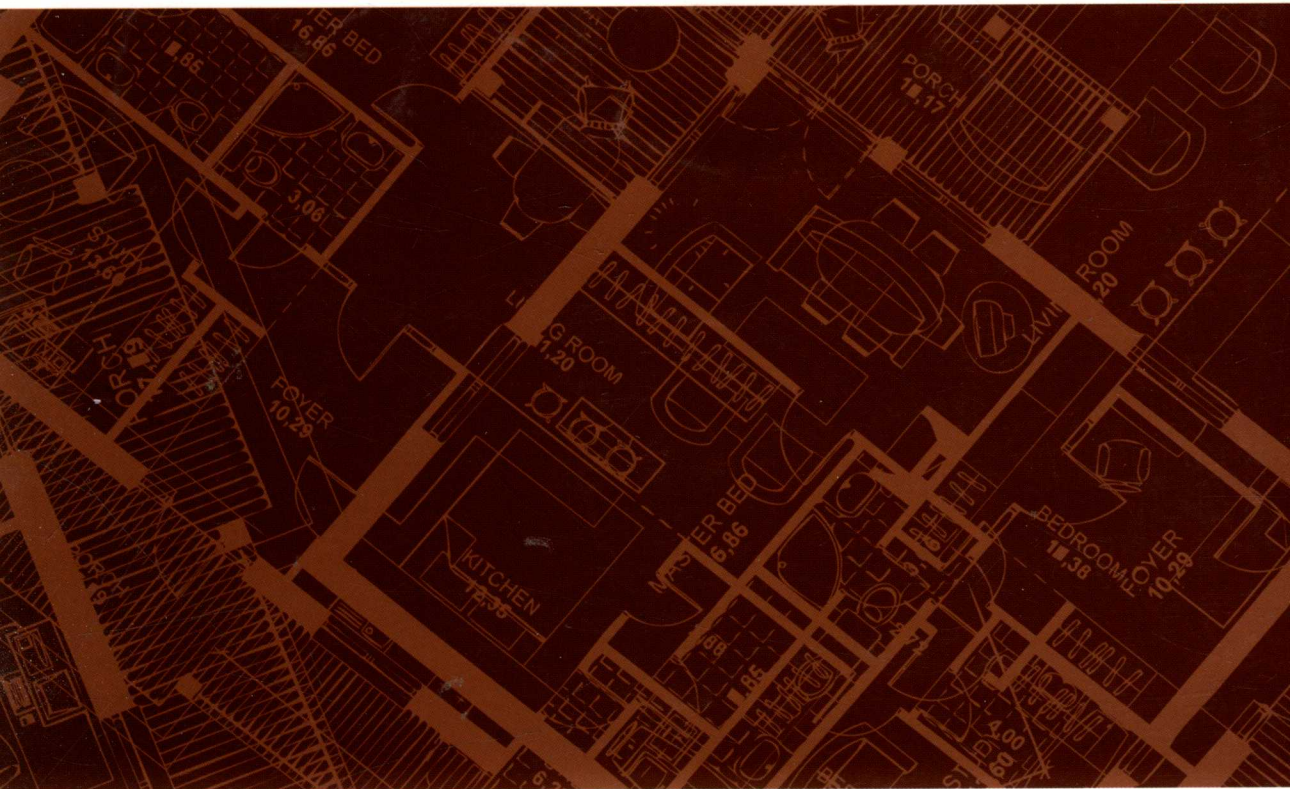


高等学校省级规划教材



结构力学

主 编 ■ 王建国



合肥工业大学出版社

高等学校省级规划教材
卓越工程师教育培养计划土木类系列教材

结 构 力 学

主 编 王建国

副主编 方诗圣 关 群

何沛祥 张鸣祥 陈 涛

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/王建国主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5650-2323-1

I. ①结… II. ①王… III. ①结构力学 IV. ①0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 161747 号

结 构 力 学

王建国 主编

责任编辑 陆向军 魏亮瑜

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2015 年 8 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2015 年 8 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
电 话	综合编辑部:0551-62903028 市场营销部:0551-62903198	印 张	24.25
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	586 千字
E-mail	hfutpress@163.com	印 刷	合肥星光印务有限责任公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-2323-1

