

# 时速120公里地铁列车气动噪声数值仿真分析

闫磊<sup>1</sup>, 由天宇<sup>2</sup>, 杨志刚<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 中南大学  
交通运输工程学院 轨道交通安全教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 列车噪声影响车内乘客舒适性, 其产生原理复杂, 在一定程度上影响着轨道交通车辆的发展, 开展列车噪声研究意义重大。文章采用数值仿真方法, 以3辆车编组、带转向架、无受电弓的1:8缩比列车模型为基础, 运用软件ICEM的拓扑优化、多层网格加密技术、附面层网格技术与网格拉伸技术开展精细化四面体/三棱柱网格划分, 构建列车明线运行环境下的计算域网格。通过建立地铁列车气动噪声仿真模型, 研究了80 km/h、120 km/h和130 km/h不同工况下列车明线运行的气动声学特性; 分析了不同速度下地铁列车流场脉动性能、气动噪声源性能和远场辐射噪声性能, 研究列车外部流场情况及其声学规律。仿真结果表明, 随着列车运行速度增加, 列车车体表面的声功率级逐渐增加, 声源能量和声压级也随之增大。对时速120公里地铁列车气动噪声特性的研究可为地铁车型气动声学优化设计提供参考。

**关键词:** 地铁列车; 仿真; 流场脉动; 气动噪声源; 远场辐射噪声

**中图分类号:** U231; U270.1+6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2022)02-0026-05

## Numerical simulation on aerodynamic noise of 120 km/h metro train

YAN Lei<sup>1</sup>, YOU Tianyv<sup>2</sup>, YANG Zhigang<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China; 2. Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Ministry of Education, School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** The mechanism of noise generated by rail vehicles in the process of driving is complex. Noise problems not only cause trouble to the comfort of passengers, but also restrict the development and application of rail transit vehicle to a certain extent. Therefore, the research on the noise of standard metro trains has important implications. Through the numerical simulation method, based on the 1:8 scaled model of 3-vehicle marshalling with bogies and without pantograph, using the topology optimization, multi-layer mesh refinement technology, boundary layer mesh technology and mesh stretching technology of the commercial meshing software ICEM to develop refined tetrahedral/triangular prism meshing, the computational domain mesh under the open-line operation was built. The simulation model of the aerodynamic noise of metro train was established, and the aeroacoustics characteristics of the open-line operation under different working conditions of 80 km/h, 120 km/h and 130 km/h were studied. Specifically, the flow field pulsation performance, aerodynamic noise source performance and far-field radiated noise performance of metro trains under different velocity were analyzed, the external flow field and acoustic law of train were researched. The simulated results show that with the increase of train's speed, the sound power level on the surface of the train body, sound source energy and sound pressure level increase gradually. The research on the aerodynamic noise characteristics of metro trains with a speed of 120 kilometers per hour in this paper provides a reference basis for the aeroacoustics

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家重大技术装备攻关工程项目 (系列化中国标准地铁列车研制及试验)

通信作者: 闫磊 (1981—), 男, 教授级高级工程师, 从事城轨车辆总体和电气系统技术研究和管理工作;

E-mail: sf-yanlei@cqsf.com

optimization design of other metro trains.

**Keywords:** metro train; simulation; flow field pulsation; aerodynamic noise source; far-field radiated noise

## 0 引言

随着城市化进程的不断推进,人们对交通工具在舒适、安全、环保、快捷等方面有了更高的要求。地铁列车在为民众带来便利的同时,其噪声污染也日益严重,而气动噪声问题成为地铁列车发展中急需克服的问题。地铁列车运行时,产生的气动噪声和气动阻力是列车气动声学性能最主要的评估目标,随着速度的提高,噪声水平呈幂次函数激增。根据既有的研究表明,一般来说,当列车运行速度为300 km/h时,气动噪声源能量占总噪声源能量的比重约为50%。随着列车运行速度的进一步提高,气动噪声将超过轮轨噪声成为主要噪声源<sup>[1-3]</sup>。空气阻力与气动噪声的大幅上升,对列车运行时的能耗、乘员的舒适性和铁路沿线居民生活造成了一定的影响。地铁列车提速后的气动噪声水平有待评估。

