

# 基于平面波分解的封闭空间次级声源布局优化

胥健<sup>1</sup>, 陈克安<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 张亚洲<sup>2</sup>

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2.西安艾科特声学科技有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:**封闭空间有源噪声控制系统的次级声源布局优化一般只关注离散点的降噪需求,导致空间区域降噪效果不理想,而且需要预先知道误差传感器布局信息。为解决该问题,提出一种面向空间降噪的代价函数。利用声场的平面波分解,获取初级声场平面波和各备选次级声源的单位次级声场平面波作为布局优化先验信息,以此构造波域有源控制代价函数,优化方法采用模拟退火搜索。以刚性壁矩形腔为对象,利用波域先验信息解析值与2种空间域布局优化方法结果做比较,表明所提方法在不依赖于误差点位置信息的情况下,能获得更优的空间声势能降噪效果;利用随机分布的传声器测量估计波域先验信息做布局优化,结果说明实际中所选布局能够达到比空间域方法更优的空间声势能降噪效果,但测量传声器位置对结果影响较大。

**关键词:**有源噪声控制;次级声源布局;平面波分解;声场重构

中图分类号:TB535 文献标志码:A 文章编号:1000-2758(2021)04-0794-07

有源噪声控制(active noise control, ANC)是基于声波相消性干涉原理的低频降噪技术。影响ANC系统降噪性能的因素很多,除控制算法之外,次级声源布局(个数和空间位置)是另一决定性因素<sup>[1]</sup>。目前在实际工作中,次级声源布局问题上通过大量的现场调试解决,相关工作效率极低,导致研制周期变长,严重阻碍了ANC技术的推广应用。

选择次级声源布局的难点在于存在大量备选位置。解决该问题的一般方法是将其看作组合优化问题,即从所有可能的布局中选择性能最优(降噪量大、鲁棒性好)的方案,人们通常采用遗传算法、模拟退火(simulated annealing, SA)算法等所谓自然算法<sup>[2]</sup>进行搜索。由于次级声源和误差传感器之间的声传递阻抗(acoustic transfer impedance, ATI)矩阵包含了布局信息,可以通过构造ATI矩阵来进行布局优化。例如Asano等<sup>[3]</sup>以ATI向量线性独立为目标,利用Gram-Schmidt正交化(GSO)方法逐个选择次级声源。Khalilian等<sup>[4]</sup>通过奇异值分解先设计“理想ATI矩阵”,再逐个选择次级声源使得ATI矩

阵逼近该理想矩阵。声场再现研究中还引入了稀疏正则化方法,通过求解稀疏线性回归问题选择扬声器位置<sup>[5-6]</sup>。此外,研究者们还提出了许多其他方法,如子集选择方法<sup>[7]</sup>、约束匹配追踪<sup>[4,8]</sup>等。

目前的次级声源布局优化方法往往只关注离散点的降噪需求,空间区域降噪效果可能不理想;此外需要预先确定误差传感器的位置,这导致次级声源与误差传感器的布局在某种意义上相互耦合,难以获得最优布局结果。耦合问题可以采用联合优化方法解决<sup>[9-10]</sup>。Martin和Roure<sup>[11]</sup>提供了另一种思路,针对自由空间声辐射控制问题,首先利用球谐函数展开将初级声场解析表达,通过球谐函数和多极子源之间的对应关系确定次级声源布局,然后应用遗传算法优化误差传感器布局,这样将二者的优化分离开来。类似地,文献[12]中对于二维自由空间利用声场的波域(柱谐域)<sup>[13-14]</sup>信息优化次级声源布局,解除了对误差传感器位置的依赖,同时以区域声势能作为控制目标。虽然所选布局在误差点降噪效果不如空间域搜索方法,但在空间声势能降噪量和系统鲁棒性方面表现更优。

收稿日期:2020-12-08

基金项目:国家自然科学基金(11974287)资助

作者简介:胥健(1992—),西北工业大学博士研究生,主要从事声场重构与再现研究。

通信作者:陈克安(1965—),西北工业大学教授,主要从事噪声控制研究。e-mail:kachen@nwpu.edu.cn。

本文将文献[12]的工作拓展到三维封闭空间,利用声场的平面波分解构造波域 ANC 代价函数,进行次级声源布局优化。以刚性壁矩形封闭空间为对象,仿真对比 2 种传统的空间域方法,并讨论所提方法在实际中的布局优化效果和相关问题。

