

## 地铁列车动态通风特性实车测试与数值模拟\*

李 芃<sup>1</sup> 李慧梅<sup>1</sup> 杨华干<sup>1</sup> 徐 峻<sup>2</sup> 吴 妍<sup>1</sup>

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春)

**摘 要** [目的] 地铁列车在隧道运行时的风量变化会影响车厢内的空气品质及车厢内的通风效果, 因此有必要对地铁列车在隧道运行时车厢内的通风特性进行研究。[方法] 通过实车测试, 研究列车运行状态下的新风量、排风量等通风参数的动态变化情况, 分析通风系统的动态性能。基于实车测试数据, 对不同运行速度下的列车通风系统工作状态进行数值模拟, 进一步分析地铁列车运行时的通风特性。[结果及结论] 同节车厢内送风与回风不均匀。各节车厢的送风量、排风量不平衡, 送风量由头车向尾车递减, 回风量由头车向尾车递增。列车提速后, 风道回风量逐渐增加, 新风量逐渐减小。当列车运行速度达到 40 km/h 后, 风道内出现明显的新风反向现象。列车提速时, 新风口表现为较大负压且不断下降, 回风口表现为较小负压且波动较小, 新风口和回风口压力差增大是造成新风反向的原因。

**关键词** 地铁; 列车; 动态通风特性

**中图分类号** U270.38<sup>+3</sup>

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.12.037

## Real-vehicle Testing and Numerical Simulation of Dynamic Ventilation Characteristics of Metro Trains

LI Peng<sup>1</sup>, LI Huimei<sup>1</sup>, YANG Huagan<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, WU Yan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] The airflow variation of metro train operating in tunnels affects the air quality and ventilation efficiency within the compartments. Therefore, it is necessary to study the ventilation characteristics of metro train compartments when operating in tunnels. [Method] Through real-vehicle testing, the dynamic variation of the ventilation parameters such as fresh air volume, exhaust volume in train operation state is studied, and the dynamic performance of the ventilation system is analyzed. Based on the in-situ test data, numerical simulations of the train ventilation system working state at different operating speeds are conducted to further analyze the

ventilation characteristics of metro trains during operation.

[Result & Conclusion] The supply and return air in a same compartment are uneven. The supply and exhaust air volumes of each compartment are unbalanced, with the supply air volume decreasing from the train front to the rear, and the return air volume increasing in the same direction. As the train accelerates, the return air volume in the air duct gradually increases, while the fresh air volume gradually decreases. When the train speed reaches 40 km/h, a significant reverse fresh air phenomenon occurs in the air duct. During train acceleration, the fresh air inlet exhibits a larger and continuously decreasing negative pressure, while the return air inlet exhibits a smaller and less fluctuating negative pressure. The increased pressure difference between the fresh air inlet and the return air inlet is the cause for the fresh air reversion.

**Key words** metro; train; dynamic ventilation characteristics

随着城市地铁的迅速发展和人们生活水平的提高, 乘客对于地铁列车客室内的舒适性和空气品质的要求越来越高。车厢内合理的气流组织是车内环境控制的基础, 国内外学者已对车厢内的气流组织展开了许多数值模拟研究, 研究主要集中在温度场、速度场<sup>[1]</sup>、热舒适性<sup>[2]</sup>和送风均匀性<sup>[3]</sup>等方面, 其模型设计算法均与静态建筑相同。然而, 地铁在隧道内运行时, 隧道内急剧变化的压力波会对列车表面压力分布和车内压力场产生影响<sup>[4-5]</sup>, 导致车厢通风量偏离设计值, 车内流场与静态时产生较大的差异, 严重影响客室内的空气环境。

目前, 针对地铁列车运行状态下的通风特性与车内流场研究较少。鉴于此, 本文通过实车测试, 研究列车运行状态下的新风量、排风量等通风参数的动态变化情况, 分析通风系统的动态性能。同时, 基于实车测试数据, 对不同运行速度下的列车通风系统工作状态进行数值模拟, 进一步分析地铁列车运行时的通风特性。本文研究可为提高车厢

