

# ABAQUS

## 在LNG储罐设计与分析中的应用

Application of ABAQUS  
in LNG Storage Tank Design  
and Analysis

◎主编 张超



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# ABAQUS 在 LNG 储罐设计与 分析中的应用

主 编 张 超

编 者 陈团海 屈长龙 扬 帆

段品佳 黄 欢 张博超

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

《ABAQUS 在 LNG 储罐设计与分析中的应用》是关于大型有限元软件 ABAQUS 在 LNG 储罐分析中的应用流程与方法。本书全面系统地介绍了 ABAQUS 软件在超大容积 LNG 储罐设计与分析应用过程中的基本理论、使用方法和应用实例。从逻辑上看,全书可分为三大部分:第一大部分(第 1 章节)主要介绍 ABAQUS 软件模块功能及相关的应用领域、特色;第二大部分(第 2~10 章节)主要介绍国内外 LNG 储罐研究和开发的相关情况,并对编者所研究的超大容积 LNG 储罐开展了 ABAQUS 软件的应用分析,包含静力学、动力学、热力学及施工过程中的整体及局部分析,并附有相关的应用实例;第三大部分(第 11 章节)主要介绍 ABAQUS 软件强大的二次开发功能。

本书特别适合于从事 LNG 储罐相关研究工作的学者及工程技术人员阅读,也可作为利用 ABAQUS 软件进行 LNG 储罐计算分析的参考教材。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

ABAQUS 在 LNG 储罐设计与分析中的应用 / 张超主编. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 6

ISBN 978 - 7 - 5682 - 0395 - 1

I. ①A… II. ①张… III. ①液化天然气 - 储罐 - 设计 - 有限元分析 - 应用软件  
IV. ①TE972 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 065189 号

---

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京京华虎彩印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 280 千字

版 次 / 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 马振武

# 序 言

目前，中国正经历着一个从制造服务型经济转向创新驱动型经济的迅猛发展时期，为了继续取得成功和保证现有技术成果的准确性并快速转化为生产力，中国需要最佳的软件工具。

Dassault Systèmes Simulia Corp. 致力于以专业的技术团队和卓越的技术实力带给中国用户世界领先的软件产品和技术服务，从而大大提升中国用户在全球市场的竞争力。如今 Dassault Systèmes Simulia Corp. 很高兴通过参与中海石油气电集团的技术服务项目，为中国能源行业的发展做出贡献。本书详细介绍了 ABAQUS 软件在大型 LNG 储罐的设计与分析中的具体应用，通过理论与实例相结合的讲解，引导读者快速高效地掌握 ABAQUS 软件的应用方法，从而有效帮助读者提升 ABAQUS 软件应用水平，并展现 ABAQUS 软件在非线性有限元分析方面的强大功能。

**Dassault Systèmes Simulia Corp.**

# 前 言

ABAQUS 是全球知名的大型通用高级有限元软件，拥有众多用户，在土木、桥梁、石油天然气、海洋与船舶、航空航天、汽车工业、水利等领域均有广泛应用。ABAQUS 作为一套功能强大的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。目前，ABAQUS 软件除了向通用性方面发展外，还在向要求更高的专业分析领域发展。ABAQUS 软件强大准确的分析功能使得其在能源、电力、核能、航空、航天、船舶、汽车、电子等领域拥有众多用户。

中海石油气电集团有限责任公司作为中国 LNG 行业领军企业，已经对 LNG 全容储罐有了丰富的技术积累。LNG 产业链运输船船容的增大、数量的增加以及 LNG 新增接收站数量的增加，带动了 LNG 储罐的大型化发展。随着储罐罐容的增大，单位容积储罐建设费用呈下降趋势，储罐经济效益竞争力大大增强；同时罐容的增大也可以更高效提高土地利用率以及更大程度降低储罐 BOG 蒸发率。因此，LNG 储罐超大型化后更具有经济优势，超大型化也将是未来国内 LNG 储罐发展的主要趋势。

中海石油气电集团技术研发中心目前已经开始了超大容积 LNG 全容储罐技术研究，而且进行了超大容积 LNG 储罐的有限元计算与分析工作，但由于有限元计算过程中及各有限元软件单元选择、荷载组合选择等方面都存在较大不确定性，且该项目为国内首次研究 20 万  $\text{m}^3$  以上超大容积储罐有限元方面计算，因此为了保证计算结果的准确性和可靠性，技术研发中心选择 ABAQUS 作为分析软件。

