DOI: 10.3901/JME.2019.14.069

高速列车轮对气动噪声特性分析*

朱剑月^{1,2} 雷震宇¹ 李莉¹

(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: 高速列车轮对位于转向架舱外部分直接受到来流冲击,产生较大气动噪声。运用涡声理论和声比拟方法,基于列车单轮对和串列双轮对简化模型,计算分析轮对周围流动与气动噪声特性。结果表明:单轮对工况下轮对周围流动分离与流体相互作用使得车轴尾流内产生了规则的交替涡脱落以及车轮尾流内形成了不同尺度的不规则涡;轮对近场四极子噪声中,体偶极子声源为主要声源,体四极子声源相对较弱;远场气动噪声预测与声学风洞测试结果吻合良好,轮对表面压力脉动诱发的面偶极子噪声为主要声源;轮对远场辐射噪声的主频和第一谐频值分别对应于轮对升力和阻力主频,第一谐频值为主频值两倍;与车轮相比,车轴部位产生的气动噪声较高;轮对声辐射指向性为垂向偶极子形状,旋转效应使得轮对噪声级幅值比静止轮对增加约2 dB。双轮对工况下,前轮对流场以及气动噪声特性与单轮对工况相似,后轮对在前轮对尾流作用下,气动噪声辐射频带加宽,强度减弱,指向呈多向性。

关键词: 铁路噪声; 简化高速列车轮对; 流场特性; 气动噪声预测

中图分类号: U270

Flow-induced Noise Behaviour around High-speed Train Wheelsets

ZHU Jianyue^{1,2} LEI Zhenyu¹ LI Li¹

(1. Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804;

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

Abstract: The parts of the high-speed train wheelset located outside the bogie cavity are exposed to the unsteady air flows. Due to this strong flow impact, the large aerodynamic noise is generated around the wheelset. The flow and flow-induced noise behaviour around the isolated wheelset and the tandem wheelsets are investigated at a scaled model. For the isolated wheelset case, results show that due to vortex shedding and flow separation, the coherently alternating shedding vortices are generated from the axle whereas the wheel wake is dominated by the irregular vortices with different scales. The volume dipole is the predominate source of the quadrupole noise generated in the wheelset wake. Moreover, it is found that good agreement is achieved between numerical simulation and experimental measurement. The dipole noise produced from the pressure fluctuations on the wheelset wall surfaces is the main aerodynamic noise source. Corresponding to the dominant frequencies of the oscillating lift and drag forces from the wheelset, the frequency of the first harmonic peak of the radiated tonal noise is twice the shedding frequency from the axle. The aerodynamic noise generated from the axle is much higher than that from the wheel, leading to a typical dipole pattern in the far-field noise directivity. The inclusion of wheelset rotation increases the radiated noise levels around 2 dB with similar directivity compared with the stationary wheelset. For the tandem-wheelset case, the flow-induced noise behaviour of the upstream wheelset is similar to the isolated wheelset case, whereas the rear wheelset is submerged in the upstream wheelset wake and situated in a turbulent condition, and thus the irregular flow feature makes the noise radiation more broadband and multi-directional with lower noise amplitude level.

Key words: railway noise; simplified train wheelset; flow behaviour; aerodynamic noise prediction

0 前言

随着高速列车运行速度提高,与滚动噪声及牵

引噪声相比,气动噪声将占据主导地位^[1-3]。高速列车气动噪声研究以往主要采用风洞和现场测试^[4-5]。数值仿真由于受计算条件限制,计算对象一般局限于简化或缩比模型。近年来,随着计算能力提高,很多研究采用数值模拟方法对高速列车整车和各关键部件进行气动噪声预测,计算分析远场辐射气动噪声的特性及其变化规律。刘加利等^[6]采用半自由

* 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资助(TPL1804)、中央高校基本科研业务费专项资金(22120170247)资助项目。20180710 收到初稿,20181219 收到修改稿

