

高速列车头车安装裙板后流场与气动噪声特性 仿真分析

朱剑月^{1,2,3}, 徐凡斐^{2,3}, 朱颖谋¹, 张俊¹

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通
研究院, 上海 201804; 3. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 运用涡声理论和声类比方法, 计算分析了转向架舱外安装裙板后高速列车头车简化模型的空气动力与气动噪声特性。基于延迟分离涡模型获得的近场流场被用于预测远场声辐射。结果表明, 流体通过头车时形成了不同尺度和方向的复杂涡结构, 上游几何体周围产生的湍涡向下游传播并与下游几何体相互作用, 从而在头车尾部形成高湍流度尾迹。头车几何体近壁流场内形成的四极子噪声中, 体偶极子声源高于体四极子声源, 成为四极子主要声源。头车鼻锥、转向架、转向架舱后壁面以及尾部等部位的涡脱落、流动分离和流体相互作用剧烈, 涡结构发展集中, 几何体表面压力脉动变化显著, 诱发形成偶极子气动噪声源。转向架舱外侧安装裙板后, 在沿转向架中心的水平面内, 后转向架部位辐射的气动噪声较前转向架强; 头车沿线路侧向辐射的气动噪声强度分布较均匀, 头车端部产生的气动噪声略高于头车尾部。裙板减弱了转向架区域流动冲击与湍流脉动, 降低了头车气动噪声的产生与辐射。

关键词: 气动噪声预测; 铁路噪声; 流体特性; 高速列车头车; 转向架舱裙板

中图分类号: TB535; U270.1⁺6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)05-1036-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.05.018

引言

当高速列车运行速度超过 300 km/h, 与滚动噪声和牵引噪声相比, 气动噪声将占据主导地位^[1-3]。近年来, 很多研究采用数值仿真方法计算分析了高速列车整车及其关键区域气动噪声的辐射特性与影响因素。肖友刚等^[4]以高速列车头部曲面为研究对象, 利用映射法生成六面体贴体网格, 分析了高速列车流线型头部的气动噪声特点, 认为车头产生的气动噪声为宽频噪声, 无明显主频率, 车头采用平滑的流线型外形, 能有效减少气动噪声产生。刘加利等^[5]根据简化高速列车头车模型, 基于稳态流场计算结果, 利用宽频带噪声源模型计算分析了高速列车头车表面气动噪声源特性; 另外基于瞬态流场计算结果, 分析了头车表面脉动压力与远场气动噪声的时域与频域特性。黄莎等^[6]对高速列车转向架部位气动噪声进行了数值模拟, 表明转向架部位气动噪声为宽频噪声, 优化设计转向架外侧裙板, 可以有效降低气动噪声的产

生。张亚东等^[7]建立了细化拖车转向架的列车模型, 分析了轮对、构架与减振器等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, 认为构架和轮对的噪声贡献量较多, 转向架远场气动噪声为宽频噪声, 在各平面内具有噪声指向性与衰减特性。杜健等^[8]数值计算了高速列车受电弓气动噪声, 认为受电弓声辐射具有指向性, 受电弓顶部横梁是诱发电动噪声产生的主要部件。张军等^[9]建立了安装有受电弓与转向架结构的三车编组高速列车模型, 根据稳态流场结果计算了车体表面声功率级, 又根据瞬态流场预测了车体侧向辐射噪声, 结果表明受电弓滑板、车头部位转向架与车头鼻尖处为主要的噪声源。Zhu 等^[10]计算模拟了高速列车三车编组模型周围流场特性与气动噪声辐射性能, 认为列车运行所产生的气动噪声源为偶极子声源, 其中车头转向架区域产生的气动噪声较大。朱剑月等^[11]通过建立高速列车转向架区域简化模型, 计算分析了转向架舱对转向架区域流动与气动噪声产生的影响, 发现与单独转向架相比, 转向架舱结构改变了转向架流动特性

收稿日期: 2020-07-29; **修订日期:** 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875411); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5631); 上海市专业技术服务平台项目(19DZ2290400)

与声辐射指向性,削弱了转向架所产生气动噪声的强度,但转向架舱后壁由于流动冲击作用会形成较强气动噪声源。

综上所述,以往研究多数采用商用流体动力学(CFD)软件进行流场数值计算,CFD商用软件作为一个封闭系统,无法定制和修改源代码,多数软件包(如 ANSYS Fluent)在计算边界层流动时,当网格精度无法满足求解黏性底层时,将转换为采用壁面函数法进行数值模拟^[12]。由于高速列车结构复杂,多数数值仿真采用非结构化网格进行近场流场计算,然后基于声比拟方法进行远场气动噪声预测,分析时域与频域内气动噪声特性及其变化规律,对于综合考虑来流与几何体结构间相互作用而诱发气动噪声产生的机理还需要深入研究。由于不能识别湍流的形成与发展等涡动力学特征,声比拟理论无法理解涡运动与流体流动发声之间的关系,同时四极子声源在低马赫数流动下的计算常被忽略。高速列车整车数值模拟需要较大计算资源,采用非结构化网格进行数值模拟时,需确保流场计算准确,以获得影响气动噪声产生的流体微小脉动。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,并可以对流动现象和气动噪声特性进行分析。另外,由于头车各关键部位(如车头转向架区域)流动复杂,基于CFD商用软件采用定常或壁面函数法求解流场,很难获得流场准确特性,从而影响气动噪声预测的精确度。因此,本文在转向架区域未设裙板的高速列车头车流场和气动噪声特性分析基础上^[13],考虑在转向架舱外安装裙板结构,建立高速列车头车模型,采用全结构化网格划分计算域,运用具有开源代码的分析软件进行流场数值模拟,采用延迟分离涡模型(DDES)进行几何体壁面边界层求解与边界层外流动计算,以准确模拟头车周围高湍流度的复杂非定常流动,基于涡声理论并结合声比拟方法分析高速列车头车气动噪声产生机理,阐明其声辐射指向性与各主要部件噪声贡献量,为高速列车关键区域低噪声设计和优化提供理论基础。

