

高速列车受电弓气动噪声仿真及控制技术研究

辛承华, 宋雷鸣

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京

收稿日期: 2023年11月22日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月27日

摘要

随着高速列车运营速度不断提高, 气动噪声逐渐成为列车主要噪声来源。受电弓作为车顶主要的受流装置, 其气动噪声成为亟待解决的噪声问题。本文基于Lighthill声类比理论, 采用CFD与声学求解器耦合的研究方法, 通过数值计算获取了受电弓区流场状况, 分析了表面气动噪声源分布及频谱特性, 研究了采用受电弓杆件背风区射流的措施对流场影响, 并评估了降噪效果。得出主要结论: 1) 受电弓表面偶极子声源为受电弓区域的主要气动噪声来源, 且背风面噪声远大于迎风面。2) 受电弓杆件背风区射流措施可有效改善流场状况, 降低受电弓气动噪声。

关键词

噪声控制, 受电弓, 气动噪声, 偶极子声源

Research on Simulation and Control Technology of Aerodynamic Noise of High Speed Train Pantograph

Chenghua Xin, Leiming Song

School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing

Received: Nov. 22nd, 2023; accepted: Dec. 20th, 2023; published: Dec. 27th, 2023

Abstract

With the continuous improvement of high-speed train operation speed, aerodynamic noise has gradually become the main source of train noise. As the main current collection device on the roof, the aerodynamic noise of the pantograph has become an urgent noise problem to be solved. This article is based on the Lighthill acoustic analogy theory and adopts the research method of coupling CFD and acoustic solver. The flow field in the pantograph area is obtained through numerical

calculation. Then the distribution and spectral characteristics of surface aerodynamic noise sources are analyzed. The effect of using the jet in the leeward area of the pantograph rod on the flow field is studied, and the noise reduction effect is evaluated. The main conclusions are drawn: 1) the surface dipole sound source of the pantograph is the main aerodynamic noise source in the pantograph area, and the noise on the leeward side is much greater than that on the windward side. 2) The measures of jet flow in the leeward area of the pantograph rod can effectively improve the flow field and reduce the aerodynamic noise of the pantograph.

Keywords

Noise Control, Pantograph, Aerodynamic Noise, Dipole Source

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速列车气动噪声的主要噪声源全部位于列车表面曲率变化较大以及有凹凸和空腔的区域。受电弓的杆状机械结构可对车顶高速气流造成强烈扰流, 形成较大的风激流噪声, 同时下方存在导流舱空腔, 因此受电弓区域噪声为高速列车气动噪声的最大噪声源, 其他气动噪声源的排序无固定顺序[1]。

有关于受电弓区域的气动噪声降噪分析日本也是起步最早, 为了降低受电弓所产生的气动噪声, 刚开始采取减少受电弓数量来实现, 随后开始对受电弓的形状进行改进。日本研发团队又对 700 系列车受电弓进行了改进, 研发出了一种 V 型受电弓[2], 该受电弓是一种单臂式的受电弓, 尽可能减少了受电弓的部件以及圆柱杆件, 另外对弓角以及碳滑板进行了打孔[3] [4] [5], 改变了受电弓顶部的流场, 进而降低了受电弓的气动噪声, 噪声值降低约 14 dB [2]。

法国 Noger C 等人用模型试验的方法, 对 TGA 型受电弓所产生的气动噪声进行了研究, 表面受电弓产生的气动噪声与湍流强度有关, 并对受电弓导流罩作出了一定的修改, 进一步试验表明气动噪声有些降低[6]。德国学者 W. Herbert [7]在新型受电弓的研发中, 设计了一款带有活动导风板结构的受电弓, 该导风板可以根据气流方向调整角度, 进而达到良好的气动降噪效果。Hee-Min Noh [8]采用风洞试验的方法研究了受电弓产生的气动噪声的特性, 用麦克风阵列测量分析了受电弓产生噪声的主要部件, 表明弓头和上下臂杆的关节处为受电弓主要的噪声源, 改变受电弓弓头的高度并进行试验最终取得了一定的降噪效果。利用风洞试验探究了受电弓弓头开孔数量对受电弓气动噪声的影响[8]。

根据以上学者研究成果可知, 受电弓区域噪声研究方法主要包括流体和声学仿真计算以及风洞实验, 气动噪声控制方法主要为受电弓气动外形优化以及导流板、导流罩等。本文通过数值仿真方法, 分析了国产某型高速列车受电弓流场状况, 分析了受电弓区噪声分布特性和频谱特征, 探究了采用背风面射流的主动噪声控制方法, 受电弓杆背风面射流措施可有效降低该处气动噪声。

2. 受电弓外流场数值计算

本文采用 CFD 与声学求解器耦合的方法, 基于 FLUENT 和 Virtual. Lab 联合仿真, 分析受电弓外场气动噪声特性。设置气流速度为 97.22 m/s 约等于 350 km/h, 分析 350 km/h 时速下的高速列车受电弓气动噪声状况, 空气处于不可压缩状态, 采用 SST 模型进行稳态流场的计算, 获得流场的稳态解, 并稳态流场为初始条件并运用大涡模拟(LES)湍流模型进行瞬态计算。

