

高速列车受电弓气动噪声分析与降噪研究

黄凯莉, 袁天辰, 杨 俭, 宋瑞刚

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 随着列车速度的大幅提升, 气动噪声问题愈发凸显; 受电弓噪声在整车噪声中占较高位置, 为研究高速列车受电弓气动噪声特性, 通过 Lighthill 声学理论的宽频噪声模型对高速列车气动噪声源进行识别, 利用定常 SST k-w 湍流方法分析高速列车受电弓的流场特性; 基于大涡模拟与 FW-H 声学比拟理论计算高速列车受电弓远场气动噪声; 数值算例结果表明, 受电弓部位的碳滑板、弓头为受电弓主要噪声源; 以轨道中心线为对称线, 远场气动噪声监测点的声压级及频谱特性表现出较高的对称性; 在同一列车运行速度下, 监测点声压级随离轨道中心线距离增大而减小, 列车以不同速度运行时, 其声压级降低的幅值相差较小; 高速列车远场气动噪声为宽频噪声, 主要能量集中在 500~5 000 Hz; 提出一种射流降噪方法, 在 350 km/h 速度下, 监测点总声压级值降低了 15.2 dB。

关键词: 高速列车; 受电弓; 气动噪声; 大涡模拟; Fluent

Aerodynamic Noise Analysis and Noise Reduction Study of Pantograph of High-speed Train

Huang Kaili, Yuan Tianchen, Yang Jian, Song Ruigang

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the increasing of high-speed train speed, the aerodynamic noise problem increasingly prominent. The pantograph noise represents a higher position in the train noise. In order to study the aerodynamic noise characteristics of the pantograph of high-speed train, the Broadband noise model based on Lighthill acoustics theory is used to identify the aerodynamic noise sources of high-speed trains, the SST k-w turbulence model is used to analyze the flow field characteristics of the pantograph; Based on the large eddy simulation and the FW-H acoustic theory, the aerodynamic noise characteristics of the pantograph is calculated. The numerical examples show that, The carbon skateboard and bow head of the pantograph are the main noise sources of the pantograph; With the center line of train, the sound pressure level and spectrum characteristics of the far field aerodynamic noise monitoring points show high symmetry; At the same train speed, the sound pressure level at the monitoring point decreases with the distance from the Central Line of the track increasing, when the train runs at different speeds, the amplitude of the sound pressure level decrease is small; The aerodynamic noise in the far field of high-speed train is broadband noise, and the main energy concentration is 500 Hz~5000 Hz. A method of jet noise reduction was proposed. At the velocity of 350 km/h, the total sound pressure level of the monitoring point decreased by 15.2 dB.

Keywords: high-speed train; pantograph; aerodynamic noise; large eddy simulation; Fluent

0 引言

轨道交通发展的同时, 人们对列车速度要求越来越高, 加快了列车运行速度的提高, 由于气动噪声的声压级增长

速度是运行速度的 6~8 次方成正比^[1-2], 噪声问题日益突出。高速列车流体外突出的部位与气流相撞, 严重干扰气流, 同时产生强大的远场空气脉动压力场, 进而转化为气动噪声。因此对高速列车气动噪声特性研究有着重要意义, 促进对后续气动噪声降噪的研究。

从近场、远场气动噪声看, 受电弓是高速列车主要气动噪声源之一^[3-5]; 张亚东^[6]等对气动噪声贡献量进行预测, 得出受电弓气动噪声贡献量最大的是碳滑板、平衡臂、弓头支架、底架、绝缘子等; SUEKI^[7]等在受电弓处采用多孔材料, 在 360 km/h 风洞试验运行下噪声减小 1.9 dB; 张亚东等^[8]对受电弓开/闭口方式、导流罩结构、导流罩安装位置进行低噪声设计, 得到远场声压级最多降低 3.1 dB 的最优设计方案; 在风洞实验中, 列车最显著的噪声源是转向架和受电弓^[9]; T. Mitsumoji 等^[10]在弓头表面施加等离子激励器, 得到该方法可降低弓头产生的窄频带气动噪声, Takehisa 等^[11]研究受电弓弓角表面的偶极子噪声源, 并分