空间的 Green 函数建立气动噪声远场声学积分公式, 分析了列车地面效应对远场气动噪声辐射的影响。肖友刚等^[7]计算了不同截面受电弓绝缘子的气动噪声, 认为椭圆形截面形状的绝缘子可以降低气动噪声的产生。黄莎等^[8]比较了高速列车车厢连接处风挡长度与深度等几何参数对列车气动噪声的影响, 提出了该部位气动噪声降噪方案。ZHU 等^[9]采用 Ansys Fluent 软件, 模拟了高速列车三车编组比例模型周围流场的气动力性能与远场辐射气动噪声的特性, 认为列车所形成的气动噪声源为偶极子声源以及车头转向架区域为主要噪声源。ZHU 等^[10]计算分析了高速列车转向架结构流场和气动噪声特性, 发现固体表面的压力脉动以及几何体周围的涡脱落和流动分离是形成气动噪声的主要原因。纵观以往研究, 由于高速列车结构复杂, 多数数值模拟采用非结构化网格进行流场计算, 然后基于声比拟方法进行噪声预测, 对于综合考虑来流与结构间流体相互作用而导致气动噪声产生的机理还需要进一步分析。由于流场中湍流的形成与发展以及涡系的拉伸与破裂等均能够产生声音, 声比拟理论无法识别涡动力学特征, 不能深入理解涡运动与湍流发声间关系, 影响了有效的气动噪声控制措施的研究; 另外, 由于声波的压强脉动较微弱, 在采用非结构化网格进行数值仿真时, 需要确保流场计算准确, 以能捕捉到影响远场声辐射的流体微小脉动。相比之下, 一些简化模型的气动噪声数值模拟可以采用结构化网格计算流场, 以提高计算精度, 计算结果也可由声学风洞试验进行验证。为了进一步考虑旋转效应与两轮对串列布置对轮对流场与气动噪声影响, 本文将在前期工作^[11]基础上对高速列车轮对周围流场进行数值仿真, 根据涡声理论并结合 Ffowcs williams-Hawkings (FW-H) 声比拟方法深入分析高速列车轮对近场声源特性与远场声辐射性能, 为高速列车关键区域低噪声设计和优化提供理论依据。

1 气动噪声数值分析

高速列车周围流动处于低马赫数区域内, 在计算流场的流体动力学性能时, 将忽略流体的可压缩性。另外, 在低马赫数下, 固体表面压力脉动产生的面偶极子声源是气动噪声的主要声源, 可以通过不可压缩流体进行计算^[12]。采用开源软件 OpenFOAM 求解控制方程, 空间和时间离散均采用二阶精度格式, 基于 Spalart-Allmaras 湍流模型的延迟分离涡模型(DDES) 用来进行数值模拟。延迟分

离涡模型在结构固面附近的边界层区域内采用基于雷诺平均(RANS)的模型、而在主体流动分离区域内则应用大涡模拟(LES)模型进行计算流体力学(CFD)数值计算。

根据声比拟方法, 近场流体计算结果获得后, 将为远场声学预测提供声源数据。根据广义导数守恒律, Ffowcs-WILLIAMS 和 HAWKINGS 得出了广义波传播方程^[13-14], 其解可以表示为

$$p'(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{f=0} \left[\frac{Q_i n_i}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \right]_{\tau_e} dS - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{f=0} \left[\frac{L_{ij} n_j}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \right]_{\tau_e} dS + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{f>0} \left[\frac{T_{ij}}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \right]_{\tau_e} dV \quad (1)$$

式中, $[\]_{\tau_e}$ 表示取值于声发射时间 τ_e 。控制面 S 被描述为 $f(\mathbf{x}, t) = 0$, 其单位法向量 $\hat{\mathbf{n}} = \nabla f$ 指向控制面外。 $p'(\mathbf{x}, t)$ 表示位于 $\mathbf{x}$ 的测点在观测者时间 t 的声压。在各积分符号内的等效源项为

$$Q_i = \rho(u_i - v_i) + \rho_0 v_i \quad (2)$$

$$L_{ij} = (p - p_0) \delta_{ij} + \rho u_i (u_j - v_j) \quad (3)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j - \tau_{ij} + [(p - p_0) - c_0^2 \rho'] \delta_{ij} \quad (4)$$

式中, Q_i 和 L_{ij} 分别为厚度噪声源与载荷噪声源; T_{ij} 为 Lighthill 应力张量, 为四极子噪声源。 ρ 为密度和 p 为压力; c_0 为周围无扰动时声在空气中传播速度, ρ_0 为静止流场的空气密度; u_i 和 v_i 分别为 i 方向上的流体和固体表面速度分量; τ_{ij} 是黏性应力张量; δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号。

