

车载智能香氛流体仿真与降噪研究*

RESEARCH ON VEHICLE INTELLIGENT FRAGRANCE FLUID SIMULATION AND NOISE REDUCTION

王磊**¹ 张天宝² 尹硕辉***¹

(1. 湘潭大学 机械工程与力学学院, 湘潭 411105)

(2. 华阳多媒体电子有限公司, 惠州 516005)

WANG Lei¹ ZHANG TianBao² YIN ShuoHui¹

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

(2. Foryou Multimedia Electronics Co., Ltd., Huizhou 516005, China)

摘要 国内现有的小型化车载智能香氛装置普遍存在风量小、噪声大等问题,导致用户体验感不佳。针对上述问题,首先,基于Catia软件设计了一款小型化车载智能香氛装置。其次,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对车载智能香氛装置进行流场仿真分析,并使用改进风路和改进风口大小的方法优化风量。优化后的风量为 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$,较优化前提升了16.7%,验证了优化方法的可行性。最后,基于西门子Simcenter Test-lab系统,对车载智能香氛装置进行降噪研究,提出了采用隔离振动源与调节电动机细分的方案来降低噪声。试验结果表明,整机噪声减小了5.61 dB(A),验证了降噪方法的有效性。所用的结构设计方法、风量优化方法,以及降噪技术方案,对车载电子领域的产品开发具有很强的借鉴意义。

关键词 车载智能香氛 计算流体力学 流场仿真 结构设计 降噪技术方案

中图分类号 TH122

Abstract The existing miniaturized vehicle intelligent fragrance devices in China generally have problems such as small air volume and high noise, resulting in poor user experience. In view of the above problems, firstly, a miniaturized vehicle intelligent fragrance device based on Catia software was designed. Secondly, based on the computational fluid dynamics (CFD) method, the flow field simulation analysis of the vehicle intelligent fragrance device was carried out, and the air volume was optimized by improving the air path and the size of the air outlet. The optimized air volume is $1.2\text{ m}^3/\text{h}$, which is 16.7% higher than that before optimization, which verifies the feasibility of the optimization method. Finally, based on Siemens Simcenter Test-lab system, the noise reduction of the vehicle intelligent fragrance devices was studied. The scheme of isolating vibration source and adjusting motor subdivision was proposed to reduce noise. The experimental results show that the noise of the whole machine is reduced by 5.61 dB(A), which verifies the effectiveness of the noise reduction method. The structural design method, air volume optimization method and noise reduction technology scheme provide a strong reference for product development in the field of vehicle electronics.

Key words Vehicle intelligent fragrance; Computational fluid dynamics; Flow field simulation; Structural design; Noise reduction technology scheme

Corresponding author: YIN ShuoHui, E-mail: yinsh2016@163.com

Manuscript received 20230510, in revised form 20230524.

0 引言

智能香氛系统是近年来十分火热的一个产品方向,其用于将特定味道的气体释放到车舱内的空气

中,使车辆驾驶员及乘客感觉更舒适^[1]。从2009年开始,第一代车载香氛系统出现在迈巴赫汽车的后座,而中国市场上之前能体验到的前装香氛系统,仅局限于很多豪华品牌的高端车系中。直到近年,诸如比亚

*20230510收到初稿,20230524收到修改稿。

**王磊,男,1999年生,湖南邵阳人,汉族,湘潭大学硕士研究生,主要研究方向为机械结构CAE仿真与优化设计。

***尹硕辉,男,1988年生,湖南邵阳人,汉族,湘潭大学副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机械结构CAE仿真、结构断裂、疲劳与损伤分析。

迪、蔚来、小鹏等自主车型才开始提供车载香氛系统。

我国车载智能香氛系统主要经历了以下几个阶段:2014—2016年,国内一些比较先进的汽车品牌开始引进车载智能香氛系统,但是这个阶段交互和体验感较低;2017—2018年,随着用户对汽车内部空气环境舒适性的关注增加,车载智能香氛系统逐渐成为汽车选装配置之一;2019年后,国内车载香氛系统趋于成熟,现有新能源车上基本都配备有智能香氛系统,但是大多数都是单气味,且体积较大、散香过慢。总体而言,我国车载智能香氛系统还需进一步探索和改进。

另外,随着汽车外部噪声的减小,以及乘员舱密封效果的改善,汽车内部的车载装置(如空调、电动座椅、智能香氛等)产生的噪声就成为了车内的主要噪声源^[2]。对于车载香氛而言,由于中央控制台的空间有限,所以迫切需要一款小体积、大风量、低噪声的车载智能香氛装置。因此,设计一款综合性能较好的小型化车载智能香氛装置,并进一步改善其风量与噪声,具有重要的理论及工程研究意义。

