

# 高速列车转向架舱对转向架区域流场与气动噪声影响

朱剑月<sup>1,2</sup>, 任利惠<sup>1</sup>, 雷震宇<sup>1</sup>

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

**摘要:** 根据涡声理论和声比拟方法, 数值模拟了高速列车转向架简化模型的流场与气动噪声特性, 分析了转向架舱对转向架流动与气动噪声性能的影响. 结果表明: 在单独转向架与转向架位于转向架舱内 2 种工况下, 几何体近壁流场内形成的体偶极子声源为近场四极子噪声的主要声源, 转向架表面压力脉动产生的面偶极子声源为声辐射主要声源; 与单独转向架相比, 转向架舱改变了转向架流动特性与声辐射指向性, 削弱了转向架所产生气动噪声的强度, 但转向架舱后壁会产生较大气动噪声.

**关键词:** 铁路噪声; 简化高速列车转向架; 转向架舱; 流体特性; 气动噪声预测

**中图分类号:** U270.1

**文献标志码:** A

## Effect of Bogie Cavity on Flow and Flow-induced Noise Behavior Around High-speed Train Bogie Region

ZHU Jianyue<sup>1,2</sup>, REN Lihui<sup>1</sup>, LEI Zhenyu<sup>1</sup>

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The behaviors of flow and aerodynamic noise produced around a high-speed train bogie are studied numerically at a scaled model based on the theory of vortex sound and the acoustic analogy method in this paper. The effect of bogie cavity on the flow and flow-induced noise performance is investigated. Results show that for isolated bogie and bogie-inside-cavity cases, the volume dipole is the predominate source of near-field quadrupole noise generated in the wake region close to the geometries. Moreover, as the main aerodynamic noise source for far-field noise radiation, the surface dipole noise is produced from the pressure fluctuation on the wall surfaces around the bogie areas. Compared with the isolated bogie configuration, the bogie

cavity changes the flow around the bogie for the bogie-inside-cavity case and consequently the directivity of the noise generated from the bogie wall surfaces is altered and the radiated aerodynamic noise level is reduced. However, the strong noise is generated on the rear wall of the bogie cavity.

**Key words:** railway noise; simplified high-speed train bogie; bogie cavity; flow behavior; aerodynamic noise prediction

当高速列车运行速度超过  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 气动噪声将占据主导地位<sup>[1-2]</sup>. 研究表明, 转向架部位存在着表面结构变化的不连续性, 气流流经时在该部位产生流动分离和较强的流体相互作用, 从而形成气动噪声<sup>[2-3]</sup>. 已有高速列车转向架部位气动噪声研究多采用现场和风洞测试方法. Fremion 等<sup>[4]</sup> 对法国高速列车(TGV)转向架和车辆连接部位的气动噪声源特性进行了现场测试, 发现转向架区域噪声由多种非相干声源组成, 形成机理复杂. Noh 等<sup>[5]</sup> 对不同在线运行速度的高速列车采用声阵列与波束成形技术进行测试, 获得了各主要气动噪声源的贡献量及频率特性. 随着计算能力的提高, 很多研究采用数值方法模拟分析了高速列车整车和各关键部位的气动噪声特性. 杜健等<sup>[6]</sup> 对高速列车受电弓气动噪声的计算结果表明, 声辐射具有指向性并存在主频, 并认为受电弓顶部横梁是诱发气动噪声的主要因素. 张亚东等<sup>[7]</sup> 建立了细化转向架结构的列车模型, 数值计算了远场气动噪声, 并分析了转向架舱内各主要部件的气动力性能以及转向架的速度场与气动噪声源特性. Zhu 等<sup>[8]</sup> 考虑转向架舱外的高速列车车轮部分直接受到来流冲击, 分析了单独轮对气动噪声的形成机理及辐射特性. 由于高速列车结构复杂, 已有研究多采用非结构化网格进行流场计算, 然后根据声比拟方法计算远场气动噪声, 探讨时域与

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 上海市浦江人才计划(17PJ1409300); 国家自然科学基金(11772230); 牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1804); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120170247)

第一作者: 朱剑月(1973—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为高速列车空气动力学与气动噪声等.

E-mail: zhujianyue@tongji.edu.cn

频域内气动噪声辐射特性及变化规律. 声比拟方法进行气动噪声预测时,无法深入理解流体流动发声机理. 为了进一步分析转向架区域各结构部件间流体相互作用与气动噪声产生机理,本文结合涡声理论和 Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H)声比拟方法,分析高速列车转向架舱结构对转向架区域流场与气动噪声特性的影响,为研究该区域气动噪声控制的有效措施建立理论基础.

