

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.003

# 压缩机噪声源识别的稀疏近场声全息方法

陈新杰<sup>1,2</sup>, 李良和<sup>2</sup>, 葛成伟<sup>1</sup>, 张永斌<sup>2</sup>

(1. 安徽美芝制冷设备有限公司, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章针对冰箱压缩机外形复杂、噪声源宽频等特点导致噪声源识别分辨率低、测试成本高的问题,在基于等效源法的近场声全息理论基础上,引入压缩感知理论和稀疏阵列测量的方式,建立一种基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息方法。该方法从理论上突破了 Nyquist 采样定理的限制,降低了测量点数目和测试成本,并可实现压缩机宽频噪声源的高分辨率识别。通过对某型冰箱压缩机的实验研究,验证了该方法识别低、中、高3个频段噪声源的有效性,该识别结果可为进一步开展压缩机噪声产生机理研究以及噪声控制提供重要的理论依据和指导。

**关键词:**稀疏近场声全息;压缩感知;噪声源识别;等效源法;压缩机

**中图分类号:** TB52.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)11-1452-07

## A sparse nearfield acoustic holography for identifying noise sources of a compressor

CHEN Xinjie<sup>1,2</sup>, LI Lianghe<sup>2</sup>, GE Chengwei<sup>1</sup>, ZHANG Yongbin<sup>2</sup>

(1. Anhui Meizhi Refrigeration Equipment Co., Ltd., Hefei 230031, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to resolve the problems in noise source identification such as low resolution and high measurement cost for a refrigerator compressor with complex shape and wideband frequency, a sparse nearfield acoustic holography based on the compressive sensing equivalent source method is proposed on the basis of the compressive sensing theory and the nearfield acoustic holography based on the equivalent source method and by measuring with a sparse microphone array. The proposed method can break through the limitation coming from the Nyquist sampling theorem in theory, and thus has the advantage of reducing the measurement points and cost and realizing a high-resolution identification of the wideband noise sources of a refrigerator compressor. Experimental results of a type of refrigerator compressor demonstrate the effectiveness of the propose method for identifying the noise sources at low, medium and high frequencies, which can be further used to instruct the study on the noise generation mechanisms and control of this type of refrigerator compressor.

**Key words:** sparse nearfield acoustic holography; compressive sensing; noise source identification; equivalent source method; compressor

随着人民生活水平的提高,冰箱等制冷家用电器越来越普及。但是这些产品在给人们生活带来方便的同时,也对室内声学环境带来了负面影响,

尤其是在安静的晚上,冰箱噪声会严重干扰人们休息和睡眠。因此,冰箱的噪声水平与用户对冰箱品质的评价密切相关,控制与优化冰箱噪声成为冰箱

收稿日期:2024-04-09;修回日期:2024-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12174082)

作者简介:陈新杰(1988—),男,安徽合肥人,安徽美芝制冷设备有限公司高级工程师;

张永斌(1982—),男,河北乐亭人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: ybzhang@hfut.edu.cn.

制造厂商的关注重点。压缩机是家用冰箱的主要激励源,是从根源上控制冰箱噪声的关键部件。压缩机的尺寸虽小,但是内部包含电机、曲轴活塞、吸排气阀组等多个部件;工作过程中会产生机械、电磁和气动等多种机理的噪声;内部噪声在壳体内经过空腔共振的放大,然后通过多种途径向外传递。正是由于压缩机噪声的来源多样且机理混杂,使得压缩机的噪声控制和优化极具难度<sup>[1-3]</sup>。

噪声源识别技术可以通过外部声场的测量,重建压缩机表面的声场,对于识别不同频率的压缩机噪声对应的物理机理和指导噪声优化方向具有重要作用。由于压缩机的尺寸较小,在识别和重建压缩机表面声场时需要较高的空间分辨率,目前只有近场声全息<sup>[4-6]</sup>这种先进的高分辨率声场重建技术才能满足要求。文献[7]将基于逆边界元法的近场声全息技术用于冰箱压缩机的噪声源识别,首先通过传递矩阵的奇异值分析优化选择非均匀分布的 418 个测点,然后以这些数据为输入,重建 588 Hz 频率处的压缩机表面声压和质点振速,并发现这个频率处存在明显垂向模式;文献[8]提出统计最优柱面近场声全息技术,并将其用于冰箱压缩机的噪声源识别,重建 882 Hz 频率下压缩机壳体表面的声压和质点振速;文献[9]采用线性传声器阵列扫描测量声场,并将测量数据与基于等效源法的近场声全息技术用于空调压缩机、冰箱压缩机和冰箱 3 种家电相关产品的噪声源识别,获得不同频率成分噪声的声源分布特性;文献[10]在压缩机的近场扫描测量了 201 个点的复声压数据,采用基于等效源法的近场声全息技术重建了压缩机表面的声压,并发现 784 Hz 是一个噪声辐射关键频率,该频率下的噪声是由吸气系统引起,经优化后,噪声明显下降。

