

文章编号：0258-0926(2018)03-0184-04; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0184

某核电厂吊篮梁型振幅偏大问题分析与诊断

罗 婷，刘才学，胡建荣，杨泰波，简 捷，冯晋涛，艾 琼

中国核动力研究设计院，成都，610213

摘要：通过对方家山、宁德核电机组多个燃料循环周期的堆外中子噪声信号进行分析，得出了吊篮梁型振动频率和幅度的特性。将此特性应用到其他核电机组，发现某核电机组吊篮梁型振幅偏大。对该机组吊篮梁型振动频率和幅度的变化趋势、频率的漂移量、幅度的增长率进行分析与诊断，判断吊篮并没有发生明显的支撑劣化情况，并给出了该机组可继续运行的条件。

关键词：中子噪声；吊篮梁型振动；频率；振幅偏大；分析

中图分类号：TL48 **文献标志码：**A

Analysis and Diagnosis of Problem of Larger Amplitude with Core Barrel Beam Mode in a Nuclear Power Plant

Luo Ting, Liu Caixue, Hu Jianrong, Yang Taibo, Jian Jie, Feng Jintao, Ai Qiong

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Based on the analysis of the ex-core neutron noise signal in multiple fuel cycles in Fangjiashan and Ningde Nuclear Power Plants, the beam mode vibration frequency and amplitude characteristics of the core barrel is obtained. These characteristics are applied to other nuclear power plants, and the problem of larger amplitude with barrel beam mode in a nuclear power station is found. The trend of beam mode vibration frequency and amplitude, the drift of frequency, and the growth rate of amplitude are analyzed and diagnosed. No obvious support deterioration in the barrel is found, and the condition under which the plant can continue to operate is given.

Key words: Neutron noise, Core barrel beam mode vibration, Frequency, Larger amplitude, Analysis

0 引 言

核电厂反应堆由于流体的不断冲击会引起堆芯吊篮的振动，吊篮正常的振动是允许的。但是吊篮本身的老化、磨损以及堆芯结构完整性的退化都可能造成吊篮的异常振动。吊篮的异常振动也会加快反应堆故障的发生，故对吊篮振动情况进行监测与分析能够为实施早期故障诊断提供有效的依据。故障信息往往是夹杂在噪声信号之中，噪声分析技术是有效的分析方法^[1]。故可以通过

对堆外中子噪声信号进行分析来实现吊篮振动情况的监测^[2]。

目前，对核电厂堆芯吊篮梁型振动特性的研究发现了吊篮振动频率的变化趋势^[3]。本文在此基础上，对吊篮梁型振动频率和幅度进行了深入研究。运用中子噪声信号分析方法，对多个核电厂多个燃料循环周期内堆外中子噪声信号进行分析与总结，掌握了核电厂吊篮梁型振动频率和幅度特性，为吊篮早期故障的监测与诊断提供依据。

收稿日期：2018-01-30；修回日期：2018-03-09

作者简介：罗 婷（1986—），女，助理研究员，硕士研究生，现从事核反应堆故障监测与诊断技术研究与设备研发工作

1 中子噪声信号分析方法

1.1 堆芯吊篮振动频率识别

中子噪声信号 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ ，经 Fourier 变换后进行归一化处理，信号自功率谱密度 $S_1(f)$ 和 $S_2(f)$ 可表示为^[4]：

$$\begin{aligned} S_1(f) &= \frac{1}{N} |S_{1N}(f)|^2 \\ S_2(f) &= \frac{1}{N} |S_{2N}(f)|^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中， N 为采样点数； f 为振动频率，Hz； $S_{1N}(f)$ 、 $S_{2N}(f)$ 为频谱。

2 个信号的互功率谱密度 $S_{12}(f)$ 为^[5]：

$$S_{12}(f) = \frac{1}{N} S_{1N}(f) S_{2N}(f) = S_R(f) + jS_I(f) \quad (2)$$

式中， $S_R(f)$ 为互功率谱的实部； $S_I(f)$ 为互功率谱的虚部。

2 个信号的相位函数 $\varphi(f)$ 为：

$$\varphi(f) = \arctan[S_I(f)/S_R(f)] \quad (3)$$

2 个信号的相干函数 $C_{12}(f)$ 为：

$$C_{12}(f) = \frac{|S_{12}(f)|^2}{|S_1(f)| \cdot |S_2(f)|} \quad (4)$$

在吊篮梁型振动下，径向反向的 2 个信号相干理论值应接近 1，相位差理论值应接近 180° 。2 个信号互功率谱与各信号自功率谱具有同一特征频率的谱峰幅度会增大，表现为区域峰值。