## 1 气动噪声预测

高速列车周围流动处于低马赫数区域,几何体结构表面压力脉动产生的面偶极子声源是流动诱发噪声的主要声源,可以根据不可压缩流体进行计算<sup>[9]</sup>. 采用开源软件 OpenFOAM 求解流体动力学控制方程,空间和时间离散均采用二阶精度格式. 数值模拟采用基于 Spalart-Allmaras 湍流模型的延迟分离涡(DDES)模型. 对于 DDES 模型,在固体表面附近的边界层区域内采用雷诺平均模型求解流场,而在流动分离区域内应用大涡模拟模型进行计算流体力学(CFD)数值计算<sup>[10]</sup>.

根据声比拟方法,近场流体计算结果将为远场声学预测提供声源数据. 假设流场参数为广义函数, Ffowcs-Williams 等<sup>[11]</sup>得出了广义波传播方程,如下所示:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t} ((\rho_0 v_n + \rho(u_n - v_n))\delta(f)) - \frac{\partial}{\partial x_i} ((P_{ij}n_j + \rho u_i(u_n - v_n))\delta(f)) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (T_{ij}H(f)) \quad (1)$$

式中: $c_0$  为周围无扰动时声在空气中的传播速度; $p'$  为远场声压; $\rho$  为空气密度, $\rho_0$  为静止流场的空气密度; $u_n$  和  $v_n$  为垂直于固体表面的流体和固体表面速度分量; $u_i$  为  $i$  方向上的流体表面速度分量; $\delta(f)$  为 Dirac delta 函数; $x_i$  或  $x_j$  为笛卡尔坐标系的 3 个方向; $P_{ij}$  为可压缩应力张量; $n_j$  为对应于单位法向量的分量; $T_{ij}$  为 Lighthill 湍流应力张量; $H(f)$  为 Heaviside 函数. Brentner 等<sup>[12]</sup>对方程(1)进行了数值求解.

声比拟方法无法深入理解流动发声机理,涡声理论则揭示了流体自由湍流运动诱导噪声的形成机理<sup>[13-14]</sup>,对于等熵低速流动,涡声方程可以表示为

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \nabla \cdot [\rho_0 (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v})] + \nabla^2 \left( \frac{1}{2} \rho_0 |\boldsymbol{v}|^2 \right) \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 、 $\boldsymbol{v}$  分别为涡矢量与速度矢量, $(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v})$  为 Lamb 矢量. 方程右端第 1 项表示声源来自于涡线在速度场中的拉伸变形,为体偶极子声源;方程右端第 2 项为流体动能分布不均匀形成的声源,通常为体四极子声源. 对于低马赫数下流动,涡声方程中由体偶极子和体四极子组成的声源项在数学上近似于声比拟方法中 Lighthill 四极子声源项.

## 2 转向架区域计算模型

高速列车转向架区域 1:10 缩比模型如图 1 所示,图 1a 为单独转向架模型(工况 1),图 1b 为转向架位于转向架舱内模型(工况 2). 一般认为转向架结构位于转向架舱外部分对转向架区域流场影响较大<sup>[2]</sup>,故对转向架内部结构进行了简化,忽略两轮轴间各部件. 由于转向架区域结构模型沿展向对称,故车体纵向对称面上流场作用的随机性影响较小,为缓解对计算资源的要求,采用展向半车模型进行数值模拟<sup>[15]</sup>. 计算区域采用全结构化网格划分,边界层内第 1 层网格至几何体固体表面距离为  $1 \times 10^{-5}$  m,并沿着壁面法向量方向以 1.1 的增长率向外拓展,使得  $y^+$  (第 1 层网格质心到壁面的量纲一距离)的最大值不超过 1. 各计算区域内共生成  $1.46 \times 10^7$  个六面体网格(工况 1)和  $3.65 \times 10^7$  个六面体网格(工况 2). 计算区域的边界条件设置如下:来流设置为低湍流均匀流( $U_\infty = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),顶面、底面与两侧面均设为对称面(相当于剪切为零的滑移壁面),出口设为压力出口,几何体固体表面定义为静态无滑移壁面. 数值仿真时,所取时间步长确保 Courant-Friedrichs-Lewy 数在大部分计算区域内小于 1 而在整个计算区域内的最大值不超过 2.