为避免壳体结构共振,压缩机的外壳呈不规则形状,因此只有逆边界元法<sup>[11]</sup>和等效源法<sup>[12-13]</sup>能够用于任意形状结构辐射声场重建的近场声全息算法,该算法可用于压缩机噪声源识别。但是将这些算法应用于压缩机时存在以下局限。首先这些算法要求声场测量点的数目大于或等于被重建面(压缩机表面或等效源面)上的网格点数目,以获得最小二乘解。为获得较高的声源识别分辨率,需要较大数目的重建面网格点,从而导致测量点数目随之增加。多数目的测量点只能采用扫描方法逐点测量,这也导致测量工作量极高且实验效率很低。其次,即使根据要求测量得到了足够数目的测点,如文献[10]中的 201 点(网格间距约

为 4 cm),近场声全息技术仍局限于较低频率下的声源识别。这一限制来自于 Nyquist 采样定理,即最大分析频率  $f_{\max} = c/(2\Delta)$ ,其中  $c = 340$  m/s 为声速, $\Delta$  为声场测量网格间距,以  $\Delta = 4$  cm 为例,所分析最高频率为 4 250 Hz。但是对于压缩机来说,5 000 Hz 以上的高频噪声中还有与壳体共振等机理相关的重要成分,因此 5 000 Hz 以上的高频噪声也是需要识别声源的频率范围,现有的近场声全息算法无法满足上述需求。

为解决上述压缩机噪声源识别过程中的局限性,实现压缩机噪声源的宽频和高分辨率识别,本文将建立基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息方法。该方法将压缩感知理论<sup>[14-19]</sup>与基于等效源法的近场声全息技术相结合,理论上可以突破 Nyquist 采样定理的限制,采用少量的测量点实现声场的不失真重建。在上述理论基础上,本文将设计球面传声器阵列,将压缩机布置在球面阵列之中,实现压缩机辐射声场的快速采集;以某型号冰箱压缩机为对象,采用构建的球面传声器阵列和所提基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息技术开展压缩机噪声源识别实验,以验证本文方法的有效性。

## 1 理 论

### 1.1 基于等效源法的近场声全息

压缩机与空间声场示意图如图 1 所示。

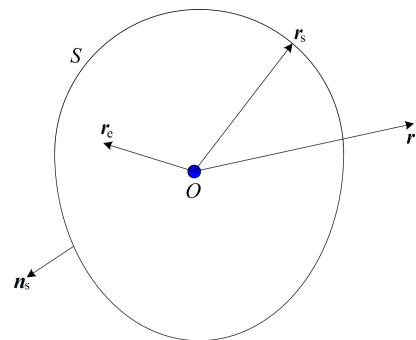


图 1 压缩机与空间声场示意图

假设  $S$  是压缩机壳体外表面,则在压缩机外部辐射声场中任意一点  $r$  处的声压  $p(r)$  可由布置在  $S$  所包围的内部区域中的  $J$  个等效源的辐射声场叠加代替,即

$$p(r) = \sum_{j=1}^J i\rho ckg(r, r_{ej})q(r_{ej}) \quad (1)$$

其中: $\rho$  为空气密度; $k = \omega/c$  为波数, $\omega$  为角频率; $r_{ej}$  和  $q(r_{ej})$  分别为布置在压缩机内部的第  $j$  个等

效源的坐标和源强;  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{ej})$  为自由场格林函数。

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{ej}) = \frac{e^{i\mathbf{k}R}}{4\pi R}, \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ej}| \quad (2)$$

假设测量  $M$  个点  $(\mathbf{r}_{h1}, \mathbf{r}_{h2}, \dots, \mathbf{r}_{hM})$  处的声压, 则得到  $M$  个与式(1)相同的等式, 将其表示成矩阵形式为:

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

其中:  $\mathbf{P}_h = [p(\mathbf{r}_{h1}) \quad p(\mathbf{r}_{h2}) \quad \dots \quad p(\mathbf{r}_{hM}) \quad \dots \quad p(\mathbf{r}_{hM})]^T$  为测量声压列向量;  $\mathbf{Q} = [q(\mathbf{r}_{e1}) \quad q(\mathbf{r}_{e2}) \quad \dots \quad q(\mathbf{r}_{ej}) \quad \dots \quad q(\mathbf{r}_{ej})]^T$  为等效源强列向量;  $\mathbf{G}_{hp}$  为等效源与测量声压之间的匹配矩阵, 其表达式为  $\mathbf{G}_{hp}(m, j) = i\rho c k g(\mathbf{r}_{hm}, \mathbf{r}_{ej})$ 。

