

# 基于声发射定位算法的故障检测技术研究\*

童国炜<sup>1,2</sup>, 徐华伟<sup>1,2</sup>, 黄林轶<sup>1,2</sup>, 陈超英<sup>1,2</sup>, 刘斌辉<sup>1,2</sup>, 蔡佳<sup>1,2</sup>

(1.工业和信息化部电子第五研究所 广州, 511370)

(2.智能产品质量评价与可靠性保障技术工业和信息化部重点实验室 广州, 511370)

**摘要** 高精度的声发射源定位能够帮助工程人员快速定位故障或异常发生的位置,可用于对大型设备进行结构可靠性监测和检测。为了提高声发射源定位的精度,提出一种融合了 Geiger 定位方法、同伦算法及牛顿梯度方法的源定位算法。采用 Geiger 迭代定位方法实现对源定位信息的迭代更新,并将更新信息的求解转变为对不适定问题的求解。同伦算法和牛顿梯度方法的结合,避免了常规不适定问题求解方法中耗时的矩阵求逆,优化了求解过程。实验结果表明,所提方法优于常规定位算法,可实现对声发射源位置信息的高精度求解。

**关键词** 无损检测;声发射;源定位算法;Geiger 定位;同伦

**中图分类号** TP29;TH70

## 引言

声发射(acoustic emission, 简称 AE)是一种由材料局部应力能量瞬间释放而引起的瞬态弹性波,以一定频率在材料中进行传播。AE 检测设备通过对这一现象中释放能量大小和频率的测量,获取材料内部特征,实现无损检测<sup>[1]</sup>。工业生产环境中大型设备或系统在长期的运行工作中会发生不可预知的故障或异常。AE 检测设备能够实时发现潜在或实际损害系统结构可靠性的不利因素,是无损探伤领域近几年的研究热点之一<sup>[2]</sup>。由于其具有运行快、造价低及技术成熟等特点,现已广泛应用于铁路、船舶、建筑及军事等领域<sup>[3-4]</sup>。

定位算法精度是影响 AE 检测系统精度的主要因素之一,国内外学者对此领域进行了广泛的研究,提出了众多的 AE 源定位方法,常规的方法有阈值法、互相关分析法及 Geiger 迭代定位法<sup>[5-6]</sup>等。但是由于定位精度偏低,这类算法仅用于对 AE 源进行初步定位。为了改善常规定位方法的弊端,Shehadeh 等<sup>[7]</sup>提出了一种结合了时域(基于能量)和频域(基于时间)处理的通用源定位方法,结果表明该算法在非连续和连续 AE 源定位中是有效的。针对基于时差定位算法中 AE 定位精度受波速等诸多因素影响的问题,杨道学等<sup>[8]</sup>提出了一种基于粒子群优化的未知波速声发射定位算法,实验结果表明该算

法优于传统已知波速算法。为了提高定位精度, Huang 等<sup>[9]</sup>通过全相位傅里叶分解分析的相位不变性确定了波形波峰,并通过 Geiger 迭代获得最终的定位坐标,实验结果表明,该算法比直接互相关结果更准确。上述方法的研究拓宽了 AE 源定位算法的设计思路,但是仍然存在继续提升的空间。

研究表明,Geiger 迭代定位算法是一种可靠经典的 AE 源定位方法<sup>[10]</sup>。但是由于其收敛条件有限、存在矩阵求逆过程及收敛速度慢等不足,不利于算法在小内存设备中的运行,在实际应用中需结合其他方法进行优化。笔者针对上述弊端,在 Geiger 算法的基础上,采用同伦算法和牛顿梯度法优化了 Geiger 迭代算法的收敛过程,提高了算法定位精度,避免了传统互相关分析可能出现无解的情况,可实现高精度的 AE 源定位。

## 1 声发射系统

AE 系统由若干个 AE 传感器、信号放大器、信号采集和处理系统组成,如图 1 所示。在工作时,工程材料内部或表面的声源产生持续或非持续的弹性波,经材料传播到表面,与表面放置的 AE 传感器产生耦合,依靠压电效应将声波信号转变为微小的电信号,经由相对应的信号放大器获得幅值可分辨的电压信号。信号采集和处理系统对电压信号进行采