1.2 堆芯吊篮振动幅度计算

中子噪声信号 $S_1(t)$ 的峰功率 P 为振动频带 $[f_1, f_2]$ 之间 $S_1(f)$ 的面积^[6]：

$$P(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} S_1(f) df \quad (5)$$

堆芯吊篮振动幅度 X 为：

$$X = \frac{[P(f_1, f_2)]^{1/2}}{h} \quad (6)$$

式中， h 为刻度因子， μm^{-1} ，一般通过运用中子运输理论建立的物理模型进行计算或者通过热态流致振动试验得到^[7]。

2 核电厂堆芯吊篮梁型振动特性研究

对宁德核电厂 1 号机组和方家山核电厂 1 号机组燃料循环周期的中子噪声信号进行分析，了解信号自功率谱密度、互功率谱密度和相干相位谱的特性，得到吊篮梁型 f 的变化趋势如图 1 所示。

文中核电厂的中子噪声信号源于堆外核测系统的 8 个中子探测器，NB₁~NB₄ 通道信号来自堆外中子探测器的第 2 段，径向间隔 90° 。NH₁~NH₄ 通道信号来自堆外中子探测器的第 5 段，径向间隔 90° 。

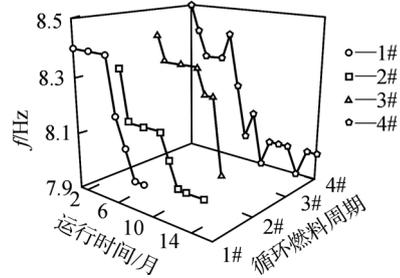


图 1 吊篮梁型 f 变化趋势图

Fig. 1 Variation Trend of Beam Mode Vibration Frequency of Barrel

1#—方家山核电厂第 1 个循环燃料周期；2#—方家山核电厂第 2 个循环燃料周期；3#—宁德核电厂第 1 个循环燃料周期；4#—宁德核电厂第 2 个循环燃料周期

由图 1 可以看出，宁德、方家山核电厂 1 号机组每一个燃料循环周期内，吊篮梁型 f 随着反应堆运行时间的增加呈现变小的趋势。方家山核电厂 1 号机组第 1 个和第 2 个燃料循环周期内 f 变化范围分别为 8.4~7.9 Hz 和 8.3~7.9 Hz；宁德核电厂 1 号机组第 1 个和第 2 个燃料循环周期内 f 变化范围为 8.4~7.9 Hz 和 8.5~7.9 Hz。

综上所述，这 2 个核电机组从燃料循环初期到末期，吊篮梁型 f 值在 8.5~7.9 Hz 范围内变化， f 漂移量在 0.4~0.6 Hz 范围内。

按照式 (6)，由 P 和 h 可以计算出吊篮梁型 X 。此处 h 取 $0.048 \mu\text{m}^{-1}$ ，计算得出宁德、方家山核电厂 1 号机组多个燃料循环周期的吊篮梁型 X 变化趋势如图 2、图 3 所示。其中 NB、NH 通道吊篮梁型 X 为各段 4 个通道 X 的平均值。

由图 2、图 3 可以看出，方家山、宁德核电厂 1 号机组每一个燃料循环内，吊篮梁型 X 随着反应堆运行时间的增加呈现变大的趋势。方家山核电厂 1 号机组第 1 个燃料循环周期内 NB 通道吊篮梁型振幅 X_{NB} 变化范围为 43.28~53.89 μm ，NH 通道吊篮梁型振幅 X_{NH} 变化范围为 27.89~31.35 μm 。第 2 个燃料循环周期内振幅 X_{NB} 变化范围为 32.35~74.44 μm ， X_{NH} 变化范围为 21.32~47.78 μm ；宁德核电厂 1 号机组第 1 个燃料循环周期内 X_{NB} 变化范围为 51.00~110.79 μm ， X_{NH}

