

基于自主有限元软件的反应堆压力容器密封分析

王辉, 何铮

(国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209)

摘要: [目的]反应堆压力容器的密封性是保证核电站安全运行的关键因素之一, 因此对其密封进行系统深入地研究具有重要的工程意义。自主开发的结构有限元软件 ATLAS 根据结构有限元分析的应用特点, 在创新的预排序文件缓存技术和三维渲染技术等方面做了大量的优化工作, 能让 CAE 工程师在高度交互及可视化的环境下进行仿真分析工作。[方法]利用 ATLAS 软件建立压力容器模型, 对压力容器螺栓预紧力、密封法兰的接触过程进行了数值模拟, 得到了其受力特性和应力分布规律。[结果]研究表明: ATLAS 可以准确的导入模型, 划分网格, 施加各种工况, 快速完成求解计算, 很好的完成密封问题的有限元分析。计算结果的准确性能得到保证, 可以使用该方法进行压力容器的密封分析和应力校核。[结论] ATLAS 是一个适用于核电工程的大规模结构快速有限元分析系统, 可以用来进行压力容器的接触分析和结构强度的校核, 具有较好的应用前景。

关键词: 反应堆压力容器; 结构有限元分析; 应力分析; 密封

中图分类号: TM623; TQ051.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0066-07

Sealing Analysis of Reactor Pressure Vessel Based on ATLAS

WANG Hui, HE Zheng

(State Nuclear Huaqing (Beijing) Nuclear Power Technology R&D Center Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: [Introduction] Sealing of reactor pressure vessel is one of the key factors in the safe operation of nuclear power plants, and therefore it has significant importance in engineering to conduct the in-depth study of its contacting systems. Based on the application characteristics of finite element analysis, we have developed independently a software ATLAS, where a lot of innovation optimizations have been done in terms of pre-sorted file caching and 3D rendering technologies that allows CAE engineers working in highly interactive and visual environments. [Method] In this paper we used ATLAS to create a pressure vessel model, and then simulated numerically the contacting and the sealing of pressure vessel, and finally obtained the mechanical characteristics and stress distribution, and evaluated the strength and fatigue analysis of its critical section. [Results] The results show that ATLAS can accurately import and mesh models, apply a variety of conditions, quickly complete finite element analysis of contact problems. The accuracy of the results can be guaranteed, according to the methods, the designed flange meets the requirements of structural strength and durability. [Conclusion] As a rapid finite element analysis system for large-scale structures, ATLAS provides tools for structural sealing analysis and strength checking for reactor pressure vessel and it has good application prospects.

Key words: reactor pressure vessel; structural finite element analysis; stress analysis; sealing

反应堆压力容器属于一级安全设备, 在各种运行工况和试验条件下均要保持结构的完整性, 不会发生放射性物质的泄漏^[1-2]。压力容器承受包括压力、热膨胀等复杂载荷, 它的密封性是保证核电站

安全运行的关键因素之一^[3-4]。因此对其密封性进行系统深入地研究具有重要的工程意义。

文献^[5]使用有限元法对反应堆压力容器国产化 O 形密封环进行了大变形弹塑性接触分析。自编程序或借助于 ANSYS, 采用弹塑性小变形问题的非线性求解方法、接触问题的混合求解算法等方法完成三维瞬态密封分析^[6]。

为保证压力容器的密封性能, 需要对螺栓预紧

过程进行数值模拟。文献[3]分析了 CPR 1000 反应堆压力容器主螺栓预紧的过程, 高温气冷堆压力容器承压螺栓预紧过程得到有限元模拟, 同时压水堆反应堆压力容器密封主螺栓预紧过程也得到模拟。但如何才能找出最合理的预紧方案, 保证最终螺栓预紧力分布的均匀性, 还需要进一步探索。

由于反应堆压力容器存在超大的模型规模、壳体之间存在多个法兰对接触、大量螺栓预紧力模拟等特征, 常规有限元分析软件在现有硬件条件下进行反应堆压力容器密封分析时对反应堆压力容器进行假设和简化。我们开发自主有限元软件, 尽可能对反应堆压力容器进行整体建模, 在进行不同工况下压力容器的应力和变形分析时考虑接触和螺栓预紧等关键问题。

