

导流罩对受电弓气动噪声影响的风洞试验研究

陈 羽^{1,2}, 高 阳³, 王毅刚^{1,2}, 杨志刚^{1,2,4}, 李启良^{1,2}

(1. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804;

2. 同济大学上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;

3. 高速列车系统集成国家重点实验室, 吉林长春 130062; 4. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 受电弓是高速列车顶部最主要的气动噪声源, 合理的导流罩设计是降低受电弓气动噪声的重要方法。通过声学风洞试验的方法, 研究缩比模型导流罩对高速列车受电弓气动噪声的影响, 采用远场麦克风及声阵列, 给出了风速范围为 200~250 km·h⁻¹ 时的升弓、降弓状态下, 受电弓和加装导流罩的远场气动噪声频谱、主要噪声源位置、强度和对应频带范围。研究表明, 受电弓气动噪声为宽频带噪声, 中频噪声源位于受电弓区域后部近车体位置, 中高频、高频噪声源对应弓头和支座区域; 升弓状态下, 导流罩增大了弓头区域的气动噪声能量, 在降弓状态下, 导流罩减小了弓头和支座的噪声水平。

关键词: 高速列车; 受电弓; 气动噪声; 导流罩; 声学风洞试验

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-05-0475-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.05.012

Wind tunnel experimental research on the effect of guide cover on aerodynamic noise of pantograph

CHEN Yu^{1,2}, GAO Yang³, WANG Yi-gang^{1,2}, YANG Zhi-gang^{1,2,4}, LI Qi-liang^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management System, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. High-Speed Train System Integration National Engineering Laboratory, Changchun 130062, Jilin, China;

4. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: The pantograph is the main aerodynamic noise source at the top of high-speed trains, and the key to reduce the pantograph aerodynamic noise is to properly design the pantograph guide cover. By using aero-acoustic wind tunnel test method, the influence of the guide cover on the aerodynamic noise of high speed train's pantograph is studied at the speed of 200~250 km·h⁻¹. Received by far field microphones and the array, the noise spectrum, dominant noise source positions, the intensity and the frequency ranges are given under the pantograph lifted and folded conditions. The study indicates that the pantograph aerodynamic noise is broadband noise; the middle frequency noise sources locate at the rear of the pantograph area near train body; the pantograph head and supporter correspond to the positions of middle and high frequency noise sources. In pantograph lifted condition, the aerodynamic noise of the pantograph head is increased by the guide cover. However, in the pantograph folded condition, the aerodynamic noise at the pantograph head and supporter is decreased by the guide cover. The results show that: the proper design of the cover can reduce the aerodynamic noise in folded condition, and avoid increasing the aerodynamic noise at the pantograph head in lifted condition.

Key words: high speed train; pantograph; aerodynamic noise; guide cover; aero-acoustic wind tunnel test

0 引 言

受电弓系统是高速列车最主要的气动噪声源之一^[1]。受电弓下方噪声比客室中部高约 4~5

dB(A), 噪声频率主要分布在 100 Hz~1 kHz 之间, 范围较广。其气动噪声强度与列车运行速度的 6~8 次方成正比、峰值频率有很强的噪声能量, 对车内的乘坐舒适性和车外的环境噪声水平有重要影响, 因此受到国内外学者、工业界的广泛重视^[2-3]。

受电弓由弓头、弓架、支座、顶部绝缘子等部件组成, 其气动噪声的产生是由类方柱、类圆柱的钝体涡脱落^[4-5]导致。受电弓气动降噪优化的重点一方面是降低钝体绕流产生的峰值频率噪声, 近年来已开展的研究包括: 外形优化设计^[6]、多孔介质被动控制^[7-8]、基于等离子激励器的主动控制气动降

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB1200503-04)、上海市重点实验室项目(18DZ2273300)、上海市浦江人才计划项目(17PJ1409300)

作者简介: 陈羽(1986—), 男, 山西太原人, 博士, 研究方向为高速列车空气动力学与气动声学。

通讯作者: 王毅刚, E-mail: yigang.wang@sawtc.com

噪^[9]等。但由于受电弓自身结构和功能的复杂性, 改形涉及到弓网动力学、流固耦合等诸多方面。另一方面希望通过导流罩来降低气动噪声^[10]。Holmes 等^[11]研究指出, 导流罩前缘分离的漩涡撞击后缘会产生附加噪声; 张亚东等^[12]通过数值研究, 指出导流罩不同的安装位置对受电弓气动噪声有显著影响; 丁叁叁^[13]在分析不同导流罩的气动降噪效果时, 发现远场噪声有增有减, Yu 等^[14]对比计算了 4 种形式导流罩的降噪效果, 指出仅有 1 种类型的导流罩有降噪效果, 可能是导流罩降低了支座的速度, 减小了噪声, 以及侧板的安装起到了降噪的作用。因此有必要在明确受电弓系统噪声源频域特征及主要声源位置的基础上, 进一步讨论导流罩对其气动噪声的影响。

