

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.01.015

# 城市轨道交通既有线路开行 快慢车方法研究

闻 千<sup>1</sup>, 付义龙<sup>2</sup>, 荆 敏<sup>2</sup>

(1. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100120; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

**摘要:**城市轨道交通既有线路有效提升运营服务品质的途径相对较少, 既有线路开行快慢车作为一种大胆尝试和创新突破, 在高质量发展的背景下, 具有非常广泛的应用需求。针对既有线路开行快慢车的方法进行系统梳理, 根据不同线路特点和运营需求, 提出既有线路开行快慢车的4种方法, 分别是利用大的行车间隔开行快车、利用交替式跨站停车开行快车、利用故障停车线开行快慢车、利用小交路折返开行快慢车。结合国内外应用实例, 对各种方法的开行原理、优缺点以及运营要求等进行详细分析, 并介绍既有线路开行快慢车需要改造的内容。

**关键词:**城市轨道交通; 既有线路; 快慢车; 方法

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)01-0095-07

## Methods for Running Express/Local Trains on Existing Lines of Urban Rail Transit

WEN Qian<sup>1</sup>, FU Yilong<sup>2</sup>, JING Min<sup>2</sup>

(1. China Communications Construction Company Limited, Beijing 100120;

2. Beijing Urban Construction Design &amp; Development Group Co., Ltd., Beijing 100034)

**Abstract:** Current solutions for enhancing the efficiency of existing urban rail transit lines are limited. As a pioneering initiative, the concept of running express/local trains on these lines presents a versatile solution for Shigh-quality development scenarios. After systematically reviewing the methods for running express/local trains on existing lines, this paper introduces four distinct strategies tailored to the unique features and operational needs of different lines: employing extended intervals for rapid trains, implementing alternate station-skipping for accelerated service, utilizing malfunctioned train stop lines for express/local runs, and operating partial-route shuttles for express/local trains. Drawing from domestic and international case studies, this research delves into the operating principles, advantages, disadvantages, and operational requirements of the aforementioned methods. Additionally, the necessary modifications for implementing express/local train services on existing lines are discussed.

**Keywords:** urban rail transit; existing lines; express/local trains; methods

### 1 研究背景

随着人民生活水平的提升, 城市轨道交通乘客的需求也发生了变化, 从开始追求“基本的乘车功能”

到现在要求“快速”“便捷”“舒适”的服务品质。国家相关部门多次倡导, 应根据客流需求推行“站站停”与“大站停”相结合的灵活运营组织模式, 提供多样化、便捷化出行服务<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2023-03-31 修回日期: 2023-08-23

第一作者: 闻千, 男, 高级工程师, 从事轨道交通运营组织规划与管理研究, 306158519@qq.com

基金项目: 南京地铁集团(JTGF-00-JY-0001-2001)

引用格式: 闻千, 付义龙, 荆敏. 城市轨道交通既有线路开行快慢车方法研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 95-101.

WEN Qian, FU Yilong, JING Min. Methods for running express/local trains on existing lines of urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 95-101.

为满足乘客需求、响应国家倡导、解决实际运营问题，城市轨道交通运营部门积极探索相关对策，努力提升轨道交通的运营服务品质。既有线路开行快慢车在多条运营线路进行实践。北京地铁运营公司于 2020 年 3 月在昌平线、八通线等线路上客流量比较小的区段开行大站快车，减少列车停站时间，加速列车周转，满足了疫情防控需要<sup>[2]</sup>；南京地铁于 2020 年 5 月在机场线和宁溧线利用较大的行车间隔开行大站快车，快车较常规列车节省约 7 min，取得了一定的社会经济效益<sup>[3]</sup>；刘炳强针对哈尔滨地铁 1 号线上下行客流不均衡性问题，研究了无越行快慢车运行的可能性与适用性<sup>[4]</sup>；代然然以天津地铁 3 号线为研究对象，针对其现有的上下车人数、断面客流量、不均衡系数、列车站停时间和列车区间运行路程等相关数据，探讨地铁 3 号线实行快慢车组合运营后为乘客创造的最大单位时间价值和企业节省的最大车体成本<sup>[5]</sup>。日本横浜市营地铁 BLUE-Line，利用新羽站和踊场站既有的配线条件开行两种小交路列车，实现了快慢车运营的功能。

