

地铁车辆轮轨粗糙度对客室噪声的影响分析*

刘长青

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130011, 长春//教授级高级工程师)

摘要 以某地铁车辆为例,针对客室噪声偏大问题,进行现场测试分析,确定客室异常噪声特性与转向架区域声振传递规律;同时对比车轮镟修前后及钢轨打磨前后的客室噪声特性,分析轮轨粗糙度对客室噪声的影响。研究表明,地铁线路钢轨表面30~50 mm波磨是客室噪声异常的主要来源;钢轨粗糙度增大会明显加剧轮轨噪声的辐射,进而增大客室噪声。

关键词 地铁车辆;客室噪声;轮轨粗糙度;钢轨波磨

中图分类号 U270.1*6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.04.002

Impact Analysis of Metro Wheel-Rail Roughness on Vehicle Interior Noise

LIU Changqing

Abstract Taking a metro vehicle as an example, the problem of large interior noise is tested in the site. The characteristics of abnormal interior noise, the law of sound and vibration transmission in bogie area are detected. At the same time, the interior noise characteristics before and after the wheel upsetting and rail polishing are compared, the influence of wheel-rail roughness on interior noise is analyzed. The results show that the main source of abnormal interior noise is the 30~50mm corrugation of rail surface, and the increasing of rail roughness will significantly increase the radiation of wheel-rail noise, and further affect interior noise.

Key words metro vehicle; vehicle interior noise; wheel-rail roughness; corrugation of rail surface

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130011, Changchun, China

随着高速铁路运营速度的不断提高,铁路噪声问题也变得日益突出。另外,乘客对旅行舒适性也有了越来越高的要求。客室噪声直接影响乘客和列车工作人员的乘坐舒适性,长期下去将会对他们的身心健康造成巨大伤害^[1]。

文献[2]基于线路试验采用VA One软件建立了客室噪声预测模型,研究了低地板列车客室噪声传递特性,结果表明列车主要声源为轮轨噪声;文献[3]通过现场调查高速列车车轮多边形对客室噪声的影响,认为车轮高阶多边形是导致高速列车客室噪声异常的主要原因;文献[4]通过对国内某地铁线路的调查试验与仿真计算,得出线路钢轨不平顺导致了客室噪声异常。

本文以某地铁车辆为例,针对客室噪声偏大问题,首先完成客室与转向架区域的振动噪声测试,分析客室异常噪声特性与转向架区域声振传递规律,然后对比车轮镟修前后及钢轨打磨前后的客室噪声特性,分析轮轨粗糙度对客室噪声的影响。

1 噪声产生机理

在列车运行速度低于35 km/h状况下,车辆运行总辐射噪声主要由牵引噪声、辅助设备噪声及轮轨噪声这3部分组成,其中牵引噪声与辅助设备噪声起主导作用。随着列车运行速度的逐步提高,轮轨噪声和牵引噪声的比重逐渐增大,且轮轨噪声的增大较快,而辅助设备噪声几乎没有增大。在列车运行速度达到35~250 km/h时,轮轨噪声是总辐射噪声的主导成分,且随着车速的提高,轮轨噪声的变化呈三次幂增长^[5]。对于城市轨道交通列车,其运行速度一般处于40~120 km/h范围内,因此,轮轨噪声是列车总辐射噪声的主要来源。

2 客室噪声测试

客室噪声测试采用线上运行测试,半自动驾驶模式,车速为80 km/h,车辆为AW0(空载)状态。依据GB/T 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值 and 测量方法》和ISO 3381标准进行测试并评价,测

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200503)