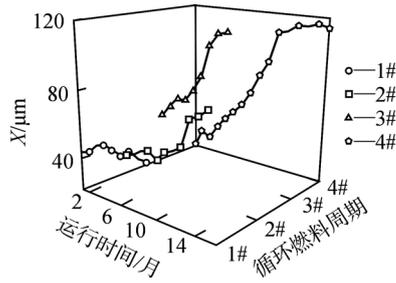


图2 NB通道吊篮梁型X变化趋势图

Fig. 2 Variation Trend of Beam Mode Amplitude of Barrel from NB

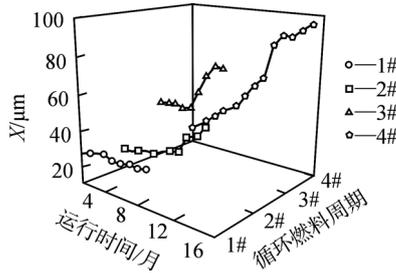


图3 NH通道吊篮梁型X变化趋势图

Fig. 3 Variation Trend of Beam Mode Amplitude of Barrel from NH

变化范围为 43.23~71.39 μm 。第 2 个燃料循环周期内 X_{NB} 变化范围为 21.60~115.97 μm , X_{NH} 变化范围为 19.42~95.49 μm 。

综上所述,这 2 个核电机组从燃料循环初期到末期,吊篮梁型振幅 X_{NB} 在 21.6~115.97 μm 范围内变化, X_{NH} 在 19.42~95.49 μm 范围内变化, X_{NB} 增长率在 24.51%~436.90% 范围内, X_{NH} 增长率在 12.41%~391.71% 范围内。

对比多个燃料循环周期初期和末期吊篮梁型 f 和 X 值可以得到, f 和 X 在新的燃料循环周期初期均能恢复到上一个燃料循环周期初期的状态。

3 某核电机组吊篮梁型振幅偏大问题分析与诊断

3.1 某核电机组吊篮梁型振动特性研究

对某核电机组第 1 个燃料循环周期的中子噪

声信号进行分析,得到该机组吊篮梁型 f 和 X 变化趋势如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可以看出,该核电机组吊篮梁型 f 和 X 变化趋势同方家山、宁德核电厂一致,吊篮梁型 f 同样呈现变小的趋势, X 呈现变大的趋势。吊篮梁型 f 值在 8.4~8.1 Hz 范围内变化, f 漂移量为 0.3 Hz。吊篮梁型 X_{NB} 在 74.36~170.42 μm 范围内变化, X_{NB} 增长率为 129.18%; X_{NH} 在 55.11~102.07 μm 范围内变化, X_{NH} 增长率为 85.21%。将该机组吊篮梁型 f 、 X 变化与方家山、宁德 1 号机组进行比较,如表 1 所示。

由表 1 可知,某机组吊篮梁型 X_{NB} 、 X_{NH} 的变化已超出了方家山、宁德核电厂的 X 变化范围,

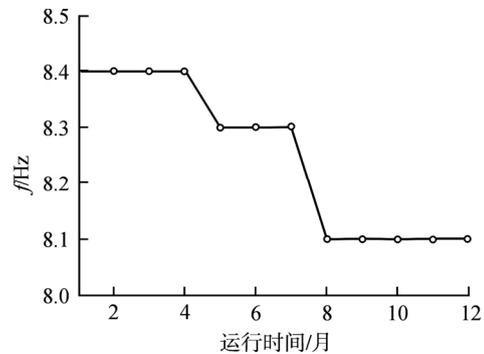


图4 吊篮梁型f变化趋势图

Fig. 4 Variation Trend of Beam Mode Vibration Frequency of Barrel

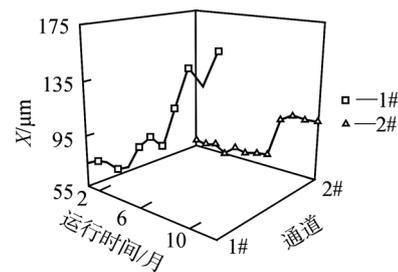


图5 NB、NH通道吊篮梁型X变化趋势图

Fig. 5 Variation Trend of Beam Mode Amplitude of Barrel from NB and NH
1#— X_{NB} ; 2#— X_{NH}

表 1 多个核电机组吊篮梁型 f 、 X 对比

Table 1 Comparison of Beam Mode Vibration Frequency and Amplitude of Barrel of Multiple Fuel Cycles

核电机组	燃料循环周期	f		X_{NB}		X_{NH}	
		变化范围/Hz	漂移量/Hz	变化范围/ μm	增长率/%	变化范围/ μm	增长率/%
方家山核电厂 1#	1	8.4~7.9	0.5	43.28~53.89	24.51	27.89~31.35	12.41
	2	8.3~7.9	0.4	32.35~74.44	130.11	21.32~47.78	124.11
宁德核电厂 1#	1	8.4~7.9	0.5	51.00~110.79	117.24	43.23~71.39	65.14
	2	8.5~7.9	0.6	21.60~115.97	436.90	19.42~95.49	391.71
某机组	1	8.4~8.1	0.3	74.36~170.42	129.18	55.11~102.07	85.21

