

CBTC 系统保护区段触发策略的优化*

李洁¹ 周光磊² 王洪伟³

(1. 北京市地铁运营有限公司技术创新研究院分公司, 100082, 北京; 2. 北京交大微联科技有限公司, 100043, 北京;

3. 北京交通大学国家轨道交通安全评估研究中心, 100044, 北京)

摘要 [目的]城市轨道交通线路的 CBTC(基于通信的列车控制)系统在特定场景中具有一定的局限性:当一条进路存在多个保护区段时,联锁无法根据列车的前进方向灵活选择保护区段,难以满足灵活、自动建立进路的需求,需要优化保护区段触发策略。[方法]简要介绍了 CBTC 系统下进路触发及保护区段设置的基本原理,列举了既有保护区段控制方案下的 2 个典型问题场景。提出了保护区段触发策略优化方案,即由 ATS(列车自动监控)自动选择保护区段方向并交由联锁执行。以场景一(列车跳停回库)为例,根据列车动力学特征,对优化前后的列车跳停性能进行了对比分析。[结果及结论]以列车跳停回库为场景案例的分析结果表明,优化保护区段控制策略后,列车跳停的时间性能大为提升。此优化方案具有可行性,可显著提高办理保护区段的灵活性,提升列车跳停的效率。

关键词 城市轨道交通; 基于通信的列车控制; 保护区段; 排列进路

中图分类号 U284.48;U237.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.018

Optimization of CBTC System Protection Section Trigger Strategy

LI Jie¹, ZHOU Guanglei², WANG Hongwei³

(1. Research Institute of Technical Innovation, Beijing Subway Operation Co., Ltd., 100082, Beijing, China; 2. Beijing Jiaoda Microunion Technology Co., Ltd., 100043, Beijing, China; 3. National Research Center of Railway Safety Assessment, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China)

Abstract [Objective] The CBTC (communication-based train control) system on urban rail transit lines has certain limitations in specific scenarios: when there are multiple protection sections along a route, the interlocking system cannot flexibly select protection sections based on the train forward direction, causing inability to meet the requirements of flexible and automatic route arrangement establishment. Therefore, there is a need to optimize the protection section trigger strategy. [Method] The basic principles of route triggering and protec-

tion section setup in CBTC system are briefly introduced, highlighting two typical problem scenarios under existing protection section control schemes. An optimization scheme for the protection section trigger strategy is proposed, where ATS (automatic train supervision) automatically selects the protection section direction and delegates it to the interlocking system. Taking scenario I (train skip-stop and turn-back to depot) as example, according to train dynamics characteristics, the train skip-stop performance before and after optimization is compared and analyzed. [Result & Conclusion] The case analysis results of train skip-stop and turn-back to depot scenario show that after optimizing the protection section control strategy, the time performance of train skip-stop is greatly improved. The proposed optimization method is feasible and can significantly enhance the flexibility of protection section handling, improving the efficiency of train skip-stop.

Key words urban rail transit; CBTC; protection section; route arrangement

在城市轨道交通线路的 CBTC(基于通信的列车控制)系统中,联锁接收 ATS(列车自动监控)的排列进路命令,为列车办理进路并锁闭保护区段。在常规的进路控制模式和保护区段设置原则下,当一条进路存在多个保护区段时,联锁无法根据列车的前进方向灵活选择保护区段。这导致 CBTC 系统在特定场景中具有一定的局限性,也在一定程度上影响了城市轨道交通线路运输能力的提升。

本文提供一种 ATS 基于当前列车运营计划和运行状态为联锁提供保护区段命令的方式,以解决联锁无法自主选择保护区段方向的局限性,进而减少列车运行时间,提高线路通过能力。

1 进路触发及保护区段设置

在城市轨道交通线路的日常运营中,为了尽可能降低调度员的工作强度,避免人为操作带来的失

* 国家自然科学基金重大项目(71942006);中央高校基本科研项目(2021QY007)

误,CBTC 系统的进路控制由 ATS 的进路自动触发功能来实现。OCC(运营控制中心)的 ATS 或者车站 ATS 根据行车计划等判断列车的后续进路方向,自动将进路命令下发给联锁。

联锁排列进路时,除了建立列车主进路外,还要在进路终端设置保护区段。其中:设于进路内方一定距离的保护区段称为内置保护区段;设于进路外方独立计轴区段的保护区段称为外置保护区段,外置保护区段一般设置在站台或临时停车线处^[1]。外置保护区段既能避免发生列车无法在信号机前正常停车的冒进事故,也能保证列车以较高速度进站且不触发紧急停车防护,保障行车效率^[2-3]。

