

与流体晃动相耦合的 快堆主容器地震响应的数值模拟

卫媛媛¹, 陆道纲¹, 梁亚平²

(1. 华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206; 2. ADINA 公司 北京代表处, 北京 100022)

摘要:快堆的主容器内存在着自由表面流体,当发生长周期地震时,该流体的晃动会冲击到容器壁,对反应堆造成威胁。本文采用 ADINA 软件建立快堆主容器的三维有限元模型,模拟了正弦三波激励下液面晃动对容器壁的冲击现象,得到的冲击压力为容器结构完整性分析提供了载荷,验证了运用 ADINA 软件对自由表面流动进行分析的可行性以及在处理流固耦合问题上的优越性。

关键词:ADINA;快堆;自由液面;正弦三波;流固耦合;共振响应

中图分类号:TL33 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2008)S1-0472-05

Numerical Simulation for Sloshing Response of Free Surface in Main Vessel of Fast Reactor by Earthquake

WEI Yuan-yuan¹, LU Dao-gang¹, LIANG Ya-ping²

(1. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. ADINA Company, Beijing 100022, China)

Abstract: There is the free surface in the main vessel of fast reactor. When long period earthquakes happen, the fluid will impact the wall of vessel and make the reactor dangerous. The 3D finite element model of the main vessel is constructed using ADINA, and the phenomenon of sloshing response to the free surface in the main vessel of fast reactor excited by 3 sine waves is simulated. The impact pressure from this research has provided important loadings for the integrality analysis of the main vessel. The feasibility of simulating the free surface flow and the advantage of dealing with FSI questions are validated.

Key words: ADINA; fast reactor; free surface; 3 sine waves; fluid-structure interaction; resonant response

快堆的主容器内存在着自由表面,当发生长周期地震时,容器中自由液面的晃动波高可达数米,会冲击到容器壁面,对反应堆的安全造

成威胁。根据核电站的抗震设计规范^[1]和核电站安全导则汇编^[2],必须考虑地震情况下液体晃动对结构的冲击载荷。

储液容器中自由液面晃动的研究属于流体力学与结构力学的交叉学科——流固耦合的范性力学行为,目前尚无很好的预测方法。本文采用有限元软件 ADINA 作为分析工具,数值模拟正弦三波激励下液面晃动对容器壁面的冲击现象,计算得到的冲击压力为容器结构完整性分析提供载荷。

1 计算软件

ADINA-FSI 是流固耦合求解器,相对于其它有限元软件,它具有以下特点:

- 1) 流体和结构的网格可独立划分,即流体和结构在界面上的网格不需要一致,可考虑自由液面运动;
- 2) 可考虑移动壁面问题;
- 3) 当流体区域发生变化时,可考虑网格重划分;
- 4) 结构域采用 Lagrange 坐标系,流体域采用 ALE 坐标系;
- 5) ALE 输运参量包括速度、压力、位移等;
- 6) 不同域自动采用相同时间积分;
- 7) 流固耦合有 FSI 和 Thermal FSI 两种选项;
- 8) 任何流体本构和结构材料都可进行耦合分析。

由于 ADINA 强大的流固耦合分析功能,为各种流固耦合问题提供强有力的求解方案,成为当前解决流固耦合分析问题的最主要的分析工具,被广泛应用于机械、航空航天、汽车、压力容器、水利、船舶、生物力学等各个领域。

2 计算模型

快堆主容器 ADINA 模型示于图 1,参考中国实验快堆(CEFR)主容器的尺寸和材料参数^[3],近似给出了主容器的三维结构模型,将模型划分成 1 664 个壳单元,根据需要对自由液面晃动对容器顶盖和裙式支承的影响,细化了液面以上容器部分和裙式支承的网格。其中,容器顶盖颈部直径 3.195 m,高 1.5 m;圆锥形顶盖与颈部夹角 45°,高 1.5 m;主容器筒直径 7.985 m,高 9.954 m;椭圆形底封头曲面深度 1.546 m;堆容器支撑裙高 2 m。主容器的整个支撑颈部、锥形顶盖以及主容器筒体上半部的材料均采用 316 钢;其余部分都

