

# 土木工程结构数值计算 与仿真分析方法

梁力 李明 编著



東北大學出版社  
Northeastern University Press



东北大学资助

2005 年 第 1 卷

第 1 期 (97C) 目录

# 土木工程结构数值计算与仿真分析方法

梁力 李明 编著

土木工程结构数值计算与仿真分析是土木工程领域的前沿技术。本书系统地介绍了有限元数值分析的基本理论和工程应用的基本方法。全书共分八章，第一章介绍有限元数值分析的基本概念，第二章介绍有限元数值分析的基本理论，第三章介绍有限元数值分析的基本方法，第四章介绍有限元数值分析的基本程序，第五章介绍有限元数值分析的基本应用，第六章介绍有限元数值分析的基本实验，第七章介绍有限元数值分析的基本软件，第八章介绍有限元数值分析的基本展望。

本书可作为土木工程专业的教材，也可供从事土木工程工作的工程技术人员参考。

本书根据东北大学近年来开设的有限元数值分析及应用课程的内容编写而成。全书共分八章，第一章介绍有限元数值分析的基本概念，第二章介绍有限元数值分析的基本理论，第三章介绍有限元数值分析的基本方法，第四章介绍有限元数值分析的基本程序，第五章介绍有限元数值分析的基本应用，第六章介绍有限元数值分析的基本实验，第七章介绍有限元数值分析的基本软件，第八章介绍有限元数值分析的基本展望。

本书可作为土木工程专业的教材，也可供从事土木工程工作的工程技术人员参考。

东北大学出版社

· 沈阳 ·

© 梁 力 李 明 2008

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程结构数值计算与仿真分析方法 / 梁力, 李明编著. —沈阳: 东北大学出版社,  
2014.9

ISBN 978-7-5517-0646-9

I. 土… II. ①梁… ②李… III. ①土木工程—数值计算—计算方法 ②土木工程—计算机仿真 IV. TU71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 120426 号

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress. com

http: // www. neupress. com

印刷者: 三河市天润建兴印务有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 14.25

字 数: 364千字

出版时间: 2014年9月第1版

印刷时间: 2014年9月第1次印刷

责任编辑: 文 韬

责任校对: 郎 坤

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

---

ISBN 978-7-5517-0646-9

定 价: 39.00元

## 前 言

土木工程是建造各类工程设施的科学技术的总称。它涉及到人类生活、生产活动有关的各类工程设施,如建筑工程、公路与城市道路工程、铁路工程、桥梁工程、隧道工程等方面,它在任何一个国家的国民经济中都占有重要的地位。土木工程科研人员在注重试验研究的同时,也进行大量的数值仿真实论及应用的研究。数值仿真是利用各种数值理论对工程结构物理变化过程进行逼真的模拟,分析结构各个阶段所处的物理状态。数值仿真的实现,使土木工程科研人员在无需进行大型的试验条件情况下,根据以往研究成果,通过计算机仿真能为土木工程设计、防灾减灾提供理论分析依据和设计方案。由于土木工程理论研究和数值模拟仿真研究的深入,使有限元技术和计算机图形、图像技术、可视化等技术相结合得到了发展,为土木工程的理论分析提供了可视化分析平台和应用空间。

本书根据东北大学近年来为土木工程专业本科生和研究生开设的有限元数值分析及应用的课程的内容编著而成。东北大学土木工程研究所开设的“有限元法及程序设计”及“大型有限元分析软件在工程中的应用”课程已近十年,并在有限元数值分析理论及其在土木工程应用方面取得了一定成果。编写本书的主要目的是为本科生和研究生进行土木工程的有限元分析打下坚实的基础,既注意到了力学分析上的基础性,又侧重土木工程应用上的实用性,比较系统地阐述了有限元数值分析基本理论和工程应用的基本方法,对以往土木工程数值分析的科研成果进行了分类总结,形成了多个实用的数值分析实例。该书在强调基本理论的同时,更注重有限元技术在土木工程中的实际应用,同时本书在编著过程中,努力使理论和实际应用相结合,尽可能地反映国内外的最新研究成果及进展情况,以便使读者能对有限元数值分析理论和方法及应用有比较全面、深入的了解。书中的算例是作者和他的研究生们多年来的部分科研成果,已经通过反复调试和多次使用,可为读者学习提供参考范例。

本书主要内容包括有限元数值分析的基本理论与仿真技术原理、有限元非线性方程求解理论、土木工程各类问题分析基本理论。本书是按照用有限元方

法分析具体工程问题的原理和过程来编写的，突出了有限元数值仿真的前后处理方法、有限元计算误差估计和自适应性分析方法，并比较详细的介绍土木工程数值仿真分析应用实例，还专门说明了应用这些程序对土木建模和分析的有关技巧。本书所使用的大型 ANSYS 软件得到了 ANSYS 公司的授权。

