

地铁高瓦斯隧道的施工方法选择

段军朝^{1,2,3} 布占江² 何凯罡² 徐 智²

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 430064, 武汉; 2. 中建三局集团有限公司, 430064, 武汉;

3. 中建三局基础设施建设投资有限公司, 430061, 武汉 // 第一作者, 高级工程师)

摘 要 以成都轨道交通 6 号线三期工程为依托, 针对泥岩、砂岩及高瓦斯地层, 综合考虑安全性、经济性、适用性等因素, 对盾构法、矿山法及明挖法等 3 种施工方法进行了对比分析, 对试验段的不同开挖方案进行了探讨。结果表明: 采用矿山法和明挖法相结合的方式分段施工地铁高瓦斯区间隧道, 能够有效降低施工风险; 相比于钻爆法, 悬臂掘进机开挖法在施工工效、施工质量及施工安全方面具有显著优势, 但施工造价相对较高。

关键词 地铁; 高瓦斯隧道; 泥岩地层; 砂岩地层; 施工方法; 悬臂掘进机

中图分类号 U455.4; TD713⁺ 3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.021

Construction Method Selection for Metro High Gas Tunnel

DUAN Junchao, BU Zhanjiang, HE Kaigang, XU Zhi

Abstract Based on the third-phase project of Chengdu Metro Line 6, targeting mudstone stratum, sandstone stratum and high gas stratum, comprehensively considering factors including safety, economy and applicability, three construction methods of shield tunneling, mining and open excavation are comparatively analyzed, and different excavation schemes are discussed taking test section as object. Results show that applying combination of mining method and open excavation method to the construction of metro high gas tunnel section by section can effectively reduce construction risks. Compared to drilling and blasting method, boom-type roadheader method has significant advantages in construction efficiency, quality and safety, but the construction cost is relatively high.

Key words metro; high gas tunnel; mudstone stratum; sandstone stratum; construction method; boom-type roadheader

First-author's address Huazhong University of Science and Technology, Co., Ltd., 430064, Wuhan, China

成都轨道交通 6 号线和 18 号线穿越油气田区, 部分隧道位于高瓦斯区段。这种地层条件在国内

地铁领域尚属首次, 也给工程技术人员带来严峻挑战。

文献[1-9]针对高瓦斯区间隧道施工中的瓦斯监测、设备防爆改装、爆破开挖、隧道通风、安全防护等方面展开了相关研究, 取得了较为丰富的研究成果。但关于高瓦斯隧道不同施工方法的对比研究较少, 尤其是缺乏针对泥岩、砂岩等特定地层条件下的相关研究。

本文主要从施工安全、施工工期、施工造价和环境保护等方面入手, 以成都轨道交通 6 号线(以下简为“6 号线”)三期工程为依托, 探讨城郊高瓦斯地铁隧道的施工方法, 对比分析试验段各种开挖方法的优劣, 以期为后续泥岩、砂岩及高瓦斯地层隧道施工提供参考。

1 工程概况

6 号线三期工程正线全长 22 km, 位于成都市高新区和天府新区, 线路呈由北向南再至西走向, 贯穿苏码头构造及其油气田主要发育区, 并受到盐井沟构造和龙泉山三大湾气田的影响。专项勘察期间, 蒲草塘站—万安站、万安站—麓山大道站、麓山大道站—沈阳路站、沈阳路站—青岛路站、青岛路站—庙儿堰站 5 个区间共布 37 个钻孔, 间距约 120 m; 甲烷的质量分数在 0~85 000 mg/L 范围内, 部分达到天然气燃爆极限。同时部分钻孔还检测到少量的 CO 和 H₂S 气体, 结合苏码头油气田构造条件下浅层天然气的形成、储藏、运移和逸出特征, 判定此 5 个区间为高瓦斯区间。

5 个高瓦斯区间埋深为 7~26 m。地铁隧道结构断面范围内主要为泥岩、砂岩, 可细分为强风化泥岩、中风化泥岩、强风化砂岩、中风化砂岩, 岩质较软。中风化泥岩天然单轴抗压强度为 2.33~6.36 MPa, 中风化砂岩饱和单轴抗压强度为 7.06~18.49 MPa。岩石节理裂隙较为发育, 地勘报告中确

