

地铁列车客室气流组织特性研究

于海飞¹ 韩崇益¹ 屠小娥¹ 张行健² 臧建彬²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 200092, 上海)

摘要 [目的] 地铁空调系统的送风舒适性是衡量其性能的重要指标。为确保乘客乘坐的舒适性, 需将客室内温度、风速控制在合理区间, 因此, 有必要对地铁车厢内的气流组织进行深入研究。[方法] 针对某地铁列车的 Tc 车(带司机室的拖车)客室, 综合分析其车辆参数及运用环境, 对风道结构实施优化。在此基础上, 构建几何模型并进行网格划分。采用计算流体力学方法, 结合 HyperMesh 和 STAR-CCM+ 等 CFD(计算流体动力学)仿真软件, 模拟计算空载与满载两种工况, 分析各工况下客室气流组织与温度特性, 并通过试验测试进行验证对比。[结果及结论] 各工况下车厢内主体流速均保持在 0.5 m/s 以下, 避免了对乘客产生显著吹风感, 但仍存在气流短路与对冲现象。空载状态下, 客室内气流组织与温度分布均匀性均表现良好; 满载时, 温度分布均匀性有所下降。优化后的风道结构展现出良好的送风效果。

关键词 地铁列车; 气流组织; 温度分布; 多工况

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.027

Airflow Organization Characteristics of Metro Train Passenger Compartment

YU Haifei¹, HAN Chongyi¹, TU Xiaoe¹, ZHANG Xingjian², ZANG Jianbin²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The comfort of airflow delivery in metro air-conditioning systems is a critical indicator for the performance measurement. To ensure passenger comfort, it is necessary to maintain the indoor temperature and air velocity within a reasonable range in the passenger compartments. Therefore, an in-depth study of the airflow organization inside metro train compartments is essential. [Method] Focusing on the passenger compartment of a Tc car (trailer car with driver's cabin) in a specific metro train, a comprehensive analysis of vehicle parameters and operating environment is conducted, followed by optimization of the air duct structure. On this basis, a geometric model is constructed and meshed. Using computational fluid dynamics (CFD) methods and simulation tools

such as HyperMesh and STAR-CCM+, the airflow organization and temperature characteristics in the compartment are simulated under both no-load and full-load conditions. Experimental tests are carried out to validate and compare the simulation results. [Result & Conclusion] Under all operating conditions, the main airflow velocity within the compartment remains below 0.5 m/s, avoiding significant draft discomfort for passengers. However, issues of airflow short-circuiting and counterflow are still observed. In un-load condition, the compartment exhibits good uniformity in airflow organization and temperature distribution, while in full-load condition, the temperature distribution uniformity declines. The optimized air duct structure demonstrates excellent airflow delivery performance.

Key words metro train; airflow organization; temperature distribution; multiple working conditions

0 引言

铁路车辆空调技术的长期演进为地铁列车空调系统提供了有益借鉴, 但鉴于地铁列车特有的使用条件, 其空调系统还需考虑以下特性^[1]:

1) 鉴于乘客乘车时间相对短暂, 对空调系统的舒适性和稳定性提出了更高要求;

2) 车内人员密集、流动性大且站间距短, 导致车门开关频率显著增加;

3) 运行范围主要局限于单个城市内部, 且多处于地下隧道环境中运行, 外部环境条件变化较小。

为不断提升地铁空调技术水平, 近年来众多研究人员在地铁客室气流组织优化方面开展了大量工作。文献[2]对比分析了送风格栅、中顶孔板与侧送风口两种送风模式对车辆客室热舒适性的影响, 结果显示: 在客室高度 1.7 m 处, 中顶孔板与侧送风口组合送风方式在整体热舒适感上表现更佳; 而在 1.1 m 处, 格栅送风方式则能提供更好的热舒适性。文献[3]针对某地铁项目设计了空调通风系统, 并模拟了客室内流场, 得出了空载与满载状态