## 1 空间域次级声源布局问题

对于封闭空间单频声场的 ANC,陈述空间域中的次级声源布局问题,定义评价布局性能的 4 个指标。

假设  $L$  个次级声源和  $M$  个误差传感器,其布局分别为  $\{\mathbf{r}_l\}_{l=1}^L$  和  $\{\mathbf{r}_m\}_{m=1}^M$ 。在误差传感器处测得的残余声压是初级声压和次级声压的叠加,为

$$\mathbf{p}_r = \mathbf{p}_p + \mathbf{Z}\mathbf{q} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{p}_p$  和  $\mathbf{p}_r$  分别为  $M \times 1$  的初级和残余声压向量;  $\mathbf{Z}$  是  $M \times L$  的 ATI 矩阵;  $\mathbf{q}$  为  $L \times 1$  的次级声源强度向量。

空间域 ANC 的代价函数为误差传感器处残余声压平方和,即

$$J_{SD} = \mathbf{p}_r^H \mathbf{p}_r = \|\mathbf{p}_p + \mathbf{Z}\mathbf{q}\|_2^2 \quad (2)$$

式中:  $(\cdot)^H$  表示共轭转置;  $\|\cdot\|_2$  是  $L_2$  范数。假设 (2) 式方程组超定 ( $M > L$ ), 则最优次级声源强度为  $\mathbf{q} = -(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \mathbf{p}_p$ , 由此获得该布局下的降噪量为<sup>[2]</sup>

$$\Delta = 10 \lg \frac{\mathbf{p}_p^H \mathbf{p}_p}{\mathbf{p}_p^H [\mathbf{I}_M - \mathbf{Z}(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H] \mathbf{p}_p} \quad (3)$$

$\Delta$  仅说明  $M$  个误差传感器位置的降噪量, 下面定义另外 3 个常用的布局性能指标:

1) ATI 矩阵的条件数  $\kappa(\mathbf{Z})$

定义  $\kappa(\mathbf{Z}) = \|\mathbf{Z}\|_2 \|\mathbf{Z}^{-1}\|_2$ , 若  $\kappa(\mathbf{Z})$  很大, 则 ATI 矩阵呈病态, ANC 系统对外界摄动敏感。

2) 控制功率  $P$

定义  $P = \mathbf{q}^H \mathbf{q}$ , 是次级声源输出功率的量度。若  $P$  过大, 会导致控制区域外声级增大, 还会引起扬声器的非线性响应。

3) 空间声势能的降噪量  $\Delta_E$

表示整个封闭空间的降噪量, 只与次级声源的布局 and 强度有关。虽然实际中无法直接测量, 但对于简单形状的封闭空间可以利用模态叠加方法进行解析计算<sup>[1]</sup>。

通过以上叙述可知, 在空间域, 对于某个次级声

源布局, 一旦误差传感器布局预先给定, 即可估计其降噪性能。将误差传感器处的初级声压  $\mathbf{p}_p$  和相应的所有备选次级声源的 ATI 矩阵  $\mathbf{Z}_c$  统称为布局优化的“空间域先验信息”。传统的空间域布局优化方法即利用  $\mathbf{p}_p$  和  $\mathbf{Z}_c$  数据, 通过具体的优化算法 (如 SA、GSO 等) 选择次级声源布局, 如图 1 所示。

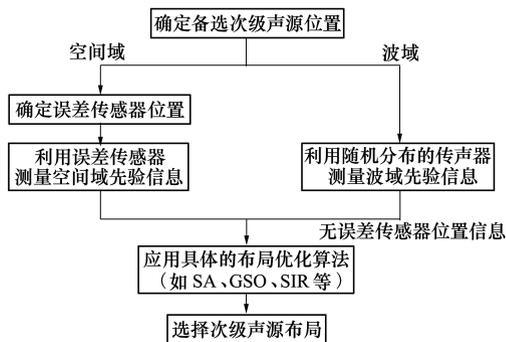


图 1 次级声源布局优化流程

## 2 波域次级声源布局优化

利用随机分布的传声器测量声场, 经平面波分解获得初级声场和各备选次级声源的波域信息, 构造波域代价函数, 进行次级声源布局优化。

### 2.1 基于平面波分解的波域先验信息获取

根据平面波分解, 封闭空间声场  $s(\mathbf{r})$  可以近似展开为一系列平面波的叠加, 这样  $s(\mathbf{r})$  可由对应的平面波幅值 (plane wave amplitude, PWA) 近似表征<sup>[15]</sup>。这些 PWA 不包含空间位置信息。实际中, 常用随机分布的传声器测量获取声场的 PWA。需要说明, ANC 关心的局部区域一般远离壁面, 因此分解中的倏逝波成分可以忽略<sup>[16]</sup>。

