

核电主设备接管嘴温度场及热应力分析

王辉, 何铮, 张小铮, 刚直

(国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209)

摘要: 反应堆蒸汽发生器主给水管的热疲劳裂纹问题备受关注, 但至今仍未得到完全解决。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, 运用 OpenGL 图形引擎的 VBO、FBO 以及 GLSL 等技术直接对硬件编程, 充分利用 GPU 的三维渲染能力开发出大模型的高度交互及可视化的仿真环境。ATLAS 软件被用来进行反应堆核电主设备接管嘴热应力数值模拟。我们首先建立管嘴的有限元分析简化模型, 在 ATLAS 软件中加载管嘴的内部表面, 并对结构加载温度边界进行结构热应力分析得出了热应力变化曲线。我们发现, ATLAS 可以准确地导入 CAD 模型, 划分网格, 施加各种工况, 完成主给水管嘴温度场和热应力分析。ATLAS 计算结果与 ABAQUS 计算结果一致, 其准确性得到保证。最后我们对计算结果进行验证并得出结论。

关键词: 核电主设备; 接管嘴; 结构有限元分析; 流固耦合

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)S1-0036-11

Thermo-mechanical Analysis of Feedwater Nozzle for Steam Generator

WANG Hui, HE Zheng, ZHANG Xiaozheng, GANG Zhi

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

Abstract: Thermal fatigue crack problems of the feedwater nozzle for steam generator have attracted widely attentions, but haven't yet been fully resolved. Depending on the application characteristics of finite element analysis, we developed finite element software ATLAS by directly programming to hardware with OpenGL graphics engine VBO, FBO and GLSL technologies. By fully using of three-dimensional rendering capabilities of the GPU, ATLAS provided a large-scale highly interactive visualization environment for engineers. ATLAS was used to simulate the thermal stress of the feedwater nozzle. A simplified model of the nozzle finite element analysis was created, and the loads and temperature boundary conditions of the nozzle were added on the interior surfaces. The thermal stress curve was obtained after conducting structural thermal stress analysis. We found that ATLAS can accurately import CAD models, mesh, apply a variety of conditions, and complete the numerical simulation of the thermal stress of the nozzle. ATLAS results were consistent with those of ABAQUS calculation, so its accuracy was assured. Finally, we validated the results and draw conclusions.

Key words: steam generator; feedwater nozzle; structural finite element analysis; fluid-structure coupling

蒸汽发生器是压水堆核电厂的关键设备之一。反应堆运行过程中, 蒸汽发生器主给水管承受着严重的瞬态热载荷^[1-4]。系统在升功率时, 蒸汽发生器主给水管嘴在低温给水入口, 小流量的补给低温

给水和与高温存留水在给水管嘴中形成热分层现象, 高达 200 多度的温度梯度导致主给水管嘴附近具有很高的热应力, 从而造成对主给水管嘴焊缝区的复杂热冲击^[5-7]。由于主给水管嘴焊缝的可能存在, 最终可能导致管嘴疲劳破损的事故, 因此主给水管嘴的热疲劳裂纹问题备受关注^[8-10]。

国内外一直关注蒸汽发生器主给水管嘴附近出现热分层现象, 并对其造成给水管嘴疲劳裂纹的事故开展了实验和理论研究^[11-12]。给水管嘴的热分层现象可以用 CFD 分析软件进行数值模拟^[13-14]。

收稿日期: 2017-01-05

基金项目: 国家重大科技专项经费资助项目(2012ZX06004-012)

作者简介: 王辉(1972), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事高性能计算技术应用研究及核电工程设计、分析软件研发工作(e-mail) wanghui6@snpctc.com.cn。

受计算能力的限制, 当时的理论分析主要以定性为主, 基于三维的实际管嘴进行全面系统的分析比较少。为验证理论分析, 实验中用热电偶测量了电厂给水管嘴与给水管道焊缝附近处的温度分布^[8]。

随着计算机技术的快速发展, 计算机仿真技术的应用得到了极大的推广。有限元分析方法作为一种现代分析计算方法也发展迅速。我们尝试使用自主开发的结构有限元软件 ATLAS^[15-16] 进行核电主设备接管嘴热应力数值模拟。我们首先建立管嘴的有限元分析简化模型, 加载管嘴的载荷, 并对结构加载温度边界进行结构热应力分析得出了热应力变化曲线。最后我们对计算结果进行验证并对结果进行讨论。

1 计算方法

1.1 ATLAS 系统简介

ATLAS 是一个大规模结构快速有限元分析系统, 由三部分组成, 包括前处理器 ATLAS Modeler, 后处理器 ATLAS Viewer 和求解器 ATLAS Solver^[15-16]。它最突出的特点是, 在普通计算机上就可以很迅速地生成、处理上千万自由度的有限元分析模型。ATLAS Solver 求解器基于高速并行原理开发, 计算收敛速度较常规有限元软件提升相当明显。

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。根据有限元分析软件的应用特点, ATLAS 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。

ATLAS 系统结构主要分为四个层次: 界面(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支持。整体结构的包图如图 1 所示。

界面(UI)子系统提供软件与外界的交互响应功能, 主要包括界面框架系统, 其中 GUI 又包括主框架(Frame), 菜单(Menu), 工具条(Toolbar), 3D 渲染窗口(GL drawer), 对象树(Object Tree), 消息窗口(Message Window)和命令窗口(Command