本书的出版得到了东北大学教务处的资助和出版社的大力支持，由梁力教授主持编著，研究中心的研究生张道明、王伟、王常剑、赵军、李鑫等参与了本书的部分编写工作。在本书出版之际，对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之有限元数值分析方法发展迅速，书中难免有不足之处，热忱欢迎读者批评指正。

作者

2014 年元月于东北大学

(电子邮箱: liangli@mail.neu.edu.cn)

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 有限元数值计算方法及其工程应用	1
1.2 计算机仿真技术的意义与趋势	3
1.3 现代计算机协同仿真技术与发展	5
1.4 土木工程数值计算与仿真分析软件简介	6
第 2 章 有限元数值计算和仿真技术的理论与方法	9
2.1 弹性力学的基本理论与基本方程	9
2.1.1 弹性力学中的基本概念	9
2.1.2 弹性力学中的基本假定	10
2.1.3 弹性力学的两种平面问题	11
2.1.4 平面问题的基本方程与边界条件	12
2.1.5 圣维南原理与叠加原理	14
2.2 有限元数值分析的基本理论与方法	14
2.2.1 有限单元离散	15
2.2.2 位移模式与形函数	16
2.2.3 虚位移原理与虚功方程	19
2.2.4 单元刚度矩阵与整体刚度矩阵	20
2.2.5 计算荷载的种类与数值处理	22
2.3 多媒体技术与实现仿真的基本方法	23
2.3.1 多媒体技术简介	23
2.3.2 多媒体协同设计环境	24
2.3.3 工程研究的多媒体仿真分析	24
2.4 线性与非线性有限元数值求解方法	24
2.4.1 线性代数方程组的求解	25
2.4.2 工程中的非线性问题及特点	27
2.4.3 非线性方程组的求解	27
2.5 结构局部与整体稳定问题的数值分析	31
2.5.1 结构屈曲基本原理及分类	31
2.5.2 结构稳定问题计算方法	31
2.5.3 有限元求解结构屈曲的基本方法	32
2.5.4 应用 ANSYS 求解结构屈曲的实现	33
2.5.5 非线性屈曲分析的具体注意事项	36

2.6	岩土工程问题稳定性数值分析方法	37
2.6.1	瑞典圆弧法计算原理	38
2.6.2	毕肖普法计算原理	40
2.6.3	简布的普遍条分法计算原理	41
2.7	动力学问题的基本方程与求解方法	42
2.7.1	动力响应及荷载类型	42
2.7.2	振动问题与波动问题	43
2.7.3	动力响应基本方程与波动问题的求解	43
2.8	渗流与地震反应问题的数值求解方法	45
2.8.1	渗流问题的数值求解方法	45
2.8.2	地震反应分析的数值求解方法	47
2.9	有限元并行计算技术及应用前景	50
2.9.1	单元分析的并行计算	51
2.9.2	总体刚度矩阵的并行装配	52
2.9.3	约束条件的并行处理	52
2.10	参数化设计方法与用户可编程特性	53
2.10.1	参数化设计语言 APDL	53
2.10.2	参数化设计宏文件	54
2.10.3	ANSYS 的用户可编程特性	55
<b>第3章</b>	<b>有限元数值计算与仿真分析的前处理方法</b>	<b>57</b>
3.1	土木工程的力学模型与有限元网格	57
3.1.1	杆件系统	57
3.1.2	平面应力与平面应变问题	58
3.1.3	轴对称问题的简化处理	58
3.1.4	半空间与全空间问题	58
3.2	力学模型与仿真模型图形数字化	58
3.2.1	数字化产品建模	58
3.2.2	二维建模	60
3.2.3	三维建模	62
3.3	有限单元法的单元类型及特点	64
3.3.1	有限元法的单元类型	65
3.3.2	一维单元	66
3.3.3	二维单元	67
3.3.4	三维单元	68
3.4	无限单元、节理单元与离散元	69
3.4.1	无限单元	69
3.4.2	节理单元	70
3.4.3	离散元	73
3.5	有限元网格生成的基本方法	74
3.5.1	结构化网格与自动生成方法	74
3.5.2	非结构化网格与自动生成方法	83

