

舱室噪声主动控制系统布放优化与试验研究

石利权¹, 梁宁远², 周国成², 车昭兵¹, 李善军³, 靳国永¹

- (1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国航空工业空气动力研究院空气动力噪声及其控制黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 中国船舶集团有限公司系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 直升机舱室噪声对舱内的环境舒适度和安全性有极大的负面影响。针对应用于舱室噪声主动控制系统的电声器件布放问题, 本文基于带精英策略的非支配排序遗传算法, 对舱室封闭空间声场进行空间离散化处理, 进一步将电声器件数量寻优、位置寻优, 次级声源发声强度寻优问题转化为组合优化问题, 以测点处声压平方和最小为控制目标, 将多目标进化算法与主动控制方法相结合, 对系统的电声器件布放进行寻优求解。综合考虑降噪系统的复杂性与可行性以及舱室内部空间的有限性, 选择控制系统次级声源与误差传声器为 4 通道配置。独立多次重复运行寻优程序, 统计出电声器件最常出现的位置, 并在此基础上进行了计算机仿真。最后在实际模拟舱室中开展了试验, 结果表明: 寻优结果可使舱内人员坐姿头部高度处降噪量最高达到 24.9 dB, 全局降噪量达到 19.4 dB。

关键词: 舱室噪声; 有源噪声控制; 多目标优化; 第二代非支配排序遗传算法; 电声器件; 仿真及试验

中图分类号: TB535 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202310032

Optimal placement and experimental study on active noise control system in the cabin

SHI Liquan¹, LIANG Ningyuan², ZHOU Guocheng², CHE Zhaobing¹,
LI Shanjun³, JIN Guoyong¹

- (1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Aerodynamic Noise and Control Key Laboratory of Heilongjiang Province, AVIC Aerodynamics Research Institute, Harbin 150001, China; 3. System Engineering Research Institute of China State Shipbuilding Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Helicopter cabin noise negatively impacts cabin environmental comfort and safety. In this paper, non-dominated sorting genetic algorithm II is used to solve the electro-acoustic device placement problem of the active control system applied in the cabin. An appropriate spatial discretization of the sound field of the confined space is preformed, and then the electro-acoustic devices placement optimization problem, quantity optimization problem, and secondary source sound intensity optimization problem are further transformed into a combinatorial optimization problem. Taking the minimum value of the sum of the squares of the acoustic pressures at the measurement points as the control objective, the multi-objective optimization algorithm combined with the active control algorithm is adopted to solve the optimal placement of electroacoustic devices in the system. Considering the noise control system's complexity and feasibility and limited space inside the cabin, the control system's secondary sound sources and error sensors are selected as a 4-channel configuration. The optimization program is repeated several times independently, and the most frequently occurring positions of electroacoustic devices are counted, based on which computer simulation and experiment are conducted, and the results show that the optimization results can make the noise reduction at the height of the head of the cabin personnel in the sitting position reach up to 24.9 dB, and the global noise reduction reaches 19.4 dB.

Keywords: cabin noise; active noise control; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm II; electro-acoustic devices; simulation and experiment

在直升机等现代航空飞行器的设计与制造中, 结构轻量化和体积小型化也是发展的方向。由于飞行器自身动力装置及外界环境因素的影响, 这一发

收稿日期: 2023-10-15; 修订日期: 2024-01-16

基金项目: 先进声学测试与降噪技术联合创新发展中心资助项目(XJSX-2022-02)

展趋势也导致了舱室声场环境的恶化。与此同时,随着舱内人员对舱室环境的舒适度和安全性需求的不断提高,舱室内部噪声控制问题日益受到重视。相较于噪声被动控制(passive noise control, PNC)技术,噪声主动控制(active noise control, ANC)在低频段内可以获得良好的噪声控制效果,且具有易于控制、便于安装卸载、结构负荷增量较小等优点^[1]。然而在实际应用中,控制系统的性能往往受到控制器参数配置和电声器件布放的影响。前者主要受限于目前的数字信号处理技术发展水平,因此在电声器件类型确定的前提下,其布放优化策略就成为决定整个系统在实际应用中控制性能优劣的重要因素。BAEK等^[2]将电声器件布放寻优描述为一个复杂的非线性最优化问题。刘姜涛等^[3]总结了控制系统中次级声源和误差传声器数量、误差传声器面以及次级声源面的距离对控制效果的影响规律。刘洋等^[4]提出一种将解析方法与遗传算法相结合的次级声源优化策略,选取局部空间声压平方和作为控制系统的目标函数,通过算法优化次级声源数量,通过解析法得到声源的布放位置,求出相应位置的最优次级声源强度,并得到次级声源位置与声场分布函数之间的关系。王国栋等^[5]建立了半自由空间声场辐射模型。张肃等^[6]建立了封闭空间声场模型,采用正交试验分析方法分析了声源与声场之间相互作用的影响。王学磊等^[7]提出了一种基于遗传算法的固定参数与柔性参数交替优化的渐次搜索逼近的策略,考虑了次级声源位置、声源强度等参数间的相互影响。王晋伟等^[8]提出了一种基于扰动跟踪方法的变压器有源噪声控制算法,对电力变压器噪声信号进行了分析,并通过工业计算机和可视化编程实现了扰动跟踪控制功能。HUANG等^[9]利用模态振动能量和多目标粒子群算法相结合的方法改进寻优算法;胡涵等^[10]针对某型直升机舱室内的低频噪声,利用自主研发的多通道ANC系统进行了控制试验,可在驾驶人员位置处实现6 dB左右的降噪量。

目前对直升机舱室内电声器件布放优化的研究尚少,为解决实际工程问题,本文在已有理论研究的基础上,针对应用于直升机舱内ANC系统的电声器件布放问题,提出基于带精英策略的非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)^[11]的布放策略。通过适当离散化处理封闭空间声场^[12],将电声器件布放寻优问题转化为组合优化问题,以测点处声压平方和最小为控制目标,将多目标进化算法与主动控制方法相结合,对ANC系统电声器件的最佳数量、最佳位置及次级声源发声强度进行寻优求解,并通过仿真及试验验证降噪效果。

1 舱室噪声有源控制理论模型

舱室封闭空间中,声源模拟系统产生初级噪声。假设在舱室空间中有 L 个次级声源,其声源强度 q_s 表示为:

$$\mathbf{q}_s = [q_{s1} \quad q_{s2} \quad \cdots \quad q_{sL}]^T \quad (1)$$

利用这 L 个次级声源对噪声进行主动控制,可得空间任意测点 e 处的声压表达式为:

$$p_e = p_p + p_s = Z_{pe} \mathbf{q}_p + Z_{se} \mathbf{q}_s \quad (2)$$

式中, p_e 为测点(误差传声器) e 处的声压; p_p 为初级声源在测点 e 处的声压; p_s 为次级声源在测点 e 处的声压; Z_{pe} 为初级声源到测点 e 处的传递函数构成的声传输阻抗矩阵; \mathbf{q}_p 为初级声源的声源强度; Z_{se} 为 L 阶行向量,为 L 个次级声源到测点 e 处的传递函数构成的声传输阻抗矩阵。

