

基于数值仿真的智轨电车送风道流场均匀性研究

李俊义^{1,2}, 刘彪^{1,2}, 张江宏^{1,2}, 李京^{1,2}, 周承明^{1,2}

(1. 湖南中车智行科技有限公司, 长沙 410006;

2. 湖南省多铰接胶轮运输系统工程技术研究中心, 长沙 410006)

摘 要:良好的送风道设计对提升智轨电车客室热舒适性具有重要作用。本文以某型智轨电车的送风道及出风格栅为研究对象,建立三维流动仿真模型,采用计算流体动力学方法对送风道内部流场特性及出风口速度分布进行数值模拟。针对原设计出口风速均匀性不足的问题,结合流场分析结果,提出在送风道内部联通气流通道的并增设导流板的优化方案。仿真结果表明,优化后各出风口流速分布显著改善,不均匀性指数降至 0.43,送风均匀性有效提升。仿真结果与试验数据对比验证了数值模型的准确性与可靠性,表明数值仿真技术对车辆送风道设计与优化具有良好的指导价值。

关键词:智轨电车; 送风道; 数值仿真; 流场均匀性; 风道优化

中图分类号:U463.85⁺1

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.01.008

Research on the Flow Field Uniformity in the Air Supply Duct of Autonomous Rail Rapid Transit Based on Numerical Simulation

LI Junyi^{1,2}, LIU Biao^{1,2}, ZHANG Jianghong^{1,2}, LI Jing^{1,2}, ZHOU Chengming^{1,2}

(1. Hunan CRRC Intelligent Transport Technology Co., Ltd., Changsha 410006, China; 2. Hunan Engineering Technology Research Center for Multi-Articulated Rubber Wheel Transportation Systems, Changsha 410006, China)

Abstract:Effective air supply duct design plays a crucial role in improving thermal comfort within the passenger compartment of autonomous rail rapid transit (ART) vehicles. This paper takes the air supply duct and outlet grille of a specific ART vehicle as the research object. It establishes a three-dimensional flow simulation model and uses computational fluid dynamics (CFD) to analyze the internal flow field characteristics and the outlet velocity distribution. To address the insufficient airflow uniformity in the original design, flow field analysis informs an optimized solution. This solution interconnects the internal air passages and integrates guide vanes inside the duct. Simulation results show that the optimized design significantly improves the velocity distribution across all outlets. The non-uniformity index drops to 0.43, which effectively enhances the supply air uniformity. A comparison between the simulation results and experimental data verifies the accuracy and reliability of the numerical model, which demonstrates that numerical simulation technology holds good guiding value for designing and optimizing vehicle air supply ducts.

Key words:autonomous rail rapid transit; supply air duct; numerical simulation; flow field uniformity; air duct optimization

智轨电车作为一种新兴的智能化公共交通工具,兼具城市客车的灵活性及轨道车辆的大运量,具有建设成本低、周期短、环保等优势,应用前景广阔。目前智轨电车已在四川宜宾、江苏苏州、陕西西安、湖南株洲等地载客运营,并出口至阿联酋阿布扎比和马来西亚古晋^[1-2]。

在车辆空调系统中,城市客车由于空间限制,通常采用侧顶隐藏式风道^[3-4];而轨道车辆为了保证超长距离送风的稳定性及全车厢风速和温度的均匀性,通常采用静压风道^[5-6]。智轨电车在设计时综合考虑了整车尺寸和乘客舒适度,故采用静压风道。

客室内乘客的舒适度不仅取决于空调制冷量,还

收稿日期:2025-06-12。

第一作者:李俊义(1991—),男,硕士,工程师,主要从事轨道车辆暖通设计工作。E-mail:lijy20189876@csrzc.com。

与送风道及出风格栅的设计密切相关。尽管已有文献对送风道设计进行过分析,但未将送风道与出风格栅一并研究^[7-10],而格栅出风口的大小和布置方式会直接影响气流的走向和风速。为此,本文首先建立现有智轨电车送风道及出风格栅的三维流场仿真模型,并利用实车试验数据验证模型可靠性。随后,利用三维仿真手段对几何模型进行优化设计。该方法不仅节约设计成本,还可提升送风系统性能。

1 送风道及出风格栅物理模型

本文研究对象为智轨电车一节车厢的顶部送风道及出风格栅。送风道的整体尺寸(长×宽×高)为6.2 m×1.4 m×0.1 m。送风道入口对称分布于送风道左侧,尺寸为1.5 m×0.16 m。送风道的几何示意图见图1。