\* 广东省省级促进经济高质量发展专项资助项目(MGG192500190)

收稿日期:2020-06-22;修回日期:2020-12-19

集、分析,并通过AE源定位方法获得声源信息<sup>[11]</sup>。

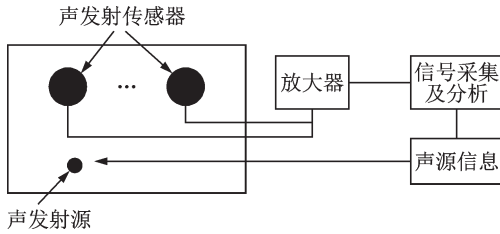


图1 AE系统

Fig.1 Acoustic emission system

## 2 定位算法

源定位方法的精度是AE检测设备中影响检测结果的重要因素之一。常见的算法有阈值法、互相关分析法及Geiger迭代定位法<sup>[5-6]</sup>。其中,Geiger迭代定位法通过在给定假设源信息的基础上,在有限步的迭代修正后可获得比阈值法和互相关分析法更好的结果<sup>[10]</sup>。但是由于该算法存在对初始值敏感、矩阵求逆过程及收敛慢等问题,学界提出了众多的改进方法。笔者在其基础上提出了一种改进的定位方法:采用互相关分析方法进行初始化;采用同伦算法避免矩阵求逆;采用牛顿梯度方法加速算法收敛。具体步骤如下。

假设某AE检测系统存在 $m$ 个传感器,其3维空间内的位置分别设为 $A_1(x_1, y_1, z_1), A_2(x_2, y_2, z_2), \dots, A_m(x_m, y_m, z_m)$ ,  $P$ 点为AE源坐标 $P(x, y, z)$ ,则声音信号由声源传递到第 $i$ 个AE传感器的过程为

$$v(t_i - t) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1)$$

其中: $v$ 为声音传播速度; $t_i$ 为第 $i$ 个AE传感器接收到声波的时刻; $t$ 为AE源发出声音的时刻; $(x_i, y_i, z_i)$ 为第 $i$ 个AE传感器的位置坐标。

由式(1)可知,AE源信息有 $(x, y, z, t)$ ,将其作为未知量,式(1)可转变为

$$t_i(x, y, z, t) = \frac{1}{v} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + t \quad (2)$$

假设存在近似的AE源信息 $(x_0, y_0, z_0, t_0)$ ,则根据泰勒展开,式(1)可变换为

$$t_i(x, y, z, t) = t_0 + \frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial t_i}{\partial t} \Delta t + e_i \quad (3)$$

其中: $\Delta x = x_i - x_0; \Delta y = y_i - y_0; \Delta z = z_i - z_0; \Delta t = t_i - t_0; t_0 = t_i(x_0, y_0, z_0, t_0)$ 为假设源到达第 $i$ 个AE

传感器的时间; $e_i$ 为2次及2次以上的截断误差; $\frac{\partial t_1}{\partial x} = \frac{x_i - x}{vR}; \frac{\partial t_1}{\partial y} = \frac{y_i - y}{vR}; \frac{\partial t_1}{\partial z} = \frac{z_i - z}{vR}; \frac{\partial t_1}{\partial t} = 1;$

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}.$$

整理式(3),忽略高阶项 $e_i$ ,当存在 $m$ 个AE传感器时,有

$$A\beta = b \quad (4)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x} & \frac{\partial t_1}{\partial y} & \frac{\partial t_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x} & \frac{\partial t_2}{\partial y} & \frac{\partial t_2}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_m}{\partial x} & \frac{\partial t_m}{\partial y} & \frac{\partial t_m}{\partial z} & 1 \end{bmatrix}; \beta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix};$$

$$b = \begin{bmatrix} t_1 - t_{10} \\ t_2 - t_{20} \\ \vdots \\ t_m - t_{m0} \end{bmatrix}.$$

