

声学风洞中的高速列车模型气动噪声试验研究

高 阳¹, 王毅刚², 王金田¹, 沈 哲², 杨志刚²

(1. 高速列车系统集成国家工程实验室, 长春 130062; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 研究借助气动-声学风洞试验平台, 首先针对某高速列车的 1:8 缩尺比例的三车编组模型建立了气动噪声试验方法和突显不同的噪声源的模型处理方法, 并结合流场外自由场传声器和传声器阵列的测量结果, 分析了模型上的主要噪声源特性及对整个模型的贡献量大小。研究表明: 转向架和受电弓噪声是模型的最主要噪声源, 其次是车连接部位间隙, 再次是鼻尖和排障器, 最后是尾车, 同时, 并给出了这些噪声源的特性, 这对于认识高速列车气动噪声和改善设计有重要的参考价值。研究也说明所提出的试验研究方法是一种研究高速列车气动噪声较为有效的方法。

关键词: 高速列车模型; 气动噪声; 气动-声学风洞

中图分类号: TU462

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-06-0506-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.06.013

Testing study of aerodynamic noise for high speed train model in aero-acoustic wind tunnel

GAO Yang¹, WANG Yi-gang², WANG Jin-tian¹, SHEN Zhe², YANG Zhi-gang²

(1. High-Speed Train System Integration National Engineering Laboratory, Changchun 130062, China;

2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A testing method of aerodynamic noise for 1:8 scale high-speed train model in an aero-acoustic wind tunnel and the treatment way to highlight the different noise sources of the model were established in this study. The characteristics of the major noise sources and its contribution to the model were analyzed according to the measurement results from the microphones and microphone array out of the flow field. The results showed that the bogie and pantograph are the major noise sources, followed by the gap between the two carriages, then the tip and cowcatcher, and finally the tail car. Meanwhile, the characteristics of the noise sources were put forward, which is important to understand the aerodynamic noise and improve the design of high speed train. The results also demonstrated that the proposed testing method was effective for studying the aerodynamic noise of high speed train.

Keywords: high-speed train model; aerodynamic noise; aero-acoustic wind tunnel

0 引言

研究表明高速列车的气动噪声随车速的 6 次方增长, 而动力系统噪声和轮轨等机械噪声仅随车速的 1 次方和 3 次方增长^[1-3]。目前, 高速列车的行驶速度普遍超过 250km/h, 气动噪声因其随车速的增长率高而在所有噪声成分中逐渐占据主导地位, 影响车内乘坐的舒适性和行驶沿线的安静环境。国外对高速列车的气动噪声研究也仅日本、德国、法国等几个高速列车发展较早、较快的国家, 其主要研究手段是风洞试验和实车测量^[4-8]。近年来, 也开始利用数值计算手段开展研究, 但计算结果的准确性

还有待验证。我国高速列车近年来发展迅速, 但气动噪声的研究尚属初级阶段。因此, 本文拟利用气动-声学风洞的试验平台, 结合某高速列车的 1:8 模型, 建立主要噪声源的试验研究方法, 并在此基础上试验研究主要噪声源及其特性。

1 试验方法

1.1 试验平台

试验在某气动-声学风洞试验平台上进行。试验段尺寸为 27m×17m×12m, 喷口面积为 27m², 试验段沿射流方向有效长度 15m。试验段按照半消声室设计, 来自于风机的噪声及流道内的气动噪声主要通过多级消声处理得到控制, 致使试验段的背景噪声满足高速列车气动噪声的试验需求。列车模型为某高速列车的 1:8 缩尺模型, 由头车、中车和尾车组成, 包含了鼻尖和排障器、头车曲线部位、转

收稿日期: 2013-06-21; 修回日期: 2013-09-23

基金项目: 国家 863 计划资助(2011AA11A103-2-1)和上海市科学技术委员会资助(11DZ2260400)项目。

作者简介: 高阳(1980-), 男, 吉林人, 硕士, 工程师, 研究方向为高速列车噪声与振动控制。

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

向架、车连接部位、空调导流罩、受电弓和导流罩及尾车的细节结构，门窗等细节结构不考虑，这些位置为光滑平面。每节车有一圆柱形支撑杆，安装于专门设计的支撑底板上，列车纵向对称面和风洞中垂面重合，如图 1 所示。