1 车载智能香氛装置结构设计

车载智能香氛装置整体外部结构如图1所示,其长宽高为107 mm×96 mm×72 mm,质量为280 g,整体体积为0.53 dm³,可满足现有的新能源汽车对车载智能香氛装置小型化的需求。香氛1、香氛2、香氛3分别代表3种不同气味的香氛瓶。内部结构如图2所示,主要由3个香氛瓶套、旋转轴、轴套、步进电动机^[3]、齿轮、吸风风扇和印刷电路板组件(Printed Circuit Board Assembly, PCBA)组成,旋转轴的外侧覆有一层白色软胶,可以保证其气密性^[4]。

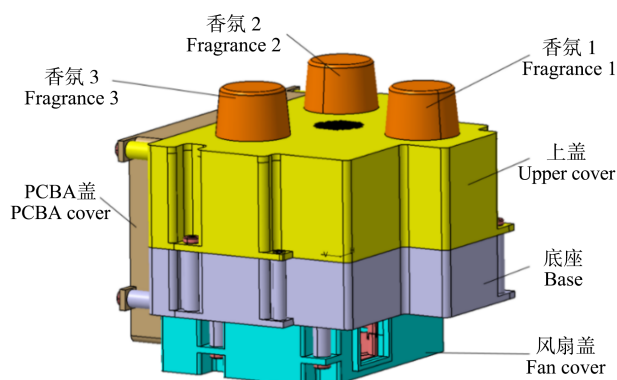


图1 车载智能香氛装置外部结构

Fig. 1 External structure of the vehicle intelligent fragrance device

装置主要动作如下:电动机通过主动齿轮带动旋转轴转动,当旋转轴的风道口与轴套、香氛瓶套的风道口对齐时,香氛通道接通。如图3所示,空气由进风口流入旋转轴上腔体内,再经香氛瓶套的上风道口流

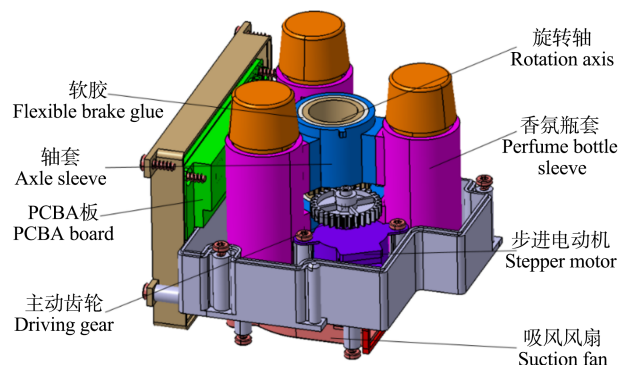


图2 车载智能香氛装置内部结构

Fig. 2 Internal structure of the vehicle intelligent fragrance device

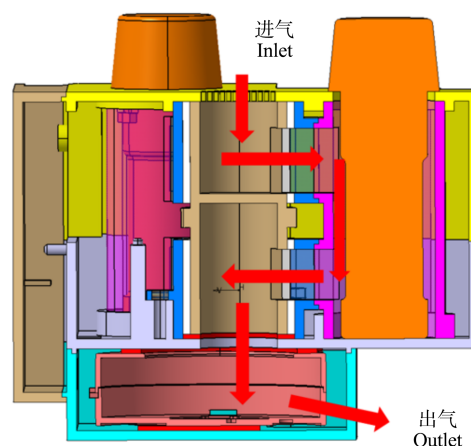


图3 气体流通示意图

Fig. 3 Air flow diagram

入下风道口,然后流入旋转轴下腔体内,最后在吸风风扇的作用下流出。如电动机继续转动120°,可实现香氛切换。

2 车载智能香氛流体仿真分析

2.1 数学模型

流体运动都会受到质量、动量和能量三大守恒定律的约束,工程应用中通常用控制方程来描述这些守恒定律。控制方程如下所述。

2.1.1 质量守恒方程

质量守恒定律可简单定义为:在单位时间内,任一微元体中增加的流体质量与相同时间范围内该微元体增加的净质量相等^[5]。假设流体为一种连续介质模型,速度和密度都是空间和时间的连续、可微函数,则质量守恒表达式可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; t 为时间; u 、 v 、 w 分别为速度矢量 $\mathbf{u}$ 在 x 、 y 、 z 方向的速度分量。

