

文章编号: 2095-2163(2021)02-0149-06

中图分类号: TP319; TP69

文献标志码: A

# 基于 fluent 的高速列车受电弓主被动整体降噪研究

袁贤浦, 袁 丁, 汤 路, 王雪明

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘要:** 针对高速列车气动噪声越来越大的问题, 本文以高速列车某车型为参考建立 1:1 受电弓区域局部模型, 基于宽频带噪声源模型、LES 大涡模拟及 FW-H 声学模型, 运用弓头仿生降噪和底部空腔主动射流降噪的整体降噪措施, 采用数值模拟法研究高速列车受电弓区域的降噪效果。结果表明: 受电弓弓头和底部空腔是气动噪声的主要来源; 降噪后, 主要噪声源的声功率级都有了较大降幅, 其中弓头和空腔部位分别降低了 15.28 dB 和 16.92 dB; 中高层住宅处的降噪效果更佳, 最大声压级降低位置在距地面 18 m 高处 (距受电弓 25 m 远处), 降低了 4.94 dBA; 远场声压级在低频区域降噪效果更为显著, 特别是在 800 Hz 位置声压级降幅最大, 降低了 8.21 dBA。

**关键词:** 高速列车; 气动噪声; 受电弓; 大涡模拟; 仿生降噪; 主动射流降噪

## Study on active and passive cooperative noise reduction of high-speed train's pantograph based on fluent

YUAN Xianpu, YUAN Ding, TANG Lu, WANG Xueming

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

**[Abstract]** In view of the increasing aerodynamic noise of high-speed train, a 1:1 local model of pantograph area is established based on a high-speed train model. Based on the broadband noise source model, large eddy simulation and FW-H acoustic model, the whole noise reduction measures of pantograph head bionic structure optimization and bottom cavity active jet are used to study the noise reduction of high-speed train pantograph area effect. The results show that: the pantograph head and bottom cavity are the main sources of aerodynamic noise; after noise reduction, the sound power levels of the main noise sources are reduced by 15.28 dB and 16.92 dB respectively; the noise reduction effect of medium and high rise buildings is better, and the maximum sound pressure level is reduced by 4.94 dBA at 18 m above the ground (25 m away from the pantograph); the noise reduction effect of far-field sound pressure level is more significant in low-frequency region, especially at 800 Hz position, the largest reduction is 8.21 dBA.

**[Key words]** high speed train; aerodynamic noise; pantograph; large eddy simulation; bionic noise reduction; jet noise reduction

## 0 引言

高速列车为人们出行带来便利,但是气动噪声扰民问题也愈发严重。气动噪声、电气噪声和轮轨噪声是目前高速铁路的三大主要噪声来源<sup>[1]</sup>。根据研究发现,车速大于 300 km/h 时,气动噪声将成为高速列车扰民的主要噪声源<sup>[2]</sup>。1990 年国家环境保护局颁布的《铁路边界噪声限值及其测量方法》中已明确规定,铁路外侧距轨道中心线 30 m 处等效声级不得高于 70 dB<sup>[3]</sup>,而实测数值早已超过 80 dB。通过数值模拟得出:高速列车气动产生的噪声主要来自于高速列车受电弓,因此降低受电弓区域的气动噪声是高速列车降噪的当务之急。

目前,对高速列车受电弓的主要研究方法是风

洞试验和数值模拟<sup>[4]</sup>。高阳等人<sup>[5]</sup>对 1:8 缩比高铁模型进行风洞试验研究发现:转向架与受电弓产生噪声最大,为高速列车主要噪声源;余培汛等人<sup>[6]</sup>研究开式空腔并提出相应降噪方法。Zhang<sup>[7]</sup>指出外界气流的涌入会导致空腔自激震荡,而剪切气流与腔内流场的相互影响会导致腔内气动噪声。黄莎等人<sup>[8]</sup>对车厢连接凹槽进行数值计算并得出运算结果,凹槽最大正压出现在迎风面顶部。

本文即以 1:1 某高速列车三车编组模型作为气动噪声源研究对象,提出弓头仿生结构优化和空腔主动射流整体降噪方法,通过对比降噪前后流场特性变化、声源特性变化和远场监测点声压级变化,确定降噪效果,为后期高速列车降噪奠定基础。