1 气动噪声数值模拟方法

高速列车周围为低马赫数流动,若列车运行速度为300 km/h,对应马赫数为0.25,故在计算流场的流体动力学性能时,将忽略流体的可压缩性。另外在低马赫数时,几何体表面压力脉动产生的偶极子噪声是流动诱发噪声的主要声源,可以通过不可压缩流体方程进行计算^[14]。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;根据基于Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型的延迟分离涡模型(DDES)进行数值模拟。

根据声学类比方法,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 和 Hawkings 由广义导数守恒律得到广义波传播方程^[15]

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

式中 c_0 为周围无扰动时声波在空气中的传播速度; p' 为远场声压; ρ 为空气密度, ρ_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 方向上的流体速度分量 ($i=1, 2, 3$); $\delta(f)$ 为 Dirac delta 函数, 采用方程 $f(x, t) = 0$ 描述积分面; x_i 或 x_j 表示笛卡尔坐标系的三个方向; P_{ij} 为可压缩应力张量; n_j 为单位法向量分量; T_{ij} 为 Lighthill 应力张量, 为四极子噪声源; $H(f)$ 是 Heaviside 函数 (当 $f > 0$ 时, $H(f) = 1$; 当 $f < 0$ 时, $H(f) = 0$)。

采用声类比方法计算噪声时,若不考虑四极子声源产生的声辐射,基于延迟时间法,方程(1)的解可表示为

$$p'(x, t) = p'_T(x, t) + p'_L(x, t) \quad (2)$$

式中 $p'(x, t)$ 表示位于远场 x 的声接受点在基于观测者时间 t 的声压脉动; $p'_T(x, t)$ 和 $p'_L(x, t)$ 分别为厚度噪声源与载荷噪声源产生的远场声压,由以下公式进行求解^[16-17]:

$$4\pi p'_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\dot{Q}_n + Q_n}{r|1 - M_r|^2} \right]_{\text{ret}} dS + \int_{f=0} \left[\frac{Q_n (r\dot{M}_r + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 |1 - M_r|^3} \right]_{\text{ret}} dS \quad (3)$$

$$4\pi p'_L(x, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r|1 - M_r|^2} \right]_{\text{ret}} dS + \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r|1 - M_r|^2} \right]_{\text{ret}} dS + \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{L_r (r\dot{M}_r + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 |1 - M_r|^3} \right]_{\text{ret}} dS \quad (4)$$

式(3)与(4)中, $[]_{\text{ret}}$ 表示取值于延迟时间 $\tau = t - |x - y|/c_0$, 其中 $|x - y|$ 为声源点到远场声接受

点的矢径值;变量上面的点表示对基于声源时间的
时间求导; \mathbf{r} 表示声辐射矢径; \mathbf{M} 为局部马赫数矢
量,其分量为 M_i ,相应地, $M_r = M_i r_i$ 和 $L_M = L_i M_i$;
 S 表示积分面,描述为 $f(x, t) = 0$;变量 Q_n 定义为:
 $Q_n = [\rho(u_i - v_i) + \rho_0 v_i] n_i$;变量 L_i 定义为:
 $L_i = [(p - p_0) \delta_{ij} + \rho u_i (u_j - v_j)] n_j$,其中 δ_{ij} 为 Kronecker
delta 符号,即当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$,而 $i \neq j$ 时,
则 $\delta_{ij} = 0$ 。

为了阐明高速列车头车周围流场中湍流运动发
声机理,运用涡声理论分析头车近壁流场内四极子
声源特性^[18-19]。对于等熵低速流动,涡声方程可以
表示为

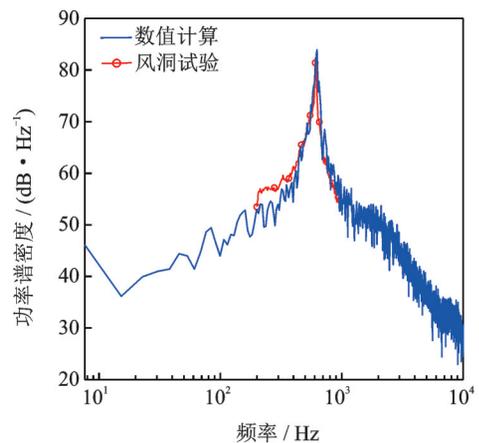
$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \nabla \cdot [\rho_0 (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v})] + \nabla^2 \left(\frac{1}{2} \rho_0 |\mathbf{v}|^2 \right) \quad (5)$$

