

# 高速列车头车气动噪声仿真及控制研究

卢 岩<sup>1</sup>, 李 岭<sup>1</sup>, 宋雷鸣<sup>1\*</sup>, 高 攀<sup>2,3</sup>, 白 夜<sup>2,3</sup>, 陈 彪<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京

<sup>2</sup>中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 北京

<sup>3</sup>北京纵横机电科技有限公司, 北京

收稿日期: 2024年10月30日; 录用日期: 2024年11月27日; 发布日期: 2024年12月6日

## 摘 要

随着高速列车运行速度的提高, 高速列车运行产生的气动噪声问题表现得更加突出。列车头车作为关键气动噪声源, 通过对其采用降噪措施可以有效地降低车内外噪声。文章建立了高速列车外流场仿真模型, 采用分离涡(DES)模拟获得头车区域表面声源, 建立头车声学仿真模型, 探究了列车头车排障器区域的气动噪声源特性。通过优化排障器的外形来降低该区域的气动噪声, 数值仿真结果表明优化排障器外形可以有效地降低该区域产生的气动噪声。在30 Hz~3000 Hz范围内, 排障器区域的气动噪声得到有效降低, 噪声总值降低7.4 dB(A)。

## 关键词

高速列车, 气动噪声, 排障器, 外形优化

# Research on Aerodynamic Noise Simulation and Control of High-Speed Train Head Car

Yan Lu<sup>1</sup>, Ling Li<sup>1</sup>, Leiming Song<sup>1\*</sup>, Pan Gao<sup>2,3</sup>, Ye Bai<sup>2,3</sup>, Biao Chen<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing

<sup>2</sup>Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing

<sup>3</sup>Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Oct. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 27<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 6<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 卢岩, 李岭, 宋雷鸣, 高攀, 白夜, 陈彪. 高速列车头车气动噪声仿真及控制研究[J]. 声学 & 振动, 2024, 12(4): 128-135. DOI: 10.12677/ojav.2024.124012

## Abstract

With the increase in high-speed train operation speed, the aerodynamic noise problem generated by high-speed train operation has become more prominent. As a key aerodynamic noise source, the head car of the train can effectively reduce the noise inside and outside the train by adopting noise reduction measures. This paper establishes a simulation model of the external flow field of a high-speed train, uses the Detached Eddy Simulation (DES) to obtain the surface sound source of the head car area, establishes an acoustic simulation model of the head car, and explores the aerodynamic noise source characteristics of the head car's cowcatcher region. The aerodynamic noise in the region is reduced by optimizing the shape of the cowcatcher, and the numerical simulation results show that optimizing the shape of the cowcatcher can effectively reduce the aerodynamic noise generated in the region. In the range of 30 Hz~3000 Hz, the aerodynamic noise in the cowcatcher region is effectively reduced, and the total noise value is reduced by 7.4 dB(A).

## Keywords

High-Speed Train, Aerodynamic Noise, Cowcatcher, Shape Optimization

Copyright © 2024 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

随着高速列车速度提高,高速列车的气动噪声问题更加突出。许多研究表明,在 300 km/h 以上,随着滚动噪声贡献的减少,气动噪声成为主导[1]-[3]。前人的研究表明,列车运行产生气动噪声涉及多个部位,其中主要有头车、尾车、转向架、受电弓、风挡等区域[4] [5]。

目前,对于高速列车气动噪声的研究方法主要有现场试验、风洞试验和数值模拟。杨妍等[6]使用声阵列,基于反卷积波束形成算法,对高速列车车外声源识别进行测试。王东镇等[7]对列车运行时转向架区域的噪声源进行了现场试验研究。贾尚帅等[8]通过风洞试验和数值仿真对某高速动车组整车、受电弓以及转向架气动进行分析。高阳等[9]通过风洞试验,探究了高速列车 1:8 缩尺的三节编组模型的气动噪声特性。结果表明排障器位置的气动噪声能量集中在 630 Hz~2.5 kHz。相对于现场试验和风洞试验,通过计算流体力学(CFD)和计算空气声学(CAA)对列车的流场信息和噪声分析的成本更低。柳润东等[10]采用分离涡(DES)对高速列车外流场进行计算,利用宽带噪声源模型和 FW-H 方程对高速列车车头、车尾、转向架、受电弓区域的近场噪声源和远场噪声进行分析。季玲等[11]选择高速列车的车体表面的噪声源的声功率、空气升力以及空气阻力作为优化目标,对高速列车头型进行多目标优化设计。朱剑月等[12]在高速列车排障器底部后端采用扰流措施后,转向架区域的噪声得到了有效控制。陈羽[13]等探究了排障器厚度和排障器前缘夹角对气动噪声的影响。

