DOI: 10.3901/JME.2020.08.207

隧道内高速列车车内噪声特性及声源识别试验分析*

柳 明¹ 张 捷¹ 高 阳² 蒋文杰¹ 肖新标¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062)

摘要: 与明线运行相比,隧道内的高速列车车内噪声将明显增加。通过线路试验,对我国某型高速列车以 160~350 km/h 速度在明线和隧道运行时的车内振动噪声进行测试分析。掌握两种线路下的车内振动和噪声、车身表面气动噪声、转向架区域振动和噪声特性及其随速度的变化规律;采用 50 通道球形声阵列,识别两种线路下的车内主要噪声源,并分析噪声源的车内区域贡献率,进而在此基础上研究两种线路下的车内声振传递特性。结果表明,两种线路下车内噪声频谱差异主要体现在 315~2 000 Hz,各测点不同线路的声压级差值与运行速度相关性较小,车内噪声受轮轨噪声激励影响相对明显。对于客室中部,列车 350 km/h 匀速运行时,隧道段列车顶板和客室后方贡献率分别增加 4.0%和 3.0%,地板贡献率降低 8.6%,差异频段主要体现在 63~160 Hz。对于侧墙区域,明线段车内低频噪声主要来自侧墙的振动,而在隧道时,车内低频噪声则主要来自于侧墙车身表面的气动激励。客室内噪声总值和频谱分布的差异在隧道运行情况下会减小,现有更关注客室端部噪声控制的传统认识,在列车隧道运行下,需要同样重要地关注和对待客室中部区域。

关键词: 高速列车;车内噪声;隧道;明线;声源识别

中图分类号: U270

Experimental Analysis on Characteristics and Source Identification of Interior Noise of a High-speed Train Running in a Tunnel

LIU Ming¹ ZHANG Jie¹ GAO Yang² JIANG Wenjie¹ XIAO Xinbiao¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062)

Abstract: The interior noise level of high-speed trains running in a tunnel can be obviously increased compared with that running on the ground surface. The interior noise and vibration characteristics of a high-speed train under two different running cases (on the ground surface or in a tunnel) at speed of 160-350 km/h are analyzed according to the line test. The interior noise and vibration characteristics, the bogie area noise and vibration characteristics, the aerodynamic noise characteristics on vehicle body surface, and their variations with speed under those two running cases are obtained. By using the 50-channel spherical acoustic array, the main noise sources of the interior noise under those two running cases are identified, the contribution rate of the noise sources are analyzed, and on this basis, the interior noise and vibration transmission characteristics are studied. Results show that the difference of interior noise spectrum in the two running cases is mainly reflected in 315-2 000 Hz. The difference of sound pressure level for different lines is relatively independent to the operating speed. The interior noise is significantly affected by the wheel-rail noise excitation. For the middle area of the coach, when the train runs at 350 km/h, the contribution rates of the roof and the rear of the cabin are increased by 4.0% and 3.0%, respectively; the contribution rate of floor is decreased by 8.6%, and the main differences of the noise spectrum between them are located in 63-160 Hz. For the sidewall area, the low frequency noise source on the ground surface mainly comes from the vibration of the sidewall; but for the tunnel, it mainly comes from the aerodynamic excitation of the side wall surface. The variation of the total noise value and the spectrum distribution in the passenger room will be reduced under the tunnel operation. The existing concept of the noise control concern mainly at the end of

* 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0205200)、国家自然科学基金(U1834201)和国家重点研发计划(2016YFB1200506-08/2016YFB1200503-02)资助项目。20181003 收到初稿,20190620 收到修改稿

the passenger compartment, but as this study indicates, it is also crucial to pay attention to the central area of the passenger compartment under the tunnel operation.