**基金项目:** 上海工程技术大学研究生科研创新项目(19KY1007)。

**作者简介:** 袁贤浦(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:高速列车受电弓弓头气动降噪;袁 丁(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:高速列车受电弓空腔气动降噪;汤 路(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:弓网故障预警;王雪明(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:基于改进神经网络的盾构隧道沉降预测及控制研究。

收稿日期: 2020-09-24

# 1 高速列车气动噪声计算模型

## 1.1 几何模型

### 1.1.1 整体几何模型

本文通过建立某型号高速列车受电弓局部1:1三维模型,并将其作为声源研究对象进行数值模拟计算。考虑小型部件如螺栓、电线及部分阀门在高速列车行驶过程中气动噪声贡献量极低,为降低网格数量及提高计算速度,故文中将其忽略;保留受电弓区域影响流场关键部件:受电弓弓头及其杆件、受电弓导流罩、空腔凹槽、空腔绝缘子。研究模型长15.46 m、宽3.36 m和高2.74 m。主被动整体降噪后的模型示意图以及受电弓局部放大图如图1、图2所示。

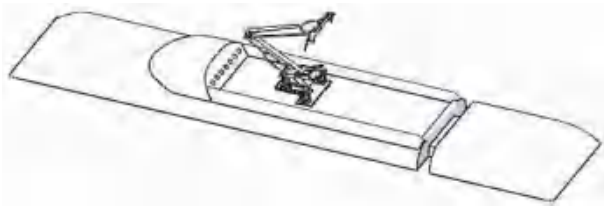
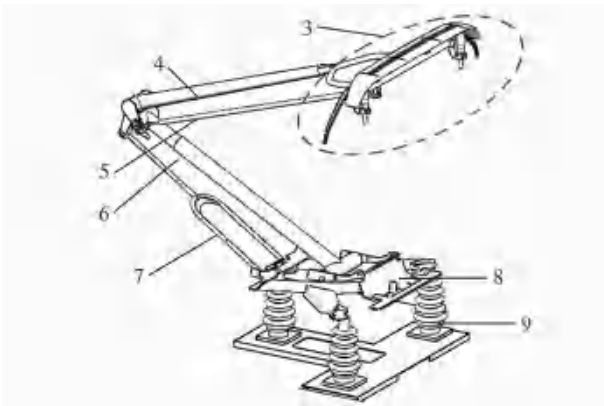


图1 列车局部1:1三维模型

Fig. 1 1:1 3D model of high speed train



1-导流罩; 2-底部空腔; 3-仿生弓头; 4-上臂杆; 5-平衡杆;  
6-下臂杆; 7-拉杆; 8-底座; 9-绝缘子

图2 受电弓处细节

Fig. 2 Details of pantograph

### 1.1.2 空腔主动射流降噪几何模型

高速列车在快速行驶过程中,由于空腔表面外形突变导致空腔顶部前端气流会因为剪切力作用速度发生突变而涌入空腔。气动噪声主要来源于2部分。一部分来源于剪切气流直接进入空腔内而产生的较大规模涡流,另一部分来源于剪切气流和绝缘子迎风面的直接碰撞。因此,本文选用射流降噪方式,通过在受电弓空腔背风面设置射流装置,行车过程利用射流气体抬高剪切气流,避免其直接撞击空

腔内部的方法,实现空腔气动噪声降噪。射流口布置位置如图3所示,射流速度为40 m/s、射流口与水平面呈7°夹角。

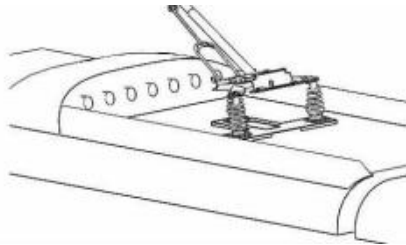


图3 射流口布置位置

Fig. 3 Arrangement position of jet port

### 1.1.3 弓头仿生结构优化被动降噪几何模型

受电弓弓头处湍动能较大,对应区域涡量也较大。弓头部位气动噪声产生机理为气流撞击杆件造成的气流分离与涡脱落,受电弓弓头部位的脱落涡即气动噪声主要噪声源。因此,本文采用仿生学原理,通过将蜻蜓翅膀前端凸起尾部梳状外形应用在碳滑板及圆杆上,形成对称椭圆状低噪声外形,实现受电弓气动噪声降噪。其中,弓头仿生模型如图4所示,碳滑板凸起高度为60 mm。