定的围岩级别为 V 级围岩。沿线地下水主要是上层滞水、第四系孔隙水和基岩裂隙水,但大部分基岩的含水量较少。

6 号线三期工程大部分位于城郊,其中的万安站—麓山大道站、麓山大道站—沈阳路站、沈阳路站—青岛路站、青岛路站—庙儿堰站 4 个区间周边环境相对简单,大都属于荒地或已经拆迁的农房,仅有蒲草塘站—万安站区间约 300 m 处于新建道路正下方。另外万安站—麓山大道站区间横向穿越市政道路 1 条,小里程端西侧有居民小区 1 个;麓山大道站—沈阳路站区间横向穿越市政道路 2 条、侧穿中国移动办公楼 1 座,小里程端西侧有居民小区 2 个、东侧有居民小区 1 个。

2 地铁高瓦斯隧道区间的施工方法选择

2.1 设计阶段施工方法选择

地铁区间工程常用的施工方法主要有盾构法、矿山法和明挖法。方法选用需要考虑建设造价、工期计划、结构埋深、地形地貌、工程地质及水文地质、周边环境、渣土外运难易等因素。

盾构法以其自动化程度高、施工速度快、开挖时地面沉降易控制、受地面建筑物影响小、作业环境较好等优点,已成为区间隧道施工的首选方法。但盾构法在高瓦斯隧道的应用属于空白地带,盾构法在低瓦斯隧道中应用的相关文献也十分稀少,已知的安全保障措施主要为:

- 1) 配备瓦斯监控系统,实现盾构机瓦电闭锁,并辅以人工检测;
- 2) 加强洞内通风,采用大直径抗静电阻燃风管,延长风管出口,配备局部风扇,实现盾构机电闭锁;
- 3) 洞内采用水冷干式变压器、防爆电缆、防爆灯具、防爆电话,配置备用发电机;
- 4) 采取掘进姿态控制、渣土改良、盾构密封、管片拼装等环节的辅助措施;
- 5) 进洞门禁、动火审批等管理措施。

由此可见,针对盾构机和电瓶车本身的防爆技术措施不足,不能达到隔爆型或本质安全型电气设备的技术要求,若在高瓦斯隧道采用盾构法施工,安全风险很高。

矿山法是十分成熟的隧道施工方法,地铁区间埋深一般较浅,也被称为浅埋暗挖法。与盾构法相比较,矿山法隧道断面可以灵活多变,线路的曲线

半径可以更小。因地铁工程主要位于城镇,对地表沉降控制较为严格,需要强调地层的预支护和预加固,即“管超前、严注浆、短开挖、强支护、早封闭、勤量测”。对于本工程而言,围岩节理裂隙发育,区间部分断面顶部处于强化岩层,进洞段考虑采用管棚支护,进洞之后考虑采用小导管超前注浆等措施;分部开挖方式可根据断面大小选择,以达到控制变形的要求;另外,矿山法在高瓦斯隧道应用的成功案例已经很多,现有的技术和管理措施相对成熟,基本能够保障高瓦斯隧道施工的安全。因此,矿山法是较为适用的施工方法。

明挖法能够最大程度地降低甚至消除瓦斯给施工带来的安全风险。工作面可以根据需要进行设置,施工速度较快,工程造价相对较低,但也受到周边环境、结构埋深、地下水、土石方开挖难易度及土方外运等因素的影响。基坑支护、降水措施、土石方开挖及回填等工程量随着这些因素的影响会产生很大的变化。

综上所述,应采用矿山法和明挖法相结合的方式进行地铁高瓦斯隧道施工,其优劣对比分析详见表 1。结合工程实际情况,兼顾工期、安全、造价、适用性等因素,本项目 5 个高瓦斯地铁隧道区间实际采用的施工方法如图 1 所示。