Key words: high-speed train; interior noise; tunnel; ground surface; sound source recognition

0 前言

我国高速铁路线路型式多样,隧道是高速线路中的重要组成部分,并且高速列车在通过隧道时车内噪声问题尤为突出。表 1 给出了部分高速列车车内噪声规范^[1],由表 1 可知,列车以 240~300 km/h 速度运行时,由于隧道对车内噪声的影响,使得车内噪声限值比明线段放宽了 5~7 dBA。高速列车以不同速度在明线和隧道运行时车内噪声特性不同,不同的噪声特性需要采取不同的控制方法,所以研究两者噪声特性的差异对高速列车车体低噪声设计具有重要意义。

表 1 部分高速列车车内噪声规范

车辆	最高速度/(km/h)	噪声级/dBA	
		明线段	隧道段
KTX	300	66	73
TGV	300	66	71
新干线	240	69	74
ICE	250	65~68	70~73

国内外学者针对高速列车车内噪声问题进行了大量研究,张强^[2]建立了高速列车车内噪声仿真模型,在司机室和观光区内层地板处添加吸声材料,使其噪声分别降低了 2.7 dBA 和 3.9 dBA。范蓉平等^[3]将新型黏弹性阻尼材料应用于列车上,通过现场测试,阻尼材料对 100~160 Hz 的低频段噪声降噪效果显著。张骏等^[4]对速度 250 km/h 的高速列车客室端部噪声传递进行量化排序,地板和风挡区域的贡献率为 50%,侧墙和顶板为 38%。张捷等^[5]基于现场测试,对高速列车车内客室端部噪声分布特性进行分析,并结合车内、车下振动及车内空腔声学模态计算,车体系统的结构振动和车内声学空腔存在相互耦合关系。CHOI^[1]通过对韩国 KTX 列车在不同轨道类型下的隧道内运行时车内噪声进行测试分析,相同速度等级下隧道内板式轨道车内噪声增加量大于有碴轨道。潘勇^[6]基于现场测试数据,对高速列车在不同长度隧道内运行的车内噪声进行分析,隧道越长,同一测点的声压级水平也越高,且车内噪声空间分布梯度越小。

近些年,针对高速列车车内噪声的研究越来越多,但是有关隧道环境下车内噪声的研究相对较少,隧道对高速列车车内噪声的影响不仅和隧道长度及

隧道内轨道型式有关,同时还受到列车运行速度的影响,有关隧道内高速列车车内噪声和声源分布特性与明线之间的差异研究较少。本文基于现场测试数据,主要研究了我国高速列车在明线和隧道以 160~350 km/h 速度运行时的车内噪声及声源分布特性,并在此基础上研究了明线和隧道环境下的车内声振传递特性,分析了两种线路环境下的噪声特性差异。

1 车内振动噪声及声源识别试验

为了解隧道对高速列车车内噪声特性及区域贡献率的影响,针对国内某 8 编组列车进行相关试验。试验方法依据 GB/T 3449-2011^[7],并参考 ISO 3381-2011^[8]相关标准规定进行。

试验内容主要包括车内噪声、车内振动、车内声源识别和车身表面噪声四部分。图 1 为列车各试验部分测点布置示意图,“▲”表示车内振动测点,包括头车观光区和客室后的顶板、侧墙和地板,主要布置在其中间位置,测试各部件的法向振动。“●”表示车内噪声测点,布置在车体纵向中心线上距离地板面 1.2 m 处,传声器与车体呈弹性连接,传声器面朝上,其轴线与地面垂直。“■”表示车内声源识别测点,采用 50 通道球形声阵列对声源进行准确定位,车内噪声和声源识别包括头车司机室(N1)、观光区(N2)、客室中(N3)和客室后(N4)四个位置。“◆”表示车身表面噪声测点,布置在列车车身外表面,采用表面麦克风,包括司机室前挡风玻璃区域(N5)、观光区侧墙区域(N6)以及客室后侧墙区域(N7),主要测试列车车身表面噪声。采样频率上限设置为 12.8 kHz,保证每次数据有效测量 30 s 以上,分析频率设置为 50~5 000 Hz,明线和隧道区段均为无砟轨道。测试前,使用声校准器对每个声传感器进行声学校准。现场测试照片如图 2 所示。

图 1 各试验部分测点布置示意图

(a) 车内噪声与声源识别

(b) 车身表面噪声

图 2 现场测试照片

2 隧道对车内噪声特性的影响

2.1 声压级总值特性

根据高速列车车外噪声水平与列车速度对数之间的关系^[9-10], 当参考速度 v_0 及其对应的声压级 $L_P(v_0)$ 已知时, 线性回归方程可由式(1)给出

$$L_P(v) = a \lg(v/v_0) + L_P(v_0) \quad (1)$$

式中, a 为回归系数; L_P 为声压级; v 是列车速度, 高速列车车内各测点声压级与速度对数之间的线性回归关系也可由式(1)表示。

图 3 给出了高速列车分别在明线和隧道以 160~350 km/h 速度运行时头车车内各测点声压级与速度对数之间的对应关系, 坐标横轴表示速度的对数值, 参考速度 $v_0=160$ km/h。

