

微穿孔板在随机-区间混合不确定性理论下的结构优化

甄冬^{1,2}, 王梓宇^{1,2}, 焦湘和^{1,2}, 刘晓昂^{1,2}, 上官文斌³, 张曲⁴

(1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300130; 2. 天津市新能源汽车动力传动与安全技术重点实验室, 天津 300130; 3. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 4. 宁波拓普集团股份有限公司, 浙江 宁波 315800)

摘要: 将不确定性理论应用于微穿孔板结构设计, 分析不确定参数(微穿孔板板厚、声速、空气运动黏度)对微穿孔板吸声特性的影响。以板厚为随机变量, 以声速和空气运动黏度为区间变量, 建立微穿孔板随机-区间混合不确定性模型, 利用蒙特卡洛法分析吸声系数和品质因素的不确定度, 并通过实验验证模型的正确性。选取吸声系数高于某一值时对应的频带宽度最大为优化目标, 以品质因素大于某一值为约束条件, 对微穿孔板结构参数进行优化。优化后的微穿孔板吸声系数和品质因素得到有效改善, 吸声性能的稳健性得到提升, 验证了随机-区间混合不确定性模型在微穿孔板吸声性能优化上的可行性与有效性, 为不确定性理论在声学工程中的应用提供参考。

关键词: 微穿孔板; 不确定性理论; 吸声系数; 优化设计; 频带拓宽

中图分类号: TB535.1; TU112.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0228-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.025

引言

微穿孔板采用亥姆霍兹共振器吸声原理消耗噪声能量, 其理论模型由马大猷首先提出, 随后被应用在多种噪声控制领域, 尤其在航空航天领域, 被广泛用于飞行器噪声控制和吸声结构设计^[1-3]。微穿孔板的吸声特性分析与拓宽吸声频带一直是该吸声结构的研究重点^[4-5]。

在微穿孔板的吸声特性研究方面, 杜韬等^[6]结合传递导纳法, 建立了简化的有限元仿真方法, 为微穿孔板的有限元优化提供了一种思路。卢焯华等^[7]提出一种将微穿孔板转化为等价多孔材料模型的方法, 分析微穿孔板的吸声特性, 简化了仿真过程, 同时也保持了对微穿孔板声学性能预测的准确性。王卫辰等^[8]提出一种几何参数估算法对不规则孔进行处理, 将不规则孔转化为面积相近的标准圆孔, 并阐述了该方法对微穿孔板吸声性能的影响, 为不规则微穿孔板的吸声特性研究提供了一种理论方法。杨程等^[9]设计出一种无背腔的微穿孔吸声结构, 利用空间几何特性在微穿孔板两侧产生压差实现共振吸声, 并分析了该结构的吸声特性。

针对微穿孔板吸声频带宽度的优化问题, 盖晓玲等^[10]设计了一种 L 型分割背腔的单层微穿孔板结构, 改善了微穿孔板的低频吸声性能, 并且明显拓宽了微穿孔板的吸声带宽。田文昊等^[11]分析双层串联穿孔板中的穿孔参数和板后空腔对吸声系数的影响, 通过优化微穿孔板的参数拓宽了吸声带宽。闵鹤群等^[12]结合二次余数扩散体结构设计出一种微穿孔板, 分析了该结构的吸声特性, 提升了单层微穿孔板在中高频的吸声能力, 拓宽了吸声频带宽度。李东庭等^[13]将卷曲腔的概念与微穿孔板结合, 设计出了在低频段具有宽吸声频带的吸声体。Buret 等^[14]将微穿孔板与在中高频具有良好吸声特性的吸声系统结合, 设计了一种混合的宽频吸声器, 并在混响室进行了测试。Bucciarelli 等^[15]采用电声等效电路模型研究多层微穿孔板几何参数与吸声特性的关系, 并通过阻抗管实验测试不同层数微穿孔板的吸声系数, 结果表明五层微穿孔板的吸声频带最宽。Simon^[16]设计了一种能吸收低频噪声的长弹性中空管结构, 将穿孔板与可变长度的管连接, 替代传统的吸声谐振结构, 提高了航空发动机吸声器的吸声系数与吸收低频噪声的能力。

微穿孔板吸声频带拓宽和吸声性能存在相互制

收稿日期: 2020-08-13; **修订日期:** 2021-03-26

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U20A20331); 国家自然科学基金资助项目(51705128); 河北省自然科学基金资助项目(E2019202169)。

约关系,吸声频带优化会受到吸声能力的约束。Qian等^[17]利用多种群遗传算法对所提出的多孔径组合结构进行了优化,与简单遗传算法优化的微穿孔板相比拓宽了吸声频带,但吸声系数略有降低。隋林强等^[18]利用遗传算法对双层微穿孔板结构进行了优化,优化后吸声频带有所增宽,但优化后的结构在中频段的吸声系数降低。

上述的研究都是基于确定参数下的模型,但在工程实践中广泛存在不确定参数,不确定参数会影响相关研究的准确性和稳定性。基于不确定原理和区间分析方法^[19-20],将不确定性理论应用在微穿孔板结构设计上。建立考虑参数不确定性的微穿孔板结构优化方法,并验证了优化方法的有效性。

1 微穿孔板的吸声特性分析

1.1 吸声特性参数定义

图1为微穿孔板结构示意图,其中, t 为微穿孔板的厚度, d 为微穿孔的直径, a 为微穿孔板的排布单胞边长, L 为微穿孔板的板后空腔深度。微穿孔板吸声体可以看作由多个亥姆霍兹谐振器并联组成的吸声体,其原理是利用空气共振来抵消噪声的能量。