为进一步优化列车运行时的气动声学性能,降低列车运行时的阻力与噪声,开展地铁列车气动噪声分析研究意义重大。本文将以3辆编组地铁列车为基础,构建数值计算分析模型<sup>[4-7]</sup>,并利用仿真方法研究其在120 km/h明线运行下的气动声学特性。进一步研究80 km/h和130 km/h工况下的声学特性,得到该型列车的气动声学速度演变趋势,为地铁列车气动声学的优化设计提供指导。

## 1 数值计算模型及计算工况

### 1.1 数值计算模型

当地铁列车在明线工况下运行时,通过利用相对运动的方法来模拟地铁列车实际的运行情况。具体的方法为在列车与计算区域静止时,通过赋予不同的流场速度,从而实现改变列车运行速度<sup>[8-12]</sup>。计算仿真的基础是以3辆车编组、带转向架、无受电弓的1:8缩比的列车模型。图1是原型车的几何模型图和明线计算域<sup>[13-14]</sup>。

当地铁列车在明线运行时,仿真设置的计算区域应充分保证流场的发展。具体要求上游流场不小于8倍特征高度,下游流场应不小于16倍的特征高度。其中特征高度指车顶与地面的距离,本文设定的地铁列车特征高度为3.73 m,采用的计算区域大小为480 m×60 m×30 m,完全满足要求。在x方向上,流域入口ABCD到车头的距离为80 m,而流域出口EFGH到车尾的距离为343 m;在y方向上,流域两侧面BFGC、AEHD关于列车中间截面对称,距离列车中间截面均为30 m;在z方向上,流域底面ABFE与顶面DCGH高度相差为

30 m,流场地面与列车的距离约为0.2 m。列车流场的数值仿真计算包括稳态计算和瞬态计算,其中稳态计算是为瞬态计算提供较好初始流场。考虑到列车运行环境差异性和计算效率,稳态计算和瞬态计算所用的方法是不一样的。对于明线运行环境来说,稳态计算的湍流模型选用Realizable  $k-\epsilon$ 模型,近壁面选用加强壁面函数,利用加强壁面函数计算近壁面,选用SIMPLE算法计算“压力-速度”耦合,采用Standard离散格式计算压力,采用二阶迎风离散格式计算湍动量、动量和湍动能耗散率,使用基于压力基隐式求解方法进行求解;瞬态计算的湍流模型选用LES,亚格子模型选用Smagorinsky Lily模型,利用PISO方法计算“压力-速度”耦合,其中时间步长为5E-5 s,共计算10 000个时间步,并且每个时间步长迭代30步。速度入口边界条件设在进口ABCD处;压力出口边界条件设置在流域出口EFGH处;而流域顶面CGHD和侧面BFGC、AEHD处给定对称边界条件,使沿该面的法向速度保持为0,从而达到在消除壁面对流场影响的同时保证流场的发展;给定滑移地面(Moving Wall)边界条件设置在流域地面ABFE处,使其速度与来流方向的速度保持一致;列车模型表面设定为有摩擦的无滑移边界条件,即静止边界。列车高速运行时,由于车体周围的压力和气流速度变化剧烈,因此在离散网格时,列车周围区域应适当加密;车尾后部流场由于列车尾涡的存在,该区域网格也应适当加密;车体、隧道壁面、地面边界层流动是宽频噪声产生的主要来源,应在这些区域添加附面层网格。因此,本文采用软件ICEM的拓扑优化、多层网格加密技术、附面层网格技术与网格拉伸技术开展精细化的四面体/三棱柱网格划分。图2给出明线运行环境下计算域网格示意图。

