

快堆蒸汽发生器声学泄漏探测技术的研究

II. 利用经典滤波技术提取泄漏信号

潘晓云 杨献勇 王 洲

(清华大学热能工程系, 北京, 100084)

根据在实验 Na 回路上得到的实验结果, 在对泄漏信号和背景噪声特性研究的基础上, 提出了用经典滤波技术处理数据的方法, 并验证了这种方法对提高测量系统灵敏度的作用。最后, 讨论了所构建的声学泄漏探测系统在我国即将建造的实验快堆电站上的实用化问题。

关键词 快堆 声学探测 水泄漏 滤波技术

中图法分类号 TL 375.2 TL 364.1

提高探测系统的灵敏度是快堆电站泄漏探测技术研究的一个重要方向。在快堆电站中, 反映泄漏的信号往往淹没在极强的背景噪声中, 致使探测系统的灵敏度偏低。为此, 必须研究有效的信号提取技术, 将泄漏信号提取出来。

目前, 各国采用的泄漏信号处理方法不尽相同。美国的 GE-ARSD 声学探测系统, 在蒸汽发生器的外壁上按螺旋线形安装了 170 个加速度传感器, 将整个蒸汽发生器分成若干层, 顺序扫描各传感器, 通过检测空间声压场能量分布变化来诊断泄漏的发生^[1]。法国 A SB 回路 8 通道实验泄漏探测系统主要由高通滤波器(截至频率为 10 kHz)、放大器、乘法器、平均器和阈值单元组成。通过比较测得信号的均方值和预设的阈值来判断泄漏是否发生^[2]。前苏联在 BN-600 蒸汽发生器上使用了 4 种带通滤波器, 通带范围分别为 1—8、8—20、20—40 和 40—200 kHz。通过注入氩气和氢气的实验观测到, 4 个频段的信号都能快速响应, 且随频段的升高, 信号的变化减小^[3]。

本工作利用现有的实验 Na 回路声学泄漏探测系统, 实验研究利用经典滤波技术提取泄漏信号, 提高声学探测系统灵敏度的可行性, 并探讨声学探测方法的实用化问题。

1 信号的特性

1.1 泄漏信号

实验中用注水的方法模拟电站蒸汽发生器的泄漏事故。高压 H₂O 与高温 Na 反应生成的氢气泡不断长大、膨胀, 推挤液 Na, 使蒸汽发生器内的压力发生变化, 产生具有频带很宽的振

潘晓云: 女, 26 岁, 工程热物理专业, 硕士

收稿日期: 1997-06-13 收到修改稿日期: 1997-09-01

荡。实验证明: 注水信号的 RMS 值与注水率的 $1/3$ - $2/3$ 次幂成正比; 氢气泡的形成所产生的噪声是泄漏信号的主要因素^[4]。泄漏信号的频率范围很宽, 一直延伸到 35 kHz 左右。实验观测到它具有 15—25 kHz 的特征频段^[4]。

Na 温对泄漏信号的时域和频域特性均有很大影响。随 Na 温升高, 泄漏噪声能量明显增大, 高频段能量增加尤为显著。这一现象可由 Na-H₂O 反应产生噪声的机理予以解释^[5]。

1.2 背景噪声

背景噪声主要由 Na 流噪声和 水流噪声构成^[5]。

Na 流噪声, 即 Na 在管路中的流动噪声, 主要有 2 种: 湍流旋涡对加速度传感器所在处的蒸汽发生器器壁的撞击产生的近域噪声; 从蒸汽发生器内部各种物体反射来的远域噪声。实验表明: 这种噪声的频率分布范围较宽, 在 30 kHz 以上方可忽略不计, 在低频段 (0—5 kHz), 能量较大。Na 流噪声受钠回路运行条件的影响很大。在一定 Na 流速下, 随 Na 温升高, Na 流噪声的能量下降; 在一定 Na 温下, 随 Na 流速增大, Na 流噪声的能量增加。

