

文章编号: 1005-0523(2024)05-0105-10



基于稀疏矢量声阵列的噪声源识别方法研究

景文倩^{1,2,3}, 曾相龙², 叶玲^{1,2}

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013; 3. 安徽建筑大学安徽省建筑声环境重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要:【目的】为了提高质点振速的重建精度, 保证声源识别的准确性, 【方法】采用质点振速测量替代传统的声压测量, 然后将矢量传感器与稀疏采样及稀疏正则化相结合, 建立一个基于稀疏矢量声阵列的压缩等效源-近场声全息技术模型(CESM-v), 并开展数值仿真和实验研究。通过质点振速重建、等效源源强重建、误差计算等多角度分析, 将文章提出的CESM-v模型与传统的等效源-近场声全息技术(ESM)模型和现有的CESM-p模型进行对比。【结果】CESM-v模型总是优于另外两个模型, 在稀疏采样条件下可获得媲美传统ESM充足采样条件下的质点振速重建效果, 且比CESM-p模型具有更高更稳定的质点振速重建精度。仿真和实验结果均表明, CESM-v模型具有更好的稳定性和可靠性, 在少量采样点条件下依然可获得较好的质点振速重建结果, 从而保证声源识别的准确性。【结论】凭借优越的声场重构稳健性, CESM-v模型可推广至轨道交通等实际工程中, 应用于噪声源识别及故障诊断。

关键词: 噪声源识别; 稀疏矢量声阵列; 质点振速测量; 压缩感知; 近场声全息; 等效源法

中图分类号: U216; TB535

文献标志码: A

本文引用格式: 景文倩, 曾相龙, 叶玲. 基于稀疏矢量声阵列的噪声源识别方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 105-114.

Research on Noise Source Identification Method Based on Sparse Vector Acoustic Array

Jing Wenqian^{1,2,3}, Zeng Xianglong², Ye Ling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Key Laboratory of Architectural Acoustic Environment of Anhui Higher Education Institutes,

Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: 【Objective】In order to improve the reconstruction accuracy of the particle velocity and ensure the accuracy of source identification, 【Method】this paper proposes a compressed equivalent source based-NAH model with the sparse acoustic vector sensor array CESM-v by substituting the particle velocity measurement for the traditional pressure measurement and combining the acoustic vector sensor with the sparse sampling and sparse regularization. Several numerical simulations and experiments were carried out to exam the efficiency of the proposed model. Through multiple analysis of the particle velocity reconstruction, the equivalent source strength reconstruction and the error calculation, the proposed CESM-v model was compared with the traditional equivalent source based-NAH with particle velocity measurement (ESM-v) and the existed CESM-p model. 【Results】The

收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(12264015); 江西省“双千计划”引进类创新领军人才长期(青年)项目(jxsq2023101062); 江西省自然科学基金资助项目(20242BAB25036); 安徽省建筑声环境重点实验室开放课题基金项目(AAE2023G01)

proposed CESM-v model always performs better than the other two models. Even though using sparse sampling, the CESM-v model can generate comparable effect of the particle velocity reconstruction to that of traditional ESM with adequate sampling, and can give higher and more stable accuracy in particle velocity reconstruction than that of the CESM-p model. In short, both simulation and experimental results show that the CESM-v model has better stability and reliability, can obtain good particle velocity reconstruction results with a small number of sampling points, and then the accuracy of sound source identification can be ensured. **[Conclusion]** With the robustness of sound field reconstruction, the CESM-v model can be extended to practical projects such as rail transportation for noise source identification and fault diagnosis.

Key words: noise source identification; sparse vector acoustic array; particle velocity measurement; compressed sensing; near-field acoustic holography; equivalent source method

Citation format: JING W Q, ZENG X L, YE L. Research on noise source identification method based on sparse vector acoustic array[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 105–114.

【研究意义】随着轨道交通系统的复杂性增加, 确保其运行安全可靠成为首要任务。在此背景下, 故障诊断技术的作用尤为重要, 它能够实时监测和评估系统中的异常状态, 预防可能的故障发生。近年来出现了很多故障诊断技术, 包括多尺度符号动力学故障诊断方法^[1]、自编码器在故障诊断技术中的应用^[2]、基于数据驱动的故障诊断技术^[3]、基于深度学习的故障诊断方法^[4]等。声源识别技术作为一种新兴的故障诊断方法, 正日益显示出其独特价值。

【研究进展】近场声全息技术(near-field acoustic holography, NAH)^[5-6]是一种非常有效的声源识别技术。它通过测量声源附近的声压或质点振速, 利用声波的传播特性, 结合计算机算法和信号处理技术, 可以重构三维空间中任意点的声场, 进而实现对复杂声场环境的精确描述和分析, 可应用于轨道交通中进行故障诊断和识别。但传统的NAH技术采集声场信息时需要大量的采样点数目, 导致需要高额的测量成本。

随着压缩感知(compressed sensing, CS)理论的提出和广泛应用, 有学者将其应用于近场声全息(NAH)中, 在减少采样点的同时保证较高重建精度^[7]。CS理论被应用于基于等效源法(equivalent source method, ESM)的NAH技术中, 建立基于压缩等效源法(compressed ESM, CESM)的NAH技术, 与传统ESM相比精度更高。但CESM应用前提是要求待重建信号稀疏, 若声源在空间上连续分

布, 需构建声源信号稀疏基。针对此问题, Bi等通过ESM得出等效声源强度的声辐射模态作为稀疏基础, 提出压缩模态ESM^[8]。Liu等进一步利用CESM和压缩模态ESM的正交基函数构建等效声源强度的冗余字典作为稀疏基础, 提高了该技术对不同类型源的适用性, 重建结果更稳定准确^[9]。Liu和Bi等使用边界元法推导声辐射模式作为稀疏基础重建振动体表面质点速度, 在采样点数量较少时仍能获得较高速度重建精度^[10-11]。对于空间分布声源, Hald比较了CESM及其各种改进算法, 给出各种算法对不同类型声源的适用性^[12]。刘袁等在此基础上提出一种基于数据驱动的声源表面振速的稀疏恢复方法, 该方法首先采用等效源通过数值仿真得到振速的数据样本, 然后利用数据样本通过K-SVD字典训练方法构建振速的稀疏基, 最后通过稀疏正则化实现从有限的测量数据中恢复整个声源表面的振速^[13]。