本文通过声学风洞试验的方法, 针对高速列车受电弓和导流罩 1:8 模型, 研究了不同速度下受电弓在升弓和降弓时的远场气动噪声特性, 给出了噪声频谱、主要噪声源位置, 分析了导流罩对受电弓气动噪声的影响, 为导流罩和受电弓系统的气动降噪设计提供参考。

1 声学风洞试验方法

试验在同济大学上海地面交通工具风洞中心的低噪声气动声学风洞中进行, 风洞试验段尺寸为 27 m×17 m×12 m, 试验段有效长度为 15 m, 为半消声室设计。声学风洞的喷口面积为 27 m², 最高风速为 250 km·h⁻¹, 在风速为 160 km·h⁻¹ 的工况时, 风洞的背景噪声为 61 dB(A)。

考虑到列车的几何尺度与风洞试验段的尺寸, 试验模型选择某高速列车 1:8 的缩比模型, 列车模型安装在专用的支撑地板上, 受电弓、导流罩和顶部绝缘子等安装在中间车后部靠近尾车位置。风洞试验中受电弓包含升弓、降弓两种状态, 升弓状态如图 1(a)所示, 加装导流罩的模型如图 1(b)所示, 试验时风速分别为 200、230、250 km·h⁻¹。

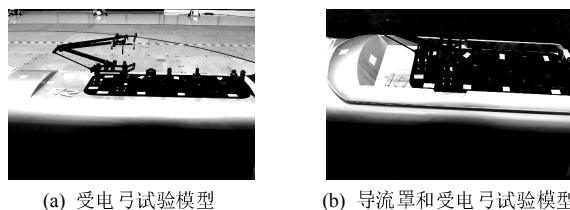


图 1 受电弓和导流罩声学风洞试验模型
Fig.1 The models of pantograph and guide cover in aero-acoustic wind tunnel test

图 2 给出了远场麦克风的位置示意图, 4 个测点均距风洞喷口到收集口之间的中心线为 7.5 m,

传声器位于射流剪切层外, 测点高度为 0.8 m。麦克风采样时间为 30 s, 采样频率为 48 kHz, 对获得的声学信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)得到远场噪声的 A 计权总声压级和频谱。在信号处理过程中为减少因在时域截断信号而在频域产生的渗漏误差, 数据处理时均加了汉宁(Hanning)窗并修正了加窗对声压频谱密度幅值带来的影响。

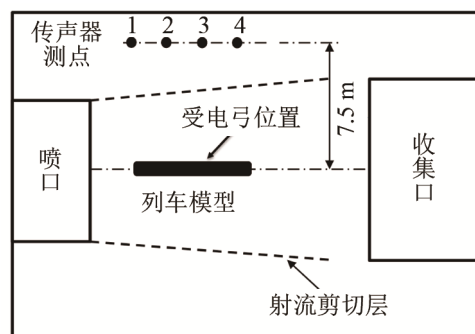


图 2 模型及远场麦克风测点位置
Fig.2 Locations of testing model and far-field microphones

由于高速列车的转向架和车辆连接处也是主要的气动噪声源, 为了重点研究受电弓及导流罩的气动噪声, 设计了全密封状态列车模型。该状态列车不安装转向架, 并将车体和地板之间、车辆连接处的空间全部封闭, 详细的安装与试验方法可参见文献[15]。此状态车体模型产生的噪声很小, 对风洞仅安装地板时背景噪声几乎无影响, 风速为 200 km·h⁻¹ 时远场测点的总声压级如表 1 所示。同时给出测点 3 全密封模型和背景噪声频谱, 如图 3 所示。

表 1 风速为 200 km·h⁻¹ 时远场测点的总声压级
Table 1 Measured overall sound pressure level in the far field at the speed of 200 km·h⁻¹

状态	测点声压级/dB(A)			
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
全密封模型	66.7	66.9	67.0	67.2
空风洞背景噪声	66.8	67.1	67.0	66.9

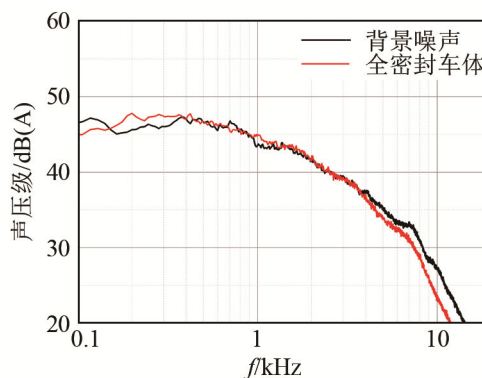


图 3 风洞背景和全密封车体噪声频谱
Fig.3 Noise spectra of wind tunnel background and full-sealed model

采用 Gfai 公司的相位传声器阵列声源识别系统, 具体参数如下: 平面螺旋阵列, 尺寸为 $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m}$; 传感器采用 GRAS 公司 $1/4\text{ in}$ ($1\text{ in}=2.54\text{ cm}$) 阵列传声器, 120 套; 数据采集系统, 120 通道高精度数据采样, 单通道采样率为 192 kHz , 采样时间为 4 s ; 数据处理采用基于波束成型算法的声源识别软件 NoiseImage。

