

1 绪 论

1.1 结构分析

在各种工程构造物中用以支撑和传递荷载的骨架部分称为结构。房屋建筑中的梁柱体系，土木工程中的桥梁，各种地下洞室及支挡，以及水利工程中的水坝、闸门等都是结构的典型例子。图 1-1 中的鸟巢以及重庆朝天门大桥都可称之为结构。



图 1-1 典型结构

人类早期的建筑更多的是从大自然中观察模仿和经验积累的产物。随着生产和技术的进步，人们对结构受力的规律，结构的强度、刚度和稳定性的认识不断加深，并从经验和试验中逐步形成了结构力学学科。通过广泛应用于工程建设实践，结构力学不断完善并成为一门指导工程建设的基础性科学。

结构分析是指用工程力学方法对结构进行分析，以检验结构是否满足规范规定的强度、刚度、稳定、尺寸等。结构分析方法与科学技术发展水平有着密切的关系，随着科学计算技术的发展而不断更新。在计算机出现之前，人们多以手算为主，他们将精力集中在如何构造一些巧妙的分析求解方法，既能解决问题，又不过于复杂，由此衍生了很多适用于不同情况的、有特色的求解技巧和方法。这些方法反映了结构力学分析中丰富的学术思想，但也暴露出受到计算手段的限制的缺陷，结构分析缺乏统一的、通用的分析计算方法。计算机出现后，计算手段的限制得到了解放，矩阵代数的方法有了用武之地，人们的注意力开始转向功能强大的计算机方法。

1.2 工程结构分析

步入 21 世纪，人类跨入信息时代，计算机技术无论从硬件还是软件上都在日新月异地发

展，信息化、数字化、网络化渗透在很多学科当中，也为很多学科提供了新的发展机遇。个人计算机的空前普及、计算技术的发展、计算机语言的更新换代，使计算机方法应用于经典结构力学中所有类型的问题，从而可进行精确的数值分析计算。工程结构分析也可称为数值模拟或者仿真计算（Numerical Simulation）。最早的仿真计算是用差分代替微分，将复杂的微分问题转换为代数问题，极大地简化了求解难度。

20 世纪 60 年代，有限元法（Finite Element Method, FEM）建立并取得了巨大的成功。它以经典牛顿力学为基础，为人们提供前所未有的能力：预测和理解复杂系统，模拟复杂的物理现象，利用这些模拟设计复杂的工程系统。它使力学这个古老学科成为对人类文明核心领域产生决定性影响的学科，对科学和技术已经产生了深远的影响。

20 世纪 70 年代，边界元法（Boundary Element method, BEM）建立。边界元法是在有限元法之后发展起来的一种精确高效的工程分析数值方法。与有限元法在连续体内划分单元的基本思想不同，边界元法是只在定义域的边界上划分单元，用满足控制方程的函数去逼近边界条件。边界元法与有限元法相比，具有单元个数少、数据准备简单等优点。另外，有限条法、加权函数法、半解析半数值解法、离散元法、无限元法等计算方法的出现，为工程结构分析提供了更广阔的舞台，可以对更复杂的问题进行求解。从某种意义上说：数值计算解放了力学，使得普通工程师和学者也有机会从事复杂的力学分析。数值计算是工程结构设计、施工、科研与咨询活动中必不可少的手段。数值计算与实验互补，甚至可替代实验无法完成的工作。

1.3 有限元基本理论

有限元法是随着电子计算机的使用而发展起来的一种有效的数值计算方法。结构矩阵分析方法认为，整体结构可以看作是由有限个力学小单元相互连接而组成的集合体，每个小单元可以比作建筑中的砖瓦，通过分析单元获得的力学特性组装起来就提供了整体结构（建筑物）的力学特性。为什么要首先分析力学小单元的特性呢？为什么不能直接分析整体结构？人类的认识能力是有限的，多数情况下不可能一下子就弄清楚很复杂的东西，因此往往把复杂系统分解成形态较简单的单个元件（单元），通过研究其形态，再将这些元件重构为原系统得到整体形态。这是工程技术人员和科学家经常采用的分析问题的方法。