然而, 上述大部分模型都是基于声压的测量和重建, 当需要重建质点振速时, 基于声压测量的模型无法保证足够的精度。为了解决这个问题, 张永斌等^[14]提出了基于质点振速测量的近场声全息技术。随后, 张永斌^[15]将等效源法与基于质点振速测量的近场声全息技术结合起来, 验证了基于质点振速测量的ESM模型在重建质点振速中的优越性。

综合CS理论和质点振速测量两者优势, Jing等^[16]提出一种基于稀疏质点振速测量的压缩等效源法(CESM-v), 并将其与传统的基于稀疏声压测

量的CESM-p模型进行对比,发现CESM-v在重建声场时展现出非常优越的重构性能,尤其是重建质点振速时。但是该研究只关注了数值仿真分析,略显单薄和不足,对该技术在实际工程应用中的参考价值不高。

【创新特色】本文以声学矢量探头为测量传感器,通过移动扫描立杆和夹具架实现全息面上质点振速扫描测量,搭建稀疏矢量声阵列,建立基于此阵列的压缩等效源-近场声全息技术模型,并综合考虑理论、数值仿真与实验研究的印证关系,为该技术在轨道交通实际应用奠定基础。

【关键问题】本文关键在于采用声学矢量探头搭建稀疏矢量声阵列(图1),保证测量矩阵和稀疏基的非相关性,利用该阵列对质点振速进行单测量面稀疏采样并开展实验研究;同时搭建单测量面数值仿真模型,对标实验中的单测量面检验方法以验证其有效性。本文研究有助于优化和完善NAH技术理论,与现有模型配合可在各种声源或声环境中发挥声源识别与定位作用,促进低成本精确识别定位声源及故障诊断技术在实际工程中的推广应用。

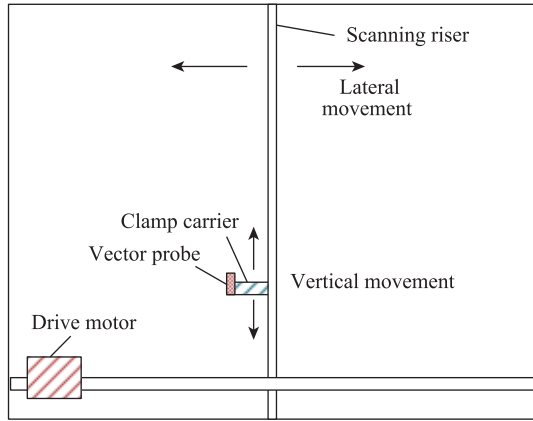


图1 稀疏矢量声阵列搭建示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the construction of sparse acoustic vector sensor array

1 理论背景

等效源法(equivalent source method, ESM)的核心原理是将目标声场等效为许多单一声源所辐射声场的叠加。考虑某声源的近场区域,某点 r_{hm} 处的声压可通过下式计算

$$p(r_{hm}) = j\rho_0\omega \sum_{i=1}^I q(r_{oi})g_p(r_{hm}, r_{oi}) \quad (1)$$

式中: j 为虚数单位; ρ_0 为介质密度; $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率; r_{oi} 为虚源面 o 上第 i 个等效声源的空间坐标; $q(r_{oi})$ 为虚源面 o 上第 i 个等效声源的声强; I 为虚源面 o 上等效声源的个数; $g_p(r_{hm}, r_{oi})$ 为全息面 h 上第 m 个测量点 r_{hm} 与等效声源 r_{oi} 之间的声压传递函数,通常用格林函数来描述

$$g_p(r_{hm}, r_{oi}) = \frac{e^{jk|r_{hm} - r_{oi}|}}{4\pi|r_{hm} - r_{oi}|} \quad (2)$$

式中: $k = \omega/c$ 为波数, c 是介质中的声速。

假如测量表面有多个测量点,则式(1)可用矩阵表示为

$$\mathbf{P}_h = \mathbf{G}_{hp}\mathbf{Q}_o \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P}_h = [p(r_{h1}), \dots, p(r_{hm}), \dots, p(r_{hM})]^T$ 为测量面的声压向量; $\mathbf{G}_{hp}$ 由 $G_{hp}(m, i) = j\rho_0\omega g_p(r_{hm}, r_{oi})$ 组成,表示等效源与测量面声压之间的传递矩阵; $\mathbf{Q}_o = [q(r_{o1}), \dots, q(r_{oi}), \dots, q(r_{oI})]^T$ 为等效源源强向量。

类似式(1),如果在给定声源的近场区域的某点 r_{hm} 上放置一个矢量传感器,则可测得该点处的质点振速为

$$v(r_{hm}) = \sum_{i=1}^I q(r_{oi})g_v(r_{hm}, r_{oi}) \quad (4)$$

式中: $g_v(r_{hm}, r_{oi})$ 为测量点 r_{hm} 与等效声源 r_{oi} 的质点振速传递函数,可通过对式(2)求导得到

$$g_v(r_{hm}, r_{oi}) = \frac{(1 - jk|r_{hm} - r_{oi}|)e^{jk|r_{hm} - r_{oi}|}}{4\pi|r_{hm} - r_{oi}|^2} \quad (5)$$

