

一种革新的不测速声发射源线性定位方法

杨妮¹ 芮艺超² 井庆贺³

1 重庆城投基础设施建设有限公司 2 重庆大学资源与安全学院 3 扎赉诺尔煤业有限公司

DOI:10.12238/btr.v6i3.4137

[摘要] 为降低波速时空测量误差对定位结果的影响,本文提出了一种革新的不测速声发射源线性定位方法。首先,根据到时数据和传感器坐标信息,建立无需波速的声发射源控制方程,并引入中间变量线性化控制方程;其次,推导与中间变量相关的正交投影算子,分离声源坐标和中间变量,构建中间变量的一元三次方程。最后,求解中间变量,并根据残差平方和最终确定声发射源坐标。开展模拟仿真试验,验证该方法在不同到时误差、波速误差以及声源位置下的定位有效性;试验结果表明,该方法的定位精度和稳定性均优于传统方法;例如在到时误差为 $0.2\mu\text{s}$ 时,新方法的平均定位误差仅有 1.5mm ,远低于传统定位方法的 2.2mm 和 7.0mm ;此外,模拟仿真实验也表明声源位置对定位精度和波速反演精度均有不同程度的影响,但无论声源位于何处,新方法均具有较传统方法更高的定位精度和波速反演精度。

[关键词] 声发射; 源定位; 无波速; 线性方程

中图分类号: TV 文献标识码: A

An Innovative Linear Location Method for Acoustic Emission Sources Without Velocity Measurement

Ni Yang¹ Yichao Rui² Qinghe Jing³

1 Chongqing City Construction Investment Corporation

2 School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University 3 Zhalaier Coal Industry Co., Ltd

[Abstract] To reduce the influence of spatio-temporal measurement error in wave velocity on the localization results, this paper proposes an innovative linear localization method for acoustic emission sources without the need of velocity measurement. First, based on the arrival data and sensor coordinate information, the velocity-free control equation of acoustic emission source is established, and the control equation is linearized by introducing intermediate variables; second, the orthogonal projection operator associated with the intermediate variables is derived to separate the acoustic source coordinates from the intermediate variables, and a one-dimensional cubic equation for the intermediate variable is constructed. Finally, the intermediate variable is solved and the acoustic emission source coordinates are finalized according to the residual sum of squares. Simulation experiments are carried out to verify the positioning effectiveness of the method under different arrival errors, velocity errors and source positions; the experimental results show that the positioning accuracy and stability of the method are better than that of the traditional methods; for example, when the arrival error is $0.2\mu\text{s}$, the average positioning error of the new method is only 1.5mm , which is much lower than that of the traditional method, which is 2.2mm and 7.0mm ; in addition, the simulation experiments also illustrate that the location of the acoustic source has different degrees of influence on the localization accuracy and wave velocity inversion accuracy, but the new method always has the higher localization accuracy and wave velocity inversion accuracy than the traditional method regardless of the location of the sound source.

[Key words] Acoustic emission; source location; without velocity; linear equation

引言

声发射源定位技术在结构健康监测、灾害预测等方面得到了广泛关注^[1-3]。人们提出了许多基于到时测量的定位方法^[4-6],

包括Inglada法^[7]和球面插值法^[8]。然而现有大多数方法需要预先测量波速,并假设介质波速保持恒定,不受环境因素(如应力和地质结构)的影响^[9-11]。这种假设似乎只在实验室和可控的室

内环境下成立。实际上,波速受外界条件的影响巨大,预先测定的波速与真实值之间往往存在较大偏差,并导致大的定位误差^[12-14]。例如:随着应力测试中应力的不断增加,材料裂纹不断萌生和发展,导致平均波速动态变化,此时预先测定的某一特定路径的波速往往与所有路径的平均波速存在较大差异^[15]。因此,迫切需要提出一种消除波速依赖的定位方法,以提高声发射源定位精度。

