

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.11.018

基于代理模型的消声器噪声和背压多目标优化

黄泽好^{1,2}, 黄荆荣^{1,3}

1. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054; 2. 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054;
3. 中国重汽集团重庆燃油喷射系统有限公司, 重庆 401120

摘要: 以汽车尾管噪声和排气背压为目标, 以消声器结构参数为变量, 以精度较高代理模型进行多目标优化. 通过最优拉丁超立方方法采集试验样本, 比较不同代理模型精度后确定应用 Kriging 代理模型并结合带有精英保留策略的非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ), 进行多目标优化得到了最优解集帕累托前沿. 在背压小于 20 kPa 附近选择一个多目标优化解并对优化后的消声器进行仿真和试验验证, 各工况下尾管噪声误差在 2% 以内, 额定转速排气背压误差为 0.86%, 优化后的尾管噪声和排气背压均在目标限值以内, 说明代理模型可信, 优化方法可行.

关键词: 消声器; 代理模型; 尾管噪声; 排气背压; 多目标优化

中图分类号: U463.51 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2022)11-0201-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-Objective Optimization of Muffler Noise and Back Pressure Based on Surrogate Model

HUANG Zehao^{1,2}, HUANG Jingrong^{1,3}

1. School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing 400054, China;
3. China National Heavy Duty Truck Group Chongqing Fuel System Co. Ltd., Chongqing 401120, China

Abstract: Taking automobile tailpipe noise and exhaust back pressure as targets, and muffler structure parameters as variables, the multi-objective optimization was carried out with a high-precision proxy model. Test samples were collected by the optimal Latin hypercube method. Kriging proxy model and non-inferior ranking genetic algorithm with elite retention strategy (NSGA-Ⅱ) were adopted after comparing the accuracy of different proxy models. The Pareto frontier of the optimal solution set was obtained by multi-objective optimization. A multi-objective optimization solution was selected near the back pressure less than 20 kPa, and the optimized muffler was verified by simulation and experiment. Under all working condi-

tions, the tailpipe noise error was within 2%, the rated speed exhaust back pressure error was 0.86%, and the optimized tailpipe noise and exhaust back pressure were within the target limits, indicating that the proxy model is credible, and the optimization method is feasible.

Key words: muffler; proxy model; tailpipe noise; exhaust back pressure; multi-objective optimization

随着对环境噪声控制的日益严格,企业和社会越来越关注汽车噪声控制.汽车的主要噪声源是发动机排气噪声,其最简单有效的控制方式是使用消声器^[1-5].目前消声器的研发设计和优化主要以经验设计和试凑调音为主,既要顾及影响环境的排气噪声,又要考虑到影响动力性的排气背压,这种试凑式传统设计方法费时费力,顾此失彼,且效果不佳,难以满足高效率、低成本的要求^[6-7].采用基于声学理论和空气动力学理论的软件仿真研究多目标优化问题又存在模型大、变量多、分析难度大等问题.因此,论文提出了一种基于代理模型的消声器声学性能和空气动力学性能的多目标优化设计方法,优化分析时选择精度较高的 Kriging 代理模型以简化基于声学理论和空气动力学理论的分析模型,该方法既克服了消声器传统设计在优化噪声和背压时目标相互冲突的限制,又简化了优化模型,对指导消声器的优化设计具有重要的工程意义.

1 声学与空气动力学性能分析

1.1 消声器声学性能分析模型

根据表 1 发动机参数信息,利用 GT-PWOER 软件建立发动机一维仿真模型,应用发动机台架试验结果对一维模型进行标定.输出功率和扭矩与台架试验结果对比如图 1 所示.仿真功率最大误差在 4 000 r/min 时为 2.8%,仿真扭矩最大误差在 1 500 r/min 时为 3.4%,最大误差均小于 5%,说明该发动机仿真模型比较精确,可以用于排气系统尾管噪声分析.