若考虑 M 个采样点,式(4)中的质点振速是一个矢量,可表示为

$$\mathbf{V}_h = \mathbf{G}_{hv}\mathbf{Q}_o \quad (6)$$

式中: $\mathbf{V}_h = [v(r_{h1}), \dots, v(r_{hm}), \dots, v(r_{hM})]^T$ 是测量面的质点振速向量; $\mathbf{G}_{hv}$ 为等效源和重建面法向振速的传递矩阵,它由 $G_{hv}(m, i) = g_v(r_{hm}, r_{oi})\cos\theta_{mi}$ 。这里的 $\cos\theta_{mi}$ 可被视为一个方向因子,用于获取质点振速的法向分量,可表示为

$$\cos\theta_{mi} = \frac{r_{hm} - r_{oi}}{|r_{hm} - r_{oi}|} \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

式中: θ_{mi} 为 r_{hm} 处的质点振速方向与测量面法线方向的夹角; $\mathbf{n}$ 为测量面上的单位法向量。

根据测量到的质点振速 $\mathbf{V}_h$ 和构建的传递矩阵 $\mathbf{G}_{hv}$,可由式(6)求解源强度列向量 $\mathbf{Q}_o$ 。对于传统的ESM,可通过 l_2 范数最小化来求解

$$\arg \min_{\mathbf{Q}_o} \|\mathbf{Q}_o\|_2 \text{ subject to } \|\mathbf{V}_h - \mathbf{G}_{hv}\mathbf{Q}_o\|_2^2 \leq \varepsilon \quad (8)$$

式中: ε 为一个和噪声有关的误差项。

但该求解过程属于声学逆问题,测量噪声很容易导致误差放大,通常采用Tikhonov正则化来稳定求解过程,以减少测量误差的影响。

$$\arg \min_{\mathbf{Q}_o} \|\mathbf{V}_h - \mathbf{G}_{hv} \mathbf{Q}_o\|_2 + \lambda \|\mathbf{Q}_o\|_2^2 \quad (9)$$

式中: λ 为正则化参数。

若待求解声源具有稀疏特性,则可以采用稀疏矢量阵列测量质点振速,并采用稀疏正则化方法,通过求解 l_1 范数最小化来获得稀疏源强向量

$$\arg \min_{\mathbf{Q}_o} \|\mathbf{Q}_o\|_1 \text{ subject to } \|\mathbf{V}_h - \mathbf{G}_{hv} \mathbf{Q}_o\|_2^2 \leq \varepsilon \quad (10)$$

将求解的稀疏源强代入式(1)和式(4),即可获得任意点处的声压和质点振速。这里由式(4)~式(7)和式(10)所构建的模型即为基于稀疏矢量声阵列的压缩等效源方法模型,记为CESM-v。

2 数值仿真研究

考虑到测量条件有限及控制成本,本文开展单测量面实验研究。由于重建面无测量值作为参考值,无法用传统双测量面检验方法检验模型有效性和稳定性。所以,本文提出单测量面检验方法,以成熟稳定的理论模型为标准,用标准模型计算的重建面值作为参考值,对所建立模型的计算值进行评估和检验,其工作原理如图2所示。传统的基于质点振速测量与Tikhonov正则化的ESM,即ESM-v,是一种非常成熟且性能稳定的方法模型,可以提供较高的质点振速重建精度,因此这里将采用ESM-v模型作为标准,以其计算的重建面上质点振速作为参考值,如图2所示。

在数值仿真实验中,使用一个半径为0.05 m的脉动球体作为声源。以脉动球声源中心为原点,建立直角坐标系。测量面平行于xoy平面,距离声源0.07 m,测量面网格点在x和y方向上均分布在-0.25~0.25 m,网格间隔为0.05 m,即测量面共有121个网格点。

测量面上法向质点振速可用以下表达式计算

$$v = v_0 \frac{(jkR - 1)a_0^2}{(jka_0 - 1)R^2} e^{jk(R - a_0)} \cos \theta \quad (11)$$

式中: v_0 为径向速度; a_0 为脉动球的半径; R 为测量点与球源中心之间的距离; θ 为测量点的质点振速与测量面法线方向的夹角。这里 $v_0 = 1$ m/s, R 可以很容易地从测量点坐标中得到, $\cos \theta$ 可以用式(7)计算。为了模拟实际测量情况,在式(11)计算的测

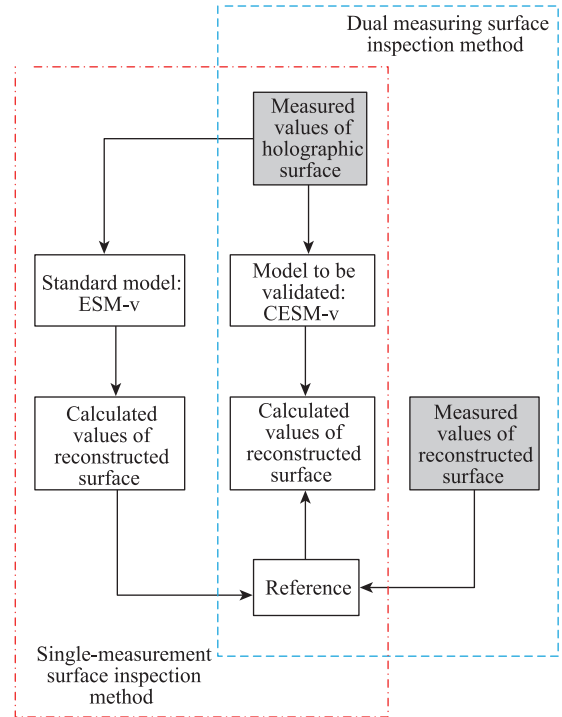


图2 单测量面与双测量面检验方法工作原理流程图
Fig. 2 Principle flowchat of single-layer and double-layer measurement evaluation methods

量面法向质点振速信号中添加信噪比为30 dB的高斯白噪声。

由于CESM-v模型是基于质点振速的稀疏采样,因此只需从测量面上121个网格点中选择少量采样点即可。为了满足测量矩阵和稀疏基的非相关性要求,一般通过随机布置传感器来达成。这里从测量面上121个网格点中随机选择60个采样点,形成了一个不规则的稀疏矢量声阵列,如图3所示。

