

快堆蒸汽发生器声学泄漏探测技术的研究

I. 系统信号特性

潘晓云 杨献勇 罗锐 王洲

(清华大学热能工程系, 北京, 100084)

根据在实验 Na 回路上的实验结果, 分析了快堆电站蒸汽发生器中 Na 噪声、H₂O 噪声、泵和风机噪声等泄漏信号和背景噪声的时域、频域特性, 对泄漏噪声的提取方法提出了设想, 为提高泄漏探测系统的灵敏度提供了实验依据。

关键词 声学探测 快堆 Na-H₂O 反应 H₂O 泄漏

中图法分类号 TL 375.2 TL 364.1

在快堆电站蒸汽发生器中, 对 H₂O/水蒸气泄漏引起的钠水反应的诊断, 目前普遍采用扩散式氢计, 它具有极高的灵敏度, 能探测出小至 50 mg/s 的微小泄漏。这种探测器的响应时间很长, 一般约为 100 s, 不适于探测快速发展的小泄漏, 法国、日本、美国以及西欧一些国家都在研究灵敏度高、响应快的泄漏探测技术。研究最多、发展较为成熟的是声学泄漏探测技术, 它利用 H₂O/水蒸气泄漏时产生的噪声(它来源于泄漏、Na-H₂O 反应以及反应生成物氢气泡的运动)来探测泄漏, 响应时间在 1 s 以内, 设备相对简单, 且有望实现在线泄漏定位, 是 1 种很有前途的泄漏探测技术。

噪声探测的灵敏度一般劣于 1 g/s。在快堆电站中, Na-H₂O/水蒸气的流动、H₂O 的沸腾蒸发以及系统中泵、风机产生的机械振动等构成了极强的背景噪声, 反映泄漏的有用信号往往被淹没在背景噪声之中。研究有效的信号提取技术是噪声探测技术发展的 1 个主要课题。迄今为止, 由于对泄漏信号和各种背景噪声的特性缺乏准确的了解, 在快堆电站上又不允许进行注水试验, 因此难以得到分离的各种背景噪声以进行深入的实验研究。

清华大学曾开展了扩散式氢计的研究工作, 并为此建立了实验 Na 系统, 此后又对实验系统进行了扩充和完善, 具备了研究噪声探测技术的良好实验基础。本文结合各种噪声的机理分析, 通过实验, 研究注水信号的特性和各种因素对注水信号的影响, 并利用实验系统具有单独产生背景噪声的功能, 研究背景噪声的时域和频域特性。在此基础上, 对如何利用信号处理技术提取泄漏信号、提高噪声探测系统的灵敏度提出设想。

