

AP1000 堆芯围筒组件在空气中 动态特性试验研究

丁宗华 张 翟 张 明
(上海核工程研究设计院 上海 200233)

摘要 通过堆芯围筒组件模拟件(1:1)的动态特性试验,可以获得 AP1000 堆内构件堆芯围筒组件在空气中动态特性(固有频率、阻尼比和对应的振型)。本试验采用多输入多输出(MIMO)试验方法进行模态试验,获得了堆芯围筒组件前 6 阶的固有频率、阻尼比与相应的振型。试验结果为建立反应堆设备系统模型及堆芯围筒组件流致振动分析提供可靠的固有特性参数。

关键词 堆芯围筒组件, 模态试验, 动态特性

中图分类号 TL375.5

在 AP1000 堆内构件设计中的一个重大改进就是采用整体焊接结构的堆芯围筒组件,其代替了与吊篮筒体连接在一起的堆芯围板组件,避免了围板之间及其与吊篮筒体连接螺栓的松动脱落,降低了中子泄漏,并改善了中子经济。堆芯围筒组件是西屋公司参考 Combustion Engineering (CE)的堆芯围筒组件设计,并做了很大的结构改进,其结构非常复杂,有限元动态分析往往难以准确模拟。通过本试验获得堆芯围筒组件在空气中的动态特性参数是为分析提供可靠和确切的依据。

1 堆芯围筒组件和试验简介

堆芯围筒位于下部堆内构件吊篮筒体内部,其通过 12 个螺栓和 4 个定位销与下部堆内构件的堆芯支承下板连接,构成了堆芯燃料组件的径向边界。通过控制堆芯腔室的尺寸(即燃料组件与堆芯围筒之间的间隙),堆芯围筒能够引导和控制流经堆芯的冷却剂流量。堆芯围筒起到从圆柱形吊篮筒体向方形燃料组件过渡的作用。堆芯围筒的结构允许冷却剂(即旁流)流经吊篮筒体和堆芯围筒之间的空腔,同时堆芯围筒可以实现部分中子反射和辐照屏蔽功能,通过限制总辐照量减少对反应堆压力容器不利的辐照影响。AP1000 堆芯围筒组件如图 1 所示。重量约 21 T,高 4.8 m,直径 3.4 m,由 4 组 C 形板和 4 组 W 形板以及大量筋板和环板等组合焊接而成,材质为 304 不锈钢。

本试验将整个堆芯围筒组件固定在带有导轨的

试验平台上。根据堆芯围筒组件螺栓位置和导轨尺寸设置了堆芯围筒组件试验的紧固方式,通过 6 个螺栓和 6 块压板与导轨进行紧固,紧固方式如图 2 所示。堆芯围筒组件左右两侧各用 3 个螺栓加以固定,另外两侧各用 3 块压板压住。

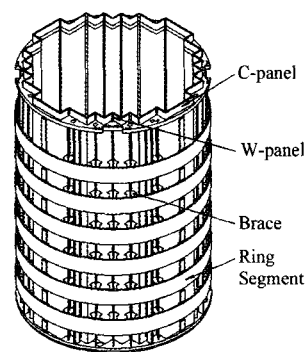


图 1 AP1000 堆芯围筒组件模型
Fig.1 AP1000 core shroud assembly model.

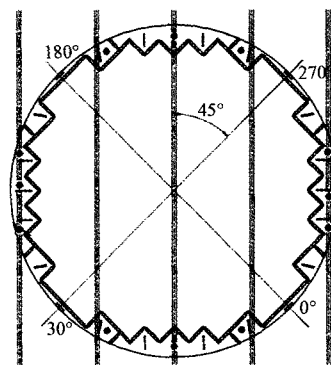


图 2 堆芯围筒组件与导轨固定图
Fig.2 Core shroud assembly fixed on slideway.