基于等效源法的近场声全息技术的第 1 步是由式(3)求解等效源强向量  $\mathbf{Q}$ 。当满足  $M > J$  时, 通过对矩阵  $\mathbf{G}_{hp}$  求逆, 可以计算得到  $\mathbf{Q}$  的最小二乘解。实际测量中的误差和噪声干扰等会被  $\mathbf{G}_{hp}$  的逆矩阵放大, 从而影响计算精度, 甚至造成重建结果失真, 因此在求解  $\mathbf{Q}$  时需正则化稳定求解过程。Tikhonov 正则化是最常用的方法, 即将  $\mathbf{Q}$  的求解转化为如下目标函数的求解:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{Q}} (\|\mathbf{P}_h - \mathbf{G}_{hp} \mathbf{Q}\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{Q}\|_2^2) \quad (4)$$

其中,  $\lambda$  为正则化参数, 可以由 L 曲线或 GCV 等方法确定。直接求解式(4)所示的泛函问题可以得到:

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{G}_{hp}^H \mathbf{G}_{hp} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}_{hp}^H \mathbf{P}_h \quad (5)$$

其中,  $H$  表示矩阵共轭转置。当求得等效源强  $\mathbf{Q}$  后, 代入式(1)可得重建压缩机表面的声压为:

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{G}_{sp} \mathbf{Q} \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{P}_s = [p(\mathbf{r}_{s1}) \quad p(\mathbf{r}_{s2}) \quad \dots \quad p(\mathbf{r}_{sn}) \quad \dots \quad p(\mathbf{r}_{sN})]^T$  为压缩机表面重建声压列向量;  $\mathbf{r}_{sn} (n=1, 2, \dots, N)$  为压缩机表面被重建点的坐标,  $N$  为压缩机表面被重建点的数目;  $\mathbf{G}_{sp}$  为等效源与重建声压之间的匹配矩阵, 表达式为  $\mathbf{G}_{sp}(n, j) = i\rho c k g(\mathbf{r}_{sn}, \mathbf{r}_{ej})$ 。

由式(6)和 Euler 公式可重建压缩机表面的法向振速, 即

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{G}_{sv} \mathbf{Q} \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{U}_s = [u(\mathbf{r}_{s1}) \quad u(\mathbf{r}_{s2}) \quad \dots \quad u(\mathbf{r}_{sn}) \quad \dots \quad u(\mathbf{r}_{sN})]^T$  为压缩机表面重建法向振速列向量;  $\mathbf{G}_{sv}$  为等效源与重建法向振速之间的匹配矩阵, 其表达式为  $\mathbf{G}_{sv}(n, j) = -\frac{\partial g(\mathbf{r}_{sn}, \mathbf{r}_{ej})}{\partial \mathbf{n}_s}$ ;  $\mathbf{n}_s$  为压缩机表面的外法向量。

## 1.2 基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息

采用式(4)求解等效源源强时, 要求测量点的

数目大于等于等效源的数目, 否则所求解问题变为欠定, 不具有唯一解。为满足上述条件且能够获得较高空间分辨率的声源识别结果, 在中高频时, 所需采样点数目急剧增加, 因此采样效率问题成为近场声全息技术在压缩机声源识别中的一大难题。而压缩感知理论为解决该问题提供了理论上的可行性和具体的实现途径。本文将压缩感知理论和基于等效源法的近场声全息技术相结合, 建立基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息技术, 以解决上述局限性。

将式(3)中的等效源强向量  $\mathbf{Q}$  视为一个  $J$  维的离散信号, 并设信号  $\mathbf{Q}$  由一组基函数  $\psi_l$  线性表示, 定义基函数矩阵  $\Psi = [\psi_1 \quad \psi_2 \quad \dots \quad \psi_l \quad \dots \quad \psi_L]$ , 则信号  $\mathbf{Q}$  可表示为:

$$\mathbf{Q} = \sum_{l=1}^L \psi_l \theta_l = \Psi \Theta \quad (8)$$

其中,  $\Theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_l \quad \dots \quad \theta_L]^T$  为分解系数。如果经过上述分解后,  $\Theta$  中只有  $K$  个非零元素, 并且  $K \ll J$ , 那么就可认为分解系数  $\Theta$  是稀疏的且稀疏度为  $K$ 。基函数  $\Psi$  即为信号  $\mathbf{Q}$  的稀疏基, 满足上述要求的稀疏基  $\Psi$  将在下文给出。将式(8)代入式(3)可得:

$$\mathbf{P}_h = \mathbf{G}_{hp} \Psi \Theta \quad (9)$$

式(3)可看成由  $M$  个方程求解  $J$  个未知数的线性方程组, 当减小测量点数目至  $M < J$  时, 该方程组是欠定的, 有无穷多个解, 因此无法从  $\mathbf{P}_h$  的  $M$  个测量值中恢复源强信号  $\mathbf{Q}$ 。但是经过式(8)的线性展开后,  $\Theta$  变为稀疏信号, 那么可以利用稀疏分解算法, 通过求解式(9)得到稀疏分解系数, 再代入式(8)即可得到源信号  $\mathbf{Q}$ 。

式(3)转化成式(9)有一个重要前提, 即能够找到合适的稀疏基  $\Psi$ 。稀疏基的作用使得源强所在空间的维度降低, 因此声模态(既可以是声压模态, 也可以是质点振速模态)是一个可行的稀疏基选择。原因是将声场分解成声模态的叠加后, 所需声模态的数目是有限的, 而且因为声模态频率是离散的, 所以可以形成离散的  $\psi_l$ 。根据文献[20-21], 对匹配矩阵奇异值分解可以得到声模态。根据前面理论, 存在 3 个匹配矩阵, 分别为等效源与测量声压之间的匹配矩阵  $\mathbf{G}_{hp}$ 、等效源与重建声压之间的匹配矩阵  $\mathbf{G}_{sp}$  和等效源与重建法向振速之间的匹配矩阵  $\mathbf{G}_{sv}$ 。因此需要先确定选取哪一个矩阵进行分解, 才能更好地实现式(9)的稀疏求解。

在使用稀疏分解算法求解式(9)时, 为保证算

法的收敛性,根据压缩感知理论,要求矩阵  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  (在压缩感知理论中常被称为观测矩阵)与稀疏基  $\Psi$  不相关,因此观测矩阵  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  本身是最不合适的选择,会导致稀疏基与观测矩阵具有较强的相关性。

$\mathbf{G}_{\text{sp}}$  和  $\mathbf{G}_{\text{sv}}$  与测量面无关,与观测矩阵的关联性较小,但是因为  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  和  $\mathbf{G}_{\text{sp}}$  都是声压匹配矩阵,所以两者之间的相关性要强于  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  与  $\mathbf{G}_{\text{sv}}$  之间的相关性。综上所述,选取矩阵  $\mathbf{G}_{\text{sv}}$  进行奇异值分解是最优选择,其分解后的表达式为:

$$\mathbf{G}_{\text{sv}} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H \quad (10)$$

其中: $\mathbf{U}$  为  $N \times J$  的酉矩阵; $\mathbf{V}$  为  $J \times J$  的酉矩阵; $\mathbf{\Lambda}$  为  $J \times J$  的对角矩阵,对角线的元素为分解得到的按从大到小顺序排列的非零奇异值。根据文献[20-21],矩阵  $\mathbf{U}$  中的列向量可视为重建面对应的声模态,而矩阵  $\mathbf{V}$  中的列向量可视为等效源面对应的声模态。式(8)需要对等效源强进行分解,因此选择矩阵  $\mathbf{V}$  作为稀疏基,即  $\Psi = \mathbf{V}$ 。

确定稀疏基后,如何求解式(9)成为下一步的主要问题。最直观的求解方法是式(9)转化为求解如下的最小化  $l_0$  范数问题:

$$\underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \|\Theta\|_0 \text{ subject to } \mathbf{P}_h = \mathbf{G}_{\text{hp}}\Psi\Theta \quad (11)$$

其中, $l_0$  范数为向量  $\Theta$  中非零元素的个数。

但是,直接搜索  $\Theta$  中的非零元素,计算复杂度过高,在实际中难以实现。因此目前常用的方法是将其转化为最小化  $l_1$  范数问题进行求解,同时考虑到测量数据中不可避免地包含噪声,式(11)转化为如下问题:

$$\underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \|\Theta\|_1 \text{ subject to } \|\mathbf{P}_h - \mathbf{G}_{\text{hp}}\Psi\Theta\|_2 \leq \epsilon \quad (12)$$

式(12)即为基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息技术的核心。其中, $\epsilon$  为与噪声有关的误差项,由于测量数据中包含的噪声情况是未知的,无法直接确定  $\epsilon$  的数值。但是在求解时可采用间接方法,本文采用的是交叉验证方法。交叉验证的思想是将测量数据进行分组,其中:一部分为训练集,用于估算模型参数;剩余的部分作为验证集,用于验证所估算的模型参数的准确性。对于式(12)的求解,目前已经发展出多种算法,如基追踪算法、快速迭代阈值收缩算法、最小绝对收缩与选择算子算法等,而且已经开发出了对应的工具包,本文的求解过程采用 CVX 工具包。

