

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 and 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>

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(科印))

(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

<b>第 1 章 引言</b> .....	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
<b>第 2 章 ABAQUS 基础</b> .....	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
<b>第 3 章</b>	<b>有限单元和刚性体</b>	<b>52</b>
3.1	有限单元	52
3.1.1	单元的特征	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
<b>第 4 章</b>	<b>应用实体单元</b>	<b>67</b>
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
<b>第 5 章 应用壳单元 .....</b>	<b>123</b>
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(referance 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
<b>第 6 章 应用梁单元 .....</b>	<b>143</b>
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
<b>第 7 章 线性动态分析 .....</b>	<b>167</b>
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
<b>第 8 章</b>	<b>非线性</b>	<b>187</b>
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
<b>第 9 章</b>	<b>显式非线性动态分析</b> .....	<b>207</b>
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
<b>第 10 章</b>	<b>材料</b> .....	<b>239</b>
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
<b>第 11 章</b>	<b>多步骤分析 .....</b>	<b>295</b>
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	重新启动分析 .....	304
11.4.1	重新启动和状态文件 .....	304
11.4.2	重新启动一个分析 .....	304
11.5	例题:重新启动管道的振动分析 .....	306
11.5.1	创建一个重新启动分析模型 .....	306
11.5.2	监控作业 .....	307
11.5.3	对重新启动分析的结果作后处理 .....	307
11.6	相关的 ABAQUS 例题 .....	310
	小结 .....	311
<b>第 12 章</b>	<b>接触 .....</b>	<b>312</b>
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
<b>第 13 章</b>	<b>ABAQUS/Explicit 准静态分析</b> .....	<b>386</b>
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

<b>第 14 章</b>	<b>ABAQUS 在土木工程中的应用(一)</b> .....	<b>407</b>
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

<b>第 15 章</b>	<b>ABAQUS 在土木工程中的应用(二)</b>	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
<b>第 16 章</b>	<b>ABAQUS 多场耦合问题工程实例</b>	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
<b>第 17 章</b>	<b>ABAQUS 在焊接工业中的应用</b>	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

<b>第 18 章 橡胶超弹性材料的应用实例</b> .....	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
<b>第 19 章 ABAQUS 用户材料子程序(UMAT)</b> .....	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
<b>第 20 章 ABAQUS 用户单元子程序(UEL)</b> .....	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 Ovenshire 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 Ovenshire 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

向试验方面，使这些研究努力令人痛心地下停下来。在 Ford 公司，WRECKER 勉强维持生存了下一个十年。而在 Argonne，由 Belytschko 发展的显式程序被移植应用在核安全工业上，其程序命名为 SADCAT 和 WHAMS。

在 DOE 国家实验室，开始了平行的研究工作。1975 年，工作在 Sandia 的 Sam Key 完成了 HONDO，它也是具有单元乘单元功能的显式方法。该程序可以处理材料非线性和几何非线性问题，并且有精心编辑的文件。然而，这个程序遭遇到 Sandia 限制传播的政策，基于保密的原因，不允许发布程序。得益于 Northwestern 大学的研究生 Dennis Flanagan 的工作，使这些程序得到进一步的发展，他将程序命名为 PRONTO。

显式有限元程序发展的里程碑来自于 Lawrence Livermore 实验室的 John Hallquist 的工作。1975 年，John 开始他的工作，1976 年，他首先发布 DYNA 程序。他慧眼吸取了前面许多人的成果，并且与 Berkeley 的研究人员紧密交流合作，包括 Jerry Goudreau、Bob Taylor、Tom Hughes 和 Juan Simo。他之所以成功的关键因素是与 Dave Benson 合作发展了接触—冲击相互作用，和他的令人敬畏的编程效率，以及计算程序 DYNA-2D 和 DYNA-3D 的广泛传播。与 Sandia 相比，对于程序的传播，在 Livermore 几乎没有任何障碍，因此，像 Wilson 的程序和 John 的程序，不久后将在全世界的大学、政府和工业实验室里到处可见。它们不容易被修改，但是，的确发展了许多新的以 DYNA 程序作为试验台的想法。

Hallquist 关于有效接触—冲击算法的发展（与今天的有效算法相比，是原始的第一批算法，但是仍然常常采用它们）、采用一点积分单元和高阶矢量使得工程仿真得以有显著性突破的可能。矢量似乎已经与新一代计算机无关，但是，在 80 年代以 Cray 机为主的计算机上运行大型问题，矢量是至关重要的。由于一点积分单元与砂漏控制的一致性，通过几乎是一阶量值的完全积分三维单元，可以提高三维分析的速度。

在 20 世纪 80 年代，DYNA 程序首先被法国 ESI 公司商品化，命名为 PAM-CRASH，它与 WHAMS 也有许多相关的子程序。1989 年，John Hallquist 离开了 Livermore，开始经营他自己的公司，扩展 LSDYNA——商业版的 DYNA 程序。

在过去的十年，计算机成本的迅速下降和显式程序功能的强健带来了设计的革命。第一个主要的应用领域是有价值的汽车碰撞，然后，应用的领域迅速地扩展。在越来越多的工业领域，有限元仿真正在代替样品原型的试验。产品设计依赖于仿真正常工作、跌落试验和其他极端加载情况的帮助，例如蜂窝电话、手提电脑、洗衣机、工具和许多其他产品。制造过程也应用有限元进行仿真，例如锻压、薄金属板成型和挤压。对于某些仿真问题，隐式方法的功能也变得越来越强，很明显，两种方法的功能都是必要的。例如，显式方法可能最适合仿真薄金属板成型的加工过程，在回弹过程模拟中，隐式方法是更合适的。