高速列车的头车作为关键的气动噪声源区域,通过控制头车区域的气动噪声对高速列车整车的噪声控制具有重要意义。本文通过数值仿真,探究高速列车头车排障器区域产生的气动噪声情况,通过优化排障器外形降低气动噪声。通过优化排障器,排障器区域产生的气动噪声得到有效的控制。

## 2. 高速列车外流场仿真设置

文章建立了包括头车、尾车、中间车 3 节编组的高速列车外流场仿真模型,如图 1 所示。本文只研

究头车的气动噪声问题, 因此没有建立受电弓, 并对车辆连接处进行了适当简化。整车长度 92 m, 计算域入口距车头 55 m (大于 0.5 倍车长), 出口距离车尾 155 m (大于 1.5 倍车长), 高度 60 m (大于 10 倍车高), 宽度 72 m (大于 10 倍车宽)。模型中网格的最小尺寸为 24 mm, 最大尺寸为 64 mm, 网格总数约为 4500 万。划分了 12 层边界层, 边界层厚度约为 4 mm。其中, 第一层边界层厚度设置为 0.08 mm, 增长率为 1.2, 最外层厚度为 0.7 mm。

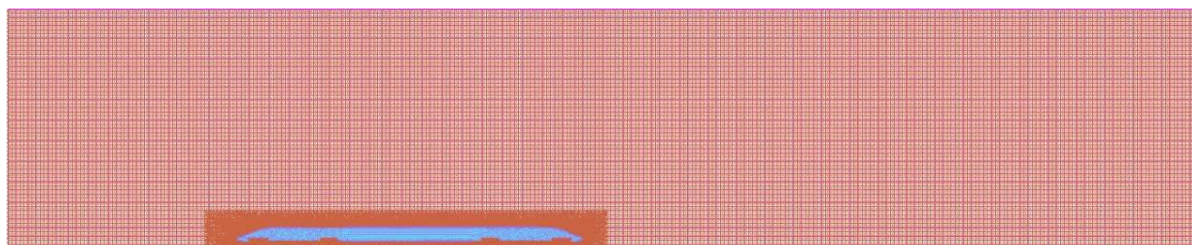


Figure 1. High-speed train external flow field model

图 1. 高速列车外流场模型

本文分析列车运行时速 350 km/h 的工况, 此时对应的马赫数小于 0.3, 因此在高速列车外流场仿真分析时采用不可压缩模型。流场边界条件设置如图 2 所示。其中, 速度入口设置为 97.2 m/s; 压力出口设置为 0; 将地面设置为滑移壁面, 其中速度大小为 97.2 m/s, 方向与速度入口方向相反; 车体设置为固定壁面; 其他面设置为对称边界。

