

文章编号：0258-0926(2016)S2-0052-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0052

反应堆堆内构件动态特性试验研究分析

许 静，喻丹萍，马建中，李锡华

中国核动力研究设计院，成都，610213

摘要：介绍了反应堆试验模型主要部件在空气中和静水中进行的动态特性试验，包括所用的测量系统、试验原理、试验方法和得到的试验结果。并对试验结果进行了分析，说明了试验结果的合理性。

关键词：堆内构件；动态特性；固有频率

中图分类号：O351.2 **文献标志码：**A

Analysis of Dynamic Characteristics Test for Reactor Internals

Xu Jing, Yu Danping, Ma Jianzhong, Li Xihua

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In this paper, testing principle, testing method, testing measurement system, and testing result have been introduced. According to the result, it can be concluded that the result of the test is reasonable and believable.

Key words: Reactor internals, Dynamic characteristics, Natural frequency

0 引言

某新型反应堆，堆内构件的结构尺寸有较大的变化，按照要求必须进行堆内构件比例模型流致振动试验研究。在正式进行流致振动试验前，需进行堆内构件的动态特性试验，测量结构各部件在空气中和静水中的固有频率、振型和阻尼比。为后续的流致振动试验结果分析及流致振动响应计算提供有关参数。本文采用结构模态试验方法获得此反应堆堆内构件在空气中和静水中的动态特性参数，并对试验结果进行研究分析。

1 堆内构件模型简介

本反应堆堆内构件由上部堆内构件、下部堆内构件及均流板组成。本堆内构件试验模型按 1:6 的比例模拟实堆，模型的三维结构见图 1。

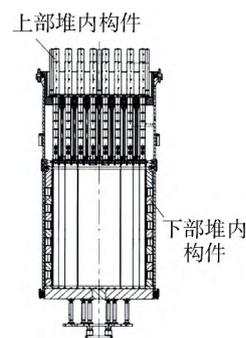


图 1 堆内构件结构示意图

Fig.1 Structure Diagram of Internals Model

2 试验内容

2.1 主要部件在空气中动态特性测量

测量堆内构件模型各主要部件在空气中的动态特性（固有频率、振型、阻尼比）：吊篮组

收稿日期：2016-10-09；修回日期：2016-12-20

作者简介：许 静（1979—），女，副研究员，现从事反应堆结构力学流致振动研究

件+压紧弹性环的动态特性； 吊篮组件+堆芯围筒组件+燃料组件模拟体+压紧弹性环+上部堆内构件子组件的动态特性； 上部堆内构件的动态特性； 堆芯围筒的动态特性。

2.2 主要部件在静水中动态特性测量

测量堆内构件模型各主要部件在静水中的动态特性（固有频率、振型、阻尼比）： 吊篮组件+压紧弹性环的动态特性； 吊篮组件+堆芯围筒组件+燃料组件模拟体+压紧弹性环+上部堆内构件子组件的动态特性； 堆芯围筒的动态特性。

3 结构动态特性试验的方法

本试验采用 LMS 公司推出的结构模态试验方法测量模型的动态特性。其原理是试验时同步测量结构的激励（输入）和响应（输出）时程，通过分析模块的模数变换并采集作快速傅立叶变换（FFT）计算，将时程信号变换成频域信号，经过计算和曲线拟合等处理，获得输入与输出之间频率反应（或传递）函数，并通过参数识别方法辨识出结构的模态参数，从而得到结构的固有频率、相应的振型和阻尼比。

激励方法有敲击法和激振器激励法。敲击法的设备简单，使用方便，可以快速地获得试验结果，对被测试件无附加质量和刚度约束，本试验的上部堆内构件和堆芯围筒的动态特性试验采用敲击法进行模态试验，对吊篮组件采用敲击法和激振器激励法进行激励。

4 试验步骤及传感器布置

4.1 上部堆内构件及导向筒

将上部堆内构件安装在吊篮支承架上，上端模拟压紧弹性环及其压缩量，在堆芯上板和上部支承板上各布置 8 个传感器（间隔 45° ），共 16 个加速度传感器。在 9R 导向筒中部 0° 和 90° 方向布置 2 个速度传感器。