3.5.3	半结构化网格与自动生成	89
3.6	自适应网格特点与无网格技术	91
3.6.1	自适应网格的特点	91
3.6.2	无网格技术	93
3.7	ANSYS 软件前处理应用实例	94
3.7.1	问题的描述	94
3.7.2	创建几何模型	94
3.7.3	设置单元属性	95
3.7.4	分网控制和分网	97
<b>第 4 章</b>	<b>有限元数值计算误差估计与自适应分析方法</b>	<b>99</b>
4.1	有限元数值计算的误差来源与估算方法	99
4.1.1	有限元数值计算的主要误差来源	99
4.1.2	有限元计算的后误差估计方法	99
4.2	有限元计算的网格修正自适应分析方法	101
4.2.1	新网格单元节点几何参数的修正计算	102
4.2.2	动力学计算中的自适应分析方法	103
4.3	有限元自适应分析的数值计算实例	108
<b>第 5 章</b>	<b>有限元数值计算与仿真分析的后处理方法</b>	<b>112</b>
5.1	有限元计算与仿真的可视化技术	112
5.1.1	可视化技术的基本概念	112
5.1.2	可视化技术的处理方式	113
5.1.3	有限元计算结果的后处理方法	114
5.1.4	实时跟踪方法	116
5.2	计算机仿真的图形技术与动画	116
5.2.1	计算机仿真的图形技术	117
5.2.2	计算机仿真动画技术	119
5.3	有限元后处理系统的数据管理	121
5.3.1	有限元后处理系统数据管理的特点	121
5.3.2	有限元结构模型数据的管理	122
5.3.3	计算结果数据的管理	123
5.4	有限元计算中的优化设计方法	124
5.4.1	最优化基本理论	124
5.4.2	优化设计技术	125
5.4.3	拓扑优化技术	126
5.5	有限元计算后处理应用实例	127
5.5.1	ANSYS 软件的通用后处理	127
5.5.2	ANSYS 软件的时间历程后处理	131
<b>第 6 章</b>	<b>土木工程数值计算与仿真技术应用实例</b>	<b>133</b>
6.1	大型钢桥架结构强度与稳定性分析	133



6.1.1	工程背景	133
6.1.2	分析步骤	133
6.1.3	大型钢桥架的静力分析	134
6.1.4	起重机桥架的屈曲稳定分析	150
6.1.5	典型命令说明	154
6.1.6	小 结	156
6.2	铝内胆-碳纤维复合气瓶强度分析	156
6.2.1	工程背景	156
6.2.2	分析步骤	157
6.2.3	复合气瓶强度分析	158
6.2.4	典型命令说明	167
6.2.5	小 结	167
6.3	钢筋混凝土组合结构的受力分析	167
6.3.1	工程背景	167
6.3.2	分析步骤	168
6.3.3	钢筋混凝土组合结果的受力分析	168
6.3.4	典型命令说明	173
6.3.5	相关工程实例	173
6.3.6	小 结	173
6.4	大型岩土边坡稳定性数值分析	173
6.4.1	工程背景	173
6.4.2	分析步骤	174
6.4.3	岩土边坡稳定性数值分析	174
6.4.4	小 结	176
6.5	尾矿库渗流稳定与液化分析	176
6.5.1	工程背景	176
6.5.2	分析步骤	176
6.5.3	尾矿库的渗流分析	177
6.5.4	尾矿库的稳定分析	178
6.5.5	尾矿库的液化分析	179
6.5.6	小 结	180
6.6	大型筏板基础沉降与受力分析	181
6.6.1	工程背景	181
6.6.2	分析步骤	181
6.6.3	大型筏板基础的沉降与受力分析	182
6.6.4	典型命令说明	186
6.6.5	小 结	188
6.7	预制钢筋混凝土螺旋桩受力分析	188
6.7.1	工程背景	188
6.7.2	分析步骤	188
6.7.3	预制钢筋混凝土螺旋桩受力分析	189
6.7.4	典型命令说明	192

6.7.5 小 结 .....	192
6.8 结构受冲击荷载数值分析 .....	192
6.8.1 工程背景 .....	192
6.8.2 分析步骤 .....	193
6.8.3 结构受冲击荷载分析 .....	193
6.8.4 相关工程实例 .....	203
6.8.5 小 结 .....	204
6.9 火灾后预应力空心板的承载能力数值分析 .....	205
6.9.1 工程背景 .....	205
6.9.2 预应力空心板有限元分析 .....	205
6.9.3 小 结 .....	208
6.10 沥青混凝土路面车辙的弹性有限元分析 .....	208
6.10.1 工程概况 .....	208
6.10.2 分析步骤 .....	208
6.10.3 沥青混凝土路面车辙的弹性有限元分析 .....	209
6.10.4 小 结 .....	210
6.11 大型钢结构静动力分析和优化设计 .....	211
6.11.1 工程概况 .....	211
6.11.2 分析步骤 .....	211
6.11.3 钢结构有限元模型建立 .....	211
6.11.4 钢结构静力分析 .....	212
6.11.5 钢结构动力分析 .....	213
6.11.6 钢结构的优化设计 .....	213
6.11.7 小 结 .....	214
主要参考文献 .....	216

