

《ABAQUS有限元分析实例详解》

姊妹篇

ABAQUS 有限元分析 常见问题解答

曹金凤 石亦平 著

附赠光盘

ABAQUS

亚太区总经理

简光圻 博士

倾情作序



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ABAQUS 有限元分析 常见问题解答

曹金凤 石亦平 著



机械工业出版社

本书以问答的形式,详细介绍了使用 ABAQUS 建模分析过程中的各种常见问题,并以实例的形式教给读者如何分析问题、查找错误原因和尝试解决办法,帮助读者提高解决问题的能力。

本书分为两篇:第1篇为基础篇,依次介绍 ABAQUS/CAE 各个功能模块中的常见问题及解决方法;第2篇为提高篇,介绍了几何非线性分析、接触分析和弹塑性分析等复杂问题的分析技巧,在一些典型实例中同时给出了错误的模型文件和正确的模型文件,帮助读者学习查找错误和修改模型的方法。书中内容从实际应用出发,文字通俗易懂,深入浅出,读者不需要具备很深的理论知识,即可轻松地掌握 ABAQUS 的分析技巧。

本书主要面向 ABAQUS 软件的初级和中级用户,对于高级用户也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS 有限元分析常见问题解答/曹金凤,石亦平著. —北京:机械工业出版社,2009.01

ISBN 978-7-111-25379-2

I. A… II. ①曹…②石… III. 有限元分析—应用软件, ABAQUS
IV. 0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 162103 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔 劲 责任编辑:孔 劲 郭 娟

版式设计:霍永明 责任校对:陈立辉

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.75 印张·485 千字

0001—5000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-25379-2

ISBN 978-7-89482-855-2(光盘)

定价:60.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379772

封面无防伪标均为盗版

序

CAE（计算机辅助工程）是一门复杂的工程科学，涉及仿真技术、软件、产品设计和力学等众多领域。世界上几大 CAE 公司各自以其独到的技术占领着相应的市场。ABAQUS 拥有世界上最大的非线性力学用户群，是国际上最先进的大型通用非线性有限元分析软件，在技术、品质以及可靠性等方面具有非常卓越的声誉。对于工程中的各种线性和非线性问题，ABAQUS 都能够提供完美的解决方案，并能不断地吸取最新的分析理论和计算机技术，领导着全世界非线性有限元技术的发展。

CAE 的发展是工程学技术进步和商业运作要求的共同产物，其重要性在于提高产品设计的准确度和精度，并大幅度地提高产品的开发效率。竞争在各个制造领域无处不在，为了比竞争对手更早地推出新品，就需要尽可能地缩短产品的研发周期。以汽车行业为例，原来汽车制造商设计一款新车需要四到五年，现在一般企业的汽车设计大概只用两年到两年半的时间，而日本和韩国汽车厂新车的研发周期普遍是两年以下，其重要原因之一就是他们在真正的原型试验之前大量地采用 CAE 仿真技术。过去推出一款新车需要建立 20 个实物原型，现在只需建 1 个实物原型，其余 19 个都使用 CAE 虚拟仿真来完成。这样实物试验可以一次达标，从而大大缩短了设计研发周期。

中国 CAE 用户的需求和世界其他发达国家的用户是相似的，同样迫切需要缩短产品上市前的研发生产周期，降低生产成本，为消费者提供质量最好的产品。中国 30 年来的发展速度在世界上是独一无二的，这里已经是世界的制造中心，而且正在逐渐变成设计中心、研发中心以及各种优秀品牌的成长中心。中国不仅仅是在追赶世界前进的步伐，而且是在完成自我实现，在按照自己的模式不断地发展壮大。

在未来的几年内，中国的制造业将会发展到一个更高的层次，这不单单体现在对先进设备的需求上，更重要的是中国本土的技术升级和自主品牌的成长都会达到一个空前的高度。这个过程中需要有一大批顶尖的研发人员，借助于最先进的研发工具，来创造具有自主知识产权的技术。

ABAQUS 一方面坚持在 CAE 高端领域的发展，通过不断地投入来保持自己软件的高度，另一方面也非常注重对软件产品的应用普及工作，将其高端的产品推广出去，让更多的 CAE 技术人员能够了解、掌握乃至深入理解这一优秀的有限元分析软件。新版 ABAQUS/CAE 的界面更加人性化，操作更加方便。近年来，ABAQUS 不断地加强在中国的技术培训力度，陆续推出了不同级别的培训书籍。

本书作者之一石亦平博士于 2006 年出版的《ABAQUS 有限元分析实例详解》一书（以下简称《实例详解》），在众多的 ABAQUS 教材中脱颖而出，以其深入浅出的讲解和详尽的实例解析深受读者的好评，成为 ABAQUS 用户的必读教材之一。

两年后，石亦平博士与曹金凤博士合作推出了这本《ABAQUS 有限元分析常见问题解答》（以下简称《常见问题解答》），挑选了 ABAQUS 用户最经常遇到的几百个疑难问