近年来,学者们提出了诸多不测波速的声发射定位方法。Das等^[16]提出了一种不需要确定材料波速的声源定位框架,通过依次更新震源位置和平均波速对声发射源进行定位。Dong等^[17]进一步提出了无需预先测定波速的多步震源定位方法,通过最小化速度区间获得更加稳定的定位结果。上述两种方法可以避免波速测量误差的影响,一定程度上提高了定位精度。然而,这些方法的代价函数都是非线性的,需要数值法进行求解,因此实时性较差;其次,这些方法需要良好的初始猜测以避免局部收敛^[18]。为克服上述问题,Yin等^[19]提出了基于“Z”形传感器簇的不测量波速的闭式解方法,提高了各向异性介质的定位精度以及定位效率。然而,该方法提供的约束较少,且对到时误差异常敏感,实用性不强。为此,Dong等^[20]在不测量平均波速的情况下,推导了长方体监测系统的声发射源解析解。然而,它们受到声发射传感器数量的限制,不能充分利用随机多传感器网络中多余的传感器。为此,美国矿产局(USBM)提出利用最小二乘原理确定声发射源位置的新方法^[21,22]。该方法通过引入中间变量对超定控制方程线性化,进而线性求解了震源坐标。更进一步,Zhou等^[23]提出了三元核密度估计的声发射源定位方法,利用每6个传感器的初步定位结果以及核密度估计函数确定了最终的声发射源坐标。然而,以上方法均忽略了源位置与中间变量间的二次约束,所构造的目标函数并不是最优的,定位结果仍存在较大偏差。此外,源位置与中间变量存在相互耦合情况,线性定位系统易产生病态和奇异,进而导致矩阵求逆困难和定位精度低的问题^[24]。

为了进一步提高定位精度,本文提出了一种革新的不测速声发射源线性定位方法。该方法首先构建无需测速的声发射源到时控制方程,并通过引入两个中间变量线性化控制方程。其次,推导关于中间变量的正交投影算子,解耦中间变量和声源位置坐标。最后,构建关于中间变量的一元三次方程,并结合残差值大小最终确定声发射源坐标。通过模拟仿真试验和分析,验证了该方法的有效性和准确性。

1 方法

假设一个三维监测系统,包含M个传感器 $S_i(x_i, y_i, z_i)$,以及声源 $\theta(x, y, z)$ 。在给定监测系统波速v的情况下,声源 θ 传播至传感器 S_i 的距离 D_i 与走时 τ_i 成正比例关系,表达式如下

$$D_i = v\tau_i = v(t_i - t_0), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中 $D_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$, t_i 表示

传感器 S_i 接收到声源信号的到时数据。

公式(1)两边同时执行平方操作,得到

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = v^2(t_i - t_0)^2, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

在不失一般性的情况下,假设第一个传感器为参考传感器,用 $i>1$ 的方程减去 $i=1$ 的方程可得

$$2(x_i - x_1)x + 2(y_i - y_1)y + 2(z_i - z_1)z + t_{i,1}^2V + 2t_{i,1}K = L_i - L_1, \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (3)$$

其中 $L_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$, $L_1 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$, $V = v^2$,

$K = t_1V$ 。附加变量V和K使得公式(1)成为线性系统。

然而由于到时误差的存在,方程两边不可能完全相等,而是存在一定的残差 ϕ_i

$$\phi_i = L_i - L_1 - 2(x_i - x_1)x - 2(y_i - y_1)y -$$

$$2(z_i - z_1)z - t_{i,1}^2V - 2t_{i,1}K, \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (4)$$

将公式(4)写成矩阵形式为

$$\phi = L - BK - CV - A\theta \quad (5)$$

其中

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_M \end{bmatrix}, \quad A = 2 \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_M & b_M & c_M \end{bmatrix}, \quad B = 2 \begin{bmatrix} d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_M \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_M \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} L_2 - L_1 \\ L_3 - L_1 \\ \vdots \\ L_M - L_1 \end{bmatrix}.$$

然而,由于系数矩阵A、B和C中的元素相差好几个数量级,线性方程组(5)总是趋近病态^[9]。此外,不合理的传感器布置也会导致某些方程的线性依赖。线性方程组的病态会导致求解困

难和定位发散。为减少线性方程组的病态性,本文引入了一个正交投影算子,用来去除由向量C的列所张成空间的分量。

$$P_B^\perp = I - B(B^T B)^{-1} B^T \quad (6)$$

其中 P_B^\perp 是一个幂等投影矩阵,满足数学关系 $P_B^{\perp 2} = P_B^\perp$, 右上角符号T和-1分别代表矩阵的转置和求逆。

