

# 地下通道超近距上跨城市轨道交通隧道 结构施工影响分析\*

黄 松

(贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 550081, 贵阳//高级工程师)

**摘 要** 目的:近年来,城市轨道交通周边施工作业导致既有线路隧道结构受损或影响行车安全的事故频繁发生,因此需加强对城市轨道交通控制保护区内可能影响城市轨道交通结构设施安全和运营安全的各类施工作业行为的管理。**方法:**以贵阳市某新建地下过街通道近距离上跨贵阳轨道交通1号线和4号线施工项目为例,介绍了安全保护方案,确定了既有轨道交通结构变形控制标准;通过建立三维数值模型模拟施工工况,分析新建地下过街通道施工对既有轨道交通结构的变形和内力影响,并对既有轨道交通结构进行了安全保护专项监测。**结果及结论:**新建地下过街通道基础采用暗托梁+桩基结构,以及跳槽开挖反压施工措施对既有轨道交通结构进行保护;既有轨道交通结构变形的数值模拟结果与实际监测结果基本一致;在采取安全保护措施后,既有轨道交通结构变形值小于控制标准值;在城市轨道交通控制保护区施工作业安全管控中,采用精细化设计、现场施工控制及安全保护专项监测等措施能够保障既有轨道交通的结构及运营安全。

**关键词** 城市轨道交通;地下通道;超近距上跨;隧道结构施工

**中图分类号** U456.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.09.017

## Construction Impact Analysis of Underground Passage Over-spanning Urban Rail Transit Tunnel Structure in Ultra-close Proximity

HUANG Song

**Abstract** **Objective:** In recent years, URT (urban rail transit) surrounding constructions frequently cause damages to existing line tunnel structures or undermine operational safety, thus it is necessary to strengthen the management of various construction activities within the URT control and protection zone that may impact the safety of URT structures and operations. **Method:** Taking the construction project of a new underground passage close-distance over-spanning Guiyang Rail

Transit Line 1 and Line 4 at close range in Guiyang City as example, a safety protection scheme is introduced and deformation control standards for existing rail transit structure are established. By establishing a three-dimensional numerical model to simulate construction working conditions, the deformation and internal force impacts of the new underground passage construction on existing rail transit structure are analyzed. Special monitoring for the safety protection of rail transit structure is conducted. **Result & Conclusion:** The foundation of the new underground passage adopts the 'hidden beam + pile foundation' structure, and measures such as excavation with bracing and anti-thrust construction are taken to protect the existing rail transit structure. The numerical simulation results of existing rail transit structure deformation are consistent with the field-monitored results. After implementing safety protection measures, the deformation values of the existing rail transit structure are below control standards. In the safety management of construction work within URT control and protection zone, measures such as refined design, on-site construction control, and special monitoring for safety protection can ensure the structural and operational safety of existing rail transit system.

**Key words** urban rail transit; underground passage; over-spanning in ultra-close proximity; tunnel structure construction

**Author's address** Guiyang Public Transportation Investment Operation Group Co., Ltd., 550081, Guiyang, China

## 0 引 言

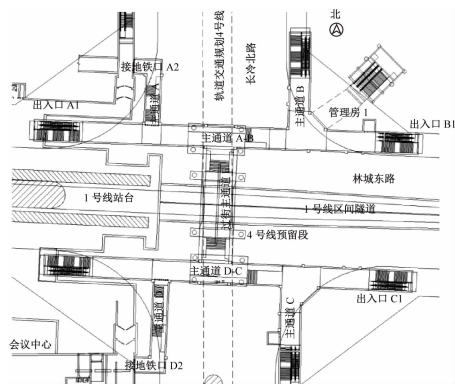
随着我国城市轨道交通领域的发展,地铁运营线路不断增加,城市轨道交通线路沿线的施工作业项目也越来越多。我国出台了相关城市轨道交通控制保护区的安全管理要求,加强对城市轨道交通控制保护区内可能影响城市轨道交通结构设施安全和运营安全的各类施工作业行为的管理。