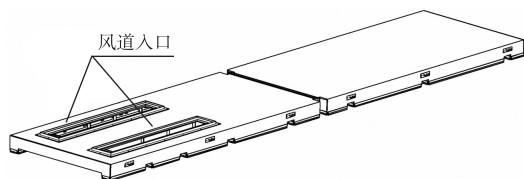


图1 送风道几何示意图

送风道内部有两块分风板,具体位置如图2所示。入口处的分风板主要用于限制前排出口的流量,而送风道内的孔状分风板主要用于调节后段出口的流量。送风道出风格栅示意图见图3。

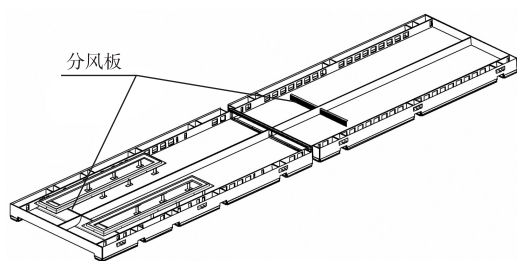


图2 送风道分风板示意图

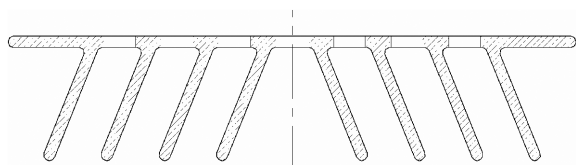


图3 送风道出风格栅示意图

2 送风道及出风格栅有限元模型

2.1 网格划分

表面网格的划分主要影响几何特征的精细程度

和整体的计算量和计算时长。一般而言,网格尺寸越小,仿真精度越高,但计算量也越大。为在精度与效率之间取得平衡,本文采用局部网格加密策略:在小尺寸几何位置(如出风格栅口、送风道内网孔状的分风板、送风道通风开口等)进行了小网格的划分,面网格的最小单元尺寸约为4 mm;随后,以1.2的增长比例向送风道主体区域逐步扩大,生成尺寸较大的网格。该策略在保证仿真精度的前提下,有效控制了网格数量。送风道面网格示意图见图4。

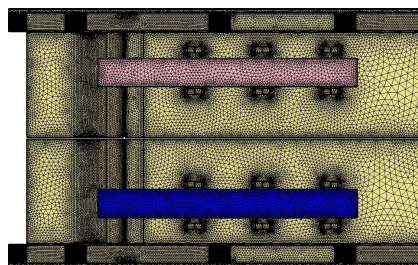


图4 送风道面网格示意图

体网格的划分对象为送风道及出风格栅所在的整个区域。体网格划分采用了带有附面层的 trimmer 网格,即在贴近表面的位置拉伸出附面层网格,以保证仿真精度;在附面层网格之外进行网格拉伸填充,以提高仿真效率。具体尺寸如下:在送风道及出风格栅壁面拉伸4层总厚度为3 mm的附面层网格;拉伸的体网格平均网格尺寸为16 mm,最大网格尺寸为64 mm。此外,还对出风格栅附近的局部体网格进行了加密,尺寸为4~8 mm。送风道内及出风格栅口附近的网格切面如图5所示。

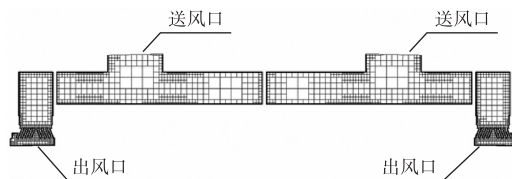


图5 送风道截面网格示意图

2.2 数值模拟方法

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)本质上是求解流体的质量守恒、动量守恒方程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) = \nabla \cdot \sigma + f_b \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; V 为速度; σ 为柯西应力张量; f_b 为动量源项。

本文研究送风道流场的均匀性,其本质是求解送风道内部的速度场,即求解上述方程(1)、(2)及相应的湍流模型。

数值模拟在商用软件 STAR-CCM+中进行。具体设置如下:求解器选用基于压力的求解器,并假定流动为定常、工质密度恒定;湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型;空间离散格式采用二阶迎风格式。

对于送风道内的流动,上述计算方法在计算速度和收敛性上,比基于密度的算法更具优势。

2.3 边界条件

送风道仿真中有 2 个送风口和 2 个出风口(见图 5)。其中,送风口采用流量边界条件,总流量为 $5\,400\text{ m}^3/\text{h}^{[7]}$,出风口采用压力边界条件,出口压力为 1 个标准大气压。