本文中我们利用自主开发的结构有限元软件 ATLAS^[7-8] 建立压力容器模型, 对压力容器密封法兰的接触过程进行了数值模拟, 得到了其受力特性和应力分布规律。同时, 我们尝试使用 ATLAS 完成压力容器螺栓预紧的力学计算。我们首先对压力容器螺栓建立模型, 然后对压力容器进行快速的有限元剖分, 接着利用有限元求解器对该模型进行计算。最后我们对计算结果进行验证并讨论。

我们自主开发的结构有限元软件 ATLAS 根据结构有限元分析的应用特点, 在创新的预排序文件缓存技术和三维渲染技术等方面做了大量的优化工作, 能让 CAE 工程师在高度交互及可视化的环境下进行仿真分析工作。

1 ATLAS 有限元软件简介

ATLAS 软件^[7-8] 由前处理器, 求解器和后处理器组成。其前处理器能直接读取 CAD 软件的几何模型进行有限元网格划分等操作, 并进行材料属性和边界条件的设置, 再提交给 ATLAS 求解器或 ABAQUS 求解器进行计算。计算完成后, 再由 ATLAS 后处理器读取计算结果, 进行后处理工作。

ATLAS 前后处理器为工程师提供了一个完整的高性能的可视化用户环境。ATLAS 能让 CAE 工程师在高度交互及可视化的环境下进行仿真分析工作, 具备与 UG、Catia、ProE 等 CAD 软件的接口, 并支持 ABAQUS、MARC 等求解器。ATLAS 也可以交互式的显示数据、进行数据捕捉、对后处理数据进行标准化设置, 还可以根据客户需要查看动画

结果。

ATLAS 求解器基于开源代码 Adventure 二次开发。Adventure 结构力学分析软件基于高速并行原理开发, 计算收敛速度提升相当明显, 求解速度较常规有限元软件求解速度快一个数量级以上。

ATLAS 软件的设计采用了先进的面向对象的设计模式, 使用多态、虚拟继承与模板技术, 在保证程序性能的前提下最大限度降低了程序模块之间的耦合性, 具有非常高的可扩展性并且易维护。

ATLAS 系统结构主要分为四个层次: UI 层、应用层、领域层和内核层。其中 UI 层主要面向与用户的交互操作; 应用层主要用来将用户的操作分配给领域层对应的对象, 是 UI 层与领域层中间的一个任务转发器; 领域层主要完成各种功能的逻辑实现, 它不与 UI 层发生直接关系; 而内核层对领域层提供必要的基础数据结构和算法的支持。

应用于子系统负责管理持久性数据以及用于显示的临时数据和状态数据, 系统内部的数据与系统外部的转换也在这一层次完成, 除此之外应用于子系统也负责具体应用功能的调用以对来自 UI 层的功能调用进行响应; 同时也控制着所有的全局参数, 负责程序的显示配置。该子系统包含命令管理器 (Command Manager)、配置模块 (Preference)、数据文档 (Document) 和渲染数据 (GL Data) 以及接口 (Interface)。

领域子系统是对真实物理世界的的数据抽象, 包括几何模型, 网格模型, 边界条件和载荷, 材料, 特征属性以及结果。

根据有限元分析软件的应用特点, 内核层在内存管理技术与三维渲染技术方面做了大量的优化工作。

首先, ATLAS 采用先进的内存优化技术, 避免了内存碎块的产生而带来的内存使用率降低问题, 也避免了频繁的系统调用造成性能的下降。其次, ATLAS 运用 OpenGL 图形引擎的 VBO、FBO 以及 GLSL 技术直接对硬件编程, 充分利用 GPU 的能力完成大模型的三维渲染。第三, ATLAS 采用了质数哈希数据结构对海量数据进行索引, 可以在常数时间定位任意节点与单元, 同时 ATLAS 创新的采用了预排序文件缓存技术。经过大量优化工作, ATLAS 软件实现在普通计算机上很迅速地生成、处理上亿自由度的有限元分析模型。