\* 国家重点研发计划项目(2022YFC3003300)

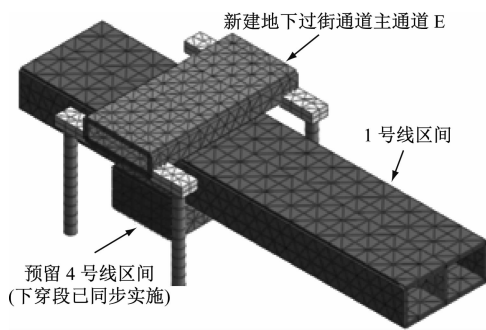
目前,我国较多城市均采用加强外部施工项目技术审查和监管的方法,通过监测、巡查、预警、监控等技术手段,全面掌控城市轨道交通设施的安全状态,对邻近既有地铁施工影响进行分析<sup>[1-2]</sup>。

为避免轨道交通设施受损,通过建立较为完善的城市轨道交通控制保护区安全管理制度,及时发现城市轨道交通控制保护区内未办理审查手续或未按照已审批保护方案实施的违法、违规施工作业行为。

本文以贵阳市某新建地下过街通道近距离上跨贵阳轨道交通1号线和4号线(以下简称“1号线”“4号线”)施工项目为例,结合既有轨道交通结构变形控制标准,对既有轨道交通结构采取安全保护措施,计算分析外部施工作业对既有轨道交通结构的受力和变形影响。本文研究可为类似工程的相关安全保护措施和现场施工控制提供参考。



a) 平面位置图



b) 模型示意图

图1 过街主通道上跨既有轨道交通模型示意图

Fig. 1 Diagram of main street-crossing passage over-spanning existing rail transit model

## 2 安全保护方案及控制标准

### 2.1 既有轨道交通线路结构

既有轨道交通线路的明挖区间为单层双孔箱形结构,结构内净高为5.15 m,区间顶板、底板及侧墙厚度为0.6 m,中隔墙厚度为0.3 m,1号线下方同步建设的4号线顶板与1号线明挖结构底板共板设置,厚度为0.8 m,侧墙宽为0.7 m。既有轨道交通线路结构剖面图如图2所示。

### 2.2 主通道E的安全保护方案

新建地下过街主通道E采用钢筋混凝土箱梁,净空尺寸为10.0 m(宽)×2.7 m(高),箱梁顶板厚度为0.35 m,底板厚度为0.3 m,侧墙厚度为0.6 m。为减小新建地下过街通道的施工和运营对既有

## 1 工程背景

贵阳市某新建地下过街通道位于城市主干道交叉口,上跨1号线和4号线。过街主通道上跨既有轨道交通模型示意图如图1所示。该路口基本情况为1号线(已运营)呈东西向敷设,4号线(远期线,下穿段预留结构已与1号线同期实施)呈南北向敷设,下穿1号线,且该处1号线区间结构顶部埋深仅为3.85 m。新建地下过街通道采用工字形主通道布置,建设规模为3 920 m<sup>2</sup>,共设8个出入口。

地下过街通道主通道E需上跨1号线和4号线区间隧道结构,与已建4号线通道在平面位置上基本重叠(见图1b)。受空间位置影响,过街通道主通道E结构底部距1号线区间隧道结构仅0.3 m,为超近距离上跨施工作业。

轨道交通线路的影响,主要采取以下保护措施:

1) 跨轨道交通隧道结构采用暗埋托梁结构形式,其剖面图如图3所示。暗埋托梁段承担过街通道自身质量和路面荷载,上跨梁长为24.0 m,高为3.8 m。腹板采用加宽过渡段与横梁相接。箱梁顶板设置宽为0.8 m的受压悬臂,以减小顶板变形。箱梁横向设置牛腿,用于安装搭板,并与路基过渡,减小不均匀沉降。

