

高速列车不同转向架区噪声特性及主要噪声源分离

王东镇^{1,2}, 葛剑敏¹

(1. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要: 以某型高速列车为研究对象, 基于线路运行类比测试, 对车辆运行时主要噪声源之一的转向架区噪声开展研究。通过对不同转向架区噪声进行类比测试和对比分析, 确定了 $350\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以下速度等级中间车拖车转向架区的主要噪声源为轮轨噪声, 头、尾拖车转向架区主要噪声源为气动噪声, 中间车动车转向架区主要噪声源为牵引系统噪声。基于以上的分析结论和一定的假设, 对车头、车尾和中间动车转向架区主要噪声源进行了分离特性研究, 获取了主要噪声源的频谱和贡献特性。研究结果可为高速列车减振降噪设计提供依据和指导。

关键词: 高速列车; 转向架区; 轮轨噪声; 气动噪声; 牵引系统噪声; 分离特性

中图分类号: U270.1+6

文献标志码: A

Noise Characteristic and Main Noise Source Separation in Different Bogie Areas for High-speed Train

WANG Dongzhen^{1,2}, GE Jianmin¹

(1. School of Physical Sciences and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CRRC Qingdao Sifang Co. Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: Based on some type of high-speed train, the different bogie area noise was tested and studied, which was one of the main noise sources of high-speed train in operation. Through the analogically test and analyze the noise characteristics in different bogies, it can be concluded that the main noise source in bogie areas of the intermediate trail car is wheel-rail noise at the speed level of $350\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ or below, the main noise source in bogie areas of the head and rear car is pneumatic noise, and the main noise source in bogie areas of the intermediate motor car is traction system noise. Furthermore, based on above results and some assumptions, the spectrum and

contribution characteristics of major noise sources were studied and obtained for bogie areas of the head, rear and motor car. The research results can provide a basis and guidance for vibration and noise reduction of high-speed trains.

Key words: high-speed train; bogie area; wheel-rail noise; pneumatic noise; traction system noise; separation characteristics

高速铁路具有速度高、运能大、安全性高、比陆路及航空运输能耗低的优点, 在世界许多国家得到了迅猛发展。随着高速列车的快速发展, 尤其是运营速度的不断攀升, 其振动和噪声问题日益凸显。

根据国内外铁路噪声测试经验: 铁路噪声主要由轮轨噪声、气动噪声和牵引系统噪声等组成。了解高速列车主要噪声的来源、增长趋势、频谱特性等是掌握高速列车噪声和进一步实施控制的基本要求。

不同噪声随列车运行速度变化的关系按照牵引系统噪声、轮轨噪声和气动噪声占主导所对应的列车运行速度范围可分为三个区段, 不同的区段不同的噪声源占主导, 其中轮轨噪声随速度的 3 次方增长, 气动噪声随速度的 6 次方增长^[1]。

轮轨噪声主要来源于车轮和钢轨两个主要部分所辐射的噪声。在车轮和钢轨辐射噪声对轮轨噪声的贡献方面, 欧洲学者偏向于认为轮轨噪声以车轮辐射的噪声为主^[2], 而美国学者则偏向于认为以轨道系统辐射的噪声为主^[3-4]。Thompson^[5]的理论分析和实际测试表明, 在不同的频率范围内, 车轮和钢轨对轮轨噪声的贡献是不同的, 低于 $1\ 000\text{Hz}$, 钢轨是主要的噪声源; 更高的频率, 则车轮辐射的噪声占主导。

国内周信等^[6]采用仿真手段研究线路中几种典

收稿日期: 2019-07-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200503)

第一作者: 王东镇(1983—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为高速列车噪声与振动控制。

E-mail: 83464491@qq.com

通信作者: 葛剑敏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为噪声与振动控制。

E-mail: jmge163@163.com



论文
拓展
介绍

型钢轨波磨对车轮声辐射的贡献影响。韩建等^[7-8]采用试验和仿真的方法,系统性地比较了各种车轮的振动声辐射特性,研究不同参数对车轮振动声辐射的影响特性。韩光旭等^[9]对运营中的高速列车进行车内振动与噪声现场测试,研究了轮轨激励对车内振动噪声的影响特性。金学松^[10]基于京津高速列车车外噪声测试分析研究了高速列车在高速条件下的声源频谱特性规律。

气动噪声主要是气流流经结构表面而产生的气流扰动并以噪声的形式进行传播。King指出高速列车气动噪声主要是由于旋涡脱落引起的,主要气动噪声源出现在气流分离的部位,诸如受电弓系统、轮轨系统、列车顶部等突出部件,同时还研究了不同部位气动噪声源的重要性^[11]。朱剑月等^[12-13]运用声学比拟方法数值模拟了高速列车转向架区域裙板和设备舱对转向架流场与气动噪声性能的影响。刘佳利等^[14-15]基于联合仿真技术对高速列车车头和受电弓气动噪声进行研究,分析了不同结构对气动噪声的影响特性。李辉等^[16]基于流体动力学基本原理及有限体积元方法建立模型,对某型受电弓300km·h⁻¹速度下周围流场进行模拟,利用声类比相关理论对受电弓纵向对称平面上的气动噪声进行计算。

目前国内外的轮轨和气动噪声的研究主要偏重于仿真计算、实验室测试和风洞模拟实验,并主要对轮轨噪声或气动噪声等单一噪声源进行研究。本文基于高速列车线路现场运行试验,对高速列车不同转向架区噪声及主要噪声源分离特性开展研究,可为研究和有效控制高速列车主要噪声源和整车减振降噪设计提供依据。

1 不同转向架区噪声特性分析

研究表明:在目前高铁的运营速度下,转向架区域噪声的总能量对整车噪声的影响和贡献最大,并且不同车型及位置的噪声存在差异^[17]。

研究的某型高速列车采用4动4拖的结构配置,如图1所示,即1、3、6、8号车为拖车,2、4、5、7号车为动车,其中T1、T4车为相同车型,T2、T3车为相同车型,M2、M3车为相同车型。