收稿日期:2018-09-04; 修回日期:2018-09-20。

基金项目:国家自然科学基金(面上项目)(51575334); 国家自然科学基金(青年项目)(51605274); 上海工程技术大学研究生创新项目基金(17KY1006)。

作者简介:黄凯莉(1992-), 女, 江苏南通市人, 硕士研究生, 主要从事轨道车辆气动噪声方向的研究。

袁天辰(1988-), 男, 上海市人, 博士学位, 主要从事轨道垂直振动, 振动降噪方向的研究。

杨 俭(1962-), 男, 黑龙江哈尔滨市人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事轨道车辆动力学; 振动与噪声方向的研究。

宋瑞刚(1984-), 男, 河南洛阳市人, 实验师, 博士在读, 主要从事城市轨道交通车辆牵引与制动系统方向的研究。

析了在弓角表面穿孔来降低气动噪声的原理。因此研究高速列车受电弓的气动噪声特性, 对气动噪声的降噪研究有着重要意义。

目前, 高速列车受电弓的气动噪声的数值仿真研究较少, 对受电弓气动噪声的声压级特性、声压级频谱特性以及在不同车速下气动噪声规律等特性了解甚少。为受电弓气动噪声降噪研究提供参考依据, 本文利用大涡模拟与 FW-H 声学模型对不同车速下受电弓气动噪声特性进行研究分析。

1 计算模型

1.1 几何模型

本文以 CRH380B 型高速列车为研究对象, 建立列车几何模型, 模型由一节头车、一节中间车和一节尾车组成, 头车和尾车外形相同, 头车车顶有 2 个空调导流罩, 中间车车顶有 1 个单臂受电弓和 1 个受电弓空腔, 且受电弓底座安装在空腔内。本文主要研究对象为车顶受电弓, 对列车模型进行适当简化, 在仿真中简化下半部分车身、车底转向架等结构, 采用完全封闭的外风挡。单臂受电弓模型是以 CX-NG 型受电弓为原型, 保留主要部件, 忽略紧固件等细小零部件。列车模型总长度 $L=76.5\text{ m}$, 宽度 $W=3.26\text{ m}$, 高度 $H=3.89\text{ m}$ 。高速列车简化模型如图 1 所示。

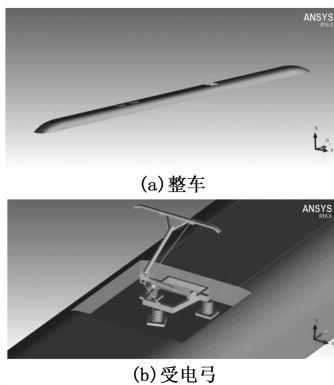


图 1 高速列车几何模型

1.2 计算域与边界条件

高速列车流场计算域长宽高分别为 306 m 、 78.24 m 、 38.9 m , 列车位于计算域中下方, 列车头车距离计算域进口处 1 倍列车长 (即 76.5 m), 尾车距离计算域出口处 2 倍列车长 (即 153 m), 且列车与地面间的距离忽略不计。

计算域的进口设置为速度进口条件。计算域出口设置为零压力出口条件。高速列车下方边界设置为无滑移条件。高速列车表面设置为无滑移的固定边界。

1.3 网格划分

本文采用 ICEM CFD 软件进行网格划分。计算域采用混合网格划分, 列车车身附近采用四面体网格划分, 外域采用六面体网格划分, 四面体域与六面体域之间的数据传递通过建立 interface 交界面。考虑到受电弓部位的压力变化, 对受电弓进行局部加密, 设置最大网格尺寸为 20 mm ;