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 1 项为体偶极
子声源,来自于流场中涡系的拉伸与破裂;方程右端
第 2 项为体轴向四极子声源,表现为流体动能分布
不均匀形成的声源。涡声方程是 Lighthill 声类比方
程在低马赫数流动下的近似,两方程本质上一致。
当流动中存在固体边界时,几何体壁上由于流场
内涡运动产生了作用在壁面附近流体上的脉动力,
该作用力随时间的变化诱发了固体边界上偶极子源
气动噪声的形成与辐射,故 Ffowcs Williams-Hawk-
ings (FW-H) 方程中偶极子声源也可以通过涡声方
程中 Lamb 矢量求解获得^[19]。因此,涡声方程将流
场中涡量的运动变化与气动噪声的产生联系起来,
可以基于涡动力学进行流体流动发声的产生机理
研究。

2 网格无关性分析与数值计算试验 验证

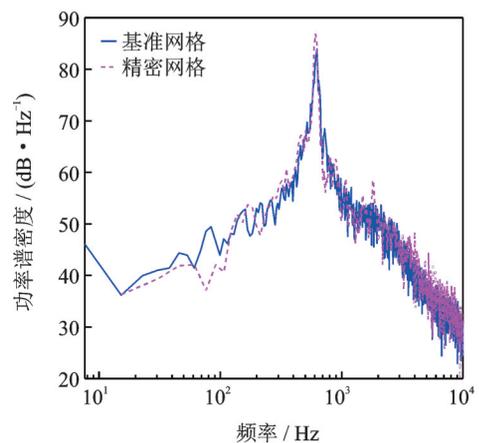
由于需要较大计算资源,网格无关性分析对于
复杂结构较难实现。本简化模型中轮轴是典型的圆
柱状结构,壁面易产生流动分离与形成涡脱落等复
杂流动,故圆柱绕流算例用于网格无关性分析与数
值计算试验验证,并为高速列车头车模型的网格划
分提供参考。风洞试验设置如下^[20]:圆柱直径为 20
mm,长度为 500 mm (25 倍直径),对于预测圆柱横
向中轴面内气动噪声辐射问题可视为无限长;来流
速度为 64 m/s,湍流度低于 0.5%。根据风洞试验参
数建立数值仿真模型,计算域左右两侧设置为周期

边界条件,模拟无限长圆柱体,远场声接收点位于圆
柱横向中轴面内,距离圆柱轴向中心线 1.4 m 处。
通过改变圆柱周向与轴向网格数进行不同精度网格
的划分^[21]。图 1 为圆柱绕流远场气动噪声频域内声
压级比较。由图 1(a)可见,采用基准网格的数值预
测结果与风洞试验结果取得很好一致。分析图 1
(b)可以发现,两种不同精度网格的数值计算结果也
吻合很好,圆柱绕流涡脱落对应的主频值相近,与
基准网格(网格数为 115 万)相比,采用精密网格(网
格数为 460 万)预测的主频幅值较高,这是由于网格
精度提高、时间步长减少之后,靠近圆柱壁面尾迹内
生成了更多脱落涡,各湍涡之间相互作用也相应加
强,导致圆柱壁面压力脉动幅值增加。因此,考虑节
约计算资源与提高计算效率,该圆柱算例基准网格
的网格拓扑技术被用于本文高速列车头车模型的网
格划分,相同的网格生成技术曾被应用于高速列车
轮对与转向架结构的气动噪声预测,其数值计算值
与风洞测试值吻合良好^[21-22]。



(a) 噪声预测试验验证

(a) Noise prediction verified by experiments



(b) 不同精度网格的噪声预测结果

(b) Noise prediction results through different meshes

图 1 圆柱绕流算例远场气动噪声比较

Fig. 1 Spectra comparisons of the radiated noises for the cylinder case

3 计算模型设置

转向架舱外安装有裙板的高速列车头车模型(1:25缩比)包括车头、前后两转向架区域、车身与车尾等结构,如图2所示。其总体几何尺寸为1020 mm×105 mm×145 mm(长×宽×高),由于既有提速线路部分列车采用钝形车头,头车模型未完全流线型化,以考虑其对气动噪声影响;地面简化为平面,忽略钢轨和轨枕结构,故车轮底部与地面保留一定间距。