本书是关于大型有限元软件 ABAQUS 在 LNG 储罐分析中的应用流程与方法。在 LNG 储罐的热学和力学计算中，通用有限元软件是常用的工具，ABAQUS 软件操作简便、结果准确、实用性强，其计算结果的准确性和实用性已经被众多的工程应用项目所证实。

本书从 LNG 储罐设计和施工的实际出发，侧重于实际操作并解决具体计算分析问题。全书分别以 16 万  $\text{m}^3$ 、20 万  $\text{m}^3$ 、27 万  $\text{m}^3$  LNG 储罐为例，详细讲解了 ABAQUS 软件在 LNG 储罐有限元分析及其计算中的使用方法与使用技巧，工程实例丰富、讲解详尽，内容安排循序渐进、深入浅出。

本书共包括 11 章。

第 1 章除简单介绍有限元法的概念及步骤外，重点介绍了 ABAQUS 软件的发展变化、软件功能模块及土木工程应用。

第 2 章重点介绍了 LNG 储罐的分类及国内外大型 LNG 储罐的仿真研究现状，第 3 章、

第4章分别详细介绍了 LNG 储罐的静力学分析和动力学分析。

第5章详细介绍了 LNG 储罐的热力学分析，第6章进行了 LNG 储罐的施工有限元分析计算讲解。

以上章节不但详细讲解了分析技巧，也进行了实例分析的讲解，同时提供多个模型的计算求解公式，为广大读者学习 ABAQUS 软件及其在 LNG 储罐中的应用奠定基础。

第7章重点介绍了 LNG 储罐各个局部的有限元分析。第8章讲解了 LNG 储罐桩基的模拟与计算。第9章主要介绍了 ABAQUS 后处理在储罐结果校核中的应用，对 ABAQUS 结果数据库结合各种不同的工况及储罐可能会出现的裂缝验算进行了详细阐述。

第10章主要从宏观层面讲解 ABAQUS 在 LNG 混凝土储罐中的应用实例，考虑各种不同载荷及现实中 LNG 储罐可能会面临的各种工况，并结合前文进行归纳总结，促进读者更深入地了解 ABAQUS 在 LNG 储罐设计与分析中的应用。第11章主要讲解 ABAQUS 软件的二次开发功能，方便读者基于所用的子程序中自行二次开发所需功能及界面。

全书根据 LNG 储罐的实际工程应用而提供相应的实例讲解，并对 LNG 储罐进行了相关的结果评价研究。这样能更好地帮助读者理解仿真分析计算的意义，并迅速应用到工程和科研的实践中去。

本书涉及的内容较广，读者可根据自己的需要进行选择性阅读。要充分掌握 ABAQUS 软件及其在能源领域的应用，读者仍需要大量的工程实践。

本书由中国 LNG 行业领军企业中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心首席工程师张超博士主编，Dassault Systèmes Simulia Corp. 的相关工程师提出了很多宝贵的意见和建议，北京视算协同科技有限公司和北京理工大学出版社有限责任公司为本书的出版做了大量的工作，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

第 1 章 ABAQUS 基础与土木工程分析 .....	1
1.1 有限元法的简单回顾 .....	1
1.2 有限元法的基本步骤 .....	2
1.2.1 单元划分 .....	2
1.2.2 确定插值函数 (形函数) .....	3
1.2.3 建立单元方程 .....	3
1.2.4 单元组集——建立总体方程组 .....	3
1.2.5 计入边界条件, 解方程组 .....	3
1.2.6 后处理 .....	4
1.3 ABAQUS 简介 .....	5
1.3.1 ABAQUS/Standard .....	6
1.3.2 ABAQUS/Explicit .....	6
1.3.3 ABAQUS/CAE .....	7
1.3.4 ABAQUS/Viewer .....	7
1.3.5 ABAQUS 帮助文档 .....	7
1.4 ABAQUS 土木行业功能介绍 .....	9
1.4.1 岩土材料本构模型 .....	9
1.4.2 混凝土本构模型 .....	9
1.4.3 单元库 .....	14
1.4.4 初始地应力平衡 .....	14
1.4.5 土体的固结和渗流分析 .....	15
1.4.6 单元生死功能 .....	15
1.4.7 强大的分析功能 .....	15
1.4.8 子模型和子结构 .....	16
1.4.9 二次开发 .....	16
1.4.10 土木领域其他功能 .....	16
1.5 ABAQUS 在土木工程中的应用 .....	17
1.5.1 ABAQUS 在特种结构中应用 .....	17
1.5.2 ABAQUS 在高层建筑结构中的应用 .....	21
1.5.3 ABAQUS 在岩土工程中的应用 .....	24
1.5.4 ABAQUS 在桥梁工程中的应用 .....	29
1.5.5 ABAQUS 在水工中的应用 .....	32
1.5.6 ABAQUS 在防火中的应用 .....	36