车身附近采用加密形式; 外场最大尺寸 1000 mm 。网格划分单元总数约为 $4\ 412\text{ 万}$ 。如图 2 中 (a) (b) 所示。

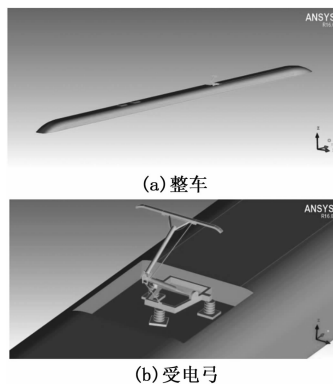


图 2 网格

1.4 计算方法

本文先基于 SST k-w 模型进行稳态计算, 再采用宽频噪声模型对受电弓气动噪声源进行识别; 瞬态计算是以稳态计算结果作为初始值, 再进行瞬态计算, 瞬态计算采用大涡模拟, 得到流场中边界脉动压力, 再利用傅里叶变换将流场中时域脉动信号变换成频域信号。在稳态计算中, 采用 SIMPLIC 算法; 在瞬态计算中, 采用 PISO 算法, 且本文气动噪声最高频率为 5 kHz , 设置时间步长 $1 \times 10^{-4}\text{ s}$, 计算 $2\ 000$ 个时间步, 总计 0.2 s , 具体的参数设置如表 1 所示。本文计算过程在 Fluent 软件中完成。

为了计算在高速行驶下受电弓的气动噪声情况, 选取受电弓为噪声源, 在列车远场附近, 分别确定 A、B、C、D、E 列作为气动噪声的 19 个噪声监测点, 见图 3 所示。

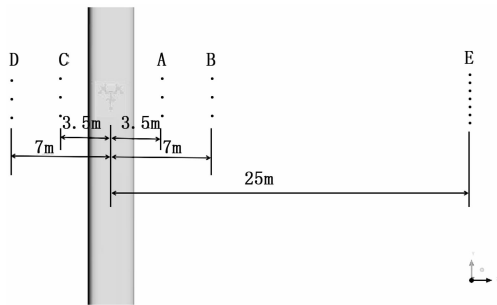


图 3 监测点位置图

表 1 流场计算参数

流场计算参数	稳态计算	瞬态计算
湍流模型	SST k-w 模型	LES 模型
算法	SIMPLIC	PISO
压力离散	Second order	PRESTO! 格式
动量离散	Second order upwind	bounded central differencing

2 数学模型

本文研究中采用大涡模拟方法来预测声源相关信息。

大涡模拟 (LES) 控制方程为:

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j) = 0 \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; \bar{u}_i, \bar{u}_j 为过滤后的速度分量; \bar{P} 为过滤后的压强; μ 为湍流黏性系数; τ_{ij} 为亚格子尺度应力, 其数学模型为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

其中: μ_t 为亚格子湍流粘性系数, 表示如下:

$$\mu_t = C_s \Delta^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (4)$$

\bar{S}_{ij} 是求解尺度下的应变率张量, 表示如下:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中, Δ 代表网格尺寸, C_s 是 Smagorinsky 常数, 对于大多数流动问题 $C_s=0.1$ 具有较好的模拟结果。

由于 LES 只能进行瞬态计算, 且对初始流场的要求比较高, 从而需要进行稳态计算, 稳态计算采用 SST k- ω 湍流模型, 其控制方程为:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (6)$$

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k$$

$$(\tau_{ij} = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (7)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma \tau_{ij}}{v_t} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \omega_s \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (8)$$

其中: $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$, $\arg_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 v}{y^2 \omega} \right]$;

$F_1 = \tanh(\xi^4)$, $\xi = \min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500 v}{y^2 \omega} \right], \frac{4 \sigma_\omega k}{CD_\omega y^2} \right]$

式中, Ω 为涡量, y 为近壁面的距离, k 为湍流动能, ω 为湍流比耗散率, μ_t 为湍流黏性系数, $\sigma_k, \sigma_\omega, \sigma_\omega, \beta$ 为经验系数, ρ 为密度, x_j 为方向坐标, μ_i 为气流速度分量。

