

绪 论

0.1 建筑力学的内容和任务

建筑力学是将刚体静力学、材料力学和结构力学等课程中的主要内容依据概念之间的逻辑关联性重新组织形成的力学知识体系。

随着我国城市现代化的快速发展,一大批新的标志性工程不断涌现,例如:目前世界上最长的大桥——丹昆大桥(全长 164.85 km,图 0.1.1)、大兴国际机场(图 0.1.2)、三峡水利工程(图 0.1.3)、高度达到 632 m 的上海中心大厦(图 0.1.4)。这些大型基建工程的建设,加快了新材料、新技术、新工艺的进步步伐,提升了工程设计理念和创新结构形式与理论的高度,为人们的生活和工作提供了良好的建筑环境。



图 0.1.1 世界最长大桥——丹昆大桥



图 0.1.2 大兴国际机场

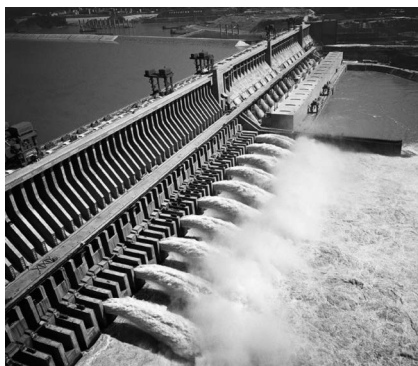


图 0.1.3 三峡水利工程



图 0.1.4 上海中心大厦

0.1.1 结构与构件

在机械、交通运输和建筑等工程中,广泛地应用各种机械设备和工程结构。机械的零件和结构部分统称为**构件**,由若干构件按照合理方式组成并用来承担荷载起骨架作用的部分称为**结构**。图 0.1.5 所示为一个常见厂房的结构及构件的示意图。

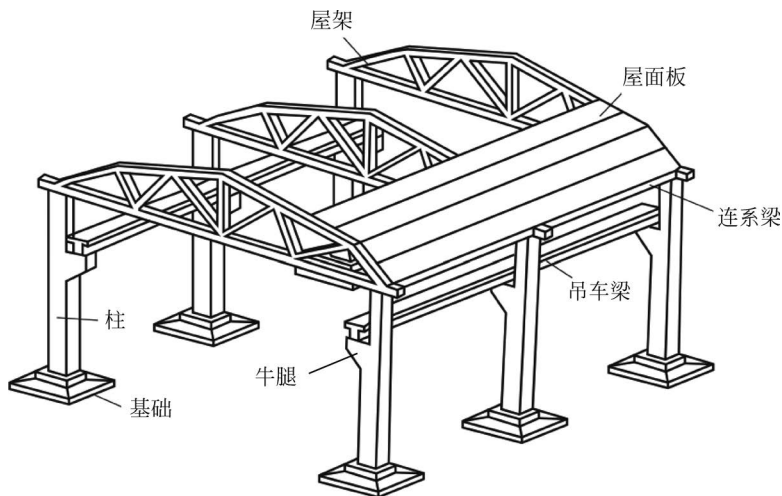


图 0.1.5 常见厂房结构及构件的示意图

结构一般可按其几何特征分为三种类型:

(1) 杆系结构 组成杆系结构的构件是杆件。杆件的几何特征是其长度尺寸远大于横截面的尺寸。

(2) 薄壁结构 组成薄壁结构的构件是薄板或薄壳。薄板或薄壳的几何特征是其厚度尺寸远远小于其另外两个方向的尺寸。

(3) 实体结构 其三个方向的尺寸基本为同一数量级的结构,如挡土墙、基础、钢球等。

建筑力学主要以杆件及平面杆系结构为研究对象,讨论其力学行为。常见的平面杆件结构形式有以下几种。

1. 梁

梁是一种受弯杆件,其轴线通常为直线。梁可以是单跨的和多跨的(图 0.1.6)。

2. 桁架

桁架是由若干根直杆在两端用铰连接(见 1.5 节)而成的结构(图 0.1.7)。当荷载只作用在结点(也称节点)时,各杆只产生轴力。

3. 刚架

刚架是由直杆组成并具有刚结点(见 1.5 节)的结构(图 0.1.8)。

4. 拱

拱的轴线是曲线,且在竖向荷载作用下,主要承受压力,并会产生水平反力(图 0.1.9)。

水平反力大大改变了拱的受力性能。

5. 组合结构

组合结构是由桁架和梁或桁架和刚架组合在一起的结构(图 0.1.10)。

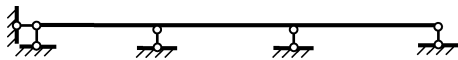


图 0.1.6 多跨梁

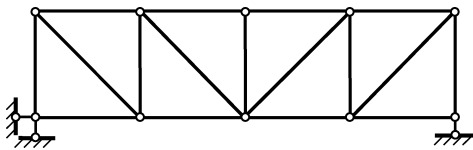


图 0.1.7 桁架

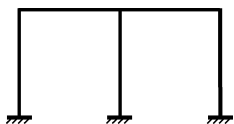


图 0.1.8 刚架

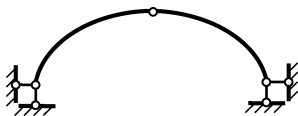


图 0.1.9 三铰拱

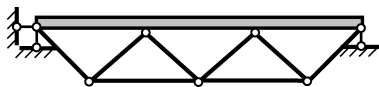


图 0.1.10 组合结构

0.1.2 建筑力学的任务与研究内容

在正常使用状态下,构件或工程结构都会受到外界的主动力(荷载)的作用,或者相邻构件或其他物体对它的作用。

在荷载作用下,构件及工程结构的几何形状和尺寸会发生一定程度的改变,这种改变称为**变形**。当荷载达到某一数值时,构件或结构就可能发生破坏,如吊索被拉断、钢梁断裂等。如果构件或结构的变形过大,也会影响其正常工作。如机床主轴变形过大时,将影响机床的加工精度;楼板梁变形过大时,下面的抹灰层就会开裂、脱落,等等。此外,对于受压的细长直杆,两端的压力增大到某一数值后,杆会突然变弯,不能保持原状,这种现象称为**失稳**。如果静定桁架中的受压杆件发生失稳,可使桁架变成几何可变体系而失去承载力。

在工程中,为了保证每一构件和结构始终能够正常地工作而不致失效,在使用过程中,要求构件和结构的材料不发生破坏,即具有足够的**强度**;要求构件和结构的变形在工程允许的范围内,即具有足够的**刚度**;要求构件和结构维持其原有的平衡形式,即具有足够的**稳定性**。

结构或构件的强度、刚度和稳定性与其本身截面的几何形状和尺寸、所用材料、受力情况、工作环境以及构造情况等有密切的关系。在结构和构件的设计中,首先要保证其具有足够的强度、刚度和稳定性。同时,还要尽可能地选用合适的材料和尽可能地少用材料,以节省资金或减轻自重,达到既安全、实用又经济的目的。建筑力学的任务就是为设计或验证既安全又经济的构件和结构提供必要的理论基础、计算方法和实验技能。

由于结构或构件的强度、刚度和稳定性都与所用材料密切相关,在计算、设计以及校核其承载力之前,必须了解材料的力学性能,而各种材料的力学性能必须通过实验加以测定,所以,建筑力学还要研究材料在荷载作用下的力学性质。

建筑力学的研究对象,依据所研究问题的目的不同而取不同的力学模型。当研究和分析各种力系的简化和平衡问题、研究结构的组成规律时,通常将被研究的物体视为**刚体**。所

谓刚体,就是绝对不变形的物体。即在任何外力作用下,其形状和大小始终保持不变的物体。刚体是一个理想化的模型,实际生活中并不存在。事实上,任何物体在外力的作用下都会产生变形,即它们都是**变形体**。但是很多物体的变形十分微小,在这种变形可以不被考虑或暂时可以不被考虑的情况下,可以把物体当作刚体来看待。例如,房屋结构中的梁和柱,在受力后将分别产生弯曲变形和压缩变形。当研究其中的梁、柱的平衡以及整个房屋结构的平衡问题时,都不考虑它们受力后的这些微小变形,而将其看成不变形的刚体。这样,大大简化了其平衡问题的分析计算。此时,刚体的模型不仅是合理的,而且是必需的。但当研究梁、柱的变形大小及由此产生的内力(应力)时,则必须考虑它们几何形状与尺寸的变化,而将它们看作变形体。可见,对同一物体,由于所研究的问题的目的不同,往往使用不同的力学模型。一般而言,构造一个物体系统合适的力学模型是一个复杂的问题,特别是随着系统的复杂性日益提高,建模的难度也日益增加。本课程主要讨论在已知力学模型的基础上,如何分析物体的受力,建立系统外力之间、内力与外力之间的关系以及外力与变形之间的关系,并讨论物体系统的强度、刚度及稳定性。

