

有轨电车空调回风风道消声降噪结构研究*

李登科^{1,2,3} 刘友梅^{2,3} 樊运新^{2,3} 刘晓波^{2,3} 王先锋^{2,3} 陈诗文^{2,3}

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

2. 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 412001, 株洲; 3. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲)

摘要 [目的] 空调系统噪声是有轨电车静态噪声的主要来源, 其中车内空调噪声主要来自空调送风风机。为降低空调风道的噪声, 特对其结构开展研究, 旨在设计一种低频宽带消声降噪结构。[方法] 对有轨电车的空调回风风道的噪声传递路径进行降噪优化, 在原有回风结构的基础上, 设计了一种基于穿孔板+多孔吸声材料的复合消声装置, 用以降低回风风道传递的风机噪声。建立了包含回风风道和风机声源的统计能量模型, 结合吸声结构的理论计算, 对导流消声风道的降噪特性进行计算分析。[结果及结论] 采用导流消声风道可以有效降低风机传递的噪声。通过搭建空调风道试验平台, 验证了消声降噪风道降低有轨电车空调系统噪声的可行性。

关键词 有轨电车; 空调风道; 穿孔板; 消声降噪; 低频噪声

中图分类号 U482.1; TB533.2; U270.38⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.10.010

Noise Elimination and Reduction Structure for Tram Air-conditioning Return Duct

LI Dengke^{1,2,3}, LIU Youmei^{2,3}, FAN Yunxin^{2,3}, LIU Xiaobo^{2,3}, WANG Xianfeng^{2,3}, CHEN Shiwen^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. The State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, 412001, Zhuzhou, China; 3. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., 412001, Zhuzhou, China)

Abstract [Objective] The noise generated by air-conditioning system is a primary source of static noise in trams, with most of the interior noise originating from the air-conditioning supply fan. Aimed at reducing the noise in air-conditioning duct, research focusing on the duct structure is carried out to design a low-frequency, broadband noise elimination and reduction structure. [Method] Noise reduction optimization is performed on the noise transmission path of the air-conditioning return air duct in trams. Referring to the original air return

structure, a composite noise reduction device is designed, which is based on a perforated plate combined with porous sound-absorbing materials, to mitigate the fan noise transmitted through the return air duct. A statistical energy model that includes the return air duct and the fan noise source is established. Combined with the theoretical calculation of sound absorption structure, the noise reduction characteristics of diversion and noise elimination air duct are calculated and analyzed. [Result & Conclusion] The adoption of a flow division and noise elimination duct effectively decreases the noise transmitted by the fan. By building a test platform for air-conditioning duct, the feasibility of using the noise reduction duct to eliminate tram air-conditioning system noise is validated.

Key words tram; air-conditioning duct; perforated plate; noise elimination and reduction; low-frequency noise

空调系统噪声是有轨电车静态噪声的主要构成部分, 其产生受多种关键因素影响。空调系统噪声源主要包括送风风机噪声、离心风机噪声、压缩机和电机噪声等, 同时, 送风风道和回风风道也是空调噪声直接传递至客室的路径^[1-2]。据文献[3]记载, 通过在空调风机机组底部粘贴吸声棉, 客室内的噪声值平均降低了0.5 dB。然而, 文献[4]的试验研究显示, 尽管尝试在空调送风风机机壳处增加吸声材料, 但并未能显著降低风机噪声。文献[5]针对高速列车空调系统的噪声控制, 提出了一种阻抗复合降噪方案, 旨在提升风道消声器的传递损失。文献[6]则专注于地铁空调风机的噪声频谱特性研究, 发现其主要噪声频率集中在1 000 Hz以下的低频区域。鉴于轨道车辆设备布局紧凑, 传统降噪方法在中低频噪声的隔离与吸收上效果有限, 且现有文献中针对车辆空调系统中低频噪声的有效降噪方案尚显不足。

马大猷院士提出的微穿孔吸声结构, 在噪声控

* 国家创新方法工作专项项目(2019IM050100); 中国国家铁路集团有限公司项目(N2022J020); 中国博士后项目(256069)

