

钠沸腾噪声探测研究

李茂季 杜呈瑞 高雅云 蒋廷三 陆道纲

(中国原子能科学研究院, 北京)

文章叙述了钠沸腾噪声探测研究进展, 建立了离线和在线均可进行的高频和低频信号采集和处理系统, 引进、开展、改进和编制了信号处理、故障诊断、事故报警和自回归模型分析等软件包。应用这些硬软件对水和钠沸腾噪声进行了探测和分析。结果表明, 沸腾噪声信号的自功率谱密度(APSD)的幅值明显大于沸腾时的值, 用自回归模型判别因子分析, 可实现钠沸腾在线实时诊断和监护。

关键词 钠沸腾噪声, 频谱分析, 自回归模型判别因子。

一、引言

为了保证钠冷快堆的安全运行和提高运行效率, 对钠开始沸腾的监测是十分重要的。这是因为钠沸腾产生的空泡降低了传热能力, 燃料在裂变过程中释放的热量不能充分地带走, 结果温度上升, 可能导致燃料元件熔化, 造成堆芯损坏事故; 另外, 对大的钠冷快堆钠的空泡反应性系数可能是正的, 钠空泡的产生引起堆功率上升, 堆功率上升会产生更多的空泡, 这种正反馈效应, 将会引起严重的瞬时超功率事故。

钠沸腾可分为整体和局部两种。整体沸腾的可能性很小, 在组件出口处的常规温度计就可探测到。局部沸腾的可能性大, 用常规的出口温度计很难探测出来, 然而钠沸腾时的噪声信号明显高于非沸腾时的信号, 所以应用噪声分析的方法可实现对钠开始沸腾的监测。

世界所有计划发展快堆的国家, 都进行了钠沸腾噪声的监测研究^[1-10]。建立了各种规模的实验回路, 开展了机理性的和与工程有关的多方面的研究。先进的国家还在快堆上建立了在线噪声探测和诊断系统。

我国已建立了离线和在线均可进行的高频和低频噪声信号采集和处理系统, 引进、开发、改进和编制了信号处理、故障诊断、事故报警和自回归模型判别因子分析等软件包, 并应用这些硬件和软件对水和钠的沸腾噪声信号进行了探测和分析, 得到了满意的结果。

二、测量仪器

1. 低频信号探测系统

低频信号是指温度、流量和压力的噪声信号。因为这些噪声信号很弱, 必须经过几千倍的放大, 才能被采集和分析, 而且这些噪声信号是叠加在直流信号上的, 必须把直流成分隔离才能探测到; 同时, 为了避免高频干扰还必须把高频干扰成分除去, 为此研制了带通

滤波-低噪声低频放大器。带通范围为0.2—40 Hz，放大倍数为80dB。这种仪器是采用高稳零低噪声的集成电路和有源滤波器集成电路块及相应的电子元件组成的，具有高稳零、高增益、低噪声、隔直流、频带宽和失真小等优点。

整套测量系统包括传感器、带通滤波器、低噪声低频率放大器和多路磁带记录仪等。

低频噪声信号探测可以直接利用迴路或反应堆上原有的传感器，不需要另外安装新的传感器，既经济又方便。

2. 高频信号探测系统

高频信号是指声噪声信号。声的发射源是空泡破裂发射的压力脉冲，频率范围从几千赫到100千赫以上。

声噪声信号探测方法具有下列优点：声波可以在很大的介质中传播，一个声传感器可以探测堆芯较大的范围。只要通过波导杆在堆芯上方装上若干个声传感器，就可以监测整个堆芯，不需要每个燃料组件都安装上声传感器。