我们对内存的优化管理进行了测试与评估。对小内存分配(32 字节),优化之后效率可提高 10 倍以上,而对较大内存(1 024 字节),效率可提高 100 倍以上。测试结果表明内存优化技术能有效减少内存碎片,尤其是在庞大的单元数据和节点数据提供管理功能,有效提高内存使用效率。内存分配经过优化之后,大大地提升有限元程序的运行效率。当 ATLAS 前处理器在启动时,将执行 modeler.exe,只需要 1 s。在软件的许可证服务器启动后,ABAQUS CAE 6.12 需要 80 s 启动,产生三个可执行程序,ABQcaeK, ABQcaeG 文件和 python,分别被描述为 SMACkmCaeKerMod, SMACgm CaeGuiMod, 和 smapython。ATLAS 前处理器, ABAQUS 中的 ABQcaeK, ABQcaeG 文件和 python 使用的内存分别是 79 MB, 160 MB, 106 MB 和 25 MB。这表明, ATLAS 前处理器导入模型前需要的内存约为 ABAQUS 的三分之一。一般来说相比, ATLAS 前后处理器需要的资源比 ABAQUS CAE 少。

2 反应堆压力容器螺栓预紧分析

2.1 螺栓预紧理论方法

对于螺栓预紧过程的评价主要包含两个方面,一个是预紧过程中螺栓的受力情况,一个是预紧过程中上下法兰的相对变形量。

由文献[7]可知,在预紧过程中螺柱的受力情况计算公式如下:

$$W = 0.785D_G^2 p_e + 6.28D_G b m p_e \quad (1)$$

式中: W 为螺柱受力(N); D_G 为垫片中心圆直径(mm); D 为螺柱直径(mm); b 为垫片有效密封宽度(mm); m 为垫片系数; n 为连接系统螺柱数量(个); p_e 为等效压力(MPa)。

螺柱所受应力按式(2)计算:

$$\sigma = \frac{0.785D_G^2 p_e + 6.28D_G b m p_e}{0.25n\pi D^2} \quad (2)$$

式中: σ 为螺柱所受应力(MPa)。

经计算由式(2)可得螺柱轴向理论应力为 $\sigma = 1.185 \text{ kPa}$ 。

上、下法兰相对变形量分析方法[8]:

$$\delta_0 = U_{\text{上}} - U_{\text{下}} \quad (3)$$

式中: δ_0 为相对变形量(mm); $U_{\text{上}}$ 为上法兰的变形量(mm); $U_{\text{下}}$ 为下法兰的相对变形量(mm)。

2.2 螺栓预紧有限元分析

ATLAS 有限元软件对反应堆压力容器螺栓预紧力学计算的步骤如下:

1) 在前处理器软件支持各种常用几何格式。在软件中导入反应堆压力容器螺栓预紧模型的几何模型。

2) 选择“面划分”,根据模型尺寸填写网格的最大尺寸、平均尺寸和最小尺寸,划分面网格;然后选择“体划分”,默认梯度为 1.05,划分体网格。查看网格模型,列表中如有四面体网格并且单元数不为 0,则说明体网格划分成功。

3) 选择“分析作业”,选择类型为“求解器”,并设置为当前分析作业,创建求解器的分析作业。

4) 选择创建材料对话框,修改材料名称。将密度添加到命名的材料中,修改密度数值。同理可以添加弹性模量等材料参数。

5) 选择创建属性对话框,将命名的材料参数加入赋值的部件,选择所有选择的部件,把材料参数赋给模型。

6) 选择载荷边界,加载压力和位移等。

7) 将模型树中的分析步展开,编辑分析步对话框,把上一步创建的载荷和边界条件添加到该分析步。

8) 选择求解器,开启计算程序。计算完成后界面会显示 Job finished。此时可看到目录中含有自主格式的结果文件。

如图 1~图 3 的结果对比所示,本文所使用求解器的应力和位移结果与 ABAQUS 计算结果非常接近,该求解器可以很好的进行螺栓预紧力分析。同时, X 、 Y 、 Z 三个方向上的位移结果误差按误差公式得到误差值,分别是 4.86×10^{-6} 、 4.16×10^{-6} 、 3.34×10^{-6} 。由此可以看出, ATLAS 计算结果与 ABAQUS 结果误差非常小。

3 反应堆压力容器接触分析

3.1 接触分析的数值方法

分析接触问题的数值方法大致可分为数学规划法、边界元法和有限元法等。研究表明,数学规划法和边界元法只适合于解决比较简单的弹性接触问题;而对于相对复杂的接触非线性问题,如大变形、弹塑性接触问题,有限元方法更成熟和有效。