#### 2.1.1 初级平面波

首先利用  $Q$  个传声器采样初级声场, 假设平面波基的离散平面波个数为  $R$ , 由下式计算初级 PWA

$$\mathbf{w}_p = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{s}_p \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{w}_p$  为  $R \times 1$  的初级 PWA 向量;  $\mathbf{s}_p$  为  $Q \times 1$  的采样声压向量;  $\mathbf{H}$  是  $Q \times R$  的平面波分解矩阵, 其元素表达式见文献[15];  $(\cdot)^\dagger$  表示伪逆。

#### 2.1.2 单位次级平面波

给定  $L$  个次级声源, 以第  $l$  个强度为  $q_l$  的次级声源单独发声为例, 同样用  $Q$  个传声器做采样, 相应的次级 PWA 为  $\mathbf{w}_{s,l} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{s}_{s,l} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{z}_l q_l$ , 其中  $\mathbf{z}_l$  是该次级声源到  $Q$  个传声器之间的 ATI 向量。因此  $L$  个次级

声源产生的次级声场的次级 PWA 为

$$w_s = H^T Z q = \Gamma q \quad (5)$$

式中:  $R \times L$  的矩阵  $\Gamma$  称为单位次级 PWA 矩阵, 其第  $l$  列为  $\gamma_l = H^T z_l$ , 解释为第  $l$  个次级声源发声强度为  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  时的次级 PWA。(5) 式给出了次级 PWA 和次级声源强度之间的关系。

### 2.2 波域代价函数

以残余 PWA 的平方和为代价函数, 即

$$J_{\text{WD}} = w_r^H w_r = \|w_p + \Gamma q\|_2^2 \quad (6)$$

(6) 式只涉及次级声源布局信息, 与误差传感器位置无关。由于一般有  $R > L$ , 因此最优次级声源强度为  $q_{\text{WD}} = -(\Gamma^H \Gamma)^{-1} \Gamma^H w_p$ , 进而可以类似(3)式计算该布局下 PWA 的衰减量。对比(2)式以最小化误差传感器处残余声压为目标, (6)式利用的残余 PWA 更能反映控制区域的全空间信息, 是面向空间降噪的控制目标。

### 2.3 次级声源布局优化

2.1 小节获得了布局优化的波域先验信息, 初级 PWA 向量  $w_p$  和单位次级 PWA 矩阵  $\Gamma$ , 均不涉及误差传感器位置信息。之后便可应用具体的布局优化算法选择次级声源布局(见图 1), 本文采用简单的 SA 搜索, 方法标记为 WD-SA。

需要强调, 虽然波域方法利用(6)式的代价函数, 选出使得残余 PWA 平方和最小的次级声源布局, 但由于实际中采用空间域控制, 因此评价所选布局的降噪性能仍需给定误差传感器位置, 再计算第 1 节介绍的 4 个指标。

## 3 仿真结果与讨论

仿真采用的模型为刚性壁矩形封闭空间, 如图 2 所示(同文献[2]), 尺寸为  $6 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ 。以空间几何中心为原点, 初级声源位于  $(-3, 0, 0.6)$ 。33 个备选次级声源和 32 个误差传感器的位置设置参考文献[2]。

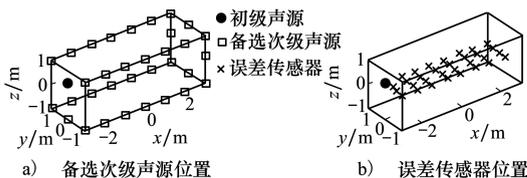


图 2 刚性壁矩形封闭空间

### 3.1 PWA 解析值的理论结果

首先考查当获知波域先验信息真实值时, WD-SA 的优化结果。在刚性壁矩形封闭空间中, 对于单极子产生的声场, 容易推导其 PWA 解析值。

假设单频  $f$  下, 位于  $r'$  处强度为  $q$  的单极子发声产生空间声场, 由模态理论, 任一点  $r$  处的声压可近似为<sup>[17]</sup>

$$p(r, k) \approx i\rho c k q \sum_{N_\psi} \frac{\psi_n(r') \psi_n(r)}{\Lambda_n(\kappa_n^2 - k^2)} \quad (7)$$