<b>第 2 章 LNG 混凝土储罐设计与分析概述</b> .....	43
2.1 LNG 储罐的类型 .....	43
2.1.1 地上式储罐 .....	43
2.1.2 半地下式储罐 .....	45
2.1.3 地下式储罐 .....	47
2.1.4 坑内式储罐 .....	47
2.2 LNG 预应力全容罐 .....	47
2.2.1 LNG 预应力全容罐结构特点 .....	47
2.2.2 国外 LNG 储罐研究概况 .....	49
2.2.3 国内 LNG 储罐研究概况 .....	49
<b>第 3 章 储罐静力学分析</b> .....	51
3.1 材料与截面属性 .....	51
3.2 约束与接触 .....	52
3.3 单元 .....	54
3.4 边界条件 .....	57
3.5 解析场和离散场 .....	57
3.6 预定义场 .....	59
3.7 分析步设置 .....	60
3.8 分析荷载与工况组合 .....	61
3.8.1 恒载 .....	62
3.8.2 活荷载 .....	63
3.8.3 预应力荷载 .....	64
3.8.4 运行荷载 .....	64
3.8.5 试验荷载 .....	67
3.8.6 风荷载 .....	67
3.8.7 雪荷载 .....	68
<b>第 4 章 储罐动力学分析</b> .....	70
4.1 单元选择 .....	70
4.2 动力问题的网格剖分 .....	70
4.3 ABAQUS 线性动力学分析 .....	71
4.3.1 固有频率和模态 .....	71
4.3.2 瞬态模态动力学分析 .....	74
4.3.3 响应谱分析 .....	74
4.3.4 随机响应分析 .....	75
4.3.5 阻尼 .....	75
4.3.6 稳态动力学分析 .....	82
4.4 ABAQUS 非线性动力学分析 .....	85
4.4.1 ABAQUS/Standard 非线性动力学分析 .....	86
4.4.2 ABAQUS/Explicit 非线性动力学分析 .....	87



4.5 储罐动力学分析荷载及荷载组合	87
4.5.1 爆炸荷载	88
4.5.2 冲击荷载	88
4.5.3 泄漏液压荷载	89
4.5.4 地震荷载	90
<b>第5章 储罐热力学分析</b>	<b>97</b>
5.1 传热问题的有限元理论	97
5.1.1 传热问题的基本方程	97
5.1.2 稳态传热问题的有限元分析式	98
5.2 热应力问题的有限元理论	99
5.2.1 热应力物理中的物理方程	99
5.2.2 有限元分析列式	99
5.3 ABAQUS 热力学分析	100
5.3.1 ABAQUS 热传导分析	100
5.3.2 ABAQUS 热应力分析	101
5.4 储罐热力学分析荷载及荷载组合	102
5.4.1 正常运转温度荷载	102
5.4.2 火灾	102
5.4.3 泄漏温差荷载	102
<b>第6章 储罐施工有限元分析</b>	<b>103</b>
6.1 ABAQUS 多步骤分析	103
6.1.1 一般分析过程	103
6.1.2 线性扰动分析	104
6.1.3 多步骤分析应用实例	106
6.2 ABAQUS 单元生死功能	107
6.2.1 ABAQUS 单元生死设置	107
6.2.2 ABAQUS 单元生死应用实例	108
<b>第7章 储罐局部有限元分析</b>	<b>110</b>
7.1 ABAQUS 子模型基本过程	110
7.2 ABAQUS 子模型基本原则及实现方式	110
7.3 储罐研究中常用子模型分析	111
7.3.1 外墙泄漏工况下的受压区厚度判定	111
7.3.2 单桩分析	112
7.3.3 锚固带分析	112
7.3.4 内罐壁板—底部环形板疲劳分析	114
7.3.5 管线分析	116
<b>第8章 储罐桩基模拟与计算</b>	<b>118</b>
8.1 基于接触的桩土分析	118
8.2 基于 Embedded 约束的桩土分析	120