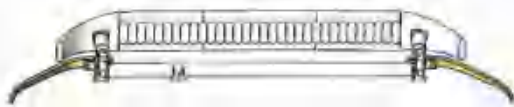


图4 弓头仿生结构(仰视图)

Fig. 4 Bionic structure of bow head (bottom view)

## 1.2 计算域设定及网格划分

本文三维模型计算区间如图5所示。根据模型尺寸最终确定计算域长45 m、宽20 m及高10 m,入口面与模型前端垂直距离为10 m,出口面与模型尾部垂直距离为20 m,计算区域对称,模型底部与计算区域底面重合。

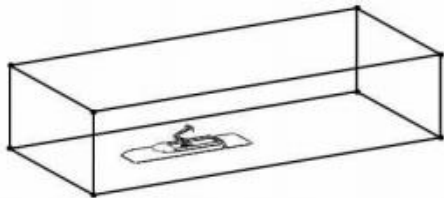


图5 计算域

Fig. 5 Computational domain

本文采用ICEM软件对模型表面及计算区域进行网格划分。其中,针对外形复杂表面如受电弓、导流罩表面进行加密网格处理。由于固体表面速度梯度较大,因此对模型表面进行边界层划分。

本文选取5组密度不同的网格进行了网格独立性检验,对列车运行时速为350 km/h的情况下主

被动整体降噪后的受电弓表面最大声功率级进行分析对比,分析结果见表1。

表1 网格独立性检验  
Tab. 1 Grid independence test

序号	网格数 /万	受电弓表面最小 网格尺寸/mm	最大声功率级 /dB
1	1 456	1.33	143.12
2	2 878	0.96	137.78
3	3 802	0.87	135.02
4	4 412	0.83	133.82
5	4 675	0.82	133.85

对比表1数据可知,受电弓表面最大声功率级变化在第四组开始随网格数量的递增最终呈现平缓趋势,因此本文确定网格总数为4 412万。其中,近壁面共设置4层边界层。第一层边界层的厚度设置为0.08 mm,增长率为1.1,网格最小尺寸为0.83 mm,计算网格总数为4 412万,计算区域及车体表面网格划分如图6所示。



图6 网格划分细节  
Fig. 6 Meshing details

1.3 数学模型

大尺度涡流是高速列车气动噪声主要噪声源,因此本文选择大涡模拟湍流模型,其控制方程为:

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (2)$$

其中, $\rho$ 为流体密度; $\bar{u}_i$ 、 $\bar{u}_j$ 为过滤后的速度分量; $\bar{P}$ 为处理后的压强; $\mu$ 为湍流粘性系数; $\tau_{ij}$ 为亚格子尺度应力,其数学模型为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} = -2S_{ij}(C_s\Delta)^2\sqrt{2(S_{ij})^2}, \quad (3)$$

其中, $\Delta$ 表示网格尺寸, $C_s$ 表示Smagorinsky常数。 $S_{ij}$ 表示求解尺度下的应变力张量,运算时会用到如下公式:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}). \quad (4)$$

1.4 计算方法

本文使用fluent流体分析软件对流场区域进行数值模拟计算。瞬态计算建立在稳态计算基础上,因此首先进行稳态计算,计算步数为500步;瞬态流场的计算步数为1 500步,步长为 $5 \times 10^5$  s,声源声功率级的步数为1 500步,步长为 $5 \times 10^5$  s,远场声压级计的步数为3 000步,步长为 $5 \times 10^5$  s。

本文采用反应人耳实际听感的A计权声压级来评价远场声压级。查阅铁路噪声标准ISO3095-2013知等效连续A计权声压级计算表达式为<sup>[9]</sup>:

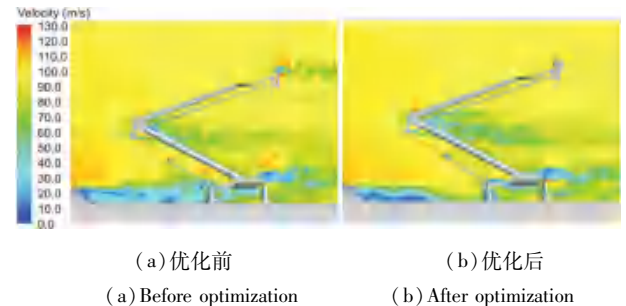
$$L_{pAeq,T} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt\right). \quad (5)$$

其中, $T$ 表示采样分辨率; $p_A(t)$ 表示非正常A计权声压; $p_0=20 \mu\text{Pa}$ 表示基准声压。

2 流场特性对比分析

以350 km/h高速列车运行时速为例,对主被动整体降噪前后的受电弓进行速度分布、湍动能分布和涡量分布的对比分析,分析降噪前后的受电弓的流场状态。

主被动整体降噪后速度分布对比如图7所示。由图7中降噪前后的速度分布对比可得:



(a) 优化前 (b) 优化后  
(a) Before optimization (b) After optimization

图7 主被动整体降噪后速度分布对比(量程:0~130 m/s)

Fig. 7 Comparison of velocity distribution between active and passive noise reduction (range:0~130 m/s)

(1)弓头位置的尾部卡门涡街现象明显减弱,碳滑板中间截面强烈的涡脱落现象基本消失。

(2)底部空腔前缘部位的剪切气流撞击绝缘子前壁面的现象基本消失,负压区明显减小(蓝色区域)。

(3)受电弓附近整体的强湍流现象基本消失,流场较优化前更加稳定。

主被动整体降噪后湍动能分布对比如图 8 所示。由图 8 中降噪前后的湍动能分布对比可得:

(1)弓头尾部湍动能基本消失,最大湍动能由  $299.46 \text{ m}^2/\text{s}^2$  减小至  $94.78 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

(2)底部空腔前缘湍动能较大区域明显缩小,底架和绝缘子尾部的湍动能也相对减小,整体底部空腔内的最大湍动能由  $301.79 \text{ m}^2/\text{s}^2$  减小至  $190.46 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。



(a) 优化前 (b) 优化后  
(a) Before optimization (b) After optimization

图 8 主被动整体降噪后湍动能分布对比(量程:0~250  $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

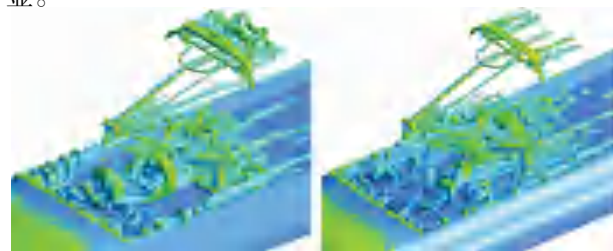
Fig. 8 Comparison of turbulent kinetic energy distribution after active and passive integrated noise reduction (range:0~250  $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

主被动整体降噪后涡量分布对比如图 9 所示。由图 9 中降噪前后的涡量分布对比可得:

(1)弓头碳滑板中间位置的月牙形涡有了大幅的减少,转化为较稀疏的带状涡。

(2)空腔前缘的大涡流被射流气流切碎形成了许多小涡流,对湍动能的减弱有了极大的促进作用。

(3)底架及绝缘子尾部涡量状态基本不变,可以初步判断主动射流方法对空腔前缘的降噪更为明显。



(a) 优化前 (b) 优化后  
(a) Before optimization (b) After optimization

图 9 主被动整体降噪后涡量分布对比

Fig. 9 Comparison of vorticity distribution between active and passive integrated noise reduction

### 3 受电弓主被动协同降噪效果分析

#### 3.1 声源特性对比分析

以 350 km/h 高速列车运行时速为例,对主被动整体降噪前后的受电弓各个部位表面声功率级进行对比分析,分析降噪前后的受电弓各个部位的声功率级变化情况。研究后可得各部位的最大声功率级降幅见表 2,协同降噪后声功率级对比图如图 10 所示。