式中:  $k = 2\pi f$  为波数,  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\rho$  为空气密度;  $c$  为声速;  $\psi_n, \Lambda_n$  和  $\kappa_n$  分别表示声模态函数、体积归一化参数和封闭空间的复特征值, 其表达式见文献[17]; 下标  $n$  表示模态阶数,  $n = [n_1, n_2, n_3]^T$ ,  $(\cdot)^T$  表示转置;  $N_\psi$  为模态截断数。

由于矩形腔中各模态可以看作 8 个平面波的叠加<sup>[16]</sup>, 因此(7)式进一步写为

$$p(r, k) \approx \sum_{N_\psi} \sum_{\iota=1}^8 \frac{i^{u_\iota n+1} \rho c k q \psi_n(r')}{8\Lambda_n(\kappa_n^2 - k^2)} \exp(-i(u_\iota \circ k_n)^T r) \quad (8)$$

式中:  $(\circ)$  为 Hadamard 积;  $k_n$  是第  $n$  阶特征波矢  $[n_1 \pi/l_x, n_2 \pi/l_y, n_3 \pi/l_z]^T$ ;  $u_\iota$  是如下符号矩阵  $U$  的第  $\iota$  列

$$U = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

由(8)式可得第  $n$  阶声模态对应的 8 个 PWA 解析值

$$w_{n,\iota} = \frac{i^{u_\iota n+1} \rho c k q \psi_n(r')}{8\Lambda_n(\kappa_n^2 - k^2)}, \quad \iota = 1, \dots, 8 \quad (9)$$

及其传播方向  $(\varphi, \theta)$

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\pm \frac{n_2 l_x}{n_1 l_y}\right), \varphi_n \in [0^\circ, 360^\circ) \\ \theta = \arccos\left(\pm \frac{n_3 \pi}{l_z \|k_n\|_2}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\varphi$  为方位角;  $\theta$  为天顶角。

利用(9)和(10)式, 可计算单极子激励下矩形封闭空间声场的 PWA 解析值及其方向, 从而获取波域先验信息  $w_p$  和  $\Gamma$ , 进行次级声源布局优化。本文算例中截取前 500 阶声模态, 得到 4 000 个平面波。需要强调, 各阶声模态对应的平面波的波数不相同, 即使传播方向一致, 也无法合并。

同文献[2], 考查 88 和 176 Hz 这两阶桨叶通过

频率,比较 WD-SA 和传统的 2 种空间域方法,分别标记为 SD-SA 和 SD-GSO。SA 算法的参数设置参考文献[2],初始温度为 0.9,冷却系数为 0.98,搜索重复运行 20 次取平均结果。GSO 算法的具体流程见文献[3]。

图 3 和图 4 分别给出了 2 个频率下 3 种布局优化方法(SD-SA、SD-GSO、WD-SA)所选布局(针对不

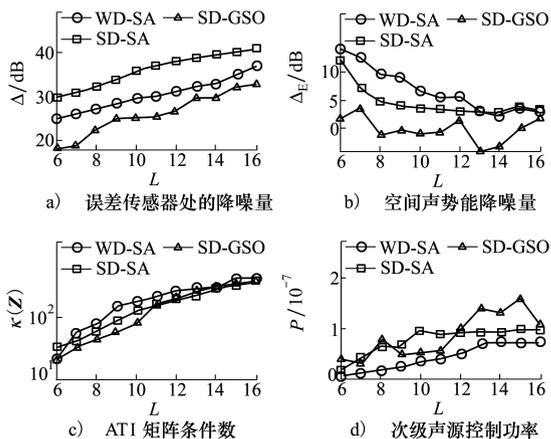


图 3 88 Hz 下 3 种布局优化方法所选布局的性能指标

同激励次级声源个数  $L$ ) 的性能指标。可见,SD-SA 在误差传感器处的降噪量  $\Delta$  最大,因为其优化目标即使得  $\Delta$  最大。SD-GSO 所选布局的各指标表现较差。三者的 ATI 矩阵条件数  $\kappa(\mathbf{Z})$  相差不大。WD-SA 虽然  $\Delta$  不如 SD-SA,但能获得明显更好的空间声势能降噪量  $\Delta_E$ ,同时所需的控制功率  $P$  更小。