在稀疏采样的情况下,使用CESM-v模型重建频率为500 Hz的质点振速,结果如图4(d)所示。这里重建面的大小尺寸与全息面一致,即x和y的范围都是-0.25~0.25 m,故重建格点有121个。为了便于分析比较,还分别采用了ESM-v(参考)、ESM-v-60和CESM-p(对照组)3种模型对质点振速进行了重建,结果如图4(a)、图4(b)和图4(c)所示。这里ESM-v-60表示模型采用了基于Tikhonov正则化的传统ESM-v理论,但其采样条件与CESM-p和CESM-v保持一致,故只有60个采样点。从图中可以明显地看出,使用CESM-v(图4(d))模型重建结果良好,峰值明显,分辨率高,定位清晰,与参考结果(图4(a))一致,且其图像分布甚至比参考结果更

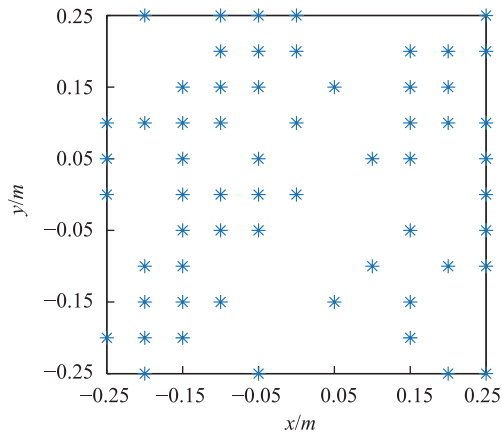


图3 60个随机采样点形成的矢量声阵列

Fig. 3 The acoustic vector array formed by 60 random sampling points

光滑;而使用CESM-p(图4(c))重建的结果则不太理想,其图像可以定位出真实峰值,但分布不光滑,且周围出现一些伪峰;ESM-v-60(图4(b))的重建结果则更不理想,峰值模糊,无法准确识别出其真实位置,说明采用基于Tikhonov正则化的传统

ESM-v理论时,采样点不足会造成重建结果较差甚至可能失效。这些结果证明,本文所提CESM-v模型不仅有效可行,且高效高精度:相比于CESM-p,在重建质点振速上更有优势;相较于传统的ESM-v, CESM-v在少量采样点情况下依然可以保证高精度重建。

为了更直观地比较这几个模型的重建结果,图5给出了质点振速的重建误差。这里质点振速的重建误差定义为

$$E = \frac{\|v_r - v_p\|_2}{\|v_p\|_2} \times 100\% \quad (12)$$

式中: v_r 为待评估的重建质点振速; v_p 为采用传统的ESM-v模型计算的参考质点振速。

从图5可以很容易发现, CESM-v的重建误差为17.63%,而CESM-p和ESM-v-60的重建误差分别高达54.99%和65.84%,更直观地表明CESM-v模型的确比另外两个模型具有更好的质点振速重构性能。

为了进一步研究CESM-v的优越性,图6和图7

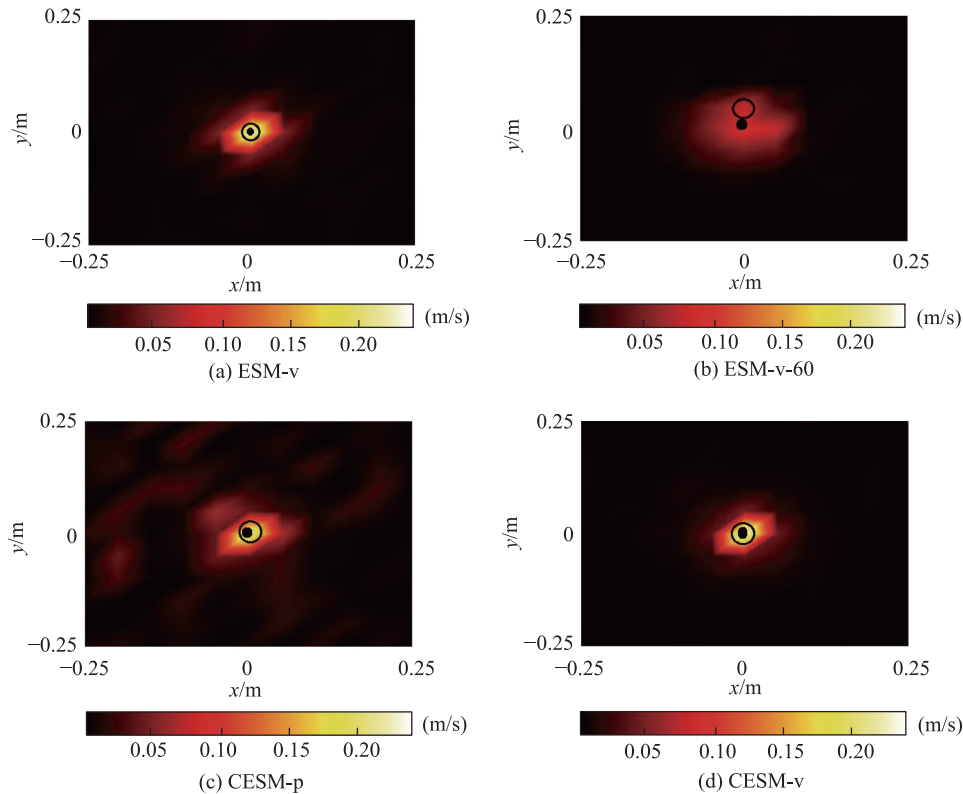


图4 采用4种模型重建的质点振速

Fig. 4 Particle velocity reconstructed by 4 models

Note: • marked the real position of the source ○ marked the identified position of the source.