题，逐个给出了准确、全面的解答。书中展示了作者在长期使用 ABAQUS 过程中所积累的丰富经验，介绍了大量的建模分析技巧和查找解决模型问题的重要方法。

《常见问题解答》这种答疑解惑的方式，在同类有限元软件类书籍中是不多见的，可谓匠心独具。在某种程度上，这种教授方式要比通常的 ABAQUS 知识讲授能够带给读者更大的收获。在大学的课堂中有三个重要的教学环节：基本知识的讲授、习题练习和答疑，三者互为补充，缺一不可。《常见问题解答》和《实例详解》互为姊妹篇，基本覆盖了上述三个教学环节，形成了一个比较完整的 ABAQUS 教学体系。读者在认真学习了这两本书后，基本可以独立完成具有一定难度的复杂模型，并能够掌握使用 ABAQUS 进行有限元分析的重要方法和技巧。

本书的出版必将推动 ABAQUS 软件在中国地区的普及和发展。ABAQUS 立志于在 3~5 年内成为中国最大的 CAE 厂商，帮助中国拥有像欧美一样庞大的 CAE 工程师队伍，让各个工程领域的中国企业广泛使用先进的虚拟研发工具。这将是一项伟大的事业，需要我们每一位 CAE 专家、学者和工程技术人员的努力，让我们大家共勉。

ABAQUS 亚太区总经理 简光圻博士

前 言

ABAQUS 有限元分析软件拥有世界上最大的非线性力学用户群，是国际上公认的最先进的大型通用非线性有限元分析软件之一。它广泛应用于机械制造、石油化工、航空航天、汽车交通、土木工程、国防军工、水利水电、生物医学、电子工程、能源、地矿、造船以及日用家电等工业和科学研究领域。ABAQUS 在技术、品质和可靠性等方面具有卓越的声誉，可以对工程中各种复杂的线性和非线性问题进行分析计算。

从 1997 年 ABAQUS 进入中国以来，越来越多的企业、高校和科研院所开始使用 ABAQUS 来进行产品研发和科学研究，其用户数量迅猛增长。遗憾的是，与其他有限元软件相比，指导用户学习使用 ABAQUS 的出版物却相对较少。

机械工业出版社于 2006 年出版的《ABAQUS 有限元分析实例详解》是一本面向初级和中级用户的 ABAQUS 学习指南，其翔实的内容和深入浅出的系统讲解受到广大读者的一致好评。

☆ 提示：本书中多处提到《ABAQUS 有限元分析实例详解》中的相关内容，为简明起见，谈到此书时一律简称为《实例详解》。

由于篇幅所限，有很多关于 ABAQUS 的重要问题在《实例详解》中没有机会涉及，或仅仅是简单地提了一下，没有展开阐述。本书是《实例详解》的姊妹篇，补充了大量关于 ABAQUS 建模分析的重要内容，详细解答了用户使用 ABAQUS 过程中经常遇到的重要问题，澄清了容易混淆的概念，是每个 ABAQUS 初级和中级用户的必备参考书。

本书分为两篇：第 1 篇为基础篇，依次介绍了 ABAQUS/CAE 各个功能模块中的常见问题及解决方法；第 2 篇为提高篇，介绍了几何非线性分析、接触分析和弹塑性分析等复杂问题的分析技巧。

本书内容是基于 Windows 操作系统下的 ABAQUS 6.7 版本。如果读者使用的是其他版本的 ABAQUS，其操作界面可能与本书所介绍的不完全相同，但书中的绝大部分内容（基本概念、基本理论、建模技巧和分析思路等），对于各个 ABAQUS 版本都是适用的。

读者对象

本书主要面向 ABAQUS 软件的初级和中级用户，对于高级用户也有一定的参考价值。本书可以作为理工科院校师生学习 ABAQUS 软件的参考书，也可为机械制造、石油化工、航空航天、汽车交通、土木工程、国防军工、水利水电、生物医学、电子工程、能源、地矿、造船等领域的工程技术人员和科研工作者提供有价值的参考。

在开始学习本书之前，读者应该已经掌握《实例详解》中介绍过的 ABAQUS 基本知识，熟悉 ABAQUS/CAE 操作界面，了解 ABAQUS 建模、提交分析和后处理的基本方法。对于《实例详解》已经介绍过的内容，本书不再重述。

书中介绍操作实例时，一般不再详细介绍相关菜单、工具栏、对话框、按钮的操作方

法。如果读者在学习本书的过程中感觉比较吃力,无法按照书中的简要提示完成模型,建议读者先认真学习一下《实例详解》的内容,然后再开始学习本书。

本书特色

✧《实例详解》的特点是全面、详尽,每个实例都给出了详细的操作步骤,以“傻瓜书”的形式帮助读者轻松地入门。本书则是侧重于解答在使用 ABAQUS 过程中经常出现的疑难问题,突破一些重要的知识点,介绍关键的建模分析技巧,帮助读者拓宽思路。

✧在选择本书内容的侧重点时,作者参考了 SIMWE 仿真科技论坛 ABAQUS 版中的大量提问帖(网址为 <http://www.simwe.com/forum/forum-31-1.html>),使得本书内容更具针对性,更能反映 ABAQUS 用户最常见的问题。