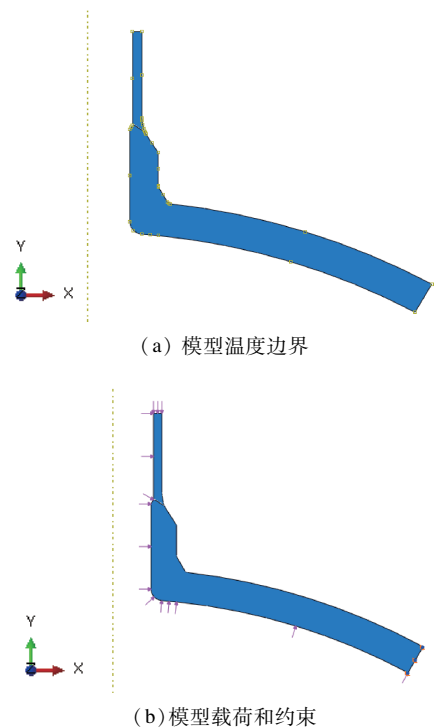


图 1 模型温度边界及模型载荷和约束图

Fig. 1 The temperature boundary and the loads and constraints

Window)。

UI 子系统的实现通过继承 Qt 库来实现。其中, 主框架提供窗口系统支持以及事件消息回路的映射支持, 其他的所有 GUI 单元都作为主框架的组件存在; 菜单对功能命令的分组以及任务转发; 工具条是菜单的按钮化形式, 使用户操作更方便; 模型树是模型数据的树形结构视图; 消息窗口是用文本显示系统运行状态和结果的窗口; 命令窗口是对于需要与领域层配合完成的功能建立的与用户交互的窗口模板。

应用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)。其中命令管理器(Command Manager), 负责注册、创建和销毁命令; 配置模块负责记录程序的配置以及各种相关全局变量的存储和获取; 数据文档负责存取和维护持久性数据; 渲染数据负责

为 UI 的三维渲染准备数据；接口负责外部数据的导入和导出。

领域子系统是对真实物理世界的数据抽象，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。其中，几何模型为独立的几何实体，包括体、面、线、点在几何元素的拓扑关系形成的空间结构，其中两个顶点决定一条线段，多个线段形成一个面，多个面形成一个体，多个体组成一个装配体；网格模型是几何模型的离散表达，所有几何元素都可以离散成单元和节点的集合，同时它还保存着几何模型的拓扑关系；边界条件和载荷是对分析模型所施加的初始条件和边界条件以及包括压力、力、温度等在内的载荷；材料为分析模型的所属的材料，表达了该材料的物理属性；特征属性是材料与单元集的对应关系以及属性；结果为求解得到的模型数据结果。

1.2 有限元内存优化技术

随着计算机硬件和软件技术的突飞猛进，使得超大规模问题的快速求解成为可能。如果能够更充分地利用计算机硬件的飞速发展，使得大规模问题的快速求解成为可能，从而能够快速处理越来越复杂的反应堆结构问题。

由于 CAE 前后处理软件需要频繁地分配和释放内存，对内存的优化管理有非常重要的意义。一方面，需要避免内存碎片的产生而带来的内存使用率降低问题，另一方面又要避免频繁的系统调用造成性能的下降，内存池的核心任务就是在满足正常内存分配的基础上解决这两个问题。内存池有两种分配模式：普通模式和单元模式，其中单元模式按给定大小每次分配或释放一个单元的内存。

内存优化算法如下：

1) 从系统中申请一个指定大小的块作为内存池，内存池可以在需要的时候申请新的块作为内存池的一部分。

2) 需要内存时，如果需要的内存不超过块大小，则直接从内存池中分配。

3) 从内存池中分配的内存存在已不需要时释放，回到内存池中供下一次申请。

4) 内存池保存分配后再释放的空闲内存地址及其大小，供下一次分配时索引。

对内存的优化管理，我们进行了测试与评估。测试环境为普通个人计算机。测试内容分未优化、

优化(使用 1 M 的内存池)、优化(使用 100 M 的内存池)三种情况分别对不同工况测试记录程序运行时间。测试结果表明，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；在连续分配模式下，优化之后可得到 2~3 倍以上的效率提升；在变长度模式下，分配效率有 6 倍以上的提升。随着内存池的增大，效率虽有提升，但提升有限。

内存管理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，将大大提升有限元程序的运行效率。

1.3 有限元可视化技术

目前，ATLAS 软件支持上千万节点单元、上亿自由度有限元网格模型。这对有限元分析计算密切相关的可视化系统是一个巨大的挑战。国内外，在有限元可视化系统的相关领域已开展了较多的研究工作。大型有限元计算软件通常自带可视化系统，如 ANSYS 和 ABAQUS，但可扩展性/开放性差，不提供开发接口。独立的可视化软件，如商用软件 Tecplot、Ensignt，功能强大，但开放性差，而开源软件，如 Paraview 和 Gmsh 等，功能较弱，大规模问题数据管理能力不足。自主开发可视化软件通常基于 Direct 3D 或 OpenGL 图形编程接口开发。同时，基于 GPU 通用计算技术，可实现高阶有限元体绘制显示。

ATLAS 前处理器具备与 UG、Catia、ProE 等 CAD 软件的接口，并支持 ABAQUS、MARC 等求解器。后处理器用于有限元计算得到的结果数据显示，其具有三维图形显示非常快等一些独特功能，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 3D 渲染窗口使用 OpenGL 引擎。系统应用 OpenGL 最新的技术充分发挥显卡的性能，针对有限元数据进行了优化再组织，运用 OpenGL 图形引擎的 VBO、FBO，充分利用 GPU 的能力完成大模型的三维渲染；除了使用 VBO(顶点缓存对象)技术外，在云图显示方面还使用了 GLSL (OpenGL 着色语言)编写在 GPU 上执行的程序，即顶点着色器和片断着色器，通过该程序可以直接由当前结果的数据进行云图渲染，大大提升了渲染

速度并节省了 CPU 的计算时间。

1.4 热应力计算方法

根据物体的热胀冷缩性质, 在自由胀缩的情况下, 当微元的温度从 t_1 增减至 t_2 , 即温度变化从 $t_2 \sim t_1$ 时物体会产生变形。在一般情况下, 微元由于温度变化而引起热变形可能由于内部或外部的原因而受到约束, 因此就产生热应力。微元的总应变由两部分组成, 一部分是温度变化引起的, 另一部分是由应力引起的。

考虑到热应力, 应力的物理方程为:

$$\sigma = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \quad (1)$$

式中: $\{\varepsilon_0\}$ 为温度变化引起的变形。

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha T [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

式中: α 为材料的线膨胀系数; T 为温度的变化。

2 应力分析及评价

2.1 建模

考虑结构的对称性, 为简化计算, 我们取管嘴的 1/4 模型。模型及温度边界条件如图 1(a) 所示。考虑核电主设备接管嘴在不同工况下的瞬态温度场和热应力, 其不同工况下的温度和内压以及出口端部压力如表 1 所示。