水流噪声主要包括 H₂O 和水蒸气的流动噪声和 H₂O 的沸腾蒸发噪声。实验中观测到: Na 温较低时 (250 °C), 水流噪声的能量很小, 增大水流速对信号的能量几乎没有影响。在 Na 温升高到 350 °C 后, 水流噪声的能量明显加大, 且随水的流速增加, 水流噪声迅速加大, 水流量达到一定数值后, 噪声增加幅度又明显变小。据此可以认为: 在水流噪声中, 沸腾蒸发噪声比 H₂O 和水蒸气的流动噪声起着更为主要的作用。在水流噪声的频谱图上可以看出: 噪声能量主要集中在低频段 (0—8 kHz), 高频段能量很小。

2 用经典滤波方法提取泄漏噪声

Na 流噪声的频率范围虽然较宽, 但能量主要集中在低频段 (0—10 kHz), 且随温度升高而减小, 在中高频段上减小得更为显著。H₂O/水蒸汽噪声的频率范围较窄, 主要集中在 0—8 kHz 范围内。Na-H₂O 反应噪声具有 15—25 kHz 的特征频段, 因此, 通过带通滤波器处理信号, 应能有效地提取泄漏信号, 提高探测系统的灵敏度。实验中设计了 1 个通带范围为 15—25 kHz 的八阶巴特沃思滤波器, 对测量信号进行处理。

2.1 用带通滤波器提取泄漏噪声

利用设计的带通滤波器, 对 Na 温为 350 °C、注水率为 200 mL/h 的注水信号进行处理。图 1 为滤波前后注水信号的 RMS 曲线图。从图中可看出, 滤波后背景噪声和注水信号的能量都有所下降, 但两者减小的幅度不同。在实际测量中, 最有意义的是信噪比, 所以, 滤波前后均以各自的背景噪声的均值对信号进行归一化处理。图 2 示出处理后的结果。从图 2 可以看出, 滤波后注水信号相对于背景噪声的增值幅度比滤波前大约增大 1 倍, 即在相同注水率下注水信号的 RMS 值比滤波前增大了 1 倍左右。由此可见, 经过带通滤波后, 探测系统的信噪比约增大了 1 倍。根据信噪比与泄漏率的关系可知, 探测系统对水泄漏率的灵敏度将提高到原来的 8 倍左右, 即在 350 °C 时, 在实验 Na 回路上, 探测系统的灵敏度由 0.235 mg/s 提高为 0.030 mg/s。

选用其它通带的带通滤波和高通滤波的实验结果表明, 处理后的信噪比的提高幅度均不如 15—25 kHz 的带通滤波, 这从实验上验证了在信号分析中得出的泄漏信号具有 15—25 kHz 的特征频段的结论。