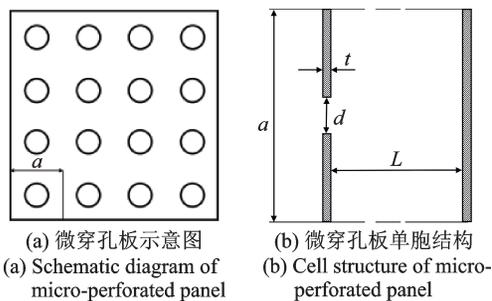


图1 微穿孔板结构

Fig. 1 Micro-perforated panel structure

分析微穿孔板的吸声特性主要有两个参数即吸声系数和品质因素,其中吸声系数表示微穿孔板的吸声能力的强弱,而品质因素可以表示微穿孔板保持较高吸声系数的能力。微穿孔板的吸声系数 α 可表示^[6]为:

$$\alpha = \frac{4\gamma}{(1-\gamma)^2 + \{[\omega m - \cot(\omega L/c)]\}^2} \quad (1)$$

式中 γ 为相对声阻, m 为相对声质量, ω 为角频率, L 为板后空腔深度, c 为声速。相对声阻 γ 和相对声质量 m 与声阻抗率的实部和虚部相关:

$$\gamma + j\omega m = \frac{R + jX}{\rho c} \quad (2)$$

式中 R 和 X 分别为声阻抗率的实部和虚部,其表

达式分别为:

$$R = \frac{32(\mu + \nu)\rho}{\epsilon} \frac{t}{d^2} k_r, X = \frac{t\omega\rho}{\epsilon} k_m \quad (3)$$

式中 μ 为空气的运动黏度系数, ν 为温度传导系数,建立微穿孔板模型为理想模型,不考虑材料传热,忽略其影响; ρ 为流体的密度, ϵ 为微穿孔板的穿孔率即穿孔面积与穿孔板面积之比, k_r 和 k_m 分别为声阻常数和声质量常数, k_r 和 k_m 的表达式见参考文献^[6]。

微穿孔板的品质因素与单振子系统中品质因素定义类似,可以表示为共振时的频率与频带宽度的比值,根据声学基础理论,品质因素可表示为:

$$Q_R = \frac{\omega M_a}{R_a + R_\beta} \quad (4)$$

式中 $M_a = \frac{\rho t}{S_0}$ 为微穿孔中的声质量; S_0 为微穿孔的横截面积; R_a 为微穿孔中的声阻; $R_\beta = \frac{\rho c}{S_0}$ 为板后空腔中辐射的平面波的声辐射阻抗。

从微穿孔板吸声系数和品质因素的表达式可以看出,微穿孔板的结构参数(如板后空腔深度、板的穿孔率、板厚、板的开孔直径)和环境参数(如空气运动黏度系数、声速)等均会对微穿孔板的吸声性能产生影响。因此,在考虑参数变化的情况下,合理设计微穿孔板的结构参数以提高微穿孔板的吸声系数,有助于提高微穿孔板结构的稳健性。

1.2 结构参数对微穿孔板吸声特性的影响

计算分析微穿孔板的结构参数:穿孔直径、空腔深度和穿孔率对其吸声系数和品质因素的影响,计算结果如图2~4所示。

由图2~4分析可知:在200~2000 Hz的范围内,微穿孔板的吸声系数峰值随穿孔直径、空腔深度和穿孔率的增大而降低;吸声系数的峰值随着开孔直径和空腔深度的增大向低频移动,随着穿孔率的增大向高频移动;吸声频带的宽度随着开孔直径和空腔深度的增大而降低,随穿孔率的增大而上升;微穿孔板的品质因素随着开孔直径和穿孔率的增大而增大,随着板后空腔深度的增大而降低。由于上述结构参数对微穿孔板吸声频带宽度和品质因素具有决定性的影响,所以本文选取上述参数作为关键变量进行优化,以提高微穿孔板的整体吸声性能。

2 微穿孔板的随机-区间模型的建立与实验验证

在工程实践和工业生产中存在不能准确预测和调控的参数,这些参数对工程问题又有不可忽视的

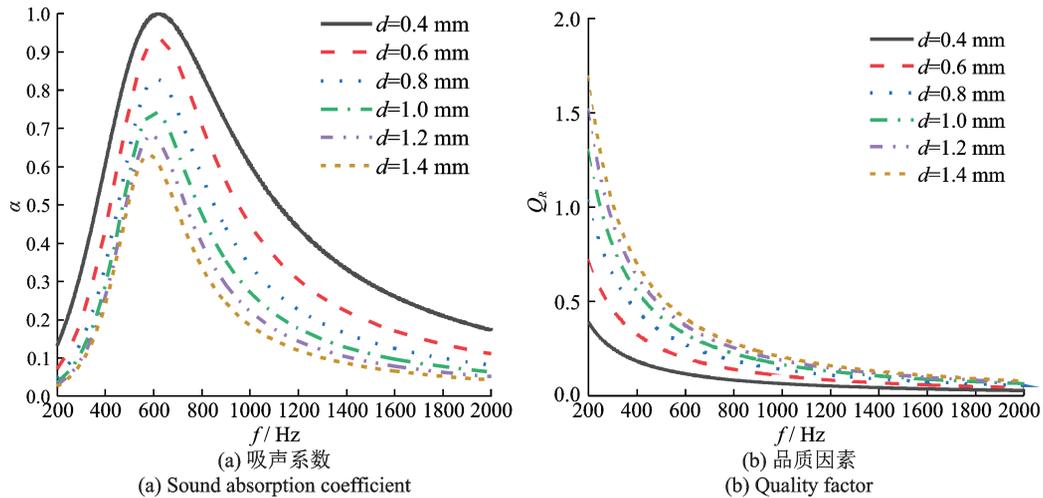


图2 穿孔直径 d 对微穿孔板的影响 ($t=2\text{ mm}$, $L=50\text{ mm}$, $\epsilon=0.015$)