## 2 实验研究

如前文中所述,求解稀疏性问题时,为保证算

法的收敛性,要求观测矩阵  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  与稀疏基  $\Psi$  不相关。保证这种不相关性的方法有:一方面体现在上文所述的稀疏基  $\Psi$  的选择过程中,文中经分析后所选择的稀疏基矩阵  $\mathbf{V}$  既与观测矩阵  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  相关性较弱,又可以从物理机理上表示等效源强的分布;另一方面,还可以从观测矩阵  $\mathbf{G}_{\text{hp}}$  入手进一步提升两者之间的不相关性,从这个角度来说,实际工程应用中的常用方法是随机布置测量传声器的位置。考虑到压缩机的尺寸较小,因此本文设计一个球面传声器阵列,阵列上随机布置 36 个传声器。球面阵列的直径为 20 cm,传声器前表面所在的球面半径为 16.5 cm。实验过程中,将压缩机放置于球面阵列内部,可以实现压缩机辐射声场的快速采集。实验场景如图 2 所示,实验在半消声室内进行。实验中,压缩机的输入激励频率为 75 Hz;等效源布置在压缩机内部,均匀分布在 1 个半径为 5 cm 的球面上,共 231 个。



图 2 实验场景图

背景噪声谱和测量面平均声压谱如图 3 所示。由图 3 可知,在压缩机激励频率及其倍频处产生了明显的纯音成分。

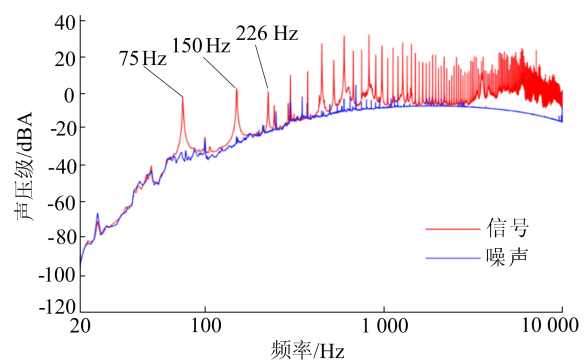


图 3 测量面平均声压谱

采用文中所提方法开展这些纯音频率处的声源识别对于压缩机纯音噪声的治理具有重要的指导意义。376、2 707、6 018 Hz 这 3 个低、中、高纯音频率处的声源识别结果如图 4~图 6 所示。从图 4~图 6 可以看出,压缩机表面主要声源位置,特别是在 6 018 Hz,采用文中所提方法可以获得高分辨率的识别结果,这些声源识别结果可为声源产生机理的探究和后续纯音成分的噪声治理提供重要的指导。

