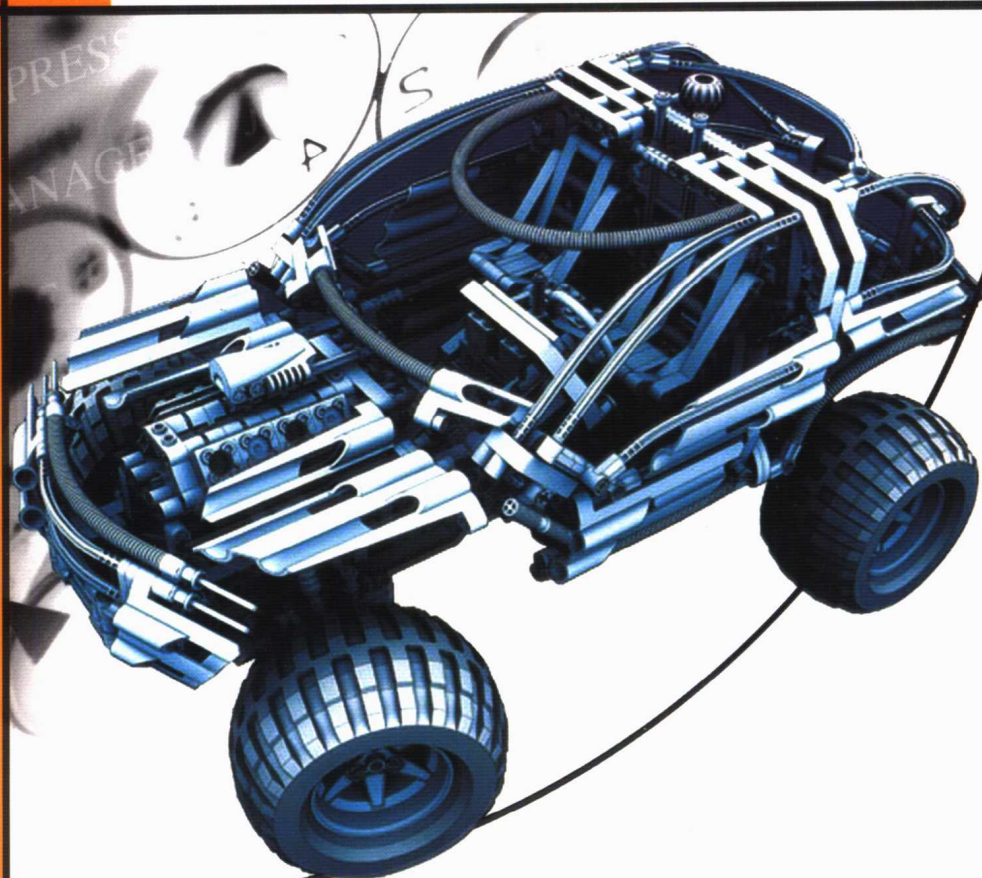


# ABAQUS 6.6

## 在机械工程中的应用

赵腾伦 编著  
姚新军 审校



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

万水 ABAQUS 技术丛书

# ABAQUS 6.6 在机械工程中的应用

赵腾伦 编著

姚新军 审校

中国水利水电出版社

## 内 容 提 要

本书以大型非线性有限元分析软件 ABAQUS 6.6 为基础,从工程实例出发,侧重于 ABAQUS 的实际操作和工程问题的解决,比较系统全面地介绍了 ABAQUS 在机械工程领域的应用。

本书共分为 10 章,第 1 章和第 2 章为应用基础部分,主要介绍了 ABAQUS 的基本功能与基本的使用方法;第 3 章至第 7 章通过具体的实例分别介绍 ABAQUS 在结构静力学分析、结构动力学分析、热分析、非线性分析、接触分析等方面的应用;第 8 章专门介绍 ABAQUS 在机械加工过程中的应用;第 9 章介绍 ABAQUS 多体系统分析;第 10 章为扩展介绍部分,简要介绍 ABAQUS 的一些高级应用技术,包括使用脚本语言、重启动分析、子模型技术、显式—隐式联合分析技术、子结构技术等。本书的附录给出常见 ABAQUS 错误和警告信息的解决办法。

本书内容丰富新颖、工程背景深厚、重点突出、讲解详尽,主要面向 ABAQUS 的初级和中级用户,适用于机械、力学以及相关专业的低年级本科生、研究生以及工程技术人员,并可以作为掌握 ABAQUS 软件的参考教材。

本书实例的输入文件和模型文件(书中简称为素材包)可以从中国水利水电出版社网站 <http://www.waterpub.com.cn/softdown/> 免费下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS 6.6 在机械工程中的应用 / 赵腾伦编著. —北京:  
中国水利水电出版社, 2007

(万水 ABAQUS 技术丛书)