下坐姿、站姿乘客头部区域的风速场和温度场分布,通过实车测试进一步验证了空调通风系统的运行性能。文献[4]选取地铁中部车厢为研究对象,采用数值模拟方法对比分析了空载车厢、贯通道及送风道的流场,发现于进风口两侧增设穿孔板能有效改善送风均匀性问题。文献[5]利用 CFD(计算流体动力学)数值模拟技术,分别探究了在送风温度为 20°C 时,无风机与有风机作用下地铁 B 型列车客室的气流组织,发现轴流风机的应用能显著降低客室内温度的不均匀性。此外,众多学者还针对地铁空调的运行特性,对车厢内的速度场和温度场进行了深入的数值模拟分析与试验验证,为地铁空调列车通风系统的优化设计提供了坚实的理论依据与参考^[6-10]。

1 研究对象和模拟过程

1.1 研究对象

本次研究对象聚焦于速度为 80 km/h 的 B 型列车整车气流组织的仿真分析与评价。Tc 车(带司机室的拖车)在研究中被特别关注。针对客室侧上方侧顶板缝隙回风的布局方案,以及经过结构优化的风道设计,完成了空载与满载两种工况下的模拟计算,获取了车内的温度场与速度场数据。依据 EN 14750-1:2006《市区和市郊轨道车辆空调设备舒适性参数》及 CJ/T 354—2010《城市轨道交通车辆空调、采暖及通风装置技术条件》对客室环境的具体要求,对各工况下的模拟结果进行了综合对比与评估。此外,还进行了实车测试,并将测试结果与模拟数据进行了比对分析。

Tc 车每节车厢配备 2 个空调机组,这些机组将处理过的回风与新风混合后,经由静压腔下方的格栅送入客室。客室内的空气则通过侧上方侧顶板的缝隙进行回排,部分空气被送回空调机组,部分则排出列车外,从而完成 1 个完整的气流循环过程,具体如图 1 所示。车厢的总送风量设定为 $8\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

1.2 风道设计

基于仿真计算的优化建议,对实体风道进行了结构上的调整。优化后的方案如图 2 所示,风道左侧增设了 10 块挡板,右侧则增设了 12 块挡板,同时入口导流板的位置也进行了相应的调整。

1.3 模拟方法

1.3.1 模型建立和网格划分

由于实际车体内部结构繁复,为便于分析,需

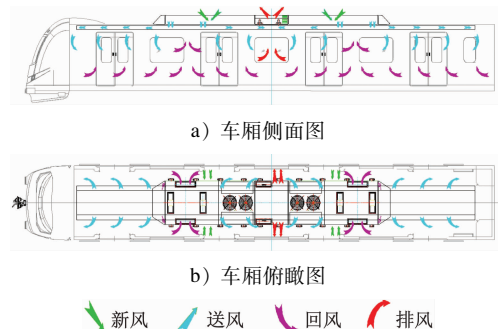


图 1 车厢内气流组织

Fig. 1 Airflow organization in compartment

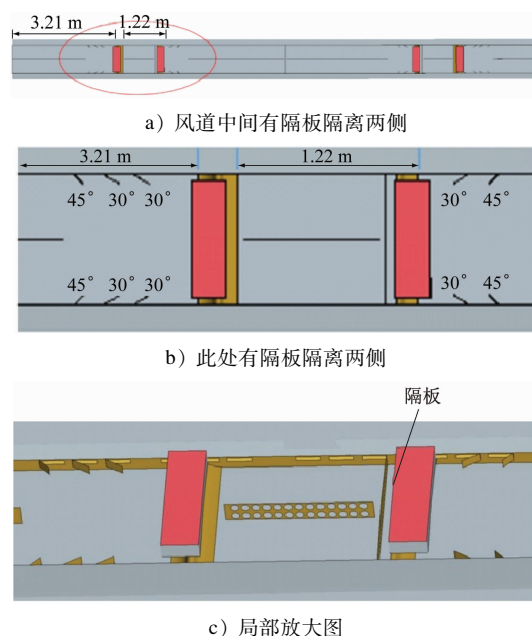


图 2 Tc 车风道优化方案示意图

Fig. 2 Diagram of Tc car air duct optimization plan

对模型实施必要的简化处理,略去部分对气流及温度影响甚微的结构细节,而重点保留对两者有显著影响的主要结构特征。车体的计算模型主要还原了围护结构、座椅、送风格栅及回风缝隙等关键部件。