在做车载智能香氛流体模拟时,若空气为理想气

体,密度为 1.22 kg/m^3 ,式(1)可变为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

2.1.2 动量守恒方程

动量守恒定律可表述为:外界对流体微元体的作用力之和等于该微元体中流体单元的动量对时间的变化率^[6]。动量守恒方程在 x 、 y 、 z 方向上的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (3)$$

式中, p 为流体微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等为微元体表面上黏性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为微元体上沿 x 、 y 、 z 方向上的体力。

2.1.3 能量守恒方程

流体能量守恒定律可定义为:体力、面对流体微元体做的功与进入其中的净热量之和等于流入该单元体中的能量^[7]。能量守恒方程的表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \quad (4)$$

式中, c_p 为比热容; T 为流体温度; k 为流体传热系数; S_T 为黏性耗散项。

综合以上方程,共有 u 、 v 、 w 、 p 、 T 、 ρ 6个未知量,但仅有5个方程,因此,增加一个联系 ρ 和 p 的状态方程即可求解。理想气体状态下,该状态方程为

$$p = \rho R T \quad (5)$$

式中, R 为摩尔气体常数。

2.2 风量仿真与结构优化

本文基于上述数学模型进行风量仿真,并分析结构参数对风量的影响,然后优化其结构,使风量达到最优值。

首先,在 Catia 软件中对车载智能香氛装置的三维模型进行简化。其次,将处理好的三维模型导入至 Flotherm XT 中进行风量仿真,边界条件设置为 Fan 边界,通过赋予风扇的风量风压特性来模拟风道中的空气流动。风扇的风量风压特性曲线^[8]如图4所示。

选用的材料为聚碳酸酯(PC)+丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS),材料主要参数如下:弹性模量为 $2\,300 \text{ MPa}$,泊松比为 0.36 ,密度约为 1.15 g/cm^3 ,拉伸强度为 55 MPa ^[9]。

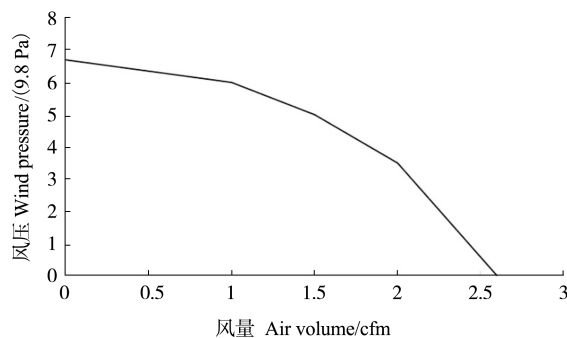


图4 风扇风量风压曲线

Fig. 4 Air volume-pressure curve of fans

2.2.1 初始结构风量仿真

如图5所示,在风扇100%占空比时,初始结构出风口处平均风量为 $0.583\,78 \text{ cfm}$ ($1 \text{ m}^3/\text{h}$)。