2 既有保护区段控制方案下的典型问题场景

2.1 保护区段建立方案

当保护区段内无道岔时,保护区段是唯一的。当保护区段内有道岔时,该进路存在多个保护区段。联锁排列进路时,默认设置唯一的保护区段或优先级最高的保护区段(一般为道岔定位方向)。若要设置其他方向的保护区段,须在排列进路前锁闭反位道岔或预先排列后续进路,这两个操作均需人工来实现。

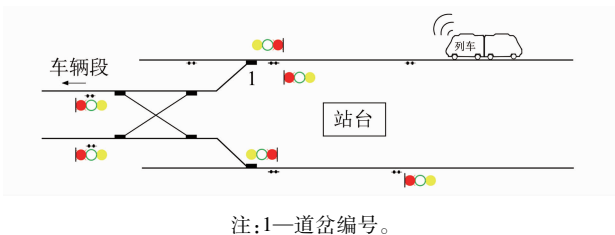
在常规自动触发进路模式下,当后续进路为过走防护道岔反位方向时,要等列车完全停稳且保护区段解锁后,联锁方能为列车建立前方侧向进路^[4]。

2.2 典型问题场景描述

当站台区段存在多个保护区段且列车需要跳停通过站台时,既有保护区段控制方案的约束尤为突出,存在无法为后续列车选择合适的保护区段、进而影响行车效率的典型问题。该类问题具体表现在以下 2 个场景中。

2.2.1 场景一

图 1 为联锁无法自主选择保护区段方向的典型场景一。如图 1 所示,早晚高峰时段结束后,某列车结束运营返回车辆段,运营计划为列车跳停通过站台。此时 ATS 为列车触发进站进路,联锁默认锁闭道岔 1 定位方向的外置保护区段。列车进入站台后需停车等待,直到保护区段解锁。保护区段解锁后,联锁建立道岔侧向的回库进路后,列车才能继续行驶,进入车辆段。



注:1—道岔编号。
图 1 联锁无法自主选择保护区段方向的典型场景一
Fig. 1 Typical scenario I where interlocking cannot automatically select the direction of protection section

2.2.2 场景二

图 2 为联锁无法自主选择保护区段方向的典型场景二。如图 2 所示,为提高上行方向的运力,某列车计划跳停通过下行站台,并在站后折返至上行方向。与场景一类似,列车进入站台后需要停车,等待保护区段解锁。保护区段解锁后,联锁方能建立折返进路。

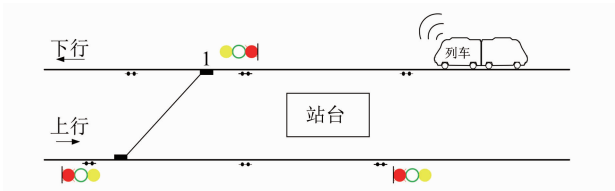


图 2 联锁无法自主选择保护区段方向的典型场景二
Fig. 2 Typical scenario II where interlocking cannot automatically select the direction of protection section

由此可见,按照当前的保护区段控制策略,列车在场景一和场景二下无法真正实现列车跳停通过站台,依然需要停车等待,这在一定程度上影响了列车的运行效率。受功能所限,联锁无法自主选择保护区段方向,难以满足灵活、自动建立保护区段的需求。为此,本文重点对保护区段的触发策略进行优化,以解决此问题。

3 保护区段触发策略优化方案

3.1 保护区段优化方案

考虑到 CBTC 系统的计划性,ATS 能够准确获取列车的运行计划,并确定其后续进路方向和目的地。为此,本文调整了保护区段的触发策略,对原有的联锁建立默认保护区段方案进行优化,改为由 ATS 根据列车走向选择保护区段并下发给联锁执行的方案,以实现灵活建立保护区段的目的,彻底解决上文所述场景一和场景二的典型问题。在自动触发进路功能的基础上,ATS 可根据列车运行图或目的地号自动选择进路保护区段。ATS 将进路信息和保护区段信息分别发送至联锁,联锁根据指令办

