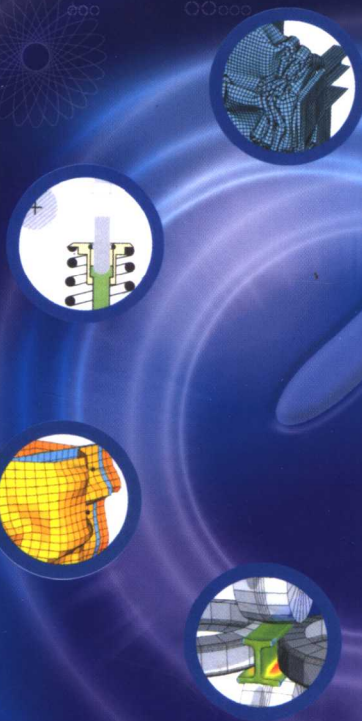


 **ABAQUS**

数码工程师系列丛书



ABAQUS

非线性有限元分析与实例

庄 茁 张 帆 岑 松 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

数码工程师系列丛书

ABAQUS 非线性有限元分析与实例

庄 茁 张 帆 岑 松 由小川 编著
于旭光 牟全臣 徐 明 白 锐

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是 ABAQUS 软件应用的实例教材,结合有限元的基本理论和数值计算方法,通过一系列的相关例题和讨论,介绍了 ABAQUS 软件的主要内容。书中系统地讲解了编写输入数据文件和前处理的要领,对输出文件进行分析和后处理的方法,并系统地讲述了一些应用在土木、材料、机械和铁道工程的实例。为了帮助二次开发,详细地讲解了如何编写用户材料子程序 UMAT 和单元子程序 UEL。因此,本书可作为工程师应用有限元软件进行力学分析和结构设计的手册,也可作为力学和工程专业研究生和本科生的有限元数值计算课的参考教材。

本书适合高校理工科教师、科研人员、工科本科生和研究生、从事设计和有限元分析的工程师等人阅读。

图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS 非线性有限元分析与实例/庄茁等编著. —北京:科学出版社, 2005

(数码工程师系列丛书)

ISBN 7-03-015088-0

I. A… II. 庄… III. 有限元-应用程序, ABAQUS-教材 IV. 0242.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015266 号

责任编辑:吕建忠 韩 洁/责任校对:都 岚

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创意

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 3 月第一次印刷 印张:35 1/4

印数:1—3 000 字数:815 000

定价:76.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131, 编辑部电话 010-62138978-8001

前 言

清华大学工程力学系高级有限元中心——AFES(advanced finite element service)成立于1997年,在国内高校率先引进 ABAQUS 有限元软件,取他山之石,助科研之力。在有限元发展与应用方面,站在高起点的 ABAQUS 软件平台上开发算法、发展用户单元和材料本构模型,使我们避免了研究工作的低水平重复,所培养的一批批本科生和研究生,在有限元软件的应用水平和开发能力上与国际接轨,其驾驭软件本体、开发接口程序方面的能力已达到国际上的较高水平。

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一,具有强健的计算功能和广泛的模拟性能,拥有大量不同种类的单元模型、材料模型和分析过程等。无论是分析一个简单的线弹性问题,还是一个包括几种不同材料、承受复杂的机械和热载荷过程、具有变化的接触条件的非线性组合问题,应用该软件计算分析都会得到令人满意的结果。

本书分为两篇,上篇为 ABAQUS 应用指南,主要取材于近几年由我们翻译和编著的 ABAQUS 有限元软件入门指南;下篇为 ABAQUS 应用实例,其内容来自于清华大学高级有限元中心的研究工作和 ABAQUS 中国用户年会的论文集,它汇集了近几年国内的部分研究成果和工程应用实践。