表 2 各部位的最大声功率级降幅

Tab. 2 Maximum sound power level reduction of each part

结构	降噪前最大声功率级	降噪后最大声功率级	降幅
弓头	134.09	118.81	15.28
上臂杆	132.65	133.10	-0.45
下臂杆	131.64	130.75	0.89
平衡杆	126.99	123.51	3.48
拉杆	127.81	124.87	2.94
底架	132.77	130.82	1.95
绝缘子	133.86	121.01	12.85
空腔	134.98	118.06	16.92

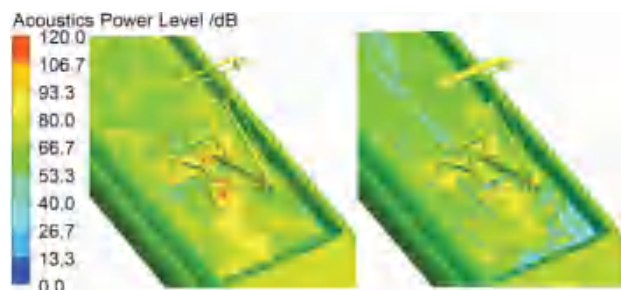


图 10 协同降噪后声功率级对比图(量程:0~120 dB)

Fig. 10 Comparison chart of sound power level after collaborative noise reduction (range:0~120 dB)

由图 10 和表 2 分析后可得:

(1)受电弓表面的声功率级大小由大到小分别为:空腔>弓头>绝缘子>底架>上臂杆>下臂杆>拉杆>平衡杆。

(2)弓头两侧曲率较大位置的声功率级降幅较大,最大声功率级由降噪前的 134.09 dB 降为 118.81 dB,降低了 15.28 dB。

(3)绝缘子表面和空腔前缘的声功率级降幅也较大,分别降低了 12.85 dB 和 16.82 dB。

(4)其他位置未施加降噪措施的位置声功率级大小基本不变。

#### 3.2 远场气动噪声对比分析

在空间域布置的远场监测点如图 11 所示。以

350 km/h 高速列车运行时速为例,沿横向( $z$ )从距受电弓 3 m 远处开始每隔 1 m 布置 24 个监测点,探究随距离增加的远场声压级衰减趋势;沿纵向( $x$ )距受电弓 7.5 m 远处布置 13 个噪声监测点,探究远场气动噪声在纵向的变化规律;沿垂向( $y$ )距受电弓 25 m 远处布置 31 个噪声监测点,探究远场气动噪声在不同楼层高度的差异。

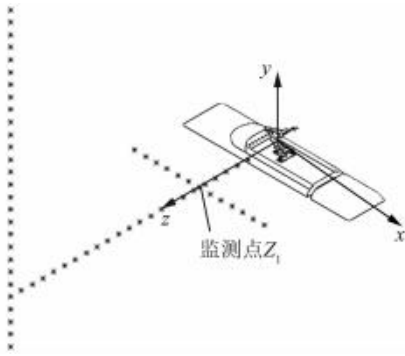


图 11 远场监测点布置形式

Fig. 11 Layout of remote monitoring points

### 3.2.1 远场声压级衰减特性分析

对主被动整体降噪前后的受电弓远场声压级横向衰减规律进行了分析,仿真结果如图 12 所示。由图 12 分析可知:

(1)受电弓远场声压级随着距离的增加逐渐变小,呈现一个对数衰减的趋势。

(2)在 3 m 和 11 m 处降噪前后的远场声压级降低值分别出现了最大值和极大值点,分别降低了 4.99 dBA 和 4.08 dBA,3 ~ 25 m 所有横向监测点声压级平均降低了 3.61 dBA。

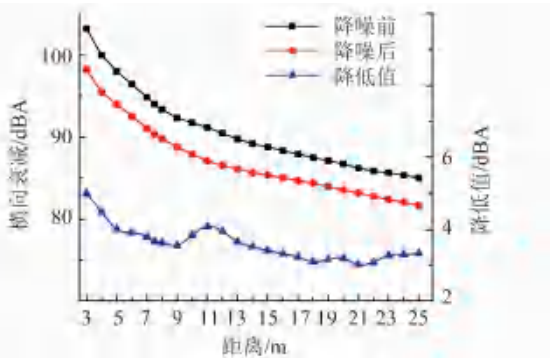


图 12 远场声压级横向衰减规律

Fig. 12 Lateral attenuation law of far field sound pressure level

对主被动整体降噪前后的受电弓远场声压级纵向变化规律进行了分析,仿真结果如图 13 所示。图 13 中,虚线处表示的是受电弓位置。由图 13 曲线分析可知:

(1)降噪前后在受电弓尾部 2 m 左右位置都出

现了声压级的极大值点,说明尾部湍流及尾涡脱落是受电弓气动噪声产生的主要原因之一。

(2)所有纵向监测点声压级平均降低了 3.92 dBA,最大降低值位置在受电弓尾部 6 m 处,降低了 4.23 dBA。

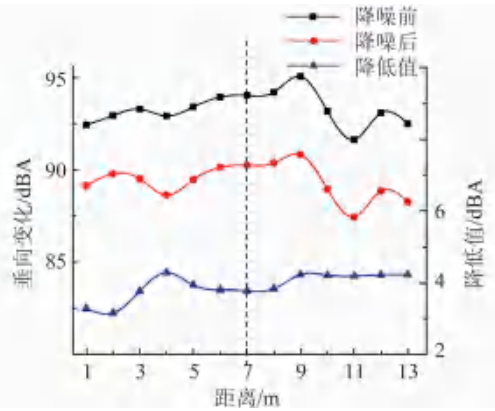


图 13 远场声压级纵向变化规律

Fig. 13 Longitudinal variation of far field sound pressure level

对主被动整体降噪前后的受电弓远场声压级垂向(25 m 远处不同楼层高度)变化规律进行了分析,如图 14 所示。图 14 中,虚线处表示的是受电弓位置。由图 14 结果分析可知:

(1)降噪前后受电弓在垂向上随着高度的增加声压级都有着先增加、后减少的规律,不同的是降噪后声压级极大值垂向位置比降噪前低了 3 m 左右,且幅值有 4.79 dBA 的显著降低。

(2)所有的垂向监测点声压级平均降低了 4.18 dBA,最大降低值位置在距地面 18 m 高处,降低了 4.94 dBA,因此主被动整体降噪对居民楼中高层住宅有着更为显著的降噪效果。

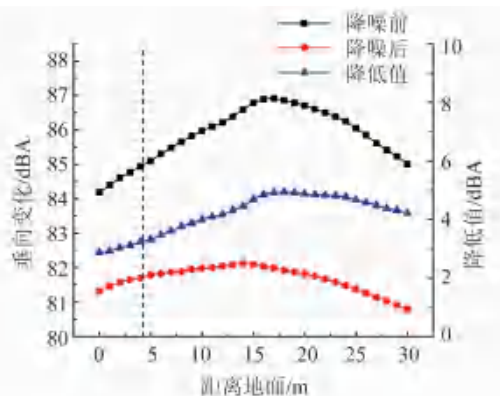


图 14 远场声压级垂向(不同楼层高度)变化规律

Fig. 14 Variation law of far field sound pressure level in vertical direction (different floor height)

### 3.2.2 远场声压级频域分布对比分析

为分析主被动整体降噪前后远场气动噪声声压

级频谱特性规律,选取距离车体 7.5 m 远处的监测点  $Z_1$  (见图 11) 作为研究对象,以 350 km/h 高速列车运行时速为例,计算得到了受电弓远场声压级频域分布规律图和 1/3 倍频程频谱图,如图 15、图 16 所示。

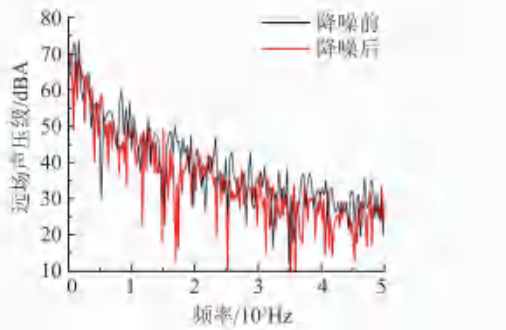


图 15 远场声压级频域分布规律图

Fig. 15 Distribution of far field sound pressure level in frequency domain

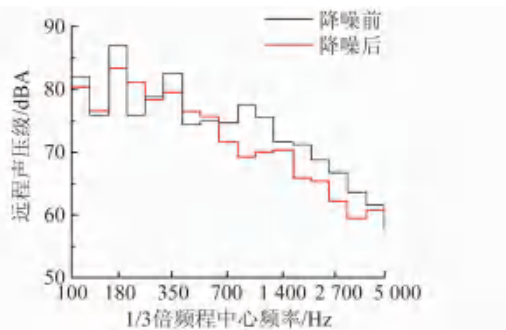


图 16 1/3 倍频程频谱图

Fig. 16 1/3 octave spectrum

由图 15、图 16 结果分析可得:

(1) 降噪前后受电弓远场声压级频域分布都较宽,且随着频率的升高,声压级呈逐渐降低趋势。

(2) 降噪后在 500 ~ 5 000 Hz 频段内远场声压级都普遍降低,总声压级由降噪前的 94.01 dBA 降为 90.37 dBA,降低了 3.66 dBA。

(3) 降噪前分别在 180 Hz、350 Hz 和 800 Hz

位置有 3 个主频,降噪后这 3 个主频的声压级都有显著的降低,特别是在 800 Hz 位置声压级降低了 8.21 dBA。

## 4 结束语

受电弓弓头和底部空腔是气动噪声的主要来源。经过弓头仿生结构优化和空腔主动射流整体降噪后,主要声源的声功率级都有较大的降幅,其中弓头和空腔部位分别降低了 15.28 dB 和 16.92 dB。

降噪前受电弓气动噪声在垂向上呈现先增加、后减少的趋势(距离受电弓为 25 m);降噪后对中高层住宅有着更加显著的降噪效果,最大降低位置在距地面 18 m 高处,降低了 4.94 dBA。远场声压级在低频区域降噪效果更为显著,特别是在 800 Hz 位置声压级降幅最大,降低了 8.21 dBA。

## 参考文献

- [1] 董继蕾. 高速动车组受电弓气动噪声产生机理及分布特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [2] 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, 2005, 293(3): 535-546.
- [3] GB 12525-9011. 铁路边界噪声值及其测量方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [4] 张亚东,张继业,张卫华. 高速受电弓气动噪声特性分析[J]. 铁道学报,2017,39(5):47-56.
- [5] 高阳,李新一,吴健. 高速列车受电弓气动噪声研究[J]. 铁道机车车辆,2017,37(5):54-57,78.
- [6] 余培汛,白俊强,郭博智,等. 剪切层形态对开式空腔气动噪声的抑制[J]. 振动与冲击,2015,34(1):156-164.
- [7] ZHANG Xin. Compressible cavity flow oscillation due to shear layer instabilities and pressure feedback[J]. AIAA Journal,1995, 33(8):1404-1411.
- [8] 黄莎,梁习锋,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]. 空气动力学学报,2012,30(2):254-259.
- [9] 张亚东,张继业,李田. 高速列车整车气动噪声声源特性分析及降噪研究[J]. 铁道学报,2016,38(7):40-49.

(上接第 148 页)

- [6] 全浩军,张涛,郭继昌. 基于改进人工鱼群算法的软硬件划分方法[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2013,46(10):923-928.
- [7] 王泽兵,杨卫,秦丽. 基于粒子群算法的动态热释电目标跟踪[J]. 光学学报,2014,34(10):35-41.
- [8] 罗慧,蹇兴亮,卢伟. 基于动态蚁群算法的模拟电路最优测点选择[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2231-2237.
- [9] GANDOMI A H, ALAVI A H. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2012,17(12):4831-4845.
- [10] LEI X, DU M, XU J, et al. Chaotic fruit fly optimization algorithm

[C]//5<sup>th</sup> International Conference on Swarm Intelligence. Hefei: Springer International Publishing,2014:74-85.

- [11] CUEVAS E, CIENFUEGOS M, ZALDÍVAR D, et al. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider [J]. Expert Systems with Applications,2013,40(16):6374-6384.
- [12] MENG Xianbing, LIU Yu, GAO Xiaozhi, et al. A new bio-inspired algorithm: Chicken swarm optimization [M]//TAN Y, SHI Y, COELLO C A C. Advances in swarm intelligence. ICSI 2014. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer,2014: 86-94.