量仪器包括1个12通道实时频谱分析仪,4个自由场传声器与预放大器,3个单向加速度计。

2.1 客室噪声评价限值

根据GB/T 14892标准,我国地铁车辆客室噪声A计权等效连续声压级应满足表1所示的限值。

表1 我国地铁车辆客室噪声限值

运行线	位置	噪声限值/dB(A)
地下	司机室	80
地下	客室内	83
地上	司机室	75
地上	客室内	75

2.2 振动与噪声测点布置

本次试验根据ISO 3381标准中测试要求,分别在司机室、转向架一位端、客室中心、转向架二位端正上方的距地板1.2 m高位置及转向架区域布置传声器。测点布置如图1和图2所示。

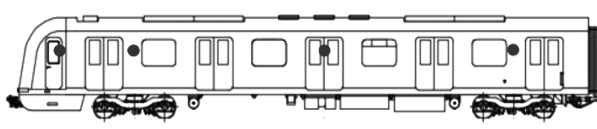


图1 地铁车辆客室噪声测点布置示意图



图2 转向架区域振动测点布置场景

考虑客室噪声主要源于轮轨辐射噪声,为进一步分析轮轨噪声对客室噪声的影响,本次试验在转向架轴箱、构架与车体垂向方向分别布置加速度传感器^[6]。加速度传感器采用某测试技术有限公司生产的4354-B型压电式单向加速度传感器。

2.3 轮轨粗糙度测试

通过测试钢轨打磨前后的粗糙度,对比钢轨打磨前后的轮轨噪声与客室噪声特性,可分析出钢轨粗糙度(钢轨的不平顺性)对客室噪声的影响。

3 客室噪声分析

3.1 客室噪声特性

为研究轮轨粗糙度对客室噪声的影响,首先需

对客室噪声特性进行分析,确定客室噪声与轮轨振动噪声的对应关系。本文选取某城市某线路噪声异常的区间,现场完成了客室噪声的测试。图3给出了该噪声异常区间客室噪声A计权声压级的时间历程曲线,其中图中标志①和②处峰值已超出标准限值83 dB(A)的要求。

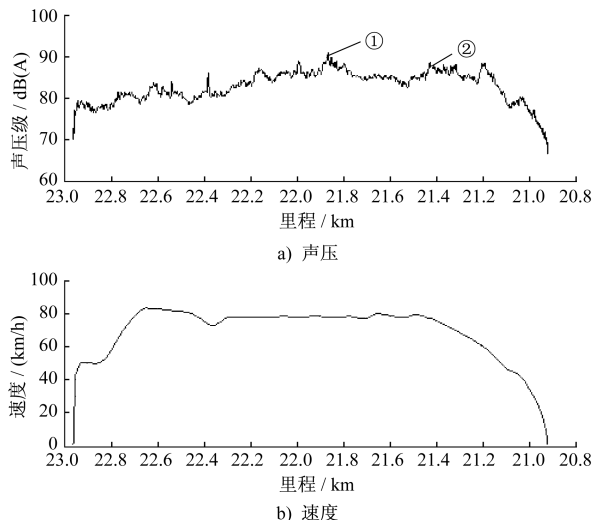


图3 客室噪声A计权声压级的时间历程曲线

针对图3中的噪声异常区段和噪声正常区段,分别给出了异常区段与正常区段噪声出的1/3倍频程频谱对比结果(见图4)。由图4可以看出:

1) 相比噪声正常区段频谱,噪声异常区段400~500 Hz和800 Hz是最为显著的频段,在此区间频段均出现明显峰值,是对噪声总值贡献最大的频段。

2) 现场车速为60~79 km/h时,显著频段400~500 Hz对应轮轨粗糙度波长范围为30~50 mm,而800 Hz对应的可能是预打磨残留的波长约20 mm左右的刀痕。由此初步判断噪声异常与钢轨和车轮表面状态有关,噪声异常与轮轨的粗糙度有关。