1 实验装置和探测系统

潘晓云: 女, 25 岁, 工程热物理专业, 硕士

收稿日期: 1997-02-28 收到修改稿日期: 1997-04-04

实验系统示于图 1, 它由 Na 回路、H₂O 回路、注水系统和噪声探测系统组成。

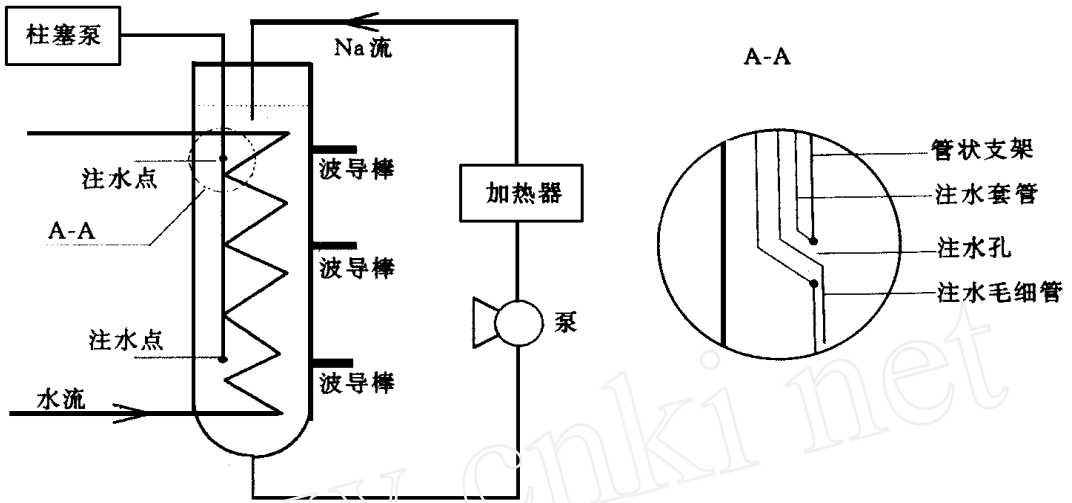


图 1 实验系统示意图

Fig 1 Schematic diagram of experimental facilities

1.1 Na 回路

回路中的液态 Na 由电磁泵驱动, 经加热器和反应器完成循环。其中, 反应器为蒸汽发生器模型, H₂O 在此被加热, 由注水产生的 Na-H₂O 反应也在此进行。Na 回路的主要参数为: Na 容量 0.14 m³; 最大 Na 流量 6.4 m³/h; 最高 Na 温 550 °C; 反应器直径 98 mm, 高 3.4 m。

1.2 H₂O 回路

H₂O 回路为单管循环系统, 回路水由柱塞泵驱动, 在反应器内经历沸腾、蒸发和过热的全过程, 用于模拟电站中水系统产生的背景噪声。回路中最大水流量为 80 kg/h。为确保实验系统的安全, 在反应器钠出口处装有爆破片紧急排钠装置。

1.3 注水装置

系统用注水方法模拟 H₂O 泄漏。柱塞泵通过直径为 3 mm 的毛细管向钠中注水, 注水率可在 0—275 mg/s 的范围内调节。利用管状支架的轴向和径向移动, 可改变注水位置。

1.4 噪声探测系统

噪声探测系统框图示于图 2。

测量噪声声压的加速度传感器难以承受高温, 不能直接安装在蒸汽发生器外壁(壁温 > 500 °C)上, 需用波导棒隔离。波导棒的设计主要考虑棒的轴向导热性能和棒的谐振频率对声波信号传输的影响。本实验系统采用的波导棒用不锈钢制成, 长 300 mm, 直径 28 mm, 它使连接加速度传感器一端的温度降至 100 °C 以下。

H₂O 泄漏信号具有很宽的频带, 加速度传感器的选择应主要考虑其频率特性和耐温性能。本实验中选用美国 ENDEVCO 公司生产的 7240A 型传感器, 灵敏度 1.625 pC/g, 频率响应 1—40 kHz, 耐温 260 °C。

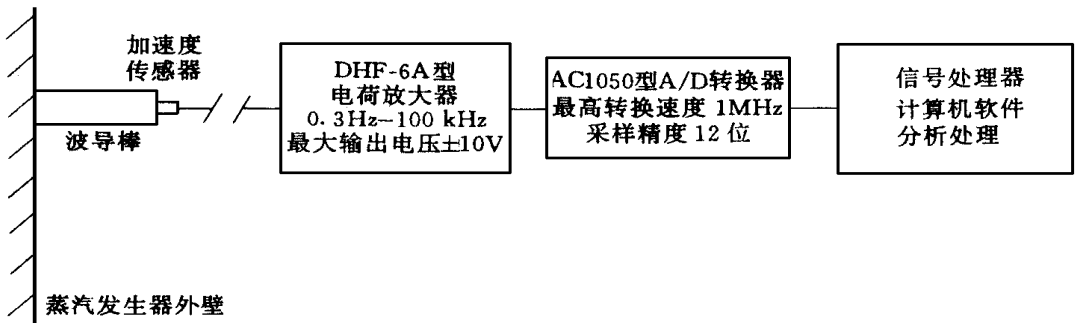


图 2 声学探测系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of acoustic leak detection system

2 实验结果和分析

2.1 H₂O 泄漏噪声

利用注水系统,进行了模拟 H₂O 泄漏的注水实验,研究 H₂O 泄漏信号的各种特性。实验中,关闭风机和 H₂O 循环系统,并将 Na 流速降至最小,以最大限度地排除背景噪声干扰。

