

# 列车自主控制系统在道岔安全区域的控制算法

王延峰 谢泽会

(郑州轻工业大学电气信息工程学院, 450002, 郑州)

**摘要** [目的]与现有 CBTC(基于通信的列车自动控制)系统控制机理不同,列车自主控制系统通过直接控制轨旁资源实现列车自主运行。为了提高道岔区段的运行效率,需研究列车自主控制系统在道岔区段的控制算法,采用颗粒度更小的道岔安全区域作为列车自主控制系统的控制资源。[方法]列车自主控制系统的控制算法将轨道区段视为共享资源,道岔安全区域单独分配给列车使用。对单开道岔区段和交叉道岔区段场景下的列车自主控制系统和 CBTC 系统进行了对比分析,并采用真实列车控制系统和道岔的参数进行仿真计算运行提升效率。[结果及结论]与 CBTC 系统的传统联锁算法相比,列车自主控制系统的道岔安全区域控制算法性能更好。在单开道岔区段场景中,列车运行安全间隔提升率最大达到 74.5%;在交叉道岔区域场景中,列车道岔通过时间提升率最大达到 33.8%。通过在系统架构和控制算法上的优化,列车自主控制系统增加系统灵活性和效率,为下一代列车控制系统重要发展方向。

**关键词** 城市轨道交通;列车自主控制系统;道岔安全区域;道岔控制算法

**中图分类号** U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.006

## Control Algorithm of Train Autonomous Control System in Turnout Safety Zones

WANG Yanfeng, XIE Zehui

(College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, 450002, Zhengzhou, China)

**Abstract** [Objective] Unlike the existing CBTC (communication-based train control) system control mechanism, the ATC (autonomous train control) system achieves autonomous train operation by directly controlling wayside resources. To improve the operational efficiency of turnout segments, it is necessary to study the control algorithm of ATC system in turnout segments, using smaller granularity turnout safety zones as control resources for ATC system. [Method] The control algorithm of ATC system considers the track section as a shared resource, with turnout safety zones allocated separately for train use. A comparative analysis is conducted between ATC system and CBTC system in scenarios with single-slip turnouts and crossover turnouts, and simulation calculations are per-

formed using real train control system and turnout parameters to improve the operational efficiency. [Result & Conclusion] Compared to the conventional interlocking algorithm of CBTC system, the control algorithm of ATC system for turnout safety zones performs better. In single-slip turnout scenarios, the maximum increase in the safety interval for train operation reaches 74.5%. In crossover turnout zone scenarios, the maximum increase in train turnout-passing time reaches 33.8%. By optimizing the system architecture and control algorithm, ATC system increases flexibility and efficiency, serving as an important direction for the development of the next generation train control system.

**Key words** urban rail transit; autonomous train control system; turnout safety area; turnout control algorithm

随着城市交通运行需求不断提高,CBTC(基于通信的列车自动控制)系统逐步从以地面为中心的控制模式向以列车为中心的列车控制模式转变。目前,法国阿尔斯通公司提出的下一代 CBTC 解决方案 Urbalis Fluence,能克服现有基于地面无线通信的列车控制系统之局限性,可将列车间隔缩短到 60 s<sup>[1]</sup>。我国的交控科技股份有限公司<sup>[2]</sup>、中国中车股份有限公司<sup>[3]</sup>、中国铁道科学研究院集团有限公司<sup>[4-5]</sup>等科研企业对列车自主控制系统进行了设计和实践。列车自主控制系统成为我国城市轨道交通领域重点发展内容之一<sup>[6]</sup>。

列车在接近或行驶到一个道岔区段时,道岔的转动可能产生列车脱轨等风险事故。CBTC 系统对道岔的操作控制由安全完整性等级为 SIL4 级的联锁系统完成。联锁系统在办理进路过程中,对道岔区段须采用严苛的检查、逻辑判断和锁闭等一系列复杂的安全控制程序,存在对道岔区段资源分配效率不高的现象。列车自主控制系统取消了地面联锁系统,使列车自主控制系统成为道岔的控制主动发起者。合理划分道岔区段和安全高效地控制道岔转动成为列车自主控制系统设计的关键点之一。