表 1 发动机参数信息

项目	发动机参数
型式	直列 4 缸、水冷
发动机排量/L	1.4
压缩比	10.5
点火顺序	1-3-4-2
进气形式	涡轮增压
缸径×行程/mm	73.5×82
气缸数/冲程数	4 缸 4 冲程
燃油种类	汽油
最大功率/kW	112(5 500 r/min)
最大扭矩/Nm	250(1 500~4 000 r/min)

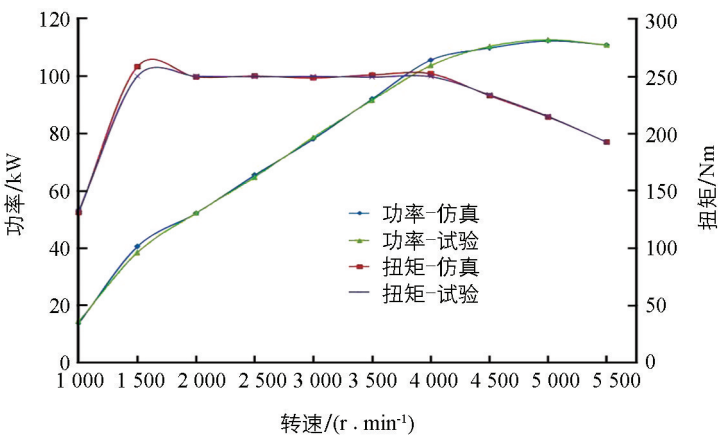


图 1 发动机功率和扭矩仿真与台架试验结果对比

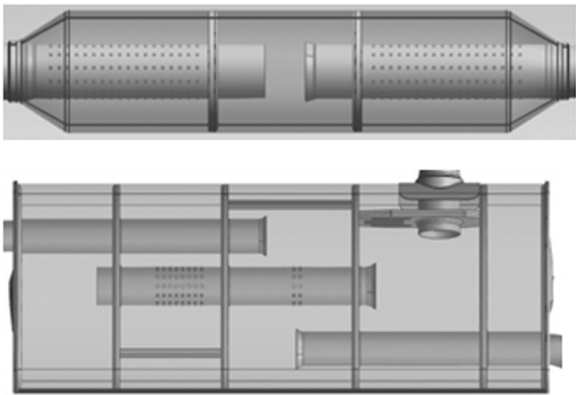
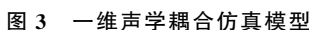
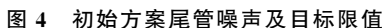


图 2 消声器初始方案结构

对图 2 所示初始消声器在 GT-POWER 中建立对应的消声器 GEM3D 模型并与发动机模型耦合,如图 3 所示.



选择 10 个转速工况(图 4),分析各工况的尾管噪声总声压级。在排气消声器设计时,为了使整车定置达到法规要求,除了应使排气尾管噪声总值低于限值要求外,通常还需要对排气声品质进行调节,一过限制各阶次噪声的方法来实现,因此提取尾管噪声 2,4,6 阶次噪声并与目标限值进行比较。



排气系统的面网格选择三角形单元,为了使生成的体网格更加精细,隔板穿孔位置单元尺寸设置为 1.5 mm,其它面网格尺寸设置为 3 mm,面网格划分完成后检查网格封闭性和单元质量,网格中不能存在自由边,最小单元角度不能小于 1° ,最小单元尺寸应大于 0.1 mm. 最后将合格的面网格以 .stl 格式导入到 STAR-CCM+ 中,设置 3 层边界层,增长率为 1.2,进出口网格设置为拉伸体网格,长度为 100 mm,层

数设置 30 层. 体网格类型为多面体网格, 总计生成 3 576 622 个体单元.