3 受电弓气动噪声特性分析

3.1 受电弓流场特性

图 4 为列车以 350 km/h 速度运行时, 受电弓表面压力云图。有图 4 可知, 碳滑板、弓头支架等表面的迎风面是正压, 其中最大正压值为 8 070 Pa, 绝缘子背风面有最大负压, 值为 6 040 Pa。由于受电弓安装在车顶空腔内, 底架及绝缘子迎风面受到的压力较小, 在 1 000 Pa 左右。以轨道中心线为对称线, 受电弓表面静压力表现出较大的对称性。

3.2 受电弓声场特性

在稳态流场计算结果的基础上进行瞬态计算, 并建立噪声监测点, 进行瞬态研究, 将经过瞬态计算得到的噪声监测点的声压数据进行 FFT 变换, 可得到监测点相应的声

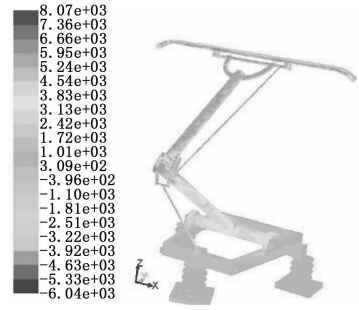


图 4 受电弓表面压力云图

压级频谱曲线及 1/3 倍频程图。本文在受电弓附近设置 5 列噪声监测点 (共 19 个监测点), 高度与地面的垂直距离为 3.5 m, 每列从上到下依次为 1、2、3 等, 如 A 列噪声监测点 A-1、A-2、A-3, 其中 E 列为远场标准监测点。噪声监测点设置位置如图 3 所示。

3.2.1 气动噪声声压级分布

图 5 为高速列车以速度为 350 km/h 运行时车顶表面声功率分布云图及受电弓部位的声功率级分布云图。由图可看出, 在列车车顶部位, 较大表面声功率级的部位为受电弓, 表面声功率级值为 111 dB。以轨道中心线为对称线, 受电弓表面声压级有较强的对称性。受电弓碳滑板、弓头声功率级峰值达到 100 dB 以上, 最大声压级为 111 dB。当列车时速为 200 km、250 km、300 km 时, 受电弓处最大声功率级分别为 93.5 dB、102 dB、109 dB。由于受电弓表面声功率较大的地方其脉动压力值较大, 产生较强的气动噪声, 因此, 受电弓碳滑板、弓头部位是受电弓产生的主要噪声源。

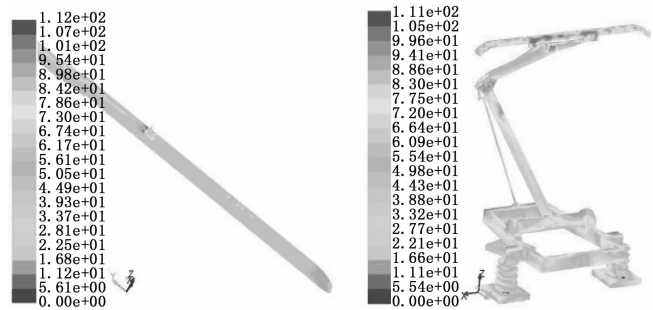


图 5 车顶表面声功率及受电弓声功率分布云图

图 6 是 E 列 7 个标准监测点的气动噪声总声压级, 由图可知, 列车速度的增加, 各监测点气动噪声总声压级也随之增加, 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 列车速度下平均总声压级分别为 61.61 dB、65.16 dB、74.15 dB、78.02 dB, 平均总声压级增加幅值为 3.55 dB、8.99 dB、3.87 dB。当列车时速从 200 km 提高到 350 km 时, 受电弓气动噪声传到远场各个标准监测点时, 总声压级值最大相差分别为 0.83 dB、1.46 dB、0.45 dB、0.15 dB。

