

中国实验快堆燃料组件频率测量试验

李海龙¹, 陆秋海², 莫亚飞¹, 文 静¹, 孙 刚¹, 李海生¹, 王 波²

(1. 中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413;

2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要:堆芯的安全性极其重要,反应堆堆芯组件的抗震分析比较困难。为给中国实验快堆堆芯组件的数值分析提供依据,同时也为安全审评提供基本数据,利用动态测量系统完成了单根燃料组件分别在空气和水介质中频率的测量。试验中,分别采用了3档不同幅值的激励力。考虑安装公差对频率的影响,采用重新安装燃料组件的方法重复测量。经分析,试验结果合理可靠。

关键词:燃料组件;频率;振型

中图分类号:TL352.23

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)11-1318-04

Frequency Measurement Test on Fuel Assembly of China Experimental Fast Reactor

LI Hai-long¹, LU Qiu-hai², MO Ya-fei¹, WEN Jing¹,
SUN Gang¹, LI Hai-sheng¹, WANG Bo²

(1. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China;*

2. *School of Aeronautics and Astronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Although the seismic analysis of core assemblies is very difficult, it is important to the safety analysis of the reactor core. In order to support the numerical analysis of core assemblies and safety evaluation of China Experimental Fast Reactor (CEFR), the frequency of a single fuel assembly of CEFR was separately measured in air and water respectively by a dynamic system. During the measurement, three different range excitation forces were applied. Considering of installation tolerance, the measurement test was repeated on the fuel assembly installed again. The result of frequency measurement test was analyzed and it is thought to be reasonable and credible.

Key words: fuel assembly; frequency; vibrate mode

堆芯是反应堆的核心部位,由于堆芯结构的复杂性和非线性,堆芯抗震的数值计算较为困难,该问题也是各国研究的热点。核电厂堆芯组件在地震作用下的安全性关系到控制棒的

插入能力及核电厂能否按要求停堆。堆芯的安全评价是核安全局安全审评的重要内容,反应堆设计和运行的经济性也要求对反应堆堆芯动力学问题有一更深入的把握。

为完成堆芯组件的抗震性计算,本工作拟进行中国实验快堆(CEFR)单根燃料组件的动态特性试验。在空气和水介质中,分别测量单根燃料组件的前3阶空间模态,进而确定组件的自振频率。

1 试验对象

CEFR为池式结构。堆芯的燃料组件安装在小栅板联箱内,小栅板联箱安装在大栅板联箱上。试验用的燃料组件选取模拟运输用的燃料组件模拟件^[1],该模拟件接近真实的燃料组件。为了试验的实施,特意加工了支承燃料组件用的单孔小栅板联箱。加工件真实地模拟了燃料组件与小栅板联箱互相配合的尺寸和公差;对非配合的外部尺寸进行了适当放大,主要是为保证小栅板联箱的刚度和避免对燃料组件频率测量的干扰。

CEFR的冷却介质为液态钠。液态钠和室温水振动特性相近,试验中,用室温水代替液态钠^[2]。这种介质代替在CEFR控制棒驱动线抗震鉴定试验中已经实现。本次试验除测量燃料组件在空气中的动力特性外,还测量在水介质中的动力特性。

CEFR主容器的名义直径为7.640 m,燃料组件完全浸没在钠介质中,真实堆芯内放置上百根燃料组件。测量水介质中燃料组件频率时,确定盛水容器的尺寸及水面与燃料组件头部间的距离,需有理论支持。因此,为确定盛水容器尺寸^[3],应用CASTE3M程序,计算不同容器尺寸对应的组件频率和振型,计算结果列于表1。

表1 盛水容器尺寸对组件频率的影响

Table 1 Frequency according to vessel of different radius

半径/m	第1阶 频率/Hz	第2阶 频率/Hz	第3阶 频率/Hz
0.25	3.512 8	22.009	61.711
0.5	3.533 0	22.136	62.060
1.0	3.561 2	22.312	62.550
1.5	3.579 9	22.430	62.886
1.7	3.585 7	22.466	62.990
2.0	3.592 9	22.512	63.125
2.3	3.598 9	22.551	63.239

