

庄茁 由小川 廖剑晖 岑松 沈新普 梁明刚 编著

基于ABAQUS的 有限元分析和应用



ABAQUS

清华大学出版社

基于ABAQUS的 有限元分析和应用

庄茁 由小川 廖剑晖 岑松 沈新普 梁明刚 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

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。本书是基于 ABAQUS 软件 6.7 版本进行有限元分析与应用的入门指南和工程分析与科学研究教程。全书分为上、下两篇。上篇结合有限元的基本理论和数值计算方法,通过系列的相关例题和讨论,系统地介绍了 ABAQUS 软件的主要功能和应用方法,包括编写输入数据文件 and 前处理的要领,对输出文件进行分析和后处理的方法等;下篇精选了一批 ABAQUS 在科研和工程领域的典型应用案例,涉及了土木、机械、航空、铁道等工程领域,橡胶、岩土和复合材料等多种材料的应用研究,以及如何通过编写用户接口程序进行二次开发等内容。

本书是应用 ABAQUS 有限元软件进行力学分析和结构计算的必备工具书,可供从事工程设计和有限元分析的科研人员和工程师等阅读和参考,也可以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辅助教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于 ABAQUS 的有限元分析和应用/庄茁等编著. —北京:清华大学出版社,2009.1
ISBN 978-7-302-18816-2

I. 基… II. 庄… III. 有限元分析—应用软件, ABAQUS 6.7 IV. O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 167334 号

责任编辑:石 磊

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:36.75 字 数:890 千字

版 次:2009 年 1 月第 1 版 印 次:2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:69.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系
调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:027899-01

前 言

非线性力学问题(材料、几何和接触)是力学发展的前沿课题。非线性有限元是计算固体力学的组成部分,是基于仿真的工程与科学的重要方法之一。基于非线性力学理论和计算固体力学而发展的 ABAQUS 有限元软件是数值仿真的重要工具之一,在科学研究和工程分析领域得到了广泛的应用。

清华大学航天航空学院工程力学系的高级有限元中心(Advanced Finite Element Service, AFES)成立于 1997 年,并于当年将 ABAQUS 有限元软件引进到国内,取他山之石,助科研和工程分析之力。在有限元发展与应用上,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,受益匪浅。我们所培养的本科生和研究生,在有限元软件的应用水平和开发能力上与国际接轨,在驾驭软件本体,开发接口程序方面达到了国际较高水平。

本书分为上、下两篇。上篇为 ABAQUS 的基础内容和应用指南,主要是基于 ABAQUS 软件 6.7 版本进行有限元分析与应用的入门指南和工程分析与科学研究教程;下篇为 ABAQUS 在科学研究和工程问题中的应用实例,其内容来自于 AFES 中心教师和研究生的科研工作及 ABAQUS 中国用户年会的论文集,它汇集了近十年的部分研究成果和工程应用实例。

借本书出版的机会,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,推动了 ABAQUS 软件的应用和二次开发工作,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。另外,对陈佩英高级工程师始终不渝的鼓励和帮助表示深深的谢意。也感谢与我们保持了多年友谊与合作的 SIMULIA 北京办事处前任总经理于旭光博士和现任总经理白锐先生及其全体同仁的支持。我们相信本书的出版必将推动 ABAQUS 软件在中国的推广和应用,有助于发展我国基于仿真的工程分析与科学研究事业。

庄茁等

2008 年 10 月于清华园

目 录

上篇 ABAQUS 的基础内容和应用指南

1 绪论	3
1.1 从 HKS 和 ABAQUS 到 SIMULIA	3
1.2 有限元著作和软件的发展历史	4
1.3 有限元分析中的问题与挑战	6
1.4 在设计中应用 ABAQUS	8
1.5 ABAQUS 产品介绍	9
1.6 有限元法的简单回顾	12
1.7 本书阅读指南	15
2 ABAQUS 基础	17
2.1 ABAQUS 分析模型的组成	18
2.2 ABAQUS/CAE 简介	19
2.3 例题：用 ABAQUS/CAE 生成桥式吊架模型	24
2.4 比较隐式与显式过程	46
2.5 小结	47
3 有限单元和刚性体	49
3.1 有限单元	49
3.2 刚性体	58
3.3 质量和转动惯量单元	60
3.4 弹簧和减振器单元	61
3.5 小结	61
4 应用实体单元	62
4.1 单元的数学描述和积分	62
4.2 选择实体单元	68
4.3 例题：连接环	69
4.4 网格收敛性	93
4.5 例题：橡胶块中的沙漏 (ABAQUS/Explicit)	96
4.6 相关的 ABAQUS 例题	109
4.7 建议阅读的文献	109
4.8 小结	110

