

# 基于车车通信列控系统的城市轨道交通列车运行效率分析

邓志翔<sup>1</sup> 王 成<sup>1</sup> 徐 军<sup>2</sup> 姜 西<sup>1</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

2. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 325088, 温州)

**摘 要** [目的]城市轨道交通 T2T(车车通信)列控系统是一种新型的信号系统,其通过资源化管理方式对轨旁设备进行管控。为了验证该系统的优越性,需对该系统下的列车运行效率进行分析。[方法]针对 T2T 列控系统,基于资源管理层面和安全防护原理的特点,在折返工况下,将原本由联锁控制的双动道岔转变为两个单动道岔,并基于列车精确自定位实现 ATP(列车自动防护),提高了岔区线路资源的使用能力;在区间和车站追踪工况下,通过前后车对于车速、加速度、所处线路位置等信息的实时互传,利用相对速度安全防护原理进一步缩小了列车的追踪间隔。通过上述两方面的技术革新,结合城市轨道交通线路的实际数据,对站后交叉渡线折返、站前单渡线折返、区间与车站追踪等运营场景进行了模拟仿真计算,确定了 T2T 列控系统的折返能力和区间追踪能力。[结果及结论]相较传统的 CBTC(基于通信的列车控制系统),T2T 列控系统在折返能力、追踪能力等方面均有着显著提升,更加适应于超大运量的城市轨道交通线路;T2T 列控系统架构简单,轨旁设备少,尤其适合城市轨道交通的大修改造项目。

**关键词** 城市轨道交通;列车;运行效率;列控系统;车车通信

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.019

## Analysis of Train Operation Efficiency of Urban Rail Transit Based on Train-to-train Communication Train Control System

DENG Zhixiang<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, JIANG Xi<sup>1</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. Wenzhou Mass Transit Railway Investment Group Co., Ltd., 325088, Wenzhou, China)

**Abstract** [Objective] The T2T (train to train) communication train control system in urban rail transit is a new type of signal system, and it manages and controls trackside equipment through resource management. To verify the superiority of the system, it is necessary to analyze the train operation efficiency

under this system. [Method] In view of the characteristics of the resource management and safety protection principles for T2T train control system, the originally interlocking controlled double action switch is transformed into two single action switches, and ATP (automatic train protection) is achieved based on train precise self-positioning under reversal working conditions. The utilization capacity of line resources in the turnout area is improved. Under tracking conditions in line sections and stations, the train tracking interval is further reduced by utilizing the principle of relative speed safety protection and by inter-transmitting the real-time information of speed, acceleration, and position between the front and rear trains. Through the technological innovation in the above two aspects and based on the actual data from urban rail transit lines, operation scenarios such as reversal on scissors crossover behind the station, reversal on single crossover in front of the station, tracking in line sections and stations are simulated and calculated. The capacity of the T2T train control system in train reversal and line section tracking is determined. [Result & Conclusion] Compared to the traditional CBTC (communication-based train control system), the T2T has significant improvement in reversal and tracking capacity and other aspects, which enables it to be more suitable for urban rail transit lines with super large traffic volume. The T2T train control system is also particularly suitable for urban rail transit renovation projects as it has a simple architecture and requires less trackside equipment.

**Key words** urban rail transit; train; operation efficiency; train control system; train to train communication

近年来,随着无线通信技术的不断迅猛发展,具有通信速率高、时延小、抗干扰能力强、移动接入性强的新型无线通信技术在城市轨道交通(以下简称“城轨”)CBTC(基于通信的列车控制)系统中被广泛应用,并助推了新一代列车运行控制系统(以下简称“列控系统”)的发展,T2T(车车通信)的列

控系统应运而生。目前,T2T 列控系统处于萌芽阶段:深圳地铁 20 号线是我国首条 T2T 工程项目,已于 2021 年底开通运营;青岛地铁 6 号线也已完成信号集成招标,正处于如火如荼的建设阶段。现阶段,T2T 列控技术有望成为下一代城轨列控系统的主流发展方向<sup>[1]</sup>。

## 1 T2T 列控系统的基本原理与特点

### 1.1 列车自主控制原理

T2T 列控系统是在传统 CBTC 系统的基础上,强调列车通过自身的感知手段实现列车运行控制。T2T 列控系统通过列车自主定位、自主测速、自主检测轨旁资源状态<sup>[2-3]</sup>,按照 ATS(列车自动监控)系统发送的运营计划,自主规划列车运行路径,与前后车进行实时交互,确定列车周围的障碍物信息,从而计算自身的移动授权,管理本列车的运行曲线,确定列车运行速度,实现列车高效安全的运行。

### 1.2 系统特点

具备自主控制能力的 T2T 列控系统,对轨旁资源的控制和管理更加合理化。每列车所具备的独立性和自主性,可以更好地体现其功能与性能。

1) 对线路和道岔资源的管理更加精细。线路资源的分辨率更高,可管理的资源颗粒度更小,从而有利于提高单位空间内的资源利用率。对于道岔资源,T2T 列控系统可对每组道岔独立操作,进而提高行车效率。道岔资源划分如图 1 所示。在同等土建规模下,为超大运量需求的工程线路提供了新的列控系统解决方案。