综上所述,建筑力学研究的主要内容可归纳为如下几个方面:

- (1) 研究物体以及物体系统的受力、各种力系的简化和平衡规律;
- (2) 研究结构的组成规律和合理形式;
- (3) 研究构件(主要是杆件)和结构(主要是杆件结构,包括静定结构和超静定结构)的内力和变形与外力及其他外部因素(如支座位移、温度改变等)之间的关系,并对构件及结构的强度和刚度进行验算;
- (4) 研究材料的力学性质和构件在外力作用下发生的破坏规律;
- (5) 讨论受压杆件以及简单刚架的稳定性问题。

建筑力学的内容是很多土木类和建筑类专业的基础。一方面,它与前修课程如高等数学、大学物理等有极其密切的联系;另一方面,又为进一步学习如建筑结构、道路、桥梁、水利以及机械原理和设计等后续的专业课程提供必要的基础理论和计算方法。因而,它在各门课程的学习中起着承上启下的作用。同时,建筑力学中的很多知识来源于生活,可以利用相关理论解决日常生活中遇到的问题。

建筑力学的理论概念性较强、分析方法典型、解题思路清晰,同学们在学习要深入理解基本概念、基本理论,通过多做习题来熟练掌握建筑力学问题的各种分析计算方法、解题思路和技巧,培养分析和解决问题的能力,从而达到弄懂概念、掌握理论和熟悉方法的目的。

0.2 变形固体的基本假设

实际工程中的任何构件、机械或结构都是变形体,或称**变形固体**。变形固体除受外力及其他外部因素的作用外,其本身性质也是多种多样、十分复杂的。每门学科只是从某个角度去研究物体性质的某一方面或某几个方面。同样,建筑力学也不可能将各种因素的影响同时加以考虑,而只能保留所研究问题的主要方面,略去影响不大的次要因素,对变形固体作某些假设,即将复杂的实际物体抽象为具有某些主要特征的理想物体。通常,在建筑力学中,对变形固体作出如下假设。

1. 连续性假设

连续是指物体内部没有空隙,处处充满了物质,且认为物体在变形后仍保持这种连续性。这样,物体的一切物理量如密度、应力、变形、位移等才是连续的,因而可以用连续函数来描述。

实践证明,在工程中将构件抽象为连续的变形体,不仅避免了数学分析上的困难,可以使用坐标来描述物体的变形,并便于利用微积分等数学工具,而且,由此假定所作的力学分析被广泛的实验与工程实践证实是可行的。

2. 均匀性假设

均匀性是指物体各点处材料的性质相同,并不因物体内点的位置的变化而变化。这样,可以从物体中取出(选取)任意微小部分进行研究,并将其结果推广到整个物体。同时,还可以将那些用大试件在实验中获得的材料性质应用到任何微小部分上去。

3. 各向同性假设

各向同性是指物体在各个不同方向具有相同的力学性质。因此,表征这些特性的力学参量(如弹性模量、泊松系数等)与方向无关,为常量。应指出的是,如果材料沿不同方向具有不同的力学性质,则称之为**各向异性材料**。木材、复合材料是典型的**各向异性材料**。

以上针对材料的三个假设是变形固体力学普遍采用的前提假设。

物体受力后,总会出现一些响应,例如,物体会运动、变形等。对于变形,有**弹性变形**和**塑性变形**之分。弹性变形是指物体在外力作用下产生变形,当去掉外力后,物体能完全恢复原来的形状而没有残余变形。具有这种性质的物体称为**完全弹性体**。实际上,理想的完全弹性体不存在,但常用的工程材料如金属、木材等,当外力不超过某一限度时,很接近于完全弹性体,可将其视为完全弹性体。塑性变形则是去掉外部因素后不能全部消失而留有残余的变形,也称**残余变形**。有时必须考虑物体的塑性变形,此时就不能再把物体视为完全弹性体,必须考虑其塑性。