图1 高速列车动力配置

Fig.1 Power configuration of high-speed train

对于拖车转向架区由于自身无激励源设备布置,因此可以判定拖车转向架区的噪声主要来源为轮轨噪声和气动噪声。对于动车转向架,由于其需要为动车组提供动力,在拖车转向架的基础上增加了牵引系统单元,因此动车转向架的主要噪声来源,除了轮轨噪声和气动噪声,还包括牵引系统噪声。二者结构对比如图2所示。

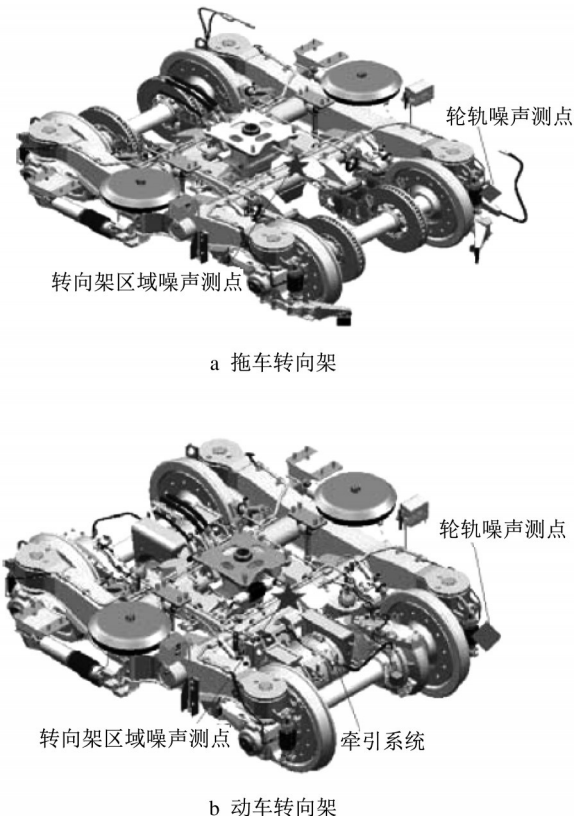


图2 拖车转向架和动车转向架结构对比和测点布置

Fig.2 Structure comparison and measuring points layout of the trail car and motor car bogie

1.1 拖车转向架区噪声特性

为研究不同位置拖车转向架区噪声特性以及噪声随速度的变化规律,搭载某型号高速列车在某高铁无砟轨道专线开展测试研究,选取T1车一位转向架、T2车一位转向架、T3车二位转向架和T4车二位转向架进行对比测试研究,不同转向架的轴重偏差控制在3%以内,在每个转向架相同位置布置噪声传感器进行测试,两个测点分别位于转向架的正上方和靠近轮轨处,具体位置如图2所示,测试时为消除转向架区混响噪声对轮轨噪声的影响,轮轨处噪声的测点布置在轮辐的外侧。所获取以上4个不同位置的拖车转向架上同位置噪声随不同速度等级的频谱特性如图3所示。

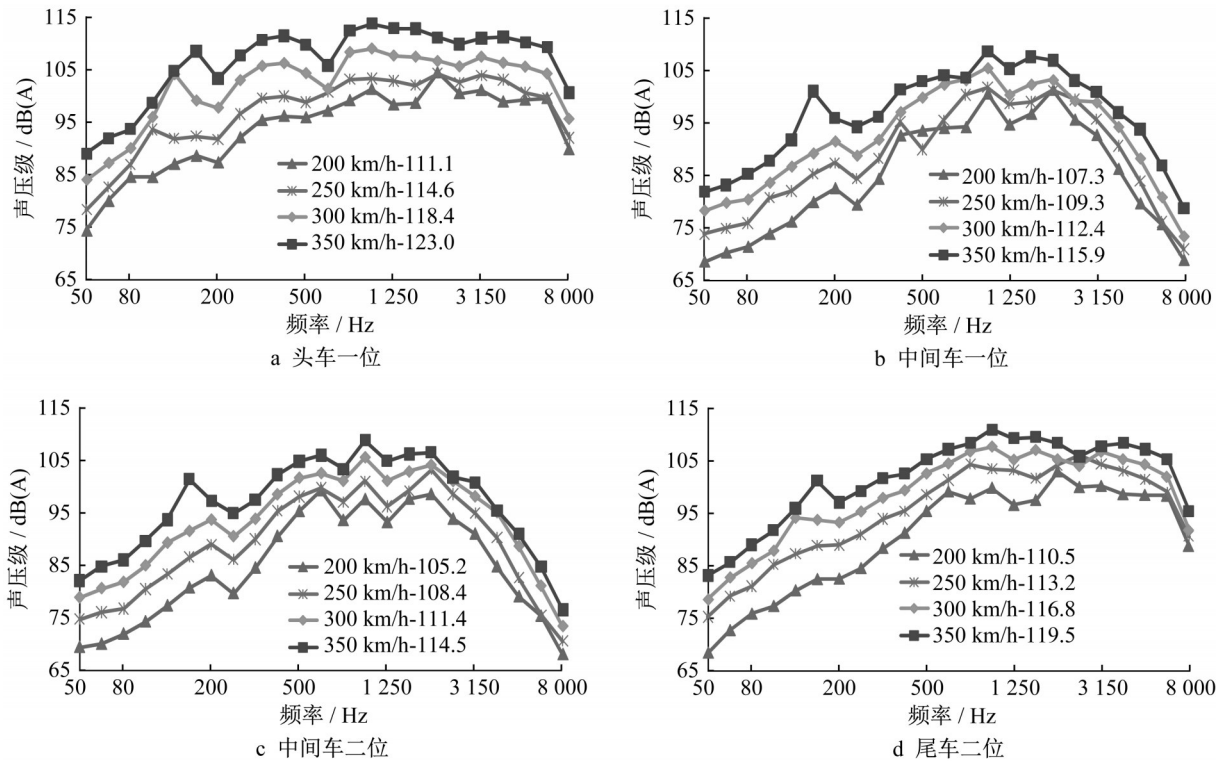


图3 不同拖车转向架区不同速度等级的噪声频谱特性

Fig.3 Noise spectrum characteristics of different trail car bogie areas at different speed levels

