Abaqus用户手册大系

Abaqus 分析用户手册

——分析卷

Abaqus Analysis User's Guide:Analysis Volume

王鹰宇　编著

- Abaqus原版用户手册的中文版
- 涵盖Abaqus全部物理过程的分析、求解和控制
- 详述针对各种仿真过程的数值计算方法和技巧

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

Abaqus 用户手册大系

Abaqus 分析用户手册

——分析卷

王鹰宇　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书是“Abaqus 分析用户手册大系”中的一册，分为上、下两篇。上篇为分析过程、求解和控制，下篇为分析技术。上篇的内容包括：静态应力/位移分析，动态应力/位移分析，稳态传输分析，热传导和热应力分析，流体动力学分析，电磁分析，耦合的多孔流体流动和应力分析，质量扩散分析，声学、冲击和耦合的声学结构分析，Abaqus/Aqua 分析，退火分析，求解非线性问题和分析收敛性控制。下篇介绍了处理求解过程中所涉及问题的多种技术，包括：重启动，导入和传递结果，子结构，子模型，生成矩阵，对称模型，惯性释放，网格更改或替换，几何缺陷，断裂力学，基于面的流体模拟，质量缩放，可选的子循环，稳态探测，ALE 自适应网格划分，自适应网格重划分，优化技术，欧拉分析，粒子方法，顺序耦合的多物理场分析，协同仿真，用户子程序和工具，设计敏感性分析，参数化研究等诸多方面。每一章都针对各项数值技术进行了详细阐述。

通过学习本书，可以全面深刻地了解 Abaqus 在诸多问题中的分析方法、求解与控制过程，以及各项分析技术。本书适合对设计项目进行有限元分析的工程技术人员使用，可以帮助读者快速、全面地掌握 Abaqus 的基础知识和使用技巧。

本书可作为航空航天、机械制造、石油化工、精密仪器、汽车交通、国防军工、土木工程、水利水电、生物医学、电子工程、能源、造船，以及日用家电等领域的工程技术人员的参考用书，也可以作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的学习用书。对于使用 Abaqus 的工程技术人员，此书是必备的工具书，对于使用其他工程分析软件的人员，此书也具有积极的参考作用。

图书在版编目（CIP）数据

Abaqus 分析用户手册．分析卷/王鹰宇编著．—北京：机械工业出版社，2017.2

（Abaqus 用户手册大系）

ISBN 978-7-111-55736-4

Ⅰ.①A… Ⅱ.①王… Ⅲ.①有限元分析－应用软件－手册 Ⅳ.①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 311057 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 王春雨

责任校对：刘怡丹 张 薇 封面设计：张 静

责任印制：

印刷厂印刷

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 70.25 印张 · 2 插页 · 1735 千字

0001— 册

标准书号：ISBN 978-7-111-55736-4

定价： 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294 机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010-88379203 金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版 教育服务网：www.cmpedu.com

作者简介



王鹰宇，男，江苏南通人。毕业于四川大学机械制造学院机械设计及理论方向，硕士研究生学历。毕业后进入上海飞机设计研究所（640 所），从事飞机结构设计与优化计算工作，参加了 ARJ21 新支线喷气式客机研制。后在 3M 中国有限公司从事固体力学，计算流体动力学，NVH 仿真和设计优化工作十年有余。目前在中国航发商发（AECC CAE）从事航空发动机短舱结构研制工作。

序　言

在20世纪，力学家对工程与科学的重大贡献之一是发展了有限单元法，使其成为基于仿真的工程与科学的重要技术手段之一，使得难以建立解析解答的力学理论模型和难以实施的真实物理实验在计算机上顺利完成。科学家和工程师的追求不仅在于解释世界，更在于改造世界。21世纪是大数据、云计算和云存储的信息爆炸时代，计算机硬件和数值仿真软件的快速发展，使得我们有能力瞬抚四海，穿越古今，破解工程与科学的难题。

力学难题的挑战主要取决于其非线性程度，非线性有限元是计算力学的重要组成部分。Abaqus是国际上最主要的大型通用有限元计算分析软件，具有材料、几何和接触非线性计算的强大功能。工欲善其事，必先利其器，它的作用正是搭建了通往工程与科学彼岸的桥梁。Abaqus具有强大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、材料本构和分析过程等。无论是分析简单的线弹性问题，还是包括几种不同材料、承受复杂的机械和热载荷过程，变化的接触条件的非线性组合问题；无论是分析静态和准静态问题，还是稳态和动态问题；无论是隐式求解，还是显式求解，应用Abaqus计算分析都会得到令人满意的结果。

