

◇ 研究报告 ◇

# 地铁车辆司机室内藏门漏声特性试验研究

王先锋<sup>1,2†</sup> 蒋忠城<sup>1,2</sup> 刘晓波<sup>1,2</sup> 叶彪<sup>1,2</sup>

(1 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室 株洲 412001)

(2 中车株洲电力机车有限公司 株洲 412001)

**摘要** 为了进一步提高内藏门的密封性能,该文试验研究了地铁司机室内藏门密封性对司机室内噪声的影响。试验研究表明:在隧道直线段运行条件下,司机座椅声压级满足标准要求,在曲线段因啸叫声而超出标准限值;内藏门漏声主要来源于轮轨噪声;对司机室内藏门门框增加密封结构,可使隧道直线段在运行工况下司机座椅处噪声降低 0.9 dB。最后,针对司机室内藏门门页后挡上门角漏声特征,提出了进一步的降噪措施。

**关键词** 地铁车辆,内藏门,漏声,试验研究

中图法分类号: U260.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)03-0352-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.03.009

## Experimental study on leakage characteristics for cab sliding door of the metro vehicle

WANG Xianfeng<sup>1,2</sup> JIANG Zhongcheng<sup>1,2</sup> LIU Xiaobo<sup>1,2</sup> YE Biao<sup>1,2</sup>

(1 *The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001, China*)

(2 *CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China*)

**Abstract** In order to further improve the sealing performance of the cab sliding door, this paper experimentally studied the sealing performance of the cab sliding door of the metro vehicle on the sound pressure level inside the cab. Experimental results show that the sound pressure level of the driver's seat is less than the standard value in straight line under tunnel condition, and the results exceed the standard value in the curved lines due to the howling. It is shown that the main noise source of the cab leakage is from the rolling noise. The sound pressure level at the driver's seat is reduced by 0.9 dB through extending the sealing strip on the top of the front door frame in the straight lines under tunnel condition. Finally, the noise control solutions are proposed to further improve the sealing performance of the sliding door on the top corner of the back door frame.

**Key words** Metro vehicle, Sliding door, Leakage, Experimental study

2019-01-15 收稿; 2019-03-08 定稿

作者简介: 王先锋 (1979-), 男, 湖南益阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 轨道车辆噪声控制。

† 通讯作者 E-mail: xfwang0812@qq.com

## 0 引言

地铁车辆司机室的噪声大小直接关系到司机驾驶的舒适度,其噪声指标要求高于客室。根据标准 GB14892-2006《城市轨道交通列车噪声限值和测量方法》,要求地铁车辆司机室地上噪声限值为 75 dB(A),地下噪声限值为 80 dB(A),地下客室噪声限值为 83 dB(A)。

地铁车辆司机室的噪声来源主要有司机室内的空调噪声和车外传递进来的轮轨噪声和牵引噪声,其中车外噪声为司机室内主要的噪声来源。因此,为保障司机驾驶环境的舒适性,提高司机室的隔声性能至关重要<sup>[1-2]</sup>。

司机室的隔声部件包括司机室地板、侧墙、顶盖、前挡风玻璃、侧门、隔墙等,其中侧门为隔声部件中最薄弱的部分,隔声量较小。另外,由于车门的设计结构、密封和安装工艺以及车辆运行时振动与冲击的影响,使车门与车体之间存在缝隙,从而引起车门漏声<sup>[3]</sup>。

司机室车门按照装车形式不同分为内藏门、塞拉门和外挂门等类型,其中塞拉门的密封性能较好,内藏门和外挂门次之<sup>[4]</sup>。本文以某地铁车辆司机室的内藏门为研究对象进行隧道内的漏声特性试验研究。

## 1 司机室内藏门的密封性分析及改进措施

目前国内地铁车辆的司机室侧门主要采用内藏门结构,司机室内藏门处于司机室电气柜与车体侧墙之间的夹层内,采用直线运动形式,具有操作灵活、重量轻、安装调试简单、占用司机室空间较少等特点。

司机室内藏门典型结构见图 1<sup>[5]</sup>,上部为承载导轨,提供门页的直线运动,并承载门页的重量;下部门槛提供不受力的导向,同时具有防水功能;中间设有可操作的门锁结构;门页中部设有带安全玻璃的门窗<sup>[5]</sup>。