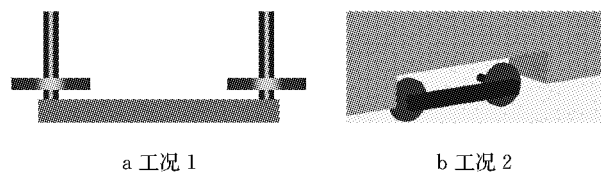


图 1 转向架区域缩比模型  
Fig. 1 Scaled model of the bogie region

## 3 瞬态流场分析

为理解转向架周围流场特性及其对气动噪声的影响,对上述 2 种工况下计算结果中转向架物面附近流场的  $Q$  准则等值面与涡量场进行分析,普遍认为湍流涡生成集中与发展剧烈部位会成为气动噪

声源.

单独转向架工况流场中物面附近的湍流涡结构如图 2 所示. 采用  $Q$  准则显示  $\alpha = 25$  的等值面 ( $\alpha = Q/(U_\infty/D)^2$ , 其中  $Q$  为速度梯度张量第二不变量,  $D$  为车轮直径,  $U_\infty$  为来流速度). 从图 2a 可以发现: 流体在前轮对车轮前端边缘分离后又黏附在车轮外侧面, 形成沿车轮前缘呈月牙形状的分流泡, 随后马蹄涡在车轮表面上产生并沿下游传播; 同样, 流动在转向架构架端部产生分离后, 不同尺度的湍流涡沿着构架表面向下游传播, 最后均合并入后轮对尾流中. 由图 2b 可见: 流动分离发生在前轮对和构架前缘, 前轮对车轴顶部生成了准二维展向涡, 随着涡脱落沿下游发展成为流向涡; 在轮对与构架联结区域, 车轴尾流涡与车轮以及构架表面产生的涡相互作用, 形成了具有较强湍流度的湍流涡结构, 使得转向架上游轮对尾流由不同尺度与强度的湍流涡组成, 这些湍流涡向下游传播, 与转向架下游几何体产生流动冲击作用, 导致后轮对车轴尾流内大尺度相干涡结构明显减少而发展成大量具有不同方向的小尺度涡结构. 图 3 为几何体周围的局部流线图. 从图 3a 可以发现, 车轮两侧边缘发生流动分离后, 剪切层离开车轮表面, 转捩后的湍流克服逆压梯度的影响, 发生流动再附, 在车轮侧面形成分离泡. 从图 3b 可以看出, 流体在车轴顶部与底部分离点下游邻近区域生成了沿轮轴轴向的准二维展向涡, 并逐渐发展成规则旋涡脱落后向下游传播.

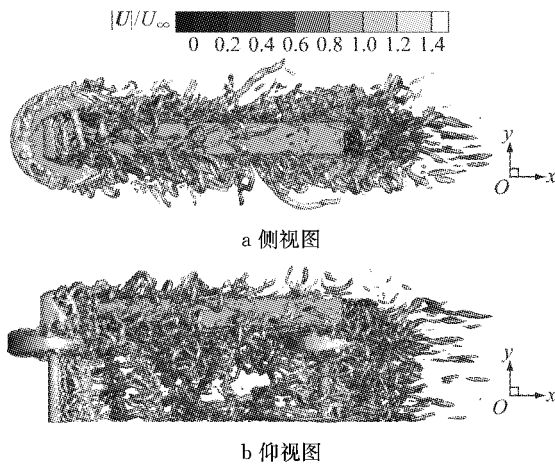
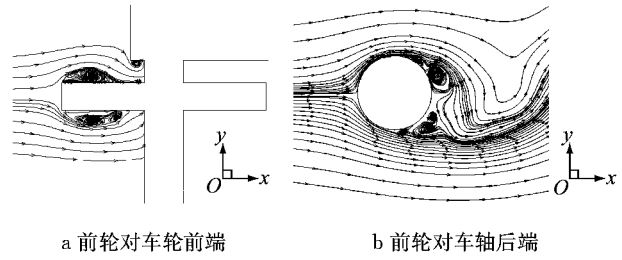


图 2  $Q$  准则显示的转向架物面附近涡结构(工况 1)  
Fig.2 Iso-surface of instantaneous normalized  $Q$ -criterion (case 1)

转向架位于转向架舱内的工况中转向架物面附近的湍流涡结构如图 4 所示. 采用  $Q$  准则显示  $\alpha = 25$  的等值面. 从图 4a 可以发现, 由于受转向架舱前端分离的剪切层流动的影响, 前轮对和转向架舱顶壁



a 前轮对车轮前端 b 前轮对车轴后端  
图 3 局部流线(工况 1)  
Fig.3 Local streamline (case 1)

之间产生了较强的流体相互作用, 形成大量不规则湍流涡并沿着转向架舱顶壁向下游传播. 由图 4b 可见, 流体在转向架舱端部分离后, 与转向架前轮对和构架发生较强的相互作用, 形成不同尺度的涡结构, 由于该区域来流湍流度较高, 与单独转向架工况相比, 前轮对尾流内大尺度相干涡结构已不出现. 转向架舱上游部位产生的涡向下游传播, 与转向架后轮对和构架后端进行流动作用后产生尾涡, 进而撞击转向架舱后壁面, 形成较多高湍流度涡结构并向车体下游传播.

