

小型模块化压水核反应堆堆内构件模态特性研究*

刘理涛 杨世豪 杨杰 赖姜[†]

(中国核动力研究设计院 反应堆工程研究所,成都 610213)

摘要 小型模块化压水核反应堆的结构形式与常规的压水核反应堆不同,除了吊篮组件以外,还有小型模块化压水核反应堆独有的压紧组件、压紧筒组件和分流环板等结构.为了对小型模块化压水核反应堆堆内构件流致振动行为进行准确的评估,首先应该确定堆内构件在空气和静水中的模态特征.本文以国内自主研发的小型模块化压水核反应堆堆内构件为研究对象,采用 ANSYS 软件对小型模块化压水核反应堆堆内构件在空气和静水中进行了干模态和湿模态分析,获得了吊篮组件、压紧组件、压紧筒组件以及分流环板在空气和静水中的固有频率及相应的振型,并开展模态试验验证了该分析方法的正确性.该方法可运用到常规压水核反应堆堆内构件的模态分析中.

关键词 堆内构件, 小型压水堆, 湿模态, 模态试验

中图分类号:O327

文献标志码:A

Experimental and Numerical Study on Modal Characteristics of Integrated Modular Small Nuclear Reactor Internals*

Liu Litao Yang Shihao Yang Jie Lai Jiang[†]

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract The structural features of the integrated modular small nuclear reactor are different from the traditional nuclear reactor. Besides the core barrel assembly, there are core support assembly, upper core support assembly, and flow distribution device in the pressure vessel of the integrated modular small nuclear reactor. The modal characteristics of the integrated modular small nuclear reactor internals is very important. In this paper, experimental and numerical studies were carried out to obtain the natural frequencies and modes in air and water, respectively. The comparisons of the modal characteristics of the reactor internals both in air and water between the experimental and numerical results illustrated that the analysis method can be used to predict the natural frequencies and modes.

Key words reactor internals, integrated modular small nuclear reactor, modal characteristics, modal analysis

引言

压水核反应堆在正常运行过程中,堆内构件受

到流体激励会发生复杂的流致振动行为.准确获得堆内构件的流致振动响应,是评价核反应堆安全运行的关键指标之一.通过学者们对常规的压水核反

应堆堆内构件流致振动特性的研究^[1-4],可以发现准确获得堆内构件在空气和静水中的模态特性,是开展堆内构件流致振动行为分析的前提和关键。

然而,一方面核反应堆堆内构件结构复杂,导致难以通过理论推导获得结构在静水中的附加质量;另一方面堆内构件结构之间的约束边界具有随机性,导致数值模型的约束边界状态难以确定。因此,不少学者对压水核反应堆堆内构件的模态特性开展了试验和理论研究。马建中等^[5]提出了两类吊篮约束边界的简化模型,并通过计算分析了约束边界对吊篮固有频率的影响。喻丹萍等^[6]开展了吊篮结构的模态和响应试验,获得了秦山核电厂二期600MW级核电站吊篮结构的模态特性和流致振动响应。席志德等^[7]将堆内构件简化为同心圆柱壳结构,讨论了流速、密度等流体参数对吊篮结构固有频率的影响。赖姜等^[8]讨论了由支承松弛导致的吊篮组件固有频率的变化规律。此外,韩国学者对小型核反应堆的模态特征开展较为系统的研究^[9-11]。Lim等^[9]通过缩比模型研究了静水中附加质量对堆内构件固有频率的影响。Choi等^[10]建立了有限元模型计算小型核反应堆堆内构件在静水中的模态特征,并与缩比模型试验结果进行了对比验证。Lee等^[11]进一步讨论了流固耦合效应对堆内构件湿模态的影响。

随着核能工程的技术发展,为满足压水核反应堆小型化、模块化等要求,我国研发了具有自主知识产权的小型模块化压水核反应堆。为获得并评估该核反应堆堆内构件的流致振动特性,笔者开展了一系列缩比模型试验与数值分析,包括模态试验与分析、流场测量与分析以及流致振动响应测量与分析等。本文的研究内容为其中的一部分研究,主要是以该反应堆的吊篮组件、压紧组件、压紧筒组件为研究对象,采用试验测量与数值计算相结合的手段,确定堆内构件各个结构的约束边界以及附加质量,获得各结构在空气和静水中的固有频率及相应振型,为流致振动响应分析提供模型基础。此外,通过试验结果与数值结果的对比,验证了采用ANSYS进行湿模态分析的方法,预测复杂堆内构件在静水中固有频率及振型的准确性。