1) 响应时间

声学探测系统的响应时间主要决定于声波在液态 Na、蒸汽发生器及波导棒中的传播,测量仪器的响应时间可以忽略不计。蒸汽发生器中有复杂的水管路,声波在传播过程中不断地反射、交混和叠加,难以进行严格理论分析。图 3 所示是注水后探测系统输出信号 RMS (均方根) 值的变化曲线,从开始注水到有信号产生约为 300 ms。可见,声学探测系统具有扩散式氦计不可比拟的快速响应特性。

2) 泄漏信号与泄漏率的关系

理论分析^[1]表明,泄漏噪声的声压 p 与泄漏率 G 具有如下关系:

$$p = Z (V_g/n)^{1/3} G^{1/3} / T_0$$

式中: G 为泄漏率, Z 为介质声阻, V_g 为氢气的比容, n 为单位时间内产生的气泡数, T_0 为气泡生成所需的时间。

加速度传感器测得信号的 RMS 值与声压信号具有相同的形式,故可由信号的 RMS 值与泄漏率的关系推知泄漏噪声的声压与泄漏率的关系。实验在 5—400 mL/h 之间选取了 10 种注水率,计算了相应的 RMS 值。图 4 所示为注水信号 RMS 值和注水率间的对数关系曲线。从图中可以看出,在注水率较低情况下,注水信号的 RMS 值与注水率的 1/3 次幂成正比;注水率较大时,则与 2/3 次幂成正比。由此可以认为,泄漏噪声的声压与泄漏率的 1/3—2/3 次幂成正比。

3) 泄漏信号的频域特性

图 5 所示为注水信号的频谱图。由图可见,泄漏信号的频率范围很宽,一直延伸到 35 kHz 左右,其能量分布在 25 kHz 以下较为平坦。实验比较了传感器位于不同位置时的信号特性(图 6)。其中位于反应器下部的传感器距离注水点较近,而位于上部的传感器距离注水点较远。二者测得的信号在 10—25 kHz 频段上的能量分布相差较大,而其它频段上则近似相同。因此可以认为,泄漏噪声的特征频段主要在 10—25 kHz。

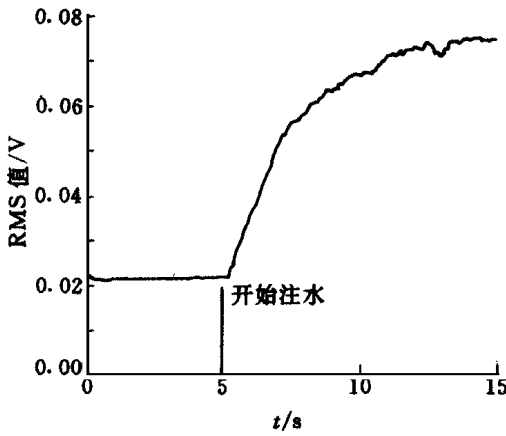


图 3 系统响应特性

Fig 3 Response characteristic
of experimental system
注水率: $10 \text{ ml} \cdot \text{h}^{-1}$

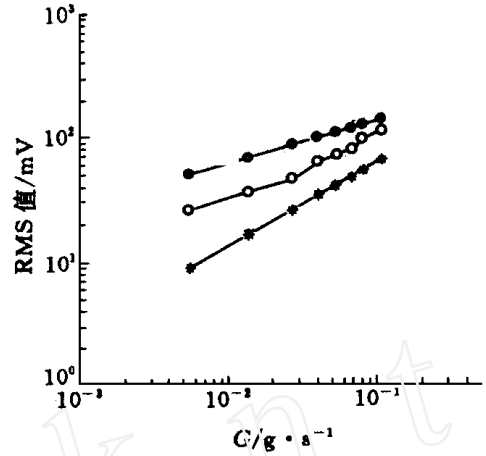


图 4 注水信号 RMS 值与注水率的关系

Fig 4 Relationship between RMS value of water
injection signal and injection rate
— 注水信号; — 注水率的 $1/3$ 次幂;
* — 注水率的 $2/3$ 次幂