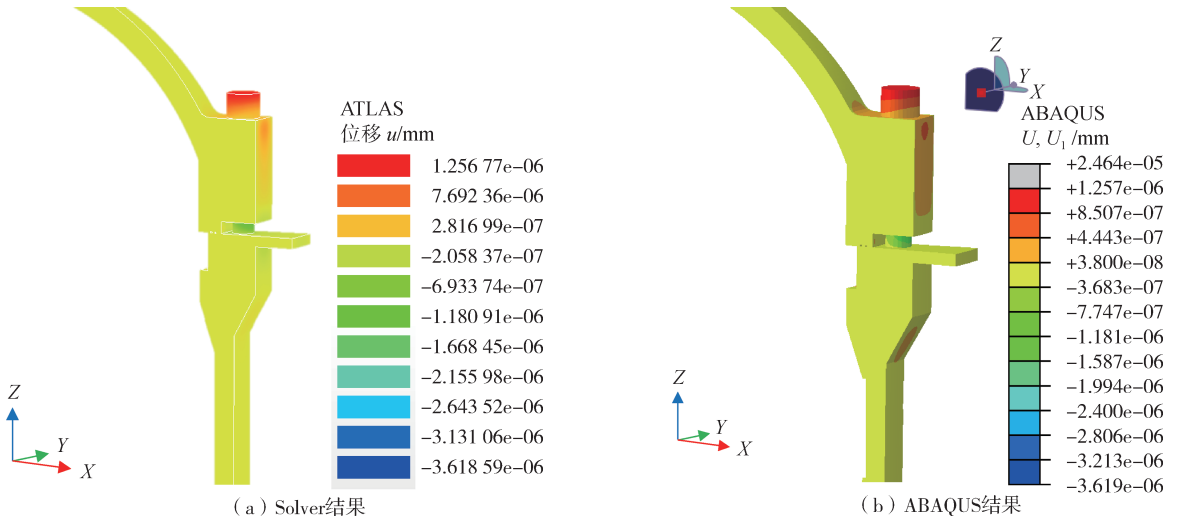


图1 X轴方向位移

Fig. 1 X-displacement

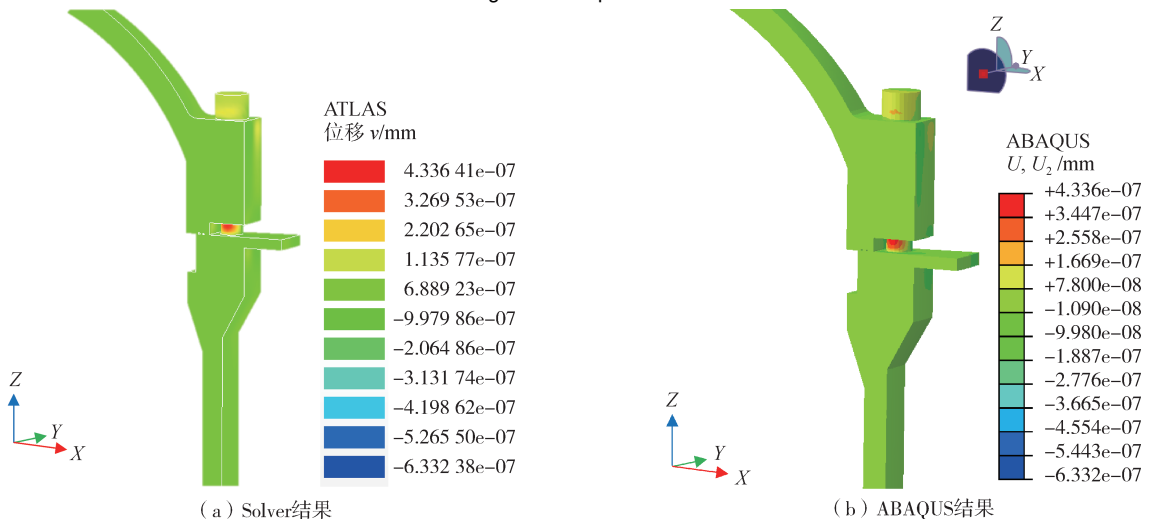


图2 Y轴方向位移

Fig. 2 Y-displacement

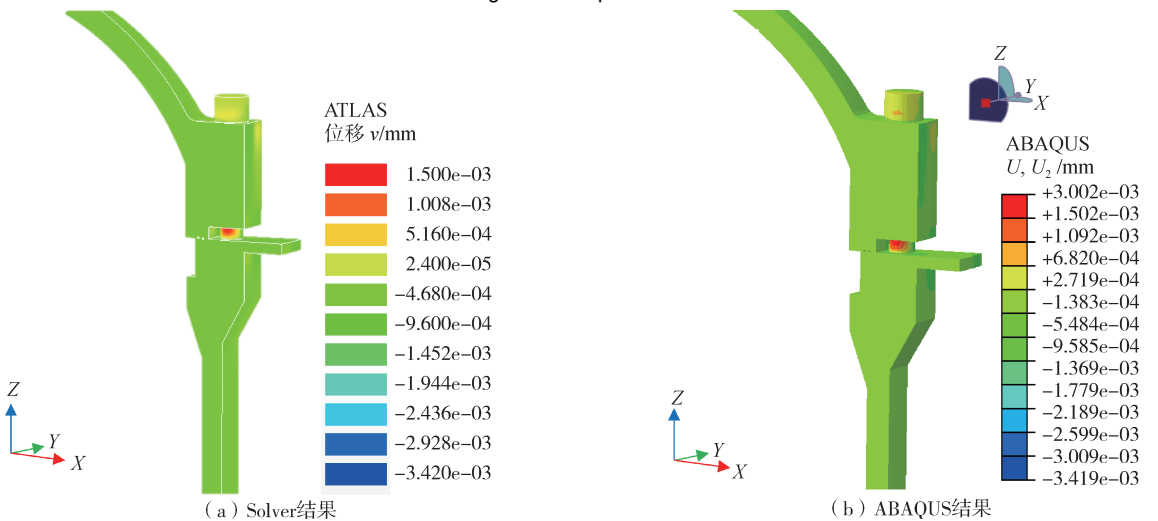


图3 XX方向上应力

Fig. 3 XX-stress

常见的物体之间的接触如图4所示。

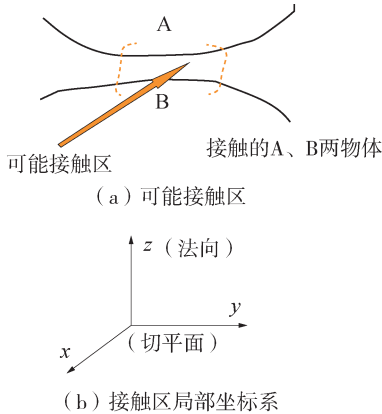


图4 接触示意图

Fig. 4 Contacting sketch map

1) 开式(opening)接触: 此时 $r_z \geq 0$, 即法向间隙大于等于0。

2) 粘式(cohesive)接触: 此时 $r_z = 0$, $\Delta r_x = 0$, $\Delta r_y = 0$, 即法向无间隙, 且在一个载荷增量步始末, 整个切平面无相对滑动。

3) 滑移(sliding)接触: 此时 $r_z = 0$, $\Delta r_x \neq 0$ 且 $\Delta r_y \neq 0$, 即法向无间隙, 且切平面的两个方向均有相对滑动。