声比拟理论可用于远场气动噪声预测, 但无法深入理解流体流动发声机理。为了理解轮对周围流场中湍流涡运动诱导噪声的形成机理, 运用涡声理论分析轮对近场四极子声源特性。POWELL 和 HOWE 结合涡运动特征, 研究了流体动力与气动噪声关系^[15-16]。对于等熵低速流动, 涡声方程可以表示为

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \nabla \cdot [\rho_0 (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v})] + \nabla^2 \left(\frac{1}{2} \rho_0 |\mathbf{v}|^2 \right) \quad (5)$$

式中, p' 表示声压, $\boldsymbol{\omega}$ 与 $\mathbf{v}$ 分别为涡矢量与速度矢量, $(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v})$ 为 Lamb 矢量; 方程右端第一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; 方程右端第二项为流体动能分布不均匀形成的声源, 为体轴向四极子声源。低马赫数下该体偶极子与体四极子组成的声源项与声比拟方法中 Lighthill 四极子源项数学近似。

2 轮对计算模型

在线运行高速列车轮对的轮轴上安装有制动盘、电机座与齿轮箱等部件, 与转向架舱内结构相比, 转向架舱外车轮部分直接受到车底来流冲击, 会产生较大的气动噪声, 故暂不考虑车体、转向架舱与地面影响, 采用高速列车简化轮对模型对其气动噪声的产生机理与相关特性进行分析。高速列车轮对 1:10 缩比模型如图 1 所示, 图 1a 为单轮对模型, 图 1b 为沿列车纵向串联布置的双轮对模型。由于轮对沿轴向对称, 数值模拟时采用轴向半轮对模型和对称面边界条件, 以减少计算量^[10]。计算区域采用全结构化网格划分, 轮对表面及其周围网格如图 2 所示。边界层内第一层网格至几何体固体表面距离为 0.01 mm 并沿着壁面法向量方向以 1.1 的增长率向外拓展, 使得 y^+ 值(第一层网格质心到壁面的无量纲距离)不超过 1, 确保边界层粘性底层内考虑低雷诺数效应。单轮对工况下生成 5.5×10^6 个网格, 双轮对工况为 1.2×10^7 个网格。计算区域的边界条件设置为: 来流为低湍流度均匀流($U_\infty=30$ m/s); 顶面、底面与两侧面均设为对称面; 出口设为压力出口; 静止状态工况下, 车轮表面设为静态无滑移壁面; 单轮对工况考虑旋转效应时, 轮对表面定义为运动无滑移壁面并施加相应的转动角速度条件。各工况数值仿真时, 确保 Courant-Friedrichs-Lewy 数在整个计算区域内不超过 2。

图 1 高速列车轮对模型

(a) 轮对表面

(b) 轮对周围

图 2 轮对表面及其周围结构化网格

3 单轮对旋转工况流场分析

数值模拟在大型并行机 Iridis4 (University of Southampton) 上运行, 以单轮对工况为例, 计算时采用 6 核共 96 个处理器, 运行 3.8×10^4 个时间步后, 流场达到统计意义上稳定; 接着再运行 5.5×10^4 个时间步进行声源数据采集, 以使计算结果的频谱分析获得合理的频率分辨率, 每时间步运行约需要 25 s, 数值仿真总运行时间为 27 d。由于流场内涡生成集中部位会诱发气动噪声产生, 故对轮对流场中涡运动特性进行分析。

3.1 DDES 模型特性分析

CFD 计算采用分离涡模型, 网格划分时需确保在整个边界层区域采用 RANS 模型和在边界层区域之外应用 LES 模型进行数值模拟。在延迟分离涡模型中, RANS 和 LES 模型的转换由重新定义的湍流长度尺度($\tilde{d}$)控制, 该长度尺度不仅由离开壁面的第一层网格高度和网格间距确定, 而且依赖于随时间变化的涡粘场^[17]。为了校核 DDES 模型中 RANS 和 LES 的转换, 图 3 绘出了流场内沿径向分布的量纲一化平均速度(U/U_∞), 模型长度尺度比(r_d), DDES 函数($1-f_d$)和湍流长度尺度与壁面距离之比($\tilde{d}/d$)在 $\theta=70^\circ$ (θ 为由轮对前端驻点沿顺时针方向的角度), 横坐标为至壁面量纲一化距离(r/D , D 为车轴直径), 根据平均速度(U/U_∞)确定边界层厚度和函数 $\tilde{d}/d$ 的比值小于 1 的区域来确定 RANS/LES 转换位