ISBN 978-7-5084-4527-4

I. A… II. 赵… III. 机械工程—有限元分析—应用软件, ABAQUS IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 044815 号

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名   | ABAQUS 6.6 在机械工程中的应用                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 作 者   | 赵腾伦 编著 姚新军 审校                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 出版 发行 | 中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水)<br><a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水) |
| 经 售   | 全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 排 版   | 北京万水电子信息有限公司                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 印 刷   | 北京市天竺颖华印刷厂                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 规 格   | 787mm×1092mm 16 开本 28 印张 686 千字                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 版 次   | 2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 印 数   | 0001—4000 册                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 定 价   | 48.00 元                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元分析软件之一，特别是在非线性分析领域，其技术和特点更是独树一帜，它融结构、传热学、流体、声学、电学以及热固耦合、流固耦合、热电耦合、声固耦合于一体，可以分析复杂的固体力学、结构力学系统，特别是能够驾驭非常庞大而复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场分析，同时还可以做系统级的分析研究，这一特点相对于其他的分析软件来说是独一无二的。由于优秀的分析能力和模拟复杂系统的可靠性使 ABAQUS 在北美、欧洲、亚洲等许多国家获得了广泛的应用，其应用领域遍及机械、土木、石油化工、汽车、冶金、水利水电、材料成型、航空航天、船舶、电子、核工业、兵器等众多行业，为各领域的科学研究和工程应用做出了巨大的贡献。

ABAQUS 自 1997 年进入中国市场以来，被越来越多的国内企业和高校用来作为产品研发和科学研究的工具。但是，ABAQUS 软件及其帮助系统均为英文，对广大中国用户来说阅读起来具有相当的难度，而市场上关于 ABAQUS 的参考资料少之又少，所以对广大使用 ABAQUS 软件的工程技术人员或在校学生而言，一本具有工程应用背景的 ABAQUS 参考书是不可或缺的。

本书以 ABAQUS 的最新版本 ABAQUS 6.6 为依据，选用机械及其相关领域的典型工程实例，具体讲解 ABAQUS 在分析工程问题时所用的方法和详细步骤，针对每一个工程实例，对问题描述、方案规划、模型建立、分析计算、结果处理等一系列过程均有明确的思路和详细的操作步骤，在关键的地方还给出相应的操作技巧和提示。通过本书的学习，读者不但能够迅速掌握 ABAQUS 软件的操作方法，而且能对具体的工程问题进行独立分析。

## 读者对象

本书主要面向 ABAQUS 的初级和中级用户，同时也能为高级用户提供有益的参考，可以作为高等院校的高年级本科生、研究生，科研院所的研究人员以及工程技术人员的参考书。本书特别适合希望在机械以及相关领域提高职业竞争力的读者。

## 本书特色

- 重点突出，特色鲜明。本书不是一本全面介绍 ABAQUS 使用方法的教材，因此不追求内容面面俱到，重点在于 ABAQUS 在机械领域的应用，对于涉及到的相关知识会有比较深入的介绍，以便于读者对问题有深刻认识，而不是只停留在一个问题的表面，以达到举一反三、抛砖引玉的作用。
- 理论结合实际。有限元分析实现的最后载体是有限元分析软件（商业化或非商业化的），但是仅仅能够使用和操作软件并不意味着掌握了有限元分析这一复杂的

工具, 因为对同一问题使用同一种有限元分析软件, 不同的人会得出完全不同的计算结果, 如何来判断有限元模型以及最后分析结果的有效性和准确性, 这是人们不得不面临的重要问题, 只有在掌握了有限元分析基本原理的基础上, 才能真正理解有限元方法的本质。本书在每一章的开始都会介绍与本章内容相关的有限元理论知识, 用以指导后面的分析。

- 深厚的工程背景。本书的目的不仅要使读者能够掌握 ABAQUS 软件本身, 更重要的是通过本书的学习来获得能进行工程实践的能力。本书的实例大都有着深厚的工程背景, 都是从实际工程、项目中提炼出来的, 具有很强的参考价值。
- 重点突出 ABAQUS 的非线性分析功能。线性分析技术目前已经相当成熟, 非线性分析技术逐渐成为有限元分析研究的重点, 同时也是一个难点, ABAQUS 在非线形分析方面有着独特的优点, 本书的重点也在于 ABAQUS 的非线性分析功能。
- 难易结合, 由浅入深。从软件的基本操作到复杂的工程实例, 从基本的线性分析到复杂的非线性分析, 循序渐进, 一步步把读者引入有限元分析的殿堂。
- 每个实例都附有精简的输入文件, 个别实例还涉及到输入文件的修改与使用, 以便适合不同程度的读者。
- 每章后面附有专题参考内容, 列出了与本章内容相关的知识、方法或理论, 可以作为本章内容的重要补充, 以期为读者提供一些有益的参考和启示。
- 本书实例的输入文件和模型文件(书中简称为素材包)可以从中国水利水电出版社网站 <http://www.waterpub.com.cn/softdown/> 免费下载。

## 致谢

本书由赵腾伦执笔完成。值本书出版之际, 衷心感谢姚进教授给予的悉心指导, 正是他严谨求实的学术作风、精益求精的治学态度和循循善诱的教诲使笔者受益匪浅。特别感谢魏振玲女士在本书的创作过程中所做出的无私奉献和给予笔者的鼓励, 感谢编者的家人对其学习、工作所做的奉献和支持。本书的审校工作由姚新军完成。

在本书的编写过程中, 还得到了四川大学制造科学与工程学院黄建峰博士、史延枫、李斌、周春山、陈双喜、罗全华、吴迎春、李耘彦、唐洪、张国亮、高伟、赵世佳、余德平、吴志俊、江广顺、李强、万雷、许志清、厉剑梁、董茜、殷世钦、王晓、郭敏、刘羽宇、黄茜、陈鲲、杜长城、余松等人的大力帮助, 在此一并致谢。还要感谢中国水利水电出版社老师的辛苦 effort, 正是因为你们辛苦的付出, 才使本书能在第一时间和读者见面。