在土建工程中,物体在外力或其他外部因素作用下产生的变形与其整体尺寸相比通常是很微小的,物体各点处的位移也是微小的,此类变形称为**小变形**。由于是小变形,在弹性变形范围内讨论物体的支反力与荷载或者内力与外力之间关系时,可以按物体的原始位置进行计算,而不用考虑其变形,这种处理方法常称为**原始尺寸原理**。同时,在计算其变形和位移时,也可略去变形的高阶微量以简化计算,产生的误差一般可以满足工程的需要。

0.3 荷载的分类及简化

作用在物体上的外力,按其作用方式可分为体积力和表面力,简称**体力**和**面力**。体力是连续分布在物体体积内的力,如物体的自重,电场中运动的带电导体的电磁力等;面力是其他物体通过接触面作用于物体表面的力,如车辆的轮胎压力、流体压力、风作用在建筑物表面的力等。力学中,把作用于物体上的外力按其使物体运动(或有运动趋势)或阻碍物体运动,分为**主动力**或**约束反力**。在外力作用下,物体发生变形,其内部各质点产生位移,同时产生内力。

0.3.1 荷载及其分类

荷载是主动作用于物体上的外力。在实际工程中,构件或结构受到的荷载是多种多样的,如建筑物的楼板传给梁的重量、钢板对轧辊的作用力等。这些重量和作用力统称为加在构件上的荷载。

荷载可以根据不同特征进行分类:

(1) 荷载按其作用在结构上的时间久暂可分为**恒载**和**活载**。

恒载是长期作用在构件或结构上的不变荷载,如结构的自重和土压力。

活载是指在施工和建成后使用期间可能作用在结构上的可变荷载,它们的作用位置和范围可能是固定的(如风荷载、雪荷载、会议室的人群重量等),也可能是移动的(如吊车荷载、桥梁上行驶的车辆等)。

(2) 荷载按其作用在结构上的分布情况可分为**分布荷载**和**集中荷载**。

分布荷载是连续分布在结构上的荷载。当分布荷载在结构上均匀分布时,称为**均布荷载**;当沿杆件轴线均匀分布时,则称为**线均布荷载**,常用单位为 N/m 或 kN/m 。

当作用于结构上的分布荷载面积远小于结构的尺寸时,可认为此荷载是作用在结构的一点上,称为**集中荷载**。如火车车轮对钢轨的压力,屋架传给砖墙或柱子的压力等,都可认为是集中荷载,常用单位为 N 或 kN 。

(3) 荷载按其作用在结构上的性质可分为**静力荷载**和**动力荷载**。

静力荷载是指从零开始缓慢、平稳地增加到终值后保持不变的荷载。

动力荷载是指大小、位置、方向随时间迅速变化的荷载。在动力荷载下,构件或结构产生显著的加速度,故必须考虑惯性力的影响。如动力机械产生的振动荷载、风荷载、地震作用产生的随机荷载等。

0.3.2 两种均布荷载的简化

工程结构计算中,通常需要将梁、板等构件所受的荷载简化以方便计算。荷载的简化是一个重要的问题,下面通过讨论两个简单的问题来说明荷载的简化。

1. 等截面梁自重(体积力)的简化

假设一矩形截面梁如图 0.3.1 所示,其截面宽度为 $b(\text{m})$,截面高度为 $h(\text{m})$,长度为 $l(\text{m})$ 。设该梁的单位体积重量(重度)为 $\gamma(\text{kN/m}^3)$,则此梁的总重为