Fig. 2 The influence of perforation diameter d on micro-perforated panel ($t=2\text{ mm}$, $L=50\text{ mm}$, $\epsilon=0.015$)

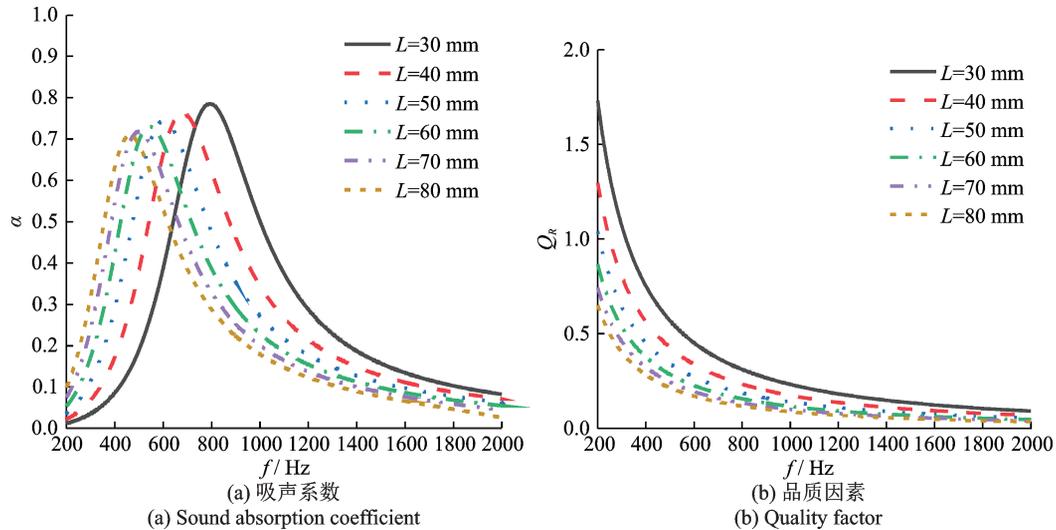


图3 空腔深度 L 对微穿孔板的影响 ($t=2\text{ mm}$, $d=0.8\text{ mm}$, $\epsilon=0.015$)

Fig. 3 The influence of the depth L of the cavity behind the panel on micro-perforated panel ($t=2\text{ mm}$, $d=0.8\text{ mm}$, $\epsilon=0.015$)

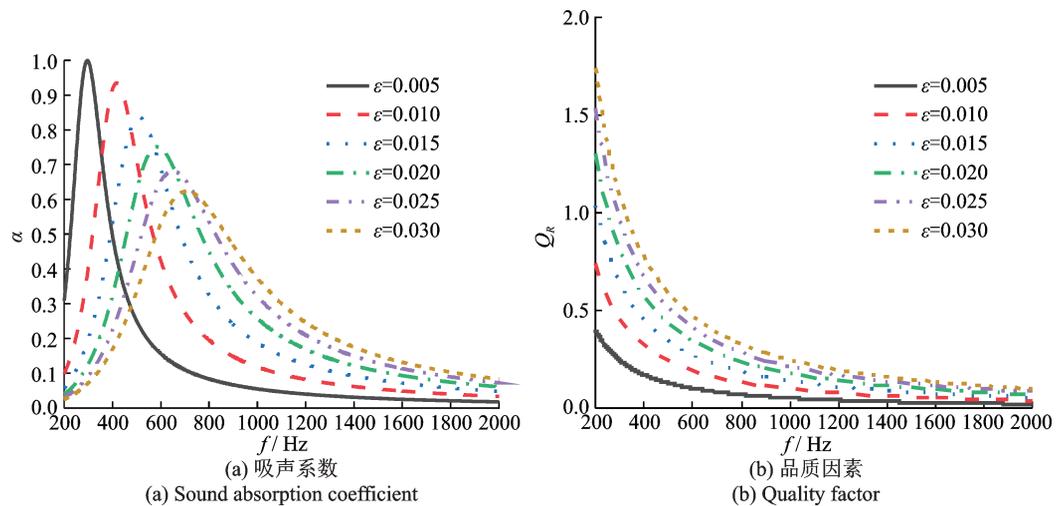


图4 穿孔率 ϵ 对微穿孔板的影响 ($t=2\text{ mm}$, $d=0.8\text{ mm}$, $L=50\text{ mm}$)

Fig. 4 The effect of perforation rate ϵ on micro-perforated panel ($t=2\text{ mm}$, $d=0.8\text{ mm}$, $L=50\text{ mm}$)

影响。将不确定性原理与微穿孔板理论结合,建立微穿孔板的不确定性模型,通过该模型分析不确定参数对微穿孔板吸声特性的影响。

依据实际工程背景,不确定参数主要有两类:第一类是微穿孔板的结构参数板厚 t ,由于工业生产中存在尺寸公差和误差,且合格率遵循正态分布原则,

选取标准的随机模型定义其分布范围;第二类是环境参数包括声速 c 、空气运动黏度 μ , 由于参数样本数量或实验测量条件的限制不能准确描述出环境参数的概率模型, 因此采取区间模型来定义其分布范

围。区间变量的不确定度为区间半径与区间中点的比值, 依据环境参数的区间范围和区间计算方法, 计算得到各区间变量的不确定度。空气运动黏度 μ 、声速 c 的区间范围及不确定度如表 1 所示。

表 1 环境参数的区间范围及不确定度

Tab. 1 Range and uncertainty of environmental parameters

环境变量	区间范围	区间半径	区间中点	不确定度/%
空气运动黏度 $\mu/(10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	[11.93, 17.60]	2.84	14.77	19.20
声速 $c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	[313, 386]	36.50	349.50	10.44