1 小型模块化压水反应堆堆内构件模型

小型模块化压水反应堆堆内构件与常规的压

水反应堆堆内构件的结构形式有较大不同。除了吊篮组件外,还包含独特的压紧组件、压紧筒组件和分流环板结构。压力容器接管被分流环板隔开,形成堆芯的进口和出口。一回路的水在压力容器接管进口进入反应堆内部,经过吊篮与压力容器形成的下降通道和流量分配装置后进入堆芯进行热交换;然后,流经压紧组件和压紧筒组件,从压紧筒组件的出水孔流入蒸汽发生器进行一次侧和二次侧的热交换;最后,从压力容器接管的出口流出。具体的流动方式如图1所示。

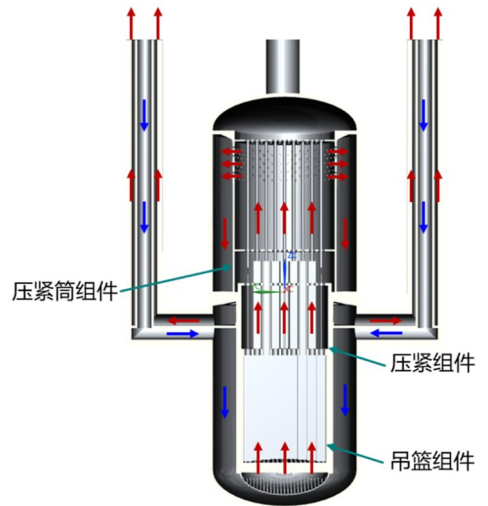


图1 小型模块化压水反应堆示意图
Fig.1 Schematic diagram of integrated modular small nuclear reactor

吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件结构和约束边界十分复杂。吊篮组件由吊篮筒体、流量分配罩和堆芯围筒组成,通过吊篮筒体法兰安装于压力容器下部。压紧组件由压紧筒体和内部的控制棒导向组件、支承柱等结构组成,通过压紧组件筒体法兰安装于吊篮筒体内部。压紧筒组件由压紧筒体和内部的测量导管组成,安装在压紧组件筒体法兰上,通过上封头和压紧弹簧进行约束。

堆内构件的模态特性是建立流致振动响应分析模型的关键输入和依据。因此,为了研究吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件的模态特性,首先需要通过空气中的模态试验确定吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件的约束边界,为建立有限元模型提供依据;其次需要建立合理的湿模态分析方法,实现对堆内构件各关键结构在静水中的模态及振型的准确预测;最后通过静水中的模态试验验证该计算方法的正确性和准确性。

2 模态分析基本方法

在核电站正常运行过程中,堆内构件与一回路的水构成一个流固耦合系统.堆内构件在静水中的附加质量会影响结构的固有频率.在湿模态计算中,水为无黏不可压缩流体,通过 Kinsler 假设,可将流体的动量方程和连续性方程简化为波动方程,如下:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中, c 为水中的声速, p 为流体声学压力.

$$\begin{aligned} & \iiint_V \frac{1}{c^2} \delta p \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} dV - \iiint_V [\delta \mathbf{L}^T \mathbf{p}] [\mathbf{L} \mathbf{p}] dV \\ & = - \iint_S \rho \delta p \mathbf{n}^T \left[\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right] dS \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ρ 为水的密度, δp 为试函数, \mathbf{L} 为边界的梯度向量, \mathbf{n} 为边界表面的法向量, \mathbf{u} 为节点速度向量.

对式(2)进行离散变化,可得:

$$\mathbf{M}_A \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{K}_A \mathbf{P} = \mathbf{F}_f \quad (3)$$

其中, \mathbf{M}_A 为流体质量矩阵, \mathbf{K}_A 为流体刚度矩阵, \mathbf{P} 为声学压力向量, \mathbf{F}_f 为声学力向量.

根据 Hamilton 原理,堆内构件在水中的动力学方程可表示为:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F}_s \quad (4)$$

其中, $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{K}_s$ 分别表示结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, \mathbf{F}_s 表示流体作用在流固界面上的耦合作用力矩阵.