借本书出版之机,衷心感谢清华大学黄克智院士和杨卫院士的远见卓识和大力支持,由此推动了引进 ABAQUS 软件的工作,使得清华大学高级有限元中心成为国内应用 ABAQUS 软件的技术支持中心。对陈佩英高级工程师始终不渝的鼓励和帮助,在此表示深深的谢意。另外,也感谢 ABAQUS 北京办事处旭光总经理及其全体同仁的支持,使我们保持了多年的友谊与合作。我们相信通过本书的出版必将推动 ABAQUS 软件在中国的推广和应用,有助于发展我国的虚拟科学与工程事业。

庄茁 教授

2004年8月于清华园

目 录

上篇 ABAQUS 应用指南

第1章 引言	1
1.1 HKS 与 ABAQUS	1
1.2 有限元著作和软件的发展历史	2
1.3 有限元带来设计的革命	5
1.4 在设计中应用 ABAQUS	7
1.5 ABAQUS 产品	7
1.5.1 ABAQUS 软件产品	7
1.5.2 ABAQUS 文档	9
1.6 有限元法的简单回顾	11
1.6.1 使用隐式方法求解位移	11
1.6.2 应力波传播的描述	13
1.7 关于 ABAQUS 实践教程	14
1.7.1 本书内容	14
1.7.2 本书中的一些约定	15
1.7.3 鼠标的基本操作	15
1.7.4 本书上篇中的有关章节	16
第2章 ABAQUS 基础	17
2.1 ABAQUS 分析模型的组成	17
2.2 ABAQUS/CAE 简介	19
2.2.1 启动 ABAQUS/CAE	19
2.2.2 主窗口的组成部分	20
2.2.3 什么是功能模块	22
2.3 例题:用 ABAQUS/CAE 生成桥式吊架模型	24
2.3.1 量纲	25
2.3.2 创建部件	26
2.3.3 创建材料	29
2.3.4 定义和赋予截面(section)特性	29
2.3.5 定义装配	31
2.3.6 设置分析过程	31
2.3.7 在模型上施加边界条件和载荷	34
2.3.8 模型的网格剖分	36
2.3.9 创建一个分析作业	38

2.3.10 检查模型	38
2.3.11 运行分析	39
2.3.12 用 ABAQUS/CAE 进行后处理	40
2.3.13 应用 ABAQUS/Explicit 重新运行分析	46
2.3.14 对动态分析的结果进行后处理	47
2.4 比较隐式与显式过程	49
2.4.1 在隐式和显式分析之间选择	49
2.4.2 在隐式和显式分析中网格加密的成本	50
小结	50
第3章 有限单元和刚性体	52
3.1 有限单元	52
3.1.1 单元的表征	52
3.1.2 实体单元	55
3.1.3 壳单元	58
3.1.4 梁单元	60
3.1.5 桁架单元	61
3.2 刚性体	62
3.2.1 确定何时使用刚性体	63
3.2.2 刚性体部件	63
3.2.3 刚性单元	64
3.3 质量和转动惯量单元	65
3.4 弹簧和减振器单元	65
小结	66
第4章 应用实体单元	67
4.1 单元的数学描述和积分	67
4.1.1 完全积分	68
4.1.2 减缩积分	70
4.1.3 非协调单元	72
4.1.4 杂交单元	73
4.2 选择实体单元	74
4.3 例题:连接环	75
4.3.1 前处理——应用 ABAQUS/CAE 建模	75
4.3.2 后处理——结果可视化	85
4.3.3 用 ABAQUS/Explicit 重新进行分析	97
4.3.4 后处理动力学分析结果	97
4.4 网格收敛性	102
4.5 例题:橡胶块中的沙漏(ABAQUS/Explicit)	105
4.5.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 创建模型	106
4.5.2 后处理	112