封闭空间的噪声主动控制就是将测点选取在需要降噪的空间区域内,通过设定控制目标函数,合理布放次级声源并设定发声强度进行控制,以使待降噪区域达到一定的降噪效果。用 L 个次级声源进行控制,通过声压叠加可得空间 M 个测点处的声压为:

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{P}_p + \mathbf{P}_s = \mathbf{Z}_p \mathbf{q}_p + \mathbf{Z}_s \mathbf{q}_s \quad (3)$$

式中, $\mathbf{P}_e = [p_{e1} \quad p_{e2} \quad \cdots \quad p_{eM}]^T$ 为 M 个测点处的声压列向量; \mathbf{Z}_p 为 M 阶列向量,为初级声源到 M 个测点的声传输阻抗矩阵; \mathbf{Z}_s 为 $M \times L$ 阶矩阵,为 L 个次级声源点到 M 个测点的传递函数构成的声传输阻抗矩阵。

为实现舱室封闭空间中待消声区域的降噪目的,理论上的控制目标是使初级声源和次级声源的总辐射功率最小。假设所用各误差传声器的频响和灵敏度一致,则此时声源总辐射功率的最小准则与各误差传声器处的声压平方和最小等价^[7],而且声压平方和在数学上处理相对简便,有利于优化算法的快速收敛和计算效率的提高。因此,本文将目标函数设定为 M 个误差点处声压的平方和。

$$J_e = \mathbf{P}_e^H \mathbf{P}_e = (\mathbf{Z}_p \mathbf{q}_p + \mathbf{Z}_s \mathbf{q}_s)^H (\mathbf{Z}_p \mathbf{q}_p + \mathbf{Z}_s \mathbf{q}_s) \quad (4)$$

式中, J_e 为次级声源强度 q_s 的二次型函数;上标“H”表示矩阵的共轭转置。利用 J_e 对 q_s 求偏导,可得当 q_s 为下式时, J_e 取得最小值:

$$\mathbf{q}_s = -(\mathbf{Z}_s^H \mathbf{Z}_s)^{-1} \mathbf{Z}_s^H \mathbf{Z}_p \mathbf{q}_p \quad (5)$$

为了评价加入次级声源阵列后待消声区域的降噪效果,定义ANC系统的降噪量(attenuation level, AL)表达式为:

$$L_{AL} = -20 \lg \left(\frac{P_{afte}(i)}{P_{befe}(i)} \right); i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式中, $P_{befe}(i)$ 、 $P_{afte}(i)$ 分别为加入次级声源前、后各误差点处的声压。 L_{AL} 数值越大, 说明降噪效果越好, 根据求得的加入次级声源后误差点的降噪量, 近似刻画待消声区域的降噪量分布, 从而评价布放方案的优劣。

实际计算描述为: 施加直升机实录噪声作为初级声源, 求得初级路径脉冲响应; 进一步地, 次级声源依次发出白噪声激励, 求得次级路径脉冲响应; 之后运用 FxLMS (filter-x least mean square) 算法求得 ANC 系统的降噪量。

2 基于 NSGA-II 算法的电声器件布放寻优

NSGA-II 算法从遗传算法的基础上改进而来, 它基于 Pareto 最优解解决多目标进化问题^[13] (multi-objective optimization problems, MOPs)。电声器件布放优化涉及不同位置的降噪性能等多个目标, 相较于单目标优化算法, 多目标优化算法更能综合考虑各目标间的平衡关系, 得到更全面的解决方案。而与其他多目标优化算法相比, NSGA-II 算法具有较好的全局搜索能力和鲁棒性, 并在优化过程中同时评估决策空间中的多个解, 且能够有效保持种群多样性, 避免收敛于局部最优解的问题, 这些对于涉及许多约束条件和变量的布放问题尤为重要; 而且 NSGA-II 算法能够灵活应对不同问题的特性和约束条件, 通过调整不同参数以满足不同的优化需求, 这使其在舱室 ANC 系统器件布放优化问题中表现出色。

以最小化问题为例, MOPs 数学形式如下^[13]:

$$\min_{x \in \mathbf{R}^d} F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)],$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \xi_j(x) \geq 0; j = 1, \dots, J \\ \psi_h(x) = 0; h = 1, \dots, H \end{cases} \quad (7)$$

式中, x 为 d 维决策变量; \mathbf{R}^d 为 x 的可行域; $F(x)$ 为 MOPs 的目标函数; m 为待优化目标个数; $\xi_j(x)$ 和 $\psi_h(x)$ 分别为 MOPs 的不等式约束和等式约束。

假设 x_A 和 x_B 为 MOPs 的 2 个解, 当且仅当满足如下公式条件时, 解 x_A 支配解 x_B , 记作 $x_A < x_B$:

$$\forall i \in (1, \dots, m): f_i(x_A) \leq f_i(x_B),$$

$$\wedge \exists i \in (1, \dots, m): f_i(x_A) < f_i(x_B) \quad (8)$$

当决策空间 \mathbf{R}^d 中不存在其他解支配 x^* 时, 即 $\neg \exists x \in \mathbf{R}^d: x < x^*$, 则 x^* 是 MOPs 的 Pareto 最优解。由所有 Pareto 最优解组成的集合称为 Pareto 最优解

集 (Pareto optimal solution set, PS):

$$PS = \{x^* \in \mathbf{R}^d | \neg \exists x \in \mathbf{R}^d: x < x^*\} \quad (9)$$

PS 在目标空间的映射构成 Pareto 最优前沿 (Pareto optimal frontier, PF):

$$PF = \{F(x) | x \in PS\} \quad (10)$$

采用 NSGA-II 算法求解 ANC 系统电声器件布放寻优问题的流程如图 1 所示。其中适应度函数由式 (4) 确定, 因此求解电声器件布放优化问题转换为求解使 J_e 最小的次级声源与误差传声器的空间坐标问题。在封闭空间内, ANC 系统中的电声器件, 包括次级扬声器、误差传声器的位置都可以移动, 视为连续域优化。通过采用真值编码的方式, 对电声器件的离散空间坐标进行编码, 从而形成种群个体。这种编码方式能够有效避免二进制编码在连续函数离散化时可能引入的映射误差。因此, 连续域优化问题可以转化为组合优化问题。形象描述就是将舱室内部空间进行适当的空间网格划分, 使电声器件待选坐标的范围限制在舱内有限的一些网格节点上。

