

亥姆霍兹共振消声器的优化设计

吕传茂, 吕海峰, 张晓光, 王普浩

(中北大学机械工程学院, 山西太原 030051)

摘要: 亥姆霍兹消声器能够有效地抑制特定频率的低频噪声。设计了一种亥姆霍兹消声器, 可以对频率在 145 Hz 处的噪声进行降噪处理。但是所设计的消声器的消声带宽较窄, 因此需要在保证消声器共振频率不发生改变的情况下, 将亥姆霍兹消声器的消声频带增大。使用遗传算法对亥姆霍兹消声器的结构参数进行优化, 将优化后的结构进行仿真模拟。仿真结果表明消声器的消声带宽从 32 Hz 拓宽到了 86 Hz。之后进行了实验验证, 实验结果显示消声带宽从 55 Hz 增大到 105 Hz, 消声频带拓宽了 91%, 证明了优化结果的可行性, 并且实现了宽频带的消声, 为消声器的设计优化提供了参考。

关键词: 亥姆霍兹消声器; 低频噪声; 消声带宽; 遗传算法; 结构优化

中图分类号: TB535.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-02-0230-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.02.018

Optimization design of Helmholtz resonance muffler

LYU Chuanmao, LYU Haifeng, ZHANG Xiaoguang, WANG Puhao

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: Helmholtz muffler can effectively suppress low-frequency noise in a specific frequency range. In this paper, a Helmholtz muffler is designed, which can reduce the noise at 145 Hz. However, the muffler has narrow muffling band-width, which needs to be increased under the condition of keeping the same resonant frequency. The genetic algorithm is chosen to deal with Helmholtz muffler, and the structure parameters of the muffler are optimized. The simulation of the optimized structure is carried out, and the results show that the muffling bandwidth is broadened from 32 Hz to 86 Hz. However, the experimental results show that the muffling bandwidth of the optimized muffler increases from 55 Hz to 105 Hz, i.e. broadened by 91%. This proves the feasibility of the optimized results, which achieves broadband muffling, and provides a reference for the optimization design of mufflers.

Key words: Helmholtz muffler; low frequency noise; muffling bandwidth; genetic algorithm; structure optimization

0 引言

管道系统在实际生产中应用十分广泛,但是在管道系统使用的过程中,噪声辐射问题也随之而来,并且噪声辐射会导致管道的使用寿命降低。为此,在管道系统中安装消声器进行消声处理,降低噪声辐射的影响,而消声器性能的优劣将会直接影响管道系统噪声的辐射水平。常见的消声器有膨胀腔式消声器、亥姆霍兹式消声器、内插管式消声器等,其中亥姆霍兹消声器可以有效地抑制低频噪声,一些专家学者进行了相关的研究。侯艳芳^[1]通过分析亥姆霍兹共振腔计算方法后,采用一维平面

波法对亥姆霍兹共振腔进行了改进,有效地降低了汽车在加速工况下前座轰鸣声。钮炳瑜^[2]通过实验与有限元模拟仿真的方法对某车辆中进气系统的亥姆霍兹消声器进行优化设计,有效地降低了汽车进气系统中的噪声影响,但是它的消声频带很窄,使用的范围受到了限制。为了拓宽亥姆霍兹消声器的消声频带,苏胜利等^[3]通过对亥姆霍兹消声器进行声学改进,一方面是将连接管延伸至背腔内部,来降低共振频率,另一方面则是将亥姆霍兹消声器进行串联,来拓宽亥姆霍兹消声器的消声频带,Wu等^[4]将亥姆霍兹消声器的背腔改变为非对称结构来扩大消声频带,而Yasuda等^[5]则是通过互连孔的方式来扩大消声频带。上述方法虽然对亥姆霍兹消声器进行了结构改进,但是导致消声器的结构更加复杂,增加了系统的加工和装配难度。

本文中使用优化算法对亥姆霍兹消声器的结构进行参数优化,既可以保持消声器结构简单,又可以进行宽频带消声。

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(5130549)