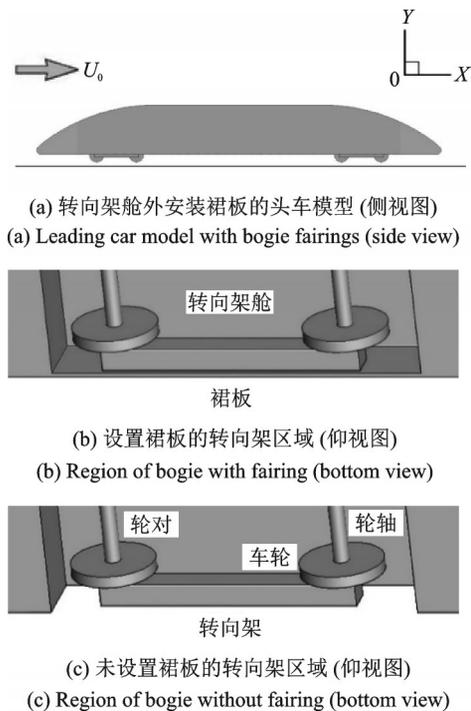


图2 高速列车头车模型

Fig. 2 Simplified leading car model

由于头车沿展向(z 方向)为对称结构,数值模拟时采用展向半车模型,以减少计算量。根据上述圆柱绕流算例网格无关性分析,计算区域采用结构化网格划分,车头表面及其周围网格划分如图3所示。

边界层内第1层网格至几何体固体表面距离为 1×10^{-5} m,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无量纲距离, $y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$,其中 y 是网格质心至壁面的距离; ν 为运动黏性系数; u_τ 为摩擦速度: $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$, τ_w 为壁面切应力。由于壁面流速为零,在近壁面区域内,流体的速度梯度较大,黏性力占主导作用)的最大值不超过1,以确保边界层内所采用的湍流模型在黏性底层内考虑低雷诺数效应。该网格划分技术在整个计算区域内共生成6152万个结构化网格。

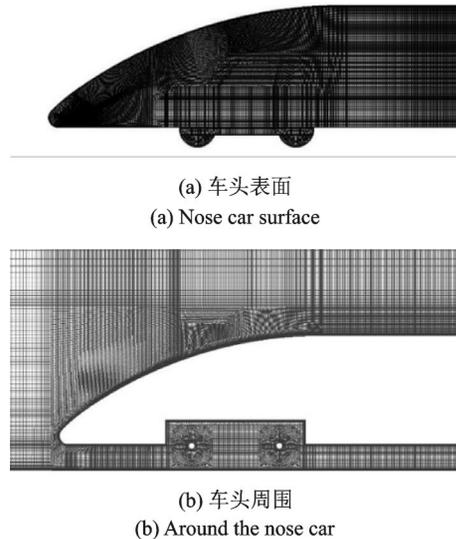


图3 车头表面及其周围结构化网格划分

Fig. 3 Structured mesh topology around the nose car

计算域的边界条件设置如下:来流为低湍流度均匀流($U_0=30$ m/s);顶面与两侧面均设为对称面(相当于剪切为零的滑移壁面);头车(除车轮外)所有固体表面均定义为静态无滑移壁面,车轮表面定义为运动无滑移壁面并根据来流速度施加相应的转动角速度条件;地面定义为以来流速度进行移动的无滑移壁面;出口设为压力出口。数值仿真时,时间步长先采用 5×10^{-6} s,再增至 1×10^{-5} s,使得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。为便于分析头车由于周围流动发展与变化而诱发的气动噪声,不考虑地面、头车车体与转向架舱外裙板等几何体对于声波的反射。

4 数值计算结果分析

高速列车头车模型数值模拟在大型并行机Iridis4 (University of Southampton)上运行,计算时采用480个处理器,运行 5.6×10^4 个时间步后,流场达到统计意义上稳定;接着再运行 3.2×10^4 个时间步进行声源数据采集,以确保时间序列计算结果的频谱分析获得合理的频率分辨率。为了理解头车周围流场和气动噪声特性,以下对头车壁面附近流场计算结果的 Q 准则等值面、涡量场、头车各主要部件气动力性能、远场辐射噪声指向性与各关键区域气动噪声贡献量等物理量进行分析。

4.1 瞬态流场

高速列车头车流场内涡运动及其发展将影响气动噪声产生,为分析头车周围流动特性,图4绘出了

流场中壁面附近的湍涡结构,采用Q准则显示 $\alpha=5$ 的等值面, $\alpha=Q/(U_0/D)^2$,其中Q为速度梯度张量第二不变量, U_0 为来流速度, D 为车轮直径;颜色表示速度幅值的大小。

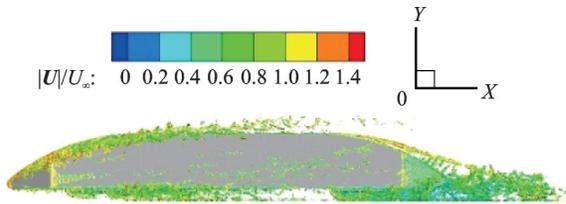


图4 头车壁面附近涡结构(Q准则显示)