2 不同速度下受电弓气动噪声

2.1 受电弓升弓状态

受电弓是由弓头、支架、支座等直径不同的类圆柱、类方柱钝体组成的复杂结构, 气流流过受电弓后, 在后部形成紊乱的湍流尾迹。图 4 给出在 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 工况下, 全密封模型、全密封模型安装受电弓升弓时, 远场测点 3 的 A 计权噪声频谱。测点 3 为正对受电弓测点, 与测点 1、2 相比可以更好地反映出受电弓的远场噪声特性。测点 3 总声压级为 71.7 dB(A) , 通过与全封闭模型对比, 可以看出缩比模型受电弓远场气动噪声为宽频带噪声, 噪声能量集中在 $300\sim 700\text{ Hz}$ 、 $1.4\sim 7\text{ kHz}$ 两个频段, 而且在 $1.8\sim 4\text{ kHz}$ 之间存在多个峰值。

同时计算受电弓的远场噪声能量与速度次方关系, 次方率 α 由式(1)计算得到^[4]:

$$\alpha = \frac{\Delta L_p}{10 \lg(u_i/u_0)} \quad (1)$$

式中, u_0 为参考试验风速 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, u_i 为实际试验时风速。受电弓升弓状态下远场测点 3 的气动噪声随速度的 6.3 次方增加, 与 Curle 偶极子声源量纲分析得到的 6 次方率^[16]接近, 表明受电弓的气动噪声源为偶极子源。

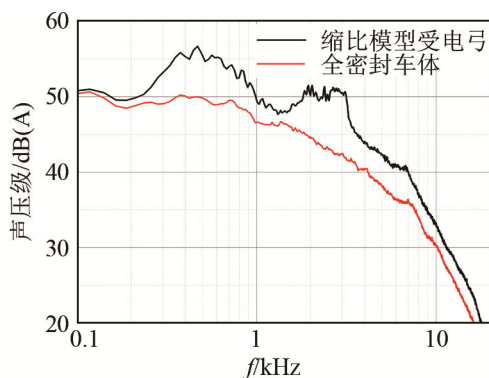


图 4 风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时升弓远场测点 3 气动噪声频谱
Fig.4 Noise spectrum measured by Microphone 3 in pantograph lifted condition at $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

图 5 给出了风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 工况下, 中心频率为 500 Hz 和 2.5 kHz 时的 1/3 倍频程声源分布云

图, 声源识别的动态范围为 0.1 dB(A) (下文相同), 这两个频带对应图 4 中远场测点 3 频谱中两个噪声能量集中分布的频率范围。声源位置已经过声漂移修正^[17], 对应中心频率为 500 Hz 时, 主要噪声源位于受电弓区域后部靠近车体位置, 声源识别最大声压级为 60.11 dB(A) ; 对应中心频率为 2.5 kHz 时, 主要噪声源位置在受电弓弓头、支座后部区域, 最大声压级为 59.5 dB(A) 。

图 6 给出了风速范围为 $200\sim 250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 升弓状态下远场测点 3 的频谱。由图 6 可知, 随着风速的增加, 各个频带的噪声均增大, 其中频率范围在 $300\sim 800\text{ Hz}$ 之间噪声声压级不随风速变化, 仅

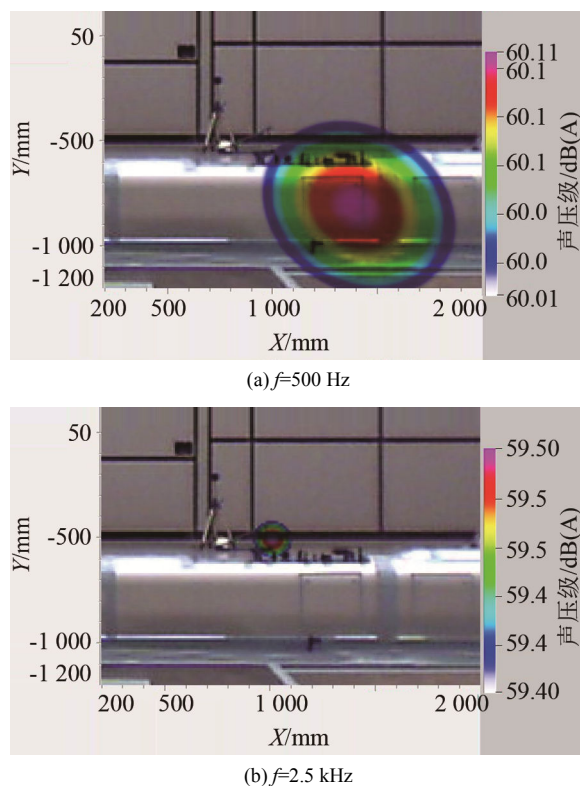


图 5 风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时升弓状态的声源分布(1/3 倍频程)
Fig.5 Noise source locations in pantograph lifted condition at $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