置。DDES 延迟函数 f_d 定义为

$$f_d \equiv 1 - \tan h((8r_d)^3) \quad (6)$$

函数 $(1-f_d)$ 在 LES 区域趋向于 0, 上式中涡粘模型中的长度尺度比 r_d 可表示为

$$r_d \equiv \frac{v_t + \nu}{\sqrt{U_{i,j} U_{i,j}} k^2 d^2} \quad (7)$$

式中, $U_{i,j} = \partial U_i / \partial x_j$ 是速度梯度 (U_i 为流体速度, x_i 表示笛卡尔坐标系的三个方向, $i=1, 2, 3$), ν_t 为湍

流动涡粘度, k 为卡门常数。由图 3a 所示, 在车轴中截面处(轮对沿流向中心面与车轮内侧面间中心截面)边界层发展至 $0.014(r/D)$ 处, 而 RANS/LES 转换发生在 r/D 约为 0.032 处; 图 3b 则表明在车轮中截面处边界层延伸至 r/D 为 0.006 处而 RANS/LES 转换则位于 $0.008(r/D)$ 处。因此, DDES 模型中 RANS 转换为 LES 的交界面位于边界层外, 确保数值计算时边界层区域运用 RANS 模型而其余区域采用 LES 模型进行求解。

图 3 单轮对旋转工况 DDES 模型特性 ($\theta = 70^\circ$)

3.2 瞬态流场分析

为了理解轮对周围流场特性及其对气动噪声产生的影响, 对轮对附近流场中 Q 准则等值面与涡量场结果进行分析。

图 4 为高速列车单轮对旋转工况下流场中物面附近的瞬态涡结构, 采用 Q 准则显示 $\alpha = 50$ 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), 灰度表示量纲一化速度幅值的大小。从图 4a 可以发现, 流体在车轮前端边缘分离后, 重新粘附在车轮外侧表面, 形成月牙形分离泡, 随后马蹄涡在车轮表面上形成并沿下游传播。由图 4b 可见, 在车轴尾流区, 紧接着车轴顶部处表面生成了准二维展向涡, 然后沿下游发展成为流向涡; 在车轴与车轮联结区域, 车轴尾流涡与车轮内侧表面产

图 4 Q 准则显示的旋转轮对物面附近涡结构(单轮对旋转工况)

生的涡相互作用, 形成了较强湍流涡结构。与车轮周围的流动相比, 车轴尾流内流体速度幅值较高, 表明了车轴尾流内由于规则的涡脱落导致的流体作用较为剧烈。

图 5 为沿着车轴与车轮中截面的瞬态涡量场轮廓图($\omega_z = (\partial V / \partial x - \partial U / \partial y) D / U_\infty$), 显示了车轴尾流内产生了交替发生的规则涡脱落(图 5a), 而在

车轮尾流内则形成了不同尺度的不规则涡(图 5b), 这是由于与车轮的几何外形相比, 车轴具有一定的沿展向相关长度, 流体流经时形成了规则的旋涡脱落。由于轮对旋转效应, 使得固体表面流动分离提前发生, 导致几何体周围旋涡的发展沿车轮滚动方向偏移, 如图 5b 所示的车轮尾流涡均偏向于右上端。

图 5 车轴与车轮中截面瞬态涡量场轮廓 (单轮对旋转工况)

图 6 为车轴上距离车轮表面 5 mm(图 6a)和 0.5 mm(图 6b)的截面上瞬态涡量场轮廓图(ω_z), 由图 6a 可见, 车轴后端交替脱落的旋涡与车轮周边形成的湍涡相互作用, 产生较大的涡拉伸变形并混合在一起, 最终合并入轮对尾流中, 使得该区域流体作

用剧烈、湍流涡结构复杂。当距离车轮较近时(见图 6b), 车轴上交替涡脱落产生的强度减弱, 对车轮周边涡的作用也明显减弱; 另外, 车轮尾流主要是由车轮顶部、底部和周边流动分离产生的涡沿下游传播而形成。

图 6 车轴与车轮连接处截面瞬态涡量场轮廓 (单轮对旋转工况)