今天，隐式方法（如 ABAQUS/Standard）比显式方法（如 ABAQUS/Explicit）的功能增加得更加迅速，对于处理非线性约束，例如接触和摩擦，隐式方法已经有了明显的改进。稀疏迭代求解器也已经成为更加有效的工具。今天，强健的功能需要两种方法的交互使用和有效性，随着不断产生的工业问题和科学研究课题，两种方法都还有着漫漫路程。

## 1.3 有限元带来设计的革命

有限元分析是计算机辅助设计的基本组成部分。由于它提供了更快捷和低成本的方式评估设计的概念和细节，因此，人们越来越多地应用有限元仿真的方法代替样品原型的试验。例如，在汽车设计领域中，对初期设计概念和最终设计细节的评估，碰撞的仿真代替了整车的试验，如布置判定气囊释放的加速计和气囊释放的释放过程、内部的缓冲装置，以及选择材料和满足碰撞准则的构件截面。在许多制造领域中，可以进行加工过程的仿真，从而加速了设计过程，例如金属薄板成型、挤压和铸造。在电子工业中，为了评估产品的耐久性，仿真分析代替了跌落试验。

应用和开发有限元程序的工程师必须理解有限元分析的基本概念。若不理解基本概念，有限元程序就只是一个提供仿真的黑匣子。诚然，商用软件只提供给用户前后处理和执行文件，其源程序对于用户就是黑匣子。这样，分析者将面对许多选择和困惑，若不理解软件所包含的内容和这些选项的内涵，分析者将非常被动。

本书的目的是描述 ABAQUS 有限元软件的方法，既然是实践教程，就要给使用者提供应用 ABAQUS 的能力。我们的意图是提供一种比较全面的阐述，这样使读者能够获得对基本方法的理解，对具体操作的掌握，正确对待潜藏在 ABAQUS 世界中的困难，即在计算理论和方法中的困惑。同时，结合我们多年的实践和经验，也足够详细地给出了各种方法的实现过程以便读者能够应用。

有限元分析包含下列步骤：

- 1) 建立模型。
- 2) 推导方程的公式。
- 3) 离散方程。
- 4) 求解方程。
- 5) 表述结果。

第 2) ~ 4) 项已在典型的分析程序中实现，而分析者的工作体现在第 1) 和第 5) 项。

在过去的十年中，在发展仿真方面有了显著地变化。直到 20 世纪 80 年代，建模注重提取反映力学性能的基本单元，目的是使这些基本单元能够与所复制的研究力学性能的最简单模型一致。现在，建立一个单一的、详细的设计模型并应用它检验所有的、必要的工业准则，在工业界已经成为非常普遍的方法。这种模拟方式的动力在于，对于一种工业产品生成几种网格的成本远高于生成对每种应用都适用的特殊网格的成本。例如，同样一个便携式计算机的有限元模型可以用来进行跌落仿真、线性静力分析和热应力分析。通过使用同一个模型进行所有这些分析，节省了大量的工程研制时间。而这种在工业中正成为非常普通的方式，还没有被推荐应用于所有的领域。

在最近的将来，有限元模型可能成为“虚拟”的样品原型，可以用来检验设计性能的许多方面。计算机机时的节省和计算机速度的提高使得这一方式更加有效。然而，对于特殊的分析，有限元软件的使用者还必须能够评估有限元模型的适用性和限制条件。

今天，方程公式的推导和离散主要掌握在软件开发者的手中。然而，由于某些方法

和软件可能应用的不合适，一位不理解软件基本内容的分析者会面对许多风险。而且，为了将试验数据转换为输入文件，分析者必须清楚在程序中所应用的和由实验人员提供材料数据的应力和应变的度量，分析者必须理解和知道如何评估数据响应的敏感程度。一位有效率的分析者必须清楚容易产生误差的来源，如何检查这些误差和评价误差的量级，以及各种算法的限制和误差影响量。

求解离散方程也面临许多选择。一种不恰当的选择将导致冗长的计算时间消耗，从而使分析者在规定的时间内无法获得结果。为了实现建立一个合理的模型和选择最佳的求解过程的良好策略，了解各种求解过程的优势和劣势以及所需要的大致计算机时是非常必要的。

分析者最重要的任务是表述结果。除固有的近似之外，即便是线性有限元模型，对于许多参数的分析常常是敏感的，这种敏感性可能将模拟引入歧途或者走向成功。非线性固体可能经历非稳态，其结果可能主要取决于材料的参数，对缺陷的反应可能是敏感的。除非分析者对于这些现象非常清醒，否则很有可能错误地描述模拟的结果。

尽管有以上这些困惑，对于有限元分析的用途和前景，我们持非常乐观的态度。在许多工业领域中，有限元分析已经缩短了设计周期，大大减少了原型试验的成本。由于仿真产生各种变化的输出，使人们很容易去做“倘使……将会怎样”的尝试，因此仿真能够极大地改进工程师对其产品在各种环境下的基本物理性能的理解程度。而从试验中只能得到产品是否能经受一种确定环境的大体的并且是重要的结果，如果产品不能满足要求，这些试验通常几乎不提供产品重新设计时所依据的性能的细节。另一方面，计算机仿真给出了详细的应力和应变以及其他状态变量的历史，这些数据掌握在一名优秀的有洞察力的工程师手中，为他提供了如何重新设计产品的有价值的资料。