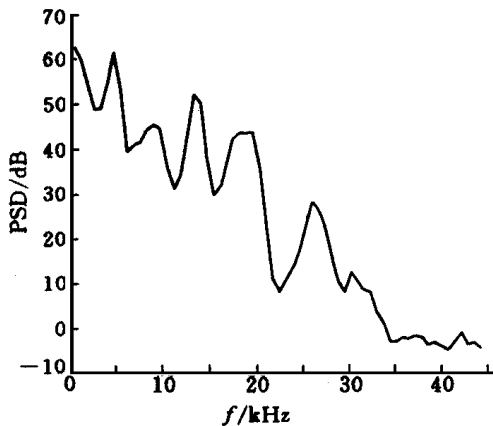


图 5 注水信号频谱图

Fig 5 Frequency spectrum
of water injection signal

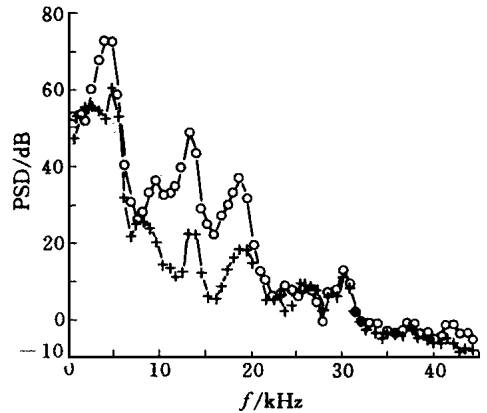


图 6 传感器位于不同位置测得的信号

Fig 6 Signals measured at different position
— 传感器位于下部; + — 传感器位于上部

4) Na 温对泄漏噪声的影响

图 7 所示为不同 Na 温下泄漏噪声的频率特性。从图中可以看出, 随 Na 温升高, 泄漏噪声能量明显增大, 高频段能量增加更加显著。这种现象可由 Na-H₂O 反应的理论得到解释^[1]。在泄漏噪声中, Na-H₂O 反应的产物——氢气泡的生长过程所产生的噪声占据主要成分, Na 温升高后 Na-H₂O 反应加剧, 产生的氢气泡数目增多, 气泡初始压力增大, 使单个气泡产生的声压场增强, 许多气泡产生的声压场相互叠加, 使整个声压场变强。另外, 在气泡崩溃过程中, 产

生的噪声有 1 个陡尖的峰值, 其频谱可看作此尖脉冲的付氏变换, 频率等于气泡生存时间的倒数。当氢气生成量增大时, 气泡初始半径增大, 气泡生长或溃灭的声压值及泡壁速度也增大, 使气泡生长或溃灭所用的时间变短, 即气泡生存时间缩短, 相应频率的峰值频率增大, 于是高频段能量增加更为显著。

2.2 背景噪声

利用实验系统具有分离各种背景噪声的特性, 对快堆电站中存在的几种背景噪声进行了实验研究。

1) Na 流噪声

关闭风机和 H₂O 循环系统, 实验研究不同运行条件下 Na 流噪声的特性。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(图 8(a) 和 (b)), 这种噪声的频率分布范围较宽, 低频段 0—5 kHz 的能量较大, 在较高频段上也有影响, 30 kHz 以上方可忽略不计。Na 流噪声受 Na 回路运行条件的影响很大。从图 8(a) 可以看出: 在一定 Na 流速下, 随 Na 温升高, Na 流噪声的能量下降; 从图 8(b) 可以看出: 在一定 Na 温下, 随 Na 流速增大, Na 流噪声的能量增加。液态金属流动的雷诺数 $Re = \rho v D / \mu$ 有可能成为研究其流动噪声的模型化参数。对于液态金属流动, 其动力粘度 μ 仅与压力有关^[2]。在 Na 流速不变情况下, 温度升高, 密度下降, 雷诺数变小, 流动噪声也变小; 在 Na 温不变情况下, Na 流速增大, 雷诺数变大, 流动噪声也变大。由于蒸汽发生器内部结构非常复杂, 计算传感器所在区域雷诺数的准确数值并推导 Na 流噪声的幅值是很困难的。