在定义不确定参数的分布后, 选取其他结构参数的初值: 开孔直径 $d=0.8 \text{ mm}$ 、板后空腔深度 $L=50 \text{ mm}$ 、穿孔率 $\epsilon=0.015$, 采用蒙特卡洛模拟法进行 20000 次随机取样, 得到微穿孔板随机-区间不确定性混合模型的仿真结果。

2.1 微穿孔板随机-区间混合模型的吸声系数计算

根据上述方法建立微穿孔板随机-区间混合不确定性模型, 样本数据为 20000 组时, 通过公式 (1)~(3), 得到的吸声系数的仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 由于考虑了随机参数和区间参数的影响, 微穿孔板的吸声系数以散点形式分布在一定范围。选定吸声系数为 0.5 时所对应的频带的最低值和最高值分别为 f_{\min} , f_{\max} , 其上下界分别为 $f_{\min 1}$, $f_{\min 2}$ 和 $f_{\max 1}$, $f_{\max 2}$ 。

吸声频带的最低频率与最高频率的变化区间和不确定度如表 2 所示。吸声系数为 0.5 时所对应频带的最低值、最高值的不确定度分别为 14.73% 和 11.38%, 与环境参数的不确定度对比可知: 吸声系数为 0.5 时对应频带最低值和最高值的不确定度大于声速 c 的不确定度, 微穿孔板的吸声系数主要受

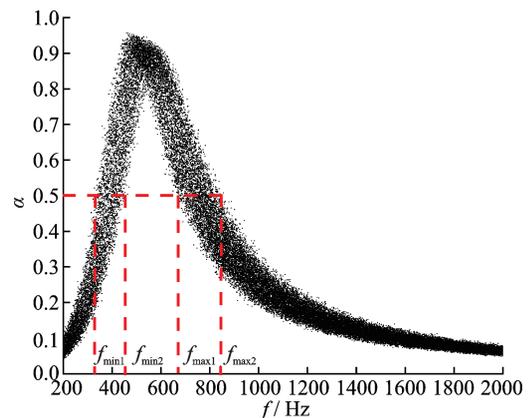


图 5 考虑随机-区间混合不确定性参数的微穿孔板吸声系数

Fig. 5 Sound absorption coefficient of micro-perforated panel considering random-interval mixed uncertain parameters

到区间参数声速 c 的影响; 频带最低值和最高值的不确定度小于空气运动黏度 μ 的不确定度, 空气运动黏度 μ 的变化对吸声系数有一定影响, 为了全面考虑环境参数对吸声系数的影响, 仍将空气运动黏度 μ 作为区间变化参数对微穿孔板的吸声系数进行不确定性分析与优化。

表 2 f_{\min} 和 f_{\max} 的变化区间和不确定度Tab. 2 Variation interval and uncertainty of f_{\min} and f_{\max}

	变化区间	区间半径	区间中点	不确定度/%
最低频率 f_{\min}/Hz	[346.87, 466.71]	59.92	406.79	14.73
最高频率 f_{\max}/Hz	[695.17, 873.64]	89.24	784.41	11.38

2.2 微穿孔板随机-区间混合模型的品质因素计算

样本数据为 20000 组时, 通过公式 (4), 得到微穿孔板随机-区间混合模型的品质因素的仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 由于考虑了随机参数和区间参数的影响, 品质因素以散点形式分布在一定范围。品质因素为 0.5 时对应的频率范围如表 3 所示。由表 3 分析, 品质因素为 0.5 对应的频带区间范围不确定

度为 16.58%, 与环境参数的不确定度对比可知: 品质因素为 0.5 时对应频率范围的不确定度大于声速 c 的不确定度, 微穿孔板品质因素主要受到声速 c 影响; 品质因素为 0.5 时对应频率范围的不确定度小于空气运动黏度 μ 的不确定度, 空气运动黏度 μ 对品质因素有一定影响, 为了全面考虑环境参数对品质因素的影响, 仍将空气运动黏度 μ 作为区间参数进行品质因素的不确定性分析与优化。

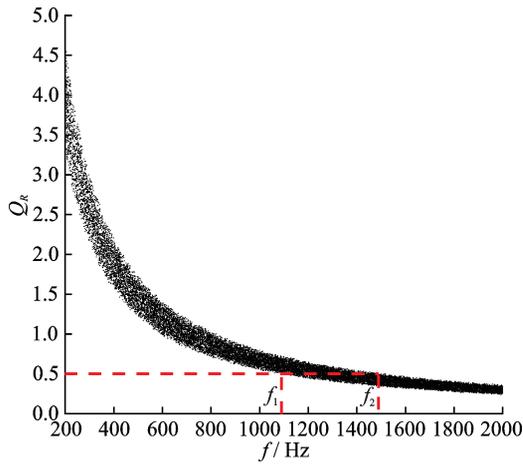


图6 随机-区间混合不确定性模型的品质因素

Fig. 6 The quality factors of random-interval mixed uncertainty model

2.3 实验验证

本文针对微穿孔板的吸声系数进行声阻抗管实验验证,实验样件的结构参数与测量时的环境参数如表4所示,样件如图7(a)所示,材料为SLA

管后端为刚性壁板,在阻抗管的另一端扬声器产生平面声波。在位置M1和位置M2布置麦克风测量两点的声压,测试频率范围为200~2000 Hz,得到测试样件表面的入射声压 P_i 与反射声压 P_r ,通过计算两点处的声压传递函数得到材料吸声系数。