司机室内藏门门页四周与车体门框和内装之间的密封方式如图 2 所示,其特点如下:(1)司机室内藏门门页与门框上部的水平方向毛刷形成密封;(2)内门槛与门页底部的水平方向毛刷形成密封;(3)门页的后挡胶条与车体侧墙型材形成密封,门页

内侧与电器柜上安装的侧向毛刷形成密封;(4)门框前挡胶条与门页护指胶条在车门关闭时形成插接式密封结构。

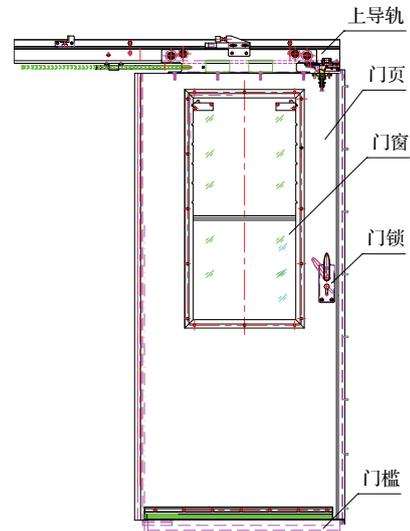


图1 司机室内藏门结构

Fig. 1 The cab sliding door structure

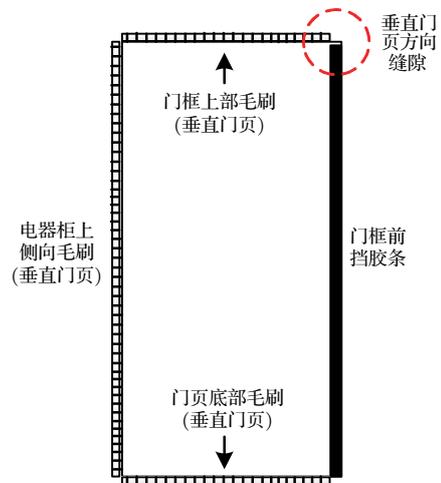


图2 司机室内藏门密封方式

Fig. 2 The sealing method of the cab sliding door

相比于塞拉门的胶条压紧结构,上述内藏门的毛刷密封结构主要用来防止灰尘进入车内,隔声效果较差,从而易形成漏声。内藏门的密封胶条具有一定的隔声效果,但在门页安装过程存在间隙过大或因为门页和门框的结构变形和车辆动态运行时振动影响使整长密封胶条部分出现扭曲或缝隙,从而使车门存在漏声。

经过对现有司机室内藏门密封性能检查,发现门框上部毛刷与门框前挡胶条在交汇之处因垂直

门页方向的位置结构偏移而存在 $10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的漏声缝隙,对车内司机室的噪声影响较大。另外,各垂直门页方向毛刷与接触面有 $1\sim 3\text{ mm}$ 间隙。为此,基于现场处置条件,提出了延长门框前挡胶条的措施,减小漏声缝隙,如图3所示。当车门关闭时,因门页高度高于门框上部毛刷,漏声缝隙的噪声需经过较长的空气传递路径进入车内,从而减少了漏声传递。

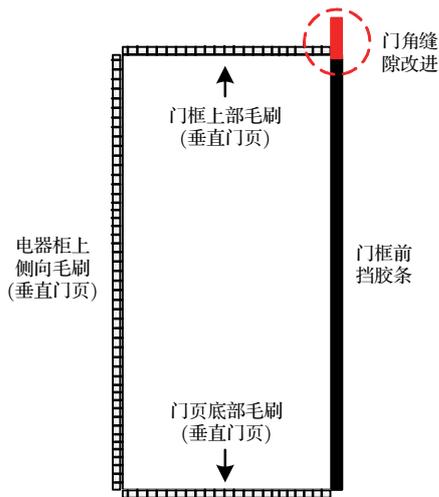


图3 司机室内藏门框前挡上门角密封改进

Fig. 3 The sealing improvement of the cab sliding door on the top corner of the front door frame