车头转向架区噪声在4个速度等级峰值都为2 000Hz,200km·h⁻¹和250km·h⁻¹有效的频率范围为315~6 300Hz,随着速度的增加有效的频率范围有所增加,主要向低频方向拓展,300km·h⁻¹和350km·h⁻¹有效的频率范围为160~6 300Hz,各频段随着速度的增加都有所增长。

中间车一位和二位转向架在4个速度等级峰值都为1 000Hz和2 000Hz,各速度等级有效的频率范围都为400~3 150Hz,各频段随着速度的增加都有所增长。

尾车转向架在200km·h⁻¹和250km·h⁻¹峰值出现在2 000Hz,有效频率范围400~5 000Hz;在300km·h⁻¹和350km·h⁻¹峰值出现在1 000Hz,有效频率范围315~6 300Hz。

同时为验证转向架区噪声的主要来源,通过在中间车靠近轮轨处设置噪声传感器测试轮轨处噪声,所获取的随速度变化的频谱曲线如图4所示,4个速度等级峰值都为1 000Hz,不同速度等级有效的频率范围都为400~4 000Hz,各频段随着速度的增加都有所增长,且峰值和主频不受速度等级变化,这与中间拖车转向架区噪声的峰值和主要频段基本一致。

一般来说,列车的轮轨噪声的A计权声压级与列车速度 V 的对数成正比,即

$$L_p = L_{p0} + N \cdot \log_{10}(V/V_0) \quad (1)$$

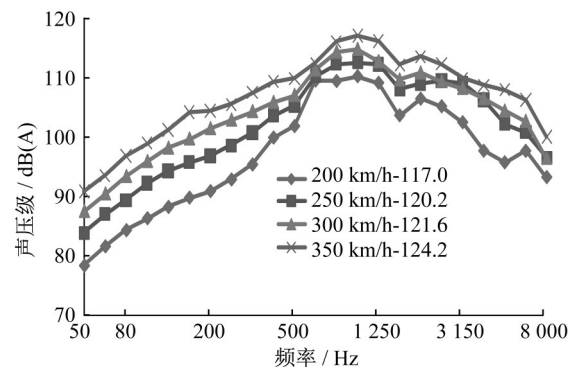


图4 中间拖车不同速度等级的轮轨噪声频谱

Fig.4 Wheel-rail noise spectrum of intermediate trail car at different speed levels

式中: L_{p0} 为列车速度为 V_0 时的声压级, N 值的大小在25~35之间,通常取30^[18]。

基于不同拖车转向架区随不同速度等级的噪声变化,获取不同拖车转向架区和轮轨处噪声随速度变化的回归线,如图5和图6所示。

车头转向架区噪声随速度增长趋势为

$$y_{a1} = 42.464x + 109.62 \quad (2)$$

中间拖车一位转向架区噪声随速度增长趋势为

$$y_{a2} = 30.361x + 107.78 \quad (3)$$

中间拖车二位转向架区噪声随速度增长趋势为

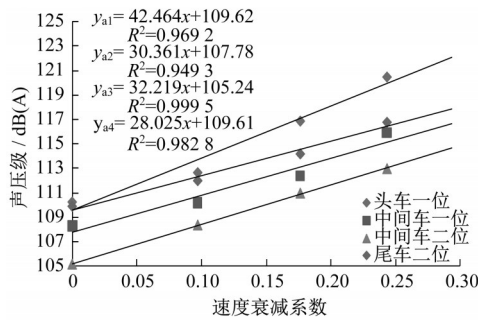


图 5 不同拖车转向架区噪声随速度增长的回归线

Fig.5 The regression lines of noise in different trail car bogie areas as speed increases

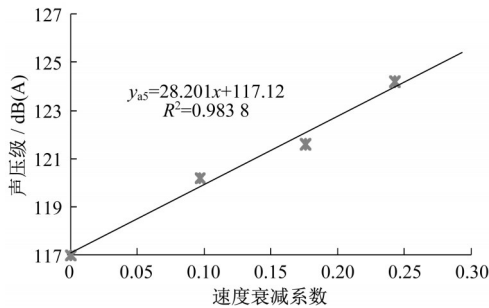


图 6 拖车轮轨噪声随速度增长的回归线

Fig.6 The wheel-rail noise regression line of trail car as speed increases

$$y_{a3} = 32.219x + 105.24 \quad (4)$$

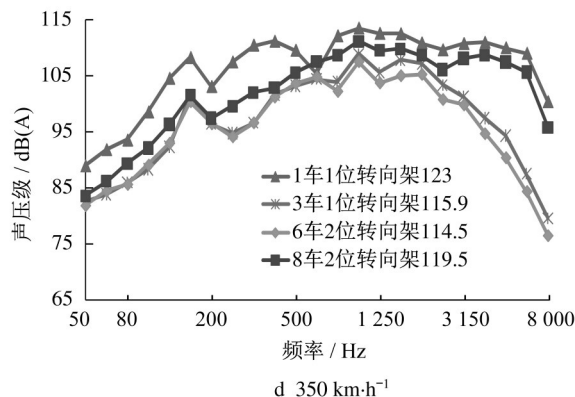
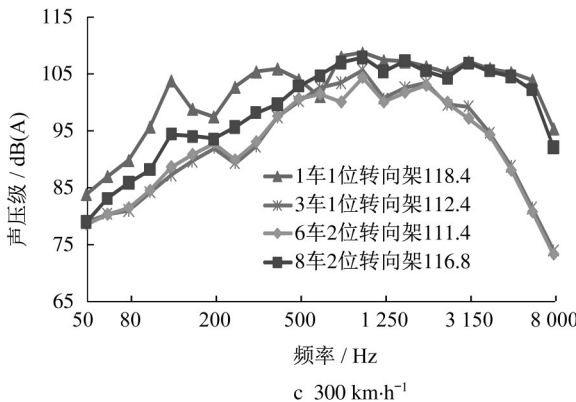
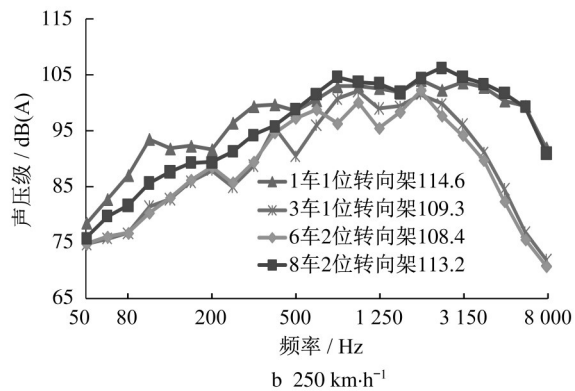
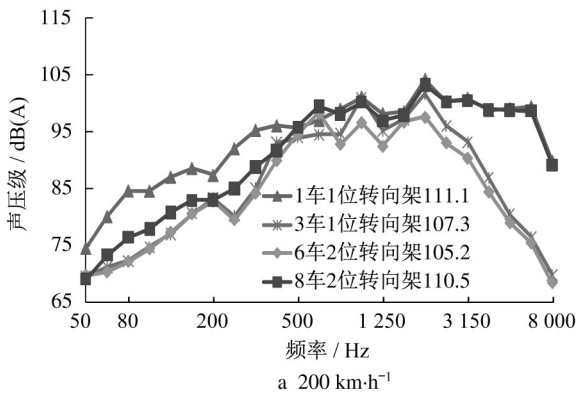