4.2 吊篮组件和二次支承柱

(1) 在吊篮外壁分 3 层，每层布置 12 个加速度计（间隔 30° ），共 36 个。从容器 0° 位置观察窗安装激振杆和力传感器至吊篮的相应位置上，并密封好激振杆。先进行吊篮空气中的模态试验，然后对容器进行充水，待灌满水后，进行吊篮在静水中的模态试验。

(2) 在二次支承柱的下支承板 0° 和 90° 侧边

缘布置 2 个加速度传感器，在涡流抑制板 0° 和 90° 侧边缘布置 2 个加速度传感器。先进行吊篮和二次支承柱（含堆芯围筒、燃料组件和上部堆内构件）在空气中的模态试验，获得吊篮和二次支承柱在空气中的动态特性。然后，对容器进行灌水，进行吊篮和二次支承柱（含堆芯围筒、燃料组件和上部堆内构件）在静水中的模态试验，获得吊篮和二次支承柱在静水中的动态特性。

4.3 堆芯围筒

堆芯围筒一共布置 16 个加速度传感器，在堆芯围筒内壁分 2 层，每层布置 8 个（间隔 45° ）。第 1 层传感器距离堆芯下板高度为 400 mm，第 2 层传感器距离堆芯下板高度为 800 mm。先采用敲击法进行空气中的模态特性试验。然后对容器进行充水，待灌满水后，进行堆芯围筒在静水中的模态试验。

5 模态试验结果

5.1 上部堆内构件和导向筒模态试验结果

激励方式采用力锤敲击法。力锤敲击堆芯上板后得到各测点响应，并对激励和响应信号进行模态分析，可获得上部堆内构件和 9R 导向筒上的力和加速度反应时程信号，经模态分析后得到传递函数，经模态识别分析可获得上部堆内构件和导向筒的动态特性，见表 1，对应振型见图 2。

5.2 吊篮组件（含全堆芯）模态试验结果

先采用激振器随机信号激励的方法进行吊篮和二次支承柱（含堆芯围筒、燃料组件和上部堆

表 1 上部堆内构件和导向筒模态试验结果

Table 1 Results of Modal Test for Upper Internals and Guide Tube

部件	阶次	固有频率/Hz	阻尼比/%	方向
上部堆内构件	1	123.99	0.55	X
		104.94	0.48	Y
导向筒	1	523.67	0.23	X
		479.02	0.32	Y

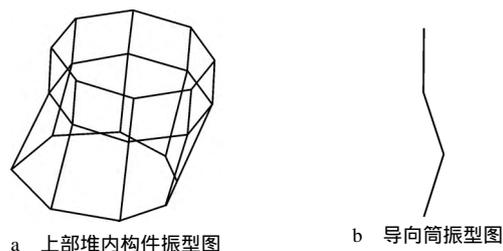


图 2 上部堆内构件和导向筒振型图

Fig. 2 Mode Shape of Upper Internals and Guide Tube

内构件)在空气中的模态试验。然后对容器进行灌水,分别采用敲击法和激振器激励法进行吊篮和二次支承柱(含堆芯围筒、燃料组件和上部堆内构件)在静水中的模态试验,获得在空气中和静水中的动态特性参数,见表2、表3。对应的振型图见图3。

表2 吊篮(含堆芯)模态试验结果
Table 2 Results of Modal Test for Barrel

状态	阶次	固有频率/Hz	阻尼比/%	方向
空气中	1	93.97	0.70	Y
		99.16	0.78	X
	2	327.13	0.81	—
		346.62	0.58	—
	3	246.44	0.71	—
		278.72	0.83	—
静水中	1	41.88	1.33	X
		44.71	1.81	Y
	2	99.30	2.52	—
		114.82	2.21	—
	3	76.50	1.41	—
		126.40	1.06	—

表3 二次支承柱模态试验结果
Table 3 Results of Modal Test for Secondary Core Support Columns

部件	阶次	固有频率/Hz	阻尼比/%	方向
空气中	1	264.11	0.42	X
		253.52	0.24	Y
静水中	1	243.30	1.09	X
		229.78	1.01	Y