定价:45.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

前 言

工程结构分析理论是一门基础科学。这门科学的理论和方法被广泛应用于不同的工程领域,如土木工程、船舶建造、飞机、空间结构等。结构力学是工程结构分析理论的一个分支学科,它是主要研究工程结构受力和传力规律的学科,讲述各种类型结构经典的分析方法。结构力学是一门古老的学科,又是一门迅速发展的学科。新的计算技术、新型工程材料和新型工程结构的大量出现,为结构力学提供了新的研究内容并提出新的要求。

现代工程结构分析软件能够分析任何不同类型的复杂结构和模拟不同的计算工况。如果使用工程结构分析计算机软件工程师不具有足够的结构分析的基础理论知识,没有掌握不同结构在外荷载作用下的内力和变形特征,他就不能精确评估和解释由计算机获得的数值结果。

只有掌握了结构分析基础理论知识的工程师才能对计算机获得的数值结果进行严谨的科学分析和有效的理论概括,预测结构的行为和参数变化的结果,才能设计满足一定的要求结构。无论结构模型多复杂、数值算法多有效,采用多强大的计算机来实现这些算法,只有对结构分析模型和计算理论有深刻认识 and 理解的工程师,才能对计算机获得的结果进行定性分析。

在一个计算机化的世界里,我们面临着一个严重的教学方法的困境。实际上,一直存在两个主要的教学模式的讨论:一种途径是先教会学生掌握坚实的、传统的结构分析的理论基础知识,然后介绍工程结构分析计算机软件;另一种途径是先学习工程结构分析计算机软件,然后再简单地介绍经典的分析方法。

本教材采用的教学模式如下:第一步,学习必要的分析方法,采用手算的方法对不同结构进行详细分析,掌握各种经典的结构分析理论和方法;第二步,学习工程结构分析的计算机方法。本教材提供了结构分析的概念和基本理论、经典分析方法及其应用、不同分析方法的比较。在许多情况下,相同的结构是由不同的方法进行分析,它可以对不同的方法进行分析比较,研究不同方法的优点和缺点。本教材的目的是帮助读者掌握结构分析的思路和方法,评估和解释获得的数值结果。

结构力学是土木工程专业必修的一门主要的专业基础课,在基础课和专业课之间起着承上启下的作用。本教材在编写过程中作了以下考虑:

(1)力求选材适当,精选内容,既为应用型土木工程专业教学打好基础,又考虑到因材施教的需要,还编写了一些加深和拓展性的内容,以供选学、提高之用。

(2)教材着重强调学生对结构力学中基本概念和基本原理的理解与思考,遵循由浅入

深、循序渐进的原则,理清学习思路。力求概念准确、论述简明透彻,思路清晰,符合认知规律。

(3)教材编写力求以实际工程结构为背景,深入浅出地讲清结构力学的基本原理和解题思路,以例题加深对分析理论和方法的理解和掌握。对于例题、习题的选择,力求做到有利于训练学生的思维能力、计算能力以及分析实际问题 and 解决实际问题的能力。

本教材编写时,借鉴和参考了相关教材,谨此表示诚挚的感谢。

由于编写时间和编者水平有限,本书的错误和不足之处在所难免,热忱欢迎广大读者批评指正。

编者

2015年8月

主要符号表

A	面积, 振幅
$\mathbf{A}$	振幅向量
c	支座广义位移, 阻尼系数
C	弯矩传递系数
D	侧移刚度
E	弹性模量
E_p	结构总势能
F	集中荷载
F_{AH}, F_{AV}	支座沿水平、竖直方向的反力
F_{Ax}, F_{Ay}	支座沿 x 、 y 方向的反力
F_σ	临界荷载
$\mathbf{F}$	结点荷载向量, 综合结点荷载向量
$\mathbf{F}_D$	直接结点荷载向量
F_D	粘滞阻尼力
$\mathbf{F}_E$	等效结点荷载向量
F_E	欧拉临界荷载, 弹性力
F_H	拱的水平推力, 悬索张力水平分量
F_I	惯性力
F_N	轴力
F_R	支座反力, 力系合力
F_S	剪力
F_T	悬索张力
F_u	极限荷载
F_V	悬索张力竖直分量
$\bar{\mathbf{F}}^e$	局部坐标系下的单元杆端力向量
$\mathbf{F}^e$	整体坐标系下的单元杆端力向量
$\bar{\mathbf{F}}^{Fe}$	局部坐标系下的单元固端力向量
$\mathbf{F}^{Fe}$	整体坐标系下的单元固端力向量
G	切变模量
i	线刚度
I	截面二次矩(惯性矩), 冲量
$\mathbf{I}$	单位矩阵
k	刚度系数
$\bar{\mathbf{k}}^e$	局部坐标系下的单元刚度矩阵
$\mathbf{k}^e$	整体坐标系下的单元刚度矩阵