2.3 Na 温对信号处理结果的影响

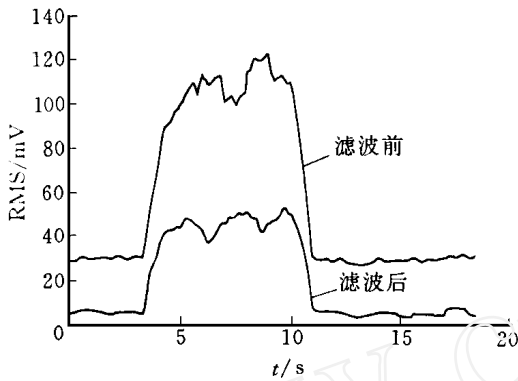


图 1 滤波前后的注水信号比较图

Fig. 1 RMS value of water injection signals pre- and post-filtration

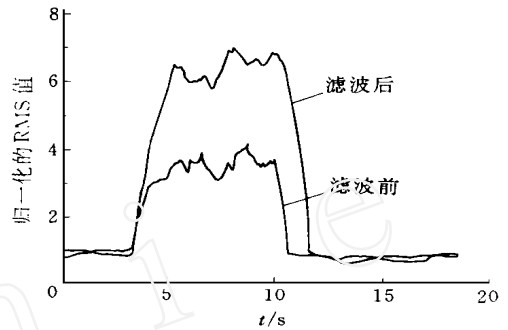


图 2 经归一化处理后

滤波前和滤波后的注水信号 RMS 值

Fig. 2 Normalized RMS value of water injection signals pre- and post-filtration

Na 温对 Na 流和 H₂O 噪声以及注水信号的时域及频域特性均有明显影响。在低 Na 温下, 水流噪声能量较小, Na 流噪声能量较大, 且和注水信号在频域上不易区分, 采用经典的滤波技术不会得到明显的处理效果。在超过 350 的高 Na 温下, 水流噪声能量加大, 并主要集中在低频段上; Na 流噪声能量减小, 对中高频段的影响很小。与 Na 流噪声相反, 注水信号随 Na 温升高, 能量明显增加, 在中高频段增加得更为显著。因此, 利用泄漏信号的特征频段 15—25 kHz 进行带通滤波可以有效地改善探测系统的灵敏度。图 3(a) 示出 Na 温为 250 、注水率为 200 mL/h 时的测量信号在滤波前后的归一化 RMS 值曲线图。从图中可以看出, 滤波后信噪比没有任何提高, 图 3(b) 是在 Na 温为 450 、注水率为 100 mL/h 时的测量信号滤波前后的归一化 RMS 值, 可以看出, 信噪比大约提高了 1 倍。

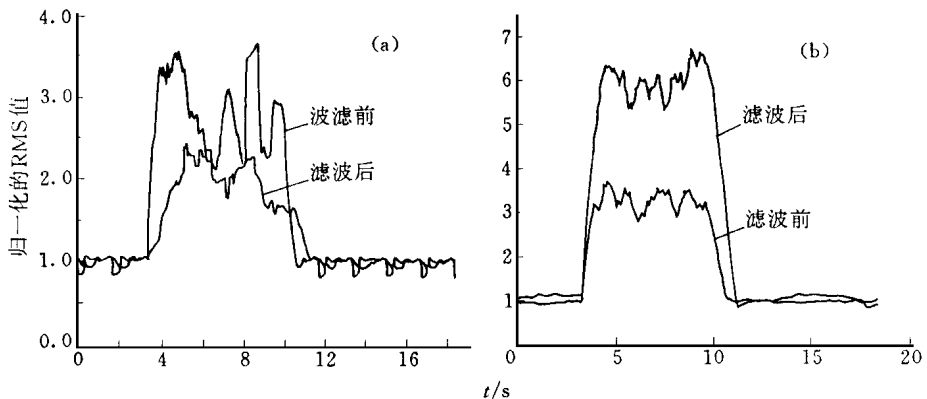


图 3 250、450 下注水信号滤波前后的归一化 RMS 值

Normalized RMS values of water injection signals pre- and post-filtration at 250(a) and 450 (b)

(a) ——注水率 200 mL/h; (b) ——注水率 100 mL/h

由以上分析可以看出: Na 温对泄漏噪声、Na 流噪声和 水流噪声均有影响。设计信号处理器的特性时, 必须考虑 Na 温的影响。本文设计的信号处理器在低温时灵敏度将降低, 这就意

味着声学泄漏探测系统在快堆正常运行时比在启动阶段具有更好的探测性能。

3 声学泄漏探测技术的实用化

由于在快堆电站上不允许注水实验, 如何把在 1 个特定的实验系统上得到的探测性能推广到快堆电站上一直是人们普遍关注的重要问题。

3.1 强背景噪声下探测系统的灵敏度

快堆电站的蒸汽发生器尺寸, N_a 、 H_2O 和水蒸汽的流量都比小规模实验系统大得多, 内部管路结构也十分复杂, 与实验系统相比, 背景噪声要强得多, 泄漏信号受到的衰减也大得多, 但水泄漏信号和各种背景噪声的基本特征, 诸如频率分布及 N_a 温等因素对频率分布的影响等则不应改变, 本文研究的信号处理方法亦应有效。为了考察在电站蒸汽发生器上进行滤波处理的效果, 利用人为加大背景噪声, 减小泄漏信号的方法进行模拟, 并讨论在这种条件下采用经典滤波处理方法的可行性。

目前, 尚没有统一认可的方法用于依据实验 N_a 回路的背景噪声和泄漏信号估计电站蒸汽发生器中的背景噪声和泄漏信号。由于背景噪声主要来自 N_a 、 H_2O 的流动噪声和蒸汽形成及流动的噪声, 因此, 可以通过这 2 种噪声来估计背景噪声的大小^[6]。文献[6]采用“系统结构参数法”, 利用 1 个在已知蒸汽发生器上得到的结果, 通过以下 2 个公式大致估算实际电站蒸汽发生器的背景噪声和泄漏信号:

$$A_N = \left\{ A_{N_{ax}}^2 \left(\frac{V_h}{V_{hx}} \right) + A_{H_2Ox}^2 \left(\frac{S_h}{S_{hx}} \right) \right\}^{0.5} \cdot \left(\frac{S_{ix}}{S_i} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$A_s = A_{sx} \left(\frac{S_{ix}}{S_i} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式中: A_N 为电站蒸汽发生器的背景噪声 RMS 值; $A_{N_{ax}}$ 为已知蒸汽发生器的 N_a 流动噪声 RMS 值; A_{H_2Ox} 为已知蒸汽发生器的蒸汽形成和流动噪声 RMS 值; V_h 、 V_{hx} 分别为电站蒸汽发生器和已知蒸汽发生器的换热区域体积; S_h 、 S_{hx} 分别为电站蒸汽发生器和已知蒸汽发生器的换热区域表面积; S_i 、 S_{ix} 分别为电站蒸汽发生器和已知蒸汽发生器的内表面积; A_s 、 A_{sx} 分别为电站蒸汽发生器和已知蒸汽发生器的泄漏信号 RMS 值。

上式主要基于以下假设: N_a 流噪声和水蒸汽形成及流动的噪声分别取决于换热区域的体积和表面积, 装置对声波的吸收取决于其内表面积。

根据实验 N_a 回路上和我国即将建造的实验快堆电站上的蒸汽发生器的结构参数, 估计了实验快堆电站的背景噪声和泄漏信号与实验 N_a 回路信号之间的关系。在相同 N_a 温和泄漏率的情况下, 实验快堆电站蒸汽发生器上的背景噪声是实验 N_a 回路的 5 倍左右, 泄漏信号约为实验 N_a 回路的 $1/7$ ^[5]。由此得到声学泄漏探测系统在我国实验快堆电站蒸汽发生器上的灵敏度约为 10 g/s ^[5]。

利用在实验 N_a 回路上采集到的最大背景噪声, 将其时域幅值增大(乘以 1 个系数 5), 模拟快堆电站蒸汽发生器上的背景噪声。以 10 g/s 的注水率在实验 N_a 回路上注水得到的注水信号应是注水率为 200 mL/h 时的注水信号的 6 倍, 由此可以利用实验中采集到的注水率为 200 mL/h 的信号构造泄漏率为 10 g/s 时在快堆电站蒸汽发生器上可能采集到的泄漏信号。图 4 示出将实验中采集的 N_a 温为 350 、注水率为 200 mL/h 的注水信号按照上述方法处理后滤波前后信号的 RMS 值, 亦即在我国实验快堆上泄漏率为 10 g/s 时, 声学泄漏探测系统输

出的估计值。从图中可以看出,滤波后信噪比提高约 1 倍,相应的灵敏度可提高到 1.1 g/s ,完全能够满足蒸汽发生器中小泄漏快速探测的要求。

对于声学泄漏探测系统的灵敏度,目前尚没有统一的定义。本文以上的讨论,将灵敏度(探测系统所能探测到的最小水泄漏率)定义为泄漏信号的 RMS 值等于背景噪声的 RMS 值一半时对应的泄漏率。由于背景噪声有一定的随机起伏,如此定义对确保正确无误地判断泄漏是否发生可能具有实际意义。

3.2 信号处理的速度

噪声泄漏探测技术的主要优点是具有极短的响应时间,这要求所采用的信号处理技术的耗时与传感器的响应时间相匹配。

本文提出的信号处理方法是软件实现的。信号处理系统的框图示于图 5。带通滤波器采用模拟滤波器,RMS 值用软件计算。在实际应用中,可以考虑部分功能用硬件实现。由于滤波器的滞后很小,且 RMS 值的计算非常简单,故整个测量系统具有快速的响应,总滞后在 1 s 以内,可以满足电站蒸汽发生器中小泄漏快速探测的要求。

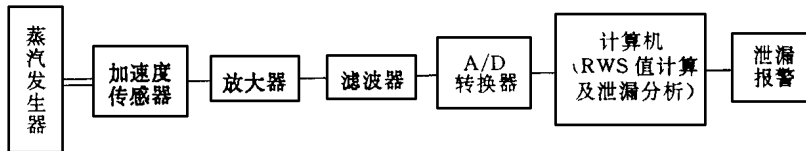


图 5 声学泄漏探测系统的结构框图

Fig 5 Block diagram of acoustic leak detection system

4 结论

1) 根据泄漏信号的特征频段,设计带通滤波器($15\text{--}25 \text{ kHz}$)处理实验数据,能够有效地提高信噪比,改善灵敏度。 Na 温为 350 时,信噪比提高 1 倍,灵敏度提高 8 倍。经过信号处理后,实验钠回路上的灵敏度达到 0.030 mg/s 。