2 试验方法和原理

堆芯围筒组件是一个复杂的连续体, 其可离散成为有限个自由度的多自由度系统。在多自由度模态测试过程中, 可采用单输入多输出(SIMO)和多输入多输出(MIMO)方式。由于 SIMO 激励能量在被测实体上分布不均匀, 以及激励位置的选择不合理等因素, 都可能导致模态分析结果中存在“丢阶”的现象, 而 MIMO 模态“丢阶”的概率会大大降低, 且 MIMO 更适用于庞大笨重结构和对称性结构(具有重根模态)。故本试验采用 MIMO 方法进行模态试验, 用力锤对堆芯围筒组件进行多点进行激励。

离散后多自由度系统的基本运动方程用矩阵形式表示为^[1,2]

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

这里 $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为离散自由度为 $m \times m$ 的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, 连同相应的加速度向量、速度向量和位移向量以及外力向量一起组成比例阻尼的动态方程。

将式(1)组进行 $F(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt$ 拉氏变换。

当初始状态为零, 则式(1)可变换为:

$$[[M]s^2 + [C]s + [K]]\{X(s)\} = \{F(s)\} \quad (2)$$

$$\text{设 } [Z(s)] = [[M]s^2 + [C]s + [K]] \quad (3)$$

称为位移阻抗矩阵; $[Z(s)]$ 和它的逆矩阵 $[Z(s)]^{-1}$ 为 $m \times m$ 方阵。

$[Z(s)]$ 的逆矩阵 $[Z(s)]^{-1}$ 即为传递函数方阵:

$$[Z(s)]^{-1} = [H(s)] = \frac{\text{Adj}[B(s)]}{\det[B(s)]} = \frac{[A(s)]}{\det[B(s)]} \quad (4)$$

令 $s=j\omega$, 代入式(4), 得到频响函数矩阵的离散表达式:

$$[H(j\omega)] = \frac{[A(s)]}{\det[B(s)]} = \sum_{k=1}^m \left[\frac{[A_k]}{(j\omega - p_k)} + \frac{[A_k^*]}{(j\omega - p_k^*)} \right] \quad (5)$$

其中:

$$[A_k] = q_k \begin{bmatrix} \Phi_{1k}\Phi_{1k} & \cdots & \Phi_{1k}\Phi_{jk} & \cdots & \Phi_{1k}\Phi_{kk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{ik}\Phi_{1k} & \cdots & \Phi_{ik}\Phi_{jk} & \cdots & \Phi_{ik}\Phi_{kk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{kk}\Phi_{1k} & \cdots & \Phi_{kk}\Phi_{jk} & \cdots & \Phi_{kk}\Phi_{kk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Φ_{ik} 、 Φ_{jk} 为与激励点 j 、相应输出响应点 i 有关的参数; $[A_k^*]$ 为 $[A_k]$ 的共轭矩阵; p_k 为与结构固有频率 f_k 和阻尼比 ξ_k 有关参数; p_k^* 为 p_k 的共轭参数。

由式(5)、(6), 频响函数是系统的固有属性, $H(s)$ 可由外部激励力 $F(s)$ 与响应 $X(s)$ 通过模态识别方法求出^[3]。

3 测量系统和测点选取

模态试验测量系统示意图如图 3 所示。由图 3, 测量系统由力锤(带 12.5 T 力传感器)、加速度传感器、电荷放大器、INV3020D 采集系统和 DASPV10 信号采集及分析软件组成。试验时由测试工程师操作力锤对试验结构进行敲击, 该高弹性聚能中力锤具有特殊构造, 含有先进的弹性聚能装置, 有效增强激励力和延长激励时间, 使激励能量集中于低频段, 特别适用于堆芯围筒组件这种低频结构。用力锤自带力传感器测量激励力, 用加速度传感器测量结构响应。堆芯围筒组件现场测量采集系统的照片全景见图 4。

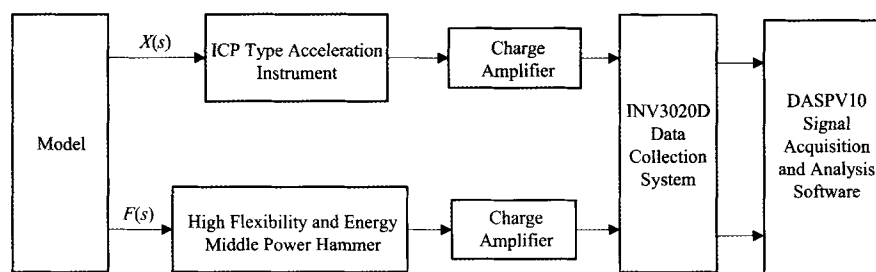


图 3 模态试验测量系统示意图
Fig.3 Diagram of modal test measurement system.