理进路并锁闭指定的保护区段。

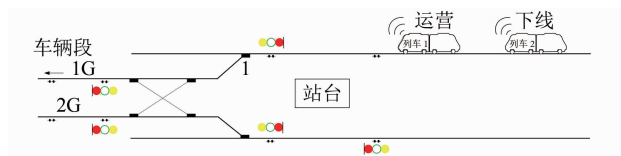
ATS 自动触发进路前,须判断保护区段内是否有道岔,以及该区段是否处于锁闭状态。当保护区段内有道岔且未锁闭时,ATS 将排列进路命令及与列车运行目的地匹配的保护区段设置命令发送给联锁;否则,仅将排列进路命令发送给联锁。

当列车已进入进路内方,所在进路保护区段没有锁闭时,ATS 需要判断进路内列车的数量及追踪状态。若该列车为进路内的第 1 列车,ATS 将向联锁发送所需保护区段的设置命令。若该列车不是进路内的第 1 列车,则待前车出清保护区段后,ATS 再根据该列车的位置和目的地信息周期性(1 s 为 1 个周期)地向联锁发送保护区段命令,直到保护区段锁闭为止。当 ATS 无法判断列车目的地时,可由调度员人工选择保护区段并将信息发送给联锁。

联锁根据 ATS 指令分别执行排列进路和建立保护区段命令,同时将进路和保护区段状态周期性发送给 ATS。

3.2 优化后的场景分析

基于优化后的保护区段触发策略,对上文所述 2 个典型场景下两车追踪情况作进一步的分析。图 3 为场景一优化后的两车追踪场景。本文将运行在 CBTC 级别的列车简称为 CBTC 车。如图 3 所示:列车 1(CBTC 车)为运营列车,在站台停车后继续直行;列车 2(CBTC 车)为下线列车,列车跳停通过站台后回车辆段。当列车 1 直行出清保护区段后,道岔 1 所在保护区段解锁。此时列车 2 在进路内方,联锁依据指令为列车 2 锁闭道岔反位的保护区段,并在列车进站前排列好回段进路。列车 2 进入站台后无须停车直接行驶回车辆段。



注:1G、2G—轨道区段编号。

图 3 场景一优化后的两车追踪场景

Fig. 3 Scenario I with double trains tracking after optimization

图 4 为场景二优化后的两车追踪场景。如图 4 所示:根据运营计划,列车 1(CBTC 车)在下行站台直行通过,列车 2(CBTC 车)在站后折返后行驶至上行线路,两车均在下行方向跳停通过站台。当列车 1 直行通过下行站台时,保护区段建立在道岔 1 定位方向。列车出清保护区段后,联锁建立道岔 1

反位方向的保护区段,同时排列好折返进路。列车 2 可直接跳停经过站台进入折返进路。当 ATS 无法自动触发进路、需要人工排列进路时,可以在排列进路时人工选择保护区段的方向。

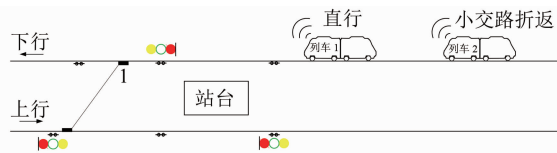


图 4 场景二优化后的两车追踪场景

Fig. 4 Scenario II with double trains tracking after optimization

通过上述的分析可知:优化保护区段控制策略后,联锁可更灵活地建立保护区段,减少了列车停站时间,真正实现了这 2 个场景下列车跳停经过站台的功能,大大提高了列车的运行效率。

4 优化前后列车跳停过站时间性能对比分析

以场景一为例,作进一步的列车跳停过站时间性能分析。分别针对保护区段控制策略优化前和优化后,在 CBTC 和非 CBTC(即 CBTC 系统失效,列车以点式 ATP(列车自动防护)模式运行)两种制式下,对回库列车从进站到驶入站后 1G 所需要的时间进行对比。

4.1 场景一优化前的回库列车跳停过站时间分析

4.1.1 CBTC 制式下列车跳停过站时间分析

CBTC 车进站后制动停车,VOBC(车载控制器)判断列车停稳后,将列车停稳信息发送给联锁。联锁为保护区段解锁并办理回库进路。信号开放后,列车起动,驶过站后岔区进入 1G。CBTC 列车从进站到驶入站后 1G 所需时间 T_{ct} 的计算式为:

$$T_{ct} = T_b + T_{p,u} + T_g + T_r + T_t + T_{p,d} + T_s \quad (1)$$

$$T_b = \sqrt{2s_p/a_b} \quad (2)$$

$$T_s = \sqrt{2s_z/a_t} \quad (3)$$

式中:

T_b ——列车进站制动所需时间;

$T_{p,u}$ ——VOBC 将列车停稳信息发给联锁的时间;