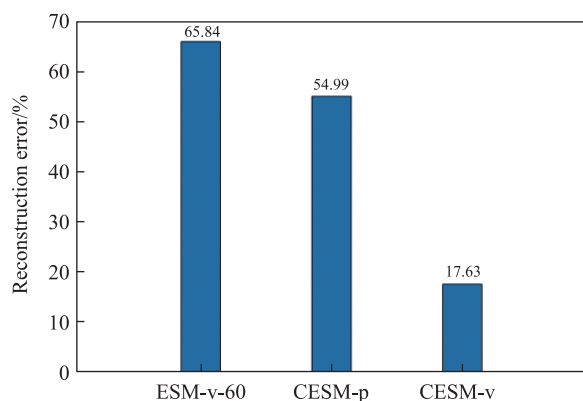


图5 质点振速重建误差

Fig. 5 Reconstruction error of the particle velocity

分别给出了使用这4种模型得到的声源等效源源强。注意:这里重建的声源等效源源强分布与重建面一致,故亦有121个格点。从图6中可以看出,使用CESM-v得到的等效源源强只显示了一个陡峭峰

值,几乎没有旁瓣;而使用CESM-p所得等效源源强除了一个陡峭峰值外,还有一些峰值较小的旁瓣,可能识别出一些伪声源。这说明使用CESM-v获得的源强在空间上分布相对集中,那么利用所得源强进一步重建质点振速时,则可以更加准确地识别出声源位置,因而CESM-v模型比CESM-p模型更具有优势。然后观察图7,发现使用ESM-v-60得到的源强在真实峰值两旁有2个比较明显的次峰旁瓣(图7(a)),这2个次峰旁瓣很容易削弱真实峰值,导致真实声源识别不清;而使用ESM-v得到的源强要好得多,呈现出一个明显的尖峰和一些平缓的小起伏(图7(b)),但相比于CESM-v(图6(b)),其源强分布并不是很光滑。

图6和图7的分析结果与图4的重建结果完全一致,再次说明CESM-v在质点振速重建方面表现优越,且即使采样点足够,传统的ESM-v也并不一定能达到CESM-v在少量采样点情况下获得的重建

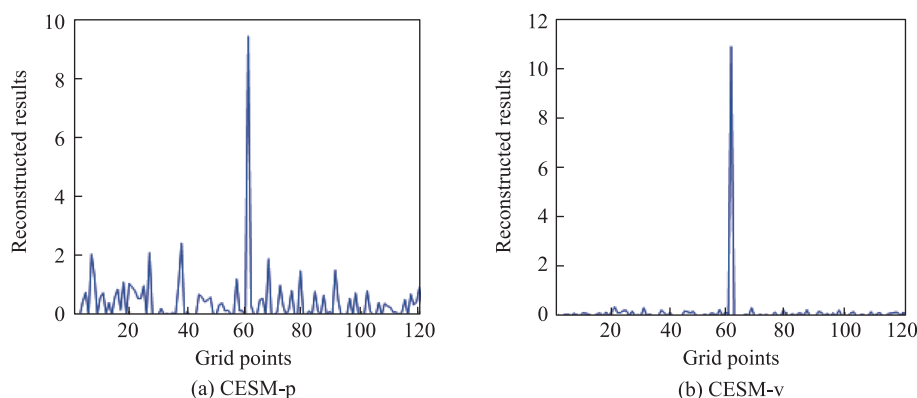


图6 CESM模型重建的等效源源强

Fig. 6 Equivalent source strength obtained from CESM model reconstruction

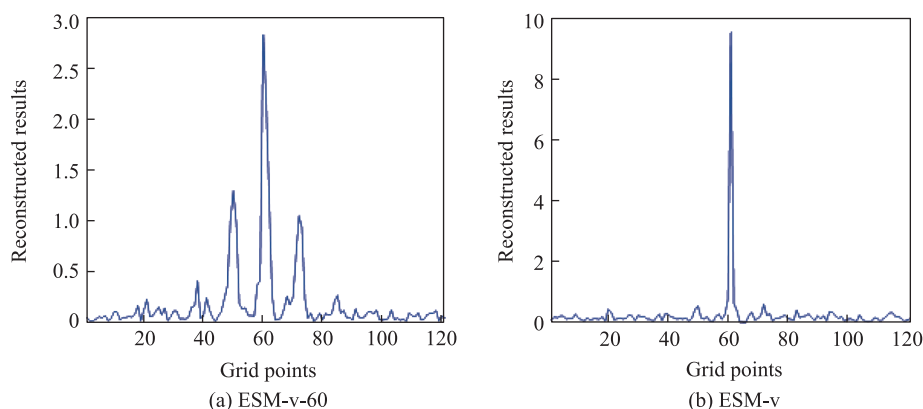


图7 ESM模型重建的等效源源强

Fig. 7 Equivalent source strength obtained from ESM model reconstruction

效果。

此外,以 ESM-v 模型为参考,图 8 给出了 ESM-v-60、CESM-p、CESM-v 这 3 种模型的质点振速重建误差频响曲线。从图中可发现,ESM-v-60 的重建误差较大,重建精度极其不稳定,这是由于采样点不足;CESM-p 的重建误差也比较大,但整体曲线变化随着频率的增大而减小,这是受传递函数矩阵的条件数所影响,详细分析可参阅文献[16];而 CESM-v 的重建误差比较小且非常稳定,在整个频段范围内均低于 23%。

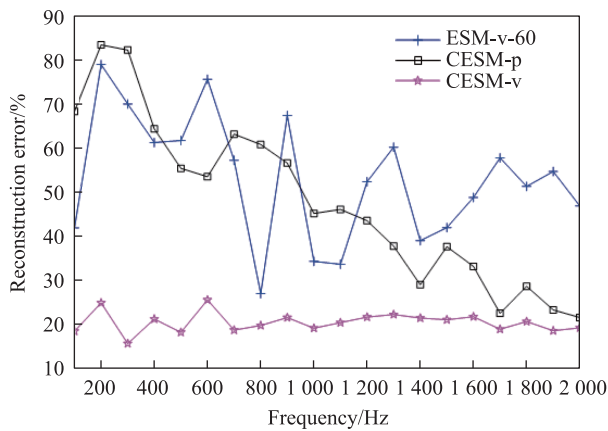


图 8 质点振速重建误差频响曲线

Fig. 8 Reconstruction errors of the particle velocity versus frequency

综上所述结果和分析,本文所提出的 CESM-v 模型相比现有模型在重建质点振速上有明显的优越性,表现出很高的准确性和很强的鲁棒性。

3 实验研究

为进一步验证 CESM-v 模型在声场重建中的有效性、准确性和优越性,以一个音箱声源为研究对象在半消声室开展实验。以测量面为 xoy 平面,中心为坐标原点建立直角坐标系,测量面位于 $z=0$ 处, x 和 y 方向测量网格点间隔为 0.06 m,共 121 个网格点。音箱声源位于 $(-0.12, 0, 0.12)$ m 处。采用声学矢量传感器扫描测量全息面上的网格点,搭建稀疏矢量声阵列,同时测得声场中的声压和法向质点振速。