2) 由于 Na 温度对泄漏信号、 Na 流和水流噪声的不同影响,不同温度下信号处理的效果也不同。本文设计的信号处理方法在快堆正常运行时比在起始阶段具有更好的处理效果。

3) 对我国即将建造的实验快堆电站的蒸汽发生器上的信号水平初步估算表明:背景噪声约为实验 Na 回路的 5 倍,泄漏信号约为实验回路的 $1/7$ 。声学泄漏探测系统在实验电站上的

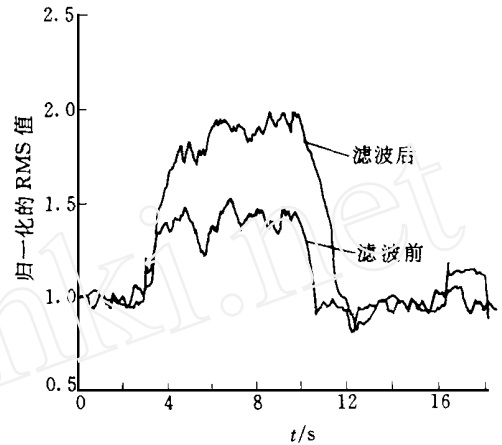


图 4 强背景噪声下注水信号滤波前后的归一化 RMS 值

Fig 4 Normalized RMS values of water injection signals pre- and post-filtration under intensive background noise

灵敏度约为 10 g/s, 经过带通滤波处理后, 可提高到 1.1 g/s

4) 本文提出的信号测量和处理方法的响应时间在 1 s 以内, 可以满足蒸汽发生器中小泄漏快速探测的要求。

参 考 文 献

- 1 Gaubatz DC, Fletcher F, Claytor T. On-line Low and High Frequency Acoustic Leak Detection and Location for Automated Steam Generator Protection System. Proceedings of the Specialists' Meeting on Acoustic/Ultrasonic Detection of in Sodium Water Leaks on Steam Generator Aix-En-Provence, France 1990
- 2 Arnautis N, Forster K, Mollerfeld H, et al Background and Simulated Leak Noise Measurements on A SB-loop, KNK II and SNR 300-steam Generators Proceedings of the Specialists' Meeting on Acoustic/Ultrasonic Detection of Sodium Water Leaks on Steam Generator Aix-En-Provence, France 1990
- 3 Petrenko A. Research and Experimental Studies on Acoustic Methods of Leak Detection in Fast Reactor Steam Generator Proceedings of the Specialists' Meeting on Acoustic/Ultrasonic Detection of in Sodium Water Leaks on Steam Generator Aix-En-Provence, France 1990
- 4 潘晓云. 利用噪声分析技术诊断钠水反应的实验研究[硕士论文]. 北京: 清华大学, 1997.
- 5 潘晓云, 杨献勇, 罗 锐, 等. 快堆蒸汽发生器声学泄漏探测技术的研究 I. 信号特性. 原子能科学技术, 1998, 32(1): 1.
- 6 Tanabe H, Kuroha M. Development of Acoustic Leak Detection System in PNC. Proceedings of the Specialists' Meeting on Acoustic/Ultrasonic Detection of in Sodium Water Leaks on Steam Generator Aix-En-Provence, France 1990

INVESTIGATION ON ACOUSTIC LEAK DETECTION METHODS IN LM FBR STEAM GENERATORS II. PICK OF LEAK SIGNALS USING CLASSICAL FILTERING TECHNOLOGY

Pan Xiaoyun Yang Xianyong Wang Zhou

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

ABSTRACT

On the base of analyzing leak and various background noises, according to the experimental results from sodium test loop, a method of processing data by using classical filtering technology is put forward and its efficacy of improving the sensibility of measurement system is proved in the paper. Finally, it is discussed that how to implement the acoustic leak detection system to LM FBR power plant which will be built in our country.

Key words LM FBR Acoustic detection Water leaks Filtering technology