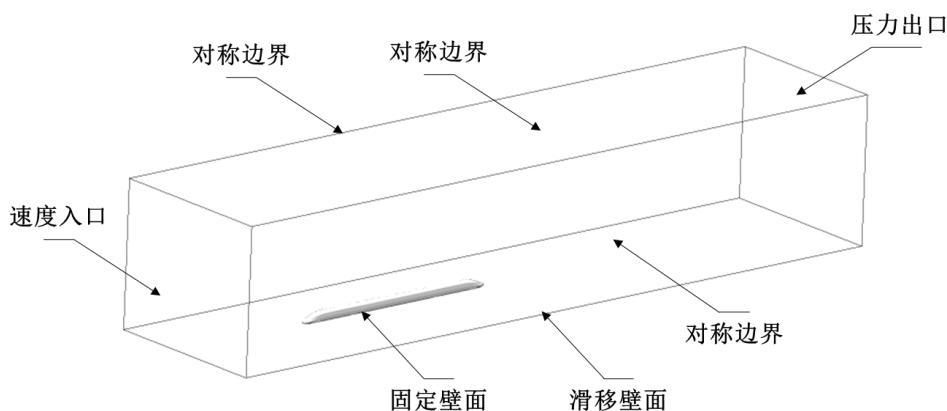


Figure 2. High-speed train external flow field boundary setting

图 2. 高速列车外流场边界设置

### 3. 高速列车气动声学数值计算

将高速列车外流场仿真所得的车体表面脉动压力进行积分变换, 获取列车表面的声源数据, 然后将列车表面声源数据进行傅里叶变换, 获得了不同频率下列车表面的声源分布情况, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 气动噪声源主要集中在头车、尾车、转向架、排障器区域。气动噪声源主要集中在 30 Hz~1000 Hz, 在 3000 Hz, 头车和排障器区域的声压级较低。

本文只分析高速列车的头车气动噪声, 因此建立了如图 4 所示的高速列车外声场模型。考虑到高速列车在实际线路运行时其周围环境可以视为无限大的自由流场, 因此将列车运行时的外声场设置为一个半无限大自由流场。考虑到地面对噪声的反射作用, 因此将地面设置为全反射的刚性壁面。

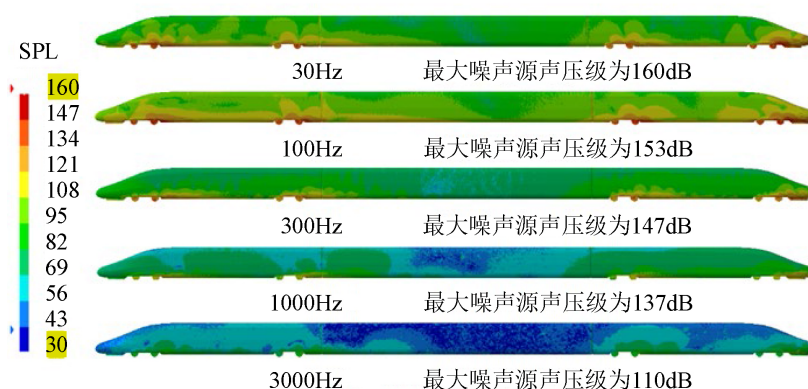


Figure 3. Noise source sound pressure level distribution at typical frequencies

图 3. 典型频率下噪声源声压级分布

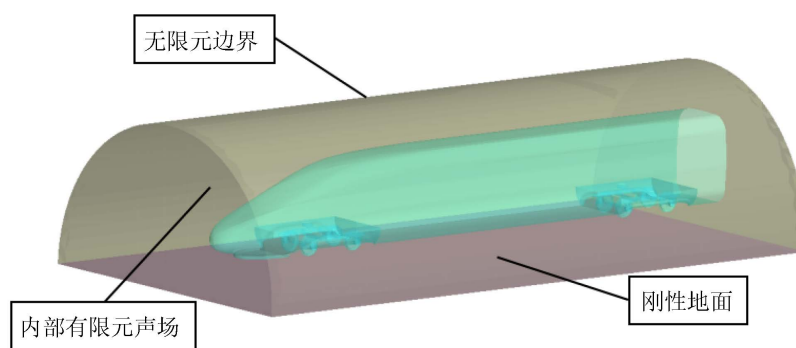


Figure 4. Model of sound field outside high-speed train

图 4. 高速列车外声场模型

### 高速列车头车排障器气动噪声源特性研究

不同频率下排障器位置噪声分布, 如图 5 和图 6 所示。从图中可以得到, 高速列车头车排障器气动噪声源主要集中在排障器前端和后端的区域。排障器区域产生的气动噪声主要集中在 30 Hz~1000 Hz。在 3000 Hz 时, 排障器区域的声压级较小, 对气动噪声的贡献较小。