\* 国家自然科学基金项目(52108087)

内环境热舒适性及空气品质提供一定的借鉴与参考。

## 1 运行地铁车厢内风口风速实测分析

### 1.1 测点布置与测试方法

为分析列车运行时车厢内实际的送风、回风状态,在地铁列车隧道运行条件下,测试不同车厢内送风口和回风口的风速。本文以上海轨道交通 11 号线(以下简称“11 号线”)列车在隧道运行状态下的数据为例进行研究,11 号线采用 6 节编组,A 型地铁列车。考虑到不同车厢的送风、回风差异,选取 11 号线头车、第 3 节及尾车车厢进行实测研究,每节车厢的送风及回风口风速测点布置示意图如图 1 所示。其中:每节车厢布置 6 个送风风速测点(测点 1—测点 6),分别位于车厢 1/4、1/2 和 3/4 处;每节车厢布置 4 个回风风速测点(测点 A—测点 D),分别位于车辆 1/4 中心线和 3/4 中心线处。

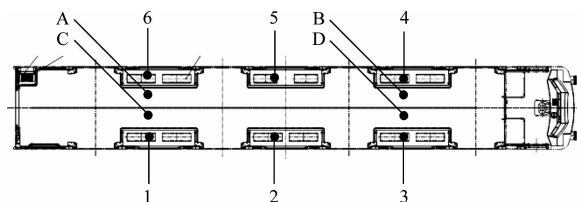


图 1 送风及回风口风速测点布置示意图

Fig. 1 Diagram of supply/return air velocity measuring point layout

测试采用 Testo 480 型多功能测量仪,外接热线风速探头,测速范围为  $0 \sim 20 \text{ m/s}$ ,精度为  $\pm (0.03 \text{ m/s} + 4\% \text{ 测量值})$ 。测量时,使用风速仪对车厢内 6 个送风位置及 4 个回风位置的风速同时进行测量,每节车厢连续测量 15 min 左右。热线风速探头紧贴于风口正下方,风速值自动记录频率为 1 个/s。

### 1.2 车厢内风口风速实测结果分析

#### 1.2.1 送风口风速

3 节车厢送风口风速箱形图如图 2 所示。由图 2 可知:地铁列车在隧道运行状态下,车厢内送风口风速分布不规则且差异较大;同节车厢内送风测点测得的风速均值可差 29 倍,实际送风不均匀。

为分析不同车厢之间送风风速的差异,对每节车厢 6 个送风测点测得的风速数据取平均,得到的 3 节车厢送风口风速均值箱形图如图 3 所示。列车头车、第 3 节及尾车车厢的送风口风速均值分别为  $1.690 \text{ m/s}$ 、 $1.353 \text{ m/s}$ 、 $1.288 \text{ m/s}$ 。由此可知,车厢