图8表示微穿孔板在某一确定性环境参数值下,吸声系数的理论解析与实验测试结果的对比。从图中可看出,微穿孔板吸声系数的实验曲线与理论解析曲线的变化趋势一致,吸声系数峰值绝对差值为0.004,峰值点对应的频率也基本相同(仅相差8 Hz左右)。实验结果表明微穿孔板的理论计算结果与实验结果具有较好的一致性,该理论计算方法可为研究不确定参数对吸声特性的影响和吸声带宽的优化提供指导。

实验结果与理论解析结果存在一定误差,最大偏差出现在800~1000 Hz范围内。经过分析,实验与理论出现偏差有以下原因:第一,建立的微穿孔板模型为理想模型,假设穿孔板是刚性的,仅考虑孔中

表3 品质因素等于0.5时对应的频率范围

Tab. 3 The corresponding frequency range when the quality factor is 0.5

最低频率 f_1 /Hz	最高频率 f_2 /Hz	变化区间	区间半径	区间中点	不确定度/%
1085.71	1517.30	[1085.71, 1517.30]	251.80	1301.51	16.58

树脂。

采用阻抗管测试材料吸声系数时,采用双麦克风的方法,如图7(b)所示为测试设备连接示意图。测试样件安装在阻抗管中,与阻抗管轴线垂直,阻抗

空气振动,忽略了材料特性与板件固体振动^[21],在中高频段内可能发生板件共振现象导致实验结果具有偏差;第二,由于建立了理想模型,忽略了温度传导系数,导致微穿孔板的声阻低于实际值,微穿孔板常

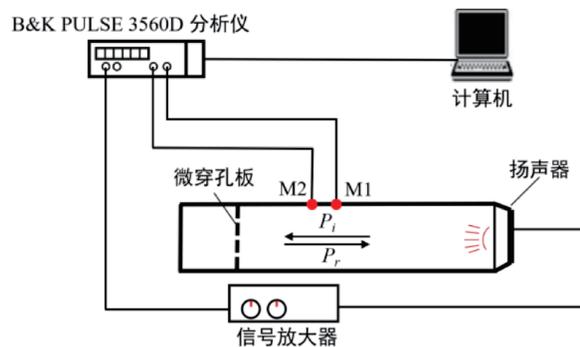
表4 测量样件参数和环境参数

Tab. 4 Sample parameters and environmental parameters

板厚 t /mm	开孔直径 d /mm	板后空腔深度 L /mm	穿孔率 ϵ /%	空气温度 T /°C	相对湿度 RH /%	声速 c /($m \cdot s^{-1}$)	空气运动黏度 μ /($10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$)
2	0.8	50	0.015	21.30	59.51	349.83	16.82



(a) 实验样件
(a) Experimental sample



(b) 声阻抗管测试设备连接示意图
(b) Connection diagram of acoustic impedance tube test equipment

图7 实验样件与测试设备

Fig. 7 Schematic diagram of experimental test equipment and experimental sample

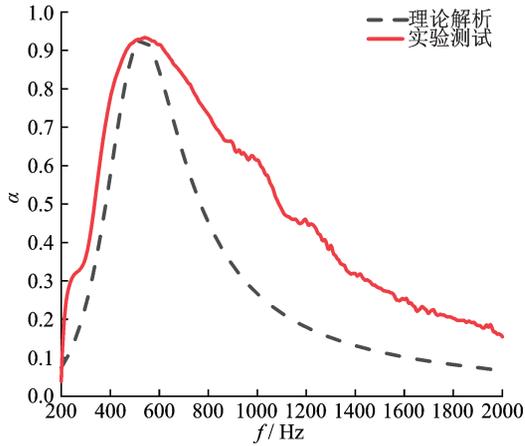


图8 微穿孔板模型吸声系数的理论解析与实验对比

Fig. 8 Comparison of theoretical and experimental sound absorption coefficient of micro-perforated panel

数增大,微穿孔板相对声阻和相对声质量降低,使吸声系数在全频段略有下降。此外,样件的加工精度和安装方式也影响样件尺寸参数的准确性,对实验值也产生了一定的影响。

3 微穿孔板结构参数优化

由第1,2节结论可知,结构不确定参数(穿孔直径 d 、板后空腔距离 L 、微穿孔板的穿孔率 ϵ)和环境不确定参数(声速 c 和空气运动黏度 μ)对微穿孔板的吸声系数和品质因素等吸声特性有明显影响。因此,基于微穿孔板的随机-区间模型进行吸声频段宽度优化,确定最佳的结构参数组合,在拓宽微穿孔板的吸声频带的同时,降低不确定参数对微穿孔板吸声特性的影响。

3.1 目标函数

微穿孔板吸声结构的优化设计目的是拓宽微穿孔板的吸声频带,使优化后的微穿孔板可以在更宽的频率范围内保持较高的吸声系数。选择吸声系数大于或等于0.5的频带宽度最大化作为优化模型的目标函数,可表示为:

$$\max \{ f_{\max} - f_{\min} \} \quad (5)$$

式中 f_{\min} 和 f_{\max} 分别表示吸声系数大于或等于0.5的频带对应的最低值和最高值。

由仿真分析可知, f_{\min} 和 f_{\max} 呈散点形式分布在一定范围内,其分布范围的上下限分别是: $f_{\min 1}, f_{\min 2}$ 和 $f_{\max 1}, f_{\max 2}$ 。根据区间分析法可知,区间 $[f_{\min 2}, f_{\max 1}]$ 可以构成一个保守区间,即在该区间内的吸声系数能保证一定是大于或等于0.5的,其他的区间如 $[f_{\min 1}, f_{\max 1}]$, $[f_{\min 1}, f_{\max 2}]$ 和 $[f_{\min 2}, f_{\max 2}]$ 都不是保守区