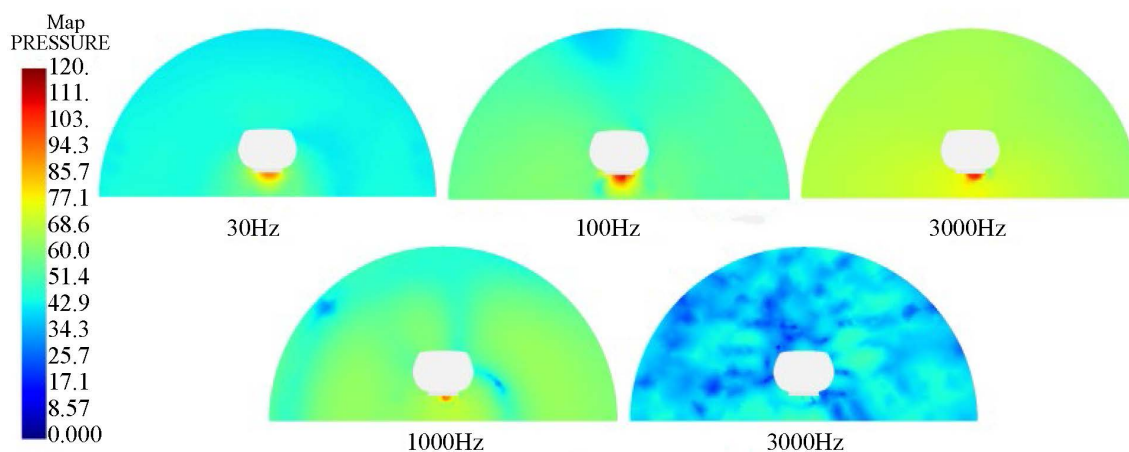
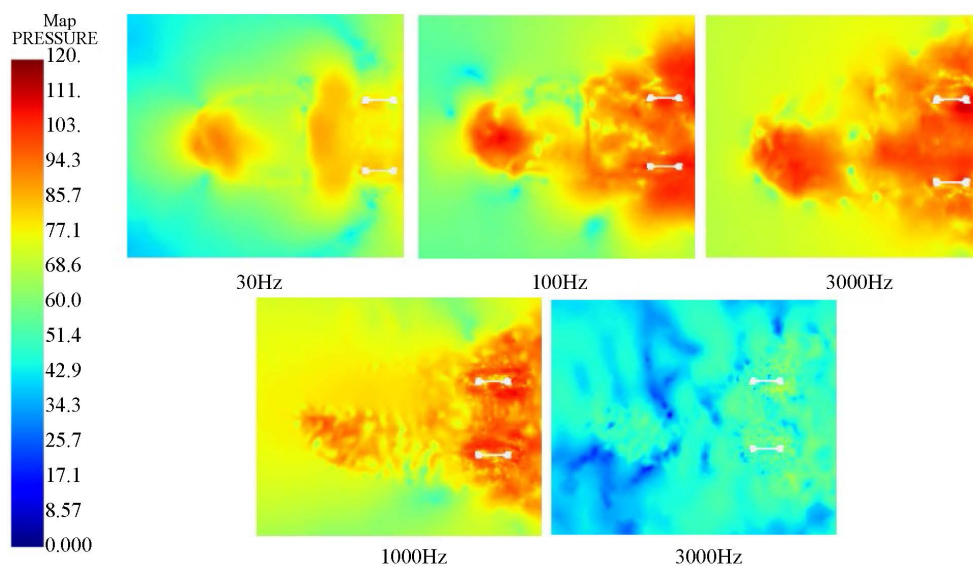


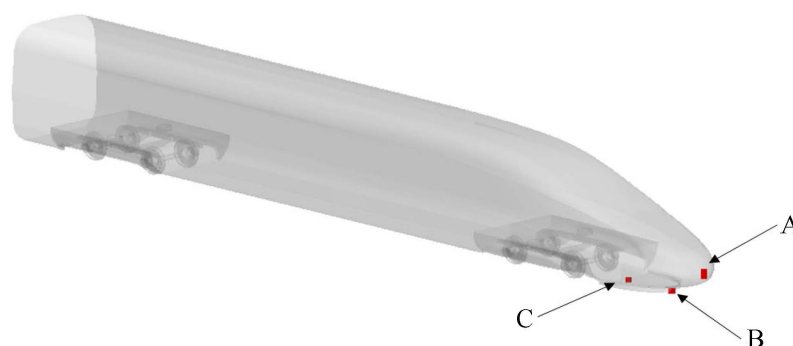
Figure 5. Noise distribution at different frequencies in the left view