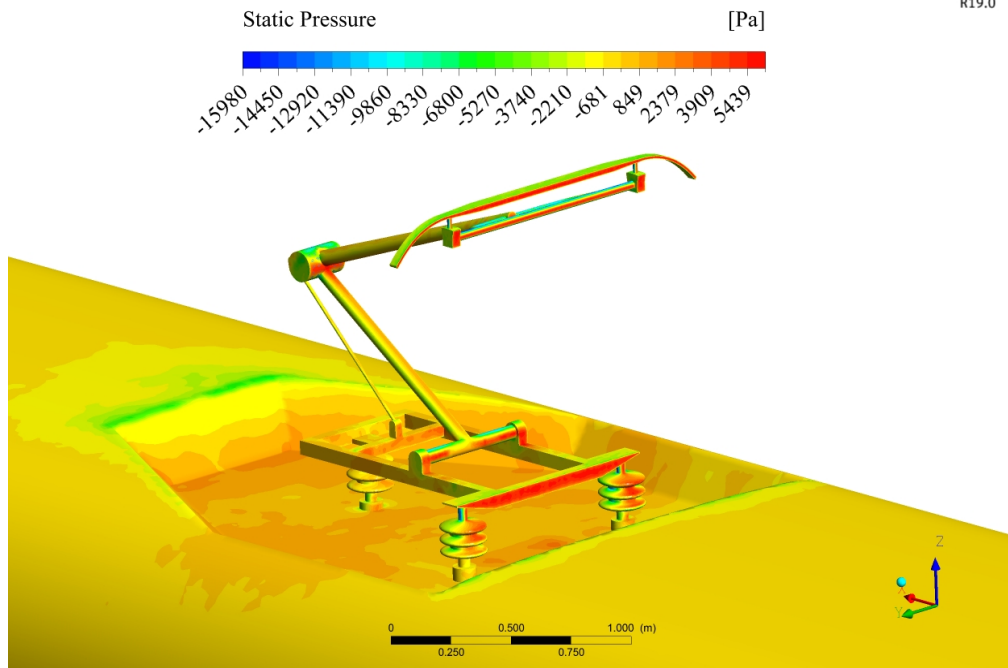


Figure 1. Static pressure cloud image of pantograph surface
图 1. 受电弓表面静压云图

稳态计算结果, 即受电弓表面的静压分布状况如图 1 所示, 由于受到来流直接冲击, 可以看到受电弓的迎风面上表面压力较大, 其中弓头、转轴以及受电弓底架的迎风面上压力最大, 最大静压约为 5500 Pa。受电弓的背风面相对于迎风面压力较小, 在受电弓背风面以及受电弓导流舱边缘形成明显的负压区, 在受电弓转轴处、弓头的背风面负压较为明显。

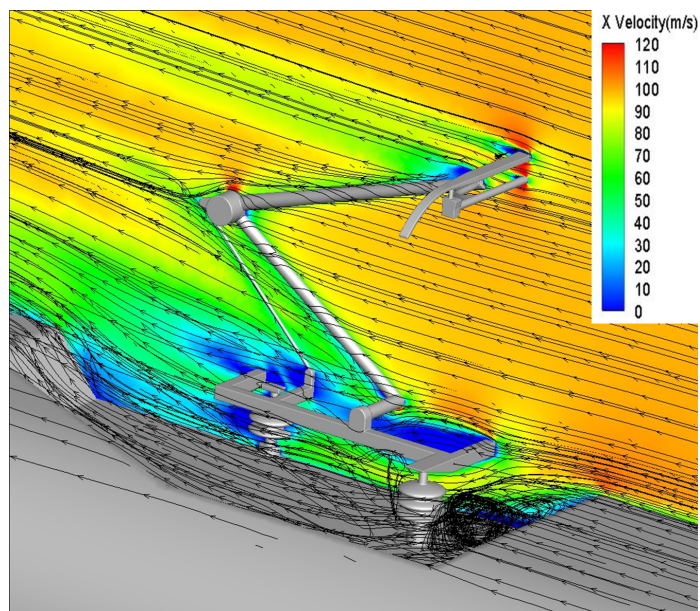


Figure 2. Velocity flow diagram of pantograph area
图 2. 受电弓区域速度流线图

为了更清晰分辨受电弓周围流场状况, 绘制出受电弓区域的流场沿列车前进方向速度流线图, 如图 2 所示。由图 2 可以看出, 受电弓将均匀流动的气流破坏, 经过受电弓导流舱的气流流动速度和方向急剧变化, 在受电弓导流舱形成流动漩涡。在受电弓弓头以及转轴处, 直线流动的气流方向迅速改变, 流动速度急速降低, 绕开受电弓杆件向后流动。可以明显的看出, 受电弓舱内的空气的流动速度小于舱外空气的流速。整个流场的最大速度出现在弓头和转轴附近。

高速列车车外气动噪声产生条件复杂, 其主要是流体与车体表面相互碰撞致使气体自身脉动所产生的噪声辐射[9]。在稳态流场计算结束后, 利用大涡模拟湍流模型, 以稳态计算的流场结果作为瞬态流场计算的初始条件, 设置瞬态计算步长为 1×10^{-4} s, 计算 1000 步, 采集物理时长为 0.1 s 的表面脉动压力作为计算受电弓气动噪声的声源。

3. 受电弓区域表面气动噪声源分布及频谱特性

将瞬态计算所得表面脉动压力进行频域分析, 得到频域范围内受电弓区域车体表面的偶极子声源分布情况, 当高速列车运行速度为 350 km/h, 得到各主要频率下表面偶极子声源的分布云图如图 3 所示。

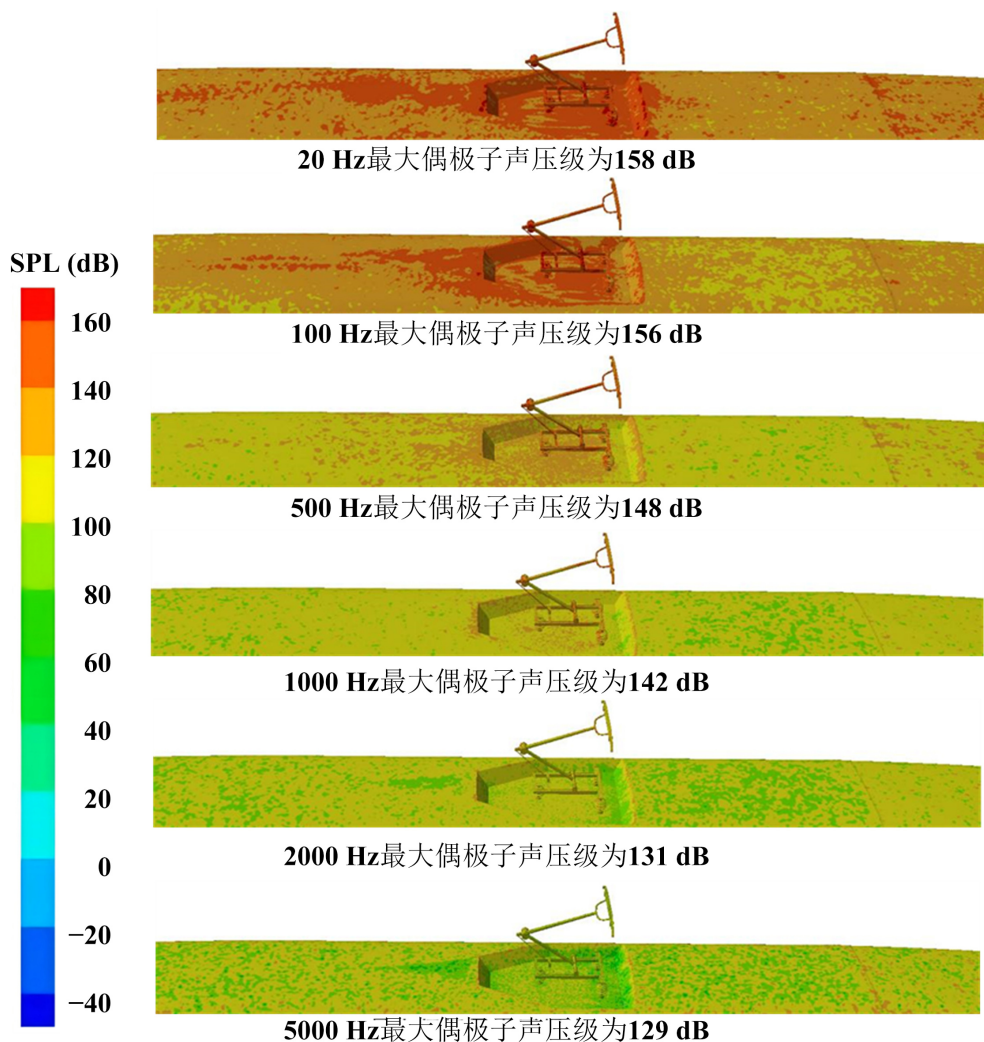


Figure 3. Surface dipole distribution cloud of each major frequency
图 3. 各主要频率下表面偶极子分布云图