由图 3 可见, 高速列车分别在明线和隧道运行时, 车内各测点声压级差值与运行速度的相关性较小, 不同速度等级下, 隧道区间头车司机室、观光区、客室中和客室后声压级分别比明线区间高 1.9~3.8 dBA、2.4~4.6 dBA、8.8~9.7 dBA 和 6.3~7.6 dBA。相对而言, 客室中后部声压级增量更为显著, 因为高速列车在明线段运行时, 主要声源是轮轨噪声和空气动力学噪声, 这两者主要位于客室两端, 所以客室中部声压级较两端偏低, 驶入隧道后, 车身处于混响环境下, 车身表面场点的声压级由直达

(a) 司机室

(b) 观光区

(c) 客室中

(d) 客室后

图 3 不同速度等级下车内声压级总值

声和反射声叠加而成,且隧道壁和车身表面的多重反射使得反射声占较大比重,导致车内噪声空间分布梯度较为均匀。相对而言,隧道对司机室和观光区影响较小,可能与车头一直处于隧道前沿,所受到的隧道混响声低于后部车厢有关。

观光区回归系数相比于车内其余测点较大,说明观光区对速度变化更为敏感,因为观光区不仅受到头车气动作用的影响,还位于转向架上方,受到转向架区域振动和噪声的作用,一般而言,列车第一个转向架区域的空气动力学噪声更为显著,且速度越高,空气动力学噪声对车内噪声贡献越大^[11]。为了解隧道环境对各测点回归系数的影响,表2给出了两种线路下车内各噪声测点的回归系数及两者差值。

表2 车内各噪声测点回归系数

	司机室	观光区	客室中	客室后
明线	28.89	39.65	30.21	26.10
隧道	31.30	38.23	30.16	28.98
差值	2.41	-1.42	-0.05	2.88

已有的文献研究结果表明^[12-13],轮轨噪声声压级随速度对数的增长斜率在25~35,气动噪声声压级在40~80 dBA。由表2可见,列车在两种线路下运行时回归系数 a 的值均保持在25~40,说明车内噪声受轮轨噪声激励影响相对明显。相比于明线段,列车在隧道段运行时头车车内各测点回归系数的变化量分别为2.41、-1.42、-0.05及2.88,两种线路条件下车内噪声和速度对数之间的回归系数差异不大,仅影响车内噪声0~0.98 dBA。

增强车体关键部件隔声性能是降低高速列车车内噪声的有效措施之一。通过分析不同速度等级下隧道内车内噪声显著频段,隧道对客室内声源分布、不同区域及各频段贡献率的影响,可以明确隧道内车体部件隔声的薄弱环节及噪声来源,进而制定相应的减振降噪方案。

2.2 1/3倍频程频谱特性

隧道环境对头车客室中后部的影响大于车内其他测点,图4给出了高速列车分别在明线和隧道以350 km/h匀速运行时,头车客室中和客室后测点的噪声A计权频谱特性,纵坐标左侧是声压级,右侧是高速列车在明线和隧道运行时的声压级差值。

由图4可见,高速列车车内噪声呈宽频带分布,隧道环境下车内各测点噪声值在全频段均高于明线,且两者峰值频率及显著频段保持不变。根据声压级叠加原理,定义低于频段最大声压级10 dB以内的频率区域为噪声显著区段,该频段噪声能量主

图4 客室中后部车内噪声频谱

导总声压级水平。高速列车在隧道段以350 km/h匀速运行时,车内各测点噪声显著频段为80~1 600 Hz的1/3倍频带。列车在明线段运行时,客室后比客室中声压级高2.5 dBA,而在隧道内,车内两测点总值和频谱基本一致,特别是250~5 000 Hz频段。因此,客室内噪声总值和频谱分布的差异在隧道运行情况下会减小,现有更关注客室端部噪声控制的传统认识,在列车隧道运行下,需要同样重要地关注和对待客室中部区域。由隧道环境引起的客室中和客室后声压级差值分别为9.6 dBA和7.3 dBA,其频谱差异主要体现在315~2 000 Hz。