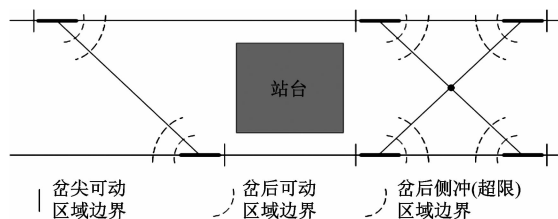


图 1 道岔资源划分示意图

Fig. 1 Turnout resource division diagram

2) 降低系统间的耦合度。线路上每列车均采用自主化控制方式,车载设备与轨旁设备的耦合度降低,设备的兼容性、通用性得到了增强,具备了实现系统互联互通和资源共享的系统属性。另一方面,在线路延伸、既有线改造等项目中,T2T 列控系统具有更强的实用性。

3) 提高了系统的可扩展性。T2T 列控系统间的关联性降低,因此每个子系统自身的可扩展得到了提高,具备向智能调度、智能运维、综合交通枢纽云平台、大数据等方向发展的潜力,为智慧城轨的发展提供了技术平台。

总体而言,T2T 列控系统在折返能力和区间追踪能力方面有着较大的提升。本文将从上述两方面对 T2T 列控系统与传统 CBTC 系统进行详细对比。

## 2 折返能力分析

### 2.1 折返能力的影响因素

在城轨折返作业过程中,对于折返能力的主要影响因素包括<sup>[4]</sup>:

1) 列车选型及编组。城轨中的列车选型和列车编组一般根据客流预测和土建投资规模来确定。列车编组越多,列车长度越长,列车折返时的走行距离越长,耗时也越长。

2) 站台至折返轨的距离。一般情况下,站台与折返轨的间距越小越好,这样可以减少列车折返过程中的空走距离,从而减小折返时间。

3) 折返轨长度。折返轨长度过长会造成土建投资规模上升;若过短则导致列车安全防护距离不足,从而列车驶入折返轨的速度偏低,使得折返时间变长,严重时会成为全线运营的瓶颈,导致运能下降。因此,折返轨的长度应在满足规范要求的前提下,结合列控系统的实际需求,取得土建投资和折返效率的平衡。

4) 折返线道岔侧向限速。折返线采用的道岔型号不同,则侧向限速也不同。道岔号越大,道岔长度越长,土建成本越高,列车通行速度也相对更高,因此折返线上道岔的选择也需取得土建投资和折返效率的平衡。

5) 系统响应时间。折返过程中的系统响应时间主要包括进路办理时间、车载列控系统换端时间、列车牵引/制动系统响应时间等。

综上所述,在车辆选型及编组(含牵引/制动系统性能)、道岔选型、土建规模确定的前提条件下,列控系统主要通过优化进路办理方式,来进一步缩短折返时间,提高折返效率。

### 2.2 站后折返能力分析

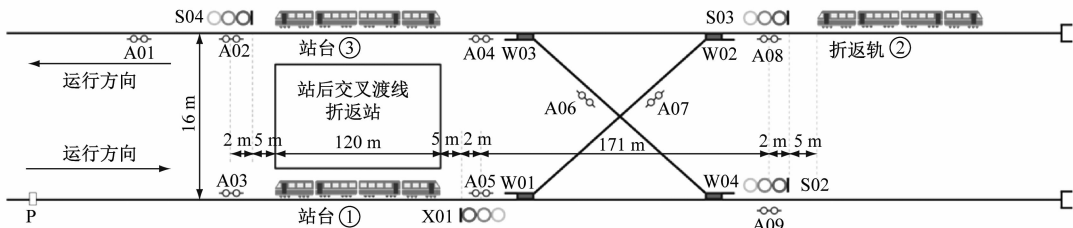
以常规城轨方案中宽 13 m 的岛式站台(线间距 16 m)站后交叉渡线折返线方案的站场布局为

例,并辅以 6 节编组 B 车型,即列车长度和站台有效长度均按 120 m 考虑,采用 60 kg/m 钢轨、9 号道岔,岔心距离有效站台端部 21 m。

### 2.2.1 CBTC 系统站后折返能力

按照 CBTC 系统的信号设备布置原则,本站的

信号设备布置如图 2 所示。有效站台端或列车精确停车后列车端部距离信号机按 5 m 计,信号机与计轴间距为 2 m,此时交叉渡线两端计轴间距为 171 m,并采用双动道岔控制逻辑。



注:A 为计轴;W 为道岔;S 为上行线信号机;X 为下行线信号机;P 为列车进站的干扰点。

图 2 站后折返线 CBTC 系统信号设备布置示意图

Fig. 2 Diagram of CBTC signal equipment layout for turn-back line behind station

图 2 中的 P 点为当前车驶向折返轨并出清站台防护区段后,后车办理站台接车进路到达的位置。CBTC 系统下列车站后折返仿真参数,如表 1 所示。

表 1 CBTC 系统下列车站后折返仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of train reversal behind station under CBTC

