

多孔径蜂窝微穿孔结构的吸声性能优化与分析

熊引^{1,2}, 吴锦武^{1,2}, 燕山林^{1,2}

¹南昌航空大学, 飞行器工程学院, 江西 南昌

²江西省微小航空发动机重点实验室, 江西 南昌

Email: wujinwu@nchu.edu.cn, 599049247@qq.com

收稿日期: 2021年2月10日; 录用日期: 2021年3月5日; 发布日期: 2021年3月15日

摘要

本文为了提高四孔径蜂窝 - 微穿孔板结构的吸声性能, 利用马大猷经典微穿孔板声电类比理论, 推导出四孔径蜂窝 - 微穿孔板结构理论模型。采用粒子群算法, 以目标频带内吸声曲线最为饱满作为优化目标, 对四孔径蜂窝 - 微穿孔板结构四个区域的穿孔率、孔径、板厚和腔深进行优化。结果表明, 与常规参数的蜂窝 - 微穿孔结构相比, 优化后结构的吸声峰值和带宽都得到了提升。

关键词

蜂窝 - 微穿孔板, 粒子群算法, 吸声

Optimization Design and Analysis of Sound Absorption Performance of Multi Aperture Honeycomb Micro Perforated Structure

Yin Xiong^{1,2}, Jinwu Wu^{1,2}, Shanlin Yan^{1,2}

¹School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

²Jiangxi Key Laboratory of Micro Aeroengine, Nanchang Jiangxi

Email: wujinwu@nchu.edu.cn, 599049247@qq.com

Received: Feb. 10th, 2021; accepted: Mar. 5th, 2021; published: Mar. 15th, 2021

Abstract

In order to improve the sound absorption performance of four aperture honeycomb microperfo-

rated plate structure, a theoretical model of four aperture honeycomb microperforated plate structure is derived by using Ma Dayou's classical acoustic electric analogy theory of microperforated plate. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize the perforation rate, aperture, thickness and cavity depth of the four regions of the four aperture honeycomb microperforated plate structure with the most full absorption curve in the target frequency band as the optimization objective. The results show that compared with the conventional parameters of the honeycomb microperforated structure, the optimized structure has improved the sound absorption peak and bandwidth.

Keywords

Honeycomb Micro Perforation, Particle Swarm Optimization, Sound Absorption

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蜂窝-微穿孔结构是将微穿孔板放置在蜂窝上表面的一种组合结构,不仅弥补了传统蜂窝结构吸声性能不足的问题,还保留着蜂窝结构一定的隔声性能。因此,越来越多的科研人员对其展开了研究。Christina Naify 等[1]将声网帽添加在蜂窝内部,并且改变声网帽在蜂窝内部的位置,以此来增强蜂窝板隔声性能。张丰辉等[2]在传统蜂窝夹层架空中引入波纹结构,并将面板和波纹打微穿孔,形成蜂窝-微穿孔波纹结构。研究表明结构不仅拥有优异的力学承载性能,还实现了低频段的宽频有效降噪。张克姝[3]将微穿孔板和铝蜂窝结合起来,实验和仿真显示,与传统铝蜂窝结构相比,蜂窝-微穿孔结构隔声性能相近,但吸声性能明显提高。

对于传统微穿孔板结构而言,采用智能优化算法对其进行参数优化以获得期望的吸声频带是重要的研究方向。Heidi Ruiz 等[4]使用模拟退火算法对多层微穿孔板结构进行优化,拓宽了结构的吸声带宽。王静云等[5]将粒子群算法应用于变截面微穿孔结构,获得了期望的声学性能。Chang Yingchun 等[6]用模拟退火算法对受限制的组微穿孔板结构进行优化,为微穿孔结构提供新的设计思路。隋林强等[7]采用标准遗传算法解决双层微穿孔板结构参数设计问题,取得了良好的结果。

虽然前人针对蜂窝-微穿孔板结构参数优化进行了研究,但基本是单参数或双参数优化,并没有针对孔径、穿孔率、腔深和板厚四种参数的优化研究。而粒子群算法相比于其他算法具有收敛速度快、操作简单等特点,因此,本文采用粒子群算法对四孔径蜂窝-微穿孔结构的孔径、穿孔率、腔深和板厚进行优化。并与常规参数下的结构对比,来探讨粒子群算法在蜂窝-微穿孔结构吸声性能研究中的可行性。

2. 四孔径蜂窝-微穿孔板结构的理论模型

2.1. 传统微穿孔板结构理论模型

根据马大猷[8]先生对微穿孔板结构的理论推导可知,将微穿孔板结构进行声电类比简化之后,仍然能获得较为符合实际的结果。对于单层微穿孔板而言,示意图和声电类比图分别如图1、图2所示:

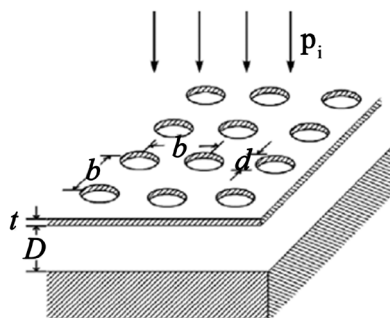


Figure 1. Basic structure diagram of single layer micro perforated plate
图 1. 单层微穿孔板基本结构示意图

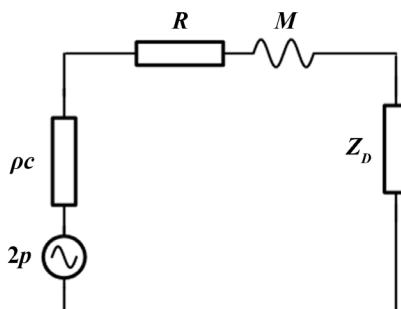


Figure 2. Acoustoelectric analogy diagram of single layer micro perforated plate
图 2. 单层微穿孔板声电类比示意图

那么，单层微穿孔结构的相对声阻抗 z 的表达式为：

$$z = r + j\omega m + z_D \quad (1)$$

其中：

$$r = \frac{32\mu t}{\sigma c_0 d^2} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2k}}{8} \cdot \frac{d}{t} \right] \quad (2)$$

$$m = \frac{t}{\sigma c_0} \cdot \left[1 + \left(9 + \frac{k^2}{2} \right)^{-1/2} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (3)$$

$$k = (d/2) \cdot \sqrt{\omega/\mu} = d \cdot \sqrt{f/10} \quad (4)$$

其中 r 为微穿孔板相对声阻率， m 是相对声质量， ω 是入射圆频率， μ 是粘滞系数， c_0 是空气中声速， k 是穿孔板常数， σ 、 t 、 d 和 D 分别为微穿孔板的穿孔率，板厚，孔径和腔深。而 z_D 为空腔的相对声阻抗率，表示为：

$$z_D = -j \cot(\omega D/c) \quad (5)$$

当垂直入射时，吸声系数 α 写为：

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re}(z)}{[1 + \operatorname{Re}(z)]^2 + [\operatorname{Im}(z)]^2} \quad (6)$$

2.2. 四孔径蜂窝 - 微穿孔板结构理论

四孔径蜂窝 - 微穿孔板结构是指将背腔分隔成四个区域，每个区域都有独立的孔径、穿孔率、腔深

和板厚，而这正是影响结构吸声性能的四个参数。分隔之后四个区域彼此独立，分别拥有四个共振峰，而不同的共振峰能起到拓宽整个结构吸声频带的作用。用声电类比理论来解释，可理解为微穿孔板上流经四个区域微孔的声体积流分别汇入各自的空腔。那么，在计算中，应将四个区域的微孔先与各自空腔串联，再相互并联。四孔径微穿孔板结构示意图如图 3 所示：

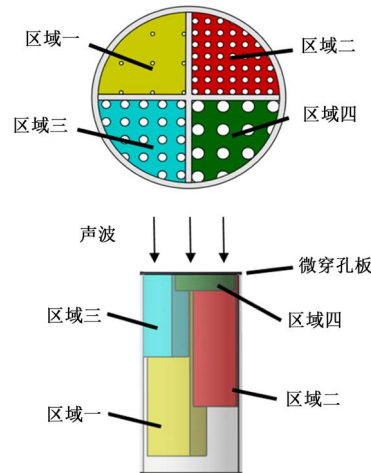


Figure 3. Structure diagram of four aperture honeycomb micro perforated plate
图 3. 四孔径蜂窝-微穿孔板结构示意图

四孔径蜂窝-微穿孔板结构的相对声阻抗 Z_{total} 为：

$$Z_{total} = \left(\frac{\varphi_1}{Z_1} + \frac{\varphi_2}{Z_2} + \frac{\varphi_3}{Z_3} + \frac{\varphi_4}{Z_4} \right) \quad (7)$$

其中， φ_1 、 φ_2 、 φ_3 和 φ_4 为四个区域占截面总面积的比值， Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 分别为对应区域的相对声阻抗率。因此，当正入射时，四孔径蜂窝 - 微穿孔板结构的吸声系数[9]为：