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 有限元数值计算方法及其工程应用

有限单元法(Finite Element Method—FEM)这一数值计算方法由于计算机软硬件的迅速发展而越来越广泛地应用于工程的许多领域之中。它已被牢固地建立为一种有广泛适用性的技术工具。它不再是研究工作者或专门学院的唯一的研究领域,现在它正被用在许多技术部门的设计上。有限元法的一个主要优点是统一了各类工程问题的求解方法。1956年,在美国为分析飞机结构问题,首次提出了有限单元法,在1961年有限元方法的研究和应用论文仅10余篇,1974年所记载的论文已达1400多篇,而近几年,每年的论文数目达到上万篇。第一本有限单元法的专著由O. C. 辛柯维奇在1967年出版,今天已有超过数百本这方面的专著。在国际上有限元方法及应用的杂志,至少在50种以上。数值方法与实验方法相比,有其自身的特点,一般来说有限元计算成本较低,周期短,可容易地模拟复杂载荷条件和多种材料组成的工程问题,它可以补充一些实验手段的不足,对于某些难以进行实验的工程问题,可以通过数值模拟来进行定性和定量分析,但是二者不能相互取代。随着计算机的进一步发展和数值方法的深入研究,许多工程中二维和三维问题可以完全通过数值模拟来进行分析、比较和设计,其前景是广阔的。正像著名力学家钱学森院士1997年9月在给清华大学工程力学系建系四十周年的贺信中写道:“随着力学计算能力的提高,用力学理论解决设计问题成为主要途径,而试验手段成为次要的了。由此展望21世纪,力学加电子计算机将成为工程设计的主要手段。”目前,有限元法的应用遍及工程各个领域,见表1.1.1。虽然这种方法最初是为分析飞机结构而提出来的,但由于其理论所具有的通用性,使它能广泛地适用于工程中的各种边值问题。

有限元法最早应用于航空领域,主要用来解决线性结构问题,目前已经经历了50多年的发展历史,其基本理论已经日趋完善,应用也得到飞速发展;有限元法的核心思想是结构离散化,将实际结构假想地离散为有限数目的单元组合体,实际结构的物理力学性能可以通过对离散体进行分析,得出满足工程精度的近似结果来代替对实际结构的分析。这样可以解决很多实际工程需要解决的复杂问题。

目前利用数值计算与仿真技术已经成为解决许多复杂工程问题的常规手段,例如:

- 提高所设计的产品和工程的可靠性;
- 在产品的设计阶段发现潜在的问题;
- 采用优化设计方案,降低原材料成本;
- 缩短产品投向市场的时间,加快进度;
- 模拟试验方案,减少试验次数,节约试验经费;
- 模拟危险环境下与一般实验室无法进行的实验。

有限单元法的基本思想是用一个较简单的问题代替复杂问题后进行求解,即把连续体分

成一系列的单元,这些单元是由有限数目的节点相联的,这个过程称为离散化。这种离散化只能求出问题的近似解,而不能求出精确解,因而如何提高近似程度,始终是人们研究的课题。

表 1.1.1

有限元法的工程应用

研究范围	平衡问题	特征值问题	瞬态问题
1. 土木工程结构	大型桁架、框架、折板、壳体屋顶、剪力墙、桥梁和预应力混凝土组合结构的静力分析	结构的固有频率和振型,结构的稳定性	应力波的传播,非周期性荷载与地震作用下结构的响应
2. 飞机结构	飞机的机翼、机身、尾翼、火箭,宇宙飞船和导弹结构的静力分析	飞机、火箭、宇宙飞船和导弹结构的固有频率、颤振及稳定性	飞机结构对随机荷载的响应,飞机和宇宙飞船对非周期性荷载的动态响应
3. 传热问题	固体和流体中的稳态温度分布	/	火箭喷管、内燃发动机、涡轮叶片、尾翼及建筑结构中的瞬态热流
4. 岩土力学	坑道、挡道、地下通道、岩石节理,土与结构相互作用问题的分析,土、坝、边坡、尾矿库等应力分析	坝-水库系统和土与结构相互作用问题的固有频率和振型	和时间有关的土与结构相互作用问题,土和岩石中的应力波传播,渗流与液化分析
5. 流体力学 水利水资源工程	势流、自由表面、边界层流、黏性流,跨声速空气动力学问题分析,水工结构和坝的分析	浅水池、湖泊、港湾的固有周期和振型,在刚性和柔性容器中液体的晃动	非稳定流体流动和波的传播问题分析,在蓄水层和多孔介质中的瞬态渗流,稀薄气体动力学,磁流体动力学
6. 核工程	核压力容器核外壳结构的分析,反应堆构件的稳态温度分析	外壳结构的固有频率和稳定性,中子流量分布	反应堆外壳结构对动载作用的响应,反应堆构件的非稳态温度分布,反应堆结构的热和黏弹性分析
7. 生物医学工程	眼球、脊椎骨、股骨头、骨髓和牙齿的应力分析,移植和置换系统的承载能力,心脏阀门力学	/	脊椎骨的动态分析,头盖骨的碰撞分析,解剖结构动力学
8. 机械设计	应力集中问题,压力容器、活塞、复合材料、连接件和齿轮的应力分析	连接件、齿轮和机械工具的固有频率和稳定性	动力荷载下的裂缝和断裂问题分析等