将式(5)乘以 P_B^\perp , 去掉其中的参数,得到一个新的关于中间变量V的线性方程

$$\phi' = P_B^\perp \phi = P_B^\perp (L - CV - A\theta) \quad (7)$$

求解方程(7)以获得 θ 关于V的表达式为

$$\theta = (A^T P_B^\perp A)^{-1} A^T P_B^\perp (L - CV) = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} V \quad (8)$$

重新代入公式(5)求出附加变量K关于V的解析表达式为

$$K = (B^T P_A^\perp B)^{-1} B P_A^\perp (L - CV) = p_4 - q_4 V \quad (9)$$

此外,公式(5)中参量x, y, z, V和K之间还受到如下平方约束

$$(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = V \left(t_1 - \frac{K}{V} \right)^2 \quad (10)$$

将公式(8)和(9)代入约束公式(10),得到关于变量V的一元三次方程为

$$aV^3 + bV^2 + cV + d = 0 \quad (11)$$

其中

$$a = q_3^2 + q_2^2 + q_1^2, b = (2q_3z_1 + 2q_2y_1 + 2q_1x_1) - (2p_3q_3 + 2p_2q_2 + 2p_1q_1 + q_4^2), c = (x_1 - p_1)^2 + (y_1 - p_2)^2 + (z_1 - p_3)^2 + 2p_4q_4, d = -p_4^2.$$

求解一元三次方程可以得到V的3个解,只保留V>0的数学实解并代入公式(8)求得声源坐标x, y, z。然而正实数的V往往并不唯一,需要通过下式进行判断

$$\varepsilon_k = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \left(\frac{\Delta D_{i,j}}{v} - \Delta t_{i,j} \right) \quad (12)$$

其中, $\Delta D_{i,j} = D_i - D_j, \Delta t_{i,j} = t_i - t_j$ 。此时,残差最

小值对应的实时解V及其声源坐标x, y, z即为正解。

新方法的整体定位流程见图1。

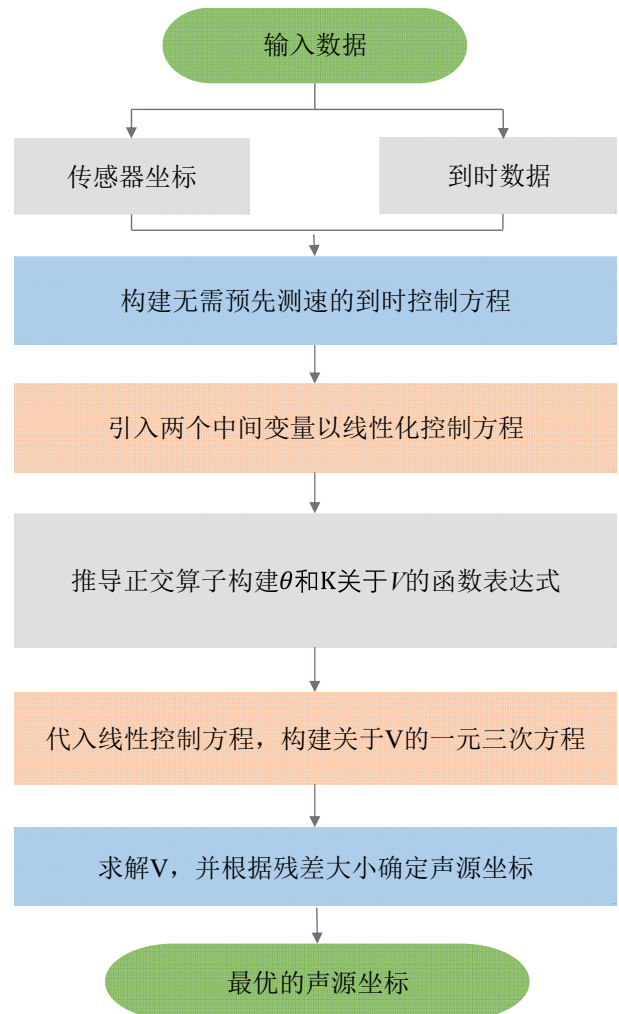


图1 新方法的整体定位流程

2 试验分析与讨论

本章节将开展模拟试验以验证新方法在不同波速误差、不同到时误差、以及不同震源位置下的定位性能。如图2所示,该系统采用一个尺寸为300mm×300mm×300mm的虚拟监测系统,并使用16个传感器进行虚拟声发射源定位,它们的具体坐标见表1。此外,将监测系统的波速设定为5000m/s,结合传感器和声源之间的距离关系生成虚拟到时数据,但该波速不作为新方法的输入参数。新方法将与无需预先测定波速的USBM方法^[21]和预先测定波速的OLS方法^[9]进行对比。由于预先测定波速的不确定性,本文向OLS方法的波速输入数据添加15%的误差,以模拟现实波速测量存在的时空误差。