✧书中以问答的形式,展现给读者分析问题、查找错误原因和尝试解决办法的具体过程,教会读者如何举一反三,帮助读者提高解决问题的能力。

✧书中内容从实际应用出发,文字通俗易懂,深入浅出,读者不需要具备很深的理论知识,即可轻松地掌握 ABAQUS 的分析技巧。

✧对于建模分析过程中容易出现错误的地方,书中都尽量给出相应的实例,介绍错误信息的含义,分析错误原因,给出解决方法,并拓展介绍相关的知识。对于需要着重强调的地方,给出了醒目的提示,以引起读者注意。

✧随书光盘给出了重要实例的 CAE 模型文件、INP 文件和 ODB 文件,以方便读者学习。光盘中还提供了本书全部常见问题的 PDF 文档,以方便读者查询本书内容。

☆ 重要提示:请不要直接打开光盘上的 CAE 模型文件(.cae),否则可能会出现异常错误。应该先将 CAE 模型文件复制到硬盘,去掉其只读属性,再在 ABAQUS/CAE 中打开。

☆ 重要提示:光盘上的 CAE 模型文件都是在 ABAQUS 6.7 版本下生成的,只能用 6.7 以上版本的 ABAQUS/CAE 打开。如果使用 6.7 以下版本打开这些 CAE 文件,会看到错误信息:*** is not a valid model database。

本书约定

✧如无特别说明,“单击”、“双击”和“拖动”均表示对鼠标左键进行操作。

✧书中的科学计数法使用了 ABAQUS 操作界面中的格式,例如用 4e9 表示 4×10^9 。

致谢

ABAQUS 公司亚太区总经理简光圻博士和北京代表处技术经理龚平博士对本书给予了大力支持,简光圻博士在百忙之中为本书撰写了序言,对本书的内容给予了高度的肯定。值本书即将出版之际,向他们表示深深的谢意。本书的出版,还得到了美国 ABAQUS 软件公司北京代表处的大力协助和支持,在此一并表示感谢。

衷心感谢中国矿业大学(北京)姜耀东教授和清华大学曾攀教授多年来给予笔者的大力支持、鼓励和指导,他们严谨求实的治学作风、循循善诱的治学精神和精益求精的治学态度使笔者受益匪浅。

在本书的编著过程中，笔者参考了 SIMWE 仿真科技论坛 ABAQUS 版中的大量提问帖（网址为 <http://www.simwe.com/forum/forum-31-1.html>），在此对 SIMWE 仿真科技论坛的大力协助表示感谢。

特别感谢笔者的家人和朋友在笔者的学习、工作中给予的无私奉献和支持。在本书的编写过程中，得到了河北农业大学宇云飞博士、清华大学周丽娜博士研究生、首都师范大学张孟霞博士、中国矿业大学（北京）韩志茹博士研究生和德国 Schaeffler 公司张甦女士的大力帮助和支持，在此表示感谢。另外，感谢机械工业出版社各位编辑的辛勤工作，正是由于他们的辛苦付出，才使得拙作能够在第一时间与读者见面。同时，感谢青岛理工大学理学院领导和同事的支持，是他们的无私帮助使笔者有足够的时间来完成本书。

ABAQUS 有限元分析涉及多个领域的知识，是一项复杂且庞大的课题，笔者深感无法在一本书中将其全部覆盖。如果能够为读者的实际工程分析提供一些帮助，笔者就颇感欣慰了。笔者水平有限，书中难免会有错误和纰漏之处，敬请各位专家和广大读者批评指正，欢迎读者通过电子邮件 bonny.cjf@163.com 和 epin@gmx.de 与笔者交流。