由于时间仓促, 作者水平有限, 书中错误、纰漏之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

编者

2007 年 1 月于四川大学

# 目 录

## 前言

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 ABAQUS 6.6 基础 .....          | 1  |
| 1.1 有限元分析与 ABAQUS 介绍 .....         | 1  |
| 1.1.1 有限元法的基本原理 .....              | 1  |
| 1.1.2 ABAQUS 简介 .....              | 2  |
| 1.2 ABAQUS 6.6 软件的新特性及新功能 .....    | 3  |
| 1.2.1 ABAQUS 6.6 的新特性 .....        | 3  |
| 1.2.2 ABAQUS 6.6 的新功能 .....        | 4  |
| 1.3 ABAQUS 的主要模块 .....             | 5  |
| 1.3.1 ABAQUS/CAE .....             | 6  |
| 1.3.2 ABAQUS/Standard .....        | 6  |
| 1.3.3 ABAQUS/Explicit .....        | 7  |
| 1.3.4 其他模块 .....                   | 7  |
| 1.4 ABAQUS 主要的分析功能 .....           | 7  |
| 1.5 ABAQUS 的文件系统 .....             | 9  |
| 1.6 ABAQUS 的接口工具 .....             | 10 |
| 1.7 ABAQUS 的帮助系统 .....             | 10 |
| 1.8 ABAQUS 中约定的符号 .....            | 12 |
| 专题 1——有限元分析中的量纲 .....              | 21 |
| 第 2 章 ABAQUS 的基本分析过程 .....         | 25 |
| 2.1 ABAQUS/CAE 简介 .....            | 25 |
| 2.2 ABAQUS/CAE 模型数据库的结构 .....      | 27 |
| 2.3 几何模型的创建 .....                  | 29 |
| 2.3.1 直接在 ABAQUS/CAE 中创建几何模型 ..... | 29 |
| 2.3.2 从其他三维 CAD 软件导入几何模型 .....     | 30 |
| 2.3.3 使用脚本语言建模 .....               | 30 |
| 2.4 ABAQUS 的材料模型 .....             | 31 |
| 2.5 ABAQUS 的装配功能 .....             | 33 |
| 2.6 分析步 .....                      | 35 |
| 2.7 相互作用定义 .....                   | 38 |
| 2.8 边界条件 .....                     | 39 |
| 2.9 网格划分 .....                     | 40 |

|                               |                              |            |
|-------------------------------|------------------------------|------------|
| 2.9.1                         | 网格密度控制 .....                 | 40         |
| 2.9.2                         | 网格形状、划分方法以及算法控制 .....        | 42         |
| 2.9.3                         | 单元类型选取 .....                 | 43         |
| 2.9.4                         | 网格质量检验 .....                 | 46         |
| 2.10                          | 作业管理 .....                   | 46         |
| 2.11                          | ABAQUS 的后处理 .....            | 47         |
| 2.12                          | 入门实例 .....                   | 48         |
| 专题 2——ABAQUS 基于特征的参数化建模 ..... |                              | 59         |
| <b>第 3 章</b>                  | <b>结构静力学分析 .....</b>         | <b>66</b>  |
| 3.1                           | 结构静力学分析简介 .....              | 66         |
| 3.1.1                         | 静力学分析的特点 .....               | 66         |
| 3.1.2                         | 静力学分析的步骤 .....               | 66         |
| 3.2                           | 梁结构静力分析 .....                | 67         |
| 3.2.1                         | 使用梁单元 .....                  | 67         |
| 3.2.2                         | 梁截面定义 .....                  | 67         |
| 3.2.3                         | 横截面方向 .....                  | 68         |
| 3.2.4                         | 门字架强度分析实例 .....              | 69         |
| 3.3                           | 轴对称结构静力分析 .....              | 80         |
| 3.3.1                         | 轴对称结构的特点 .....               | 80         |
| 3.3.2                         | 对称结构的分析要点 .....              | 80         |
| 3.3.3                         | 压力容器不连续区域应力分析实例 .....        | 81         |
| 3.4                           | 壳结构静力分析 .....                | 90         |
| 3.4.1                         | 使用壳单元 .....                  | 90         |
| 3.4.2                         | 壳单元几何尺寸 .....                | 91         |
| 3.4.3                         | 材料方向 .....                   | 94         |
| 3.4.4                         | 薄壁圆筒工件在切削力作用下的应力应变分析实例 ..... | 95         |
| 专题 3——弹性体的五个基本假设 .....        |                              | 106        |
| <b>第 4 章</b>                  | <b>结构动力学分析 .....</b>         | <b>108</b> |
| 4.1                           | 动力学分析简介 .....                | 108        |
| 4.1.1                         | 动力学有限元法的基本原理 .....           | 108        |
| 4.1.2                         | 动力学分析的类型 .....               | 111        |
| 4.2                           | 结构模态分析 .....                 | 112        |
| 4.2.1                         | 模态分析的步骤 .....                | 112        |
| 4.2.2                         | 联轴器的模态分析实例 .....             | 113        |
| 4.3                           | 瞬态动力学分析 .....                | 123        |
| 4.3.1                         | 瞬态动力学分析的基本原理 .....           | 124        |
| 4.3.2                         | 钢球对钢板的侵彻模拟分析实例 .....         | 125        |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 4.3.3 机翼模态及稳态动力响应分析实例 .....                      | 136 |
| 专题 4——如何写 ABAQUS 的输入文件 (*.inp) .....             | 145 |
| 第 5 章 结构热分析 .....                                | 157 |
| 5.1 热分析简介 .....                                  | 157 |
| 5.1.1 传热分析有限元法基本原理 .....                         | 157 |
| 5.1.2 热分析的基本步骤 .....                             | 159 |
| 5.1.3 冷却栅温度场分布实例 .....                           | 160 |
| 5.2 热应力分析 .....                                  | 168 |
| 5.2.1 热应力分析的基本原理 .....                           | 168 |
| 5.2.2 冷却栅热应力分析实例 .....                           | 170 |
| 5.3 热应力(热—机耦合)分析综合实例 .....                       | 174 |
| 专题 5——ABAQUS 单元选择原则 .....                        | 191 |
| 第 6 章 非线性分析 .....                                | 198 |
| 6.1 非线性分析概述 .....                                | 198 |
| 6.1.1 非线性有限元法的概念 .....                           | 198 |
| 6.1.2 非线性有限元法的基本原理 .....                         | 199 |
| 6.2 非线性的来源 .....                                 | 202 |
| 6.2.1 几何非线性 .....                                | 202 |
| 6.2.2 材料非线性 .....                                | 203 |
| 6.2.3 边界非线性 .....                                | 204 |
| 6.3 立杆失稳分析实例 .....                               | 204 |
| 6.4 弹塑性分析 .....                                  | 216 |
| 6.4.1 屈服准则 .....                                 | 216 |
| 6.4.2 流动准则 .....                                 | 217 |
| 6.4.3 硬化准则 .....                                 | 218 |
| 6.4.4 弹塑性本构关系 .....                              | 219 |
| 6.5 铆接过程中铆钉的弹塑性分析实例 .....                        | 219 |
| 专题 6——线性分析的收敛准则与收敛判断 .....                       | 233 |
| 第 7 章 接触分析 .....                                 | 238 |
| 7.1 ABAQUS 接触功能简介 .....                          | 239 |
| 7.1.1 接触问题的描述方法 .....                            | 239 |
| 7.1.2 接触算法的基本流程 .....                            | 240 |
| 7.1.3 ABAQUS 提供的接触算法 .....                       | 242 |
| 7.2 接触对的定义 .....                                 | 243 |
| 7.2.1 定义接触面 .....                                | 243 |
| 7.2.2 主面(master surface)和从面(slave surface) ..... | 244 |
| 7.3 接触探测 .....                                   | 245 |