本书内容分为上下两篇，上篇内容涵盖求解力学问题的动量方程和多物理场方程，如静态和动态的应力/位移计算，热、流、声和电磁场方程等；下篇内容涵盖力学问题的有限元数值方法，如基于拉格朗日、欧拉和任意拉格朗日-欧拉格式的有限元建模，隐式和显式积分的计算方法以及粒子方法和优化算法等。掌握这些内容对有限元建模、计算方法选择和正确评估计算结果大有裨益。本书内容汇集了发展力学理论模型和应用工程实践的宝贵经验，必然会使读者受益和借鉴。

王鹰宇先生是位具有丰富工程实践经验的工程师，也是一位潜心积累，热心传播知识的学者，他的艰辛付出使得本书得以问世。我相信本书的出版必将持续推动非线性有限元的发展和Abaqus软件在我国的应用，并促进我国基于仿真的工程与科学事业的发展。

庄　茁　教授

于清华园

前　言

Abaqus 被公认为是功能强大的有限元软件。借助它可以分析复杂的结构力学系统，特别是能够解决非常庞大复杂的问题，而且可以模拟高度非线性问题。运用 Abaqus 不仅可以做单一零件的力学和多物理场的分析，还可以进行系统级的分析和研究，并且在近期的版本中，Abaqus 中还引入了优化以及计算流体动力学问题的功能。Abaqus 强大的分析能力和模拟复杂系统的高可靠性使得它在各国的工业生产和科研领域得到广泛的应用。

自 1997 年清华大学庄茁教授将 Abaqus 软件引入国内后，Abaqus 因其卓越的性能而在国内各行各业得到广泛应用。

由于工作的缘故，笔者将“Abaqus Analysis User's Guide”（《Abaqus 分析用户手册》）所包含的五部手册翻译成了中文。

本书为“Abaqus 分析用户手册大系”中的一本，分为上、下两篇，上篇的内容涵盖 Abaqus 各种不同物理过程的分析、求解和控制，并阐述了得到合理收敛结果的方法，偏重于问题物理类型本身的模拟。内容包括：静态应力/位移分析，动态应力/位移分析，稳态传输分析，热传导和热应力分析，流体动力学分析，电磁分析，耦合的多孔流体流动和应力分析，质量扩散分析，声学、冲击和耦合的声学结构分析，Abaqus/Aqua 分析和退火分析，求解非线性问题方法选用和分析收敛性控制。

下篇内容阐述在模拟计算过程中使用的各种不同的数值方法、优化过程中采用的计算方法等，偏重于计算方法和对模型计算过程的方法讨论。涉及的分析技术包括：重启动，导入和传递结果，子结构，子模型，生成矩阵，对称模型，惯性释放，网格更改或替换，几何缺陷，断裂力学，基于面的流体模拟，质量缩放，可选的子循环，稳态探测，ALE 自适应网格划分，自适应网格重划分，优化技术，欧拉分析，粒子方法，顺序耦合的多物理场分析，协同仿真，用户子程序和工具，设计敏感性分析，参数化研究等。

通过学习本书内容，可以全面深刻地了解 Abaqus 在诸多问题中是如何分析的，采用什么样的计算方法和模型运算处理技术可以快速地得到合理的结果。

在写作过程中，笔者付出了艰辛的劳动，牺牲了大量的业余时间，不可避免地影响到了家人的生活。在这里特别向我的夫人陈菊女士和孩子表达我由衷的谢意。没有他们的理解与默默的支持，这些成果是难以取得的。谨以此书献给他们。

感谢 SIMULIA 中国区总经理白锐先生、用户支持经理高祎临女士和 SIMULIA 中国南方区资深经理及技术销售高绍武博士在翻译过程中给予笔者的鼓励和支持，以及在书稿出版工作中给予的支持和帮助。

感谢我的良师益友金舟博士在我的工作与学习中给予的一贯的帮助与支持。

非常感谢庄茁教授百忙之中给本书作序。

虽然笔者尽最大努力，力求行文流畅并忠实于原版手册，但由于语言能力和技术能力所限，书中难免出现不当之处。对于书中的问题，希望读者和同仁不吝赐教，共同努力，以使此书更加完善。意见和建议可以发送至邮箱：wayiyu110@ sohu. com。

著　者

目 录

序言
前言

上篇 分析过程、求解和控制

1 分析过程 …… 3
1.1 介绍 …… 4
1.1.1 求解分析问题：概览 …… 5
1.1.2 定义一个分析 …… 7
1.1.3 通用和线性摄动过程 …… 16
1.1.4 多载荷工况分析 …… 21
1.1.5 直接线性方程求解器 …… 27
1.1.6 迭代线性方程求解器 …… 28
1.2 静态应力/位移分析 …… 34
1.2.1 静态应力分析过程：概览 …… 35
1.2.2 静态应力分析 …… 35
1.2.3 特征值屈曲预测 …… 41
1.2.4 非稳定失稳和后屈曲分析 …… 50
1.2.5 准静态分析 …… 56
1.2.6 直接循环分析 …… 60
1.2.7 使用直接循环方法的低周疲劳分析 …… 71
1.3 动态应力/位移分析 …… 86
1.3.1 动态分析过程：概览 …… 87
1.3.2 使用直接积分的隐式动力学分析 …… 101
1.3.3 显式动力学分析 …… 113
1.3.4 直接求解的稳态动力学分析 …… 128