2.1 不同到时误差对定位结果的影响

为了研究到时误差尺度对定位精度的影响,在到时测量值中分别加入不同尺度(标准偏差为2、4、6、8、10 μs)的到时随机误差,以模拟环境噪声等随机因素的影响。此外,为了保证定位结果更具统计性,在监测系统中随机生成100个虚拟声发射

源。图3为100个声发射源的平均定位误差。从图中可以看出，随着到时误差尺度的不断增大，新方法、USBM和OLS方法的定位误差均不同程度地上升，但新方法的定位精度上升速度最慢(仅从1.5mm增加至7.1mm)，且均小于传统USBM方法和OLS方法(分别从2.2mm和7.0mm增加至10.7mm和9.9mm)。

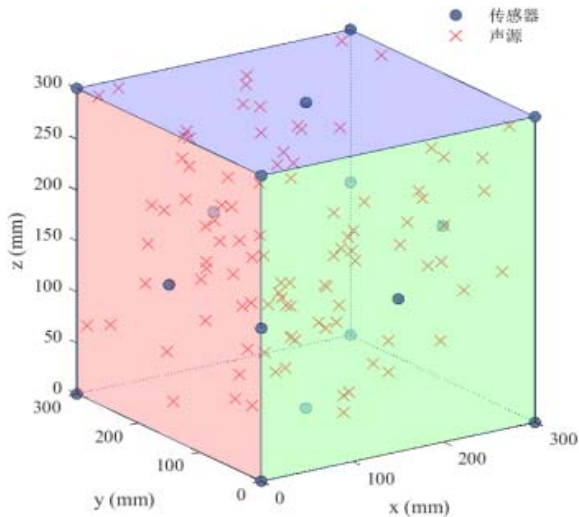


图2 模拟定位系统中传感器和声发射源的布置

表1 传感器坐标

编号	传感器坐标			编号	传感器坐标		
	x (mm)	y (mm)	z (mm)		x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	0	0	0	9	150	0	150
2	300	0	0	10	300	150	150
3	300	300	0	11	150	300	150
4	0	300	0	12	0	150	150
5	0	0	300	13	150	150	0
6	300	0	300	14	150	150	300
7	300	300	300	15	0	0	150
8	0	300	300	16	300	300	150

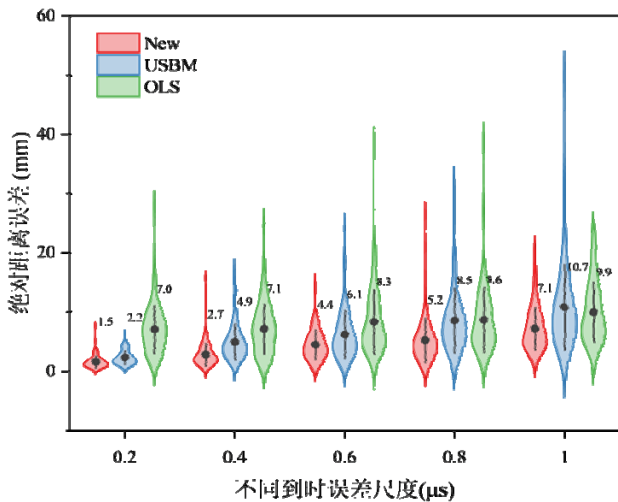


图3 不同到时误差尺度下三种方法的定位误差对比

此外，新方法和USBM方法都属于无需预先测速的定位方法，可以动态反演平均波速。图4展示了新方法和USBM方法的波速反演精度对比。从图中可以看出，随着到时误差尺度的不断增加，新方法的波速反演误差始终处于最低的位置，且仅从23m/s增加至110m/s，而USBM方法的波速反演误差则从82m/s迅速增加至613m/s。