## 2 司机室内藏门漏声改进试验

司机室内藏门的漏声测试在地铁隧道运行条件下进行,对上述司机室内藏门密封改进前后状态进行司机室内部噪声的测量。运行线路包括直线段和曲线段,曲线段的曲率半径为 $650\text{ m}$ 。列车运行速度为 $75\text{ km/h}$ 。测量过程中,车辆处于AW0状态,车门处于关闭状态,列车辅助单元如空调装置等额定功率输出状态。

司机室车门漏声试验采集系统包括传声器和采集器,采集器为LMS公司SCM05多通道动态数据采集系统;传声器为PCB公司ICP型1/2英寸预极化传声器,频率响应范围为 $20\text{ Hz}\sim 15\text{ kHz}$ ,动态范围为 $120\text{ dB(A)}$ 。传声器与采集器接口相连,采集器用于噪声信号的采集,采集频率为 $10\text{ kHz}$ 。数据采集显示和分析系统采用LMS Test.lab软件。

因司机室内藏门门页四周与门框的毛刷和胶条密封存在漏声,尤其是门角漏声问题,为此,在门

页四周布置5个传声器测点,分别布置在门页上部左右门角、车门中部两侧和车门底部中间位置,各测点传声器正对门页且与其垂直,距离门页 $0.1\text{ m}$ ,5个测点传声器由测量架支撑。门页上部左右门角的传声器用来监测门角漏声情况,其中,测点2即为前挡上门角密封改进处。中部两侧的两个测点数据可以用来对比左右和上下的噪声强弱。底部测点用来监测底部毛刷漏声情况。 $0.1\text{ m}$ 的距离是为了减少司机室内混响声的影响。

另外,在司机座椅人耳旁 $0.1\text{ m}$ 处布置一个传声器,为第6个测点,该测点可以表征漏声改进前后司机室噪声大小,也是型式试验检测的测点,如图4所示。



图4 司机室内藏门和座椅的测点布置

Fig. 4 Measuring points arrangement of cab sliding door and seat

## 3 试验结果分析

### 3.1 隧道直线段内藏门漏声特性分析

采用上述司机室车门漏声试验测试系统在隧道直线段进行噪声数据采集和处理,获得各测点的A计权声压级。前挡上门角密封改进前后司机座椅测点6位置处噪声测试对比结果如图5所示,改进后司机座椅声压级降低了 $0.9\text{ dB}$ ,说明司机室内藏门的门角密封改进效果明显。改进前后司机室座椅位置处的噪声值均在标准GB14892-2006要求的限值内。

前挡上门角密封改进后的门周5个测点位置的测试结果如图6所示,分析可知:(1)测点1处噪声最大,比同一高度的测点2高 $1.9\text{ dB}$ ,比中间位置的测点3高 $2.7\text{ dB}$ ,说明门页后挡上门角漏声较大;(2)

测点2比测点4只高0.1 dB,相比于测点1比测点3高2.7 dB小得多,说明测点位置2处的前挡顶部密封效果明显;(3)测点5噪声次之,比测点3和4分别高1.8 dB和1.1 dB,说明门页底部的漏声比门页两侧大,另一个原因是底部测点更接近轮轨噪声源,但在隧道混响环境下,这种影响减弱。

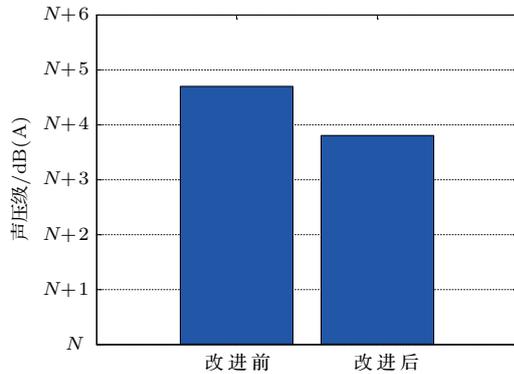


图5 隧道直线段司机室前挡上门角密封改进前后座椅测点声压级

Fig. 5 Sound pressure level of the driver's seat in the straight section of the tunnel