1.3.2 边界条件设置

进口设置质量流量边界条件, 质量流量为 0.139 kg/s, 温度设置为 850 ℃, 数据为台架试验测得. 湍流强度为 0.03, 湍流长度尺度设为 0.004 5. 尾管出口为压力出口边界条件, 温度为 300 K, 壁面边界为无滑移边界条件, 载体壁面为绝热边界条件, 其余壁面为对流换热边界条件, 换热系数为 30 W/m² · k, 环境温度为 300 K. 最大求解步数为 2 000 步, 结合设置的求解监视器和残差曲线判断求解是否收敛.

1.4 消声器内流场空气动力学仿真

迭代求解达到收敛以后, 得到排气系统初始方案压力场结果如图 5 所示. 可以看出, 整个排气系统压力分布由进口到出口逐渐降低, 前消和后消压力损失分别为 3.12 kPa 和 13.97 kPa. 前消进口背压为 22.89 kPa, 大于背压目标限值 20 kPa, 排气系统背压需要进行优化.

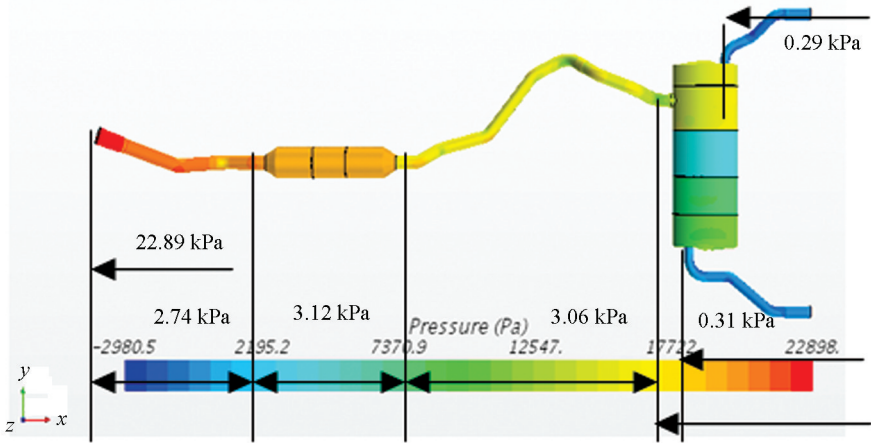


图 5 初始方案排气背压分布

2 消声器噪声和背压多目标优化

2.1 优化变量的选择

对消声器优化时选取了 10 个优化变量, 分别对应隔板穿孔直径、隔板穿孔数、穿孔管的穿孔数、3 个芯管的直径以及 4 个隔板的位置, 如图 6 所示.

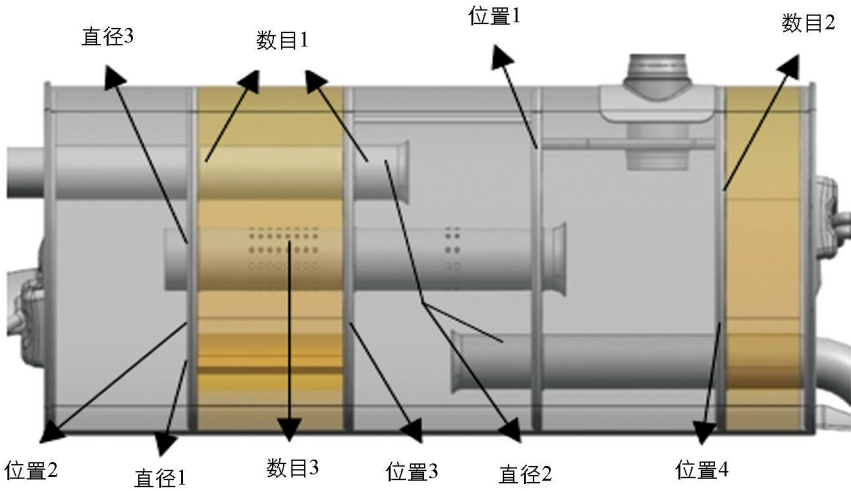


图 6 优化变量示意图

表 2 优化变量取值范围

优化变量	上限	下限
隔板小孔直径 1/mm	3	6
出口芯管直径 2/mm	45	55
中间芯管直径 3/mm	50	60
第一、二隔板小孔数 1/个	120	220
第四隔板小孔数 2/个	150	250
中间芯管穿孔数 3/个	50	150
第一隔板位置 1/mm	410	490
第二隔板位置 2/mm	120	190
第三隔板位置 3/mm	260	330
第四隔板位置 4/mm	630	690