3 隧道对车内声源分布特性的影响

3.1 球形声阵列声源识别理论基础

球形声阵列是基于平面波声源模型和波束形成方法处理信号,采用球谐函数声场分解和重构方法,快速实现声源可视化的一种声源识别方法^[14-15]。采用B&K的刚性球形声阵列系统,主要包括50个传声器通道和12个摄像头。球面上任意场点的声压可由 $p(k, r, \Omega)$ 表示, k 为波数, $(r, \Omega) \equiv (r, \theta, \varphi)$ 表示球面坐标的空间位置,其中 θ 为仰角, φ 为方位角, r 为半径,球面声压的傅里叶变换可由式(2)给出

$$p_{nm}(k, r) = \int_{\Omega \in S^2} p(k, r, \Omega) Y_n^m(\Omega) d\Omega \quad (2)$$

利用逆变换关系可得到球面任意声场的球谐函数

$$p(k, r, \Omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n p_{nm}(k, r) Y_n^m(\Omega) \quad (3)$$

$$\int_{\Omega \in S^2} d\Omega \equiv \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta d\varphi \text{ 中包括了由 } S^2 \text{ 表示的}$$

单位球面的整个表面积(S^2 是在一个半径不变的球

中定义的空间)。 $Y_n^m(\Omega)$ 为 m 阶 n 次的球谐函数。

$$Y_n^m(\Omega) \equiv \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} p_n^m(\cos\theta) \exp(im\phi) \quad (4)$$

式中, 此处 $i = \sqrt{-1}$, $p_n^m(\cos\theta)$ 是相关联的勒让德函数。

由单一平面波构成的声场对波束形成具有重要意义, 因为光束图案经常被测量为对单个平面波的阵列响应。因此, 当声场由一个幅值 $a(k)$ 及方位角 Ω_0 的单一平面波组成时, p_{nm} 可由式(5)表示

$$p_{nm}(k, r) = a(k) b_n(kr) Y_n^{m*}(\Omega_0) \quad (5)$$

式中, $b_n(kr)$ 取决于球体边界, 对于刚性球形声阵列和开口球形声阵列两种不同球形阵列, $b_n(kr)$ 可由式(6)表示

$$b_n(kr) = \begin{cases} 4\pi i^n \left(j_n(kr) - \frac{j_n'(kr_a)}{h_n'(kr_a)} h_n(kr) \right) & \text{刚性球} \\ 4\pi i^n j_n(kr) & \text{开口球} \end{cases} \quad (6)$$

式中, j_n 和 h_n 分别为 n 阶球贝塞尔函数和 n 阶球汉克尔函数; j_n' 和 h_n' 分别是其导数; r_a 是刚性球的半径。

测试时, 由刚性阵列球表面的传声器测得球表面的声强, 进而得到阵列表面声场, 广角摄像头拍摄被测车厢空间背景图。测试设备所配套的数据后处理软件中, 对所拍摄的车厢内部三维空间进行网格划分, 利用波束形成法, 对球形阵列采集到的声学信号进行处理, 计算得到各个网格点处的声强数值, 重现车厢内部三维空间中的声场云图。通过球形阵列表面摄像头拍摄到的影像, 采用缝补法将其组合形成完整的三维空间图片, 并使用统一的球形坐标将声学云图与现场环境准确地对应起来, 从而实现声源的可视化。

3.2 车内声源分布特性

为了解不同线路下车内噪声的声源特性差异, 图 5 给出了高速列车以 350 km/h 分别在明线和隧道匀速运行时, 列车客室中部声源识别结果, 声强云图动态范围为 3 dBA, 计算频率为 50~5 000 Hz, 覆盖了声源的主要频带。

(a) 明线

(b) 隧道

图 5 客室中部噪声 A 计权声源识别声强云图(dBA)