1.3.5 固有频率提取 …… 138
1.3.6 复特征值提取 …… 152
1.3.7 瞬态模态动力学分析 …… 159
1.3.8 基于模态的稳态动力学分析 …… 168
1.3.9 基于子空间的稳态动力学分析 …… 179
1.3.10 响应谱分析 …… 192
1.3.11 随机响应分析 …… 205
1.4 稳态传输分析 …… 218
1.5 热传导和热-应力分析 …… 232
1.5.1 热传导分析过程：概览 …… 233
1.5.2 非耦合的热传导分析 …… 234
1.5.3 完全耦合的热-应力分析 …… 246
1.5.4 绝热分析 …… 257
1.6 流体动力学分析 …… 265
1.6.1 流体动力学分析过程：概览 …… 266
1.6.2 不可压缩流体的动力学分析 …… 266
1.7 电磁分析 …… 296
1.7.1 电磁分析过程 …… 297
1.7.2 压电分析 …… 298
1.7.3 耦合的热-电分析 …… 302
1.7.4 完全耦合的热-电-结构分析 …… 312
1.7.5 涡流分析 …… 320
1.7.6 静磁分析 …… 331
1.8 耦合的孔隙流体流动和应力分析 …… 337
1.8.1 耦合的孔隙流体扩散和应力分析 …… 338
1.8.2 自重应力状态 …… 352
1.9 质量扩散分析 …… 360
1.10 声学、冲击和耦合的声学结构分析 …… 371
1.11 Abaqus/Aqua 分析 …… 395
1.12 退火分析 …… 415
2 分析求解和控制 …… 419
2.1 求解非线性问题 …… 420
2.2 分析收敛性控制 …… 430

2.2.1　收敛准则和时间积分准则：概览 …… 431
2.2.2　常用的控制参数 …… 431
2.2.3　非线性问题的收敛准则 …… 439
2.2.4　瞬态问题的时间积分精度 …… 449

下篇　分析技术

3　分析技术：介绍 …… 455
4　分析连续性技术 …… 460
4.1　重启动一个分析 …… 461
4.2　导入和传递结果 …… 476
4.2.1　在 Abaqus 分析之间传递结果：概览 …… 477
4.2.2　在 Abaqus/Explicit 与 Abaqus/Standard 之间传递结果 …… 485
4.2.3　从一个 Abaqus/Standard 分析传递结果到另外一个 Abaqus/Standard 分析 … 501
4.2.4　从一个 Abaqus/Explicit 分析传递结果到另外一个 Abaqus/Explicit 分析 …… 512
5　模拟抽象化 …… 522
5.1　子结构 …… 523
5.1.1　使用子结构 …… 524
5.1.2　定义子结构 …… 540
5.2　子模型 …… 553
5.2.1　子模型模拟：概览 …… 554
5.2.2　基于节点的子模型模拟 …… 560
5.2.3　基于面的子模型模拟 …… 581
5.3　生成矩阵 …… 591
5.3.1　生成结构矩阵 …… 592
5.3.2　生成热矩阵 …… 599
5.4　对称模型生成、结果传递和循环对称模型的分析 …… 604
5.4.1　对称模型生成 …… 605
5.4.2　从一个对称网格或者三维网格的一部分传递结果到一个完全的三维网格 … 615
5.4.3　表现出循环对称的模型的分析 …… 619
5.5　周期介质分析 …… 629
5.6　网格划分的梁横截面 …… 636
5.7　使用扩展的有限元方法将不连续性模拟成一个扩展特征 …… 643