作者简介: 吕传茂(1994—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为噪声控制及应用。

通讯作者: 吕海峰, E-mail: 330802273@qq.com

1 理论基础

亥姆霍兹消声器结构如图1所示,由主管道、颈部以及背腔三部分组成,其中 S_1 是主管道的截面积, S_p 是颈部的截面积, l_p 是颈部的高度, V_r 是背腔的体积。当入射声波 a 在主管道传播并到达颈部时,一部分声波 b 被反射回来,另一部分则会分成两路,一路为声波 c 进入到背腔中,使背腔内的空气产生运动,转变为其他能量耗散掉,另一路声波 d 则在主管道内继续传播,形成透射波。

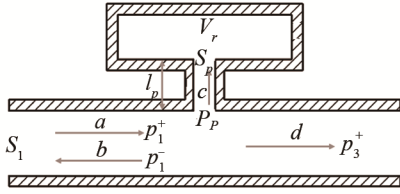


图1 亥姆霍兹消声器的结构简图

Fig.1 Structural sketch of Helmholtz muffler

当亥姆霍兹消声器进行工作时,从图1中可以看出,存在关系式^[6]:

$$\begin{cases} P_1^+ + P_1^- = P_3^+ = P_p \\ \frac{P_1^+ - P_1^-}{Z_1} = \frac{P_3^+}{Z_3} + \frac{P_p}{Z_p} \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_1 = Z_3 = \frac{\rho c}{S_1} \quad (2)$$

其中: P_1^+ 为入射声压; P_1^- 为反射声压; P_3^+ 为透射声压; P_p 为颈部声压; Z_1 、 Z_3 分别为主管道的声阻抗; Z_p 为颈部的声阻抗; ρ 为空气密度; c 为声速。

而颈部声阻抗的计算公式为

$$\begin{aligned} Z_p &= jZ_p X \\ Z_p &= \frac{\rho c}{S_p} \end{aligned} \quad (3)$$

根据式(1)~(3)进行计算可以得到:

$$\frac{P_1^+}{P_3^+} = 1 + \frac{1}{2} \frac{Z_1}{Z_p} = \frac{Z_p + \frac{1}{2} Z_1}{Z_p} = \frac{\frac{1}{2} Z_1 + jZ_p X}{jZ_p X} \quad (4)$$

因此亥姆霍兹消声器的传递损失计算公式为

$$L_T = 10 \lg \left| \frac{P_1^+}{P_3^+} \right|^2 = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{4X^2} \frac{S_p^2}{S_1^2} \right) \quad (5)$$

式(5)中的 X 可以根据式(6)、(7)进行求解:

$$\begin{cases} Z_p = j \left(\omega m_p - \frac{1}{\omega C_p} \right) = j \frac{\rho c}{S_p} \left(kl_p - \frac{S_p l_p}{V_r} \frac{1}{kl_p} \right) \\ m_p = \rho \frac{l_p}{S_p} \\ C_p = \frac{V_r}{\rho c^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_p C_p}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_p}{l_p V_r}} \quad (7)$$

整理后得到关于 X 的表达式:

$$X = kl_p - \frac{S_p l_p}{V_r} \frac{1}{kl_p} = \sqrt{\frac{S_p l_p}{V_r}} \left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right) \quad (8)$$

其中: k 为波数。

对亥姆霍兹消声器的传递损失计算公式进行整理可以得到:

$$L_T = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{\frac{V_r S_p}{4l_p S_1^2}}{\left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right)^2} \right\} \quad (9)$$