曹金凤 石亦平

目 录

序

前言

第 0 章 导言：路漫漫其修远兮，吾将上下而

求索 1

0.1 数值仿真在产品研发中的作用 1

0.2 工程实际中的有限元分析 2

0.3 ABAQUS 的学习方法 8

0.4 查找解决模型问题的基本方法 10

0.5 心愿 11

第 1 篇 基 础 篇

第 1 章 关于 ABAQUS 基本知识的常见

问题 14

1.1 ABAQUS 的基本约定 15

1.1.1 自由度的定义 15

1.1.2 选取各个量的单位 16

1.1.3 ABAQUS 中的时间 17

1.1.4 ABAQUS 中的重要物理常数 18

1.1.5 ABAQUS 中的坐标系 18

1.2 ABAQUS 中的文件类型及功能 20

1.3 ABAQUS 的帮助文档 23

1.3.1 在帮助文档中查找信息 23

1.3.2 在 ABAQUS/CAE 中使用帮助 功能 24

1.4 更改工作路径 26

1.5 ABAQUS 的常用 DOS 命令 27

1.6 设置 ABAQUS 的环境文件 30

1.6.1 磁盘空间不足 31

1.6.2 设置内存参数 33

1.7 影响分析时间的因素 34

1.8 ABAQUS 6.7 新增功能 35

1.9 ABAQUS 和其他有限元软件的比较 36

1.10 本章小结 38

第 2 章 关于 ABAQUS/CAE 操作界面的常见

问题 40

2.1 用鼠标选取对象 41

2.2 Tools 菜单下的常用工具 42

2.2.1 参考点 43

2.2.2 面 43

2.2.3 集合 44

2.2.4 基准 45

2.2.5 定制界面 45

2.3 本章小结 47

第 3 章 Part 功能模块中的常见问题 48

3.1 创建、导入和修补部件 49

3.1.1 创建部件 49

3.1.2 导入和导出几何模型 49

3.1.3 修补几何部件 51

3.2 特征之间的相互关系 53

3.3 刚体和显示体 55

3.3.1 刚体部件的定义 55

3.3.2 刚体部件、刚体约束和显示体 约束 57

3.4 建模实例 57

3.5 经验总结 60

3.6 本章小结 61

第 4 章 Property 功能模块中的常见问题 62

4.1 超弹性材料 63

4.2 梁截面形状、截面属性和梁横截面 方位 64

4.2.1 梁截面形状 64

4.2.2 截面属性 66

4.2.3 梁横截面方位 67

4.3 材料属性 70

4.4 本章小结 70

第 5 章 Assembly 功能模块中的常见问题 71

5.1 基本概念 72

5.1.1 模型、装配件、部件实体与 部件 72

5.1.2 部件实体与部件的区别与联系 75

5.1.3 非独立部件实体与独立部件实体的

区别与联系	76	8.3 边界条件	119
5.2 部件实体的定位方法	77	8.4 预定义场	120
5.2.1 几种定位约束的区别	77	8.4.1 速度和角速度预定义场	121
5.2.2 Instance 菜单与 Constraint 菜单的 区别	79	8.4.2 平衡初始地应力	123
5.2.3 将定位约束转换为绝对位置	80	8.5 本章小结	129
5.2.4 不同功能模块中的约束	80	第9章 Mesh 功能模块中的常见问题	130
5.3 对多个部件实体进行布尔操作	81	9.1 单元类型	131
5.4 建模思路	82	9.1.1 单元类型的表示方法	131
5.5 本章小结	82	9.1.2 完全积分与减缩积分单元	132
第6章 Step 功能模块中的常见问题	83	9.1.3 非协调单元	133
6.1 四组重要概念	84	9.1.4 杂交单元	133
6.1.1 初始分析步与后续分析步	84	9.2 沙漏模式、剪切闭锁和体积闭锁	134
6.1.2 一般分析步与线性摄动分析步	85	9.2.1 沙漏模式	134
6.1.3 分析步、增量步与迭代	86	9.2.2 剪切闭锁和体积闭锁	135
6.1.4 场变量输出与历史变量输出	89	9.3 关于单元类型的常见问题	137
6.2 两个特殊设置	91	9.4 划分网格	142
6.2.1 几何非线性开关的设置	91	9.4.1 网格划分技术	142
6.2.2 自适应技术	91	9.4.2 网格种子工具	146
6.3 分析步替换	94	9.4.3 网格划分失败的原因和解决 方法	147
6.4 经验总结	95	9.4.4 网格编辑工具	149
6.5 本章小结	96	9.5 虚拟拓扑	150
第7章 Interaction 功能模块中的常见 问题	97	9.5.1 虚拟拓扑的基本概念	150
7.1 Interaction 功能模块中的约束	98	9.5.2 虚拟拓扑工具和几何修补工具的 比较	151
7.1.1 绑定接触与绑定约束	98	9.6 单元网格的常见错误信息和警告 信息	152
7.1.2 运动耦合约束和分布耦合约束	99	9.6.1 网格质量问题	152
7.1.3 耦合约束和方程约束	100	9.6.2 调整从面节点坐标造成的单元 异常	153
7.1.4 焊接和铰接	102	9.6.3 节点编号顺序错误	154
7.2 接触和约束的自动检测	103	9.6.4 分析过程中出现单元扭曲	155
7.3 弹簧、点质量和转动惯量	105	9.7 本章小结	156
7.4 本章小结	108	第10章 Job 功能模块中的常见问题	157
第8章 Load 功能模块中的常见问题	109	10.1 监控分析作业的运行状态	158
8.1 幅值曲线	110	10.2 查看分析诊断信息	160
8.1.1 默认的线性过渡幅值曲线	110	10.3 数值精度	165
8.1.2 表格型幅值曲线	111	10.4 本章小结	166
8.1.3 等间距型幅值曲线	112	第11章 Visualization 功能模块中的常见 问题	168
8.1.4 周期型幅值曲线	113	11.1 输出图片和动画	169
8.2 载荷	115	11.1.1 输出图片	169
8.2.1 集中载荷和弯矩载荷	116	11.1.2 输出动画	169
8.2.2 线载荷	118		
8.2.3 面载荷与压力载荷	118		
8.2.4 重力载荷与体载荷	119		