由图 3 可以得出以下结论:

1) 在低频范围内受电弓车体表面声源声压级较大, 在 20 Hz 时, 最大偶极子声源声压级可达 158 dB。随着频率的升高, 声压级逐渐减小, 5000 Hz 时, 车体表面声源声压级最大为 129 dB, 相比 20 Hz 情况下降低了 29 dB。

2) 频率范围在 2000 Hz 以内, 受电弓车体表面偶极子声源强度分布较为集中。强度较大偶极子声源主要集中在受电弓迎风面以及受电弓舱边缘, 其他部位声源强度较弱。当频率达到 5000 Hz 时, 强度较大的偶极子声源分布较为分散。基本均匀分布在车体表面。

由于受电弓区域车体表面偶极子声源分布不均匀, 不同位置偶极子声源的声压级频谱存在较大差异, 本文在受电弓表面以及受电弓附近车体表面均匀的取了 100 个点, 得到其 A 计权声压级频谱, 然后对其进行平均, 能够得到具有统计能量平均意义的受电弓区域偶极子声源的频谱, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 受电弓区域偶极子声源声压级随着频率的升高, 先增大后减小, 频率由 20 Hz 上升到 100 Hz 过程中, 声源声压级逐渐升高。在频谱为 100 Hz 到 1000 Hz 范围内, 声压级稳定在 100 dB 以上, 呈现出“微拱”形状, 最高声压级可达 105.86 dB。当频率超过 1000 Hz, 声压级随频率的升高逐渐降低。

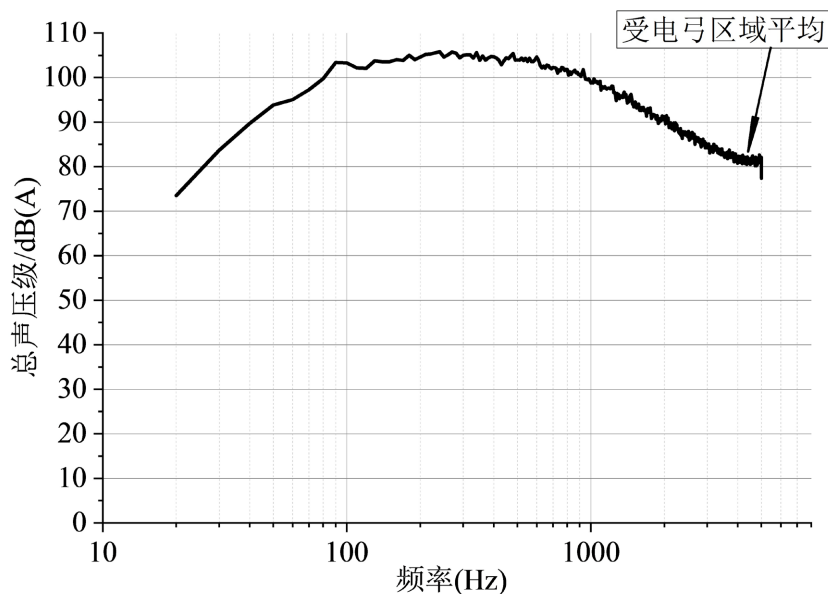
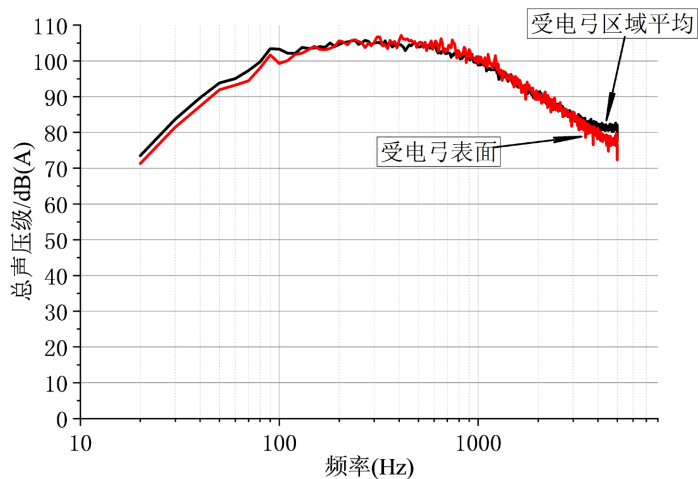


Figure 4. Spectrum of dipole sound source in the pantograph area

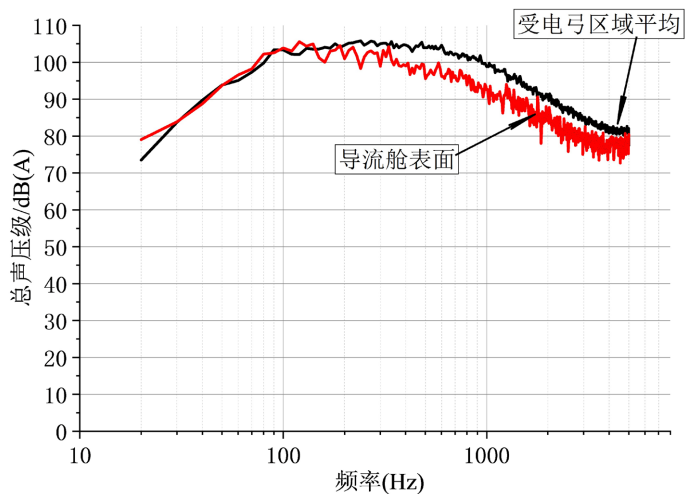
图 4. 受电弓区域偶极子声源频谱

为了探究受电弓区域各部位对偶极子声源的影响, 分别从受电弓表面、导流舱表面、列车表面三个区域选取足够数量的点, 得到具有统计能量意义的偶极子声源声压级频谱, 并同整个区域统计能量平均的频谱进行对比。对比结果如图 5 所示。由图 5 可知, 受电弓表面与受电弓整个区域偶极子声源的频谱非常接近, 且变化趋势相同, 在整个频率范围内基本吻合, 可以认为在 20~5000 Hz 范围内, 受电弓表面为受电弓区域的主要气动噪声来源。