计算模型采用多面体网格进行划分,全局网格尺度设定为 50.0 mm ,并针对送回风口、热源等关键位置进行了局部加密处理,最小网格尺度达到 2.5 mm 。通过多轮计算验证,确保了网格的独立性,最终网格总量约为 1 497 万个。

1.3.2 边界条件设置

模拟过程中,主要边界条件设定如下:

1) 入口边界:客室模拟的入口边界设定为速度入口,采用空气与水蒸气双组分输运模型,速度值依据风道模拟结果进行合理分配。客室内设两台

风机,单台风机风量为 $4\,000\text{ m}^3/\text{h}$,送风气流含湿量为 11.4 g/kg ,送风温度统一为 $17.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 出口边界:客室侧上方侧顶板设为压力出口,压力值设为 0 Pa ,进出口湍流度均取固定值 0.01 ,湍流黏度比亦取固定值 10.00 。

3) 热源边界:将发热设备、围护结构及乘客视为热源壁面,4种工况下各热源发热量具体分配如下:太阳辐射热流量 $4\,500.0\text{ W}$,作用于单侧车窗;车体传热热流量 $3\,724.8\text{ W}$,作用于车厢两侧外壁;照明及设备热流量 $1\,000.0\text{ W}$,作用于车厢顶部。对于满载工况,单节车厢增设246个乘客模型,人员密度分别为座椅区 6 人/张 ,站立区 6 人/m^2 ,即共36人坐下,其余210人站立,乘客显热量 64 W/人 ,散湿量 $76\text{ g/(h}\cdot\text{人)}$ 。

1.3.3 数值计算模型及收敛判断

本研究采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算。模拟计算的收敛判定依据包括:①连续性方程、动量方程、湍流动能方程及耗散率方程残差小于 10^{-3} ,能量方程残差满足特定要求;②计算区域满足质量守恒与能量守恒原则;③流场与温度场的计算结果需符合EN 14750-1:2006及CJ/T 354—2010的相关标准。

2 模拟结果剖析

为深入探究车厢内气流组织与温度分布情况,特在高度方向上设置了多个观测面,分别为距地面 0.1 m (记为High-1)、 1.1 m (记为High-2)、 1.7 m (记为High-3)的观测面。通过分析这些观测面的气流速度矢量图与温度云图,可全面评估空调送风的均匀性。

2.1 速度场结果

Tc车空载与满载状态下的高度方向气流速度矢量图如图3所示,矢量场范围均为 $0\sim 1\text{ m/s}$ 。

由图3可知:空载状态下,两种工况的观测面流场均大致呈现出沿车厢中心线左右对称的分布特征,尤其在High-3高度观测面上表现更为显著。风速沿列车长度方向分布均匀,无明显增减趋势,且各截面风速均处于较低水平。气流在座椅及其他障碍物处会形成大小不一的涡流,涡流区域速度梯度较大,流速明显高于或低于周边区域。此外,格栅向客室侧墙的送风存在明显短路现象,即气流直接从送风口流向回风缝隙,送风可及性欠佳。满载状态下,相较于空载工况,车内流场展现出以下新

特点:各截面平均流速较空载时有所下降,尽管局部区域增加的乘客模型会减小通风面积,从而在一定程度上增大大局部流速,导致中心线附近流速较高,但乘客的增加也导致气流聚集,使得平面整体流速降低。此外,满载工况下车内形成了数量更多、尺寸更小的涡流,但风速基本保持在 0.9 m/s 以下,各截面流速均处于较低水平。