2.2 优化目标及约束条件

由于初始方案尾管噪声除了 1 500 r/min 超过目标限值外, 其他转速均符合噪声要求, 并且要求整个排气系统在 5 500 r/min(额定转速)时前消进口背压小于 20 kPa, 因此将 1 500 r/min 的尾管噪声和 5 500 r/min 的背压作为优化目标. 同时消声器容积不可能无限制增大, 且穿孔管与穿孔板的穿孔率也不能超过 30%, 否则消声性能会急剧变差^[8], 因此设置如下优化目标式(1)和约束条件式(2):

优化目标:

$$\begin{cases} \min f_1(x_1 \cdots x_{10}) = \text{尾管噪声}(1\,500\text{ r/min}) \\ \min f_2(x_1 \cdots x_{10}) = \text{排气背压}(5\,500\text{ r/min}) \end{cases}$$

(1)

约束条件:

$$\begin{cases} V_{\text{消声容积}} = 26\text{L} \\ \varphi_{\text{穿孔管}} \leq 30\% \\ \varphi_{\text{穿孔板}} \leq 30\% \end{cases}$$

(2)

2.3 优化模型的构建

随着工程问题复杂程度的增加, 仿真模型越来越复杂、规模越来越大, 求解耗时成倍增加, 直接将多目标优化算法应用到具有物理意义的实际仿真模型将耗费大量资源, 因此迫切需要引入高效多目标优化方法^[9]. 基于代理模型的多目标优化方法是通过重新构建目标与对应变量的数学关系的代理模型以逼近真实模型, 然后在代理模型上应用多目标优化算法进行优化, 从而大幅提高优化效率.

代理模型是通过插值或拟合的方式来建立输入量和输出量的关系. 为保证代理模型的精度和效率, 构建代理模型时包括两个重要内容, 首先通过试验设计采集构建代理模型所需的样本点, 然后进行试验设计样本点的拟合与模型精度验证^[10].

确定了优化变量的取值范围以及优化目标后, 利用试验设计方法进行代理模型样本点的采集. 最优拉丁超立方(OLHD)是在拉丁超立方(LHD)的基础上增加了优化准则(常用的优化准则有熵、极大极小距离、总均方差和中心化偏差), 能同时满足设计变量的投影均匀性和设计空间分布均匀性^[11]. 本文选择最优拉丁超立方试验设计进行优化变量采样, 总共采集了 80 组试验样本(表 3).

Isight 多学科优化设计软件提供的近似模型包括响应面模型(Response Surface, RSM)、径向基神经网络模型(Radial Basic Function Neural Network)、克里金模型(Kriging)3 种. 通过用最优拉丁超立方采样方法采集 80 组样本, 50 组样本用于构建代理模型, 30 组用于检验代理模型精度. 对构建的 3 种代理模型的误差分析结果如表 4 所示.