4.5.3 改变网格的效果	117
4.6 相关的 ABAQUS 例题	120
4.7 建议阅读的文献	120
小结	121
第 5 章 应用壳单元	123
5.1 单元几何尺寸	123
5.1.1 壳体厚度和截面点(section points)	123
5.1.2 壳法线和壳面	124
5.1.3 壳的初始曲率	125
5.1.4 参考面的偏移(reference surface offset)	126
5.2 壳体公式——厚壳或薄壳	126
5.3 壳的材料方向	127
5.3.1 默认的局部材料方向	127
5.3.2 建立可变的材料方向	128
5.4 选择壳单元	129
5.5 例题:斜板	129
5.5.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 建立模型	130
5.5.2 后处理	134
5.6 相关的 ABAQUS 例题	141
5.7 建议阅读的文献	141
小结	142
第 6 章 应用梁单元	143
6.1 梁横截面几何形状	143
6.1.1 截面点(section points)	144
6.1.2 横截面方向	144
6.1.3 梁单元曲率	145
6.1.4 梁截面的节点偏移	146
6.2 计算公式和积分	147
6.2.1 剪切变形	147
6.2.2 扭转响应——翘曲	148
6.3 选择梁单元	149
6.4 例题:货物吊车	149
6.4.1 前处理——应用 ABAQUS/CAE 创建模型	151
6.4.2 后处理	161
6.5 相关的 ABAQUS 例子	165
6.6 建议阅读的文献	165
小结	165
第 7 章 线性动态分析	167
7.1 引言	167

7.1.1 固有频率和模态	167
7.1.2 振型叠加	168
7.2 阻尼	169
7.2.1 在 ABAQUS/Standard 中阻尼的定义	170
7.2.2 选择阻尼值	170
7.3 单元选择	171
7.4 动态问题的网格剖分	171
7.5 例题:货物吊车——动态载荷	171
7.5.1 修改模型	173
7.5.2 结果	176
7.5.3 后处理	178
7.6 模态数量的影响	181
7.7 阻尼的影响	182
7.8 与直接时间积分的比较	183
7.9 其他的动态过程	184
7.9.1 线性模态法的动态分析	184
7.9.2 非线性动态分析	185
7.10 相关的 ABAQUS 的例子	185
7.11 建议阅读的文献	185
小结	186
第 8 章 非线性	187
8.1 非线性的来源	188
8.1.1 材料非线性	188
8.1.2 边界非线性	188
8.1.3 几何非线性	189
8.2 非线性问题的求解	190
8.2.1 分析步、增量步和迭代步	191
8.2.2 ABAQUS/Standard 中的平衡迭代和收敛	191
8.2.3 ABAQUS/Standard 中的自动增量控制	193
8.3 在 ABAQUS 分析中包含非线性	193
8.3.1 几何非线性	193
8.3.2 材料非线性	194
8.3.3 边界非线性	195
8.4 例题:非线性斜板	195
8.4.1 修改模型	195
8.4.2 作业诊断	197
8.4.3 后处理	201
8.4.4 用 ABAQUS/Explicit 运行分析	205
8.5 相关的 ABAQUS 例子	205

8.6 建议阅读的文献	205
小结	206
第9章 显式非线性动态分析	207
9.1 ABAQUS/Explicit 适用的问题类型	207
9.2 动力学显式有限元方法	208
9.2.1 显式时间积分	208
9.2.2 比较隐式和显式时间积分程序	209
9.2.3 显式时间积分方法的优越性	210
9.3 自动时间增量和稳定性	211
9.3.1 显式方法的条件稳定性	211
9.3.2 稳定性限制的定义	211
9.3.3 在 ABAQUS/Explicit 中的完全自动时间增量与固定时间增量	212
9.3.4 质量缩放以控制时间增量	213
9.3.5 材料对稳定极限的影响	213
9.3.6 网格对稳定极限的影响	213
9.3.7 数值不稳定性	213
9.4 例题: 在棒中的应力波传播	214
9.4.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 创建模型	214
9.4.2 后处理	219
9.4.3 网格对稳定时间增量和 CPU 时间的影响	224
9.4.4 材料对稳定时间增量和 CPU 时间的影响	225
9.5 动态振荡的阻尼	226
9.5.1 体粘性	226
9.5.2 粘性压力	227
9.5.3 材料阻尼	227
9.5.4 离散的减振器	228
9.6 能量平衡	228
9.6.1 能量平衡的表述	228
9.6.2 能量平衡的输出	228
9.7 弹簧和减振器的潜在不稳定性	229
9.7.1 确定稳定时间增量	231
9.7.2 识别非稳定性	232
9.7.3 消除不稳定性	235
小结	237
第10章 材料	239
10.1 在 ABAQUS 中定义材料	239
10.2 延性金属的塑性	239
10.2.1 延性金属的塑性性质	239
10.2.2 有限变形的应力和应变度量	240