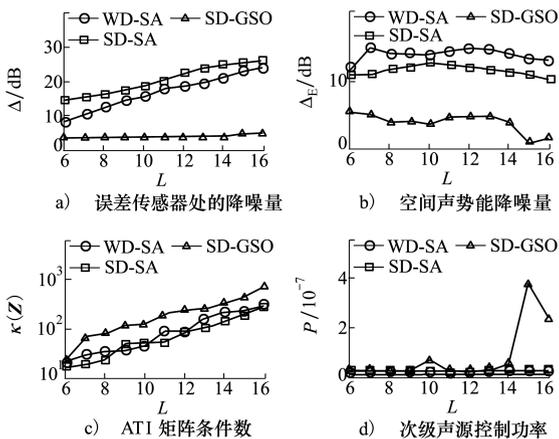


图 4 176 Hz 下 3 种布局优化方法所选布局的性能指标

### 3.2 PWA 测量估计值的结果

3.1 小节探究了波域先验信息解析值下的布局优化效果,但实际上只能通过传声器现场测量来估计  $\mathbf{w}_p$  和  $\mathbf{\Gamma}$ (如 2.1 小节介绍)。本文采用  $Q = 100$  随机分布的传声器(称为一个传声器组)采样封闭空间声场,并附加信噪比 30 dB 的零均值高斯噪声作为环境扰动。另外,平面波方向的解析值也难以获知,需通过求解 Thomson 问题,在球面上均匀选取  $R$  个离散传播方向<sup>[15]</sup>,组成平面波基。由于传声器随机布放,不同随机位置可能会产生影响,因此考查 50 组传声器组。激励次级声源个数  $L$  设置为 8,SA 算法重复运行 20 次取平均结果。

图 5 给出了 88 Hz 下利用 PWA 测量估计值计算的 WD-SA 所选布局的降噪量指标,实线表示的相同信噪比下 SD-SA 的 20 次搜索平均结果作为参考。可以看到,WD-SA 能达到更优的  $\Delta_E$ ,但不同随机位置的传声器组的结果相差很大。差异与传声器组对 PWA 的估计误差有关。离散平面波个数  $R$  对结果的影响没有明显规律,可选取较小的  $R$  以减少计算量。

由于真实的平面波方向难以获知,因此无法直接计算 PWA 的估计误差。为此,这里利用 PWA 进

一步做声场重构,计算重构声场的相对平均误差(RME)来间接考查 PWA 的估计精度,定义如下<sup>[18]</sup>

$$E_{RM} = \|\mathbf{s} - \hat{\mathbf{s}}\|_2 / \|\mathbf{s}\|_2 \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{s}$  和  $\hat{\mathbf{s}}$  分别是场点的真实和重构声压向量。

图 6 给出了初级 PWA 和单位次级 PWA 对应的重构 RME。同样看到  $R$  影响较小。为便于观察,设置图 6a)纵轴为对数尺度,发现不同传声器组的初级声场重构 RME 不同,但大多数在 0.1 以下,差

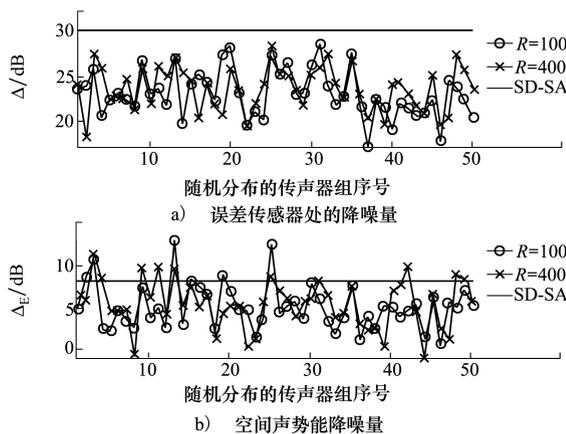


图 5 88 Hz 下利用 PWA 测量估计值的 WD-SA 所选布局的降噪量指标( $L=8$ )