表 3 最优拉丁超立方试验设计采样

序号	直径 1/ mm	直径 2/ mm	直径 3/ mm	位置 1/ mm	位置 2/ mm	位置 3/ mm	位置 4/ mm	穿孔数 1/ 个	穿孔数 2/ 个	穿孔数 3/ 个	声压级/ dB(A)	背压/ Pa
1	4	49	59	434	124	279	646	171	185	148	71.77	24.59
2	4	52	56	467	130	316	641	206	250	121	71.81	23.17
3	6	45	54	469	161	293	674	142	236	66	71.99	20.47
4	6	53	50	470	127	313	677	161	203	123	72.37	19.57
5	5	53	59	451	143	329	673	153	217	52	72.06	22.52
6	5	49	52	452	120	286	662	210	211	50	72.14	21.45
7	3	45	55	431	160	297	650	220	223	103	70.63	34.69
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
79	5	46	60	430	170	319	657	165	244	126	71.91	19.11
80	5	50	50	426	156	306	654	132	172	56	71.33	27.01

表 4 代理模型误差评价 R^2

代理模型	声压 R^2 (1 500 r/min)	排气背压 R^2 (5 500 r/min)
响应面模型	0.927	0.736
Kriging 模型	0.912	0.949
径向基神经网络模型	0.909	0.783

代理模型常见的误差评价指标为 R^2 ，计算公式如式(3)，由表 4 可知，响应面模型和径向基神经网络模型的排气背压 R^2 值均小于 0.9，误差精度不合格，而 Kriging 模型的尾管噪声和排气背压 R^2 值均大于 0.9，说明 Kriging 模型可作为消声器多目标优化模型。

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n_t}(f_i-\widetilde{f}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_t}(f_i-\overline{f_i})^2}$$

(3)

式中， $f_i, \widetilde{f}_i, \overline{f_i}$ 分别为测试点响应的真实值、近似值、真实响应的平均值， n_t 为测试代理模型精度的样本点个数。 R^2 越接近于 1，意味着代理模型精度越好，一般认为 $R^2>0.9$ 时建立的代理模型是可靠的^[12]。

2.4 多目标优化结果

应用已建立的 Kriging 模型，结合带有精英保留策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[13]对消声器进行尾管噪声和背压的多目标优化，优化算法参数设置如表 5。

表 5 多目标优化算法参数设置

参数	值
种群大小	120
遗传代数	50
交叉概率	0.9
交叉分布指数	10
突变分布指数	20

多目标优化问题可以有很多全局最优解，不存在唯一最优解。目前普遍采用 Pareto 定义，即在满足约

束的前提下, 对任何一个子目标的进一步改进必然使至少一个其他子目标变差, 该点就被称为 Pareto 最优
点. 一个多目标优化问题通常有许多 Pareto 点, 所有这些点构成多目标优化问题的 Pareto 前沿, 对于两设
计目标, Pareto 前沿可由一条曲线表达. 而 NSGA-II 算法显著改善了 Pareto 前沿解的多样性和算法鲁棒
性, 经过 6 000 步进化寻优后得到最终的 Pareto 前沿(图 7)和局部放大(图 8).