虽然既有线路开行快慢车进行过以上种种尝试，但是应用范围有限，所采用的方法未形成体系。本文结合国内外相关运营经验，针对既有线路开行快慢车的方法进行了系统梳理和研究。

## 2 既有线路开行快慢车的方法

本文主要研究目标是规划设计阶段未考虑快慢车运营组织模式，投入运营后具有开行快慢车需求的线路。由于土建已实施完成，为避免对既有运营造成较大的影响，应遵照不改造或尽量少改造土建工程的原则。在线路不具备常规避让条件下，实现快慢车运营，主要有两种思路，一是利用较大的行车间隔开行快车，快车追踪慢车运行，慢车不需避让快车；二是利用非常规避让条件开行快车，快车追踪慢车运行，慢车可避让快车。基于两种思路，提出以下 4 种方法。

### 2.1 方法 1：利用大的行车间隔开行快车

利用大的行车间隔开行快慢车是目前国内应用最多的方法，已在南京地铁市域线、郑州地铁城郊线得到了应用，深圳地铁 14 号线也有所研究<sup>[6]</sup>。

1) 适用条件。主要适用于无任何避让条件，行车间隔大、系统能力富余，且有明显点到点跨站客流的线路。比如城区外围的市域线、机场线，平峰时段的市区线，以及上下行客流不均衡的线路等。

2) 开行原理。该方法利用过站不停车节约旅行时间形成快车，快车追踪前序列车直至两者以最小行车间隔运行，快车并未越行前序列车。假定发车间隔为  $T_1$ ，最小行车间隔为  $T_2$ ，快车相对于普通车节约的时间为  $T_3$ 。

在发车间隔较大，即  $T_1 \geq T_2 + T_3$  时，起点站快车和普通车可均衡发车，此时快车与前序普通车发车间隔  $T_{11}$  等于普通车之间的发车间隔  $T_{12}$ ，即  $T_1 = T_{11} = T_{12} \geq T_2$ ，快车相对普通车节约时间  $T_3 = T_{11} - T_2$ ，如图 1 所示。

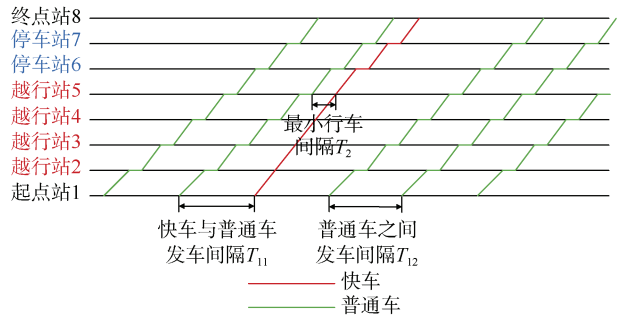


图 1 发车间隔较大时列车运行示意  
Figure 1 Schematic illustration of train operation at large departure intervals

在发车间隔较小，即  $T_1 < T_2 + T_3$  时，需调整起点站列车的发车间隔  $T_1$ ，通过不均衡发车实现快车运行，即拉大快车和前序普通车发车间隔到  $T_{11}$ ，压缩普通车之间的发车间隔到  $T_{12}$ ，此时  $T_{11} > T_1 > T_{12} \geq T_2$ ，快车相对于普通车节约的时间  $T_3 = T_{11} - T_2$ ，如图 2 所示。

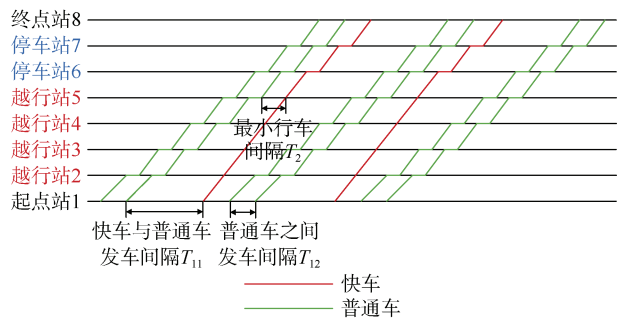


图 2 发车间隔小时列车运行示意  
Figure 2 Schematic illustration of train operation at small departure intervals

3) 优缺点分析。由于采用追踪运行，快车仅仅是越行了部分车站，并未越行慢车，因此该种模式不需要避让条件。同时，为保证快车运行效果，即快车尽量节约更多时间，需要拉大发车间隔  $T_1$ ，这时会导致系统能力损失严重。另外，针对快车越行车站，行车间隔必然存在不均衡，会导致各车站列车的到达、发