其中: f 为声波频率, f_p 为共振频率。

影响因子 K 的表达式为

$$K = \frac{V_r S_p}{4l_p S_1^2} \quad (10)$$

根据传递损失计算公式,可以绘制出如图2所示的传递损失图,在图中可以明显看出,影响因子 K 的大小决定着消声器的消声带宽, K 越大,带宽越大,噪声控制效果越好。

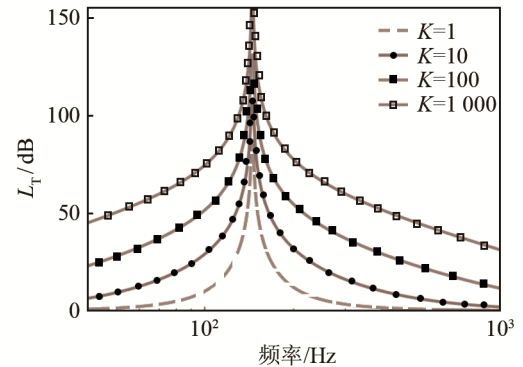


图2 不同影响因子 K 的传递损失曲线图

Fig.2 Transmission loss curves for different influencing factor K

2 消声器结构设计

在某化工厂内有一段管道在使用的过程中出现噪声,后经过检测发现,该处的噪声频率为145 Hz。因此设计了一种亥姆霍兹消声器进行降噪处理,这种消声器对频率为145 Hz左右的噪声具有明显的抑制作用,其结构如图3所示。图3中消声器的结构参数见表1。

使用COMSOL软件中的压力声学模块对图3中消声器进行传递损失计算,其中声波频率在40~1000 Hz之间以1 Hz的步长进行递增,通过计算,得到消声器的传递损失曲线,如图4所示。

从图4中可以看出:传递损失在频率为146 Hz

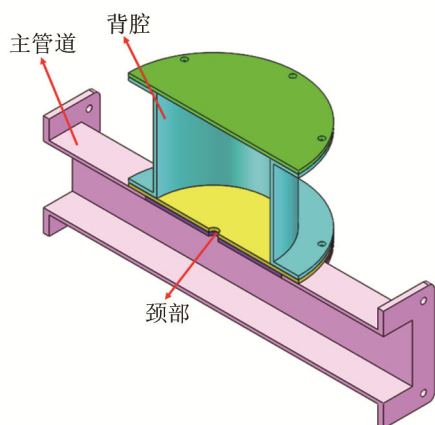


图3 亥姆霍兹消声器结构
Fig.3 Helmholtz muffler structure

表1 优化前的结构参数

Table 1 Structural parameters before optimization

颈部直径/mm	颈部高度/mm	背腔直径/mm	背腔高度/mm
8	6	100	75

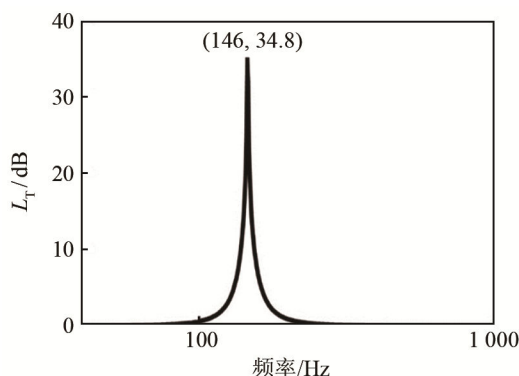


图4 优化前传递损失曲线图
Fig.4 Transmission loss curve before optimization

处时出现最大值，说明此频率是亥姆霍兹共振器的固有频率。当频率为 146 Hz 的噪声通过该系统时，系统发生共振，将声能转换为热能，从而抑制噪声值。

但是此种结构的亥姆霍兹消声器其带宽较窄，适用范围受到限制。因此，为了扩大消声器的噪声频率抑制范围，使用优化算法对消声器的结构参数进行优化^[7-8]。优化算法分为传统优化算法与智能优化算法。传统优化算法（线性规划、二次规划等）在求解时，容易出现局部最优解，而且求解的最优结果会强烈依赖初始值。智能优化算法又可以分为多种，例如：遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等。在这些智能优化算法中，遗传算法相对来说较为简单、易于实现，计算效率高，并且在运算时会自动调整搜索方向，不易陷入局部最优，即使在有干扰的情况下也能够求得全局最优解。因此本文选择使