图 1 声学风洞试验段及高速列车模型

Fig.1 Wind tunnel test section and the model of the high-speed train

1.2 试验模型处理方法

高速列车模型的主要噪声源分布于头车的鼻尖处(含排障器)、转向架、车连接部位、受电弓导流罩及尾车气流分离位置等。流场外传声器测量的是所有这些噪声源产生的噪声在测量点的叠加，传声器阵列难以区分得较近的鼻尖和排障器与转向架(相距小于 0.5m)的噪声。所以，为了区分不同位置的噪声源，试验中采用多种模型结构形式。一是将车身和地板间的空间全部封闭(简称全封闭状态)，此状态不含受电弓和导流罩，只有空调导流罩。试验研究表明，此状态模型噪声很小，对风洞仅安装底板时的背景噪声几乎无影响，如表 1 所示，为此将此状态作为基本状态，后续比较区分其它部位的噪声；二是将列车底部平滑处理，即将转向架拿掉，其空腔用木板封堵，用胶布带光滑处理，使整个车底部为一光滑平顺的平面(模型支撑杆除外)，产生的噪声变小，突出鼻尖和排障器位置及车连接部位噪声(简称半封闭状态)；三是分别将转向架、轨道安装在模型上，比较测量这些位置产生的噪声(简称含转向架状态)；四是在含转向架状态基础上在中间车上表面安装受电弓(升弓)和导流罩，比较测量这些位置产生的噪声(简称含受电弓状态)。

表 1 风速 250km/h 时的总声压级

Table 1 The total sound pressure level when the wind speed 250 km/h

状 态	测点声压级 dB(A)			
	1	2	3	4
全封闭状态	73.2	73.3	73.4	73.6
仅支撑地板	73.1	73.3	73.5	73.7

1.3 噪声测量方法

本次试验基于列车模型几个主要噪声源的位

置特点，希望得到其噪声的特性和分布。采用试验段流场外布置自由场传声器方式测量模型气动噪声源向外的声辐射，以了解列车模型所有噪声源对外的辐射特性，通过不同试验状态比较分析部分噪声源的特性；同时，在试验段流场外布置声源识别设备(36 通道传声器阵列)，对于细长体模型的不同噪声源分布，阵列在不同位置对模型上的噪声源进行识别。图 2 给出了传声器和传声器阵列的分布位置。其中四个传声器间距 3m，离地高度 0.8m。