同时,应用该软件计算了水面与燃料组件头部间的距离对组件频率的影响,计算结果列于表2。测量频率时,需用小锤给燃料组件施加一初始激励力,根据容器尺寸变化对组件频率的影响,最终确定钢制容器的直径为0.5 m,水面与燃料组件头部间的距离为0.2 m。这样,既保证了试验的实施,也考虑到了试验经济性要求。小栅板联箱模拟件与盛水容器为刚性连接,通过地脚螺栓将它们固定在承力地基上。

表2 液面与组件头部间的距离对组件频率的影响

Table 2 Frequency according to distance between assembly top and water surface

高度 ¹⁾ /m	第1阶 频率/Hz	第2阶 频率/Hz	第3阶 频率/Hz
0.2	3.561 2	22.312	62.550
2.0	3.561 4	22.312	62.550
3.0	3.561 5	22.312	62.550

注:1) 组件头部与水面间的距离

2 试验条件和状态

2.1 试验条件

CEFR燃料组件动态特性试验在清华大学航天航空学院振动实验室进行。动特性测试系统由承力地基、比利时LMS-TestLab模态分析系统、力锤激励系统、压电式加速度计等组成。承力地基具有足够的刚度,用于固定盛水容器和小栅板联箱模拟件,不允许有过大的变形。力锤配有软橡胶或塑料锤头,使激励能量尽量集中在低频范围内(所关心的频率在100 Hz以下);力锤的最大输出力不小于100 N,力值精度不低于10%。

2.2 试验状态

将CEFR燃料组件插入固定于承力地基的小栅板联箱中,对组件施加锤击激励,安装在组件上的加速度传感器测得加速度信号、激励信号和加速度响应信号,通过LMS模态分析系统测量和分析,得到组件的前3阶自振频率。实验中,激励力分3档,激励力大小在试验过程中视试验效果确定。完成1次试验后,将CEFR燃料组件完全拔出再重新插入小栅板联箱,然后重复进行1次动特性实验。上述实验在空气和水中分别进行。

3 试验方法及结果

3.1 燃料组件模拟件的质量测量

经测量,燃料组件的质量为 (28.0 ± 0.5) kg。

3.2 锤击力摸底试验

在燃料组件上选取 6 个测点安装加速度传感器,测点沿轴向基本均匀分布。从组件插入端上端面起到组件上端部长 2 195 mm。以组件插入端上端面为 z 轴参考原点,6 个测点的轴向坐标分别为 5、439、878、1 317、1 756 mm 和上端部小头圆柱中心。传感器使用专用胶进行粘接,连线后,进行防水处理。将燃料组件插入小栅板联箱模拟件中。12 通道加速度传感器和力锤接入 LMS TestLab 模态测量和分析系统,完成自检。大致设定大中小 3 档激励力,用力锤沿水平方向敲击燃料组件 6 号物理测点,观察 12 通道频响函数是否能清晰获得前 3 阶模态对应的峰,激励力幅值结果列于表 3。

3.3 模态试验及重复安装模态试验

在 LMS TesLab 模态分析系统中建立相应的测点坐标表和连线表,确定测试模型。用

表 3 激励力幅值

Table 3 Different excitation forces

激励力幅值档	激励力幅值范围/N
大	150~180
中	90~110
小	50~60

力锤按摸底试验确定的 3 种激励力范围在组件 6 号测点上施加水平方向的激励力。LMS TestLab 模态测量和分析系统采集力传感器输入信号和加速度传感器(位移)响应信号,经处理,得到频响函数曲线。重复激励 8 次,获得稳定、有效的频响函数估计。由频响函数数据通过稳态图确定前几阶模态,识别出对应的频率和振型。通过振型分析确定前 3 阶模态的频率和振型。采用 TestLab 的 PolyMAX 软件确定前几阶弯曲模态,各阶模态的确定综合了稳态图、振型的正交性和 MAC 指标等方法。试验结果列于表 4。

将燃料组件从小栅板联箱中拔出后转 90°,重复上述试验内容,结果列于表 5。

表 4 空气中燃料组件频率

Table 4 Frequency of fuel assembly in air

测点编号	频率/Hz			平均频率/Hz	平均相对偏差 ¹⁾ /%
	激励力大	激励力中	激励力小		
1	3.134	2.937	3.075	3.049	2.4
2	3.419	3.273	3.306	3.333	1.7
3	23.710	23.918	24.187	23.938	0.7
4	23.856	24.073	24.624	24.184	1.2
5	116.838	118.246	118.603	117.896	0.6
6	118.800	121.763	121.941	120.835	1.1

