

根据本课程在土木工程、交通工程、水利工程等学科本科教育中的作用及特点,本书将以狭义结构力学为主,适当涉及一些广义结构力学的内容,也即主要讨论杆系结构力学的内容。

0.1.2 课程所涉及的内容

当今结构力学的研究内容包括以下三方面:

(1) **分析** 在已知结构和荷载(也称已知系统和作用)的前提下,根据强度、刚度和稳定性等方面的要求,通过分析计算,使所设计的结构既经济合理,又安全可靠。强度、刚度和稳定性分析属于结构力学的经典内容。

(2) **识别** 一些问题往往需要在已知系统反应(response)和结构信息的前提下,确定外界作用,这样的问题称为**荷载识别**(load identification);还有一些问题是在已知系统反应和荷载信息的前提下,确定结构信息,这样的问题称为**系统识别**(system identification)。这两类问题统称为反问题。

(3) **控制** 控制理论和控制在结构工程中的应用直到 20 世纪 70 年代才被提出。它是人们在抵御外界作用方面往智能化结构方向迈出的可喜一步,因此立即引起广大学者和工程技术人员的关注,从而得到了迅速发展。这是结构工程领域的前沿课题之一。

本书将以最基本的“分析”为主,介绍结构在实际工程常见各种可能的外界作用下的受力、变形和稳定性分析的基本概念、基本原理和基本方法。

0.1.3 结构力学与其他课程和结构设计的关系

理论力学、材料力学、高等数学和计算机基础知识都是结构力学的基础,特别是理论力学中关于力系的平衡、约束的性质、质点系及刚体虚位移原理、运动及动力分析;材料力学中的内力分析、强度、刚度和稳定性分析等重要内容,不仅是结构力学的基础,而且在结构力学中将得到扩展和延伸。因此,读者学习本课程时应当与理论力学和材料力学贯通起来,形成总体概念。

与理论力学和材料力学相比,结构力学与工程结构联系更为紧密,其基本概念、基本理论和基本方法将作为钢筋混凝土结构、钢结构、地基基础和结构抗震设计等工程结构课程的基础;结构力学的分析结果又是各类结构的设计依据。当前的计算机辅助设计软件,其核心计算部分的基本理论和方法也都以结构力学作为基础。

0.2 一些工程结构实例与计算简图

图 0-2~图 0-8 所表示的高层建筑、大型水利工程、桥梁结构、大跨结构、高耸结构、核电站结构和体育馆建筑等,都是工程结构的具体例子。



图 0-2 上海金茂大厦

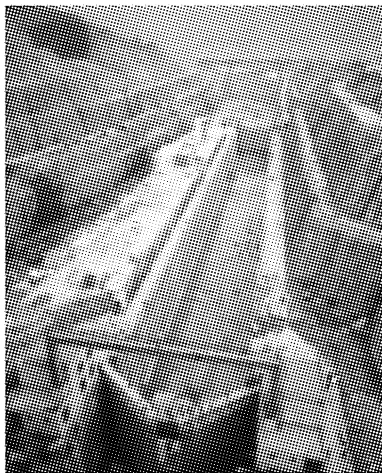


图 0-3 施工中的长江三峡五级船闸

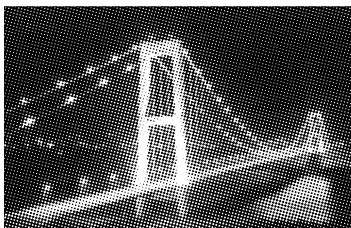


图 0-4 长江西陵大桥

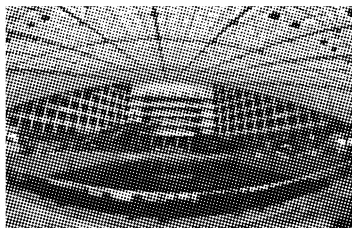


图 0-5 哈尔滨梦幻乐园网架屋盖

实际工程结构是很复杂的,必须进行简化,否则分析计算将十分困难。将实际结构进行简化的过程,称为**力学建模**(mechanics modeling),简化后可以用于分析计算的模型,称为**结构计算简图**(structural computer diagram)。

确定计算简图的一般原则是:

- (1) 尽可能简单——忽略次要因素,尽量使分析过程简单。
- (2) 尽可能符合实际——计算简图应尽可能反映实际结构的主要受力、变形等特性。

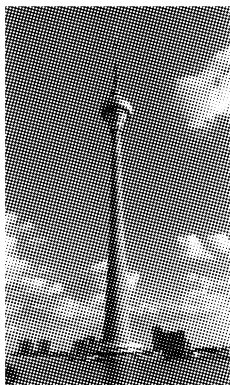


图 0-6 天津电视塔

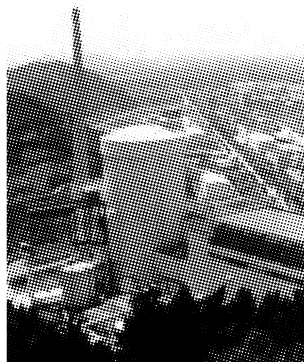


图 0-7 秦山核电站安全壳

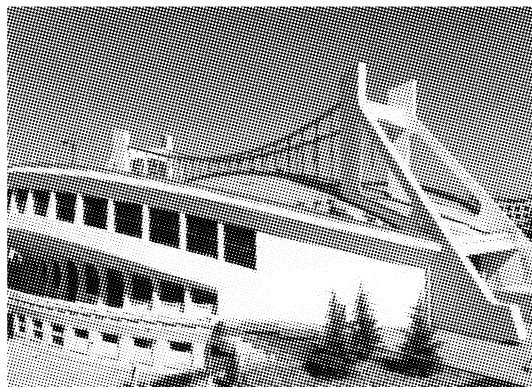


图 0-8 北京朝阳门体育馆

对实际结构进行简化可从体系、构件、构件间的联结(结点)、支座以及荷载等方面进行。简化时需要用力学知识、结构知识和工程实践经验,对实际结构的受力和变形等方面进行科学的抽象和提炼。理论力学中已经引入了支座和结点的计算简图,现归纳、补充如下:

支座是将结构和基础联系起来的装置。其作用是将结构固定在基础上,并将结构上的荷载传递到基础和地基。支座对结构的约束力称为**支座反力**(reactions at support),支座反力总是沿着它所限制的位移方向。

本书中所用的支座计算简图及相应的支座反力有以下几种形式(图 0-9 所示):

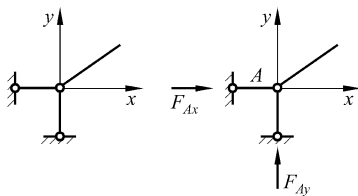
(1) **固定铰支座**: 限制各方向线位移,但不限制转动。其反力可用沿坐

标的分量表示,如图 0-9(a)、(b)所示。

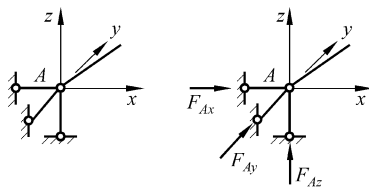
(2) **可动铰支座**: 限制某一方向线位移,但不限制转动。其反力沿所限制的位移方向,如图 0-9(c)所示。

(3) **固定端(固定支座)**: 限制全部位移(移动和转动),其反力用沿坐标的分量和力偶来表示,如图 0-9(d)、(e)所示。

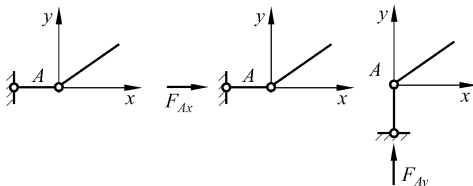
(4) **定向支座**: 限制某些方向的线位移和转动,而允许某一方向产生线位移,其反力除所限制线位移方向力外,还有支座反力偶,如图 0-9(f)所示。在结构分析中,由于利用对称性往往出现这种支座。



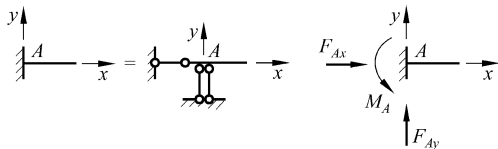
(a) 平面固定铰支座及反力



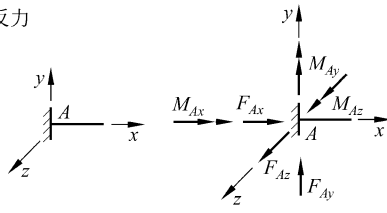
(b) 空间固定铰支座及反力



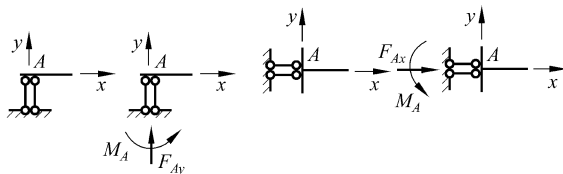
(c) 可动铰支座及反力



(d) 平面固定端支座及反力



(e) 空间固定端及反力



(f) 定向支座及反力

图 0-9 支座计算简图、所约束的位移和反力

对于杆系结构,杆件简化为其截面形心轴线。杆件(轴线)的交汇点称为**结点**(joint 或 node)。由于连接情况不同,结点可分为铰结点、刚结点和组合结点,其简图如图 0-10 所示。