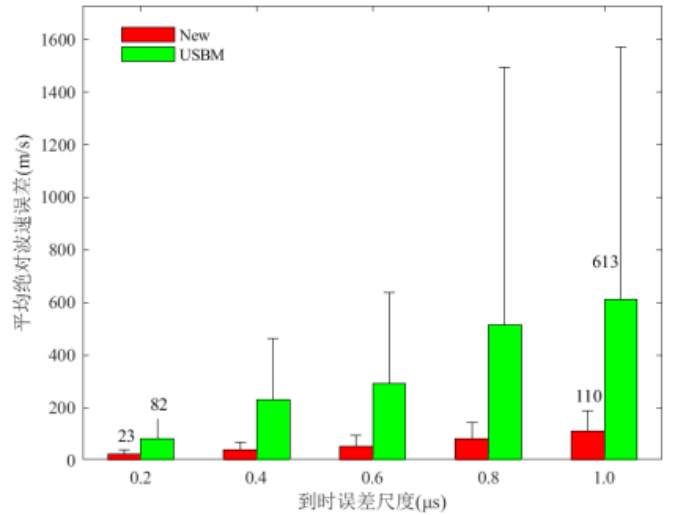


图4 不同到时误差尺度下不同方法的波速反演误差对比

2.2 不同波速误差对定位结果的影响

此外，为研究不同波速误差对定位精度的影响，本章节向波速数据中分别添加10%到50%的误差。图5展示了不同波速误差下三种方法的定位精度对比。从图中可以看出，随着波速误差的不断增大，OLS方法的定位精度迅速下降；而新方法和USBM方法的定位精度始终处于稳定状态，这是由于这两种定位方法不需要波速测量作为定位的输入参数，因此定位结果始终处于稳定状态。此外，虽然新方法和USBM方法在不同波速误差下始终保持稳定，但新方法的定位精度却始终高于USBM方法。

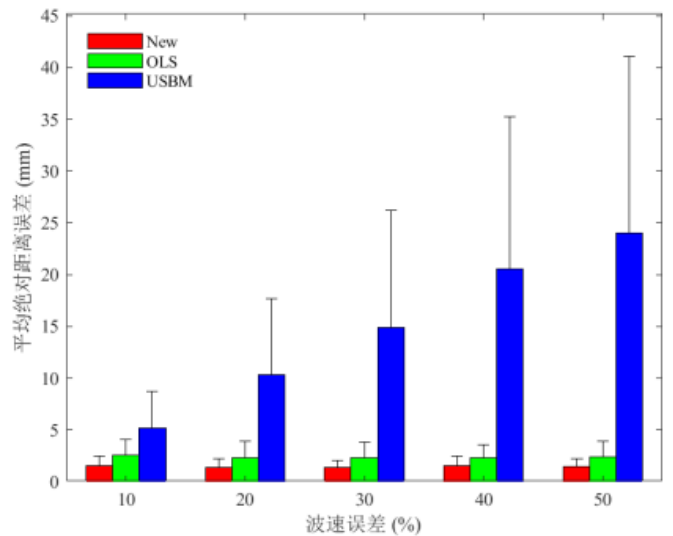


图5 不同波速误差下三种方法的定位误差对比

2.3 不同传感器位置对定位精度的影响

为研究不同震源位置下新方法的定位性能。以上述监测系统为基础,在系统内部和外部分别添加如图6所示的两个声发射源,它们的坐标分别为(160, 130, 170)和(400, 160, 430),单位mm。向监测系统的模拟到时数据中继续添加标准差为 $0.2\ \mu\text{s}$ 的随机误差,以模拟环境噪音的干扰。图7展示了不同声源位置下三种方法的平均定位误差,从图中可以看出对于传感器阵列内部的声发射源,三种定位方法的定位精度均远高于外部的声发射源;这是因为传感器阵列内部的震源双曲线密度远高于传感器阵列外部,因此传感器阵列内部的定位精度往往更高;此外,无论声源位于传感器阵列内部还是外部,新方法的定位精度均远小于USBM和OLS方法。图8则对比了不同声源位置下不同方法的波速反演误差。从图中可以看出,传感器阵列内部声源的平均波速反演误差远大于传感器阵列外部声源的平均波速反演误差;这与声源定位结果恰好相反,这是因为传感器阵列内部的波速场密度小于传感器阵列外部的波速场密度。但无论声发射源位于阵列内部还是外部,新方法的波速反演精度均远高于传统方法。

