

控制理论与应用

智轨电车司机室主动降噪方法仿真研究

周 升^{1,2}, 黄万军¹, 李 伟¹, 肖 磊², 黄 金^{1,2}, 何 杰³

(1. 四川省中车铁投轨道交通有限公司, 四川 宜宾 644600;

2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 3. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘 要: 智轨电车司机室的噪声主要来自布置在司机室底架上的大型机电设备, 这些噪声频带分布广、且具有明显的时变特性, 而传统降噪技术只能在某些特殊的频率和工况下发挥作用, 不能完全满足智轨电车的降噪需求。为进一步提高智轨电车司机室驾驶环境的舒适性, 文章针对智轨电车司机室降噪技术进行研究, 提出一种宽带前馈主动降噪方法, 其采用 FxLMS 控制算法。文中对其控制算法进行了推导, 并结合智轨电车噪声数据在 Matlab/Simulink 平台进行建模仿真。仿真结果表明, 采用该主动降噪技术能够有效降低司机室内噪声水平, 噪声降幅约为 20 dB。

关键词: 智轨电车; 主动降噪; FxLMS 算法

中图分类号: TP273⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)03-0065-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.03.011

Simulation Research on Active Noise Reduction in Driver's Cab of Autonomous-rail Rapid Tram

ZHOU Sheng^{1,2}, HUANG Wanjun¹, LI Wei¹, XIAO Lei², HUANG Jin^{1,2}, HE Jie³

(1. Sichuan CRRC SRIG Rail Transit Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644600, China; 2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd.,

Zhuzhou, Hunan 412001, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Noise of autonomous-rail rapid tram mainly comes from giant mechanical and electrical equipment installed on the chassis of cab. The noise has a wide frequency band and obvious time-varying characteristics. Traditional noise reduction technology can only work in specific frequencies and working conditions, and may not fully meet the noise reduction requirements of the autonomous-rail rapid tram. In order to further improve the comfort of driving environment for autonomous-rail rapid tram cab, this paper studies the active noise reduction technology of autonomous-rail rapid tram cab. A wideband feedforward active noise reduction method is proposed, which adopts FxLMS control algorithm, and the control algorithm is derived, and the noise data of autonomous-rail rapid tram is used in the Matlab/Simulink platform for modeling and simulation. The results show that the active noise reduction technology can effectively reduce noise level in cab and the noise reduction is about 20 dB.

Keywords: autonomous-rail rapid tram; active noise reduction; FxLMS(filtered-x least mean square)

0 引言

由中车株洲电力机车有限公司研究所自主研发的智能轨道快运系统(autonomous-rail rapid transit,

ART)具有运量大、建设成本低、建设周期短等优势, 受到广泛关注, 先后在湖南株洲和四川宜宾开通试运营了首条示范线和商业化运营线路^[1-2]。作为 ART 的重要组成部分, 智轨电车以其平稳、舒适的特点而受到广泛好评。得益于合理的布局设计和先进的隔热降噪工艺, 智轨电车客室的噪声抑制效果比地铁车辆和普通公交车的更好。由于智轨电车采用 100% 低地板

收稿日期: 2020-04-22

作者简介: 周升(1971—), 教授级高级工程师, 主要从事电气工程、新材料技术等方面研究工作。

设计,大型车载机电设备均被布置在电车两端司机室底架,这些设备会产生大量的噪声且噪声可通过车体传入司机室。传统的吸音棉降噪措施其噪声抑制效果与厚度有关,在复杂的噪声环境中降噪效果不理想;且受空间限制,加装大型消音装置也不太现实。

主动降噪(active noise cancellation, ANC)技术因具有装置体积小、重量轻、针对性强等特点被广泛应用^[2]。早在 20 世纪 30 年代,德国学者 P.Leug 就提出了前馈主动噪声控制技术并申请了相关专利^[3];随后“电子吸声器”的概念被提出且其应用场景被进行了设想^[4]。到了 20 世纪 80 年代,主动降噪技术开始被应用在汽车驾驶室并取得了良好的降噪效果^[5-6]。目前,该技术在乘用车上的应用已经比较成熟,但在轨道交通车辆领域的应用相对较少,因此对智轨电车主动降噪技术的研究十分必要。