将式(4)转化为最小二乘形式

$$\min_{\beta} (F(\beta) = \|A\beta - b\|_2^2) \quad (5)$$

式(5)的最终结果为 $\beta = (A^T A)^{-1} A^T b$ 。假设Geiger定位算法的初始值为 $\alpha = [x, y, z, t]$ ,则第1次迭代后 $\alpha$ 的值通过 $\alpha = \alpha + \beta$ 进行更新,以此类推直至满足迭代停止条件。初始值 $\alpha$ 点的选择关系着是否能够得到全局最小值和求解效率的问题,笔者采用互相关分析方法进行初始化,减小了初始值对优化过程的影响。

直接求解会存在耗时严重的方阵求逆过程。同时,考虑到泰勒展开后对高阶项的省略,Geiger迭代方法的精度会受到影响。此外,当 $A^T A$ 接近奇异时会出现无法定位求解的问题。因此,笔者采用求解过程更为稳健的融合了同伦方法<sup>[12]</sup>和牛顿梯度方法的组合求解策略实现对式(5)求解。该框架可提高算法执行速度和收敛效率。

根据同伦框架构建函数 $\|A\beta - b\|_2^2$ 的同伦函数为

$$H(\beta, s) = sF(\beta) + (1 - s)F_0(\beta) \quad (s \in [0, 1]) \quad (6)$$

其中: $F_0(\beta)$ 为某已知最终解的方程。

笔者采用 $F_0(\beta) = F(\beta) - F(\beta^*)$ ,其中 $\beta^*$ 为已知常数向量。因此,当 $s = 0$ 时, $H(\beta, 0) = 0$ 为已知问题的求解;当 $s = 1$ 时, $H(\beta, 1) = 0$ 为原始问题的求解,即方程 $F_0(\beta)$ 和 $F(\beta)$ 通过同伦路径 $H(\beta, s)$ 连接到了一起。

将  $F_0(\beta)$  带入式(6)可得

$$H(\beta, s) = F(\beta) + (s - 1)F(\beta^*) = \|A\beta - b\|_2^2 + (s - 1)\|A\beta^* - b\|_2^2 \quad (s \in [0, 1]) \quad (7)$$

由于  $H(\beta, s) = 0$  的解依赖于同伦方法引入参数  $s$ , 因此将  $s$  在  $[0, 1]$  之间进行离散化, 获得  $n$  个离散值,  $0 = s_0 < s_1 < \dots < s_n \leq 1$ , 分别代入式(6), 可得  $n$  个方程

$$H(\beta, s_j) = 0 \quad (j \in Z \cap [1, n]) \quad (8)$$

对式(8)采用牛顿法进行求解可获得最终的结果。

综上所述, 本研究所提方法流程如图 2 所示。

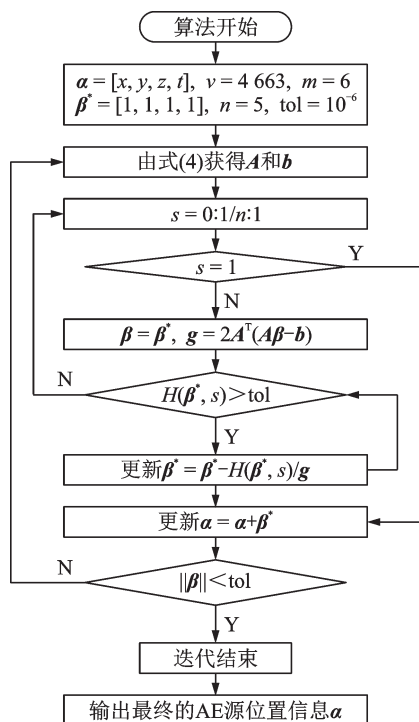


图 2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flow chart

优化算法参数的选取是一个复杂的数学问题, 对于同伦问题亦是如此。就具体问题而言, 选择适当的参数可保证结果有物理意义, 可加速算法收敛, 并可令收敛解近似于真实解。但是由于理论推导出的参数一般效果不佳, 因此算法参数的选取往往通过经验法取得。文中算法的参数是通过多次算法调试后得以确定, 当取文中算法参数组合时, 算法收敛较快, 精度较高。