表 1 地铁高瓦斯隧道区间明挖法与矿山法对比表

项目	矿山法	明挖法
施工进度	一般采用台阶法或 CD(中隔壁法)法施工,工序较复杂,工作面数量受进洞条件限制,单次循环进尺为 1~2 榀钢架间距,施工工效低	一般采用桩撑支护体系,纵向开挖后可形成流水作业,工作面数量可灵活增加,施工进度快
施工安全	存在瓦斯爆炸、瓦斯突出、拱顶坍塌、地面沉降等安全风险,需采取专门措施降低瓦斯带来的安全风险	基本可排除瓦斯带来的安全风险,但存在深基坑施工安全风险
施工质量	结构断面小,作业条件差,易出现超欠挖、初期支护喷射混凝土表面不平整、二次衬砌接缝错台及渗漏等质量问题	现浇钢筋混凝土框架结构及外包防水施工难度低,施工质量容易控制,后期渗漏水风险更低
施工造价	造价主要与所在地层特性有关,不会随埋深的变化发生显著变化	造价会随隧道埋深变化发生显著变化;埋设越深,造价越高
环境保护	易产生噪声、爆破振动等环境影响	易产生扬尘、噪声等污染问题
施工适应性	基本无限制条件,适用范围更广	受周边建(构)筑物及地下管线分布等条件限制

2.2 施工阶段开挖方法选择

2.2.1 开挖方案初选

矿山法隧道的开挖方法多种多样,从断面开挖顺序上可分为全断面法、台阶法、中隔壁法和双侧

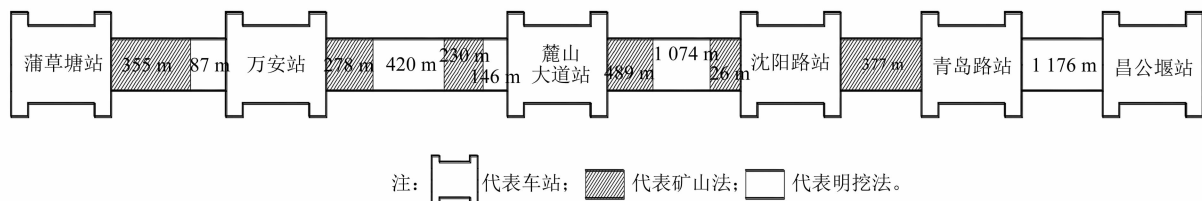


图1 地铁高瓦斯隧道区间的施工方法分布

壁导坑法。从岩土体破除方式上包括钻孔爆破法(即钻爆法)和机械开挖法。机械开挖常用设备有悬臂掘进机、挖掘机或由其改装而成的“炮机”等机具。

1) 高瓦斯隧道单洞单线开挖断面总面积为 39.16 m^2 , 跨度为 6.76 m , 属于小断面隧道。考虑围岩节理裂隙发育和变形控制要求, 选用短台阶法施工, 分上台阶以及下台阶和仰拱两步进行开挖和支护, 上台阶初期支护增设锁脚锚杆, 并将其作为临时支撑控制拱顶沉降和围岩变形。

2) 高瓦斯隧道钻爆开挖技术较为成熟, 主要安全技术要求如下: ①采用湿式钻孔; ②采用煤矿许用炸药, 严禁反向装药; ③采用电力起爆, 并使用煤矿许用电雷管, 当使用煤矿许用毫秒延期电雷管时, 最后一段的延期时间不得大于 130 ms ; ④爆破网络必须采用串联连接方式, 瞬发电雷管与毫秒电雷管不得在同一串联网络中使用; ⑤采用防爆型起爆器作为起爆电源, 一个开挖工作面不得同时使用两台及以上起爆器起爆; ⑥严格控制装药前、爆破前和爆破后的洞内瓦斯浓度。对于本工程, 线路周边环境较为简单, 对爆破振动控制要求不高, 少量邻近既有建(构)筑物地段可以改为机械开挖方式, 但V级围岩条件下超欠挖控制还需要进一步研究论证。

3) 悬臂掘进机早期主要用于煤矿工程, 近年来逐渐被应用到公路、铁路及水工等隧道工程, 但尚未在地铁高瓦斯隧道工程应用^[10-12]。目前, 市面上的掘进机主要有防爆和非防爆两种类型, 即煤矿掘进机和隧道掘进机, 从安全角度出发, 煤矿掘进机能够适用于高瓦斯隧道。煤矿掘进机的型号多样, 以徐工系列为例, 铲板宽度为 $2.8 \sim 3.8 \text{ m}$, 机身尺寸在 $2.200 \text{ m} \times 1.470 \text{ m}$ 至 $3.000 \text{ m} \times 2.195 \text{ m}$ (宽度×高度) 范围内, 定位切割范围为 $4.00 \text{ m} \times 4.84 \text{ m}$ 至 $5.70 \text{ m} \times 7.10 \text{ m}$ (宽度×高度); 最大切割岩石强度为 $70 \sim 130 \text{ MPa}$, 经济切割岩石强度为 $60 \sim 100 \text{ MPa}$; 供电电压有 $\text{AC } 660 \text{ V}$ 和 $\text{AC } 1140 \text{ V}$ 两种; 爬坡能