T_g ——保护区段解锁时间;

T_r ——进路命令下达的时间;

T_t ——回库进路办理时间(含转动道岔时间);

$T_{p,d}$ ——地面 ATP 将列车移动授权发送至 VOBC 的时间;

T_s ——列车从停车点驶入 1G 的时间;

s_p ——列车从进入车站到停车所行驶的距离;

a_b ——列车的制动加速度;

s_z ——列车从停车点至完全进入 1G 的行驶距离;

a_t ——列车的牵引加速度。

4.1.2 非 CBTC 制下列车跳停过站时间分析

非 CBTC 车进站后,保护区段延时一定时间解锁,列车在此期间已停稳。联锁排列回库进路,列车起动并驶入 1G。非 CBTC 车从进站到驶入站后 1G 所需时间 T_{ut} 的计算式为:

$$T_{ut} = T_v + T_g + T_r + T_t + T_{h,d} + T_s \quad (4)$$

式中:

T_v ——保护区段延时时间;

$T_{h,d}$ ——司机确认信号开放所需时间。

4.2 场景一优化后的回库列车跳停过站时间分析

基于本文所提出的进路控制和保护区段分配方式,列车可真正实现站台跳停,保护区段和进路均能在列车进站前完成设置。因此,无论列车是否处于 CBTC 制式,列车均能以最高限速通过站台并驶入 1G。由此可求得场景一优化后列车从进站到驶入站后 1G 所需时间 T_o 的计算式为:

$$T_o = (v_r - v_c) / a_b \quad (5)$$

由于

$$v_r^2 - v_c^2 = 2a_b(s_p + s_z) \quad (6)$$

式中:

v_r ——列车进站的最大运行速度,其值等于站台限速;

v_c ——列车通过侧向道岔的最大运行速度,其值等于侧向道岔最高限速。

由此可得:

$$T_o = (\sqrt{2a_b(s_p + s_z)} + v_c - v_c) / a_b \quad (7)$$

4.3 列车跳停过站时间性能对比分析

本文设定的线路参数如下: $v_c = 35 \text{ km/h}$, $s_p = 200 \text{ m}$, $s_z = 300 \text{ m}$ 。设定的列车参数如下: $a_b = a_t = 0.8 \text{ m/s}^2$ 。

1) 场景一优化前,考虑到无线传输的时间很短,将 $T_{p,u}$ 和 $T_{p,d}$ 设置为通信周期,即 $T_{p,u} = T_{p,d} = 200 \text{ ms}$,这 2 个时间段可以忽略。此外,保护区段的解锁时间为软件计算过程,故 T_g 为毫秒级,也可以忽略。设定 $T_r = 4.00 \text{ s}$, $T_t = 8.00 \text{ s}$, $T_v = 45.00 \text{ s}$, $T_{h,d} = 1.00 \text{ s}$,由式(1)计算可得 $T_{ct} = 61.75 \text{ s}$,由式(4)计算可得 $T_{ut} = 85.39 \text{ s}$ 。

2) 由式(7)计算可得:场景一优化后,回库列车过站进入站后 1G 所需时间 $T_o = 12.50 \text{ s}$ 。

由此可知:本文所提的优化方法具有可行性。与场景一优化前的 CBTC 车、非 CBTC 车相比,优化后列车从进站到驶入站后 1G 所需时间分别减少了 49.25 s、72.89 s。

场景一优化前和优化后列车跳停过站时间的性能对比如图 5 所示。由图 5 可看出:优化前 CBTC 车和非 CBTC 车的时间差距在于停站时间的不同,这主要是非 CBTC 列车受到保护区段延时解锁时间的影响。优化后,列车无论在站台区段还是站后区段所用的时间都明显缩短,列车跳停过站时间仅受站台限速和道岔侧向限速的影响。

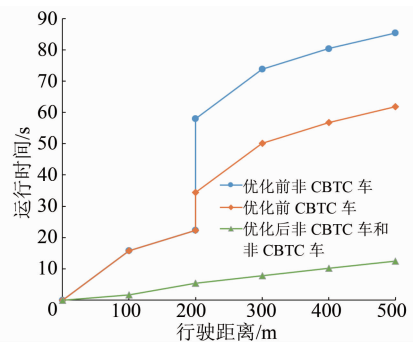


图 5 场景一优化前和优化后列车跳停过站时间的性能对比图
Fig. 5 Comparison diagram of train skip-stop time performance before and after optimization in Scenario I