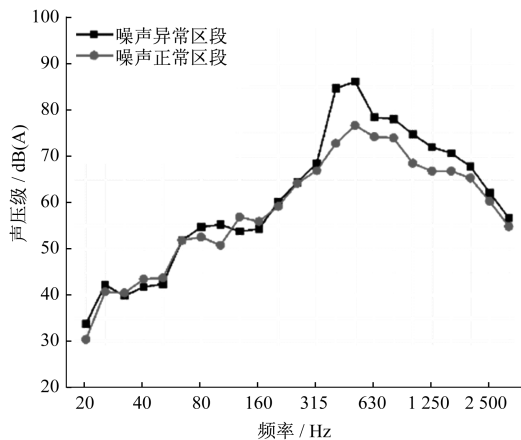


图4 异常区段与正常区段噪声1/3倍频程图

3.2 转向架区域和客室声振传递规律

图5给出了车辆噪声异常区段转向架区域轴箱、构架与车体的振动窄带频谱图,以及轮轨噪声与客室噪声的噪声窄带频谱图。分析转向架区域振动与噪声频谱的峰值对应关系,可以看出:

1) 轮轨噪声与客室噪声频谱均在频率440 Hz附近存在显著峰值,转向架区域振动频谱也在440 Hz附近出现明显峰值,与噪声频谱规律一一对应。

2) 客室噪声440 Hz显著频率主要由轮轨相互作用产生的振动和声辐射引起,且通过空气路径和结构路径向客室传递,因此可以确定客室异常噪声的根源在于轮轨关系。

3) 车轮和钢轨粗糙度作为激励输入,对轮轨振动噪声影响较大,为此需要对车轮粗糙度和钢轨粗糙度进行测试。

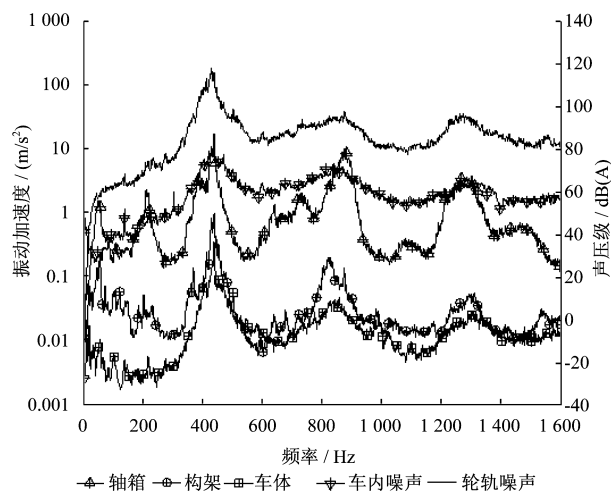


图5 客室噪声异常区段振动与噪声幅频特性曲线

4 轮轨粗糙度对客室噪声的影响

基于控制变量法,在轨道未打磨前,对比车轮镟修前、后的客室噪声特性。采用镟修后的地铁车辆,在保持车辆车轮粗糙相同的前提下,测试对比钢轨打磨前、后的客室噪声特性。

4.1 车轮粗糙度对客室噪声的影响

由上述分析可知,轮轨粗糙度是客室异常噪声的根本原因,因此需对车轮粗糙度测试结果进行对比分析。图6给出了车轮镟修前后的粗糙度均值对比图。由图6可知,1阶、3阶及6阶偏心对应的粗糙度值略高,结合车轮半径(0.365 m)可计算出对应的车轮粗糙度为0.3 m以上。

在保持钢轨未打磨的情况下,现场测试对比车

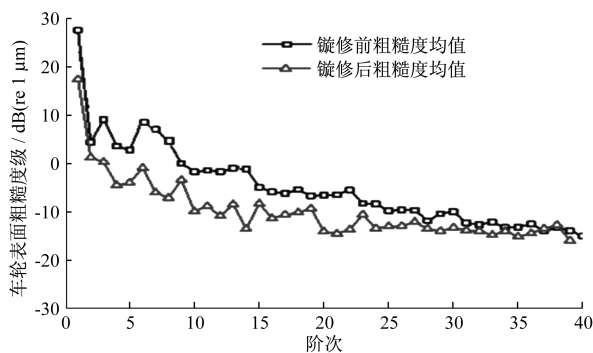


图6 车轮镟修前后的粗糙度均值对比

轮镟修前后车辆客室噪声特性,分析车轮粗糙度的变化对客室噪声的影响。图7为车轮镟修前后客室噪声1/3倍频程对比图。由图7分析可以得出:

1) 在钢轨表面粗糙度保持不变的前提下,车轮镟修前后的客室噪声没有明显降低,频段400~500 Hz处峰值并未减小。

2) 客室噪声显著频段400~500 Hz对应的轮轨粗糙度波长范围为30~50 mm,车轮的粗糙度大于0.3 m,二者并未产生对应,故客室噪声异常与车轮粗糙度没有直接关系。

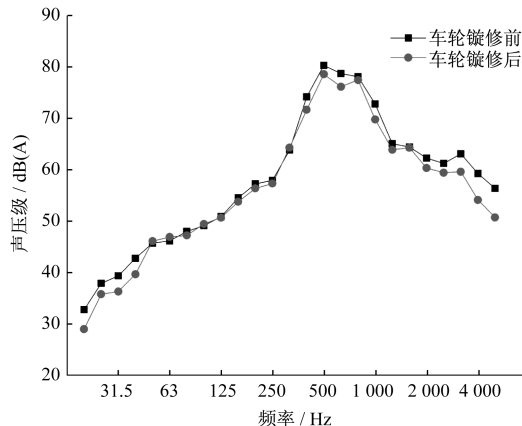


图7 车轮镟修前后客室噪声三分之一倍频程图

4.2 轨道粗糙度对客室噪声的影响

为进一步分析钢轨粗糙度对客室噪声的影响,需对异常噪声区段钢轨的粗糙度进行测量。由图8所示的异常噪声区段钢轨表面不平顺1/3倍频程图可看出:

1) 该异常噪声区段的钢轨粗糙度均已超出ISO 3095标准中规定的粗糙度限值;

2) 异常噪声区段钢轨表面不平顺1/3倍频程图在30~50 mm区间出现峰值,与前述客室噪声频谱特性分析相互对应,即钢轨表面存在30~50 mm的波浪形磨耗。

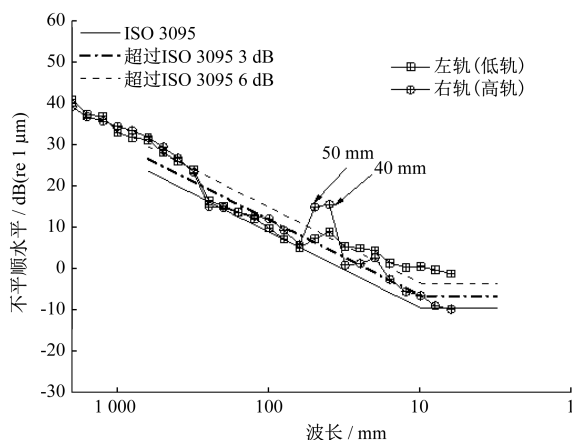


图8 异常噪声区段钢轨表面不平顺倍频程图

从图9的现场典型波磨照片可以看出,钢轨表面均出现了明暗交替的周期性椭圆形貌,现场测试其对应的波长为50 mm与45 mm。可以看出,轮轨长期相互作用下,在钢轨表面留下了周期性波浪形磨耗,加剧了轮轨噪声辐射,从而使客室噪声出现超标现象。

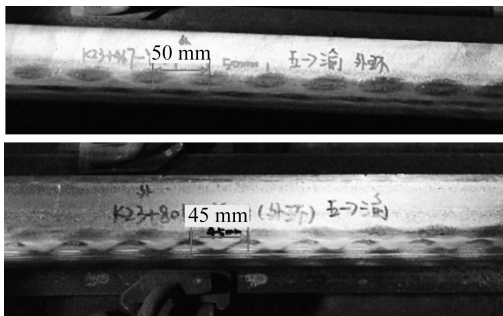


图9 钢轨表面波浪形磨耗形貌

在保持车辆车轮粗糙度相同的前提下,测试对比钢轨打磨前、后的客室噪声特性,以此来分析钢轨表面粗糙度对客室噪声的影响。图10给出了钢轨打磨前后的客室噪声1/3倍频程对比图。由图10可以看出:

1) 在车轮粗糙度相同的前提下,通过对异常噪声的钢轨区段进行打磨,可使客室噪声明显降低,频段400~500 Hz处峰值减小。

2) 客室噪声显著频段400~500 Hz对应的轮轨粗糙度波长范围为30~50 mm,与钢轨表面的粗糙度结果一一对应,说明客室异常噪声与钢轨粗糙度有直接关系。

5 客室噪声控制措施

钢轨的粗糙度大小与轮轨噪声辐射噪声值之

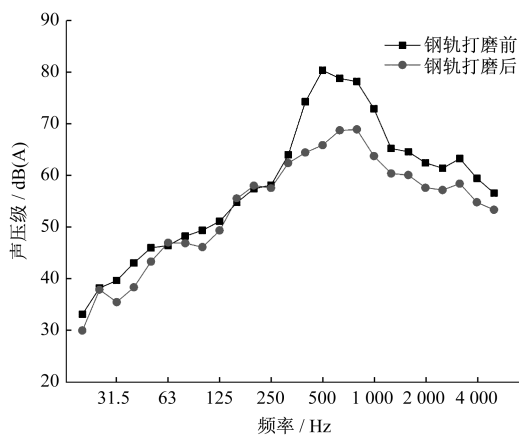


图10 钢轨打磨前后的客室噪声倍频程对比图

间有直接关系。钢轨粗糙度增大,会明显加剧轮轨噪声的辐射,进而影响客室噪声,其中钢轨30~50 mm波长波磨是客室噪声异常的主要原因。目前为止,钢轨打磨是控制钢轨粗糙度的主要措施。但由于国内地铁运行频繁,若按照ISO 3095标准进行打磨钢轨无疑会大幅提高运营成本,同时频繁地打磨钢轨会降低钢轨寿命,因此,需要定期测量钢轨的粗糙度,在波磨产生前对钢轨进行预防性打磨。同时,制定一套合理的钢轨打磨限值方案,也可有效控制钢轨表面粗糙度。

6 结论

1) 客室噪声440 Hz显著频率主要由轮轨相互作用产生的振动和声辐射引起,且通过空气路径和结构路径向客室传递,因此可以确定客室异常噪声的根源在于轮轨关系。

2) 客室噪声显著频段400~500 Hz对应轮轨粗糙度波长范围为30~50 mm,车轮的粗糙度大于0.3 m,钢轨表面存在30~50 mm的波浪形磨耗,故客室噪声异常与车轮粗糙度没有直接关系,而与钢轨粗糙度有着紧密关系。

3) 钢轨的粗糙度大小与轮轨噪声辐射噪声值之间有直接关系。钢轨粗糙度增大,会明显加剧轮轨噪声的辐射,进而影响客室噪声,钢轨30~50 mm波长波磨是客室噪声异常的主要原因。

4) 需要定期测量钢轨的粗糙度,在波磨产生前对钢轨进行预防性打磨。同时,需要制定一套合理的钢轨打磨限值方案,以便有效控制钢轨表面粗糙度。

(下转第46页)

2.2.3 结果分析

如图 13—图 15 所示,气流从散流器进入客室后迅速扩散。站立人员头部区域气流风速达到 0.42 m/s ,脚部风速在 $0.2\sim 0.3\text{ m/s}$ 之间,温度在 $23\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,垂直温差为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足地铁标准要求^[7]。