根据数值仿真部分的分析和讨论,本节实验部分继续采用 ESM-v 模型作为标准,以其计算的重建面上质点振速作为参考值,对 CESM-v 模型的有效性和准确性进行检验,并通过与 ESM-v-60 和 CESM-p 两种模型对比,衡量 CESM-v 模型的优

越性。

为了方便采用 ESM-v 模型重建质点振速,实验过程中扫描测量了 121 个网格点,以保证获得足够的全息数据。由于 ESM-v-60、CESM-p 和 CESM-v 这 3 种模型是利用稀疏声阵列采样,因此只需从测量的 121 个网格点数据中选择少量采样点数据即可。类似数值仿真部分,这里随机选择 60 个采样点,形成一个不规则的稀疏矢量声阵列,从而测得 60 个采样点处的声压和法向质点振速。

根据测得的声压和法向质点振速,分别采用 ESM-v、ESM-v-60、CESM-p 和 CESM-v 共 4 种模型对质点振速进行重建,结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,除了 ESM-v-60,另 3 种模型基本都能识别出峰值,定位出真实的声源位置,但定位精度却存在微小差异。注意与数值仿真的参数不同,这里的声源中心位置位于 $(-0.12, 0)$ m 处,并不是在中心位置 $(0, 0)$ 处。其中,使用 CESM-v(图 9(d))模型重建的结果与参考结果(图 9(a))吻合最好,光斑最亮,峰值最大,但定位精度并不是很理想。这一结果似乎与预期不太一致,实则是因为实验所用音箱声源并不是理想的单极子声源,故而音箱中心点周围可能存在其他噪点,导致峰值并不唯一,可能有旁瓣影响,这在图 10~图 12 中可以得到验证。另一方面,使用 CESM-p(图 9(c))重建的结果与参考结果差异相对明显,光斑不够明亮,峰值略小;而使用 ESM-v-60(图 9(b))重建的结果最差,峰值模糊,旁瓣太大。

图 10~图 12 分别对比了采用 ESM-v-60、CESM-p 和 CESM-v 共 3 种模型得到的等效源源强与采用 ESM-v 参考模型得到的等效源源强。类似数值仿真,这里重建的声源等效源源强分布仍然与重建面一致,故亦是 121 个格点。从图 9 中可以看出,4 种模型得到的源强都可识别出声源中心峰值,但同时都存在若干次峰,说明实验所用音箱声源确实非理想型单极子声源,其在声源中心区域有一定的空间连续性,因此造成图 9 所示结果定位精度不高的假象。另一方面,3 种待估模型得到的源强峰值均比参考模型得到的源强峰值小,但 CESM-v 得到的源强峰值最接近参考峰值,且其空间分布情况与参考最吻合,与图 9 所示结果一致。

为了进一步衡量对比 ESM-v-60、CESM-p 和 CESM-v 这 3 种模型的优劣,图 13 给出了 3 种模型相对 ESM-v 参考模型的质点振速重建误差。从图

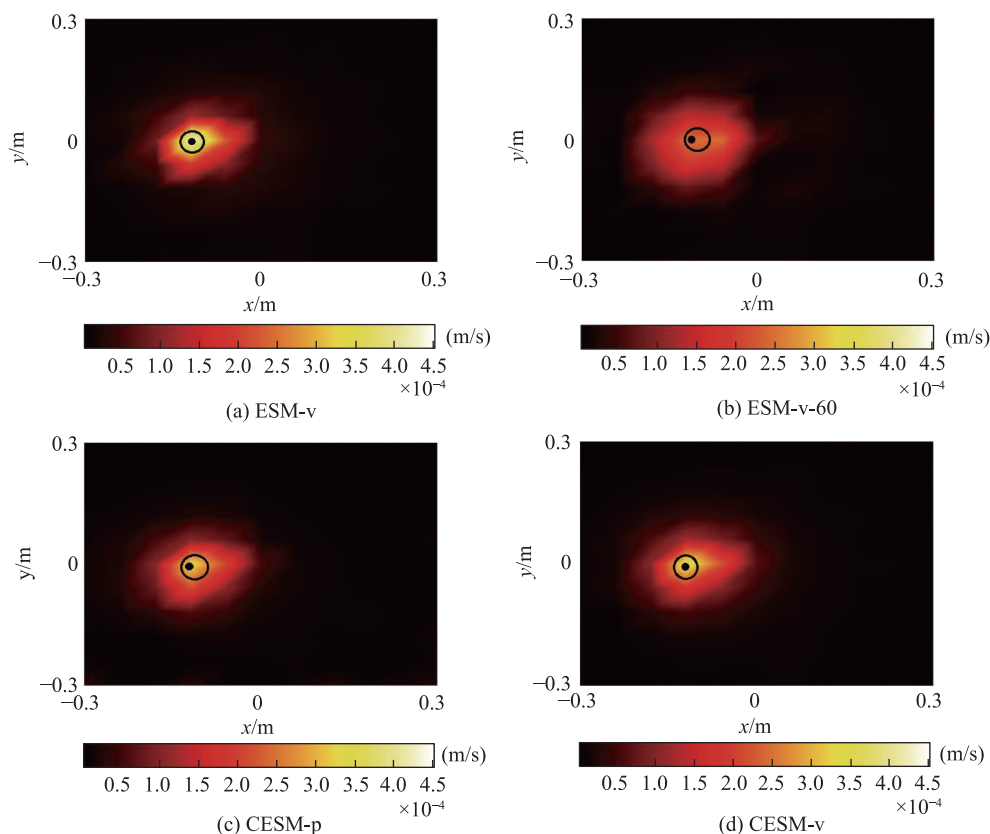


图9 实验中采用4种模型重建的质点振速

Fig. 9 Particle velocity reconstructed by 4 models used in the experiment

Note: • marked the real position of the source ○ marked the identified position of the source.