笔者所提算法基于 Geiger 定位方法框架, 结合同伦算法和牛顿梯度法优异的数值性能加速了定位算法的收敛速度, 提高了算法稳定性, 改善了矩阵求逆过程对算法运行性能的不利影响。

### 3 实验与分析

笔者设计了一套 AE 定位测试系统, 并通过对比本研究所提方法、互相关分析方法及 Geiger 定位方法的结果, 验证本研究所提方法的有效性和精确性。实验示意图如图 3 所示, 实验平台由 6 个 AE 传感器、6 个信号放大器、1 块 1 000 mm × 500 mm 的镀锌钢板、8 模拟通道数据采集卡及上位机系统组成。实验中使用直径为 0.5 mm、硬度为 HB 且延伸长度为 3 mm 的铅笔芯在镀锌钢板上产生信号, 图 4 为声发射传感器位置, 图中 1 个方格的尺寸为 20 mm × 20 mm (由于实验采用 2 维镀锌钢板作为对象, 因此声源位置信息中的  $z = 0$ ), 6 个传感器坐标分别为 (140, 100), (80, 320), (420, 320), (580, 420), (740, 460) 及 (920, 420), 部署的原则是为了在收集 AE 信号的同时, 保证信号具有较高的信噪比和较低的能量衰减, 有利于算法精度的保障。表 1~3 分别为互相关分析、传统 Geiger 定位方法及本研究所提定位方法的定位结果, 表 4 为上述 3 种方法的运行耗时对比, 图 5 为 3 种方法定位结果平均绝对误差对比曲线。

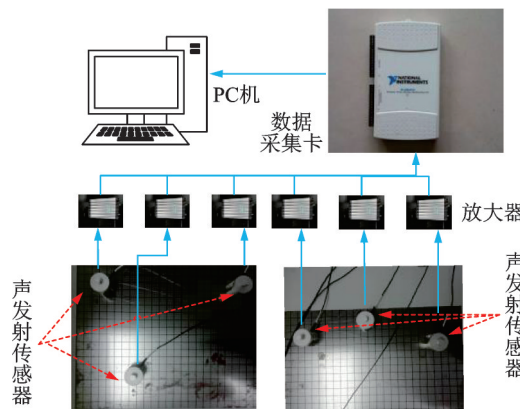


图 3 实验示意图

Fig.3 Experiment schematic

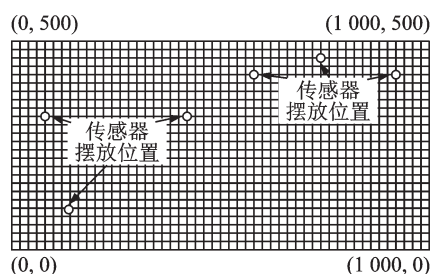


图 4 传感器位置

Fig.4 Sensor location

观察表 1~3 可知, 在所设计的 10 个案例中, 本研究所提方法的定位结果优于互相关分析方法和传

表 1 互相关分析方法结果

Tab.1 Results of cross-correlation

序号	声源实际位置/mm	定位结果/mm	绝对误差/mm	平均误差/mm
1	(20,20)	(15.7,23.2)	(4.3,3.2)	3.75
2	(180,160)	(183.3,162.6)	(3.3,2.6)	2.95
3	(340,260)	(335.2,252.9)	(4.8,7.1)	5.95
4	(600,320)	(610.9,328.5)	(10.9,8.5)	9.70
5	(900,480)	(917.1,467.4)	(17.1,12.6)	14.85
6	(40,460)	(36.7,470.6)	(3.3,10.6)	6.95
7	(860,90)	(851.2,94.1)	(8.8,4.1)	6.45
8	(500,250)	(491.5,255.1)	(8.5,5.1)	6.80
9	(500,60)	(507.2,56.4)	(7.2,3.6)	5.40
10	(500,480)	(490.4,486.9)	(9.6,6.9)	8.25

