

锅炉承压管泄漏双曲面定位的遗传算法优化

安连锁¹, 王鹏¹, 姜根山¹, 李庚生², 沈国清¹

(1. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 天津国投津能发电有限公司, 天津市 汉沽区 300480)

Boiler Tube Leakage Hyperboloidal Location Optimization via Genetic Algorithm

AN Liansuo¹, WANG Peng¹, JIANG Genshan¹, LI Gengsheng², SHEN Guoqing¹

(1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University),
Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China;

2. Tianjin SDIC Jinneng Electric Power CO. LTD, Hangu District, Tianjin 300480, China)

ABSTRACT: The main requirement of a modern power plant is an efficient and reliable operation; hence, the source of boiler tube leakage must be precisely localized. In this study, the quaternary acoustic array was used in the furnace, a set of hyperboloidal equations was established, and the sensors distributed for capturing the leakage signal were given. The experiment on leakage localization shows that a stable and sharp peak is obtained through an approximation of the maximum likelihood estimator which signal-to-noise ratio function on frequency domain performs well in inhibition of the background noise. In order to avoid initial guess and distant source assumption, this study employed adaptive Gaussian mutation operator, which was implemented in the genetic algorithm (GA), to provide an explicit solution. Compared with the quasi-Newton method, GA is more robust and accuracy, although it requires more time to converge. The time delay estimator error greatly influences the accuracy of the localization. When the time delay estimator error is below 0.1 ms, the quaternary plane array localization error is within the permitted range of 1 m, which is derived through numerical calculation.

KEY WORDS: boiler tube leakage; hyperboloidal location; genetic algorithm; time differences of arrival

摘要: 电站锅炉“四管”泄漏的精确定位对于火电机组的安全、经济运行具有极其重要的意义。该文建立了双曲面定位模型并给出炉膛内平面四元阵列的测点分布, 泄漏定位实验

表明通过极大似然(maximum likelihood, ML)广义互相关对能取得非常稳定和尖锐的时间估计峰值, 频域信噪比函数能较好地抑制炉膛强背景噪声的影响。为了避免初值猜测与远场假设, 采用遗传算法: 十进制浮点编码, 非均匀高斯变异算子, 进行双曲面方程组定位解的全局性概率搜索。对比遗传算法和拟牛顿法的双曲面方程组优化, 表明遗传算法的优化误差略小于拟牛顿法, 具有稳健性和高精度, 但其需要较长的收敛时间。时延估计误差对定位影响很大, 时间迟延误差不大于 0.1 ms, 平面四元阵列空间坐标定位误差保持在 1 m 之内从而满足精确定位的要求。

关键词: 炉管泄漏; 双曲面定位; 遗传算法; 时间迟延估计

0 引言

火电锅炉的“四管”泄漏一直是困扰火电机组安全生产的一大难题, 进行锅炉爆管早期预报, 在其还未发展成为破坏性爆漏之前及时发现泄漏并确定泄漏点的位置, 对于妥善安排停炉、缩短检修时间、减少经济损失有重大意义。

当前, 国内外锅炉承压管泄漏声学检测^[1-3]普遍采用大量布置测点覆盖锅炉受热面, 在滤掉锅炉背景噪声后检测泄漏声的声压级大小和泄漏声的频谱特征对泄漏是否发生加以诊断。若某测点发生报警, 则确定泄漏源位于该测点为圆心, 半径为 10 m 的半球空间内, 所以该技术的主要作用还是判断泄漏并确定泄漏的受热面, 并不能定位到具体的管排上^[4-6]。对于孔径 1~4 mm 的泄漏, 检修则往往需要花费大量的人力和时间。国内外锅炉承压管泄漏声学检测技术面临的重大技术难题是解决泄漏源的精确定位问题^[7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50976034, 10774043); 中央高校基本科研业务费专项资金(09QG43)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50976034, 10774043); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (09QG43).