类似许多有限元书籍，本书大量地展示了对于工程和科学问题应用 ABAQUS 求解的各种方法和技巧。然而，为了便于自学，请读者注意学习的方法：

- 1) 对于要解决的问题，如何选择合适的隐式或显式的方法和程序。
- 2) 对于给定的问题，如何选择合适的有限元网格描述以及动力学和运动学的方法。
- 3) 如何检验计算的平滑性和求解过程的稳定性。
- 4) 如何认识计算中所隐含的求解质量和困难。
- 5) 如何判断主要假设的作用和误差的来源。

对于许多包含过程仿真的大变形问题和破坏分析，选择合适的网格描述是非常重要的，例如，是否应用 Lagrangian（拉格朗日）、Eulerian（欧拉）或者 Arbitrary Lagrangian Eulerian（ALE——任意的拉格朗日-欧拉）网格，需要认识网格畸变的影响，在选择网格时必须牢牢记住不同类型网格描述的优点。

在仿真过程中，普遍存在着稳定性的问题。在数值模拟中，很可能获得物理上的不稳定，因而得到相对无意义的解答。对于不完备的材料和载荷参数，许多解答是敏感的；在某些求解情况下，甚至是敏感于所采用的网格。一位睿智的有限元软件实用者必须清醒这些特性，估计到可能遇到的陷阱，否则，由计算机仿真精心制作的结果可能是错误的，也可能导致不正确的设计精度。

在有限元分析中，平滑性也是普遍存在的问题。缺乏平滑性会降低大多数算法的强劲功能，并可能在结果中引入不期望的波动。目前已经发展了改进响应平滑性的技术，

它们称为调整过程。然而，调整过程常常并不基于物理现象，在许多情况下难以确定与调整相关的常数。因此，分析者常常面临进退两难的窘境，是否选择导致平滑求解的方法或者处理不连续的响应。我们非常希望分析者能够理解调整参数和存在隐含调整的效果，例如在接触-碰撞中的罚函数方法、有限滑移和小滑移、过盈和侵入，以及正确地应用和评价这些方法。

在非线性分析中，结果的精度和稳定性是重要的问题，这些问题以多种方式出现。例如，在选择单元的过程中，分析者必须清楚稳定性和各种单元的锁定特性。单元的选择包括多种因素，例如，对于求解问题的单元的稳定性和结果的期望平滑性，以及期望变形的量级。此外，分析者必须清楚非线性分析的复杂性。对于出现物理和数值非稳定性的可能性，必须给予密切关注和在求解过程中检查。

因此，在工业设计和科学研究中，精通有限元软件（如 ABAQUS）非常重要。同时，要求分析者重视对于非线性有限元方法的理解，提供这种理解和使读者能够清楚在 ABAQUS 分析中许多有兴趣的挑战和机遇，这正是本书的目的。

## 1.4 在设计中应用 ABAQUS

ABAQUS 是一套功能强大的基于有限元方法的工程模拟软件，它可以解决从相对简单的线性分析到极富挑战性的非线性模拟等各种问题。ABAQUS 具备十分丰富的单元库，可以模拟任意实际形状；ABAQUS 也具有相当丰富的材料模型库，可以模拟大多数典型工程材料的性能，包括金属、橡胶、聚合物、复合材料、钢筋混凝土、可压缩的弹性泡沫，以及地质材料，例如土壤和岩石等。作为一种通用的模拟工具，应用 ABAQUS 不仅能够解决结构分析（应力/位移）问题，而且能够模拟和研究包括热传导、质量扩散、电子元器件的热控制（热-电耦合分析）、声学、土壤力学（渗流-应力耦合分析）和压电分析等广阔领域中的问题。

ABAQUS 为用户提供了广泛的功能，使用起来又十分简便。即便是最复杂的问题也可以很容易地建立模型。例如，对于多部件问题，通过对每个部件定义合适的材料模型，然后将它们组装成几何构形。对于大多数模拟，包括高度非线性的问题，用户仅需要提供如结构的几何形状、材料性能、边界条件和载荷工况这些工程数据。在非线性分析中，ABAQUS 能自动选择合适的载荷增量和收敛准则，ABAQUS 不仅能够自动选择这些参数的值，而且在分析过程中也能不断地调整这些参数值，以确保获得精确的解答。对于控制问题的数值求解，用户几乎不必去定义任何参数。

## 1.5 ABAQUS 产品

### 1.5.1 ABAQUS 软件产品

ABAQUS 由两个主要的分析模块组成：ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。其中在 ABAQUS/Standard 中还附加了三个特殊用途的分析模块：ABAQUS/Aqua、ABAQUS/Design 和 ABAQUS/Foundation。另外，ABAQUS 还分别为 MOLDFLOW 和 MSC.ADAMS 提供了 MOLDFLOW 接口和 ADAMS/Flex 接口。ABAQUS/CAE 是集成

的 ABAQUS 工作环境，它包括了 ABAQUS 模型的建模、交互式提交作业和监控运算过程，以及结果评估（即后处理）等能力。ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子模块，它只包括其中的后处理功能，这些模块之间的关系见图 1-1。