10.2.3 在 ABAQUS 中定义塑性	240
10.3 弹-塑性问题的单元选取	244
10.4 例题:连接环的塑性	244
10.4.1 修改模型	245
10.4.2 作业监控和诊断	246
10.4.3 对结果进行后处理	251
10.4.4 在材料模型中加入硬化特性	252
10.4.5 运行考虑了塑性硬化的分析	252
10.4.6 对结果进行后处理	253
10.5 例题:加强板承受爆炸载荷	259
10.5.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 创建模型	260
10.5.2 后处理	266
10.5.3 分析的回顾	270
10.6 超弹性	273
10.6.1 引言	273
10.6.2 可压缩性	274
10.6.3 应变势能	275
10.6.4 应用试验数据定义超弹性行为	275
10.7 例题:轴对称橡胶支座	277
10.7.1 对称性	277
10.7.2 前处理——应用 ABAQUS/CAE 创建模型	278
10.7.3 后处理	285
10.8 大变形的网格设计	291
10.9 减少体积自锁的技术	292
10.10 相关的 ABAQUS 例题	293
10.11 建议阅读的文献	293
小结	294
第 11 章 多步骤分析	295
11.1 一般分析过程	295
11.1.1 在一般分析步中的时间	296
11.1.2 在一般分析步中指定载荷	296
11.2 线性摄动分析	296
11.2.1 在线性摄动分析步中的时间	297
11.2.2 在线性摄动分析步中指定载荷	297
11.3 例题:管道系统的振动	300
11.3.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 创建模型	300
11.3.2 对作业的监控	302
11.3.3 后处理	303

11.4 重启动分析	304
11.4.1 重启动和状态文件	304
11.4.2 重启动一个分析	304
11.5 例题:重启动管道的振动分析	306
11.5.1 创建一个重启动分析模型	306
11.5.2 监控作业	307
11.5.3 对重启动分析的结果作后处理	307
11.6 相关的 ABAQUS 例题	310
小结	311
第 12 章 接触	312
12.1 ABAQUS 接触功能概述	312
12.2 定义接触面	312
12.3 接触面间的相互作用	314
12.3.1 接触面的法向行为	314
12.3.2 表面的滑动	315
12.3.3 摩擦模型	315
12.3.4 其他接触相互作用选项	317
12.3.5 基于表面的约束	317
12.4 在 ABAQUS/Standard 中定义接触	318
12.4.1 接触相互作用	318
12.4.2 从属(slave)和主控(master)表面	318
12.4.3 小滑动与有限滑动	319
12.4.4 单元选择	319
12.4.5 接触算法	320
12.5 在 ABAQUS/Standard 中的刚性表面模拟问题	321
12.6 ABAQUS/Standard 例题:凹槽成型	323
12.6.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 建模	323
12.6.2 监视作业	335
12.6.3 ABAQUS/Standard 接触分析的故障检测	335
12.6.4 后处理	338
12.7 在 ABAQUS/Explicit 中定义接触	343
12.8 ABAQUS/Explicit 建模中需要考虑的问题	347
12.8.1 正确定义表面	347
12.8.2 模型的过约束	352
12.8.3 网格细化	352
12.8.4 初始过盈接触	353
12.9 ABAQUS/Explicit 例题:电路板跌落试验	354
12.9.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 建模	354
12.9.2 后处理	365