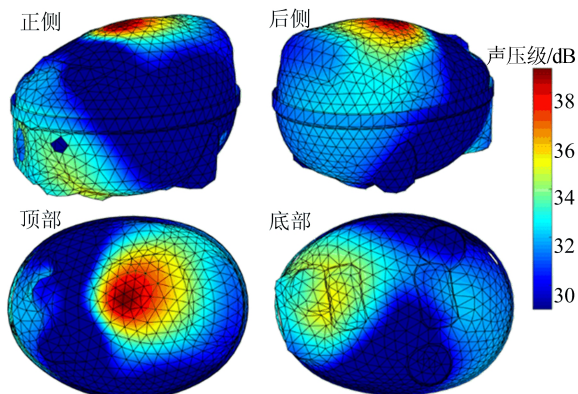


图 4 376 Hz 时压缩机表面声压级分布

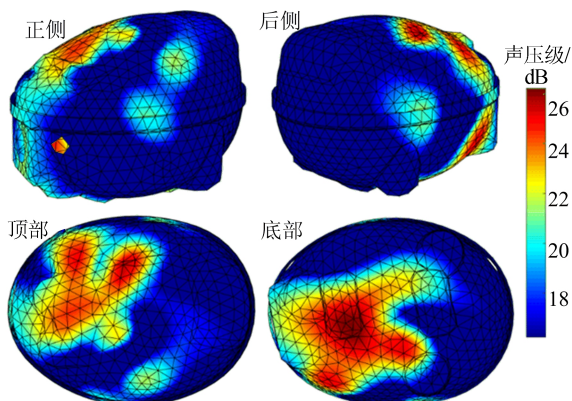


图 5 2 707 Hz 时压缩机表面声压级分布

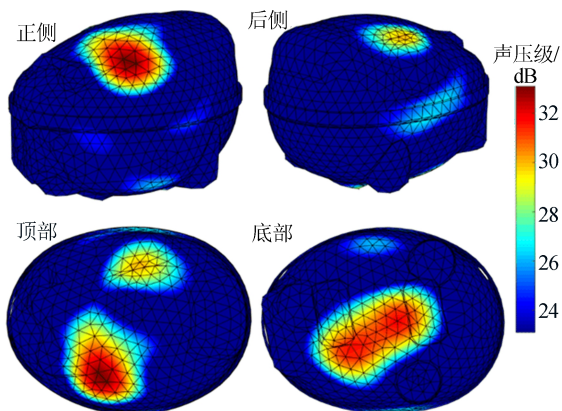


图 6 6 018 Hz 时压缩机表面声压级分布

从图 3 也可以看出,除了纯音成分,压缩机噪声也存在一些突出频带,这些频带可能与壳体的共振存在一定的关联,因此采用本文所提方法开展这些突出频带的噪声源识别对于压缩机宽带噪声的治理也具有重要的指导意义。

在低、中、高 3 个频带区间选取的 3 个突出频带如下:756~883 Hz、3 424~3 704 Hz、5 668~6 190 Hz,分别如图 7~图 9 所示。

所选的 3 个突出频带的识别结果分别如图 10~图 12 所示。图 10~图 12 中的声压级为频带平均声压级,即针对频带的每个频率分别进行重建,再将各频率重建结果进行能量平均。

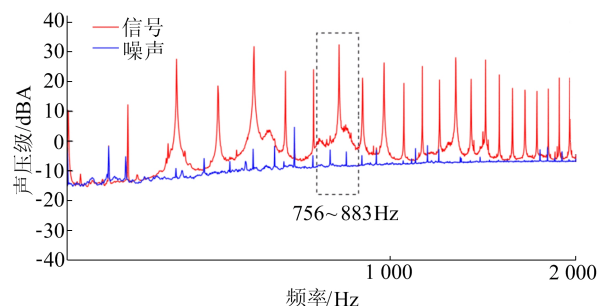


图 7 756~883 Hz 突出频带

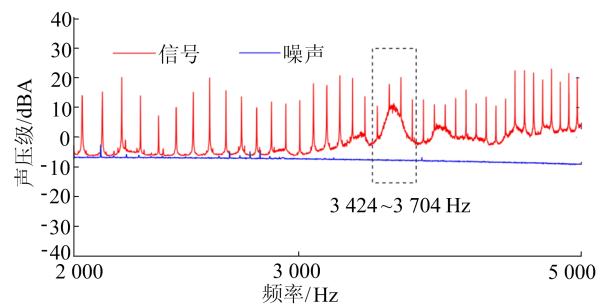


图 8 3 424~3 704 Hz 突出频带

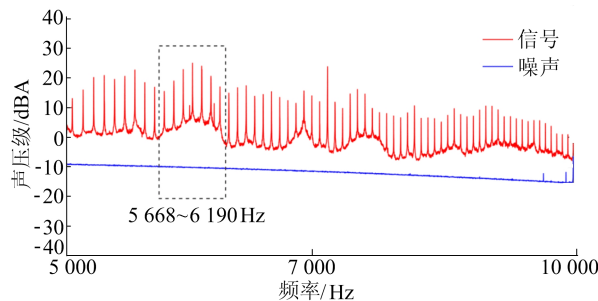


图 9 5 668~6 190 Hz 突出频带

由图 10~图 12 可知,压缩机表面主要声源的位置。由于 756~883 Hz 为压缩机空腔共振所在区间,此频带的识别结果与空腔共振模态分析结果相结合,可为揭示空腔共振对壳体的影响机制提供

很好指导;3 424~3 704 Hz 和 5 668~6 190 Hz 这 2 个频带是壳体模态集中区间,此频带的识别结果与壳体振动模态结果相结合,可为揭示壳体振动模态声辐射机制提供有益支撑。