如图 1 所示, 约束固定筒体右侧。载荷由压力载荷、外部接管载荷组成。内压为压力施加在筒体和管嘴的内表面。外部接管载荷在接管端部施加端部力以记入接管轴向薄膜应力分布。这一端部力以压力载荷的方式施加在接管端部, 压力载荷大小按式(3)计算:

$$\sigma = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (3)$$

式中: σ 为等效端部压力; p 为内压; R_o 为接管外半径; R_i 为接管内半径。载荷组合分为五个运行工况和一个试验工况, 如表 1 所示。

表 1 载荷工况

Tab. 1 Loadings under different conditions

工况	最大压力(内压)/MPa	最高温度/°C	端部压力/MPa
设计工况	8.10	320.0	17.93
正常工况	8.10	320.0	17.93
异常工况	9.00	340.0	19.92
危急工况	8.33	315.0	18.44
事故工况	8.61	300.8	19.06

模型材料参数包括两部分, 即筒体和管嘴, 其详细参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 筒体材料性能参数

Tab. 2 Material parameters of vessel

温度/ °C	密度/ (t · m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	热膨 胀系 数/°C	泊松 比	导热率/ (mW · mm ⁻¹ · °C ⁻¹)	比热容/ (kJ · t ⁻¹ · °C ⁻¹)
20	7.85	206	1.62E-5	0.3	34.9	461
100	7.85	206	1.62E-5	0.3	37.3	479
200	7.85	206	1.62E-5	0.3	38.2	499
300	7.85	206	1.62E-5	0.3	37.8	517
400	7.85	206	1.62E-5	0.3	36.6	536



表 3 管嘴材料性能参数

Tab. 3 Material parameters of nozzle

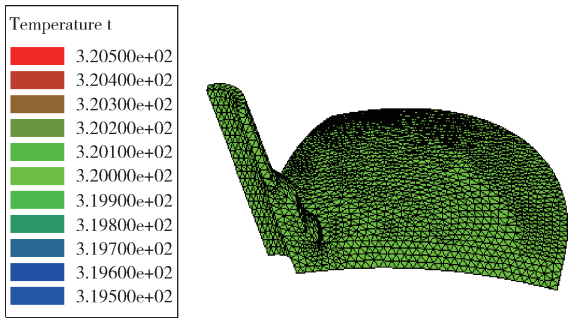
温度/ °C	密度/ (t · mm ⁻³)	弹性 模量/ MPa	热膨胀 系数/ °C	泊松 比	导热率/ (GW · mm ⁻¹ · °C ⁻¹)	比热容/ (kJ · t ⁻¹ · °C ⁻¹)
20	7.85	206	1.62E-5	0.3	51.0	461
100	7.85	206	1.62E-5	0.3	50.8	479
200	7.85	206	1.62E-5	0.3	48.7	499
300	7.85	206	1.62E-5	0.3	45.8	517
400	7.85	206	1.62E-5	0.3	42.5	536

注: 材料的对流换热系数均采用 1 TW/(m² · °C⁻¹)。

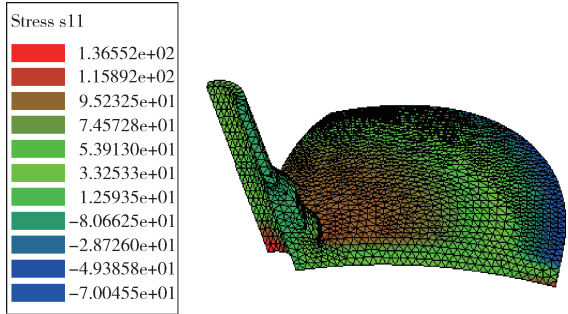
2.2 应力分布

计算结束后, 我们选择左侧模型树中的基本结果—Temperature-t 并双击, 然后选择工具栏中  的“光滑云图”即可显示温度场分布。同样, 选择左侧模型树中的基本结果—Stress-s11 并双击, 然后选择工具栏中  的“光滑云图”即可显示应力分布, 如图 2 所示。采用同样的方法可以计算异常工况、危急工况、事故工况和试验工况的结果。

以正常工况的结果为例, 我们将求解器计算的应力场、位移场、温度场、热应力场和 ABAQUS 的结果进行了对比。ATLAS 的计算结果与 ABAQUS 相比, 基本是一致的, 结果值也几无差别, 由此可以证明 ATLAS 计算所得结果的准确性是可以得到保证的。瞬态温度场、瞬态热应力场随时间变化对比图详见第 3 节。



(a) 温度结果查看



(b) 应力结果查看

图2 温度结果查看及应力结果查看图示

Fig. 2 The temperature results and the stress results

2.3 应力路径的选取

根据图3 应力路径参考图，对附件的模型进行路径定义，补强区内和补强区外均定义应力路径。我们按图3 中所示的应力路径评定管嘴的膜应力和薄膜加弯曲应力。

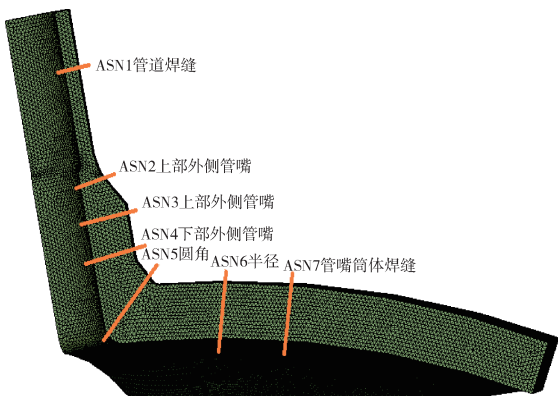


图3 应力路径参考图

Fig. 3 Reference path of stress

2.4 计算各截面形状因子

截面形状因子的定义为，产生全塑性截面的载荷设定值与产生截面表层起始屈服的载荷设定值的比值。用于施加在一次膜应力 + 弯曲应力的应力强度限值上。空心圆柱体横截面形状因子的公式为：

$$\alpha = \frac{16R_o}{3\pi} \left[\frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^4 - R_i^4} \right] \quad (4)$$