12.10 综合例题:筒的挤压	372
12.10.1 前处理——用 ABAQUS/CAE 创建模型	373
12.10.2 屈曲分析的结果	377
12.10.3 修改模型创建筒的挤压分析	378
12.10.4 挤压分析的结果	381
12.11 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的比较	383
12.12 相关的 ABAQUS 例题	383
12.13 建议阅读的文献	384
小结	384
第 13 章 ABAQUS/Explicit 准静态分析	386
13.1 显式动态问题类比	386
13.2 加载速率	387
13.2.1 光滑幅值曲线	387
13.2.2 结构问题	387
13.2.3 金属成型问题	389
13.3 质量放大	390
13.4 能量平衡	391
13.5 例题:ABAQUS/Explicit 凹槽成型	392
13.5.1 前处理——应用 ABAQUS/Explicit 重新运算模型	392
13.5.2 成型分析——尝试 2	397
13.5.3 两次成型尝试的讨论	398
13.5.4 加速分析的方法	402
小结	405

下篇 ABAQUS 应用实例

第 14 章 ABAQUS 在土木工程中的应用(一)	407
14.1 问题描述	407
14.2 斜拉桥建模	407
14.2.1 桥塔建模	409
14.2.2 拉索建模	409
14.2.3 桥面体系	410
14.2.4 数值方法的选取	411
14.3 静力分析和施工过程仿真	412
14.3.1 常规方式的静力分析	412
14.3.2 逐段加载	417
14.4 动态分析	423
14.4.1 模态分析	424
14.4.2 地震反应时程分析	430

第 15 章 ABAQUS 在土木工程中的应用(二)	434
15.1 钢筋混凝土圆柱形结构的倾倒分析	434
15.1.1 分析模型	434
15.1.2 ABAQUS 混凝土本构模型	434
15.1.3 混凝土中的加强筋	439
15.1.4 分析结果	440
15.2 牙轮钻头破岩过程模拟	446
15.3 大型储液罐的动力分析	449
15.3.1 问题描述	449
15.3.2 储液罐有限元模型	450
15.3.3 附加质量公式和单元模型	452
15.3.4 动力响应分析过程	454
15.3.5 动力响应分析结果与讨论	454
第 16 章 ABAQUS 多场耦合问题工程实例	456
16.1 一种新型高速客车空气弹簧的非线性有限元分析	456
16.1.1 前言	456
16.1.2 CAD 模型和 ABAQUS 有限元模型	456
16.1.3 空气弹簧的有限元计算结果与分析	458
16.1.4 计算结果和分析	460
16.2 多场耦合问题在水坝工程中的应用两例	462
16.2.1 变形场—温度场—渗流场分析(THM 分析)及堆石坝实例	463
16.2.2 掺 MgO 混凝土拱坝的施工/运行仿真分析(TCM 分析)	468
16.2.3 小结	473
16.3 复合材料层合板固化过程中的化学场、温度场耦合问题	473
16.3.1 前言	473
16.3.2 ABAQUS 有限元模型	474
16.3.3 材料属性	474
16.3.4 初始条件和边界条件	474
16.3.5 用户子程序	475
16.3.6 结果与分析	477
第 17 章 ABAQUS 在焊接工业中的应用	480
17.1 用 ABAQUS 软件进行插销试验焊接温度场分析	480
17.1.1 平板焊接温度场有限元分析及实测对比	480
17.1.2 插销试验的温度场	483
17.2 焊接接头氢扩散数值模拟	484
17.2.1 接头扩散过程的几项基本假设	485
17.2.2 初始条件和边界条件	485
17.2.3 焊接接头氢扩散计算结果	486