2) 托梁基础采用桩基础,为12根直径1.8 m的混凝土灌注桩,距既有结构最小净距不小于2 m。同时,按承压和抗拔桩设计桩基,其与主梁端横梁固结,基底深入4号线结构以下超过2 m。箱梁端横梁设置于梁底,与桩基固结。

3) 为减小对既有轨道交通结构的影响,将隧道

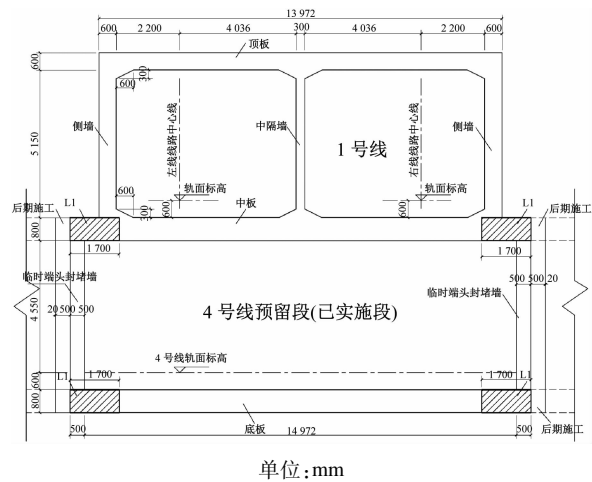


图 2 既有轨道交通隧道结构剖面图

Fig. 2 Profile drawing of existing rail transit tunnel structure

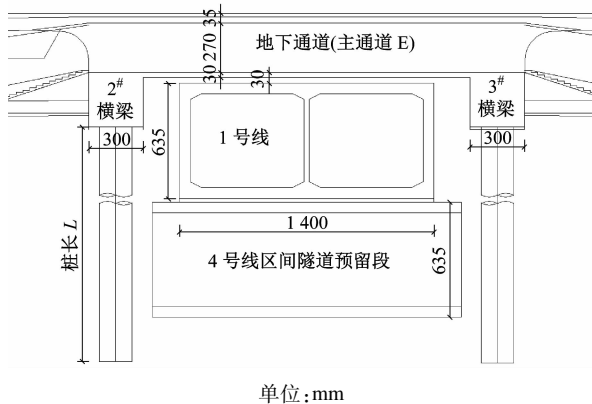


图 3 过街通道暗埋托梁剖面图

Fig. 3 Profile drawing of street-crossing passage hidden beams

结构顶部以上 10 cm 设置为垫层,可有效保护结构防水层和荷载缓冲。

### 2.3 既有轨道交通结构变形控制标准

根据 CJJ/T 202—2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》、GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》、GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》等规定,同时参考我国其他地区的相关变形控制标准<sup>[3]</sup>,结合本项目涉及的 1 号线区间结构情况,确定本工程区间隧道结构的变形控制标准为水平变形量小于 5 mm,沉降量小于 7 mm,隆起量小于 5 mm。

## 3 安全保护方案施工影响分析

### 3.1 施工工况

新建地下过街通道基坑按照分层、分步、对称、

平衡、限时这 5 个要素,遵循“纵向分段、竖向分层、先支后挖”的原则。以基坑整个横断面的宽度和分层深度开挖土体,严禁大槽开挖施工。每层开挖高度为 2 m,开挖一层,支护一层。在轨道结构防水层 1 m 内,采用人工配合机械开挖,避免大型机械直接开挖作业危及隧道安全。

主通道分 3 段施工,施工步骤为:

- 1) 第 1 节段、第 3 节段基坑开挖;
- 2) 抗拔桩施工,底板浇筑,沙袋反压底板;
- 3) 第 2 节段开挖;
- 4) 抗拔桩施工,底板浇筑;
- 5) 第 1 节段、第 2 节段、第 3 节段腹板和顶板一次浇筑成型,回填路面。