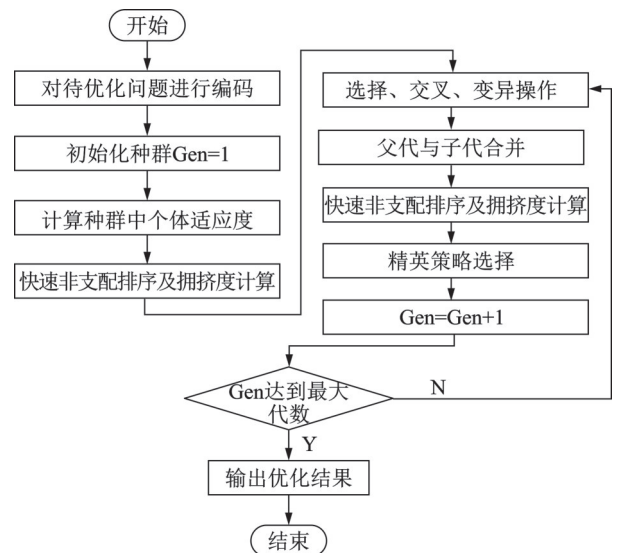


图 1 NSGA-II 求解 ANC 系统电声器件布放优化算法流程
Fig.1 Flowchart for solving ANC system electro-acoustic device optimal placement using NSGA-II algorithm

根据以下步骤对舱室内的电声器件布放进行优化:

(1) 对 N 个电声器件的位置进行编码, 并将一条编码串 E 作为一个种群个体, 同时给定约束范围, 令种群个体中的每一维元素 l_N 在约束范围内随机赋值, 实现对种群的初始化。之后对初始化种群进行适应度值的计算, 并将适应度值 F 加入编码串 E 序列中:

$$E = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ \dots \ l_N \ F_1 \ \dots] \quad (11)$$

式中, F_1 表示每一个种群的适应度值。

(2)按照适应度值大小进行非支配快速排序以及拥挤度的计算,并将计算得到的种群个体序值 R 及拥挤距离 C 也加入到编码串 E 序列中:

$$E=[l_1 \ l_2 \ l_3 \ \dots \ l_N \ F_1 \ \dots \ R_1 \ C_1] \quad (12)$$

式中, R_1 表示每一个种群的序值; C_1 表示每一个种群的拥挤距离。

(3)为了避免种群陷入局部最优,交叉操作采用模拟二进制交叉(SBX)^[14],交叉分布指数为30,交叉概率为0.9。假设随机选择的两个互不相同的父代种群个体分别为 $X^1(x_1^1, \dots, x_D^1)$ 和 $X^2(x_1^2, \dots, x_D^2)$,通过交叉操作得到的子代个体分别为 $C^1(c_1^1, \dots, c_D^1)$ 和 $C^2(c_1^2, \dots, c_D^2)$ 。

$$\begin{cases} c_i^1 = 0.5[(1+\beta)x_i^1 + (1-\beta)x_i^2] \\ c_i^2 = 0.5[(1-\beta)x_i^1 + (1+\beta)x_i^2] \end{cases} \quad (13)$$

其中, β 由分布因子 η 动态随机决定,可表示为:

$$\beta = \begin{cases} (2 \times rand)^{\frac{1}{1+\eta}}, rand \leq 0.5 \\ (\frac{1}{2-2 \times rand})^{\frac{1}{1+\eta}}, rand > 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $rand$ 表示随机生成一个0~1之间的数; η 为一个自定义的参数,其值对交叉后的子代有一定程度的影响,更大的分布因子意味着子代与父代更接近。所以SBX算子在局部优化搜索上表现较佳,针对高维目标优化问题时有较好的效果。

变异操作采用多项式变异(PM)^[15]的方法,突变分布指数为20,变异概率为0.1。其原理为:随机选择一个个体 X^1 进行变异:

$$x^1(i) = x^1(i) + \Delta_i; \quad i = 1, 2, \dots, D \quad (15)$$

其中:

$$\Delta_i = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{1+\eta_u}} - 1, u_i < 0.5 \\ 1 - [2(1-u_i)]^{\frac{1}{1+\eta_u}}, u_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

式中, u_i 为0~1之间的随机数; η_u 为自定义非负实数。

(4)合并父代与子代种群,通过快速非支配排序和精英策略优选出新的种群参与下一次迭代。

3 计算机仿真

3.1 理论仿真

将直升机舱室抽象简化为 $1.8 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 1.35 \text{ m}$ 的长方体封闭空腔,如图2所示。图2中,CK1表示初级声源; L_0 表示简化的封闭空腔模型到YOZ平面的距离; L_x 、 L_y 和 L_z 分别表示封闭空腔模型的长、宽和高。设腔体内媒质为空气,其中声速为 $c = 343 \text{ m/s}$,媒质密度为 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$,腔体的6个内界面为均匀小阻尼壁面。控制的噪声频率范

围设定在20~500 Hz,则声波最短波长为 $\lambda_{\min} = c/f_{\text{high}} = 0.686 \text{ m}$ 。根据工程技术要求次级声源之间的距离要小于初级声源的最短波长,所以本文将待选次级声源的间距设定为0.6 m。

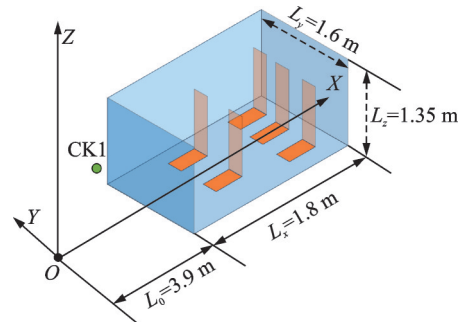
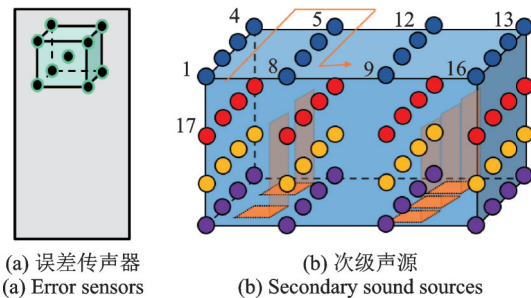


图2 简化的封闭空腔模型

Fig. 2 Simplified closed cavity model

在座椅位置适当位置处均匀布放误差传声器,共计 $9 \times 5 = 45$ 个待选位置,如图3(a)所示;在腔体内均匀布放次级声源,共有64个待选位置,如图3(b)所示。设空间中所有声源均为点声源,其中初级声源为CK1(3.64 m, 1.2 m, 0.8 m)。将次级声源的初相位在 $0 \sim 330^\circ$ 范围内以 30° 为间隔进行12等分,幅值分别取为初级声源幅值乘以0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5。利用NSGA-II算法对这些初相和幅值组合进行优选,获得降噪量随次级声源初相和幅值的变化关系,考虑如下几种情况:1)优化4个次级声源位置;2)优化8个次级声源位置;3)优化16个次级声源位置;4)优化32个次级声源位置。