采用 304 钢。基本的材料参数按温度 427 °C 时来选取,两种钢体的弹性模量皆取为 1.7×10^5 MPa,泊松比取为 0.3,密度取为 $8\ 000\text{ kg/m}^3$,对于热膨胀系数,316 钢取为 $1.82 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,304 钢取为 $1.75 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。如图 2 所示,将容器内液体模型均分了 1 536 个三维流体单元,液高 10 m,密度按照液钠来选取 $\rho=970\text{ kg/m}^3$,按照 CFD 流体来计算。

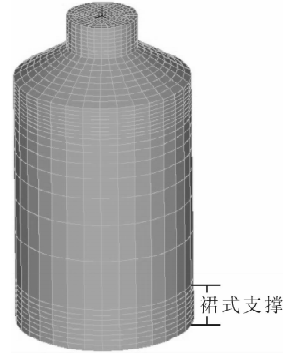


图 1 快堆主容器 ADINA 模型

Fig. 1 ADINA model for main vessel of FBR

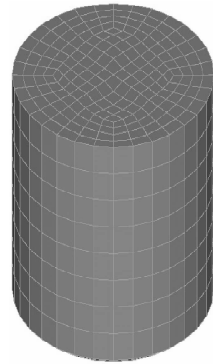


图 2 容器内液体的 ADINA 模型

Fig. 2 ADINA model of fluid in vessel

3 流固耦合系统振动特性分析

ADINA 采用计算特征值和特征向量的方法计算频率和模态,而不采用时程分析计算频率。特征值计算得到的特征值就是频率,特征向量就是模态。利用这种方法计算,理论上可以得到无穷多阶的频率与模态。

首先,用 ADINA 模型计算容器的自振频率,共计算了容器 30 个模态的自振频率,结果如表 1 所示。图 3 分别示出了容器 1~3 阶和 7~9 阶模态变形图。

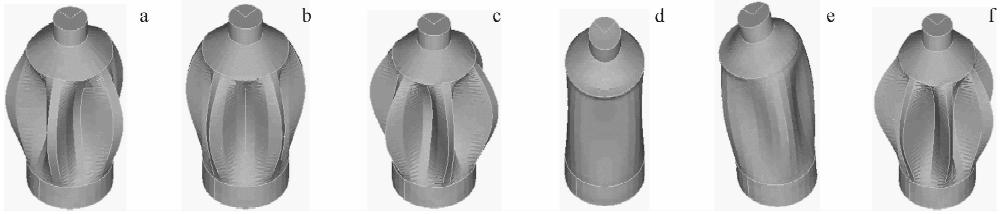


图3 容器不同模式下的振动图

Fig. 3 Vibration shapes at different modes of vessel

a、b、c——容器 1、2、3 阶模态振动图；d、e、f——容器 7、8、9 阶模态振动图

表 1 容器不同模式的自振频率

Table 1 Natural frequencies at different modes of vessel

| 模态阶数 | 自振频率/Hz | 模态阶数 | 自振频率/Hz |
|------|---------|------|---------|
| 1 | 17.6 | 16 | 35.8 |
| 2 | 17.6 | 17 | 35.8 |
| 3 | 18.7 | 18 | 36.8 |
| 4 | 18.7 | 19 | 36.8 |
| 5 | 20.9 | 20 | 39.8 |
| 6 | 20.9 | 21 | 39.8 |
| 7 | 20.9 | 22 | 41.0 |
| 8 | 20.9 | 23 | 41.0 |
| 9 | 23.6 | 24 | 42.7 |
| 10 | 23.6 | 25 | 42.7 |
| 11 | 28.9 | 26 | 43.9 |
| 12 | 28.9 | 27 | 43.9 |
| 13 | 31.9 | 28 | 46.4 |
| 14 | 31.9 | 29 | 49.1 |
| 15 | 33.6 | 30 | 49.1 |