本文摒弃当前锅炉四管泄漏检测中单点各自探测的思路,考虑各个单点传感器之间的相干信息:将传声器组成阵列接收泄漏信号;通过极大似然(maximum likelihood, ML)广义互相关得出声信号到达不同位置传声器的时间差(time differences of arrival, TDOA);利用再根据目标与基元位置之间的几何关系建立双曲面方程组,采用遗传算法进行优化。

1 平面四元阵列锅炉承压管泄漏定位模型与 ML 广义互相关时间延迟估计

1.1 平面四元阵列定位模型

声学阵列的设计在被动定位技术中具有重要的意义。泄漏坐标是三维参量,若采用线阵只能确定其中的二维参量^[8];立体阵可以对整个空间定位,但其算法要复杂得多^[9];面阵中可以在整个平面对泄漏声源进行定位,五元或五元以上构成的十字阵列和均匀圆阵^[10]有良好的测量性能,其基本思想是通过增加敏感元来提高定位精度,但增加元数势必增加系统的成本且其结构也不适合在电站锅炉上应用。

采用平面四元阵列对电站锅炉四管泄漏进行精确定位, A~F 共 6 层, 30 个声传感器测点如图 1 所示, 测点布置可根据现场情况适当改动。

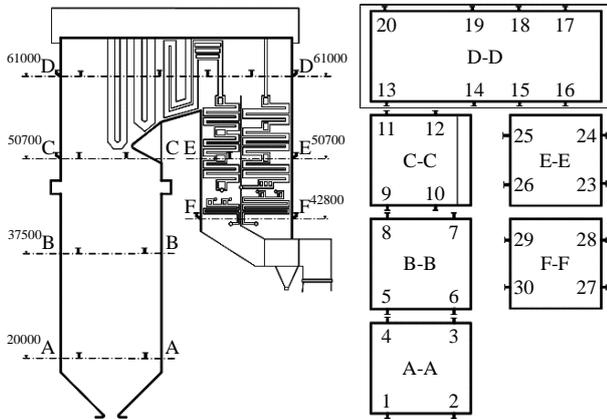


图 1 电站锅炉泄漏定位声传感器测点分布图

Fig. 1 Distribution of sensors within the furnace chamber

平面四元阵列泄漏定位空间几何原理如图 2 所示,以 A 层为例,其中 S 表示目标点声源。 M_1, M_2, M_3, M_4 分别表示 A 层 4 个传声器,坐标分别为 $M_1(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, 0), M_2(-\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, 0), M_3(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}, 0), M_4(\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}, 0)$, 假设泄漏声源 S 的坐标为 (x, y, z) , 并规定 τ_{ij} 表示声源 S 分别到达传声器 M_i 与 M_j 的时

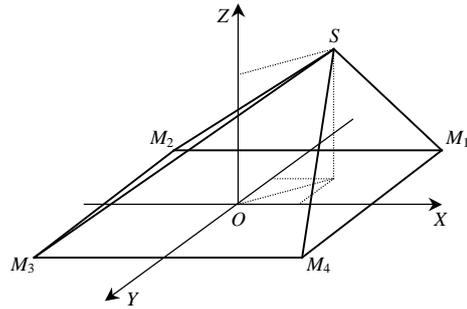


图 2 A 层平面四元阵定位几何原理图

Fig. 2 The four-element array leakage localization geometry

间延迟。

则泄漏声源应满足双曲面方程组:

$$\|M_i - S\| - \|M_j - S\| = c\tau_{ij} \quad (1)$$

式中 c 为声波传播速度。

对于双曲面方程组的求解,雷达和声纳系统的测距和定位中往往进行远场假设:目标距离远大于声阵特征尺寸($r \gg a, b$),从而进行化简得到时间延迟组合公式进行定位^[11-13]。蜂窝移动通信中,通过远场假设泰勒级数展开算法^[14]在每一次递归过程中求解测量误差的局部线性最小二乘解来改善估计位置,初始值必须具有一定的准确度才能够保证比较快的收敛速度,而且算法是否收敛与初值有关;Chan 采用二重最小二乘算法给出了定位方程组的非迭代闭式解^[15],算法计算量小,在噪声服从高斯分布的环境下定位精度高,但局限于二维平面。

电站锅炉的特征尺寸以 SG-1025/17.5-M723 锅炉为例:其结构为深(a)13.64 m、宽(b)14.022 m,而每层传感器的探测范围在 20 m 之内,远场假设会对求解精度造成巨大的影响。