### 3.2 计算参数及本构模型

根据勘察报告,地层物理力学参数如表 1 所示。土体材料本构模型采用修正 Mohr-Coulomb 模型,由非线性弹性模型和弹塑性模型组合,可以模拟土体不受剪切破坏或压缩屈服影响的双硬化行为。新建地下过街通道结构、抗拔桩、1 号线结构和 4 号线预留通道结构的材料均采用弹性 Elastic 模型。模型结构属性及物理力学参数如表 2 所示。

表 1 地层物理力学参数指标

| Tab. 1 Physical and mechanical parameters of stratum |                               |      |             |              |
|--|-------------------------------|------|-------------|--------------|
| 名称   | 天然密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 泊松比  | 黏聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>(°) |
| 人工填土   | 1.70                          | 0.30 | 5           | 12           |
| 红黏土  | 1.71                          | 0.28 | 40          | 6            |
| 强风化泥质白云岩   | 2.66                          | 0.25 | 80          | 21           |
| 中风化泥质白云岩   | 2.70                          | 0.20 | 400         | 36           |

### 3.3 计算模型及数据分析

采用有限元软件建立新建过街通道上跨 1 号线及 4 号线预留段明挖区间隧道的计算模型。考虑到圣维南原理的影响,模型尺寸设为基坑每侧的超出宽度为基坑开挖深度的 3~5 倍,模型尺寸为 80 m (长)×80 m (宽)×40 m (高)。模型侧向采用水平约束,模型底部采用竖向及水平约束。计算模型示意图如图 4 所示。在模拟场地原始地应力和 1 号线及 4 号线预留段区间隧道开挖施工完成后,进行位移清零设置,再按照前文所述的施工步骤进行施工模拟计算。

不同施工步骤下,地层、1 号线及 4 号线预留段区间结构的竖向位移云图如图 5 所示。当第 1 节

表 2 模型结构属性及物理力学参数

Tab.2 Structure properties and physical and mechanical parameters in model

| 名称       | 属性       | 弹性模量/<br>GPa | 重度/<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 泊松比 | 板(墙)厚度/mm |     |     |     |
|----------|----------|--------------|-----------------------------|-----|-----------|-----|-----|-----|
|          |          |              |                             |     | 顶板        | 底板  | 侧墙  | 中隔墙 |
| 新建地下过街通道 | 2D 板单元   | 3.15         | 25                          | 0.2 | 700       | 500 | 700 | —   |
| 1 号线     | 2D 板单元   | 3.15         | 25                          | 0.2 | 600       | 600 | 600 | 300 |
| 4 号线     | 2D 板单元   | 3.15         | 25                          | 0.2 | 800       | 800 | 700 | 400 |
| 抗拔桩      | 1D 植入式桁架 | 3.15         | 25                          | 0.2 | —         | —   | —   | —   |

注:抗拔桩直径为 1 800 mm。

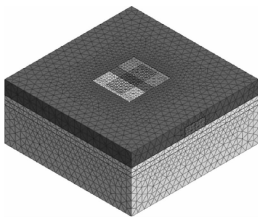
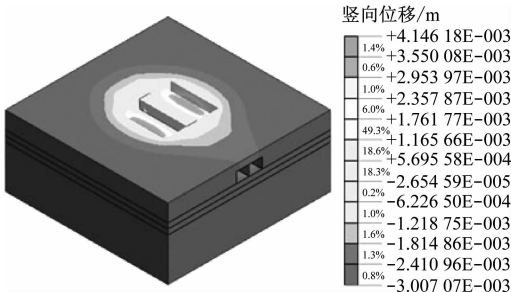
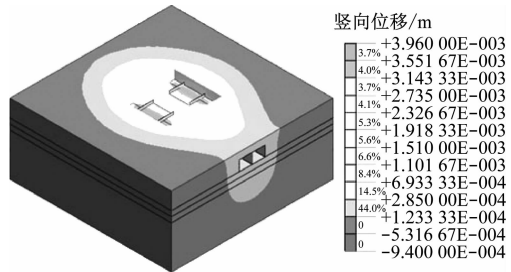