K	结构刚度矩阵
m	质量
M	力矩, 力偶矩, 弯矩
M	质量矩阵
M_u	极限弯矩
M^F	固端弯矩
q	分布荷载集度
r	单位位移引起的广义反力
R	广义反力
S	劲度系数(转动刚度), 截面静矩, 影响线量值
t	时间
T	周期
T	坐标转换矩阵
u	水平位移
v	竖向位移
V	外力势能
V_e	应变能
W	平面体系自由度, 功, 弯曲截面系数
X	广义未知力
Z	广义未知位移
α	线(膨)胀系数
Δ	广义位移
Δ	结点位移向量
ν	剪力分配系数
δ	单位力引起的广义位移, 阻尼系数
ξ	阻尼比
θ	干扰力频率
μ	力矩分配系数, 动力因数, 长度因数
σ_b	强度极限
σ_s	屈服应力
σ_u	极限应力
φ	角位移, 初相角
Y	振型矩阵
ω	角频率

目 录

主要符号表	(1)
第 1 章 绪论	(1)
§ 1.1 结构力学的研究对象和任务	(1)
§ 1.2 结构的分类	(2)
§ 1.3 结构的计算简图(computing model of structure)	(5)
§ 1.4 荷载的分类	(7)
第 2 章 平面结构的几何组成分析	(8)
§ 2.1 几何组成分析的一些概念	(8)
§ 2.2 几何不变体系的几何组成规则	(12)
§ 2.3 瞬变体系和常变体系	(14)
§ 2.4 几何组成分析示例	(16)
§ 2.5 静定结构和超静定结构	(18)
习题	(19)
第 3 章 静定梁和静定刚架	(21)
§ 3.1 单跨静定梁	(21)
§ 3.2 多跨静定梁	(29)
§ 3.3 静定刚架	(34)
§ 3.4 静定结构的特性	(39)
习题	(41)
第 4 章 三铰拱	(44)
§ 4.1 三铰拱的计算	(45)
§ 4.2 三铰拱的合理拱轴线	(50)
习题	(54)
第 5 章 静定平面桁架	(55)
§ 5.1 概述	(55)
§ 5.2 结点法	(57)
§ 5.3 截面法	(59)
§ 5.4 结点法和截面法的联合运用	(62)
§ 5.5 常见平面桁架的受力特征比较	(64)
§ 5.6 组合结构的计算	(65)

习题	(66)
第 6 章 静定结构的位移计算	(70)
§ 6.1 概述	(70)
§ 6.2 变形体系的虚功原理	(71)
§ 6.3 位移计算的一般公式——单位荷载法	(75)
§ 6.4 荷载作用下的位移计算	(77)
§ 6.5 图乘法	(81)
§ 6.6 温度变化时的位移计算	(87)
§ 6.7 支座移动时的位移计算	(90)
§ 6.8 线弹性变形体的互等定理	(91)
习题	(93)
第 7 章 力法	(98)
§ 7.1 超静定结构的概念和超静定次数的确定	(98)
§ 7.2 力法原理和力法典型方程	(102)
§ 7.3 用力法计算荷载作用下的超静定结构	(107)
§ 7.4 对称性的利用	(119)
§ 7.5 温度变化和支座移动时超静定结构的计算	(126)
§ 7.6 用弹性中心法计算无铰拱	(134)
§ 7.7 两铰拱及系杆拱	(137)
§ 7.8 超静定结构的位移计算和最后内力图的校核	(139)
§ 7.9 超静定结构的特性	(143)
习题	(144)
第 8 章 位移法	(152)
§ 8.1 概述	(152)
§ 8.2 等截面直杆的转角位移方程	(153)
§ 8.3 位移法的基本未知量和基本结构	(159)
§ 8.4 位移法的典型方程	(161)
§ 8.5 位移法的计算步骤及算例	(162)
§ 8.6 位移法与力法的特点分析	(168)
§ 8.7 支座位移引起结构内力计算的位移法	(169)
§ 8.8 对称结构的计算	(172)
习题	(173)
第 9 章 力矩分配法	(179)
§ 9.1 概述	(179)
§ 9.2 力矩分配法的基本原理	(181)