5 应用壳单元	111
5.1 单元的几何尺寸	111
5.2 壳体公式——厚壳或薄壳	114
5.3 壳的材料方向	115
5.4 选择壳单元	117
5.5 例题：斜板	117
5.6 相关的 ABAQUS 例题	127
5.7 建议阅读的文献	127
5.8 小结	128
6 应用梁单元	129
6.1 梁横截面的几何形状	129
6.2 计算公式和积分	133
6.3 选择梁单元	135
6.4 例题：货物吊车	135
6.5 相关的 ABAQUS 例题	149
6.6 建议阅读的文献	150
6.7 小结	150
7 线性动态分析	151
7.1 线性动态问题简介	151
7.2 阻尼	153
7.3 单元选择	154
7.4 动态问题的网格划分	154
7.5 例题：货物吊车——动态载荷	155
7.6 模态数量的影响	165
7.7 阻尼的影响	165
7.8 与直接时间积分的比较	166
7.9 其他动态过程	167
7.10 相关的 ABAQUS 例题	169
7.11 建议阅读的文献	169
7.12 小结	169
8 非线性	170
8.1 非线性的来源	171
8.2 非线性问题的求解	173
8.3 在 ABAQUS 分析中包含非线性	176

8.4	例题：非线性斜板	178
8.5	相关的 ABAQUS 例题	187
8.6	建议阅读的文献	188
8.7	小结	188
9	显式非线性动态分析	189
9.1	ABAQUS/Explicit 适用的问题类型	189
9.2	动力学显式有限元方法	190
9.3	自动时间增量和稳定性	192
9.4	例题：在棒中的应力波传播	195
9.5	动态振荡的阻尼	206
9.6	能量平衡	208
9.7	弹簧和减振器的潜在不稳定性	209
9.8	小结	217
10	材料	219
10.1	在 ABAQUS 中定义材料	219
10.2	延性金属的塑性	219
10.3	弹-塑性问题的单元选取	223
10.4	例题：连接环的塑性	224
10.5	例题：加强板承受爆炸载荷	238
10.6	超弹性	251
10.7	例题：轴对称支座	255
10.8	大变形的网格设计	267
10.9	减少体积自锁的技术	268
10.10	相关的 ABAQUS 例题	269
10.11	建议阅读的文献	270
10.12	小结	270
11	多步骤分析	272
11.1	一般分析过程	272
11.2	线性摄动分析	273
11.3	例题：管道系统的振动	276
11.4	重启动分析	280
11.5	例题：重启动管道的振动分析	282
11.6	相关的 ABAQUS 例题	286
11.7	小结	286

12	接触	287
12.1	ABAQUS 接触功能概述	287
12.2	定义接触面.....	287
12.3	接触面间的相互作用.....	289
12.4	在 ABAQUS/Standard 中定义接触	292
12.5	在 ABAQUS/Standard 中的刚性表面模拟问题	295
12.6	ABAQUS/Standard 例题: 凹槽成型	296
12.7	在 ABAQUS/Explicit 中定义接触	315
12.8	ABAQUS/Explicit 建模中需要考虑的问题	319
12.9	ABAQUS/Explicit 例题: 电路板跌落试验	324
12.10	综合例题: 筒的挤压	340
12.11	ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的比较.....	349
12.12	相关的 ABAQUS 例题	350
12.13	建议阅读的文献	350
12.14	小结	350
13	ABAQUS/Explicit 准静态分析	352
13.1	显式动态问题类比.....	352
13.2	加载速率.....	353
13.3	质量放大.....	355
13.4	能量平衡.....	356
13.5	例题: ABAQUS/Explicit 凹槽成型	357
13.6	小结.....	369
 下篇 ABAQUS 在科学研究和工程问题中的应用实例 		
14	在土木工程中的应用(1)——荆州长江大桥南汊斜拉桥结构三维仿真分析	373
14.1	斜拉桥结构三维仿真问题描述.....	373
14.2	斜拉桥建模.....	375
14.3	静力分析和施工过程仿真.....	378
14.4	动态分析.....	388
15	在土木工程中的应用(2)	397
15.1	钢筋混凝土圆柱形结构的倾倒分析.....	397
15.2	牙轮钻头破岩过程模拟.....	408
15.3	大型储液罐的动力分析.....	411