结合式(3)和式(4)可得到堆内构件流固耦合方程的统一矩阵方程:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ \rho \mathbf{L}^T & \mathbf{M}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{L} \\ 0 & \mathbf{K}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_f \end{bmatrix} \end{aligned}$$

对式(5)进行特征值分析,可得到结构的湿模态频率及振型.

3 模态试验方法

3.1 测量方法

模态试验方法通常可以分为试验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)和运行模

态分析(Operational Modal Analysis, OMA).

基于输入与输出信号的 EMA 其原理是通过测量激励(输入)和响应(输出)时程,对信号进行傅里叶变换,将时程信号变换为频率信号,经过计算和曲线拟合等处理,求出频率响应函数(或传递函数),并通过参数识别方法辨识出结构的模态参数和物理参数,从而得到结构的固有频率、响应振型及阻尼.

仅基于输出信号的 OMA 方法其基本思想是两个响应点之间的互相关函数和脉冲响应函数有相似的表达式,而后使用参数识别方法进行模态参数识别,得到结构的固有频率、响应振型及阻尼.

EMA 需要测量输入信号(一般为力信号),因此输入端的能量不能过大使得力传感器过载,因而有的振型可能因为能量不足而无法激振得到;而 OMA 无法得到正则振型且环境激励的能量、周期性等性质不明,故其准确度较 EMA 低.因此,试验中根据实际情况使用 EMA 与 OMA 方法.

3.2 传感器安装方式

小型模块化压水反应堆堆内构件主要包含了吊篮组件、压紧组件、压紧筒组件和分流环板结构.为了获得相关结构在空气和静水中的模态特征,需要在以上四个主要结构中分别安排单向防水加速度传感器进行模态测量.

其中,吊篮组件一共安装单向防水加速度传感器 24 个,位于吊篮筒体内表面距吊篮法兰顶部 600mm、830mm 和 1180mm 三个高度,环向 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°位置,如图 2 所示.

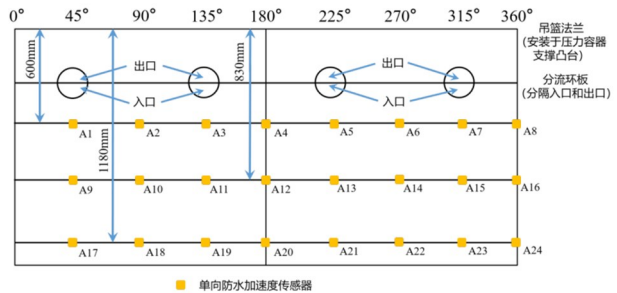


图 2 吊篮组件传感器布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the locations of the acceleration sensors of core barrel

压紧组件一共安装单向防水加速度传感器 16 个,位于压紧组件筒体内表面距筒体法兰下表面 100mm 和 300mm 两个高度,环向 0°、45°、90°、

135°、180°、225°、270°、315°位置,如图3所示。

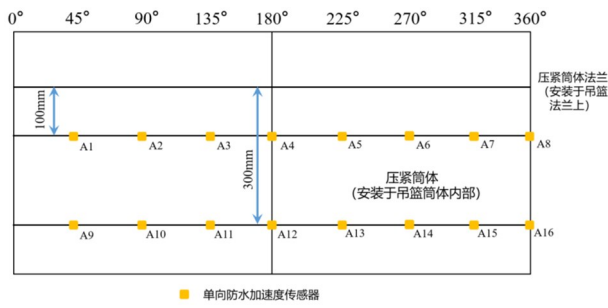


图3 压紧组件传感器布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the locations of acceleration sensors of core support assembly

压紧筒组件一共安装单向防水加速度传感器24个,位于压紧筒组件筒体外表面距筒体法兰下表面220mm、580mm和830mm三个高度,环向0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°位置,如图4所示。

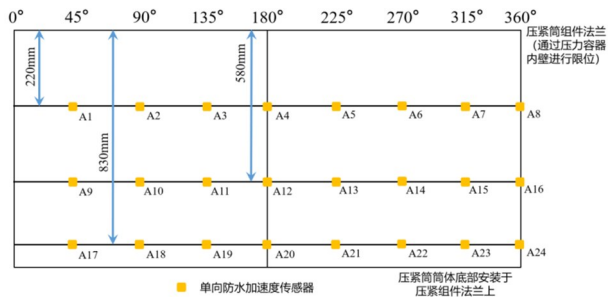


图4 压紧筒组件传感器布置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the locations of acceleration sensors of upper core support assembly