§ 9.3	应用举例	(183)
§ 9.4	无剪力分配法	(187)
§ 9.5	力矩分配法与位移法的联合应用	(191)
§ 9.6	超静定结构总论	(192)
习题		(193)
第 10 章	矩阵位移法	(198)
§ 10.1	概述	(198)
§ 10.2	单元刚度矩阵	(198)
§ 10.3	单元刚度矩阵的坐标变换	(204)
§ 10.4	结构的整体刚度矩阵	(210)
§ 10.5	支承条件的引入	(217)
§ 10.6	非结点荷载的处理	(218)
§ 10.7	矩阵位移法的计算步骤及示例	(220)
§ 10.8	几点补充说明	(230)
习题		(233)
第 11 章	影响线	(236)
§ 11.1	影响线的概念	(236)
§ 11.2	静力法作单跨静定梁的影响线	(237)
§ 11.3	间接荷载作用下的影响线	(242)
§ 11.4	机动法作单跨静定梁的影响线	(243)
§ 11.5	多跨静定梁的影响线	(246)
§ 11.6	桁架的影响线	(249)
§ 11.7	利用影响线的求量值	(252)
§ 11.8	最不利荷载位置	(254)
§ 11.9	简支梁的内力包络图	(260)
§ 11.10	简支梁的绝对最大弯矩	(261)
习题		(263)
第 12 章	结构的极限荷载	(267)
§ 12.1	极限荷载概述	(267)
§ 12.2	极限弯矩、塑性铰和极限状态	(267)
§ 12.3	超静定梁的极限荷载	(270)
§ 12.4	比例加载时判定极限荷载的一般定理和基本方法	(271)
§ 12.5	刚架的极限荷载	(277)
习题		(279)
第 13 章	结构的稳定计算	(285)
§ 13.1	稳定的概念及两类稳定问题	(285)

§ 13.2	用静力法确定临界荷载	(287)
§ 13.3	具有弹性支座等截面压杆的稳定	(291)
§ 13.4	用能量法确定临界荷载	(294)
§ 13.5	组合压杆的临界荷载	(299)
§ 13.6	初参数法	(305)
§ 13.7	连续梁和刚架的稳定性	(309)
	习题	(319)
第 14 章	结构动力学	(322)
§ 14.1	结构动力计算的基本概念	(322)
§ 14.2	单自由度结构的自由振动	(325)
§ 14.3	简谐荷载作用下的单自由度体系受迫振动	(337)
§ 14.4	一般荷载作用下的单自由度体系受迫振动	(344)
§ 14.5	多自由度体系的自由振动	(349)
§ 14.6	多自由度体系主振型的正交性和主振型矩阵	(364)
§ 14.7	多自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	(366)
	习题	(371)
参考文献		(375)

第 1 章 绪 论

§ 1.1 结构力学的研究对象和任务

在土木工程中,建筑材料按照一定的方式组成并能承受或传递荷载起骨架作用的部分称为工程结构(简称结构 Structure)。例如房屋建筑中的梁柱结构、桥梁、隧洞、水坝、挡土墙等,都是工程结构的典型例子。它们承受着由工作装置传来的荷载、结构自重、风力、水压力等荷载的作用。在外荷载的作用下,结构必须能保持其固有的几何形状而不发生破坏或产生超过某一容许范围的大变形——结构需要满足强度、刚度、稳定性的要求。结构力学的任务是研究结构在外荷载作用下结构的内力和变形,结构的强度、刚度、稳定性、动力反应以及组成规律。研究结构的组成规律,其目的在于保证结构各部分不发生相对的刚体运动,能承受荷载、维持平衡。探讨结构合理的形式是为了有效地利用材料,使其性能得到充分发挥。进行强度和稳定性计算的目的在于保证结构满足安全和经济的要求。计算刚度的目的在于保证结构不因发生过大的变形而影响正常使用。主要研究内容包括以下几个方面:

- (1)结构的组成规律和合理形式,还有结构计算简图的合理选择。
- (2)结构内力和变形的计算方法,进行结构的强度和刚度的验算。
- (3)结构的稳定性。
- (4)结构在动荷载作用下的动力反应。

在结构分析中,首先把实际结构简化为计算模型(或称为计算简图),然后根据计算简图进行分析计算。结构分析中的计算方法是多种多样的,但所有方法都要考虑下列三个方面的条件:

- (1)力系的平衡条件。
- (2)变形几何连续性条件。
- (3)应力与应变之间的物理关系(或称为本构方程)。

结构力学是一门技术基础课,它一方面要用到数学、理论力学和材料力学等课程的知识;另一方面又为学习建筑结构、桥梁、隧道等课程提供必要的基本理论和计算方法。

各力学课程的比较见表 1-1 所列。

表 1-1 各学科的研究对象和研究任务

学 科	研究对象	研究任务
理论力学	质点、刚体	物体机械运动的一般规律
材料力学	单根杆件	变形体的强度、刚度 和稳定性
结构力学	杆件结构	
弹性力学	板壳、实体结构	

§1.2 结构的分类

结构按几何形状,可分为以下几类:

(1) 杆系结构(structure of bar system): 构件的横截面尺寸 $\ll$ 长度尺寸(如图 1-1~图 1-4 所示)。

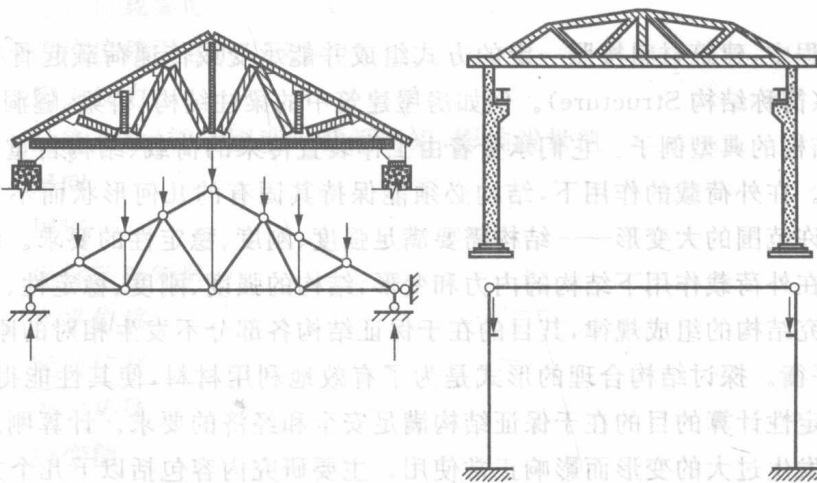


图 1-1 杆系结构



图 1-2 南京长江大桥

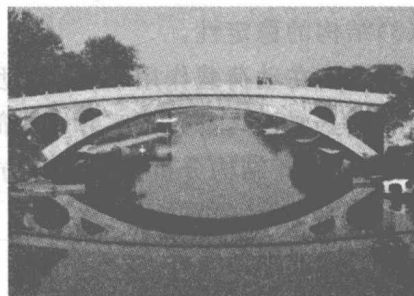


图 1-3 河北赵州桥



图 1-4 英国伦敦的“The Gherkin”