力最大为 18° 。区间隧道单洞单线断面分部开挖轮廓尺寸最大为 $6.76 \text{ m} \times 3.38 \text{ m}$ (宽度×高度), 隧道断面内岩石强度均小于经济切割强度。综上所述, 可初步判定悬臂掘进机能够适应本工程的基本条件。

为进一步研究钻爆法和悬臂掘进机开挖法的优劣, 选取试验段进行施工对比研究。试验段初期支护中钢架间距为 0.9 m , 循环进尺按2榀钢架间距, 即 1.8 m 控制。

2.2.2 钻孔爆破开挖

根据工程特点, 上、下台阶均采用光面爆破的方式进行浅孔松动爆破。利用延时爆破理论, 增强碎岩作用、降低振动效应、减小岩体抛掷及提升断面成型效果, 遵循“多打孔、少装药、多分段”原则。采用YT28气腿式凿岩机钻孔, 钻孔直径为 40 mm ; 采用水平楔形掏槽方式, 掏槽眼和底板眼深度取 2.3 m , 辅助眼和周边眼深度取 2 m ; 药卷统一采用 $\phi 32 \text{ mm}$ 、长 20 cm 药卷(三级煤矿许用乳化炸药); 雷管采用煤矿许用毫秒电雷管1~5段, 最后一段延期时间为 100 ms ; 上台阶单循环装药量为 28.8 kg , 下台阶装药量为 26.7 kg ; 周边眼、辅助眼、掏槽眼和底板眼装药集中度分别为 0.2 kg/m 、 0.35 kg/m 、 0.39 kg/m 、 0.39 kg/m , 炸药单耗为 0.8 kg/m^3 。爆破网络如图2所示。

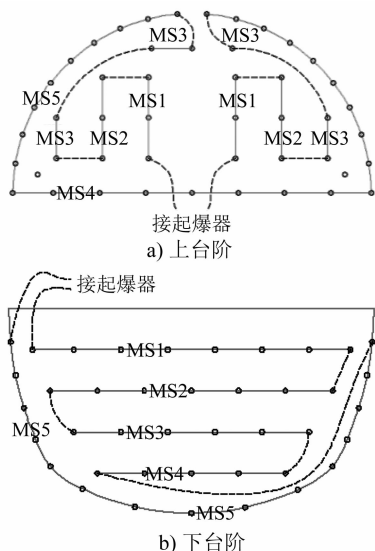
2.2.3 悬臂掘进机开挖

选用EBZ 160型悬臂掘进机施工, 机身尺寸为 $2.33 \text{ m} \times 1.65 \text{ m}$ (宽度×高度), 整机质量为 47 t , 总功率为 265 kW , 定位切割范围为 $5.4 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$ (宽度×高度), 最大切割岩石强度为 80 MPa , 装载能力为 $4.32 \text{ m}^3/\text{min}$ 。上台阶采用由中间向外逐渐扩大、近似于同心岩掘进的截割方式(见图3), 下台阶采用自上而下的截割方式。

2.2.4 开挖方法结果对比

2.2.4.1 施工工效

钻爆法主要工序平均耗时统计: 钻孔 3.5 h , 装药 3 h , 爆破、超欠挖处理和出渣 12 h , 立架 7 h , 喷锚 8 h , 合计循环一次需要 33.5 h 。受到火工品供应、



注: MS1—MS5 表示毫秒雷管的段位。

图2 爆破网络示意图



图3 悬臂掘进机施工现场照片

渣土外运等因素影响,综合进尺约每月 30 m。

悬臂掘进机法主要工序平均耗时统计:开挖与出渣 7 h,立架 7 h,喷锚 6 h,合计循环一次需要 20 h。受到渣土外运、设备故障等因素影响,综合进尺约每月 60 m。