图 4 计算模型示意图

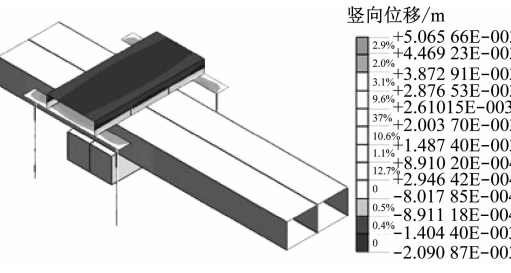
Fig.4 Diagram of calculation model



a) 过街通道第 1 节段、第 3 节段基坑开挖



b) 过街通道第 2 节段开挖



c) 过街通道结构施工

图 5 地层、1 号线及 4 号线预留段区间结构竖向位移云图  
Fig.5 Interval structure vertical displacement nephogram of stratum, Line 1 and Line 4 reserved section

段、第 3 节段基坑开挖时,土体最大隆起量约为 4.2

mm,明挖区间结构顶板最大隆起量约为 3.3 mm,位于基坑开挖区域的中心位置;当第 2 节段土体开挖时,基坑土体最大隆起量约为 4.0 mm,明挖区间结构的最大隆起量约为 3.2 mm;结构浇筑完成回填后,区间最大位移为 2.1 mm。

不同施工步骤下,既有结构(1 号线及 4 号线预留段)隆起量及内力统计情况如表 3 所示。由表 3 可知:新建地下过街通道施工时,既有结构的最大隆起量约为 3.3 mm,不超过变形控制标准;新建地下过街通道施工引起区间结构的内力变化,按裂缝控制进行验算满足施工要求。由此可见,在采取一系列保护措施后,新建地下过街通道的施工对 1 号线和 4 号线产生的影响较小。

3.4 现场监测情况

为实时掌控项目施工对既有线路结构的影响,对所涉及的轨道交通区间结构进行安全保护专项监测,监测项目有区间结构竖向位移、水平位移、相对收敛变形、轨道静态几何形位(轨距及高差)等,采用自动化监测方法进行监测。在 1 号线区间隧道中,按照 5~6 m 间距布设测点,共计布设 13 个断面,每个断面包含顶板沉降测点(2 个)、道床沉降测点(4 个,水准测量和静力水准测量各 2 个)、侧墙结构水平及竖向位移测点(4 个,水平和竖向共用测点)、相对收敛变形测点(与结构水平位移共用测点)共计 10 个测点。同时,对轨道静态几何形位进行检查,对变形缝差异沉降增加 1 组沉降测点。测点布置示意图如图 6 所示。

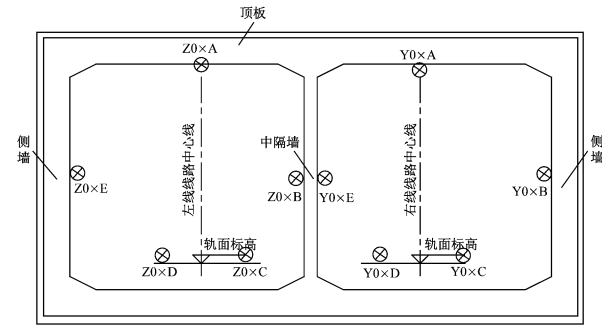
1 号线和 4 号线区间结构计算值与实测值的最大隆起量对比如图 7 所示。由图 7 可知:1 号线区间结构累计变形量为 0~1.5 mm,其变形趋势与计算结果相符,但其实测数值小于计算值且未超过控制标准值;在施工过程中,1 号线区间结构的竖向变形监测数据变化速率不大,隆起量浮动较小,说明项目施工全过程对既有线路的影响较小。