(a) 误差传声器
(a) Error sensors

(b) 次级声源
(b) Secondary sound sources

图3 电声器件待选位置及编号示例

Fig. 3 Examples of alternative locations and numbers of electro-acoustic devices

以座椅后排左侧乘客处为例,给出以上不同数量的次级声源初相位和幅值比作用下的降噪量,分别如图4和5所示。

分析发现,对于不同幅值比曲线,随着初相位的变化,降噪量的变化趋势具有一致性,在初相位 150° 左右就可以达到10 dB左右的降噪量。对于不同初相位曲线,在幅值比为0.2时,绝大部分曲线可取得最大降噪量,随着幅值比增加至0.5,降噪量有所降低或只缓慢增加。因此,最佳幅值可定为初级声源乘以0.2。随着次级声源的增多,后排左侧乘客处的

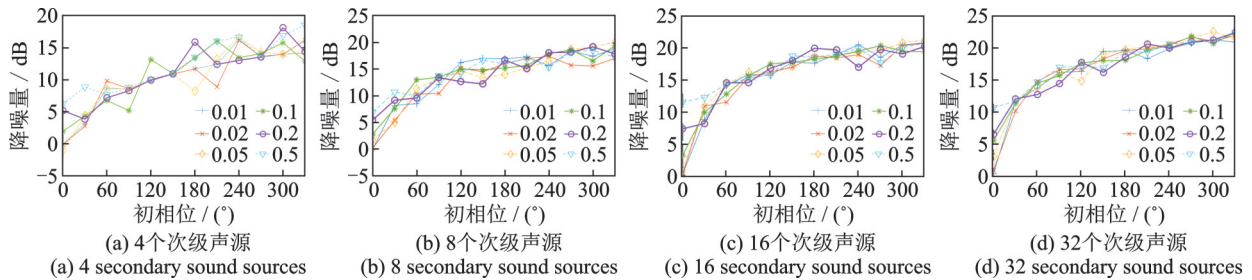


图 4 后排左侧乘客处不同次级声源不同初相位作用下的降噪量

Fig. 4 Noise reduction of different secondary sound sources with different initial phases at the rear left passenger

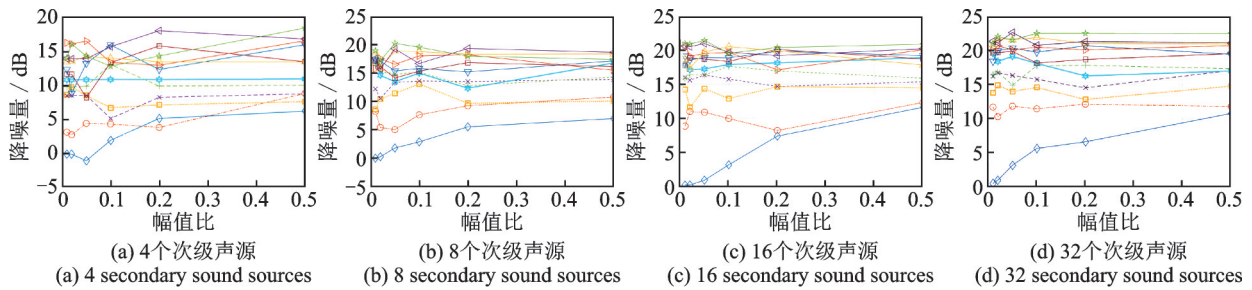


图 5 后排左侧乘客处不同次级声源不同幅值比作用下的降噪量

Fig. 5 Noise reduction of different secondary sound sources with different amplitude ratios at the rear left passenger

降噪量较只布放 4 个次级声源时有所增大,但降噪量变化较为缓慢。

依据现有多级子阵有源控制理论^[16],综合考虑降噪系统的复杂性与可行性,同时受制于舱室内部空间

尺寸有限以及形状复杂等因素,次级声源布放位置和数量受到约束,故选择 ANC 系统次级声源与误差传感器的 4 × 4 配置。独立重复多次运行寻优程序,统计出声声器件最常出现且利于实际布放的位置,如表 1 所示。

表 1 电声器件布放具体空间位置

Tab. 1 Specific placement spatial locations of electro-acoustic devices

电声器件	编号	布放位置/m	电声器件	编号	布放位置/m	电声器件	编号	布放位置/m
次级声源	②	(3.90, -0.27, 0.90)	误差传声器	⑥	(4.20, -0.375, 1.20)	参考传声器	①	(3.60, 1.20, 0.80)
	③	(3.90, 0.27, 0.90)		⑦	(4.20, 0.375, 1.20)		⑩	(7.30, -1.30, 1.50)
	④	(5.70, -0.27, 1.35)		⑧	(5.30, -0.40, 1.20)		⑪	(4.90, 0, 1.31)
	⑤	(5.70, 0.27, 1.35)		⑨	(5.30, 0.35, 1.20)			

3.2 数值仿真

根据最优次级声源强度下 4 个次级声源的空间位置,得到次级声源和误差传声器布放如图 6 所示。图 6 中,白色圆点代表激励点,黄色圆点代表次级声

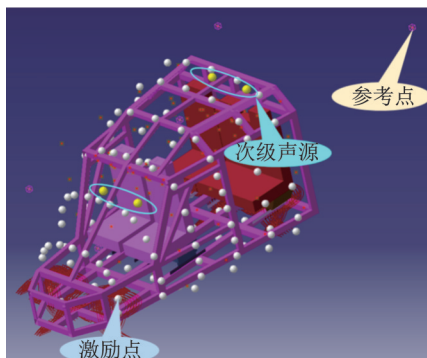


图 6 控制系统电声器件布放示意图

Fig. 6 Placement schematic diagram of control system electro-acoustic devices

源,红色立方体代表参考传声器。在激励点施加直升机实录噪声,同时对布放位置的 3 个参考点、4 个误差点进行仿真运算,测量初级路径脉冲响应;进一步地,4 个次级声源依次发出白噪声激励,测量次级路径脉冲响应;之后运用 FxLMS 算法求得 ANC 系统的降噪量。

以位置①处测得的参考信号为例,图 7 给出了布放位置 4 个测点处主动控制前后的噪声频谱曲线。考虑到降噪区域为人员坐姿头部高度处,图 8 给出了 A 计权声级下布放位置 4 个测点处主动控制前后的噪声频谱曲线。表 2 给出了 20~500 Hz 范围该布放位置下 4 个测点处主动控制前后的降噪量及全局降噪量。对仿真结果进行分析,在 20~500 Hz 范围内,4 个测点处的降噪量均在 30.2 dB 以上,经 A 计权处理后降噪量均在 13.7 dB(A) 以上;全局降噪量达到 30.5 dB,经 A 计权处理后降噪量达到 17.1 dB(A)。