然后,计算了容器内液体晃动的 1 阶模态,其晃动的 1 阶频率为 0.32 Hz,如图 4 所示。此时由于液体晃动的频率远低于结构的自振频率,所以,此时结构不会振动。

根据参考文献[4],输液容器内液体晃动的

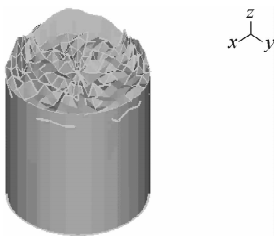


图 4 液体晃动的 1 阶模态振动图

Fig. 4 Vibration shape at first mode of fluid

固有频率由下列公式计算:

$$T_1 = 2\pi \left[\frac{\pi g \tanh(2\pi h/l)}{l} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$f_1 = 1/T_1 \quad (2)$$

其中: l 为容器的宽度; h 为容器内的液体高度; T_1 为振动周期。

将模型的相关尺寸代入上述公式,得到 $T_1 = 3.2 \text{ s}$, $f_1 = 0.313 \text{ Hz}$ 。与用 ADINA 计算的结果基本一致,从而验证了 ADINA 在求解液面振动上的准确性。

最后,通过 ADINA 计算了容器和液体的耦合振动频率。表 2 列出不同模式下的耦合频率。图 5 示出耦合振动下 1~3 阶和 7~9 阶的模态振动图。

表 2 流固耦合下不同模式的振动频率

Table 2 Vibration frequencies at different modes of FSI

| 模态阶数 | 耦合频率/Hz | 模态阶数 | 耦合频率/Hz |
|------|---------|------|---------|
| 1 | 8.44 | 16 | 18.2 |
| 2 | 8.44 | 17 | 18.2 |
| 3 | 9.25 | 18 | 19.8 |
| 4 | 9.25 | 19 | 19.8 |
| 5 | 9.57 | 20 | 20.2 |
| 6 | 9.58 | 21 | 20.2 |
| 7 | 11.8 | 22 | 21.7 |
| 8 | 11.8 | 23 | 21.7 |
| 9 | 12.8 | 24 | 23.5 |
| 10 | 12.8 | 25 | 23.5 |
| 11 | 13.2 | 26 | 25.5 |
| 12 | 13.3 | 27 | 25.5 |
| 13 | 13.3 | 28 | 26.1 |
| 14 | 15.9 | 29 | 26.1 |
| 15 | 16.0 | 30 | 30.2 |

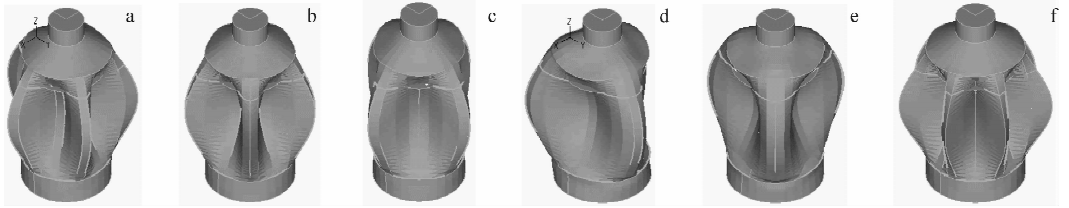


图5 耦合振动下的不同模态振动图

Fig. 5 Vibration shapes at different modes of FSI

a、b、c——容器1、2、3阶模态振动图;d、e、f——容器7、8、9阶模态振动图

4 正弦三波激励下流固耦合系统的响应与结果分析

计算共分为两个阶段,第1阶段用静力算法计算重力平衡位置得到结构在重力条件下实际的状态,第2阶段在次状态下用动力算法计算振动。

由于胡聿贤^[5]算出地面运动卓越周期为0.34 s,与本文计算出的流体晃动频率差距很大。根据文献[2],计算中采用3个正弦波输入比较合理。本文分别针对两个不同的输入载荷进行计算。