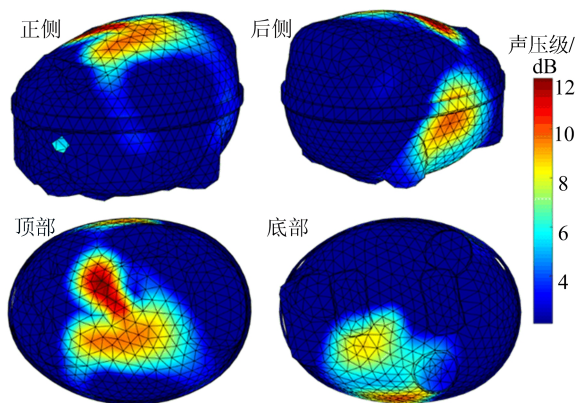


图 10 756~883 Hz 压缩机表面声压级分布

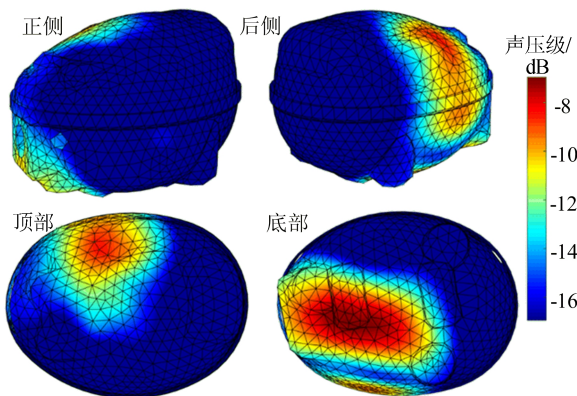


图 11 3 424~3 704 Hz 压缩机表面声压级分布

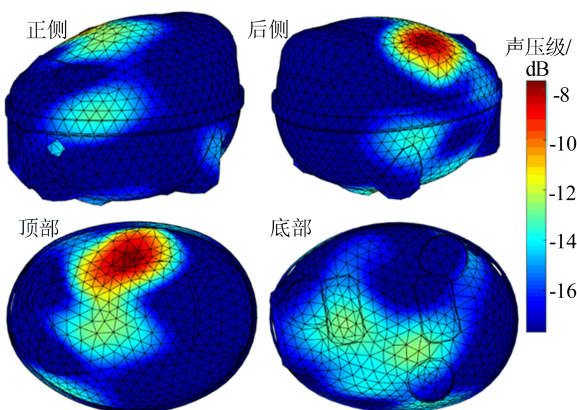


图 12 5 668~6 190 Hz 压缩机表面声压级分布

### 3 结 论

在利用传统的近场声全息技术识别压缩机噪声源时,要求声场测量点数目大于或等于被重建面上的网格点数目,多数目的测量点只能采用扫描方

法逐点测量,因此导致测量工作量极高且实验效率很低。此外,即使测量了多数目的声场数据,由于 Nyquist 采样定理的限制,传统的近场声全息技术仍然局限于较低频率下的声源识别。为解决上述问题,本文建立了基于压缩感知等效源法的稀疏近场声全息技术。该技术将压缩感知理论与基于等效源法的近场声全息技术相结合,突破了 Nyquist 采样定理的限制,在降低测量点数目和测试成本的同时,实现了压缩机宽频噪声源的高分辨率识别。本文还分析了压缩感知理论中的稀疏基选择问题,并根据感知矩阵与稀疏基的相关性要求,设计了球面传声器阵列,用于压缩机辐射声场的快速采集。最后,将本文所提方法用于某型号冰箱压缩机噪声源识别实验研究,既实现了较高频率下的声源识别,又极大地提升了实验效率。针对纯音噪声和共振带噪声的识别结果可为压缩机噪声产生机理研究和噪声控制提供重要的理论依据和指导。

### [参 考 文 献]

- [1] 季晓明,孟晓宏,金涛. 往复式冰箱压缩机噪声分析及控制方法综述[J]. 噪声与振动控制,2007(1):25-28.
- [2] 韩海晓,何志龙,彭强强. 全封闭冰箱压缩机噪声控制研究综述[J]. 流体机械,2012,40(1):35-40.
- [3] 周明龙,陈文卿,邢子文,等. 冰箱压缩机噪声控制技术综述[J]. 家电科技,2020(5):68-72.
- [4] WILLIAMS E G. Fourier acoustics: sound radiation and near-field acoustic holography[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 89-114.
- [5] 蒋伟,康万泉. 近场声全息理论与应用的研究现状与展望[J]. 机械强度,2005,27(3):288-295.
- [6] 陈心昭,毕传兴. 近场声全息技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2013:18-57.
- [7] IH J G, KANG S C, KIMS J, et al. Reconstruction of the vibro-acoustic field on the surface of the refrigerator compressor by using the BEM-based acoustic holography [C]//International Compressor Engineering Conference. [S. l.]: Purdue e-Pubs, 1998:525-528.
- [8] CHO Y T, BOLTON J S, HALD J. Source visualization by using statistically optimized near-field acoustical holography in cylindrical coordinates[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(4): 2355-2364.
- [9] 蒋伟康,张海滨,万泉. 家电产品的噪声源辨识技术及其应用[J]. 制冷与空调,2010(10):2239-235.
- [10] XU J W, FABIAN F, JIANG W K. Nearfield acoustical holography research & application on compressor & refrigerator [C]//International Compressor Engineering Conference. [S. l.]:Purdue e-Pubs,2012:1-9.
- [11] BAI M R. Application of BEM (boundary element method) based acoustic holography to radiation analysis[J]. Journal of