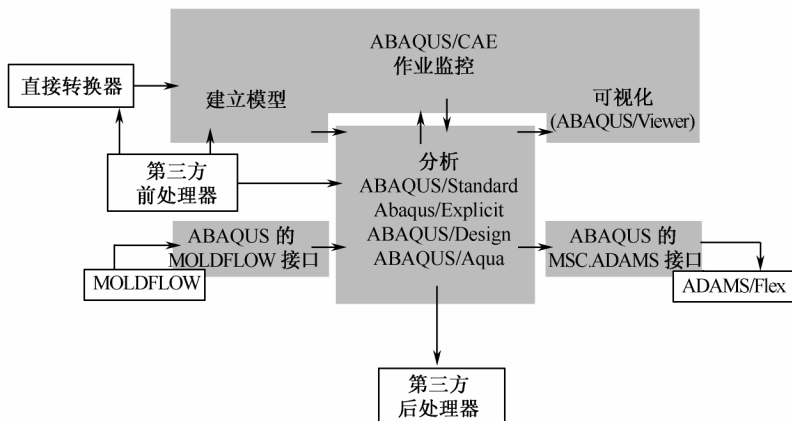


图 1-1 ABAQUS 产品

### 1. ABAQUS/Standard

ABAQUS/Standard 是一个通用分析模块，它能够求解领域广泛的线性和非线性问题，包括静力、动力、构件的热和电响应的问题。这个模块将在本书中详细讨论。

### 2. ABAQUS/Explicit

ABAQUS/Explicit 是一个具有专门用途的分析模块，采用显式动态有限元格式，它适用于模拟短暂、瞬时的动态事件，如冲击和爆炸问题，此外，它在处理包括改变接触条件的高度非线性问题时也非常有效，例如模拟成型问题。这个模块也将在本书中详细讨论。

### 3. ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE (complete ABAQUS environment) 是 ABAQUS 的交互式图形环境。通过生成或输入将要分析结构的几何形状，并将其分解为便于网格划分的若干区域，用户应用它可方便而快捷地构造模型，然后对生成的几何体赋予物理和材料特性、载荷以及边界条件。ABAQUS/CAE 包括对几何体剖分网格的强大功能，并可检验所形成的分析模型。模型生成后，ABAQUS/CAE 可以提交、监视和控制分析作业。而 Visualization (可视化) 模块可以用来显示得到的结果。本书中将对 ABAQUS/CAE 进行讨论。

### 4. ABAQUS/Viewer

ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子模块，它只包含了可视化模块的后处理功能。本书中对可视化模块的讨论都适用于 ABAQUS/Viewer。

## 5. ABAQUS/Aqua

ABAQUS/Aqua 是一套选择功能，可以附加到 ABAQUS/Standard 模块。它的功能在于模拟近海结构，如海上石油钻井平台；其他一些功能包括模拟波浪、风载及浮力的影响。

## 6. ABAQUS/Design

ABAQUS/Design 是一套选择功能，可以附加到 ABAQUS/Standard 模块，用于进行设计敏感度的计算。

## 7. ABAQUS/Foundation

ABAQUS/Foundation 为 ABAQUS/Standard 提供了一套更高效的处理线性静力和动力分析的功能。

## 8. ABAQUS 的 MOLDFLOW 接口

ABAQUS 的 MOLDFLOW 接口将 MOLDFLOW 分析软件中的有限元模型信息转换并写成 ABAQUS 输入文件的一部分。

## 9. ABAQUS 的 MSC.ADAMS 接口

ABAQUS 的 MSC.ADAMS 接口允许 ABAQUS 有限元模型作为柔性部件输入到 MSC.ADAMS 系列产品中。这个接口是基于 ADAMS/Flex 的子模态综合格式。

### 1.5.2 ABAQUS 文档

ABAQUS 具有一套内容丰富和完整的文档。以下文档和出版物，除非特别说明，均可从 ABAQUS 公司得到。这套文档包括印刷品文档和在线文档两种形式。有关使用在线文档的更多信息，请参考在 ABAQUS 分析用户手册（ABAQUS Analysis User's Manual）中关于操作过程的讨论内容。

#### 1. ABAQUS 分析用户手册（ABAQUS Analysis User's Manual）

这是最常用的 ABAQUS 手册。它是包含了 ABAQUS 所有功能的参考手册，包括对单元、材料模型、分析过程、输入格式等内容的完整描述。本书会经常提到 ABAQUS 分析用户手册的内容，因此当读者运算例题时，最好具备该手册以便经常查阅。

#### 2. ABAQUS/CAE 用户手册（ABAQUS/CAE User's Manual）

该手册一开始便通过三个便于理解的教程详细说明了如何运用 ABAQUS/CAE 生成模型、分析、对结果进行评估和可视化。该手册中关于 Visualization（可视化）模块的内容同样适用于 ABAQUS/Viewer。

### 3. ABAQUS 在线文档使用手册 (Using ABAQUS Online Documentation)

该在线手册包括指导怎样阅读和搜索 ABAQUS 在线文档。

4. ABAQUS 公司提供的其他手册还有以下几种。

#### 1) ABAQUS 实例手册 (ABAQUS Example Problem Manual)。

该手册包含了多达 75 个详细实例，设计这些例子用来演示那些有意义的线性和非线性计算分析的方法和结果。典型的例题有：弹塑性管撞击刚性墙产生的大运动；薄壁弯管的非弹性屈曲破坏；弹性粘塑性薄环承受爆炸载荷；基础的加固；带孔洞复合材料壳的屈曲；以及金属薄板的大变形拉伸等。每一个例题的说明中都包括了对单元类型和网格密度选择的讨论。