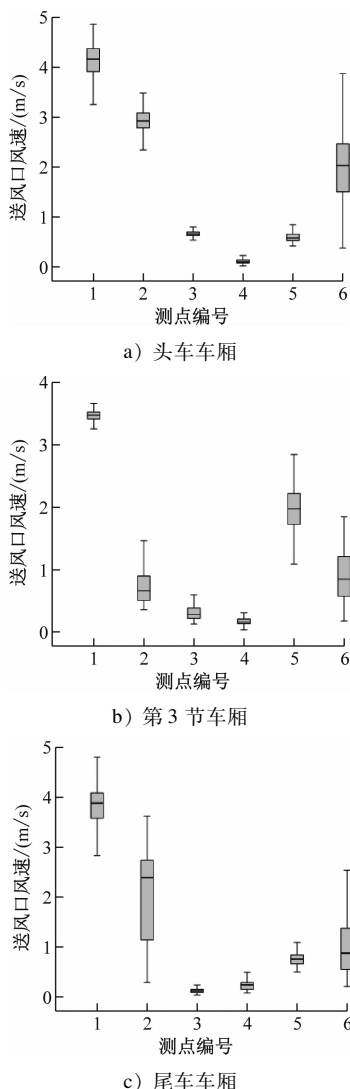


图 2 3 节车厢送风口风速箱形图

Fig. 2 Box plot of supply air velocity in three compartments

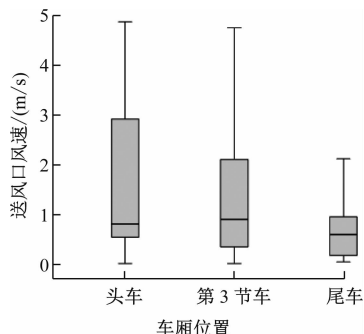


图 3 3 节车厢送风口风速均值箱形图

Fig. 3 Box plot of average supply air velocity in three compartments

内送风口风速分布规律为由头车向尾车递减,第 3 节车厢的送风口风速比头车车厢的送风口风速降低了 19.95%,尾车车厢的送风口风速比第 3 节车

厢的送风口风速降低了 4.84%,降幅较大。

根据列车空气动力学理论,在列车运行方向的车头中,车外相对于车内是正压<sup>[5]</sup>,导致通过新风阀门进入车内的空气流量有所上升,因此会出现头车送风量大、尾车送风量小的现象,测试数据显示的规律与理论分析结果相吻合。

### 1.2.2 回风口风速

3 节车厢回风口风速箱形图如图 4 所示。回风口风速分布不均匀度比送风口小,但同节车厢内的回风风速均值差距仍可达 1.57 倍,回风分布也不均匀。

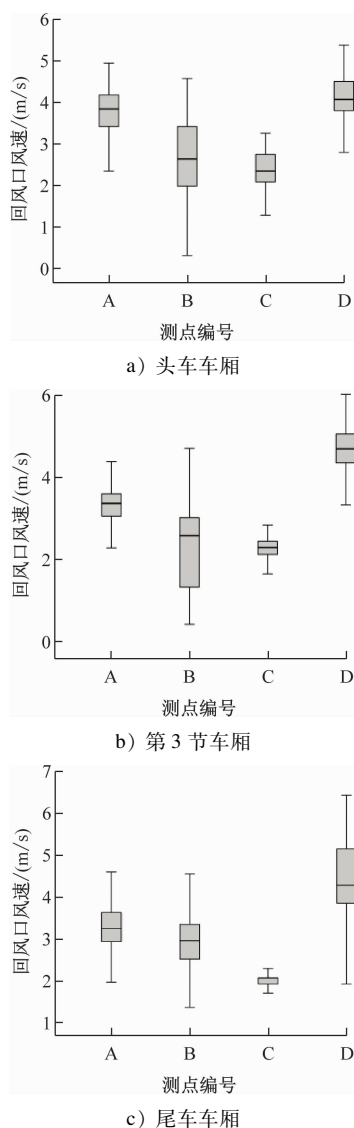


图 4 3 节车厢回风口风速箱形图

Fig. 4 Box plot of return air velocity in three compartments

对每节车厢 4 个回风测点测得的风速数据取平均,得到的 3 节车厢回风口风速均值箱形图如图 5

所示。列车头车、第 3 节及尾车车厢的回风口风速均值分别为 3.032 m/s、3.091 m/s、3.233 m/s。由此可知,车厢内回风口风速分布规律为由头车向尾车递增,第 3 节车厢回风口风速比头车车厢回风口风速增加了 1.95%,尾车车厢回风口风速比第 3 节车厢回风口风速增加了 4.59%。