|              |                                                  |            |
|--------------|--------------------------------------------------|------------|
| 7.3.1        | 接触容限 .....                                       | 245        |
| 7.3.2        | 偏斜系数 .....                                       | 245        |
| 7.4          | 接触属性 .....                                       | 246        |
| 7.4.1        | 小滑移 (small sliding) 和有限滑移 (finite sliding) ..... | 246        |
| 7.4.2        | 摩擦模型 .....                                       | 247        |
| 7.4.3        | 其他接触属性 .....                                     | 249        |
| 7.5          | 轮齿条接触分析实例 .....                                  | 250        |
| 7.5.1        | 问题描述 .....                                       | 250        |
| 7.5.2        | 问题分析 .....                                       | 250        |
| 7.5.3        | 建模求解 .....                                       | 252        |
| 7.5.4        | 结果评价及深入研究 .....                                  | 266        |
| 7.5.5        | INP 文件 .....                                     | 266        |
| 7.6          | 过盈装配中的接触分析实例 .....                               | 270        |
| 7.7          | 自接触 .....                                        | 281        |
| 7.7.1        | 橡胶材料 .....                                       | 282        |
| 7.7.2        | 橡胶缓冲器受挤压变形分析实例 .....                             | 282        |
|              | 专题 7——接触分析中的常见问题及解决方法 .....                      | 294        |
| <b>第 8 章</b> | <b>机械加工过程仿真 .....</b>                            | <b>300</b> |
| 8.1          | 机械加工过程仿真概述 .....                                 | 300        |
| 8.1.1        | 成型过程分析的特点 .....                                  | 300        |
| 8.1.2        | ABAQUS/Explicit 准静态分析 .....                      | 301        |
| 8.1.3        | 减少计算成本的方法 .....                                  | 301        |
| 8.1.4        | 质量放大与能量平衡 .....                                  | 302        |
| 8.2          | 冲压加工 .....                                       | 302        |
| 8.3          | 旋压加工 .....                                       | 320        |
| 8.3.1        | 旋压加工简介 .....                                     | 320        |
| 8.3.2        | 影响旋压产品成型精度的因素 .....                              | 322        |
| 8.3.3        | 筒形件旋压成型模拟实例 .....                                | 322        |
|              | 专题 8——网格自适应技术 .....                              | 346        |
| <b>第 9 章</b> | <b>多体系统分析 .....</b>                              | <b>352</b> |
| 9.1          | ABAQUS 多体系统分析简介 .....                            | 352        |
| 9.2          | ABAQUS 的连接单元 .....                               | 353        |
| 9.2.1        | 连接单元边界条件和载荷 .....                                | 353        |
| 9.2.2        | 连接单元行为 .....                                     | 354        |
| 9.3          | ABAQUS 的连接属性 .....                               | 355        |
| 9.3.1        | 基本连接属性 .....                                     | 356        |
| 9.3.2        | 组合连接属性 .....                                     | 358        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 9.4 飞机起落架局部结构分析实例 .....             | 360        |
| 9.5 双万向联轴器机构模拟实例 .....              | 376        |
| 专题 9——有限元分析结果评价 .....               | 386        |
| <b>第 10 章 ABAQUS 其他常用分析技术 .....</b> | <b>389</b> |
| 10.1 ABAQUS 脚本参数化建模与分析 .....        | 389        |
| 10.1.1 ABAQUS 脚本语言——Python 概述 ..... | 389        |
| 10.1.2 ABAQUS 脚本的基本语法 .....         | 390        |
| 10.1.3 多螺栓孔平板参数化建模与网格划分实例 .....     | 395        |
| 10.1.4 一个完整的实例 .....                | 399        |
| 10.2 重启动分析 .....                    | 402        |
| 10.2.1 重启动分析必备的文件 .....             | 403        |
| 10.2.2 重启动分析的类型和步骤 .....            | 403        |
| 10.2.3 重启动联轴器模态分析实例 .....           | 404        |
| 10.3 子模型 .....                      | 410        |
| 10.3.1 子模型技术概述 .....                | 411        |
| 10.3.2 工艺孔应力集中子模型分析实例 .....         | 413        |
| 10.4 显式—隐式联合分析 .....                | 424        |
| 10.5 网格重划分 .....                    | 424        |
| 10.6 子结构技术 .....                    | 427        |
| 专题 10——计算成本估计 .....                 | 429        |
| <b>附录 常见警告和错误信息 .....</b>           | <b>430</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>436</b> |