在散流器下方区域,侧送气流与中顶气流存在部分交汇,并在座椅上方区域形成漩涡,气流风速约为 0.1 m/s 。因此,在系统方案设计时,需充分考虑侧顶送风量的比例,避免出风气流过大,使站立此区域人员产生吹风感。

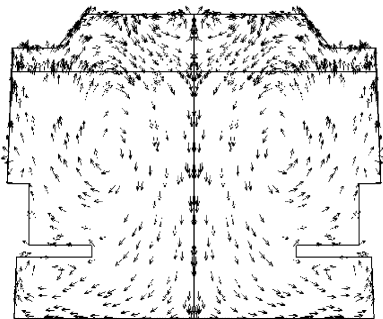
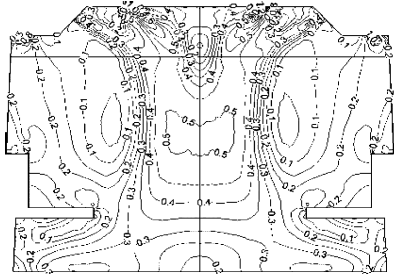
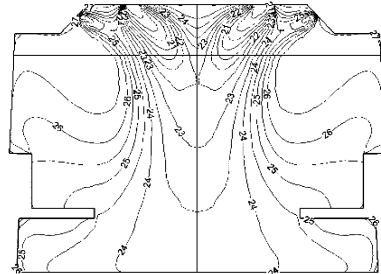


图 13 客室断面气流示意图



(单位: m/s)

图 14 客室断面气流分布图



(单位: $^{\circ}\text{C}$)

图 15 客室断面温度场分布图

3 结论

1) 与传统方式相比,地铁车辆采用多方位送回风系统既可以提高座椅区域与门区乘客的舒适性,又降低了客室中部送风量,缓解了中部乘客的吹风感,满足了地铁车辆热舒适性要求。

2) 通过数值模拟计算,送风道各出风口预测风量与理论风量偏差在 15% 之内。客室人员活动区域微风速在 $0.20\sim 0.42\text{ m/s}$ 之间,断面垂直温差在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,速度场与温度场分布均匀,满足地铁标准要求,从而验证了多方位送回风系统在地铁车辆中运用的可行性。

3) 采用多方位送回风系统设计时,需考虑中顶散流器与侧顶送风量的分配比例。此外,由于客室侧顶板与车顶之间安装设备多,风道结构设计时需控制支风道尺寸,确保足够的安装空间。

参考文献

- [1] ASHRAE. Ventilation for acceptable indoor air quality: ASHRAE Standard 62.1—2010[S]. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [2] 连之伟,刘蔚巍. 空调房间气流组织与人体热舒适[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(5): 22.
- [3] 龙静,王书傲. 地铁车辆空调系统送风风道分析[J]. 地铁车辆, 2004(7): 15.
- [4] 刘松,程勇,刘东,等. 人体吹风感影响因素的总结与分析[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(2): 7.
- [5] ASHRAE. Thermal environment condition for human occupancy: ASHRAE Standard 55—2010[S]. Atlanta: ASHRAE, 2011.
- [6] 钱珊珊,安恩科. 上海地铁 A 型车车厢体空调气流组织的模拟研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(124): 28.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通车辆空调、采暖及通风装置技术条件: CJ/T 354—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

(收稿日期: 2019-08-17)

(上接第 8 页)

参考文献

- [1] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [2] 张捷,肖新标,张玉梅,等. 100% 低地板列车车内噪声传递特性分析[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 541.
- [3] 韩光旭,张捷,肖新标,等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50

(22): 113.

- [4] 刘晓龙. 地铁司机室内噪声异响原因探析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [5] 徐志胜,翟婉明. 轨道交通轮轨噪声机理分析[J]. 噪声与振动控制, 2006, 2(1): 52.
- [6] 樊康,华春蓉,闫兵,等. 某航空发动机扭振减振器失效机理分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(02): 318.

(收稿日期: 2019-10-20)