11.2 显示分析结果	170	第 12 章 Sketch 功能模块中的常见问题	180
11.2.1 变形缩放系数	170	12.1 通过绘制草图创建部件	181
11.2.2 显示局部坐标系下的结果	173	12.2 将 AutoCAD 图形导入 ABAQUS/CAE	181
11.2.3 多种图形叠加显示	174	12.3 改变坐标的显示精度	182
11.2.4 同时显示多个视图	174	12.4 恢复视图的初始状态	182
11.3 绘制 X-Y 图	174	12.5 设置草图的整体尺寸	182
11.4 应力、应变和力的分析结果	176	12.6 草图中的各种约束	183
11.4.1 壳单元的应力结果	176	12.7 本章小结	185
11.4.2 力的分析结果	178		
11.5 本章小结	178		
第 2 篇 提 高 篇			
第 13 章 关于 INP 文件的常见问题	188		
13.1 INP 文件的结构和输入格式	189	14.1.4 在 ABAQUS/CAE 中运行重启动 分析的方法	210
13.1.1 INP 文件的结构	189	14.1.5 在 ABAQUS/CAE 中运行重启动 分析的实例	211
13.1.2 INP 文件的输入规则	190	14.1.6 合并基础模型和重启动模型的 ODB 文件	213
13.1.3 引用外部文件的方法	192	14.2 在分析过程之间传递数据	214
13.2 将 INP 文件导入 ABAQUS/CAE	193	14.2.1 在分析过程之间传递数据的 优点	214
13.3 将 INP 文件提交分析	195	14.2.2 在分析过程之间传递数据的 操作步骤	215
13.4 在 INP 文件中定义输出	198	14.2.3 数据传递应该注意的问题	215
13.4.1 将分析结果输出到 DAT 文件	198	14.2.4 数据传递与重启动分析的 比较	217
13.4.2 将分析结果输出到 ODB 文件	199	14.3 本章小结	217
13.4.3 将分析结果输出到 FIL 文件和 SEL 文件	201	第 15 章 非线性分析中的常见问题	218
13.4.4 输出单元刚度矩阵和质量 矩阵	202	15.1 线性分析与非线性分析	219
13.5 在 ABAQUS/CAE 中生成 INP 文件	203	15.2 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的比较	221
13.5.1 生成 INP 文件时的关键词 冲突	203	15.3 ABAQUS/Standard 的非线性分析	222
13.5.2 如何生成不包含部件和装配件的 INP 文件	204	15.4 ABAQUS/Explicit 的非线性分析	222
13.6 经验总结	204	15.4.1 ABAQUS/Explicit 求解非线性 问题的方法	222
13.7 本章小结	205	15.4.2 ABAQUS/Explicit 分析的增量 步长	223
第 14 章 多步骤分析中的常见问题	206	15.4.3 ABAQUS/Explicit 分析中的 阻尼	226
14.1 重启动分析	207	15.4.4 ABAQUS/Explicit 分析中的边界 条件和载荷	227
14.1.1 重启动分析的使用场合	207	15.4.5 金属塑性成形和准静态分析	231
14.1.2 利用 INP 文件实现重启动 分析	207	15.4.6 ABAQUS/Explicit 分析的应力	
14.1.3 在 ABAQUS/CAE 中设置重启动 数据的输出请求	209		

结果	231	17.2.2 输入塑性材料数据	270
15.5 本章小结	232	17.2.3 材料的失效和破坏	273
第 16 章 接触分析中的常见问题	234	17.2.4 将塑性材料数据绘制为 X-Y 图	276
16.1 接触分析的基本概念	235	17.3 弹塑性分析的网格和单元	277
16.1.1 点对点离散与面对面离散	235	17.4 弹塑性分析不收敛时的解决方法	277
16.1.2 有限滑动和小滑动	237	17.5 弹塑性分析的后处理	281
16.1.3 输出接触力	239	17.6 本章小结	282
16.1.4 ABAQUS/Standard 与 ABAQUS/ Explicit 的接触分析	240	第 18 章 常见的错误信息和警告信息	285
16.1.5 严重不连续迭代与平衡迭代	240	18.1 正常的提示信息	286
16.2 ABAQUS/Standard 接触分析中的警告 信息	244	18.1.1 DAT 文件中的正常提示信息	286
16.2.1 数值奇异	244	18.1.2 MSG 文件中的正常提示 信息	289
16.2.2 零主元	252	18.2 LOG 文件中的错误信息	290
16.2.3 过约束	254	18.2.1 错误代码	291
16.2.4 负特征值	255	18.2.2 分析过程中的临时文件	293
16.3 ABAQUS/Standard 接触分析综合 实例	256	18.3 ABAQUS/CAE 中的错误信息	294
16.3.1 接触分析综合实例 1	256	18.3.1 数据无法释放	294
16.3.2 接触分析综合实例 2	259	18.3.2 显卡和硬件加速	295
16.4 本章小结	262	18.3.3 ABAQUS 版本	296
第 17 章 弹塑性分析中的常见问题	264	18.3.4 环境文件	297
17.1 关于弹塑性的基本知识	265	18.4 安装和运行 ABAQUS	297
17.2 定义塑性材料参数	268	18.5 本章小结	298
17.2.1 根据材料试验数据计算应力和 应变	268	附录 SIMWE 仿真科技论坛简介	300
		参考文献	302

第 0 章 导言：路漫漫其修远兮，吾将上下而求索

我们生活在一个伟大的时代，当今世界的生产力飞速发展，科技产品日新月异。从事 CAE 行业，我们注定要见证有限单元法这一强大的数值计算方法从无到有、从弱到强、从不为人知到不可或缺的发展历程。有限单元法自 20 世纪 50 年代创立以来，首先在飞机的结构分析等连续体力学领域中大展身手，随后迅速地扩展到热力学分析、电磁场分析、流体力学分析等各个领域，CAE（计算机辅助工程）在有限单元法的基础上不断地发展和壮大。