本文对以列车自主控制系统为对象,根据道岔

转换的特点和需求,定义道岔安全区域,采用新的道岔区段控制算法,在保证列车安全通过前提下进一步提升道岔区段通行效率。

1 列车自主控制系统的架构

列车自主控制系统的架构如图 1 所示。该系统以列车为中心,由列车在行驶过程自主控制所需的进路资源,如轨道区段和道岔区段,系统架构图车载系统包括 OR(车载天线)、ATP(列车自动保护)子系统、ATO(列车自动运行)子系统、里程计和应答器;地面系统包括 RM(资源控制器)和轨旁设备。各部分功能如表 1 所示。

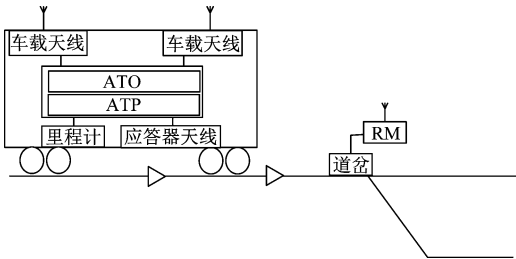


图 1 列车自主控制系统的架构图

Fig. 1 Architecture diagram of autonomous train control system

表 1 列车自主控制系统的组成及功能  
Tab. 1 Composition and functionality of autonomous train control system

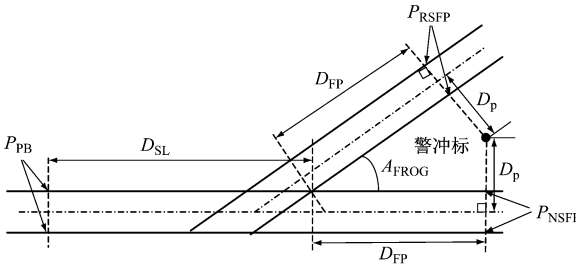
系统	功能
OR	支持列车之间的通信以及列车与地面设备之间的无线通信
ATP	通过参考前列列车的信息和 RM 来计算并确保列车可以安全地共享资源,并保护列车在安全资源内安全运行
ATO	控制列车的加速和减速,使其在 ATP 设定的距离和速度限制内行驶而无需驾驶员干预
应答器、里程计	计算移动距离和修正距离
RM	记录列车对轨道段、轨道分支段、路线站台门等共享资源的占用情况,并将记录的信息提供给列车

2 道岔安全区域控制算法

2.1 道岔安全区域

CBTC 系统中的道岔区段根据联锁系统的控制需求,采用以地面为中心的安全防护逻辑,其划分的道岔区段安全范围过大。列车自主控制系统取消了地面安全防护系统,将安全防护功能转移到列车自主控制系统,因此道岔区段可根据列车长度进行精准分割,将道岔转动部分减少至道岔安全区域。

将道岔 SA(安全区域)作为 RM 中的一个信号量区域进行管理,其长度控制为一列列车的长度,如图 2 所示。其中,SA 起点坐标为  $P_{PB}$ ,终点坐标为  $P_{RSFP}$  和  $P_{NSFP}$ ( $P_{RSFP}$  和  $P_{NSFP}$  处为警冲标在两边钢轨的投影垂直点), $D_p$  为警冲标距离轨道中心线距离。



注: $D_{SL}$ —道岔叉心到道岔区段绝缘节的长度; $D_{FP}$ —道岔叉心到  $P_{RSFP}$  或  $P_{NSFP}$  的长度; $A_{FROG}$ —道岔角度。

图 2 列车自主控制系统的道岔安全区域

Fig. 2 Turnout safety zones of autonomous train control system

结合图 2 可知:

$$D_p = \frac{1}{2}(D_T + D_C + D_D + D_E) \tag{1}$$

式中:

$D_T$ ——列车宽度;

$D_C$ 、 $D_D$ 、 $D_E$ ——在道岔安全区域内的前、后和侧面的列车动态轮廓界限值。

道岔安全区域长度可用  $P_{PB} - P_{RSFP}$  和  $P_{PB} - P_{NSFP}$  表示,即:

$$D_{SWA} = P_{PB} - P_{RSFP} = D_{SL} + \frac{D_p - D_{TRW}/2}{\tan(A_{FROG}/2)} \tag{2}$$

式中:

$D_{SWA}$ ——道岔安全区域长度;