式中： R_o 是截面外半径； R_i 是截面内半径。

2.5 验收准则

根据 ASME BPVC 第 III 卷 NB-3220，确定各评定截面的应力限制值。对于 D 级使用限制，适用 ASME BPVC 第 III 卷附录 F 的规则。

各载荷工况下的应力分类由 ASME BPVC 第 III 卷 NB-3213 和表 NB-3217-1 确定。

2.6 应力评价

表 4 ~ 表 8 列出了不同工况下各个应力路径的应力评价结果。

表4 设计工况下各评定截面计算值

Tab. 4 Calculation values of each section in design conditions MPa

评定截面	膜应力	膜加弯应力	
		内侧	外侧
ASN1	43.32	47.15	39.49
ASN2	17.44	23.06	11.83
ASN3	27.91	44.61	12.38
ASN4	58.61	81.81	35.8
ASN5	112.51	157.47	94.83
ASN6	87.50	57.13	128.81
ASN7	80.06	52.17	108.11

表5 异常工况下各评定截面计算值

Tab. 5 Calculation values of each section in abnormal conditions MPa

评定截面	膜应力	膜加弯应力	
		内侧	外侧
ASN1	48.13	52.39	43.87
ASN2	19.38	25.62	13.14
ASN3	31.01	49.57	13.76
ASN4	65.12	90.89	39.77
ASN5	125.01	174.97	105.36
ASN6	97.20	63.50	143.12
ASN7	88.95	57.96	120.12

表6 危急工况下各评定截面计算值

Tab. 6 Calculation values of each section in critical condition MPa

评定截面	膜应力	膜加弯应力	
		内侧	外侧
ASN1	44.55	48.49	40.61
ASN2	17.93	23.72	12.17

表 6(续) 危急工况下各评定截面计算值

Tab. 6(Cont.) Calculation values of each section in critical condition

评定截面	膜应力	膜加弯应力	
		内侧	外侧
		MPa	
ASN3	28.70	45.88	12.73
ASN4	60.27	84.13	36.81
ASN5	115.71	161.94	97.52
ASN6	89.97	58.75	132.46
ASN7	82.33	53.65	111.18

表 7 事故工况下各评定截面计算值

Tab. 7 Calculation values of each section in accident condition

评定截面	膜应力	膜加弯应力	
		内侧	外侧
		MPa	
ASN1	46.04	50.12	41.98
ASN2	18.54	24.52	12.58
ASN3	29.67	47.42	13.16
ASN4	62.29	86.96	38.05
ASN5	119.60	167.39	100.80
ASN6	92.99	60.73	136.92
ASN7	85.10	55.45	114.91

表 8 试验工况下各评定截面计算值

Tab. 8 Calculation values of each section in test condition

评定截面	膜应力	膜加弯应力	
		内侧	外侧
		MPa	
ASN1	56.26	61.24	51.28
ASN2	22.65	29.95	15.36
ASN3	36.25	57.94	16.10
ASN4	76.11	106.25	46.49
ASN5	146.13	204.52	123.16
ASN6	113.62	74.20	167.29
ASN7	103.98	67.76	140.41

将上述结果与相应的应力限制比较如表 9 所示。由表 9 结果可知, 计算值均在应力限制之下。

表 9 主给水管嘴应力结果评价

Tab. 9 Results of stress of feedwater nozzle

使用限制	应力类别	ASN 1			ASN 2		
		计算值/MPa	许用值/MPa	比值	计算值/MPa	许用值/MPa	比值
设计	Pm	43.32	207	0.21	17.44	207	0.08
	PL	—	—	—	—	—	—
	Pm + Pb	47.15	280	0.17	23.06	284	0.08
B 级	Pm	48.13	228	0.21	19.38	228	0.09
	PL	—	—	—	—	—	—
	Pm + Pb	52.39	308	0.17	25.62	312	0.08
C 级	Pm	44.55	376	0.12	17.93	376	0.05
	PL	—	—	—	—	—	—
	Pm + Pb	48.49	509	0.10	23.72	517	0.05
D 级	Pm	46.04	434	0.11	18.54	434	0.04
	PL	—	—	—	—	—	—
	Pm + Pb	50.12	588	0.09	24.52	596	0.04
试验	Pm	56.26	338	0.17	22.65	338	0.07
	PL	—	—	—	—	—	—
	Pm + Pb	61.24	507	0.12	29.95	507	0.06

3 瞬态温度场和热应力分析

3.1 瞬态温度场计算

在进行瞬态温度场分析时, 进行热-结构完全耦合分析, 设定环境温度和整体模型初始温度为 20 ℃。温度边界亦即最高温度的施加如图 1(a) 所示, 载荷和约束情况如图 1(b) 所示。计算时间设定为 1 200 s。

该瞬态分析只有热的结果, 故将温度作为对比项来比较各个分析步的计算结果, 对比结果如图 4~图 10 所示(左为 ATLAS 计算结果, 右为 ABAQUS 计算结果)。

从图 4~图 10 可以看出, 正常工况下 ATLAS 的计算结果与 ABAQUS 相比, 基本是一致的, 温度在 20~320 ℃, 而且温度云图中的梯度变化非常近似, 结果值也几无差别。从 3 s 到 400 s, 从管道到管嘴, 温度逐步升高到 320 ℃。从 400 s 到 1 200 s, 温度场云图基本保持不变。