选择好试验方法后(本试验采用 MIMO 方式), 就要根据堆芯围筒结构的特点和试验目的确定测点的数目和布置, 以及传感器的安装方式等。

测点的选择包括激励点和响应点的选择, 本试验测点(顶层)选择如图 5 所示。激励点的选择根据试验结构和约束边界, 将其选择在堆芯围筒的最上

端。根据有限元动态分析表明,图 5 中 40 和 44 位置的上端不会同时成为前几阶模态振型的节点,故选择这两处作为激励点。

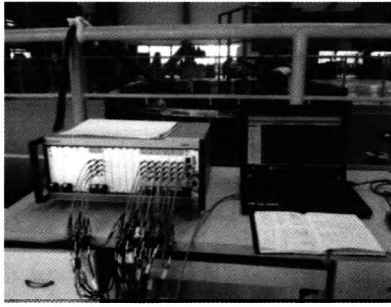


图 4 现场 INV3020D 采集系统
Fig.4 INV3020D data collection system.

响应点的选择基于能明确显示堆芯围筒组件的模态振型特征和反应其轮廓的基础,并根据堆芯围筒组件的结构,测点布置方案如下:堆芯围筒组件的圆周方向,在每个转角的位置(共 44)选取两个加速度传感器,分别为 X 向和 Y 向,共有 88 个测点;堆芯围筒组件的轴向,在每个环板上端选取一层测点,且在堆芯围筒组件上端选取二层测点,共 8 层

测点;堆芯围筒组件共有 $88 \times 8 = 704$ 个测点,其中 X 方向 352 个测点, Y 方向 352 个测点。

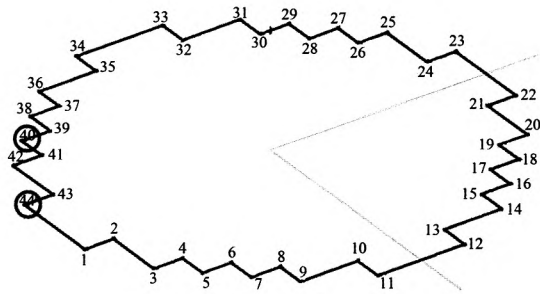


图 5 顶层测点布置方案
Fig.5 Measure point layout scheme on the top of model.

4 试验结果和分析

本试验分别进行了堆芯围筒组件底部模拟非紧固状态(6 个螺栓和 6 块压板全松开)和紧固状态(6 个螺栓和 6 块压板全紧固)安装条件下进行试验。模态试验典型前 6 阶的固有频率、阻尼比与振型结果见表 1,两种安装条件下堆芯围筒组件的各阶固有频率对应的振型见图 6 和 7。

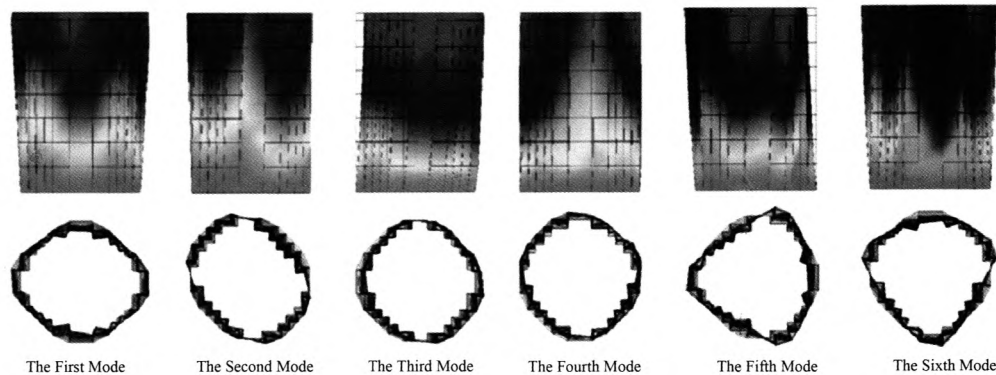


图 6 在非紧固状态下各阶模态振型
Fig.6 Vibration modes under the unfastening state.