$D_{TRW}$ ——轨道宽度。

2.2 道岔安全区域逻辑向量

道岔安全区域的逻辑向量由 6 个变量构成,表示为[道岔 ID,参考 TAG ID,道岔位置定/反位,道岔区域起始长度,道岔反位长度,道岔定位长度]。

不同道岔类型的道岔安全区域如图 3 所示。图 3 中,S、X、Y、Z 为道岔的不同轨编号,P1、P2 为转辙机编号,TAG#M、TAG#K、TAG#N 为道岔的不同接入点, $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  分别为道岔安全区域 SA1 的起始长度、道岔反位长度及道岔定位长度、 $d_4$ 、 $d_5$ 、 $d_6$  分别为道岔安全区域 SA2 的起始长度、道岔反位长度及道岔定位长度。

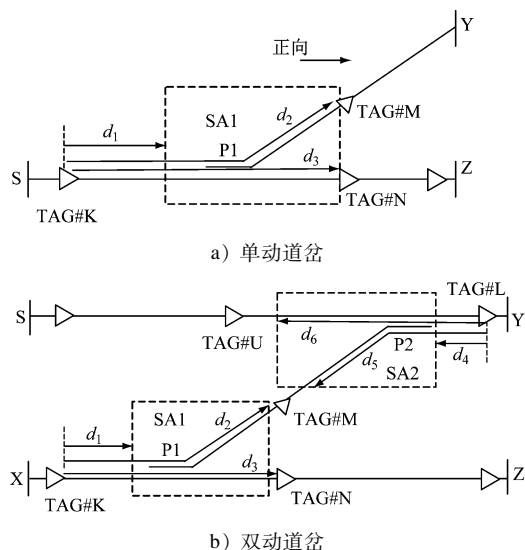


图 3 不同道岔类型的道岔安全区域示意图

Fig. 3 Diagram of turnout safety zones for different turnout types

以图 3 a) 的单动道岔为例,根据转辙机 P1 的操作,可能产生  $S \leftrightarrow P1 \leftrightarrow Y$  或  $S \leftrightarrow P1 \leftrightarrow Z$  方向的进路。 $S \leftrightarrow P1 \leftrightarrow Y$  为道岔反位,  $S \leftrightarrow P1 \leftrightarrow Z$  为道岔定位。由上文结合图 3 a) 可知,SA1 的逻辑模型表示为  $[P1, TAG \#K, \text{定位}, d_1, d_2, d_3]$ 。道岔定位和反位的 SA1 分别定义为  $TAG \#K \leftrightarrow P1 \leftrightarrow TAG \#N$  和  $TAG \#K \leftrightarrow P1 \leftrightarrow TAG \#M$ 。

图 3 b) 为双动道岔。列车自主控制系统可对单个道岔进行操作。SA2 的逻辑模型表示为  $[P2, TAG \#L, \text{反位}, d_4, d_5, d_6]$ 。道岔定位和反位的 SA2 分别定义为  $TAG \#L \leftrightarrow P2 \leftrightarrow TAG \#U$  和  $TAG \#L \leftrightarrow P2 \leftrightarrow TAG \#M$ 。

## 2.3 道岔安全区域控制算法

图 4 为交叉道岔区段列车自主控制系统在道岔安全区域的信息交互。图 4 中,列车 T1 在站台 N 出发后改变方向,准备沿  $Z \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow S$  方向进路运行( $P3$ 、 $P4$  为转辙机编号),T2 在  $X \rightarrow P1 \rightarrow P2 \rightarrow Y$  方向进路运行并准备停靠站台 M。图 4 中列车自主控制系统的控制算法如下:

1) 列车 T2 检查通过 RM 运行  $X \rightarrow P1 \rightarrow P2 \rightarrow Y$  路线所需的资源状态。然后,锁闭轨道区段 O、Q、E 和道岔安全区域 SA1 和 SA2,并向转辙机 P1 和 P2 发送转动到反位的控制命令。

2) RM 收到列车 T2 的操纵道岔指令,将转辙机 P1、P2 转动到反位。

3) RM 向列车 T2 发送转辙机转换到位以及资源占用状态。

4) 列车 T2 沿  $X \rightarrow P1 \rightarrow P2 \rightarrow Y$  行驶。

5) 列车 T1 检查通过 RM 运行  $Z \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow S$  路线所需的资源状态——道岔安全区域 SA3 及 SA4,以及轨道区段 R 及 C,并记录在 RM 中。列车 T1 向 RM 发送转辙机 P3 及 P4 转动到反位的操作命令。