(1) **铰结点** 各杆件在此点互不分离,但可以相对转动,因此相互间作用为力,如图 0-10(a)所示。

(2) **刚结点** 各杆件在此点既不能相对移动,也不能相对转动(保持夹角不变),因此相互间作用除力以外还有力偶,如图 0-10(b)所示。

(3) **组合结点** 各杆件在此点不能相对移动,部分杆件之间属铰结点,另部分杆件之间属刚结点,如图 0-10(c)所示。

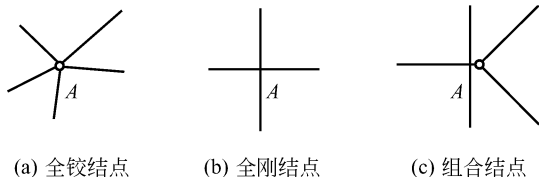


图 0-10 全铰、全刚和组合结点计算简图

关于各类结构的计算简图,将在后面有关章节中讨论。

0.3 学习建议

初学结构力学一般都会感觉结构力学一听就懂,一做题却又不知所措,因此认为结构力学是三门力学中最难学的一门课程。

产生这种感觉的原因可能有如下几方面:

(1) 实际上理论力学和材料力学已经为结构力学几乎提供了全部的基本原理和方法,因此一听感觉这都是熟悉的,当然就好懂。但是,结构力学中各章的联系特别紧密,如果有一章达不到熟练掌握的程度,势必导致后面章节的学习困难。特别是第 2 章静定结构受力分析,它实际只用到平衡条件(列平衡方程)、截面法和平衡微分关系等,这些都是理论力学和材料力学应该掌握的知识,好像没有什么新知识。可是如果浅尝辄止,达不到熟练掌握的程度,第 3 章静定结构位移计算的学习就将产生困难,从而恶性循环,也就越学越难了。

(2) 和其他课程一样,结构力学必须做一定量的习题,通过做习题体会和加深理解所学原理、方法。由于结构力学一题可有多种解法,灵活程度较大,不同的解法工作量相差可能很大,这需要经过边练习边总结去积累经验,不做

一定的练习和总结是达不到深刻理解和掌握的。可初学者往往由于种种原因,忽略了练习,或只是盲目做题、对答案,不思索、不总结,结果自然达不到熟练和灵活自如。长此以往,理当越学越难。

(3) 如果理论力学和材料力学的基础不是很好,加上学完后又有遗忘,开始学结构力学又不及及时弥补,第2章又没有做到熟练掌握,也会感觉结构力学比较难学。实际上不是结构力学难,是因基础不牢固而误认为结构力学最难学。

为此,除主教材外,本套教材还出版了学生学习用书——《结构力学学习指导》,为不同接受能力的读者准备了“思考题参考答案”、“附加例题”、“练习和测试系统”等辅助材料,以供读者结合自身情况选学。

学习建议:

(1) 在自行思考的基础上,参看思考题答案以加深对基本概念的理解和拓展思路。

(2) 根据自己的情况,多看一些例子,从中总结解题经验。

(3) 自行做一定量的练习,而且边做边总结经验。

(4) 每学完一章,用练习和测试系统做一些练习,进一步积累经验,测试当前自己的掌握程度,及时消除“隐患”。

只要按上述建议付出了努力,不管基础如何,读者会觉得结构力学实际是三门力学课程中最好学的,而且还是能弥补基础之不足的课程。

体系的几何组成分析

用各种结点将杆件连接起来所组成的体系称为**杆件体系**，这样的体系不一定能在任意荷载下都保证不发生几何形状与位置变化，只有不发生几何形状与位置变化的体系才能作为常规的工程结构使用。结构的几何组成方式不同还将影响其力学性能和分析方法。因此，在分析结构的受力、变形等之前，必须首先了解常规结构的几何组成方式。

实际结构中的构件在外界因素作用下都是要变形的，但是因为变形都很微小，做体系的几何组成分析时可以忽略其变形，因而所有构件在本章将均视为**刚体**(rigid body)。