第 18 章 橡胶超弹性材料的应用实例	489
18.1 问题简介	489
18.2 橡胶各种本构关系模型	490
18.2.1 超弹性模型本构关系基本理论	490
18.2.2 各类超弹性本构模型	490
18.2.3 小结	494
18.3 过盈配合平面应力下的小变形解	495
18.4 过盈配合平面应力下的大变形解	498
18.5 体积刚度及泊松比对过盈配合的影响	501
18.5.1 体积刚度对过盈配合的影响	502
18.5.2 泊松比对过盈配合的影响	503
第 19 章 ABAQUS 用户材料子程序(UMAT)	504
19.1 引言	504
19.2 模型的数学描述	505
19.2.1 Johnson-Cook 强化模型简介	505
19.2.2 率相关塑性的基本公式	505
19.2.3 完全隐式的应力更新算法	506
19.3 ABAQUS 用户材料子程序	508
19.3.1 子程序概况与接口	508
19.3.2 编程	510
19.4 SHPB 实验的有限元模拟	511
19.4.1 分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验	511
19.4.2 有限元建模	512
19.4.3 二维动态分析	515
19.4.4 三维动态分析	524
19.5 UMAT 的 Fortran 程序	525
19.5.1 UMAT	525
19.5.2 UMATHT(包含材料的热行为)	531
第 20 章 ABAQUS 用户单元子程序(UEL)	533
20.1 非线性索单元	533
20.1.1 背景	533
20.1.2 基本公式	533
20.1.3 应用举例	534
20.1.4 非线性索单元用户子程序	536
20.2 利用 ABAQUS 用户单元计算应变梯度塑性问题	541
20.2.1 两种应变梯度理论	542
20.2.2 ABAQUS 用户单元的使用	544
20.2.3 有限元计算的结果	545

上篇 ABAQUS 应用指南

第1章 引言

1.1 HKS 与 ABAQUS

当中国人听到来自大洋彼岸的美国罗德岛州的 HKS 公司 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC., 现为 ABAQUS 公司) 的有限元软件命名为 ABAQUS 时, 会觉得那么熟悉和亲切, 因为我们中华民族的古老计算工具——算盘的英文就是 ABACUS, 二者发音相同, 仅一个字母之差。聪明的美国科学家利用它作为商标, 开发了汇集线性和非线性计算功能为一体的有限元软件, 并且成立了商业化运作的大型跨国有限元软件公司。

HKS 公司是由三个人发起创立的。在商用有限元软件的舞台上, David Hibbitt 是位举足轻重的人物。这位来自曼彻斯特市的英国人, 20 世纪 60 年代毕业于英国的剑桥大学, 70 年代初期在美国的布朗大学获得博士学位, 使他具备了坚实的工程力学基础和高超的计算编程能力。Hibbitt 与他的导师 Pedro Marcal 教授合作至 1972 年, 正是由于这个重要的合作, 以 Hibbitt 的博士论文工作为基础开发了 MARC 有限元软件。1969 年成立了 MARC 公司, 而该软件和公司的名字均为 Marcal 教授姓氏的前四个字母。MARC 公司在市场上经营了整整 30 年, 于 1999 年被 MSC 公司兼并, 但是 MARC 有限元软件仍然是 MSC 的主要产品。HKS 的另外两个主要人物是 Karlsson 博士和 Sorensen 博士, 他们在开始创业时, 在 Hibbitt 家的车库里写程序, 带着今天看来是“小儿科”的简单程序到企业去解决工程问题, 有时甚至是一边在修改程序还一边向工程师介绍程序。1978 年 2 月 1 日, 他们三人合作建立了 HKS 公司, 使 ABAQUS 商用软件进入市场。因为该程序是能够引导研究人员增加用户单元和材料模型的早期有限元程序之一, 受到了科研人员和工程师们的青睐, 它给有限元软件行业带来了实质性的冲击。

1997 年和 2000 年夏季, 本书的第一作者应邀两次到 Hibbitt 博士家中作客, 坐在他的位于罗德岛州大西洋港湾岸边的白色房子中, 望着远处水天一色的片片轻舟、点点白帆, 感受大西洋的暖风轻抚, 聆听 Hibbitt 博士讲述当年他们三人以 2000 美元创业的故事。从平静的交谈中可以体会到他们脚踏实地的创业精神和远见卓识。第一个十年, 公司平均每两个月增加一人; 第二个十年, 平均每个月增加一人; 最近五年, 平均每个月增加两人。人员稳步增加, 规模逐渐扩大, 市场不断发展, 资本良性循环, 经济健康运行。公司坚持私有企业性质, 没有泡沫, 没有浮躁, 所具有的只是工程师们在兢兢业业地编写软件以及诚信谨慎的商业运行, 使得公司得到平稳发展。

