

# 城市轨道交通线路失表道岔处列车安全防护包络研究

左 辉

(卡斯柯信号有限公司, 610083, 成都//工程师)

**摘 要** 道岔失去表示(以下简称“失表”)是城市轨道交通中常见的故障场景。当列车通过物理上位置确定而状态表示为失表的道岔时,ZC(区域控制器)必须制定有效的列车安全防护措施。提出了道岔失表处列车安全防护的新方案:使用列车安全防护包络(以下简称“包络”)对列车进行安全防护,任何时刻列车都不可冲出包络的范围;防止其他列车的移动授权进入包络覆盖的区域,以避免发生列车相撞;当列车可能通过失表道岔时,在列车所有可能到达的路径上创建包络,并根据计轴/轨道电路区段的被占用状态推导列车可能的位置并扩展包络;为了降低包络对线路运行效率的影响,在列车通过失表道岔后,将列车不可能进入区域内的包络予以缩短或删除。

**关键词** 城市轨道交通;道岔失表;列车安全防护包络;区域控制器

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.11.020

## Train Safety Protection Envelope at the Switch without Indication for Urban Rail Transit Line

ZUO Hui

**Abstract** The loss of switch indication (hereinafter referred to as ‘switch without indication’) is a common failures cenario in urban rail transit system. The ZC( zone controller) must formulate effective train safety protection measures when a train passes through the physically determined swith but the actual state shows no indication. A new scheme of train safety protection at the switch without indication is put forward, which defines the train protection envelope to ensure that the train at any time could not break out of the envelope, and prevents any other trains’ movement authorization to enter the scope covered by the envelope in order to avoid train collisions. When a train is passing through a switch without indication, the protection envelope should be created on all possible paths of the train, and the possible positions of the train should be deduced according to the occupied status of axle counter/track circuit sections, the envelope should be expanded at the same time. To reduce the impact of the envelope on line operation efficiency, when a

train passes through a switch without indication, envelops within the area where the train cannot enter should be shortened or deleted.

**Key words** urban rail transit; loss of switch indication; train protection envelope; zone controller

**Author’s address** CASCO Signal Ltd., 610083, Chengdu, China

列车运行振动等原因会导致道岔密贴检查故障,ZC(区域控制器)与联锁通信中断也会导致 ZC 内道岔状态未知,此时道岔的物理状态是连通的,但有可能被 ZC 判定为处于失去表示(以下简称“失表”)状态<sup>[1]</sup>。列车可能通过失表的道岔,因此,ZC 需要对列车可能到达的区域进行防护,以避免其他 CBTC(基于通信的列车控制)列车进入该区域。具有定位信息的列车通过失表道岔时可能会失去其定位信息,故不能完全依赖列车的位置报文判定列车的位置。为此,本文提出一种失表道岔处列车安全防护的新方案,旨在保证 CBTC 系统安全的同时,尽量减少对采用 CBTC 运行模式的列车的正常运行产生影响。

本文采用列车安全防护包络(以下简称“包络”)方法对失表道岔处的列车进行安全防护。当列车可能通过失表道岔时,在列车所有可能到达的路径上创建包络,对列车进行防护。根据计轴或轨道电路采集的区段占用状态,实时更新该列车包络。当列车不可能从某路径通过时,删除该路径上的列车包络,以避免影响其他 CBTC 列车的正常运行。

## 1 列车安全防护包络

包络是一段轨道区域,用以描述列车可能占用的一个线路区间。任何时刻下的任何列车均应在包络范围之内<sup>[2]</sup>。列车的移动授权计算将包络作为列车安全防护的重要保障,列车的移动授权不能

位于其他列车的包络范围之内。若列车位置超出包络范围,可能会引起严重后果。

根据列车的通信状态,包络可分成两类:

1) 通信列车安全防护包络(以下简称“通信包络”):基于列车报告的位置信息对包络进行更新,将列车车头基于安全定位的最靠前位置作为通信包络头部位置,将列车车尾基于安全定位的最靠后位置作为通信包络的尾部位置。通信包络中有且仅有 1 列列车。当列车关联 1 个通信包络时,该车必须由该通信包络完全覆盖。不关联通信包络的列车不能被判定为 CBTC 列车,也不能计算出该车的有效移动授权。

2) 非通信列车安全防护包络(以下简称“非通信包络”):基于计轴/轨道电路采集的区段被占用状态对包络进行更新,非通信包络包括所占用计轴/轨道电路的整个区段。此外,在从占用转为出清的计轴/轨道电路区段边界点处,非通信包络还应从该边界点向占用转出清的方向扩展 1 个列车悬垂距离(在计轴/轨道电路确认检测到列车之前,列车可以在该计轴/轨道电路上运行的最大距离)。非通信包络中可能不包含任何列车,也可能包含多列列车。当列车不关联任何通信包络时,该车必须由 1 个或多个(如列车车身跨越失表的道岔时)非通信包络完全覆盖。

## 2 失表道岔处的包络管理

包络会被失表道岔阻挡,但列车可以运行通过物理位置确定但状态表示为失表的道岔,从而存在列车运行超出包络防护的风险。为了防止该危险场景的发生,当包络中的列车有可能通过失表道岔时,ZC 将在失表道岔的另一侧构建非通信包络,以保证列车越过失表道岔后仍然处于包络防护范围内。失表道岔的定位和反位区段均需要构建非通信包络。

为了提升 CBTC 系统的可用性,失表道岔处新构建的非通信包络只限定在当前时刻列车可能到达的区域。对于通信包络/非通信包络而言,新构建的非通信包络长度即为该通信包络/非通信包络被失表道岔阻挡的距离。图 1 为根据通信包络被失表道岔阻挡的距离  $L_B$  构建的非通信包络防护。

如图 1 所示,当列车通过失表道岔 P 时,会导致道岔区域的计轴/轨道电路区段被占用,新构建的非通信包络将根据计轴/轨道电路区段的占用状态

进行更新。如非通信包络覆盖的计轴/轨道电路区段均为出清状态,该非通信包络可被删除,以提升 CBTC 系统的可用性。

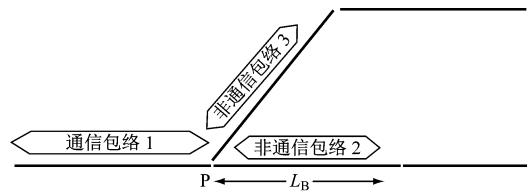


图 1 在失表道岔处创建非通信包络

Fig. 1 Creation of a non-communication envelope at the switch without indication

## 3 失表道岔处包络防护的实现方法

在线路上发生多个相邻的道岔同时失表的情况下,列车可能的运行区域将是一个复杂的网状结构,且对于同一个轨道区段,列车可能存在多条到达路径。在不同路径下,列车在该轨道区段的防护距离是不同的,ZC 需根据防护的最差条件来构建非通信包络。图 2 为列车通过失表道岔 P1 时可能到达的路径。

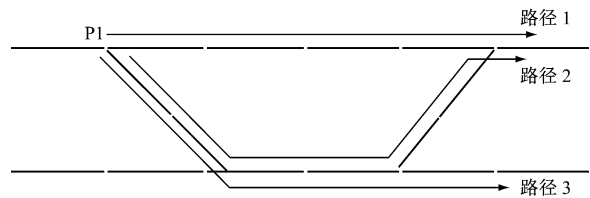


图 2 失表道岔处的多个运行路径

Fig. 2 Multiple running paths at the switch without indication

如图 2 所示,若 ZC 与联锁通信中断,联锁管辖的所有道岔都被 ZC 判定为失表状态,此时列车可能的运行区域是一个复杂的网状图,这对于需要实时计算包络位置的 ZC 而言,其运算负担较重。因此,此时的列车安全防护方案需要满足以下要求:①按列车可能的运行路径构建所有的包络;②采用离线方式进行预计算,以减小 ZC 系统的在线运算负载;③尽量减小对其他正常运行列车的影响。