仿真参数	取值
列车及站台有效长度/m	120
列车运行速度从 0 增至 40 km/h 的平均加速度/( $\text{m/s}^2$ )	1.0
列车运行速度从 0 增至 80 km/h 的平均加速度/( $\text{m/s}^2$ )	0.6
常用制动率/( $\text{m/s}^2$ )	1.0
9 号道岔侧向临界速度/(km/h)	40
9 号道岔 ATO(列车自动运行)最大过岔速度/(km/h)	36
A01 与 A02 的距离/m	100
CBTC 进路办理时间/s	12
站台①停站时间/s	40
站台③停站时间/s	30
列车在折返轨等待时间/s	15
正线线路 ATO 最高速度/(km/h)	80
站台区域顶篷速度/(km/h)	60
站台区域 ATO 限速/(km/h)	56

CBTC 系统下列车站后折返的流程如下:

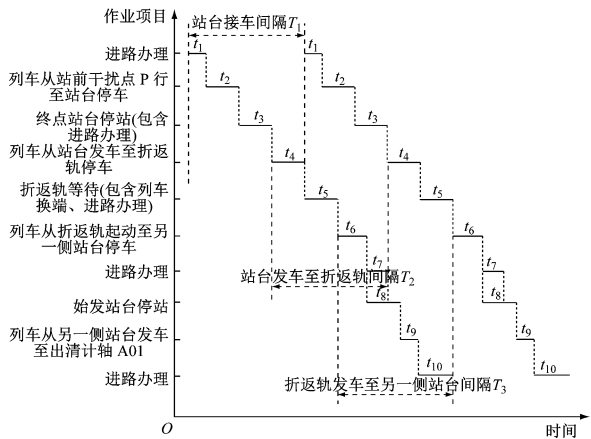
1) 当前车从站台①行驶至折返轨②处(即列车最后一个轮对越过 A08 计轴,考虑到列车越过 A08 计轴至列车在折返轨②处停车的时间间隔很短,在本仿真中忽略不计)时,后车进站的接车防护进路便可重新建立,后车刚好达到干扰点 P。

2) 当前车从折返轨②行驶至另一侧站台③处停车时(同理,此处将列车最后一个轮对越过 A04

计轴至停车的时间予以忽略),CBTC 系统即可重新办理从站台①至折返轨②的进路,后车开始从站台①起动向折返轨②发车。

3) 当前车在另一侧站台③停站上客,且起动发车出清外方保护区段(即列车最后一个轮对越过 A01 计轴)后,CBTC 系统即可重新办理由折返轨②至站台③的折出进路,后车开始向站台③发车。

CBTC 系统下列车站后折返流程示意,如图 3 所示。



注: $t_1$ — $t_{10}$  分别代表相应作业项目的作业时间。

图 3 CBTC 系统下列车站后折返流程示意图

Fig. 3 Flow diagram of train reversal behind station under CBTC

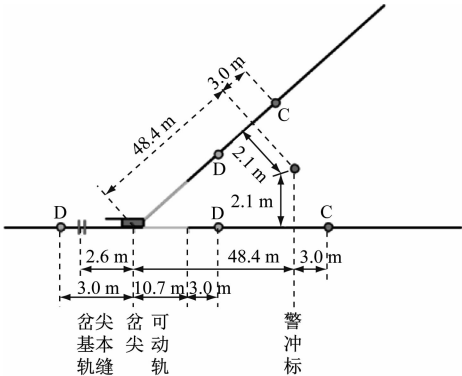
通过表 1 和相关参数的仿真计算,可得到: $t_1 = t_7 = t_{10} = 12.0 \text{ s}$ ,  $t_2 = 22.2 \text{ s}$ ,  $t_3 = 40.0 \text{ s}$ ,  $t_4 = 40.5 \text{ s}$ ,  $t_5 = 15.0 \text{ s}$ ,  $t_6 = 35.5 \text{ s}$ ,  $t_8 = 30.0 \text{ s}$ ,  $t_9 = 22.5 \text{ s}$ ,此时站台接车间隔  $T_1$  为 114.7 s。站台发车至折返轨间隔  $T_2$  为 103 s,折返轨发车至站台间隔  $T_3$  为 100 s。

故在该站型条件下,采用 CBTC 系统的站后折返间隔为 114.7 s。

2.2.2 T2T 列控系统站后折返能力

按照 T2T 列控系统的信号数据配置要求,将道岔划分为可动范围和侧防范围。本文仿真计算中,定义信号系统的模糊区段长度为 3 m。则在岔区运行时,车载 ATP(列车自动防护)所判定的道岔数据如图 4 所示。