声探测系统包括波导、压电加速度计、电荷放大器，磁带记录仪和滤波器等。

3. 在线噪声信号采集和处理系统

在钠迴路或反应堆附近建立在线噪声信号采集和处理系统，可以及时和大量地采集和处理噪声信号，使实验效率大大提高；同时，可通过此系统实现实时事故诊断和报警。

在线噪声信号采集和处理系统有两种

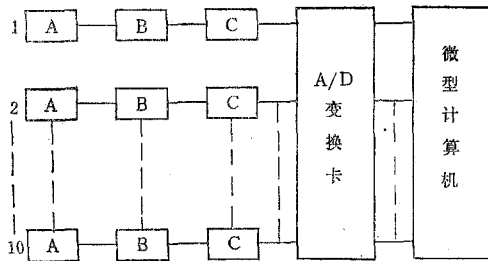


图1 在线信号采集和处理系统方块图

Fig.1 Block diagram of on-line signal acquisition and processing system

A——传感器；B——滤波器；C——放大器。

方式，1. 用一块A/D变换卡(120kHz, 12位, 16路)直接插在IBM兼容机HQ-286的扩展槽内，利用管理程序和信号处理程序，达到计算机在线信号采集和处理的目的。2. 一台具有两块500kHz、8位、8路的A/D变换卡组成的贮存量为64×1024的缓存器与HQ-286微型机相连，构成在线信号的采集和处理系统。前者适用于低频和单路高频信号的采集和处理(见图1)，后者适用于多路高频信号的采集和处理。

三、信号分析方法^[11]

噪声信号分析可在频域内进行，也可在时域内进行。在频域内采用频谱分析的方法，即自谱、互谱和相干等分析。在时域内采用相关分析。在噪声信号分析中，通常把涨落部分称为随机变量 $x(t)$ 。对于平稳的随机过程，自功率谱密度(APS_D)为自相关函数的付里叶变换：

$$G_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

其中自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 为

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t+\tau) dt, \quad (2)$$

同样, 互功率谱密度可表示为

$$G_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (3)$$

其中互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt \quad (4)$$

相干函数表示为

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|G_{xy}(\omega)|^2}{G_{xx}(\omega)G_{yy}(\omega)}, \quad 0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1, \quad (5)$$

按照付里叶变换理论, 一个可积的时间函数可以用不同频率的谐波与其相应的振幅的乘积叠加来表示。所以谱函数和相关函数互为付里叶变换和逆变换。

谱分析可在动态信号分析仪上进行, 也可以利用谱分析程序在微型计算机上进行。也可两者并用, 进行比较。

时域分析, 利用自回归模型判别因子分析。判别因子 f 定义为残差的方差 σ_a^2 与方差 D_x 之比:

$$f = \frac{\sigma_a^2}{D_x} \quad (6)$$

其中

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(x_i - \sum_{i=1}^n a_i x_{i-i} \right) - \mu_a \right]^2, \quad (7)$$

x_i 是由 $i=1, 2, \dots, N$ 组成的时间序列; a_i 是自回归系数; μ_a 是残差的平均值。

$$D_x = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} [x(t_j) - \bar{x}]^2 \quad (8)$$

四、实验结果和讨论

1. 水沸腾实验

为了研究钠沸腾声噪声探测, 在还没有钠沸腾回路的情况下, 用水来模拟钠沸腾实验。通过实验检验国产压电加速度计的性能, 区别沸腾噪声与本底噪声和研究对接长波导造成信号损失的程度。实验装置的方块图示于图 2。

进行了四种情况的实验: (1) 水加热而没有产生任何汽泡, 测量本底噪声; (2) 水加热到在加热器电阻丝周围不断产生汽泡, 并上升直至破裂, 测量次冷沸腾噪声; (3) 水加热到整体沸腾, 测量整体沸腾噪声; (4) 加长波导实验, 测量不同波导对沸腾噪声的影响。

噪声信号送给磁带仪进行记录, 同时送到动态信号分析仪进行处理。结果示于图 3, 4。

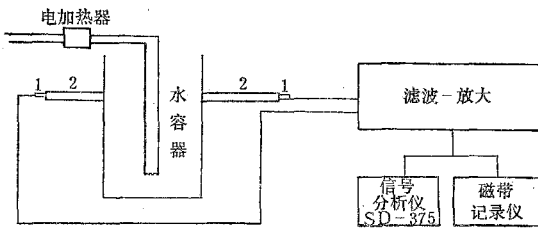


图 2 水沸腾噪声探测装置方块图
Fig. 2 Block diagram of water boiling noise detection equipment
1——压电加速度计；2——波导。