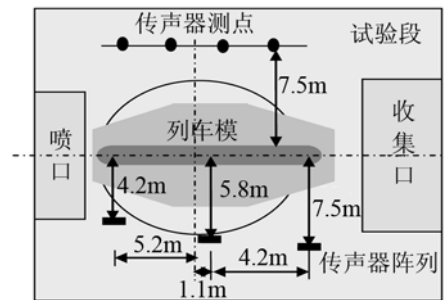


图 2 风洞试验段测点分布

Fig.2 The distribution of the measuring points in wind tunnel test section

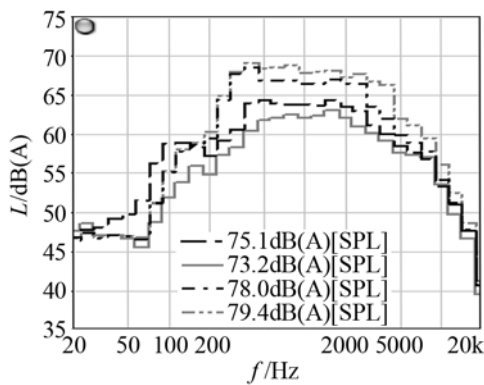
2 测量结果及分析

2.1 流场外传声器的测量结果及分析

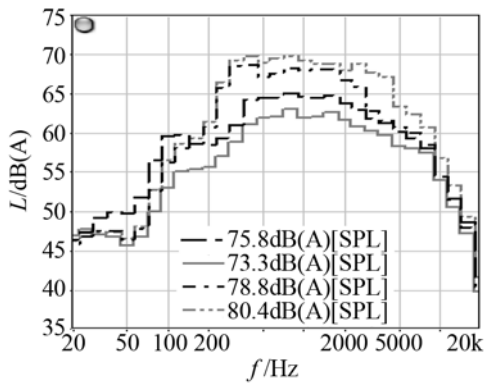
2.1.1 四种不同状态

试验中分别对风洞试验段内的不同模型结构进行流场外噪声测量。图 3 为图 2 中四个测点(靠近喷口测点为测点 1，依此类推，向收集口方向的测点分别为测点 2~4)得到的 A 计权的 1/3 倍频程声压级。这些结构包括：底板+全封闭状态(图中实线)，底板+半封闭状态(图中虚线)，底板+含转向架状态(图中点划线)和底板+含受电弓状态(图中双点划线)。针对目前高速列车行驶的速度，试验选取了 150km/h 的风速进行了试验测量。通过比较可明显分析出不同噪声源的主要特征。

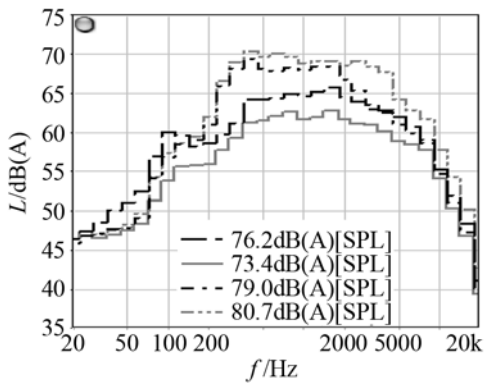
从图 3 可以看出，四个测点表现出近似相同的不同模型处理状态下的噪声频谱特性。同全封闭状态相比，半封闭状态的主要噪声来自于头车和尾车以及分布于三辆车下的三个支撑杆。可以看出在中心频率 100Hz 附近噪声较大，在 300Hz~5kHz 噪声级更高，频带较宽。需要结合传声器阵列结果分辨头尾车的噪声特性；在此基础上再与含转向架状态比较发现，转向架位置产生的噪声主要能量集中在 200Hz~3kHz，而且远大于头车和尾车产生的噪声，尤其在 315 Hz 和 400 Hz 出现峰值，表现出低中频噪声特性；在安装受电弓和导流罩之后，整个模型



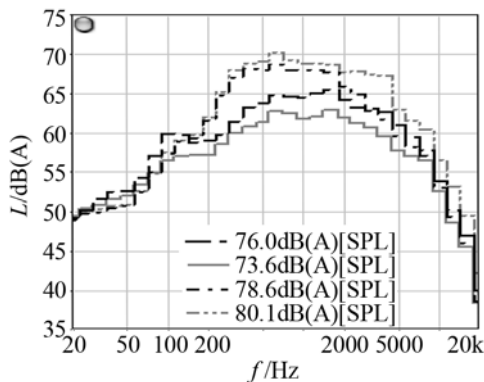
(a) 测点 1 的声压谱



(b) 测点 2 的声压谱



(c) 测点 3 的声压谱



(d) 测点 4 的声压谱

图 3 4 个测点 1/3 倍频程 A 计权谱

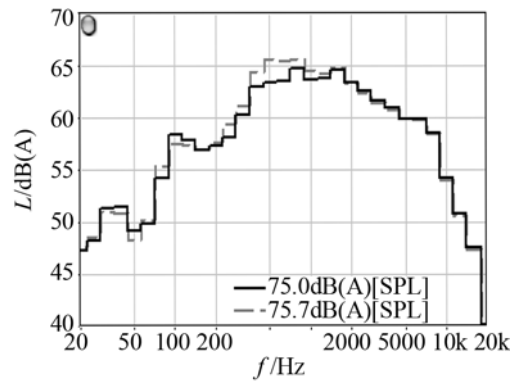
Fig.3 A-weighted sound pressure level at 1/3 octave band for 4 measuring points

的噪声进一步增加，噪声能量主要集中于在 200Hz~5 kHz 之间较宽的频带内。在对转向架噪声有叠加外，很明显在 2~5 kHz 的噪声是有受电弓和导流罩产生的，受电弓和导流罩是模型的又一主要噪声源。