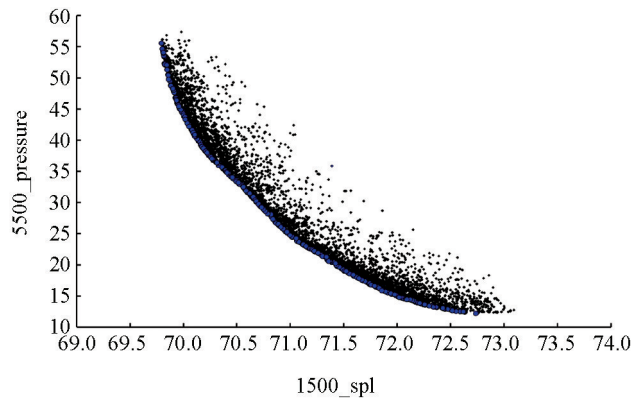


图 7 Pareto 前沿

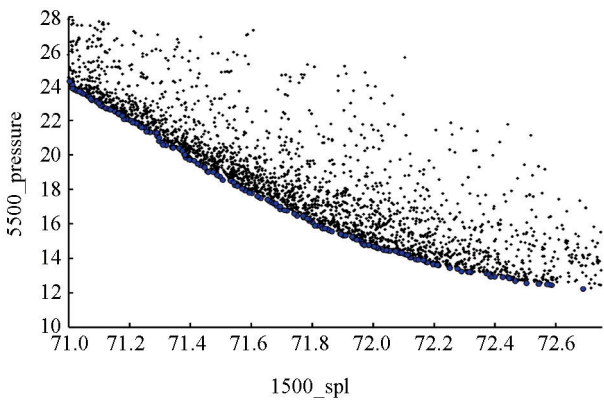


图 8 Pareto 前沿局部放大图

Pareto 前沿是一个解集, 在 Pareto 前沿上的解为一组非支配解, 需要根据所关注的目标选择一个折衷
的多目标优化解. 根据 5 500 r/min 时整个排气系统背压要小于目标限值 20 kPa 和 1 500 r/min 时尾管噪
声越低越好的要求, 在 Pareto 前沿背压小于 20 kPa 附近选择一个设计空间作为最终的多目标优化解, 将
多目标优化后的结果与优化前仿真结果进行对比(表 6).

表 6 噪声和背压优化前后对比

	直径 1/mm	直径 2/mm	直径 3/mm	穿孔数 1/个	穿孔数 2/个	穿孔数 3/个
优化前	5	46	53	154	215	88
优化后	5	47	52	174	186	116
变化量	0	1	−1	20	−29	28

	位置 1/mm	位置 2/mm	位置 3/mm	位置 4/mm	声压级/dB(A)	背压/kPa
优化前	473	131	286	671	72.9	22.89
优化后	438	162	325	649	71.5	19.65
变化量	−35	31	39	−22	−1.4	−3.24

由表 6 可知, 应用代理模型多目标优化后, 1 500 r/min 时尾管噪声由 72.9 dB(A)减小到 71.5 dB(A), 减
小了 1.4 dB(A). 排气系统背压由 22.89 kPa 减小到 19.65 kPa, 减小了 3.24 kPa. 将代理模型优化得到
的最优变量值代入实际模型进行验证, 尾管噪声和排气背压分别与实际模型结果相差 0.2 dB(A)和
0.02 kPa, 误差分别为 0.3%和 0.1%, 说明代理模型多目标优化可行, 多目标优化后尾管噪声和背压符
合消声器开发设计要求.

3 尾管噪声和背压试验验证

为验证实际仿真模型和代理模型优化结果的可行性, 用试验对优化方案的声学性能和背压进行验证.
台架试验参照汽车排气消声器总成技术条件和试验方法执行^[14], 背压测点位置与仿真输出相同, 试验与仿
真结果如图 9 和图 10 所示.

根据图 9 可知, 尾管噪声仿真值与试验结果吻合较好, 各个转速下的误差均在 2%以内. 图 10 显示,
额定转速(5 500 r/min)时排气背压试验值为 19.8 kPa, 仿真值与试验值相差仅为 0.86%, 说明该代理模型
得到的结果可行, 优化后的消声器尾管噪声和排气背压达到了开发设计要求.