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re}(Z_{total})}{[1 + \operatorname{Re}(Z_{total})]^2 + [\operatorname{Im}(Z_{total})]^2} \quad (8)$$

3. 基于粒子群算法的四孔径蜂窝 - 微穿孔吸声性能优化

为由前面的分析可以，蜂窝 - 微穿孔板结构的吸声性能由四个区域的穿孔率，孔径，板厚和腔深决定，那么变量一共有十六个之多，因此本文采用全局搜索能力强，收敛速度快的粒子群算法对结构进行优化。

粒子群算法基本思想是通过适应度函数来比较每个粒子的个体最优解和全局最优解，由此来决定下一步搜索方向。粒子群算法基本流程如下：

- 1) 初始化粒子群，包括群体规模 N ，每个粒子的位置 x_i 和速度 v_i 。
- 2) 计算每一个粒子的适应度值 $f(x_i)$ 。
- 3) 计算每个粒子，用它的适应度值 $f(x_i)$ 和个体极值 $f(pbest_i)$ 比较，如果 $f(x_i) > f(pbest_i)$ ，则用 $f(x_i)$ 替换掉 $f(pbest_i)$ 。
- 4) 计算每个粒子，用它的适应度值 $f(x_i)$ 和全局极值 $f(gbest_i)$ 比较，如果 $f(x_i) > f(gbest_i)$ ，则用 $f(x_i)$ 替换掉 $f(gbest_i)$ 。
- 5) 根据式(4-1)和式(4-2)更新粒子的位置 x_i 和速度 v_i 。
- 6) 如果满足结束条件(误差足够好或到达最大循环次数)退出，否则返回步骤 2。

定义适应度函数为给定频带内吸声曲线最饱和，即：

$$fitness = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \alpha(f) df \quad (9)$$

其中， f_{\max} 、 f_{\min} 为优化区间的上下限频率， $\alpha(f)$ 是频率为 f 时结构的吸声系数。由于函数连续，为了使得函数可搜寻，将其离散化：

$$fitness = \sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta f \quad (10)$$

其中， Δf 为上下限频率之差。

定义优化区间为 200~2000 Hz，四个区域变量范围都相同：穿孔率为 0.1~30，板厚 0.1~1 mm，孔径 0.1~1 mm，空腔范围为 0.001~0.05 m。优化结果如表 1 所示：

Table 1. Optimization results of four aperture honeycomb micro perforated plate

表 1. 四孔径蜂窝 - 微穿孔板优化结果

区域	穿孔率	板厚(mm)	空腔(m)	孔径(mm)
区域一	5	1	0.05	0.45
区域二	1.81	1	0.05	1
区域三	15.39	1	0.039	0.25
区域四	0.36	0.1	0.05	1

为了验证算法的准确性，现任意取两组参数，数据如表 2，表 3 所示：

Table 2. Take any parameter one

表 2. 任取参数一

区域	穿孔率	板厚(mm)	空腔(m)	孔径(mm)
区域一	5	1	0.02	0.2
区域二	6	0.9	0.03	0.4
区域三	7	0.8	0.04	0.6
区域四	8	0.7	0.05	0.8

Table 3. Take any parameter two

表 3. 任取参数二

区域	穿孔率	板厚(mm)	空腔(m)	孔径(mm)
区域一	28	0.1	0.01	1
区域二	16	0.4	0.04	0.6
区域三	9	0.3	0.02	0.5
区域四	1	0.2	0.03	0.9

将上表 1，表 2，表 3 的参数带入公式，并且将优化后各区域独立参与吸声的曲线绘制出来，吸声曲线如图 4、图 5 所示：

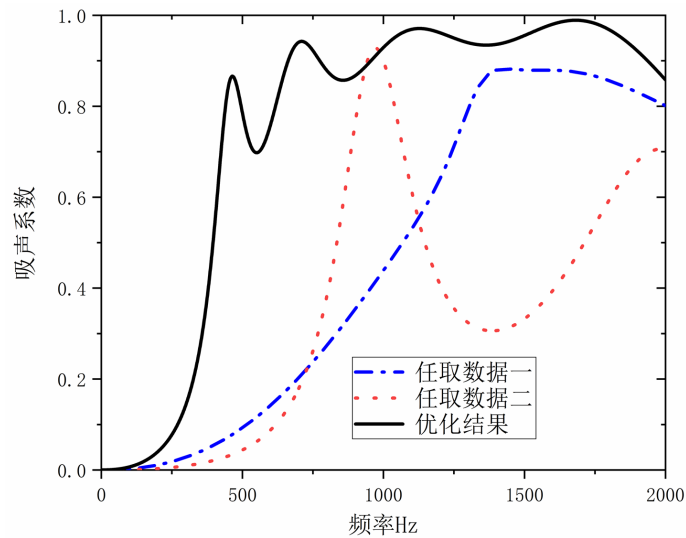


Figure 4. Comparison of sound absorption coefficient between optimized parameters and arbitrary parameters
图 4. 优化参数与任取参数吸声系数对比图