本文通过对智轨电车司机室的噪声特点进行研究,分析了传统降噪技术的不足,对主动降噪技术的原理和算法进行了介绍并针对智轨电车的噪声数据进行了建模仿真分析。

1 智轨电车司机室噪声分析

智轨电车司机室的噪声主要来自安装在底架上的牵引电机、驱动桥以及空压机等机电设备。机电设备在工作时产生的不同频率的振动通过车体传播到司机室,在司机室内形成空气噪声和机械噪声。智轨电车司机室噪声空间分布如图 1 所示。

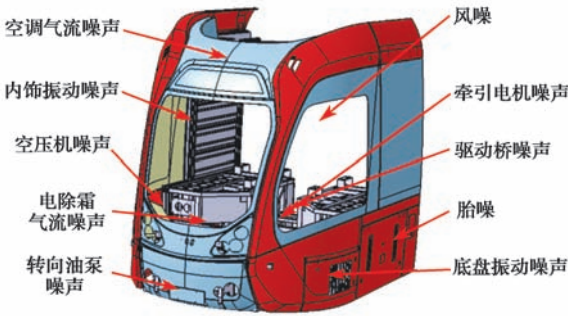


图 1 智轨电车司机室噪声空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of ART cab noise

根据国家标准 GB 14892-2006《城市轨道交通列车噪声限值 and 测量方法》^[7],地铁和轻轨车辆运行在地上线路时,司机室内噪声等效声压级(sound pressure leve, SPL)最大允许限值为 75 dB。这里等效声压级被定义为

$$L_{eq}=10\times\lg\left[\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt\right]$$
 (1)

式中: L_{eq} ——等效声压级, dB; (t_2-t_1) ——规定的时间间隔, s; $p_A(t)$ ——瞬时 A 计权声压, Pa; p_0 ——基准声压, 20×10^{-6} Pa。

根据文献 [7] 提出的测量方法,以宜宾智轨 T1 线列车作为测试对象,采用 I 型声计器获得列车司机室座椅旁边各主要噪声源等效声级如表 1 所示。可以看出,牵引电机噪声在各噪声源中为主要噪声来源。

表 1 主要噪声源噪声等级
Tab. 1 Noise level of main noise sources

噪声源	等效声级 /dB	噪声源	等效声级 /dB
空压机	55.58	空调	43.16
转向油泵	28.54	电除霜	40.11
牵引电机	78.56		

取时间间隔为 5 000 个采样周期,由式 (1) 计算的等效声压级时程如图 2 所示。测量数据时长为 48 s, 0~5 s 期间列车启动,牵引工况下司机室噪声等效声压级约为 75 dB; 5~20 s 期间列车高速滑行,噪声约为 70 dB; 20~28 s 期间列车减速制动,噪声水平达到 80 dB 左右; 28~30 s 期间列车为怠速滑行状态,此时胎噪和外场风噪较小,电机、空压机等设备也不产生剧烈抖动,噪声来源主要为各机电设备的原始噪声,因此司机室噪声水平较低。综合来看,智轨电车在滑行的时候噪声比较小,在牵引和制动的时候噪声会较大且波动剧烈。