根据方程(1)可以推导出:

$$\begin{cases} f_1(x, y, z) = -2c\tau_{21}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - ax - by + \frac{a^2 + b^2}{4}} + 2ax - c^2\tau_{21}^2 \\ f_2(x, y, z) = -2c\tau_{31}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - ax - by + \frac{a^2 + b^2}{4}} + 2ax + 2by - c^2\tau_{31}^2 \\ f_3(x, y, z) = -2c\tau_{41}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - ax - by + \frac{a^2 + b^2}{4}} + 2by - c^2\tau_{41}^2 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 ML 广义互相关时间延迟估计

国内某电厂 1025 t/h 循环流化床锅炉的平面四元阵列的特征尺寸 $a=12$ m, $b=7.3$ m, 采 LabVIEW 软件和 NI PXI-6133 采集卡,每通道采样速率最高

可达 3 MS/s, 设置采样频率 $f_s = 102\ 400\ \text{S/s}$, 冷态情况下, 各通道采集的泄漏声源时域波形如图 3 所示。

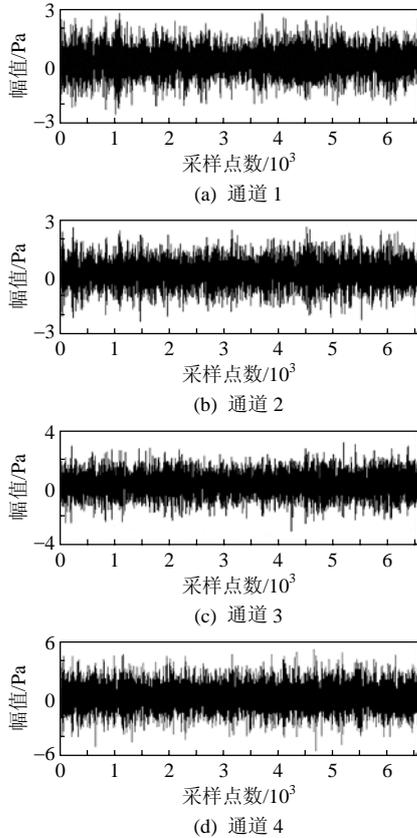


图 3 泄漏信号的时域波形

Fig. 3 The time domain wave form of receivers

两通道信号的直接互相关系数为

$$\hat{R}_{x_1 x_2}(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_{\tau}^T x_1(t)x_2(t + \tau)dt \quad (3)$$

由炉膛内的燃烧噪声、燃烧器的射流噪声、烟气横掠管束的风吹声、吹灰器的噪声以及其他机械噪声组成的背景噪声的影响导致 $\hat{R}_{x_1 x_2}(\tau)$ 的峰值不明显, 降低了时延 τ_{ij} 估计的精度。为了锐化 $\hat{R}_{x_1 x_2}(\tau)$ 的峰值, 可以根据泄漏信号和背景噪声的先验知识, 在频域内给互功率谱一定的加权来抑制背景噪声的影响。加窗滤波后, 两信号的互功率谱可表示为

$$G_{P_1 P_2}(f) = H_1(f)H_2^*(f)G_{x_1 x_2}(f) \quad (4)$$

又因为互相关函数与互功率谱函数之间是一对傅里叶变换的关系, 因此相关函数的输出为

$$\hat{R}_{x_1 x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{12} \hat{G}_{x_1 x_2}(f) e^{j2\pi f \tau} df \quad (5)$$

ML 权函数为

$$\psi_{12} = H_1(f)H_2^*(f) = \frac{|\gamma(f)|^2}{|G_{x_1 x_2}(f)|(1 - |\gamma(f)|^2)} \quad (6)$$

式中 $|\gamma(f)|^2$ 为两麦克接受信号的模平方相干函数, 表达式为

$$|\gamma(f)|^2 = \frac{|G_{x_1 x_2}(f)|^2}{G_{x_1 x_1}(f)G_{x_2 x_2}(f)} \quad (7)$$

式中 $G_{x_1 x_1}$ 和 $G_{x_2 x_2}$ 分别表示信号的自功率谱和互功率谱, 通道 2、3、4 分别与通道 1 进行广义互相关得到的泄漏信号的时间延迟估计如图 4 所示。