当用户想使用一个以前从未用过的功能时，需要参考一个或多个使用了该功能的例子；通过这些例子，可以使用户熟悉如何正确地使用这种功能。为了查找使用某个功能的例子，可以搜索在线文档或利用 **ABAQUS findkeyword** (查询关键字) 工具 (见 ABAQUS 分析用户手册的第 3.2.11 节 “Execution procedure for querying the keyword/problem database” 可获得更详细的信息)。与这些例子有关的所有输入文件都已在 ABAQUS 安装时提供。帮助获取这些文件的工具称为 **ABAQUS/Fetch** (获取)，它包含在每一个 ABAQUS 版本中。其语法为

```
abaques fetch job=<文件名>
```

用户可以从安装目录中提取任何一个例题文件，然后自己运行一遍模拟分析并观察计算结果。也可以通过 ABAQUS 实例手册中的超链接进入例题的输入文件。

#### 2) ABAQUS 基准校核手册 (ABAQUS Benchmark Manual)。

该手册只有在线版本，它包含了用于评估 ABAQUS 性能的基准问题和标准分析，将其结果与精确解和其他已经发表的结果进行比较。这些问题与实例问题一样为学习各种单元和材料模型的性能提供了很好的起点。该手册包含了 NAFEMS 基准问题，其输入文件也在安装时提供，提取的方法与提取例题手册中输入文件的方法相同。

#### 3) ABAQUS 验证手册 (ABAQUS Verification Manual)。

该手册只有在线版本，它包括了对 ABAQUS 每一种特定功能 (分析过程、输出选项、多点约束等) 进行质量评估的基本测试问题。当学习使用一种新的功能时，运行这些问题会对用户很有帮助。获得这些基准问题的输入文件同样存在于安装目录中，可以用上面提到的获取例题输入文件的方法来获得。

#### 4) ABAQUS 理论手册 (ABAQUS Theory Manual)。

该手册只有在线版本，它包括关于 ABAQUS 理论方面的详尽而严谨的讨论，其内容是具有工程背景的用户而写的，并不需要用作日常参考。

#### 5) ABAQUS 关键词参考手册 (ABAQUS Keyword Reference Manual)。

该手册提供了在 ABAQUS 中全部输入选项的完整描述，包含对每个选项中可能使用的任何参数的说明。

#### 6) ABAQUS 版本说明 (ABAQUS Release Notes)。

该文本包含了 ABAQUS 产品序列的最新版本中新增功能的简要描述。

7) ABAQUS 安装和授权指南 (ABAQUS Installation and Licensing Guide)。

在每一个 ABAQUS 授权中都提供了该指南, 它描述了如何安装 ABAQUS 和如何针对特定的环境设置安装。其中与用户最相关的一些信息, 也包含在用户手册中。

8) 质量保证计划 (Quality Assurance Plan)。

该文件阐述了 ABAQUS 的质量保证 (QA) 程序。它是一个控制文件, 只提供给订购了核心质量保证程序 (Nuclear QA Program) 或质量监视服务 (Quality Monitoring Service) 的用户。

9) 讲义 (Lecture Notes)。

讲义和专题培训班可以帮助用户理解许多 ABAQUS 的使用性能和实际应用, 例如金属成型或热传导。在技术研讨会上, ABAQUS 公司通过讲义帮助用户改进他们对 ABAQUS 软件的理解和使用。尽管讲义并不是一个完全独立的学习资料, 但是其内容的丰富足以帮助用户理解 ABAQUS。关于某一专题的讲义通常可用作该专题的入门教材, 使得用户手册更容易被理解。在手册的价格清单中包括了现有的讲义目录, 或者可以在 ABAQUS 公司主页 [www.abaqus.com](http://www.abaqus.com) 的产品 (products) 子页中找到讲义目录。

## 1.6 有限元法的简单回顾

本节将回顾有限元的基础知识。任何有限元模拟的第一步都是用一个**有限单元** (finite element) 的集合**离散** (discretize) 结构的实际几何形状, 每一个单元代表这个实际结构的一个离散部分。这些单元通过共用**节点** (node) 来连接。节点和单元的集合称为**网格** (mesh)。在一个特定网格中的单元数目称为**网格密度** (mesh density)。在应力分析中, 每个节点的位移是 ABAQUS 计算的基本变量。一旦节点位移已知, 每个单元的应力和应变就可以很容易地求出。

### 1.6.1 使用隐式方法求解位移

一端约束而另一端加载的桁架的简单例子, 如图 1-2 所示, 我们将通过这个简单算例介绍本书中将使用的一些术语和约定。这个分析的目的是求解桁架自由端的位移、桁架中的应力以及桁架约束端的反力。