用遗传算法对亥姆霍兹消声器的结构进行参数优化，使得亥姆霍兹消声器结构具有更宽频带的消声效果。

3 遗传算法优化

遗传算法是一种通过模拟自然环境中生物遗传、进化过程的自适应全局优化概率搜索方法。它会将具体问题所涉及的相关参数与求解得到的结果编码成染色体的二进制字符串。在遗传算法中，不同的编码方法与遗传算子的设置，会形成不同方式的遗传算法，但是不管是何种的遗传算法，都会涉及到种群的初始化、参数编码、选择、交叉、变异等基本操作算子^[9-10]。

(1) 种群初始化：在进行遗传算法求解时，首先需要根据具体问题的相关条件生成一个具有 N 个个体的种群，作为初始种群；

(2) 参数编码：对随机生成的初始种群中的每个个体进行二进制编码，编码所形成的字符串长度为 L ，且字符串长度决定了求解问题的精度；

(3) 选择：模仿自然界中生物可以不断进化的机理，对随机生成的种群个体进行选择操作，选择出来的个体将作为遗传时的对象个体；

(4) 交叉：对选择出来的个体进行配对处理，选择个体的基因进行互换重组，形成新个体；

(5) 变异：自然界中生物会受到环境因素的影响，会导致基因发生突变，因此模仿生物在遗传过程中的基因突变现象，使产生的新个体中的基因按照一定的变异概率发生变异。

在进行优化时，将传递损失计算公式中带宽的影响因子 K 作为优化的目标函数 $(G)^{[11-12]}$ ，而影响因子 K 的值越大，消声器的消声带宽就越宽。

由式(10)可知：影响带宽的结构参数分别为颈部直径 d_1 、颈部高度 l 、背腔直径 d_2 以及背腔的高度 h ，最终目标函数可以表示为

$$G(x_1, x_2, x_3, x_4) = z(d_1, l, d_2, h)$$

其中：目标函数中变量的取值范围(单位 mm)分别是 $d_1 \in [2, 15]$ 、 $l \in [5, 10]$ 、 $d_2 \in [20, 400]$ 、 $h \in [20, 500]$ 。由于在遗传优化的过程中，最优解会受到种群数量、遗传代数、编码长度以及交叉概率等遗传因素的影响，影响因素如表 2 所示。通过使用表 2 中的数据进行计算可以得到如表 3 所示的优化结果。

最终将遗传算法中的种群的个体数目选择为 150，个体的基因转换为二进制字符串后的长度为

表 2 影响因素
Table 2 Influencing factors

序号	种群数量	遗传代数	编码长度	交叉概率
1	75	80	25	0.4
2	75	150	25	0.4
3	75	150	50	0.4
4	150	150	50	0.4
5	150	150	50	0.7

表 3 优化后的结果
Table 3 Optimized results

序号	d_1/mm	l/mm	d_2/mm	h/mm	K
1	8.03	5.06	94.68	90.22	634.8
2	14.76	5.01	203.53	44.92	4 997.4
3	10.39	7.51	109.10	85.38	900.5
4	10.25	5.00	117.63	81.84	1 814.6
5	15.00	5.19	156.98	79.95	5 268.3

50, 交叉概率选择为 0.7, 进行 150 代的计算, 得到优化过程的收敛曲线图如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 当遗传代数达到 130 时, 种群均值稳定, 不再发生波动, 考虑到加工精度问题, 对优化的结果进行四舍五入, 得到的结构参数^[13-14]如表 4 所示。

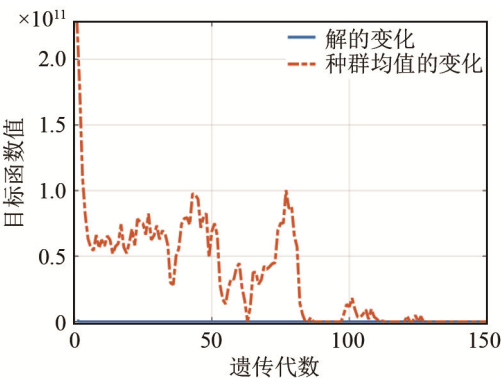


图 5 遗传算法优化设计的收敛曲线图
Fig.5 Convergence curve of optimized design by genetic algorithm