由此可见,优化保护区段控制策略后,列车跳停过站时间性能得到大大提升。在客流压力日趋变大、列车发车间隔越来越小的情况下,该优化方案能够有效提升线路运力,为运营组织模式的创新提供新的技术途径。

5 结语

本文针对 CBTC 系统既有保护区段设置和建立原则的局限性,提出了一种基于 ATS 自动选择保护区段的优化控制策略。考虑到列车运行的计划性,ATS 根据列车的前进方向选择保护区段的方向,生成相关指令发送至联锁,联锁执行建立保护区段的命令。

本文所提的基于 ATS 自动选择保护区段的方法在解决灵活办理保护区段问题上具有很大的优势,可以解决联锁只能办理单一方向保护区段的问题。本文以列车跳停回库为场景案例的分析结果表明,优化保护区段控制策略后,列车跳停过站时间性

能大为提升。此优化方案大大提高了办理保护区段的灵活性,提升了列车运营的效率。

参考文献

[1] 张大涛. 城市轨道交通信号系统保护区段设置的研究[J]. 控制与信息技术, 2020(2): 85.
ZHANG Datao. Research on protection section setting of urban rail transit signaling system[J]. Control and Information Technology, 2020(2): 85.

[2] 孟军, 尹逊政, 李亮. CBTC 系统中保护区段的计算与优化[J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(3): 50.
MENG Jun, YIN Xunzheng, LI Liang. Computing and optimization of protection section in CBTC System[J]. Railway Computer Application, 2015, 24(3): 50.

[3] 陈虹. CBTC 中联锁对保护进路分类及处理方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(8): 47.
CHEN Hong. Classification and treatment of overlap protection route by interlocking subsystem of CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(8): 47.

[4] 刘江, 谢鲲. CBTC 系统在车站保护区段的解锁优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 55.
LIU Jiang, XIE Kun. Optimum scheme of overlap releasing in urban rail transit CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 55.

[5] 宁滨, 刘朝英. 中国轨道交通列车运行控制技术的应用[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 1.

NING Bin, LIU Chaoying. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 1.

[6] 刘会明, 高翔, 刘明霞. 互联互通的 CBTC 系统中 ATS 接口实现方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(增刊 1): 10.
LIU Huiming, GAO Xiang, LIU Mingxia. Implementation of ATS interface in interconnection and interoperable CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(S1): 10.

[7] 何占元, 阴佳腾, 王明主. 基于线性规划模型的城轨列车运行图调整策略[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(4): 296.
HE Zhanyuan, YIN Jiateng, WANG Mingzhu. Urban rail train diagram adjustment strategy based on linear programming model[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2019, 40(4): 296.

[8] 王婵婵, 陈菁菁. 城市轨道交通列车延误时多线换乘站列车跳停方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(12): 69.
WANG Chanchan, CHEN Jingjing. On the skip-stop schemes at rail transit transfer station in case of train delay[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(12): 69.

· 收稿日期:2021-09-26 修回日期:2022-01-04 出版日期:2024-04-10
Received:2021-09-26 Revised:2022-01-04 Published:2024-04-10

· 通信作者:李洁,高级工程师, ljbzx029@126.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

(上接第 94 页)

LI Jingxiang, ZHAO Shengdun. Research review of pneumatic exhaust noise time-frequency characteristics and suppression control[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(2): 14.

[6] 比斯, 汉森. 工程噪声控制: 理论和实践[M]. 邱小军, 于森, 刘嘉俊, 译. 北京: 科学出版社, 2013.
BEES D A, HANSEN C H. Engineering noise control—theory and practice[M]. QIU Xiaojun, YU Miao, LIU Jiajun, trans. Beijing: Science Press, 2013.

[7] 刘斌. Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
LIU Bin. Fluent 19.0 fluid simulation from entry to mastery[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.

[8] 詹福良, 徐俊伟. Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
ZHAN Fuliang, XU Junwei. Virtual. Lab Acoustics: acoustics

simulation calculation from introduction to mastery [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013.

[9] 李靖祥, 赵升吨, 钟斌, 等. 基于时频分析的非稳态排气噪声辐射特性研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50(1): 91.
LI Jingxiang, ZHAO Shengdun, ZHONG Bin, et al. Study on radiation characteristics of unsteady exhaust noise based on time-frequency analysis [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50(1): 91.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10

· 第一作者:张超,硕士研究生, 2437300013@qq.com
通信作者:王俊勇,教授, sfswjy@163.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