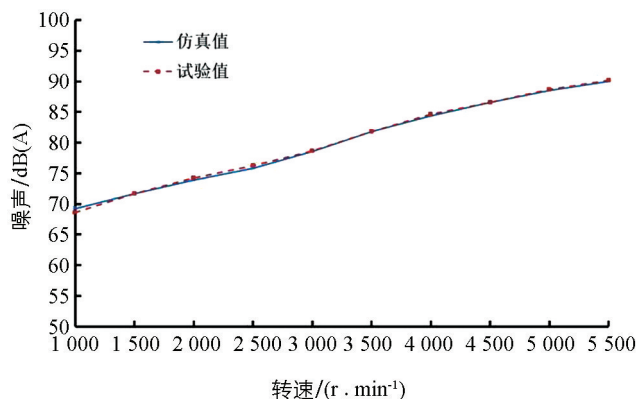


图 9 尾管噪声仿真与试验对比

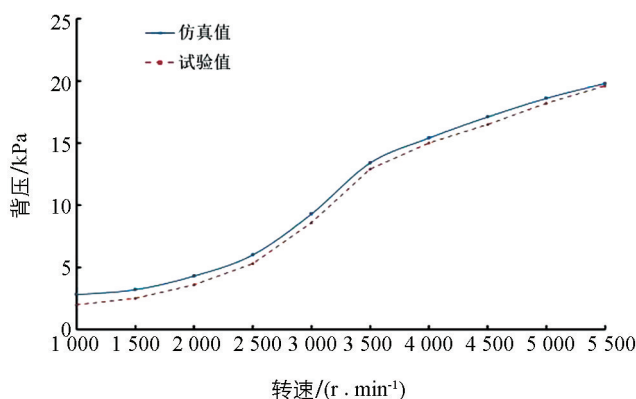


图 10 排气背压仿真与试验对比

4 结论

本文通过仿真和试验相结合的方法对消声器进行尾管噪声和排气背压多目标优化, 主要结论如下:

1) 采用最优拉丁超立方试验设计方法采集样本点, 构建了多目标优化模型. 选取隔板穿孔直径、隔板穿孔数目、穿孔管的穿孔数目、3 个芯管的直径以及 4 个隔板位置等 10 个参数为优化变量, 设定 1 500 r/min 的尾管噪声和 5 500 r/min 的排气背压为优化目标.

2) 鉴于流固耦合实际模型的复杂性, 优化时选择精度最高的 Kriging 代理模型并结合 NSGA-II 多目标优化算法对尾管噪声和背压进行多目标优化. 代理模型优化后尾管噪声仿真值与试验值误差均在 2% 以内. 额定转速(5 500 r/min)时排气背压试验值为 19.8 kPa, 小于 20 kPa 目标限值要求, 仿真值与试验值相差仅为 0.86%, 消声器噪声和背压多目标优化达到了开发设计要求.

参考文献:

- [1] 吕金水, 陈剑, 袁正. 基于 DOE 的挖掘机排气消声器结构优化设计 [J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(5): 210-213, 218.
- [2] 袁正, 陈剑. 采用试验设计方法的消声器优化设计 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 172-176.
- [3] CHERNG J G, WU W W, DING P R, et al. Design Optimization of Vehicle Muffler Transmission Loss Using Hybrid Method SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2015: 1-230.
- [4] ZUO S G, WEI K J, WU X D. Multi-Objective Optimization of a Multi-Chamber Perforated Muffler Using an Approximate Model and Genetic Algorithm [J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2016, 21(2): 152-163.
- [5] SETHI I P S, NENE D, SHIVAJIRAO P A. Engine Exhaust Noise Optimization Using Sobol DoE Sequence and NSGA-II Algorithms [C] //SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2019: 1-1483.
- [6] 李明瑞, 邓国勇, 米永振, 等. 基于响应面法的乘用车消声器声学性能优化 [J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(9): 1031-1035.
- [7] 徐靖鉴, 张杰, 郭文亮, 等. 膨胀室消声器气流再生噪声分析 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39(1): 98-101.
- [8] 顾倩霞. 汽车排气消声器的结构与性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [9] 陈国栋. 基于代理模型的多目标优化方法及其在车身设计中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [10] 龙腾, 李学亮, 黄波, 等. 基于自适应代理模型的翼型气动隐身多目标优化 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 101-111.
- [11] 贾青, 陈佳萍, 杨志刚. 基于气动减阻和散热需求的主动格栅优化设计 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 264-275.
- [12] 童水光, 何顺, 童哲铭, 等. 基于组合近似模型的轻量化设计方法 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(11): 1337-1343.
- [13] DEBA, PRATAPA, AGARWAL S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 汽车排气消声器总成技术条件和试验方法: QC/T631-2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.