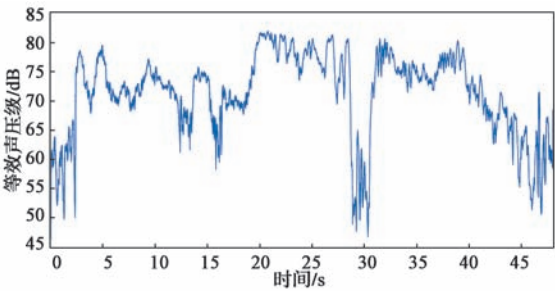


图 2 智轨电车司机室噪声等效声压级时程图
Fig. 2 Time series of SPL in ART cab

为了进一步分析智轨电车司机室的噪声成分,对所采集的司机室噪声进行频谱分析,结果如图 3 所示。

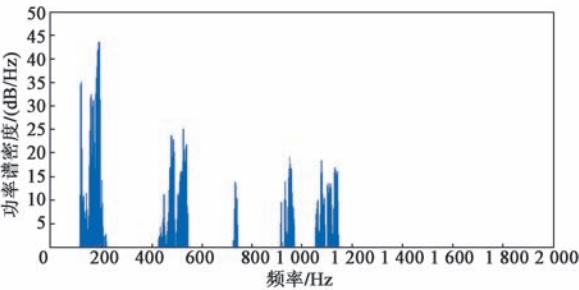


图 3 司机室噪声功率谱密度
Fig. 3 Power spectral density in ART cab

由图 3 可以看出, 智轨电车司机室噪声集中分布在 100~200 Hz、420~550 Hz、720~750 Hz、920~980 Hz 和 1 050~1 150 Hz 几个频段, 其中以 200 Hz 以下的低频噪声为主。对于 420~1 150 Hz 频段的高频噪声, 采用传统被动降噪技术进行抑制; 而对于低频噪声, 若采用被动降噪技术会造成降噪成本的大幅提升, 因此难以实际应用。智轨电车司机室构造属于典型的封闭内腔, 而腔内主动降噪技术对 200 Hz 以下的低频噪声具有较好的抑制效果, 本文将重点研究该技术在智轨电车司机室低频噪声抑制中的应用。

2 主动降噪基本原理

主动降噪分为前馈型控制和反馈型控制。反馈型主动降噪因自身缺点而较少应用^[8]。前馈主动降噪系统按照其噪声抑制的带宽又分为窄带前馈主动降噪系统和宽带前馈主动降噪系统^[9]。由于智轨电车司机室噪声频率分布较广, 因此本文重点阐述宽带前馈主动降噪系统原理。

图 4 示出宽带前馈主动降噪系统, 其主要由参考传感器、次级声源以及 ANC 控制算法等组件构成。为了使降噪效果在较宽的频段内有效, 宽带 ANC 控制系统一般采用声学传感器来构造参考信号。通过参考传感器和误差传感器采集初级声源信号以及误差信号, 通过相应算法计算出次级声源所需信号, 由扬声器发出声波与噪声互相抵消, 实现降噪功能。

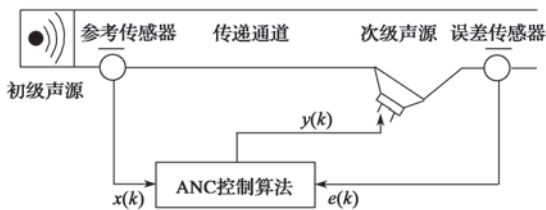


图 4 主动降噪技术原理

Fig. 4 Principle of active noise reduction technology

假设噪声和次级声源分别为

$$p_1 = p_{A1} \cos(\omega t - \varphi_1) \quad (2)$$

$$p_2 = p_{A2} \cos(\omega t - \varphi_2) \quad (3)$$

式中: p_1, p_2 ——声压; p_{A1}, p_{A2} ——声压幅值; ω ——角频率; φ_1, φ_2 ——相位。

两个声波叠加后, 分布在空间的平均声音能量密度为^[10]

$$\bar{\varepsilon} = \frac{p_{A1}^2 + p_{A2}^2 - 2p_{A1}p_{A2}\cos\varphi}{2\rho c^2} \quad (4)$$

式中: ρ ——介质密度; c ——声速; φ ——相位, $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。

当 $p_{A1} = p_{A2}$, $\varphi = n\pi$, $n=1, 3, 5, \dots$ 时, $\bar{\varepsilon} = 0$, 从而实现消除噪声的功能。