4) 混合(mixed)接触: 此时 $r_z = 0$, Δr_x 与 Δr_y 中一个为0、一个不为0, 即法向无间隙, 切平面的一个方向无相对滑动、而另一个方向有相对滑动。

有限元法的基本思想是: 假定接触状态, 求出接触力, 检验接触条件, 若与假定的接触状态不符, 则重新假定接触状态, 直至迭代计算得到的接触状态与假定状态一致为止。具体做法是:

对于弹性接触的两个物体, 通过有限元离散, 建立方程

$$\mathbf{K}_i \boldsymbol{\delta}_i = \mathbf{R}_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: \mathbf{K}_i 为整体刚度矩阵; $\boldsymbol{\delta}_i$ 为结点位移列阵; \mathbf{R}_i 为结点荷载列阵。 $i=1$ 表示接触初始状态, 通常根据经验和实际情况假定。求解式(1), 得到结点位移 $\boldsymbol{\delta}_1$, 再计算接触点的接触力 P_1 , 将 $\boldsymbol{\delta}_1$ 和 P_1 代入与假定接触状态相应的接触条件, 如果不满足接触条件, 就要修改接触状态重新进行计算。这样不断的迭代循环, 直至 $\boldsymbol{\delta}_n$ 和 P_n 满足接触条件为止, 此时得到的解答就是真实接触状态下的解答。