<b>第 9 章 ABAQUS 后处理在储罐结果校核中的应用</b> .....	122
9.1 ABAQUS 结果数据库的访问和控制 .....	122
9.2 工况组合 .....	124
9.3 裂缝验算 .....	127
<b>第 10 章 ABAQUS 在 LNG 混凝土储罐的应用实例</b> .....	130
10.1 有限元模型 .....	130
10.1.1 罐体模型 .....	130
10.1.2 桩土耦合模型 .....	135
10.1.3 模型分析参数 .....	135
10.2 基本工况分析 .....	136
10.2.1 恒载 .....	136
10.2.2 活荷载 .....	137
10.2.3 预应力荷载 .....	138
10.2.4 风荷载 .....	138
10.2.5 雪荷载工况 .....	140
10.2.6 运行荷载 .....	140
10.2.7 试验荷载 .....	143
10.3 荷载组合 .....	160
10.3.1 适用性极限状态 .....	160
10.3.2 最终极限状态 (ULS) 正常荷载工况 .....	164
10.3.3 最终极限状态 (ULS) 偶然荷载工况 .....	166
10.4 分析总结及补充校核 .....	170
10.4.1 金属结构 .....	171
10.4.2 混凝土构件 .....	171
<b>第 11 章 ABAQUS 二次开发功能</b> .....	174
11.1 ABAQUS 用户子程序 .....	174
11.2 常用用户子程序简介 .....	175
11.2.1 DLOAD 子程序 .....	175
11.2.2 DISP 子程序 .....	176
11.2.3 CREEP 子程序 .....	177
11.3 基于内核脚本 (Python) 二次开发 .....	179
11.3.1 ABAQUS 前处理二次开发 .....	181
11.3.2 ABAQUS 后处理二次开发 .....	181
11.4 ABAQUS 图形用户界面 (GUI) 二次开发 .....	183
<b>参考文献</b> .....	186

# 第 1 章 ABAQUS 基础与土木工程分析

## 1.1 有限元法的简单回顾

一个桁架的简单算例，如图 1.1 所示，一端约束而另一端加载，分析桁架自由端的位移、桁架的应力及桁架约束端的反作用力。

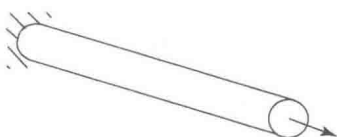


图 1.1 桁架问题

任何有限元模拟的第一步总是用有限单元来离散结构的实际几何形状。每个单元都代表结构的一个离散部分。有限单元通过共用节点来连接。将有限单元和节点的组合称为网格。在一个特定网格中的单元数与网格密度有关。在应力分析中节点位移是 ABAQUS 计算的基本参量。一旦节点位移已知，每一个单元的应力应变均能很容易地求出。

在图 1.1 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 1.2 中用节点和单元的编号表示了离散模型。

图 1.3 所示为模型中每个节点的分离体图。在通常情况下，模型中的每个节点将承受外部载荷  $P$  和内部载荷  $I$ ，后者是由单元应力引起而附加到节点上。由于模型处于静平衡状态，每个节点的合力一定为零。例如，每个节点的外部载荷和内部载荷必须相互平衡。对于节点  $a$  的平衡方程描述如下。

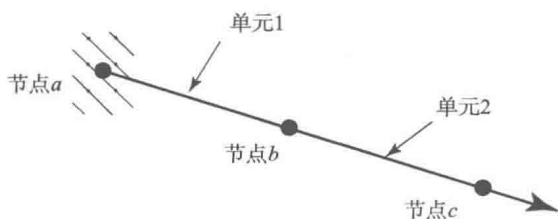


图 1.2 桁架问题的离散化模型

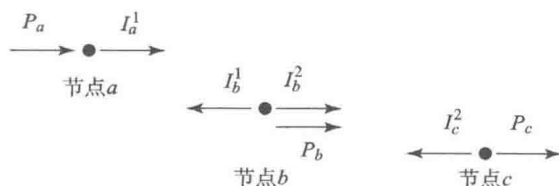


图 1.3 每个节点的分离体图

假设圆杆的长度改变是很小的，给出单元 1 的应变为：

$$\varepsilon_{11} = \frac{u^b - u^a}{L} \quad (\text{式 1.1})$$

其中  $u^a$  和  $u^b$  分别是节点  $a$  和  $b$  的相应位移， $L$  是单元的原始长度。

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：

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \quad (\text{式 1.2})$$

作用在端部节点的轴向力等于圆杆的应力乘以其截面积  $A$ 。因此，内部载荷、材料性能和位移的关系表达式为：

$$I_a^l = \sigma_{11}A = E\varepsilon_{11}A = \frac{EA}{L}(u^b - u^a) \quad (\text{式 1.3})$$