总体而言,不同高度平面的流速均处于较低水平,不会引发明显的吹风感,基本满足轨道车辆空调设备舒适性的相关要求。

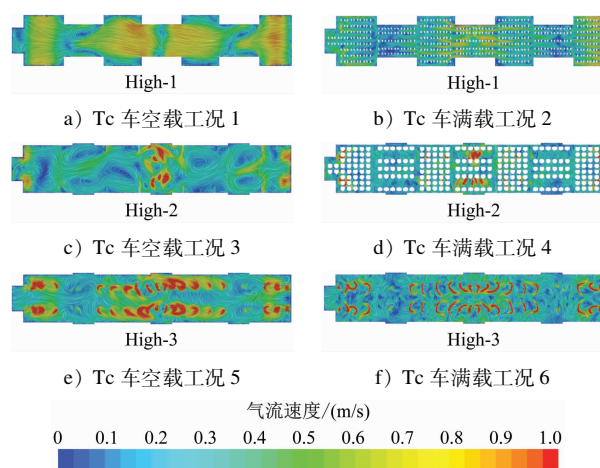


图3 客室高度方向气流速度矢量图

Fig. 3 Airflow velocity vector diagram in passenger compartment height direction

2.2 温度场结果

Tc车空载与满载状态下的高度方向温度分布云图如图4所示。图4表明:车厢内部大部分区域的温度分布相对均匀,主要集中于 $18\text{ }^\circ\text{C}\sim 21\text{ }^\circ\text{C}$ 范

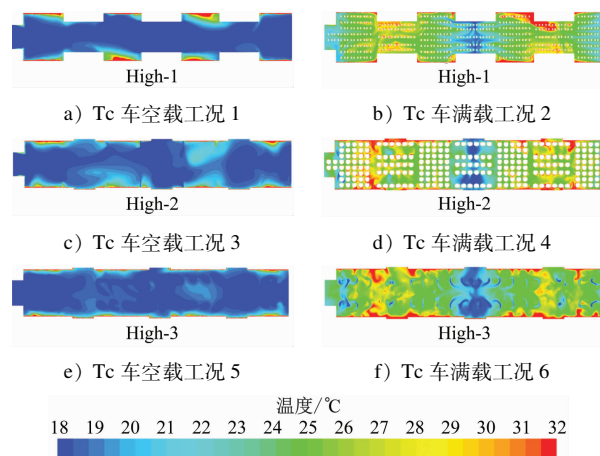


图4 客室高度方向温度云图

Fig. 4 Temperature nephogram in passenger compartment height direction

围内,且在高度方向上未观察到显著的分层现象。侧壁面、顶面及单侧窗户因承担围护结构的传热负荷及辐射热负荷,致使邻近壁面区域的温度梯度显著增大。

在满载工况下,温度分布的对称性有所提升,而均匀性则有所降低。由于乘客作为热源且分布密集,导致人体周边热量积聚而无法被空气有效驱散,进而形成多处局部高温区域;气流的汇聚进一步加剧了温度分布的不均匀程度,使得车厢中心线周边区域的温度显著低于其他区域。尽管满载状态下客室温度相较于空载工况有所上升,但仍能满足热舒适要求,且各观测面的平均气温差异甚微。

根据 EN 14750-1:2006 标准的规定,乘客停留区域的风速需在地板上方 1.2 m(座位区)及 1.7 m(站立区)处进行测量,要求气流速度不低于 0.07 m/s 且最大不超过 0.90 m/s。参照表 1 数据,同一水平面上各测量点的风速均未超过 0.9 m/s 的限值。

遵循 CJ/T 354—2010 标准,客室内同一水平面或铅垂面上的温度差异应不大于 4 K。由表 1 可知:同一水平面上各测量点的最大温差仅为 2.5℃,符合该标准对温度均匀性的要求。