图 4 所示的主动降噪抑制系统中, ANC 控制算法是整个系统的关键。该算法主要功能是对次级声源信号及误差信号进行分析处理, 计算出消除噪声所需的次级声源信号并输出到扬声器产生次级声源, 与现场噪声相互叠加抵消。文献 [8] 指出, 为了消除系统电信号和声音信号互相转换时的延迟问题, 通常采用滤波 x 信号最小均方算法 (filtered-x least mean square, FxLMS) 和无限冲击响应滤波算法 (infinite impulse response, IIR), 但前者应用范围更加广泛。

3 FxLMS 算法

FxLMS 算法是在 LMS 算法基础上进行优化的一种改进算法, 其原理如图 5 所示。其中, $p(z)$ 为主通道的传递函数, $c(z)$ 为扬声器以及功放等电声转换系统的传递函数, $w(z)$ 是控制算法的滤波权值系数, $c'(z)$ 是 $c(z)$ 的估计值, 用于消除 $c(z)$ 带来的延时问题。 $c'(z)$ 的估计可以采用系统辨识的方法获取, 通常采用在线辨识以消除具有时变特性的次级通道带来的不利影响。

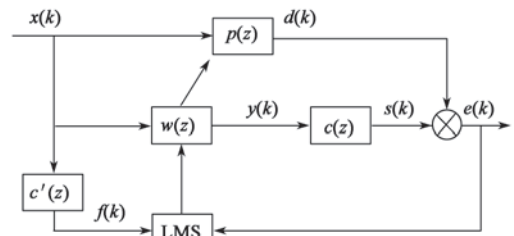


图 5 FxLMS 算法原理

Fig. 5 Principle of FxLMS algorithm

参考信号经过主通道以后得到期望信号

$$d(k) = x(k) * p(k) \quad (5)$$

式中: $*$ 表示卷积运算; $x(k)$ 为参考信号; $p(k)$ 为传递通道 $p(z)$ 的脉冲响应函数, 其中, k 为脉冲响应传递函数及声音信号时间序列的自变量, z 为连续时间系统传递函数自变量。

当滤波器长度为 L 时, 控制器输出信号为

$$y(k) = x(k) * w(k) = \sum_{l=1}^L w_l(k) x(k-l+1) \quad (6)$$

式中: $w(k)$ 为滤波器 $w(z)$ 的脉冲响应函数。

次级通道会引起控制器输出信号的时延, 扬声器实际播放的次级信号为

$$s(k) = y(k) * c(k) \quad (7)$$

式中： $c(k)$ 为次级通道 $c(z)$ 的脉冲响应函数。

通过在 LMS 算法前加入估计的次级通道传递函数，可以修正次级通道 $c(z)$ 带来的时延：

$$f(k)=x(k)*c'(k) \quad (8)$$

式中： $c'(k)$ 是通过系统辨识方法对 $c(k)$ 进行估计得到的一个估计结果。

期望信号和次级信号相互叠加，形成误差信号：

$$e(k)=d(k)+s(k) \quad (9)$$

LMS 算法以最小均方差作为计算权系数的目标函数 $J(k)$ ，即

$$J(k)=E[e^2(k)] \quad (10)$$

采用最陡下降法^[11]更新权系数。设 LMS 算法的收敛速度由收敛因子控制，则

$$w(k+1)=w(k)-2\mu e(k)r(k) \quad (11)$$

其中， $r(k)=x(k)*c(k)$ 。

4 仿真分析

将智轨电车司机室采集的噪声数据导出作为语音文件，然后导入到 Matlab/Simulink 平台中，建立智轨电车司机室的主动降噪仿真模型（图 6）。由于智轨电车司机室内净空较大，噪声源较多且有明显的时变特性，声场特性十分复杂，给主动降噪系统各组件的布置带来很大的挑战。在实际布置过程中，次级扬声器应当布置在司机室附近以消除复杂的噪声环境的影响；误差传感器则应尽量靠近次级扬声器布置。为了更加准确获取噪声数据，参考传感器一般靠近噪声源布置，因此该传感器适宜布置在噪声能量贡献最大的牵引电机周围。