在节点  $a$  处的平衡方程因此可以写成：

$$P_a + \frac{EA}{L}(u^b - u^a) = 0 \quad (\text{式 1.4})$$

节点  $b$  处的平衡必须考虑到该节点连接的相邻单元的内力。单元 1 的内力作用在反方向上，因此变为负值。平衡方程为：

$$P_b - \frac{EA}{L}(u^b - u^a) + \frac{EA}{L}(u^c - u^b) = 0 \quad (\text{式 1.5})$$

节点  $c$  处的平衡方程为

$$P_c - \frac{EA}{L}(u^c - u^b) = 0 \quad (\text{式 1.6})$$

这些平衡方程可联立求解，以便获得所有节点的位移。以上求解最好采用矩阵方法，因此，将内力和外力写成矩阵形式。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：

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} + \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{式 1.7})$$

通常情况下，每个单元的刚度  $EA/L$  项是不同的，因此，将模型中的两个单元刚度分别写成  $K_1$  和  $K_2$ 。我们感兴趣的是获得平衡方程的解答，使施加外力  $P$  与生成内力  $I$  达到平衡。当讨论这个方程时，若考虑到问题的收敛性和非线性，我们可以把它写成：

$$\{P\} - \{I\} = 0 \quad (\text{式 1.8})$$

对于完整的双单元三节点结构，我们改变其符号且重写平衡方程为：

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{式 1.9})$$

由此方程组能够解得三个未知变量： $u^a$ ， $u^b$  及  $P_a$ （在该问题中， $u^a$  确定为 0.0）。一旦知道了位移，就能用其计算桁架单元的应力。

## 1.2 有限元法的基本步骤

### 1.2.1 单元划分

将求解域离散为有限单元。根据基本长变量与坐标的关系决定采用一维、二维、三维单元。一维元用线段表示，二维元可为三角形元或四边形元，三维元常用四面体元或六面体

元。单元划分越密，计算精度越高，但计算工作量也越大。通常，在场变量变化剧烈处可将单元取密些，反之则取疏些。

### 1.2.2 确定插值函数（形函数）

在有限元法中，单元内任一点  $(x, y, z)$  的场变量需通过选定的插值形式由单元节点值插值求得，即：

$$\Phi^{(e)}(x, y) = \Psi \Phi^{(e)} = \Psi_1(x, y) \Phi_1^{(e)} + \Psi_2(x, y) \Phi_2^{(e)} + \Psi_3(x, y) \Phi_3^{(e)} + \cdots + \Psi_m(x, y) \Phi_m^{(e)} \quad (\text{式 1.10})$$

式中， $m$  为单元节点自由度总数； $\Phi^{(e)}$  是单元自由度列阵，即  $\Phi^{(e)} = \{\Phi_1^{(e)} \Phi_2^{(e)} \cdots \Phi_m^{(e)}\}^T$ ； $\Psi$  称为单元的形函数矩阵，它与单元节点坐标节点数目及插值形式有关。形函数矩阵分量的数目应与单元节点自由度数相等。以二维问题的三节点三角形单元为例，设每一节点只有一个自由度，则单元中任一点  $(x, y)$  处的场变量  $\Phi^{(e)}(x, y)$  可表示为：

$$\Phi^{(e)}(x, y) = \Psi \Phi^{(e)} = \Psi_1(x, y) \Phi_1^{(e)} + \Psi_2(x, y) \Phi_2^{(e)} + \Psi_3(x, y) \Phi_3^{(e)} \quad (\text{式 1.11})$$

上式对于单元的任一点均成立。显然在单元的三节点 1、2 和 3 处应有：

$$\begin{cases} \Phi_1^{(e)} = \Psi \Phi^{(e)} = \Psi_1(x_1, y_1) \Phi_1^{(e)} + \Psi_2(x_1, y_1) \Phi_2^{(e)} + \Psi_3(x_1, y_1) \Phi_3^{(e)} \\ \Phi_2^{(e)} = \Psi \Phi^{(e)} = \Psi_1(x_2, y_2) \Phi_1^{(e)} + \Psi_2(x_2, y_2) \Phi_2^{(e)} + \Psi_3(x_2, y_2) \Phi_3^{(e)} \\ \Phi_3^{(e)} = \Psi \Phi^{(e)} = \Psi_1(x_3, y_3) \Phi_1^{(e)} + \Psi_2(x_3, y_3) \Phi_2^{(e)} + \Psi_3(x_3, y_3) \Phi_3^{(e)} \end{cases} \quad (\text{式 1.12})$$