4 模态试验与数值结果

4.1 空气和静水中的试验结果

为了准确模拟堆内构件各结构之间约束边界,在开展模态试验之前,将吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件等安装在压力容器内。吊篮筒体直径为759mm,长度为1376mm。压紧组件筒体直径为727mm,长度为471mm。压紧筒组件筒体直径为812mm,长度为1233mm。模态试验模型材料均为304不锈钢。在压力容器的筒体对应于吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件位置分别预留了模态试验的激振孔。激振器的激振杆穿过激振孔后,可对试验对象进行激振,开展敲击法的模态试验,如图5所示。

采用敲击法,分别在空气和静水中对吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件进行模态试验,得到结

构在空气和静水中的低阶模态频率及对应的振型。吊篮组件在空气和静水中前三阶的固有频率和阻尼比如表1所示,其对应的振型如图6所示。压紧组件在空气和静水中前两阶的固有频率和阻尼比如表2所示,其对应的振型如图7所示。压紧筒组件在空气和静水中前三阶的固有频率和阻尼比如表3所示,其对应的振型如图8所示。



图5 激振器与激振孔

Fig.5 Vibration exciter and exciting location

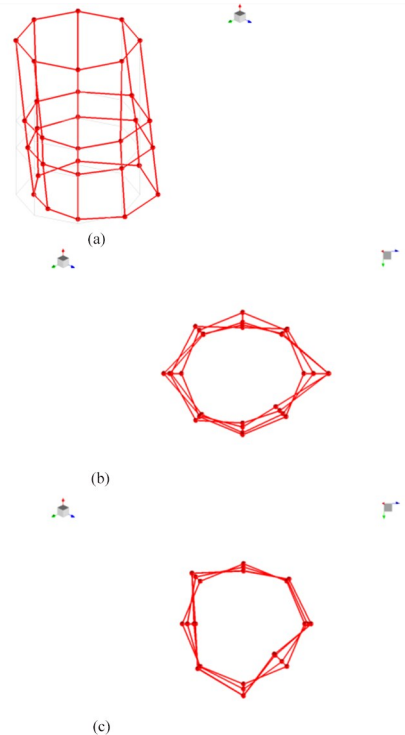


图6 吊篮组件前三阶振动:(a)一阶梁式;(b)二阶壳式;(c)三阶壳式

Fig.6 Mode shape of core barrel:(a) the first order mode;(b) the second order mode;(c) the third order mode

表 1 吊篮组件在空气和静水中前三阶固有频率及阻尼比(Hz)
Table 1 The natural frequency and damping ratio of core barrel in air and water

	空气中		静水中	
	频率	阻尼比	频率	阻尼比
梁式	95.6	0.63%	60.3	1.91%
二阶壳式	224.6	1.90%	181.9	1.20%
三阶壳式	324.6	3.36%	286.4	2.49%

表 2 压紧组件在空气和静水中前两阶固有频率及阻尼比(Hz)
Table 2 The natural frequency and damping ratio of core support assembly in air and water

	空气中		静水中	
	频率	阻尼比	频率	阻尼比
二阶壳式	479.2	0.92%	246.4	1.96%
三阶壳式	532.1	1.05%	334.9	2.19%

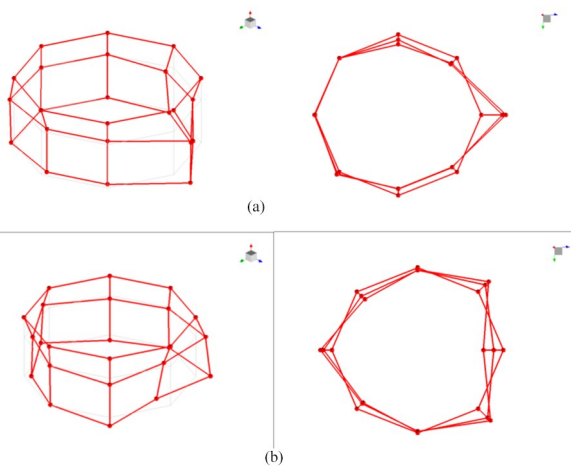


图 7 压紧组件前两阶振动:(a)二阶壳式;(b)三阶壳式

Fig.7 Mode shape of core support assembly:(a)the second order mode;(b)the third order mode

