

小波变换在快堆蒸汽发生器 声学泄漏检测中的应用

牛晓东, 杨献勇

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要: 根据在清华大学液态金属实验室实验钠回路上得到的实验数据, 采用基于小波变换的奇异性检测理论进行快堆蒸汽发生器水/水蒸气泄漏的故障诊断研究。结果表明: 此方法使得声学泄漏探测系统的灵敏度得到了提高, 且对泄漏发生时间的定位十分准确, 是快堆蒸汽发生器水/水蒸气泄漏检测的有效方法。

关键词: 快堆; 泄漏检测; 小波变换

中图分类号: TL329

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)04-0289-05

Application of Wavelet Transform on Acoustic Leak Detection for Steam Generators in Liquid Metal Fast Breeder Reactor

NIU Xiao-dong, YANG Xian-yong

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

Abstract: A method detecting water/steam leaks of steam generators in liquid metal fast breeder reactor (LMFBR) is described, which is based on the principle of singularity detection of wavelet transform according to the data from the acoustic leak detection system of sodium loop in the liquid metal lab of Tsinghua University. The methods are proved to be effective to improve the sensibility of acoustic leak detection system and detect the time of leaks correctly.

Key words: liquid metal fast breeder reactor; acoustic leak detection; wavelet transform

在快堆核电站中,蒸汽发生器管路长期运行在高温、高压、钠环境的恶劣条件下,运行中可能发生水/水蒸气管路的泄漏。泄漏的高压水/水蒸气向钠侧喷射,将发生剧烈的钠水反应。反应时,钠水反应区附近的温度、压力急剧升高,释放大量的热量,使漏孔腐蚀扩大,造成泄漏的扩大和蔓延,对蒸汽发生器管束造成破

坏。因此,及时检测泄漏并采取相应的安全保护措施以控制事故的蔓延是保证快堆安全运行的重要条件。在快堆电站中,微氢探测系统是主要的探测设备,但这种探测器的响应时间长,不适于探测快速发展的小泄漏。

声学泄漏探测技术利用水/水蒸气泄漏时钠水反应产生的声频噪声来探测泄漏,它适宜

收稿日期:2002-05-22;修回日期:2002-07-15

作者简介:牛晓东(1975—),男,北京人,硕士,工程热物理专业

探测发展快速的中小泄漏。声频信号传递到蒸汽发生器外壳并通过外壳上的传感器转换成电信号,传送到检测系统进行信号处理以确定泄漏的发生。声学泄漏探测技术虽具有响应时间短、设备简单的优点,但泄漏信号往往被淹没在背景噪声之中,造成该方法的灵敏度不高。因此,采用有效的信号处理方法提取泄漏信号,提高探测系统的灵敏度是声学泄漏探测技术的主要研究课题。

在已见诸报道的有关声学泄漏探测技术研究^[1~7]中,信号处理多采用传统的傅立叶(Fourier)变换。泄漏信号具有非平稳性,而建立在平稳随机过程理论之上的 Fourier 变换对它并非完全适用。小波变换是近几年发展起来的一门新的信号分析理论,它在时频两域均具有表征信号局部特征的能力,又具有多分辨率分析特点,可聚焦到信号的任意细节,尤其适用于非平稳信号的处理^[8]。

本文研究将小波变换引入快堆水/水蒸气声学泄漏探测系统的信号处理中,利用其奇异性检测原理进行泄漏故障检测。

1 小波变换的奇异性检测原理

信号 $x(t)$ 的小波变换 ($WT_{ax}(t)$) 可表示成如下卷积形式:

$$WT_{ax}(t) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi_a(t-\tau) d\tau = x(t) * \psi_a(t) \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为母小波; $a > 0$, 为尺度因子; 符号“*”表示求卷积; $\psi_a(t)$ 由 $\psi(t)$ 在 a 下作伸缩得到,即

$$\psi_a(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (2)$$

所以,小波变换 $WT_{ax}(t)$ 可看成是信号 $x(t)$ 通过冲激响应为 $\psi_a(t)$ 的系统后的输出。

若 $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 分别为某一低通函数 $\psi(t)$ 的一阶导数和二阶导数,即

$$\begin{aligned} \psi^{(1)}(t) &= \frac{d}{dt} \psi(t) \\ \psi^{(2)}(t) &= \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) \end{aligned} \quad (3)$$

可以证明: $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 是带通函数,且满足小波容许性条件,可作为母小波。