3 结果对比分析及优化设计

3.1 送风道三维仿真结果及分析

从送风道内的迹线图(见图 6)可以看出空气在送风道内的流动分布情况。空气从进口垂直段流入送风道后逐渐散开,吹到送风道下表面后向四周运动。由于送风道入口前端存在分风板,气流在其作用下被分成两部分:少部分气流流向送风道前端的出口;大部分气流则继续向后运动。向后流动的这部分空气,一部分从中段的出口流出,另一部分在经过孔状分风板后,继续分散从其他出口流出。

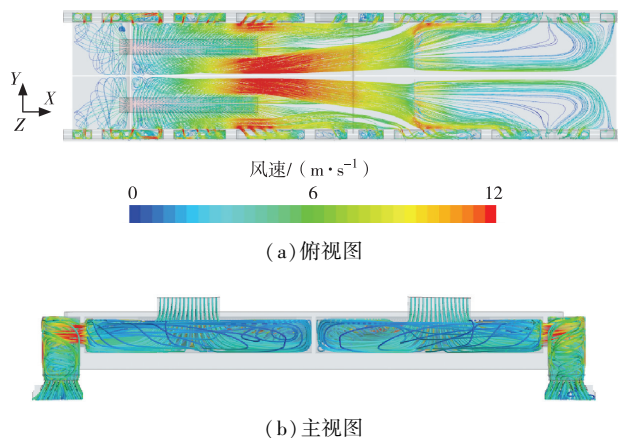


图 6 送风道内流动迹线

送风道出口向出风格栅口的流动迹线如图 7 所示。由于送风道结构限制,出风格栅口附近存在一定的漩涡。

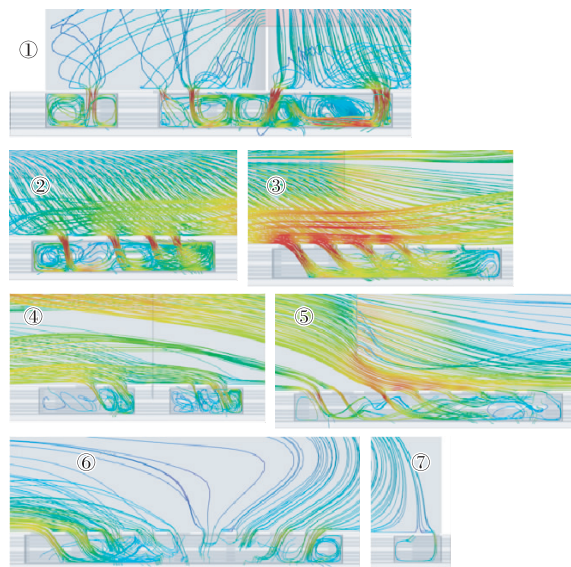


图 7 出风格栅口附近流动迹线

3.2 送风道出口风速与试验对比

为验证仿真方法与结果的准确性,将各出风口的仿真平均风速与试验结果进行对比。其中,仿真平均风速由各出口风量除以其面积计算得到;试验风速则使用手持风速仪,在每个出风格栅的左、中、右三个位置(见图 8)进行风速测量。由于实际空调送风存在波动,各测点的瞬时风速会在约 15% 的范围内变化,而仿真为稳态计算,风速恒定。因此,为进行有效对标,将同一时段内各格栅三个测点风速的平均值,作为该格栅的出风口平均风速(即试验值)。最终,将每个出口的试验平均风速与对应的仿真平均风速进行对比分析。

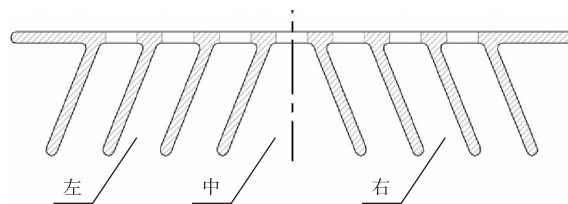


图 8 测速点示意图

试验与仿真结果的对比见表 1。分析如下:

1) 平均风速对比:除 9 号出口外,其余各格栅出风的试验值与仿真值的偏差均小于 20%。设定 20% 为偏差值的依据主要有两点:①手持风速仪的测量误差约为 $\pm 5\%$;②设计车型的空调额定风量存在 $\pm 10\%$ 以内的允差。因此,本文以 $\pm 20\%$ 作为判定仿真与试验是否吻合的指标。表 1 数据显示,绝大多数出风口的偏差在此范围内,表明二者吻合良好。