Fig. 4 Iso-surfaces of the instantaneous normalized Q criterion

可以发现头车鼻锥与侧墙连接部位、前后两转向架区域以及头车尾部流动变化较大,形成了不同尺度的湍涡结构,涡运动发展集中。由于头车简化模型的流线型设计程度较低,鼻锥与侧墙连接部位产生了流动分离,诱发了较多湍涡沿车头与侧墙交界处向车顶方向发展。前后两转向架区域的流动变化也较为显著,裙板缓和了位于转向架区域车体侧向表面上的流动,但来流在头车底部、转向架舱端分离后,与转向架各部件发生较强的流体相互作用,之后又撞击转向架舱后壁面,形成大量湍涡结构向下游传播。头车尾部流动变化主要受尾迹形成与发展的影响,通过分析图5所示的头车壁面附近沿着车轮中心纵向切面的涡量场轮廓图($\omega_z = (\partial V/\partial x - \partial U/\partial y)D/U_0$)后可以发现,前转向架部位产生的不同尺度的湍涡,沿着车体底部向下游流动,与后转向架结构进行相互作用后,融合在头车尾流中形成湍流度较高、分布较广的尾迹区。由此可见,头车周围流动表现为前端鼻锥处剪切层涡流、前后转向架区域三维近地空腔复杂流动与后端尾迹涡脱落等特征,头车周围非定常流动中不同湍涡结构与几何体边界干涉诱发的壁面压力脉动,将导致气动噪声产生与向外辐射。

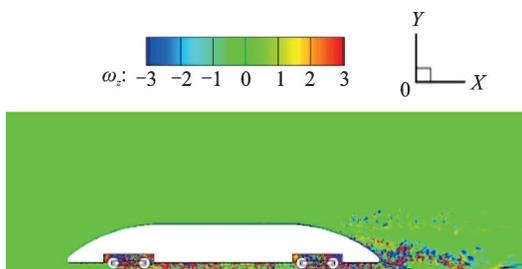
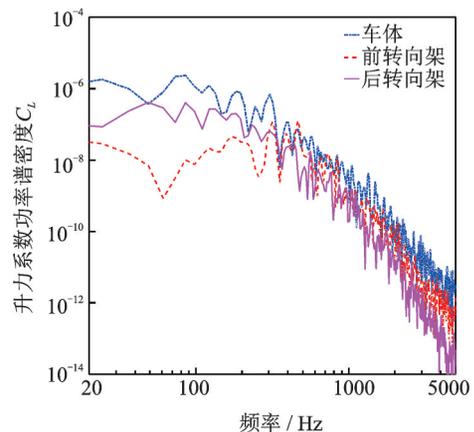


图5 头车壁面附近瞬态涡量场轮廓图

Fig. 5 Contours of the instantaneous spanwise vorticity field in a vertical plane

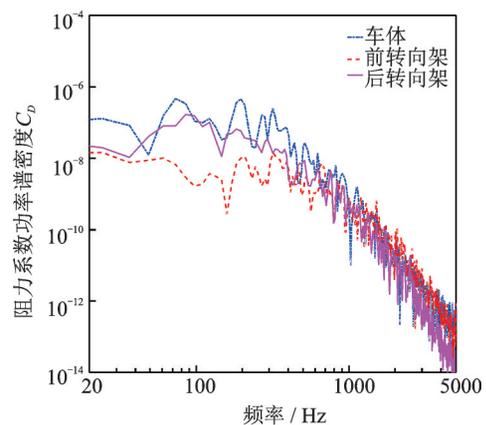
4.2 气动力性能

如前所述,低马赫数下运动物体固体壁面上形成的偶极子声源,其分布在声学上对应于固体边界施加给流体的脉动力,故对头车各主要部件的气动力性能进行分析。图6比较了头车车体与前、后转向架的升力与阻力系数功率谱密度(PSD),气动力系数通过 $\frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 A$ (其中A为车体正投影面积)进行无量纲化。分析图6可知,在5 kHz频域内,头车车体各气动力系数最高,这与头车鼻锥部位来自于来流的直接冲击作用、前后两转向架舱壁受到湍涡撞击作用以及头车尾迹内大尺度尾涡激扰作用等因素密切相关;转向架区域覆盖裙板后,在300 Hz以上频率范围内,头车前转向架气动力系数略高于后转向架,而在300 Hz以下的低频区域内,后转向架受到了头车车尾流动分离与尾涡振荡的激扰作用,使得脉动力幅值明显高于前转向架。头车各主要部件的气动力性能将影响这些区域以及整个头车气动噪声的形成与辐射。



(a) 升力系数

(a) Lift coefficient



(b) 阻力系数

(b) Drag coefficient

图6 头车不同部件气动力系数功率谱密度

Fig. 6 Power spectral densities of force coefficients for different components of leading car

4.3 近场四极子声源特性

考虑涡声方程(5)右端两声源项中密度为常量($\rho_0=1.225 \text{ kg/m}^3$),为便于数据处理,省略该密度项,由此绘出高速列车头车周围流场内体偶极子声源(其强度定义为: $\nabla \cdot [(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v})]$)和体四极子声源(其强度定义为: $\nabla^2 \left(\frac{1}{2} |\boldsymbol{v}|^2 \right)$),各声源强度在云图显示时采用了相同数量级以便于比较两不同声源分布范围。图7与8分别为头车周围沿车轮纵向中截面的体偶极子和体四极子声源分布,显示了前后两转向架区域、车体底部与地面之间以及头车尾端等部位形成了较强的体偶极子与体四极子声源。