$$W = bhl\gamma \quad (\text{kN})$$

若梁的自重沿梁跨度方向是均匀分布的,则沿梁轴单位长度,即每米的自重 q 为

$$q = W/l = bh\gamma \quad (\text{kN/m})$$

q 值就是梁自重简化为沿梁轴方向的均布线荷载值。线荷载 q 也称线荷载集度,表示单位长度内有多大的力作用。

2. 均布面荷载化为均布线荷载

图 0.3.2 中的平板,板宽为 $b(\text{m})$,板跨度为 $l(\text{m})$,若在板上受到均匀分布的面荷载 $q'(\text{kN/m}^2)$ 的作用,那么,在这块板上受到的全部荷载 F 为

$$F = q'bl \quad (\text{kN})$$

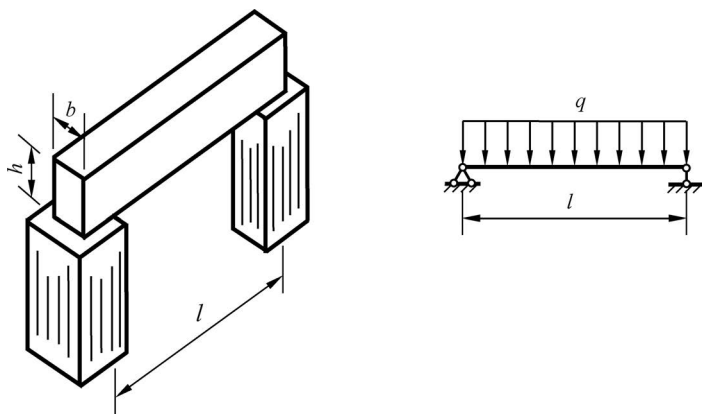


图 0.3.1 梁自重荷载的简化

而荷载 F 是沿板的跨度均匀分布的, 于是, 沿板长度方向均匀分布的线荷载 q 大小为

$$q = q' b \quad (\text{kN/m})$$

可见, 均布面荷载简化为均布线荷载时, 均布线荷载的大小等于均布面荷载的大小乘以受荷宽度。

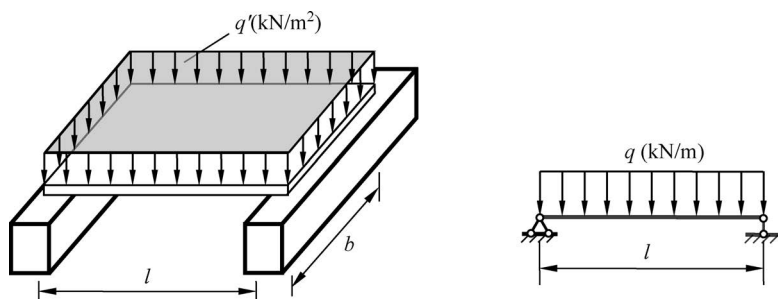


图 0.3.2 作用在平板上的均布荷载的简化

图 0.3.3 所示为某楼面的结构示意图。平板支承在大梁上, 跨度为 l_1 ; 梁支承在柱上, 跨度为 l_2 。当平板上受到均布面荷载 q' (kN/m^2) (图中未画出) 时, 梁 AB 沿其轴线方向受到板传来的均布线荷载 q (kN/m) 怎样计算呢? 由于梁的间距为 l_1 , 跨度为 l_2 , 所以梁 AB 的受荷范围是图 0.3.3 中阴影线所占的面积, 即梁的受荷宽度为 l_1 。于是, 很容易就能算出梁 AB 受到板传来的均布线荷载值为

$$q = l_1 q' \quad (\text{kN/m})$$

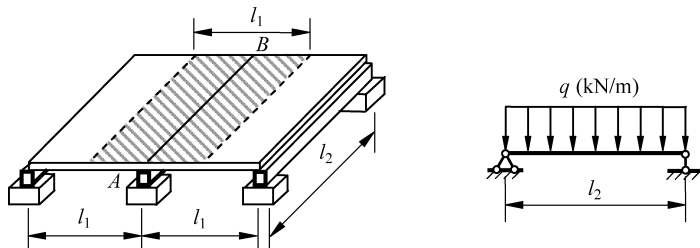


图 0.3.3 梁、板荷载的传递计算

均布荷载是工程中常见的荷载类型,另外还有非均布的荷载及其简化等问题,将在后续章节详述。

0.4 杆件的基本变形

如前所述,结构可以视为很多构件或杆件按照一定的方式组装而成,故结构的变形也可以视为各个构件或杆件变形后依据变形协调后形成。在各种不同形式的外力作用下,杆件的变形形式各不相同。而复杂的变形可以分解为几种基本变形形式的组合。杆件的基本变形形式有下面 4 种。