间,在不保守区间内可能出现吸声系数小于0.5的情况,与优化目的相悖。因此优化模型的目标函数可转换为:

$$\max \{ f_{\max 1} - f_{\min 2} \} \quad (6)$$

其中, $f_{\min 2}$ 和 $f_{\max 1}$ 定义分别表示为:

$$f_{\min 2} = \max_{c, \mu} \left\{ \min_f \{ f(\alpha \geq 0.5) \} \right\},$$

$$f_{\max 1} = \min_{c, \mu} \left\{ \max_f \{ f(\alpha \geq 0.5) \} \right\},$$

$$\text{s.t. } c \in [313 \text{ m/s}, 386 \text{ m/s}]$$

$$\mu \in [11.93 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, 17.60 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}]$$

$$f \in [200 \text{ Hz}, 2000 \text{ Hz}] \quad (7)$$

3.2 约束条件

在进行优化时,需要考虑另一个非常重要的吸声特性指标:品质因素。品质因素表示共振频率与吸声带宽的比值,因此选取品质因素不低于0.5作为优化的约束条件以避免因拓宽频带宽度而导致其吸声系数过低,可表示为:

$$Q_R (f_{\min 2} \leq f \leq f_{\max 1}) \geq 0.5 \quad (8)$$

式中 $f_{\min 2}$ 和 $f_{\max 1}$ 表示微穿孔板的吸声系数大于或等于0.5时对应的最低频率的上限与下限。

3.3 优化模型

根据优化目标函数和约束条件,选取微穿孔板的穿孔直径 d 、板后空腔距离 L 、微穿孔板的穿孔率 ϵ 为优化设计变量,可以得到优化模型如下:

$$\max \{ f_{\max 1} - f_{\min 2} \} = f(x_1, x_2, x_3)$$

$$\text{s.t. } Q_R(x_1, x_2, x_3) \geq 0.5$$

$$0.4 \times 10^{-3} \leq x_1 \leq 1.4 \times 10^{-3}$$

$$30 \times 10^{-3} \leq x_2 \leq 80 \times 10^{-3}$$

$$0.005 \leq x_3 \leq 0.03 \quad (9)$$

式中 x_1 表示微穿孔板的穿孔直径 d ; x_2 表示板后空腔深度 L ; x_3 表示微穿孔板的穿孔率 ϵ ,为设计变量。

参照上述优化模型设置优化变量的个数和上下限,编写优化目标函数和非线性约束函数,采用遗传算法进行优化,遗传算法中主要参数定义如表5所示。

表5 遗传算法的参数设置

Tab. 5 Parameter setting of genetic algorithm

种群初始区间	种群规模	交叉概率	变异概率	进化代数
[0,1]	20	0.8	0.2	100

4 优化后的微穿孔板吸声特性分析

将设计变量的初始值设置为 $d = 0.8 \text{ mm}$, $L = 50 \text{ mm}$, $\epsilon = 0.015$, 利用遗传算法进行迭代优化, 得

到的优化结果为: 设计变量 $d = 0.413 \text{ mm}$, $L = 30.2 \text{ mm}$, $\epsilon = 0.029$. 将优化后的参数更新, 取样本为 20000 组进行蒙特卡洛法模拟得到优化后的微穿孔板模型的吸声系数如图 9 所示。图 9 中吸声系数 $\alpha \geq 0.5$ 对应的频带区间范围如表 6 所示。

表 6 优化后的 f_{\min} 和 f_{\max} 区间范围和不确定度

Tab. 6 The optimized interval range and uncertainty of f_{\min} and f_{\max}

	变化区间/Hz	区间半径	区间中点	不确定度/%
最低频率 f_{\min}	[547.58, 717.68]	85.05	632.63	13.64
最高频率 f_{\max}	[1408.19, 1751.18]	171.50	1579.68	10.85

由图 9 和表 6 可知, 经过遗传算法优化后的微穿孔板在吸声系数大于或等于 0.5 时频带范围的安全区间为 [717.68 Hz, 1408.19 Hz], 频带宽度为 690.51 Hz, 最低频率和最高频率的区间分布不确定度分别为 13.64% 和 10.85%。通过对比图 5 和表 2, 可以得到结论: 优化后微穿孔板吸声系数大于或等于 0.5 时对应的频带宽度约为优化前 (频带宽度为 228.46 Hz) 的 3 倍。对应频带的最低频率和最高频率都有所提高, 说明优化后的微穿孔板在中高频段的吸声效果得到改善, 吸声效果整体加强。并且最低频率和最高频率的区间分布不确定度比优化前分别降低了 1.09% 和 0.53%, 说明微穿孔板吸声系数受环境不确定参数的影响减小, 吸声性能稳健性有所提高。

将优化后的参数更新, 取 20000 组样本进行

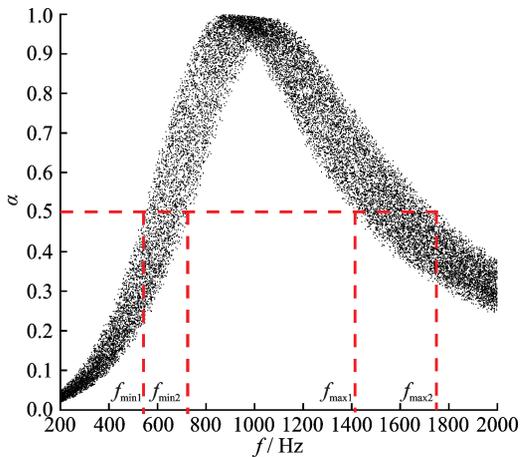


图 9 优化后的微穿孔板吸声系数

Fig. 9 The sound absorption coefficient of the optimized micro-perforated panel

蒙特卡洛法模拟, 得到优化后的微穿孔板模型的品质因素如图 10 所示。优化前品质因素的最大值为 4.48, 优化后品质因素的最大值为 6.73, 且样本点分布的范围整体提高, 说明优化后的品质因素有所提升, 使全频段都满足了设计的约束要求。并且将品质因素高于 0.5 时对应的频带范围记录在表 7 中。