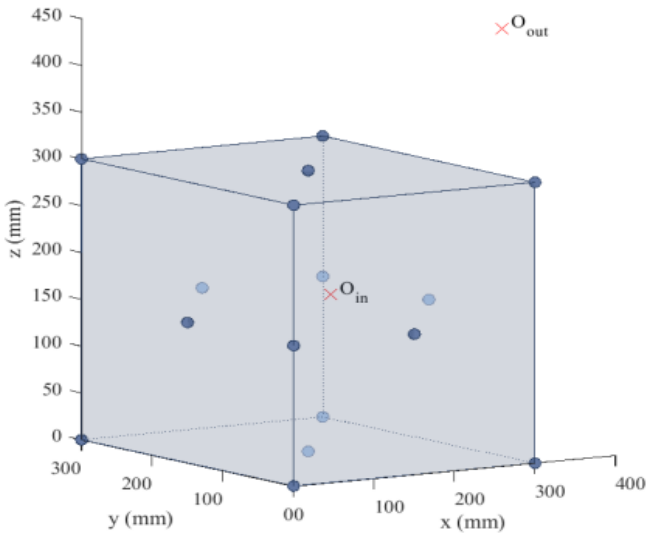


图6 模拟系统中传感器位置分布和系统内外声源的分布情况

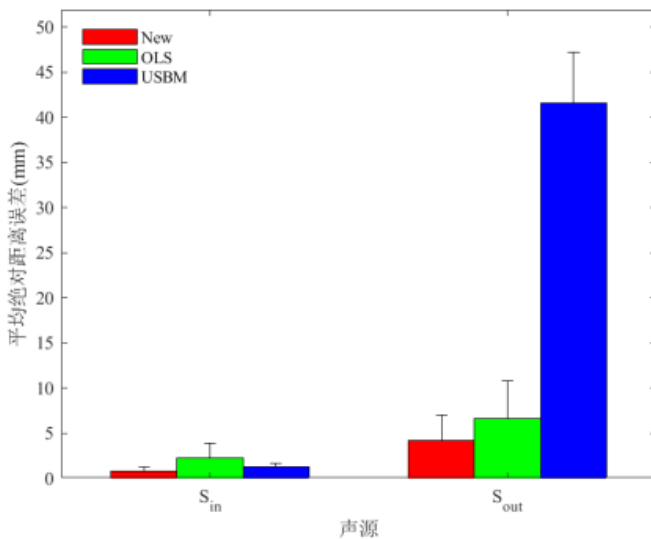


图7 不同声源位置下三种不同方法的平均定位误差比较

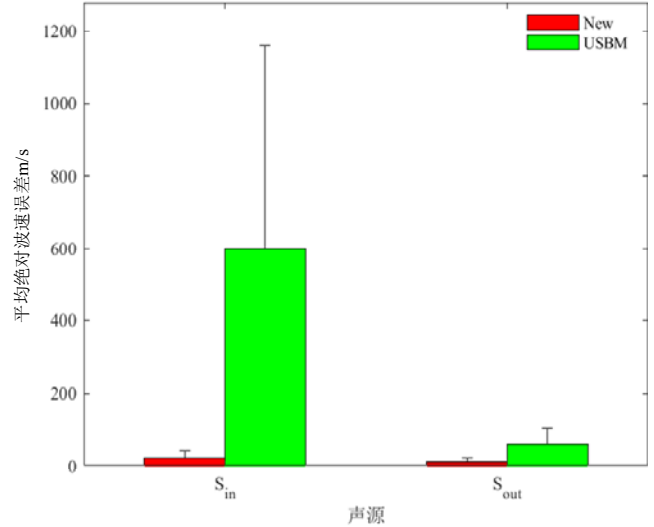


图8 不同声源位置下两种方法的波速反演误差对比

3 结论

本文提出了一种革新的无需测定波速的声发射源线性定位方法。该方法的优点是:(1)不需要输入声速数据,在进行声源定位时可以实时反演准确的平均波速;(2)考虑了声源坐标与中间变量的平方约束,进一步提高了定位精度;(3)采用了最小残差判据,避免了无解和多解情况;(4)引入了正交投影算子,简化了线性系统的病态性。通过模拟仿真试验验证了新方法的定位性能;试验结果表明,在不同噪声尺度下,新方法的定位结果和波速反演精度始终具有较传统方法更高的抗噪性;对不同位置的声发射源的模拟结果表明:传感器阵列内部的声源较外部声源具有更高的定位精度,但具有更低的波速反演精度;但无论声源的位置如何,新方法始终具有更高的定位精度和波速反演精度。