出时刻不具有规律性。

4) 运营要求。为解决列车到达、发出时刻不规律性问题,一般可以通过发布时刻表等措施加强信息传播,实现乘客按时乘车,避免长时间等待。

## 2.2 方法 2: 利用交替式跨站停车开行快车

利用交替式跨站停车开行快车是在不设置越行线的情况下,唯一可使得列车旅行速度提高,并保持高发车频率和高线路能力的运营组织模式,适用于既有线路的改造运营,目前已在郑州地铁 10 号线等线路进行过研究,在韩国首尔地铁 5 号线等得到了应用<sup>[7]</sup>。

1) 适用条件。该方法适用于无任何避让条件、通过能力要求较高,并有明显的点到点跨站客流的线路。跨站停模式适宜在高峰时段实行,由于平峰时段客流量较小,行车间隔大,采用跨站停行车后导致行车间隔更大,服务水平差,不利于吸引客流,影响运营经济性。

2) 开行原理。该方法的基本原理是 2.1 介绍的第一种情况,即利用大的行车间隔开行快车。但为了弥补系统能力损失严重的缺陷,进行了部分优化调整。该方法选择全线乘降量较小的车站 A-B 组对,并设置 A-B 两种列车,采用“由远及近”的方式分别停靠,乘降量较大的关键车站两种列车均停车。

根据客流特点将全线车站分为 A、B、AB 三类,全线列车分为 A、B 两类。其中 A 类列车在 A 和 AB 类车站停靠,在 B 类车站跨站不停车; B 类列车在 B 和 AB 类车站停靠,在 A 类车站跨站不停车<sup>[7]</sup>。

A、B 两种列车跨站次数相同,由于部分车站过站不停车,节约了停站时间和启停时间,因此旅行速度均有明显提高,A-B 车站组对越多,提速效果越明显,如图 3、4 所示。

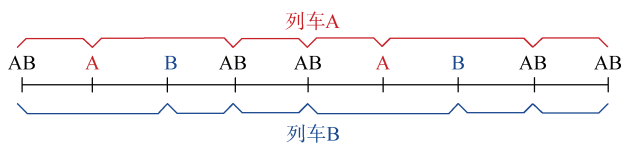


图 3 交替式跨站停车方法列车组织方式示意  
Figure 3 Schematic illustration of train organization of alternate skip-station stopping method

3) 优缺点分析。由于 A、B 两种列车无速差且采用由远及近的停站方式,限制系统能力的点仍在 AB 大站上,因此线路的通过能力无折减,对于常规地铁可实现 30 对/h。

对于 AB 大站而言,列车的行车间隔无影响;但

对于 A、B 小站,行车间隔加倍。对于 AB 大站而言,可实现对所有车站的直达化运输,但对于 A、B 小站之间的交流,需要在 AB 大站换乘一次才可到达。

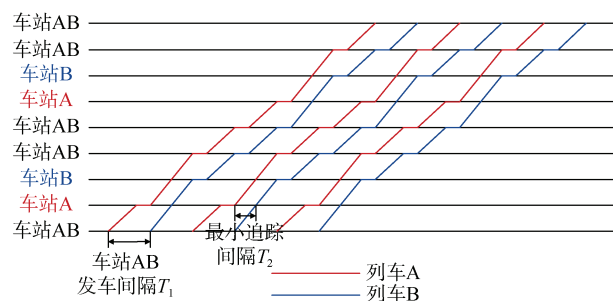


图 4 交替式跨站停车方法列车运行示意  
Figure 4 Schematic illustration of train operation of alternate skip-station stopping method

该方法适应性强,可根据客流情况灵活选择跨停车站,但由于不同车次的停车方案均有所不同,车站客运组织稍有复杂,乘客需接受的信息较多,容易引发混乱。

4) 运营要求。由于开行跨站停列车会使 A、B 类车站之间交换的客流不能直达,只能在 AB 类车站换乘,因此车站需要提供完备和人性化的服务系统,借助列车车底标识、车站广播、车站人工导向、车站电子显示屏、列车上的广播通知让所有乘客明确本次列车及下次列车的列车种类、停站信息等,使乘客能选择适合乘坐的列车,尤其要对需绕行并换乘的乘客加强引导。

