

文章编号: 0258-0926(2018)03-0181-03; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0181

基于功率密度谱的压水堆核电厂 中子噪声特性研究

杨泰波, 刘才学, 罗 婷, 胡建荣, 简 捷

中国核动力研究设计院, 成都, 610041

摘要: 分析了压水堆核电厂中子噪声功率密度谱的计算方法, 利用该方法以核电厂堆内构件振动监测系统长期的监测数据为基础, 计算了中子噪声的功率密度谱, 分别分析了百万千瓦级核电厂、不同功率核电厂和不同燃料周期核电厂中子噪声功率密度谱特性。结果表明, 通过分析压水堆核电厂的中子噪声功率密度谱特性, 能有效的认识压水堆核电厂堆内构件的振动行为, 为压水堆核电厂堆内构件状态分析提供了基础。

关键词: 中子噪声; 功率密度谱; 堆内构件

中图分类号: TL327 文献标志码: A

Study on Neutron Noise Characteristics of PWR Nuclear Power Plants Based on Power Density Spectrum

Yang Taibo, Liu Caixue, Luo Ting, Hu Jianrong, Jian Jie

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: The calculation method of neutron noise power density spectrum for PWR nuclear power plants is analyzed. By using this method, the power density spectrum of noise neutron is calculated on the basis of long-term internal vibration monitoring system in nuclear power plants. Therefore, the power density spectrum characteristics of noise neutron for PWR nuclear power plants of million kilowatt is analyzed with different power and different fuel cycles. The results show that it can recognize the internal vibration behavior of PWR nuclear power plants through the analysis of power density spectrum characteristics, which can provide a basis for internal state analysis of PWR nuclear plants.

Key words: Neutron noise, Power density spectrum, Internals

0 引 言

核电厂一回路冷却剂的流动和主泵的运转会激励核反应堆堆内构件发生复杂的振动, 如吊篮、燃料组件、控制棒、热屏蔽及连接件振动。堆内构件的振动在一定程度上是允许的, 但异常振动则可能导致故障甚至事故的发生。因此, 堆内构件振动与安全密切相关。

堆内构件的异常振动会严重危害堆芯, 引起核电发达国家的高度重视, 为了预防这种危害, 堆内构件振动监测技术研究迅速展开, 而在反应

堆运行状态下, 对堆内构件实施长期监测的直接测量手段是难以实施或困难的。当在反应堆外部实施堆内构件的振动监测时, 堆内构件振动的传输一般是以下途径, 即堆内构件振动所引起的堆内构件和压力容器间水层厚度的改变, 造成中子注量率的波动, 依靠这种机理, 将振动传输给堆外中子电离室, 获得表征堆内构件振动的中子噪声信号。因此, 中子噪声信号的特性可间接表征堆内构件的振动行为。如 1964 年美国 Big Rock Point 核电厂热屏蔽异常振动就是在额定运行条

件下中子注量率波动幅度达到 9% 时发现的。1985 年德国 Greifswald 核电厂由于固定吊篮的弹性管式部件失去刚性, 中子注量率波动的均方根增加了一个数量级^[1-2]。

1 中子噪声功率密度谱计算方法

压水堆核电厂反应堆堆内构件的振动会引起结构和中子探测器之间的水层厚度变化, 水层厚度变化会造成阻尼变化, 使到达堆外探测器的中子注量率随着这些结构的振动频率变得更大或更小, 因此通过对中子噪声的分析可以间接的分析堆内构件的振动状态。文中基于中子噪声功率密度谱研究中子噪声特性, 从而间接分析堆内构件的振动^[3-4]。核电厂堆内构件一般采用定期振动监测模式, 用于分析堆内构件振动的中子噪声信号(包括 4 个呈 90° 角布置的中子电离室信号, 在每个方向取上、下 2 段电离室信号)^[5]。堆外电离室将探测的堆内中子注量率的变化转化为电信号。

2 中子噪声功率密度谱特性分析

基于核电厂堆内构件振动监测系统长期获得中子噪声数据, 计算中子噪声的功率密度谱, 研究中子噪声特性, 从而分析核电厂堆内构件的振动行为。

2.1 百万千瓦级核电厂中子噪声特性分析

压水堆核电厂中子噪声所有频率上的功率谱幅度增大均与燃料燃烧过程(分裂产物积聚)和 1 个换料周期内硼酸浓度的变化有关。因此在对堆内构件进行分析时, 需要清楚的了解反应堆的运行状态, 包括燃料循环天数、换料周期、堆功率、回路压力、回路温度、硼浓度等。在进行中子噪声的计算和分析时, 反应堆应处于满功率状态, 控制棒没有动作, 没有进行调硼的操作。某百万千瓦级核电厂 1 个燃料周期内的中子噪声变化特性见图 1。

由图 1 可知, 1 个燃料周期内, 随着堆芯燃料的增加, 核电厂正常运行状态下中子噪声功率谱幅度增大。在中子噪声功率谱上出现 6 个共振点, 每个都是由各种堆内构件和压力容器的振动引起的。5 个共振频段分别为: b 频段为燃料组件 1 阶振动; c 频段为燃料组件 2 阶振动; d 频段为堆芯吊篮 1 阶梁型振动; g 频段为堆芯吊篮的 2 阶壳型振动; h 频段为主泵回转