- the Acoustical Society of America, 1992, 92(2): 533-549.
- [12] BI C X, CHEN X Z, CHEN J, et al. Nearfield acoustic holography based on the equivalent source method[J]. Science in China (Series E), 2005, 48(3): 338-353.
- [13] ZHANG Y B, JACOBSEN F, BI C X, et al. Near field acoustic holography based on the equivalent source method and pressure-velocity transducers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(3): 1257-1263.
- [14] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [15] 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(3): 1521-1534.
- [16] FERNANDEZ-GRANDE E, XENAKI A, GERSTOFT P. A sparse equivalent source method for near-field acoustic holography[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(1): 532-542.
- [17] 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(1): 73-79.
- [18] HU D Y, LI H B, HU Y, et al. Sound field reconstruction with sparse sampling and the equivalent source method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108(9): 317-325.
- [19] HALD J. A comparison of compressive equivalent source methods for distributed sources[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147(4): 2211-2221.
- [20] PHOTIADS D M. The relationship of singular value decomposition to wave-vector filtering in sound radiation problems[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 88(2): 1152-1159.
- [21] BORGOTTI G V. The power radiated by a vibrating body in an acoustic field and its determination from boundary measurements[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 88(4): 1884-1893.

(责任编辑 吴亮)

#### (上接第 1451 页)

语音识别方案和集中式红外手势识别方案均使用专用传感器,增加了成本,成本为中;分布式红外手势识别方案使用通用红外传感器,有效降低成本,成本为低。

考虑可靠性、准确率和成本,使用集中式红外手势识别方案和语音识别方案效果最佳。

#### 4 结 论

本文使用基于红外手势识别和语音识别作为智能座舱的人机交互方案,使用通用红外传感器、专用红外手势识别传感器和语音识别传感器的组合实现了多模态人机交互,实现了对智能座舱的天窗系统控制,经测试,可得结论如下。

1) 分布式红外手势识别模块识别准确率为 91%,可以正确识别大多数动作,且占用范围较大,需要专门设计空间容纳;在可靠性方面,基本可以识别所定义的手势;使用通用红外传感器,有效降低了成本。

2) 集中式红外手势识别模块识别准确率为 97%,体积较小,无需专门设计空间;在可靠性方面,多种环境下均可以识别所定义的手势;使用专用红外手势传感器,成本中等。

3) 语音识别模块在安静的座舱环境内可以识别所有指令;可靠性优秀,噪音信号基本无法被识别,有效避免了误识别情况;由于使用 US516P6 纯离线语音识别芯片,成本中等。

综上所述,集中式红外手势识别方案和语音识别方案效果最佳。本文设计的汽车天窗控制系统,能够在降低硬件成本、避免消耗大量算力的同时,为车辆乘员提供准确高效的交互通道,这对保障驾驶安全具有重要意义。作为智能座舱的组成部分,本文汽车天窗控制系统的设计可拓展至天窗以外的其他部分,对智能座舱领域的其他设计具有较好的借鉴意义。

#### [参 考 文 献]

- [1] 赵逸彬,刘晶,雷聪锐,等. 基于 MPV 车型的智能座舱设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(8): 164-166.
- [2] 孟健,王馨,李函遥. 自动驾驶与智能座舱的关系及技术难点[J]. 时代汽车, 2023(11): 132-134.
- [3] 孙博文,杨建明,孙远波. 汽车人机交互界面层级设计研究[J]. 机械设计, 2019, 36(2): 121-125.
- [4] 吉岩,晏江华,董玮,等. 智能座舱交互式功能测试技术研究[J]. 中国汽车, 2022(5): 39-4348.
- [5] 徐娜,郭广通. 基于红外结构光的交互手势变形跟踪识别方法[J]. 激光杂志, 2020, 41(8): 72-76.
- [6] 占宏,吴碧霄,杨辰光. 基于视觉手势识别的人机交互实验平台[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(7): 23-25, 29.
- [7] 李澍,蔡振雄,詹文杰,等. 基于深度学习的手势识别系统的设计与实现[J]. 现代信息科技, 2022, 6(11): 106-109.
- [8] 陈思宇,黄菊花,刘引引,等. 高度集成化的汽车智能座舱工程应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(8): 62-66.

(责任编辑 胡亚敏)