同时,针对跨站停引起的小站点发车频率低、发车间隔大的情况,建议在相应站点执行时刻表模式,降低乘客的等候时间。编制时刻表时需注意连续的两列车不能在同一站点跨站不停车,即 A 类列车和 B 类列车需间隔发车。由于 A 类列车或 B 类列车在运行中存在跨站停站点,若 A 类列车或 B 类列车连续发车会造成某些站点的发车频率加大,服务水平降低。因此,A 类列车和 B 类列车要间隔发车,才能保证列车的服务水平不受过大影响。因此,在跨站停运营时段,运营部门要根据列车种类调整信号模式,保证不同列车在不同的跨站不停车站点的正常运行。

## 2.3 方法 3: 利用小交路折返开行快慢车

鉴于利用故障停车线开行快慢车存在载客停车时间过长,通过能力有影响等问题,对于客流分段分布特征较为明显的线路,可利用小交路折返开行快慢车。

1) 适用条件。该方法适用于具有明显的点到点

跨站客流，客流分段分布特征较为明显，全线设置有故障停车线和小交路折返线，并分布在合适车站的线路。

2) 开行原理。根据客流分段特征，利用既有的折返线、停车线或段场出入线，开行一种或多种小交路列车，通过运行图的铺画，在小交路列车后方设置快车，并将快车越行慢车的车站调整到小交路折返站。在快车追踪小交路列车到最小行车间隔时，小交路列车在折返站清客，并离开正线进入折返线，实现避让快车。具体原理如图 5 所示。

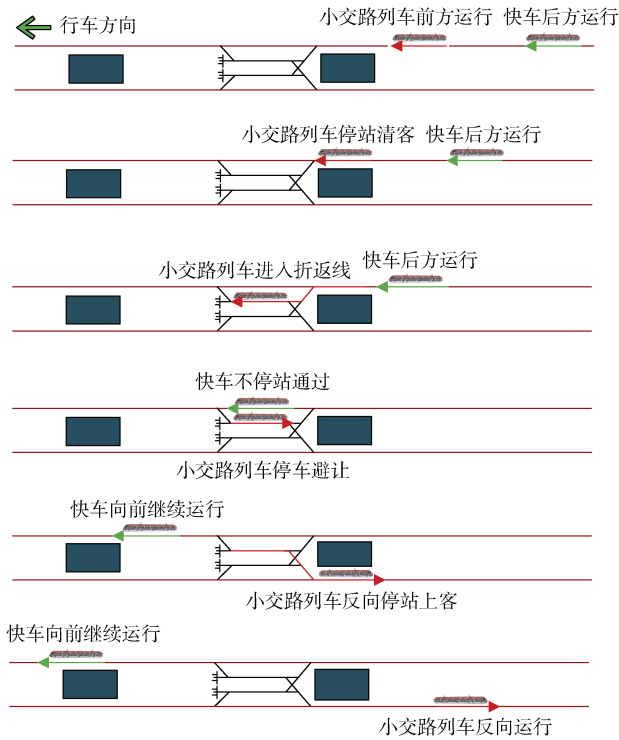


图 5 利用小交路折返开行快慢车原理

Figure 5 Schematic illustration of the principle of using part route shuttle to run fast and slow trains

3) 优缺点分析。该方法通过小交路折返站清客的手段有效避免了慢车载客在停车线长时间停车带来的管理问题和安全问题，但由于开行了小交路列车，导致小交路以外区段服务水平有所降低。

4) 运营要求。为解决小交路以外区段服务水平较低的问题，可以通过调整快车的停站方式实现，将快车在小交路以外区段车站调整为站站停，增加列车的覆盖密度，保证服务水平。目前该方法在国内并无实际应用，国外应用较多。典型的案例有日本横滨市营地铁 BLUE-Line，如图 6 所示，从 2015 年 7 月 18 日(周六)起，正式开行快慢车。