图 3 示出前三种情况的测量结果。从图上可看出开始沸腾噪声信号自谱的幅值明显高于整体沸腾和本底的自谱幅值。由此可见，国产压电加速度计的灵敏度是高的，其性能可以满足实验的要求。

图 4 示出单根波导和两根波导连接测量的结果。从图上可看出在 20 kHz 以下，两者基本相同；在 20 kHz 以上，前者明显高于后者。由此可见，加长波导对高频信号有较大的影响。

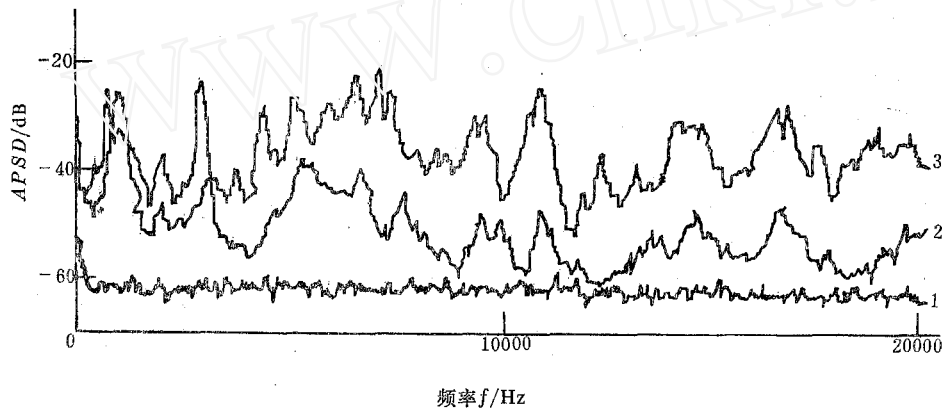


图 3 水沸腾和没有沸腾声的 APSD
Fig. 3 APSD of acoustics for water boiling and no boiling

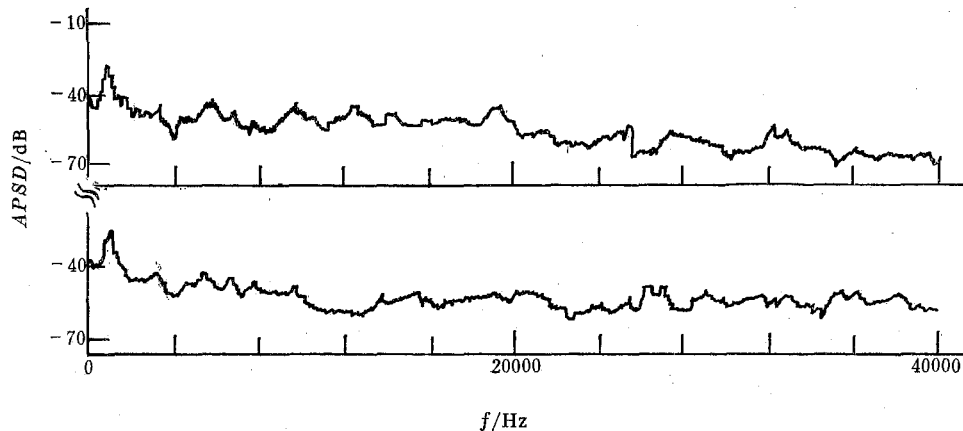


图 4 声的 APSD
Fig. 4 APSD of acoustics with one and two waveguides
上图为一根波导；下图为两根波导。

2. 钠 沸 腾 实 验

钠沸腾噪声探测是在西安交大的沸腾迴路上进行的。此回路是在原钠实验回路上接出

的一个支路。支路内的钠是自然循环的，外加热到650℃左右，抽真空达到沸腾。回路中实验段长80cm，直径1cm，壁厚0.1cm。外壁布置了16个热电偶温度计，实验选用其中4个。另外还利用入口热电偶和流量计为实验的传感器。在实验段入口和出口处各焊一根长12cm，直径1cm的波导。实验时加长22cm同样直径的波导。波导末端安装加速度计。