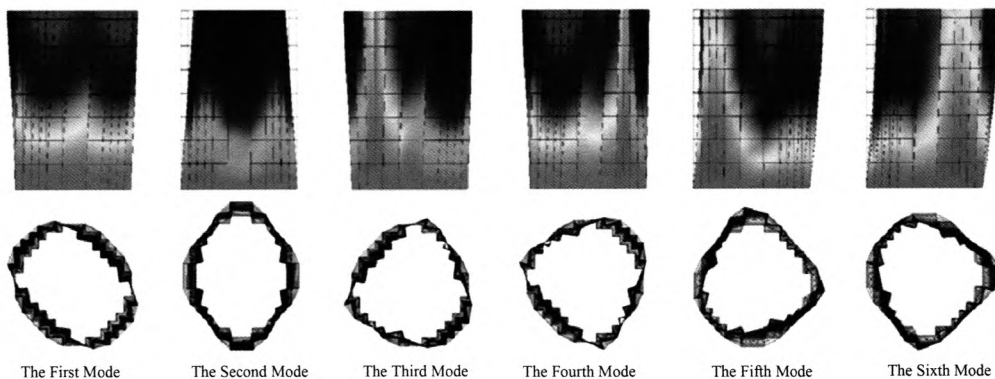


图 7 在紧固状态下各阶模态振型
Fig.7 Vibration modes under the fastening state.

从表 1 可以看出, 处于非紧固状态下的堆芯围筒组件各阶固有频率比处于紧固状态下的堆芯围筒组件对应固有频率要低, 两种安装条件下对应的模态振型次序也不完全相同。可见试验结构的边界安

装紧固条件会对结构固有频率和模态振型有较大影响, 所以实际堆芯围筒组件结构安装时必须注意其与堆芯支承下板连接螺栓的预紧力。

表 1 堆芯围筒组件模态试验结果
Table 1 Result of core shroud assembly modal test.

阶次 Mode	非紧固状态 Unfastening state			紧固状态 Fastening state		
	固有频率 /Hz Natural frequency	阻尼比 /% Damping	模态振型 Vibration mode	固有频率 /Hz Natural frequency	阻尼比 /% Damping	模态振型 Vibration mode
1	14.5	1.1	椭圆壳型 Ellipse shell model	24.0	0.6	椭圆壳型 Ellipse shell model
2	18.0	0.6	同第 1 阶 As first mode	24.5	2.3	同第 1 阶 As first mode
3	22.0	3.8	1 阶梁型 First beam model	35.0	1.6	三角形壳型 Triangle shell model
4	25.5	5.5	同第 3 阶 As third mode	35.5	1.0	同第 3 阶 As third mode
5	35.5	0.2	三角形壳型 Triangle shell model	42.5	3.0	1 阶梁型 First beam model
6	36.0	0.6	同第 5 阶 As fifth mode	43.5	3.9	同第 5 阶 As fifth mode

5 结语

AP1000 堆内构件堆芯围筒组件动态特性试验采用比较先进的测量系统, 通过 DASPV10 获得了堆芯围筒组件在空气中的不同边界安装紧固条件下的模态动态特性。

本试验研究结果表明, 可以为堆内构件振动分析提供堆芯围筒组件固有动态特性参数; 验证堆芯围筒组件有限元仿真计算; 可为其他结构动态性能试验研究提供指导。

致谢 在本试验过程中, 得到了北京东方振动和噪声技术研究所和上海第一机床厂有限公司的协作和支持, 特此感谢!

参考文献

1 顾海明, 周勇军. 机械振动理论与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2007
GU Haiming, ZHOU Yongjun. Mechanical vibration theory and application[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2007

2 大久保信行[日]著, 尹传家译. 机械模态分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985
Okubo Nobuyuki [Japan] write, YIN Chuanjia translate. Mechanical Modal Analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1985

3 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1985
YING Huaiqiao. Waveform and Spectrum Analysis and Random Data Processing[M]. Beijing: China Railway Press, 1985

Dynamic property test study for AP1000 core shroud in air

DING Zonghua ZHANG Zhai ZHANG Ming

(*Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China*)

Abstract Background: Core shroud is an important assembly, which forms the lateral periphery of the core inside the core barrel. **Purpose:** To carry out a dynamic property test on a core shroud mockup(1:1) at the damping, natural frequency and the corresponding vibration mode of AP1000 reactor internal core shroud assembly in air. **Methods:** The multi-input multi-output (MIMO) test method was used in this modal test. **Results:** By such test, the first six mode natural frequencies, damping and vibration modes of the core shroud assembly were obtained. **Conclusions:** The test results would be used to offer natural parameters of the core shroud assembly for AP1000 reactor equipment system model and flow-induce vibration analysis of the core shroud assembly.

Key words Core shroud assembly, Modal test, Dynamic property

CLC TL375.5