图 7 拖车不同转向架区不同速度等级的噪声频谱

Fig.7 The noise spectrum of different trail car bogie areas at different speed levels

车尾转向架区噪声随速度增长趋势为

$$y_{a4} = 28.025x + 109.61 \quad (5)$$

中间车轮轨噪声随速度的增长趋势为

$$y_{a5} = 28.201x + 117.12 \quad (6)$$

式中: y_{ai} 为车头转向架区噪声声压级; $i=1$ 代表车头转向架; $i=2$ 代表中间拖车一位转向架; $i=3$ 代表中间拖车二位转向架; $i=4$ 代表车尾转向架; $i=5$ 代表中间拖车轮轨处; x 为速度衰减系数, $x = \log(V/V_0)$, V_0 为相对速度, 为测试的最低速度 $200\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, V 为实际速度。

根据中间拖车转向架上方区测点噪声与轮轨近场测点噪声频谱和回归公式的对应关系, 可以判定对于中间拖车的转向架区在 $350\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以下的速度等级的主要噪声源为轮轨噪声, 轮轨噪声的特征频率峰值为 1000Hz 和 2000Hz , 影响的频率范围为 $400 \sim 4000\text{Hz}$ 。这表明: 尽管中间拖车转向架区结构存在一定程度的凸起和不平, 但由于其基本处于车体包裹下相对封闭的区域, 受气流扰动激励的影响较小。

车头和车尾转向架区除轮轨噪声外, 还受到气动噪声的主要影响, 根据不同拖车转向架区不同速度等级的噪声频谱曲线对比, 如图 7 所示, 可以判断气动噪声频段范围较宽, 车头和车尾转向架区受气动噪声影

响较大,且随着速度的增加影响增大。

1.2 动车转向架区噪声特性

同时在中间动车M2车一位转向架、M3车二位

转向架与拖车同样位置布置噪声传感器进行测试研究动车转向架区噪声特性,获取的动、拖车转向架区不同速度等级的噪声频谱对比曲线如图8所示。

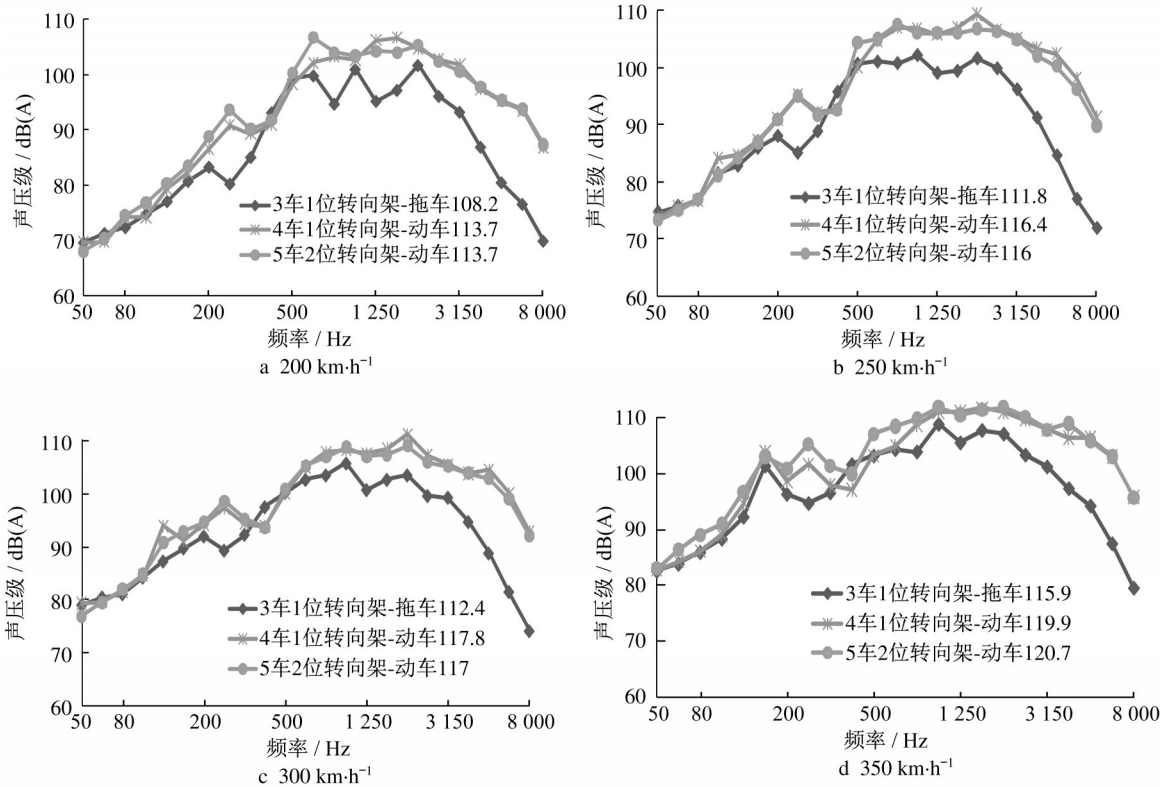


图8 动、拖车转向架区不同速度等级的噪声频谱

Fig.8 The noise spectrum characteristics of the motor car and trailer car bogie areas at different speed levels