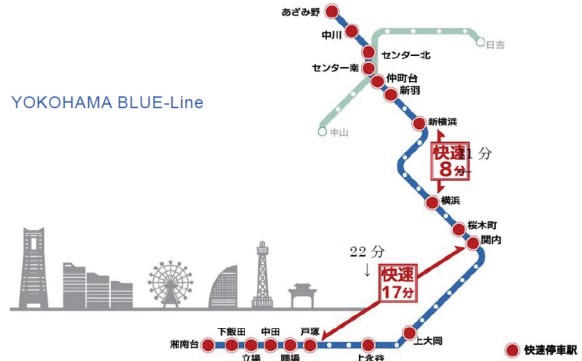


图 6 日本横滨市营地铁蓝线线路示意

Figure 6 Schematic illustration of Yokohama Blue-Line

该线路规划时并未设置避让线，开通运营后也未开行小交路列车。后续为满足客流需求，利用新羽站和踊场站既有的配线条件开行两种小交路列车，实现了快慢车运营的功能。为保证小交路以外区段的服务水平，快车在新羽站和踊场站以外车站均为站站停，如图 7、8 所示。

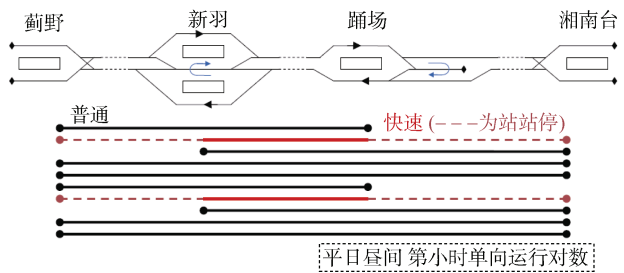


图 7 日本横滨市营地铁蓝线快慢车停站方案

Figure 7 Express/local train stop scheme of Yokohama Blue-Line

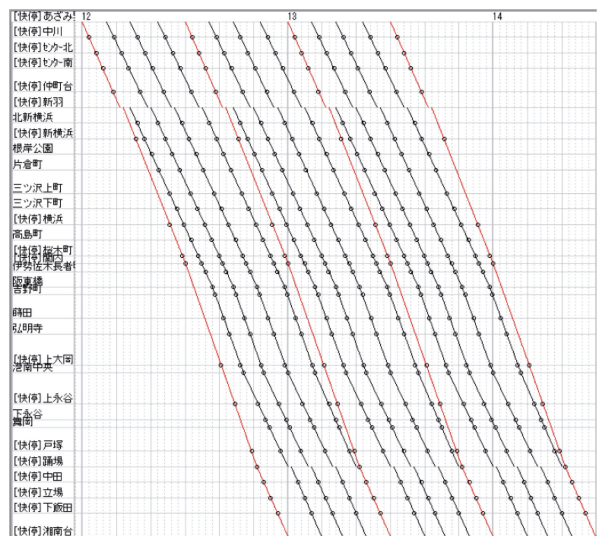


图 8 日本横滨市营地下铁蓝线快慢车开行方案

Figure 8 Plan for running fast and slow trains on the Blue Line of Yokohama

## 2.4 方法 4: 利用故障停车线开行快慢车

既有线路由于无常规避让条件,采用追踪运行模式时会存在线路运输能力降低、快车提速效果不明显、运营组织复杂等问题。为此,可尝试利用线路的既有工程条件,即区间的故障停车线。

1) 适用条件。该方法适用于具有明显的点到点跨站客流,全线设置有故障停车线,并分布在合适车站的线路。

2) 开行原理。根据《地铁设计规范》(GB50157—2013)第 6.4.3 条规定:正线应每隔 5~6 座车站或 8~10 km 设置停车线;停车线应具备故障车待避和临时折返功能;停车线尾端应设置单渡线与正线贯通。因此,我国已建的轨道交通线路,基本上每隔 8~10 km 都设置有与正线贯通的停车线,如图 9 所示。

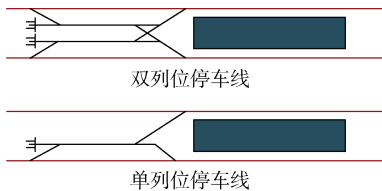


图 9 地铁常见停车线示意

Figure 9 Schematic illustration of common metro stop lines

慢车避让的本质是慢车离开正线,以空出正线的通过进路,在固定停车线上停车,等待快车通过,然后再进入正线正常运营。因此,常规停车线具备慢车停车避让的功能,对于开行快慢车需求较为强烈的线路,可以利用故障停车线作为慢车待避线,以实现快慢车的开行。开行原理如图 10 所示。