16	在多场耦合问题中的应用实例	418
16.1	一种新型高速客车空气弹簧的非线性有限元分析.....	418
16.2	多场耦合问题在水坝工程中的应用实例.....	424
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	434
17	在焊接工艺中的应用	440
17.1	用 ABAQUS 进行插销试验焊接温度场分析	440
17.2	焊接接头氢扩散数值模拟.....	444
18	橡胶超弹性材料的应用实例	449
18.1	问题简介.....	449
18.2	常用橡胶本构关系模型.....	450
18.3	过盈配合平面应力下的小变形解.....	455
18.4	过盈配合平面应力下的大变形解.....	460
18.5	体积刚度及泊松比对过盈配合的影响.....	465
19	岩土材料与结构的弹塑性蠕变分析	467
19.1	蠕变模型的理论.....	467
19.2	蠕变模型参数选取.....	470
19.3	实例：地下储库施工引起的岩体弹塑性蠕变及套管变形数值模拟	472
19.4	岩土材料与结构的渗流与变形耦合.....	480
19.5	实例：储油层射孔三维弹塑性变形与渗流耦合分析	484
20	复合材料层合板低速冲击损伤	492
20.1	问题简介.....	492
20.2	损伤判据及应力更新方案.....	493
20.3	损伤分层.....	495
20.4	无 z-pin 增韧复合材料层合板有限元建模及分析	497
20.5	z-pin 增韧层合板模拟	499
20.6	小结.....	503
21	ABAQUS 用户材料子程序	505
21.1	问题简介.....	505
21.2	模型的数学描述.....	506
21.3	ABAQUS 用户材料子程序	509
21.4	SHPB 实验的有限元模拟.....	512
21.5	UMAT 的 Fortran 程序	525

22	ABAQUS 用户单元子程序(1)	531
22.1	非线性索单元.....	531
22.2	UEL 在钢筋混凝土梁柱非线性分析中的应用	538
22.3	应用 UEL 计算应变梯度塑性问题	554
23	ABAQUS 用户单元子程序(2)	561
23.1	四边形面积坐标方法与单元 AGQ6-I 简介	561
23.2	单元 AGQ6 的完全拉格朗日(TL)格式	564
23.3	算例：细长悬臂梁的几何非线性(大转动)分析	573
附录 A	例题文件	576

上 篇

ABAQUS 的基础内容和应用指南



1 绪 论

1.1 从 HKS 和 ABAQUS 到 SIMULIA

当中国人听到来自大洋彼岸的美国罗得岛州的 HKS 公司 (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC., 现为 SIMULIA 公司) 的有限元软件命名为 ABAQUS, 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, 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, 发展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, 顾名思义, 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, 1965 年毕业于英国的剑桥大学, 1972 年在美国的布朗大学获得工学博士学位。这样的教育背景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, 以 Hibbitt 的博士论文工作为基础发展了 MARC 有限元软件。1969 年, MARC 公司成立, 这个软件和公司的名字均为 Marcal 教授姓氏的前四个字母。博士毕业后, Hibbitt 在 MARC 公司工作到 1977 年。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, 后者是著名力学家 Rice 的学生。他们开始创业时, 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, 有时甚至是一边修改程序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。该程序是能够引导研究人员自主增加用户单元和材料模型的早期有限元程序之一, 因此受到科研人员和工程师们的青睐, 对当时的有限元软件行业带来了实质性的冲击。

1997 年和 2000 年夏季, 本书的第一作者两次应邀到 Hibbitt 博士家中作客, 在他位于罗得岛州大西洋港湾岸边的白色房子中, 望着远处片片轻舟, 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。平静的交谈体现出 Hibbitt 博士脚踏实地的工作作风和远见卓识的创业精神。第一个 10 年, 公司平均每两个月增加一人; 第二个 10 年, 平均每一个月增加一人; 进入 21 世纪后, 平均每一个月增加两人。人员稳步增加, 规模逐渐扩大, 市场不断发展, 资本良性循环。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。诚信谨慎的商业运行, 使公司得到平稳的发展。

ABAQUS 公司在计算机硬件和软件高速发展的大环境下应运而生, 如鱼得水, 在激烈的全球市场竞争中适者生存。正是美国这种社会背景培育了人们的竞争精神, 其价值取向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 公司已成为拥有 300

多名员工、几十家分公司遍布美国和全世界的跨国有限元软件企业。2005 年 ABAQUS 公司被法国达索公司收购,2007 年公司更名为 SIMULIA。

ABAQUS 有限元软件的发展适逢有限元数值计算的蓬勃兴起及虚拟科学和工程仿真的大量需求,顺应历史者昌,高瞻远瞩者进。因此,我们有必要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,特别是一些成功的试验报道和专题文章,对有限元的发展做出了不同程度的贡献。例如,专门论述非线性有限元分析的著作中比较有影响的包括 Oden(1972)^①,Crisfield(1991),Kleiber(1989)和 Zhong(1993)等的作品。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。近期的著作有 Simo 和 Hughes(1998),Bonet 和 Wood(1997),Belytschko, Liu 和 Moran(2000)等的书。还有一些著作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)等的相关图书。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,关于线性有限元分析的论述,内容最全面的著作是 Hughes(1987),Zienkiewicz^② 和 Taylor(2000)的作品。