表 4 优化后的结构参数
Table 4 Optimized structural parameters

颈部直径 d_1/mm	颈部高度 l/mm	背腔直径 d_2/mm	背腔高度 h/mm
15.0	5.2	157.0	80.0

使用优化得到的消声器结构参数建立三维模型, 进行仿真模拟, 就可以得到优化后的消声器结构所对应的传递损失。

将亥姆霍兹消声结构优化前后对噪声的降噪效果进行对比, 得到结果如图 6 所示。从图 6 中可以明显地看出, 消声器的消声频带从 32 Hz 变大到了 86 Hz(传递损失大于 5 dB 说明说明消声器降噪

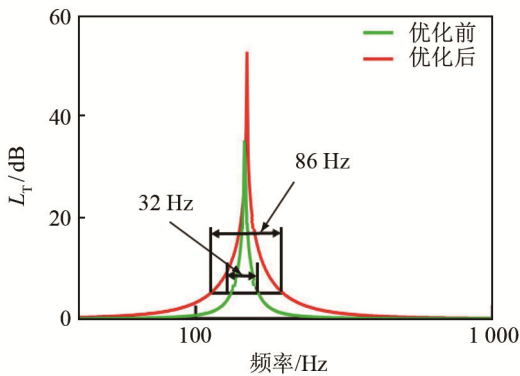


图 6 优化前后传递损失曲线的仿真结果对比
Fig.6 Comparison of simulated results of transmission loss curves before and after optimization

有效^[15]), 消声效果得到明显的改善。

4 声学性能测试

使用四传声器法对消声器进行传递损失的测试, 其测试平台如图 7 所示。图 7 中扬声器作为测试系统中的声源, 可以发出不同频率的平面波, 平面波沿着主管道传播, 经过消声器时, 消声器对管道内的声波进行降噪处理, 为了提高测试结果的准确性, 安装消音末端对透射波进行吸收, 降低了声波因反射产生的误差, 使用传感器对消声器前后的声波进行信号的采集, 通过相关软件进行分析处理, 就可以得到测试系统的传递损失曲线, 如图 8 所示。

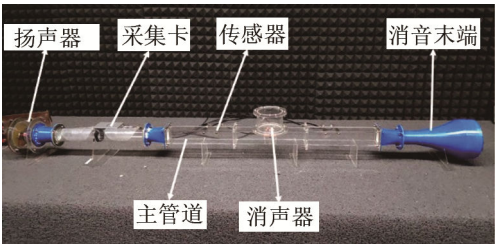


图 7 声学测试平台
Fig.7 Acoustic test platform

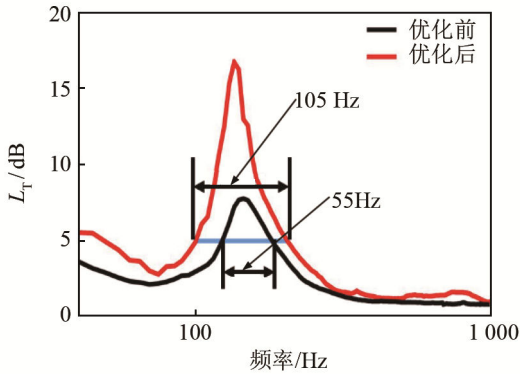


图 8 测试所得的优化前后传递损失曲线
Fig.8 The measured transmission loss curves before and after optimization

从图 8 中可以看出: 优化后消声器的传递损失峰值变大, 消声带宽从 55 Hz 增大到 105 Hz, 消声的频带范围扩大了 91%。由此可见, 使用遗传算法对亥姆霍兹消声器进行结构优化的方案是可行的, 为以后消声器的设计与优化提供了参考。