3.2 瞬态热应力分析

在进行热应力分析时, 将瞬态温度场的分析结果作为预定义温度场施加在模型上, 此外载荷和约束情况如图 1(b) 所示。计算时间设定为 1 200 s。

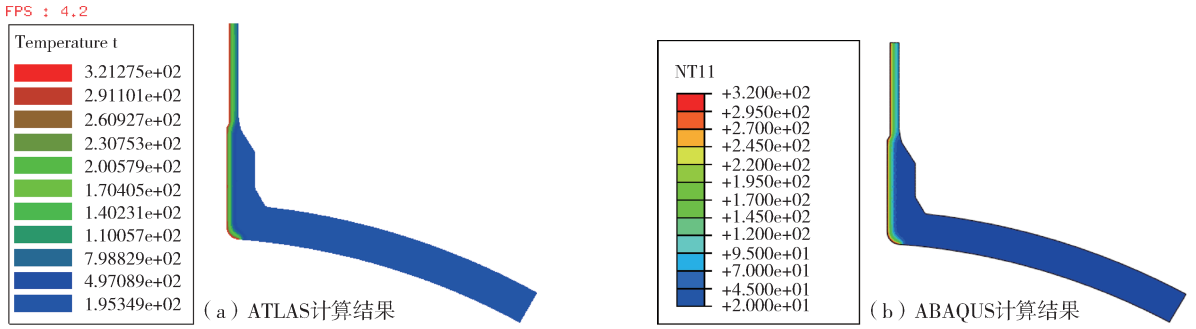


图 4 3 s 时的温度场云图

Fig. 4 Contour of temperature field at 3 s

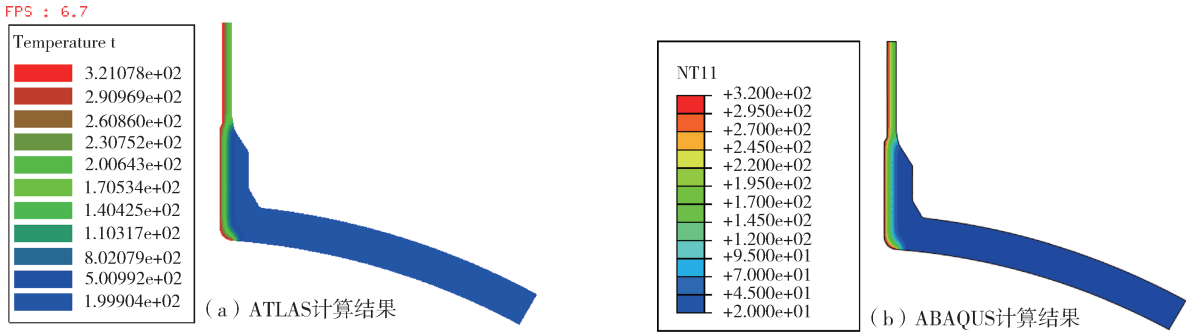


图 5 7 s 时的温度场云图

Fig. 5 Contour of temperature field at 7 s

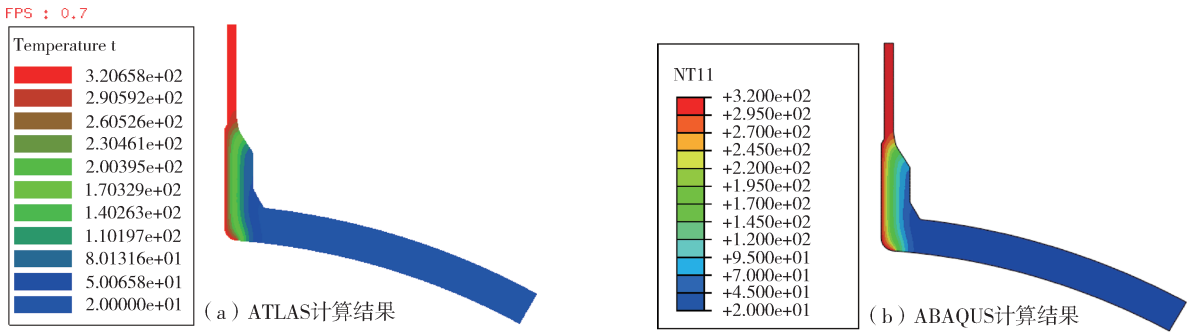


图 6 32 s 时的温度场云图

Fig. 6 Contour of temperature field at 32 s

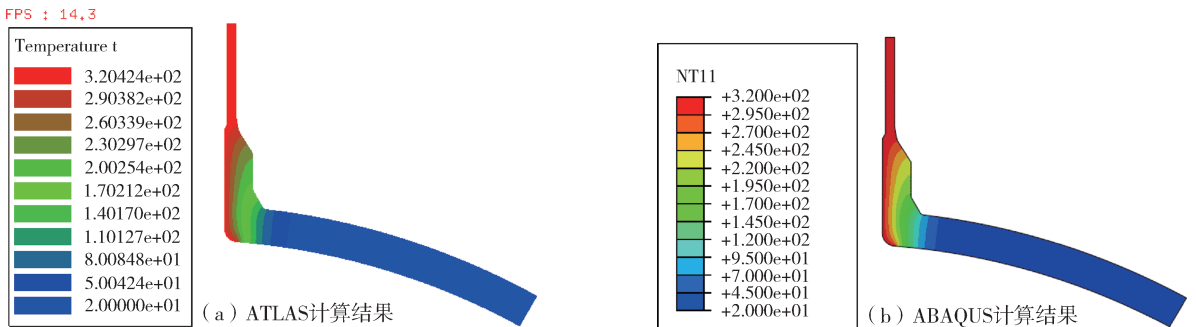


图 7 119 s 时的温度场云图

Fig. 7 Contour of temperature field at 119 s

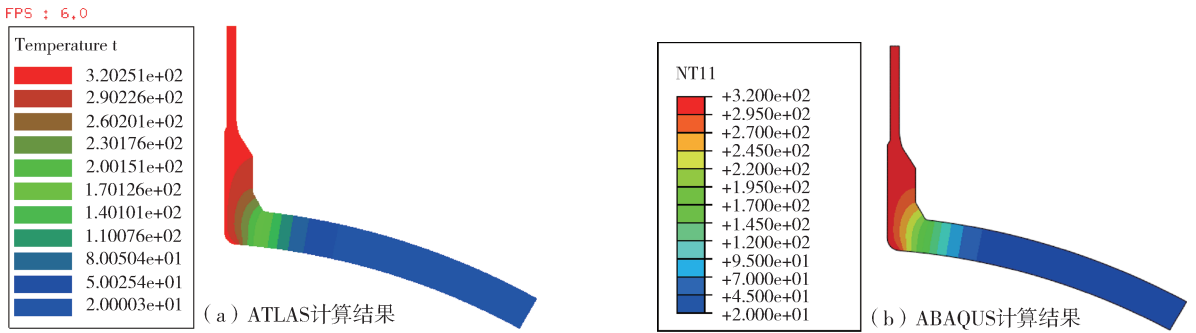


图 8 400 s 时的温度场云图