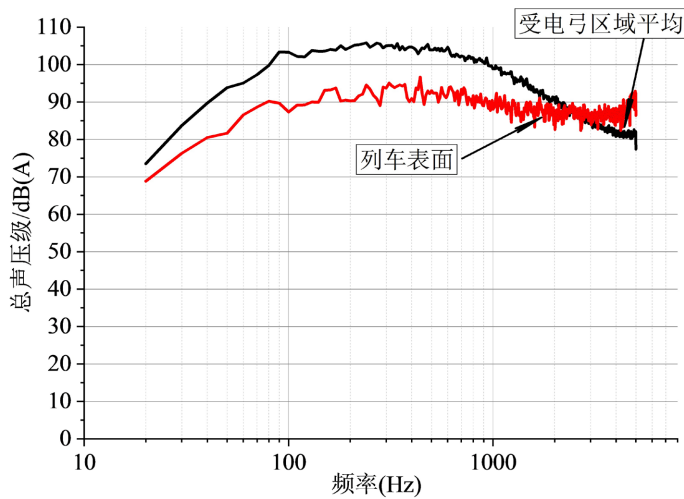
导流舱表面偶极子声源声压级明显小于受电弓整个区域, 其最大声压级差值达到 12.64 dB, 其导流舱表面偶极子声源声压级明显小于受电弓整个区域, 其最大声压级差值达到 12.64 dB, 其对受电弓区域噪声贡献相对较小。列车表面偶极子声源总体低于受电弓区域的平均水平, 最大差值达到了 16.44 dB, 在 2500 Hz 以上频域内, 列车表面偶极子声源高频噪声贡献较大。



(a) 受电弓表面偶极子声源频谱对比



(b) 导流舱表面偶极子声源频谱对比



(c) 列车表面与整个区域频谱对比

Figure 5. Comparison of frequency spectra in different regions
图 5. 各区域频谱对比

由图 1 可知受电弓杆件迎风面形成了较大的表面静压, 同时在受电弓杆件的背风面存在表面负压, 为了探究其对表面偶极子声源的影响, 同样在受电弓杆件的迎风面以及背风面选取一定数量的点, 计算其具有统计平均意义下的偶极子声源频谱结果如图 6 所示。

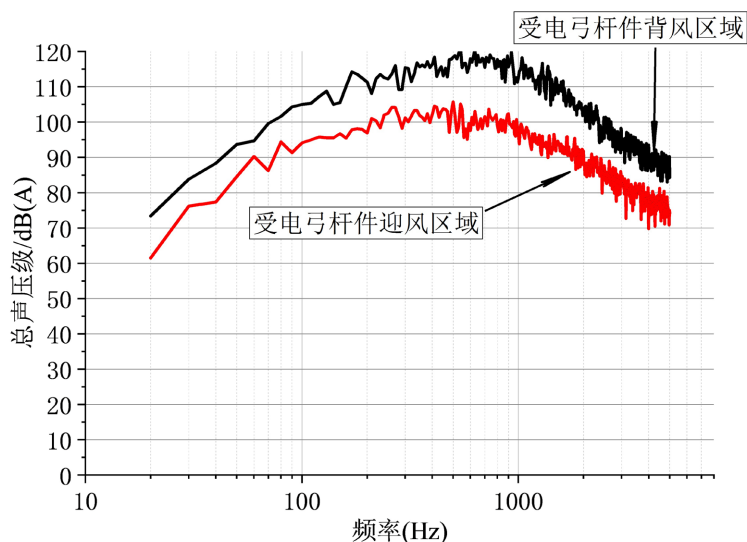


Figure 6. Spectrum of windward and leeward side of pantograph
图 6. 受电弓迎风面与背风面频谱

由图 6 可知, 受电弓杆件背风表面的偶极子声源声压级在全频域范围内高于迎风表面, 最大差值达到了约 26 dB。这是由于, 在列车高速运行条件下, 受电弓杆件背风面存在着大量的漩涡脱落现象, 形成了较强的压力脉动, 从而产生了强度较高的偶极子声源。受电弓杆件的迎风面漩涡脱落现象较弱, 因此偶极子声源强度较小。

4. 受电弓噪声主动控制

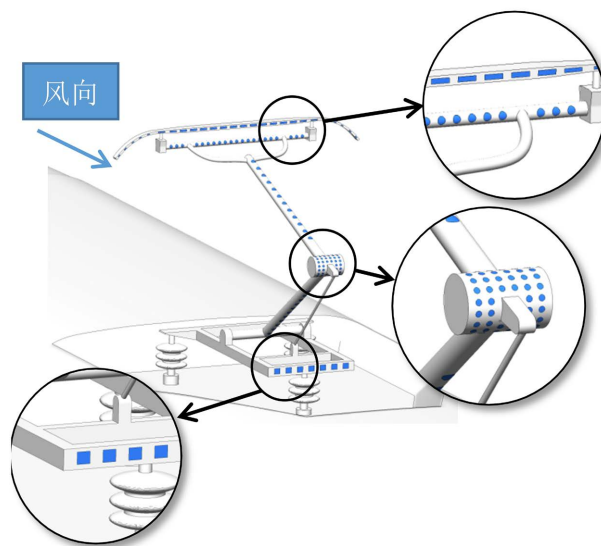
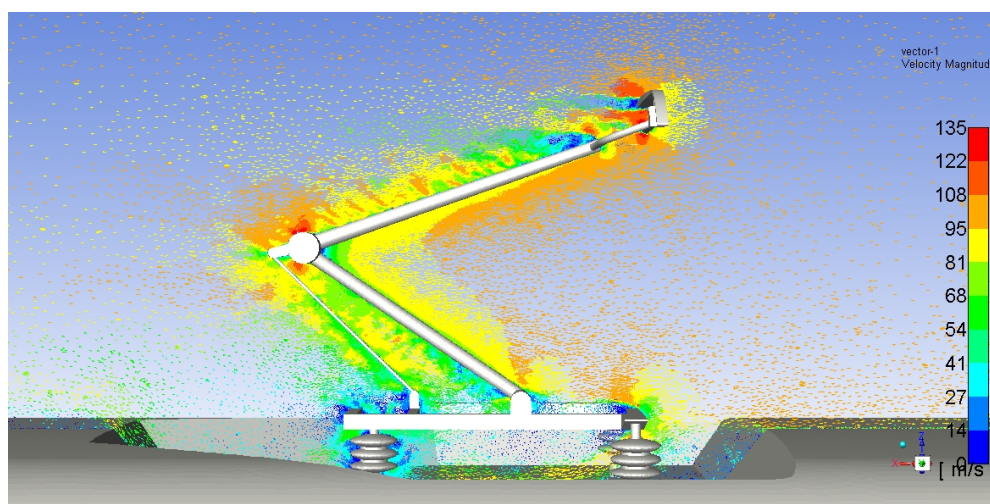