由此可见,悬臂掘进机施工工效显著高于钻爆法,一是因为悬臂掘进机采用了边掘进、边出渣的先进工艺,改变了工序衔接关系,压缩了施工用时;二是因为在高瓦斯隧道实施爆破,需要严格执行一炮三检和 3 人连锁放炮等复杂管理程序,掌子面附近的监测传感器和风筒出口段需在爆破前后进行移动,进而增加了爆破过程时间消耗。另外,城市轨道交通施工中对火工品的管理也更加严格,偶尔存在火工品禁用和断供问题,影响现场施工的连续性。

2.2.4.2 施工质量

采用钻爆法施工时,由于围岩节理裂隙发育,光面爆破效果较差,超欠挖问题难以控制,超欠挖处理也导致了整体工效的降低。悬臂掘进机能够

精确控制截割头的截割路径,基本不会出现超挖;若出现欠挖部分,通过局部修整则可达到规范要求,因此,与钻爆法相比,悬臂掘进机开挖断面成型质量更好。

2.2.4.3 施工安全

悬臂掘进机为防爆设备,只要做好设备的日常检查、维护和保养,便能很好地保障瓦斯隧道施工安全。而钻爆法施工工序多、管理程序复杂,对施工单位的管理水平提出了更高的要求。施工过程中容易出现飞石击损风筒、爆堆中残留炸药等安全问题,爆破振动也易引起附近居民投诉,因此,邻近重要建(构)筑物还需进行专门监测。

2.2.4.4 施工造价

经测算,悬臂掘进机施工造价高于钻爆法约 20%,主要是因为设备租赁费偏高。

3 结论

1) 城郊地铁高瓦斯区间隧道在设计阶段应综合考虑工程造价、施工安全、工期要求和周边环境等多方面的因素选取施工方法。盾构机和电瓶车不能达到隔爆型或本质安全型电气设备的技术要求;高瓦斯隧道不应采用盾构法施工,宜优先选用明挖法施工;当基坑开挖条件受限或埋深过大时,可采用矿山法进行施工,这两种方法应根据工程实际情况组合使用。

2) 与钻爆法相比,采用悬臂掘进机开挖地铁高瓦斯隧道,在施工工效、施工质量和施工安全等方面具有显著优势。悬臂掘进机施工速度是钻爆法的两倍,但施工造价相对较高,悬臂掘进机每延米施工造价高于钻爆法约 20%。

参考文献

- [1] 张亚龙. KJ90NA 瓦斯自动监控系统在高速公路瓦斯隧道的使用效果[J]. 交通世界, 2019(13): 104.
- [2] 周远毅, 胡小刚. 高瓦斯隧道施工的瓦斯监控技术研究[J]. 住宅与房地产, 2018(9): 207.
- [3] 唐斌, 徐文平. 瓦斯隧道施工机械车辆防爆改装形式探讨及建议[J]. 现代隧道技术, 2019(5): 67.
- [4] 胡小刚, 周远毅. 山岭高瓦斯隧道钻爆开挖控制要点的分析[J]. 建材与装饰, 2018(8): 242.
- [5] 杨延勇. 成贵铁路瓦斯长大隧道控制爆破技术[J]. 四川建筑, 2015(6): 149.
- [6] 赵伟. 发耳高瓦斯公路隧道开挖爆破技术[J]. 隧道建设, 2015(4): 369.

(下转第 103 页)

由表4可知,工况1下,围岩剪切塑性区体积为 $1\,089.03\text{ m}^3$;工况2和工况3下,围岩的剪切塑性区体积分别为 $1\,213.10\text{ m}^3$ 和 $1\,134.93\text{ m}^3$,工况1下的剪切塑性区体积分别为工况2和工况3下的89.8%和96.0%;工况1下围岩总的塑性区体积为 $1\,718.07\text{ m}^3$,工况2和工况3下围岩总的塑性区体积分别为 $1\,823.37\text{ m}^3$ 和 $1\,758.94\text{ m}^3$,工况1的总塑性区体积分别为工况2和工况3下的94.2%和97.7%。由此可见,工况1下由新建换乘通道施工产生的围岩塑性区体积最小。