1.1 基本概念

1.1.1 几何不变体系与几何可变体系

在忽略杆件微小变形的前提下，几何形状及位置都不能发生变化的杆件体系称为**几何不变体系**(geometrically stable system)，如图 1-1(a) 所示。而几何形状或位置都有可能发生变化的体系则称为**几何可变体系**(geometrically unstable system)，如图 1-1(b)、(c)、(d) 所示。

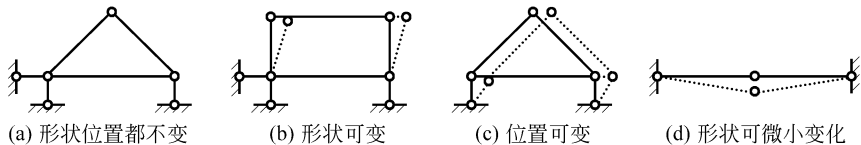


图 1-1 杆件体系

几何可变体系又可分为**常变体系**(frequentation unstable system)和**瞬变体系**(instantaneous unstable system)。如图 1-1(b)、(c)所示体系从机械运动角度看，均属“四连杆机构”，可以发生有限的位移，称为常变体系；图 1-1(d)

所示体系,杆件处在水平位置时有运动趋势,但在发生微小位移后又不能继续运动,称为瞬变体系。

只有几何不变体系才能作为常规的工程结构。几何可变体系只能在特定荷载下保持平衡,在一般荷载作用下均将发生运动,因此几何可变体系不能作为常规的工程结构。

1.1.2 自由度

自由度(degree of freedom)是指确定体系位置所需的独立坐标数,或者体系运动时可以独立改变的几何参数的数目。体系的自由度通常记作 n 。

根据上述定义,图 1-2 所示的平面上一个自由点 A ,其独立的坐标数为 2,因此,其自由度为 $n=2$;一个平面自由刚体 AB 的独立坐标数为 3(A 点的两个坐标和一个转角),因此,其自由度为 $n=3$ 。

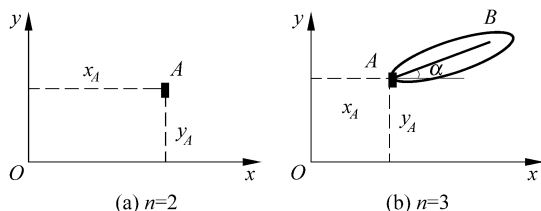


图 1-2 自由点与自由刚体的自由度

1.1.3 刚片和约束

刚片(plane rigid body) 几何形状不变的平面物体称为刚片。刚片可以是杆、由杆组成的结构或支撑结构的地基,如图 1-3(a)所示。需要指出的是:图 1-3(b)所示的刚片 II 与图 1-3(a)中的刚片 II 比较,二者的可变性及与其他部分的连接方式相同,但形状和组成不同。作体系几何组成分析时,二者可以等价替换而不影响结果。

约束 凡能减少体系自由度的装置称为**约束**(constraint)(也称为**联系**)。能减少 s 个自由度的装置就称为有 s 个约束或 s 个联系。

组成体系的各杆件之间、体系与基础之间都需要通过结点、支座相互联系起来,这些都是约束。

常见的约束有:

(1) **单铰**(simple hinge)仅连接两个刚片(或杆件,因为杆件也是刚片)的铰链称为单铰,如图 1-4(a)所示。若图中的单铰 A 不存在,两个刚片有 6 个

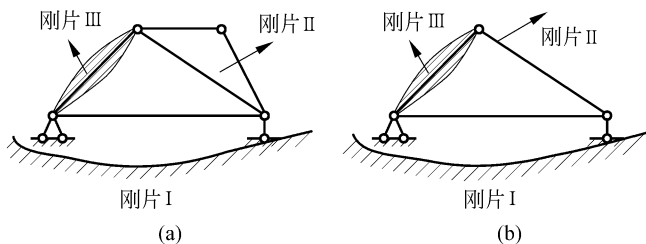


图 1-3 刚片

自由度；加铰后，确定体系位置只需 4 个坐标，比如： x_A 、 y_A 、 φ_1 、 φ_2 ，即这个单铰能减少两个自由度。因此一个单铰相当于两个约束。

(2) 链杆 (connection link) 两端用铰与其他体系相连的杆件。实际中，常把在两点用铰与其他体系相连的无多余约束刚片简化成连接两个铰的链杆。

图 1-4(b) 中之 12 杆即为链杆。如图 1-4(b) 所示分析，它只能减少一个自由度，故一根链杆为一个约束。在几何组成分析时往往将大地视为刚片，体系与大地相连的每一支座杆即为链杆。