比较上式左右两端，显然有：

$$\begin{aligned} \Psi_1(x_1, y_1) &= 1; \Psi_2(x_1, y_1) = \Psi_3(x_1, y_1) = 0 \\ \Psi_2(x_2, y_2) &= 1; \Psi_1(x_2, y_2) = \Psi_3(x_2, y_2) = 0 \\ \Psi_3(x_3, y_3) &= 1; \Psi_1(x_3, y_3) = \Psi_2(x_3, y_3) = 0 \end{aligned} \quad (\text{式 1.13})$$

即对于  $i, j = 1, 2$ ，式 1.13 可写为：

$$\psi_i(x_i, y_i) = \begin{cases} 1 & \text{当 } i = j \\ 0 & \text{当 } i \neq j \end{cases} \quad (\text{式 1.14})$$

### 1.2.3 建立单元方程

在上述的例子中，直接根据问题的物理概念建立了单元方程。不过，在一般情况下，特别是二维和三维单元，这种直接法就显得过于繁杂而难以应用。为此，需要采用更为一般的数学方法，如变分法、加权余量法或具有明显物理意义上的虚功原理。

### 1.2.4 单元组集——建立总体方程组

首先在单元方程将局部自由度编号系统扩展到总体自由度编号系统中，将单元矩阵元素和列阵元素按照局部和总体自由度的关系“对号入座”，然后将这种扩展了的单元方程相加即得到总体方程组。

### 1.2.5 计入边界条件，解方程组

组集后的总体特征矩阵是奇异的，必须计入边界条件才能求得其唯一解，计入边界条件有三种方法。

#### 1. 直接代入法

上述引例中所用的方法，是将自由度作为已知量从总体方程组中消去，从而得到一组阶数降低了的修正方程。由于这种方法是改变方程组的阶数，会使程序编制复杂化，故程序中一般不采用。

#### 2. 对角线元素置 1 法

式子：

$$10^6 \times \begin{bmatrix} 4 & -4 & 0 \\ -4 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{式 1.15})$$

因为边界条件  $\Phi_1 = 0$ ，则可将矩阵中与  $\Phi_1$  对应的对角线元素置为 1，与该对角线元素相应的行和列的其他元素均置为零，右端列阵的相应元素也置为零，即上述式子修正为：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{式 1.16})$$

这种计入边界条件的方法简单，不改变原方程的阶数和未知量顺序，因此只适用于边界条件为零值的情况。

#### 3. 对角线元素乘大数法

仍以式 1.15 为例。为计入  $\Phi_1 = \Phi_1^* (= 0)$ ，可将式子中矩阵的第一个对角线元素（记为  $k_{11}$ ）乘以一大数  $a$ （如取  $a = 10^{10}$ ）并将原  $F_1$  用  $ak_{11}\Phi_1^*$  代替，则式子变为：

$$k_{11}\Phi_1 - \frac{4 \times \Phi_2}{a} + \frac{0 \times \Phi_3}{a} = k_{11}\Phi_1^* \quad (\text{式 1.17})$$

那么上式中的第一个方程相当于：

$$\begin{bmatrix} ak_{11} & -4 & 0 \\ -4 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} ak_{11}\Phi_1^* \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{式 1.18})$$

式中， $\Phi_1^*$  表示  $\Phi_1$  的已知值。

经边界条件修正过的总体线性代数方程组可采用成熟的解线性代数方程组的程序求解，如对称带状矩阵的高斯消元法等，对于大型方程组则可采用分块解法或波前法等。这些解法属于纯数值分析问题。

### 1.2.6 后处理

有限元求解计算结束后，通过后处理，可以查看各种应力大小、应变大小、变形量大小等，显示方法有列表显示、云图显示多种手段，既可以直观反映所研究参数的分布规律，又可以较精确读取所需要的数据。

目前流行的有限元后处理技术有：平均和局部插值技术。

根据解方程组后求得的节点基本场变量计算其他有关量，如应变、应力或热流密度等，视具体问题而定。

### 1.3 ABAQUS 简介

美国 SIMULIA 软件公司（原 ABAQUS 公司）成立于 1978 年，总部位于美国罗德岛博塔市，专门从事非线性有限元力学分析软件 ABAQUS 的开发与维护。公司总部雇员二百余人，其中近 90 人具有工程或计算机博士学位，近 60 人具有硕士学位，被公认为世界上最大且最优秀的固体力学研究团体。

2005 年，ABAQUS 公司加入法国达索系统，成为达索集团的全资子公司，并发展基于以 CATIA、ENOVIA 为核心的 PLM（产品生命周期管理）系统架构下的仿真平台 SIMULIA，这代表着 CAE（计算机辅助工程）技术和 CAD（计算机辅助设计）技术的进一步融合，为广大用户提供更为全面的 PLM 和 SLM（供应商生命周期管理）解决方案。