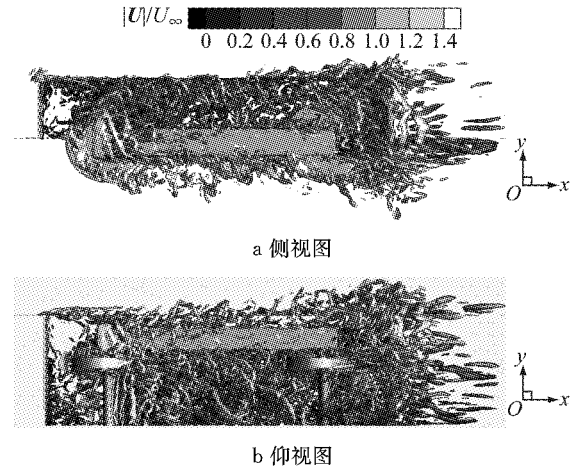


图 4  $Q$  准则显示的转向架物面附近涡结构(工况 2)  
Fig.4 Iso-surface of instantaneous normalized  $Q$ -criterion (case 2)

图 5 为沿着车轴截面的涡量场轮廓 ( $\omega_z = (\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})/U_\infty$ ). 由于后轮对车轴远离前轮对车轴, 因此转向架后轴将位于前轴尾流的回流区之外, 涡脱落将分别在两车轴上产生. 图 5 表明: 前轮对车轴尾流内产生了规则的交替发生的涡脱落, 并沿着下游传播; 后轮对车轴周边形成的涡受到了上游车轴涡脱落的周期性冲击作用, 产生较大的变形并混合在一起, 导致后轮对车轴尾流区域流体作用剧烈、湍流涡结构复杂.

对于工况 2, 车轴与车轮中截面的涡量场轮廓

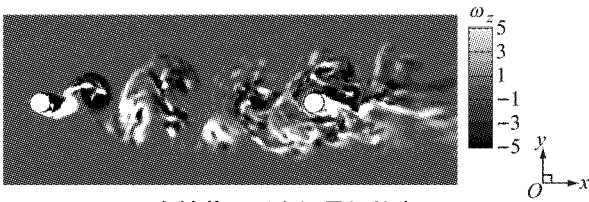


图 5 车轴截面瞬态涡量场轮廓(工况 1)

Fig.5 Contour of instantaneous spanwise vorticity field (case 1)

( $\omega_z$ )如图 6 所示.可以发现,一剪切层在转向架前缘脱落并沿流向传播,与前轮对车轴上端的分离涡相互作用后,迅速向上弯曲,撞击在转向架舱的顶壁上,导致该区域涡结构复杂;另外,由于该剪切层的直接作用,前车轴上流动提前分离,破坏了车轴后规则涡脱落的形成,使得前车轴尾流内均形成了湍流度较高的不规则涡,所发展的涡向下游传播并与后车轴周围流体发生相互作用,最终后车轴尾涡与转向架舱内涡混合在一起,作用在转向架舱后壁与后缘上,使得该区域流动作用剧烈,涡生成集中.

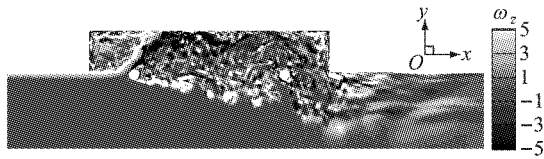


图 6 车轴截面瞬态涡量场轮廓(工况 2)

Fig.6 Contour of instantaneous spanwise vorticity field (case 2)

#### 4 近场四极子声源特性

涡声方程(2)右端两声源项中密度为常量,为便于数据处理,省略该密度项,由此绘出了 2 种工况下转向架水平面中心截面内作为 Lamb 矢量散度的体偶极子声源分布(见图 7)和流体动能分布不均匀形成的体四极子声源分布(见图 8),其中体偶极子和体四极子声源强度在云图显示时采用了相同数量级,以便于比较 2 类不同声源的分布范围.从图 7 和图 8 可见:前后车轮前缘、车轴尾流涡脱落以及构架外侧流体分离为转向架周围主要噪声源;单独转向架结构中(见图 7a 和图 8a),上游车轴流动分离产生的展向交替分离涡形成了较强的气动声源,所产生的涡向下游传播,与后轮对车轴进行流动作用后,在转向架尾流中产生了气动噪声源.当转向架位于转向架舱时(见图 7b 和图 8b),与单独转向架工况相比,转向架结构周围形成的气动噪声源产生了一定程度的削弱,但转向架舱后壁部位由于剧烈的流动冲击作