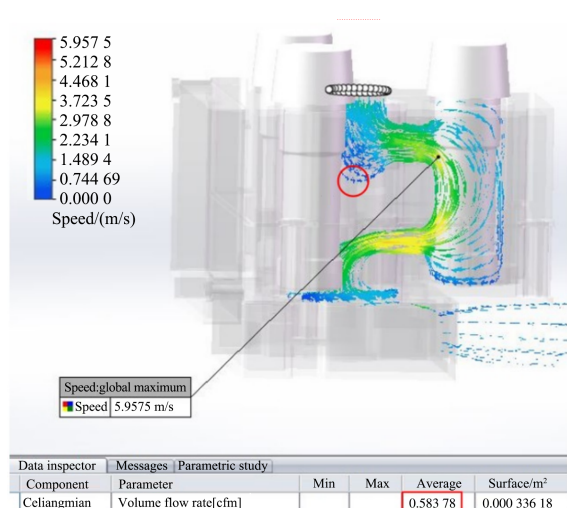


图5 初始结构风量仿真

Fig. 5 Simulation of the initial structure air volume

2.2.2 齿轮轴挡板位置的改进对风量的影响

图5中,A点处风路并不顺畅。因此,如图6所示,将齿轮轴挡板设计在紧贴上风道口处,以免风路下沉,造成风量损失。

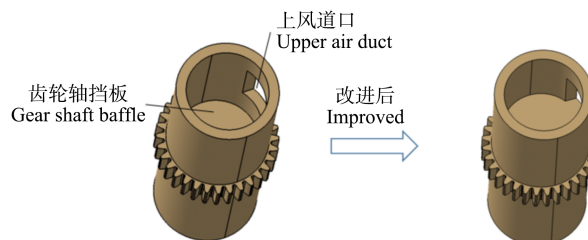


图6 改进齿轮轴挡板位置

Fig. 6 Position of the improved gear shaft baffle

如图7所示,在风扇100%占空比时,出风口处平均风量为 $0.617\,55 \text{ cfm}$ ($1.07 \text{ m}^3/\text{h}$),较改进前风量提升了 6.5% 。其原因在于,改进后的风路更为顺畅,缩短了一定的送风距离,有效降低了风阻。

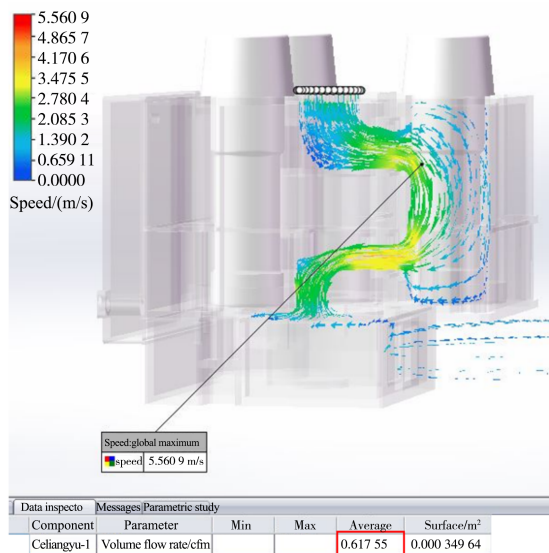


图7 改进齿轮轴结构后风量仿真

Fig. 7 Air volume simulation after improving the gear shaft structure

2.2.3 风口大小的改进对风量的影响

如图8所示,齿轮轴上下风口各有余量,在不影响香氛切换的前提下,尽可能加大齿轮轴上下风口的大小以增大风量,与之相配合的上下轴套风口,以及香氛瓶套的上下风口也随之加大。

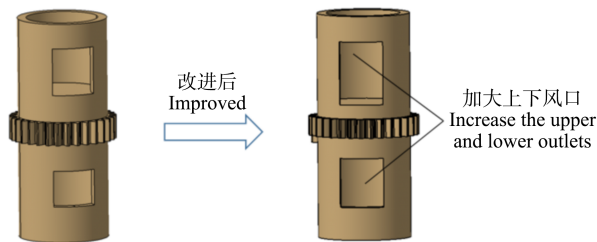


图8 改进齿轮轴上下风口大小

Fig. 8 Improve the size of gear shaft upper and lower outlet

如图9所示,在风扇100%占空比时,出风口处平均风量为0.69178cfm(1.2m³/h),较改进前风量提升了10.7%。其原因在于,增大了风口的大小,吸入的空

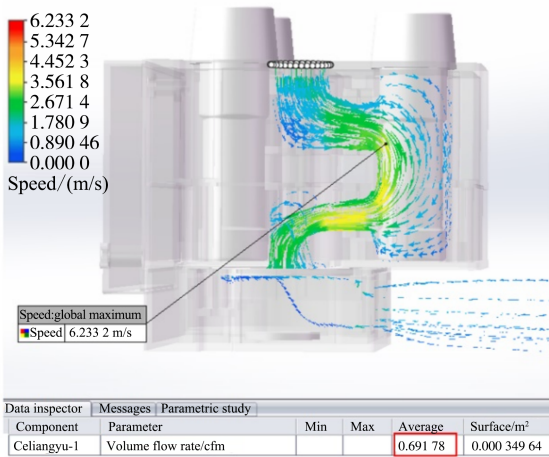


图9 改进上下风口大小后风量仿真

Fig. 9 Air volume simulation after improving the size of upper and lower air outlets

气增加,从而增大了出风量。

2.2.4 仿真结果对比

如表1所示,通过优化风路与增大风口大小的优化方法^[10-11],风量提升显著,优化后的结构较初始结构风量提升了16.7%。

表1 结构优化仿真结果对比

Tab. 1 Comparison simulation results for structure optimization		
	仿真风量 Simulation air volume/(m³/h)	风量提升百分比 Air volume increase percentage/%
初始结构 Initial structure	1	
改进挡板位置 Improved baffle position	1.07	+6.5
改进风口大小 Improved tuyere size	1.2	+10.7