Fig. 8 Contour of temperature field at 400 s

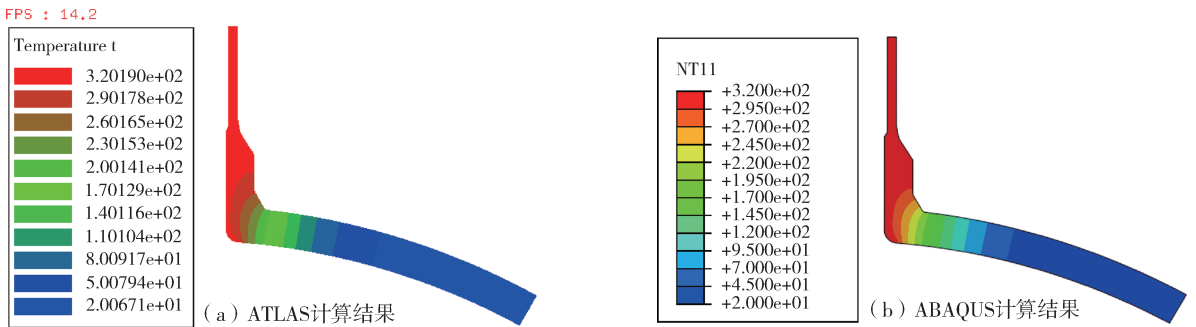


图 9 800 s 时的温度场云图

Fig. 9 Contour of temperature field at 800 s

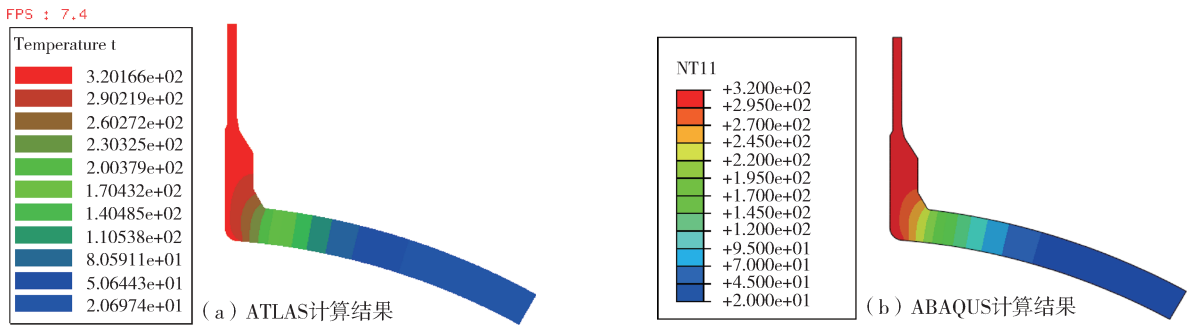


图 10 1 200 s 时的温度场云图

Fig. 10 Contour of temperature field at 1 200 s

该瞬态分析是温度应力随时间的变化, 我们选择其中一部分分析步的计算结果, 对比结果如图 11 ~ 图 17 所示(左为 ATLAS 结果, 右为 ABAQUS 结果)。

从图 11 ~ 图 17 可以看出, 正常工况下热应力分布在 8.31 ~ 884 MPa, 刚开始的时候, 最大热应力急剧增加, 在 7 s 前后达到最大值,

之后逐渐减少, 1 200 s 时最大热应力为 640 MPa。

从 ABAQUS 和 ATLAS 分析对比中可以看出 ATLAS 应力结果与 ABAQUS 计算结果非常吻合, 最大误差 0.5%, 热应力云图中的梯度变化非常近似, 结果值也几无差别。所以 ATLAS 可以进行瞬态温度场和热应力分析。