3.2.2 气动噪声频域分布特征

图 7 为仿真得到的以轨道中心线对称的 A、B、C、D 四列监测点在高速列车在 300 km/h 下的声压级频谱图, 从

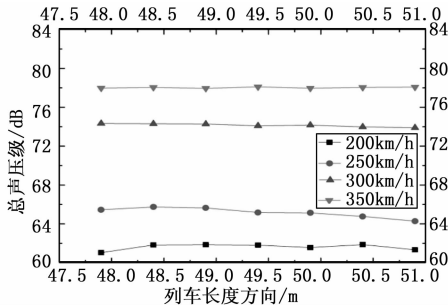


图 6 E 列监测点总声压级图

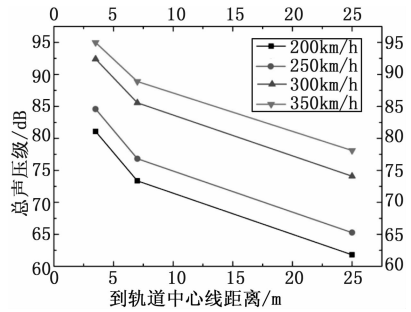


图 8 列车横向监测点声压级图

图中可得出如下结论:

(1) 所有噪声监测点的声压级随频率的变化规律基本相同, 声压级分布的频带较宽, 声压级幅值在低频段时较高, 各个噪声监测点的声压级随着频率的增加呈现出下降的趋势。由此可知该型高速列车受电弓产生的气动噪声是一种宽频噪声。

(2) 由图 10 以及表 3 总声压级值可知, 列车左右两边对称的监测点频谱曲线图有较强的重合, 以轨道中心线为对称线, 表现出较强的对称性。

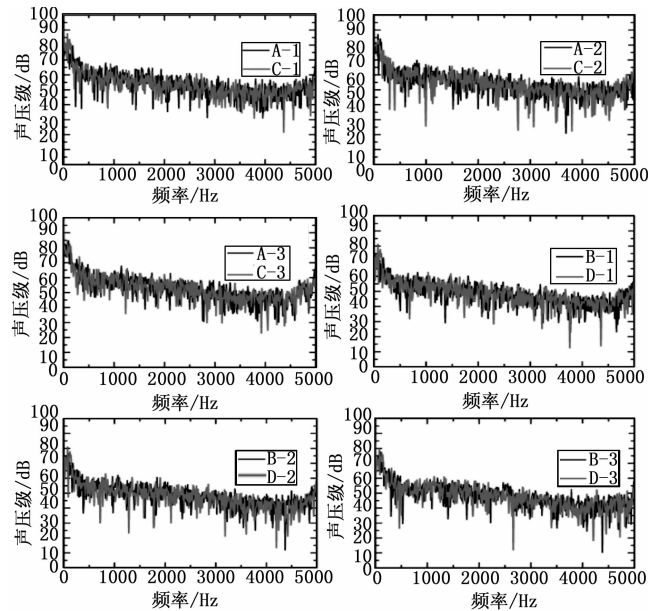


图 7 对称监测点声压级频谱图

图 8 为列车在不同速度下运行时, 距离地面高 3.5 米处, $y=49$ m 截面上, 距离轨道中心线不同距离的 A-2、B-2、E-4 监测点总声压级图。由图可看出, 在同一车速下, 离轨道中心线的距离逐渐增大, 监测点的气动噪声总声压级逐渐减小。各车速下总声压级减小的幅值在 6.07~11.56 dB, 且在不同车速下相邻两监测点的总声压级减小的幅值在 0.01~0.93 dB。

由表 2 可知, 在列车速度为 250 km/h 下, 距离轨道中心线从 3.5 m 增加到 25 m, 其气动噪声声压级减小的幅值为 7.76 dB (A)、11.65 dB (A), 在不同列车速度下气动噪声声压级最大减小的幅值分别为 11.56 dB (A)、11.65

dB (A)、11.47 dB (A)、10.80 dB (A)。

表 2 列车横向监测点 A 计权声压级 dB(A)