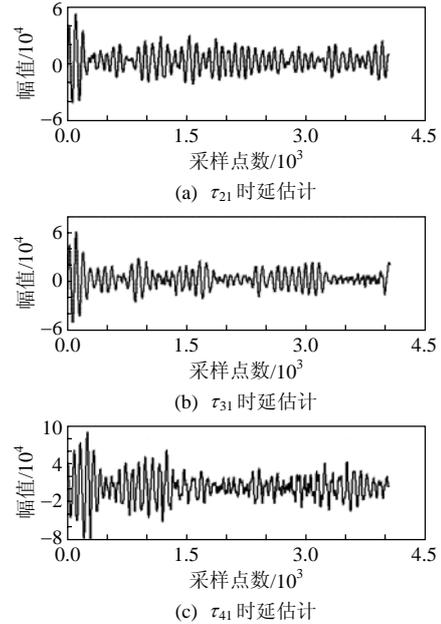


图 4 ML 广义互相关时间延迟估计

Fig. 4 Time delay estimation experiment by ML

通过频域信噪比函数, ML 广义互相关函数对信噪比大的频段给予大权值, 而对信噪比小的频段给予小权值, 从而比较好地抑制了噪声的影响。在采样点 $N_1 = 174$, $N_2 = 178$, $N_3 = 317$ 检测到非常稳定的尖锐峰值:

$$\tau_{21} = \frac{f_s}{N_1} = 1.699\ 22\ \text{ms}, \quad \tau_{31} = \frac{f_s}{N_2} =$$

$$1.738\ 28\ \text{ms}, \quad \tau_{41} = \frac{f_s}{N_3} = 3.095\ 7\ \text{ms}.$$

在国内某电厂 1025 t/h 循环硫化床锅炉上设计的平面四元阵列特征尺寸 $a = 12\ \text{m}$, $b = 7.3\ \text{m}$ 。定位模型的优化问题为: 寻找定位双曲面函数 $F(\mathbf{X}) : \Omega \subset R^n \rightarrow R$ 的全局最优解 \mathbf{X}^* , n 维实向量 \mathbf{X}^* 满足 $F(\mathbf{X}^*) = \min_{\mathbf{X} \in \Omega} F(\mathbf{X})$, Ω 为其传声器在的探测域。

2 非均匀高斯变异遗传算法的双曲线定位方程组优化

标准遗传算法(simple genetic algorithm, SGA)的基本理论和基本方法最早是由美国 Michigan 大学的 J. Holland 教授于 1975 年提出来的, 是一种借

鉴生物界自然选择和遗传机制的高度并行、随机、自适应的全局优化概率搜索算法^[16-17]，但其存在计算量大、全局优化速度慢以及常常出现早熟收敛现象^[18]。

利用遗传算法求解以上问题步骤如下：

1) 变量初始变化空间和编码。由于声传感器的探测半径为 12m，变量对应的范围设定为 $[-12,12]$ 。对于泄漏定位多维、高精度要求的连续函数优化问题，二进制编码可量测性不强，不直观，且不是因为字符串太长而导致遗传算法训练的解空间过大、寻优时间很长，就是因为字符串太短，使权值表达精度不够，因此采用浮点数编码方式。浮点数编码中，个体的每个基因值用某一范围内的一个浮点数来表示，个体的编码长度等于其决策变量的个数。将每个染色体的基因 \mathbf{X} ，叠加了与这个分量相关的扰动的偏差。这种随机扰动的分布特性既充分保证了变异的精细搜索能力，又保证了变异有可能以较大的步距来改变解向量的各个分量，从而提供了使搜索过程脱离局部最优点的可能性，改进的染色体编码串如图 5 所示。

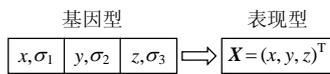


图 5 双曲面定位方程解的基因型及对应表现型

Fig. 5 The genotype and phenotype for hyperbolic location solution

2) 随机生成初始父代群体。群体规模大小 $P_s=100$ ，分别在 \mathbf{X} 向量各维分量的取值范围内以均匀分布随机地取值，得到初始解向量 \mathbf{X}_0 ，并取 σ 向量赋初值 $\sigma_0=0.3$ 。