低频信号经过放大和滤波，高频信号经过电荷放大器放大，然后分别送给7路模拟磁带仪进行记录。记录的信号离线分别在SD-375型动态信号分析仪和在微型计算机上进行处理。在动态信号分析仪上分析了自功率谱密度和相干。在微型计算机上除分析自功率谱密度外，还利用自回归(AR)模型进行了判别因子的分析。分析的部分结果示于图5—11。

从图5—7可以看出，沸腾时的APSD的幅值，不管哪种传感器，均有明显增大。对声传感器，靠近实验段的APSD的幅值增长较大。从图6可看出钠沸腾时两个温度传感

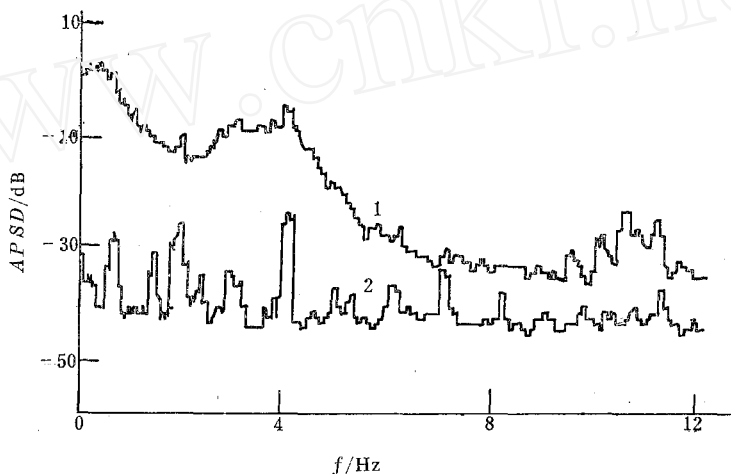


图 5 入口温度的 APSD
Fig.5 APSD of inlet temperature
1——沸腾；2——本底(不沸腾)。

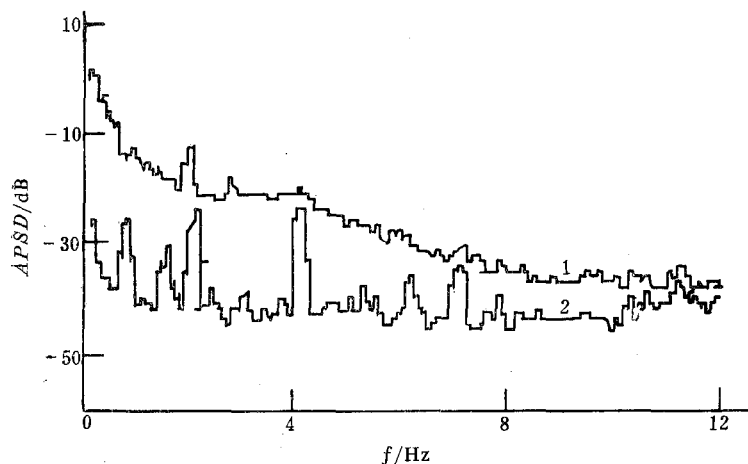


图 6 实验段上部温度的 APSD
Fig.6 APSD of temperature at the upper part of the experimental section
1——沸腾；2——不沸腾。