列车速度 (km/h)	200	250	300	350
A-2	81.08	84.58	92.39	94.97
B-2	73.37	76.82	85.56	88.90
E-4	61.81	65.17	74.09	78.10
最大减小幅值	11.56	11.65	11.47	10.80

3.2.3 A 计权声压级 1/3 倍频程分析

A 计权声压级是模拟人耳对 55 dB 以下低强度噪声的频率特性, 和人耳的听感特性最为相似贴切, 图 9 为列车在不同速度下运行时, 监测点 1 的 A 计权声压级 1/3 倍频程图。由图可看出:

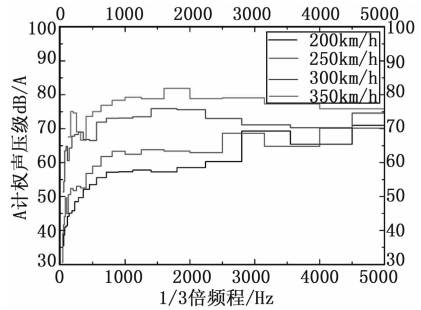


图 9 不同速度下监测点 A-2 的 1/3 倍频程频谱图

(1) 随着列车运行速度的增加, A 计权声压级也随之增加, 且主要能量集中在 500~5 000 Hz 频域内, 最高 A 计权声压级值也逐渐增大。

(2) 随着 1/3 倍频程的增加, 监测点气动噪声 A 计权声压级也随之迅速增加, 在 0~500 Hz 频率范围内, 气动噪声的 A 计权声压级随着 1/3 倍频程的增加而迅速增加。

(3) 列车速度为 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 时, 主要能量分布在 4 500~5 000 Hz, 4 200~5 000 Hz, 1 400~1 800 Hz, 1 600~2 000 Hz, 存在明显的主频, 随着列车速度的增加, 主频有着从高频向低频移动的趋势。

表 3 所示为各个监测点在不同速度下的总声压级值。

4 受电弓降噪研究

4.1 气动噪声降噪方法

高速列车气动噪声的产生及传播属于流体动力学领域,

表 3 不同列车速度下监测点总声压级对比表 dB

方案	200km/h	250km/h	300km/h	350km/h
A-1	81.51	83.70	90.64	95.02
A-2	81.08	84.58	92.39	94.97
A-3	81.40	84.30	92.74	92.80
B-1	73.43	77.90	84.83	89.12
B-2	73.37	76.82	85.56	88.90
B-3	72.85	76.05	86.06	88.05
C-1	81.26	82.92	92.93	94.68
C-2	82.05	84.43	92.80	95.25
C-3	82.80	84.64	91.57	94.14
D-1	73.62	77.53	86.54	88.77
D-2	73.72	76.29	86.39	88.76

受电弓部位气动噪声降噪主要分为两大类，分别为被动降噪和主动降噪。其中，被动降噪是没有外部能量输入，目前主要靠优化几何结构、材料属性、安装导流罩、仿生改形设计、受电弓开/闭口方式等来改变流场，这些被动降噪对气动噪声只能达到有限的降噪效果；主动降噪是由外部能量输入，直接作用在局部流场中，来改变局部流场，从而达到降低气动噪声的目的，其中 T. Mitsumoji 等在弓头表面施加等离子激励器，得到该方法可降低弓头产生的窄频带气动噪声。

对大型客机起落架气动噪声进行主动降噪的，有如下几种方法，高哲采用空气膜降噪法，在原本形成湍流的区域增加额外层流（空气膜），层流代替原来不规则的流动，使湍流区域明显减小；任旺在起落架背风面边缘施加垂直射流，使射流、扭力臂与支柱构成一近似封闭空间。