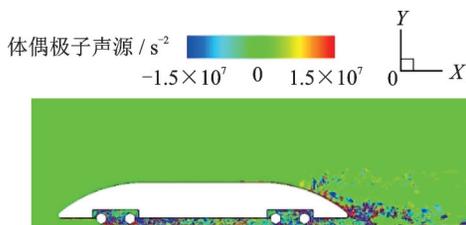


图7 头车周围沿车轮中截面体偶极子声源分布
Fig. 7 Contours of volume dipole source distribution of leading car along the wheel vertical mid-plane

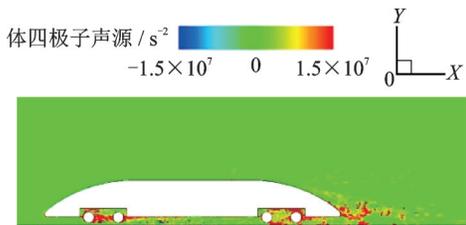


图8 头车周围沿车轮中截面体四极子声源分布
Fig. 8 Contours of volume quadrupole source distribution of leading car along the wheel vertical mid-plane

为进行声源强度对比,图9绘出了车头前转向架区域1/4车轴长度位置纵向截面内沿流线方向体声源分布(车头鼻尖点位于 $x=0$ 处),可以发现转向架舱中部和后缘附近区域分布了具有较高强度的体偶极子和体四极子声源,与体四极子声源相比,体偶极子声源强度较高,这是由于高速列车几何体近壁区流动分离、湍涡运动及涡线变形与破裂产生了较强的流体相互作用,所形成的体偶极子声源中由流动能量转化为声能的效率较高,成为近场四极子噪声的主要声源。故涡声方程中的Lamb矢量($\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}$)构成了偶极子噪声主要声源,当其随时间变化时,相应部分流体会产生噪声。由此可见,涡量是低马赫数下高速列车流动诱发气动噪声形成的根源。由于涡旋结构往往分布于较狭小的流动区域,因此可将列车气动噪声偶极子声源视为

紧致声源。

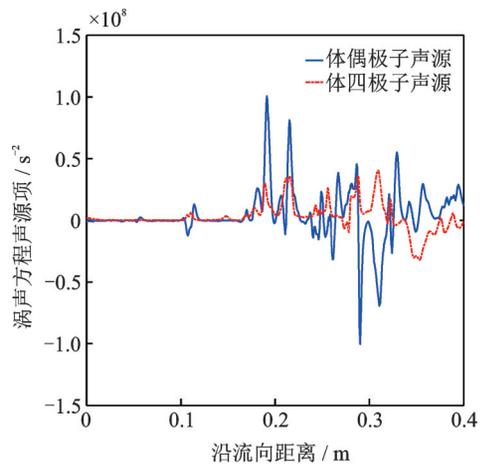
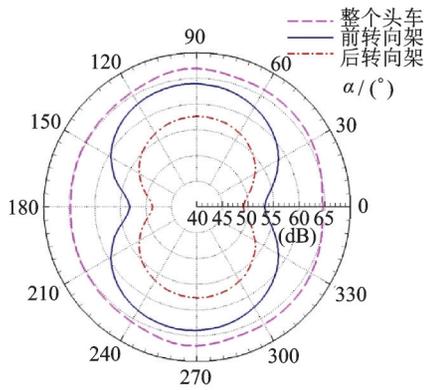


图9 车头前转向架区域纵向截面内沿流线方向体声源分布
Fig. 9 Volume sound source distribution around the leading bogie region along the streamline in the vertical plane

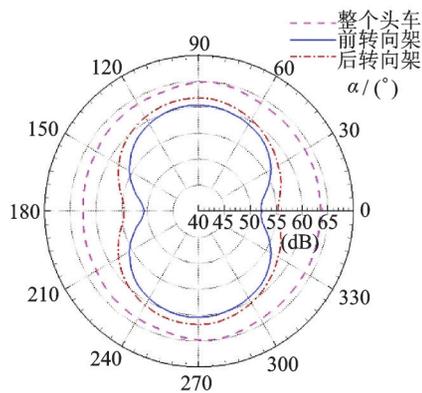
4.4 远场气动噪声特性

当瞬态流场达到统计意义上稳定后,采用FW-H声类比方法,以近场流场数据作为源项对远场辐射噪声进行预测。根据Welch方法编制的程序对计算所得的远场噪声时间序列进行功率谱密度分析^[22],然后再进行总声压级的计算($OASPL=10\lg(\sum 10^{SPL_i/10})$),式中 $SPL=20\lg(p_e/p_{ref})$,其中 p_e 为实际声压, $p_{ref}=20 \mu\text{Pa}$ 为参考声压)。根据展向半车模型所得的流场数据,整车模型的声压级由沿着展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:假定两半车声源互不相关, $L_p=10\lg(10^{L_{p1}/10}+10^{L_{p2}/10})$ 。声辐射指向性计算时,远场声接受点均布在半径为1 m的圆周上,圆心为车体中心(针对整车为计算对象)或转向架中心(针对转向架部位为计算对象),垂向距离轨面高度为0.018 m,每个声接受点依据其时间序列声压信号计算出一定频域内的总声压级。图10绘出了转向架区域设置裙板前后通过轮对轴心的水平面内整个头车及其前、后转向架的声辐射指向性,可以发现:整个头车产生的气动噪声沿水平面内各方向指向性较为均匀,呈圆形辐射状,这主要是由于来流作用下,头车周围产生了大量不同尺度的不规则涡诱发产生气动噪声所致;相比之下,转向架舱内流动与转向架结构的相互作用,使得前、后转向架的声辐射指向性沿车侧方向呈横向偶极子形状;由图10(a)可见,转向架舱外无裙板,后转向架产生的气动噪声远低于前转向架,图10(b)则显示转向架舱外设置裙板后,后转向架噪声级幅值较前转向架增