图 5. 左视图下不同频率的噪声分布



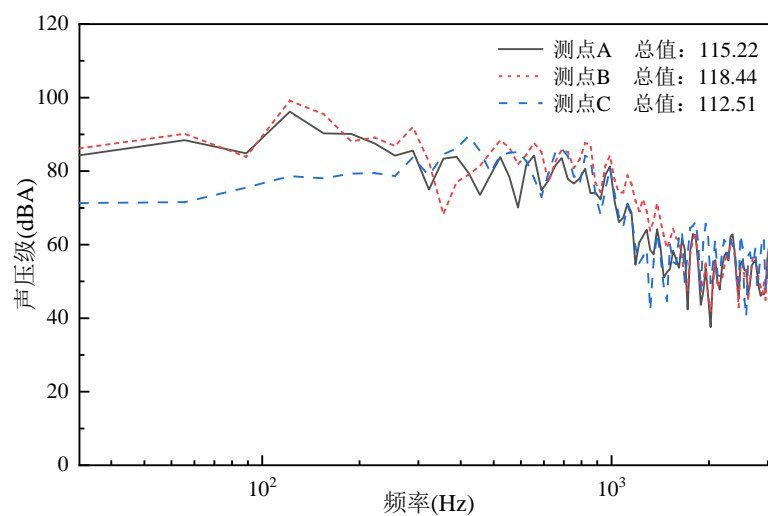
**Figure 6.** Noise distribution at different frequencies in top view

**图 6.** 俯视图下不同频率的噪声分布



**Figure 7.** Car body external monitoring point

**图 7.** 车体外部监测点



**Figure 8.** The weighted spectrum of the monitoring point of the cowcatcher

**图 8.** 排障器监测点计权频谱



为了进一步探究排障器区域气动噪声特性,声学外场计算模型建立之后,对排障器区域进行气动噪声监测点的设置。如图7所示,设置了A、B、C三个监测点。

图8给出了3个监测点在30 Hz~3000 Hz的声压级分布。从图中分析得到,声音的能量主要集中在30 Hz~1000 Hz。排障器前端B处的声压级最大为115.22 dB(A),排障器C处的声压级最小为112.51 dB(A)。因为测点B在排障器前端,高速气流流过排障器前端时,在该区域产生了湍流,产生了较大的脉动压力,因此B处的声压级大于C处的声压级。

#### 4. 高速列车头车降噪措施

由于气流在经过头车排障器时会受到一定阻碍,产生湍流涡团,进而产生较大的脉动压力。本文通过对排障器外形进行优化来降低气动噪声的产生。

##### 4.1. 排障器结构优化

通过声源分布,我们可以看到,排障器区域的声源声压级较大。因此,通过对排障器前端和后端的外形进行优化,来降低高速气流通过排障器时产生的涡流,进而降低该区域的气动噪声。本文针对排障器的结构外形设计了改进方案,如图9和图10所示。在车下排障器的前端位置进行圆角化处理,同时对后端直角凸台也进行圆角化处理。

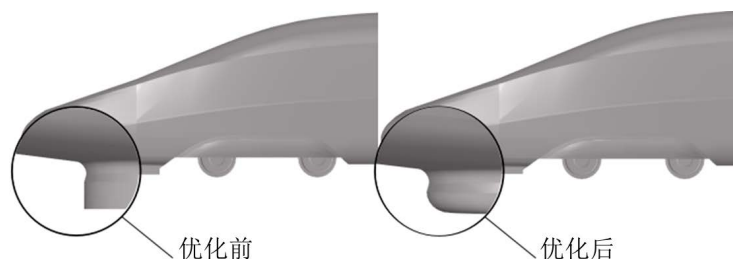


Figure 9. Optimized processing of the front end of the cowcatcher

图9. 排障器前端优化处理

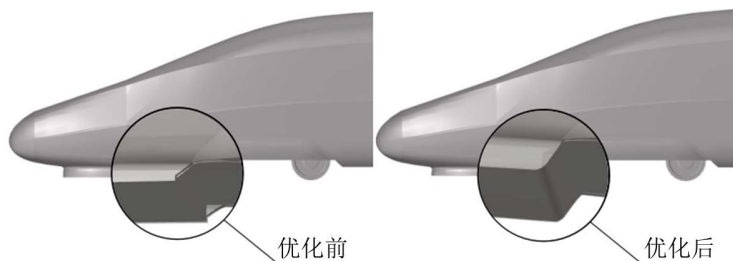


Figure 10. Optimized processing of the backend of the cowcatcher

图10. 排障器后端优化处理

##### 4.2. 降噪效果分析

排障器优化前后,在50 Hz、1000 Hz、500 Hz、1000 Hz频率下,排障器位置处的气动噪声源分布如图11所示。

从声源分布上可以看出,排障器区域优化后声源得到有效的改善。在50 Hz、1000 Hz、500 Hz、1000 Hz频率下,优化前,排障器前端的声压级较大,优化后前端区域声压级减小。取排障器区域若干监测点,绘制优化前后的声压级频谱如图12所示。