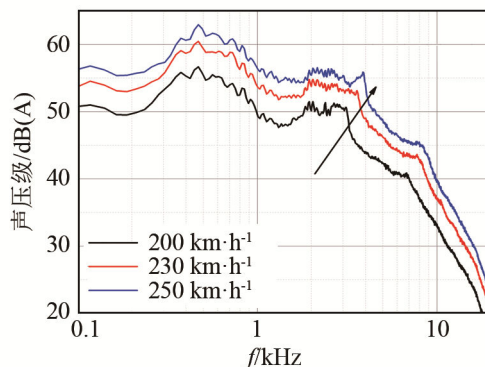


图 6 升弓状态不同风速下风洞测点 3 噪声频谱
Fig.6 Noise spectra measured by Microphone 3 in pantograph lifted condition at different wind speeds

对应幅值增加;频率范围在 1.8~4 kHz 之间时噪声声压级随风速增加,频率范围和对幅值均增大。

2.2 受电弓降弓状态

图 7 给出风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 工况下,全封闭模型、全封闭模型安装受电弓降弓状态测点 3 的噪声频谱。受电弓降弓时远场气动噪声为宽频带噪声,测点 3 的总声压级为 71.5 dB(A) ,噪声能量集中在 $300\sim 800\text{ Hz}$ 、 $1.8\sim 3\text{ kHz}$ 、 $4\sim 6\text{ kHz}$ 三个频段,且在 $1.8\sim 3\text{ kHz}$ 、 $4\sim 6\text{ kHz}$ 范围内存在多个峰值噪声。采用式(1),计算得到受电弓降弓时远场测点 3 的气动噪声能量随风速呈 6.2 次方增加,与升弓状态的风速次方率接近。

图 8 给出了风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 工况下,中心频

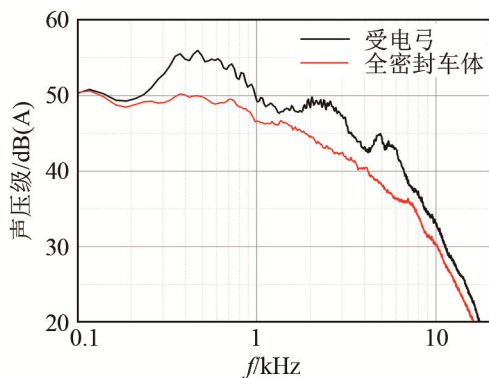
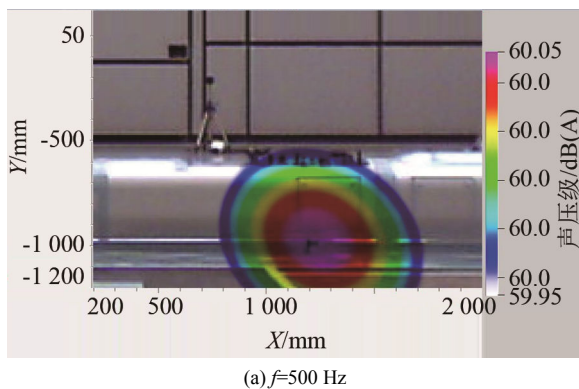
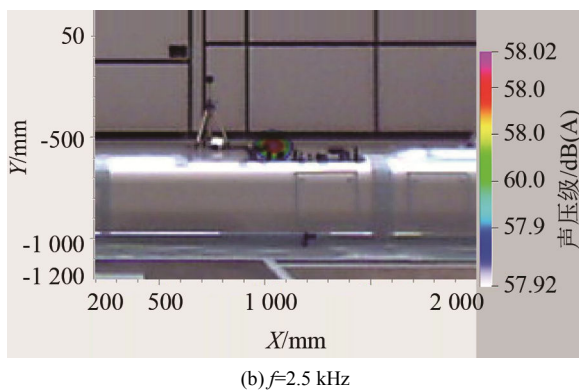


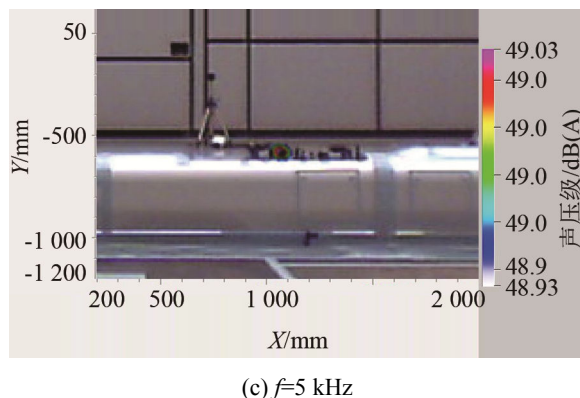
图 7 风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时降弓远场测点 3 气动噪声频谱
Fig.7 Noise spectrum measured by Microphone 3 in pantograph folded condition at $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$



(a) $f=500\text{ Hz}$



(b) $f=2.5\text{ kHz}$



(c) $f=5\text{ kHz}$

图 8 风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时降弓状态声源识别(1/3 倍频程)
Fig.8 Noise source locations in pantograph folded condition at $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