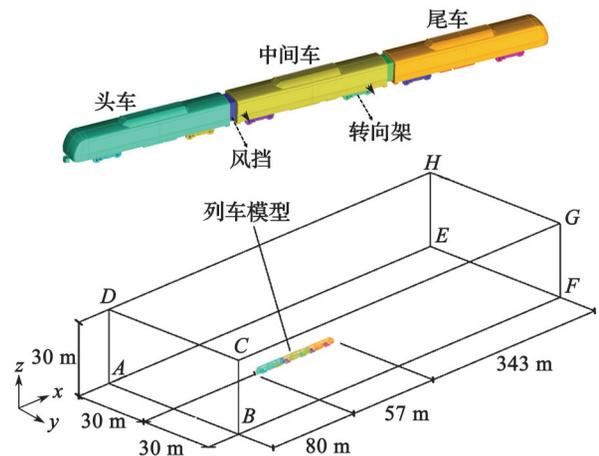


图1 明线运行的地铁列车计算模型与计算域

Fig. 1 Calculation model and computational domain of open-line train

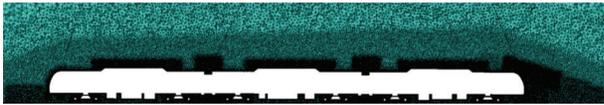


图2 明线运行环境下计算网格图  
Fig. 2 Computational grid diagram in open-line operating environment

1.2 计算工况

本文计算地铁列车在明线上以 80 km/h、120 km/h 和 130 km/h 的车速运行时的气动噪声特性，共 3 个计算工况，如表 1 所示。

表 1 原型车计算工况

Table 1 Calculation conditions of prototype train

参数项目	计算模型	缩比	运行环境	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	工况数
参数值或说明	地铁列车 3 车编组	1:8	明线	80, 120, 130	3

2 结果分析

2.1 流场脉动性能速度演变规律

图 3 是地铁列车在明线运行以时速 80 km、120 km

和 130 km 运行工况下车体表面的压力系数分布图。分析图 3 可以发现，在 3 个速度工况下明线运行的压力系数分布云图相似，例如在列车车头鼻锥区域和头车吸能防爬装置处正压力最大、在空调导流罩前端处压力较大、在头车两侧和空调导流罩前端上边缘存在较小的负压区等等。结果表明，在该速度范围内明线列车表面压力分布变化不明显。

图 4 为地铁列车在明线上以 80km/h、120 km/h 和 130 km/h 的车速运行时，y=0 纵向截面的涡量分布云图。根据图 4 可发现，在 3 个速度工况下明线运行的纵向对称面涡量幅值分布云图相似，列车周围涡量幅值较大，而且变化剧烈，但远离列车的流域涡量幅值可忽略不计而且变化轻微；在列车车头车吸能防爬装置区域、转向架区域、空调导流罩后方、风挡空腔处以及尾车后方区域涡量较大；头车一位转向架区域的涡量强度远大于其他转向架区域。随着速度的增大，各部分的涡量也随之增大，尾涡的长度也随着速度的增长而变长。上述结果表明，在该速度范围内明线列车周围涡量分布规律具有速度保持性质。从分析可知，当地铁列车以 80 km/h、120 km/h 和 130 km/h 速度在明线运行时，列车周围脉动流场空间分布规律具有速度保