用,发展成为强气动噪声源.为进行声源强度对比,图 9 绘出了 2 种工况下转向架前轮对车轴尾流中沿近壁流线方向的噪声源分布.图 9 表明,体偶极子声源的强度远大于体四极子声源的强度.因此,与体四极子声源相比,体偶极子声源中由流动能量转化为声能的效率较高.另外,对于高速列车转向架区域,各部件表面流动分离产生较强的流体相互作用,使得靠近几何体近壁区流场内的涡运动剧烈,所形成的体偶极子声源发展为近场体四极子声源的主要组成部分.

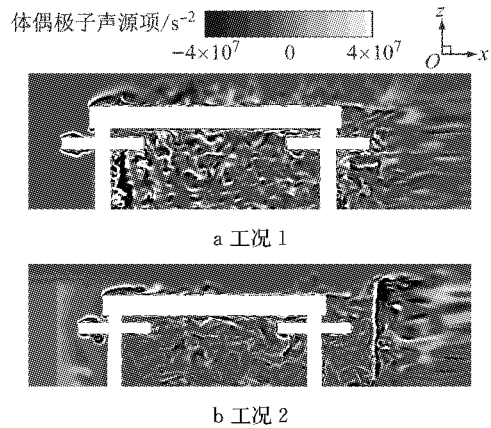


图 7 转向架水平面中心截面体偶极子声源分布

Fig.7 Contour of volume dipole source distribution on wheelset horizontal mid-plane

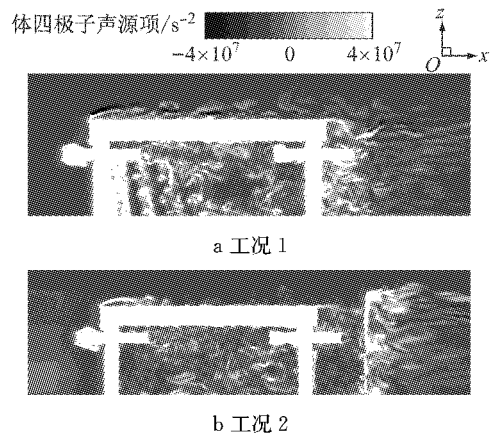


图 8 转向架水平面中心截面体四极子声源分布

Fig.8 Contour of volume quadrupole source distribution on wheelset horizontal mid-plane

#### 5 远场气动噪声特性

当瞬态流场达到统计意义上稳定后,运用 FWH 声比拟方法,以近场流场数据作为源项对远场辐射噪声进行预测,数值仿真结果通过低噪声风洞进行试验验证.采用 Welch 方法对计算所得的远场噪

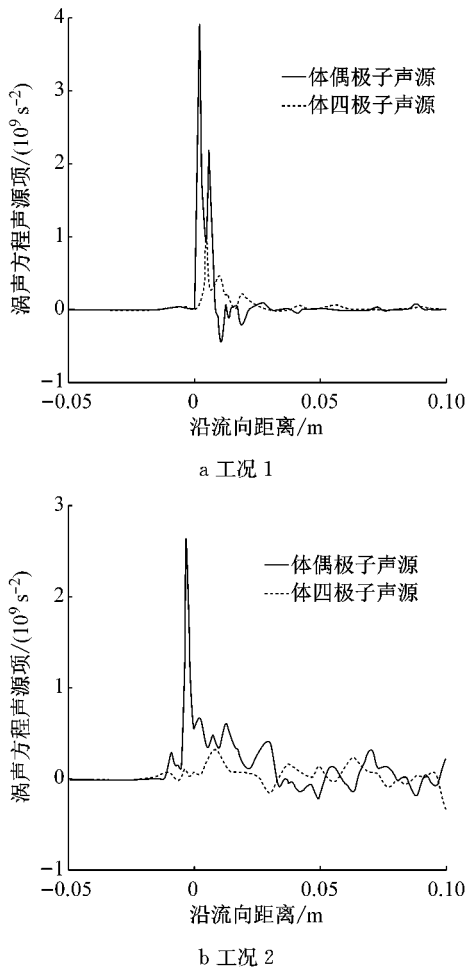


图 9 转向架前轮对车轴尾流中沿流线方向四极子声源分布  
Fig. 9 Quadrpole noise source distribution along the streamline in the front axle wake of bogie

声时间序列进行功率谱密度分析<sup>[15]</sup>, 然后进行总声压级的计算, 所用频率分辨率为 6 Hz.