由式(1)、(3)可得信号 $x(t)$ 在母小波 $\psi^{(1)}(t)$ 和 $\psi^{(2)}(t)$ 下的小波变换:

$$\begin{aligned} WT_a^{(1)} x(t) &= x(t) * \psi_a^{(1)}(t) = \\ x(t) * \left[a \frac{d}{dt} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \right] &= a \frac{d}{dt} [x(t) * \psi_a(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} WT_a^{(2)} x(t) &= x(t) * \psi_a^{(2)}(t) = \\ x(t) * \left[a^2 \frac{d^2}{dt^2} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \right] &= a^2 \frac{d^2}{dt^2} [x(t) * \psi_a(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\psi_a(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t}{a}\right)$ 。

$x(t) * \psi_a(t)$ 可看成是低通平滑函数 $\psi(t)$ 在尺度 a 下对函数 $x(t)$ 进行平滑的结果,从式(4)、(5)知:小波变换 $WT_a^{(1)} x(t)$ 和 $WT_a^{(2)} x(t)$ 分别是函数 $x(t)$ 在尺度 a 下由 $\psi(t)$ 平滑后再取一阶与二阶导数。

由上述分析知, $WT_a^{(1)} x(t)$ 的零点对应于平滑后信号 $x(t) * \psi_a(t)$ 的极值点, $WT_a^{(1)} x(t)$ 的局部极值点既对应于 $WT_a^{(2)} x(t)$ 的过零点,又对应于 $x(t) * \psi_a(t)$ 的拐点,即极限情况下的阶跃点。当 a 较小时,用 $\psi_a(t)$ 对 $x(t)$ 平滑的结果对 $x(t)$ 的突变部分的位置与形态的影响不大;当 a 较大时,平滑过程将使 $x(t)$ 的一些细小的突变消去而只剩下大尺寸的突变。由此可知:信号以 $\psi^{(1)}(t)$ 为小波基的小波变换的局部极值点对应于信号的突变点,而以 $\psi^{(2)}(t)$ 为小波基的小波变换的过零点也对应于信号的突变点。这就是用小波变换的过零点和极值点来检测信号局部突变的原理。

采用检测信号小波变换系数的过零点和局部极值点的方法可以检测信号的突变。这两种检测方法中,采用局部极值点进行检测更具优越性。

1) 过零点易受噪声干扰。

2) 过零点有时反映的并非突变点,而是信号在慢变区间的转折点; $x(t) * \psi_a(t)$ 的拐点既对应于它的一阶导数模的极大值点,又对应于极小值点,而 $WT_a^{(1)} x(t)$ 的极大值点对应于信号快变化点的位置, $WT_a^{(1)} x(t)$ 的极小值点对应于信号变化最慢点的位置,因此,单凭检测二阶导数的过零点很难判定是信号的突变点还是缓变点。

3) 过零点仅给出拐点的位置信息而不能给出变化点变化的快慢信息,而局部极值点则确定对应信号的快变点,且可推测出拐点处的导数值,以获得信号变化的快慢信息。

2 泄漏信号的奇异性检测

在快堆蒸汽发生器中,水/水蒸气在传热管内流动,钠在传热管外流动。当蒸汽发生器正常运行,即无水/水蒸气泄漏时,声学泄漏探测系统采集的正常信号是系统的背景噪声本底信号。背景噪声主要来自钠、水的流动噪声和蒸汽形成及流动的噪声。如果传热管壁出现漏洞或裂缝而发生泄漏时,由于水/水蒸气侧压力比钠侧压力高,高压水/水蒸气将冲入钠中,导致钠水反应。

在泄漏开始的瞬间,背景噪声本底上因叠加了泄漏信号而发生能量突变。

泄漏噪声信号在蒸汽发生器内的换热管束之间传播,通过液态钠传到蒸汽发生器的器壁上,安装在蒸汽发生器外壁上的加速度传感器可将蒸汽发生器内部的各种噪声传送到信号接收系统。

从以上分析可知:在快堆蒸汽发生器中,泄漏信号总是叠加在各种背景噪声本底之上,在泄漏故障发生的瞬间,信号波形将发生幅值的突变,不同于正常时的本底信号。信号的突变带有泄漏的重要信息,通过对信号突变的检测即可以判断泄漏的发生。由于突变信号往往具有很宽的频谱能量分布,采用传统的基于傅立叶变换的频谱分析方法很难作出故障识别,且傅立叶变换缺乏空间局部性,只能确定信号奇异性的整体性质,难以确定突变发生的时域位置。

小波变换具有空间局部化性质,因此,利用小波变换检测信号的奇异性判断泄漏的发生是较为有效的。

3 数据处理

利用清华大学实验钠回路声学泄漏探测系统进行蒸汽发生器正常和不同泄漏率情况下的实验研究。350 工况下的实验条件为:钠流量 $6.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、水流量 50 L/h (为实验钠回路最大背景噪声),泄漏率在 $5 \sim 400 \text{ mL/h}$ 范围内变化。