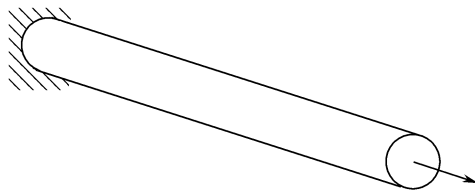


图 1-2 桁架问题

在图 1-2 所示的模型中, 将圆杆离散成两个桁架单元。ABAQUS 的桁架单元只能承受轴向载荷。在图 1-3 中显示了离散模型, 并标出了节点和单元编号。

图 1-4 显示了模型中每个节点的分离图。在通常情况下, 模型中的每个节点将承受

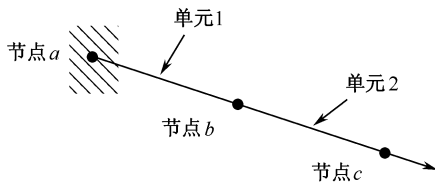


图 1-3 桁架问题的离散化模型

外部载荷  $P$  和内部载荷  $I$ ，后者是由于节点相连单元的应力引起的。对于一个处于静平衡状态的模型，每个节点上的合力必须为零，即每个节点上的外部载荷和内部载荷必须相互平衡。对于节点  $a$ ，其平衡方程可如下建立。

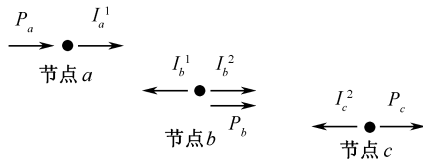


图 1-4 每个节点的分离图

假设圆杆的长度变化很小，则单元 1 的应变可表示为

$$\epsilon_{11} = \frac{u^b - u^a}{L}$$

其中  $u^a$  和  $u^b$  分别是节点  $a$  和  $b$  的位移， $L$  是单元的初始长度。

假设材料是弹性的，圆杆的应力可以通过应变乘以杨氏模量  $E$  给出：

$$\sigma_{11} = E\epsilon_{11}$$

作用在端部节点的轴向力等于圆杆的应力乘以其横截面积  $A$ 。这样，内力、材料性能和位移的关系给出：

$$I_a^1 = \sigma_{11} A = E\epsilon_{11} A = \frac{EA}{L}(u^b - u^a)$$

在节点  $a$  处的平衡方程因此可以写成

$$P_a + \frac{EA}{L}(u^b - u^a) = 0$$

节点  $b$  的平衡必须同时考虑与该节点相连的两个单元的内力。对于节点  $b$ ，单元 1 的内力作用在反方向上，因此变为负值。平衡方程为

$$P_b - \frac{EA}{L}(u^b - u^a) + \frac{EA}{L}(u^c - u^b) = 0$$

节点  $c$  的平衡方程为

$$P_c - \frac{EA}{L}(u^c - u^b) = 0$$

对于隐式方法，这些平衡方程需要同时进行求解以获取每个节点的位移。以上求解最好采用矩阵算法；因此，我们将内力和外力的贡献写成矩阵形式。如果两个单元的性质和维数相同，平衡方程可以化简成如下形式：

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \left[ \frac{EA}{L} \right] \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{Bmatrix} = 0$$

通常情况下，每个单元的刚度（本例中的  $EA/L$  项）是不同的。因此，可以将模型中两个单元的刚度分别写成  $K_1$  和  $K_2$ 。我们感兴趣的是获得平衡方程的解答，使施加的外力  $P$  与产生的内力  $I$  达到平衡。若考虑到问题的收敛性和非线性，可以将平衡方程写成

$$\{P\} - \{I\} = 0$$

对于完整的两单元三节点结构，经过这种符号变换后，可以将平衡方程重写为

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0$$

在隐式方法中（例如应用 ABAQUS/Standard），由此方程组能够解出三个未知变量的值： $u^b$ 、 $u^c$  及  $P_a$ （在该问题中， $u^a$  已指定为 0,0）。一旦位移求出后，就能利用位移返回计算出桁架单元的应力。当每一个求解增量步结束时，隐式的有限元方法要求解一组方程组。

显式方法与隐式方法相反，例如应用在 ABAQUS/Explicit 中的显式方法，并不需要同时求解一套方程组或计算整体刚度阵。求解是通过动态方法从一个增量步前推到下一个增量步得到的。在下节中，将介绍显式动力学有限元方法的内容。

### 1.6.2 应力波传播的描述

本节试图提供从概念上理解应用显式动力学算法时应力是如何在模型中传播的。在这个演示例子中，我们考虑应力波沿着一个由三个单元构成的杆件模型传播的过程，如图 1-5 所示。随着时间增量的变化，我们将研究杆件的各个状态。

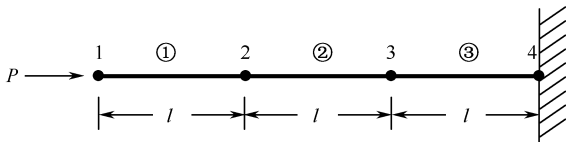


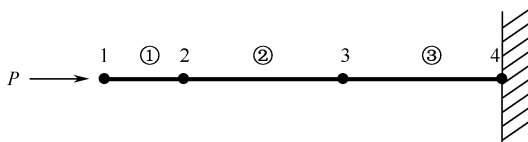
图 1-5 自由端作用有集中力  $P$  的杆件的初始状态

在第一个时间增量段，施加在节点 1 的集中力  $P$  使节点 1 产生了一个加速度  $\ddot{u}_1$ 。这个加速度引起节点 1 产生速度  $\dot{u}_1$ ，在单元 1 内引起应变速率  $\dot{\epsilon}_{e11}$ 。在第一个时间增量段内对应变速率进行积分就获得了单元 1 的应变增量  $d\epsilon_{e11}$ 。总应变  $\epsilon_{e11}$  是初始应变  $\epsilon_0$  和应变增量的和，在这个问题中的初始应变为零。一旦计算出了单元应变，就可以通过材料的本构模型求出单元的应力  $\sigma_{e11}$ 。对于线弹性材料，应力是弹性模量与总应变的乘积。这个过程如图 1-6 中所示。在第一个时间增量段里，节点 2 和 3 因为没有力作用在其上，所以没有移动。