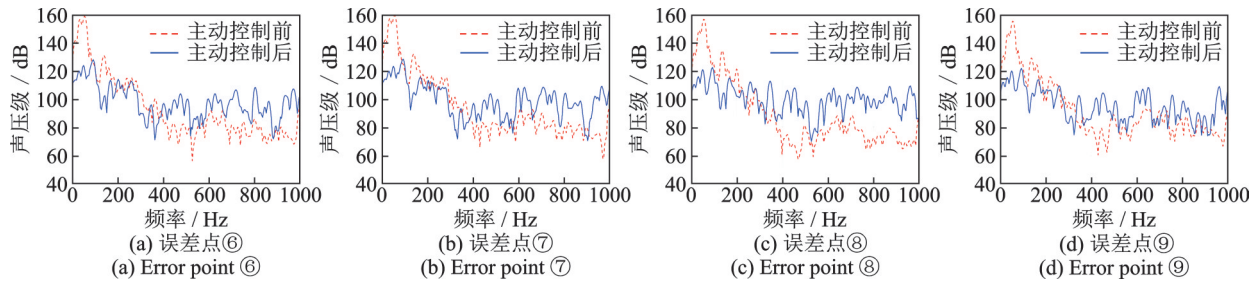


图7 布置位置4个测点处主动控制前后的噪声频谱

Fig. 7 Noise spectra before and after active control at 4 measurement points in the placement location

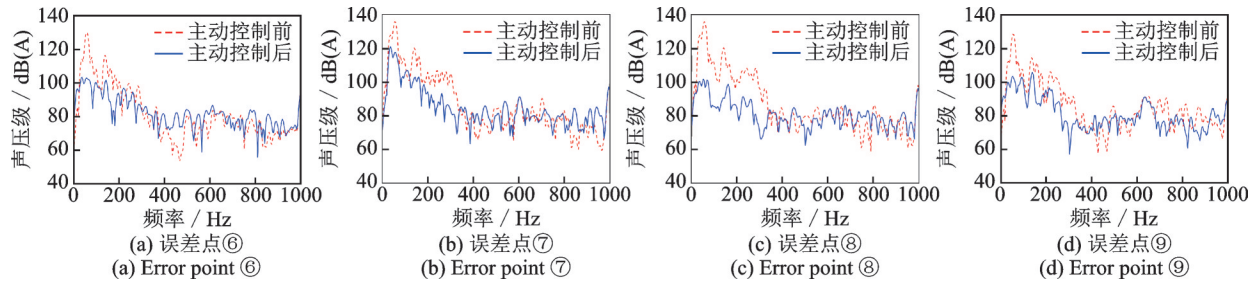


图8 布置位置4个测点处主动控制前后的噪声频谱-A计权声级

Fig. 8 Noise spectra before and after active control at 4 measurement points in the placement location-A weighted sound pressure level

表2 参考点①布置位置下4个测点处主动控制前后的降噪量及全局降噪量(20~500 Hz范围)

Tab. 2 Noise reduction and global noise reduction before and after active control at 4 measurement points in the placement location of reference point ① (in the range of 20~500 Hz)

布置位置	降噪量/dB	布置位置	降噪量/dB
误差点⑥	30.2	误差点⑨	30.7
误差点⑦	30.5	全局	30.5
误差点⑧	31.0		

4 试验验证

本文所用直升机地面模拟舱安装在半消声室中,舱体采用方钢骨架加铝板蒙皮铆接的结构形式;风挡玻璃和舱门玻璃采用亚克力板加工模拟;舱体下平面布置吸声地板用于承载。所用直升机声源模拟系统由16个音响(见图9(a))、电源管理器和功率

放大器等组成。16个音响分别布置在直升机模拟舱的左右侧和上侧,每个音响独立发出一组噪声信号,由16个音响共同发声以重建直升机运转时的实际声场环境。

上述数值仿真模型与实际地面模拟舱室按1:1绘制,故在试验中电声器件的布置均与计算机仿真时相同,如图9(b)和(c)所示。

开启直升机模拟舱外的声源模拟系统,产生舱内初始噪声,以声源模拟系统某一工况时的录音信号为例进行分析,得到4个误差点处主动控制前的噪声频谱如图10所示。

选择参考传声器①,位于模拟舱室右前方下排音响处。采样频率为2000 Hz,滤波器为1024阶,进行FxLMS四通道控制。主动控制前后误差点处的噪声频谱如图11所示;A计权声级下主动控制前后误差点处的噪声频谱如图12所示;主动控制前后误差点处声压级及降噪量如图13(a)所示;ANC系统

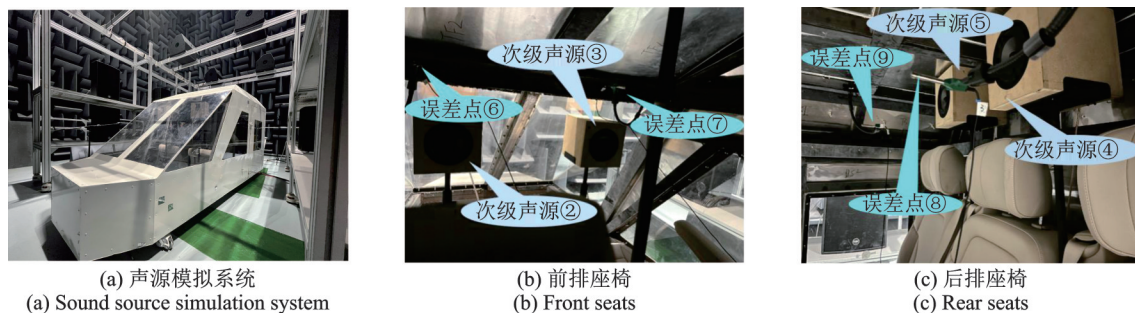


图9 直升机舱内ANC系统实物图

Fig. 9 Physical diagram of the active noise control system in the helicopter cabin

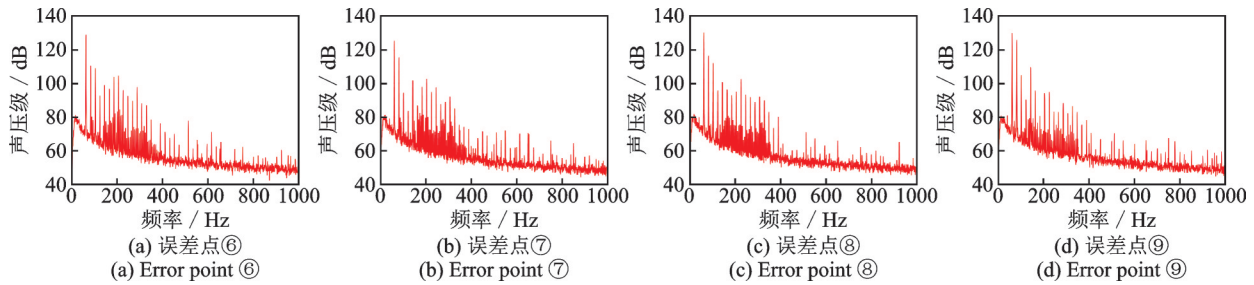


图 10 声源模拟系统某一工况时各误差点处主动控制前的噪声频谱

Fig. 10 Noise spectra before active control at each error point under a certain working condition of the sound source simulation system