3 噪声分析及降噪研究

噪声试验是为了测试车载智能香氛的噪声大小,并以其为研究对象进行降噪研究。所有试验的噪声值取的是整个测试期间的最大噪声值。

3.1 搭建试验平台

为了尽量减少外界噪声的干扰,以便准确测量车载智能香氛装置的噪声值,噪声试验在静音房^[12]内进行。静音房的四面墙壁和房顶采用的是吸声材料,地面采用的是隔音材料和弹性减振结构,进出口的门也做了消音和密封处理。静音房的背景噪声在20dB(A)左右,能满足车载智能香氛装置的噪声试验测试要求。

如图10所示,车载智能香氛装置置于黑色减振垫上,以防止与其他物体接触对噪声值的测量产生影响。麦克风处于车载智能香氛装置正前方30cm处,为了降低气流对麦克风的影响,用海绵套将麦克风罩住。噪声测试设备采用西门子测试系统。数据采集与分析在装有西门子Simcenter Test-lab系统的电脑上完成。

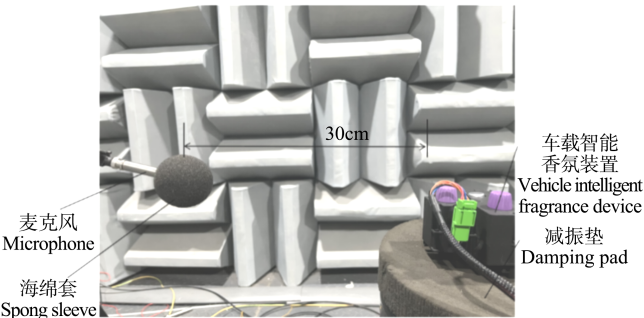


图10 测试环境示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the test environment

3.2 试验工况

噪声试验工况如表 2 所示。

表 2 噪声试验工况条件

Tab. 2 Working conditions of the noise test

参数 Parameter	值 Value
电压 Voltage/V	12
风扇占空比 Fan duty cycle/%	100
麦克风位置 Position of microphone/cm	30

3.3 风扇噪声试验

在通信处理器上调整风扇占空比,不同占空比对应不同的风扇转速,从而产生不同的噪声大小。因此,试验中直接测试风扇最大占空比状态,即测试其噪声最大值^[13],如果试验测得其转速最大时的噪声值满足要求,则其余更低转速下的噪声也满足要求。经过测试后,输出的声音时域谱与频域谱^[14-15]如图 11、图 12 所示。