制领域得到了广泛应用^[7-8]。文献[9]进一步创新,提出了一种穿孔板与吸声材料相结合的复合吸声结构,显著增强了传统微穿孔吸声结构的宽频吸声性能。

本文深入分析了有轨电车空调噪声的传递路径与频率特性,特别针对空调风机噪声的低频特性,设计了一种低频宽带消声降噪结构。利用 Va one 软件,建立了包含回风风道和风机声源的统计能量模型,对空调风道噪声的传递特性进行了详细分析。此外,还搭建了地面试验平台,对提出的降噪方案进行了测试与验证,最终提出了针对空调风道的系统性降噪方案。

1 空调回风风道消声计算模型

1.1 空调回风风道降噪模型

图 1 为有轨电车空调送风及回风流动示意图,其中空调风道采用底送底回的设计方案。从图 1 可以看出:原始空调回风风道未做降噪处理,空调送风风机噪声可以直接通过回风风道传递至客室内。为了有效控制回风风道向客室传递的噪声,建议对图 1 中所示的回风风道进行合理设计,并在其中增加消声导流装置。

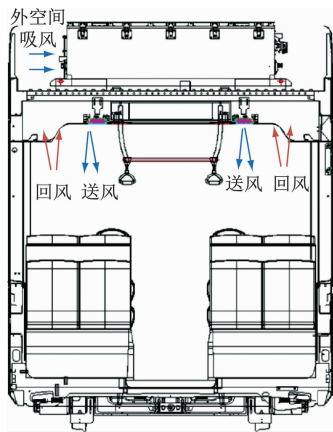
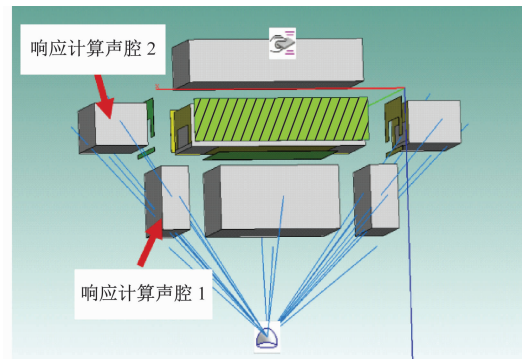


图 1 有轨电车空调送风及回风流动示意图

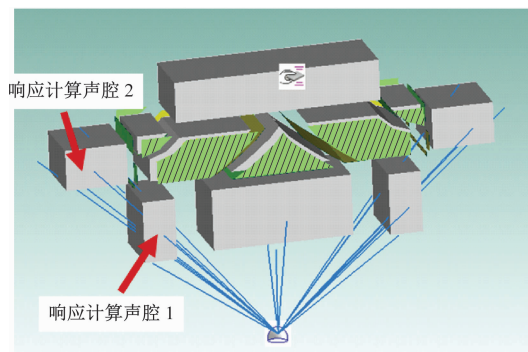
Fig. 1 Flow Diagram of Tram Air Conditioning Supply and Return Air

图 2 为回风风道噪声传递的 Va one 计算模型。针对回风风道噪声控制问题,本文基于 Va one 软件建立了两种噪声传递计算模型:原始回风风道模型和导流消声风道模型。由图 2 可知,在模型中,回风风道顶部声腔加载了空调风机的噪声频谱,而导流消声结构表面则加载了消声器扩散场内的平均吸声系数。将导流消声结构的扩散场吸声系数和回

风风道的声压作为计算输入,导入到噪声计算模型中,即可模拟并计算出回风风道的噪声传递特性。通过对比两种风道结构底部声腔的声学响应,本文可以评估出增加消声降噪方案后,空调回风风道所实现的降噪量。



a) 原始回风风道



b) 回风风道增加消声结构

注:直线连接的是半自由辐射声腔,声波通过风道后直接向下传播;
/// 模块是风道壁板。

图 2 回风风道噪声传递 Va one 计算模型

Fig. 2 Vaone calculation model of noise transmission in return air duct

图 3 为回风风道增加消声降噪结构的剖面图,其中消声降噪方案为穿孔板 + 吸声材料组合。其中穿孔板结构设计成人字形的导流消声结构,在保持风道导流特性的同时,提升风道的消声性能。穿孔板结构参数为:孔径为 3 mm,穿孔板厚度为 1 mm,孔间距为 9 mm。穿孔板后的多孔材料为三聚氰胺泡沫吸声材料,等效厚度为 100 mm。穿孔板 + 吸声材料的组合结构吸声系数的理论计算模型将在 1.2 节进行详细介绍。