1) 选取正弦三波的频率为流固耦合后的最小频率,即8.44 Hz,位移振幅为0.05 m。模型的振动响应结果如图6所示。约2.5个周期后,容器发生破坏。

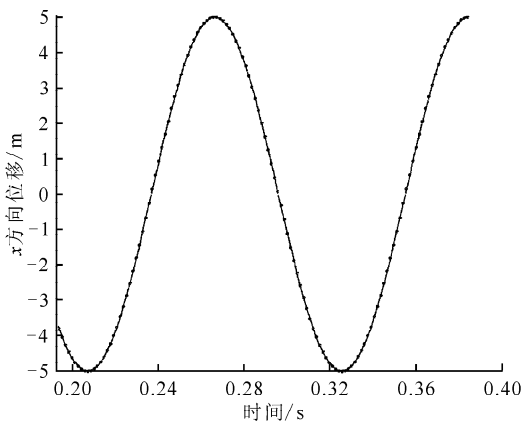


图6 输入载荷下容器的时间-位移图

Fig. 6 Time-distance figure of vessel by input load

2) 选取正弦三波的频率为液体晃动的1阶固有频率,即0.32 Hz,因为地震史上曾观察到峰-峰间位移达1 m的长周期地震,所以,在这里取位移振幅为0.5 m的正弦三波输入后

最大共振振动响应的结果作为设计载荷^[6]。

在正弦三波激励下容器内发生共振晃动,直至右侧周向0°处液面的波高达2.6 m。图7示出了周向0°最右侧液面的波高响应。波高达2.6 m时的液体晃动形象如图8所示。ADINA 计算出了正弦三波输入后液体晃动对主容器各个部位的载荷。图9示出了3个不同时刻结构的等效应力图。此外,根据上述计算结果还得到了正弦三波激励下晃动载荷对在底部支撑处不同方向的支反力(图10)。