5.1 声学风洞试验验证

在英国南安普顿大学声与振动研究所 (ISVR) 的低噪声风洞内进行单独转向架模型气动噪声数值模拟的试验验证<sup>[15-16]</sup>. 转向架模型被固定在喷口侧向支承板上 (见图 10), 远场测点位于轮对顶部; 来流速度为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 湍流度低于 0.3%. 由于 100 Hz 以下频域内喷口喷流产生较大的背景噪声而实际转向架结构产生的气动噪声幅值很小, 故该频域内噪声辐射数据将被忽略. 从图 11 可以看出, 转向架模型远场测点气动噪声的数值模拟与声学风洞测试结果吻合得很好. 对于主频所对应的幅值, 计算值高于测试值, 这是由于数值模拟时采用对称面的边界条件, 而在试验中使用支承板固定轮对, 削弱了车轴尾流中规则的相干涡旋脱落的产生与其所诱发的气动噪声; 同时, 数值计算所得主频值 (324 Hz) 略高于测试值 (314 Hz), 误差约为 3%. 究其原因, 主要是由于

转向架结构沿纵向较长, 风洞测试时可能没有完全处于喷口自由射流的势流核心区内.

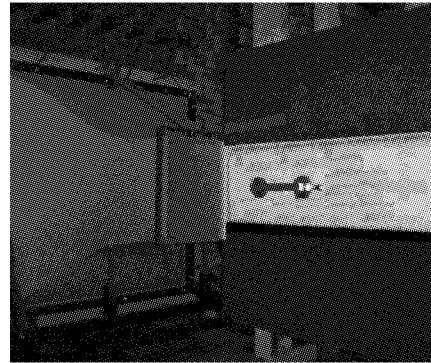


图 10 低噪声风洞内转向架测试装置  
Fig. 10 Experimental setup in anechoic chamber

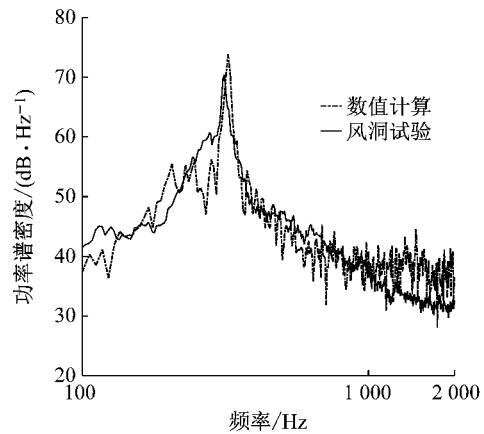


图 11 远场气动噪声预测的试验验证  
Fig. 11 Experimental verification of far-field noise prediction

5.2 转向架气动噪声频谱分析

对于单独转向架和转向架位于转向架舱内 2 种工况, 采用流场稳定后继续运行 0.52 s 进行物面压力脉动时间序列信号的采集, 以进行远场噪声预测. 近场噪声源为转向架半模型的固体表面, 远场测点位于以转向架中心为原点的展向平面内. 图 12a 比较了 2 种工况下转向架顶部接收点辐射噪声的功率谱密度. 对于工况 2, 假设转向架固面产生的气动噪声直接辐射至远场声接收点. 结果表明, 与单独转向架相比, 位于转向架舱内转向架的远场辐射噪声级显著降低, 在 2 kHz 以下频域范围内从 72.7 dB 降至 55.2 dB, 下降了 17.5 dB. 这主要是由于当转向架位于转向架舱内时, 来流速度降低的同时转向架周围不再产生大尺度的规则涡脱落. 图 12b 比较了 2 种工况下转向架侧向接收点辐射噪声的功率谱密度. 在 2 kHz 以下频域内转向架舱内转向架的远场辐射噪声较单独转向架下降了约 3 dB. 与单独转向