# 第 1 章 ABAQUS 6.6 基础

## 知识要点:

- 有限元分析与 ABAQUS
- ABAQUS 6.6 软件的新特性及新功能
- ABAQUS 的主要模块
- ABAQUS 的主要分析功能
- ABAQUS 的文件系统
- ABAQUS 的接口工具
- ABAQUS 的帮助系统
- ABAQUS 中约定的符号
- 专题 1——有限元分析中的量纲

## 本章导读:

本章主要介绍 ABAQUS 的发展概况、主要模块、主要功能、文件系统、帮助系统、与其他 CAD/CAE 软件的接口以及 ABAQUS 6.6 版本的新增功能与主要技术特点等内容。通过本章的学习,读者可以掌握 ABAQUS 的基本知识,熟悉 ABAQUS 的操作环境和文件系统,了解 ABAQUS 软件与其他 CAD 软件的数据接口等。

## 1.1 有限元分析与 ABAQUS 介绍

有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)是工程技术领域进行科学计算的极为重要的方法之一,利用有限元分析可以获得几乎任意复杂工程结构的各种机械性能信息,还可以直接就工程设计进行评判,对各种工程事故进行技术分析。有限元分析实现的最后载体是经过技术集成的有限元分析软件,在众多的有限元分析软件中,ABAQUS 以其先进的非线性分析技术和卓越的分析性能,已逐渐成为分析工程技术问题的首选软件。

### 1.1.1 有限元法的基本原理

自从 1960 年波音公司 Clough 提出有限元方法(Finite Element Method, FEM)这一概念以来,随着计算机技术的飞速发展,有限元方法在工程技术领域得到了广泛的应用,从简单的弹性力学分析到复杂的弹塑性非线性分析;从最初只在航空工业中使用到目前广泛应用于机械设计制造、航空航天、汽车、电子、土木工程、材料、能源、水利、生物医学等领域;从最初的结构静力学分析到现在的结构静力学、结构动力学、热学、电磁学、声学、流体力学以及热机耦合、流固耦合、声固耦合等多物理场耦合分析。短短的 40 多年时间里,有限元分析方法得到了迅速的发展,在工程技术领域的各个方面也都得到广泛的应用。

同时,有限元方法的基本思想和原理是“简单”而又“朴素”的,其基本思想就是“一分一合”,归纳如下:

假想把连续系统分割成数目有限的单元,单元之间只在数目有限的指定点(称为节点)处相互连接,构成一个单元集合体来代替原来的连续系统。在节点上引进等效载荷(或边界条件)来代替实际作用于系统上的外载荷(或边界条件)。

然后对每个单元由分块近似的思想,按一定的规则(由力学关系或选择一个简单函数)建立求解未知量与节点相互作用(力)之间的关系(力—位移、热量—温度、电压—电流等)。

最后把所有单元的这种特性关系按一定的条件(变形协调条件、连续条件或变分原理及能最原理)集合起来,引入边界条件,构成一组以节点变量(位移、温度、电压等)为未知量的代数方程组,求解就得到有限个节点处的待求变量。

所以,有限元法实质上是把具有无限个自由度的连续系统,理想化为只有有限个自由度的单元集合体,使问题转化为适合于数值求解的结构型问题。显然,节点数是有限的,单元数目也是有限的,所以称为“有限单元”,这也是有限元一词的由来。

有限元分析是物理现象(几何及载荷工况)的模拟,是对真实情况的数值近似,通过对分析对象划分网格,把具有无限个自由度的连续系统离散成只有有限个自由度的单元集合体,通过求解有限个数值来近似模拟真实环境的无限个未知量。

通常,有限元分析主要包括以下几个步骤:

(1) 问题及求解域定义。根据实际问题近似确定求解域的物理性质和几何区域。

(2) 求解域离散化。将求解域近似为具有不同有限大小和形状,且彼此相连的有限个单元组成的离散域,习惯上称为有限元网格划分。显然单元越小(网格越细),则离散域的近似程度越好,计算结果也越精确,但计算量及误差都将增大,因此求解域的离散化是有限元法的核心技术之一。

(3) 确定状态变量及控制方法。一个具体的物理问题通常可以用一组包含问题状态变量边界条件的微分方程式表示,为适合有限元求解,通常将微分方程化为等价的泛函形式。

(4) 单元推导。对单元构造一个适合的近似解,即推导有限单元的列式,其中包括选择合理的单元坐标系,建立单元函数,以某种方法给出单元各状态变量的离散关系,从而形成单元矩阵(结构力学中称为刚度阵或柔度阵)。为保证问题求解的收敛性,单元推导有许多原则要遵循。对工程应用而言,重要的是应注意每一种单元的解题性能与约束。例如,单元形状应以规则为好,畸形时不仅精度低,而且有缺秩的危险,将导致无法求解。

(5) 矩阵总装。将单元总装形成离散域的总矩阵方程(联合方程组),反映对近似求解域的离散域的要求,即单元函数的连续性要满足一定的连续条件。总装是在相邻单元节点进行,状态变量及其导数(可能的话)连续性建立在节点处。

(6) 联立方程组求解和结果解释。有限元法最终导致联立方程组。联立方程组的求解可用直接法、迭代法和随机法。求解结果是单元节点处状态变量的近似值。对于计算结果的质量,将通过与设计准则提供的允许值比较来评价并确定是否需要重新计算。

### 1.1.2 ABAQUS 简介

ABAQUS 是美国 ABAQUS 公司(原名 HKS 公司,即 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.)的产品。ABAQUS 公司总部设在罗德岛州普罗维登斯市,成立于 1978 年,最初由三个人(即

Hibbitt, Karlsson 和 Sorensen 博士)发起,目前已经发展成一个拥有 600 余名雇员(其中总部 200 余名)的全球知名的有限元软件公司,在北美、欧洲、亚太地区有 40 个分公司或代表处。2005 年 5 月,ABAQUS 公司与世界知名的在产品生命周期管理软件方面拥有先进技术的达索公司合并,并将共同开发新一代软件分析平台,这也标志着制造业统一有限元时代即将来临。

ABAQUS 是一套功能强大的进行工程模拟的有限元软件,其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库,并拥有各种类型的材料模型库,可以模拟典型工程材料的性能,其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料。作为通用的模拟工具,ABAQUS 除了能解决大量结构(应力/位移)问题,还可以模拟其他工程领域的许多问题,例如热传导、质量扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质分析。

ABAQUS 为用户提供了广泛的、使用便捷的功能。可以通过关键字的不同组合很容易地模拟大量的复杂问题。例如,对于复杂多构件问题的模拟是通过把定义每一构件的几何尺寸的选项块与相应的材料性质选项块结合起来。在大部分模拟中,甚至高度非线性问题,用户只需提供一些工程数据,像结构的几何形状、材料性质、边界条件及载荷工况。在一个非线性分析中,ABAQUS 能自动选择相应载荷增量和收敛限度。它不仅能够选择合适的参数,而且能连续调节参数以保证在分析过程中有效地得到精确解。用户通过准确地定义参数就能很好地控制数值计算结果。

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元软件之一,可以分析复杂的固体力学、结构力学系统,特别是能够驾驭非常庞大、复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析,同时还可以做系统级的分析和研究。ABAQUS 的系统级分析的特点相对于其他的分析软件来说是独一无二的。由于 ABAQUS 优秀的分析能力和模拟复杂系统的可靠性使得 ABAQUS 被广泛应用于世界各国的工业生产和研究设计中。ABAQUS 产品还在大量的高科技产品研究中发挥着巨大的作用。

## 1.2 ABAQUS 6.6 软件的新特性及新功能

2006 年,ABAQUS 公司发布了其最新产品——ABAQUS V6.6-1, ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit,在振动分析、材料失效特征分析、轮胎模拟等方面提供了新的分析方法。ABAQUS/CAE 中新的工具助手能够帮助 ABAQUS 用户更快地得到精确的结果,获得更具说服力的报告。

### 1.2.1 ABAQUS 6.6 的新特性

#### 1. 计算性能增强

主要是 ABAQUS/Standard I/O 效率的提高,具体表现在以下两个方面:

(1) 在各种平台下优化 ABAQUS/Standard I/O,提高了执行效率,保证分析尽可能全部在内存中运行。

(2) 对于 Windows/x86-32 机型输入输出效率的提高,显著地提高了运行性能。

## 2. 并行单元操作效率提高

- (1) 增加了分析类型, 包括直接循环、热固耦合、热传导、热电耦合、动力学等。
- (2) 并行效率进一步提高, 对所有支持的功能默认使用并行单元进行操作。

## 3. Quasi-Newton 方法的改进

- (1) 当平衡迭代出现问题时改变了重新计算雅克比矩阵的方法, 提高了效率。
- (2) 在大模型的计算中可以在外存中进行 BFGS 更新。
- (3) 可用于接触分析。