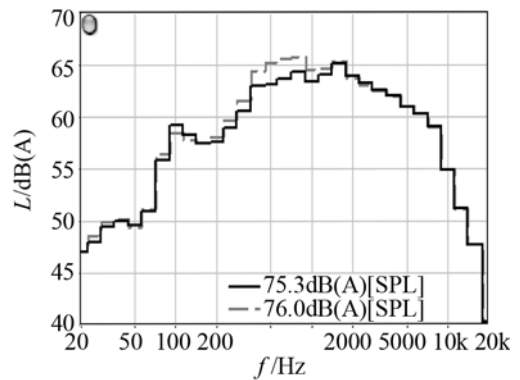
2.1.2 车连接部位的噪声特性

试验通过半封闭状态和在该状态下将两处车连接部位的实际结构复原，比较分析车连接部位的噪声特性，见图 4，图中虚线表示复原后，实线表示复原前。

从图 4 可看出，车连接部位也产生一定的噪声，噪声能量主要集中在 250Hz~1kHz 范围内，其产生的噪声至少和半封闭状态相当。



(a) 测点 2 的声压谱



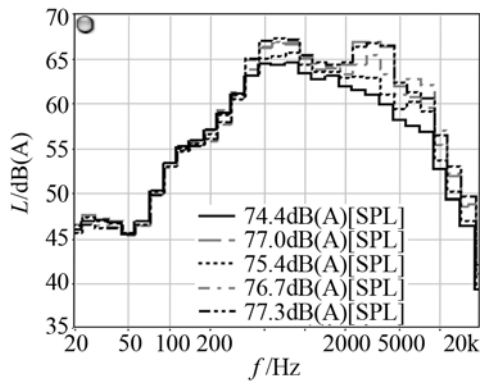
(b) 测点 3 的声压谱

图 4 1/3 倍频程 A 计权谱

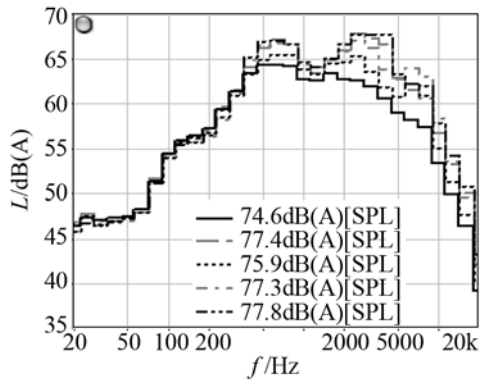
Fig.4 A-weighted sound pressure level at 1/3 octave band

2.1.3 导流罩+受电弓升弓、导流罩+受电弓降弓

为了了解受电弓、导流罩及升弓和降弓时的噪声特性，采用半封闭状态的列车模型进行测量，如图 5 所示测点 2 和测点 3 在风速为 250km/h 时的测量结果。先安装导流罩(图中实线)，再加上受电弓升弓状态(图中虚线)，此后是受电弓降弓状态(图中点划线)；然后将导流罩去掉的受电弓降弓状态(图中点划线)，最后是将导流罩去掉的受电升降弓状态(图中双点划线)，以此来对比分析各自的噪声特性。