采用有限单元法求解一般连续介质问题的步骤如下:

- (1) 将实际工程问题简化成物理或力学模型;
- (2) 将力学模型的连续体离散为有限个单元;
- (3) 选择适当的单元插值模式或位移模式;
- (4) 计算所选单元的刚度矩阵和处理边界条件;
- (5) 将单元刚度矩阵和载荷项组装成总体刚度矩阵;
- (6) 利用数值技术解联立方程组求出未知节点变量;
- (7) 计算从属的单元参数,如位移法中的应力等数值。

如果把以上概念推广到其他领域,只需要改动上述七个步骤中所用的术语,基本的步骤是一样的,主要解决三个方面的问题:一是前处理问题,建立实际工程结构的物理或力学模

型, 要充分考虑工程问题的主要影响因素, 如材料特点, 荷载与位移边界条件等, 并采用适当的有限单元对模型进行离散, 生成符合要求的、最佳化的有限元网格; 二是数值计算问题, 利用现代数值计算方法求解线性与非线性问题, 解决数值计算的收敛与精度问题; 三是后处理问题, 利用现代仿真与可视化技术, 将计算结果利用各种多媒体形式展现出来, 以便于分析结果和应用。近年来随着计算机硬件发展, 计算机速度和容量的增加, 有限元方法可以更广泛地应用于复杂工程问题。

## 1.2 计算机仿真技术的意义与趋势

计算机辅助工程 CAE(Computer Aided Engineering)可以说是现代仿真产品研发中出现最早的技术, 它是建立在现代有限元数值计算方法的基础上, 但它过去却始终不温不火地发展着, 但这并不妨碍它成为促进世界工业产品进化的最重要的技术, 是它一直刺激着工业产品和技术的创新。CAE 和其他诸如信息化产品最本质的区别在于: 其他信息化产品让企业降低了成本, 而 CAE 为企业产品产生了高附加值, 真正能为现代企业创造高额利润。随着人们对 CAE 技术价值的认识逐步深刻和 CAE 技术本身的发展, CAE 技术正在快速发展起来, 正如安世亚太《现代产品研发—创刊号》所预测的那样, 目前 CAE 技术的应用和发展趋势主要有:

趋势一: CAE 仿真技术驱动现代产品研发流程, 通常使用 CAD(Computer Aided Design)建模, 用 CAE 进行仿真。因此, 在许多人的眼里, CAE 理所当然是 CAD 的后端技术了, 但其实恰恰相反, 在先进研发流程中, CAE 是 CAD 的“先行”技术。在新产品设计周期里, CAD 付诸实施之前, CAE 已经行动了。CAD 并不是贯穿整个研发周期的技术, CAE 却是, 它在产品研发全过程中影响着设计。一般详细设计之前, 在计算机上进行虚拟实验(仿真), 来预测产品是否可行, 可以省略大量的真实实验, 从而节省时间及成本, 防止各种意外的发生, 保证详细设计的高成功率。在详细设计的任何时期, CAE 技术都将发挥其巨大作用, 任何不能确认合理的细节, 都可以通过 CAE 技术来验证, 将所有潜在的问题解决在萌芽之中。CAE 技术的采用, 在研发流程的前期看似投入比较高, 但越到后来投入越低, 回报越高, 产品可更早推向市场, 且质量更高。

趋势二: 核心功能深入化, 使用环境简单化, 仿真技术在向专业化方向深入发展。核心技术在远离使用者, 仿真结果却逼近真实世界。在仿真软件发展初期, 功能性较为简单, 但对使用人员的要求却很高。现在, 仿真功能从线性发展到非线性, 从静态(稳态)到动态, 隐式到显式, 均质材料到复合材料, 确定性分析到非确定性(概率)分析, 校核分析到设计优化, 单学科仿真到多学科耦合, 但对仿真人员的要求却低了; 主要原因是应用界面越来越简单。过去, CAE 软件自己做实体建模, 有诸多不便。现在, 可用 CAD 软件做实体建模, CAE 软件直接使用 CAD 模型, 而且可以自动探测接触关系, 建立接触单元。CAE 和 CAD 之间可以双向参数互动, 任何一方修改了模型, 在另外一方只需刷新即可得到新模型。现代产品的设计绝大多数是变形设计, 一个新产品中 80% 以上的零部件是在原有产品基础上进行参数修改而成的。对于这些零部件, 可以建立它们的仿真模型, 其中包括网格剖分、载荷施加、求解分析及结果察看等设置, 形成虚拟样机部件库。当需要进行分析的时候, 只需局部修改参数, 就可以投入求解。如果需要进行整机仿真, 则可以快速组装形成虚拟整机。这在