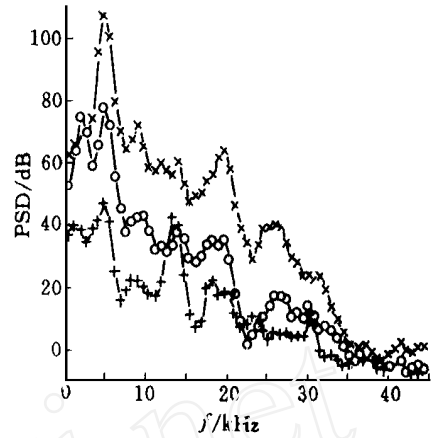


图 7 不同 Na 温度下的注水信号频谱图
Fig 7 Frequency spectra of water injection signals at different temperatures of sodium
+ — 250 ; — 350 ; x — 450

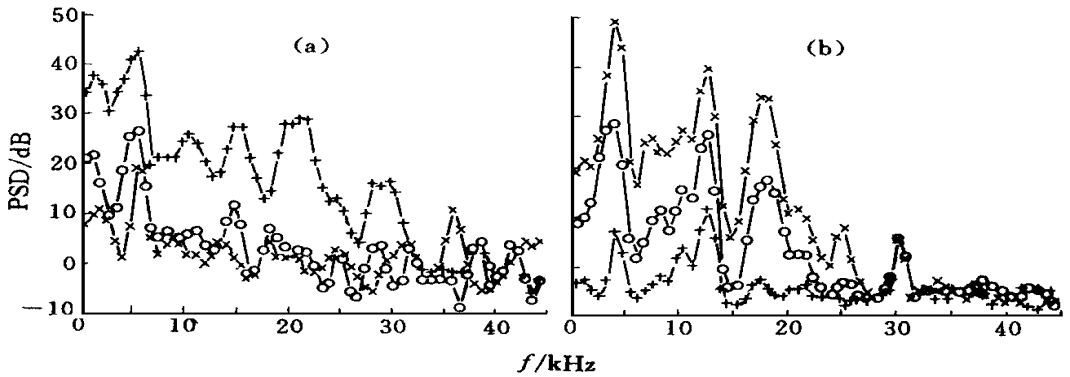


图 8 不同 Na 温(a) 和不同 Na 流速(b) 下的 Na 流噪声频谱图

Fig 8 Frequency spectra of sodium flow noise at different temperatures (a) and flow rates (b)
(a): + — 250 , — 350 , x — 450 ; (b): + — 0.129 m · s⁻¹ , — 0.184 m · s⁻¹ , x — 0.236 m · s⁻¹ ;

2) 水流噪声

在关闭风机并使Na流速最低的条件下,实验研究水流噪声特性。水流噪声主要包括水和水蒸气的流动噪声和水的沸腾蒸发噪声。实验中观测到:Na温较低时(250℃),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(图9(a))。在Na温升高到350℃后,水流噪声的能量明显加大,且随水流速的增加,水流噪声迅速加大,当水流量达到一定数值后,噪声增加幅度明显变小(图9(b))。据此可以认为,在水流噪声中,沸腾蒸发较水和水蒸气的流动起更为主要的作用。Na温较低时,Na-H₂O之间的温差较小,水的沸腾和蒸发比较慢,信号较小;水流量的增大并不能使沸腾和蒸发加剧,因此对信号影响很小。Na温较高时,Na-H₂O的温差加大,水的沸腾和蒸发加剧,因此信号较大;水流量增加使沸腾蒸发更加剧烈,信号明显增大,当水流量达到一定数值时,沸腾和蒸发已趋于饱和,水流量的增加对信号的影响反而减小。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,对高频段影响很小。