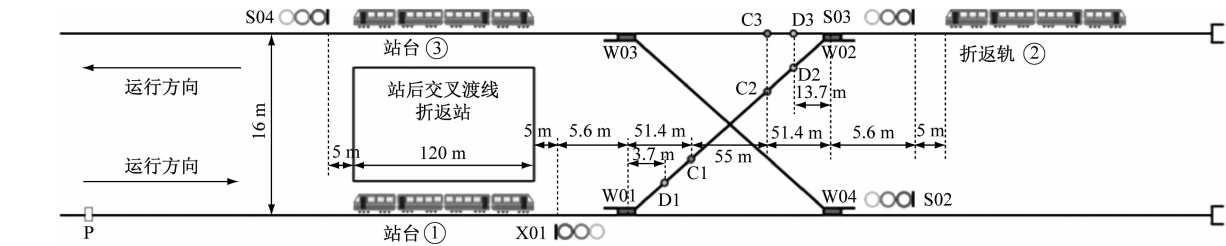
本文将岔尖至岔内第一轨缝视为道岔可动区域,其长度约 10.7 m;设备限界暂按 2.1 m 计算,则岔尖至警冲标约 48.4 m,所有道岔按照单动道岔进行控制。站后折返线 T2T 列控系统的数据配置如图 5 所示。



注:C 为 ATP 中的侧冲防护点;D 为 ATP 中的可动轨防护点。

图 4 9 号道岔 ATP 防护区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ATP protection area for turnout No. 9



注:C1、C2 分别为 W01、W02 道岔侧向岔根侧冲防护点;C3 为 W02 道岔直向岔根侧冲防护点;D1、D2 分别为 W01、W02 道岔侧向岔根可动轨防护点;D3 为 W02 道岔直向岔根可动轨防护点。

图 5 站后折返线 T2T 列控系统数据配置示意图

Fig. 5 Diagram of T2T control system layout for turn-back line behind station

站后折返线 T2T 列控系统的仿真参数,如表 2 所示。

表 2 站后折返线 T2T 列控系统仿真参数

Fig. 2 T2T simulation parameters of turn-back line behind station	
仿真参数	取值
列车及站台有效长度/m	120
列车运行速度从 0 增至 40 km/h 的平均加速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.0
列车运行速度从 0 增至 80 km/h 的平均加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.6
常用制动率/(m/s <sup>2</sup> )	1.0
9 号道岔侧向临界速度/(km/h)	40
9 号道岔 ATO 最大过岔速度/(km/h)	36
正线线路 ATO 最高速度/(km/h)	80
站台区域顶篷速度/(km/h)	60
站台区域 ATO 限速/(km/h)	56
列车在折返轨等待时间/s	12.0
轨旁设备动作时间/s	8.0
轨旁资源获取时间/s	2.0

T2T 列控系统的列车折返流程如下:

- 1) 在折返站对于接车而言,可根据与折返站台相连的道岔 W01 位置申请相应的资源,使得站台接车能力与正线的追踪间隔相接近。
- 2) 对于从站台①至折返轨②的折入流程而言,车车通信列控系统可实现在侧冲区域外方的追踪运行,由于道岔 W02 的侧冲区域、可动区域等资源均分配给前车,因此后车最远仅能运行至道岔 W02 的侧冲区域外方(C2 点左侧);当前车出清道岔 W02 的岔尖可动区域后,前车便可向轨旁申请 W02 道岔的定位资源,在道岔转动的同时前车在折返轨完成换端,待 W02 道岔转动到定位后,前车便获得了 W02 道岔出折返轨的可动区域资源,前车便可执行折出任务至另一侧站台③停车。
- 3) 当前车出清 W02 道岔可动区域(D3 点)后,后车便可申请 W02 道岔的可动资源,使 W02 道岔从定位转向反位;当前车出清 W02 道岔的侧冲区域(C3 点)后,后车便可申请并获得 W02 道岔的侧冲资源,使其从 W02 道岔侧冲区域外向折返轨②

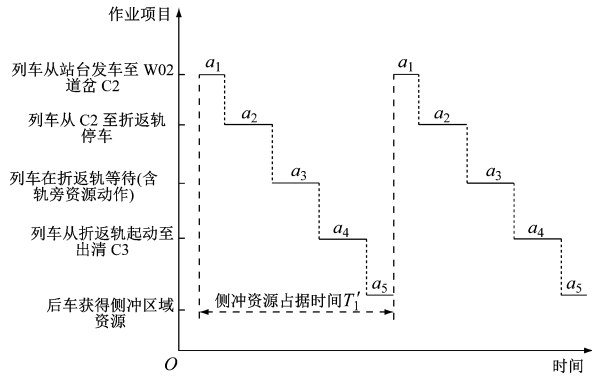


运行。

4) 待前车停站时间结束后,列车即可发车驶向下一站,整个折返过程完成。

T2T 列控系统折返时,其站台接车以及折返轨发车能力与正线追踪间隔相接近,因此 T2T 列控系统折返能力的关键点在折返时间。而在列车折返时,主要针对关键道岔 W02 侧冲资源和可动资源的获取和释放,因此,需分别计算侧冲资源占据时间  $T'_1$  和可动资源占据时间  $T'_2$ ,实际的折返时间为  $\max(T'_1, T'_2)^{[5]}$ 。