基于 Haar 函数的 Haar 小波是检测信号局部性常用的小波,对实验钠回路最大背景噪声下泄漏率为 10 mL/h 时的泄漏信号使用 Haar 小波进行 3 层小波变换(图 1)。图 1 中 S 为原始信号;CA 为低频分解系数,CD 为高频分解系数,后续数字代表分解层数,即尺度数。

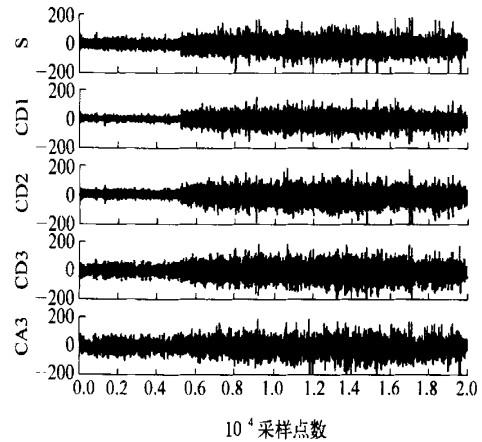


图 1 泄漏信号的 3 层小波变换

Fig. 1 Wavelet transform of leak signal with scale 3

由图 1 可看出:小波变换很好地检测出了泄漏发生时的信号的突变,特别是在尺度 1 的高频分解系数 CD1 上的极大值十分明显,大约 5 000 点,信号突变的时域定位非常准确。

信号的突变部分包含丰富的高频信息,在小波分解中,第 1 层的高频系数 CD1 将信号的突变点表现得最为明显。而且,由理论分析可知,尺度越小,平滑函数 $\psi_a(t)$ 的平滑区域越小,小波系数极大值点对突点变位置的定位越准确。在大尺度下,对噪声进行了一定的平滑,使其定位产生了偏差。

随着水泄漏率的增大,泄漏的高压水/水蒸气冲激力的增大和钠水反应剧烈程度的增加,使信号突变能量随之增大,使用小波变换进行奇异性检测更加有效。

将图 1 的各级小波分解系数进行重构,可观察各级小波分解的细节和概貌信号(图 2),图 2 中 A 为低频概貌信号,D 为高频细节信号。

由图 2 可看出:小波变换第 1 层高频分解系数 CD1 的重构信号 D1 在泄漏发生 5 000 点以后的幅度值与其它层的高频分解系数 CD2、CD3 的重构信号 D2、D3 的幅值相比,前者明显

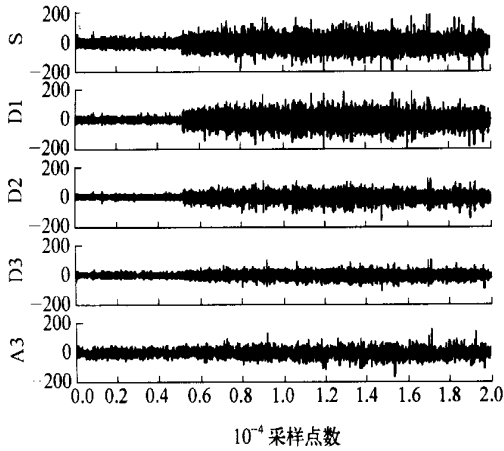


图2 3层小波变换系数重构信号

Fig. 2 Reconstructed signal of wavelet transform with scale 3

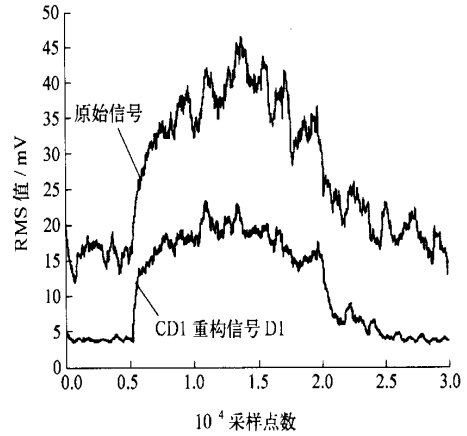


图3 原始信号与重构信号 D1 的 RMS 值

Fig. 3 RMS values of original signal and reconstructed signal D1

大于后者,而它们在泄漏发生点之前的本底阶段幅值相差不多,所以,可考虑用第1层高频系数 CD1 的重构信号 D1 的均方根值(RMS 值)进行泄漏的检测。通过计算 RMS 值,可观察信号的强度随时间变化的情况。