(2)板壳结构(plate and shell structure):构件的厚度 $\ll$ 表面尺寸(如图1-5、图1-6所示)。

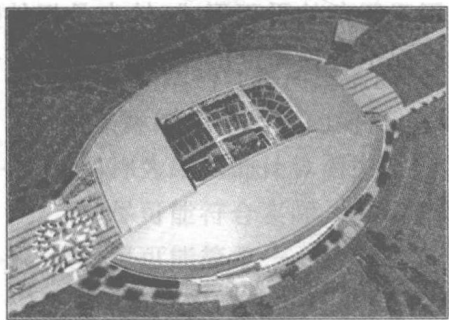


图1-5 得克萨斯体育馆

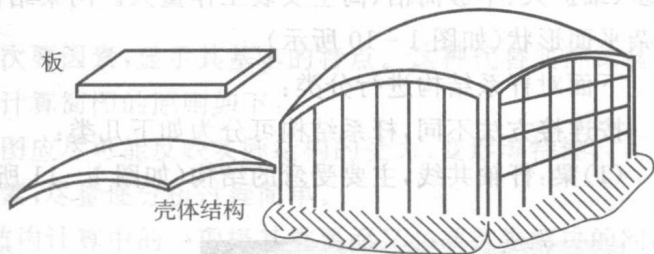


图1-6 壳体结构

(3)实体结构(massive structure):结构的长、宽、高三个方向的尺寸相近(数量级相同),几何特征是呈块状的,并且内部大多为实体,建筑物基础、重力堤坝、码头边坡处修建有挡土墙等(如图1-7所示)。

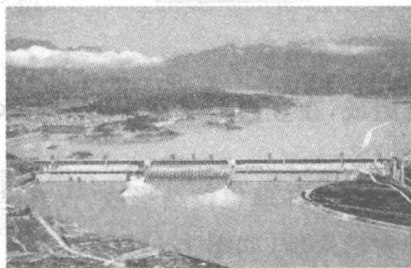
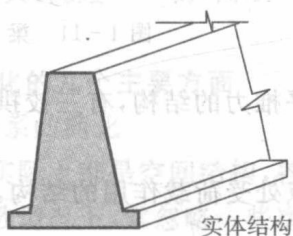


图1-7 三峡大坝

(4)悬吊结构:荷载通过吊索或吊杆传递到固定在筒体或柱上的水平悬吊梁或桁架上,并通过筒体或柱传递给基础的结构体系。悬吊结构的水平荷载也由筒体或柱承受。悬吊结构的造型新颖、建筑功能多样,能充分利用钢材和预应力混凝土的受拉工作性能;但筒体受力较大,对地基基础的要求较高。悬吊结构适用于大跨度的轻型屋盖、大跨度的公路桥、跨越大山谷或大河流的轻便人行索桥、大型体育场建筑的顶盖等(如图1-8、图1-9所示)。

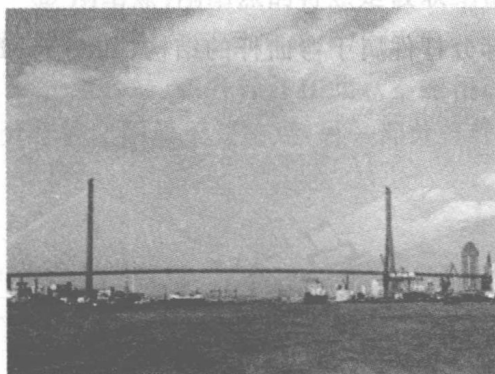


图1-8 上海杨浦大桥



图1-9 江阴长江公路大桥(悬索桥 1385m)

(5)网架结构:网架结构是空间杆系结构,杆件主要承受轴力作用,截面尺寸相对较小。这些空间交汇的杆件又互为支撑,将受力杆件与支撑系统有机结合起来,因而用料经济。网架结构的优点是用钢量小、整体性好、制作安装快捷,可用于复杂的平面形式;缺点是杆件数量多、维护大、不够简洁、高空安装工作量大。网架结构适用于各种跨度的结构,尤其适用于复杂平面形状(如图 1-10 所示)。

下面对杆系结构进行分类:

按连接方法不同,杆系结构可分为如下几类:

(1)梁:杆轴共线,主要受弯的结构(如图 1-11 所示)。

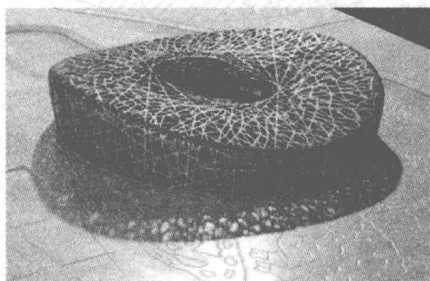


图 1-10 北京鸟巢

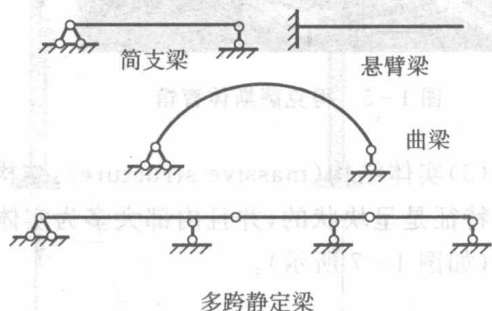


图 1-11 梁

(2)拱:由曲线组成,在竖向荷载作用下产生水平推力的结构,有三铰拱、两铰拱、无铰拱等(如图 1-12 所示)。

(3)桁架:由等截面直杆理想铰结形成,仅在结点处受荷载作用的结构,其各杆仅受轴力作用(二力杆)时称为桁架杆(如图 1-13 所示)。

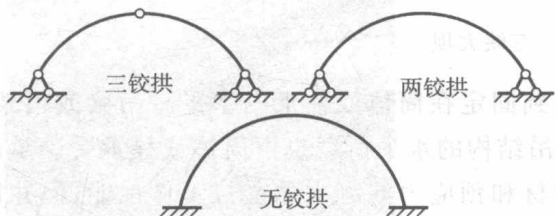


图 1-12 拱

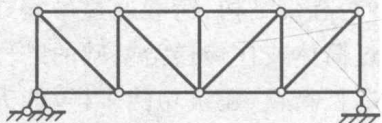


图 1-13 桁架

(4)刚架:由刚性结点连接而成的结构,刚架中的杆件主要承受弯曲变形(如图 1-14 所示)。

(5)组合结构:一部分杆件属于桁架杆;另一部分杆件属于弯曲杆的结构(如图 1-15 所示)。

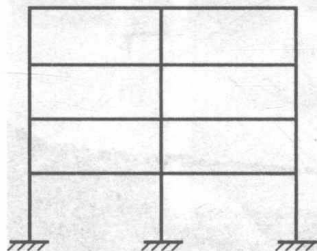


图 1-14 刚架

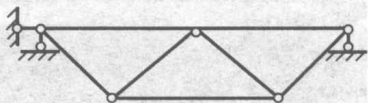


图 1-15 组合结构

§1.3 结构的计算简图(computing model of structure)

1. 选取结构计算简图的原则

将实际结构作适当的简化,忽略次要因素,显示其基本的特点。这种代替实际结构的简化图形,称为结构的计算简图。确定计算简图的原则如下:

(1)尽可能符合实际——计算简图应尽可能反映实际结构的受力、变形等特性。

(2)尽可能简单——忽略次要因素,尽量使分析过程简单。

合理地选取结构的计算简图是结构计算中的一项极其重要而又必须首先解决的问题。

2. 影响计算简图选取的主要因素

(1)结构的重要性:重要结构——精,次要结构——粗;

(2)设计阶段:初步设计——粗,技术设计——精;

(3)计算问题的性质:静力计算——精,动力计算——粗;