T2T 列控系统下站后折返线关键道岔 W02 侧冲资源的获取和释放流程如图 6 所示。



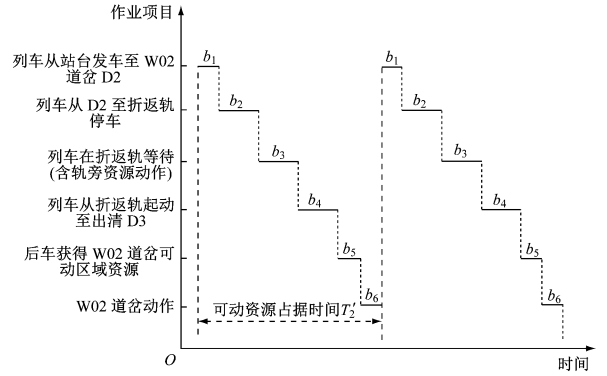
注:  $a_1$ — $a_5$  分别代表相应作业项目的作业时间。

图 6 T2T 列控系统下站后折返线道岔 W02 侧冲资源的获取和释放流程示意图

Fig. 6 Flow diagram of obtaining and releasing flank resources for switch W02 on the turn-back line behind station under T2T train control system

通过表 2 和相关参数的仿真计算,可得到:  $a_1 = 18.7 \text{ s}$ ,  $a_2 = 23.8 \text{ s}$ ,  $a_3 = 12.0 \text{ s}$ ,  $a_4 = 19.9 \text{ s}$ ,  $a_5 = 2.0 \text{ s}$ , 此时  $T'_1 = 76.4 \text{ s}$ 。

T2T 列控系统下站后折返线关键道岔 W02 可动资源的获取和释放流程如图 7 所示。



注:  $b_1$ — $b_6$  分别代表相应作业项目的作业时间。

图 7 T2T 列控系统下站后折返线道岔 W02 可动资源的获取和释放流程示意图

Fig. 7 Flow diagram of obtaining and releasing movable resources for switch W02 for turn-back line behind station under T2T train control system

通过表 2 和相关参数的仿真计算,可得到:  $b_1 = 22.5 \text{ s}$ ,  $b_2 = 20.0 \text{ s}$ ,  $b_3 = 12.0 \text{ s}$ ,  $b_4 = 17.5 \text{ s}$ ,  $b_5 = 2.0 \text{ s}$ ,  $b_6 = 8.0 \text{ s}$ , 此时  $T'_2 = 82.0 \text{ s}$ 。

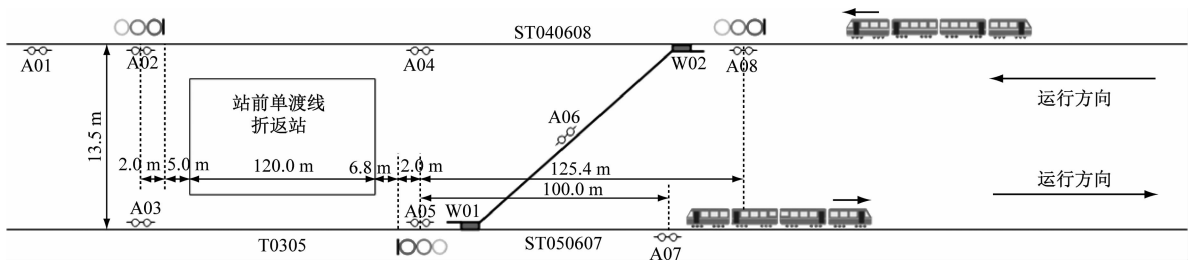
综上所述, T2T 列控系统的站后折返间隔为  $82.0 \text{ s}$ 。

### 2.3 站前折返能力分析

以常规城轨方案中宽  $10.5 \text{ m}$  的岛式站台(线间距为  $13.5 \text{ m}$ )站前单渡线折返方案的站场布局为例,以 6 节编组 B 车型、 $60 \text{ kg/m}$  钢轨、9 号道岔为对象进行仿真分析。

#### 2.3.1 CBTC 系统站前折返能力

按照 CBTC 系统的信号设备布置原则,本站的信号设备布置如图 8 所示。



注: ST040608、ST050607、T0305 为轨道区段。

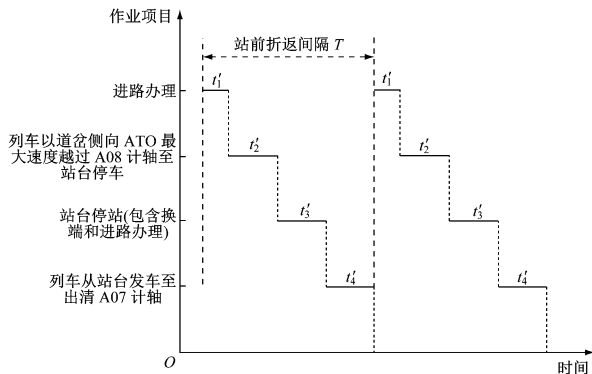
图 8 站前折返线 CBTC 系统信号设备布置示意图

Fig. 8 Diagram of CBTC signal equipment layout for turn-back line in front of the station