Figure 7. Pantograph surface jet port
图 7. 受电弓表面射流口

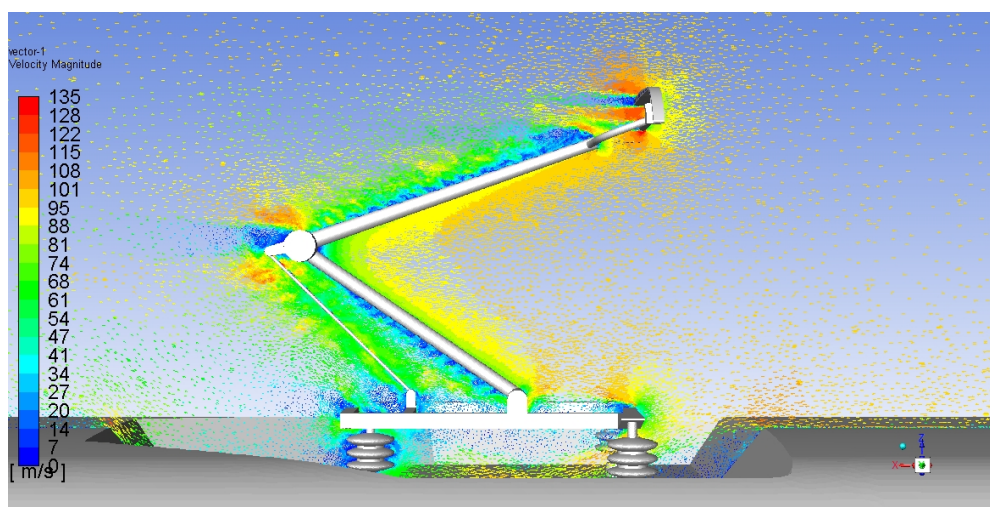
由受电弓区域偶极子声源频谱分析可知, 受电弓表面偶极子声源为该区域气动噪声主要贡献源, 同时相关研究也表明, 受电弓外场噪声主要来自于受电弓偶极子声源[10] [11]。主要原因在于受电弓背风面出现较多的涡流脱落, 形成了较强的偶极子噪声源, 远大于受电弓迎风面声压级。为引导受电弓背风面气流, 减少其紊乱程度, 以减少涡量的产生降低气动噪声, 在受电弓的背风面开出大小适中的射流孔。同时在受电弓转轴处设置了均布小孔, 形成射流气垫, 减少气流对受电弓转轴的表面冲击。

如图 7 所示, 在受电弓的背风面以及转轴处开出大小合适的射流口, 开射流口的部位包括弓头、上臂杆、下臂杆、转轴以及底架。各部位开孔的尺寸以及形状依据受电弓部件的尺寸和形状拟定, 受电弓弓头以及底架开孔形状为矩形, 其他部件开孔形状为圆形, 弓头处矩形射流孔尺寸为 $12\text{ mm} \times 48\text{ mm}$, 两侧弓角尺寸略有减小, 上臂杆射流孔直径分别为 20 mm 和 30 mm , 转轴处射流孔直径为 15 mm , 下臂杆射流孔直径为 30 mm , 底架矩形射流孔尺寸为 $35\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。

在射流口处设置速度为 30 m/s 的沿法向射流, 通过流场数值计算可以得到受电弓部件周围的速度矢量图以及三维涡量图, 通过对比射流前后的流场状况, 探究射流对受电弓周围流场的影响。



(a) 射流前



(b) 射流后

Figure 8. Velocity vector diagram before and after normal jet
图 8. 法向射流前后速度矢量图

如图 8 所示为受电弓区域射流前后的速度矢量图, 由图可知气流流经受电弓后, 其流动方向以及速度发生急剧变化, 这种现象在受电弓弓头以及转轴处较为明显。通过对比分析射流前后受电弓杆件附近的情况可以看到, 受电弓射流后改变了受电弓背风面的气流流速, 使得射流口周围气流流速降低, 对受电弓转轴以及上下臂杆背风面的气流有引导作用, 射流明显减小了受电弓杆件周围气流的紊乱程度。

在流场瞬态计算过程中, 采用的是大涡模拟湍流模型, 将流场分为大尺度的漩涡和小尺度的漩涡, 流场中涡的强度通常用涡量来描述, 涡量的描述有多种准则, 常用的有 Invariant Q 准则、Lambda 2 准则、delta 准则以及 Omega 准则[12]。为了探究受电弓周围的涡量分布, 绘制了射流前后的 Q 准则等值面的三维涡量图, 如图 9 所示, 涡量云图采用速度值渲染。

由图可以看出气流流经受电弓, 产生大小不一的漩涡, 小漩涡在流场的后方发展成大的漩涡, 最大的漩涡在弓头的下游。对比射流前后的三维涡量图可以看到, 吹气后使得受电弓流场下游区域的涡量明显减少, 这种现象在受电弓弓头以及下臂杆处较为明显, 由于各射流孔的射流方向均为法向, 明显看到射流后转轴处的射流对来流起到了阻碍作用, 致使转轴四周的涡量范围变大, 上臂杆处由于法向射流的影响也使得涡量有所增加。