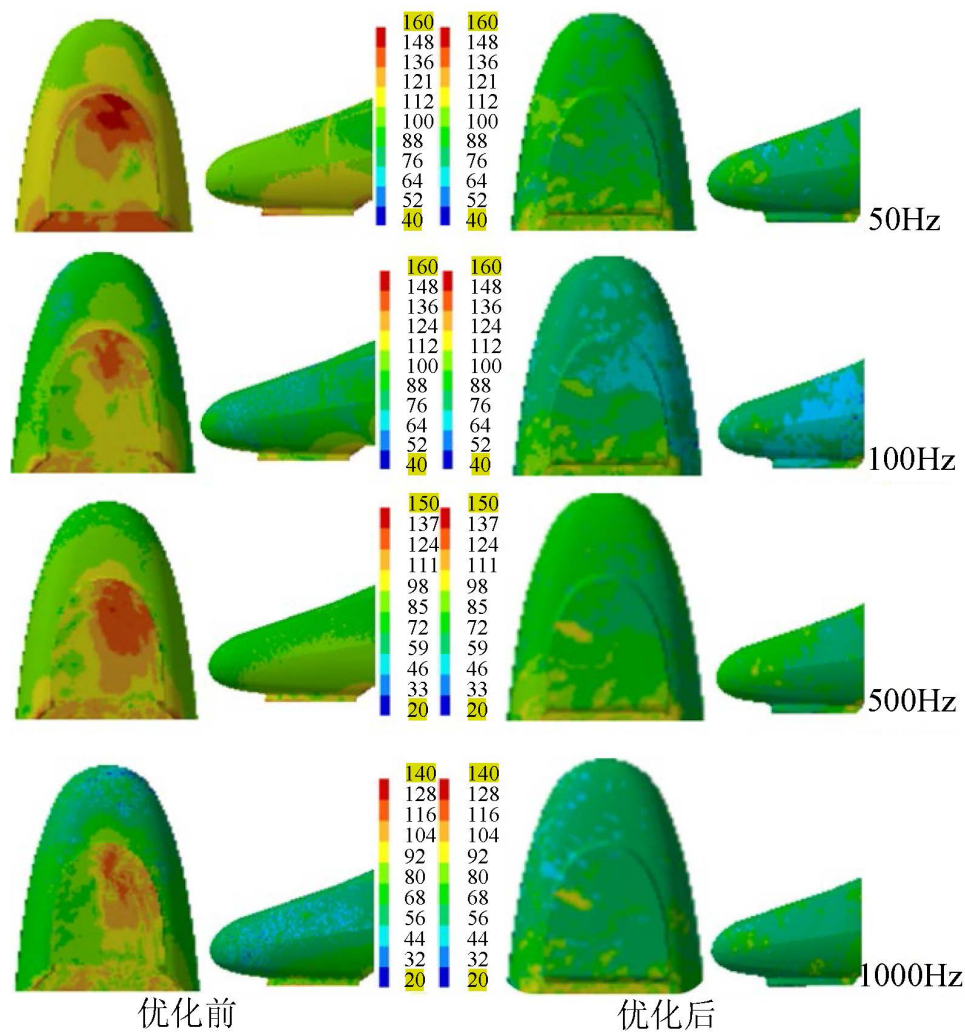


Figure 11. Comparison of sound source distribution in the area of cowcatcher  
图 11. 排障器区域声源分布对比