## 4. 线性动力学问题的性能提高

- (1) 在特征值问题中引入 ABAQUS/AMS, 在结构自然频率的提取过程中能采用自动多级子结构方法, 并发展了基于 Vanderplaats Research & Development 公司提出的 SMS 特征值求解器。
- (2) 基于模态过程开始被移植到一个高性能的框架中, 具有高效率的数据库和更快的矩阵处理速度。

提示: 在 6.6 版本中, 使用 ABAQUS/AMS 时, 这些改进只能用于稳态动力学问题。

在内存分布式并行执行方面增加了 DMP 对稀疏矩阵求解器的支持, 为在整个 ABAQUS/Standard 中引入 DMP 求解器迈出了重要一步。

## 1.2.2 ABAQUS 6.6 的新功能

### 1. 草图约束管理器

- (1) 自动及人为约束定义和管理。
- (2) 拖动草图物体。
- (3) 标注尺寸的改进。
- (4) 定义草图物体之间的参数关系。

### 2. 网格

- (1) 自适应重分网格, 支持基于几何的模型, 支持三角形、四边形和四面体单元。
- (2) 网格过渡的改进。
- (3) 边界网格的光滑处理。
- (4) 基于曲率的网格尺寸定义。
- (5) 四边形/三角形单元的自动映射→倒角处的高质量四面体单元。
- (6) 广义 Swept Meshing 功能: 不需要固定不变的  $x$  截面; 表面不需要是平面; 增加了扫略网格的可用性/强健性; 支持虚拟拓扑 (VT), VT 也支持分割、几何修补和建立特征。

### 3. ABAQUS/Standard 中的接触增强

- (1) 有限滑动的面面接触中可以考虑壳的厚度, 改进了精度和强健度, 迈出了走向通用接触的重要一步。
- (2) 基于罚函数接触, 在求解器中消去拉格朗日乘子提高了计算效率。
- (3) 收敛控制和更加灵活的时间步长选择, 通过改变接触和摩擦的变化产生的残余力减少了解的抖动, 通过接触收敛的历史来更加合理地选择时间步长。

### 4. 连接单元

- (1) 特殊滑轮连接件能够模拟安全带的动力学问题。
- (2) 加速度计在 ABAQUS/Explicit 中能够使用。

### 5. 损伤破坏模拟增强

(1) 可以模拟纤维增韧复合材料各向异性破坏。

(2) 在 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 之间可以导入粘性单元, 拓宽了这种类型单元的应用范围。

(3) ABAQUS/CAE 支持初始损伤 (Damage initiation) 和损伤扩展 (Damage evolution)。

### 6. 稳态传输问题

(1) 可以使用精确的胎面几何模拟轮胎的稳态传输。

(2) 增强了在 Version 6.5 中的功能: 对称模型生成允许可变的环向角度; 考虑接触面上的传送。

### 7. 粘弹性功能增强

(1) 可以指定存储模量和损失模量与预载荷之间的依赖关系。

(2) 扩展垫片单元使之能够模拟动力响应, 能和现有的压力—闭合行为配合使用。

(3) 导入粘弹性材料。

### 8. ABAQUS/CAE 中的高级分析支持

(1) 函数分布、分布载荷可以通过 Python 来实现, 支持压力和温度载荷。

(2) 声学加载。

(3) 支持脆性断裂模型。

(4) 支持 Coriolis 力。

(5) 支持壳的偏置。

### 9. 结果显示

(1) ABAQUS/Standard 可以在固定的时间点输出数据, 增量步会自行调整以保证在特定的时间点输出数据。

(2) 通过属性来定义颜色, 属性可以是材料、截面, 单元类型、集合、表面、区域、部件、实例、载荷、边界条件、相互作用等。

(3) 动画控制。用户可选择步骤/帧, 可以输出同步、多幅动画, 在视图中同步导入动画 (包括 avi、mpeg、wmv、mov 类型), 在 Overlays 中支持动画等。

(4) 支持半透明。

(5) 双边壳。

(6) 实体壳单元的“层”。

(7) 对称/阵列模型的可视化。

(8) 图例的色谱控制。

## 1.3 ABAQUS 的主要模块

ABAQUS 有两个主求解器模块——ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。ABAQUS 还包含一个全面支持求解器的图形用户界面, 即人机交互前后处理模块——ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environment)。ABAQUS 对某些特殊问题还提供了专用模块来加以解决。各个模块之间的关系如图 1-1 所示。