6) RM 接收列车 T1 的操作道岔指令,将转辙机 P3 及 P4 转动到反位。

7) RM 向列车 T1 发送道岔 P3 转换完成信息及资源占用状态信息。

8) 列车 T1 行驶到 SA3 的终点,须等待列车 T2 解除轨道交叉区段 Q 的占用状态。

9) 列车 T1 向 RM 查询交叉区段 Q 状态。

10) RM 向列车 T1 发送轨道交叉区段 Q 资源占用状态和安全状态信息。

11) 列车 T1 通过交叉区段 Q 行驶到区段 R。

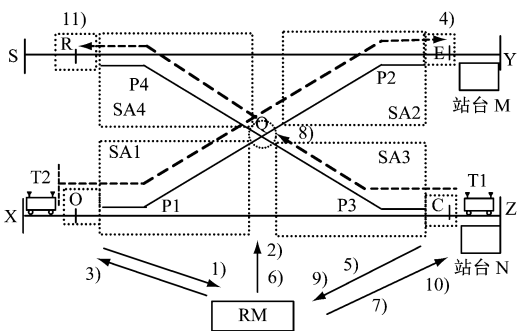


图 4 交叉道岔区段列车自主控制系统在道岔安全区域的信息交互

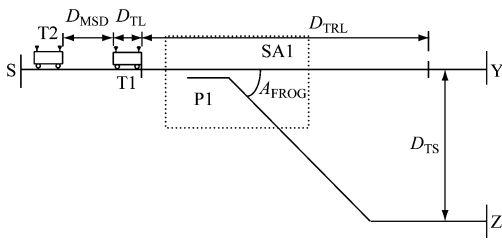
Fig. 4 Information interaction of autonomous train control system in the turnout safety zones of crossover turnout segment

## 3 列车自主控制系统的道岔区段场景

### 3.1 单开道岔运行场景

列车 T1 和列车 T2,以相同速度运行到单开道岔区间后分离行驶。单开道岔区段运行场景如图 5 所示。列车 T1 和列车 T2 沿  $S \rightarrow Y$  方向以最小间隔运行。为了与 CBTC 系统比较控制算法的性能,假设 CBTC 和列车自主控制系统的列车具有相同控制参数,以相同的最小间隔运行。

在 CBTC 系统控制的运行场景下,从列车 T1 进入道岔区段  $D_{TRL}$  开始,直到列车 T1 尾部完全离开道岔区段,列车 T2 无法进入道岔区段。当列车 T1 完全出清道岔区段后,列车 T2 才可进入道岔区段。



注:  $D_{MSD}$ —列车间最小距离;  $D_{TL}$ —列车长度;  $D_{TRL}$ —道岔区段长度;  $D_{TS}$ —两条轨道中心线的间距。

图5 单开道岔区段运行场景

Fig. 5 Operation scenario of single-slip turnout segment

在列车自主控制系统控制的运行场景下,列车 T1 进入道岔安全区域 SA1 后,列车 T2 则无法使用资源道岔安全区域 SA1。当列车 T1 的尾部完全出清 SA1 后,列车 T2 才可进入道岔安全区域 SA1。由图可知,列车自主控制系统控制资源单位——道岔安全区域 SA1 的范围要小于 CBTC 系统联锁安全防护的道岔区段长度  $D_{TRL}$ 。

$D_{MSD}$  同列车 T2 的紧急制动加速度  $a_{GT2}$  相关,可以表示为:

$$D_{MSD} = [(v_{T2} + v_e + a_{T2} t_{eGEBR})^2 - (v_{T2} + v_e)^2] / 2a_{T2} + (v_{T2} + v_e + a_{T2} t_{eGEBR})^2 / 2a_{GT2} + D_{PU} \quad (3)$$

式中:

- $v_{T2}$ ——列车 T2 当前速度;
- $v_e$ ——车速传感器的速度误差;
- $a_{T2}$ ——列车 T2 的最大加速度;
- $t_{eGEBR}$ ——GEBR(紧急制动率)等效制动的延迟输出时间;