3) 父代个体的适应度评价。定义第 i 个父代个体的适应度函数值为

$$F_i = \sum_{i=1}^{ps} f_i(x, y, z)^2 \quad (8)$$

4) 父代个体的概率选择。取比例选择方式，则个体 i 的选择概率为

$$p_i = F_i / \sum_{i=1}^{ps} F_i \quad (9)$$

5) 父代个体的杂交。从种群中以上述的方式选择 2 个个体，按事先给定的杂交概率 $P_c=0.8$ ，确定是否要进行交叉运算，若要进行交叉，在 $[1,2]$ 区间内产生一个均匀分布的随机整数 $\mathbf{j}_{\text{cross}}$ ，2 个被选择的染色体交换第 $\mathbf{j}_{\text{cross}}$ 位基因后面染色体片断，如图 6 所示。

6) 子代个体的变异。变异算子最主要起细粒

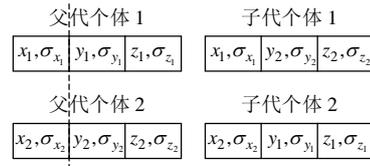


图 6 浮点数编码的交叉算子

Fig. 6 The one-point crossover operator

度搜索作用，同时还要赋予搜索以跳离局部极小点的能力^[19]，这就要求每一位基因通过变异得到的可能的等位基因以较大的概率密度分布在基因原值的附近，并在离基因原值较远的地方的分布也具有一定的概率密度^[20]。由于在多维遗传搜索中采用了十进制浮点数基因表示方式，因此采用简单遗传算法的位变异操作来进行基因的突变显然是不恰当的。搜索的每个解向量包含了一个扰动向量 $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z]^T$ ，这个扰动向量给出了如何对 x 进行变异的信息，并且其本身也是要进行变异的。采用下式以变异概率 $P_m=0.3$ 对父代解向量 (\mathbf{X}, σ) 进行变异，得到子代解向量 (\mathbf{X}', σ') 如图 7 所示，其中：

$$\sigma'_i = \sigma_i \exp[\alpha N(0,1) + \beta N_i(0,1)] \quad (10)$$

$$\mathbf{X}'_i = \mathbf{X}_i + N(0, \sigma'_i), \quad i = x, y, z \quad (11)$$

式中： $N(0,1)$ 表示一个标准的高斯随机变量； $N_i(0,1)$ 表示对应于 X_i 的独立的标准高斯随机扰动；常数 α 、 β 是这个变异算子的参数，分别定义了整个 σ 向量的搜索步长及其各维分量 σ_i 的搜索步长。

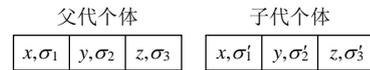


图 7 自适应高斯变异操作

Fig. 7 Adaptive Gaussian mutation operator

7) 进化迭代。由步骤 6) 得到的 n 个子代个体作为新的父代，算法转入步骤 3)，进入下一次进化过程，如此循环往复使得个体逼近最优点。

3 时延估计误差对定位精度的影响

假设时延估计误差为 0，采用遗传算法群体经过 26 代演化，群体最小适应度为 0 具有稳健性和高精度。而当时延估计误差为 0.1 ms 时，群体经过 97 代演化，群体最小适应度为 0.1655。时延误差线为 1 ms 时，群体经过 25 代演化，群体最小适应度为 24.6149，如图 8 所示。

拟牛顿法是改进牛顿法进行非线性优化中有代表性的一种方法，其核心思想是用计算函数值代替计算导数。牛顿法及其改进方法具有很高的收敛速度，但对迭代的初值要求很苛刻，如果初始迭代点不在牛顿法的收敛域内，该方法将失效。再热器