HKS 公司是在计算机硬件和软件发展的大环境下应运而生, 在激烈的全球市场竞争中生存并不断扩大。正是美国这种社会背景培养了人们的竞争精神, 使具有高水平科研能力的博士能够放弃待遇优厚和工作稳定的高校教授岗位, 白手起家创立计算机软件

公司, 开发和生产高技术的软件产品。目前 ABAQUS 公司已形成具有几十个分公司、拥有 300 多名员工的跨国有限元软件企业。

ABAQUS 有限元软件的发展适逢有限元数值计算的蓬勃兴起和虚拟科学与工程仿真的大量需求, 顺应历史者昌, 高瞻远瞩者进。下面首先介绍有限元著作和软件的发展历史。

1.2 有限元著作和软件的发展历史

近 50 年来, 发表了大量的有限元专著和文章, 其中一些成功的试验报道和专题文章, 它们完全或者部分地对有限元的发展做出了贡献。例如, 仅论述非线性有限元分析的包括 Oden (1972)、Crisfield (1991)、Kleiber (1989) 和 Zhong (1993) 等人的著作。特别值得注意的是 Oden 的书, 它是固体和结构非线性有限元分析的先驱著作。最近的有 Simo 和 Hughes (1998), Bonet 和 Wood (1997), Belytschko、Liu 和 Moran (2000) 等人的著作。某些著作还部分地对非线性分析做出了贡献, 它们是 Belytschko 和 Hughes (1983), Zienkiewicz 和 Taylor (1991), Bathe (1996), 以及 Cook、Malkus 和 Plesha (1989)。对于非线性有限元分析, 这些书提供了有益的入门指南。作为姐妹篇, 线性有限元分析的论述也是不可或缺的, 内容最全面的是 Hughes (1987)、Zienkiewicz 和 Taylor (1991) 等人的著作。

在我国比较有影响的有限元教材和专著包括浙江大学的谢贻权和何福保 (1981)、同济大学的徐次达和华伯浩 (1983)、清华大学的王勖成和劭敏 (1987, 1995)、王勖成 (2003) 等人的著作。

下面我们简要回顾有限元软件的发展历史。在信息与计算机时代, 像许多其他方面的进步一样, 在有限元分析中, 有限元软件常常比文献更好地代表了最新的进展, ABAQUS 正是在这个大环境中成长与成熟的, 通过优胜劣汰, ABAQUS 确立了自己在线性和非线性有限元中的主导软件地位。

追溯有限元发展的源头, 美国波音研究组的工作和 Turner、Clough、Martin 和 Topp (1956) 的著名文章, 使线性有限元分析得以闻名, 不久之后, 在许多大学和研究所里, 工程师们开始将有限元方法扩展至非线性、小位移的静态问题。但是, 它还难以燃起早期有限元社会的激情和改变传统研究者们对于这些方法的鄙视。例如, 因为考虑到没有科学的实质, 《Journal of Applied Mechanics》许多年都拒绝刊登关于有限元方法的文章。然而, 对于许多必须涉及工程问题的工程师们, 他们非常清楚地意识到有限元方法的前途, 它提供了一种处理复杂形状的真实问题的可能性, 这种求解的可能性是解析方法无法实现的。

在 20 世纪 60 年代, 由于 Ed Wilson 发布了他的第一个程序, 这种激情终于被点燃了。这些程序的第一代没有名字。在遍布世界的许多实验室里, 通过改进和扩展这些早期在 Berkeley 开发的软件, 工程师们扩展了新的用途; 这些带来了工程分析的巨大冲击和有限元软件的随之发展。在 Berkeley 开发的第二代线性程序称之为 SAP (structural analysis program)。由 Berkeley 的工作发展起来的第一个非线性程序是 NONSAP, 它具有隐式积分进行平衡求解和瞬态问题求解的功能。