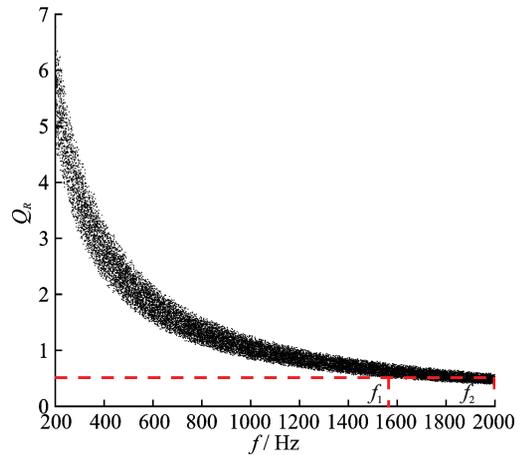


图 10 优化后的微穿孔板品质因素

Fig. 10 The quality factors of the optimized micro-perforated panel

由图 10 和表 7 可知, 经过遗传算法优化后微穿孔板品质因素等于 0.5 时的频率范围是 [1590.26 Hz, 1998.41 Hz], 频率的区间不确定度为 11.37%; 通过对比图 6 与表 3, 可以看出, 优化后微穿孔板品质因素高于 0.5 的样本点分布有所增多, 频率范围增加, 频率区间的不确定度下降了 5.21%, 优化后的微穿孔板在全吸声频率范围内满足了优化约束条件, 且品质因素受不确定参数的影响降低。

表 7 优化后品质因素等于 0.5 时对应的频率范围

Tab. 7 The frequency range when the optimized quality factor is 0.5

最低频率 f_1 /Hz	最高频率 f_2 /Hz	变化区间/Hz	区间半径	区间中点	不确定度/%
1590.26	1998.41	[1590.26, 1998.41]	204.08	1794.34	11.37

5 结 论

本文基于不确定性理论,对微穿孔板吸声性能进行优化,建立了微穿孔板随机-区间不确定性模型,基于对该模型的计算分析,得到如下结论:

(1)在200~2000 Hz的范围内,微穿孔板的吸声系数峰值随穿孔直径、空腔深度和穿孔率的增大而降低,随着开孔直径和空腔深度的增大向低频移动,随着穿孔率的增大向高频移动;吸声频带随着开孔直径和空腔深度的增大而降低,随穿孔率的增大而上升;品质因素随着开孔直径和穿孔率的增大而增大,随着板后空腔深度的增大而降低。

(2)优化后的微穿孔板吸声系数大于或等于0.5对应的频带宽度拓宽了3倍,吸声频带上下界的不确定度降低,中高频段吸声效果得到改善;品质因素得到提高,品质因素高于0.5对应频带范围不确定度降低。说明基于随机-区间不确定性模型的微穿孔板结构优化有助于提高微穿孔板吸声性能的稳健性。

参考文献:

- [1] 孙亚飞,陈仁文,徐志伟,等.应用微穿孔板吸声结构的飞机座舱内部噪声控制实验研究[J].声学学报,2003,28(4):294-298.
SUN Yafei, CHEN Renwen, XU Zhiwei, et al. Experiment research of noise control in the fighter cockpit using microperforated panel absorber structure [J]. Acta Acustica, 2003, 28(4): 294-298.
- [2] 杨玉光.微穿孔板消声器在风冷插箱噪声控制中的应用[J].电子机械工程,2012,28(5):26-28.
YANG Yuguang. Application of micro-perforated panel in noise control of wind-cooling sub-rack [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012, 28(5): 26-28.
- [3] Thaveedu J R, Padavala P, Mediseti J R. Application of micro-perforated panel in automotive vehicle noise refinement[R]. SAE Technical Paper, 2020.
- [4] 刘克,田静,焦风雷,等.微穿孔板吸声体的研究进展[J].声学学报,2005,30(6):20-27.
LIU Ke, TIAN Jing, JIAO Fenglei, et al. Research progress of micro-perforated panel sound absorber [J]. Acta Acustica, 2005, 30(6): 20-27.
- [5] 邢拓,李贤徽,盖晓玲,等.微穿孔板结构吸声仿真技术研究[J].噪声与振动控制,2019,39(5):8-11.
XING Tuo, LI Xianhui, GAI Xiaoling, et al. Research on sound absorption simulation technology of micro-perforated panel structure [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(5): 8-11.