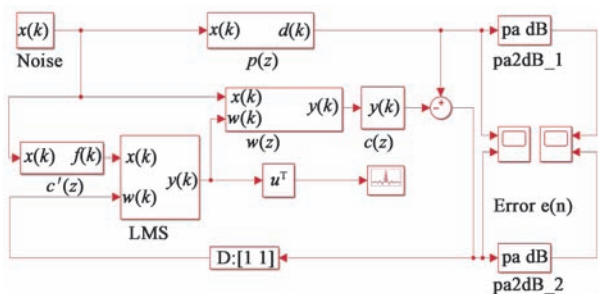


图 6 司机室主动降噪仿真模型

Fig. 6 Simulation model of active noise reduction for cab

在该模型中，初级和次级通道的传递函数与智轨电车的结构以及功率放大器和扬声器的结构相关，一般可以通过实验或者建模分析获得。由于传递函数不影响验证算法的正确性，因此这里可以设定两个传递函数来对司机室主动降噪进行模拟。

$$\left. \begin{aligned} p(z) &= 0.02 + 0.01z^{-1} - 0.3z^{-2} + 0.5z^{-3} \\ c(z) &= 0.01 + 0.05z^{-1} - 0.1z^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

取收敛因子 $\mu=0.5$ ；滤波器长度 $L=128$ 个采样步长；仿真时间 $t=48$ s，其和采集的数据时长一致；步长取 10^{-6} s。将司机座椅旁采集到的噪声数据导入仿真模型，并进行运行仿真，得到降噪前后声压值和声压级波形如图 7 和图 8 所示。可以看到，主动降噪后，声压值较降噪前有大程度的下降；声压级的下降幅度大约在 20 dB 左右，说明该算法对智轨电车噪声抑制效果明显。

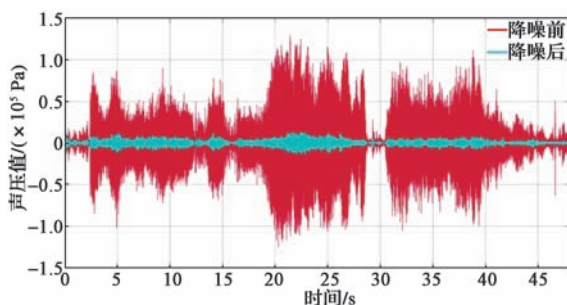


图 7 声压值仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of sound pressure value

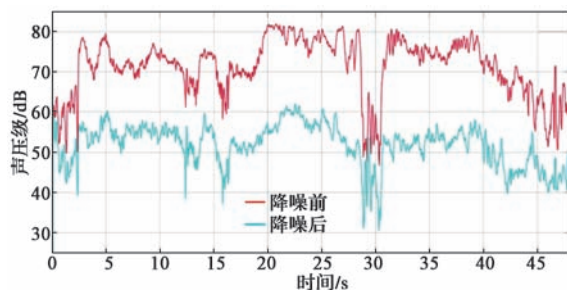


图 8 声压级仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of sound pressure level