表 3 不同施工步骤下既有结构隆起量及内力统计情况

Tab.3 Statistics of existing structure heave amount and internal force at different construction steps

| 施工步骤              | 既有结构隆起量/mm | 区间结构顶板弯矩/(kNm <sup>2</sup> ) |     | 剪力/kN | 轴力/kN |
|-------------------|------------|------------------------------|-----|-------|-------|
|                   |            | 正弯矩                          | 负弯矩 |       |       |
| 基坑开挖前             | 0          | 174                          | 202 | 535   | 744   |
| 第 1 节段、第 3 节段开挖   | 3.3        | 160                          | 204 | 511   | 654   |
| 第 1 节段、第 3 节段底板施工 | 2.5        | 162                          | 202 | 520   | 674   |
| 第 2 节段开挖          | 3.2        | 159                          | 201 | 589   | 681   |
| 第 2 节段底板施工        | 3.1        | 158                          | 199 | 575   | 674   |
| 整体浇筑回填            | 2.1        | 160                          | 199 | 566   | 674   |

注:弯矩下拉为正,上拉为负。



注:Y0 为右线;Z0 为左线;A—E 为测点编号。

图 6 测点布置示意图

Fig. 6 Diagram of measuring point layout

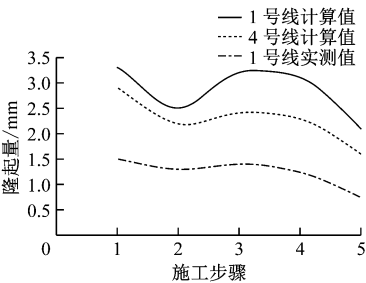


图 7 1 号线和 4 号线区间结构计算值与实测值的隆起量对比

Fig. 7 Comparison of calculated and field-measured heave amount of Line 1 and Line 4 interval structures

4 现场施工控制措施

1) 该项目为超小净距施工,施工前进行了联测,确保了过街通道和 1 号线及 4 号线预留段区间结构平面坐标、高程与收集资料一致,特别是钻孔和基桩的位置,为施工提供准确的基础资料。

2) 地下通道上跨明挖区间节点处需严格控制先期开挖第 1 节段、第 3 节段的基坑范围,在该范围底板结构达到强度后需进行配重,以减少后期基坑开挖引起的回弹变形。基坑底部的土体必须采用

人工开挖,以确保轨道交通结构防水层的完整性。

3) 对 1 号线明挖区间结构进行安全专项监测,并做好应急预案。现场需配备足够的应急物资,一旦发生险情应及时处理。

5 结论

1) 通过有限元数值模拟可知,地下通道施工完成后,1 号线明挖区间结构(含 4 号线预留节点)的最大隆起量约为 3.3 mm,满足变形控制标准,且新建地下过街通道的施工对既有结构产生的附加内力较小,满足明挖区间结构受力要求。

2) 在既有轨道交通结构近距离施工时,外部施工项目应采取必要的安全保护措施,精细化设计和施工控制措施对既有轨道交通的建设和安全运营十分重要。

3) 加强既有轨道交通结构的安全保护专项监测可以实时掌握轨道交通结构动态,为现场施工提供必要信息,动态调整施工控制措施。

参考文献

[1] 万飞,谭忠盛,陈岩. 新建隧道近距离上跨既有线施工方案研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 40.  
WAN Fei, TAN Zhongsheng, CHEN Yan. Research on construction program of new tunnel passing above existing tunnel at a short distance[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(1): 40.

[2] 胡学兵,胡居义. 明挖隧道上跨运营轨道隧道施工安全影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 178.  
HU Xuebing, HU Juyi. Study on effect of cross open-cut tunnel excavation on safety of railway tunnel below[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 178.