异不大。对于各备选次级声源的单位次级声场,同一传声器组得到的重构 RME 差异很大,虽然大多数在 0.3 以下,但一些组个别次级声源甚至超过 0.5。这是因为不同位置备选次级声源产生的单位次级声场不同,同一传声器组在不同待测声场下的重构能力不尽相同。对于不同传声器组,单位次级声场重构 RME 分布也很不相同。因此,需要针对具体的待测声场,选择较优的传声器组做采样。

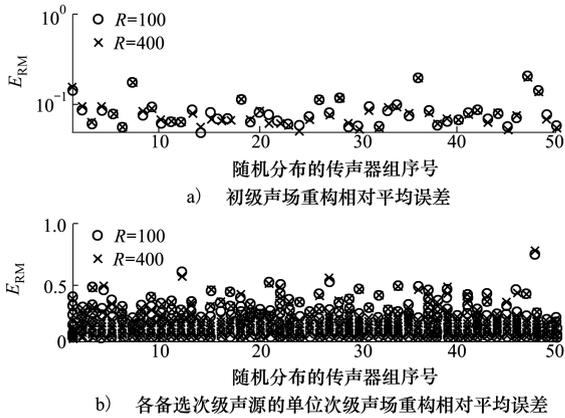


图 6 88 Hz 下 100 个随机分布传声器重构声场的相对平均误差

联合图 5 和图 6,对比  $R=100$  下的第 13 组和第 50 组传声器组,前者的降噪效果远优于后者,但观察图 6,前者的重构 RME 劣于后者,其中初级 PWA 的重构 RME 分别为 0.084 和 0.057;对于单位次级 PWA 的重构 RME,第 13 组存在 7 个在 0.21 以上,

而第 50 组全部小于 0.21。这说明重构 RME 并不完全对应波域先验信息估计值的布局优化性能。可能的原因是重构 RME 不能等价于 PWA 估计误差;或者是不同次级声源的声场贡献作用不同,因而其重构 RME 对布局优化的影响也不同,对于作用小的次级声源,即使其单位次级 PWA 的重构 RME 很大,也不会产生影响;也与波域代价函数的布局优化目标和空间域控制的不匹配有关。

## 4 结 论

本文利用封闭空间声场的平面波分解构造波域 ANC 代价函数,优化次级声源布局。主要结论如下:

1) WD-SA 利用波域先验信息(初级声场 PWA 和各备选次级声源的单位次级声场 PWA)优化次级声源布局,不涉及具体的误差传感器位置信息。以残余声场 PWA 平方和作为代价函数,是一种面向全局控制的目标函数,所选布局相比空间域方法能获得更好的空间声势能降噪效果。

2) 实际应用 WD-SA 需要预先利用传声器采样封闭空间声场,估计其 PWA,通过 PWA 估计值所选的布局可以达到比空间域方法更好的空间声势能降噪量。PWA 估计精度影响 WD-SA 的布局优化效果,其与客观存在的待测声场和传声器位置有关。

3) 下一步研究需关注如何提高 PWA 估计精度,深入探究 PWA 估计误差对布局优化结果的影响,并进行实验验证。

## 参考文献:

- [1] 陈克安. 有源噪声控制(第 2 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014  
CHEN Kean. Active noise control (2nd ed.)[M]. Beijing, National Defense Industry Press, 2014 (in Chinese)
- [2] BAEK K, ELLIOTT S J. Natural algorithms for choosing source locations in active control systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 186(2): 245-267
- [3] ASANO F, SUZUKI Y, SWANSON D. Optimization of control source configuration in active control systems using Gram-Schmidt orthogonalization[J]. IEEE Trans on Speech and Audio Processing, 1999, 7(2): 213-220
- [4] KHALILIAN H, BAJIC I V, VAUGHAN R G. Comparison of loudspeaker placement methods for sound field reproduction[J]. IEEE/ACM Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2016, 24(8): 1364-1379
- [5] LILIS G, ANGELOSANTE D, GIANNAKIS G. Sound field reproduction using the lasso[J]. IEEE/ACM Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2010, 18(8): 1902-1912
- [6] GAUTHIER P A, LECOMTE P, BERRY A. Source sparsity control of sound field reproduction using the elastic-net and the lasso minimizers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(4): 2315-2326
- [7] RUCKMAN C E, FULLER C R. Optimizing actuator locations in active noise control systems using subset selection[J]. Journal