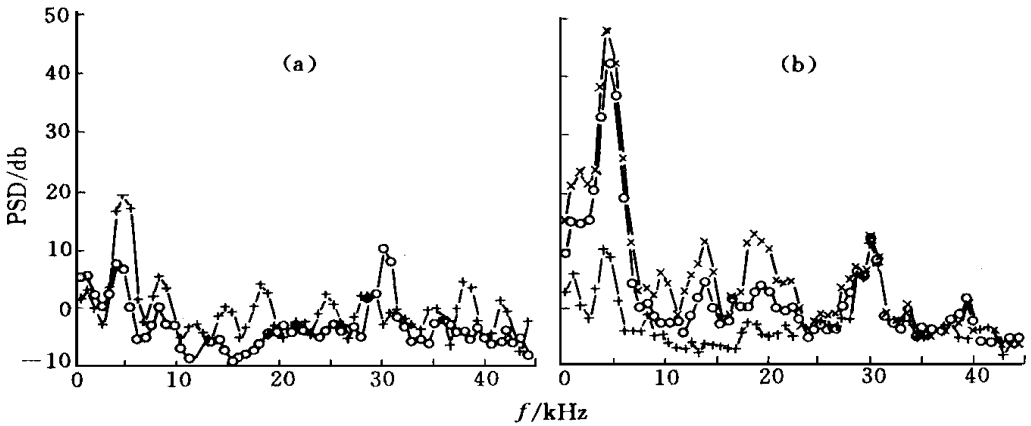


图9 250℃(a)和350℃(b)时的水流噪声

Fig 9 Water flow noise at 250℃(a) and 350℃(b)

(a): ————水流速 $0.157 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, + ———— $0.707 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 (b): + ———— $0.157 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ———— $0.314 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, × ———— $0.491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3) 泵和风机噪声

实验研究测量了风机和泵产生的噪声。对于离心式风机,其噪声主要由空气流过叶片产生,它表现为离散的叶片噪声和宽带气动噪声。泵的噪声主要由液力、空穴和回流等因素造成,液力表现为离散频率噪声,湍流、空穴和回流引起宽带噪声。在实验条件下,由于泵和风机距离反应器较远(在快堆电站中也是如此),它们所引起的噪声很难通过回路中的高压液态钠和管束传到蒸汽发生器壁面上。所以,尽管实验空间内泵和风机噪声很大,但对传感器测得的信号影响很小。

3 泄漏噪声提取方法设想

根据以上的分析可以看出,Na温对泄漏噪声、Na流噪声和水流噪声均有影响,在设计信号处理器的特性时,必须考虑Na温的影响。图10(a)—(c)是Na温分别为250、350和450℃时上述3种噪声的频谱。从图中可看出,为了最大限度地抑制背景噪声,提高探测系统的灵敏

度, 应注意如下 2 点。

1) 在低 N_a 温下, 水流噪声能量较小, N_a 流噪声能量较大, 且和注水信号在频域上不易区分, 故采用经典的滤波技术不会得到明显的效果。

2) 在超过 350 的高 N_a 温下, 水流噪声能量加大, 但主要集中在低频段上; N_a 流噪声能量减小, 尤其在中高频段上的影响很小。与 N_a 流噪声相反, 注水信号随 N_a 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 10—25 kHz 进行带通滤波可望改善探测系统的灵敏度。这样设计的信号处理器在低温时灵敏度将降低, 这就意味着探测系统在快堆正常运行时(此时 N_a 温较高)比在快堆启动阶段(此时 N_a 温较低)具有更好的探测性能。