3.2 压力容器建模

反应堆压力容器算例模型如图5所示, 因压

力容器是对称的, 取其1/4模型来分析法兰与压力容器之间的接触, 该模型仅受螺栓预紧力的作用。材料参数为: 弹性模量为200 GPa、泊松比为0.3。

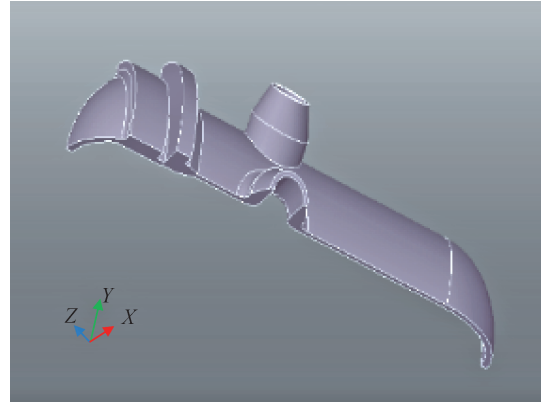


图5 反应堆压力容器模型

Fig. 5 Model of reactor pressure vessel

我们首先通过 ATLAS 前处理器导入模型。根据模型尺寸填写网格的最大尺寸、平均尺寸和最小尺寸, 划分面网格和体网格。然后, 我们创建材料属性, 在项目列表中的名称中可以修改材料名称, 修改密度数值等。同理可以添加弹性模量等材料参数。

接着, 我们设置边界。如图6所示, 在“载荷边界”, 点击列表中的“压力”, 可以修改边界条件的名称, 选中如图6所示的相对的两个面用来模拟预紧力, 输入值, 点击应用即加载了预紧力。

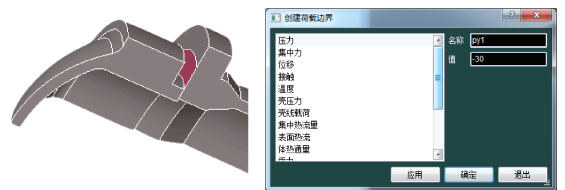


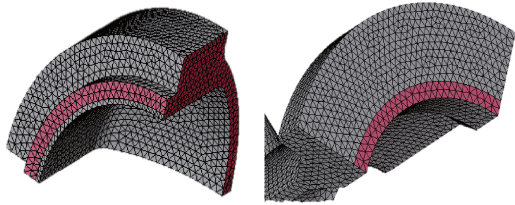
图6 施加载荷

Fig. 6 Applying loadings

在模型显示区选择要施加约束的面, 因选择的是1/4模型, 需要施加对称边界条件, 软件左侧的选择列表会列出已经选择的面及编号, 点击创建荷载边界对话框中的确定按钮。

然后, 我们设置接触对。如图7所示, 在模型显示区选择上下法兰的接触面, 可使用左侧模型树的是否显示部件功能分别选择面, 左侧的选择列表会列出已经选择的面及编号, 输入静摩擦系数, 完

成接触对的设置。过程如图 7 所示。



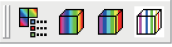
注: 接触对选择列表为面 929 网格模型和面 388 网格模型。

图 7 设置接触对

Fig. 7 Setting contact pairs

最后, 把上一步创建的载荷和边界条件添加到该分析步。

3.3 压力容器接触分析结果

在 ATLAS 后处理器中, 如图 8 所示, 选择左侧模型树中的基本结果—Displacement—U0, 并双击, 然后选择工具栏中  的“光滑云图”即可显示 X 方向位移云图, 对应的 V0 为 y 方向位移、W0 为 Z 方向位移。应力结果查看同位移的查看方法。