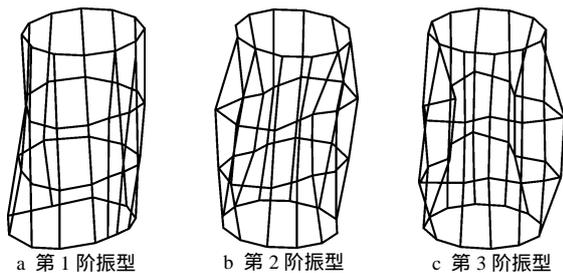


图3 吊篮振型图

Fig. 3 Mode Shape of Barrel

5.3 堆芯围筒模态试验结果

激励方式采用力锤敲击法。力锤敲击试验件后得到各测点响应,并测量激励和响应信号进行模态分析,可获得堆芯围筒的力和加速度反应时程信号,经模态分析后得到传递函数,经模态识别分析可获得堆芯围筒的动态特性,见表4,对应振型见图4。

表4 堆芯围筒模态试验结果

Table 4 Results of Modal Test for Core Shroud

状态	阶次	频率/Hz	阻尼比/%
空气中	n=2 壳式	147.84	0.37
		167.05	0.41
	n=3 壳式	207.36	0.78
静水中	n=1 梁式	297.07	0.63
	n=2 壳式	59.42	—
	n=3 壳式	130.47	—

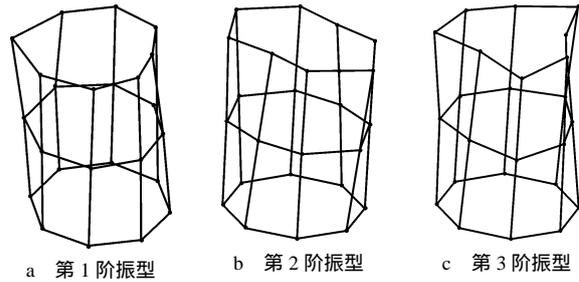


图4 堆芯围筒振型图

Fig. 4 Mode Shape of Core Shroud

6 结果分析

6.1 上部堆内构件及导向筒试验结果分析

根据试验结果,上部堆内构件的整体1阶梁型固有频率在X方向(0°)为123.99 Hz,高于Y方向(90°)104.91 Hz;导向筒的1阶梁型固有频率在X方向(0°)为523.67 Hz,高于Y方向(90°)479.02 Hz。分析上部堆内构件的模型结构,导向筒下端靠2个销固定于堆芯上板上,这2个销的方向分别是0°和180°,故导向筒在X方向的刚度大于Y方向的刚度,上部堆内构件在X方向的刚度也会大于Y方向的刚度,所以X方向的频率值高于Y方向的频率值。

6.2 吊篮组件(含全部堆内构件)试验结果分析

根据试验结果,含堆芯的吊篮在空气中X方向的梁型固有频率(99.16 Hz)略高于Y方向(93.97 Hz)的梁型固有频率,原因同上;然而在静水中,X方向的梁型固有频率(41.88 Hz)则略低于Y方向(44.71 Hz)的梁型固有频率。这是由于2个189.7 mm的出水管嘴,在静水中削弱了水的附加质量对吊篮频率的影响,导致Y方向固有频率下降的幅度小于X方向下降的幅度。所以,在静水中X方向的梁型固有频率为41.88 Hz,低于Y方向的梁型固有频率44.71 Hz。

6.3 堆芯围筒试验结果分析

根据试验结果,堆芯围筒在空气中第2阶壳

式频率有 2 个值, 147.84 Hz 和 167.05 Hz, 2 个频率对应的振型相差 45° ; 第 3 阶壳式频率值为 207.36 Hz, 整体 1 阶梁式频率值为 297.07 Hz。在静水中, 由于水的附加质量的影响, 第 2 阶壳式频率降到了 59.42 Hz, 第 3 阶壳式频率降到了 130.47 Hz。由于堆芯围筒位于吊篮内部, 激励方式受限, 在目前的力锤敲击激励下, 堆芯围筒梁式振动不明显, 未能识别出堆芯围筒在静水中的梁式频率。

7 结 论

综上所述, 可以得出如下结论:

(1) 堆内构件模型动态特性试验采用的测量系统先进, 测试技术成熟可靠。

(2) 堆内构件模型动态特性试验采用的试验方法合理, 布置了足够数量的测点, 测试用的传感器在检定周期内, 测量用传感器的编号和通道记录详细准确。通过对结果的分析, 说明测试结果是合理可信的。

(3) 堆内构件模型模态试验结果为后续的流致振动模拟试验结果分析提供了动态特性参数。

(责任编辑: 张明军)