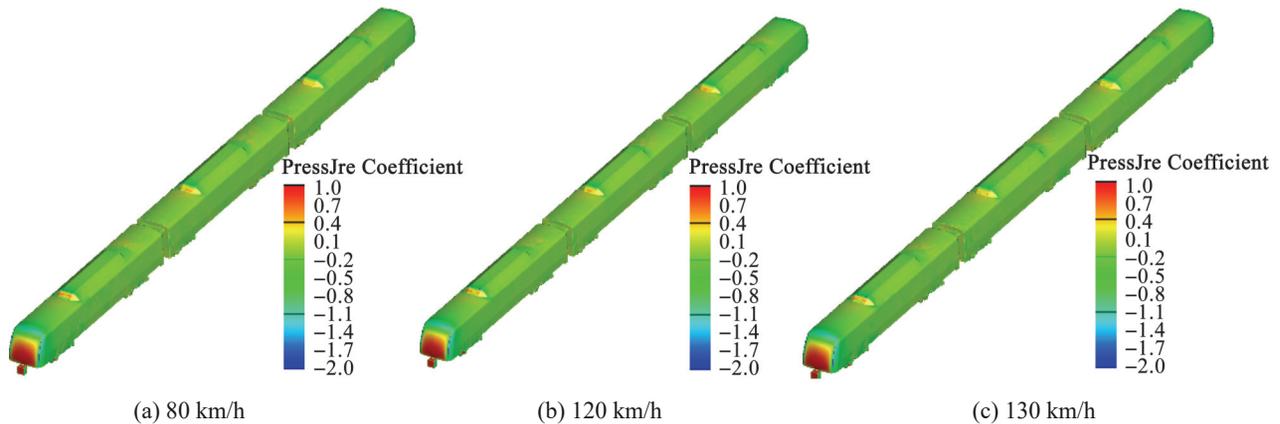
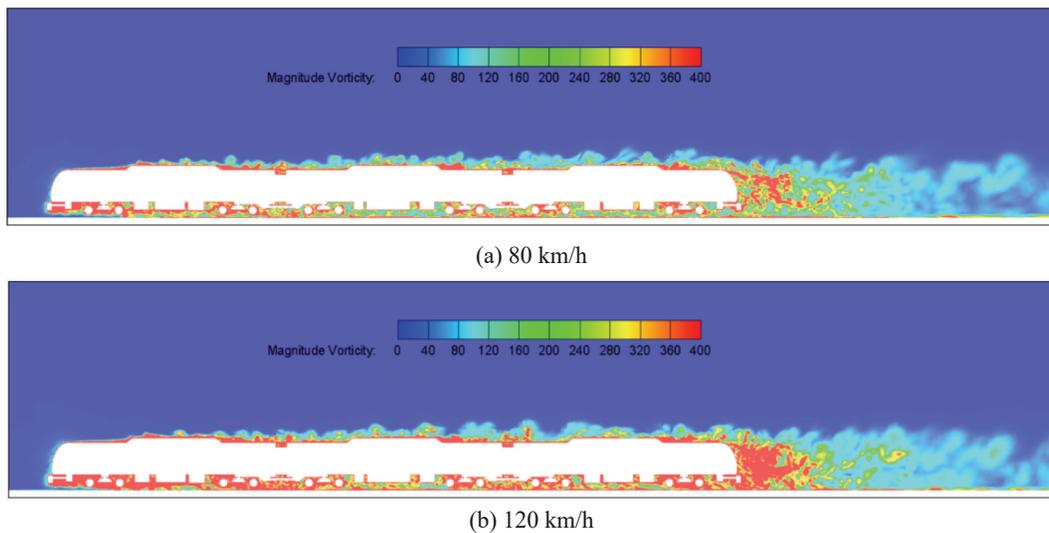
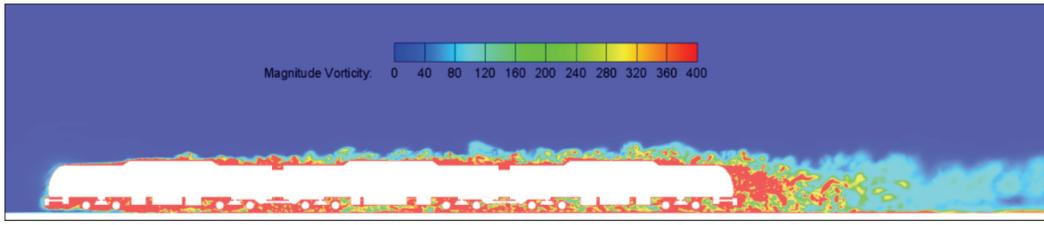


图 3 不同速度下车体表面压力系数分布图

Fig. 3 Distribution diagram of surface pressure coefficient of train body at different speeds



(b) 120 km/h



(c) 130 km/h

图4 不同速度级下y=0截面的涡量分布图

Fig. 4 Vorticity distribution diagram of the y=0 section at different speed levels