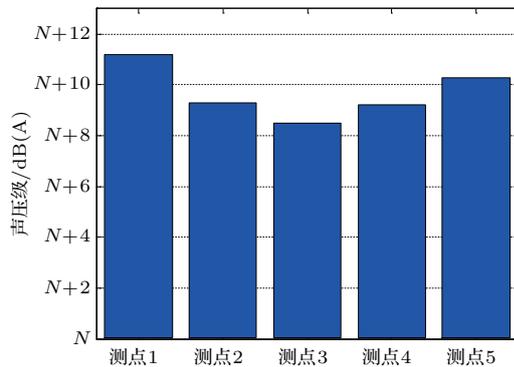


图6 隧道直线段司机室内藏门周5个测点声压级

Fig. 6 Sound pressure level of the cab measuring points in the straight section of the tunnel

### 3.2 隧道曲线段内藏门漏声特性分析

地铁车辆在隧道相同曲线段以75 km/h的速度重复运行,在司机室内藏门密封条件改进前后进行测试,前挡上门角密封改进前后司机座椅测点6位置处噪声测试对比结果如图7所示,改进后司机座椅声压级降低了0.7 dB,说明司机室内藏门的门角密封改进效果明显。隧道曲线段密封改进效果比直线段有所降低,说明在外部噪声变大时差值变小,这是由于曲线段振动引起的司机室内部二次结构噪声的提高而削弱了密封差异的空气传声影响。另外,密封改进前后,司机座椅位置处的噪声均超

出标准限值80 dB(A),分别比直线段高出5.2 dB、5.4 dB,这是由650 m半径的曲线啸叫声导致的。

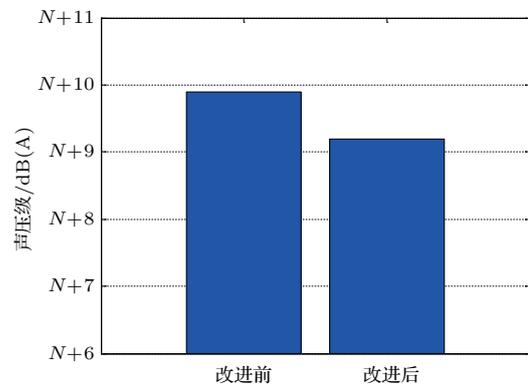


图7 隧道曲线段司机室前挡上门角密封改进前后座椅测点声压级

Fig. 7 Sound pressure level of the driver's seat in the curve section of the tunnel

同样,分析前挡上门角密封改进后的门周5个测点位置的测试结果如图8所示,可知:(1)测点1处噪声最大,比同一高度的测点2高2.4 dB,比中间位置的测点3高3.2 dB,说明门页后挡上门角漏声较大;(2)测点2噪声次之,比测点4高0.6 dB,相比于测点1比测点3高3.2 dB小得多,说明测点位置2处的前挡顶部密封效果明显;(3)测点5噪声与测点3和测点4噪声接近,相比于直线段测点5噪声大于测点3和测点4,可能是由于车外噪声增加后,测点1的漏声量更大,作为车内的一个噪声源往下部传递,从而使门页中部位置噪声超过底部位置噪声;另外,由于隧道曲线段列车振动引起司机室内二次结构声增大,从而削弱了车门漏声空气传声引起的测点间差值。

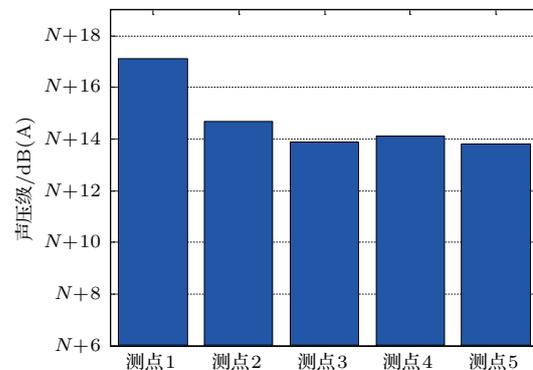


图8 隧道曲线段司机室内藏门周5个测点声压级

Fig. 8 Sound pressure level of the cab measuring points in the curve section of the tunnel