4 单轮对旋转工况近场四极子声源特性

根据涡声理论, 运用涡声方程式(5), 省略密度

项($\rho_0=1.225 \text{ kg/m}^3$), 绘出作为 Lamb 矢量散度的体偶极子声源和流体动能分布不均匀形成的体四极子声源。图 7 为沿轮对中心水平面截面的声源分布, 表明车轮前缘以及车轴端部流体分离产生的分离涡

以及车轴附近尾流是车轮周围主要体偶极子与体四极子声源。图 8 显示沿车轴轴向中截面的声源分布, 可见车轴顶部与底部流动分离形成强烈压力脉动并导致大量展向交替分离涡产生是主要四极子声源部位。为便于进行声源分布区域的对比, 图 7 与图 8 的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, 但实际上根据图 9 绘出的车轴尾流中沿圆柱近壁流线方向的声源分布可以发现: 具有

较高强度的体偶极子和体四极子声源均集中分布于车轴顶部与底部邻近的流动分离区域内(车轴中心位于 $x=0\text{ m}$), 相比之下, 体四极子声源的幅值远小于体偶极子声源, 表明其声能量转换效率较低, 故对于高速列车轮对, 靠近几何体近壁区流场内, 流动分离产生较强的流体相互作用, 涡运动剧烈, 从而生成的体偶极子声源为近场四极子噪声的主要声源。

图 7 轮对水平面中心截面四极子声源分布 (单轮对旋转工况)

图 8 沿车轴轴向中截面四极子声源分布(单轮对旋转工况)

5 单轮对工况气动噪声预测

当瞬态流场达到统计意义上稳定后, 采用 FW-H 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声时间序列进行功率谱密度(PSD)分析^[18], 频率分辨率为 6 Hz, 然后再进行总声压级(OASPL)的计算。

图 9 车轴尾流中沿流线方向四极子声源分布
(单轮对旋转工况)

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轮对模型气动噪声测试^[11,18]。轮对静止(图 10), 来流速度 30 m/s, 湍流度低于 0.3%。从图 11 可见, 气动噪声计算值与声学风洞测试结果吻合得很好, 特别是位于 960 Hz 左右谐频的小振幅峰值也在数值计算中被准确捕捉到了。与仿真计算值相比, 试验结果在 230 Hz 左右频段出现一低振幅宽频峰值, 这主要是由于测试时车轴尾流与轮对支承板相互作用产生了气动噪声; 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了对称面的边界条件, 而在试验中则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发展, 导致交替涡脱落所致峰值噪声的幅值降低。

图 10 低噪声风洞轮对模型

图 11 气动噪声计算试验验证

5.2 噪声辐射频谱分析

作为近场噪声源的固体积分表面, 车轮表面上的单元数为 22 016 以及车轴表面上的单元数为 15 232。对于旋转与静止轮对工况, 流场仿真时间均为 0.93 s, 对应于 20 次流体流经整个计算域, 其中后 0.55 s 的时间序列信号用于远场噪声预测。图 12 为远场测点布置示意图, 声源为半轮对模型, 三个接收点均位于以轮对中心为圆心和半径为 2.5 m 的圆弧上 (轴向 YZ 平面内), 其中侧向、顶部与横向接收点的坐标值分别为(0, 0.434 m, 2.372 m)、(0, 2.5 m, 0)和(0, 0, 2.5 m)。图 13 比较了旋转轮对远场三个接收点辐射噪声的功率谱密度。如图 13a 所示, 侧向接收点的气动噪声谱分析曲线上出现两个明显峰值, 频率分别为 311 Hz(主频, 对应于轮对升力)和 622 Hz(第一谐频, 对应于轮对阻力), 第一谐频值为主频值的两倍, 这与气动阻力所对应的主频值为升力所对应主频值的两倍相吻合。究其原因, 低马赫数下运动物体的气动噪声主要产生于几何体所受的各个方向的力源在固体表面形成的压力脉动,

图 12 测点布置示意

图13 远场测点辐射噪声频谱(单轮对旋转工况)