架相比,转向架位于转向架舱内后,不同方向的气动噪声级下降幅度不同,显然受到了结构声辐射指向性的影响。

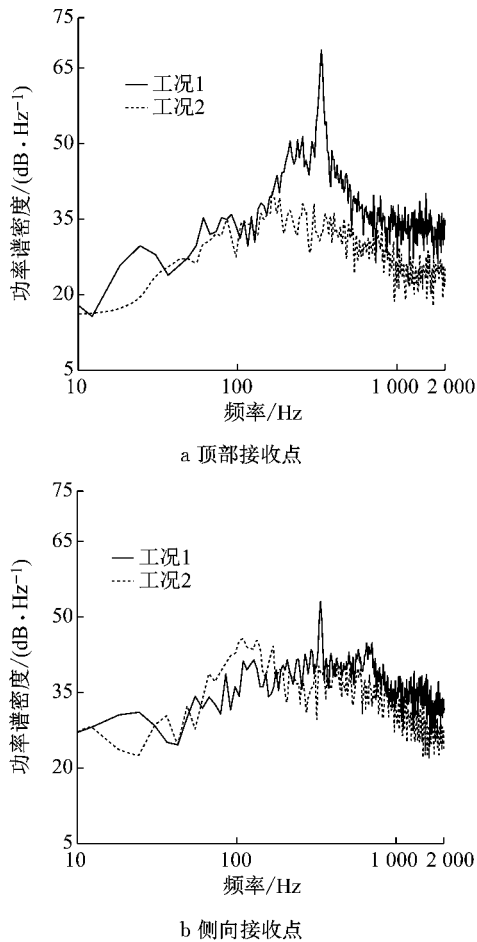


图 12 远场测点辐射噪声频谱比较  
Fig.12 Comparisons of noise spectra of far-field receivers

### 5.3 转向架声辐射指向性分析

根据展向半转向架模型所得流场数据,整个转向架的声压级由沿着展向对称面对称布置的 2 个接收点声压级( $L_{p1}$  和  $L_{p2}$ ) 计算得出. 假定两对称半转向架声源互不相关, 则  $L_p = 10\log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10})$ . 进行声辐射指向性计算时,远场 1 946 个声接收点均匀分布在以转向架中心为球心、半径为 2.5 m 的球面上,每测点根据声压时间序列计算出总声压级值(低于 5 kHz 频域内). 对于转向架舱内转向架工况,假设气动噪声由转向架表面向远场辐射,不考虑车体对声波的反射与遮挡作用,以便于与单独转向架工况进行比较. 图 13a 显示了单独转向架的声辐射指向性为垂向偶极子形状,这主要是由于单独转向架的轮对车轴表面上较大的压力脉动产生了交替分离涡,从而形成了较强的面偶极子声源. 图

13b 表明,转向架舱内转向架的声辐射指向性为横向偶极子形状,噪声级幅值较单独转向架工况下降约 12 dB. 究其原因,转向架舱的存在,改变了转向架周围的流动特性,抑制了轮对车轴表面规则交替分离涡的形成,削弱了偶极子气动噪声源产生的强度. 与单独转向架相比,转向架舱改变了转向架气动噪声的声辐射指向性,同时降低了其噪声级;转向架舱后缘壁面由于受到转向架尾流的流动冲击作用,会产生较大气动噪声。

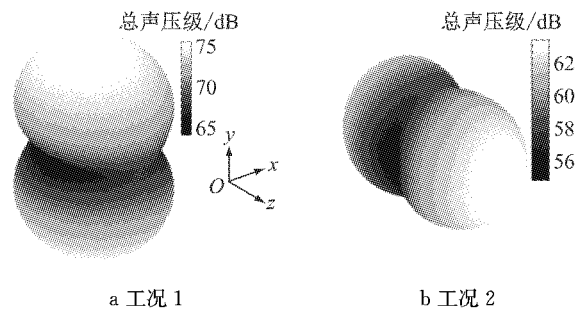


图 13 转向架气动噪声声辐射指向性(中心位于 50 dB)  
Fig.13 Noise directivity for bogie (starting at 50 dB)

## 6 结语

本文根据涡声理论和声比拟方法,计算分析了转向架舱对转向架结构流动与气动噪声性能的影响. 结果表明:当转向架位于转向架舱内时,流体在转向架舱前缘端部分离并与转向架前端结构发生较强的相互作用,与单独转向架工况相比,转向架前轮对尾流内大尺度相干涡结构已不出现;2 种工况下,靠近几何体近壁区流场内,涡运动剧烈,所形成的体偶极子声源为近场四极子噪声的主要声源. 对于远场辐射噪声,转向架各部件表面压力脉动形成的面偶极子声源成为主要噪声源;与单独转向架结构相比,转向架舱改变了转向架周围流体的流动特性与转向架气动噪声的声辐射指向性,削弱了转向架结构表面气动噪声产生的强度,而车体转向架舱后缘区域由于受到流动冲击作用,成为强气动噪声源. 对于实尺转向架,轮轴间布置有牵引与制动系统的相关结构部件,将会影响单纯轮轴尾流内规则涡的形成与发展,从而影响气动噪声的产生. 本文基于简化比例模型的研究,有助于理解实际运行车辆转向架舱对于转向架区域复杂流动流场与气动噪声特性的影响,为高速列车转向架区域结构优化与噪声控制提供理论依据。