由图 5 可见, 高速列车在两种线路环境下运行时, 客室中部声源分布规律有所差异。明线时, 车内噪声源主要位于客室地板, 其次是列车顶板及客室前方区域, 但列车驶入隧道后, 显著声源的分布区域进一步扩大, 其中顶部区域的贡献量明显增加, 车内噪声源主要位于客室顶板, 其次是地板、客室前方及左右侧墙区域。

3.3 车内区域声源贡献率分析

声强云图只能定性地反映声源的分布情况, 无法对各区域的能量贡献做出具体量化。所以需要云图中的网格点进行区域划分, 并对各网格点处的声强数据做进一步计算, 得到各个网格点处的声功率值, 才能进一步计算各个区域的声能量贡献率, 图 6 给出了声源识别云图网格点示意图。

图 6 声源识别云图网格点示意图

由图 6 可见, 声源识别网格点的分布并不是平面云图所体现出的均匀分布, 而是沿角度均匀分布在一个球面上。经度和纬度方向每 10° 一个网格点, 其中经度有 36 层, 纬度有 19 层, 共计 684 个网格点。每个网格点对应的等效面积可由式(7)计算。

$$S_i = \int_{\theta_i-5^\circ}^{\theta_i+5^\circ} r^2 \sin\theta d\theta \int_{\varphi_i-5^\circ}^{\varphi_i+5^\circ} d\varphi \quad (7)$$

式中, r 为球面半径, 设置为 1.2 m; θ_i 和 φ_i 分别表示网格点的纬度角坐标和经度角坐标。

一般而言,车内噪声都是列车外部声源以不同传递方式通过不同板件传至车内,为了进一步获得列车不同区域的贡献率,可将其分为顶板、地板、左侧墙、右侧墙、前方和后方(以一车头运行方向为前)六个部分,区域划分如图7所示,各个区域声源贡献率公式可由式(8)给出

$$\alpha_{ith\ band,\ jth\ source} = \frac{W_{ith\ band,\ jth\ source}}{\sum_{bands} \sum_{source} W_{ith\ band,\ jth\ source}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $W_{ith\ band,\ jth\ source}$ 为 i 频带在 j 区域下的声功率, $\sum_{bands} \sum_{source} W_{ith\ band,\ jth\ source}$ 为所有区域在全频带下的声功率。

图7 客室中部声源识别区域划分

图8给出了高速列车分别在两种线路环境下以350 km/h速度运行时客室中各区域的贡献率,图中7个不同区域(其中客室后方被划分为两个区域)贡献率的百分比之和为100%;图9进一步给出了声源贡献最为明显的地板和顶板区域各频段的贡献率,图中50~5 000 Hz中的任意某个频率段,各区域贡献率的百分比之和为100%。

图8 客室中部声源区域贡献率

由图8可见,隧道对地板和顶板区域贡献率影响较大,其次是客室后方区域,明线贡献最明显的是地板区域,隧道贡献最明显的是顶板区域,此时

列车顶板和客室后方贡献率分别增加4.0%和3.0%,地板区域的贡献率相应降低8.6%。原因可能是列车客室中部声源主要来自车身表面气动噪声,列车驶入隧道后,隧道壁的反射使得车体表面反射声比重明显增加,而车体表面增加的声能量更容易从隔声较为薄弱的顶板及风挡区域传入车内,从而使得地板区域的贡献率降低,顶板及客室后方的贡献率相应增加。

图9 客室中部声源地板和顶板区域各频带贡献率

由9图可见,列车在明线上运行时,顶板区域的主要贡献率体现在250~3 150 Hz的中高频带,其贡献率基本达到25%以上,而地板区域则主要体现在63~160 Hz的低频带,其贡献率达到了30%以上,尤其在中心频率80 Hz处贡献率达到45%,成为地板区域的主要贡献频带。由此可知,在车内噪声比较显著的80~1 600 Hz频带内,其中80~160 Hz主要来自于地板,而250~1 600 Hz主要来自于顶板。隧道环境对各频带贡献率的影响也主要体现在63~160 Hz,列车350 km/h匀速运行时,此频带内地板、顶板及客室后方区域的贡献率分别变化-5.4%、6.0%和2.5%。