率为 500 Hz 、 2.5 kHz 和 5 kHz 的 1/3 倍频程声源分布云图。对应中心频率 500 Hz 时,主要噪声源位于受电弓区域后部靠近车体位置,相比于升弓状态其位置向车体下方移动,最大声压级为 60.1 dB(A) ;对应中心频率 2.5 kHz 和 5 kHz 时,主要噪声源位置在受电弓弓头和支座后部区域,声源识别的最大声压级分别为 58.0 dB(A) 、 49.0 dB(A) 。

图 9 给出了风速范围为 $200\sim 250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时降弓状态下远场测点 3 的频谱。随着风速的增加,各个频带的噪声声压级均增大,其中频率范围为 $300\sim 800\text{ Hz}$ 、 $1.8\sim 3\text{ kHz}$ 时噪声幅值增加, $300\sim 800\text{ Hz}$ 的噪声频率范围基本不随风速变化;频率范围在 $4\sim 7\text{ kHz}$ 之间的噪声声压级随风速增加,频率范围和对幅值均增大。

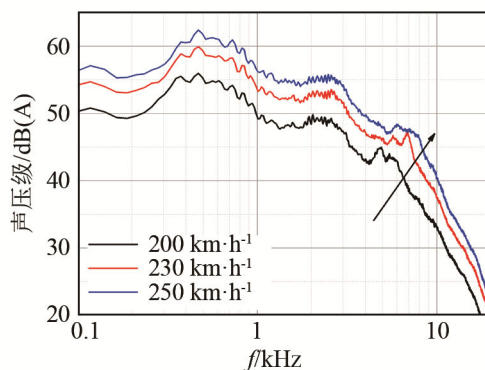


图 9 降弓不同速度下风洞测点 3 噪声频谱
Fig.9 Noise spectra measured by Microphone 3 in pantograph folded condition at different wind speeds

3 导流罩对受电弓气动噪声影响

3.1 导流罩对受电弓升弓影响

表 2 给出了升弓状态不同风速下远场测点 3、4 的远场总声压级对比。不同风速下两种状态远场总声压级差值非常小,在 $0.1\sim 0.5\text{ dB(A)}$ 之间。可知

升弓状态安装导流罩后，对远场总声压级几乎不产生影响。

表 2 升弓状态不同风速远场噪声总声压级
Table 2 Far field overall sound pressure level in the pantograph lifted condition at different wind speeds

风速/ (km·h ⁻¹)	状态	总声压级/dB(A)	
		测点 3	测点 4
200	升弓	71.7	71.0
	导流罩+升弓	71.5	70.9
230	升弓	75.6	74.9
	导流罩+升弓	75.1	74.7
250	升弓	77.8	77.3
	导流罩+升弓	77.5	77.2

图 10 给出了不同风速下测点 3 的噪声频谱，导流罩对 10 kHz 频率以上远场气动噪声能量影响在 0.2 dB 以内，这里给出 100~10 kHz 频带内的 A 计加权线性声压级频谱。安装导流罩后，远场气动噪声能量的频率分布范围与无导流罩相同，为宽频带噪声且在 300~800 Hz、1.4~7 kHz 频段的能量集中。首先，安装导流罩使得 1.4~4 kHz 频段内出现了能量更高的峰值噪声。相比于无导流罩状态，风速在 200 km·h⁻¹ 时 2.2 kHz 频率处的峰值能量增大了 3.7 dB(A)，风速在 230 km·h⁻¹ 时 2.5 kHz 频率处的峰值能量增加了 2.5 dB(A)，风速在 250 km·h⁻¹ 时 2.7 kHz 频率处的幅值能量增加了 1.8 dB(A)。

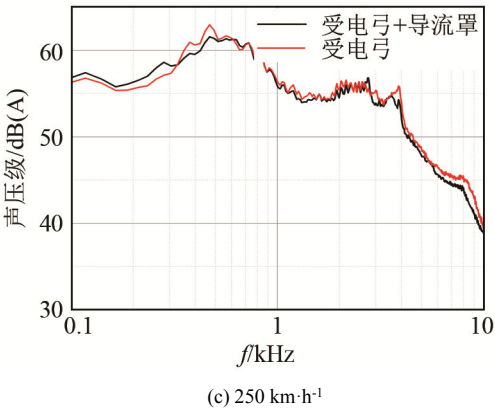
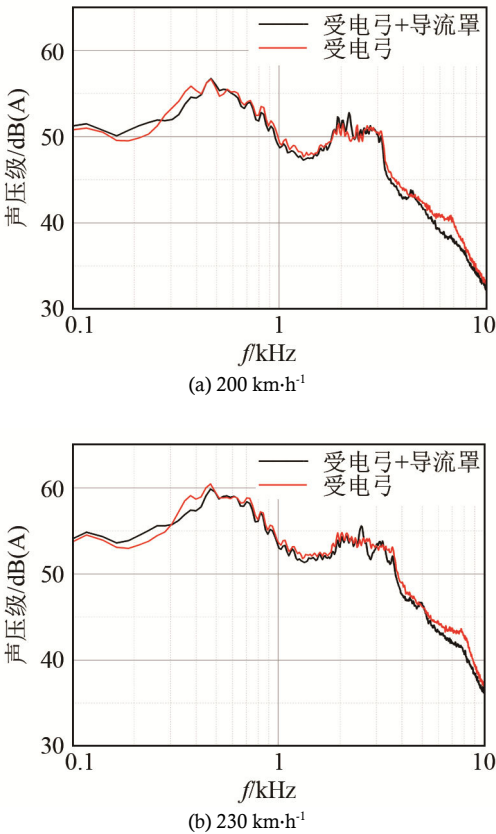