ABAQUS 软件已被全球工业界广泛接受，并拥有世界最大的非线性力学用户群。ABAQUS 软件以其强大的非线性分析功能以及深入解决复杂的科学问题的能力，除了在广大工业用户中得到认可外，也在以高等院校、科研院所等为代表的高端用户中得到广泛赞誉。

ABAQUS 是一套功能强大的基于有限元法的工程模拟软件，其解决问题的范围从相对简单的线性分析到最富有挑战性的非线性模拟问题。

ABAQUS 具备十分丰富的、可模拟任意实际形状的单元库。超过 500 种单元类型，提供了丰富的结构单元、连续单元和特殊单元。几乎每种单元都具有处理大变形几何非线性、材料非线性和包括接触在内的边界条件非线性以及组合的高度非线性的超强能力，并与之对应拥有各种类型的材料模型库，可以模拟大多数典型工程材料的线性和非线性行为，其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩弹性泡沫材料以及岩石和土壤这样的地质材料。作为通用的模拟分析工具，ABAQUS 不仅能解决结构分析中的问题（应力/位移），还能模拟和研究各种领域中的问题，如热传导、质量扩散、电子元器件的热控制（热-电耦合分析）、声学分析、土壤力学分析（渗流-应力耦合分析）和压电介质力学分析，对非结构的场问题如包含对流、辐射、相变潜热等复杂边界条件的非线性传热问题的温度场也提供了很好的分析能力；并具有模拟流-热-固、土壤渗流、声-结构、电-热、电-热-结构以及热-结构等多种耦合场的分析能力。ABAQUS 提供了丰富的接触和连接类型，可以是硬接触或软接触，也可以是 Hertz 接触（小滑动接触）或有限滑动接触，还可以是双面接触或自接触，接触面还可以考虑复杂的摩擦和阻尼的情况。

ABAQUS 分析采用具有高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性求解技术，为了进一步提高计算精度和分析效率，提供了多种功能强大的加载步长自适应控制技术，自动确定分析屈曲、蠕变、热弹塑性和动力响应的加载步长。此外，ABAQUS 还支持网格重划功能，用以纠正过度变形后产生的网格畸变，确保大变形分析的继续进行。

为了满足高级用户的特殊需要和进行二次开发，ABAQUS 提供了方便的开放式用户环境。这些用户子程序入口几乎覆盖了 ABAQUS 有限元分析的所有环节，从载荷定义、边界定义、材料定义到分析求解、结果输出，用户都能够访问并修改程序的缺省设置。在原有功

能的框架下，用户能够极大地扩展 ABAQUS 分析能力。

ABAQUS 有两个主要的分析模块：隐式求解器模块 ABAQUS/Standard 和显式求解器模块 ABAQUS/Explicit。ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 的前后处理模块。ABAQUS/Standard 还有两个特殊用途的附加分析模块：ABAQUS/Aqua 和 ABAQUS/Design。另外，还有 ABAQUS 分别与 ADAMS/Flex，C-MOLD 和 MOLDFLOW 的接口模块：ABAQUS/ADAMS，ABAQUS/C-MOLD 和 ABAQUS/MOLDFLOW。ABAQUS/CAE 是完全的 ABAQUS 工作环境模块，它包括了 ABAQUS 模型的构造，交互式提交作业、监控作业过程以及评价结果的能力。ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子集，它具有后处理功能，这些模块之间的关系如图 1.4 所示。