概念设计阶段的快速选型非常有用,虽然没有详细设计模型,但我们仍可以快速把握未来产品的性能。由于仿真环境的方便易用,使得软件使用者不需要掌握深奥的核心技术和背景知识,但由于采用了知识工程手段,将软件界面的自动化程度提高,使用者只需较少的操作即可准确完成仿真设计工作。

**趋势三:多学科联合仿真和多物理场耦合技术兴起。**CAE 技术涵盖了结构力学、流体力学、电磁学等诸多学科专业,而像火箭、飞机、船舶等复杂工业产品的设计对这几个学科专业都有强烈的耦合分析需求,多学科及多物理场耦合技术是保证仿真结果逼近真实世界的重要技术。一般的 CAE 软件通常都只能解决某个单学科的问题,用户需要配置一系列由不同公司开发的、具有不同应用领域的软件组合起来,以解决其实际工程问题。这不但增加了用户投资,而且很多耦合场问题会由于不同软件间不能有效、准确地传递数据而无法真正实现耦合仿真计算。能否真正完成全面的耦合场分析,已经成为现代 CAE 软件所追求的目标。现代仿真技术的集成平台集成了许多 CAE 内核技术,将使用界面统一化,且功能丰富,在同一个界面中可以满足产品研发的大多数仿真需求,而且使用范围扩大化,产品研发的所有人员都可在不同程度上参与仿真。

**趋势四:产品仿真中高性能计算。**产品仿真中的物理场仿真对高性能计算技术的要求最为迫切。在硬件支持方面,CAE 软件不但在普通的微机与工作站等都能够正常工作,而且还提供统一的用户交互界面、统一的软件功能、统一的数据库以及网络浮动能力。而今 CAE 软件的发展已经超越了计算机平台的概念,多个 CPU 的大型并行机、网格计算机等局域网连接的工作站/微机群的并行计算是现代 CAE 技术追求的新境界。CAE 已经开始采用不同机型及操作系统的混合网络上的并行计算。并行计算使 CAE 进行系统级的大规模计算不再是新闻,数百万甚至千万网格的计算规模已经成为可能。但更大规模的问题求解越来越成为人们追求的目标,真实的世界需要超过一亿自由度问题的求解方案,比如大型飞机整机气动的精确计算、整个车体详细结构模态分析、大型土木工程结构灾害的分析等,但能提供求解方案的仿真产品现在还为数不多,而且价格昂贵。

**趋势五:协同仿真环境的建立。**现代研发技术的蓬勃发展使得 CAD/CAE 软件百花齐放。这种景象为企业带来了宽广选择余地的同时,也带来了异构问题。企业已经认识到异构问题一定要解决。但努力之后又发现现代研发技术的一大特征:CAD 技术在趋同,而 CAE 技术则在求异。设计工具可以通过整个企业选择一种 CAD 系统达到统一。但对仿真来说,没有一种仿真系统可以包打天下,每种工具都有其无法替代的价值。面对此种局面,保持企业核心技术多样性的同时,建立协同仿真环境的呼声越来越高。

**趋势六:仿真咨询服务和研发环境的实施。**CAE 软件可以对产品设计提供指导,但毕竟是高科技产品,还是要求使用人员具备一定的 CAE 专业知识。而通常用户的优势在于其所在行业和本公司的产品,而不是 CAE。对于高度复杂的问题,与专业的分析团体合作进行问题攻关已成为国际共识。现在流行的仿真咨询方式有领航员计划、联合攻关、分析项目承接、企业工程分析部、用户化开发、行业化开发等。企业信息化平台后面面临的一个难题是,不但没有将它有效利用起来,反而被其产生的麻烦纠缠。因此,研发平台的实施成为咨询业务的最大热点,这需要实施队伍具有过硬的技术和高水平的管理。这支队伍不仅是企业信息化工程的施工队,更是企业信息化肌体的医务组,让企业摆脱技术痛苦,专注本企业的产品研发。21 世纪中国制造业面临更加白热化的市场竞争。制造企业要适应市场竞争的全

球化、产品生命周期日益缩短和竞争加剧的环境，要在激烈的市场竞争中求生存、求发展，必须在最短的时间内生产出适应市场需求的产品。建立一个强大的 CAE 体系是使企业立于不败之地的迫切需要，也是中国制造业数字化工程的需要。

### 1.3 现代计算机协同仿真技术与发展

安世亚太集团在中国率先扛起了协同仿真技术的大旗，提出了“登陆协同仿真时代”。

在现代企业产品研发过程中，设计、仿真和试验技术都发挥着重要作用。实验技术相对独立且变化缓慢，而设计和仿真技术则以计算机技术为纽带而紧密联系在一起，且随着计算机技术的高速化而蓬勃发展。现代企业常见的研发工具有：土木工程设计、机械零件设计、电子设备设计、物理场分析（包括结构分析、温度场分析、电磁场分析、流场分析等）、多体动力学分析、电路仿真、液压仿真、控制仿真、成本估算、重量估算、多学科优化等。这些基于计算机的研发技术正是现代协同仿真技术的基础。这些研发技术的百花齐放为企业带来了宽广选择余地的同时，也带来了异构问题和协同需求。现代企业大多采用传统技术进行产品数据管理，也的确在协同仿真方面发挥了重大作用。但当我们仔细审视企业的需求时，发现除了数据管理，企业还需要更多协同技术，譬如研发技术集成、研发流程集成、智力资产管理、硬件资源管理、多学科优化，等等。其实，这些协同需求的满足正在成为现代研发技术的发展特征。目前协同仿真技术需求解决的主要问题有：