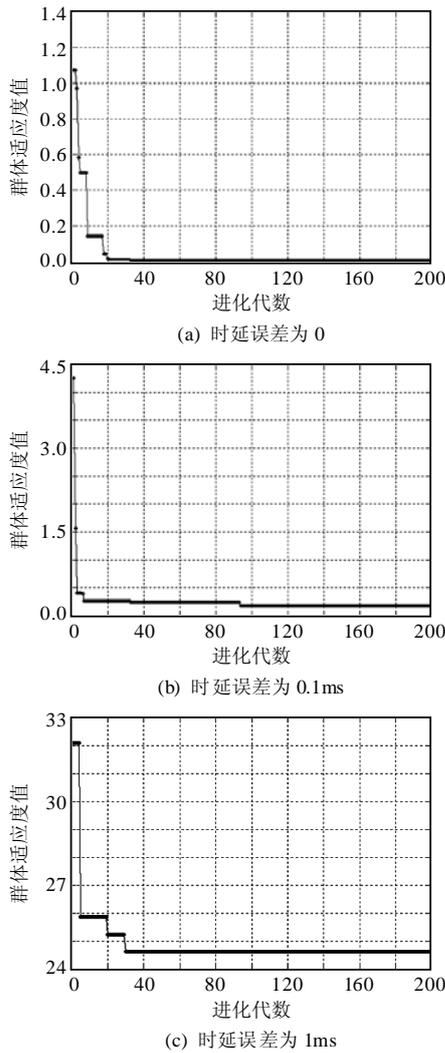


图 8 群体最优个体进化曲线

Fig. 8 The evolution curve of the best chromosomes in the population

泄漏点坐标(5,3,10), 选定时间迟延误差线为 0.1 ms, 时间迟延误差从 -0.1 ms 变化到 0.1 ms, 采用遗传算法和拟牛顿法进行双曲线方程组优化。由于 Z 方向距离相对 X、Y 方向较大定位误差也最大, 泄漏位置解 Z 坐标的误差变化如图 9 所示:

拟牛顿法的迭代初值选择在泄漏点附近 (4.5,2.5,10.5), 从而使初值落在收敛域内, 而遗传

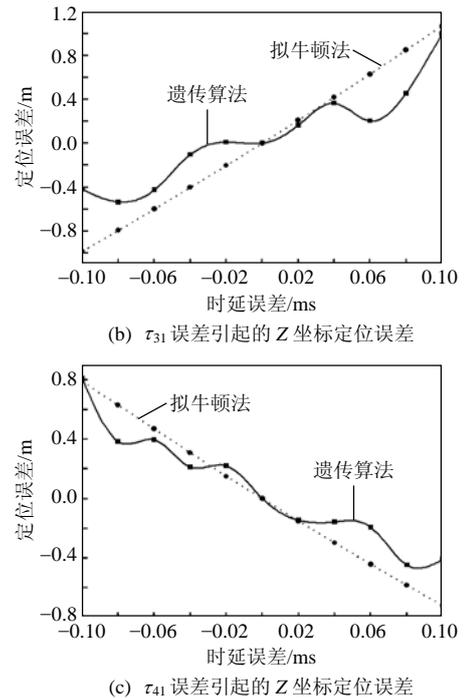
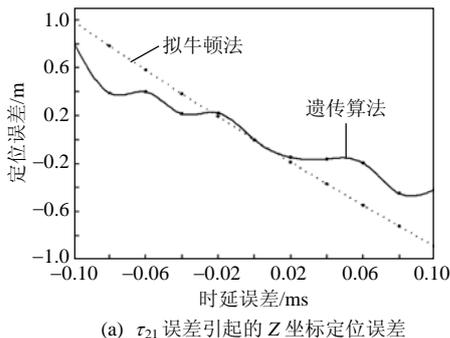


图 9 拟牛顿法和遗传算法双曲线方程组优化误差曲线
Fig. 9 Comparing GA to quasi-Newton method error curves of hyperboloidal location optimization

算法的初始种群则在 [-12, 12] 内随机产生。由图 9 可以看出时延误差从 -0.1 ms 变化到 0.1 ms, 2 种算法的定位误差都能基本保持在 1 m 以内, 遗传算法的定位误差具有一定的波动性且略小于拟牛顿法, 但却不依赖初值且具有良好的全局收敛性, 适合泄漏定位双曲线方程组的优化。