1. 轴向拉伸与压缩

在一对大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的外力作用下,杆件的长度发生伸长或缩短,这种变形称为**轴向拉伸与轴向压缩**,如图 0.4.1(a)、(b)所示。拉压杆件常常直接称为**杆**,有时将在竖直方向承受压缩荷载的杆件也称为**柱**。

2. 剪切

在一对大小相等、方向相反、作用线相距很近且垂直于杆件轴线的外力作用下,杆件的横截面沿外力作用方向发生错动,这种变形称为**剪切变形**,如图 0.4.1(c)所示。机械及土木结构中常见的联结件,如铆钉、螺栓等受力时常发生剪切变形。

3. 扭转

在一对大小相等、转向相反、位于垂直于杆轴线的两平面内的力矩作用下,杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动,这种变形称为**扭转变形**,如图 0.4.1(d)所示。机械工程中的传动轴等的变形即是扭转变形。通常将以扭转为主要变形形式的杆件称为**轴**。

4. 弯曲

在一对大小相等、转向相反、位于杆件纵向平面内的力偶作用下,杆件的轴线由直线变为曲线,这种变形称为**弯曲变形**,如图 0.4.1(e)所示。通常将以弯曲为主要变形形式的杆件称为**梁**。

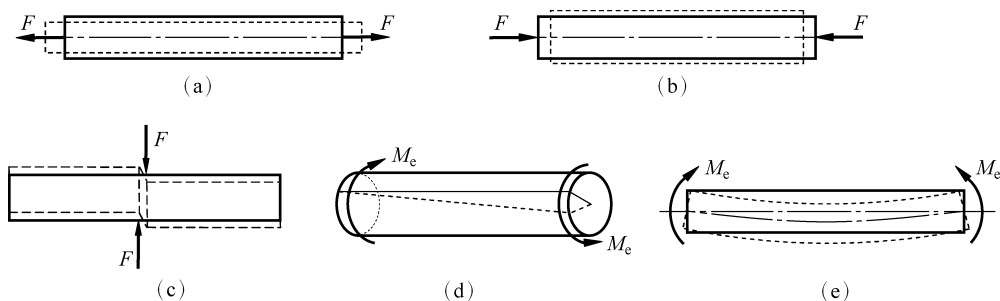
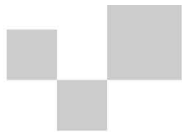


图 0.4.1 杆件的基本变形

受弯杆件是工程中最常见的构件之一。吊车梁、火车轮轴等的变形都是弯曲变形。

实际工程中,还有一些杆件可能同时具有多种基本变形形式,这种复杂的变形形式常见的有拉伸与弯曲的组合变形、弯曲与扭转的组合变形等。这种基本变形的组合称为**组合变形**。杆件组合变形的分析是建立在杆件基本变形分析结论的基础上的。



第1章

静力学的基础知识

1.1 力及力系

1.1.1 力

1. 力的概念

力是物体间相互的机械作用,它使物体的机械运动状态发生改变和使物体产生变形。前者称为力的**运动效应**或**外效应**,后者称为力的**变形效应**或**内效应**。刚体静力学只限于研究刚体,不考虑物体的变形,只涉及力的外效应,而力的内效应将在后续各章变形体力学中研究。

力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点。这三者称为力的**三要素**。力的大小表示物体相互间机械作用的强弱程度。在国际单位制中,以 N(牛顿,牛)或 kN(千牛)等作为力的单位。力的方向表示物体间的相互机械作用具有方向性,它包含力的作用线在空间的方位和力沿其作用线的指向两个因素。力的作用点是抽象化的物体间相互机械作用位置。实际上物体相互作用的位置并不是一个点,而是物体的一部分面积或体积。如果这个作用面积或体积与物体的几何尺寸相比很小,可以忽略不计,则可将其抽象为一个点,称为力的作用点,作用于该点的力则称为**集中力**;反之,当力的作用面积或体积不能忽略时,则称该力为**分布力**,如重力、水压力等。分布力可视为在作用区域内无穷多个微小集中力的集合。