- of Sound and Vibration, 1995, 186(3): 395-406
- [8] LIU J, WANG X, WU M, et al. An active control strategy for the scattered sound field control of a rigid sphere[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(1): 52-58
- [9] KOYAMA S, CHARDON G, DAUDET L. Optimizing source and sensor placement for sound field control: an overview[J]. IEEE/ACM Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2020, 28: 696-714
- [10] MANOLAS D A, BORCHERS I, TSAHALIS D T. Simultaneous optimization of the sensor and actuator positions for an active noise and/or vibration control system using genetic algorithms, applied in a dornier aircraft[J]. Engineering Computations, 200, 17(5): 620-630
- [11] MARTIN T, ROURE A. Optimization of an active noise control system using spherical harmonics expansion of the primary field [J]. Journal of Sound and Vibration. 1997, 201(5): 577-593
- [12] 陈克安, 胥健, 王磊, 等. 基于声场分解和稀疏正则化的二维空间次级声源布局优化[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 697-703
- CHEN Kean, XU Jian, WANG Lei, et al. Optimization of secondary sources configuration in two-dimensional space based on sound field decomposition and sparsity-inducing regularization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 697-703 (in Chinese)
- [13] BETLEHEM T, ABHAYAPALA T D. Theory and design of sound field reproduction in reverberant rooms[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(4): 2100-2111
- [14] ZHANG W, ABHAYAPALA T D, BETLEHEM T, et al. Analysis and control of multi-zone sound field reproduction using modal-domain approach[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140(3): 2134-2144
- [15] VERBURG S A, FERNANDEZ-GRANDE E. Reconstruction of the sound field in a room using compressive sensing[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(6): 3770-3779
- [16] MIGNOT R, CHARDON G, DAUDET L. Low frequency interpolation of room impulse responses using compressed sensing[J]. IEEE/ACM Trans on Audio, Speech and Language Processing, 2014, 22(1): 205-216
- [17] HANSEN C, SNYDER S, QIU X, et al. Active control of noise and vibration (2nd ed.)[M]. Boca Raton, CRC Press, 2012
- [18] WANG Y, CHEN K. Sparse plane wave decomposition of a low frequency sound field within a cylindrical cavity using spherical microphone arrays[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 431: 150-162

## Optimization of secondary source configuration in enclosure using plane wave decomposition

XU Jian<sup>1</sup>, CHEN Kean<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yazhou<sup>2</sup>

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2.Xi'an ACT Acoustic Science and Technology Co., Ltd, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** The optimization of secondary source configuration for an active noise control (ANC) system in its enclosed space generally focuses on noise reduction requirements at discrete points only. This may lead to the poor noise reduction performance in the whole spatial region, and it is necessary to know the information on error sensor positions in advance. To address this problem, a cost function for spatial-region-oriented noise reduction is proposed. The plane wave decomposition of the enclosed sound field is used to obtain the primary field plane waves and the unit secondary field plane wave of each candidate secondary source as the prior knowledge for configuration optimization, so as to formulate a wave-domain ANC cost function. The optimization method adopts the simulated annealing search. Taking a rigid-walled rectangular cavity as an example, the optimization method is firstly compared with two space-domain methods by using analytic values of the wave-domain prior knowledge. The comparison results show that the better reduction of spatial acoustic potential energy can be achieved independent of the error sensor configuration information. Then the estimated values of the wave-domain prior knowledge through measuring randomly distributed microphones are used to optimize the configuration of the ANC system. The optimization results suggest that the noise reduction of spatial acoustic potential energy of the optimized configuration can be better than that of the space-domain method, but the microphone positions have a great influence on the noise reduction performance.

**Keywords:** active noise control; secondary source configuration; plane wave decomposition; sound field reconstruction

**引用格式:** 胥健, 陈克安, 王磊, 等. 基于平面波分解的封闭空间次级声源布局优化[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 794-800

XU Jian, CHEN Kean, WANG Lei, et al. Optimization of secondary source configuration in enclosure using plane wave decomposition[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(4): 794-800 (in Chinese)