表 2 Geiger 定位方法结果

Tab.2 Results of Geiger method

序号	声源实际位置/mm	定位结果/mm	绝对误差/mm	平均误差/mm
1	(20,20)	(23.8,23.7)	(3.8,3.7)	3.75
2	(180,160)	(177.1,162.3)	(2.9,2.3)	2.60
3	(340,260)	(344.5,263.2)	(4.5,3.2)	3.85
4	(600,320)	(587.9,328.5)	(12.1,8.5)	10.30
5	(900,480)	(915.1,491.5)	(15.1,11.5)	13.30
6	(40,460)	(37.5,449.6)	(2.5,10.4)	6.45
7	(860,90)	(870.0,94.4)	(10.0,4.4)	7.20
8	(500,250)	(507.5,254.1)	(7.5,4.1)	5.80
9	(500,60)	(492.9,64.5)	(7.1,4.5)	5.80
10	(500,480)	(508.6,486.4)	(8.6,6.4)	7.50

表 3 本研究所提方法定位结果

Tab.3 Results of the proposed method

序号	声源实际位置/mm	定位结果/mm	绝对误差/mm	平均误差/mm
1	(20,20)	(23.5,22.4)	(3.5,2.4)	2.95
2	(180,160)	(182.0,163.4)	(2.0,3.4)	2.70
3	(340,260)	(335.9,257.7)	(4.1,2.3)	3.20
4	(600,320)	(590.8,314.7)	(9.2,5.3)	7.25
5	(900,480)	(912.3,490.2)	(12.3,10.2)	11.25
6	(40,460)	(42.1,450.8)	(2.1,9.2)	5.65
7	(860,90)	(852.4,92.9)	(7.6,2.9)	5.25
8	(500,250)	(506.7,246.5)	(6.7,3.5)	5.10
9	(500,60)	(506.3,63.5)	(6.3,3.5)	4.90
10	(500,480)	(492.2,486.2)	(7.8,6.2)	7.00

表 4 算法耗时

Tab.4 Algorithm elapsed time

定位方法	耗时均值/s	均方差
互相关分析	0	0
Geiger 定位	0.071	$4.5 \times 10^{-5}$
本研究所提方法	0.062	$7.9 \times 10^{-6}$

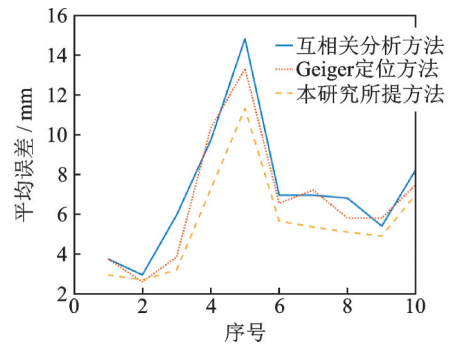


图 5 平均误差曲线

Fig.5 Mean error curve

统 Geiger 迭代方法的定位结果。在对边缘声源点定位时,最小平均误差可达 2.95 mm;对镀锌钢板中心区域声源定位时,最小平均误差可达 5.10 mm。误差均小于互相关分析方法的 3.75 mm,6.80 mm 和传统 Geiger 迭代方法的 3.75 mm,5.80 mm。

表 4 展示了 3 种定位方法运行耗时,分析可知,本研究所提方法运行耗时及其稳定性优于 Geiger 迭代定位方法,这是由于本研究所提方法采用了同伦框架改进了问题求解过程,提升了运行速度和收敛速度。同时,迭代框架的引入导致本研究算法运行耗时劣于互相关分析,但是精度的提升令人满意。

AE 源定位问题是一病态问题,输入数据的微小波动及计算误差的累积与扩散会导致计算结果的震荡,最终结果与真实值存在一定差距。观察表 1~3 及图 5 可知,由于测量结果引入了环境噪声,导致本研究所提算法在第 2 个点的精度劣于 Geiger 定位方法 0.1 mm,同时也导致 3 种方法在对第 5 个点定位时,产生了很明显的偏差。但是综合分析 10 个点的定位结果,本研究所提方法对定位精度和速度的提升令人满意。上述定量和定性分析结果揭示了本研究所提方法在求解 AE 源定位问题是可行的、精确的。