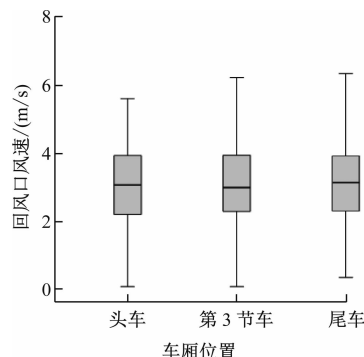


图 5 3 节车厢回风口风速均值箱形图

Fig. 5 Average return air velocity in three compartments

11 号线列车车厢的排风方式为回风道中空气通过车顶 6~8 个风帽排出车外,回风量的增减趋势与排风量相同。根据列车空气动力学理论,在列车运行方向的尾车中,车外相对于车内是负压。在压差作用下,车内空气将向车外流动,最终导致头车排风量小、尾车排风量大,测试数据显示的规律与理论分析结果相吻合。

11 号线列车 1 节车厢的新风量设计值为 3 200 m<sup>3</sup>/h,送风量为 10 000 m<sup>3</sup>/h,每节车厢有两个空调机组,每个空调机组有两个回风口,每个回风口尺寸为 450 mm×290 mm,即 1 节车厢回风口总面积为 1.044 m<sup>2</sup>。根据实测回风口风速均值,计算得到 11 号线头车、第 3 节车厢及尾车车厢的回风量分别为 11 393.98 m<sup>3</sup>/h、11 615.70 m<sup>3</sup>/h 和 12 149.14 m<sup>3</sup>/h,分别比设计值大 13.93%、16.16%、21.49%。

由此可知,地铁列车的隧道运行状态与静态设计工况存在巨大差异,实际运行时受隧道空气动力学效应影响,车身排风口处于负压区,导致回风量明显大于设计值。根据实测数据可知,列车在隧道运行状态下,送风量由头车向尾车递减,回风量由头车向尾车递增,通风量的变化不仅影响了车内流场,亦可能导致尾车新风量下降至低于设计值,无法满足定员载荷时每人 10 m<sup>3</sup>/h 的新风需求,影响车内空气品质与乘客健康,因此需更重视地铁列车通风空调系统的动态性能。

## 2 运行列车通风特性数值模拟与分析

### 2.1 数值模拟方法

试验采用中车株洲风洞测试实验台来模拟分析列车运行时的通风特性,风道模型示意图如图 6 所示。采用 STAR-CCM+ 软件求解,选取  $k-\varepsilon$  湍流模型及分离流模型进行分析。经验证可知,该数值模拟方法的计算误差在合理范围内。当列车运行速度为 0、20 km/h、40 km/h、60 km/h、95 km/h、120 km/h、160 km/h、200 km/h 时,模拟分析列车风道系统的流场特征,以及新风量、回风量、送风量。

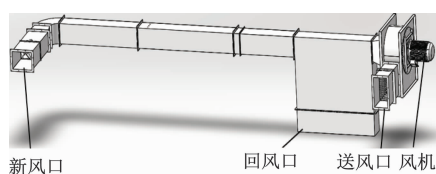


图 6 风道模型示意图

Fig. 6 Diagram of air duct model

对模型进行非结构网格划分,在滤板等细节处进行加密,最终的网格数为 618 万个,经网格独立性检验,网格质量满足要求。风道模型网格划分示意图如图 7 所示。边界设置回风口为 0 Pa 压力进口,送风口为 0 Pa 压力出口,新风口根据风洞测试实测压力数据设置压力出口。风机设置风机边界并使用风机曲线,网板统一设置为多孔跳跃模型,管壁统一设置粗糙度。

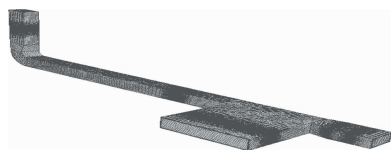


图 7 风道模型网格划分示意图

Fig. 7 Diagram of air duct model grid division

### 2.2 风道模拟结果与分析

#### 2.2.1 风量

不同列车运行速度  $v$  下,各风道风量实测值与模拟值对比如图 8 所示。由图 8 可知:模拟结果与实测值较为接近;随着列车运行速度的提升,回风量实测值逐渐增大,送风量与新风量实测值逐渐减小;随着列车运行速度的提升,回风量模拟值逐渐增加,新风量模拟值逐渐减小;当列车运行速度为 40 km/h 后,风道新风量转为负值,且其数值不断增大,风道送风量与回风量模拟值则恒为正值。