(下转第 1608 页)

- [12] 于风光,周君,翟春安. 节能量保证型模式下 ESCO 承诺节约成本估算 [J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(2): 36.  
YU Fengguang, ZHOU Jun, ZHAI Chun'an. Strategic design of cost savings guarantee in Energy Performance Contracting [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(2): 36.
- [13] DENG Q L, ZHANG L M, CUI Q B, *et al.* A simulation-based decision model for designing contract period in building energy performance contracting [J]. Building and Environment, 2015, 71: 71.
- [14] DENG Q L, JIANG X L, ZHANG L M, *et al.* Making optimal investment decisions for energy service companies under uncertainty: a case study [J]. Energy, 2015, 88: 234.
- [15] 彭鸿广, 骆建文. 信息不对称下节能服务外包合同的设计 [J]. 预测, 2014, 33(6): 60.  
PENG Hongguang, LUO Jianwen. Design of contract in energy service contracting under asymmetric information [J]. Forecasting, 2014, 33(6): 60.
- [16] 卢志坚, 孙元欣. 完全信息下的合同能源管理节能效益分享模式博弈模型 [J]. 科技管理研究, 2015, 35: 216.  
LU Zhijian, SUN Yuanxin. A game for the shared saving model of energy performance contract under perfect information [J]. Science and Technology Management Research, 2015, 35: 216.
- [17] 薛薇. 基于 SPSS 的数据分析 [M]. 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.  
XUE Wei. Data analysis based on SPSS [M]. 3rd ed. Beijing: China Renmin University Press, 2014.

(上接第 1561 页)

### 参考文献:

- [1] 杨国伟, 魏宇杰, 赵桂林, 等. 高速列车的关键力学问题 [J]. 力学进展, 2015, 45: 217.  
YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, *et al.* Research progress on the mechanics of high speed rails [J]. Advances in Mechanics, 2015, 45: 217.
- [2] THOMPSON D J, IGLESIAS L E, LIU X W, *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.
- [3] 朱剑月, 景建辉. 高速列车气动噪声的研究与控制 [J]. 国外铁道车辆, 2011, 48(5): 1.  
ZHU Jianyue, JING Jianhui. Research and control of aerodynamic noise in high speed trains [J]. Foreign Rolling Stock, 2011, 48(5): 1.
- [4] FREMION N, VINCENT N, JACOB M, *et al.* Aerodynamic noise radiated by the intercoach spacing and the bogie of a high-speed train [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 577.
- [5] NOH H, CHOI S, HONG S, *et al.* Investigation of noise sources in high-speed trains [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(3): 307.
- [6] 杜健, 梁建英, 田爱琴. 高速列车受电弓气动噪声特性分析 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 935.  
DU Jian, LIANG Jianying, TIAN Aiqin. Analysis of aeroacoustics characteristics for pantograph of high-speed trains [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 935.
- [7] 张亚东, 张继业, 李田, 等. 拖车转向架气动噪声数值研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 106.  
ZHANG Yadong, ZHANG Jiye, LI Tian, *et al.* Numerical research on aerodynamic noise of trailer bogie [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 106.
- [8] ZHU J Y, HU Z W, THOMPSON D J. Flow simulation and aerodynamic noise prediction for a high-speed train wheelset [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2014, 13(7/8): 533.
- [9] WANG M, FREUND J B, LELE S K. Computational prediction of flow-generated sound [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 483.
- [10] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, *et al.* A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20: 181.
- [11] FFWCS-WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound radiation from turbulence and surfaces in arbitrary motion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1969, 264: 321.
- [12] BRENTNER K S, FARASSAT F. Modelling aerodynamically generated sound of helicopter rotors [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 83.
- [13] POWELL A. Theory of vortex sound [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36(1): 177.
- [14] HOWE M S. Theory of vortex sound [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [15] ZHU J Y. Aerodynamic noise of high-speed train bogies [D]. Southampton: University of Southampton, 2015.
- [16] ZHU J Y, HU Z W, THOMPSON D J. Flow behaviour and aeroacoustic characteristics of a simplified high-speed train bogie [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(7): 1642.