(a) 无裙板头车工况

(a) Leading car case without bogie fairings



(b) 设置裙板头车工况

(b) Leading car case with bogie fairings

图 10 远场气动噪声声辐射指向性

Fig. 10 Far-field noise directivity

加了 1.5-4 dB,表明转向架区域被裙板覆盖后,后转向架由于受到列车周围流动与尾流的相互作用,相比于前转向架产生了较强的气动噪声,尤其是沿列车纵向中心线方向;另外,与无裙板头车工况相比,转向架舱外安装裙板可使整个头车模型沿列车侧向各方向远场辐射噪声降低 1-3 dB,气动噪声得到了有效控制。因此,头车前转向架区域作为主要气动噪声声源,在其两侧设置裙板后,可以抑制转向架舱前缘车体侧壁处剪切层的形成与发展,减弱转向架舱前缘涡流和转向架舱内空腔涡流与转向架结构的相互作用,有效削弱几何体壁面压力脉动及其诱发气动噪声的产生,从而降低整个头车向外辐射的气动噪声。由于数值计算时头车静止不动,为了模拟头车通过轨道线路旁某固定位置时产生的气动噪声,在头车前 1 m 处为起点,至头车后 1 m 处为终点间的距离内每隔 0.03 m 布置了接收点(侧向距离转向架中心 0.3 m,垂向距离轨面 0.048 m),将各均布接收点结果按照时间间隔依次排列在一起,则可以获得头车通过某固定接收点时产生的噪声时间历程(不考虑多普勒效应),图 11 绘出了头车及其各主要部件通过固定接收点时(位于静止头

车前 1 m 处)头车不同部位所产生的总声压级。分析图 11 可以发现,由于来流与头车迎风面间流动冲击、转向架舱内复杂流动以及头车尾端流动分离,使得头车车体部位产生了较大噪声;整个头车通过时辐射的气动噪声变化较为平缓,头车端部区域声压级略高于头车尾部,这是由于转向架区域覆盖裙板后,增加了车体表面平顺性,使得头车各部位形成的气动噪声辐射均匀;另外,头车前、后两转向架产生的气动噪声相当,究其原因,裙板减弱了气流沿车体侧向流经转向架舱空腔区域产生的流动分离和流体冲击,使得转向架辐射噪声主要由转向架舱内流动与转向架结构间相互作用诱发转向架壁面产生压力脉动所致。

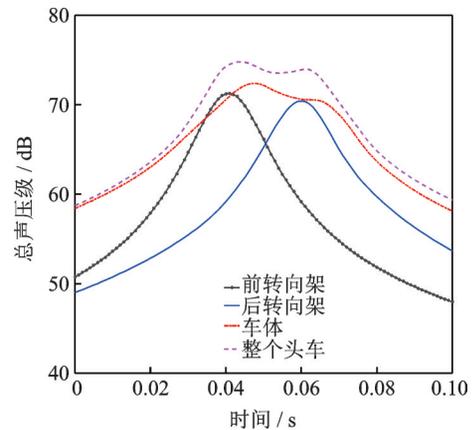


图 11 头车通过时气动噪声总声压级

Fig. 11 Pass-by overall sound pressure from different parts of the simplified leading car

5 结 论

本文基于涡声理论和声类比方法,模拟计算了转向架舱外安装裙板后高速列车头车模型流场与气动噪声特性。结果表明:(1)头车鼻锥部位与侧墙连接处、两转向架区域、转向架舱后壁面以及头车尾端流动分离与流体相互作用较强,涡结构发展集中;头车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,强度高于体四极子声源;(2)对于远场辐射噪声,整个头车沿通过转向架中心水平面内的气动噪声声辐射指向呈多向性且沿各方向分布较均匀,前后两转向架的声辐射呈沿车体侧向的横向偶极子形状,后转向架由于受到头车周围流动与尾流的相互作用,辐射的气动噪声较前转向架强;(3)列车通过线路旁侧向接收点的气动噪声时间历程表明,转向架区域安装裙板使得头车各关键区域产生的气动噪声强度分布