图 9 示出降噪后司机室的噪声功率谱密度。

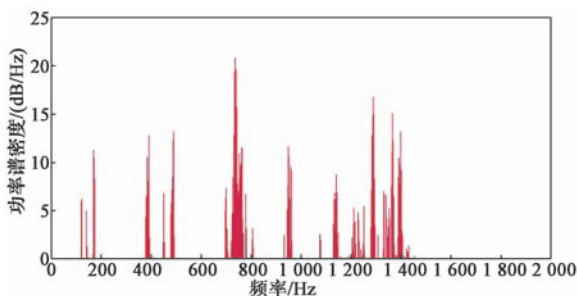


图 9 主动降噪后司机室噪声功率谱密度

Fig. 9 Noise power spectral density of cab after active noise reduction

对比图 3 和图 9 可知，采用上述降噪技术以后，各成分噪声均有削弱，但 200 Hz 以下的低频噪声降噪效果更明显。由于次级声场的作用，采取主动降噪

以后,司机室还有少量 700~800 Hz 左右的噪声引入,但其功率谱密度集中在 20 dB/Hz 以下,对声场能量贡献较低。

5 结语

为降低智轨电车司机室噪声,本文对其噪声特点进行研究,发现智轨电车司机室的噪声源中含有大量 200 Hz 以下的低频噪声成分,而传统的被动降噪技术很难将其彻底消除。为此,本文提出一种智轨电车司机室噪声抑制方法,其采用宽带前馈主动降噪技术以及 FxLMS 控制算法。仿真验证结果表明,采取该技术后,司机室噪声降幅约为 20 dB,声压级最大值在 60 dB 左右,进一步提升了智轨电车司机室的降噪效果。该技术占用空间小,适应性强,能够满足智轨电车司机室降噪要求。

后续将结合本文的研究内容在工程样机中开展具体实验验证工作,就传感器的数量、布置等方面做进一步的研究。

参考文献:

[1] 谭俊桦,肖习雨,张恒,等.智轨列车路口信号配时方法研究[J].计算机时代,2018(6): 23-25, 28.
TAN J H, XIAO X Y, ZHANG H, et al. Research on the signal timing method of ART intersection[J]. Computer Era, 2018(6): 23-25, 28.

[2] 蒋小晴,肖磊,吴雄韬,等.宜宾市智能轨道快运系统工程设计与应用[J].控制与信息技术,2020(1): 105-112.
JIANG X Q, XIAO L, WU X T, et al. Engineering Design and Application of the Autonomous-rail Rapid Transit in Yibin

City[J].Control and Information Technology, 2020(1): 105-112.

[3] 马玺越,陈克安,丁少虎,等.基于平面声源的三层有源隔声结构物理机制研究[J].声学学报,2013,38(5): 97-606.
MA X Y, CHEN K A, DING S H, et al.Physical mechanisms of active control of sound transmission through triple-layer structure using planar loudspeaker[J]. Acta Acustica, 2013, 38(5): 597-606.

[4] 邹海山,邱小军.复杂声学环境中人耳附近空间有源降噪研究综述[J].物理学报,2019,68(5):1-12.
ZOU H S,QIU X J.A review of research on active noise control near human ear in complex sound field[J]. Acta Physica Sinica,2019,68(5):1-12.

[5] 胥国文.车内多通道噪声主动控制技术研究[D].吉林:吉林大学,2018.

[6] 徐志坚.基于压电效应的汽车车内噪声主动控制研究[D].上海:上海工程技术大学,2017.

[7] 中华人民共和国建设部.城市轨道交通列车噪声限值和测量方法:GB 14892-2006[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2006.

[8] 刘斌.车内噪声主动控制系统设计与实验研究[D].长沙:湖南大学,2017.
LIU B. A Design and Experimental Research on Adaptive Active Noise Control for Vehicle[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[9] 黄博妍.管道宽窄带混合主动噪声控制系统的若干关键算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
HUANG B Y. Several key algorithms of active noise control system for broadband and narrowband hybrid noises in a duct[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[10] LI Y L,WANG X J, WANG L,et al. Non-probabilistic stability reliability measure for active vibration control system with interval parameters[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 387(20): 1-15.

[11] 陈智.基于 FxLMS 算法的前馈式自适应有源噪声控制系统建模与仿真[J].自动化与仪器仪表,2018(5): 10-13.
CHEN Z. Modeling and simulation of feed-forward adaptive active noise control system based on FxLMS[J]. Automation & Instrumentation, 2018(5): 10-13.



广告目录:

湖南中车时代通信信号有限公司（封二）；株洲时代新材料科技股份有限公司（后插 1）；中车时代电动汽车股份有限公司（后插 2，3）；南京菲尼克斯电气有限公司（后插 4）；安徽省康利亚股份有限公司（封三）；株洲中车时代电气股份有限公司（封四）