表 1 Tc 车测点参数

Tab. 1 Measuring point parameters of Tc car

测点距离/mm	距地面高度/m	温度/℃	速度/(m/s)
2 197	1.1	20.5	0.12
		18.4	0.36
		18.4	0.41
		22.2	0.28
		17.9	0.38
		19.3	0.33
		20.5	0.14
1 197	0.1	18.1	0.30
		19.4	0.51
		18.1	0.23
		17.7	0.60
2 797	1.7	18.1	0.23
		18.4	0.20
		18.3	0.24
		18.2	0.22

3 试验结果分析

为与仿真分析结果进行对比,本研究选取真实

车辆进行了气流组织特性试验。在进行温度及风速均匀性测试前,确保车辆的隔热性能达到设计要求,且安装的采暖通风与空气调节系统满足通风量标准,空调机组已调整至额定工况。测量参数及其对应仪器详列于表 2。

表 2 为测量参数及所用仪器的具体信息,包括温湿度自记仪(型号 175H1)用于温度测量,以及风速仪(型号 Testo405i)用于风速测量,两者均提供了测量范围、分辨率及精度等关键参数。

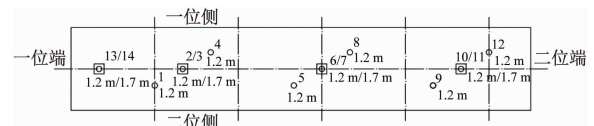
表 2 测量参数和测量仪器

Tab. 2 Measuring parameters and measuring instruments

测量参数	仪器名	型号	测量范围和精度
温度	温湿度自记仪	175H1	测量范围为 -20℃~55℃, 分辨率为 0.1℃, 精度为 ±0.4℃
风速	风速仪	Testo405i	测量范围为 0~10 m/s, 分辨率为 0.01 m/s, 精度为 ±(0.3 m/s+5%测量值)

3.1 客室测点布置

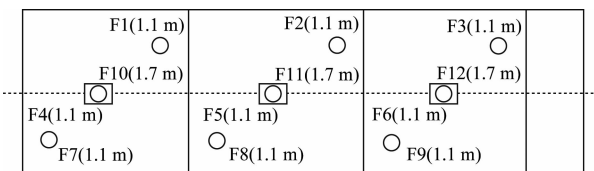
客室内共设置了 14 个温度测量点,其中 3、7、11、14 号点位于 1.7 m 高度,其余点位于 1.2 m 高度,布局如图 5 所示;同时布置了 12 个风速测量点,布局如图 6 所示。



注:1~14 为温度测量点。

图 5 车内温度测量点布置图

Fig. 5 Layout diagram of temperature measuring points inside the vehicle



注:F1~F12 为风速测量点。

图 6 车内风速测量点布置图

Fig. 6 Layout diagram of wind velocity measuring points inside the vehicle

3.2 客室温度测试结果

表 3 为 Tc 车客室内各测量点的温度测试结果。由表 3 可知:客室内水平与垂直方向的温度差异均较小,均符合小于 4℃ 的标准要求。具体而言,水平方向最大温差为 1.2℃,垂直方向最大温差为 0.8

℃,所有测量点中的最大温差为 1.8 ℃。因此,Tc 车客室内的温度分布满足 CJ/T 354—2010 的相关规定。

表 3 Tc 车客室各测量点温度测试结果

Tab.3 Temperature test results of each measuring point in Tc car passenger compartments

测点编号	高度/m	温度/℃	测点编号	高度/m	温度/℃
1	1.2	20.0	8	1.2	20.6
2	1.2	19.9	9	1.2	18.8
3	1.7	19.9	10	1.2	19.5
4	1.2	19.9	11	1.7	19.1
5	1.2	20.0	12	1.2	19.6
6	1.2	20.0	13	1.2	19.9
7	1.7	20.0	14	1.7	19.3