图 10 升弓状态不同风速下测点 3 频谱频谱
Fig.10 Noise spectra measured by Microphone 3 in pantograph lifted condition at different wind speeds

图 11 给出了 200 km·h⁻¹ 的工况下，中心频率为 500 Hz 和 2.5 kHz 的 1/3 倍频程声源分布云图。当中心频率为 500 Hz 时，主要噪声源位置位于受电弓区域后部靠近车体，与无导流罩时基本相同；在中心频率为 2.5 kHz 时，声源识别的最大声压级为 60.7 dB(A)，较无导流罩时的 59.5 dB(A)增加了 1.2 dB(A)，主要声源位置为弓头，较无导流罩状态的主要噪声源位置上移。表明导流罩增大了弓头的涡脱落噪声能量，阵列声源识别与远场测点 3 频谱的结果一致。

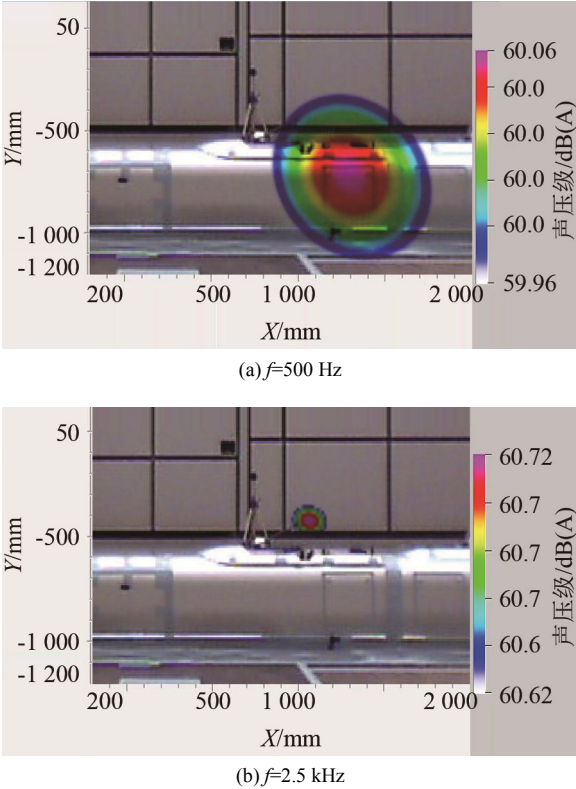


图 11 风速为 200 km·h⁻¹ 时升弓和导流罩的声源分布(1/3 倍频程)
Fig.11 Noise source locations of pantograph and guide cover in pantograph lifted condition at 200 km·h⁻¹

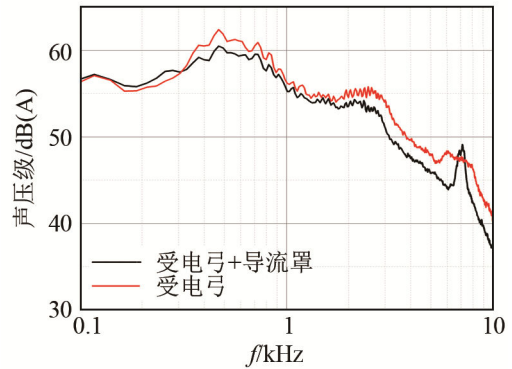
3.2 导流罩对受电弓降弓影响

表 3 给出降弓状态不同风速下,远场测点 3、4 的远场总声压级。安装导流罩使得降弓状态总声压级减小,其中测点 3 在风速 200、230、250 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下总声压级的差值分别为 1.2、1.3、1.2 dB(A) 。

表 3 降弓状态不同风速远场噪声总声压级
Table 3 Far field overall sound pressure level in the pantograph folded condition at different wind speeds

风速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	状态	总声压级/ dB(A)	
		测点 3	测点 4
200	降弓	71.5	71.1
	导流罩+降弓	70.3	70.5
230	降弓	75.2	75.0
	导流罩+降弓	73.9	74.0
250	降弓	77.5	77.1
	导流罩+降弓	76.3	76.3