(1) 仿真是核心。企业在进行协同仿真的过程中发现了现代研发技术的一大特征：CAD 技术在趋同，而 CAE 仿真技术则在求异。设计工具可以通过整个企业选择同一种 CAD 系统而达到统一。但对仿真来说，每种工具都有其无法替代的价值。因此，在解决异构和协同问题的时候，软件开发公司开发的协同技术都围绕仿真技术而展开，同时兼顾设计技术和仿真技术的互动性。

(2) 研发技术集成。研发技术集成是指采用合适的平台整合世界所有主流研发技术，保持多学科核心技术多样化的同时，建立统一研发环境，所有研发技术成为这个环境的后台技术。在此环境中，工作人员始终面对同一个界面，无需在各种程序界面之间频繁切换。目前此类平台的代表者 ANSYS 公司出品的 Workbench，此类技术对 CAE 核心技术的要求深且广，开发“门槛”较高。

(3) 研发流程集成。在产品的设计过程中，针对相同的整机和零部件，多类学科的仿真工具可能同时用到。在整个企业产品研发过程中，对于一个主流程，多个辅流程在同时执行。这些多学科工具和多个辅流程同时进行的目的是同时关注产品的各项指标，以确认产品的所有指标都满足要求。有时某项指标的计算还需要其他学科或辅助流程的计算结果作为输入。在研发过程中，各流程职责部门细化本部门负责的流程，完成流程中各应用节点的封装、各辅流程设计以及和主流程的接口，最终使主流程和辅流程协同流畅执行，对产品的各项指标进行完整研究，这个过程就是研发流程集成。

(4) 研发数据管理。在传统技术的成功实施下，各企业已经很完善地管理着本企业产品的设计数据。但仿真数据的特殊性要求采用特殊方式管理，需要体现仿真行为及数据之间的逻辑关系，这在企业的研发体系中还是新课题。

(5) 多学科优化。产品优化是企业产品研发的终极目标，多学科优化是研发流程集成

的直接结果,在企业协同仿真中占有非常地位。现有的某些软件能够提供多种优化算法和设计功能,其中有些是确定性方法,有些是非确定性(概率)方法。确定性计算方法用于性能设计和优化,非确定性计算方法用于质量评估和优化。在通常的应用中,性能设计和质量设计方法组合使用,使产品在性能和质量两方面达到设计指标。

(6) 硬件资源管理。协同仿真技术的提供商们正致力于最大程度地利用企业硬件资源。对于大型计算问题,可以采用并行求解技术,在多台机器上并行求解同一个问题。利用网格计算技术是另一项可充分利用企业硬件资源的技术。该技术可更广泛地访问企业软硬件资源,能帮助企业智能化地完成分布式、虚拟 IT 环境中的批量作业。这种分布式资源调用中的负载均衡能力在同时进行多学科多流程的仿真计算时,可协调各个硬件计算资源的负载,使某台计算资源一旦空闲,立即分担其他硬件的计算任务,保证各个硬件资源最大限度地被优化利用。

(7) 智力资产管理。企业研发相关的技术、流程、经验和数据是企业的重要智力资产,这些智力资产的有效管理将对企业可持续发展提供保障。常见的智力资产包括:CAE 模型化模版、虚拟样机库、研发数据库、插件及流程库等。采用知识工程手段,将这些智力资产固化进入计算机程序中以后将永久保留与共享。随着这种工作的持续进行,将为企业积累异常珍贵的智力资产。

目前每一种需求都有合适的平台和工具与之对应,但没有一个成熟平台可以满足企业所有的需求。目前通过对三个子平台(技术集成平台、流程集成平台以及产品数据管理平台)的集成,整合企业目前采用的各类研发工具,以满足企业对协同仿真平台的需求。协同仿真平台相对于其他信息化产品来说,实施门槛比较高,而现代计算机技术与有限元数值计算方法是这一技术发展的重要工具和基础。

## 1.4 土木工程数值计算与仿真分析软件简介

目前我国有限元计算的商业软件有许多,有的以公司命名,有的以软件功能命名,主要的土木工程有限元计算与仿真分析软件有:

SAP2000(Structure Analysis Program)——结构分析有限元程序。SAP2000 是非常优秀的结构分析通用有限元软件,在桥梁、房屋、塔架、港航等土木工程领域中广泛应用。在 SAP2000 三维图形环境中提供了多种建模、分析和设计选项,且完全在一个集成的图形界面内实现。它提供了逐步大变形分析、多重 P-Delta 效应、特征向量和 Ritz 向量分析、索体的单拉和单压分析、结构屈曲分析、爆炸分析、针对阻尼器、基础隔震和支承塑性的快速动力非线性分析、用能量方法能进行侧移控制和分段施工分析等。

ADINA(Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)——自动动态增量非线性分析有限元程序。该计算程序能够实现结构、传热、流体以及相互耦合的综合分析功能。包含固体、杆、梁、管、板、壳和空白单元等各种单元类型的单元库。它提供了强大的 2D/3D 线性、非线性问题,静力和动力问题求解能力,具有热效应的弹塑性和蠕变分析、屈曲和后屈曲分析、静力和动力接触问题、加工成形和切割加工工艺过程仿真模拟及高效的动力子结构分析模态分析、响应谱、随机振动分析、波传播和冲击波分析、结构振动和谐振分析、声流体结构干涉问题分析等功能,比较适合土木工程问题的计算与分析。



**ANSYS**——大型 CAE 仿真分析软件。ANSYS 是一个通用性强大的大型有限元分析软件，融结构、热、流体、电磁和声学于一体。无论是它的前后处理功能、图形处理功能还是人性化的操作界面，都近乎完美，一方面使得 ANSYS 简单易学，一方面可以很容易的对各种问题进行分析计算。ANSYS 是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一，是应用特别广泛的少数软件之一。它广泛应用于土木工程、地质矿产、水利、铁道、汽车交通、国防军工、航天航空、船舶、机械制造、能源、核工业、石油化工、轻工、电子、日用家电和生物医学等一般工业及科学研究之中。为工程节约成本、提高设计效率、缩短设计周期，而且很多厂家已经把前期的软件模拟作为检验设计成败的关键步骤。另外，良好的兼容性，使得 ANSYS 可以在大多数计算机及操作系统上运行。从 PC 机到工作站，到巨型计算机，ANSYS 的文件系统及其所有的产品系列在工作平台上均兼容。此外，ANSYS 软件是第一个通过 ISO9001 质量认证的大型分析设计类软件，是美国机械工程师协会 (ASME)、美国核安全局 (NQA) 及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件。在国内第一个通过了中国压力容器标准化技术委员会认证并在国务院 17 个部委推广使用。

**ABAQUS/CAE**——非线性有限元分析软件。ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟的有限元软件，其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库。并拥有各种类型的材料模型库，可以模拟典型工程材料的性能，其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料。作为通用的模拟工具，ABAQUS 除了能解决大量结构(应力/位移)问题，还可以模拟其他工程领域的许多问题，例如热传导、质量扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质分析。

**MIDAS (Modeling Integrated Design & Analysis Software)**——土木工程数值分析程序。MIDAS 是世界一流的桥梁结构分析软件，MIDAS/Civil 是一个通用的空间有限元分析软件，可适用于桥梁结构、地下结构、工业建筑、飞机场、大坝、港口等结构的分析与设计。特别是针对桥梁结构，MIDAS/Civil 结合国内的规范与习惯，在建模、分析、后处理、设计等方面提供了很多的便利的功能，目前已为各大公路、铁路部门的设计院所采用。

**REI Eng. Software**——阿依艾建筑工程分析软件。阿依艾工程软件的主要产品包括：STAAD/CHINA, SSDD, STAAD/Pro, AutoCivil 等十余种土木工程和结构设计商品软件。该软件已经被广大中国工程师所接受，并且在工程和结构设计领域得到了广泛的应用。在吸收了国际上广为应用的结构分析与设计软件 STAAD/Pro 的开发经验基础上，开发了适合中国工程师习惯的，符合中国最新结构设计和荷载规范的结构设计与绘图软件——STAAD/CHINA，该软件于 1999 年 6 月通过了中国建筑金属结构协会建筑钢结构委员会组织的鉴定。

**IFEFG (Internet Finite Element Program Generator)**——火箭在线生成有限元程序系统。在线生成有限元程序系统 (Internet Finite Element Program Generator) 是一个互动式的互联网软件，它集有限元程序自动生成技术和网络技术于一体，你可在任何时候，任何地方，任何一台 PC 机通过互联网给出你所要求解的有限元问题，就可得到所需要的有限元源程序，并可以在计算机上自动编译运行，直到获得所要的计算结果。其突出特点是可以由计算机自动产生 FORTRAN 程序，突破了目前有限元程序系统只适用于特定领域和特定问题的限制。用户只需输入有限元方法所需的各种表达式和公式，即可自动产生所需的全部有限元程序。包括前处理程序、单元子程序、算法程序等，免去了大量的烦琐的有限元编程劳动，保证了程序