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(2003),浙江大学的郭乙木、陶伟明和清华大学的庄茁(2005)等编写的相关图书。

下面我们简要回顾有限元软件的发展历史。20 世纪 50 年代,美国波音研究组的工作和 Turner, Clough, Martin 以及 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,它还难以燃起早期的科学界对有限元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。

有限元软件的一支血脉是隐式有限元程序。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,工程师们扩展了很多新的用途,从而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

① 本节中人名后面括号中的数字是其代表著作发表的年份。

② 该作者的代表作《有限单元法(第 5 版)》(共 3 卷)中文翻译版已于 2008 年由清华大学出版社出版发行。

(1967)。不久,一大批文章涌现,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;该程序命名为 MARC,目前它仍然是有限元领域的主要软件之一。大约在同期,John Swanson 为了核能应用在 Westinghouse 开发了一个非线性有限元程序 ANSYS。为了使 ANSYS 进入市场,他于 1969 年离开了 Westinghouse。ANSYS 尽管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 1977 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。Klaus-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,商用有限元程序都集中在静态解答和隐式方法的动态解答。在 20 世纪 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, Klaus-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,他们是早期的有限元的主要孵化人员。

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

在 1964 年,Costantino 在芝加哥的 IIT 研究院开发了可能是第一个显式有限元程序。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。IBM7040 只有 32KB RAM,其速度远远低于一个 megaflop(每秒一百万次浮点运算)。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 CDC6600,它们是 20 世纪 60 年代运行有限元程序的机器。一台 CDC6400 价值约为 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。

在 1969 年,为了实现对美国空军销售的计划,研究人员发明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。以此为基础,开发了名为 SAMSON 的二维有限元程序,它被美国的武器实验室应用了 10 年。在 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 20 世纪 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。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,决定将所有的基金转向试验方面,使这些研究努力令人痛心地停止下来。在 Ford 公司, WRECKER 勉强维持生存了下一个 10 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。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。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, 在 1976 年, 他首先发布了 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, 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, Wilson 的程序和 John 的程序不久后在全世界的大学、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, 但是仍然常被采用)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 20 世纪 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。一点积分单元与沙漏控制的一致性, 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 PAMCRASH。它与 WHAMS 也有许多相关的子程序。在 1989 年, John Hallquist 离开了 Livermore, 开始经营他自己的公司, 他扩展了 LSDYNA, 使之成为商业版的 DYNA 程序。

1.3 有限元分析中的问题与挑战

在过去的 20 年, 计算机速度的加快、成本的迅速下降和显式程序功能的日益强大带来了设计的革命, 有限元分析成为计算机辅助设计的基本组成部分。第一个最有价值的应用领域是汽车碰撞, 之后迅速扩展。在越来越多的工业领域, 采用更快捷和低成本的方式评估设计概念和细节的有限元仿真正在代替样品原型的试验。产品设计依赖于模拟正常工作状态、跌落试验和其他极端加载情况的帮助, 例如手机、便携式计算机、洗衣机和许多其他产品。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成型等。对于某些仿真问题, 隐式方法的功能也变得越来越强健。在分析中, 如果能够根据不同情况充分发挥显式和隐式的功能, 则效果更为突出。例如, 显式方法可能适合仿真薄金属板成型的加工过程; 而在回弹过程模拟中, 隐式方法是更合适的。当前, 隐式方法比显式方法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。随着工业问题和科学研究课题的不断产生, 将对两种方法提出更多的发展需求。

商用软件只提供给用户前后处理和执行文件, 其源程序对于用户是黑匣子。这样, 分析者将面对许多选择和困惑, 若不理解有限元的基本概念、程序中所包含的内容和这些选项的内涵, 分析者将会非常被动。因此, 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。

有限元分析包含下列步骤：

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

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

在过去的10年中,在发展仿真方面有了显著的变化。直到20世纪80年代,建模还只是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。这种应用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。当然,对于特定的分析,有限元软件的使用者必须能够评估有限元模型的适用性和限制条件。

今天,方程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得不合适,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的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机时是非常必要的。

分析者最重要的任务是表述结果。除了固有的近似之外,即便是线性有限元模型,对于许多参数的分析也常常是敏感的。这种敏感性可能给模拟带来成功,也可能将其引入歧途。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。这些都需要在进行有限元分析时加以注意。

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。在阅读过程中,读者应特别注意以下内容:

- (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