- [6] 杜韬,苗天丞,付国涛,等.微穿孔板吸声结构仿真计算方法研究[J].工程热物理学报,2015,36(6):1242-1246.
DU Tao, MIAO Tiancheng, FU Guotao, et al. Study on numerical simulation method for the MPP absorber [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(6): 1242-1246.
- [7] 卢焯华,陈弯,刘志恩,等.微穿孔板简化仿真方法在双层微穿孔结构中的应用[J].北京理工大学学报,2019,39(1):1-6.
LU Chi-hua, CHEN Wan, LIU Zhi-en, et al. A simplified simulation method for micro-perforated panel with double layer micro-perforated structure [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(1): 1-6.
- [8] 王卫辰,邢邦圣,顾海霞,等.微穿孔板几何参数估算及其对吸声性能的影响[J].声学学报,2019,44(3):369-375.
WANG Weichen, XING Bangsheng, GU Haixia, et al. Estimation of geometric parameters for micro-perforated panels and their effect on absorption performance [J]. Acta Acustica, 2019, 44(3): 369-375.
- [9] 杨程,蒋伟康,吴海军.一种无背腔的微穿孔板吸声设计[J].声学技术,2018,37(6):459-460.
YANG Cheng, JIANG Weikang, Wu Haijun. Design of a microperforated panel without the backing cavity for acoustic absorption [J]. Technical Acoustics, 2018, 37(6): 459-460.
- [10] 盖晓玲,李贤徽,邢拓,等.L型分割背腔的微穿孔板吸声结构的吸声性能研究[J].振动与冲击,2018,37(16):256-260.
GAI Xiaoling, LI Xianhui, XING Tuo, et al. Sound absorption of a microperforated panel backed by an L-type division cavity [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 256-260.
- [11] 田文昊,吴锦武,李威,等.双层串联微穿孔板吸声体吸声特性研究[J].噪声与振动控制,2019,39(4):32-35.
TIAN Wenhao, WU Jinwu, LI Wei, et al. Study on the acoustic characteristics of double-layer micro-perforated panel absorbers [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(4): 32-35.
- [12] 闵鹤群,郭文成.具有并联不等深度子背腔序列的微穿孔板吸声体吸声特性[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(1):177-183.
Min Hequn, Guo Wencheng. Absorption characteristics of micro-perforated panel sound absorbers with array of parallel-arranged sub-cavities with different depths [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(1): 177-183.
- [13] 李东庭,黄思博,莫方朔,等.基于微穿孔板和卷曲背腔

- 复合结构的低频宽带吸声体[J]. 科学通报, 2020, 65(15): 1420-1427.
- Li Dongting, Huang Sibao, Mo Fangshuo, et al. Low-frequency broadband absorbers based on coupling micro-perforated panel and space-curling chamber[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(15): 1420-1427.
- [14] Buret M, Iu K K. Hybrid sound absorbers combining micro-perforated panels with conventional absorption mechanisms[J]. Acoustics, 2012, 131(4): 3421.
- [15] Bucciarelli F, Fierro G P M, Meo M. A multilayer micro-perforated panel prototype for broadband sound absorption at low frequencies [J]. Applied Acoustics, 2019, 146: 134-144.
- [16] Simon F. Long elastic open neck acoustic resonator for low frequency absorption[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 421: 1-16.
- [17] Qian Y J, Cui K, Liu S M, et al. Optimization of multi-size micro-perforated panel absorbers using multi-population genetic algorithm [J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, 62(1): 37-46.
- [18] 隋林强, 赵晓丹, 祝瑞银. 遗传算法在双层微穿孔结构优化设计中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2006, (2): 49-52.
- SUI Linqiang, ZHAO Xiaodan, ZHU Ruiyin. Multilayer microperforated structure optimization design using genetic algorithm [J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(2): 49-52.
- [19] 夏百战, 覃缘, 于德介, 等. 区间模型下声学超材料的可靠性优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 94-102.
- XIA Baizhan, QIN Yuan, YU Dejie, et al. Reliability-based optimization of the acoustic metamaterial under the interval model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 94-102.
- [20] 吕辉, 于德介. 基于区间分析的汽车制动器不确定性优化[J]. 汽车工程, 2015, 37(7): 807-812.
- LÜ Hui, YU Dejie. Uncertainty optimization of vehicle brakes based on interval analysis[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(7): 807-812.
- [21] 孙文娟, 苏巧平, 孔德义, 等. 计及板材料性能影响的微穿孔板吸声特性仿真计算[J]. 振动与冲击, 2013, 32(9): 150-154.
- SUN Wenjuan, SU Qiaoping, KONG Deyi, et al. Calculation of acoustical characteristics of micro-perforated panel considering the effect of panel properties [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(9): 150-154.

Structural optimization of micro-perforated panel using random-interval mixed uncertainty theory

ZHEN Dong^{1,2}, WANG Zi-yu^{1,2}, JIAO Xiang-he^{1,2}, LIU Xiao-ang^{1,2}, SHANGGUAN Wen-bin³, ZHANG Qu⁴

(1.School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2.Tianjin Key Laboratory of Power Transmission and Safety Technology for New Energy Vehicles, Tianjin 300130, China;

3.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

4.Ningbo Tuopu Group Co., Ltd, Ningbo 315800, China)

Abstract: Combining the uncertainty theory with the sound absorption structure model of the micro-perforated plate, the influence of the uncertainty parameters (thickness of the micro-perforated plate, sound velocity, air kinematic viscosity) on the sound absorption characteristics of the micro-perforated plate model was analyzed. A random-interval mixed uncertainty model was established for the study. In the model, the micro-perforated plate thickness was considered as a random variable and the sound velocity and air kinematic viscosity were used as the interval variables. And the correctness of the model was validated through the experimental and simulation analysis using Monte-Carlo method. The maximum frequency bandwidth corresponding to a certain value of sound absorption coefficient was selected as the optimization goal. The quality factor is greater than a certain value was setup as the constraint condition. Using genetic algorithm to optimize the structural parameters of the micro-perforated plate. The optimized micro-perforated plate structure has been improved in terms of sound absorption coefficient and quality factors. The analysis results showed that the sound absorption performance can be improved and verify the effectiveness of the random-interval mixed uncertainty model in the study of micro-perforated plate sound absorbers. It provides a novel method of the application of uncertainty theory in acoustic engineering.

Key words: micro-perforated plate; uncertainty theory; sound absorption coefficient; optimal design; frequency band widening

作者简介: 甄冬(1982—),男,教授,博导。电话:18522252617;E-mail: d.zhen@hebut.edu.cn。

通讯作者: 刘晓昂(1989—),女,副教授,硕导。电话:18722272351;E-mail: liuxiaoang@hebut.edu.cn。