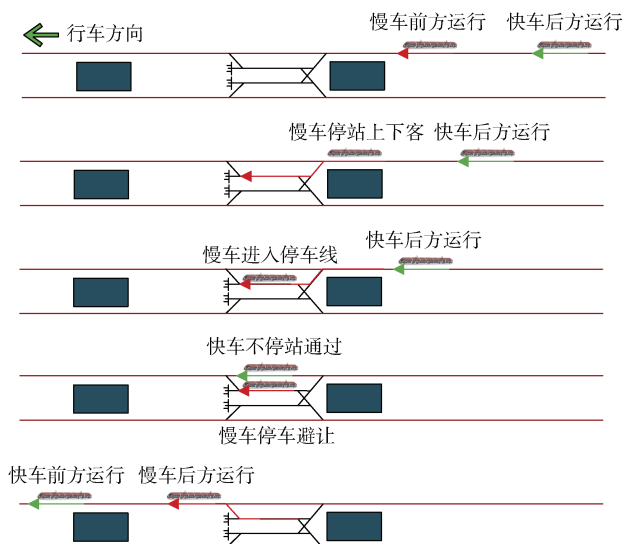


图 10 故障停车线作为待避线原理

Figure 10 Schematic illustration of the principle of failure train stop lines as waiting tracks

3) 优缺点分析。利用故障车停车线作为慢车待避线为既有线路开行快慢车提供了新的思路,是对既有设施的最大化利用。但仍存在部分问题需要解决:一是慢车载客长时间在区间停车,降低了慢车的运行效率,影响线路的通过能力;二是慢车在车站和停车线两次停车,乘客等待时间长,客运管理难度大;三是对于单列位停车线,上下行无法同时开行快慢车。

以国内运营最多的 6 辆编组地铁 B 型车线路为例,开行快慢车后慢车车站作业时间达到 211 s,普通车仅为 107 s,也就是开行快慢车后,慢车旅行时间增加 104 s,乘客需要多等 104 s,如图 11、12 所示。

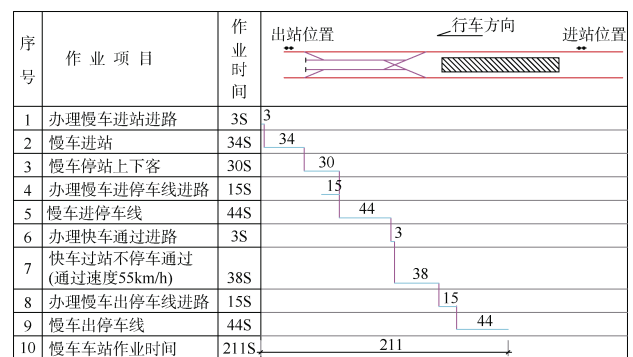


图 11 慢车待避站作业流程

Figure 11 Flowchart of waiting stations for slow trains

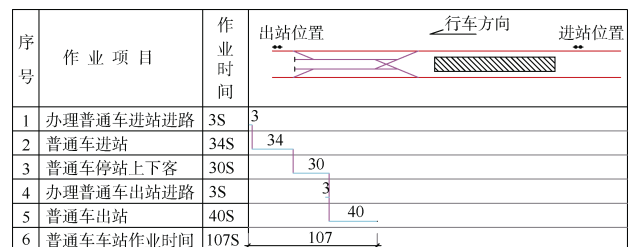


图 12 普通车站作业流程

Figure 12 Flowchart of stations for ordinary trains

4) 相关要求。在实际运营和规划过程中可采取如下措施:①实际运营前进行相关保障设施的改造和升级。故障车停车线上增设照明和疏散平台等,安抚和切实保障乘客在非站台区域避让等待引起的不适感。②运营过程中加强管理措施,人性化服务乘客。对于常规避让站(双岛四线型式等),慢车一般在车站停车开门待避,乘客容易接受,但对于既有线路利用停车线开行快慢车,慢车需要载客关门在区间长时间停车,容易导致乘客投诉等问题。