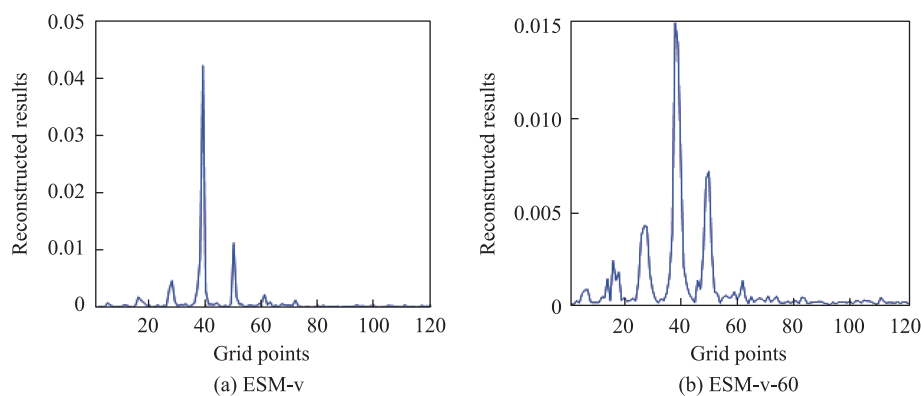


图10 ESM-v-60模型重建的等效源源强

Fig. 10 Equivalent source intensity of ESM-v-60 model construction

中可以直观发现,CESM-v的重建误差仅为14.47%,而CESM-p与ESM-v-60的重建误差则分别高达34.38%和40.88%。正如预期,本文所提CESM-v模型确实可以更好地重建质点振速。

最后,图14给出了ESM-v-60、CESM-p、CESM-v这3种模型相对ESM-v参考模型的质点振

速重建误差频响曲线。从图中可以看出,CESM-v在整个频带上的重建误差始终最小,而另外两个模型的重建误差都比较大,且重建精度不太稳定,再次说明CESM-v模型相比现有模型有明显的优越性,非常值得研究和探讨,具有较高的工程实用价值。