0.1 数值仿真在产品研发中的作用

在当今欧美发达国家的工业企业中，有限元分析已成为产品研发过程中一个必不可少的重要环节。CAE 工程师在校核设计方案、保证产品质量、改进产品设计、降低产品成本、提高产品强度和寿命等方面肩负重要的职责。对于一些复杂的关键部件，如果不经 CAE 工程师分析确认设计方案，就不能投产；如果产品因设计不当而出现质量问题，CAE 工程师也负有不可推卸的责任。

数值仿真在全球制造业的发展历程可以分为 5 个阶段：

- 1) 只使用 CAD 进行产品设计。
- 2) 开始使用少量的 CAE 技术。
- 3) 综合应用各种成熟完整的 CAE 技术，并相互融合。
- 4) 各种 CAE 数据的管理和重复利用。
- 5) 制造业的完全电子化，建立完整的 PLM（Product Lifecycle Management）系统和知识库。

目前，我国的制造企业仅停留在前 4 个阶段。有限元分析在我国的应用领域多是航空航天、汽车、造船等大型企业的核心设计部门，而不像发达国家那样广泛应用于普通的消费类产品设计。

在我国，虽然有些企业已经应用 CAE 技术进行产品的研发，但 CAE 所起的作用仍与发达国家存在较大的差距。在我国的一些企业中，CAE 的作用仅仅是为产品报告增加一些美观的图片，给出一些复杂的分析数据和曲线，让客户或上级领导知道“这个东西我们算过了”，而在整个产品研发过程中，并没有真正把计算机仿真放在核心的地位。

造成这种现象的原因是多方面的，就笔者的了解，可以归纳为以下几点：

- 1) “不需要”：总体来看，我国各行业的自主工业产品设计还处于初级阶段（例如上面提到的第一个阶段），很多产品的设计工作仅仅是略微修改一下老产品的图样，而有限元分析并不是必不可少的。

2) “不了解”：有些企业大致知道可以用有限元软件来作分析计算，但对于有限元软件具体能够分析什么并不十分了解，没有真正认识到有限元分析对企业发展的重要性。

3) “不信任”：有些企业误以为有限元是万能的，希望它能给出任何所需要的分析结果，希望计算结果能够与工程实际 100% 地吻合。当这些过度的期望落空后，就走向了另一个极端，认为它百无一用，没有必要为其花费大量经费，干脆弃之不用，回到多年来已经熟悉的传统方法上，用机械手册上的公式来大致估算，产品成功与否更多地依靠老工程师的经验。

在这些问题的背后，国内 CAE 工程师整体水平的欠缺是一个无法否认的事实。业界普遍认为，中国目前仍然非常缺乏优秀的 CAE 工程师。在高校教育过程中，缺少工程实践环节，很多教师偏向于理论研究，欠缺工程应用背景。机械、力学专业的学生尽管掌握了一定的有限元知识，但在走出校门后，一遇到工程实际问题就一筹莫展。他们面对复杂的模拟对象感到无从入手，所建的模型或者过于简单，没有体现出所模拟问题的重要特征，或者过于复杂，将大量精力和计算时间浪费在不重要的细节上，即使能够得到分析结果，也无从得知这个结果是否正确，准确度有多高。

0.2 工程实际中的有限元分析

无论多么优秀的有限元分析软件，只有正确使用，才能得到令人满意的模拟结果。在进行有限元分析时，切忌拿到一个问题就不假思索地开始建立几何模型、划分网格、输入材料特性、定义边界条件和载荷，最后看到分析收敛了，就打印一些云纹图，画几条曲线，然后万事大吉。虽然只要在有限元软件中输入足够的模型参数，就可以得出五颜六色的云纹图和丰富的分析数据，但这些结果是否正确，是否真是我们所需要的结果，取决于我们建模的方法和所输入的参数，而不能靠有限元软件本身来保证。

举例来说，我们要开车去某地，如果我们直接一头钻进驾驶室，点火、踩油门、换挡、打转向盘，几个小时后我们一定会到达某个地点，但这是不是我们想去的目的地，取决于我们的驾驶过程，而不是只要驾驶的是奔驰、宝马就没问题了。在出发之前，我们首先应该进行缜密的思考和规划——目的地在什么方向、距离有多远、有哪些可供选择的路线、路上是否有什么高山大河的险阻、有哪些必须停留的中转地点、需要在多长时间之内到达、汽车的性能是否足以完成整个旅程，等等。在行进过程中，需要不断地校准方位，时时留心是否行进在正确的路线上。到达终点时，要仔细检查这是不是最初所预期的目的地，是否需要继续行进，奔向下一个目标。

有限元分析的过程与此类似，CAE 工程师在拿到一个工程项目时，应该依次思考和解决以下问题：

1. 明确分析目的

首先应该明确所关心的是零件或结构的强度（应力、疲劳寿命）、刚度（位移和载荷的关系）、温度场还是重量的最小化等。分析目的不同，则建模方法也不同。如果只关心刚度，则不需要划分过细的网格；如果关心的是强度，则需要在可能的危险部位（例如应力集中的圆角处）进行网格细化。