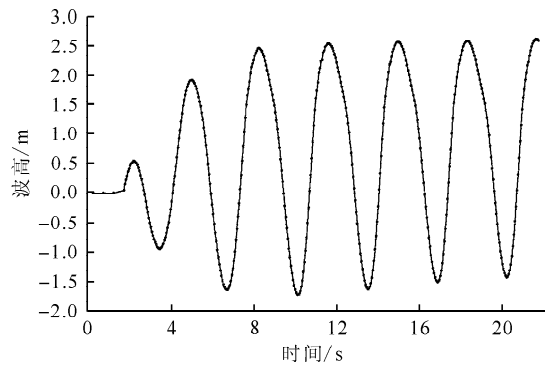


图7 周向0°最右侧液面的波高响应

Fig. 7 Time history of wave height at right side

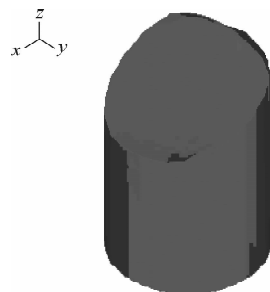


图8 波高达2.6 m时的液面晃动形象

Fig. 8 Image of sloshing at 2.6 m of wave height

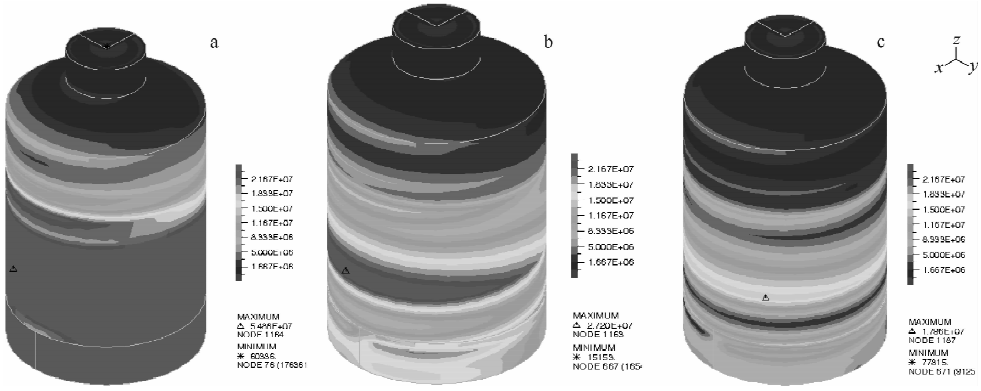


图9 不同时刻主容器结构的等效应力图

Fig. 9 Stress figure at different time of main vessel

时刻, s: a—1.700; b—1.940; c—2.340

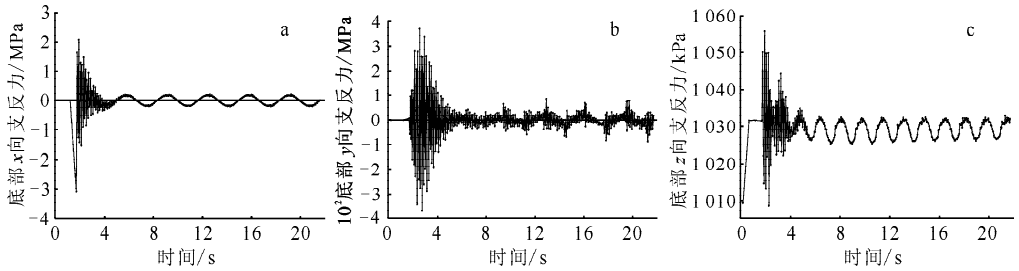


图10 容器底部支撑处不同方向的支反力

Fig. 10 Support reaction at different direction of bottom of vessel

a—x方向; b—y方向; c—z方向

通过上述两步的计算结果可看出,由于计算中采用的是壳式单元,所以,容器壁受到的最大压力都发生在容器的中间部位。容器底部 x 方向承受的支反力最大。当采用低频输入时,容器与液体相耦合后振动的振幅较大;采用高频输入时,容器与液体相耦合后振动的振幅则较小。

5 结论

本文采用有限元分析软件 ADINA 数值模拟了正弦三波激励下液面晃动对快堆容器壁面的冲击现象,验证了该软件在处理流固耦合问题及自由表面流动问题的可行性和优越性。通过计算,得到了晃动载荷对容器的冲击载荷以及在容器底部支撑处的支反力,为快堆主容器及其对内构件的应力分析提供了重要的载荷输入。

参考文献:

[1] 国家核安全局. 核安全导则汇编:附录 II:核电厂的抗震设计与鉴定(HAD102/02)[M]. 北京:

中国法制出版社, 1998.

- [2] 国家核安全局政策法规处. 核电厂安全导则汇编(HAF0102)[M]. 北京:中国法制出版社, 1992.
- [3] YU Huajin, LU Daogang, XU Mi. Stress analysis and evaluation for the reactor vessels of CEFR [C]//International Conference & Exhibition on Pressure Vessels and Piping "OPE 2006-CHENNAI". Chennai, India: [s. n.], 2006.
- [4] TAKIZAWA A, KOSHIZUKA S, KONDO S. Generalization of physical component boundary fitted coordinate (PCBFC) method for the analysis of free surface flow[J]. Int J Numer Methods Fluids, 1992, 15: 1 213-1 237.
- [5] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社, 1999.
- [6] 陆道纲. CEFR 主容器内正弦三波激励下液面晃动响应[J]. 核科学与工程, 2003(4): 306-310.
- LU Daogang. Sloshing response of the free surface in the main vessel of CEFR excited by 3 sine waves[J]. Chin J Nucl Sci Eng, 2003(4): 306-310(in Chinese).