4 车内声振传递特性分析

高速列车车内噪声可由车外主要噪声源通过空气传声和结构传声两条路径传至车内,车体结构的隔声性能及密封性能主要影响空气传声的大小,而车体结构各部件的振动特性主要影响结构传声的大小。高速列车驶入隧道后,由于声波无法向外扩散,一方面,这些声波可以通过车体各种孔洞、缝隙及穿透车身壁板(包括地板、侧墙、顶板和端墙等)进

入车厢内部;另一方面,外部声源能量的增加,会增加车体地板、侧墙、顶板等部件的振动,并向车内辐射噪声。

(a) 噪声测点

图 10 给出了高速列车以 160~350 km/h 分别在两种线路环境下运行时部分噪声和振动测点的差值。

(b) 振动测点

图 10 隧道段和明线段噪声和振动测点差值

由图 10a 可见,高速列车分别在两种线路环境下运行时,各噪声测点声压级差值与运行速度没有明显的相关性。随着速度的增加,两者声源差值的变化不大。其中,在转向架区域及车头迎面区域噪声,隧道和明线的差值基本在 2 dBA 以内;车体表面(侧墙和顶部)区域噪声,隧道和明线的差值在 3~8 dBA。因此,隧道混响环境主要影响车体表面。由图 10b 可见,随着列车运行速度的增加,隧道环境对转向架及地板振动作用的变化量影响相对较小,但会增加侧墙和顶板的振动,速度越高,隧道环境影响越大。

对于隧道环境影响明显的侧墙和顶板区域,以侧墙区域为例,基于相关性分析进一步从频率分布特性上研究其声振传递特性。相关性分析是指对两

个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度,通过相关性分析,可以定性地掌握空气传声和结构传声对车内噪声的贡献,其公式如式(9)所示

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|G_{xy}(k)|^2}{G_{xx}(k) \cdot G_{yy}(k)} \quad (9)$$

式中, γ 为相关系数; $G_{xy}(k)$ 为两变量的互功率密度谱; $G_{xx}(k)$ 和 $G_{yy}(k)$ 分别为自功率密度谱,一般而言,相关系数为 0.5~1.0 为强相关,0.3~0.5 为中等相关,0.1~0.3 为弱相关,小于 0.1 为不相关。

图 11 给出了高速列车 350 km/h 匀速运行时观光区侧墙断面振动和车身表面噪声与车内观光区噪声测点的相关性分析结果。

(a) 侧墙断面振动

(b) 侧墙表面噪声

图 11 侧墙区域振动噪声相关性分析

由图 11 可见,当列车在明线运行时,车内噪声主要与侧墙振动存在相关性,而与侧墙表面噪声相关性较差。其中,车内噪声和侧墙振动在 0~200 Hz、600~900 Hz 的相关系数为 0.5~0.8,属于强相关;500~600 Hz、900~1 000 Hz 的相关系数为 0.3~0.5,属于中等相关;200~500 Hz、1 000~1 200 Hz 的相关系数为 0.1~0.3,属于弱相关。当列车进入隧道之后,车内噪声同时与侧墙振动、侧墙表面噪声存在相关性,特别是提高了与侧墙表面 300 Hz 以下的噪声相关性,而与侧墙振动的相关性则略有降低。说明在明线时,车内低频噪声主要来自于侧墙的振动,而在隧道时,车内低频噪声则主要来自于车身表面的气动激励。

5 结论

通过对我国某型高速列车以 160~350 km/h 速度在明线和隧道环境下运行时的车内噪声、车内振动、车内声源识别及车身表面噪声进行现场测试。分析了隧道环境对车内振动和噪声、车身表面气动噪声、转向架区域振动和噪声特性及其随速度的变化规律,并研究了明线和隧道环境下车内主要噪声源的声源分布和贡献率的差异,主要结论如下。

(1) 不同速度等级下,隧道区间头车司机室、观光区、客室中和客室后声压级分别比明线区间高 1.9~3.8 dBA、2.4~4.6 dBA、8.8~9.7 dBA 和 6.3~7.6 dBA,两者频谱差异主要体现在 315~2 000 Hz,各测点在不同线路的声压级差值与运行速度相关性较小。