需要注意的是，有限元软件尽管功能强大，适用范围广泛，但它并不是万能的，不能期

待它完美地模拟任何问题。例如，可以通过有限元分析来得出结论：该部件在当前的支撑条件和载荷工况下是满足强度要求的，但这一结论的前提条件是部件在生产过程中没有出现缺陷。如果部件的材料本身存在杂质或缺陷、在铸造过程中出现气孔或在锻造工程中出现裂纹，都会导致部件被提前破坏，而这些问题在进行一般的有限元分析时是不会考虑的。

2. 选取适当的分析类型

常用的分析类型包括静力分析、动态分析、准静态分析等。实际上，我们的分析对象往往是处在运动状态中（例如汽车、机床、重型机械、船舶中的部件）的，但并非只要部件是运动的，就一定要采用动态分析。静力分析的建模过程更简单，不确定性因素更少，更容易得到可靠的结果，因此应该始终将其作为首选的分析类型来考虑。用静力分析来模拟运动的对象，如同用相机来对运动对象的某个瞬间做一个定格的抓拍，这个瞬间往往选取在受力最大的那一刻。

必须采用动态分析的场合包括：需要模拟构件的振动特性或高速冲击碰撞过程，或者接触问题过于复杂，使用静力分析无法收敛或计算时间过长等。动态分析需要考虑阻尼、加载速度、动能和内能的比例等复杂因素，准静态分析往往需要进行适当的质量缩放。如果没有足够的建模经验和试验测试结果的验证，不要轻率地选择这两种分析类型。

3. 选取适当的建模对象

工程实际中的分析对象（例如汽车、机械、医疗器械）一般都是由大量零部件组合而成的复杂系统，各个部件之间存在着复杂的相互作用。我们在建模时，不可能也没有必要把所有部件都放入模型。选取建模对象时可以遵循以下原则：

1) 仅选取所关心的部件，必要时可以适当增加一些相邻的其他部件，去掉那些远离所关心部位的部件。例如希望计算起重机的起重臂强度，则没有必要把整个起重机车身都模拟出来。

2) 去掉或简化对分析结果影响很小的部件或环境因素。例如进行整车碰撞模拟时，应只对重要的车身结构件建模，其余部分可以简化为质量块或忽略不计。分析潜水艇在水下的性能时，主要的载荷是水下的压力，而潜水艇内的空气压力远远小于水的压力，空气的作用就可以忽略不计。

3) 在模型中部件和模型之外部件的交界处，应定义适当的边界条件或载荷。常见的做法是：在交界处和某个参考点之间建立耦合约束（coupling），然后将边界条件或载荷定义在参考点上。根据圣维南原理，当截取整个模型的一部分时，可以用外力系的合力来替代截面处的力，对于远离截面处的部位，这种替代的影响可以忽略不计。

4. 建立合理的几何模型

借助先进的 CAD 软件，我们可以模拟出产品外形和内部结构的每一个微小细节，得到几可乱真的几何模型。但对于有限元模型来说，很多几何模型的细节往往不是必需的，如果进行模拟则可能造成不必要的细化网格，大大增加计算时间。在建立有限元模型时，一般不应保留几何模型中的所有细节，例如可以去掉那些远离关键部位的小孔，用光滑的圆孔来代替螺纹孔，用尖角来代替小圆角，用直线来代替小的过渡圆弧等。

另外，这些细微的几何特征处可能应力集中系数很大，甚至接近应力奇异状态，但这不一定意味着这些部位就是危险部位。举一个工程实际中的例子来说明：起重机的吊臂在使用过程中，不可避免地会出现一些很浅的划痕，如果对这些划痕建模（例如，将其模拟为深

度为 0.1mm 的半圆槽)，并在划痕区域划分非常细的网格，就会看到划痕区域出现应力集中现象，应力远远大于其他部位。但不能就因此判断这些划痕区域是危险部位，因为实践经验告诉我们，吊臂不会因为这些浅浅的划痕而出现破坏。

对上述情况的解释是：应力大的区域仅仅局限在这些微小的局部上，因此不会对整个结构的强度造成影响。比较另外一种情况：如果在吊臂表面开一道深度为 10mm 的半圆槽，这个半圆槽就很可能是危险部位。因为这个半圆槽的尺寸较大，其附近较大区域内的应力都会很高，因而会对整个构件的强度造成影响。

以上说法或许会令人感到奇怪——理论上应该是半径越小，应力集中现象越严重，但在上面的例子中，0.1 mm 的半圆槽不是危险部位，10mm 的半圆槽反而是危险部位。这就是解决实际工程问题的困难之处：既要依据力学理论，又不能死板地套用力学理论。

再举一个常见的例子：在铸件上往往会铸出一些凸出的数字或字母组成的编号，以便于在大批量生产中识别。这些凸出处和铸件平面之间的过渡圆角往往非常小（例如小于 0.2mm），如果在这些圆角部位划分非常细的网格，会得到非常大的应力。事实上，在建模时可以忽略这些凸起的几何特征，将其所在区域简化处理为一个平面。

实际分析时可以把握这样一个原则：如果几何细节的尺寸远远小于构件的尺寸，就可以考虑忽略这些几何细节。即使在模型中保留了这些几何细节，也不要在这部位划分过细的网格。至于“远远小于”是什么概念，可以这样大致判断：令整个构件的外形轮廓充满屏幕，如果这时某个几何细节很难用肉眼分辨出来，就可以称得上是“远远小于”了。