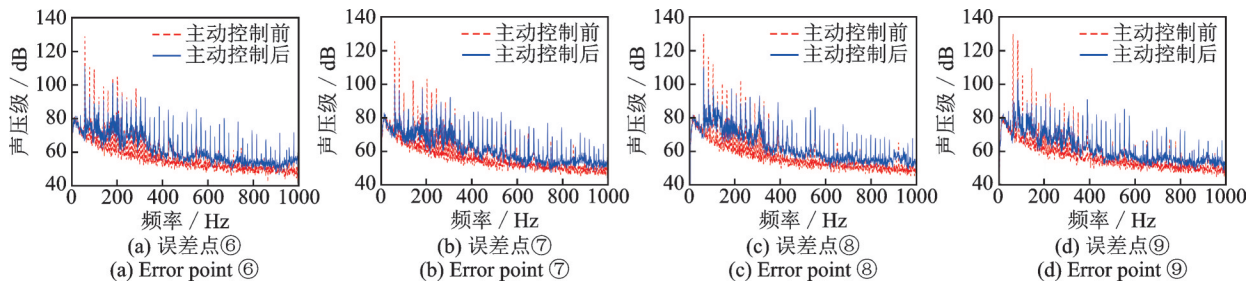


图 11 布放位置主动控制前后的噪声频谱

Fig. 11 Noise spectra before and after active control at the placement locations

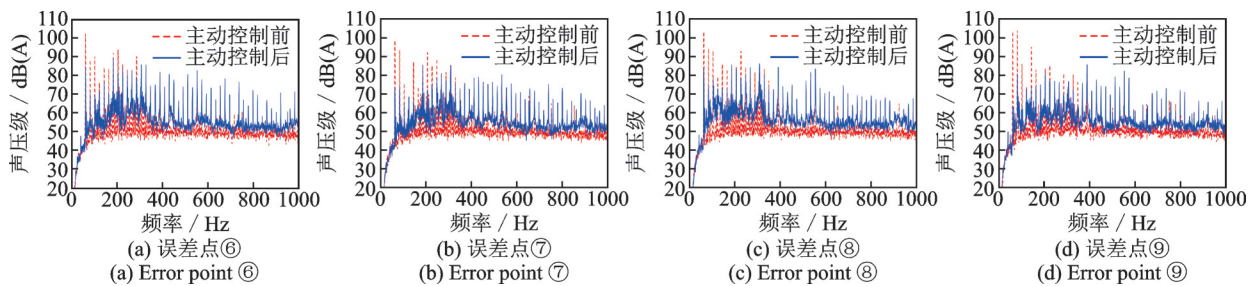


图 12 布放位置主动控制前后的噪声频谱-A 计权声级

Fig. 12 Noise spectra before and after active control at the placement locations-A weighted sound pressure level

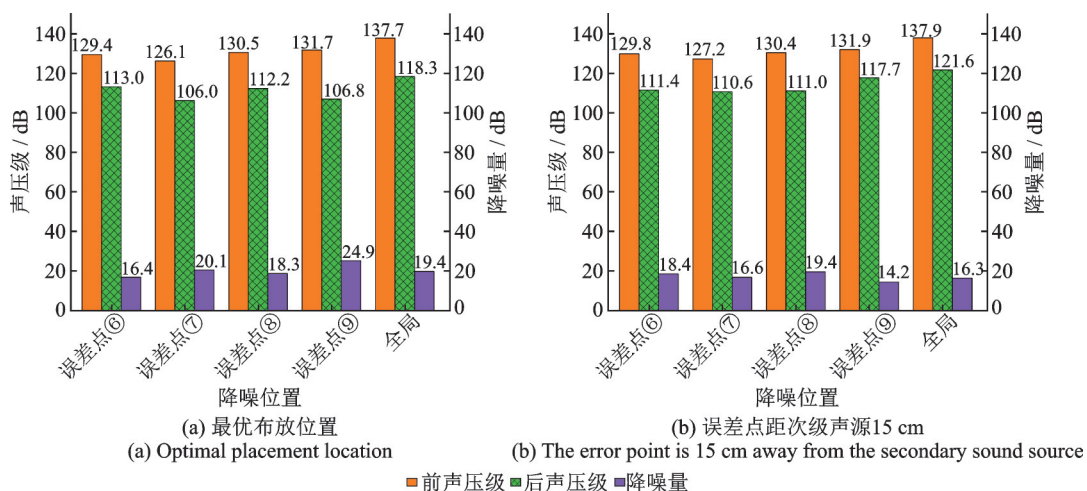


图 13 不同布放位置下主动控制前后的声压级及降噪量

Fig. 13 Sound pressure level and noise reduction before and after active control at different placement locations

控制效果如图 14 所示。由图 13(a)可知,在频率低于 500 Hz 时,4 个误差位置处的降噪量最高达到 24.9 dB,经 A 计权处理后降噪量最高达到 14.3 dB (A);全局降噪量达到 19.4 dB,经 A 计权处理后降噪

量为 10.0 dB(A)。由图 14 可知,在 4 个误差位置处均有 5 根及以上线谱的降噪量达到 10 dB 及以上,在噪声频谱中能量占比最大的 61.5 和 82 Hz 两根线谱的降噪量均达到 17 dB 以上。