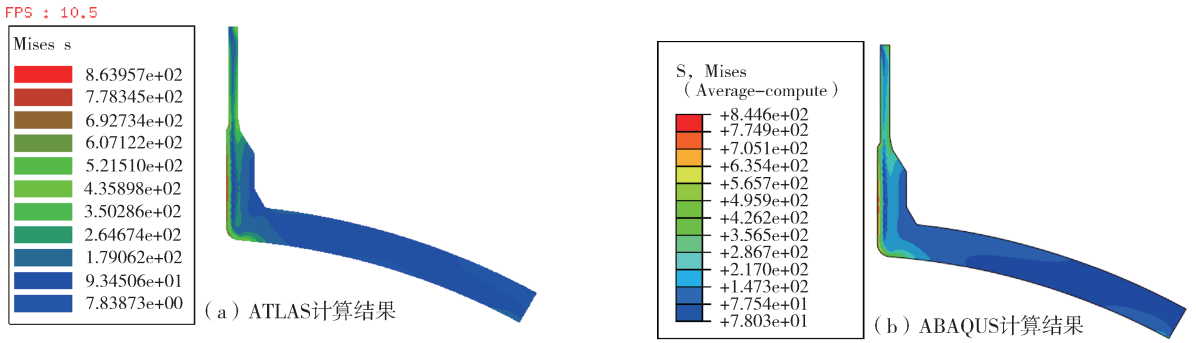


图 11 3 s 时的温度应力云图

Fig. 11 Contour of temperature stress at 3 s

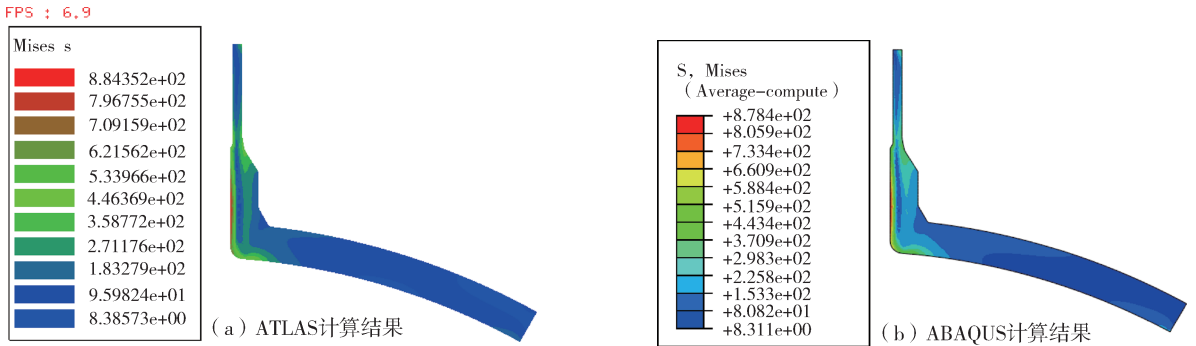


图 12 7 s 时的温度应力云图

Fig. 12 Contour of temperature stress at 7 s

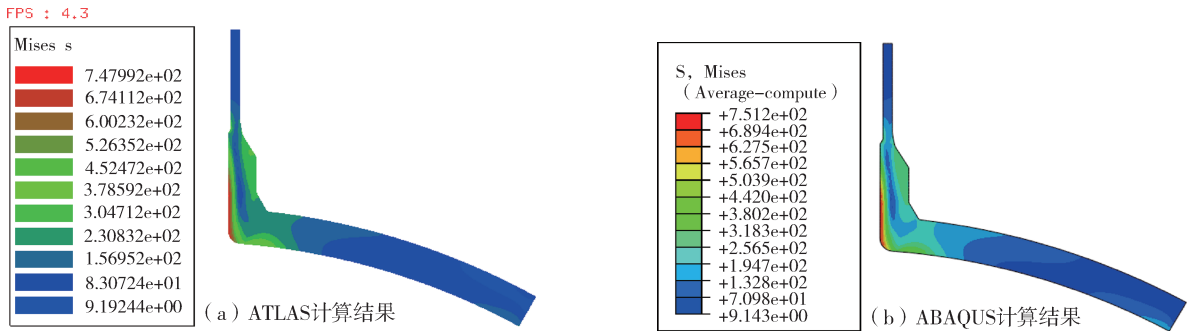


图 13 32 s 时的温度应力云图

Fig. 13 Contour of temperature stress at 32 s

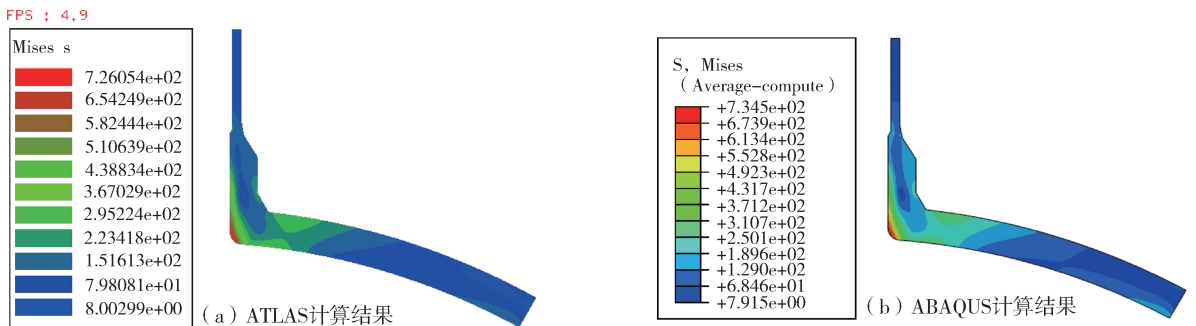


图 14 119 s 时的温度应力云图

Fig. 14 Contour of temperature stress at 119 s

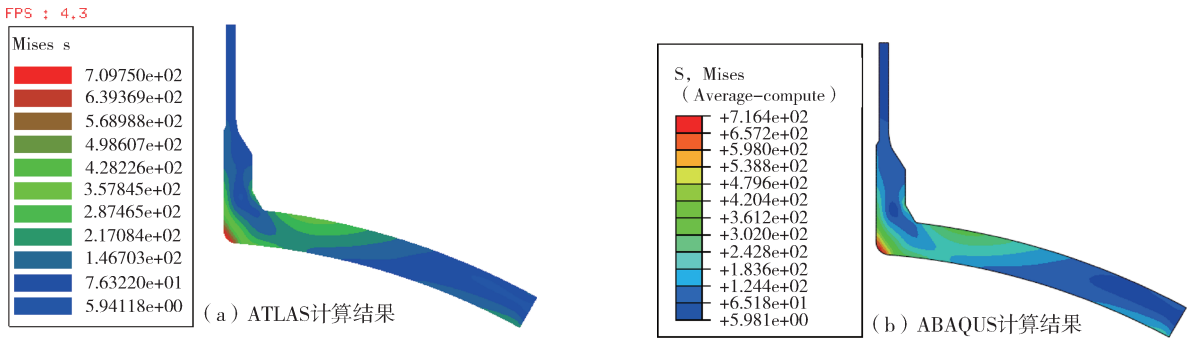


图 15 400 s 时的温度应力云图

Fig. 15 Contour of temperature stress at 400 s

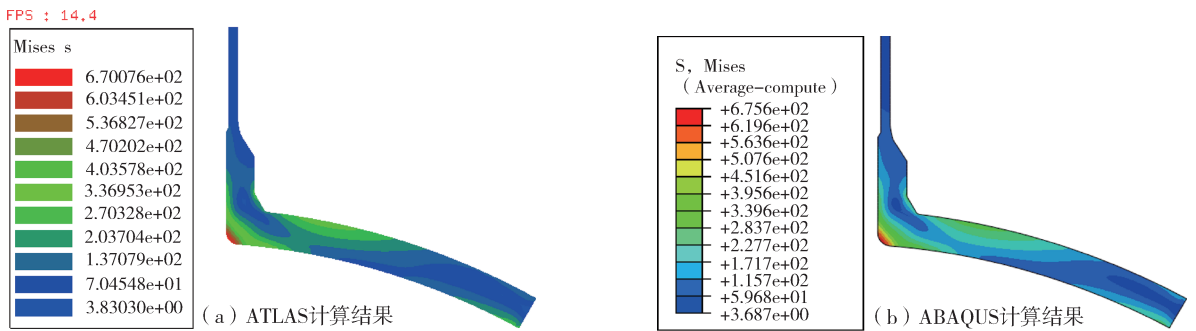


图 16 800 s 时的温度应力云图

Fig. 16 Contour of temperature stress at 800 s

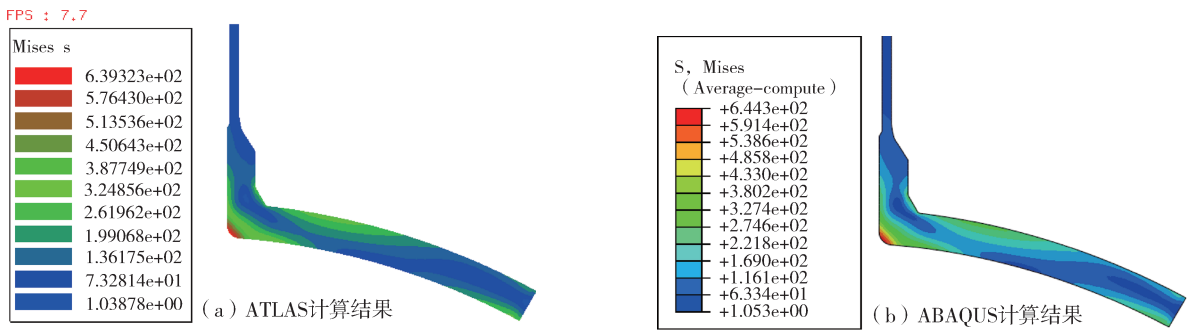


图 17 1200 s 时的温度应力云图

Fig. 17 Contour of temperature stress at 1200 s

4 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, 集成了核电设计中所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、应力线性化功能、压力容器防断裂评定功能等。本文通过核电关键主设备接管嘴案例分析, 证明如下:

1) 自主开发的 ATLAS 有限元分析软件能准确的将结构的 CAD 模型导入前处理系统, 快速为模型划分网格, 将各种工况施加到模型之上, 快速完成求解计算。

2) ATLAS 软件借助于 solver 求解器, 可以很好地完成弹性分析、应力线性化、瞬态温度分析、热应力分析。ATLAS 计算结果的准确性可以得到保证, 与 ABAQUS 相同模型的计算结果非常吻合。

3) 利用 ATLAS 对核电主设备接管嘴应力评定、瞬态温度场、热应力分析的结果表明, 该软件已经具备相关计算分析功能和工程设计的实用价值, 同时为下一步热机疲劳分析模块的开发奠定了基准。

参考文献:

- [1] THURMAN A L, MAHLAB M S, BOYLSTEIN R E. 3-D finite element analysis for the investigation of feed water line cracking in PWR steam generators [J]. ASME Paper, 1981, 81(3): 21-25.
- [2] SIMOS N, REICH M, COSTANTINO C J, et al. Assessment of thermal fatigue crack propagation in safety injection PWR lines [C]//Pressure Vessels and Piping Conference; Be in Tune for the 90's, Jun. 17-21, 1990, TN(USA): Nashville, 1990: 1069-1108.
- [3] CRANFORD E L, GRAY M A, SAHGAL S. Predicting steam generator auxiliary feedwater nozzle thermal stratification transients and fatigue effects in complex systems [C]//ASME 2005 Pressure Vessels and Piping Conference, 2005: 369-374.