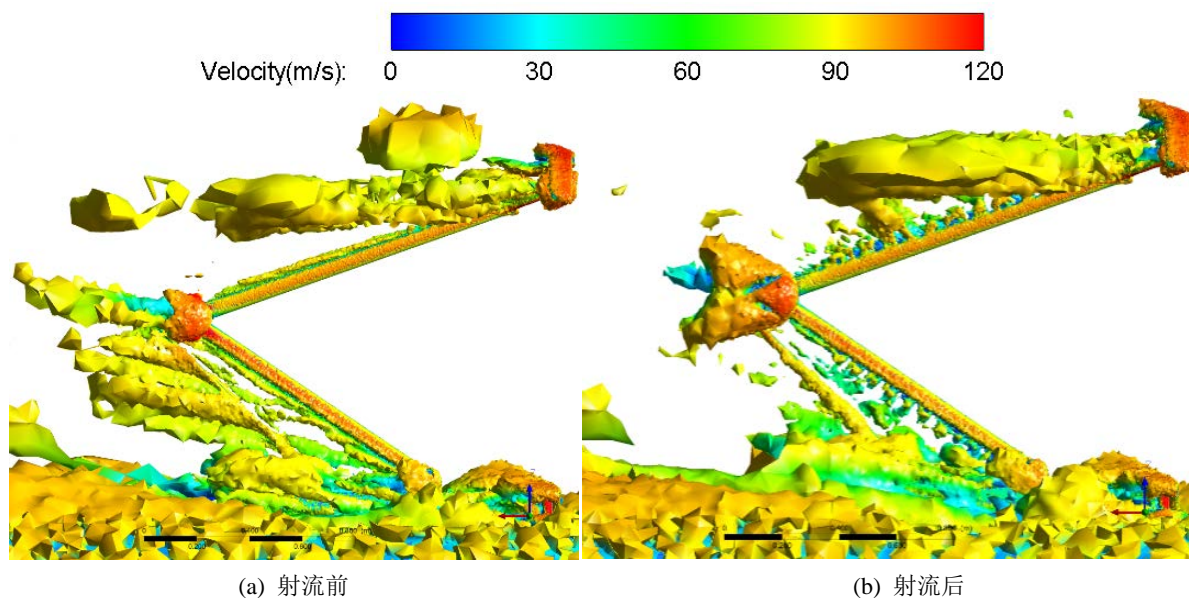
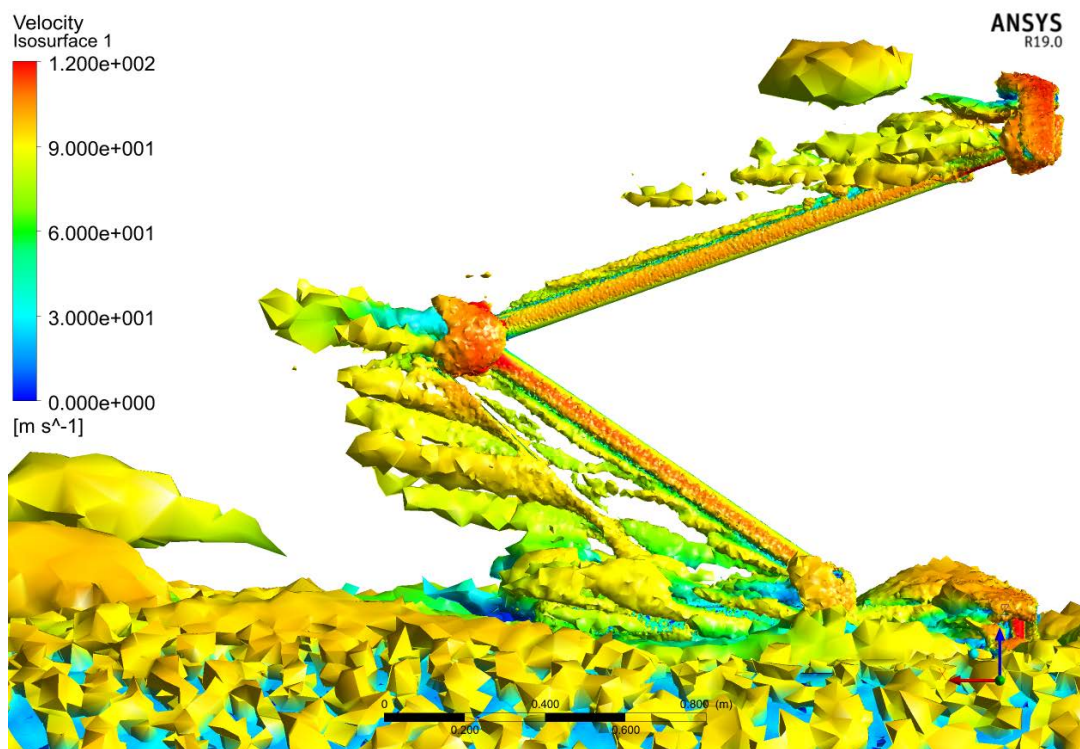


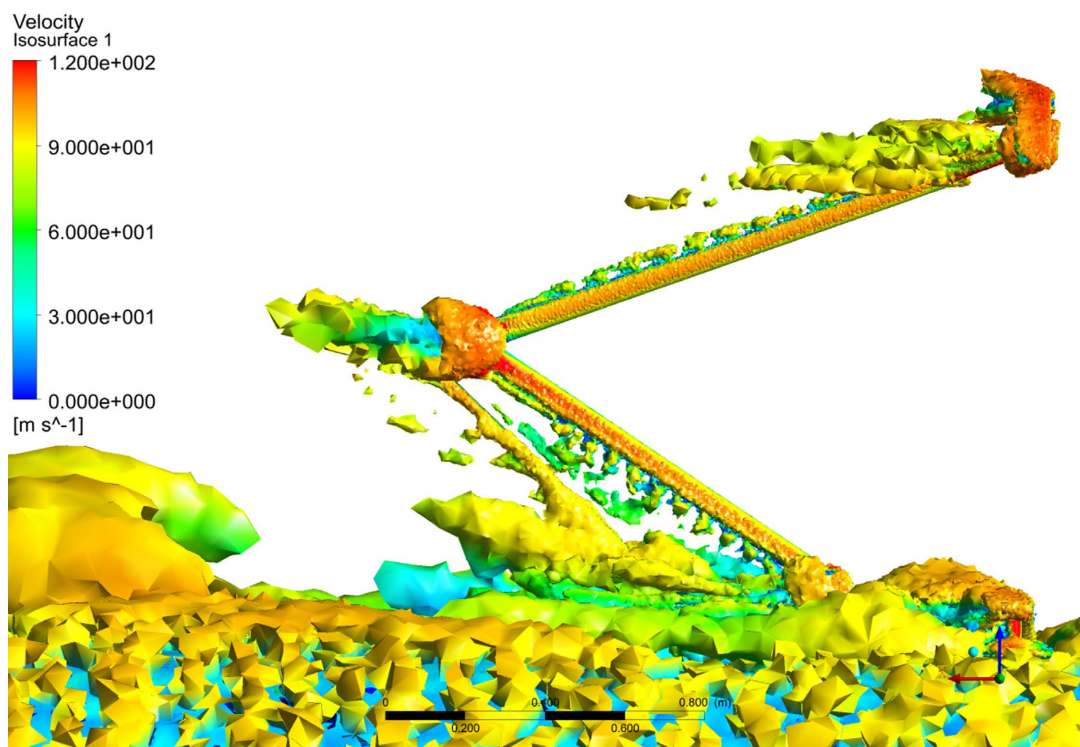
Figure 9. Three-dimensional vorticity diagram before and after normal jet flow
图 9. 法向射流前后三维涡量图

将受电弓上臂杆射流孔射流方向改为沿水平方向, 转轴处关闭阻碍来流气流的射流口, 并将其余射流口射流方向也改为沿水平方向, 得到射流前后的 Q 准则等值面三维涡量图($Q = 1000$), 如图 10 所示, 同样采用速度值渲染。

由射流前后的 Q 准则等值面三维涡量图($Q = 1000$)可知, 在调整转轴以及上臂杆处射流孔射流方向后, 受电弓弓头处的涡量明显减少, 上臂杆处的涡量强度得到降低, 由于射流使得原本连续的涡被打断, 受电弓转轴处涡量变化不明显, 受电弓下臂杆流场后方涡量降低最为明显, 原因是主动射流改变了原本紊乱的气流, 使得其速度变化较慢, 因此气流流向下臂杆后方只产生了较小的涡, 从整体来看受电弓几乎各部件周围的涡量都有所降低。