### 3.3 内藏门漏声特性频谱特征

在隧道直线段,在司机室前挡上门角密封改进后,测点1、测点5和测点6的频谱如图9所示。由图9可知,各测点的主频在315 Hz~2000 Hz之间,峰值在500 Hz~800 Hz,说明司机室内侧噪声为宽频噪声,且以轮轨噪声为主。测点1位置的最大噪声幅值频率在630 Hz,测点5的最大幅值频率在800 Hz,而轮轨噪声预测模型中钢轨噪声的峰值频率为800 Hz,说明轮轨噪声中以钢轨噪声为主<sup>[6]</sup>。

在隧道曲线段,在司机室前挡上门角密封改进后,测点1、测点5和测点6的频谱如图10所示。由图10可知,各测点的频谱峰值也在500 Hz~800 Hz

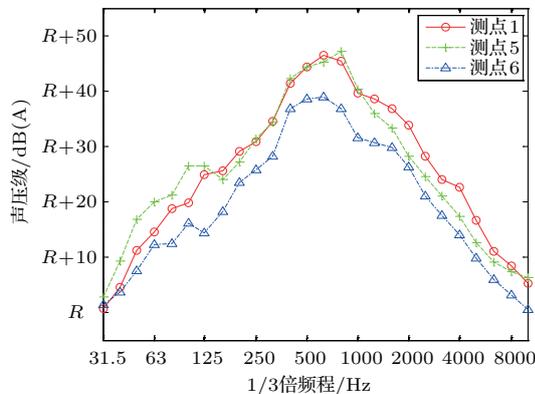


图9 隧道直线段司机室前挡上门角密封改进后的测点频谱

Fig. 9 Noise spectrum of measuring points under improved sealing condition in the straight section of the tunnel

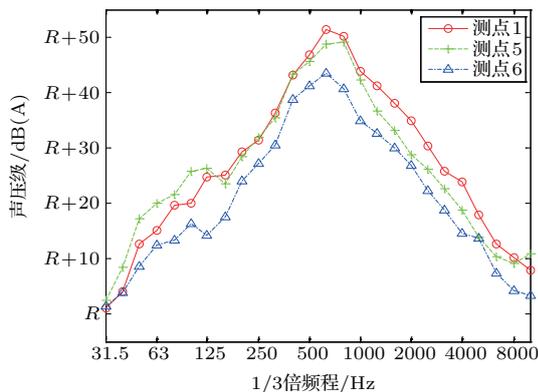


图10 隧道曲线段司机室前挡上门角密封改进后的测点频谱

Fig. 10 Noise spectrum of measuring points under improved sealing condition in the curve section of the tunnel

之间。对比图9和图10可知,曲线段各测点的频谱曲线在频谱峰值处更尖锐,说明曲线段的轮轨噪声对司机室噪声影响更大,更突出。

## 4 司机室内藏门密封研究性试验及结果分析

针对内藏门后挡上门角测点1漏声较大以及密封毛刷与接触面之间存有间隙等问题,为了研究内藏门密封进一步改进的潜在效果,在上述司机室前挡上门角密封改进的基础上,对司机室内藏门门页与门框接触的四条边在司机室内侧用纸胶带进行临时粘贴密封,并在隧道直线段和曲线段的相同测试条件下进行研究性试验,测试结果如图11所示。由图11可知,司机座椅测点6,隧道曲线段声压比直线段高5.9 dB,门周5个测点均值隧道曲线段比直线段高5.7 dB,这是由650 m半径的曲线啸叫声导致的。

对比内藏门有纸胶带密封与无纸胶带密封时的司机室各测点声压级可知:(1)隧道直线段,司机座椅测点6的声压级有纸胶带密封比没有低2.2 dB,在隧道曲线段,前者比后者低1.7 dB,说明门页四周有漏声,还有较大的改进空间,且隧道曲线段密封改进效果比直线段有所降低;(2)隧道直线段,有纸胶带密封的门周5个测点均值相对于后者有显著下降,为3.2 dB,隧道曲线段,前者比后者低2.3 dB,说明车门四周经纸胶带密封后,噪声下降显著。