1.2 穿孔板 + 吸声材料吸声计算模型

根据 Maa 模型^[8],穿孔板的声阻抗 Z_{mpp} 计算公式如下:

$$Z_{mpp} = \rho c (r_p + j\omega m_p) \quad (1)$$

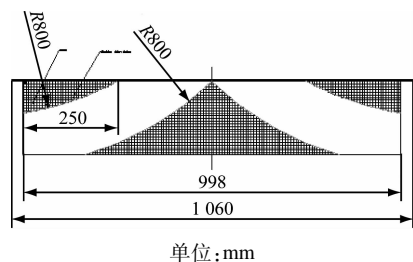


图3 回风风道增加消声降噪结构的剖面图

Fig. 3 Section drawing of additional noise elimination and reduction structure in return air duct

式中:

r_p ——声阻率;

m_p ——声质量;

ρ ——空气的密度;

c ——空气中的声速;

ω ——角频率。

且有:

$$r_p = \frac{32\eta t}{ppcd^2} \left[\left(1 + \frac{k^2}{32} \right)^{1/2} + \frac{\sqrt{2}}{8} k \frac{d}{t} \right] \quad (2)$$

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

$$k = (d/2) \sqrt{2\pi f \rho / \eta} \quad (4)$$

式中:

t ——微穿孔板的厚度,单位 mm;

d ——穿孔的直径,单位 mm;

k ——微穿孔板常数;

η ——空气的黏滞系数;

p ——穿孔率;

f ——声波的频率。

给定吸声材料的厚度为 L 时,则吸声材料的表面声阻抗为 $Z_s = -1jz_c \cot(k_c L)$, 其中 z_c 为多孔材料的特性阻抗, k_c 为材料内部的声波传播常数^[9]。

组合结构的表面声阻抗 Z_t 为:

$$Z_t = Z_{mpp} + Z_s \quad (5)$$

式中:

Z_s ——为表面声阻抗。

当入射角度为 θ 时,组合结构的阻抗为 $Z_t \cos \theta$, 组合结构的吸声系数 $\alpha(\theta)$ 为:

$$\alpha(\theta) = 1 - R(\theta)^2 \quad (6)$$

式中:

$R(\theta)$ ——反射系数。

组合结构的反射系数定义为:

$$R(\theta) = \frac{Z_t \cos \theta - \rho c}{Z_t \cos \theta + \rho c} \quad (7)$$

组合结构的角扩散场平均吸声系数为:

$$\langle \alpha \rangle = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin 2\theta d\theta \quad (8)$$

2 仿真计算结果

由图4可知:空调风机的噪声频谱主要集中在200~2000 Hz的中低频段。为了有效控制这一频段内的噪声通过回风风道传播,需要针对回风风道的噪声频率特性设计专用的中低频消声装置。通过将穿孔板+吸声材料的组合结构的吸声峰值频率设计在100~2000 Hz的频段内,这样可实现对风机宽频噪声源的有效降噪控制。

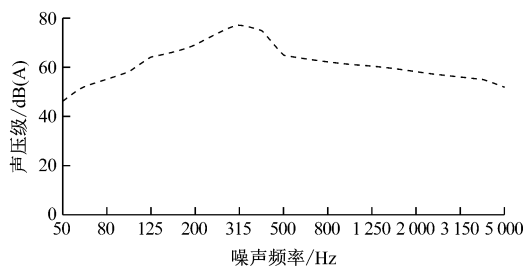


图4 回风风道内的噪声频谱特性

Fig. 4 Noise spectrum characteristics in return air duct

从图5中可以观察到:在声波正入射条件下,穿孔板+吸声材料组合结构在200~4000 Hz范围内的吸声系数均大于0.5,这表明该结构能够有效吸收空调风机的宽频噪声,从而提升导流消声结构的整体降噪性能。

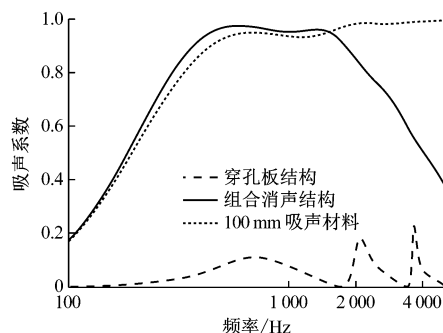


图5 组合消声结构正入射下吸声系数

Fig. 5 Sound absorption coefficient of combined noise elimination structure under normal incidence