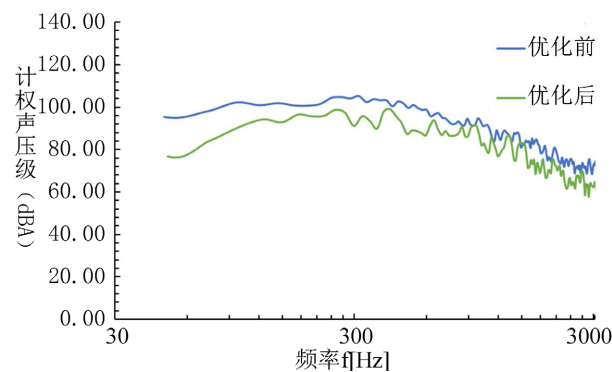


Figure 12. Comparison of sound pressure levels before and after optimization of the cowcatcher  
图 12. 排障器优化前后声压级对比

高速列车排障器的前端和后端经过外形优化后，可以有效地降低该区域产生的涡流，进而降低该区域产生的脉动压力。从图 11 也可以看出，优化后排障器区域产生的声源声压级低于优化前该区域的声源

声压级。由图 12 可以得到优化后排障器产生的气动噪声在 30 Hz~3000 Hz 范围内均得到有效的控制, 其中中低频降噪效果更明显, 优化后排障器区域产生的气动噪声降低了 7.4 dB(A)。

## 5. 结论

本文通过数值仿真, 探究了高速列车车头排障器区域的气动噪声源特性。通过对排障器外形进行优化设计, 来降低该区域的气动噪声, 仿真结果表明对排障器外形进行优化设计可以有效地降低该区域的气动噪声。本文主要得出以下结论:

- 1) 由于高速气流流过排障器时, 在该区域产生了湍流、较大的脉动压力和较大的声压。排障器区域的噪声主要集中在 30 Hz~1000 Hz, 3000 Hz 以上对声源贡献度较小。
- 2) 通过对排障器外形进行优化设计, 取得了有效的降噪效果。在 50 Hz、100 Hz、500 Hz、1000 Hz 下, 优化排障器外形后, 声源得到有效的控制。在 30 Hz~3000 Hz 范围内, 对比优化前后排障器区域位置的噪声总值, 该区域的噪声总值降低 7.4 dB(A)。

## 基金项目

中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(L2022Z002); 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2022YJ254)。

## 参考文献

- [1] 朱剑月, 张清, 徐凡斐, 刘林芽, 圣小珍. 高速列车气动噪声研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 39-56.
- [2] Zhang, J., Xiao, X., Sheng, X. and Li, Z. (2019) Sound Source Localisation for a High-Speed Train and Its Transfer Path to Interior Noise. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **32**, Article No. 59. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0375-1>
- [3] Yan, H., Xie, S., Jing, K. and Feng, Z. (2022) A Review of Recent Research into the Causes and Control of Noise during High-Speed Train Movement. *Applied Sciences*, **12**, Article 7508. <https://doi.org/10.3390/app12157508>
- [4] 王友彪, 李红梅, 宣言, 李志强, 周学影. 高速列车外流场及气动噪声特性数值分析[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2023, 13(4): 5-10.
- [5] 丁世峰. 高速列车气动噪声数值计算研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [6] 杨妍, 张捷, 何宾, 范静, 王德威, 肖新标. 基于试验测试的桥梁与路堤区段高速列车车外噪声特性分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 188-197.
- [7] 王东镇, 葛剑敏. 高速列车运行时不同转向架区噪声特性[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 174-183.
- [8] 贾尚帅, 张文敏, 韩铁礼, 彭垒. 高速动车组气动噪声试验与仿真分析[J]. 应用声学, 2021, 40(4): 611-618.
- [9] 高阳, 王毅刚, 王金田, 沈哲, 杨志刚. 声学风洞中的高速列车模型气动噪声试验研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 506-510.
- [10] 柳润东, 李志强, 伍向阳, 潘永琛. 高速列车关键区域流场结构及气动噪声特性仿真分析[J]. 中国铁路, 2024(6): 1-6.
- [11] 季玲, 刘海东, 陈秉智. 高速列车头型的减阻降噪多目标优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(5): 35-40.
- [12] 朱剑月, 程冠达, 陈力, 高阳, 张清. 高速列车排障器底部后端扰流对转向架区域流场与气动噪声特性的影响[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(6): 119-130.
- [13] 陈羽, 柳壹明, 毛懋, 李启良, 王毅刚, 杨志刚. 高速列车底部结构参数对气动噪声影响规律[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(5): 1171-1179.