对获取的不同速度等级的动车转向架区噪声进行回归分析,回归线如图9所示。

级; x 为速度衰减系数, $x = \log(V/V_0)$, V_0 为相对速度, V 为实际速度。

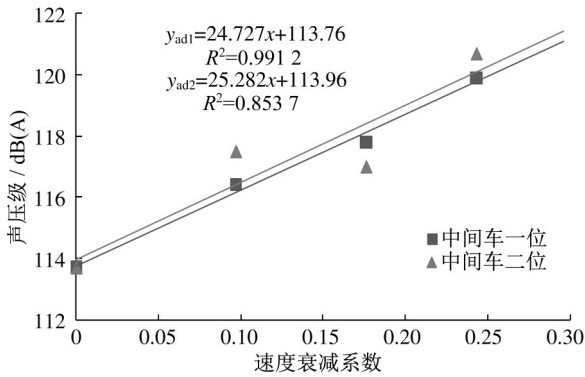


图9 不同动车转向架区噪声随速度增长的回归线

Fig.9 The noise regression lines in the motor car bogie areas as speed increases

中间动车一位转向架区噪声随速度增长趋势为 $y_{ad1} = 24.727x + 113.76$ (7)

中间动车二位转向架区噪声随速度增长趋势为 $y_{ad2} = 25.282x + 113.96$ (8)

式中: y_{ad1} 和 y_{ad2} 为中间动车二位转向架区噪声声压

根据动拖车转向架区相同测试位置不同速度等级的噪声频谱曲线对比,动车转向架的噪声明显高于拖车转向架区噪声,主要原因为:相比于拖车转向架,动车转向架由于需要为动车组提供动力,其在拖车转向架基础上增加牵引系统单元,牵引系统噪声导致动车转向架区噪声相比拖车转向架区同样位置增大明显,且主要增大频段位于中高频段。

根据不同动车转向架区相同测试位置不同速度等级获取的噪声频谱曲线对比,对于不同速度等级不同动车转向架,噪声声压级基本都维持在同等水平,频谱特性差异也不大,这也从侧面印证了气动噪声非中间车转向架区的主要噪声源。

2 不同转向架区噪声源分离特性

2.1 车头和车尾转向架区噪声源分离

基于拖车不同转向架区不同速度等级的噪声频谱,可以判定中间拖车不同位置转向架区噪声频谱

特性基本一致,主要噪声特性与轮轨噪声呈现的特性一致。由于轮轨噪声的产生激励主要与车轮和轨道的粗造度有关,而对于同一列车,轮轨激励都是基于同样的运营里程的轮对和同样的轨道条件,并且对于本研究车型不同车轴重偏差控制在3%以内,因此可假设对于同一列车的不同速度等级不同位置转向架区的轮轨噪声是一致的。基于此假设以中间车一二位端转向架区噪声为基础,对车头和车尾转向架相同测点位置气动效应导致的气动噪声进行分离,气动噪声分离公式如下:

$$L_{dPaf_{ij}} = 10\log(10^{0.1L_{sPaf_{ij}}} - 10^{0.1L_{wPaf_{ij}}}) \quad (9)$$

式中: $i=1$ 代表车头, $i=2$ 代表车尾; $j=1,2,3,\dots,n$,分别代表对应的1/3倍频程中心频率50,63,80,……,8000Hz; $L_{sPaf_{ij}}$ 为实测的对应车辆、对应1/3倍频程频率的转向架区噪声; $L_{wPaf_{ij}}$ 为对应车辆位置、对应1/3倍频程频率的轮轨噪声; $L_{dPaf_{ij}}$ 为分离的对应车辆位置、对应1/3倍频程频率的气动噪声。

基于以上气动噪声分离公式,获取的车头和车尾转向架的主要噪声源分离频谱曲线如图10~图12所示。

对车头和车尾转向架区分获取的气动噪声进行回归,如图13所示。

车头气动噪声随速度的增长趋势如下:

$$y_{aq1} = 52.705x + 108.45 \quad (10)$$

车尾气动噪声随速度的增长趋势如下:

$$y_{aq4} = 37.823x + 108.52 \quad (11)$$

根据车头和车尾转向架区不同速度等级主要噪声源的分离结果,可以得出如下结论:

(1)对于车头转向架区的气动噪声和轮轨噪声随着速度的增加都增长较快,气动噪声占主导,在200km·h⁻¹、250 km·h⁻¹、300km·h⁻¹、350 km·h⁻¹速度工况气动噪声贡献量分别为60.8%、70.6%、74.5%和80%。在200 km·h⁻¹至350km·h⁻¹,气动噪声的增长幅度快于轮轨噪声的增长幅度。

(2)对于车尾转向架区的气动噪声和轮轨噪声随着速度的增加都增长较快,气动噪声占主导,在200km·h⁻¹、250 km·h⁻¹、300km·h⁻¹、350 km·h⁻¹速度工况气动噪声贡献量分别为70%、67.3%、70.8%和68.8%,在200 km·h⁻¹至250km·h⁻¹,气动噪声基本维持在一定的贡献比范围之内。