站前折返线 CBTC 系统仿真参数中,计轴 A05 与 A07 的距离取  $100 \text{ m}$ ,站台停站(含换端、进路办理)时间取  $60 \text{ s}$ ,其余参数与表 1 一致。

站前折返流程较为简单,主要是对于道岔区段的进路办理。CBTC 系统下站前折返流程,如图 8 所示。折返间隔主要受限于轨道区段 ST040608、

ST050607 和 T0305 的占用和出清情况。上述关键区段的占用和出清流程如图 9 所示。



注:  $t_1' - t_4'$  分别代表相应作业项目的作业时间。

图 9 CBTC 系统下列车站前折返流程示意图

Fig. 9 Flow diagram of train reversal in front of the station under CBTC

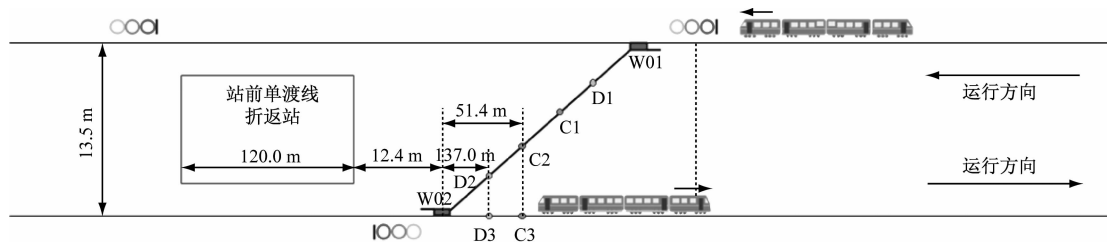
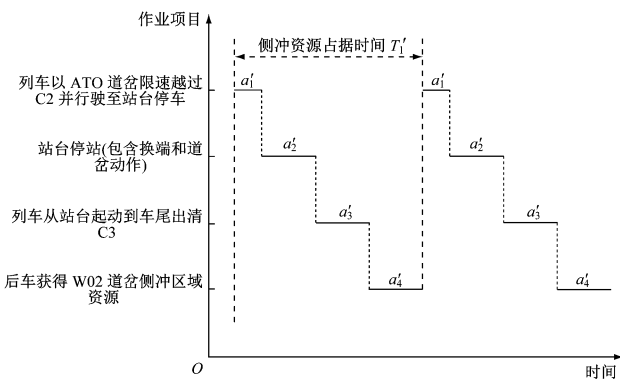


图 10 站前折返线 T2T 列控系统数据配置示意图

Fig. 10 Diagram of T2T control system layout for turn-back line in front of the station



注:  $a_1' - a_4'$  分别代表相应作业项目的作业时间。

图 11 T2T 列控系统下站前折返线道岔 W02 侧冲资源获取和释放流程示意图

Fig. 11 Flow diagram of obtaining and releasing flank resources for turn-back line in front of the station under T2T train control system

通过表 4 和相关参数的仿真计算,可得到:  $a_1' = 23.4$  s,  $a_2' = 60.0$  s,  $a_3' = 20.0$  s,  $a_4' = 2.0$  s, 此时 W02 道岔  $T_1'$  为 105.4 s。

T2T 列控系统下站前折返线关键道岔 W02 可

通过表 1 和相关参数的仿真计算,可得到:  $t_1 = 12.0$  s,  $t_2 = 30.4$  s,  $t_3 = 60.0$  s,  $t_4 = 22.6$  s, 则 CBTC 系统的站前折返间隔  $T$  为 125.0 s。

### 2.3.2 T2T 列控系统站前折返能力

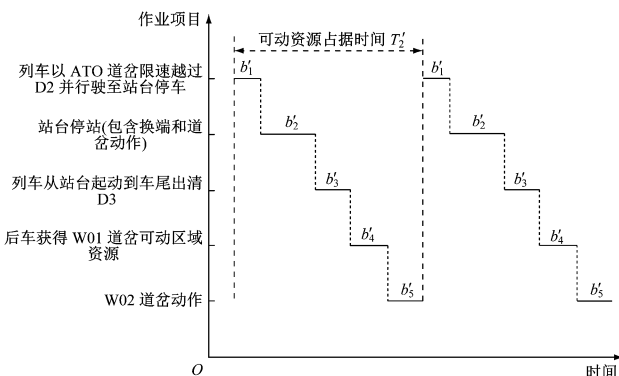
按照 T2T 列控系统的数据配置要求,站前折返线的列控数据配置如图 10 所示。