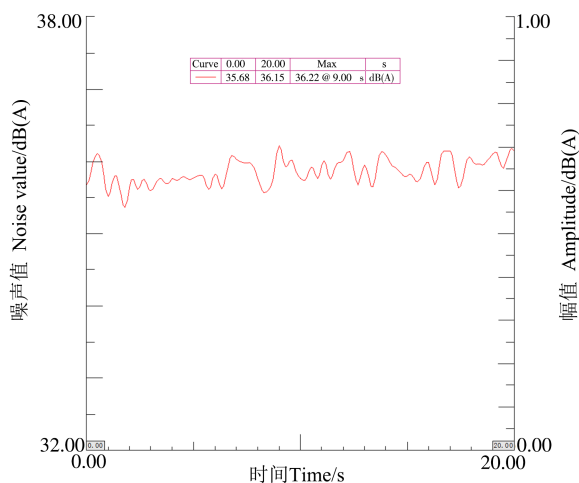


图 11 风扇噪声时域图

Fig. 11 Time domain diagram of fan noise

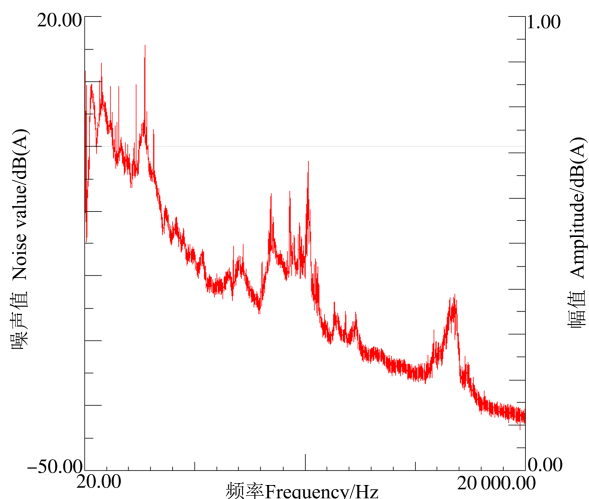


图 12 风扇噪声频域图

Fig. 12 Frequency domain diagram of fan noise

图 11 中,风扇噪声最大值为 36.22 dB(A),噪声较小。图 12 中,各频段的声功率较为平均,尖峰较少,表示风扇噪声相对稳定,声音品质较好。

3.4 电动机噪声试验

在通信处理器上输入香氛切换指令,然后测试其香氛切换过程中电动机的噪声值。如图 13 所示,电动机在一个周期的噪声最大值为 34.47 dB(A),噪声偏大。如图 14 所示,电动机噪声频谱图相对风扇频谱图尖峰较多,声音品质一般。

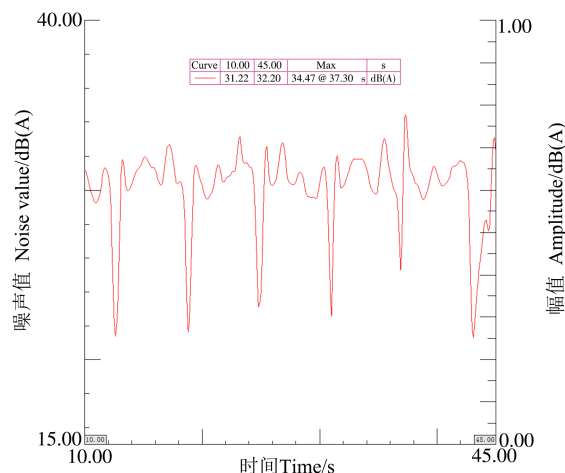


图 13 电动机噪声时域图

Fig. 13 Time domain diagram of motor noise

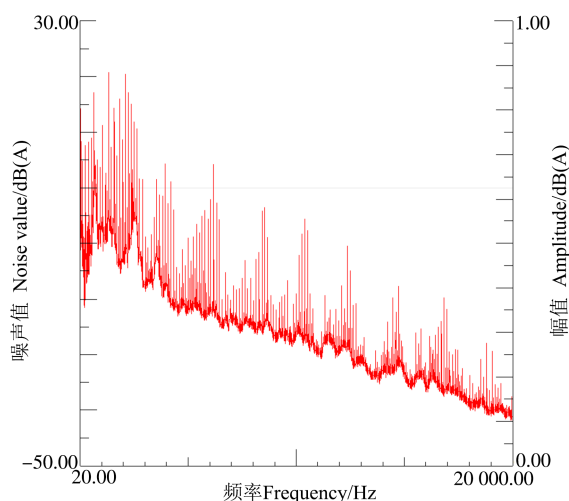


图 14 电动机噪声频域图

Fig. 14 Frequency domain diagram of motor noise

3.5 电动机降噪研究

为解决上述电动机噪声大的问题,现提出以下方案进行降噪验证。

3.5.1 隔离振动源

在结构设计时,由于未考虑到共振问题,电动机尾部与底座进行了直接接触,从而引起车载智能香氛整机噪声较大的问题。因此,在电动机尾部与底座之间加入胶垫,避免步进电动机与底座产生共振。如图

15所示,采用隔振的方案后,整机噪声为30.71 dB(A),减小了3.76 dB(A),降噪效果明显。

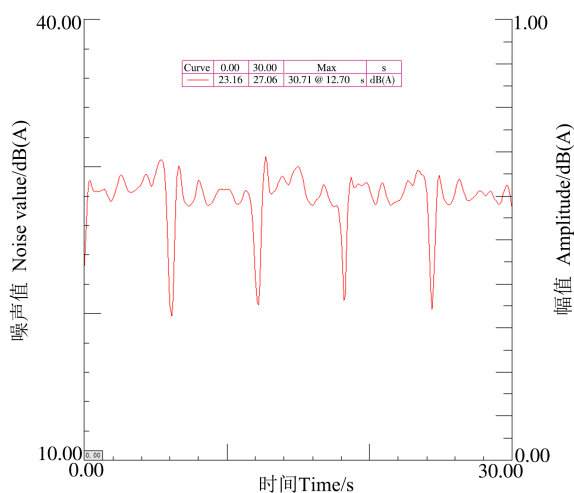


图 15 应用减振方案后噪声时域图

Fig. 15 Noise time domain diagram after application of vibration reduction scheme