- [4] YONG W K, DONG O K, LEE J S, et al. Thermo-mechanical simulation for nozzle header of once-through steam generator by experiment and finite element method [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2005, 82(8): 602-609.
- [5] CHATTOPADHYAY S. Structural evaluation of a piping system subjected to thermal stratification [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009(293): 2236-2241.
- [6] 盛旭婷. 压水堆蒸汽发生器的制造 [J]. 装备机械, 2010(4): 36-42.
- [7] 韩良弼. 核岛主设备中的结构力学问题 [J]. 上海力学, 1989, 10(4): 62-70.
- [8] 袁启根. 压水堆蒸汽发生器传热管腐蚀破裂分析及预防 [J]. 海军工程学院学报, 1994, 68(3): 67-71.
- [9] 何树延, 李笑天. 10 MW 高温堆热启动时蒸汽发生器管板焊缝处疲劳分析 [J]. 核动力工程, 2004, 25(2): 203-207.
- [10] 董建令, 张晓航, 殷德健, 等. 10 MW 高温气冷堆蒸汽发生器传热管束应力分析 [J]. 核动力工程, 2001, 22(5): 433-437.
- [11] 陈银强, 张蜀治, 桂春, 等. 蒸汽发生器给水管嘴低周疲劳损伤分析评定研究 [J]. 压力容器, 2008, 25(6): 13-17.
- [12] 刘涛, 李凤婷, 景雪辉. T 型管接头的流固耦合及热应力分析 [J]. 机床与液压, 2010, 38(3): 127-128.
- [13] KIM Y W, KIM D O, LEE J S, et al. Thermo-mechanical simulation for nozzle header of once-through steam generator by experiment and finite element method [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005(82): 602-609.
- [14] SILVAA L L D, MANSUR T R, JUNIOR C A C. Thermal fatigue damage evaluation of a PWR NPP steam generator injection nozzle model subjected to thermal stratification phenomenon [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011(241): 672-680.
- [15] WANG H, LÜ P. Performance improvement of seismic analysis in a large scale interactive visualization [C]. IEEE HPCC/CSS/ICISS, 2015: 908-913.
- [16] WANG H, LÜ P. Evaluation of memory optimization in a large-scale structural finite element pre-processor [C]. IEEE MCSoc, 2014: 31-38.

(责任编辑 高春萌)

“华龙一号”全球首堆示范工程首台主设备即将吊装引入

2017年11月9日,“华龙一号”全球首堆示范工程——中核福清核电5号机组首台ZH-65型蒸汽发生器现场吊装工作准备就绪,将视现场风力情况择机吊至16.5米平台后引入。这是我国首个具有完全自主知识产权的蒸汽发生器,标志着我国已基本突破三代核电主设备设计、制造技术和工艺。“华龙一号”核电技术是由中国核工业集团和中广核集团研发的百万千瓦级压水堆核电技术,是我国核电自主创新的重大成果。

(来源:新华社)