因此,由作用力载荷形成的偶极子噪声的频率特性与流体内力源的频率特性相一致。图13b比较了轮对上车轮与车轴分别作为声源的辐射噪声的功率谱

密度,可以看出,311 Hz对应的主频主要来自于车轴产生的气动噪声,而622 Hz对应的第一谐频则主要来自于车轮产生的气动噪声,这也说明对于轮对结构而言,升力主要产生于车轴而阻力则主要来自于车轮。根据图13c可以发现,旋转轮对远场辐射噪声的主频值(311 Hz)在顶部接收点位置达最大值,主要对应于车轴周围的规律性旋涡脱落产生的升力,横向接收点位置辐射噪声则主要来源于车轮所受阻力。

5.3 声辐射指向性分析

根据轴向半轮对模型所得的流场数据,整个轮对模型的声压级由沿着轴向对称面对称布置的两个接收点声压级(L_{p1} 和 L_{p2})计算得出:考虑轮对轮间距较大($L/d > 8$,其中 L 为轮间距, d 为车轴直径),假定相邻两半轮对声源互不相关,则 $L_p = 10 \log_{10}(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10})$ 。进行三维声辐射指向性计算时,远场1946个声接受点均匀分布在以轮对中心为球心、半径为2.5 m的球面上,每测点根据其声压时间序列计算出低于5 kHz频域内的总声压级值。图14显示了旋转轮对的声辐射指向性为垂向偶极子形状(中心位于40 dB),这主要是由于轮对车轴表面上较强的压力脉动产生了交替分离涡,形成了面偶极子声源。

图14 轮对声指向性(单轮对旋转工况)

旋转轮对沿气流方向中心平面内声辐射指向性如图15所示,由图15a可见,旋转轮对和静止轮对的声辐射指向性形状相似,但旋转轮对噪声级幅值高出约2 dB,这是由于轮对旋转效应增强了来流与几何体的相互作用,使得固体表面上压力脉动加强,从而增加了旋转轮对气动噪声产生的强度。图15b显示了旋转轮对和静止轮对结构中车轮与车轴部分各自作为辐射声源的声指向性,可以发现,旋转轮对的车轮声指向性倾向于来流方向,这是由于轮对旋转效应使得车轮表面流动分离提前产生,改变了

几何体周围旋涡的产生与分布, 如流场分析结果(第 3.2 节)所述; 旋转效应虽然改变了车轮部位的声指向

性, 但对噪声级幅值影响较小; 另外, 与车轮部位作为声源相比, 车轴部分产生的气动噪声幅值较高。

图 15 旋转轮对和静止轮对的声辐射指向性(侧视图, 单轮对工况)

6 双轮对工况气动噪声特性分析

为了与单轮对工况流动性能进行比较, 图 16 显示了串联双轮对工况静止状态下流场中物面附近的瞬态涡结构(同上, 采用 Q 准则绘出 $\alpha = 50$ 的等

值面)。可以发现, 除了单轮对工况下由于旋转效应使得涡分布沿逆时针滚动方向略有偏移外(图 4), 双轮对工况下前轮对周围流场发展以及流动特性与单轮对工况较为相似; 流体在前轮对分离后, 形成较强湍流涡结构向下游传播, 与后轮对几何结构发生了流体相互作用, 从而在后轮对尾流中产生了不同

图 16 Q 准则显示的旋转轮对物面附近涡结构 (双轮对静止工况)

尺度的涡结构。由图 16a 可见, 后轮对车轮前缘月牙形分离泡, 在来流湍流的冲击作用下发生割裂破碎, 随后马蹄涡在车轮表面上沿着上下圆周方向移动与发展, 最后合并入后轮对尾流中; 根据图 16b 可以发现, 与前轮对尾流涡相比, 由于后轮对受到湍流来流的作用, 其尾流涡尺度较小、分布更均匀。

结合上述双轮对结构流动特性进行气动噪声分析, 图 17 比较了双轮对工况前后轮对远场侧向接收点(0, 0.35 m, 2.372 m)处辐射噪声的功率谱密度, 前轮对由于车轴流动分离形成了周期性涡脱落, 产生了幅值较大的峰值噪声; 后轮对则处于湍流来流条件下, 流体作用产生了大量不同尺度的不规则涡, 使得辐射噪声频带更宽, 指向多向, 宽频噪声幅值增加, 但峰值幅值有所降低。另外, 双轮对工况下前后轮对声辐射指向性如图 18 所示, 可以发现, 前轮对声辐射指向性为垂向偶极子形状, 噪声级幅值较单轮对旋转工况(图 14)降低约 2 dB, 但与静止单轮对工况相差仅 0.2 dB, 因此, 相似的流场特性使