由力的三要素可知,力是矢量,而且是**定位矢量**(即该矢量的作用效果与作用点的位置有关)。在力学分析中,力矢量一般用有向线段和字符两种方式表达。如图 1.1.1 所示,有向线段的长度 $\overline{AB}$ 按一定比例尺表示力的大小,线段的方位和箭头的指向表示力的方向,线段的起点 A 或终点 B 表示力的作用点。线段所在的直线称为力的作用线(如图中虚线所示)。通常用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示力矢量,用字母 F 表示力的大小。

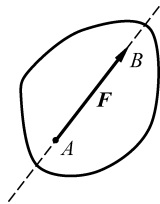


图 1.1.1 力的表示

2. 力的投影计算

在直角坐标系中,已知力 $\mathbf{F}$ 与 x 轴、 y 轴的夹角分别为 α 、 β ,如图 1.1.2(a)所示,则 $\mathbf{F}$ 在直角坐标轴 x 、 y 上的投影分别为

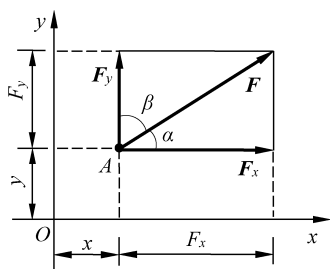
$$F_x = F \cos \alpha, \quad F_y = F \cos \beta \quad (1.1.1)$$

力在一个轴上的投影是代数量。

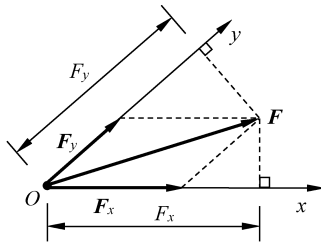
若力 F 在平面内两正交轴上的投影 F_x 和 F_y 已知, 则力 F 的大小和方向余弦分别为

$$\begin{cases} F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \cos \alpha = \frac{F_x}{F}, \cos \beta = \frac{F_y}{F} \end{cases} \quad (1.1.2)$$

一般而言, 若坐标系不是直角坐标系, 则上述公式不成立。



(a) 力的投影



(b) 力的分力

图 1.1.2 力的投影及分力

【说明】 ①力的投影和分力是两个不同的概念: 力在一个轴上的投影是代数量, 如图 1.1.2(a)所示, 它只有大小和正负; 而力的分量是矢量, 不仅有大小和方向, 还有作用点, 二者不可混淆。②当 x 、 y 轴不垂直时, 力沿两轴的分力 F_x 和 F_y 在数值上并不等于力在两轴上的投影 F_x 、 F_y , 如图 1.1.2(b)所示。③计算力在一个轴上的投影的方法需要熟练掌握, 以便今后能快速建立力的投影的平衡方程。

1.1.2 力系

力系是一组力的总称。为了深入分析和讨论力系, 常将力系按照力的作用线分布情况进行分类。

如果力系中所有力的作用线在同一平面内, 则这种力系称为平面力系。平面力系又分为:

- (1) **平面汇交力系:** 所有力的作用线都在同一平面内且作用线汇交于一点的力系。
- (2) **平面平行力系:** 作用于同一平面内、力的作用线相互平行的力系。
- (3) **平面一般力系:** 各力作用线位于同一平面内, 但既不是汇交力系, 也不是平面平行力系, 又称平面任意力系。

若力系中所有力的作用线不全在同一平面内, 则这种力系称为空间力系。与平面力系一样, 也可以把空间力系分为空间汇交力系、空间力偶系、空间一般(任意)力系。

按照作用效果来说, 若某两个力系分别作用于同一物体上, 其效应相同, 则这两个力系称为等效力系。力系 $\{F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1m}\}$ 与 $\{F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2n}\}$ 等效可记为 $\{F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1m}\} \Leftrightarrow \{F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2n}\}$ 。等效力系的一个重要性质就是具有可传性(见文献[17])。若某力系作用在一物体上, 并且该物体处于平衡状态, 则该力系称为平衡力系。