在第二个时间增量段，由单元 1 的应力产生的单元内力被施加到了与单元 1 相连的

所有节点上，如图 1-7 所示。然后应用这些单元应力计算节点 1 和节点 2 的动力平衡方程。

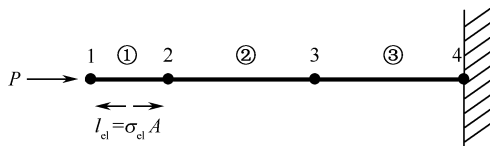
这个过程继续下去，到第三个时间增量段开始时，单元 1 和 2 中都已存在了应力，而节点 1、2 和 3 则存在了作用力，如图 1-8 所示。这个过程将一直继续下去，直到总的分析时间结束。



$$\ddot{u}_1 = \frac{P}{M_1} \Rightarrow \mathbf{n}_1 = \int \ddot{u}_1 dt \Rightarrow \mathbf{e}_{e11} = \frac{-\mathbf{n}_1}{l} \Rightarrow d\epsilon_{e11} = \int \mathbf{e}_{e11} dt$$

$$\Rightarrow \epsilon_{e11} = \epsilon_0 + d\epsilon_{e11} \Rightarrow \sigma_{e11} = E\epsilon_{e11}$$

图 1-6 自由端作用有集中力的杆件在第一个时间增量段结束时的状态



$$\ddot{u}_1 = \frac{P - I_{e11}}{M_1} \Rightarrow \mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_1^{old} + \int \ddot{u}_1 dt \quad \mathbf{e}_{e11} = \frac{\mathbf{n}_2 - \mathbf{n}_1}{l} \Rightarrow d\epsilon_{e11} = \int \mathbf{e}_{e11}$$

$$\Rightarrow \epsilon_{e11} = \epsilon_1 + d\epsilon_{e11}$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{I_{e11}}{M_2} \Rightarrow \mathbf{n}_2 = \int u_2 dt \quad \Rightarrow \sigma_{e11} = E\epsilon_{e11}$$

图 1-7 杆件在第二个时间增量段开始时的状态

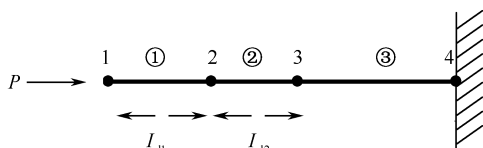


图 1-8 杆件在第三个时间增量段开始时的状态

## 1.7 关于 ABAQUS 实践教程

### 1.7.1 本书内容

本书分为两篇，第一篇是提供给用户 ABAQUS 的基础内容和应用指南，使他们能够应用 ABAQUS/CAE 前处理生成实体、壳体和框架模型，并应用 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 对模型进行静力和动力分析，在可视化模块中监控求解进程和观察后处理结果。

建议用户首先应具备有限元方法的基本知识，然而无须任何 ABAQUS 的预备知识就可以从本书中获益。本书仅涉及了应力/位移问题的模拟计算，关注线性和非线性的静态分析，以及动态分析；而并没有涉及其他类型的模拟，如热传导和质量扩散问题。这里假定用户应用 ABAQUS/CAE 建模。如果用户不能进入 ABAQUS/CAE 或者其他前处理程序，也可以应用其他手册中的例题，人工创建 ABAQUS 所要求的输入文件。

本书的第二篇是 ABAQUS 在科学与工程问题中的应用实例。大部分内容来自清华大学工程力学系高级有限元中心 (AFES) 的工作，其余部分选自 1998~2003 年的 ABAQUS 中国用户会议论文集。在这些应用实例中，有土木工程、橡胶减震元件、实验模拟、开发用户单元与材料接口程序等。这些是我们多年经验的总结，相信会成为初学者的良师益友。

### 1.7.2 本书中的一些约定

在演示例题中分别采用不同的字体，例如：

1) 用 Courier Font 字体表示需要用户准确按照书中所示键入到 ABAQUS/CAE 或用户计算机中的字符。例如

```
abaqus cae
```

在计算机中键入这个命令运行 ABAQUS/CAE。

2) 在 ABAQUS/CAE 屏幕上的菜单选项、对话框中标记和分项标签将以黑体表示：

**View**→**Graphics Options**  
**Deformed Sharpe Plot Options**

### 1.7.3 鼠标的的基本操作

图 1-9 所示为左右手三键鼠标各键的方位，以下术语描述了所使用鼠标的各项功能。

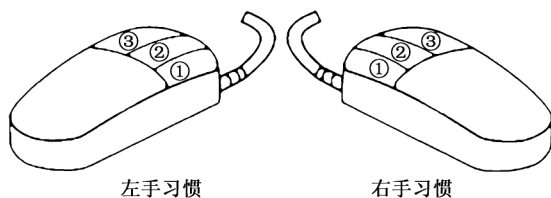


图 1-9 鼠标键

**单击 (Click)**：按下并快速松开鼠标键，除非特别指出，“单击”均指单击鼠标的键 1。

**拖动 (Drag)**：按住键 1 移动鼠标。

**指向 (Point)**：移动鼠标使光标到达指定项的位置。

**选取 (Select)**：使光标指向某一项后，单击键 1。

**Shift+单击 (Click)**：按住 Shift 键，单击键 1，然后松开 Shift 键。

**Ctrl+单击 (Click)**：按住 Ctrl 键，单击键 1，然后松开 Ctrl 键

ABAQUS/CAE 设计使用的鼠标为三键鼠标，因此本书中将参照图 1-9 所示的鼠标键 1、2 和 3 键。然而，ABAQUS/CAE 也可以按如下方法应用二键鼠标：