(3) 单刚结点 (simple rigid joint) 仅连接两个刚片的刚结点，图 1-4(c) 所示之 B 处即为单刚结点。它能减少三个自由度，所以单刚结点有三个约束。任一杆段均可视为由两段刚结而成，因而杆中任意截面处均可视为有三个约束。

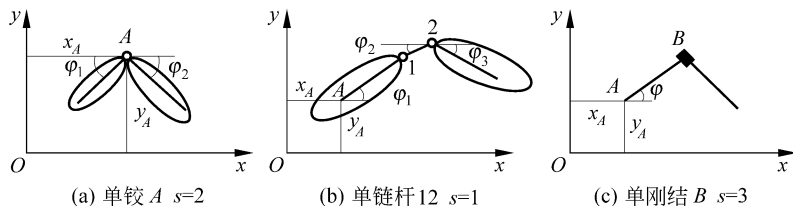


图 1-4 约束

单铰、链杆和单刚结点从运动的可能性或从所提供的约束方面考虑，可以如图 1-5 和图 1-6 所示互相代替，也即双向箭头 ($\leftrightarrow$) 所表示的是相互可以替换的。例如图 1-5(a) 相交两链杆等价于一个单铰；图 1-6 所示的单刚结点等价于不全平行、不交于一点的三根链杆或一个单铰和一根链杆等。图 1-5(c) 所示的延长线相交的两根链杆使得他们所连接的刚片在当前位置只能发生绕 O 点的转动，其作用相当于在 O 点的一个单铰，称其为虚铰 (virtual hinge)。

相对于虚铰,图 1-5(a)所示单铰称为**实铰**(real hinge)。但是虚铰和实铰也是有区别的,实铰的转动中心是固定的,虚铰的转动中心不一定是固定的,因此虚铰也称为瞬铰,只是瞬间相当于在此处有铰的作用。

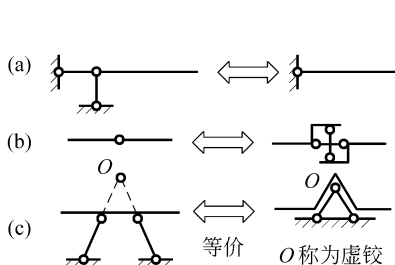


图 1-5 铰与链杆的关系

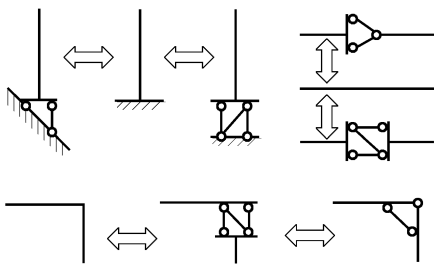


图 1-6 刚结与链杆的关系

1.1.4 必要约束、多余约束

根据对自由度的影响,体系中的约束可分为两类:

(1) 除去该约束后,体系的自由度将增加,这类约束称为**必要约束**

(necessary constraint),如图 1-7(a)中体系除去 A 支座水平链杆后,原来的体系变为图 1-7(c)所示的可变体系,因此支座水平链杆 A 是必要约束。

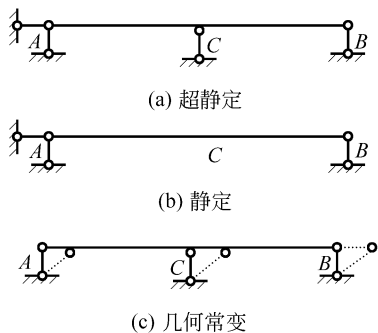


图 1-7 多余约束和必要约束

(2) 除去该约束后,体系的自由度不变,这类约束称为**多余约束**(superfluous constraint),如图 1-7(a)中的体系,除去竖向链杆 C 后,变成图 1-7(b)所示体系,自由度不变,因此链杆 C 是多余约束。

在有多余约束的体系中,哪些约束是多余约束并不惟一。例如在图 1-7(a)所示之体系中,若将 B、C 链杆看作必要的,则 A 支座竖向链杆是多余的;若将 A 处竖向链杆与 B 链杆看成必要的,则 C 链杆就是多余的。

若一个几何不变体系中无多余约束,则称其为**无多余约束几何不变体系**。反之称为**有多余约束几何不变体系**。

1.1.5 静定结构、超静定结构

几何不变体系在荷载作用下可维持平衡,从而可作常规结构用。当仅由静力平衡方程即可确定全部约束力和内力时,称为**静定结构**(statically