表 3 压紧筒组件在空气和静水中前两阶固有频率及阻尼比(Hz)
Table 3 The natural frequency and damping ratio of upper core support assembly in air and water

	空气中		静水中	
	频率	阻尼比	频率	阻尼比
二阶壳式	356.5	0.99%	230.0	1.73%
三阶壳式	398.5	0.47%	298.2	2.47%

4.2 空气和静水中的计算结果

根据上一小节空气中的模态试验结果,确定了吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件的约束边界.通过 Workbench 软件中的有限元建模模块,分别建立吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件的有限元模型.吊篮组件的有限元模型包含了吊篮筒体、流量

分配罩和围筒,如图 9 所示.压紧组件和压紧筒组件的有限元模型分别如图 10 和图 11 所示.其中,固体域的吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件采用 SOLID185 单元,流体域采用 FLUID30 单元.吊篮组件和压紧组件均在法兰下表面固支,压紧筒组件在筒体下端固支,在筒体上端约束轴向位移.通过 Workbench 中的干模态和湿模态分析模块,分别得到了吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件在空气和静水中的模态频率及相应的振型.将空气和静水中的试验结果与计算结果进行对比,如表 4 和表 5 所示.各阶模态的振型如图 10—图 12 所示.

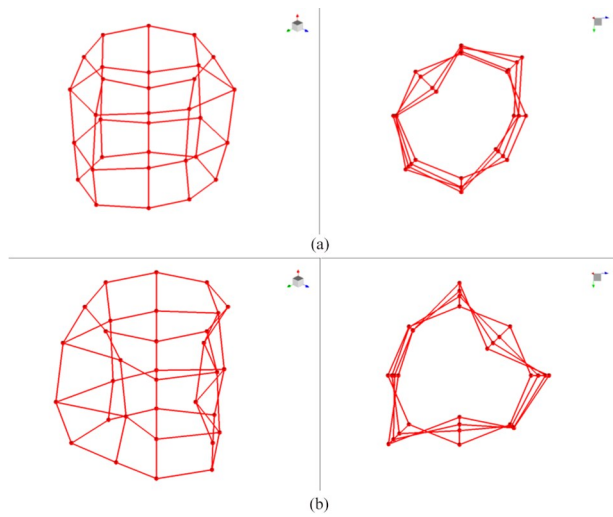


图 8 压紧筒组件前两阶振动:(a)二阶壳式;(b)三阶壳式

Fig.8 Mode shape of upper core support assembly:
(a)the second order mode;(b)the third order mode