图 12 给出了降弓和降弓安装导流罩时,不同风速下远场测点 3 的频谱。在降弓状态下安装导流罩后,气动噪声能量的频率分布范围与无导流罩时一致,为宽频带噪声且在 $300\sim 800\text{ Hz}$ 、 $1.8\sim 3\text{ kHz}$ 、 $4\sim 8\text{ kHz}$ 频段内的能量集中。安装导流罩使得 $300\sim 800\text{ Hz}$ 、 $1.8\sim 3\text{ kHz}$ 两个频段内的能量减小;对应于 $4\sim 8\text{ kHz}$ 的高频噪声,在风速 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时峰值能量减小,在 $230\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时峰值大小基本不变,在 $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时峰值能量增加,可知该峰值能



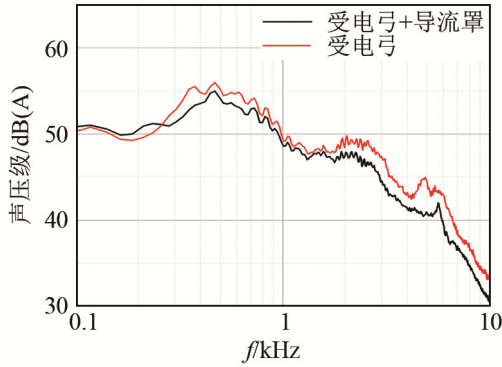
(c) $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

图 12 降弓状态不同风速下测点 3 频谱频谱
Fig.12 Noise spectra measured by Microphone 3 in pantograph folded condition at different wind speeds

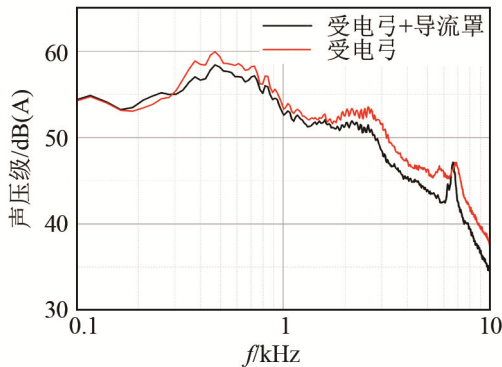
量与气流绕过导流罩后的具体流动结构有关。安装导流罩后远场噪声仅在 300 Hz 以下能量增加。

图 13 给出了风速为 $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的工况下,中心频率为 500 Hz 、 2.5 kHz 和 5 kHz 的 $1/3$ 倍频程声源识别结果。

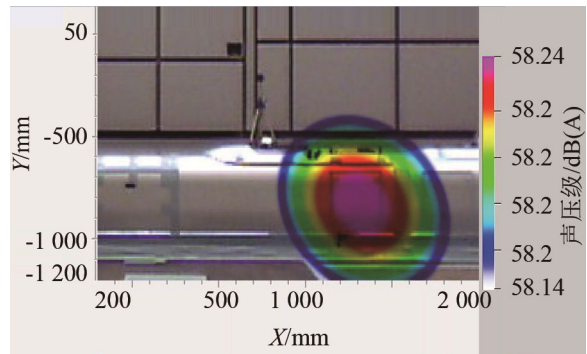
在中心频率为 500 Hz 时,主要噪声源位置位于受电弓区域后部靠近车体,与无导流罩基本相同;在中心频率为 2.5 kHz 时,弓头及支座位置声源识别的最大声压级为 55.8 dB(A) ,较无导流罩时减小了 2.2 dB(A) ;在频率为 5 kHz 时,最大声压级为 45.0 dB(A) ,较无导流罩时减小了 4.0 dB(A) 。声源识别结果表明,导流罩有效地减小了降弓状态弓头



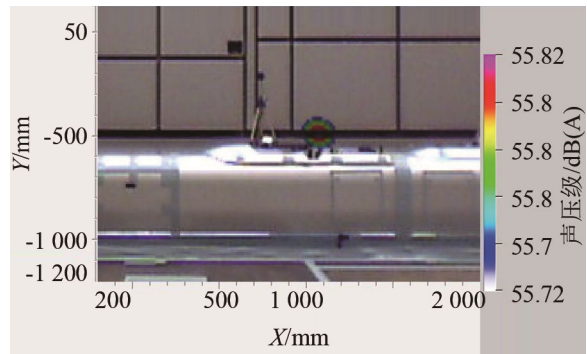
(a) $200\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$



(b) $230\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$



(a) $f=500\text{ Hz}$



(b) $f=2.5\text{ kHz}$

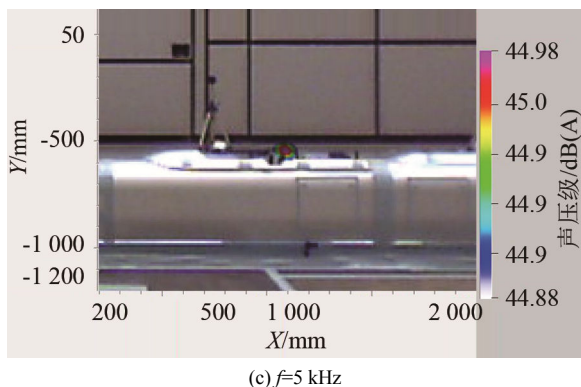


图 13 风速为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下降弓+导流罩声源识别(1/3 倍频程)