ATLAS 和 ABAQUS 的应力和位移的对比结果如图 8 ~ 图 9 所示。

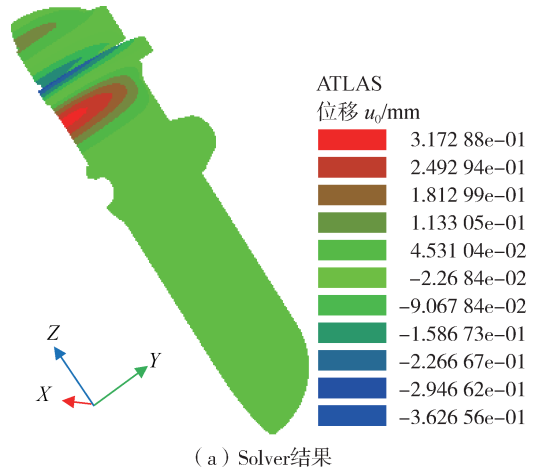
从图 8 ~ 图 9 的结果对比中可以看出本文所使用求解器的应力和位移结果与 ABAQUS 计算结果非常接近, 该求解器可以很好的进行接触分析。

4 结论

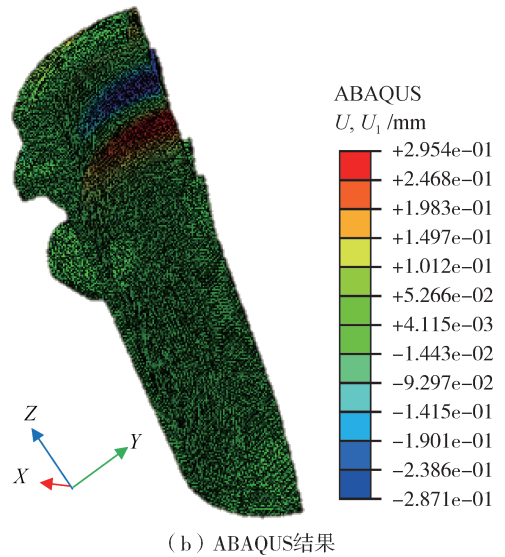
自主开发的结构有限元分析软件 ATLAS 是一个适用于核电工程的大规模结构快速有限元分析系统, 集成了核电设计中常用的分析功能模块, 如弹塑性分析功能、大开孔优化功能、热机耦合分析功能、瞬态分析功能、时程分析功能、楼层响应谱生成功能、反应谱分析功能、应力线性化功能、压力容器防断裂评定功能等。本文通过反应堆压力容器密封性分析, 得到以下结论:

1) 自主开发的 ATLAS 软件系统与并行服务器硬件系统组成的大规模有限元分析平台能够用来进行反应堆压力容器压力和变形分析。在分析中考虑了壳体法兰之间的接触条件, 以及法兰紧固螺栓的螺栓预紧力, 为以后进行上亿自由度核电关键设备结构力学分析打下基础。