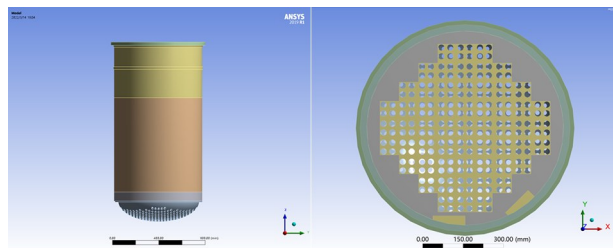


图 9 吊篮组件的有限元模型

Fig.9 Finite element model of core barrel

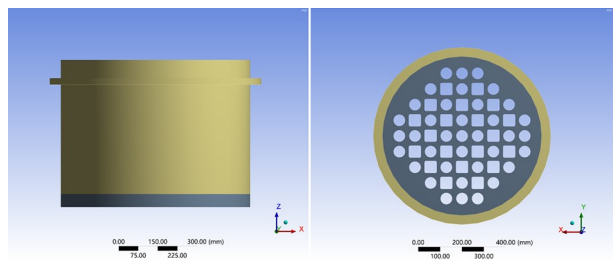


图 10 压紧组件的有限元模型

Fig.10 Finite element model of core support assembly

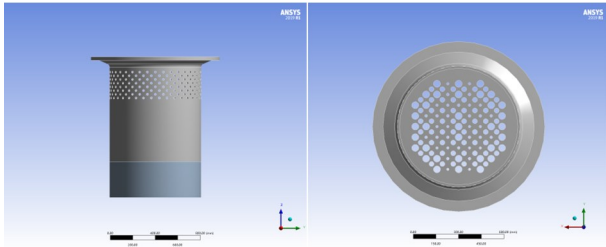
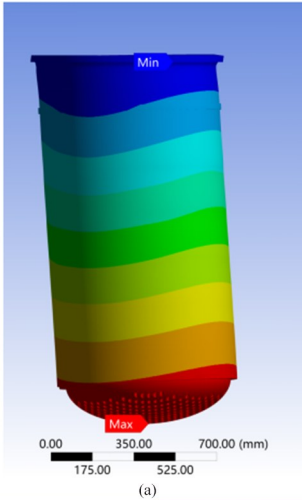
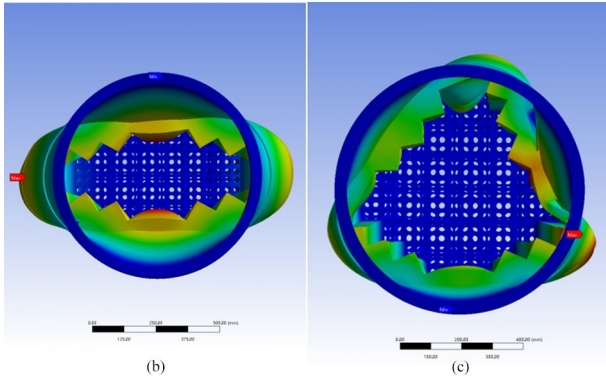


图 11 压紧筒组件的有限元模型

Fig.11 Finite element model of upper core support assembly



(a)



(b)

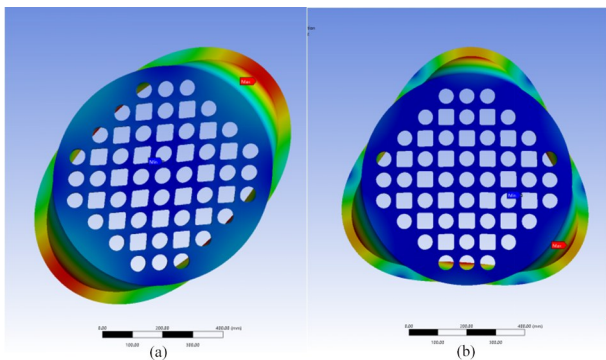
(c)

图 12 吊篮组件在空气和静水中的前三阶振型;

(a)一阶梁式;(b)二阶壳式;(c)三阶壳式

Fig.12 Mode shape of core barrel:(a)the first order mode;

(b)the second order mode;(c)the third order mode



(a)

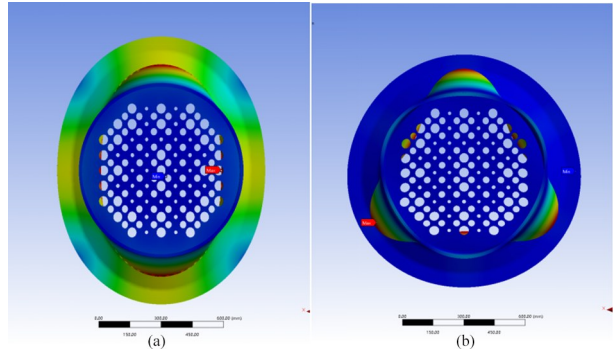
(b)

图 13 压紧组件在空气和静水中的前两阶振动;

(a)二阶壳式;(b)三阶壳式

Fig.13 Mode shape of core support assembly;

(a)the second order mode;(b)the third order mode



(a)

(b)

图 14 压紧筒组件在空气和静水中的前两阶振动;

(a)二阶壳式;(b)三阶壳式

Fig.14 Mode shape of upper core support assembly;

(a)the second order mode;(b)the third order mode

表 4 堆内构件在空气中模态频率试验与计算结果(Hz)

Table 4 Experimental and numerical results of natural frequency in air

		试验结果	计算结果	偏差
吊篮组件	一阶梁式	95.6	95.4	0.11%
	二阶壳式	224.6	221.0	1.60%
	三阶壳式	324.6	356.2	9.73%
压紧组件	二阶壳式	479.2	486.8	1.58%
	三阶壳式	532.1	544.9	2.26%
压紧筒组件	二阶壳式	356.5	370.4	3.93%
	三阶壳式	398.5	461.3	15.83%