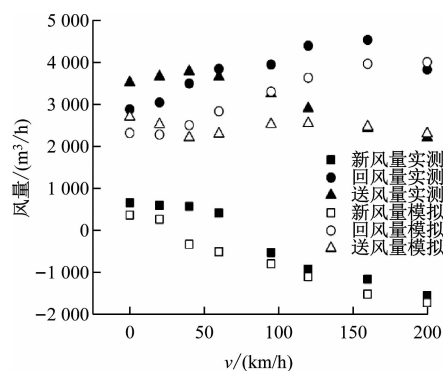


图 8 不同列车运行速度下各风道风量实测值与模拟值对比

Fig. 8 Comparison of field-measured and simulated values of air volume through each air duct under different train operating speeds

列车运行时的风道风量与静止时具有较大的差异,尤其当列车运行达到一定速度时,空调通风系统的新风口出现了新风反向现象,直接影响了车厢内的风量,造成车厢内的流场发生变动。

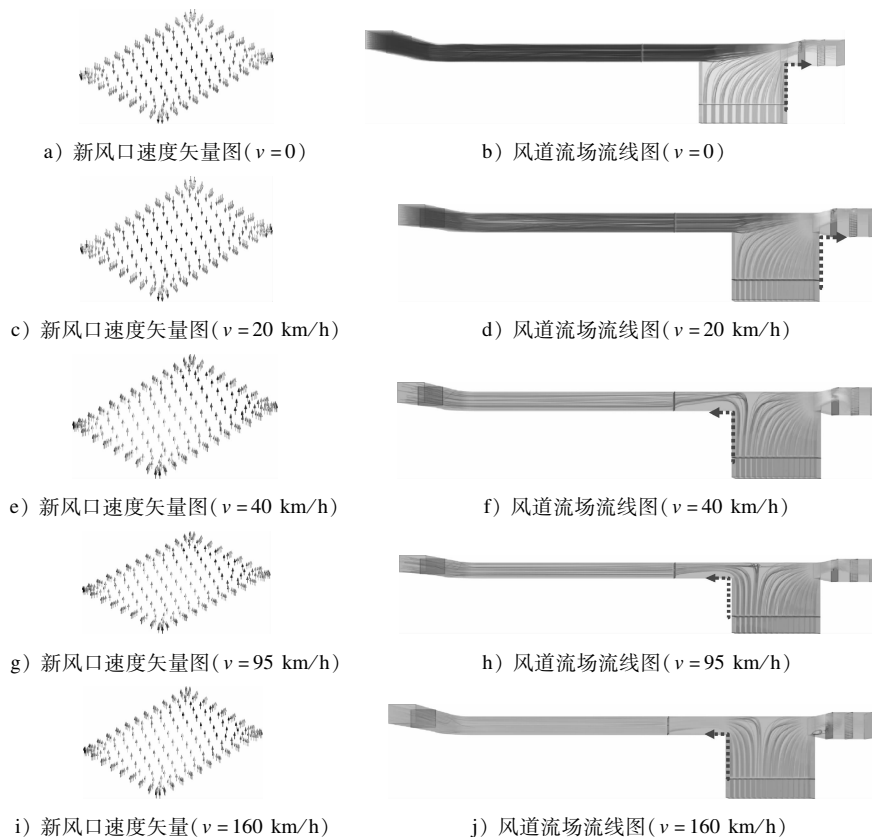
#### 2.2.2 风道流场

不同列车运行速度下的新风口速度矢量图与风道流场流线图如图 9 所示。当列车运行速度为 0 和 20 km/h 时,风道的回风与新风混合后通过送风口送入车内。当列车运行速度为 40 km/h 时,新风口部分风向开始由进入风道转变为离开风道,一部分回风通过送风口进回车内,一部分回风通过新风口排出风道,即出现了新风反向现象。随着列车运行速度的提升,越来越多的回风通过新风口排出风道,新风反向的风量逐渐增大,导致车厢内的新风量有所下降,车厢内的空气品质变差。