进一步分析图6,本文发现组合结构在2000 Hz以上的高频降噪性能主要由多孔吸声材料贡献。对比组合结构与单一吸声材料的吸声系数,可以看出穿孔板结构通过其提供的声质量增强了组合结构在1500 Hz以下低频段的吸声能力。因此,组合

消声结构不仅保留了多孔吸声材料在高频段的优异吸声特性,还具备了一定的中低频吸声性能。此外,穿孔板还充当了保护面板的角色,用于固定吸声材料在消声风道内的位置。

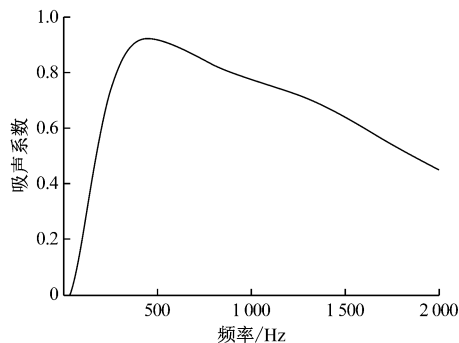


图6 组合消声结构扩散场平均吸声系数

Fig. 6 Averaged sound absorption coefficient of combined noise elimination structure in diffuse field

从图7可以看出,在扩散场条件下,组合结构在200~2 000 Hz的中低频段内的平均吸声系数仍然大于0.5,这进一步证实了该结构在降低空调风机宽频噪声方面的有效性。

图7提供了原始风道和消声风道底部声腔1的降噪量对比分析,同时,回风风道噪声传递的仿真计算模型如图2所示。从该对比分析图中可以明显看出,采用穿孔板+吸声材料的组合消声结构后,回风风道底部在50~5 000 Hz频段内的噪声降低了3 dB(A)以上。这一结果表明,该组合消声结构对于降低空调风道的宽频噪声具有显著效果。

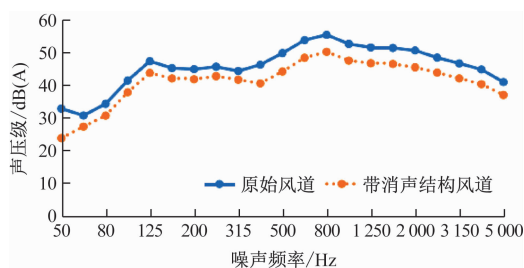


图7 原始风道和消声风道底部声腔1的降噪量对比

Fig. 7 Noise reduction comparison between original air duct and cavity 1 at noise elimination air duct bottom

3 试验结果

为了验证回风风道降噪方案的有效性,分别对安装原始风道及导流消声风道的空调机组回风风道底部噪声进行了测量。导流消声装置的实物如图8所示。测试时,将空调机组运行在43 Hz,送风

阀角度调至40°,回风阀角度调至45°,待运行稳定后,在距离空调机组送回风口20 cm位置处进行噪声测量,测试现场的传声器布置如图9所示。测量结果中,噪声曲线图见图10,具体数据见表1。



图8 导流消声结构设计实物图

Fig. 8 Photo of the designed flow division and noise elimination structure



图9 噪声测试传声器布置图

Fig. 9 Setup of microphone noise test

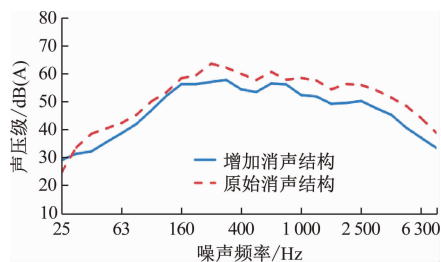


图10 空调回风风道底部声压级测试对比

Fig. 10 Comparison of test sound pressure level at air-conditioning return air duct bottom

表1 增加消声结构后的空调回风风道底部噪声对比

Tab. 1 Noise comparison at air-conditioning return air duct bottom after adding noise elimination structure

序号	声压级/dB(A)
原始风道	68.8
增加消声结构	66.3

从图10可以看出:在整个测量频段内,回风风道采用穿孔板+吸声棉的复合消声方案后,底部噪声平均降低了约2.5 dB(A)。其中,导流消声装置对回风风道底部200~2 000 Hz的中低频噪声具有显著的降低效果,同时在部分高频段(如>2 000 Hz)也表现出良好的降噪性能。相比原有的回风风