表 5 堆内构件在静水中模态频率试验与计算结果对比(Hz)

Table 5 Experimental and numerical results of natural frequency in water

		试验结果	计算结果	偏差
吊篮组件	一阶梁式	60.3	59.4	1.49%
	二阶壳式	181.9	180.6	0.72%
	三阶壳式	286.4	274.8	4.05%
压紧组件	二阶壳式	246.4	252.2	2.44%
	三阶壳式	334.9	332.6	0.89%
压紧筒组件	二阶壳式	230.0	238.6	3.48%
	三阶壳式	298.2	282.7	5.37%

通过对比试验和计算结果可以发现,附加质量影响结构的模态频率,不影响模态振型。吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件在静水中的模态频率远小于在空气中的模态频率。吊篮组件在空气和静水中的基阶模态为梁式振型,压紧组件和压紧筒组件在空气和静水中的基阶模态为二阶壳式振型。

5 结论

本文以国内自主研发的小型模块化压水反应堆堆内构件为研究对象,通过试验与数值计算相结

合的手段,研究了吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件在空气和静水中的模态特性,得到如下结论:

①堆内构件在静水中的附加质量对吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件的固有频率影响明显,但不影响结构的振型。

②本文采用的湿模态计算方法能够准确地获得吊篮组件、压紧组件和压紧筒组件等复杂结构在静水中的固有频率及相应的振型。在本文的研究中,该方法计算结果与试验结果偏差小于10%。

参考文献

- [1] SIGRIST J F, BROCK D. Homogenisation method for the modal analysis of a nuclear reactor with internal structures modelling and fluid-structure-interaction coupling [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237:431-440.
- [2] BOCHKAREV S A, MATVEYENKO V P. The dynamic behavior of elastic coaxial cylindrical shells conveying fluid [J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 74: 467-474.
- [3] LAI J, SUN L, YANG J, et al. He. Experimental and numerical analyses on flow-induced vibration of a nuclear engineering test reactor internal [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 340: 335-346.
- [4] LAI J, SUN L, LI P, et al. He. Study on vortex-induced vibration of the tubes in a nuclear engineering test reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 330: 391-399.
- [5] 马建中,杨翊仁,张继业,等. 空气中吊篮结构的振动特性分析 [J]. 核动力工程, 2000, 21(4): 323-327.(in Chinese)
- MA J Z, YANG Y R, ZHANG J Y, et al. Analysis of vibration characteristics of a core barrel in air [J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(4): 323-327.
- [6] 喻丹萍,胡永陶. 秦山核电二期工程反应堆堆内构件模型流致振动试验研究 [J]. 核动力工程, 2003, 24(S1): 109-1113.(in Chinese)
- YU D P, HU Y T. Experimental study of flow-induced vibration of the reactor internal in Qinshan phase II NNP project [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(S1):109-113.
- [7] 席志德,陈炳德,李朋洲,等. 输送流体的同心圆筒结构动力学特性研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(11): 218-222.(in Chinese)
- XI Z D, CHEN B D, LI P Z, et al. The dynamic characteristics of coaxial cylindrical shell conveying fluid [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 218-222.
- [8] 赖姜,何超,席志德,等. 反应堆吊篮在正常和劣化支撑条件下的振动模态特性 [J]. 核动力工程, 2016, 37(S2):20-23.(in Chinese)
- LAI J, HE C, XI Z D, et al. Vibration characteristics of a core barrel with conventional and unconventional core support barrel [J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(S2):20-23.
- [9] LIM S, HA K, PARK K S, et al. Modal test of scaled-down reactor internals in SMART considering the fluid-structure interaction. Proceedings of the ASME 2011 Small Modular Reactors Symposium, 2011, USA, SMR2011-6574.
- [10] CHOI Y, LIM S, KO B H, et al. Dynamic characteristics identification of reactor internals in SMART considering fluid-structure interaction [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 255:202-211.
- [11] LEE J W, LEE Y S. The effects of fluid structure interactions on the dynamic characteristics of the reactor internals structure of SMART [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014: 752-753, 851-858.