$D_{PU}$ ——列车的不确定性距离。

在 CBTC 系统控制情况下,列车 T1 和列车 T2 之间的安全距离  $D_{CBTC}$  为列车 T1 尾部完全离开道岔区段时 2 列列车间距离最大值,即:

$$D_{CBTC} = D_{MSD} + D_{TL} + D_{TRL} - (v_{T2} - v_e)^2 / 2a_{T2} - [v_{T2} - v_e - a_{FT2}(D_{TRL} + D_{TL}) / (v_{T1} - v_e)]^2 / 2a_{T2} \quad (4)$$

式中:

- $v_{T1}$ ——列车 T1 当前速度;
- $a_{FT2}$ ——列车 T2 的全制动加速度。

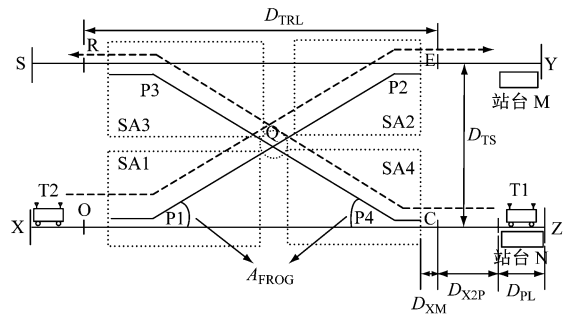
在列车自主控制系统控制情况下,列车 T1 和 T2 的安全间隔  $D_{ATCS}$  表示为:

$$D_{ATCS} = D_{MSD} + D_{TL} + D_{SWA} - (v_{T2} - v_e)^2 / 2a_{T2} - [v_{T2} - v_e - a_{FT2}(D_{TRL} + D_{TL}) / (v_{T1} - v_e)]^2 / 2a_{T2} \quad (5)$$

### 3.2 交叉道岔运行场景

交叉道岔区段运行场景如图 6 所示。列车 T1 往 Z→P3→P4→S 方向行驶,列车 T2 行驶进路为

X→P1→P2→Y。



注:  $D_{PL}$ —站台长度;  $D_{X2P}$ —安装弯道到站台的轨道段长度;  $D_{XM}$ —弯道末端至末端的长度。

图6 交叉道岔区段运行场景

Fig. 6 Operation scenario of crossover turnout segment

在 CBTC 系统控制的运行场景中,在列车 T1 的尾部完全离开长度为  $D_{TRL}$  的道岔区段前,列车 T2 只能在道岔区段外的轨道区段等待。只有列车 T1 完全出清道岔区段后,列车 T2 才可进入道岔区段,并最终停靠在站台 M。列车 T1 行驶距离  $D_{eT1}$  为:

$$D_{eT1} = D_{PL} + D_{X2P} + 2D_{XM} + D_{CX} \quad (6)$$

式中:

$D_{CX}$ ——从 P3 到 P4 的对角线方向长度。

$D_{CX}$  和  $D_{XM}$  分别表示为:

$$D_{CX} = \csc(A_{FROG}) D_{TS} \quad (7)$$

$$D_{XM} = [D_{TRL} - \cos(A_{FROG}) D_{CX}] / 2 \quad (8)$$

列车 T1 的道岔通过时间  $t_{eT1CBTC}$  为:

$$t_{eT1CBTC} = \sqrt{2D_{eT1} / a_{T1}} \quad (9)$$

式中:

$a_{T1}$ ——列车 T1 的加速度。

列车 T2 行驶停靠到站台 M 所需时间  $t_{eT2CBTC}$  为:

$$t_{eT2CBTC} = \sqrt{\frac{2a_{T2} D_{aT2}}{a_{dT2}(a_{T2} + a_{dT2})}} + \sqrt{\frac{2a_{dT2} D_{aT2}}{a_{T2}(a_{T2} + a_{dT2})}} + t_{throw} \quad (10)$$

式中:

- $a_{T2}$ ——列车 T2 的加速度;
- $D_{aT2}$ ——列车 T2 的行驶里程;
- $a_{dT2}$ ——列车 T2 的制动加速度;
- $t_{throw}$ ——道岔转动并锁闭的时间。