并且该机组燃料循环初期吊篮梁型基准 X 较其他核机组大得多。随着反应堆运行时间的增加,吊篮梁型振幅会逐渐变大,以至于到燃料循环末期,吊篮梁型振幅远远大于其他核机组。

3.2 吊篮梁型振幅偏大问题分析与诊断

对某核机组反应堆吊篮梁型基准 X 偏大的原因进行分析,得出以下几点:吊篮与其支撑构件的安装可能与其他机组有差异,造成了吊篮梁型基准 X 偏大;堆外核测系统采集的中子噪声信号本底噪声偏大造成吊篮梁型 X 偏大;反应堆结构十分复杂,也可能有其他综合性原因造成吊篮梁型 X 偏大。故造成吊篮梁型基准 X 偏大的原因还需要进一步的研究与探讨。

图 6 所示为该机组 NB₁ 通道中子噪声信号时域波形图,从图中可以看出,中子噪声信号本地噪声并不大,故可排除中子噪声信号本底噪声偏大造成吊篮梁型 X 偏大。

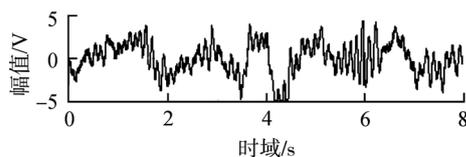


图 6 NB₁ 通道中子噪声信号时域波形图
Fig. 6 Time-Domain Waveform of Neutron Noise Signal from NB₁

该核机组该燃料循环周期吊篮梁型 f 和 X 变化趋势同其他核机组一致,频率漂移量不大, X_{NB} 和 X_{NH} 的增长率在其他核机组振幅增长率范围内,说明该核机组吊篮并没有发生明显的支撑劣化情况。

若该核机组新的燃料循环周期初期,吊篮梁型 f 和 X 都能够恢复到上一个燃料循环周期初期的状态,则认为该机组可以继续运行,但仍需继续对吊篮振动情况进行密切关注。

4 结 论

运用核电厂中子噪声信号分析方法,对方家

山、宁德核电厂 1 号机组多个燃料循环周期的堆外中子噪声信号进行分析,得到了吊篮梁型振动频率和幅度的特性:

(1) 吊篮梁型振动频率和幅度的变化趋势在每一个燃料循环周期内都是一致的,振动频率呈现变小的趋势,振动幅度呈现变大的趋势。

(2) 吊篮梁型振动频率和幅度在新的燃料循环周期初期均能恢复到上一个燃料循环周期初期的状态。

将此特性推广应用到其他核电厂,发现某核机组吊篮梁型振幅偏大。对振幅偏大问题进行分析与诊断,发现该机组吊篮并没有发生明显的支撑劣化情况。若吊篮梁型振动频率和幅度在新的燃料循环周期初期都能够恢复到上一个燃料循环周期初期的状态,则该机组可以继续运行。

参考文献:

- [1] 罗璋琳. 核动力堆噪声分析[M]. 北京:中国原子能出版社, 2013: 146-161.
- [2] 刘才学, 郑武元, 汪成元, 等. 基于中子噪声分析技术的核电站振动监测系统研制[J]. 核动力工程, 2009, 30(6): 91-94.
- [3] 刘才学, 魏东, 房成春, 等. 中子噪声在核反应堆吊篮振动监测中的应用研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(1): 30-33.
- [4] 杨泰波, 刘才学, 罗婷, 等. 基于中子噪声分析的某核电厂堆芯吊篮梁型振动特征研究[J]. 核科学与工程, 2017, 37(1): 42-47.
- [5] 盛焕行. 核电厂压水堆堆内构件的振动监测: EJ/T 1188-2005[S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 2005: 22-23.
- [6] Fallah V F, Vosoughi Naser. Calculation of VVER-1000 reactor scaling factor for inference of core barrel motion[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63(1): 205-208.
- [7] Christian R, Song S H, Kang H G. Study of core support barrel vibration monitoring using ex-core neutron noise analysis and fuzzy logic algorithm[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(2): 165-175.

(责任编辑:杨灵芳)