一般可以通过加强运营管理措施进行缓解。如拓宽乘客信息发布渠道,优化乘客界面;强化客流组织,

深化客流引导;加强宣传推广,人性化服务乘客等<sup>[8]</sup>。针对仅设置有单停车线的既有线路,可以结合线路客流的潮汐特征,单方向开行快慢车。③规划线路采用多功能故障停车线配线型式。针对后续的规划线路,根据对城市规划发展的判断和客流预测成果,如果存在开行快慢车的可能性,故障停车线的配线型式可以由传统的单列位停车线和双列位停车线(见图9),调整为一岛四线停车线(见图13),该配线形式具有故障车待避的功能,同时还可以预留后期开行快慢车的条件,而且在采用9号道岔的情况下,工程规模比单列位停车线和双列位停车线要小。但如果后续存在作为小交路折返站的可能性,则还是适宜采用双列位停车线。

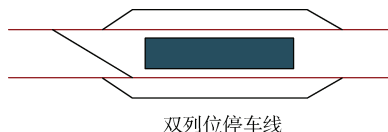


图13 一岛四线故障车停车线示意

Figure 13 Schematic illustration of failure train stop lines for one island and four lines

### 3 既有线路开行快慢车的改造内容

既有线路开行快慢车,为避免对既有运营造成较大的影响,应遵照不改造或尽量少改造的原则。但由于多数线路规划建设时并未考虑快慢车运营组织模式,因此仍需对部分设备系统进行升级改造,主要涉及信号系统和通信系统。

#### 3.1 信号系统升级改造

对于常用的基于通信的移动闭塞CBTC系统,主要涉及中心软件修改。ATS列车自动监控子系统在定义列车运行交路时,增加列车交路的快慢车属性,系统通过列车运行交路识别相应的快慢车属性,并自动匹配相应的交路控制列车运行。ATS子系统需要将乘降和跳停的站台固定,作为系统对快车的缺省设置。在ATS人机界面中对快慢车应有明显的区分显示,对外部其他系统接口中应提供相应的快慢车属性。

#### 3.2 通信系统改造升级

快慢车开行并不影响无线通信系统的使用,但对于PIS乘客信息系统来说,PIS的相关信息均来自ATS系统。由ATS系统确定快慢车的相关信息,PIS系统根据ATS信息进行播放。若不涉及对PIS软件版面进行修改,快慢车不影响PIS的正常显示。若由于快慢车导致PIS软件版式发生变化,软件需进行部分修改,

相关版式变化根据具体需求来确定。

对于广播系统来说,广播的相关信息也均来自ATS系统。由ATS系统确定快慢车的相关信息,广播根据ATS信息进行播报。由于存在过站不停车的相关情况,车站广播软件要做部分修改。

#### 3.3 其他方面改造升级

除信号系统及通信系统有所调整外,由于开行了快慢车,导致原发车时刻和行车间隔有所调整,一般根据客流特征和需求进行快慢车开行时刻表的调整。为解决列车到达、发出时刻不规律性问题,运营公司应提前采取各种途径向乘客发布时刻表等措施加强信息传播,实现乘客按时乘车,避免长时间等待。因此还会增加时刻表发布等改造内容。

以南京地铁宁溧线为例,线路全长30.16 km,共设置9座车站,列车采用B型鼓形列车4辆编组,土建预留6辆编组,列车最高运行速度100 km/h。线路规划设计阶段未考虑快慢车运营组织模式,为实现快慢车运营,对全线的信号、通信、时刻表等系统进行了改造,改造周期约4个月,合计改造费用约260万元。除改造费用外,加开快车后还会增加一定的运营成本,经核算,合计增加运营成本约2.6万元/d,约949万元/a<sup>[3]</sup>。

### 4 结束语

既有线路为满足客流需求开行快慢车是城市轨道交通实现高质量发展的重要途径,能够为乘客带来便捷的乘车体验,同时也会带来较为可观的社会效益。根据南京地铁宁溧线的运营成果,宁溧线每日开行2对大站快车,可实现南京南站、以北站点出发到达空港江宁站—翔宇路南站范围以及宁高线各站的乘客节省约6.5 min的出行时间,南京南站及以北站点出发到达溧水站及以南站点能节省约15.7 min的出行时间。根据调查,乘客及相关部门对开行的快慢车方案相当满意,对地铁运营部门积极研究开行快慢车的工作给予了充分的肯定和鼓励。另外,经核算该线路开行快慢车能带来的社会效益为4.05万元/d,约1478万元/a。

本文针对既有线路开行快慢车的适用条件、开行方法、运营要求等进行了研究,供相关运营单位参考借鉴。本文探讨的是在不改造或尽量少改造土建工程的原则下开行快慢车的方法,后续相关城市可在有客流需求的前提下,根据自身的运营条件,研究改造土建工程条件下开行快慢车的方法,以进一步完善既有线路开行快慢车的方法体系。