2) 速度分布规律对比:各出风格栅左、中、右三

个位置的实测风速分布,与仿真云图(见图 9)揭示的格栅出风口内、外侧速度变化规律基本一致。

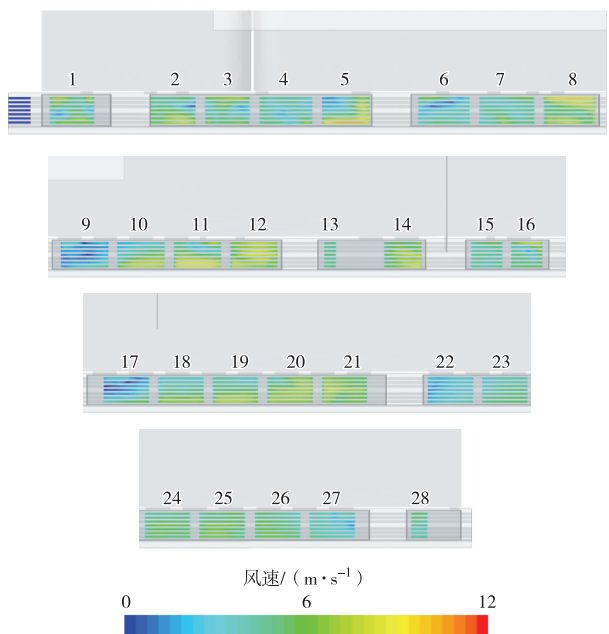


图 9 仿真获得的各个出风口的风速分布

综上所述,仿真结果与试验结果具有较好的一致性。

表 1 试验与仿真结果对比

编号	测点风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			试验平均 风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真 风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	一致性	偏差/ %
	左	中	右				
1	4.6	2.0	5.5	4.03	4.82	好	17.30
2	6.1	5.5	4.8	5.47	5.66	好	3.39
3	5.1	3.6	4.0	4.23	4.64	好	8.75
4	3.5	2.1	5.5	3.68	4.35	好	15.30
5	7.0	4.0	3.0	4.67	5.27	好	11.52
6	2.7	1.6	4.2	2.83	2.42	好	-16.92
7	3.5	3.5	3.8	3.60	3.73	好	3.56
8	5.6	3.8	5.2	4.85	6.06	好	19.94
9	4.3	2.8	3.2	3.43	0.87	差	-295.29
10	4.6	3.7	3.9	4.07	3.98	好	-2.07
11	6.5	4.5	4.9	5.30	5.14	好	-3.05
12	6.0	5.8	5.5	5.77	6.07	好	5.05
13	4.7	4.4	4.2	4.43	4.72	好	6.02
14	6.5	4.8	5.3	5.53	6.00	好	7.79
15	3.8	2.9	3.6	3.44	4.22	好	18.57
16	3.9	3.6	3.3	3.60	4.47	好	19.43

表 1(续)

编号	测点风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			试验平均 风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真 风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	一致性	偏差/ %
	左	中	右				
17	2.7	2.5	1.5	2.23	2.05	好	-8.82
18	4.2	4.0	3.5	3.90	4.28	好	8.93
19	4.6	3.9	3.3	3.94	4.86	好	18.81
20	5.6	5.0	4.7	5.05	5.98	好	15.56
21	5.2	4.8	4.5	4.83	5.95	好	18.76
22	3.0	2.5	2.5	2.67	2.81	好	5.00
23	4.1	3.5	3.2	3.57	4.34	好	17.65
24	5.0	4.5	3.9	4.44	5.22	好	15.03
25	5.3	5.2	3.7	4.73	5.38	好	12.16
26	4.9	4.7	3.9	4.50	4.97	好	9.49
27	4.0	4.0	3.9	3.94	3.32	好	-18.67
28	4.0	3.5	3.4	3.64	4.49	好	18.92

3.3 送风道出风均匀性评价

为评估送风道出风的均匀性,本文定义了不均匀性指数 σ 。该指数为各出风口平均风速的最大值与最小值之差,与所有出风口平均风速的总平均值的比值。当 $\sigma<0.5$ 时,可认为风场分布较为均匀。 σ 的计算公式见式(3)。

$$\sigma=(V_{\text{avgmax}}-V_{\text{avgmin}})/V_{\text{avg}} \quad (3)$$

式中: V_{avgmax} 为各格栅出风口平均风速的最大值; V_{avgmin} 为各格栅出风口平均风速的最小值; V_{avg} 为所有格栅出风口的总平均风速。