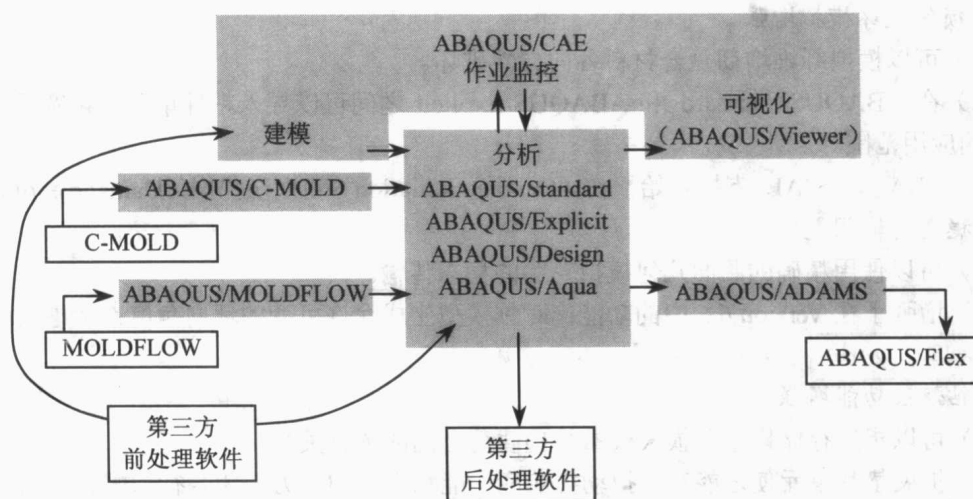


图 1-1 ABAQUS 各模块之间的关系

### 1.3.1 ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 的交互式图形环境，利用它能够快速有效地创建、编辑、监控、诊断和后处理先进的 ABAQUS 分析，ABAQUS/CAE 将建模、分析、工作管理以及结果显示集成于一个一致的、使用方便的环境中，使得初学者易于学习，而经验丰富的用户的工作效率会更高。ABAQUS/CAE 提供了一个广泛的、全面的有限元建模交互环境，将各种功能集成在模块以及工具箱中，用户界面具有互动性、一致性和直观性；同时还提供最好的对 ABAQUS 求解器的支持，ABAQUS 用户所熟悉的 ABAQUS 求解器的概念，如分析步、接触和摩擦、截面特性、材料和幅值曲线等，在用户界面中都非常直观；另外，通过便利的工具可以检测分析过程，再加上一系列完整的结果可视化功能，ABAQUS/CAE 使用户能够方便地生成、解释和交流分析结果，使用 Python 脚本语言和 GUI 工具包，还可以实现自定义的菜单对话框以及实现自动化处理各种任务和流程。

本书中实例的绝大部分工作均基于 ABAQUS/CAE 完成，第 2 章将对 ABAQUS/CAE 各组成模块的功能用法作详细介绍。

### 1.3.2 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、热、电磁、声，以及复杂的非线性、物理场耦合分析等。

ABAQUS/Standard 提供一个动态载荷平衡的并行稀疏矩阵求解器，能够实现多达 16 个处理器的并行运算，可以应用于各种类型的分析。

ABAQUS/Standard 还提供一个并行的 Lanczos 特征值求解器，在大规模模型中可以快速有效地提取多阶特征值，是线性动力学分析的重要工具，包括瞬态响应、谐波响应、随机响应以及地震响应谱分析。ABAQUS/Standard 还有一个复特征值求解器，可以实现对非对称系统或带阻尼的对称系统的复特征值提取。

### 1.3.3 ABAQUS/Explicit

ABAQUS/Explicit 可以进行显式动态分析,适用于求解非线性动力学问题和准静态问题,特别是模拟短暂、瞬时的动态问题,如跌落、爆炸、冲击等。另外,对于处理接触条件高度非线性的准静态问题也非常有效,例如模拟制造过程(如高温金属轧制、板金冲压等)和能量吸收装置的缓慢挤压过程等。

ABAQUS/Explicit 可以实现基于域分解的并行计算,可以使用子模型技术,在大变形问题中,可以使用 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 自适应网格技术来避免求解过程中的网格畸变,保证求解的顺利进行。

### 1.3.4 其他模块

ABAQUS 除了上面的三个基本的常用模块之外,还有一系列专用的分析模块,分别介绍如下:

(1) ABAQUS/Design: ABAQUS/Design 是一个可选择的附加产品,用于设计灵敏度分析(DSA)。设计灵敏度用于预测设计发生变化时对结构响应产生的变化,可以提供“立即再分析”或“假设分析”来进行优化设计。

(2) ABAQUS/Aqua: ABAQUS/Aqua 的一系列功能可以附加在 ABAQUS/Standard 中应用。它偏向于模拟海上结构,如海洋石油平台。它的功能包括模拟波浪、风载荷及浮力的影响。

(3) ABAQUS/Viewer: ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子集,它只包含了可视化的后处理功能。

(4) ABAQUS/Foundation: ABAQUS/Foundation 提供 ABAQUS/Standard 中有关线性静态分析和动态分析的功能。

(5) Fe-safe/Fe-Safe: Fe-safe/Fe-Safe 模块的一系列功能可以附加在 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 上应用,使用它的目的是通过疲劳分析预测部件和系统的寿命。

(6) ABAQUS for CATIA V5: ABAQUS for CATIA V5 为用户提供了完全集成在 CATIA V5 的使用环境中的 ABAQUS 求解器,使 CATIA 用户无须离开 CATIA 环境就能方便地进行有限元分析。

(7) ABAQUS Interface for MSC.ADAMS: ABAQUS 和 ADAMS/Flex 软件的接口,可以导入 ADAMS 模型中的部件进行有限元分析并将结果返回到 ADAMS。

(8) ABAQUS Interface for MOLDFLOW: ABAQUS 和注塑模拟软件 MOLDFLOW 之间的接口,可以基于 MOLDFLOW 分析得到的注塑成型后的材料性质和残余应力进行有限元分析。

## 1.4 ABAQUS 主要的分析功能

作为世界上著名的非线性有限元分析软件,ABAQUS 具有广泛的分析功能,根据分析类型的不同,分别归纳如下:

### 1. 结构分析

(1) 静态、准静态分析: 各类工程结构、零件及装配件的强度校核等。

(2) 振动、模态分析: 结构固有频率的提取、瞬态及稳态响应分析、随机响应分析等。