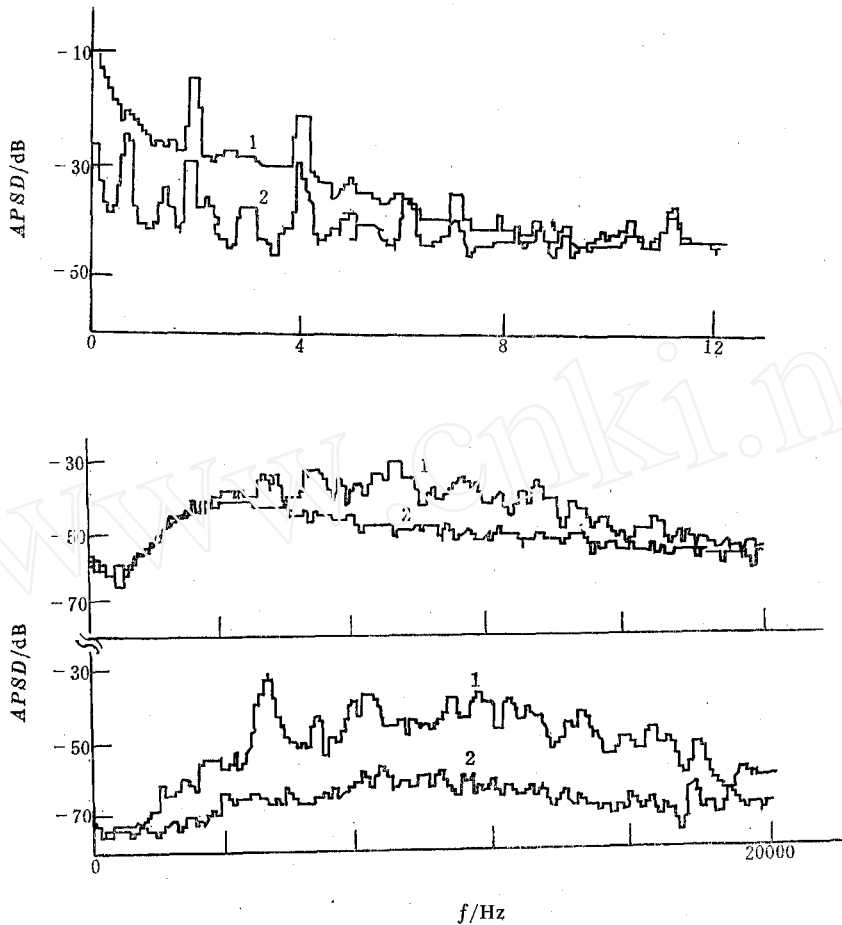


图 7 流量和声的 APSD
 Fig.7 APSD of Flow and acoustic
 中图为入口声的 APSD; 下图为出口声的 APSD;
 1——沸腾; 2——不沸腾。

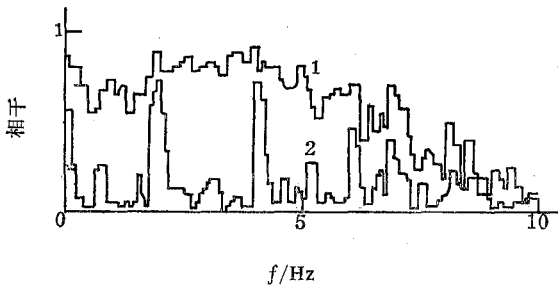


图 8 两个温度之间的相干
 Fig.8 Coherence between two temperatures
 1——沸腾; 2——不沸腾。

器输出的噪声信号相干明显大于非沸腾时的相干。

图 9 和 10 是利用 AR 模型分析在微型计算机上计算的判别因子。从图中可以看到本底的判别因子基本上不变, 而沸腾的判别因子有明显变化, 特别是从没有沸腾到沸腾, 有个突变。声的判别因子, 从本底到沸腾开始再到整体沸腾, 均有突变。所以应用判别因子来监测钠的沸腾是一种灵敏且有效的方法。

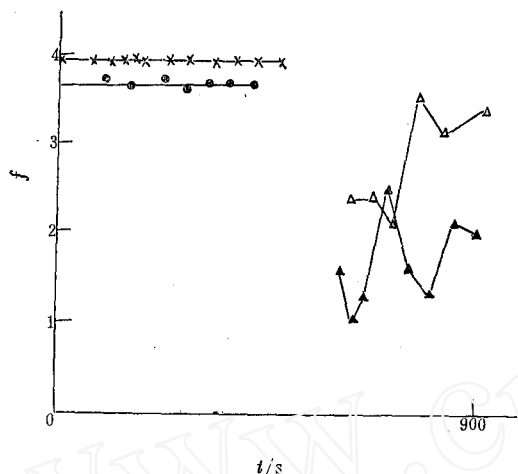


图 9 判别因子

Fig. 9 Distinguishing factor
 ×——不沸腾流量判别因子; ▲——沸腾流量判别因子; •——不沸腾温度判别因子; △——沸腾温度判别因子。