(3)气动噪声为车头和车尾转向架区的主要噪声源,车头和车尾转向架区的主要频谱差异体现在中低频范围,车头在中低频段明显高于车尾。

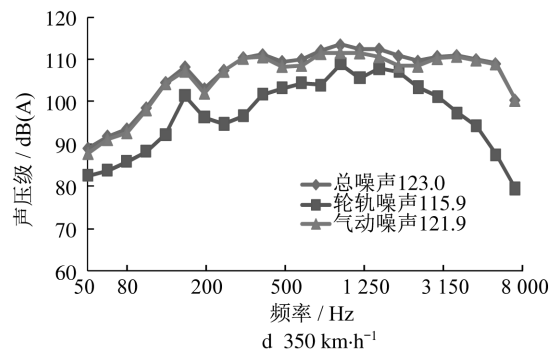
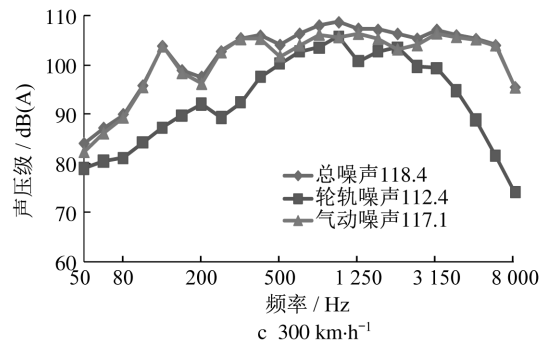
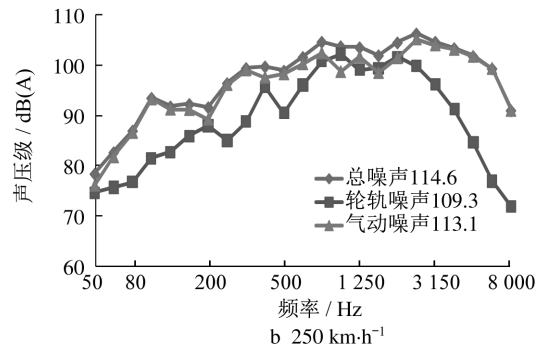
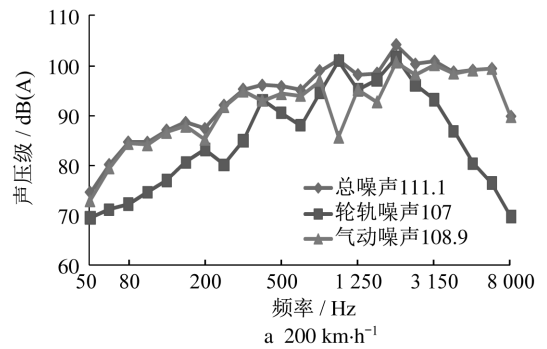


图10 车头转向架区不同速度等级噪声源分离频谱
Fig.10 Separated noise source spectrum of the head car bogie area at different speed levels

转向架区气动噪声的贡献频段较宽,主频涵盖从低频到高频的范围,其噪声增长特性符合偶极子随速度的6次方增长规律;而车尾转向架区气动噪声的贡献频段主要集中高频的范围内,其噪声增长特性符合单极子随速度等级的4次方增长规律。

(4)头尾车的主要频谱差异主要体现在中低频

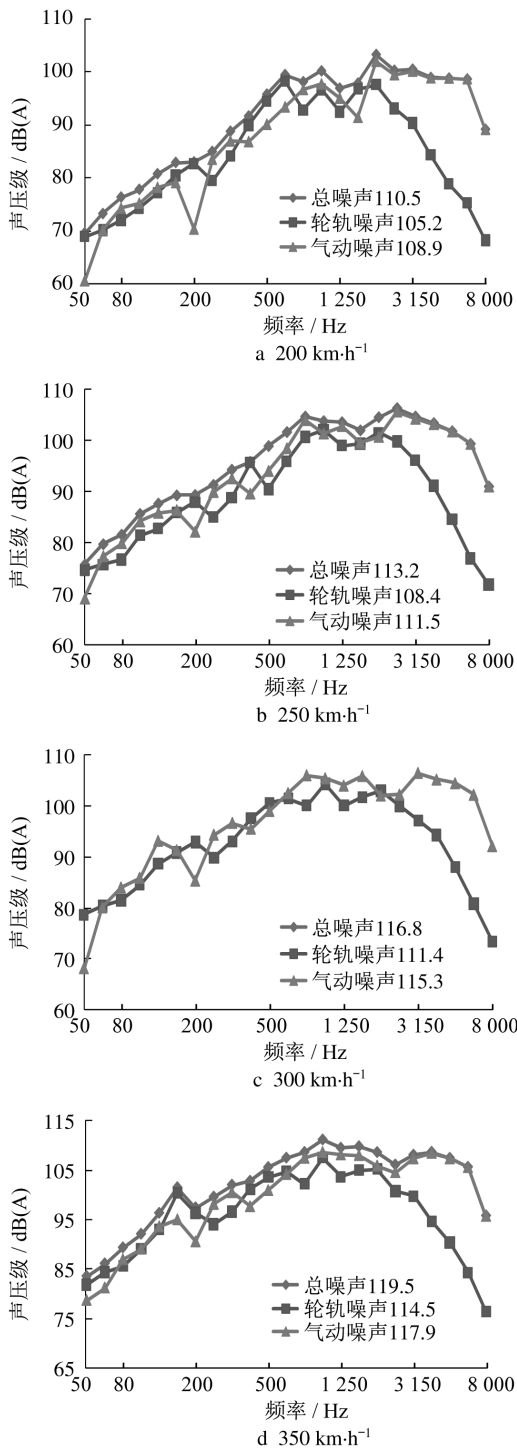


图11 车尾转向架区不同速度等级噪声源分离频谱
Fig.11 Separated noise source spectrum of the rear car bogie area at different speed levels

区域,头车在中低频段明显高于尾车。这主要与二者气动效应的差异有关。在车头转向架处,气流受到车头的挤压,空气流速垂直于车下进行冲击;在车尾附近,由于车尾的突然离开,周围空气受到吸引而形成强烈的涡流。