站前折返线 T2T 列控系统仿真参数中,站台停站(含换端、道岔动作)时间取 60 s,其余参数与表 2 一致。

此时, W02 即为关键道岔,需分别计算 W02 道岔的  $T_1'$  和  $T_2'$ 。

T2T 列控系统下站前折返线关键道岔 W02 侧冲资源的获取和释放流程如图 11 所示。

动资源的获取和释放流程如图 12 所示。



注:  $b_1' - b_5'$  分别代表相应作业项目的作业时间。

图 12 T2T 列控系统下站前折返线道岔 W02 可动资源获取和释放流程示意图

Fig. 12 Flow diagram of obtaining and releasing movable resources for turn-back line in front of the station under T2T train control system

通过表 4 和相关参数的仿真计算,可得到:  $b_1' = 19.6$  s,  $b_2' = 60.0$  s,  $b_3' = 17.6$  s,  $b_4' = 2.0$  s,  $b_5' = 8.0$  s, 此时 W02 道岔  $T_2'$  为 107.2 s。

综上所述, T2T 列控系统的站前折返间隔为 107.2 s。

### 3 区间及车站追踪能力分析

列车在区间和车站内的追踪能力, 与列控系统的安全防护模型原理密切相关。传统 CBTC 系统采用的是前后车相对位置安全防护原理, 而基于 T2T 的列控系统则依托于强大的无线通信技术, 采用的是相对速度安全防护原理。

#### 3.1 前后车相对位置安全防护原理

CBTC 系统的理论架构采用区域集中控制方式, 利用相对位置安全防护原理实现了移动闭塞, 并一直沿用至今。前后车相对位置安全防护原理如图 13 所示, 后车运行的防护点为当前时刻前车的尾部, 因此列车在区间追踪时, 前后两车之间的位置间隔必须大于后车的紧急制动距离与安全防护距离之和。按照目前的实际情况, CBTC 系统下列车的区间追踪间隔可以达到 90 s。

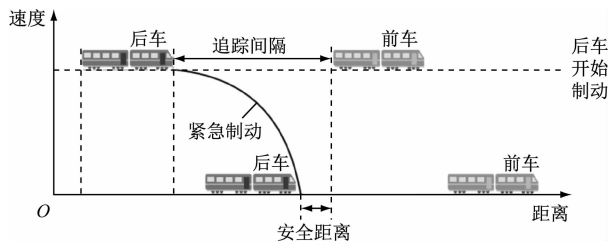


图 13 前后车相对位置安全防护原理

Fig. 13 Principle of relative position safety protection for the front and rear trains

#### 3.2 相对速度安全防护原理

随着近年来计算机技术的日新月异, 以及无线通信技术的迅猛发展, 曾经的技术难题已不再是困扰列控技术发展的瓶颈。在技术条件成熟的当下, T2T 列控系统则采用了相对速度安全防护原理<sup>[6]</sup> (见图 14)。

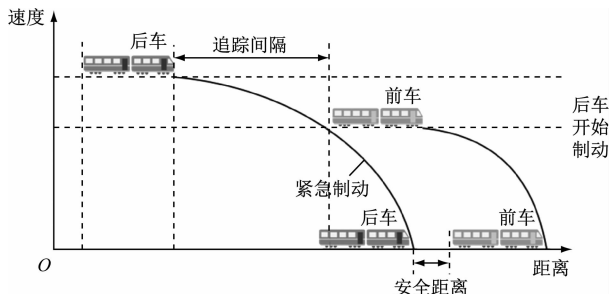


图 14 前后车相对速度安全防护原理

Fig. 14 Principle of relative speed safety protection for the front and rear trains

理论上, 只要列车的响应速度足够快, 无线通信延迟足够小, 前后列车之间运行的同步性就能更好, 其列车之间的追踪间隔距离则可更小。根据文献[7]中的仿真结论可知, 在通信延迟为 0.1 s, 列车最大运行速度为 80 km/h, 前后列车速度误差为 2 km/h 的前提下, 列车在区间的最小追踪间隔距离为 87.7 m, 最小追踪间隔约为 4 s。在 T2T 列控系统实际工程方案中, 相对速度安全防护原理可以使列车之间的追踪间隔进一步缩小, 从而进一步提高线路的通过能力和运营效率。

然而考虑到实际客流情况、工程投资、运行能耗、车站停车等综合因素, 线路上的列车实际追踪间隔应控制在合理范围内。

#### 3.3 车站追踪能力

现阶段, 大部分工程中的列车编组长度与车站站台长度相同, 因此即使区间运行时两列车可以无限靠近, 但在车站范围内, 仍只能停靠 1 列列车。列车在车站的追踪能力必须按照先后进站的方式进行仿真计算。车站追踪示意图如图 15 所示。