(a) 测点 2 的声压谱



(b) 测点 3 的声压谱

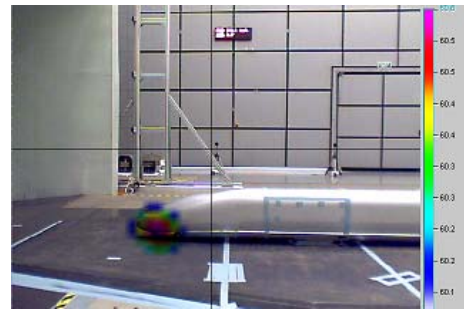
图 5 1/3 倍频程 A 计权谱

Fig.5 A-weighted sound pressure level at 1/3 octave band

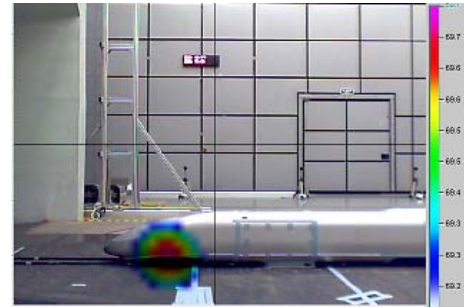
从试验结果可以看出，受电弓的存在导致 500~800Hz 和 2~4kHz 及 6kHz 附近噪声能量较大，降弓状态比升弓状态噪声低，频带略窄。若与图 3 的转向架状态比较，则转向架在 500~800Hz 的范围噪声略高于受电弓，但两者的叠加使得模型在该频段噪声较高，但在 2~4 kHz 的范围，受电弓噪声频带宽，总噪声能量大。从图中还可看出，带导流罩的降弓状态明显比不带导流罩的降弓状态几乎在整个频段噪声级都有一定的降低，说明整流罩在降弓状态下降低噪声的效果明显。带导流罩的升弓状态和不带导流罩的升弓状态相比，在低中频几乎无降噪效果，只是在高频约 500Hz 以上有一定的降噪量，但效果不明显，说明整流罩在升弓状态下降低噪声的效果不明显。

2.2 流场外传声器阵列的测量结果及分析

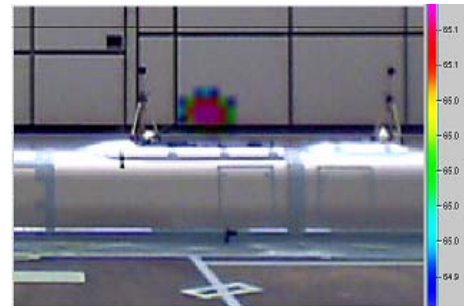
流场外传声器测量结果由于噪声源多，不能完全分辨各自噪声源的特性，为此，试验中采用了声源识别设备对几个主要的噪声源位置进行定位和测量。图 6 为不同位置的噪声源及云图举例。图 6(a)为半封闭状态下测得的鼻尖和排障器位置的噪声，由于云图位置靠近排障器，所以，此处的噪声应以排障器产生的为主；图 6(b)为转向架状态下测



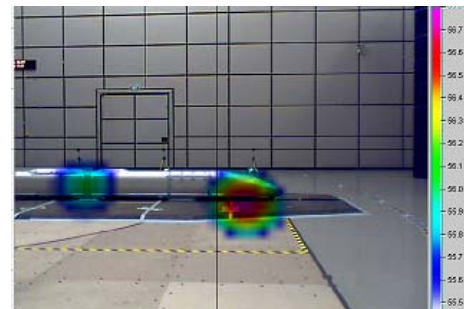
(a) 噪声源位于鼻尖和排障器处(1kHz)



(b) 噪声源位于转向架处(1kHz)



(c) 噪声源位于受电弓上部(2.5kHz)



(d) 噪声源位于尾车转向架附近(2kHz)

图 6 模型上的噪声源位置

Fig.6 Noise source location on the model

得的转向架位置的噪声；图 6(c)为全封闭状态下测得的受电弓升弓位置的噪声；图 6(d)为转向架状态下测得的尾车位置的噪声，云图靠近转向架，说明转向架对尾车的噪声贡献量大。

图 7 为利用传声器阵列按照 1/3 倍频程规律测量的不同噪声源附近的噪声频谱。由于传声器阵列动态范围的限制，各噪声源只能给出较高噪声级时的频率特性。对于鼻尖和排障器噪声主要噪声能量

集中在 630 Hz~2.5 kHz, 和图 3 的流场外测量结果比较, 出现在 1.6 kHz 处的峰值应为模型下方支撑杆产生, 而在 630Hz 附近的峰值应是鼻尖和排障器产生的。而尾车处的噪声还是以转向架处噪声为主, 气流在尾车处的分离及不稳定流动产生的噪声次之。对转向架噪声而言和图 3 的结果一致。对于受电弓而言, 由于是全封闭状态, 噪声级偏低, 没有捕捉到其它频段上的噪声, 只捕捉到了高频噪声, 说明受电弓噪声高频能量较强。