CAE 工程师必须运用经验和直觉来判断设计细节的相关性能，确定它们能否被简化而不产生错误的结果。这些简化区域附近的应力结果会不完全准确，但在远离这些简化区域的位置，应力结果基本不受影响，整个模型的位移结果一般也不受影响。

在有些情况下，某些细节在一开始显得并不重要，但后来的分析结果表明该细节是至关重要的（例如此处应力很大，是危险部位），这时可以在模型中恢复该细节，重新进行计算。如果模型非常复杂，修改模型重新计算需要的时间过长，可以采用子模型（submodel）的方法来分析这个局部区域。

5. 划分合理的网格

实际建模分析时，经常可以看到一些初学者为整个模型划分均匀的网格，这是一种偷懒的做法，其结果是：一些重要部位（应力集中处、大变形处、接触面上）的网格过粗，使得分析结果不准确或无法收敛；其他不重要部位的网格过细，导致浪费了大量的计算时间。

在一般情况下，都应该在上述关键部位进行分割（partition）操作，生成局部细化的网格，而在应力很小和远离关键部位的区域划分比较粗的网格。

至于具体细化到何等程度就足够了，则要靠实践经验。在没有把握时，可以进行收敛性试验，即划分几种不同密度的网格，当网格细化到一定程度时，应力结果基本不再变化，说明网格密度已经足够了。一般情况下，在应力集中的 90° 圆角上应该至少划分 12 个单元，在厚度方向上至少应划分 3 层单元，如果使用减缩积分单元（例如 C3D8R），在厚度方向上至少应划分 4 层单元。

6. 选取适当的材料特性

弹塑性分析的收敛难度和计算时间都大大高于线弹性分析。对于一般的强度分析，使用弹性材料就可以满足工程需要。如果在弹性分析的结果中看到某些区域的 Mises 应力大于屈

服应力（同时可以看到等效塑性应变 $PEEQ > 0$ ），就可以判断这些区域会发生塑性变形。如果发生塑性变形的区域仅仅是很小的局部应力集中区域，而不是贯穿部件截面的大部分区域，就可以认为部件不会发生塑性破坏。

表面加工硬化和感应淬火是工程中提高部件强度的常见工艺，它们一般仅仅是提高材料应力-应变曲线中的屈服强度和断裂强度，而不会改变弹性模量。如果使用弹性材料，在设置模型的材料属性时不需要考虑这些工艺的影响。

如果模型中某些部件的弹性模量和刚度很大，其变形量远远小于所关心部件的变形量，或者其位置远离所关心的部位，就可以把这些部件设为刚体。常见的例子包括轧辊、冲头、模具、机械设备中的底座等。

7. 定义合理的边界条件、载荷和相互作用

边界条件不足是静力分析中最常见的问题。例如，一个圆筒的内壁上受到均匀的径向压力（载荷和几何形状在3个方向上都是对称的），如果直接对完整的圆筒体建模，就很难定义边界条件。有些读者会想到取1/2来建模，在对称面上定义对称边界条件，但静力分析要求约束模型全部6个自由度上的刚体平动和转动，仅有一个对称边界条件仍然是不够的。正确的做法是充分利用对称性，取1/8圆筒来建模，在3个方向的对称面上分别定义边界条件。

接触分析会大大增加收敛的难度，如果两个部件的接触面远离关键部位，而且接触部位在整个分析过程中始终紧密连接，不会分开（例如螺栓和螺母的螺纹连接处），就可以用绑定约束（tie）来代替接触。

对于非线性问题，加载次序不同，得到的结果也很可能会不同，因此模型中各个分析步的模型状态应尽量符合工程实际。例如，某种机械产品的工程实际情况是：首先由生产商完成装配过程，将各个部件通过过盈配合装配在一起，然后客户将此产品投入使用，使其承受一定的载荷。在对这个产品的承载状况进行有限元分析时，应该首先用一个单独的分析步来模拟完成装配后的过盈接触状态，在下一个分析步再施加载荷，而不能只有一个分析步，同时定义过盈配合和载荷。

前面讨论的几点都是关于如何建立正确的模型，本书各章内容也都是围绕着这些主题而展开的。如果能够顺利完成建模工作，并得到收敛的分析结果，这就是迈出了重要的一步，但这并不意味着全部CAE工作已经完成，接下来还有几项重要的工作需要去做，下面分别进行讨论。

8. 评价和理解分析结果

得到分析结果后，首先要根据实践经验和力学的基本原理来评价这些结果的正确性，尽可能理解出现这样结果的可能原因，常用的方法包括：

1) 检查分析结果的数量级。例如在正常的载荷下，得到的应力结果达到了材料屈服应力的几十倍，则这个结果有可能是错误的（例如某个参数的单位不正确）。

2) 与以往的同类分析做比较。例如，如果应力集中的圆角半径由3mm缩小为2.5mm，或者圆角半径保持不变，沿圆弧方向上的单元数由6个增大到12个，如果这时应力结果的变化量在10%以下，是比较正常的，如果应力变化很大（例如增大了几倍），计算结果就值得怀疑。

应力奇异是评价分析结果时经常会遇到的问题。根据力学的基本理论，在尖角处以及边