6 特殊目的的技术 …… 668
6.1 惯性释放 …… 669
6.2 单元和接触对的删除和再激活 …… 680
6.3 在一个模型中引入一个几何缺陷 …… 690
6.4 断裂力学 …… 695
6.4.1 断裂力学：概览 …… 696
6.4.2 围线积分评估 …… 696
6.4.3 裂纹扩展分析 …… 715
6.5 基于面的流体模拟 …… 737
6.5.1 基于面的流体腔：概览 …… 738
6.5.2 流体腔定义 …… 746
6.5.3 流体交换定义 …… 755
6.5.4 充气器定义 …… 765
6.6 质量缩放 …… 770
6.7 选择性的子循环 …… 784
6.8 稳态检测 …… 788
7 自适应技术 …… 795
7.1 自适应技术：概览 …… 796
7.2 ALE 自适应网格划分 …… 800
7.2.1 ALE 自适应网格划分：概览 …… 801
7.2.2 在 Abaqus/Explicit 中定义 ALE 自适应网格区域 …… 807
7.2.3 Abaqus/Explicit 中的 ALE 自适应网格划分和重映射 …… 828
7.2.4 Abaqus/Explicit 中的欧拉自适应网格区域的模拟技术 …… 839
7.2.5 Abaqus/Explicit 中的 ALE 自适应网格划分的输出和诊断 …… 845
7.2.6 在 Abaqus/Standard 中定义 ALE 自适应网格区域 …… 849
7.2.7 Abaqus/Standard 中的 ALE 自适应网格划分和重映射 …… 860
7.3 自适应网格重划分 …… 866
7.3.1 自适应网格重划分：概览 …… 867
7.3.2 影响自适应网格重划分的容差指标的选择 …… 873
7.3.3 基于求解的网格大小 …… 876
7.4 网格替换后的分析连续性 …… 885
8 优化技术 …… 891
8.1 结构优化：概览 …… 892

8.2　优化模型 …… 900
8.2.1　设计响应 …… 901
8.2.2　目标和约束 …… 909
8.2.3　创建 Abaqus 优化模型 …… 917
9　欧拉分析 …… 923
9.1　欧拉分析：概览 …… 924
9.2　定义欧拉边界 …… 935
9.3　欧拉网格运动 …… 939
9.4　在欧拉区域中定义自适应网格细化 …… 945
10　粒子方法 …… 948
10.1　离散单元方法 …… 949
10.2　连续粒子分析 …… 958
10.2.1　平滑粒子流体动力学 …… 959
10.2.2　有限元转换为 SPH 粒子 …… 967
11　顺序耦合的多物理场分析 …… 976
11.1　顺序耦合的预定义场 …… 977
11.2　顺序耦合的热-应力分析 …… 983
11.3　顺序耦合的预定义载荷 …… 988
12　协同仿真 …… 992
12.1　协同仿真：概览 …… 993
12.2　为协同仿真准备一个 Abaqus 分析 …… 998
12.3　Abaqus 求解器之间的协同仿真 …… 1016
12.3.1　结构-结构的协同仿真 …… 1017
12.3.2　流体-结构的协同仿真和共轭热传导 …… 1023
12.3.3　电磁-结构的和电磁-热的协同仿真 …… 1027
12.3.4　执行一个协同仿真 …… 1031
12.4　结构-逻辑的协同仿真 …… 1033
13　扩展 Abaqus 的分析功能 …… 1040
13.1　用户子程序：概览 …… 1041
13.2　可以使用的用户子程序 …… 1051
13.3　可以使用的工具程序 …… 1055
14　设计敏感性分析 …… 1059
15　参数化研究 …… 1071

15.1 脚本运行参数研究 …… 1072
15.2 参数化研究：命令 …… 1091
15.2.1 *aStudy*.combine（）：为参数化研究组合参数采样 …… 1092
15.2.2 *aStudy*.constrain（）：在参数化研究中约束参数值组合 …… 1093
15.2.3 *aStudy*.define（）：为参数化研究定义参数 …… 1093
15.2.4 *aStudy*.execute（）：执行参数化研究设计的分析 …… 1095
15.2.5 *aStudy*.gather（）：收集参数化研究的结果 …… 1097
15.2.6 *aStudy*.generate（）：生成一个参数化研究的分析工作 …… 1103
15.2.7 *aStudy*.output（）：指定参数化研究结果的源 …… 1103
15.2.8 *aStudy* = ParStudy（）：创建一个参数化研究 …… 1105
15.2.9 *aStudy*.report（）：汇报参数化研究结果 …… 1106
15.2.10 *aStudy*.sample（）：参数化研究的采样参数 …… 1108

上　篇

分析过程、求解和控制

1 分析过程

1.1 介绍 …… 4
1.2 静态应力/位移分析 …… 34
1.3 动态应力/位移分析 …… 86
1.4 稳态传输分析 …… 218
1.5 热传导和热-应力分析 …… 232
1.6 流体动力学分析 …… 265
1.7 电磁分析 …… 296
1.8 耦合的孔隙流体流动和应力分析 …… 337
1.9 质量扩散分析 …… 360
1.10 声学、冲击和耦合的声学结构分析 …… 371
1.11 Abaqus/Aqua 分析 …… 395
1.12 退火分析 …… 415

1.1 介绍

- “求解分析问题：概览”1.1.1 节
- “定义一个分析”1.1.2 节
- “通用和线性摄动过程”1.1.3 节
- “多载荷工况分析”1.1.4 节
- “直接线性方程求解器”1.1.5 节
- “迭代线性方程求解器”1.1.6 节