4.2 受电弓降噪分析

空腔噪声产生的机理是由于，气流流经空腔前缘产生分离，在空腔上方形成剪切层，转化为漩涡运动，漩涡以一定的速度流向空腔下游，到达空腔后缘处与空腔后壁产生碰撞，从而诱发向前传播的压力波。

为改变空腔内的湍流，在高速列车受电弓空腔背风面设置射流降噪装置，射流面是宽为 400 mm，长为 2200 mm 的矩形。射流温度与来流温度保持一致，射流在整个面上保持速度均匀分布，速度设置为 30 m/s，列车速度为 97.2 m/s。射流方向位置如图 10 所示。

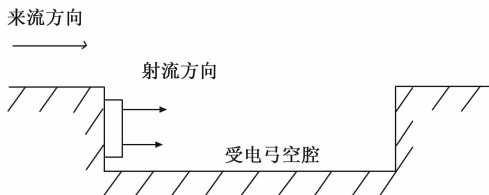


图 10 射流位置图

在建立的受电弓模型附近设置 1 个噪声监测点，位于空腔的中部，高度与车顶保持一致。图 11 给出了该噪声监测点的 A 计权 1/3 倍频程图，从图 11 中可得出如下结论：

该监测点在降噪前脉动压力的能量较为稳定，主要分布于 105~111dB (A) 之间，在 800 Hz 时脉动压力级出现

较高峰值，800 Hz 之后的高频段变化幅值较小，趋于稳定。而在射流降噪后，噪声监测点在低频时迅速增加，然后趋于稳定，在 800 Hz 时脉动压力级出现最大幅值，900 Hz 之后的高频段变化峰值较小，

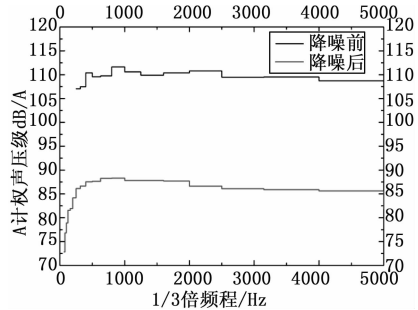


图 11 监测点 1/3 倍频程图

施加射流后，监测点计算得到的总声压级值从 133.17 dB 降到 117.97 dB，该射流方法具有一定的降噪效果，为后面的降噪研究提供一定的基础。

5 结论

本文基于 Lighthill 声学理论，采用 SST K-W 模型、LES 等模型对高速列车受电弓进行仿真模拟，并考虑不同列车运行速度，分析了受电弓的主要气动噪声源和远场气动噪声特性，并对受电弓进行降噪研究。基于仿真结果分析，可以得出以下结论。

- (1) CRH380B 高速列车车顶的主要气动噪声源是受电弓，受电弓部位的碳滑板、弓头等为受电弓的主要噪声源。
- (2) 高速列车以不同速度运行时，同一监测点随着列车运行速度的增加其声压级增加，以轨道中心线为对称的，监测点声压级及频谱特性表现出较高的对称性。
- (3) 高速列车以一定速度行驶时，随着离轨道中心线距离的增大，监测点的声压级逐渐减小，且在不同运行速度下，声压级降低的幅值相差较小。高速列车远场气动噪声是一种宽频噪声，其主要的能量集中在 500~5000 Hz，存在明显的主频。
- (4) 在受电弓空腔处加射流主动降噪，监测点降低了 15.2 dB，具有明显的降噪效果，为后续射流降噪研究提供基础。

参考文献：

[1] Mellet C, Létourneaux F, Poisson F, et al. High speed train noise emission: latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293 (3): 535-546.

[2] King WF. III. A précis of developments in the aeroacoustics of fast trains [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193 (1): 349-358.

[3] 张曙光. 350 km·h⁻¹ 高速列车噪声机理、声源识别及控制 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30 (1): 86-90.

[4] 张军, 郭涛, 孙帮成, 等. 高速列车气动噪声源特性研究 [J]. 铁道学报, 2015 (6): 10-18.