3 结论

1) 从既有车站底板附加变形指标来看,3种工况下既有车站底板沉降呈非对称分布,工况1下的底板最大沉降值为 4.72 mm ,工况2和工况3下的底板最大沉降值分别为 4.90 mm 和 4.86 mm ,工况1对既有车站底板的沉降控制更具优势。

2) 从新建换乘通道初期支护变形指标来看,顶板沉降值相差不大;底板隆起分布基本一致,在中隔壁附近的底板隆起量小于各导洞跨中的隆起量;工况1下底板的最大隆起量为 9.04 mm ,工况2和工况3下底板的最大隆起量分别为 9.83 mm 和 9.20 mm ,工况1下底板的最大隆起量分别占工况2和工况3下的92.0%和98.3%;工况1下换乘通道初期支护变形更小。

3) 从围岩塑性区来看,3种工况下围岩塑性区分布基本一致,两侧壁外侧主要为围岩剪切塑性区,底板下部主要为围岩拉伸塑性区。从量值上看,采用工况1施工产生的围岩塑性区体积在3种

工况中最小,分别为工况2和工况3下的94.2%和97.7%。

4) 3种工况均能满足施工安全需求,工况1相对最优。

参考文献

- [1] 贾龙飞. 新建地铁车站密贴下穿既有异型地铁车站的影响研究[D]. 北京:北京建筑大学,2016.
- [2] 崔光耀,倪嵩陟,伍修刚,等. 深圳地铁小净距盾构重叠隧道施工工序及加固方案[J]. 铁道建筑,2016(9): 66.
- [3] 段卫党,袁成海,郑文博,等. 城市浅埋连拱隧道单洞法施工工序的优化[J]. 上海交通大学学报,2012(1): 99.
- [4] 申玉生,何尉祥,赵乐,等. 浅埋暗挖矩形隧道施工方案比选研究[J]. 铁道标准设计,2017(2): 100.
- [5] 吴波,高波,漆岳岳,等. 城市地铁区间隧道洞群开挖顺序优化分析[J]. 中国铁道科学,2003(5): 24.
- [6] 韩焜,刘赅伟,STANDING J R. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. 土木工程学报,2012(1): 134.
- [7] 沈良帅,贺少辉. 复杂环境条件下跨下穿同一既有地铁隧道的变形控制分析及施工方案优化[J]. 岩石力学与工程学报,2008(增刊1): 2893.
- [8] 胡元芳,王守慧. 大跨浅埋暗挖地铁车站中洞法施工安全性分析[J]. 现代隧道技术,2008(4): 1.
- [9] 杨建华,朱彬. 大跨度软岩隧道开挖方法及施工方案数值模拟研究[J]. 西安科技大学学报,2011(3): 287.
- [10] 黄成林,罗学东,吕乔森. 软岩隧道开挖方法对变形影响数值模拟研究[J]. 铁道建筑,2011(11): 35.
- [11] 陈孟乔,杨广武. 新建地铁车站近距离穿越既有地铁隧道的变形控制[J]. 中国铁道科学,2011(4): 53.
- [12] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

(收稿日期:2020-05-23)

(上接第98页)

- [7] 舒东利,杨建民,谢文强,等. 保安营特长高瓦斯隧道运营通风方案研究[J]. 现代隧道技术,2019(增刊2): 96.
- [8] 赵光. 超大断面盾构穿越江中瓦斯地层风险识别与预控技术[J]. 市政技术,2018(2): 103.
- [9] 赵阶勇. 铁路瓦斯隧道施工特点及问题探讨[J]. 隧道建设,2011(1): 82.
- [10] 杨余秀. 工程隧洞新型开挖方式悬臂掘进施工工艺研究[J]. 工程技术与应用,2018(11): 61.
- [11] 梁鲜明. 悬臂掘进机在临近既有线隧道施工中的运用[J]. 工

程建设与设计,2017(12): 263.

- [12] 漆岳岳,李斌. 悬臂掘进机在复杂断面地铁隧道中的应用研究[J]. 现代隧道技术,2011(4): 32.
- [13] 周少东,夏银飞,杜先照,等. 地铁盾构隧道穿越瓦斯地层的施工技术[J]. 城市轨道交通研究,2009(8): 68.
- [14] 李越. 沼气对盾构隧道的影响及施工控制措施[J]. 城市轨道交通研究,2013(2): 95.

(收稿日期:2019-05-27)