[参考文献]

[1]Liu T, Han C, Wang Q L, et al. A method of acoustic emission source location for engine fault based on time difference matrix[J].Structural Health Monitoring,2023,22(1):621-638.

[2]赵兴东,周鑫,赵一凡.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.

[3]刘强,魏晋宏,孟巧荣.煤矿微震监测定位系统的设计与研究[J].煤炭技术,2022,41(8):203-207.

[4]李翔,徐奴文.微震震源定位研究现状及展望[J].地球物理学进展,2020,35(02):598-607.

[5]Hassan F,Mahmood A K B, Yahya N,等.State-of-the-art review on the acoustic emission source localization techniques[J].IEEE Access,2021,9:101246-101266.

[6]Dong L,Zou W, Sun D, et al. Some developments and new insights for microseismic/acoustic emission source localization [J].Shock and Vibration,2019,2019:9732606.

[7]Inglada V. The calculation of the stove coordinates of

- a nahbebens[J]. *Gerlands Beitrage Zur Geophysik*, 1928, 19: 73–98.
- [8] Smith J O, Abel J S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1987, 35(12): 1661–1669.
- [9] Zhou Z, Rui Y, Zhou J, et al. A new closed-form solution for acoustic emission source location in the presence of outliers[J]. *Applied Sciences–Basel*, 2018, 8(6): 949.
- [10] Rui Y, Zhou Z, Lu J, et al. A novel ae source localization method using clustering detection to eliminate abnormal arrivals[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(1): 51–62.
- [11] Zhou Z, Rui Y, Zhou J, et al. Locating an acoustic emission source in multilayered media based on the refraction path method[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 25090–25099.
- [12] Li Q, Dong L, Li X, et al. Effects of sonic speed on location accuracy of acoustic emission source in rocks[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2011, 21(12): 2719–2726.
- [13] Zhou Z, Rui Y, Cai X, et al. Constrained total least squares method using tdoa measurements for jointly estimating acoustic emission source and wave velocity[J]. *Measurement*, 2021, 182: 109758.
- [14] Zhou Z, Rui Y, Cai X. A novel linear-correction localization method of acoustic emission source for velocity-free system[J]. *Ultrasonics*, 2021, 115: 106458.
- [15] Rui Y, Zhou Z, Cai X, et al. A novel robust method for acoustic emission source location using dbSCAN principle[J]. *Measurement*, 2022, 191: 110812.
- [16] Das A K, Lai T T, Chan C W, et al. A new non-linear framework for localization of acoustic sources[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(2): 590–601.
- [17] Dong L, Shu W, Han G, et al. A multi-step source localization method with narrowing velocity interval of cyber-physical systems in buildings[J]. *IEEE Access*, 2017, 5(c): 20207–20219.
- [18] 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.
- [19] Yin S, Cui Z, Kundu T. Acoustic source localization in anisotropic plates with “z” shaped sensor clusters[J]. *Ultrasonics*, 2018, 84: 34–37.
- [20] Dong L, Li X, Zhou Z, et al. Three-dimensional analytical solution of acoustic emission source location for cuboid monitoring network without pre-measured wave velocity[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 293–302.
- [21] Leighton F, Blake W. Rock noise source location techniques[M]. *U S Bur Mines, Rep Invest 7432*. US Department of the Interior Information, Bureau of Mines, 1970.
- [22] Ge M. Analysis of source location algorithms part i: overview and non-iterative methods[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2003, 21: 14–28.
- [23] Zhou Z, Lan R, Rui Y, et al. A new acoustic emission source location method using tri-variate kernel density estimator[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(19105568): 158379–158388.
- [24] Zhou Z, Rui Y, Cai X, et al. A closed-form method of acoustic emission source location for velocity-free system using complete tdoa measurements[J]. *Sensors (Switzerland)*, 2020, 20(12): 3553.