列车自主控制系统控制过程如 2.3 节所述,列车 T1 进路可以分为两部分:从站台 N 到道岔安全区段 SA4 的距离  $D_{eT1ATCS-1}$  和经过交叉段 Q 后到达终点 S 经过的距离  $D_{eT1ATCS-2}$ ,分别表示为:



$$D_{eT1ATCS-1} = D_{X2P} + D_{XM} + D_{SWA} \tag{11}$$

$$D_{eT1ATCS-2} = D_B + D_{SWA} + D_{XM} + D_{TL} \tag{12}$$

式中:

$D_B$ ——轨道交叉段 B 的长度。

列车 T1 的道岔通过时间  $t_{eT1ATCS}$  可以表示为:

$$t_{eT1ATCS} = \sqrt{\frac{2a_{T1}D_{eT1ATCS-1}}{a_{dT1}(a_{T1} + a_{dT1})}} + \sqrt{\frac{2a_{dT1}D_{eT1ATCS-1}}{a_{T1}(a_{T1} + a_{dT1})}} + \sqrt{\frac{2D_{eT1ATCS-2}}{a_{T1}}} + t_{wait} \tag{13}$$

式中:

$t_{wait}$ ——列车 T2 完全通过轨道交叉段 Q 期间,

列车 T1 在交汇区 SA3 末端等待的时间;

$a_{dT1}$ ——列车 T1 的制动加速度。

4 系统仿真

4.1 仿真参数

为了对比 CBTC 系统和列车自主控制系统在单开道岔区段和交叉道岔区段两个场景的运行性能,采用地铁 A 型车规格<sup>[7]</sup>和 9 号道岔作为仿真对象,车辆和道岔仿真试验参数如表 2 所示。

表 2 车辆和道岔仿真试验参数

Tab.2 Parameters of vehicle and turnout simulation tests

参数	取值
$D_{TL}/m$	140
$D_T/m$	3
$v_{T1}, v_{T2}/(km/h)$	100
$D_D/m$	0.2
$D_C/m$	0.142
$D_E/m$	0.162
$t_{eGEBR}/s$	1.3
$D_{PU}/m$	$\pm 6.25$
$v_e/(km/h)$	$\pm 2$
$D_{TRW}/m$	1.435
$D_{TRL}/m$	200
$A_{FROG}/(^{\circ})$	6.340 3
$D_{PL}/m$	200
$D_{X2P}/m$	20
$D_{TS}/m$	10
道岔长度 $D_{SL}/m$	32.4
$t_{throw}/s$	6
$t_{wait}/s$	3

4.2 单开道岔运行场景性能分析

对图 5 中 2 列列车通过单开道岔的场景进行仿真。在 CBTC 系统中,列车 T1 以最大速度通过道岔区段,列车 T2 须等待列车 T1 尾部完全出清道岔区段;而在列车自主控制系统中,列车 T2 只需在列车 T1 完全离开 SA 部分后即可继续行驶。将列车 T1 和列车 T2 的安全间隔作为效率提升评价指标,列车自主控制系统在单开道岔区段运行场景安全间隔提升效率如图 7 所示。

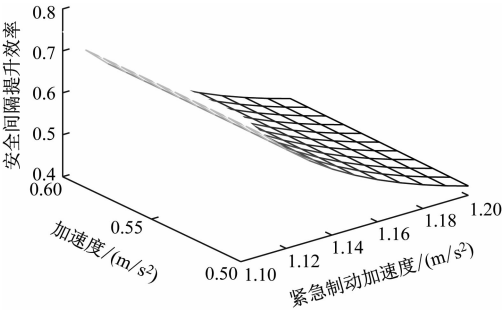


图 7 列车自主控制系统在单开道岔区段运行场景安全间隔提升效率

Fig. 7 Improved efficiency of autonomous train control system for safety interval in single-slip turnout segment operation scenario

由图 7 可知,安全间隔提升效率随着列车紧急制动加速度的增大而减小,而加速度对安全间隔提升效率影响较小。在列车常规参数下,自主控制系统相比 CBTC 系统的安全间隔提升效率都有所提升,最大提升 74.5%。

4.3 交叉道岔运行场景性能分析

对图 6 中 2 列列车通过交叉道岔的场景进行仿真。将列车 T1 和列车 T2 从起始点出发到达目的点所需时间作为道岔通过时间提升效率评价指标,得到列车自主控制系统在交叉道岔区段运行场景道岔通过时间的提升效率如图 8 所示。通过图 8 即可定量评估列车制动加速度和加速度对道岔通过时间提升效率的影响。