有限元法即表现出这种分析方法的特征。将一个物体划分成由多个单元（有限单元）组成的等价系统，这些单元以多个节点相互连接，或与边界线（或表面）相互连接，这个过程叫离散化。有限元法代替一次求解对应整体结构的问题，通过建立每一个有限单元的方程，并组合这些方程从而得出对应整个问题的解答。

电子计算机的出现和其性能的提高使得求解离散系统问题变得容易起来，即使对于连续系统，只要其离散单元的数目选择合适也是如此。工程中处理连续体问题的方法一般是将连续系统离散化，利用计算机进行计算处理。这种离散仍带有近似性，但当离散变量数目很大时，离散系统的分析结构可以逼近真实连续解。

1.4 有限元法应用特点

有限元法适应性强，应用范围广。有限元法可以用来求解工程中绝大多数的复杂问题，如复杂结构形状问题，复杂边界条件问题，非均质、非线性材料问题，动力学问题等。有限元法便于编制计算机程序，这是由于有限元法计算过程规范，可以充分利用数字计算机的优势。目前，国内外开发出了众多的通用有限元程序，比如 SAP 系列、ADINA、ANSYS、MARC、ABAQUS 等软件，可以利用这些商业软件进行数值分析工作。这些通用程序的编制与推广，给解决工程技术问题提供了极大的方便。

1.4.1 计算机辅助工程

计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 技术的提出就是要把工程的各个环节有机地组织起来，其关键就是将有关的信息集成，使其产生并存在于工程的整个生命周期中。因此，CAE 系统是一个包括了相关人员、技术、经营管理及信息流和物流的有机集成且优化运行的复杂系统。随着计算机技术及应用的迅速发展，特别是大规模、超大规模集成电路和微型计算机的出现，计算机图形学 (Computer Graphics, CG)、计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 与计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM) 等新技术得以迅猛发展。CAD、CAM 已经在电子、造船、航空、航天、机械、建筑、汽车等各个领域得到了广泛的应用，成为最具有生产潜力的工具，展现了光明的前景，取得了巨大的经济效益。计算机辅助技术已经成为现代设计方法的主要手段和工具。

计算机辅助工程分析方法和软件是关键的技术要素之一。计算机辅助工程作为一项跨学科的数值模拟分析技术，越来越受到科技界和工程界的重视。许多大型的 CAE 分析软件已相当成熟并已商品化。计算机模拟分析不仅在科学研究中被普遍采用，而且在工程上也已达到了实用化阶段。

采用 CAD 技术来建立 CAE 的几何模型和物理模型，完成分析数据的输入，通常称此过程为 CAE 的前处理。同样，CAE 的结果也需要用 CAD 技术生成形象的图形输出，如生成位移、应力、温度、压力分布的等值线图，表示应用、温度、压力分布的彩色明暗图，以及随机械荷载和温度荷载变化生成位移、应力、温度、压力等分布的动态显示图。

1.4.2 CAE 主要版块

(1) 前处理模块——实体建模与参数化建模，构件的布尔运算，单元自动剖分，节点自动编号与节点参数自动生成，荷载与材料参数直接输入、公式参数化导入，节点荷载自动生成，有限元模型信息自动生成等。

(2) 有限元分析模块——有限单元库，材料库及相关算法，约束处理算法，有限元系统组装模块，静力、动力、振动、线性与非线性解法库。大型通用题的物理、力学和数学特征，可被分解成若干个子问题，由不同的有限元分析子系统完成。一般有如下子系统：线性静力分析子系统、动力分析子系统、振动模态分析子系统、热分析子系统等。