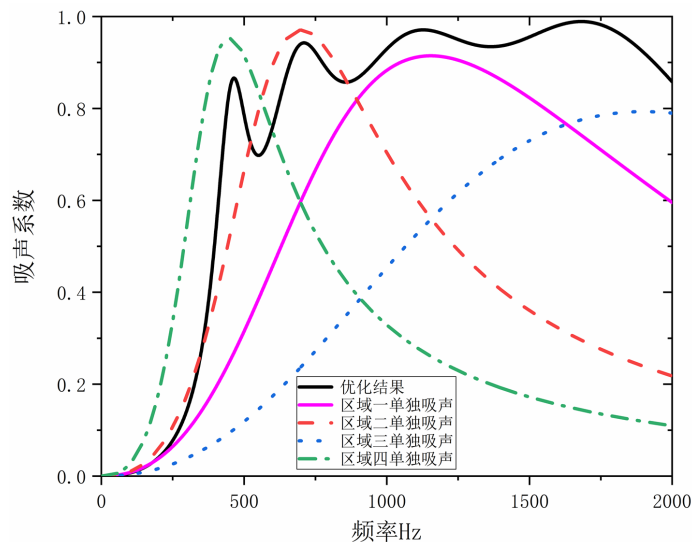


Figure 5. Comparison of sound absorption coefficient between common absorption and independent absorption in four areas
图 5. 四区域共同吸声与独立吸声的吸声系数对比图

由图 4 可知, 优化后的吸声曲线相比于任取数据的两组曲线显得更为饱和, 不仅最大系数更高, 而且吸声带宽更广, 从 500 Hz 到 2000 Hz, 吸声系数更是几乎都在 0.8 以上。并且从图 5 中可以看出, 优化后的曲线有四个共振峰, 正好对应蜂窝-微穿孔板结构的四个区域, 具体对应关系如图 5。而其余两组参数至多只有两个共振峰, 虽然同为四孔径蜂窝-微穿孔板结构, 但由于其参数是随机取得, 因此其共振峰相距甚远, 且多数共振峰不在本文设定的 200~2000 Hz 范围内, 所以难以达到有目的、成体系的吸声效果。这体现了粒子群算法在四孔径蜂窝-微穿孔板结构中的可行性与优越性。

4. 结论

本文根据前人对蜂窝-微穿孔结构的研究, 将粒子群算法应用在四孔径蜂窝-微穿孔板结构中, 对四个区域的孔径、腔深、穿孔率和板厚进行优化, 以目标频带内吸声曲线饱和为适应度函数。优化结果

显示,相比于未优化的参数,经粒子群算法优化后的吸声曲线不仅最大吸声系数更高,吸声频带也变宽。因此,粒子群算法可为蜂窝-微穿孔板结构提供快速有效的优化方法。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51965041)。

参考文献

- [1] Naify, C. and Nutt, S. (2009) Noise Reduction of Honeycomb Sandwich Panels with Acoustic Mesh Caps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **126**, 2281. <https://doi.org/10.1121/1.3249347>
- [2] 张丰辉, 唐宇帆, 辛锋先, 卢天健. 微穿孔蜂窝-波纹复合声学超材料吸声行为[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 120-130.
- [3] 张克姝, 许晴, 马维莲, 潘春军. 新型微穿孔铝蜂窝板隔吸声性能仿真与测试[J]. 中国建材科技, 2020, 29(6): 36-39.
- [4] Ruiz, H., Cobo, P. and Jacobsen, F. (2011) Optimization of Multiple-Layer Microperforated Panels by Simulated Annealing. *Applied Acoustics*, **72**, 772-776. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.04.010>
- [5] 王静云, 常安定, 徐春龙, 周秀秀, 王久杰. 应用粒子群优化算法设计锥形孔微穿孔板结构[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 37-41.
- [6] Chang, Y.C., Yeh, L.J. and Chiu, M.C. (2005) Optimization of Constrained Composite Absorbers Using Simulated Annealing. *Applied Acoustics*, **66**, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.07.003>
- [7] 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, 26(2): 49-52.
- [8] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975(1): 38-50.
- [9] 杜功焕. 声学基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.