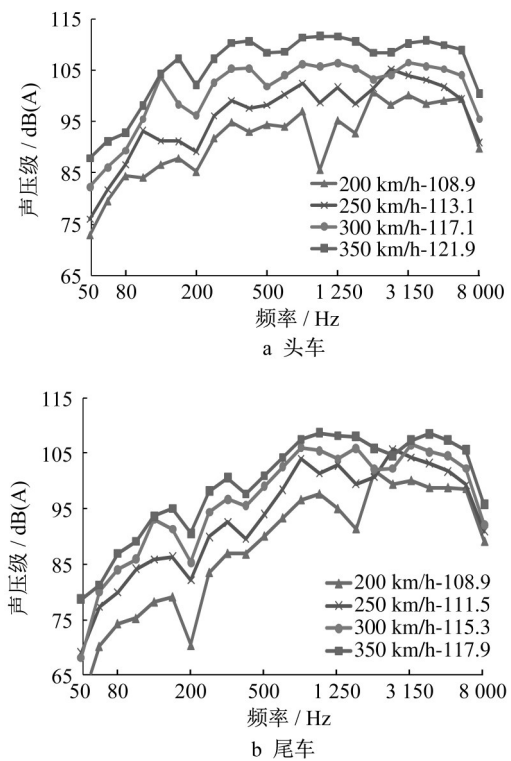


图12 车头车尾转向架区不同速度分离气动噪声源频谱
Fig.12 Separated aerodynamic noise source spectrum of the head car and rear car bogie areas at different speed levels

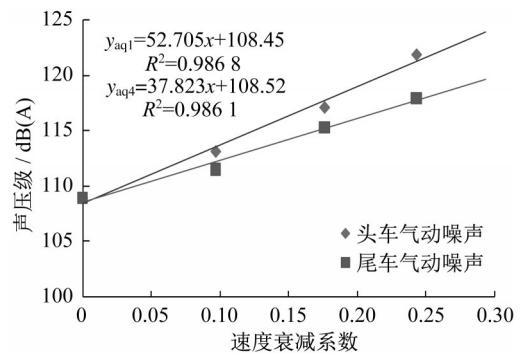


图13 车头车尾转向架区分的气动噪声随速度回归线
Fig.13 Separated aerodynamic noise regression lines of the head car and rear car bogie areas as speed increases

2.2 中间动车转向架区噪声源分离

基于同一列车的不同速度等级不同位置转向架区的轮轨噪声一致的假设,实现对中间动车转向架牵引系统噪声和轮轨噪声的分离。牵引系统噪声分离公式如下:

$$L_{tPafj} = 10\log(10^{0.1L_{sPafj}} - 10^{0.1L_{wPafj}}) \quad (12)$$

式中: $j=1, 2, 3, \dots, n$, 分别代表对应的1/3倍频

程中心频率 50, 63, 80, ……8 000 Hz; L_{sPa_f} 为实测的对应车辆位置、对应 1/3 倍频程频率的动车转向架区噪声; L_{wPa_f} 为对应车辆位置、对应 1/3 倍频程频率的轮轨噪声; L_{tPa_f} 为分离的对应车辆位置、对应 1/3

倍频程频率的牵引系统噪声。

基于以上牵引系统噪声分离公式获得中间动车转向架区的主要噪声源分离频谱曲线, 如图 14 和图 15 所示。

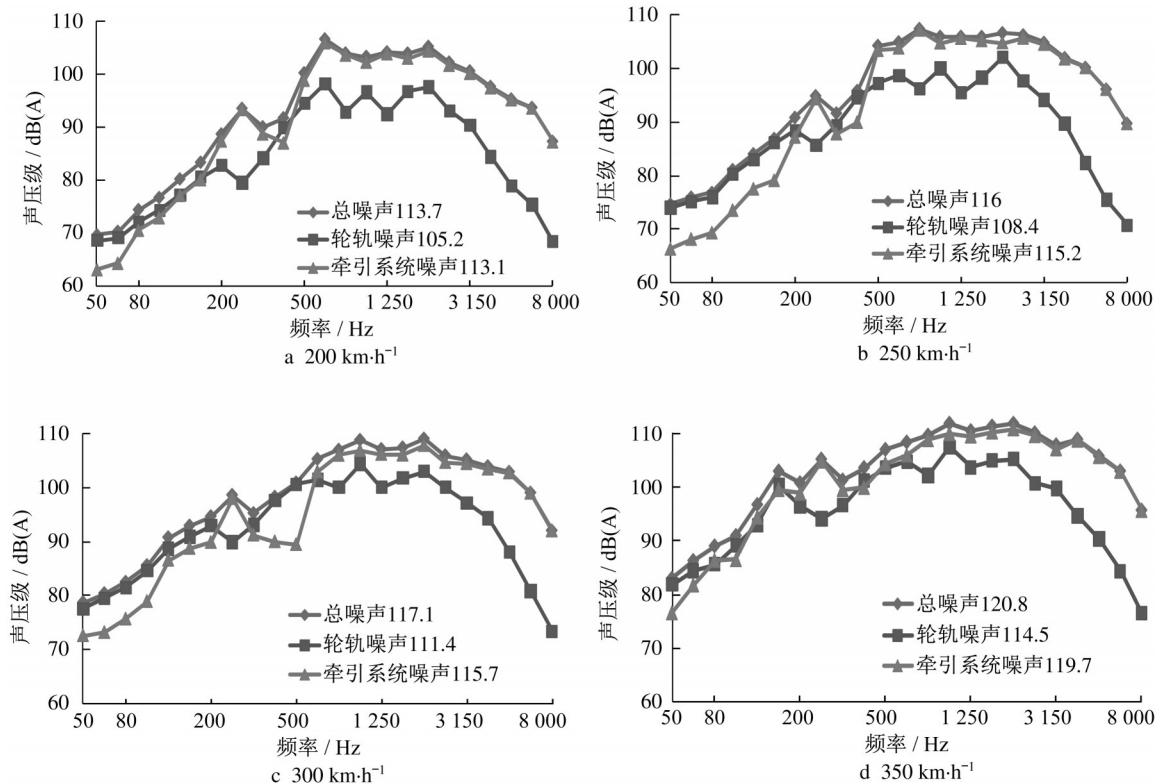


图 14 动车转向架区不同速度等级分离的噪声源频谱

Fig.14 Separated noise source spectrum of the motor car bogie area at different speed levels