Fig.13 Noise source locations of pantograph and guide cover in pantograph folded condition at $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

及支座后部的高频噪声能量。

4 结 论

本文通过对 $1:8$ 导流罩和受电弓模型的声学风洞试验,研究了风速为 200 、 230 、 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 工况下受电弓升弓、降弓状态下的气动噪声频域特征、主要噪声源位置和导流罩对受电弓气动噪声的影响,得到以下结论:

(1) 受电弓在升弓、降弓状态下,气动噪声均为宽频带噪声,噪声能量集中在 $300 \sim 800 \text{ Hz}$ 的中频、 1.4 kHz 以上的中高频和低频;中频噪声源位于受电弓区域后部近车体位置,中高频、高频噪声源对应弓头和支座区域,两种状态下远场噪声能量分别随风速呈 6.3 、 6.2 次方增加。

(2) 风速为 $200 \sim 250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 升弓状态下,安装导流罩后远场总声压级变化很小,但在风速为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, $1/3$ 倍频程中心频率为 2.5 kHz 的声源识别云图中,对应的弓头区域较无导流罩增加 1.2 dB(A) 。

(3) 风速为 $200 \sim 250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 降弓状态下,安装导流罩后远场总声压级减小 $1.2 \sim 1.3 \text{ dB(A)}$,在风速为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,中心频率 2.5 kHz 和 5 kHz 分别对应于弓头和支座后部区域,较无导流罩状态分别减小 2.2 dB(A) 和 4.0 dB(A) 。

参 考 文 献

- [1] THOMPSON D J, IGLESIAS E L, LIU X, et al. Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains[J]. International Journal of Rail Transportation, 2015, 3(3): 119-150.
- [2] LAUTERBACH A, EHRENFRIED K, LOOSE S, et al. Microphone array wind tunnel measurements of Reynolds number effects in high-speed train aeroacoustics[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2012, 11(3): 411-446.
- [3] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 30-41.
TIAN Hongqi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(4): 30-41.
- [4] IGLESIAS E L, THOMPSON D J, SMITH M G. Component-based model to predict aerodynamic noise from high-speed train pantographs[J]. Journal of sound and vibration, 2017, 394: 280-305.
- [5] 李辉, 肖新标, 李志辉, 等. 某型受电弓 300 km/h 速度下气动噪声初步分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(9): 18-22.
LI Hui, XIAO Xinbiao, LI Zhihui, et al. Preliminary investigation into aerodynamic noise of a certain type of pantograph under speed of 300 km/h [J]. Journal of Railway Society, 2016, 38(9): 18-22.
- [6] IKEDA M, SUZUKI M, YOSHIDA K. Study on optimization of panhead shape possessing low noise and stable aerodynamic characteristics[J]. Quarterly Report of RTRI, 2006, 47(2): 72-77.
- [7] SUEKI T, TAKAISHI T, IKEDA M. Application of porous material to reduce aerodynamic sound from bluff bodies[J]. Fluid Dynamic Research, 2010, 42(1): 1-14.
- [8] LIU H, WEI J, QU Z. Prediction of aerodynamic noise reduction by using open-cell metal foam[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(7): 1483-1497.
- [9] MITSUMOTO T, SATO V, IKEDA M. A basic study on aerodynamic noise reduction techniques for a pantograph head using plasma actuators[J]. Quarterly Report of RTRI, 2014, 55(3): 186-189.
- [10] 杨帆, 郑百林, 贺鹏飞. 高速列车集电部气动噪声数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(1): 44-47.
YANG Fan, ZHENG Bailin, HE Pengfei. Numerical simulation on aerodynamic noise of power collection equipment for high-speed trains[J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(1): 44-47.
- [11] HOLMES B S, DIAS J B, JAROUX B A et al. Predicting the wind noise from the pantograph cover of a train[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 24(12): 1307-1319.
- [12] 张亚东, 韩璐, 李明, 等. 高速列车受电弓气动噪声降噪[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 94-101.
ZHANG Yadong, HAN Lu, LI Ming, et al. Reduction of aerodynamic noise of high-speed train pantograph[J]. Journal of Mechanical Engineering, 53(6): 94-101.
- [13] 丁叁叁. 高速列车车体设计关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 72-74.
- [14] YU H H, LI J C, ZHANG H Q. On aerodynamic noises radiated by the pantograph system of high-speed trains[J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 29(3): 399-410.
- [15] 高阳, 王毅刚, 王金田, 等. 声学风洞中的高速列车模型气动噪声试验研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 506-510.
GAO Yang, WANG Yigang, WANG Jintian, et al. Testing study of aerodynamic noise for high speed train model in aero-acoustic wind tunnel[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 506-510.
- [16] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1995, A231: 505-514.
- [17] 沈哲, 王毅刚, 杨志刚, 等. 基于剪切层扇形分层模型的射流声传播分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 596-601.
SHEN Zhe, WANG Yigang, YANG Zhigang, et al. Acoustic propagation analysis of jet flow based on stratified fan shaped shear layer model[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(4): 596-601.