(a) 射流前



(b) 射流后

Figure 10. Three-dimensional vorticity diagram before and after horizontal jet flow
图 10. 水平射流前后三维涡量图

5. 主动降噪措施效果分析

5.1. 外声场噪声分析

为分析评估主动降噪措施效果, 建立受电弓的边界元模型, 以射流前后的流场计算结果作为声学边界条件, 计算受电弓的外场噪声状况, 对比不同频率下外场噪声水平, 如图 11 所示为法向射流下受电弓外场噪声的声压级云图。

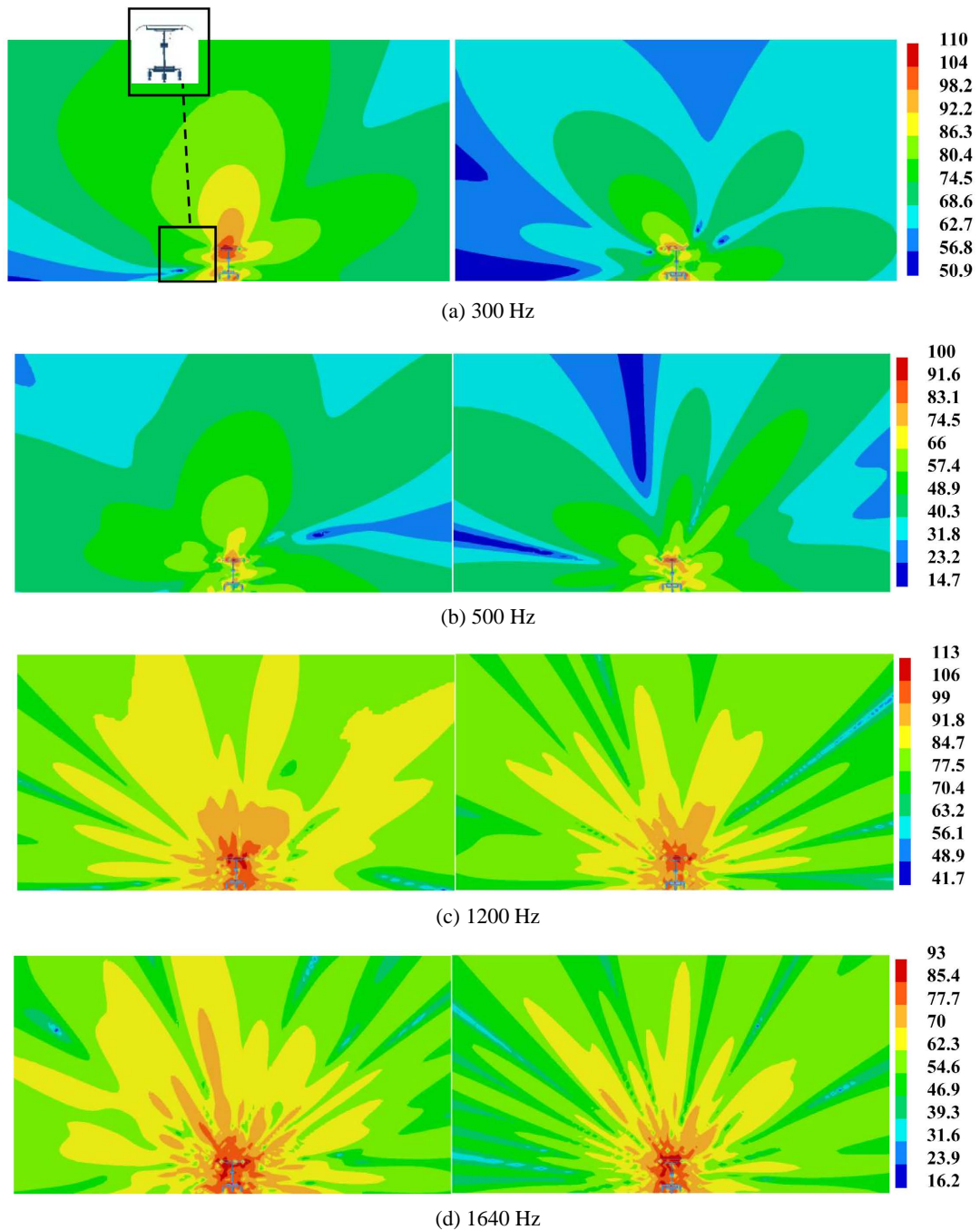


Figure 11. Sound pressure level cloud before and after active control (unit: dB)

图 11. 主动控制前后声压级云图(单位: dB)

通过不同频率下受电弓主动控制前后的外声场声压级云图可以看出, 在所列出的频率下, 左侧为主动射流前外声场分布, 右侧为主动射流后的外声场分布, 能看出主动射流使得受电弓对外场的声辐射能力明显减弱, 云图中较高声压级的红色区域的面积明显减小, 部分区域形成了声压级的“低谷区”。300 Hz、1200 Hz、1640 Hz 频率的噪声云图对比中, 声压最大的红色及黄色区域面积减少, 300 Hz、500 Hz 频率的噪声云图对比中, 声压最小的区域面积增大且声压最小值更低。原因在于主动射流改善了气流流场分布, 使得流场速度梯度更小, 受电弓各部件周围的涡量降低, 气动噪声随之减少。

5.2. 监测点噪声分析

分别取受电弓几何中心的前 3 m、后 3 m、高 3 m 以及侧边 7 m 作为评价其降噪效果的监测点, 监测点位置以及编号如下图 12 所示。为探究不同射流方式下的噪声控制效果, 定义不同射流工况, 对比分析监测点噪声声压级。

定义为工况一: 全部射流口沿法向射流。

定义为工况二: 射流口沿水平方向射流。

根据图 9, 可见射流后转轴处的射流对来流起到了阻碍作用, 致使转轴四周的涡量范围变大, 同时上臂杆处由于法向射流的影响也使得涡量有所增加。由此定义工况三: 下臂杆射流口沿法向射流, 转轴处射流口关闭, 其余射流口仍沿水平方向射流。