3.5.2 调节电动机细分

步进电动机细分技术实质上是一种电子阻尼技术,可以减弱或消除步进电动机的低频振动,细分越大,电动机里的线圈变化幅度也就越小,从而减小了噪声^[16]。但是细分增多会使步进电动机运行速度变慢,内部旋转轴旋转一圈的时间(香氛切换时间)不宜过长也不宜过短,在8~16 s时最佳。因此调节电动机的速度,使内部旋转轴旋转一周的时间在8~16 s,再验证电动机细分对噪声的影响。如图16所示,16细分的噪声值整体优于8细分与2细分的噪声值,在旋转轴转一圈的时间为12.5 s时,噪声值最小,为28.86 dB(A),降低了1.85 dB(A),其噪声时域图如图17所示。16细分噪声频域图如图18所示。

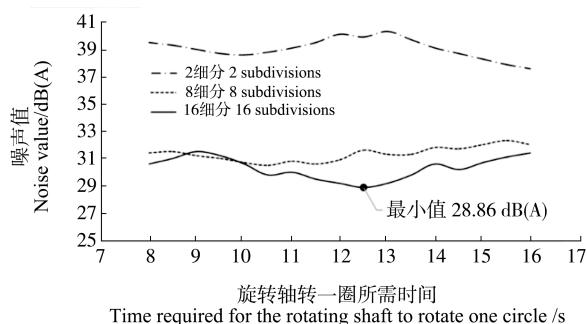


图 16 各细分噪声数据对比曲线

Fig. 16 Comparison curves of each subdivision noise data

由图18可知,与未优化前的频域图(图14)相比较,更改细分后在低频范围内的噪声得到了优化,声音品质得到了一定的改善。但是仍存在许多的频率“尖峰”,可能是由步进电动机本体引起的,例如,电动机内各部分的配合、转子偏心或动平衡不好等都会对声音品质产生很大的影响。

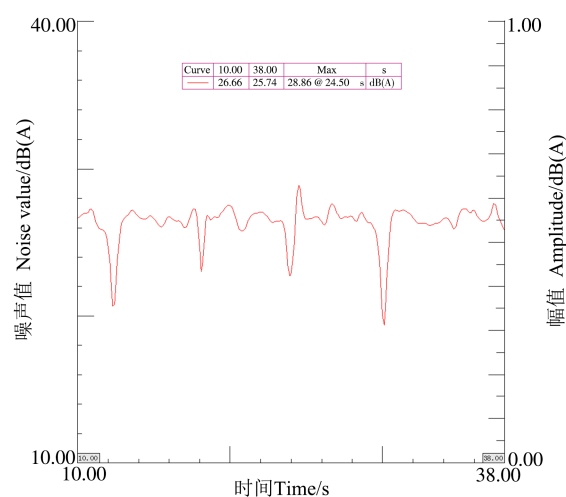


图 17 16 细分噪声时域图

Fig. 17 Noise time domain diagram after 16 subdivision

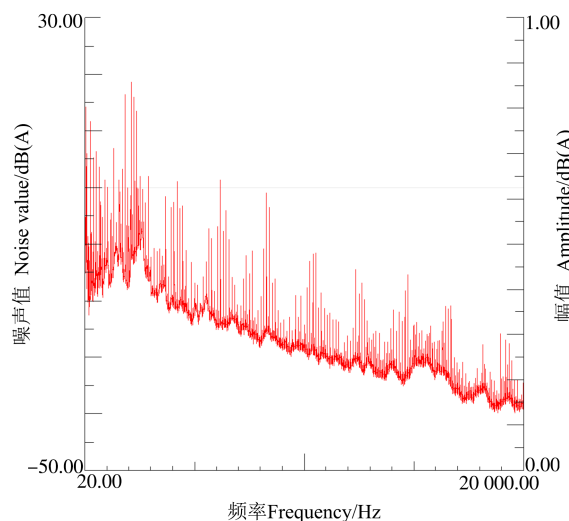


图 18 16 细分噪声频域图

Fig. 18 Noise frequency domain diagram after 16 subdivision

4 结论

本文设计了一款小体积、大风量、低噪声的车载智能香氛装置,在车载电子领域具有较高的工程应用价值。

基于计算流体力学的基本方法,对车载智能香氛装置进行风量仿真,并提出了改进风路和风口结构两种风量优化方案,优化后的风量为0.691 78 cfm (1.2 m³/h),成功将风量提升了16.7%。

此外,采用隔离振动源与调节电动机细分的方法对整机噪声值进行了优化。试验结果表明,优化后的噪声值降低了5.61 dB(A),取得了较好的噪声改善效果。

参考文献 (References)

- [1] 王 勇,陈 茹. 香氛的应用研究进展[J]. 日用化学品科学, 2021, 44(10): 58-62.
WANG Yong, CHEN Ru. Research and progress of fragrance [J].