经计算,28 个出风口的 σ 值为 1.29,表明当前送风道的出风均匀性有待提升。其中,6 号口风速略低,9 号口风速明显偏低,而 8 号口和 12 号口风速则略高。

3.4 送风道优化方案及结果

为提升送风道出口风速的均匀性,需提高 6 号、9 号口的风速,并降低 8 号、12 号口的风速。常见的送风道优化方法包括:①调节局部流通阻力,通过改变(扩大或缩小)特定支路的流通面积,以调节流向各出口的流量分配;②优化气流导向,通过增设导流板或调整通道结构,引导气流更多地流向目标区域。

从风道几何结构(见图 10(a))和风道内流动迹线(见图 11(a))可以看出,9 号口风速偏低的主要原因是其后部管道更空旷、压力相对较低,导致更多气流向后运动,分配给 9 号口的气流减少。为此,实施

如下优化:①连通出风格栅上通道(见图 10(b)中位置 4),将 8 号口的部分过剩气流引导至 9 号口;②增设导流板(见图 10(b)中位置 3),直接改变局部流场,将更多气流导入 9 号口。

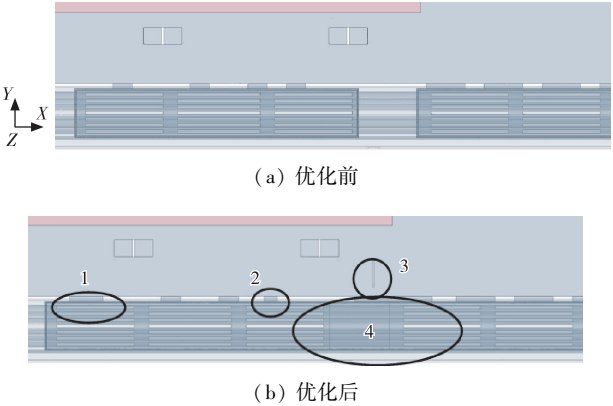


图 10 优化前后送风道几何结构

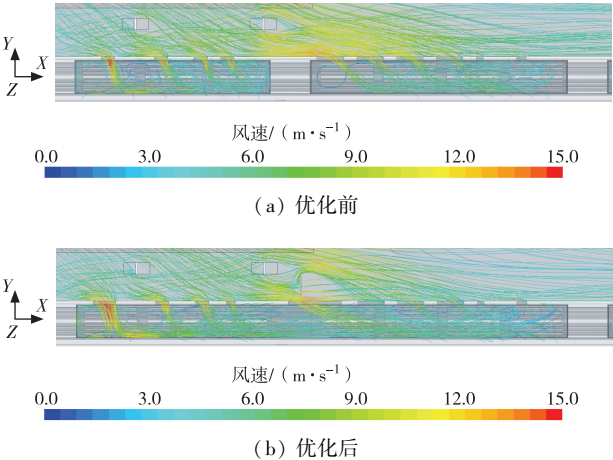


图 11 优化前后送风道内流动迹线

为平衡 6 号口和 8 号口的风速,对送风道与出风格栅衔接处(见图 10(b)中位置 1、2)的流通面积进行了调整。具体而言,扩大位置 1 的流通面积,降低了该支路的流动阻力,从而引导更多气流流向 6 号口;相应地,减小位置 2 的流通面积,则增大了其流动阻力,减少了流向对应出口的气流。

上述结构优化有效改善了各出风口之间的风速均匀性,同时也使单个出风格栅自身的速度分布更为均匀。优化前后的风速分布对比如图 12 所示,具体数值及均匀性统计见表 2 和表 3。

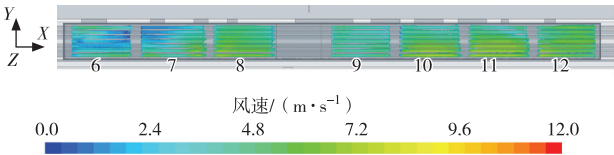
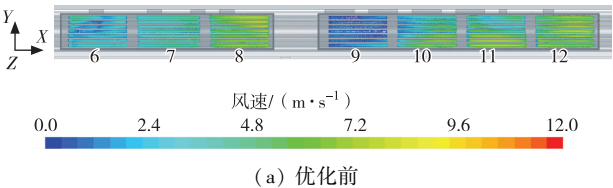