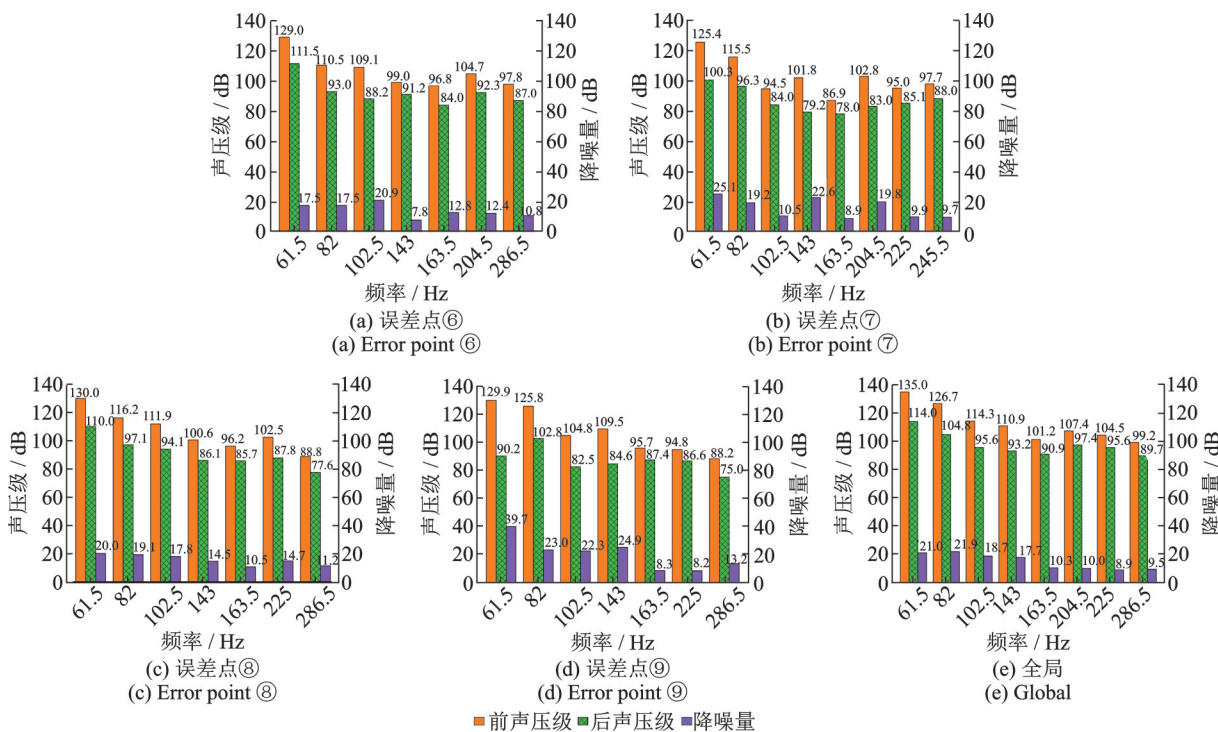


图 14 ANC 系统控制效果数据图

Fig. 14 Detailed data diagram of the control effect of the active noise control system

作为对比,给出误差传声器位置固定,移动次级声源距离误差传声器 15 cm 时的试验结果。主动控制前后误差点处的噪声频谱如图 15 所示; A 计权声级下主动控制前后误差点处的噪声频谱如图 16 所示;声压级及降噪量如图 13(b)所示;ANC 系统控制效果如图 17 所示。由图 13(b)可知,在频率低于 500 Hz 时,与最优布放位置下的控制效果

相比,除误差点⑥、⑧处降噪量有些许增大外,其余 2 个误差点处降噪量均不及前者;且全局降噪量不及最优布放位置下的控制效果。由图 17 可知,在 4 个误差位置处仅有 2~3 根线谱的降噪量达到 10 dB 及以上。

经过对比发现,利用 NSGA-II 算法优化得到的电声器件最优布放位置下的 ANC 系统的控制效果

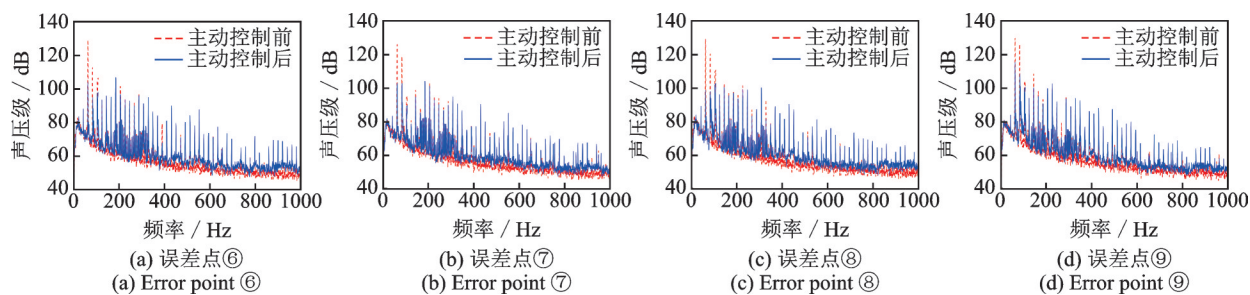


图 15 布放位置主动控制前后的噪声频谱

Fig. 15 Noise spectra before and after active control at the placement locations

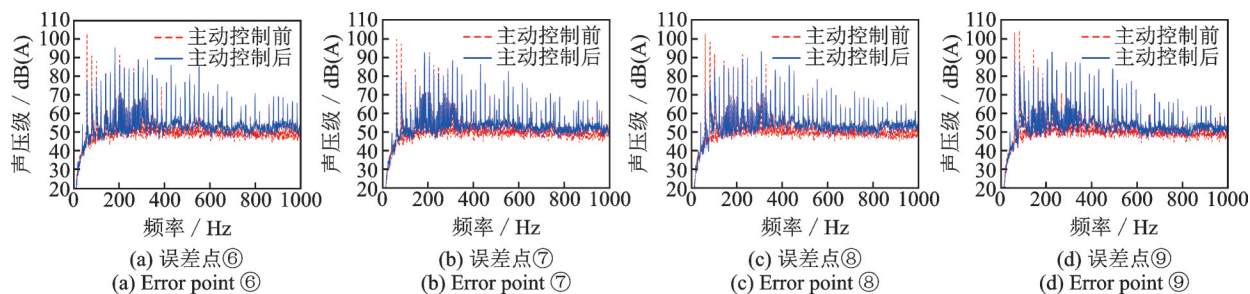


图 16 布放位置主动控制前后的噪声频谱-A 计权声级

Fig. 16 Noise spectra before and after active control at the placement locations-A weighted pressure level