持性质, 并且流场脉动强度随速度增大而增大。

### 2.2 气动噪声源性能速度演变规律

表2统计了在3个速度工况下地铁列车各部件的声源能量百分比, 并根据表2数据绘制了图5。从图5可看出, 在3个速度级下头车声源能量总和占比均超过总能量的50%, 是车体主要的偶极子声源, 中间车和尾车声源能量占比接近。明线80km/h、120 km/h和130 km/h速度下列车表面声源强度分布规律均相似, 上述结果表明在该速度范围内明线周围涡量分布规律具有速度保持性质。偶极子声源声强主要在转向架及其周围车体表面的位置分布(特别是1位转向架区域)

表2 地铁列车声源能量比

Table 2 Sound source energy ratio of subway train %

速度/(km·h <sup>-1</sup> )	头车声源能量占比	中间车声源能量占比	尾车声源能量占比
80	51.66	21.84	26.50
120	53.17	21.18	25.65
130	55.42	20.07	24.51

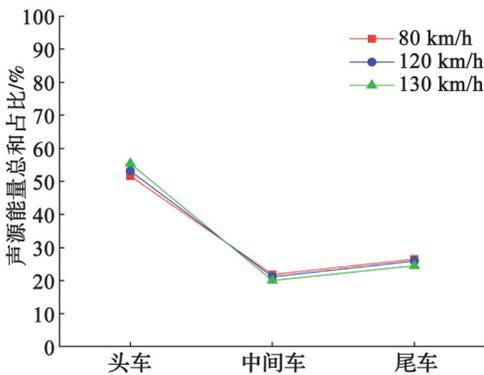


图5 列车各部分声源能量占比图

Fig. 5 Proportion of sound source energy of each part of train

### 2.3 远场辐射噪声性能速度演变规律

为考察地铁列车运行时的辐射噪声, 在列车运行方向上分别在高于地面3.5 m和距列车中轴线25 m沿线处布置总计16个检测点, 如图6所示(图中数值单位为m)。监测点布置范围是从列车头车吸能防爬装置前端开始至尾车吸能防爬装置后2.5 m处, 相邻监测点相隔4 m。由图6可知, 原点位置在列车吸能防爬装置

前端处, 监测点x坐标从0 m到60 m, 相邻监测点之间均相隔4 m。风挡分别位于5号监测点与6号监测点及10号监测点与11号监测点之间。本文中各工况的所有监测点坐标均相同。

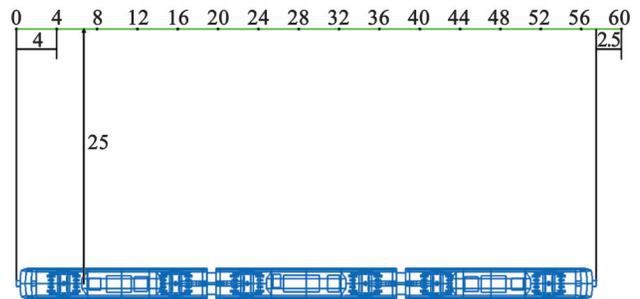


图6 声监测点布置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sound measurement point layout

图7是地铁列车明线运行时3种速度工况的A计权总声压级的分布(16个声监测点)。随着车速的提升, 16个声接收点处的声压级均在逐渐增大, 其中以头车流线型附近的声接收点声压级最大; 随着车身往后, 监测点的声压级减小, 尾车流线型附近接收点的声压级最小。由此可见, 在3个速度级下, 头车是最主要的噪声源。

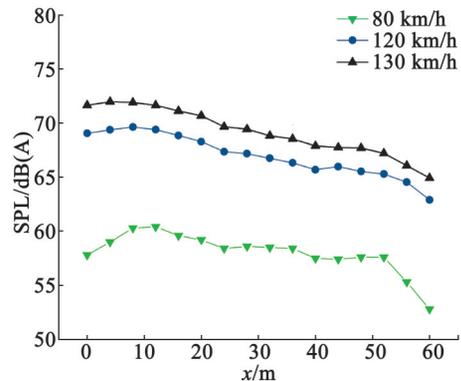


图7 地铁列车声监测点处A计权声压级分布

Fig. 7 A-weighted sound pressure level distribution at the sound measurement point of the subway train