较均匀,头车端部形成的气动噪声略高于头车尾部;
(4)与未安装裙板工况相比,头车转向架舱外安装裙板,减弱了前转向架区域流体相互作用,平顺了头车周围流动,避免了较强湍流脉动形成,有效降低了前转向架区域以及整个头车的气动噪声产生与辐射。本文基于头车简化模型的研究,可为实际运行高速列车头车与尾车裙板设置及其气动噪声控制提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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, 4: 30-41.
Tian Hongqi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Engineering Sciences, 2015, 4: 30-41.
- [2] 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: 217-459.
Yang Guowei, Wei Yujie, Zhao Guilin, et al. Research progress on the mechanics of high speed rails[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45: 217-459.
- [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] 肖友刚, 康志成. 高速列车车头曲面气动噪声的数值预测[J]. 中南大学学报, 2008, 39(6): 1267-1272.
Xiao Yougang, Kang Zhicheng. Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from high speed train head surface[J]. Journal of Central South University, 2008, 39(6): 1267-1272.
- [5] 刘加利, 张继业, 张卫华. 高速列车车头的气动噪声数值分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(9): 19-26.
Liu Jiali, Zhang Jiye, Zhang Weihua. Numerical analysis on aerodynamic noise of the high-speed train head [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(9): 19-26.
- [6] 黄莎, 杨明智, 李志伟, 等. 高速列车转向架部位气动噪声数值模拟及降噪研究[J]. 中南大学学报, 2011, 42(12): 3899-3904.
Huang Sha, Yang Mingzhi, Li Zhiwei, et al. Aerodynamic noise numerical simulation and noise reduction of high speed train bogie section [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(12): 3899-3904.
- [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): 106-116.
Zhang Yadong, Zhang Jiye, Li Tian, et al. Numerical research on aerodynamic noise of trailer bogie[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 106-116.
- [8] 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): 935-941.
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): 935-941.
- [9] 张军, 孙帮成, 郭涛, 等. 高速列车整车气动噪声及分布规律研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 10-17.
Zhang Jun, Sun Bangcheng, Guo Tao, et al. Research on aerodynamic noise radiated from whole body surface of high-speed train and its distribution[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 10-17.
- [10] 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.
- [11] 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): 1556-1608.
Zhu Jianyue, Ren Lihui, Lei Zhenyu. Effect of bogie cavity on flow and flow-induced noise behaviour around high-speed train bogie region[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(11): 1556-1608.
- [12] FLUENTANSYS 19.1 Theory Guide [M]. ANSYS, Inc., 2018.
- [13] 朱剑月, 胡志伟. 高速列车头车空气动力和气动噪声特性分析[C]. 2016年度全国气动声学学术会议, 北京, 2016.
Zhu Jianyue, Hu Zhiwei. The flow and flow-induced noise behaviour of a simplified high-speed train leading car[C]. National Academic Conference on Aeroacoustics, Beijing, 2016.
- [14] Wang M, Freund J B, Lele S K. Computational prediction of flow-generated sound[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 483-512.
- [15] Ffowcs Williams J, Hawkings D. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1969, 342: 264-321.
- [16] Farassat F. Derivation of formulations 1 and 1A of Farassat[R]. NASA/TM-214853, 2007.
- [17] Brentner K S, Farassat F. Modelling aerodynamically generated sound of helicopter rotors [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 83-120.
- [18] Powell A. Theory of vortex sound [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36(1): 177-195.
- [19] Howe M S. Theory of Vortex Sound[M]. Cambridge:

- Cambridge University Press, 2003.
- [20] King W F, Pfizenmaier E. An experimental study of sound generated by flows around cylinders of different cross-section [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 328: 318-337.
- [21] 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.
- [22] Zhu J Y. Aerodynamic noise of high-speed train bogies [D]. Southampton: University of Southampton, 2015.

Numerical investigation on flow and flow-induced noise behaviour of simplified high-speed train leading car with bogie fairing

ZHU Jian-yue^{1,2,3}, XU Fan-fei^{2,3}, ZHU Ying-mou¹, ZHANG Jun¹

(1.The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001, China;

2.Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China;

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

Abstract: The aerodynamic and aeroacoustic behaviour of flow past a simplified high-speed train leading car with bogie fairing is studied based on the theory of vortex sound and the acoustic analogy method. The near-field unsteady flow is obtained by the delayed detached-eddy model and the results are used to predict the far-field noise. It is found that the unsteady flow past the leading car is characterized by the vortices of various scales and orientations separated from the geometries. The vortices formed behind the upstream geometries are convected downstream and impinge on the downstream bodies, generating a highly turbulent wake behind the leading car. The volume dipole is larger than the volume quadrupole and becomes the predominate source of the quadrupole noise generated around the leading car. Strong flow separations and vortex sheddings are developed in regions of the noise, bogies, bogie cavities, and rear parts of the leading car where the large wall pressure fluctuations are generated and the dipole noise of high level is produced correspondingly. After the bogie cavities are covered by the fairings, the noise radiated from the rear bogie is higher than the leading bogie in the horizontal plane along the bogie center. The intensity of the aerodynamic noise radiated to the track-side direction is distributed even with the noise level of the front region a little higher than the rear part. The current leading car model can effectively mitigate the turbulence fluctuation and flow interaction in the key regions with the bogie cavities shielded by the bogie fairings and consequently reduce the aerodynamic noise generation and radiation.

Key words: aerodynamic noise prediction; railway noise; flow behaviour; high-speed train leading car; bogie fairing

作者简介: 朱剑月(1973-),男,博士,副教授,博士生导师。电话:(021)69584712;E-mail:zhujianyue@tongji.edu.cn