是无论接触面形状如何,只能限制物体沿接触面公法线方向朝向接触面的运动,而不能限制物体沿接触表面的切线方向和其他离开约束方向的运动。因此,光滑支承面对物体的约束力,作用在接触点处,方向沿接触表面的公法线,并指向被约束的物体。这种力称为法向约束力,通常用 F_N 表示,如图 1-7 中的 F_{NA} 、 F_{NB} 。

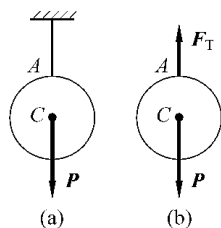


图 1-5

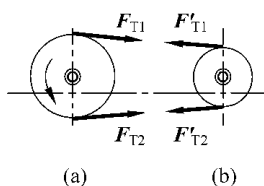


图 1-6

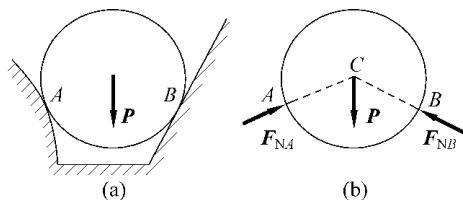


图 1-7

3. 光滑圆柱铰链和固定铰链支座的约束

如图 1-8(a)所示,在物体 A 和物体 B 上各钻一直径相同的圆孔,用一圆柱形销钉 C 把它们连接起来,忽略摩擦,如图 1-8(b),这种连接方式称为光滑圆柱铰链约束,简称铰链,并用简图 1-8(c)表示圆柱铰链连接。例如剪刀上的销子连接,机器上的轴与径向轴承的配合都是这种连接的实例。

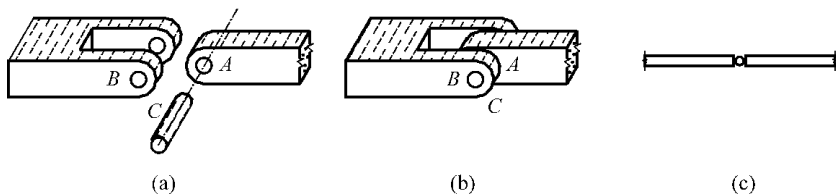


图 1-8



如果用铰链连接的两个物体,有一个是固定不动的支座,这种约束称为**固定铰链支座约束**,简称**固定铰支座**,如图 1-9(a),其简图为图 1-9(b)所示。

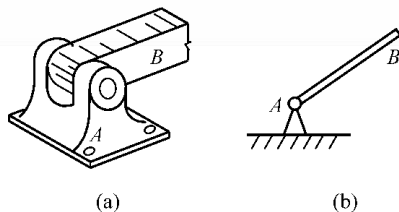


图 1-9

铰链和固定铰支座这类约束的特点是**不能限制物体绕销钉转动和沿销钉轴线的移动**,却能限制物体在垂直于销钉轴线的平面内沿径向的运动。因此,铰链的约束力作用在垂直于销钉轴线的平面内,通过销钉中心,而方向待定,可用图 1-10(a)中的 F_A 和 θ 表示, θ 为变量。但这种表示法在解析计算中不常采用。为了便于计算,常将这种方向不能预先确定的约束力用两个互相垂直的未知力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示,图 1-10(b)所示,其指向可以假设,真实指向最后由相应的计算确定。

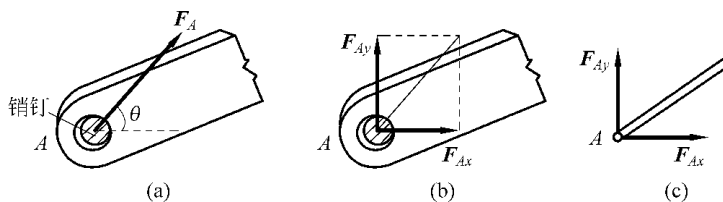


图 1-10

顺便指出,铰链虽然由 3 个构件组成,但也可以把销钉看作是固连于两零件中的某一个上,这样就简化为只有两个部件的结构,这对分析约束力没有影响,如图 1-11 所示。

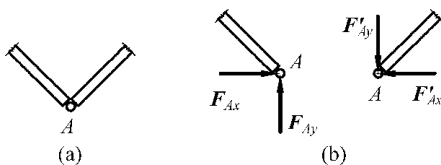


图 1-11

径向轴承(图 1-12(a))是工程中常见的一种约束,简图符号如图 1-12(b)所示,其约束力与铰链约束力的特征完全相同,如图 1-12(c)。

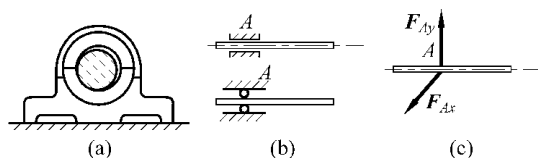


图 1-12