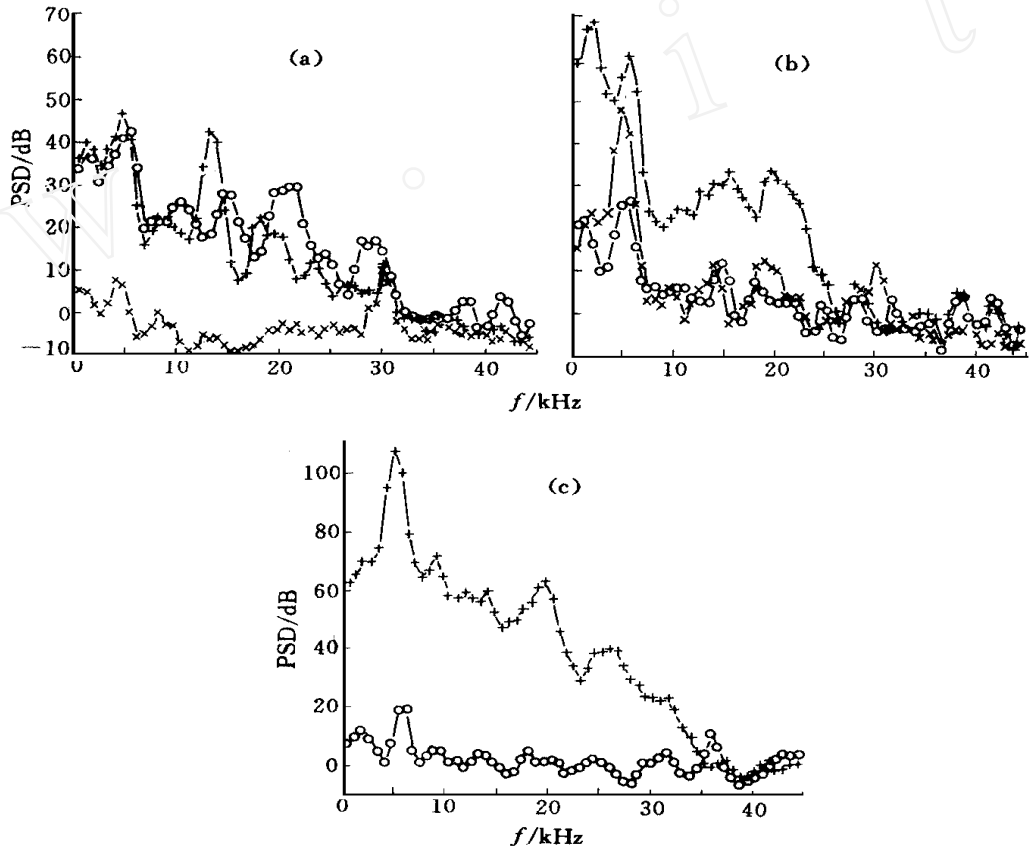


图 10 250 (a)、350 (b) 和 450 时几种信号的频谱图

Fig 10 Frequency spectra of signals at 250 (a), 350 (b) and 450 (c)

+ ——注水信号, ——— N_a 流噪声; x ——水流噪声

4 结论

1) 声学探测系统具有快速响应特性, 在本实验室的实验 N_a 回路上响应时间约为 300 m s, 适用于探测快速发展的泄漏。

2) Na 流噪声的频率范围较宽, 随温度升高信号能量减小, 特别是在中高频段上减小得更显著。雷诺数可能是研究 Na 流速对 Na 流噪声影响的模型化参数。

3) 水流噪声主要是水的沸腾和蒸发噪声, 且随 Na 温升高, 能量增大。能量主要集中在较低频段上。

4) 泄漏信号的声压值与泄漏率的 $1/3$ — $2/3$ 次幂成正比。

5) 泄漏噪声存在特征频段 (10—25 kHz), 在高 Na 温 (350 以上) 下, 通过带通滤波, 可望有效地提高探测系统的灵敏度。

参 考 文 献

- 1 周伟东 快堆蒸汽发生器声学泄漏探测技术的实验研究 [硕士学位论文] 北京: 清华大学, 1995
- 2 《快堆研究》编辑部 钠 钠钾工程手册 北京: 《快堆研究》编辑部, 1986 24

INVESTIGATION ON ACOUSTIC LEAK DETECTION METHODS IN LIQUID METAL FAST BREEDER REACTOR STEAM GENERATOR I CHARACTERISTICS OF SIGNALS

Pan Xiaoyun Yang Xianyong Luo Rui Wang Zhou

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

ABSTRACT

Based on the latest experimental results come from the sodium test loop, properties of leak noise in a steam generator of a liquid metal fast breeder reactor (LMFBR) and all kinds of background noises are analyzed and discussed, such as sodium flow noise, water flow noise, pump and fan noises. A reasonable assumption about how to pick up the leak noise is put forward, and which will provide an experimental base for improving the sensitivity of the acoustic leak detection system.

Key words Acoustic detection LMFBR Na-H₂O reaction Water leak