- Detergent & Cosmetics, 2021, 44(10): 58-62 (In Chinese).
- [2] 闵海娇. 汽车空调风道气动噪声分析与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021: 2.
- MIN HaiJiao. Analysis and research on aerodynamic noise of automotive air conditioning duct [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021: 2 (In Chinese).
- [3] 赵鹏, 李帅波, 钱美, 等. 步进电机控制系统设计与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43(11): 87-90.
- ZHAO Peng, LI ShuaiBo, QIAN Mei, et al. Design and implementation of stepper motor control system [J]. Process Automation Instrumentation, 2022, 43(11): 87-90 (In Chinese).
- [4] 宾旭平. 二次橡胶制品的注塑工艺分析及模具设计[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009: 17-20.
- BIN XuPing. Injection process analysis and mold design of secondary soft rubber products [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2009: 17-20 (In Chinese).
- [5] TREIBER M, KESTING A. Continuity equation [M]//Traffic Flow Dynamics. Berlin: Springer, 2012: 67-80.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 2-60.
- TAO WenQuan. Numerical heat transfer [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 2-60 (In Chinese).
- [7] SCHLICHTING H, GERSTEN K. Boundary-layer theory [M]. 8th ed. Berlin: Springer, 2000: 2-28.
- [8] 成高飞, 郭媛. 基于多项式曲线拟合方程法的矿用风机风压特性曲线的对比研究[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(1): 47-50.
- CHENG GaoFei, GUO Yuan. Comparative study on wind pressure characteristic curves of mining fans based on polynomial curve fitting equation method [J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(1): 47-50 (In Chinese).
- [9] 丁永峰, 龙婵娟. PC+ABS工程塑料合金薄壁制件注塑工艺参数的优化[J]. 机械工程材料, 2019, 43(11): 12-15.
- DING YongFeng, LONG ChanJuan. Optimization of injection process parameters of PC+ABS engineering plastic alloy thin-walled parts [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(11): 12-15 (In Chinese).
- [10] 邓玉伟, 潘作峰, 侯杭生. 简易风道气动噪声仿真分析[J]. 机械设计, 2020, 37(增刊2): 176-180.
- DENG YuWei, PAN ZuoFeng, HOU HangSheng. Aerodynamic noise analysis of the simple duct [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37 (Suppl. 2): 176-180 (In Chinese).
- [11] 王淑坤, 赵浩鸣, 刘伟. 基于CFD汽车空调风道分析与优化[J]. 机械设计, 2018, 35(增刊1): 44-47.
- WANG ShuKun, ZHAO HaoMing, LIU Wei. Based on CFD analysis and optimization of air conditioning ducts [J]. Journal of Machine Design, 2018, 35 (Suppl. 1): 44-47 (In Chinese).
- [12] 王东. 除尘系统降噪设计与数值计算研究[D]. 上海: 东华大学, 2009: 25-40.
- WANG Dong. Research on noise reduction design and numerical calculation of dust removal system [D]. Shanghai: Donghua University, 2009: 25-40 (In Chinese).
- [13] 陈艳娟, 罗刘敏, 岳宗豪. 基于FDB和扇叶结构的笔记本电脑风扇降噪研究[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(26): 230-232.
- CHEN YanJuan, LUO LiuMin, YUE ZongHao. Research on noise reduction of laptop fan based on FDB and fan blade structure [J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 15(26): 230-232 (In Chinese).
- [14] 冯书鹏. 基于频谱分析的扫地机器人降噪研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020: 46-50.
- FENG ShuPeng. Research on noise reduction of sweeping robot based on spectrum analysis [D]. Suzhou: Soochow University, 2020: 46-50 (In Chinese).
- [15] 李峰, 张吉健. 应用频谱特性分析和测试实现直流无刷电机降噪优化[J]. 工业技术创新, 2019, 6(2): 106-109.
- LI Feng, ZHANG JiJian. Realization of noise reduction optimization of brushless DC motor using spectrum characteristics analysis and test [J]. Industrial Technology Innovation, 2019, 6(2): 106-109 (In Chinese).
- [16] 赵路路. 高细分集成式步进电机驱动电路的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022: 8-12.
- ZHAO LuLu. Research on high subdivision integrated stepper motor drive circuit [D]. Xi'an: Xidian University, 2022: 8-12 (In Chinese).