3.3 客室风速测试结果

表 4 为 Tc 车客室内各测量点的风速测试结果。由表 4 可知:随着测量点离地面高度的增加,风速呈现明显上升趋势。在 1.1 m 高度处,风速测量值主要集中在 0.2 ~ 0.3 m/s 范围内;而在 1.7 m 高度处,风速测量值则接近 0.4 m/s。尽管测量过程中存在一定的误差,导致部分测量点的实测值与模拟值存在微小差异,但总体上所有测量值均符合规定范围。因此,Tc 车客室内的风速分布情况满足 EN 14750-1:2006 的标准要求。

表 4 Tc 车客室各测量点风速测试结果

Tab.4 Velocity test results of each measuring point in Tc vehicle passenger compartments

测点编号	高度/m	风速/(m/s)	测点编号	高度/m	风速/(m/s)
F1	1.1	0.24	F7	1.1	0.26
F2	1.1	0.27	F8	1.1	0.31
F3	1.1	0.22	F9	1.1	0.24
F4	1.1	0.23	F10	1.7	0.40
F5	1.1	0.28	F11	1.7	0.42
F6	1.1	0.21	F12	1.7	0.42

4 结语

本文采用计算流体力学方法,基于 Tc 车几何模型,针对客室侧顶部缝隙回风方案及其风道结构优化,对 Tc 车满载与空载 2 种工况进行了仿真模拟与试验验证,得出以下结论:

1) 各工况下的气流分布较为均匀,流速普遍维

持在 0.5 m/s 以下。气流特征主要表现为车厢中心线两侧流速高于其他区域,车厢两侧送风气流存在短路现象,并形成多个涡流。涡流的分布受热浮升力影响显著。为改善气流短路问题,可考虑调整送风方式,如采用上送下回等策略。

2) 在空载工况下,温度分布均匀性良好且维持在较低水平,高度范围 1.1 ~ 1.7 m 内的最大温差约为 0.8 ℃。相比之下,满载工况下的温度分布均匀性有所下降。

3) 客室侧顶部缝隙回风方式在空载与满载工况下均能满足送风均匀性的要求。经过风道结构优化后,送风效果得到显著提升。

参考文献

- [1] 明光宇. 地铁列车客室气流组织与空气质量评估数值模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
MING Guangyu. Numerical simulation study on air distribution and air quality assessment in passenger compartment of subway train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [2] 向清河, 康伟, 朱启文, 等. 车辆空调送风方式对车辆客室热舒适性的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 76.
XIANG Qinghe, KANG Wei, ZHU Qiwen, et al. Influence of vehicle air-conditioning ventilation mode on carriage thermal comfort[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12): 76.
- [3] 杨延龙, 刘保生, 王岩. 基于 B 型地铁的空调通风系统设计[J]. 制冷与空调(四川), 2021, 35(2): 225.
YANG Yanlong, LIU Baosheng, WANG Yan. Design of air conditioning system based on type B subway[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2021, 35(2): 225.
- [4] 王东屏, 王斌, 李鹏, 等. 地铁车贯通道内空气流场与温度场的数值模拟[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(5): 7.
WANG Dongping, WANG Bin, LI Peng, et al. Numerical simulation of air-flow field and temperature distributions of subway gangway[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(5): 7.
- [5] 叶晨辉, 陈建云, 臧建彬. 周期性扰动气流对地铁车辆车内流场影响[J]. 发电与空调, 2016, 37(5): 68.
YE Chenhui, CHEN Jianyun, ZANG Jianbin. Impact of periodic disturbance airflow on metro train flow distribution[J]. Power generation and Air Conditioning, 2016, 37(5): 68.
- [6] 燕成飞, 郑学林, 臧建彬. 车辆客室热舒适性及顶部侧送格栅风口设计研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(6): 95.
YAN Chengfei, ZHENG Xuelin, ZANG Jianbin. Study on the thermal comfort of the vehicle passenger compartment and the design of the top side grille[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(6): 95.