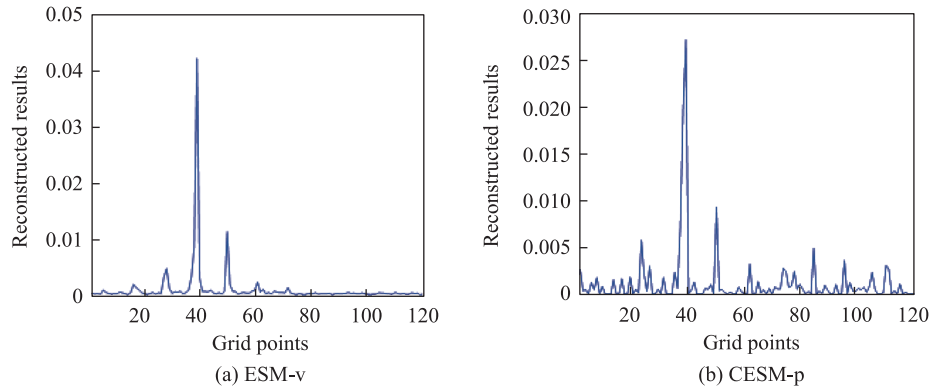


图 11 CESM-p 模型重建的等效源源强

Fig. 11 Equivalent source strength of CESM-p model reconstruction

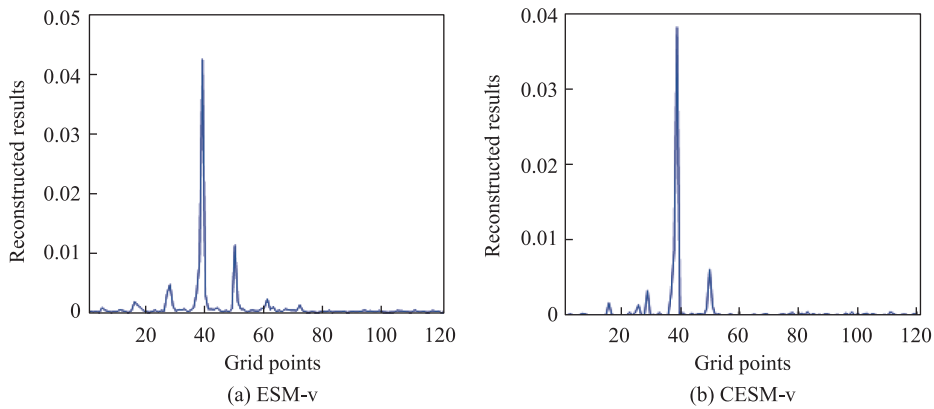


图 12 CESM-v 模型重建的等效源源强

Fig. 12 Equivalent source strength of CESM-v model reconstruction

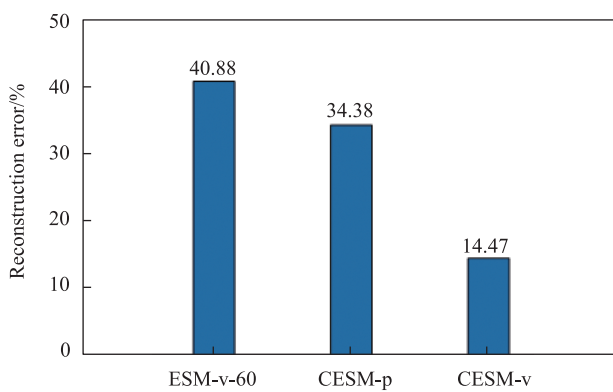


图 13 实验中质点振速重建误差

Fig. 13 Reconstruction error of particle velocity in the experiment

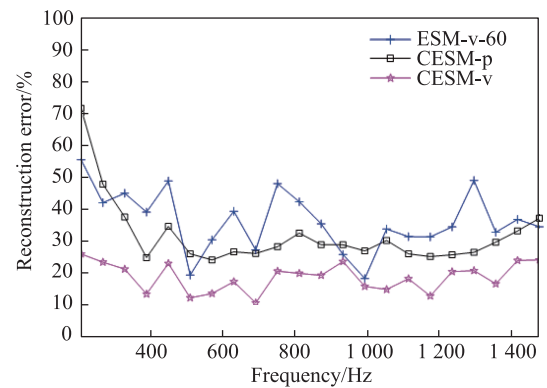


图 14 实验中质点振速重建误差频响曲线

Fig. 14 Frequency response curve of particle velocity reconstruction error in the experiment

4 结论

1) CESM-v 模型在少量采样点条件下,可高精度重建质点振速,其重建效果可媲美采样充足的传

统等效源法模型(ESM-v),有时甚至比 ESM-v 表现更优越,避免由于采样不足而造成的声场重构不稳定、声源识别不准确问题。

2) 与现有的 CESM-p 模型相比,CESM-v 模型

可明显提高质点振速重建精度,展现出更优异的声场重构性能,具有更强的稳定性和可靠性,能够更准确地识别声源,避免由于模型限制而导致的声场重构精度不高以及伪声源识别问题。

3) 实验结果验证了CESM-v模型在实际应用中的可行性和有效性,说明CESM-v模型具有很高的实用价值,值得研究和推广,可发展成为一种有效的轨道交通系统故障诊断和声源识别技术方法。

参考文献:

- [1] 张龙,刘皓阳,肖乾.采用改进多尺度符号动力学熵的铁路机车轴承故障诊断[J].华东交通大学学报,2023,40(5): 32-40.
ZHANG L, LIU H Y, XIAO Q. Fault diagnosis of railway locomotive bearings using improved multiscale symbolic dynamic entropy[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(5): 32-40.
- [2] 周建民,刘露露,杨晓彤,等.自编码器及其改进算法在滚动轴承故障诊断的应用[J].华东交通大学学报,2023,40(3): 88-96.
ZHOU J M, LIU L L, YANG X T, et al. Application of auto-encoder and its improvement in rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 88-96.
- [3] 李合菊,李素叶,魏琰,等.基于数据驱动的采煤机滚筒轴承故障诊断[J].煤矿机械,2024,45(8): 184-186.
LI H J, LI S Y, WEI L, et al. Fault diagnosis of shearer drum bearing based on data drive[J]. Coal Mining Machinery, 2024, 45(8): 184-186.
- [4] 彭辉,张群慧,杨灿.深度学习技术在列车故障自动巡检中的应用[J].湖南邮电职业技术学院学报,2024,23(2): 11-14.
PENG H, ZHANG Q H, YANG C. Application of deep learning technology in automatic train fault inspection[J]. Journal of Hunan Institute of Post and Telecommunications Technology, 2024, 23(2): 11-14.
- [5] MAYNARD J D, WILLIAMS E G, LEE Y. Near-field acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 78: 1395-1413.
- [6] BAI M R. Application of BEM-based acoustic holography to radiation analysis of sound sources with arbitrarily shaped geometries[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92: 533-549.
- [7] CHARDON G, DAUDET L, PEILLOT A, et al. Near-field acoustic holography using sparse regularization and compressive sampling principles[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132: 1521-1534.
- [8] BI C X, LIU Y, XU L, et al. Sound field reconstruction using compressed modal equivalent point source method[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141: 73-79.
- [9] LIU Y, BI C X, XU L, et al. Sound field reconstruction using equivalent source method based on a redundant dictionary[C]//Hong Kong: INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2017.
- [10] LIU J, LIU Y, BOLTON J S. Acoustic source reconstruction and visualization based on acoustic radiation modes[J]. Journal Sound and Vibration, 2018, 437: 358-372.
- [11] BI C X, LIU Y, ZHANG Y B, et al. Sound field reconstruction using inverse boundary element method and sparse regularization[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145: 3154-3162.
- [12] HALD J. A comparison of compressive equivalent source methods for distributed sources[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147: 2211-2221.
- [13] 刘袁,刘文强,赵瑾瑜,等.基于数据驱动的声源表面振速稀疏恢复方法[J].南京大学学报(自然科学),2024,60(3): 523-530.
LIU Y, LIU W Q, ZHAO J Y, et al. A data-driven sparse recovery method for surface velocity of the sound source[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2024, 60(3): 523-530.
- [14] 张永斌,毕传兴,陈剑,等.基于质点振速测量的近场声全息技术[J].农业机械学报,2007(9): 112-115.
ZHANG Y B, BI C X, CHEN J, et al. Near field acoustic holography study based on measurement of particle velocity[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2007(9): 112-115.
- [15] 张永斌.基于等效源法和质点振速测量的近场声全息技术[D].合肥:合肥工业大学,2010.
ZHANG Y B. Research on nearfield acoustic holography based on the equivalent source method and the measurement of particle velocity[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [16] JING W Q, LIU G S. Compressive equivalent source method based on particle velocity measurements for near-field acoustic holography[J]. Measurement and Control. 2023, 56(7/8): 1471-1482.



通信作者:景文倩(1987—),女,副教授,博士,硕士生导师,国家自然科学基金青年/地区科学基金获得者,江西省“双千计划”引进类创新领军青年人才,研究方向为轨道交通振动、噪声测试。E-mail: jwqtkhz@126.com。

(责任编辑:吴海燕)