由图 8 可知,道岔通过时间的提升效率随着列车加速度的增加而增长,而制动加速度对道岔通过时间提升效率较小。在列车常规参数下,相比 CBTC 系统,列车自主控制系统的道岔通过时间都有所提升,最大提升 33.8%。

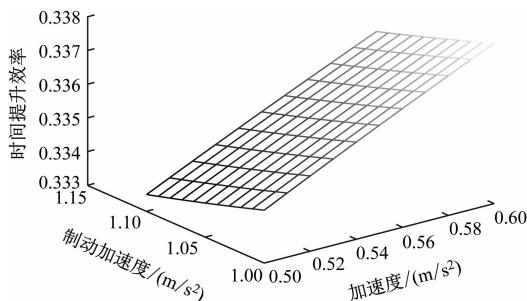


图8 列车自主控制系统在交叉道岔区段运行场景效率提升率

Fig.8 Improved efficiency ratio of autonomous train control system in crossover turnout segment operation scenario

## 5 结语

为了安全高效的列车运行,定义道岔安全区域为列车自主控制系统在道岔区段控制的资源,提出道岔控制算法,并在单开道岔区段和交叉道岔区段两种常见的城市轨道交通运营场景进行了资源利用效率定量分析。

仿真结果证明,与现有的 CBTC 系统相比,列车自主控制系统的安全间隔和道岔通过时间效率有所提升。本研究可为列车自主控制系统的设计提供参考。在具体工程应用过程中,应结合具体项目特点进行适应性分析,实现效率安全可靠的提升。

## 参考文献

- [1] SCHUMANN T. Increase of capacity on the Shinkansen High-speed Line using virtual coupling[J]. International Journal of Transport Development and Integration, 2017, 1(4): 666.
- [2] 杜恒, 孙军国, 张强, 等. 基于地面无线锁及区域控制器的新一代 CBTC 系统方案[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(4): 91.
- DU Heng, SUN Junguo, ZHANG Qiang, et al. A new generation

of CBTC system without CI and ZC[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(4): 91.

- [3] 卿建强, 雷成健, 梁波. 列车自主运行控制系统研究[J]. 控制与信息技术, 2021(4): 95.
- QING Jianqiang, LEI Chengjian, LIANG Bo. Research on train autonomous circumambulation system[J]. Control and Information Technology, 2021(4): 95.
- [4] 黄苏苏, 冯浩楠. 基于车车通信的 CBTC 系统[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 188.
- HUANG Susu, FENG Haonan. CBTC system based on train-train communication[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 188.
- [5] 冯浩楠, 白广争, 于健洁, 等. 以列车为中心的自主控制系统功能及运营场景研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 115.
- FENG Haonan, BAI Guangzheng, YU Jianjie, et al. Research on functions and operation scenario of train-centric autonomous train control system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 115.
- [6] 冯浩楠, 郑泽熙, 白广争, 等. 以列车为中心的自主控制系统的列车工作模式[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 198.
- FENG Haonan, ZHENG Zexi, BAI Guangzheng, et al. Train operation mode of train-centric autonomous control system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12): 198.
- [7] 柳晓峰, 李耘茏. 100 km/h 速度等级 A 型地铁车辆[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(1): 5.
- LIU Xiaofeng, LI Yunlong. A-type metro vehicle of 100 km/h speed grade[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2010, 33(1): 5.

· 收稿日期:2023-01-27 修回日期:2023-05-06 出版日期:2024-01-10  
Received:2023-01-27 Revised:2023-05-06 Published:2024-01-10  
· 通信作者:王延峰,讲师,wang79yf@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 26 页)

- [8] BOTEV Z I, GROTHOWSKI J F, KROESE D P. Kernel density estimation via diffusion[J]. The Annals of Statistics, 2010, 38(5):2916.
- [9] HUANG C, ZHAO Z, WANG L, et al. Point and interval forecasting of solar irradiance with an active Gaussian process[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(6): 1020.

· 收稿日期:2021-07-09 修回日期:2021-08-31 出版日期:2024-01-10  
Received:2021-07-09 Revised:2021-08-31 Published:2024-01-10  
· 通信作者:文豪,讲师,工程师,406590052@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