#### 2.2.3 风口压力

不同列车运行速度下的风道新风口与回风口压力如图 10 所示。列车运行时,新风口与回风口一直处于负压状态,当列车运行速度增大时,压力呈现下降趋势。当列车运行速度为 60 km/h 时,新风口压力为静止时的 14.22 倍。由于新风口呈现出较大的负压,导致通过新风口进入风道的新风量随着列车运行速度的提高而减少。由于风道中过滤网及沿程阻力的影响,车厢内部回风口的压力波动明显小于新风口的压力波动,且负压较新风口小,范围在  $-8$  Pa 以内。随着列车运行速度的增大,新风口与回风口的压力差为负压,且其数值不断增大。当列车运行速度为 40 km/h 和 60 km/h 时,其压力





注:进入风道的风向与新风口向下的速度矢量同向。

图9 不同列车运行速度下的新风口速度矢量图与风道流场流线图

Fig. 9 Fresh air inlet velocity vector diagram and air duct field streamline diagram under different train operating speeds

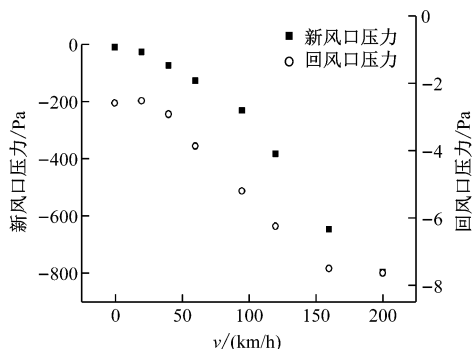


图10 不同列车运行速度下的风道新风口与回风口压力

Fig. 10 Pressure at air duct fresh/return air inlets under different train operating speeds

差分别为静止时的 9.94 倍和 17.37 倍。新风口和回风口的负压力差增大是造成新风反向的主要原因。

### 3 结语

通过对 11 号线的实车测试及不同列车运行速度下地铁列车通风系统实际工作状态的数值模拟,

对列车隧道运行状态下的车厢内送风及回风口风速、风口压力和压差进行了研究。主要获得以下结论:

1) 地铁在隧道运行状态下,同节车厢内的送风与回风不均匀。送风风速差 29 倍,回风风速差 1.6 倍,实际风量与静止时存在较大的差异。车厢内实测回风量高达设计值的 1.21 倍,车厢内的通风系统实际工作状态与静态设计工况存在较大的差异。

2) 各节车厢的送风量、排风量不平衡。送风量由头车向尾车递减,回风量由头车向尾车递增,送风、排风量不平衡使得车内空气由头车向尾车流动,严重影响了车内流场、空气品质与乘客健康。

3) 列车提速后,风道风量与压力产生了明显的变化。当列车运行速度增大时,回风量逐渐增加,新风量逐渐减小。当列车运行速度达到 40 km/h 后,新风量转为负值,出现了明显的新风反向现象,越来越多的回风通过新风口排出风道。新风口与回风口负压差增大是造成新风反向的主要原因。

(下转第 240 页)

息,不会转为 PS 模式。此场景与正线直接、直发时相同,存在列车越过实际出站信号机绝缘节时因车载数据未更新而出现的接收到轨道电路载频不同和紧追踪情况下码序变化的问题。解决方案可参照前文,载频不同问题可以利用车载载频锁定处理逻辑内的开窗(50 m)解决;对于紧追踪所产生的码序问题,建议按照上文所述采用“链接反应”方案,进站应答器中对丢失出站应答器后的链接反应按照转 PS 模式考虑。