(下转第 153 页)

1) 变电所馈线断路器宜选用电子脱扣器,并通过合理设置短延时电流的整定值,通常情况下可以实现短延时保护兼做接地故障保护的功能。

2) 配电箱馈线回路需根据具体情况进行接地故障保护灵敏度的校验。虽然进线电缆的影响因素相对较小,但仍需给予足够重视。断路器额定电流的选择应满足实际需求,不宜过大,并需合理选择脱扣曲线。

3) 在采用带有接地故障保护功能的断路器时,应特别注意上下级保护之间的配合问题。

本文的分析尽量涵盖了地铁配电系统的各类情况,并通过归纳总结典型数据,大致确定了需进行接地故障灵敏度校验的回路范围,从而有效减少了设计计算的工作量。同时,文中还给出了地铁配电系统中断路器作接地故障保护时铜芯电缆的最大允许长度,为同类项目提供了有益的参考。

参考文献

- [1] 任元会. 低压配电系统故障防护和保护电器选择[J]. 建筑电气, 2016, 35(7): 3.
REN Yuanhui. Fault prevention and selection of electrical protective device in low voltage distribution system[J]. Building Electricity, 2016, 35(7): 3.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低压配电设计规范: GB 50054—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of low voltage electrical installations: GB 50054—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑电气与智能化通用规范: GB 55024—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

(上接第 147 页)

- [7] 周新喜, 王宗昌, 陈垒, 等. 基于客流密度的地铁列车空调夏季送风温度控制模型研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 162.
ZHOU Xinxi, WANG Zongchang, CHEN Lei, et al. Temperature control of air supply for metro train air conditioner based on passenger density [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(5): 162.
- [8] TAO Y, YANG M, QIAN B, et al. Numerical and experimental study on ventilation panel models in a subway passenger compartment[J]. Engineering, 2019, 5(2): 329.
- [9] 张建平, 李桐. 地铁列车车厢内不同气流形式下的舒适性[J]. 大连交通大学学报, 2020, 40(1): 39.
ZHANG Jianping, LI Tong. Thermal comfort of subway train com-

partment with different airflow forms[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 40(1): 39.

- [4] 王厚余. 对 IEC 标准低压线路过载保护公式调查的回顾[J]. 建筑电气, 2011, 30(1): 3.
WANG Houyu. Investigation of the reason for low-voltage circuit overload protection formulas in IEC standard[J]. Building Electricity, 2011, 30(1): 3.
- [5] 中国航空规划设计研究总院有限公司组. 工业与民用供配电设计手册[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd. Handbook of industrial and civil power supply and distribution design[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [6] 韩帅. 断路器故障保护允许线路长度的应用简析[J]. 建筑电气, 2020, 39(1): 13.
HAN Shuai. Brief analysis on application of allowable line length in circuit breaker fault protection[J]. Building Electricity, 2020, 39(1): 13.
- [7] 陆辉. TN 系统接地故障保护半径探讨[J]. 建筑电气, 2017, 36(8): 25.
LU Hui. Discussion on earth fault protection radius of TN system [J]. Building Electricity, 2017, 36(8): 25.
- [8] 周龙. 接地故障引起的某地铁站停电事故研究[J]. 工程技术研究, 2019(8): 230.
ZHOU Long. Study on power failure accident of a subway station caused by grounding fault[J]. Engineering and Technological Research, 2019(8): 230.

· 收稿日期:2022-12-16 修回日期:2023-02-09 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-16 Revised:2023-02-09 Published:2025-03-10
· 通信作者:周龙,高级工程师,Zhoulong523@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

- [10] 孙丽花. 南方某市地铁 B 型车客室气流组织分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
SUN Lihua. Analysis of southern city type B vehicle passenger-compartment airflow organization [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

· 收稿日期:2022-12-01 修回日期:2023-02-24 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-01 Revised:2023-02-24 Published:2025-03-10
· 第一作者:于海飞,高级工程师,yuhf628@163.com
通信作者:臧建彬,教授,98798@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license