图 12 优化前后出风口风速分布

表 2 优化前后送风道出风口风速						m/s
出风口 编号	优化前 平均风速	优化后 平均风速	出风口 编号	优化前 平均风速	优化后 平均风速	
1	4.82	4.47	15	4.22	3.68	
2	5.66	4.73	16	4.47	4.06	
3	4.64	4.24	17	2.05	3.70	
4	4.35	3.92	18	4.28	4.79	
5	5.27	5.07	19	4.86	4.93	
6	2.42	3.76	20	5.98	5.41	
7	3.73	3.84	21	5.95	5.34	
8	6.06	5.5	22	2.81	3.68	
9	0.87	3.62	23	4.34	4.12	
10	3.98	4.15	24	5.22	4.89	
11	5.14	4.76	25	5.38	5.02	
12	6.07	5.54	26	4.97	4.66	
13	4.72	3.90	27	3.32	3.75	
14	6.00	5.18	28	4.49	4.09	

表 3 优化前后送风道出风均匀性				
项目	V_{avgmax}	V_{avgmin}	V_{avg}	σ
优化前	6.07	0.87	4.04	1.29
优化后	5.54	3.62	4.45	0.43

从表 2 和表 3 可知,优化后出风口风速的均匀性得到明显提升,均匀性指数 σ 由优化前的 1.29 显著降至 0.43,表明出风口风速的均匀性得到了明显提升。

4 结 论

本文对智轨电车送风道内的流动进行了三维数值仿真研究,主要结论如下:

- 1) 三维数值仿真可直观呈现智轨电车送风道内部及出风格栅出口附近的流动情况,为送风道的优化设计提供直观、可靠的依据。
- 2) 仿真结果与试验结果的对比验证表明,该仿

真方法具有较高的可靠性,各出口平均风速的偏差小于20%,二者分布规律基本一致。

3) 基于仿真分析,提出了针对性的结构优化方案(如局部阻流与导流)。方案实施后,送风道的均匀指数由1.29显著降至0.43,有效提升了送风均匀性及客室舒适度。

参考文献:

- [1] 钟凌生,张陈林,刘彪,等. 人机工程在多编组铰接电车驾驶室设计中的应用[J]. 客车技术与研究,2023,45(5):39-43.
 - [2] 冯江华,肖磊,胡云卿. 智能轨道快运系统[J]. 控制与信息技术,2020(1):1-12.
 - [3] 郭凡,刘芳忠,刘永福. 客车空调风道及导流板设计对气流的影响研究[J]. 客车技术与研究,2022,44(2):41-43.
 - [4] 刘灿,王硕祺. 城市客车常用风道结构分析[J]. 安徽科技,2019(1):49-50.
 - [5] 袁博,张杰,张永利. 地铁车辆风道系统 CFD 数值模拟优化与试验验证[J]. 电力机车与城轨车辆,2017,40(5):10-13.
 - [6] 龚惠华,王正,聂文斌,等. 有轨电车空调送风均匀性研究及优化[J]. 铁道机车与动车,2024(4):29-34.
 - [7] 李俊义,刘彪,李京,等. 智轨电车客室空调机组制冷量的计算及验证[J]. 技术与市场,2024,31(8):62-67.
 - [8] 刘洋,易柯,李颖明. 地铁车辆风道系统出风均匀性设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2011,34(1):48-50.
 - [9] 宁宝焕,于海飞,屠小娥,等. 地铁列车风道送风均匀性优化研究[J]. 制冷技术,2024,44(2):75-80.
 - [10] 袁心怡,卞世敏,邵峥达,等. 某地铁车辆空调送风道出风性能仿真优化及分析[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(8):140-144.
-
- (上接第21页)
- [6] DEO N, RANGESH A, TRIVEDI M M. How would surround vehicles move? A unified framework for maneuver classification and motion prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2018,3(2):129-140.
 - [7] 侯钧杰,邵双运,郭学谦,等. 小波函数在内源光信号去噪中的应用[J]. 中国医疗设备,2020,35(2):81-85.
 - [8] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation,1997,9(8):1735-1780.
 - [9] 陈磊. 基于深度学习的压载系统实时调载策略研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
 - [10] 乔阳. 基于元胞自动机的公交车进站换道行为研究[D]. 西安:长安大学,2018.