(4)计算工具:先进——精,简陋——粗。

3. 结构简化的几个主要方面

(1)结构体系的简化

一般结构实际上都是空间结构,各部分相连成为一个空间整体,以承受各方向可能出现的荷载。在多数情况下,常忽略一些次要的空间约束,将实际结构分解为平面结构。

(2)杆件的简化

杆件用其轴线表示,杆件之间的连接区用结点表示,杆长用结点间距表示,荷载作用于轴线上。

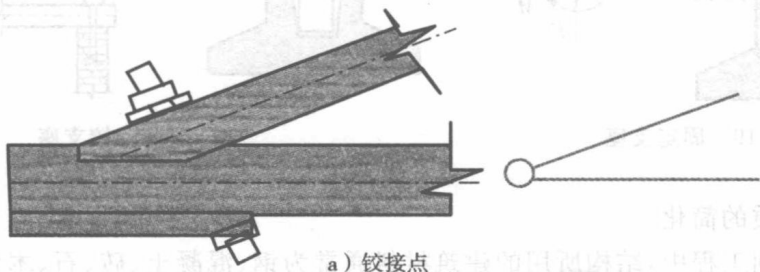
(3)结点

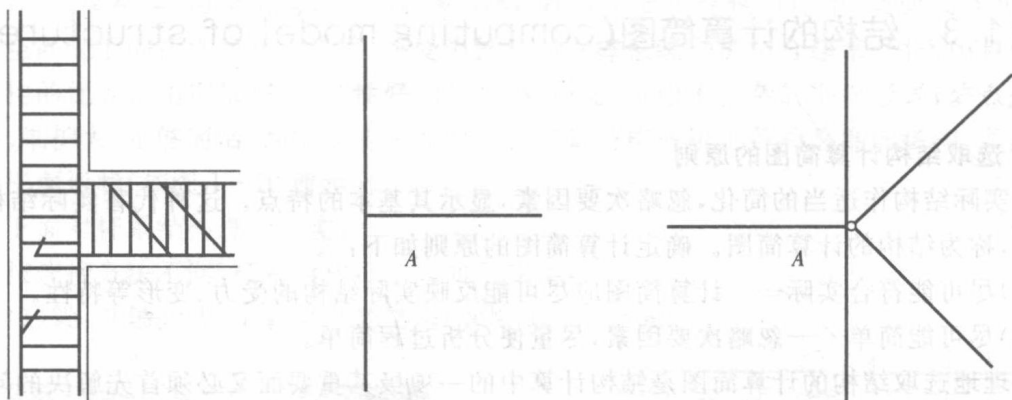
在杆件结构中,几根杆件之间的相互联结区称为结点。根据结构的受力特点和结点的构造情况,在计算中常将杆件间的连接区简化为三种理想情况(如图1-16所示):

① 铰结点:铰结点的特点是被联结的各杆件在联结处不能相对移动,但可以绕结点自由转动,杆件之间的夹角是可以改变的,即可以传递力而不能传递力矩。

② 刚结点:刚结点的特点是被联结的各杆件在联结处不能相对移动,也不能绕结点相对转动,即各杆端转动的角度应相等。刚结点可以传递力,也可以传递力矩。

③ 组合结点:各杆件在此点不能相对移动,部分(但非全部)杆件间还不能相对转动,即部分杆件之间属于铰结点;另一部分杆件之间属于刚结点。





b) 刚结点

c) 组合结点

图 1-16 结点

(4) 支座的简化

① 滚轴支座: 约束杆端不能竖向移动, 但可水平移动和转动, 只有竖向反力 (如图 1-17 所示)。

② 定向支座: 允许杆端沿一定方向自由移动, 而沿其他方向不能移动, 也不能转动 (如图 1-18 所示)。

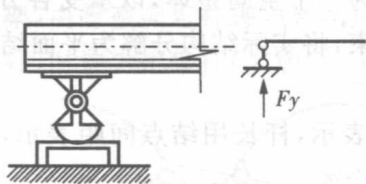


图 1-17 滚轴支座

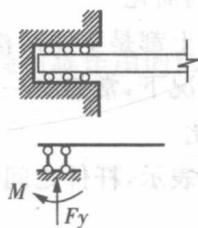


图 1-18 定向支座

③ 固定支座 (fixed support): 约束杆端不能移动, 也不能转动, 有三个反力分量 (如图 1-19 所示)。

④ 铰支座 (hinge support): 约束杆端不能移动, 但可以转动, 有两个互相垂直的反力, 或合成为一个合力 (如图 1-20 所示)。

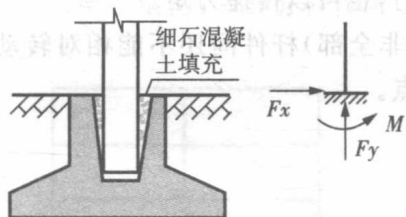


图 1-19 固定支座

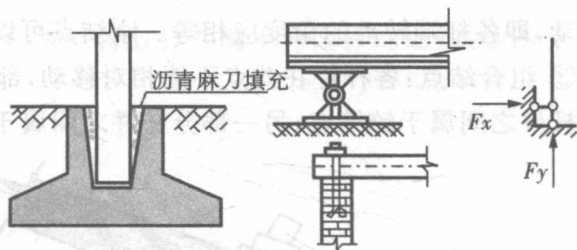


图 1-20 铰支座

(5) 材料性质的简化

在土木、水利工程中, 结构所用的建筑材料通常为钢、混凝土、砖、石、木料等。在结构计