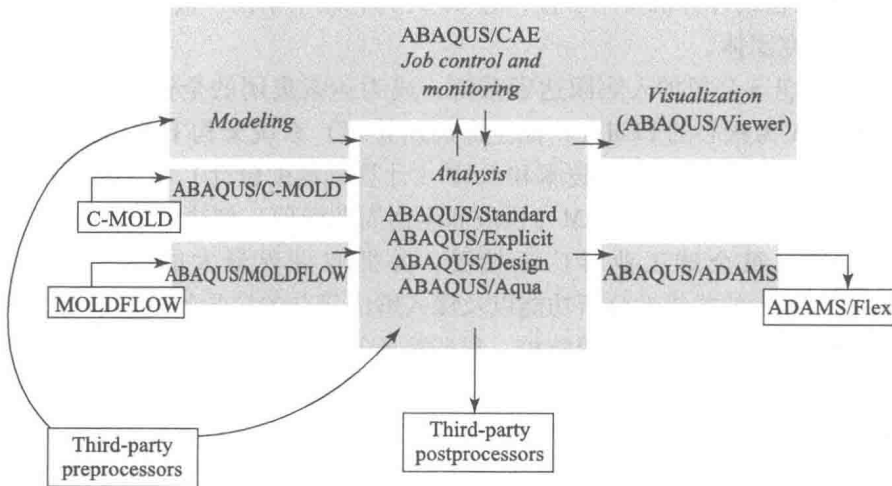


图 1.4 ABAQUS 模块关系图

### 1.3.1 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，包括线性/非线性静力分析、模态分析、简谐响应分析、频谱分析、随机振动分析、动力响应分析、静/动力接触、屈曲/失稳、失效和破坏分析、机构运动分析、热和电问题的响应等，具有极强的结构分析能力。它还可以同时处理几何、材料和接触非线性的组合非线性问题，采用自动增量控制技术，最小化用户输入。

1) 丰富的单元类型，ABAQUS 静力学分析单元种类达 562 种，提供了更多的选择余地，并能更深入反映细微的结构现象和现象间的差别。除常规结构外，可以方便地模拟管道、接头以及纤维加强结构等实际结构的力学行为。

2) 丰富的材料模型，包括材料的本构关系和失效准则等，除常规的金属弹塑性材料外，还可以有效地模拟高分子材料、复合材料、土体、岩石和高温蠕变材料等特殊材料，仅橡胶材料模型就达 16 种。

3) 材料和单元属性独立，在求解问题的时候拥有更多的灵活性和兼容性。

4) 灵活强大的用户自定义接口，用户可以使用 Fortran 语言来开发自己的材料模型。

针对储罐分析而言，ABAQUS/Standard 主要用于储罐静力学分析、模态动力学分析以及热分析等。



### 1.3.2 ABAQUS/Explicit

ABAQUS/Explicit (显式积分) 是一个具有通用功能的分析模块, 利用对时间的显式积分求解动态有限元方程。它适合于分析像冲击和爆炸这样短暂、瞬时的动态事件, 对高度非线性问题也非常有效, 例如模拟加工成型过程中改变接触条件的问题。显式与隐式方法的不同特性为:

显式方法需要一个只依赖于模型的最高自然频率, 而与荷载类型及持续时间无关的微小时间增量。一般取 10 000 ~ 100 000 个步长来模拟, 但是每步所花费的机时是比较小的。

隐式方法并没有时间增量步长的限制, 增量的大小通常参考精度和收敛情况来决定。通常隐式模型所用的增量步数要比显式模型小几个数量级。然而, 由于在每个步长中都必须求解一整套平衡方程, 所以隐式方法的每一步骤成本比显式方法要大得多。

在储罐分析中, ABAQUS/Explicit 主要应用于冲击分析、爆炸分析以及材料的失效及破坏分析。

### 1.3.3 ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environment) 是 ABAQUS 的交互式图形环境。用它可方便而快捷地构造模型, 只需生成或输入要分析结构的几何形状, 并把它分解为便于网格化的若干区域, 同时对几何体赋予物理和材料特性、荷载以及边界条件。ABAQUS/CAE 具有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。一旦模型生成, ABAQUS/CAE 可提交并监控要分析的作业, 可视化模块就可用来显式结果。

ABAQUS/CAE 是现代的、基于 Windows 风格的前后处理器, 最大限度地降低了工作量和培训成本。开放式、多功能的体系结构可将工程设计、工程分析、结果评估、用户化和交互图形界面集于一身, 构成一个完整 CAE 集成环境。

### 1.3.4 ABAQUS/Viewer

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

### 1.3.5 ABAQUS 帮助文档

ABAQUS 帮助文档的内容是广泛和完整的, 以下所叙的手册和印刷物, 除非特别声明, 均来自 HKS 公司。它们以印刷品形式和在线文档服务器提供。相关手册的更多信息, 可参考 ABAQUS/Standard 用户手册操作过程中所讨论的内容。

#### 1. ABAQUS/Standard 用户手册

这是使用最频繁的一本手册, 分为三卷。它是包含了 ABAQUS/Standard 所有功能的参考手册, 即对单元、材料模型、过程、输入规则等内容都做了详尽的说明。用户在做算例时, 必须在手头放着该手册以备时刻查用。

#### 2. ABAQUS/CAE 用户手册

该手册中有三个便于理解的教程和运用 ABAQUS/CAE 生成模型、进行分析及用可视化工具对结果评价的详细叙述。