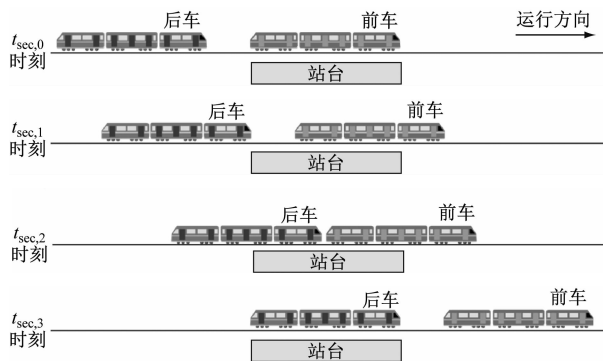


图 15 车站追踪示意图

Fig. 15 Tracking diagram in station

以表 2 中的数据进行仿真计算, 前车出站是个变加速过程, 后车进站是匀减速过程。两车之间的间距是一个变小再变大的过程, 只有当前后车速度相等时, 两车之间的间距最小。前后车车站追踪速度曲线如图 16 所示。图 16 中, 在站台区域前车加速出站行进的距离要大于后车减速进站在站台区域行进的距离, 即  $S_1 \geq S_2$  ( $S_1$  为  $\triangle EFO$  的面积;  $S_2$  为梯形  $HGFO$  的面积)。当两者面积相等时, 后车追上前车。

通过计算可知: 在  $t_{\text{sec},0}$  时刻, 前车起动并加速出站; 经过 6.6 s, 即在  $t_{\text{sec},1} = t_{\text{sec},0} + 6.6$  s 时刻, 后车车头进入站台区; 经过 11.1 s, 即在  $t_{\text{sec},2} = t_{\text{sec},0} + 11.1$  s

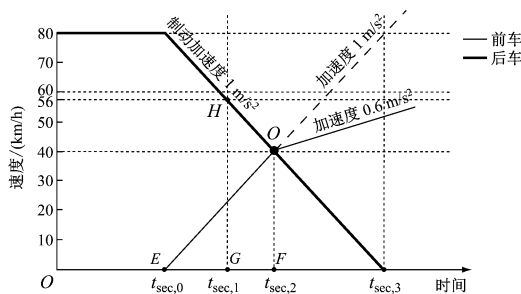


图 16 前后车站追踪速度曲线图

Fig. 16 Tracking speed curve of front and rear trains in station

时刻,前后两车车速相等,约为 40 km/h,且两车间距达到最小;经过 22.2 s,即在  $t_{\text{sec},3} = t_{\text{sec},0} + 22.2$  s 时刻,后车在站台停车。

若停站时间按照 35 s 考虑,则理想状态下车站追踪间隔为 57.2 s,可视其为列车在区间的追踪间隔。实际工程中,前后两车之间必须考虑安全防护距离、通信延时等客观因素,因此,T2T 列控系统可以实现约 70 s 的车站追踪间隔。

## 4 结语

通过本文的详细分析,T2T 列控系统从系统架构、安全防护原理等层面进行了全方位优化,其站后折返间隔为 82.0 s,站前折返间隔为 107.2 s,区间追踪间隔为 70.0 s;相较于传统 CBTC 系统,T2T 列控系统在各项指标上均有较大幅度的提升。随着 T2T 列控系统在更多项目上得到应用,其方案、架构、软件实现及工程实施等方面必将日益成熟,其在系统架构与运行性能方面的优势,将为超大运量需求的城轨列控系统解决方案提供强有力的技术支撑。

## 参考文献

[1] 杜建新,左旭涛. 列车自主运行系统在城市轨道交通网络化和运营中的适用性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 199.

DU Jianxin, ZUO Xutao. Applicability analysis of train autonomous circumambulate system in urban rail transit network construc-

tion and operation[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 199.

[2] 汪小勇. 城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J]. 中国铁路, 2020(9): 77.

WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle-to-vehicle communication in urban rail transit[J]. China Railway, 2020(9): 77.

[3] 朱志伟,李聪. 基于车车通信的地铁列车自主运行系统线路资源管理方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 137.

ZHU Zhiwei, LI Cong. Research on wayside infrastructure management scheme in metro train autonomous control system based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 137.

[4] 吴殿华,范永华,李聪. 基于车车通信的城市轨道交通列车控制系统折返能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 50.

WU Dianhua, FAN Yonghua, LI Cong. Turn-back performance analysis of train-to-train based urban rail transit train control system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 50.

[5] 郭玉珊,成正波,陈绍文. 基于车车通信系统的折返能力研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(7): 77.

GUO Yushan, CHENG Zhengbo, CHEN Shaowen. Study on turn-back capacity based on TACS[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(7): 77.

[6] 黄苏苏,王芃,郑伟. 相对速度模式下的列车自动防护(ATP)紧急制动安全模型分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(4): 68.

HUANG Susu, WANG Peng, ZHENG Wei. Analysis of ATP safety emergency braking model in velocity related mode[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(4): 68.

[7] 李建雄. 面向动态编组和紧密追踪的虚拟编组列控方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

LI Jianxiong. Research on virtual marshalling train control method for dynamic marshalling and close tracking[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

· 收稿日期:2022-06-23 修回日期:2022-10-05 出版日期:2024-03-10  
Received:2022-06-23 Revised:2022-10-05 Published:2024-03-10  
· 通信作者:邓志翔,正高级工程师,1082626@qq.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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com