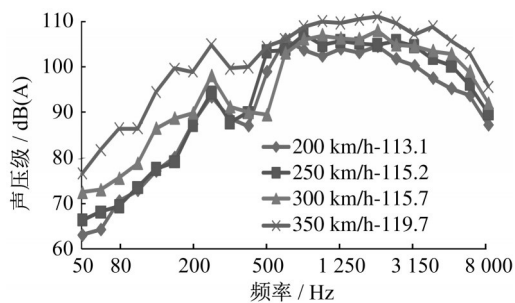


图 15 动车转向架区不同速度等级分离的牵引噪声频谱

Fig.15 Separated traction noise source spectrum of the motor car bogie area at different speed levels

根据中间动车转向架区主要噪声源的分离结果, 可得:

(1) 对于动车转向架牵引系统噪声和轮轨噪声随着速度的增加都增长较快, 在 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度工况牵引系统噪声贡献量分别为 86%、82.9%、72.7% 和 77%。在 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 至 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 轮轨噪声噪声的增长幅度快于

牵引系统的增长幅度。

(2) 牵引系统噪声对动车转向架区噪声的贡献频段主要为中高频段, 占据主导作用。

3 结论

(1) 车头、中间拖车、中间动车和车尾转向架区主要噪声源由于受位置和设备布置的影响, 主要噪声源存在较大差异。轮轨噪声为中间拖车转向架区的最主要噪声源; 牵引系统噪声为中间动车转向架区的最主要噪声源; 气动噪声为车头和车尾拖车转向架区的主要噪声源。

(2) 对于车头转向架气动噪声的贡献频段较宽, 主频涵盖从低频到高频的范围, 其噪声增长特性符合偶极子随速度等级的 6 次方增长规律; 而对于车尾转向架区气动噪声的贡献频段主要集中高频的范围内, 其噪声增长特性符合单极子随速度等级的 4 次方增长规律。

(3) 车头和车尾转向架区气动噪声差异主要与二

者气动效应的差异有关,在车头转向架处,气流受到车头的挤压,空气流垂直于车下进行冲击。在车尾附近,由于车尾的突然离开,周围空气受到吸引而形成强烈的涡流。而气动噪声对中间车转向架区噪声影响不显著,这主要由于中间车转向架基本处于车体包裹下相对封闭的区域,受气流扰动激励的影响较小。

参考文献:

- [1] 沈志云. 高速列车的动态环境及其技术的根本特点[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 1.
SHEN Zhiyun. Dynamic environment of high-speed train and its distinguished technology [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4): 1.
- [2] PETERS S, HEMSWORTH B, WOODARD B. Noise radiation by a railway rail[J]. Journal of Sound and Vibration, 1974, 35(1):146.
- [3] REMINGTON P J. Wheel/rail noise, part iv: rolling noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 1976, 46: 419.
- [4] BENDER E K, REMINGTON P J. The influence of rails on train noise [J]. Journal of Sound and Vibration, 1974, 37: 321.
- [5] THOMPSON D J. Predictions of acoustic radiation from vibration wheels and rails [J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 120: 275.
- [6] 周信, 赵鑫, 韩健, 等. 波磨条件下地铁车轮瞬态滚动噪声特性研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4):196.
ZHOU Xin, ZHAO Xin, HAN Jian, *et al.* Study on transient rolling noise characteristics of subway wheel with rail corrugation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4):196.
- [7] HAN Jian, WANG Ruiqian, WANG Di, *et al.* Effect of Wheel load on wheel vibration and sound radiation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(1):46.
- [8] 韩健, 肖新标, 金学松, 等. 城市轨道交通车轮滚动声辐射特性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1):115.
HAN Jian, XIAO Xinbiao, JIN Xuesong, *et al.* Sound radiation characteristics of wheels used in urban rail traffic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1):115.
- [9] 韩光旭, 温泽峰, 张捷, 等. 车轮非圆化对高速列车振动噪声的影响[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4):10.
HAN Guangxu, WEN Zefeng, ZHANG Jie, *et al.* Influence of out-of-roundness of wheels of high-speed trains on interior vibration and noise[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4):10.
- [10] 金学松. 京津城际高速铁路科学实验——X. 车外噪声实验报告[R]. 成都:牵引动力国家重点实验室, 2009.
Jin Xuesong. Scientific experiment of Beijing to Tianjin intercity high-speed railway——X. experimental report on out-of-vehicle noise[R]. Chengdu: State Key Laboratory of Traction Power, 2009.
- [11] KING W F. A precise of development in the aero acoustics of fast trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193: 349.
- [12] 朱剑月, 任利惠, 雷震宇. 高速列车转向架舱对转向架区域流场与气动噪声影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 1556.
ZHU Jianyue, REN Lihui, LEI Zhenyu. Effect of bogie cavity on flow and flow-induced noise behavior around high-speed train bogie region[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(11): 1556.
- [13] 朱剑月, 王毅刚, 杨志刚, 等. 高速列车转向架区域裙板对流场与气动噪声的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 1512.
ZHU Jianyue, WANG Yigang, YANG Zhigang, *et al.* Effect of bogie fairing on flow and aerodynamic noise behavior around bogie of high-speed train [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(10): 1512.
- [14] LIU Jiali. Study on characteristics analysis and control of aeroacoustics of high-speed trains [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [15] 刘加利, 张继业, 张卫华. 高速列车车身表面气动噪声源研究[J]. 铁道车辆, 2010, 48(5):1.
LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Research on the aerodynamic noise source on surface of high speed trains [J]. Rolling Stock, 2010, 48(5):1.
- [16] 李辉, 肖新标, 李志辉, 等. 某型受电弓300km·h⁻¹速度下气动噪声初步分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(9):18.
LI Hui, XIAO Xinbiao, LI Zhihui, *et al.* Preliminary investigation into aerodynamic noise of a certain type of pantograph under of 300km·h⁻¹ [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(9):18.
- [17] DENG Yongquan, XIAO Xinbiao, HE Bin, *et al.* Analysis of external noise spectrum of high-speed railway [J]. Journal of Central South University, 2014, 21: 4753.
- [18] 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: 535.