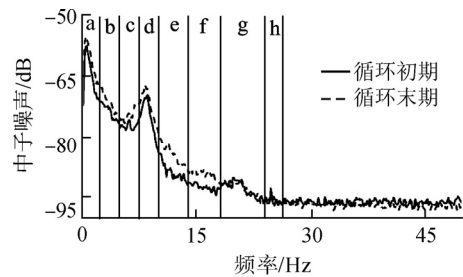


图 1 燃料周期内堆外中子噪声变化特性

Fig. 1 Characteristics of Ex-Core Neutron Noise in Fuel Cycle

频段。

核电厂正常运行状态下, 随着燃料的增加, 燃料组件谐振频率减小, 主要是由于燃料组件刚度属性变化引起的; 堆芯吊篮振动模式的变化, 与吊篮压紧弹簧松弛程度有密切关系, 并且随着燃料周期的增加, 吊篮与压力容器键内接触表面的磨损开始显现; 在核电厂寿命期内正常运行状态下, 主泵回转的频率不变。

2.2 不同功率核电厂中子噪声特性分析

某百万千瓦核电机组和某 60 万千瓦核电厂机组在相同燃料周期内堆外中子噪声功率密度谱特性曲线(3 个月数据)见图 2。由图 2 可知, 百万千瓦核电机组和 60 万千瓦核电厂机组中子噪声功率密度谱曲线的共振点相似, 频率为 0~11 Hz, 即燃料组件 1 阶振动、燃料组件 2 阶振动、堆芯吊篮 1 阶梁型振动频段内, 百万千瓦机组的核电厂中子噪声功率密度谱幅度比 60 万千瓦机组大, 除了百万千瓦机组堆芯吊篮 1 阶梁型振动的频率比 60 万千瓦核电厂机组大以外, 其余堆内构件振动模式的频率相似; 频率大于 11 Hz 后, 60 万千瓦机组的中子噪声功率密度谱幅度大, 曲线上的主要频率特征为主泵的回转频段, 百万千瓦核电机组和 60 万千瓦核电厂机组一致, 原因是 2

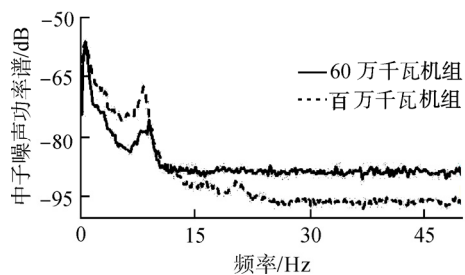


图 2 不同堆型的堆外中子噪声特性

Fig. 2 Characteristics of Neutron Noise for Different Reactor Type Fuel Cycle

个类型机组的主泵转速一样。

2.3 不同燃料周期核电站中子噪声特性分析

百万千瓦的核电机组在不同燃料周期内堆外中子噪声功率密度谱特性曲线见图 3。由图 3 可知，除堆芯吊篮 1 阶振动频段处第 3 个燃料周期机组的中子噪声功率谱幅度比新机组大外，其余频段的中子噪声功率谱幅度相差不大。由此说明在第 3 个燃料周期内，核电机组的吊篮 1 阶振动模态频率略微变小，而中子噪声功率密度谱幅度明显变大，可推断随着燃料循环的增多，吊篮的压紧结构可能出现了轻微的松弛，压力容器和其余堆内构件的振动模态变化不大，保持了良好的结构特性。

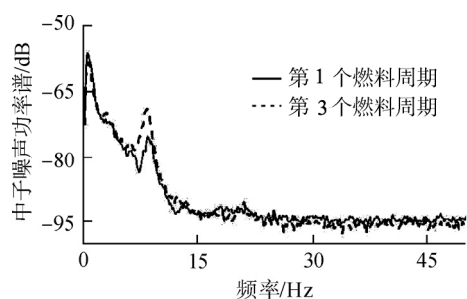


图 3 相同堆型不同燃料周期堆外中子噪声特性
Fig. 3 Characteristics of Neutron Noise for Same Reactor Type in Different

3 结论

(1) 针对单个核电机组而言，1 个燃料周期内，随着堆芯燃耗的增加，核电厂正常运行状态下中子噪声功率密度谱幅度增大。分析表明，在中子噪声功率密度谱上出现 5 个共振点，每 1 个都是由各种堆内构件的振动引起的，可间接的分析堆内构件振动状态。

(2) 相同堆型不同功率的核电站中子噪声功率密度谱曲线共振点相似，低功率的核电机组，

燃料组件 1 阶振动、燃料组件 2 阶振动、堆芯吊篮 1 阶梁型振动频段内的中子噪声功率密度谱幅度比高功率大，而高频处，低功率核电机组的中子噪声功率密度谱幅度大。

(3) 不同燃料周期的核电机组中子噪声功率密度谱曲线共振点相似，随着燃料周期的增多，核电机组的吊篮 1 阶振动模态频率略微变小，而中子噪声功率密度谱幅度明显变大。

(4) 通过分析压水堆核电站的中子噪声功率密度谱特性，能有效的认识压水堆核电站堆内构件的振动行为，为压水堆核电站堆内构件状态分析提供了参考。

参考文献：

- [1] Turkcan E. On-Line monitoring of A pwr for plant surveillance by noise analysis[J]. Progress in Nuclear Energy,1985, 15: 365-378.
- [2] Presuell G M. Duke power's investigation of changing neutron noise signatures at McGuire nuclear unit 1 during recent cycles of operation [C]. A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI. Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 - Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. 1991.
- [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站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] 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, 32(3): 91-94.
- [6] IEC 61502. Nuclear power plants-pressurized water reactors-vibration monitoring of internal structures[S]. International Electrotechnical Commission, 1999.

(责任编辑：王中强)