注:1) 大、中、小激励力作用下的频率对平均频率的相对偏差绝对值的平均

表 5 空气中重复安装后燃料组件频率

Table 5 Frequency of fuel assembly installed again in air

测点编号	频率/Hz			平均频率/ Hz	平均相对 偏差/%	空气中平均 频率 ¹⁾ /Hz	重复相对 偏差 ²⁾ /%
	激励力大	激励力中	激励力小				
1	3.405	3.126	3.454	3.328	4.1	3.189	4.4
2	3.564	3.282	3.775	3.540	4.9	3.423	3.4
3	22.760	24.204	22.549	23.171	3.0	23.555	1.6
4	25.471	24.290	24.339	24.700	2.1	24.442	1.1
5	112.138	115.596	117.938	115.224	1.8	116.560	1.1
6	115.791	120.161	118.686	118.213	1.4	119.524	1.1

注:1) (表 4 中的平均频率+本表中的平均频率)/2

2) |平均频率-空气中平均频率|/空气中平均频率 $\times 100\%$

在上述安装状态下,向盛水容器中加水,使燃料组件浸没水下 0.2 m。水介质中的试验结

果列于表 6。重复进行模态试验及重复安装模态试验,结果列于表 7。

表 6 水介质中燃料组件频率
Table 6 Frequency of fuel assembly in water

测点编号	频率/Hz			平均频率/Hz	平均相对偏差/%
	激励力大	激励力中	激励力小		
1	2.394	2.492	2.522	2.469	2.0
2	2.795	2.850	2.732	2.792	1.4
3	20.752	20.344	21.762	20.953	2.6
4	21.362	21.592	21.961	21.638	1.0
5	75.270	76.405	76.510	76.062	0.7
6	78.420	78.974	80.128	79.204	0.9

表 7 水介质中重复安装后燃料组件频率
Table 7 Frequency of fuel assembly installed again in water

测点编号	频率/Hz			平均频率/ Hz	平均相对 偏差/%	空气中平均 频率 ¹⁾ /Hz	重复相对 偏差/%
	激励力大	激励力中	激励力小				
1	2.790	2.672	2.724	2.729	1.5	2.599	5.0
2	3.010	3.007	3.221	3.079	3.1	2.936	4.9
3	20.255	19.678	20.927	20.287	2.1	20.620	1.6
4	21.210	21.340	22.775	21.775	3.1	21.707	0.3
5	75.146	77.204	76.157	76.169	0.9	76.116	0.1
6	77.994	80.465	79.298	79.252	1.1	79.228	0.0

注:1) (表 6 中的平均频率+本表中的平均频率)/2

3.4 结果分析

试验获得了组件在空气中安装和水中安装状态、不同激励力水平下的前 6 阶弯曲模态频率和振型。空气中燃料组件两个正交一弯模态的平均频率分别为 3.189、3.409 Hz;水中燃料组件两个正交一弯模态的平均频率分别为 2.599、2.936 Hz。燃料组件在空气中的频率总体上高于在水中的频率。在大、中、小激励力作用下,燃料组件的频率变化不大,空气中平均相对偏差最大为 4.9%;水中平均相对偏差最大为 3.1%。燃料组件重复安装后的测量频率的重复性较好,空气中安装的平均重复偏差为 14.1%,水中安装的平均重复相对偏差为 5.0%,水中安装状态的重复性比空气中安装好得多。比较 3 种激励力和安装状态对组件频率的影响表明,安装状态对组件模态频率的影响较大,超过了激励力大小非线性对结构模态的影响。

4 结论

通过试验,得到空气中燃料组件的频率为 3.313 Hz、水介质中燃料组件的频率为 2.768 Hz。

燃料组件在空气中的频率总体上高于在水中的频率。试验结果合理可靠。将该试验结果适当修正,可得到钠介质中燃料组件的频率,继而可为堆芯组件的抗震理论分析提供基础。

参考文献:

- [1] 孙刚. 组件动态特性实验装置[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2008.
- [2] 孙磊. 中国实验快堆控制棒驱动线抗震鉴定实验总报告[R]. 成都:中国核动力研究设计院,2007.
- [3] 莫亚飞. 容器尺寸对组件频率的影响[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2008.