#### 4 无直向发车端安全线设置分析

对于侧线股道无直向发车端,根据设置安全线与否,信号设备布置有如图 3 和图 4 所示两种方式。

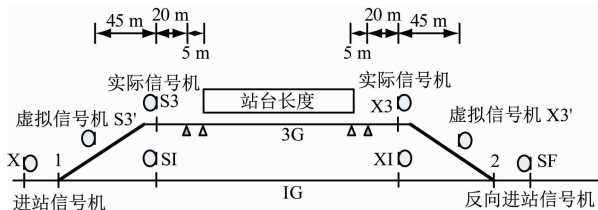


图 3 无安全线情况下信号设备布置示意图

Fig. 3 Diagram of signaling equipment layout without safety lines

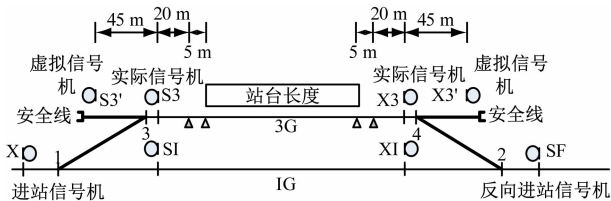


图 4 有安全线情况下信号设备布置示意图

Fig. 4 Diagram of signaling equipment layout with safety lines

##### 4.1 不设置安全线方案

不设置安全线,延续进路终端需至反向进站信号机 SF 处。由于侧线接车的延续进路占用了正线区段资源,需等待延续进路解锁完成后,正线才能开始接车。延续进路解锁方案可采用发车后解锁或停稳解锁,当 ATO 故障时改为人工或延时解锁。无论采用何种方案,都会对行车效率造成影响。

##### 4.2 设置安全线方案

设置安全线,延续进路终端可至安全线,此时正线区段无锁闭,可以正常接发车,满足平行作业要求。由于安全线方向无法发车,需要解锁进路后重新办理开通正线进路,延续进路解锁方式考虑采用停稳解锁(当 ATO 故障时改为人工或延时解

锁),后续重新办理发车进路方式。

结合市域铁路车站设置侧线的主要目的,本着不影响正线正常越行且尽可能减少投资的原则,建议对正方向上的无直向发车端采用方案二设置安全线。对于反向上的无直向发车端,由于一般用于特殊情况的故障行车,因此采用方案一不设置安全线,信号设备布置如图 5 所示。

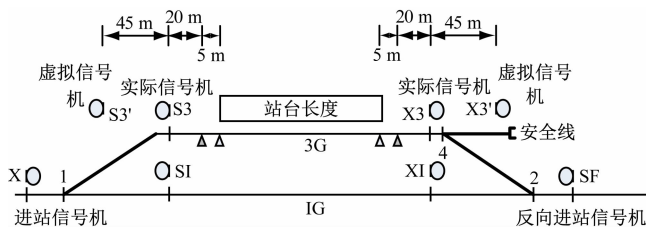


图 5 推荐信号设备布置示意图

Fig. 5 Diagram of recommended signaling equipment layout

#### 5 结语

采用延续进路方案后,市域铁路有岔站站台距离岔前基本轨缝距离为 25 m,相比原 CTCS2 + ATO 系统方案的 70 m 缩短了 45 m,显著减少了地下车站规模,减少了土建投资,提高了项目的经济性。

#### 参考文献

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. CTCS-2 级列控车载设备技术规范: Q/CR 843—2021[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021:7.  
China State Railway Group Co., Ltd. Technical specification for CTCS-2 onboard ATP: Q/CR 843—2021[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021:7.
- [2] 国家铁路局. 列控系统应答器应用原则: TB/T 3484-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017:3.  
National Railway Administration of People's Republic of China. The balise application principle for the train control system: TB/T 3484—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017:3.
- [3] 国家铁路局. 列控中心技术条件: TB/T 3439—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016:9.  
National Railway Administration of People's Republic of China. Technical specification of train control center: TB/T 3439—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016:9.
- [4] 国家铁路局. 铁路车站计算机联锁技术条件: TB/T 3027—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016:4.  
National Railway Administration of People's Republic of China. Computer based interlocking technical specifications: TB/T 3027—2015[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016:4.

(下转第 344 页)