图3中比较的是在实验钠回路最大背景噪声下,泄漏率为 10 mL/h 的原始泄漏信号 RMS 值与其3层小波变换的第1层高频分解系数 CD1 的重构信号 D1 的 RMS 值。从此图中可看出:重构信号 D1 在背景噪声本底阶段和泄漏阶段的能量都有所下降,但两阶段能量减小的幅度不同。

由图3不易直接观察出两阶段能量的变化效果。实际测量中,最有意义的是信噪比,所以,应对信号进行归一化处理,即原始泄漏信号以实验钠回路该工况下的背景噪声的均值为相对量,重构信号 D1 以该工况下背景噪声的第1层高频小波分解系数的重构信号的均值为相对量。

经过归一化处理后的信号的 RMS 值结果示于图4。

从图4可看出:重构信号 D1 在泄漏阶段相对于背景噪声的增值幅度明显大于原始信号在泄漏阶段相对于背景噪声的增值幅度(将近增大了 1.5 倍)。因此,如果将重构信号 D1 的背景噪声放大至原始信号背景噪声的水平时,相同泄漏率下重构信号 D1 在泄漏段的 RMS 值比原始信号在泄漏段的 RMS 值增大了约 1.5 倍。由此可

见:采用原始泄漏信号的小波变换第1层高频分解系数的重构信号 D1 进行泄漏探测,可使探测系统的信噪比增大约 1.5 倍。

从图3、4还可看出:泄漏信号的小波变换第1层高频分解系数的重构信号 D1 对泄漏发生时间的定位十分准确,其 RMS 值增大的时刻与原始泄漏信号完全相同。

对泄漏率为 5 ~ 400 mL/h 的所有泄漏信号的处理表明,D1 的归一化 RMS 值在泄漏阶段约为原始泄漏信号归一化 RMS 值的 2.5 ~ 3 倍。

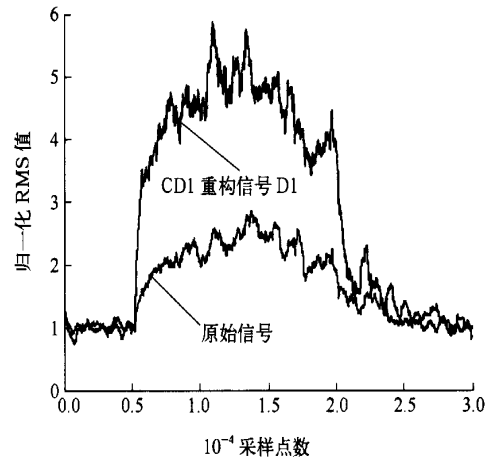


图4 原始信号与重构信号 D1 的归一化 RMS 值

Fig. 4 Normalized RMS values of original signal and reconstructed signal D1

4 结论

根据在实验钠回路声学泄漏探测系统获得的实验数据,使用小波变换进行泄漏信号的奇异性检测。对原始泄漏信号的第1层小波高频分解系数 CD1 进行重构,得到高频细节信号 D1, D1 的归一化 RMS 值在泄漏段约为原始信号归一化 RMS 值的 2.5 ~ 3 倍。由此可通过设定阈值定量进行泄漏判断,并可准确进行泄漏的时间定位。

对实验数据的处理结果表明:使用以上方法可对泄漏率在 5 ~ 400 mL/h 的所有泄漏信号进行成功检测,并能进行准确的时间定位,与传统的信号处理方法相比,泄漏探测系统的灵敏度得以较大提高,为快堆蒸汽发生器水/水蒸气的声学泄漏检测技术改进提供了一有效途径。

参考文献:

- [1] Srinivasan GS, Singh OP, Prabhakar R. Leak Noise Detection and Characterization Using statistical Features [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 1999, 27: 329 ~ 343.
- [2] Hayashi K, Shinohara Y, Watanabe K. Acoustic Detection of Irradiation Water Leaks Using Twice Squaring Method [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 1995, 23: 1 249 ~ 1 259.
- [3] 成文华, 陈华兴, 杜呈瑞, 等. 钠水反应的噪声诊断 [J]. *原子能科学技术*, 1994, 28 (2): 157 ~ 161.
- [4] 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 . 系统信号特性 [J]. *原子能科学技术*, 1998, 32(1): 1 ~ 8.
- [5] 潘晓云, 杨献勇, 王 洲. 快堆蒸汽发生器声学泄漏探测技术的研究 . 利用经典滤波技术提取泄漏信号 [J]. *原子能科学技术*, 1998, 32(2): 159 ~ 163.
- [6] 潘晓云. 利用噪声分析技术诊断钠水反应的实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1997.
- [7] 蒋 冰. 利用信号处理技术提高声学泄漏探测技术的灵敏度 [D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [8] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 21 ~ 27.