(2) 两种线路下车内各测点的噪声回归系数均保持在 25~40,表明车内噪声受轮轨噪声激励影响相对明显。

(3) 对于客室中部,列车 350 km/h 匀速运行时声源位置均主要位于列车地板和顶板区域,隧道环境使得列车顶板和客室后方贡献率分别增加 4.0% 和 3.0%,而地板区域的贡献量相应降低 8.6%,差异频段主要体现在 63~160 Hz。

(4) 对于侧墙区域,在明线时,车内低频噪声主要来自于侧墙的振动,而在隧道时,车内低频噪声则主要来自于侧墙车身表面的气动激励。

(5) 客室内噪声总值和频谱分布的差异在隧道运行情况下会减小,现有更关注客室端部噪声控制的传统认识,在列车隧道运行下,需要同样重要地关注和对待客室中部区域。

参 考 文 献

- [1] CHOI S. 韩国高速列车在隧道内的车内噪声[J]. 国外铁道车辆, 2016, 53(5): 15-18.
CHOI S. Interior noise of a korean high-speed train in tunnels[J]. Foreign Rolling Stock, 2016, 53(5): 15-18.
- [2] 张强. 高速列车司机室与观光室车内噪声预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
ZHANG Qiang. Research on interior noise prediction of high-speed train cab and tourist cabin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [3] 范蓉平, 孟光, 贺才春, 等. 粘弹性阻尼材料降低列车车内噪声的试验研究[J]. 振动与冲击, 2008(6): 123-127, 192.
FAN Rongping, MENG Guang, HE Caichun, et al. Experimental study on viscoelastic damping materials for noise control in railway vehicles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008(6): 123-127, 192.
- [4] 张骏, 张捷, 陈沛, 等. 时速 250 公里动车组车内声源特性及其贡献量分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(3): 96-100, 130.
ZHANG Jun, ZHANG Jie, CHEN Pei, et al. Characteristics and contribution analysis of interior noise sources of a 250 km/h internal combustion multiple unit[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(3): 96-100, 130.
- [5] 张捷, 肖新标, 韩健, 等. 高速列车车内客室端部噪声分布特性与声学模态分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 97-103.
ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, HAN Jian, et al. Characteristics of noise distribution at the ends of the coach and acoustic modal analysis of high-speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 97-103.
- [6] 潘勇. 动车组车内噪声和车外噪声源识别研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
PAN Yong. Research on interior noise and noise source identification of the EMU[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [7] 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. GB/T 3449-2011 声学 轨道车辆内部噪声测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 3449-2011 Acoustics-measurement of noise inside railbound vehicles[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [8] The International Organization for Standardization. ISO 3381: 2011. Railway applications-acoustics measurement

- of noise inside railbound vehicles[S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2011.
- [9] MELLET C, LETOURNEAUX F, POISSON F, et al. High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3-5): 535-546.
- [10] HE Be, XIAO Xinbiao, ZHOU Qiang, et al. Investigation into external noise of a high-speed train at different speeds[J]. *Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2014, 15(12): 1019-1033.
- [11] ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, SHENG Xiaozhen, et al. Characteristics of interior noise of a Chinese high-speed train under a variety of conditions[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering)*, 2017, 18(8): 617-630.
- [12] THOMPSON D J. *Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control*[J]. *Elsevier Science & Technology*, 2009, 153(4): 12-14.
- [13] 刘加利. 高速列车气动噪声的理论研究与数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- LIU Jiali. The theoretical research and numerical simulation of aerodynamic noise for high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [14] 褚志刚, 周亚男, 王光建, 等. 基于声压球谐函数分解的球面波束形成噪声源识别[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 1): 146-151.
- CHU Zhigang, ZHOU Yanan, WANG Guangjian, et al. Noise source identification by spherical beamforming based on sound pressure spherical harmonics decomposition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(Suppl.1): 146-151.
- [15] 褚志刚, 杨洋, 贺岩松, 等. 球谐函数波束形成声源识别扩展方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(20): 45-53.
- CHU Zhigang, YANG Yang, HE Yansong, et al. Extension method of spherical harmonics beamforming for sound source identification[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(20): 45-53.
-
- 作者简介:** 柳明, 男, 1994 年出生。主要研究方向为高速铁路振动噪声控制。
E-mail: 15184446574@163.com
- 肖新标(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为轨道交通振动噪声分析与控制。
E-mail: xinbiaoxiao@163.com