5 结 论

本文设计了一种亥姆霍兹消声器结构, 可以有效地降低频率在 145 Hz 处的管道噪声。

以消声器的带宽计算公式为目标函数, 通过遗传算法对亥姆霍兹消声器的结构进行参数优化, 使用优化后的结构参数建立模型并进行仿真模拟可知, 消声器的消声带宽从 32 Hz 拓宽到了 86 Hz, 消声效果得到了显著的提升。

对消声器进行传递损失测试, 从测试结果的对比如可以知道, 消声器经过优化后的消声频带扩大了 91%。

参 考 文 献

- [1] 侯艳芳. 绝对消声器在汽车进气噪声研究中的应用[C]//2014 年全国声学设计与演艺建筑工程学术会议论文集, 2014.
HOU Yanfang. Application of absolute silencer in automobile intake noise research[C]//Proceedings of the 2014 National Acoustic Design and Performing Arts Construction Engineering Conference, 2014.
- [2] 钮炳瑜. 某车辆进气系统消声性能分析与优化研究[J]. 汽车科技, 2013(3): 5-9.
NIU Bingyu. Analysis and optimization of noise reduction performance of a vehicle's air intake system[J]. Automobile Science & Technology, 2013(3): 5-9.
- [3] 苏胜利, 张苗, 曹为午. 亥姆霍兹共振消声器的声学改进[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(11): 128-131.
SU Shengli, ZHANG Miao, CAO Weiwu. acoustic improvement of Helmholtz resonant muffler[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(11): 128-131.
- [4] WU C, CHEN L, NI J, et al. Modeling and experimental verification of a new muffler based on the theory of quarter-wavelength tube and the Helmholtz muffler[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1-14.
- [5] YASUDA T, WU C, NAKAGAWA N, et al. Studies on an automobile muffler with the acoustic characteristic of low-pass filter and Helmholtz resonator[J]. Applied Acoustics, 2013, 74(1): 49-57.
- [6] 福田基一. 噪声控制与消声设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
FU Tianji. Noise control and noise reduction design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
- [7] CHIU M C. Noise elimination of a multi-tone broadband noise with hybrid Helmholtz mufflers using a simulated annealing method[J]. Archives of Acoustics, 2012, 37(4): 489-498.
- [8] CHIU M C. Acoustical treatment of multi-tone broadband noise with hybrid side-branched mufflers using a simulated annealing method[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2014, 33(1): 79-111.
- [9] 张国胜. 基于遗传算法的汽车排气消声器优化设计研究及其软件开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
ZHANG Guosheng. Research on optimization design and software development of automobile exhaust muffler based on genetic algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [10] 徐小程, 税永波, 李智, 等. 基于遗传算法穿孔管消声器结构优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(7): 9-11, 31.
XU Xiaocheng, SHUI Yongbo, LI Zhi, et al. Structural optimization of perforated tube muffler based on genetic algorithm[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2012, 50(7): 9-11, 31.
- [11] BARBIERI R, BARBIERI N. Finite element acoustic simulation based shape optimization of a muffler[J]. Applied Acoustics, 2006, 67(4): 346-357.
- [12] LEE K S, GEEM Z W. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm[J]. Computers & structures, 2004, 82(9-10): 781-798.
- [13] 韩彦南, 吕海峰, 耿彦章, 等. 压电声衬结构设计及其优化[J]. 压电与声光, 2017, 39(2): 220-223, 227.
HAN Yannan, LYU Haifeng, GENG Yanzhang, et al. Structure design and optimization of piezoelectric acoustic lining[J]. Piezoelectric and acoustooptic, 2017, 39(2): 220-223, 227.
- [14] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. MATLAB genetic algorithm toolbox and its application[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2014.
- [15] 中华人民共和国化学工业部. GB/T 21616-1997. 化工厂常用设备消声器标准系列[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
Ministry of chemical industry of the people's Republic of China. GB/T 21616-1997. Standard series of silencers for common equipment in chemical plants[S]. Beijing: China Standards Press, 1997.