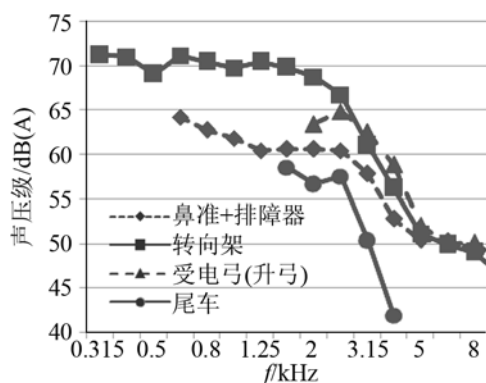


图7 传声器阵列测量的噪声源附近的噪声谱

Fig.7 The noise spectrum at the location near the noise source measured by microphone array

3 总结

本研究借助气动-声学风洞试验平台, 对某高速列车的 1:8 缩尺比例的三车编组模型的气动噪声特性进行了试验研究。研究首先针对列车模型及噪声源位置特点, 设计了不同的模型结构处理来突显不同的噪声源, 并在流场外布置自由场传声器和声源识别的传声器阵列设备获取模型噪声源对外界的声辐射信息以及噪声源的信息, 分析模型上的主要噪声源特性, 这些研究首先是对试验方法的探索, 其次是对高速列车模型进行气动噪声试验测量分析。研究结果表明:

(1) 模型的主要噪声源分别分布于头车的鼻尖和排障器、不同车体下的转向架、车连接位置间隙、受电弓和导流罩以及尾车的转向架位置。就该模型的噪声源而言, 转向架和受电弓噪声是模型的最主

要噪声源, 噪声水平高于其它噪声, 其次是车连接部位间隙, 再次是鼻尖和转向架, 最后是尾车;

(2) 鼻尖和排障器噪声主要噪声能量集中在 630 Hz~2.5 kHz; 转向架噪声主要能量集中在 200 Hz~3 kHz, 尤其在 315 Hz 和 400 Hz 出现峰值; 受电弓的存在导致 500~800Hz 和 2~4kHz 及 6kHz 附近噪声能量较大; 车连接部位产生的噪声能量主要集中在 250Hz~1kHz 范围内。同时说明受电弓的导流罩对降弓状态有一定的降噪作用, 而对升弓作用不明显, 因此, 其设计需要进一步改善。上述噪声源频率特性可以依据相似准则, 推算到实车上, 即模型上各噪声源对应的频率除以 8 即为实车上对应噪声源的频率, 但其量值大小不同, 其推算方法还有待进一步发展声学相似理论。

上述研究结果说明本文形成的试验测量方法, 能够较有效地了解噪声源特性, 获得了不同噪声源产生噪声的能力大小及其频谱特性, 研究对认识该列车的气动噪声特性, 并以此指导改善设计有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] King W F, Bechert D. Aerodynamic noise generated by high speed trains[J]. Noise Control Engineering, 1979, 13: 13-23.
- [2] Nagakura K. Localization of aerodynamic noise sources of Shinkansen trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 547-556.
- [3] Nagakura Kiyoshi. The methods of analyzing Shinkansen noise. Railway[R]. Technical Research Institute, Quarterly Reports, 1996, 37: 210-215.
- [4] Nagakura Kiyoshi. Method of analyzing the wind tunnel test data measured with directional microphone systems[R]. QR of RTRI, 2001, 42: 104-109.
- [5] Hoglzl G, Fodiman P, Schmidz K P, et al. localized sound sources on the high speed vehicles ICE, TGV-A and TR07[C]// 1994 Internoise, Yokohama, Japan, August, 1994.
- [6] Nagakura K, Moritoh Y, Zenda Y et al. Aerodynamic noise of MAGLEV cars[C]// 1994 Internoise, Yokohama, Japan, August.
- [7] Tsuda H, Kimata M, Sawada H. Prediction of the Shinkansen noise[C]// 1994 Internoise, Yokohama, Japan, August, 1994.
- [8] Kawahara M, Hotta H, Hiroe M, et al. Source identification of high-speed train noise by sound intensity[C]// 1997, CRR97, Firenze, November, 1997.