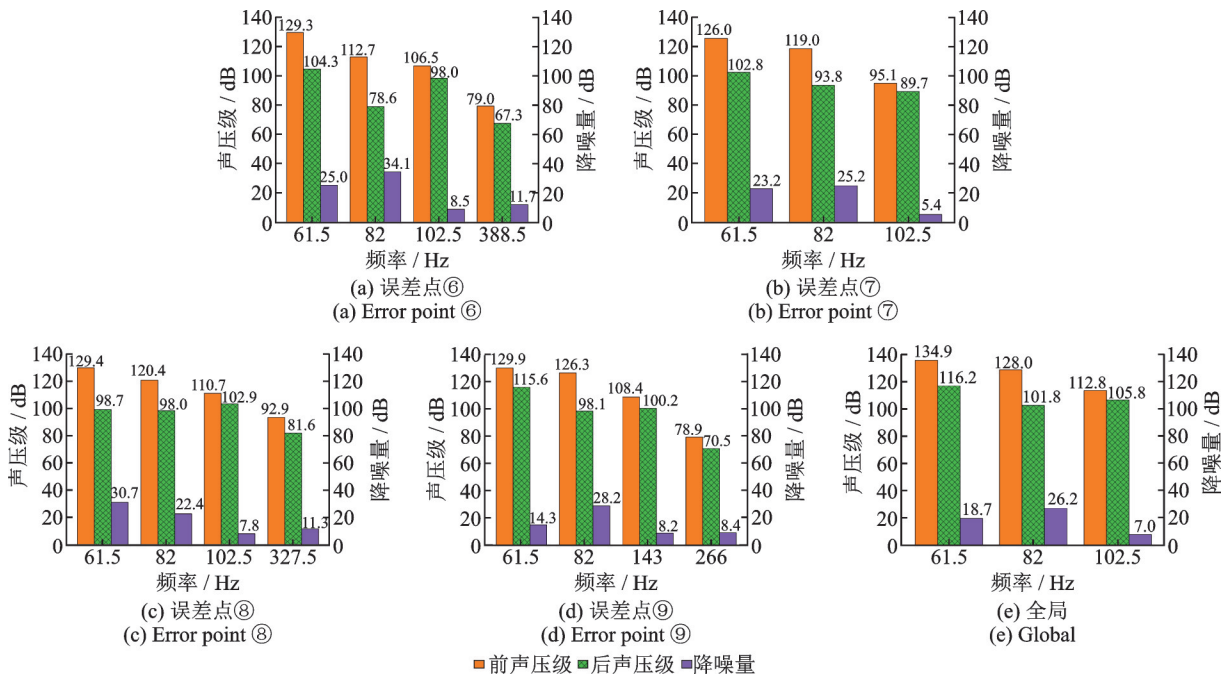


图 17 ANC 系统控制效果数据图

Fig. 17 Detailed data diagram of the control effect of the active noise control system

优于普通布放位置下的控制效果,进一步体现了本文所提方法的有效性及其优越性。

5 结 论

针对直升机舱内 ANC 系统中的电声器件布放设计及优化问题,基于带精英策略的第二代非支配排序遗传算法,以误差点处声压平方和为目标函数,对 ANC 系统扬声器传声器的位置、数量,次级声源扬声器发声强度等优化变量进行了综合优化设计,并根据算法的多次迭代结果,统计出了硬件的最优布放位置。综合考虑降噪系统的复杂性与可行性以及舱室内部空间的有限性,选择 ANC 系统次级声源与误差传声器的 4×4 通道配置。将计算机仿真所得电声器件布放位置应用到实际模拟舱室中,进行相关主动控制试验以及不同布放下对比试验。结果表明:在最优布放位置下,舱内驾驶员及后排乘客坐姿头部高度等主要目标区域内频率低于 500 Hz 时的降噪量最高达到 24.9 dB,全局降噪量达到 19.4 dB。

本文的工作可为后续在舱室噪声控制系统布放优化中运用多种多目标进化算法的研究提供一定的技术参考,可使布放设计阶段更加高效,为各类飞行器舱内 ANC 系统投入使用提供一定的技术储备。接下来的研究将侧重于把不同的多目标进化算法应用到舱室 ANC 系统电声器件布放优化仿真及试验中,探究对比不同进化算法对控制系统降噪性能的影响。

参考文献:

- [1] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-5.
CHEN Kean. Active Noise Control[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 1-5.
- [2] BAEK K H, 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] 刘姜涛, 应黎明. 基于粒子群算法的电力变压器噪声有源控制系统优化[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(4): 498-501.
LIU Jiangtao, YING Liming. Optimization of AANC System in power transformer by particle swarm optimization[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(4): 498-501.
- [4] 刘洋, 应黎明, 周亚琪, 等. 电力变压器局部有源静音区的次级声源优化策略[J]. 变压器, 2015, 52(6): 22-26.
LIU Yang, YING Liming, ZHOU Yaqi, et al. Optimal strategy of secondary sound source of active quiet zone in partial space of power transformer[J]. Transformer, 2015, 52(6): 22-26.
- [5] 王国栋, 应黎明, 刘洋, 等. 电力变压器有源降噪系统次级声源优化布放[J]. 电测与仪表, 2017, 54(13): 1-7.
WANG Guodong, YING Liming, LIU Yang, et al. Layout and strength optimization for secondary sound sources of transformer active noise control system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54

- (13): 1-7.
- [6] 张肃, 陈南, 车华军. 封闭空间有源噪声控制次级声源优化策略[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4): 779-784.
ZHANG Su, CHEN Nan, CHE Huajun. Optimal strategy for the second source in enclosure under active noise control[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(4): 779-784.
- [7] 王学磊, 张黎, 李庆民, 等. 电力变压器有源降噪中次级声源的参数优化分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2815-2822.
WANG Xuelei, ZHANG Li, LI Qingmin, et al. Parameter optimization analysis of the secondary acoustic sources for power transformer active noise control[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2815-2822.
- [8] 王晋伟, 应黎明, 刘勤, 等. 基于扰动跟踪法的变压器有源降噪系统研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 1-8.
WANG Jinwei, YING Liming, LIU Qin, et al. Study on transformer active noise control system based on disturbance tracking method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 1-8.
- [9] HUANG Yizhe, ZHANG Huizhen, ZHAO Kaiyang, et al. Precise configuring of actuators/sensors for active control of sound quality in cabs with modal vibration energy and LA-PSO[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 5891.
- [10] 胡涵, 陈克安. 民用直升机舱内噪声自适应有源控制试验研究[C]// 2010年全国声学学术会议论文集. 北京: 中国声学学会, 2010: 1-2.
HU Han, CHEN Kean. Experimental study of adaptive active noise control in a civil helicopter cabin[C]// Proceedings of the 2010 National Acoustics Conference. Beijing: Acoustical Society of China, 2010: 1-2.
- [11] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [12] 胡涵, 陈克安. 直升机舱室周期噪声有源控制的电声器件布放优化[C]// 中国航空结构动力学专业组第十六届学术交流会论文集. 西安: 中国振动工程学会, 2008: 152-157.
HU Han, CHEN Kean. Optimal placement of transducers in a helicopter cabin using active noise control for periodic disturbances[C]// Proceedings of the 16th Academic Exchange Meeting of China Aerostructural Dynamics Professional Group. Xi'an: Chinese Society of Vibration Engineering, 2008: 152-157.
- [13] 徐康宇, 刘元, 李密青, 等. 进化高维多目标优化研究综述[J]. 控制工程, 2023, 30(8): 1436-1449.
XU Kangyu, LIU Yuan, LI Miqing, et al. Evolutionary many-objective optimization: a survey[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(8): 1436-1449.
- [14] KONG Lingren, WANG Jianzhong, ZHAO Peng. Solving the dynamic weapon target assignment problem by an improved multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9254.
- [15] JUNG D, CHOI Y H, KIM J H. Multiobjective automatic parameter calibration of a hydrological model[J]. Water, 2017, 9(3): 187.
- [16] GUO Jingnan, PAN Jie, BAO Chaoying. Actively created quiet zones by multiple control sources in free space [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(3): 1492-1501.

第一作者: 石利权(1999—), 男, 硕士研究生。

E-mail: liquanshi99@163.com

通信作者: 靳国永(1980—), 男, 博士, 教授。

E-mail: guoyongjin@hrbeu.edu.cn