## 参考文献

- [1] 国务院办公厅. 关于推动都市圈市域(郊)铁路加快发展的意见(国办函〔2020〕116号)[Z]. 北京, 2020.
- [2] 北京地铁运营有限公司. 北京地铁“超常超强运行图”诞生记[J]. 城市轨道交通, 2020(7): 32-38.
- [3] 华杰, 闻千. 南京市域线运营优化研究: 以宁溧线、机场线为例[J]. 工程技术, 2021, 12: 261-264.
- [4] 刘炳强. 哈尔滨地铁1#线客流特征与开行方案分析[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(2): 165-168.  
LIU Bingqiang. Analyze passenger flow characteristics and operation plan of Harbin metro line 1[J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2021, 44(2): 165-168.
- [5] 代然然. 天津地铁3号线快慢车组合运行模式研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.  
DAI Ranran. Study on combination operation of express/local trains on Tianjin metro Line 3[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [6] 于德涌. 既有城市轨道交通线路开行大站快车影响因素及方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(7): 88-92.  
YU Deyong. Study on influencing factors and schemes of operation of express trains at large stations on existing urban rail transit lines[J]. Modern urban transit, 2021(7): 88-92.
- [7] 郑铨, 宋瑞, 何世伟, 等. 城市轨道交通跨站停车方案优化模型及算法[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 1-8.  
ZHENG Li, SONG Rui, HE Shiwei, et al. Optimization model and algorithm of skip-stop strategy for urban rail transit[J]. Journal of the China railway society, 2009, 31(6): 1-8.
- [8] 赖素欢. 城市轨道交通快慢车运营模式下的客运组织研究[J]. 科技传播, 2016, 8(7): 174-175.  
LAI Suhuan. Research on passenger transport organization under the operation mode of fast and slow trains in urban rail transit[J]. Public communication of science & technology, 2016, 8(7): 174-175.

(编辑: 王艳菊)

(上接第81页)

- [5] 黄美群, 杨秀仁, 钟元元, 等. 装配式地铁车站结构接缝防水关键技术研究与应用[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(2): 62-71.  
HUANG Meiqun, YANG Xiuren, ZHONG Yuanyuan, et al. Research and application of key technology of joint waterproofing for prefabricated metro station structures[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(2): 62-71.
- [6] 叶飞, 刘丰军, 黎柯军. 隧道工程渗漏水机理及防治[J]. 铁道建筑, 2006, 46(12): 51-54.  
YE Fei, LIU Fengjun, LI Kejun. Mechanism and prevention of water leakage in tunnel engineering[J]. Railway engineering, 2006, 46(12): 51-54.
- [7] 刘会迎, 宋宏伟. 隧道渗漏水成因分析及治理措施研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, 26(4): 54-56.  
LIU Huiying, SONG Hongwei. Genetic analysis and preventing measures for the tunnel water penetration and water leakage[J]. Journal of Chongqing Jiaotong university (natural science), 2007, 26(4): 54-56.
- [8] 李鑫. 公路隧道渗漏水病害检测及评价体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
LI Xin. Research on seepage diseases detection and evaluation system of highway tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [9] 董飞, 房倩, 张顶立, 等. 北京地铁运营隧道病害状态分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 104-113.  
DONG Fei, FANG Qian, ZHANG Dingli, et al. Analysis on defects of operational metro tunnels in Beijing[J]. China civil engineering journal, 2017, 50(6): 104-113.
- [10] 罗鑫. 公路隧道健康状态诊断及系统的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
LUO Xin. Study of diagnosis method and system for health condition of highway tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] 陈宁威. 南京地铁1号线明挖区间隧道渗漏水治理技术[J]. 中国建筑防水, 2011(24): 22-24.  
CHEN Ningwei. Leakage treatment technology of open excavated running tunnels of Nanjing subway line 1[J]. China building waterproofing, 2011(24): 22-24.
- [12] 黄强, 黄宏伟, 张锋, 等. 饱和软土层地铁列车运行引起的环境振动研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 563-567.  
HUANG Qiang, HUANG Hongwei, ZHANG Feng, et al. Research on environmental vibration response of soft saturated soil due to moving metro train[J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(S1): 563-567.

(编辑: 傅依萱)