[3] 闫国栋. 地铁施工横通道转区间正线处下穿既有建筑沉降控制研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(1): 18.

(下转第 109 页)

方案,也可通过量化指标进行综合定量比选确定最佳信号系统制式方案。

若上述方法仍难以确定信号系统制式方案,则应针对线路特点编制信号系统制式比选专题,再进

行深入详细论证,最后根据专家调查法或组织专家评审方式确定最佳信号系统制式方案。市域轨道交通信号系统制式技术应用及方案选择的考虑因素如表1所示。

| 表1 信号系统制式技术应用及方案选择的考虑因素  |            |                       |         |           |           |         |             |     |           |      |       |      |      |        |             |               |      |      |
|--|------------|-----------------------|---------|-----------|-----------|---------|-------------|-----|-----------|------|-------|------|------|--------|-------------|---------------|------|------|
| Tab.1 Factors influencing signaling system format technological application and scheme selection |            |                       |         |           |           |         |             |     |           |      |       |      |      |        |             |               |      |      |
| 信号系统制式   | 系统技术限制因素   |                       |         | 运营管理模式    |           | 网络化运营需求 |             |     | 客流特征      |      |       | 投资效益 |      |        | 设备故障        |               |      | 其他因素 |
|  | 列车运行间隔/min | 牵引制式                  | 地下段线路占比 | 运营维护      | 资源共享      | 与国铁互联互通 | 与城市轨道交通互联互通 | 客运量 | 客流构成      | 乘车距离 | 票价敏感性 | 经济效益 | 社会效益 | 每公里投资额 | 系统故障弱化及恢复能力 | 故障造成列车晚点乘客容忍度 | 社会影响 |      |
| CTCS2 + ATO  | 4          | 适应交流牵引,不适应直流牵引        | 占比比较小   | 与既有线路制式一致 | 与既有线路制式一致 | 采用      | 不采用         | 中小  | 旅游、探亲、商务等 | 长    | 不敏感   | 敏感   | 不敏感  | 投资额较少  | 低           | 高             | 小    | 相当   |
| CBTC   | 2          | 适应直流牵引,交流牵引线路计轴设备易受干扰 | 占比比较大   | 与既有线路制式一致 | 与既有线路制式一致 | 不采用     | 采用          | 中大  | 通勤、通学、购物等 | 短    | 敏感    | 不敏感  | 敏感   | 投资额较高  | 高           | 低             | 大    | 相当   |

5 结语

市域轨道交通网络化运营条件下,信号系统制式主要在CTCS2 + ATO和CBTC制式下进行选择,根据线网运营要求也可选择多网融合STCS(CTCS2 + CBTC)信号系统。具体的应用方案选择应在确定线路定位、基本功能需求前提下,从系统能力、交直流牵引的适应性、地下线路占比等决定性因素中进行初步选择,再辅以客流特征、投资效益、设备故障影响等因素进行深入分析,为市域轨道交通网络化运营选择适宜的信号系统制式,在实现线路及线网整体功能的同时保证投资效益。

参考文献

[1] 罗松. CTCS2 + ATO 城际铁路列控系统总体技术研究[J]. 铁

路通信信号工程技术, 2015, 12(3): 1.

LUO Song. General technique research on CTCS2 + ATO intercity railway train control system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2015, 12(3): 1.

[2] 邓志翔. 市域轨道交通信号系统方案选择刍议[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(5): 7.

DENG Zhixiang. Research on signal system selection for suburban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(5): 7.

[3] 李晶. 市域快速轨道交通信号制式的选择[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(12): 57.

LI Jing. Selection of signal system in urban rapid rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(12): 57.

(收稿日期:2022 - 07 - 02)

(上接第104页)

YAN Guodong. Study on settlement control of existing building induced by horsehead excavation from transverse gallery to main tun-

nels[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(1): 18.

(收稿日期:2023 - 03 - 27)