图 17 远场测点辐射噪声频谱
(侧向接收点, 双轮对静止工况)

(a) 前轮对

(b) 后轮对

图 18 轮对声指向性(双轮对静止工况)

得相同状态下(静止或旋转)双轮对工况下前轮对与单轮对工况的辐射气动噪声性能差异较小; 相比之下, 后轮对声辐射指向呈多向性且沿各方向分布较为均匀, 但幅值有所降低。

7 结论

通过对高速列车单轮对与串列双轮对缩比模型流场与气动噪声特性进行数值模拟, 结果表明:

(1) 单轮对工况下, 车轴几何体周围流动分离导致其尾流内形成了交替发生的规则涡脱落, 产生了大量展向与流向涡、并与车轮周围流动相互作用, 使得轮对尾流内生成了不同尺度的不规则涡。

(2) 根据涡声方程对轮对近场四极子声源特性的计算发现, 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; 相比之下, 体四极子声源强度较弱。

(3) 运用声比拟方法进行远场气动噪声预测, 计算值与测试结果吻合良好。单轮对工况下远场辐射噪声的主频值和第一谐频值分别对应于轮对结构产生的升力和阻力, 故相应地第一谐频值为主频值的两倍; 与轮对车轮部位相比, 车轴部位产生的气动噪声较高; 不考虑转向架结构的旋转轮对和静止轮对的声辐射指向性均为垂向偶极子形状, 但噪声级幅值旋转轮对高于静止轮对约 2 dB。

(4) 双轮对工况下, 前轮对周围流场与气动噪声特性与单轮对工况相似, 后轮对在湍流来流作用下形成了不同尺度的不规则涡, 使得气动噪声辐射频带加宽, 指向多向, 但峰值的幅值降低。

对于在线运行的高速列车, 转向架舱结构与舱内各部件将会影响轮对部位气动噪声的形成与辐射, 但基于简化模型的研究可以帮助理解实际运行

车辆中轮对气动噪声的产生机理, 为该部位气动噪声控制提供理论依据。

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] 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): 1-5.
SHEN Zhiyun. Dynamic environment of high-speed train and its distinguished technology[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4): 1-5.
- [3] THOMPSON D J, LATORRE I 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): 119-150.
- [4] 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: 411-446.
- [5] 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): 577-593.
- [6] 刘加利, 张继业, 张卫华. 考虑地面效应的高速列车远场气动噪声计算方法研究[J]. 计算力学学报, 2013, 30(1): 94-100.
LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Study of computational method of far-field aerodynamic noise of a high-speed train considering ground effect[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(1): 94-100.
- [7] 肖友刚, 时戡. 高速列车受电弓绝缘子的气动噪声计算及外形优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(6): 72-76.
XIAO Yougang, SHI Yu. Aerodynamic noise calculation and shape optimization of high-speed train pantograph insulators[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(6): 72-76.
- [8] 黄莎, 梁习峰, 杨明智. 高速列车车辆连接部位气动噪声数值模拟及降噪研究 [J]. 空气动力学报, 2012, 30(2): 254-259.
HUANG Sha, LIANG Xifeng, YANG Mingzhi. Numerical simulation of aerodynamic noise and noise reduction of high-speed train connection section[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(2): 254-259.
- [9] ZHU C L, HEMIDA H, FLYNN D, et al. Numerical simulation of the slipstream and aeroacoustic field around a high-speed train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(6): 740-756.
- [10] 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): 1642-1658.
- [11] 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): 533-552.
- [12] WANG M, FREUND J B, LELE S K. Computational prediction of flow-generated sound[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 483-512.
- [13] FLOWCS-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, 342: 264-321.
- [14] BRENTNER K S, FARASSAT F. Modelling aerodynamically generated sound of helicopter rotors[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 83-120.
- [15] POWELL A. Theory of vortex sound[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36(1): 177-195.
- [16] HOWE M S. Theory of vortex sound[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [17] 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: 181-195.
- [18] ZHU J Y. Aerodynamic noise of high-speed train bogies[D]. Southampton: University of Southampton, 2015.

作者简介: 朱剑月(通信作者), 男, 1973年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为高速列车空气动力学与气动噪声。

E-mail: zhujianyue@tongji.edu.cn