第一批非线性有限元方法文章的主要贡献者有 Argyris (1965) 以及 Marcal 和 King (1967)。不久,一大批文章激增,而且软件随之诞生。当时在 Brown 大学任教的 Pedro Marcal,为了使第一个非线性商业有限元程序进入市场,于 1969 年建立了一个公司;程序命名为 MARC,目前它仍然是主要软件。大约在同期,John Swanson 为了核能应用在 Westinghouse 发展了一个非线性有限元程序。为了使 ANSYS 程序进入市场,他于 1969 年离开 Westinghouse。尽管 ANSYS 主要是关注非线性材料而非求解完全的非线性问题,它多年来仍垄断了商业有限元软件的舞台。

在早期的商用软件舞台上,另外两个主要人物是 David Hibbitt 和 Klaus-Jürgen Bathe。Hibbitt 与 Pedro Marcal 合作到了 1972 年,后来与其他人合作建立了 HKS 公司,使 ABAQUS 商用软件进入市场。Jürgen Bathe 是在 Ed Wilson 的指导下在 Berkeley 获得博士学位的,不久之后开始在 MIT 任教,这期间他发布了他的程序。这是 NONSAP 软件的派生产品,称为 ADINA。

直到大约 1990 年,商用有限元程序集中在静态解答和隐式方法的动态解答。在 70 年代,这些方法取得了非常大的进步,主要贡献来自于 Berkeley 和起源于 Berkeley 的研究人员:Thomas J. R. Hughes、Robert Taylor、Juan Simo、Jürgen Bathe、Carlos Felippa、Pal Bergan、Kaspar Willam、Ekerhard Ramm 和 Michael Ortiz。他们是 Berkeley 的杰出研究者的一部分。不容置疑,他们是早期年代的有限元的主要孵化人员。

当代有限元软件的另一支血脉是显式有限元程序。Wilkins (1964),特别是命名为 hydro-codes 的软件的诞生,在 DOE 实验室的工作强烈地影响了早期的显式有限元方法。

1964 年,Costantino 在芝加哥的 IIT 研究院发展了可能是第一个显式有限元程序 (Costantino, 1967)。它局限于线性材料和小变形,由带状刚度矩阵乘以节点位移计算内部的节点力。它首先在一台 IBM7040 系列计算机上运行,花费了数百万美元,其速度远远低于一个 megaflop (每秒 100 万次浮点运算) 和 32000BRAM。刚度矩阵存储在磁带上,通过观察磁带驱动能够监测计算的过程;当每一步骤完成时,磁带驱动将逆转以便允许阅读刚度矩阵。这些和以后的 Control Data 机器有类似的性能,如 CDC6400 和 6600,它们是 60 年代运行有限元程序的机器。一台 CDC6400 价值几乎为 1000 万美元,有 32KB 内存 (存储全部的操作系统和编译器) 和大约一个 megaflop 的真实速度。

1969 年,为了实现对美国空军销售的计划,研究人员开发了著名的单元乘单元的技术;节点力的计算不必应用刚度矩阵。因此,发展了名为 SAMSON 的二维有限元程序,它被美国的武器实验室应用了 10 年。1972 年,该程序功能扩展至结构的完全非线性三维瞬态分析,称为 WRECKER。这一工作得到美国运输部敢于幻想的计划经理 Lee Owenshire 的基金资助,他在 70 年代初期就预言汽车的碰撞试验可能被计算机仿真所代替。

然而,比他所预言的时间稍微提前了一点,在当时进行一个 300 个单元模型的模拟计算,对于 2000 万次模拟需要大约 30 小时的计算机机时,花费大约 3 万美元。Lee Owenshire 的计划资助了若干个开拓性的工作: Hughes 的接触-冲击工作、Ivor McIvor 的碰撞工作、以及由 Ted Shugar 和 Carly Ward 在 Port Hueneme 所从事的关于驾驶员人头的模拟研究。但是,大约在 1975 年,运输部认为仿真过于昂贵,决定所有的基金转