## 3 结论

本文主要研究了3辆车编组地铁列车的外部流场情

况及其声学性能, 主要研究结论如下:

①随着列车运行速度的增加, 地铁列车车体表面的声功率级逐渐增加; 偶极子声源强度主要分布在转向架及其周围的车体表面位置; 当速度为120 km/h时, 空调导流罩以及风挡区域偶极子声源强度逐渐显现, 并随着速度的增长而增长。

②随列车运行速度的增加, 整车声源能量随之增大, 但头车、中间车和尾车声源能量所占比例变化很小, 头车占比最大, 其声源能量总和占比超过50%。

③随着列车运行速度的增加, 在声接收点处的声压级逐渐增加。头车流线型附近接收点的声压级最大, 并沿着车身往后逐渐减小, 尾车流线型附近接收点声压级最小, 头车是最主要的噪声源。

#### 参考文献:

- [1] 王秀珍. 地铁列车气动效应分析[J]. 中国科技信息, 2011(21): 85-86.  
WANG Xiuzhen. Analysis of aerodynamic effect of subway train[J]. China Science and Technology Information, 2011(21): 85-86.
- [2] 刘林芽, 雷晓燕, 练松良. 铁路线路噪声特点分析[J]. 噪声与振动控制, 2006, 26(3): 77-80.  
LIU Linya, LEI Xiaoyan, LIAN Songliang. Analysis of the railway line noise characteristic[J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(3): 77-80.
- [3] 唐闻天, 王丽丽. 快速地铁车辆气动效应及车辆设计参数分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 138-142.  
TANG Wentian, WANG Lili. Analysis on aerodynamic effects and design parameters in rapid metro vehicle design[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 138-142.
- [4] 徐俊伟, 吴亚锋, 陈耿. 气动噪声数值计算方法的比较与应用[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(4): 6-10.  
XU Junwei, WU Yafeng, CHEN Geng. Comparison and application on the aero-acoustics numerical computing methods[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4): 6-10.
- [5] THOMPSON D J, LATORRE IGLESIAS E, LIU Xiaowan, 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.
- [6] 王毅刚, 危巍, 杨洋, 等. 气动噪声相似关系及在风洞试验中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1466-1470.  
WANG Yigang, WEI Wei, YANG Yang, et al. Aerodynamic noise similar relationship and its application to wind tunnel test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9): 1466-1470.
- [7] ZHU Chunli, 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.
- [8] ZHANG Yadong, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(4): 561-575.
- [9] 金海, 何连华, 杨立国. 地铁列车气动噪声数值模拟研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(9): 67-72.  
JIN Hai, HE Lianhua, YANG Ligu. Numerical simulation investigation on aero acoustics of subway train[J]. Building Science, 2014, 30(9): 67-72.
- [10] 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, 37(6): 10-18.  
ZHANG Jun, GUO Tao, SUN Bangcheng, et al. Research on characteristics of aerodynamic noise source for high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(6): 10-18.
- [11] 杨晓宇, 高阳, 程亚军, 等. 高速列车气动噪声 Lighthill 声类比的有限元分析[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4): 80-84.  
YANG Xiaoyu, GAO Yang, CHENG Yajun, et al. Finite elements analysis of high-speed train wind noise in Lighthill's acoustic analogy[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(4): 80-84.
- [12] 杜芳慧. 地铁列车气动特性的数值模拟研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.  
DU Fanghui. Numerical simulation study on the aerodynamic characteristics of subway train[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [13] 周立, 张书慧. 地铁列车车头外流场的数值仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(3): 34-37.  
ZHOU Li, ZHANG Shuhui. Numerical simulation and analysis of air flow distribution around metro train head[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(3): 34-37.
- [14] 周立. 流线型地铁列车车头设计及其气动性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
ZHOU Li. Streamlined design and numerical calculation of aerodynamic characteristics of metro train head[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.