2) 使用自主开发的结构有限元分析 ATLAS 软件针对压力容器模型进行了螺栓预紧力分析, 并与



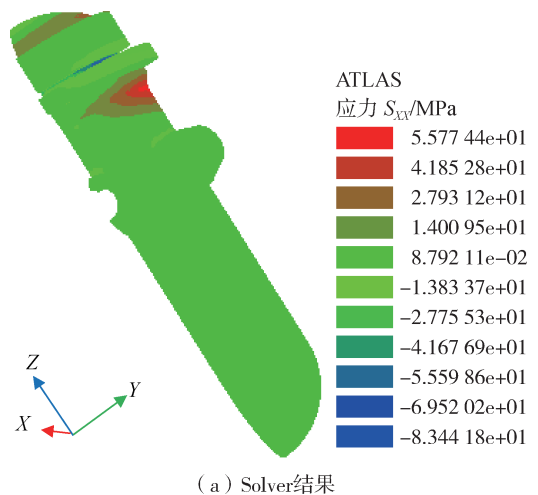
(a) Solver结果



(b) ABAQUS结果

图 8 X 方向位移结果

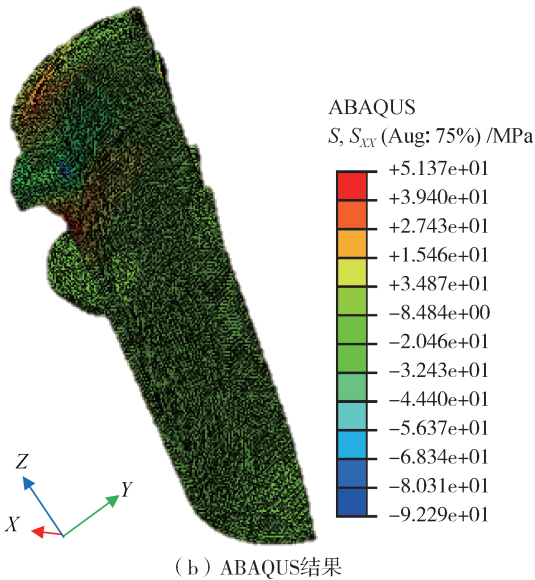
Fig. 8 Results of X-displacements



(a) Solver结果

图 9 S_{xx} 计算结果对比

Fig. 9 S_{xx} results comparison



续图9 S_{xx} 计算结果对比

Fig. 9(Cont.) S_{xx} results comparison

同样模型的 ABAQUS 计算结果进行了对比, 由以上分析可知, ATLAS 软件可以快速有效的进行螺栓预紧力分析, 其计算结果的准确性和精度是可以得到保证的。

3) ATLAS 软件针对压力容器模型进行了接触分析。ATLAS 软件可以准确的导入模型, 划分网格, 施加各种工况, 快速完成求解计算, 很好的完成接触问题的有限元分析。计算结果的准确性能够得到保证, 可以使用该方法进行压力容器的接触分析和结构强度的校核。

参考文献:

- [1] MOHAN K M, CHAKRABARTI S K, BASU P C, et al. Study of the linear behavior of a PSC containment dome with large openings [J]. Nuclear Engineering & Design, 2000, 196(2): 123-137.
- [2] NASSAR S A, ALKELANI A A. Clamp load loss due to elastic interaction and gasket creep relaxation in studed joints [J]. ASME J. Pressure Vessel Technol, 2006, 128(3): 394-401.
- [3] 熊光明, 邓小云, 段远刚, 等. CPR1000 反应堆压力容器密封性能模拟技术研究 [J]. 核技术, 2013, 36(4): 32-36. XIONG G M, DENG X Y, DUAN Y G, et al. Sealing behavior simulation technology research for CPR1000 reactor pressure vessel [J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 32-36.

- [4] JIA X, CHEN H, LI X, et al. A study on the sealing performance of metallic C-rings in reactor pressure vessel [J]. Nuclear Engineering Design, 2014, 278(10): 64-70.
- [5] 薛国宏, 曹明, 沈睿, 等. 反应堆压力容器国产 O 形环密封性能分析 [J]. 压力容器, 2016, 33(3): 16-20. XUE G H, CAO M, SHEN R, et al. Sealing behavior research on metal O-ring of reactor pressure vessel [J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(3): 16-20.
- [6] 邵雪娇, 郑连纲, 苏东川, 等. 反应堆压力容器密封环有限元模拟技术研究 [J]. 核动力工程, 2015, 36(增刊2): 142-145. SHAO X J, ZHENG L G, SU D C, et al. Study on finite simulation technology for seal ring of reactor pressure vessel [J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(Supp. 2): 142-145.
- [7] WANG H, LÜ P. Performance improvement of seismic analysis in a large scale interactive visualization[C]//IEEE. 2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC), New York, U. S. A., Aug. 24-26, 2015. U. S. A.: IEEE, 2015:908-913.
- [8] WANG H, LÜ P. Evaluation of memory optimization in a large-scale structural finite element pre-processor [C]//IEEE. 2014 IEEE 8th International Symposium on Embedded Multicore/Manycore SoCs (MCSoc), Aizu-Wakamatsu, Japan, Sep. 23-25, 2014. U. S. A.: IEEE, 2014: 31-38.

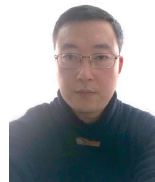
作者简介:



WANG H

王辉(通信作者)

1972-, 男, 江苏南京人, 高级工程师, 工学博士, 现为国家电投集团科学技术研究院核电软件中心主任科研人员, 主要从事高性能计算及核电工程设计、分析软件研发工作 (e-mail) wanghui6@snpct.com.cn.



HE Z

何铮

1983-, 男, 北京市人, 高级工程师, 工学博士, 现为博思英诺科技(北京)有限公司项目经理, 主要从事核电关键设备分析设计, 核设施、设备退役工程, 放射性废物处理、处置相关技术服务。

(责任编辑 郑文棠)