(3) 后处理模块——有限元分析结果的数据平滑,各种物理量的加工与显示,针对工程或产品设计要求的数据检验与工程规范校核,设计优化与模型修改等。

CAE 主要版块见图 1-2。

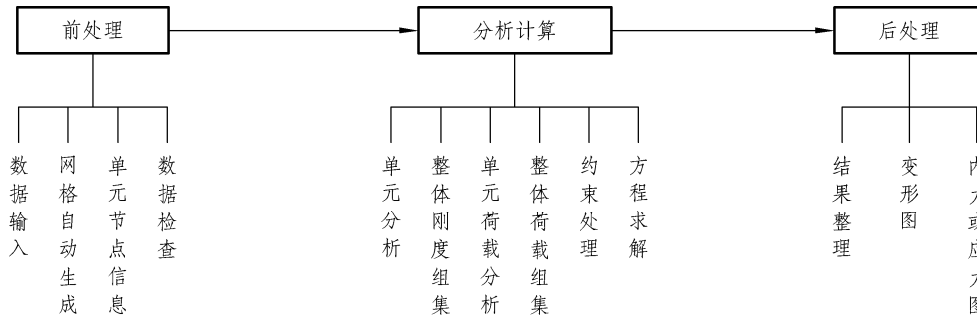


图 1-2 CAE 主要版块

随着我国科学技术现代化水平的提高,计算机辅助工程技术也在我国蓬勃发展起来。政府的主管部门和科技界已经认识到计算机辅助工程技术对提高我国科技水平,增强我国企业的市场竞争能力乃至整个国家的经济建设都具有重要意义。近年来,我国的 CAE 技术研究开发和推广应用在许多行业和领域已取得了一定的成绩。但从总体来看,我国的 CAE 技术研究和应用的水平还不能说很高,某些方面与发达国家相比仍存在不小的差距;从行业和地区分布方面来看,发展也还很不平衡。

1.5 软件介绍

在土木工程领域,CAE 软件程序主要可分为两大类:一类是可以针对各类工程结构物理、力学性能进行分析、模拟和预测、评价和优化,甚至可以完成结构与流场以及结构与温度场的耦合计算分析,以实现技术创新的软件,称为通用 CAE 程序,以 ANSYS、ABAQUS、MARC、ADINA 等程序为代表;另一类则是面向实际工程使用的设计类 CAE 程序,一般是以相关的结构设计规范为依据,主要功能是对工程结构进行设计、验算、优化以及出图等,其在建模能力、单元及材料类型的数量、边界形式的丰富性、非线性求解能力等方面较第一类 CAE 程序略显逊色,但由于其具备较强的针对性和相对较低的理论门槛,在设计行业拥有更为广泛的使用人群。

目前,ABAQUS、ANSYS、NASTRAN 等大型通用有限元分析软件已经引进我国,在汽车、航空、机械、材料等许多行业得到了应用,而且我们在某些领域的应用水平并不低。不少大型工程项目也采用了这类软件进行分析。我国已经拥有一批科技人员在从事 CAE 技术的研究和应用,取得了不少研究成果和应用经验,这使我们在 CAE 技术方面紧跟现代科学技术的发展。但是,这些研究和应用的领域以及分布的行业和地区还很有限,现在还主要局限于少数具有较强经济实力的大型企业、部分大学和研究机构。

我国的工业界在 CAE 技术的应用方面与发达国家相比水平还比较低。大多数的工业企业

对 CAE 技术还处于初步的认同阶段，CAE 技术的工业化应用还有相当的难度。这是因为，一方面，我们缺少自己开发的具有自主知识产权的计算机分析软件；另一方面，掌握 CAE 技术的科技人员大量缺乏。人才的培养需要一个长期的过程，这将对我国 CAE 技术的推广应用产生严重影响的一个制约因素，而且很难在短期内有明显的改观。提高我国工业企业的科学技术水平，将 CAE 技术广泛应用于工程分析的全过程还是一项相当艰巨的工作。

定性和定量是相辅相成的两个方面，许多解题方法和简化算法是以反映结构性态本质的定性知识为基础的，许多定性概念则往往是在多次定量计算中重复出现后才被总结出来的，这就要借助计算机高速运算的功能来完成。也就是说，定性分析与计算机应用——理论—实践—而后形成规律的过程，是从假说或猜想中产生再经过试验或理论推演以证明其正确与否的过程。

同时，数值方法的弱点是就事论事，且计算机程序对应用者而言具有黑箱效果，所以工程师要善于对结构的性态作定性分析和近似估算，以便对计算机提供的数值成果的可靠性给出应有的评价。由此可知，结构受力的定性分析与计算机方法是现代结构力学中密不可分的两个方面。