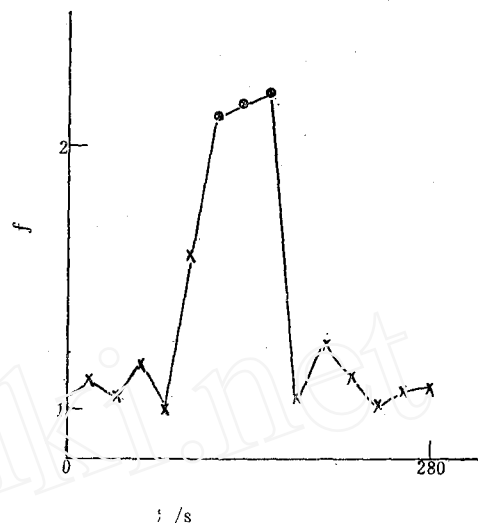


图 10 声的判别因子

Fig. 10 Distinguishing factor of acoustics
 ×——不沸腾; •——沸腾。

五、结 语

从实验结果表明: (1) 高频、低频和在线信号采集和处理系统基本上能满足实验的要求。不过, 对高频信号的采集, 需要研制具有带通滤波的电荷放大器, 以便滤掉低频的强信号和高频的干扰信号, 使感兴趣的信号能够更有效地放大。(2) 沸腾噪声信号的幅度明显高于非沸腾的, 足以判别钠的沸腾。(3) AR模型判别因子分析对钠沸腾的判别是灵敏和迅速的, 其中以声的判别因子变化最为明显。(4) 利用 AR 模型判别因子分析, 可实现在线实时钠沸腾的诊断和监护。

参 考 文 献

- [1] Burton, E.J., Report on the IAEA-IWGFR specialists meeting on sodium boiling noise detection, 9-11, June, (1981).
- [2] Inujima, H. et al., *Prog. Nucl. Energy*, 9, 107(1981).
- [3] Gourdon, J., Caseque, R., *Prog. Nucl. Energy*, 9, 365(1981).
- [4] Le Guillon, G. et al., *Prog. Nucl. Energy*, 15, 815(1985).
- [5] Mnlens, J.A. et al., *Prog. Nucl. Energy*, 15, 483(1985).
- [6] Türkcan, E., *Prog. Nucl. Energy*, 1, 497(1977).
- [7] Kaiser, A., peppier, W., *Nucl. Eng. Design*, 43, 285(1977).
- [8] Biserna, T. et al., *Prog. Nucl. Energy*, 1, 517(1977).
- [9] Afanasev, V. A. et al., *Kernergie*, 22, 357(1979).
- [10] Burton, E.J. et al., *Prog. Nucl. Energy*, 1, 393(1977).
- [11] Thie, J.A., *Power Reactor Noise*, USA, 29-56(1981).

(编辑部收稿日期: 1991年3月30日)

SODIUM BOILING NOISE DETECTION RESEARCH

LI MAOJI DU CHENGRUI GAO YAYUN JIANG TINGSAN

LU DAOGANG

(China Institute of Atomic Energy, P.O.Box 275, Beijing)

ABSTRACT

The paper describes the progress of the research work on sodium boiling noise detection. High frequency and low frequency noise signal analysis system with on-line or off-line signal acquisition and processing were set up. We introduced, developed, improved and designed the signal processing, accident alarming, failure diagnosis and autoregression model analysis computer softwares. Utilizing these hardware and software, we detected and analysed the noise signals of sodium and water boiling. The results show that the amplitude of *APSD* of noise signals in boiling was obviously larger than that in no boiling. Using distinguishing factor of autoregression model analysis, we can realise on-line and real-time boiling diagnosis and surveillance.

Key words Sodium boiling noise, Frequency spectral analysis, Discrimination factor of autoregression model analysis.