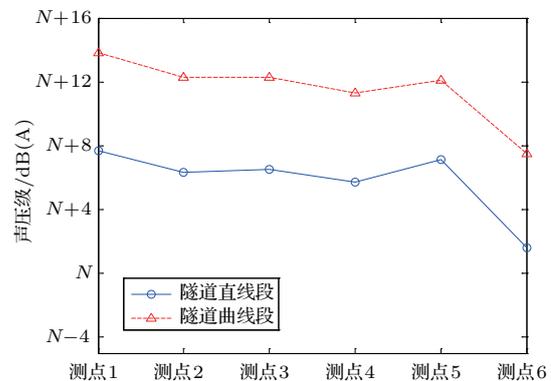


图11 纸胶带密封时司机室各测点声压级

Fig. 11 Sound pressure level of the cab measuring points under paper tape sealing condition in the tunnel

## 5 结论

通过实验研究获得以下声学结论: (1) 在隧道直线段运行条件下司机座椅声压级满足标准要求, 而在曲线段因啸叫声而超出标准限值; (2) 对司机室内藏门门框前挡顶部加长密封胶条可使隧道直线段在运行工况下司机座椅处噪声降低0.9 dB; (3) 在隧道各运行工况和内藏门各密封条件下, 门页四周5个测点中测点1声压级最高, 说明门页后挡上门角漏声较大; (4) 在隧道曲线段车外噪声增加的情况下, 车门密封条件变化引起的车内声压级差值变小, 这是由于曲线段振动引起的司机室内部二次结构噪声的提高而削弱了密封差异的空气传声影响; (5) 司机室车门漏声频谱特性曲线显示漏声来源主要为轮轨噪声; (6) 在隧道直线段运行工况下, 对司机室门页四周贴纸胶带密封后司机座椅的噪声降低2.2 dB, 说明司机室内藏门的漏声仍有改进空间。

针对门页后挡上门角漏声较大和密封毛刷与接触面之间存在缝隙等特征, 提出司机室内藏门结构改进措施如下: (1) 向车体型材方向延伸门页后挡胶条, 减少后挡胶条与车体型材之间的间隙, 并向左延长门框上部毛刷, 从而保证内藏门后挡上门角的密封, 降低测点1的声压级水平; (2) 采用调整密封毛刷水平安装位置的措施, 减少密封毛刷与密封面的间隙(小于0.5 mm), 从而降低内藏门整体漏声量, 包括向门页侧调整门框上部水平方向密封毛刷

和电气柜上的垂直方向密封毛刷, 以及向内门框侧调整门页底部的水平方向密封毛刷。

## 参 考 文 献

- [1] 乐恺, 安军社, 钟延炯. 机车驾驶室中自适应有源降噪系统的研究[J]. 应用声学, 2003, 22(3): 33-38.  
Yue Kai, An Junshe, Zhong Yanjiong. Adaptive active noise control in driver's cab[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(3): 33-38.
- [2] 段传波, 张辉, 朱妍妍, 等. 中低速磁悬浮交通噪声研究[J]. 应用声学, 2010, 29(3): 184-188.  
Duan Chuanbo, Zhang Hui, Zhu Yanyan, et al. Noises of middle-low-speed maglev vehicles[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(3): 184-188.
- [3] 刘晓波, 刘剑. 重载电力机车司机室声振特性分析[J]. 机车电传动, 2013(1): 39-42.  
Liu Xiaobo, Liu Jian. Acoustic-vibration characteristics of heavy electric locomotive cab[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(1): 39-42.
- [4] 叶彪, 程雄, 陈晓, 等. 地铁车门隔声性能试验研究与分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(3): 46-49.  
Ye Biao, Cheng Xiong, Chen Xiao, et al. Experimental study and analysis of sound insulation performance for metro vehicles' door[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2013, 36(3): 46-49.
- [5] 肖勇, 成志刚. 地铁车辆司机室内藏门优化设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2014, 37(4): 47-49.  
Xiao Yong, Cheng Zhigang. Optimal design of cab side sliding door system for metro vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2014, 37(4): 47-49.
- [6] David Thompson. 铁路噪声与振动——机理、模型和控制方法[M]. 中国铁道科学研究院节能环保劳卫研究所, 译. 北京: 科学出版社, 2013.