道,增加导流消声结构后的降噪效果十分明显,因此该装置可以推荐应用于后续类似项目的空调风道噪声控制中。

4 结论

1) 针对有轨电车的空调回风风道噪声传递路径进行了降噪优化。在原有回风结构的基础上,根据空调系统回风风道的噪声传递路径以及空调风机宽频噪声的频率特征,设计了人字形的导流消声装置。通过测试和仿真分析,结果表明采用穿孔板+吸声材料的组合消声结构相比原始回风风道,可以有效降低空调系统通过回风风道传递至客室的噪声达 2.5 dB(A)。此外,该消声器的降噪频带广泛覆盖了 50~8 000 Hz 的频率范围。

2) 穿孔板与吸声材料的组合使用,能够兼顾风道在低频及高频段的消声特性。其中,穿孔板通过增加组合消声结构的声质量,有效提升了消声装置的低频吸声性能;而多孔材料则显著增强了导流消声装置的高频消声能力。因此,该组合消声装置具有广泛的适用性,可以推广应用于轨道车辆的空调风道降噪设计中。

参考文献

- [1] 柳周,刘晓波,雷新红. 空调机组对地铁车辆室内噪声贡献量的测试分析[J]. 技术与市场,2014,21(8):49.
LIU Zhou, LIU Xiaobo, LEI Xinhong. Testing and analysis of the noise contribution for an air-conditioning unit mounted in a subway vehicle[J]. Technology and Market, 2014, 21(8):49.
- [2] 李鹏,储成龙,蒲栋,等. 轨道车辆空调送风系统噪声振动传递分析[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(5):1833.
LI Peng, CHU Chenglong, PU Dong, et al. Noise and vibration transmission of air supply system of rail vehicle air conditions[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(5):1833.
- [3] 王业,马英华,朱洪磊,等. 有轨电客车客室空调机组降噪试验研究[J]. 技术与市场,2018,25(2):9.
WANG Ye, MA Yinghua, ZHU Honglei, et al. Research on noise reduction of air conditioning unit for tram passenger room[J]. Technology and Market, 2018, 25(2):9.
- [4] 齐玉文,王森林,孟胜军,等. 地铁车辆空调机组降噪试验研究[J]. 铁道车辆,2022,60(4):78.
QI Yuwen, WANG Senlin, MENG Shengjun, et al. Experimental study on noise reduction of air conditioning units for metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2022, 60(4):78.
- [5] 孙艳红,张捷,韩健,等. 高速列车风道消声器传声特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(7):1389.
SUN Yanhong, ZHANG Jie, HAN Jian, et al. Sound transmission characteristics of silencer in wind ducts of high-speed train[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(7):1389.
- [6] 付翔,杨晓东,姚学斌. 地铁列车空调系统噪声试验研究[J]. 技术与市场,2017,24(8):33.
FU Xiang, YANG Xiaodong, YAO Xuebin. Experimental study on noise of air conditioning system of subway train[J]. Technology and Market, 2017, 24(8):33.
- [7] MAA D Y. Potential of microperforated panel absorber[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(5):2861.
- [8] MAA D Y. Microperforated-panel wideband absorbers[J]. Noise Control Engineering Journal, 1987, 29(3):77.
- [9] LI D, CHANG D, LIU B, et al. Improving sound absorption bandwidth of micro-perforated panel by adding porous materials [C]//Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering. Melbourne: Australian Acoustical Society, 2014.

· 收稿日期:2023-02-07 修回日期:2023-02-24 出版日期:2024-10-10
Received:2023-02-07 Revised:2023-02-24 Published:2024-10-10
· 通信作者:李登科,高级工程师,ldk@mail.ioa.ac.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

同济大学《城市轨道交通研究》杂志社在第六届上海市科技期刊编辑技能大赛中荣获三项优秀奖

在 2024 年 9 月 27 日举办的第六届上海市科技期刊编辑技能大赛中,同济大学《城市轨道交通研究》杂志社参赛团队荣获团队优秀奖,齐琳老师荣获个人优秀奖,编辑部荣获优秀组织奖。本届大赛由上海市科技期刊学会主办,共有 49 个编辑团队、241 名编辑参赛。

同济大学《城市轨道交通研究》杂志社始终坚持以培育高品质科技期刊为发展核心,持续创新发展。2019 年,实现了编辑团队“青年化”;2023 年,在新一届编委会换届之际首次组建了青年委员团队,同时,全面启动了期刊国际化工作,目前已先后被 6 大国际知名数据库收录。

(同济大学《城市轨道交通研究》编辑部供稿)