## 4 结束语

针对传统 Geiger 迭代方法在 AE 源定位中的不足,如耗时的矩阵求逆、较低的定位精度,设计了一种以传统 Geiger 迭代方法为框架,并融合了同伦理论和牛顿梯度方法的 AE 源定位算法。首先,采用互相关分析方法进行初始化,Geiger 迭代框架进行 AE 源信息更新,保障了解的精确性;其次,同伦方法将原始最小二乘问题转变成为对同伦函数的求解,避免了矩阵求逆运算,改善了算法数值性能;最后,经由同伦路径,牛顿梯度法迭代地实现了对同伦



问题至原始问题的求解,加速了算法的收敛速度。实验结果表明,本研究所提方法能够在互相关分析方法和传统 Geiger 方法的基础上进一步提高定位精度,对边缘声源点定位最小平均误差可达 2.95 mm,对中心区域声源定位最小平均误差可达 5.10 mm,是一种可靠的、可行的 AE 源定位方法。

### 参 考 文 献

- [1] EATON M J, PULLIN R, HOLFORD K M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(6): 856-863.
- [2] 彭鹏,陈李果,汪久根,等.机械磨损的检测技术综述[J].润滑与密封,2018,43(1):115-124.  
PENG Peng, CHEN Liguang, WANG Jiugen, et al. A review on detection technology of mechanical wear[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(1): 115-124. (in Chinese)
- [3] 申景诗,曾晓东,姜明顺.基于FBG和BP神经网络的声发射定位方法[J].振动、测试与诊断,2018,38(4): 816-820.  
SHEN Jingshi, ZENG Xiaodong, JIANG Mingshun. Acoustic emission localization method based on FBG and BP neural network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 816-820. (in Chinese)
- [4] 张晓涛,唐力伟,王平,等.轴承故障声发射信号多频带共振解调方法[J].振动、测试与诊断,2015,35(2): 363-368.  
ZHANG Xiaotao, TANG Liwei, WANG Ping, et al. Multi-band resonance demodulation method of bearing fault acoustic emission signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2): 363-368. (in Chinese)
- [5] LI S, ZHANG J, YAN D, et al. Leak detection and location in gas pipelines by extraction of cross spectrum of single non-dispersive guided wave modes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 255-262.
- [6] XU C, GONG P, XIE J, et al. An acoustic emission based multi-level approach to buried gas pipeline leakage localization[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 397-404.
- [7] SHEHADEH M F, ELBATRAN A H, MEHANNA A, et al. Evaluation of acoustic emission source location in long steel pipes for continuous and semi-continuous sources[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(2): 1-15.
- [8] 杨道学,赵奎,曾鹏,等.基于粒子群优化算法的未知波速声发射定位数值模拟[J].岩土力学,2019,40(S1): 494-502.  
YANG Daoxue, ZHAO Kui, ZENG Peng, et al. Numerical simulation of unknown wave velocity acoustic emission location based on particle swarm optimization algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 494-502. (in Chinese)
- [9] HUANG X H, SUN G Q, ZHANG K Y. Localisation of Geiger acoustic emission source based on all-phase analysis and several times cross-correlation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1362-1368.
- [10] GEGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only[R]. Missouri, America: Washington University in St. Louis, 1912.
- [11] BAH M, MANGA E D, BLASCO H, et al. Acoustic emission monitoring during gas permeation: a new operando diagnostic tool for porous membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 555: 88-96.
- [12] BRINGMANN B, CREMERS D, KRAHMER F, et al. The homotopy method revisited: computing solution paths of  $L_1$ -regularized problems [J]. Mathematics of Computation, 2018, 87: 2343-2364.



**第一作者简介:**童国炜,男,1988年1月生,博士、工程师。主要研究方向为数值优化、逆问题求解、人工智能及相关领域问题的模型构建和求解。曾发表《Computationally efficient image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography》(《Transactions of the Institute of Measurement and Control》2018, Vol.8)等论文。

E-mail: tongguowei188@163.com

**通信作者简介:**黄林轶,男,1984年2月生,硕士、高级工程师。主要研究方向为新一代电子信息与人工智能领域检测认证技术与标准。

E-mail: hly@ceprei.biz