- 1) 两个鼠标键分别相当于三键鼠标中的 1、3 键。
- 2) 同时按下两个键相当于按下三键鼠标中的 2 键。

**提示：**在本手册中提及的各个操作过程中要经常单击鼠标的 2 键，所以必须首先要确认鼠标 2 键（或滚轮键）的动作已设置为鼠标中键。

#### 1.7.4 本书上篇中的有关章节

本书是使用 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的参考指南。在每一个求解增量步（increment）中，ABAQUS/Standard 隐式地求解一套方程组；相比之下，ABAQUS/Explicit 在时间域中以很小的时间增量步前推出结果，无须在每一个增量步求解耦合的方程系统（或者生成总体刚度矩阵）。在手册中，应用术语 ABAQUS 整体地代表 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit；当信息适用于个别产品时，采用个别产品的名称。

本书上篇共有 13 章，每章介绍一个或几个主题。大部分章节包括对所介绍主题或者所涉及的主题的简短讨论，以及一两个演示例题。由于它们包含使用 ABAQUS 的大量的实用建议，所以请务必仔细学习这些例题。ABAQUS/CAE 的功能也会在这些例题中逐步地介绍。

本章是对 ABAQUS 和本书的一个简短介绍。第 2 章将围绕一个简单的例题介绍使用 ABAQUS 的基本知识。至第 2 章结束，读者将了解使用 ABAQUS 的基本知识，了解对一个 ABAQUS 的模拟计算如何来准备模型、检查数据、运行分析作业和观察结果。

第 3 章大致展示了 ABAQUS 软件中的主要单元家族。在第 4、5、6 章中，分别讨论了连续体（实体）单元、壳单元和梁单元的具体使用。

第 7 章讨论了线性动态分析。第 8 章一般性地介绍了非线性的概念，特别是几何非线性，并且包含 ABAQUS 所模拟的第一个非线性例题。第 9 章讨论了非线性的动态分析。第 10 章介绍了材料非线性。第 11 章介绍了多步骤模拟的概念，第 12 章提出了接触分析的诸多问题。第 13 章展示了如何应用 ABAQUS/Explicit 来求解准静态问题。

## 第 2 章 ABAQUS 基础

一个完整的 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 分析过程，通常由三个明确的步骤组成：前处理、模拟计算和后处理。这三个步骤之间通过文件建立的联系如图 2-1 所示。

### 1. 前处理 (ABAQUS/CAE)

在前处理阶段需要定义物理问题的模型，并生成一个 ABAQUS 输入文件。尽管一个简单分析可以直接用文本编辑器生成 ABAQUS 输入文件，但通常的做法是使用 ABAQUS/CAE 或其他前处理程序，以图形方式生成模型。

### 2. 模拟计算 (ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit)

模拟计算阶段使用 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 求解输入文件中所定义的数值模型，它通常以后台方式运行。以应力分析的输出为例，包括位移和应力等的输出数据保存在二进制的文件中以便于后处理。完成一个求解过程所需的时间可以从几秒到几天不等，这取决于所分析问题的复杂程度和所使用计算机的运算能力。

### 3. 后处理 (ABAQUS/CAE)

一旦完成了模拟计算并得到了位移、应力或其他基本变量后，就可以对计算结果进行评估。评估通常可以通过 ABAQUS/CAE 的可视化模块或其他后处理软件在图形环境下交互式进行。可视化模块可以将读入的二进制输出数据库中的数据结果以多种方式显示出来，包括彩色等值线图、动画、变形图和 X-Y 曲线图等。

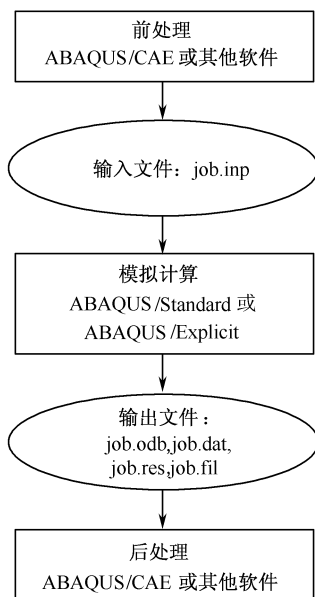


图 2-1 文件联系

## 2.1 ABAQUS 分析模型的组成

ABAQUS 模型通常由若干个不同部分组成，它们共同描述了所分析的物理问题和需要获得的结果。一个分析模型至少要包含如下信息：离散化的几何形体、单元特性 (element section properties)、材料数据、载荷和边界条件、分析类型和输出要求。

### 1. 离散化的几何形体

有限单元和节点定义了 ABAQUS 所模拟的物理结构的基本几何形状。模型中的每