4 结论

利用平面四元阵列接收泄漏声场的信息, 进行 ML 广义互相关的时间延时估计和双曲面方程组的遗传算法搜索可以实现电站锅炉承压管泄漏的精确定位。

1) 平面四元阵列是非常适合电站锅炉承压管泄漏精确定位适合应用的声学阵列, 泄漏定位实验表明通过 ML 广义互相关能取得非常稳定和尖锐的时间估计峰值。

2) 采用遗传算法: 十进制浮点编码, 自适应高斯变异算子, 进行双曲面方程组定位解的全局性概率搜索, 能避免初值猜测与远场假设。

3) 遗传算法和拟牛顿法双曲面方程组优化对比表明遗传算法具有稳健性和高精度, 但收敛时间略长于拟牛顿法。

4) 时延估计误差对定位影响很大。误差线为 0.1 ms 时, 平面四元阵列空间坐标定位误差在 1 m

以内, 实用上具有了足够的精度。

参考文献

- [1] Michael L M, Stephen J P. Acoustic leak detection system: United States, 4960079[P]. 1990-10-02.
- [2] 胡勇. BLD 型锅炉泄漏在线监测系统在线监测系统在火力发电厂中的应用[J]. 黑龙江电力, 2007, 29(1): 42-44.
Hu Yong. Application of BLD type boiler leakage monitor system on line to fossil-fired power plant[J]. Heilongjiang Electric Power, 2007, 29(1): 42-44(in Chinese).
- [3] 姜根山, 安连锁, 杨昆. 温度梯度场中声线传播路径数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 210-214.
Jiang Genshan, An Liansuo, Yang Kun. Numerical study on the propagation path of sound ray through the temperature gradient field [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 210-214(in Chinese).
- [4] 姜根山, 安连锁, 吕亚东, 等. 炉内单排换热器管阵列声传播特性数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 156-160.
Jiang Genshan, An Liansuo, Lü Yadong, et al. Numerical study on the sound wave propagation through a row of heat-exchanger tubes in boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 156-160(in Chinese).
- [5] 姜根山, 安连锁, 田静. 炉内双排换热器管阵列声传播特性的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 106-111.
Jiang Genshan, An Liansuo, Tian Jing. Numerical study on the sound wave propagation through two rows of heat-exchanger tubes in boilers [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 106-111(in Chinese).
- [6] 姜根山, 安连锁, 沈国清, 等. 炉内多排换热器管阵列声传播特性数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 81-85.
Jiang Genshan, An Liansuo, Shen Guoqing, et al. Numerical Study on the sound wave propagation through many rows of heat-exchanger tubes in boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(20): 81-85(in Chinese).
- [7] 姜根山. 锅炉管道泄漏声行为特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006: 1-7.
Jiang Genshan. Acoustic behavior of steam leakage from boiler tubes[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006: 1-7(in Chinese).
- [8] Mark L M, Roy J G, Wilson D K. Acoustic array tracking performance under moderately complex environmental conditions[J]. Applied Acoustics, 2007, 68(10): 1241-1262.
- [9] 鲁佳. 基于传声器阵列的声源定位研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 47-51.
Lu Jia. The research on acoustic source localization based on microphone arrays[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 47-51(in Chinese).
- [10] 祝龙石. 一种基于圆阵测量的扩展卡尔曼滤波算法[J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 492-495.
Zhu Longshi. An extended KALMAN filtering algorithm based on circular array measurement[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 492-495(in Chinese).
- [11] Bishop A N, Fidan B, Dogancay K, et al. Exploiting geometry for improved hybrid AOA/TDOA based localization[J]. Signal Processing, 2008, 88(7): 1775-1779.
- [12] Lui Kenneth W K, Chan Frankie K W, So H C. Accurate time delay estimation based passive localization[J]. Signal Processing, 2009, 89(9): 1835-1838.
- [13] So H C. On time delay estimation using an FIR filter[J]. Signal Processing, 2001, 81(8): 1777-1782.
- [14] Liu Jun, Cui Qimei, Tao Xiaofeng. Improved taylorseries location algorithm for cooperation networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2007, 14(2): 38-44.
- [15] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [16] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [17] David B F. An introduction to simulated evolutionary optimization [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(1): 3-14.
- [18] Sidiropoulos E, Tolikasa P. Genetic algorithms and cellular automata in aquifer management[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(4): 617-640.
- [19] Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs[M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [20] Reid D J. Genetic algorithms in constrained optimization[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 23(5): 87-111.



安连锁

收稿日期: 2010-01-05。

作者简介:

安连锁(1955), 男, 教授, 博士生导师, 从事电站设备状态监测与控制研究, liansuoan@ncepu.edu.cn;

王鹏(1981), 男, 博士研究生, 研究方向为电站设备状态声学监测与控制研究;

姜根山(1963), 男, 教授, 从事应用声学及热力设备故障声诊断;

李庚生(1960), 男, 高级工程师, 从事热能动力工程技术及能源管理工作;

沈国清(1980), 男, 讲师, 研究方向为电站设备状态声学监测与控制研究。

(责任编辑 车德竞)