为探究高速列车 400 km/h 下的降噪效果, 定义工况四: 流场流速为 400 km/h, 射流孔射流速度为 40 m/s, 射流方向与工况三相同。

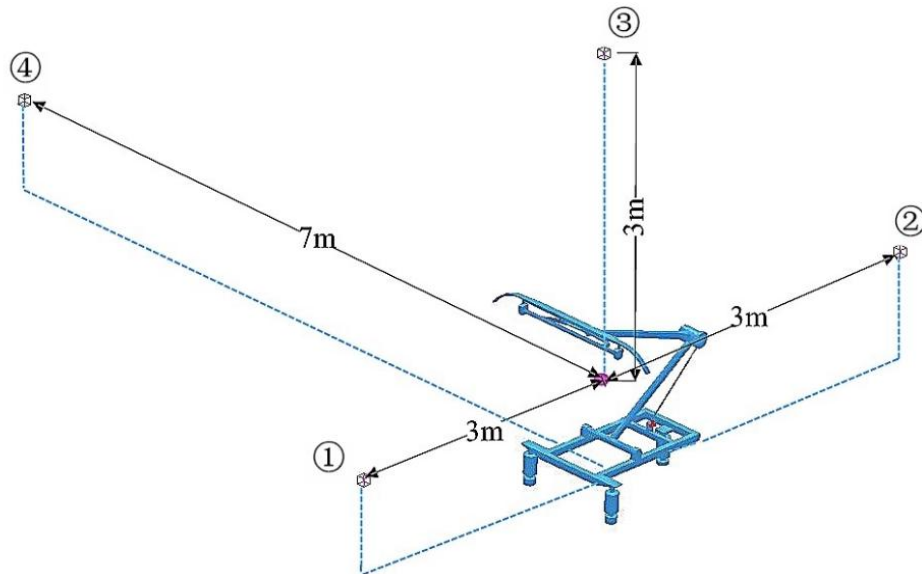


Figure 12. Pantograph field noise monitoring point layout
图 12. 受电弓外场噪声监测点的布置

四种工况下监测点处噪声声压级下降对比如表 1 所示。由表可知, 四种工况下各监测点均有降噪效果, 降噪效果最大处为监测点③, 即受电弓顶 3 m 处, 工况三下降噪效果达到了 2.15 dB。可见采取主动射流的降噪措施后, 对受电弓的上部噪声控制效果较好。工况二下, 侧边 7 m 处监测点降低了 1.26 dB, 表明将射流口沿水平方向射流有助于增大受电弓侧边方向的降噪效果。400 km/h 工况下, 受电弓顶部和流场下游的降噪效果较好, 分别达到了 1.28 dB 和 1.7 dB。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 标准试验系统结果数据

	监测点①	监测点②	监测点③	监测点④
工况一	1.11	0.74	2	0.35
工况二	1.09	0.17	1.49	1.26
工况三	0.89	0.39	2.15	0.3
工况四	0.43	1.7	1.28	0.17

6. 结论

本文采用 FLUENT 和 Virtual. Lab 联合仿真方法, 完成了高速列车受电弓的外流场计算分析, 得到受电弓区域压力以及速度状况, 明确了受电弓区偶极子声源分布特点和频域特征。探究了受电弓主动噪声控制技术, 在受电弓部件的背风面开启大小合适的射流孔, 改变受电弓区域流场特征, 降低该区域气动噪声。本文得出主要结论有:

1) 本文对于受电弓区域完成外流场模型的建立以及受电弓区域外流场的稳态计算, 分析了受电弓区域的速度以及压力状况。在高速流场中, 由于受电弓强烈扰流作用, 在受电弓导流舱形成流动漩涡, 受电弓舱内的空气的流动速度小于舱外空气的流速。整个流场的最大速度出现在弓头和转轴附近。

2) 以稳态计算结果为初始条件, 进行瞬态计算。分析得出表面偶极子声源强度随着频率的升高逐渐降低。采用具有统计能量平均意义的方法, 对比分析得出受电弓区域噪声源主要来自于受电弓部件表面偶极子声源。同时由于在高速流场中, 受电弓杆件背风面存在着大量的漩涡脱落现象, 形成了较强的压力脉动, 从而产生了强度较高的偶极子声源。导致受电弓杆件背风表面的偶极子声源声压级远高于迎风表面。

3) 在受电弓部件的背风面开启大小合适的射流孔, 分析了不同射流工况下, 气流流场的状况。结果显示, 合理安排受电弓各部位射流方向和速度, 可有效降低气流的紊乱程度, 降低受电弓结构漏量。

4) 建立了受电弓边界元模型, 以偶极子声源作为声源, 探究了受电弓外场噪声状况, 主动射流使得受电弓对外场的声辐射能力明显减弱。分析了各工况下监测点处噪声声压级, 结果显示主动射流对受电弓的上部噪声控制效果较好, 最大降幅达到 2.15 dB, 前后方和侧方声场噪声也有不同幅度的下降。

基金项目

中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(P2021J035) CR450 动车组振动噪声特征及减振降噪技术研究。

参考文献

- [1] 孙振旭, 姚永芳, 杨焱, 等. 国内高速列车气动噪声研究进展概述[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 385-397.
- [2] 成瀨功, 牛晓妮. 700 系电动车组用单臂型受电弓[J]. 国外铁道车辆, 2003, 40(3): 35-37.
- [3] Suzuki, M., Ikeda, M. and Koyama, T. (2008) Flow Control for Pantographs Using Air Intake and Outlet. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, **1**, 272-280. <https://doi.org/10.1299/jmtl.1.272>
- [4] Takaishi, T. and Ikeda, M. (2005) Numerical Method for Evaluation Aeroacoustic Sound Sources. *Quarterly Report of RTRI*, **46**, 23-28. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.46.23>
- [5] Ikeda, M. and Takaishi, T. (2004) Perforated Pantograph Horn Aeolia Tone Suppression Mechanism. *Quarterly Report of RTRI*, **45**, 169-174. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.45.169>
- [6] Noger, C., Patrat, J., Peube, J. and Peube, J.L. (2000) Aeroacoustical Study of the TGV Pantograph Recess. *Journal of Sound and Vibration*, **231**, 563-575. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2545>

- [7] 王渤洪, W. Herbert. ICE 用 DSA350S 型高速受电弓的开发和运行经验[J]. 电力牵引快报, 1994(8): 13-18.
- [8] Noh, H.-M. (2019) Wind Tunnel Test Analysis to Determine Pantograph Noise Contribution on a High-Speed Train. *Advances in Mechanical Engineering*, **11**, No. 10. <https://doi.org/10.1177/1687814019884778>
- [9] 陆晓柳. CRH380A 型高速列车气动噪声数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [10] Zhang, Y.D., Zhang, J.Y., Li, T., *et al.* (2017) Investigation of the Aeroacoustic Behavior and Aerodynamic Noise of a High-Speed Train Pantograph. *Science China Technological Sciences*, **60**, 561-575. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-0649-6>
- [11] Tan, X.-M., Yang, Z.-G., *et al.* (2018) Vortex Structures and Aeroacoustic Performance of the Flow Field of the Pantograph. *Journal of Sound and Vibration*, **432**, 17-32. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.025>
- [12] Li, R., Liang, W., *et al.* (2020) Investigation of Turbulence-Induced Quadrupole Source Acoustic Characteristics of a Three-Dimensional Hydrofoil. *Modern Physics Letters B*, **34**, 18. <https://doi.org/10.1142/S0217984920501456>