根据上述要求,对列车运行区域进行抽象描述:

1) 首先按照道岔的汇聚和发散方向,将该道岔描述为带方向的矢量信息(以下简称“PV”)。因为非通信包络创建的原因是包络被失表道岔阻挡,所以提取创建非通信包络的源道岔关联矢量(以下简称“SrcPV”)。对于任意道岔,在道岔的发散端和汇聚端均应关联各自的 SrcPV。

2) 同理提取创建非通信包络目的道岔的关联矢量(以下简称“DstPV”),将 SrcPV 到 DstPV 的路径称为道岔链路(以下简称“PntChain”)。各道岔链路的长度是确定的。

3) 对于某个 DstPV,应建立与其关联的所有 SrcPV 及 PntChain 的路径列表(以下简称“SrcList”),并且允许同一个 SrcPV 通过不同的 PntChain 到达同一个 DstPV(例如图 2 所示的路径 1 和路径 2)。这些抽象数据(DstPV、SrcList、SrcPV 及 PntChain)可采用离线方式进行预计算。

3.1 抽象数据的离线预计算

3.1.1 包络被失表道岔阻挡的最大距离  $L_{\max\_B}$

包络被失表道岔阻挡的最大距离  $L_{\max\_B}$  用于检查失表道岔的包络影响范围,其计算式为:

$$L_{\max\_B} = \max(L_{\max\_CT\_B}, L_{\max\_NCT\_B}) \tag{1}$$

式中:

$L_{\max\_CT\_B}$ ——通信列车通信包络被阻挡的最大距离;

$L_{\max\_NCT\_B}$ ——非通信列车非通信包络被阻挡的最大距离。

$L_{\max\_CT\_B}$  为列车最大安全前端位于道岔处时通信包络被失表道岔阻挡的最大距离,其计算式为:

$$L_{\max\_CT\_B} = v_{\max} T + \frac{1}{2} a T^2 \tag{2}$$

式中:

- $v_{\max}$ ——列车的最大运行速度;
- $a$ ——列车在最大牵引和最大坡度下的加速度;
- $T$ ——列车位置报文的最大有效期(即从列车产生位置报文开始到 ZC 认为该位置报文失效的最大时限)。

$L_{\max\_NCT\_B}$  为非通信列车占用岔区所在区段且车辆外侧端点已位于下一个区段但列车车轴还未占用下一个区段时,非通信包络被失表道岔阻挡的最大距离,其计算式为:

$$L_{\max\_NCT\_B} = L_{\max\_Sw\_S} + L_{T\_O} \tag{3}$$

式中:

- $L_{\max\_Sw\_S}$ ——岔区最长区段的长度;
- $L_{T\_O}$ ——列车的悬垂距离。

3.1.2 计算静态链路配置数据表

以每个道岔在汇聚方向和发散方向关联的 SrcPV 为基础,遍历所有可达链路,如果链路内的某一道岔与 SrcPV 关联道岔的距离小于  $L_{\max\_B}$ ,则将该道岔在链路搜索方向的 PV 作为 DstPV,在其

SrcList 中加入 SrcPV 和道岔链路 PntChain。

从 SrcPV 到 DstPV 的静态链路 PntChain 中,应进行如下定义:链路长度  $L_s$  用以描述从 SrcPV 到 DstPV 的距离;链路道岔列表用以描述静态链路包含的道岔和道岔状态,其中,道岔状态用以描述链路中对应道岔连通的位置,分为定位和反位两种。在道岔列表中不包含 SrcPV 与 DstPV 关联的道岔。

如图 3 所示,假设岔 P1 到 P3 的距离小于  $L_{\max\_B}$ ,每个道岔关联 3 个区段,假定每个区段的长度均为 10 m,则从 P1 向 P3 方向构建的静态链路配置数据示例如表 1 所示。

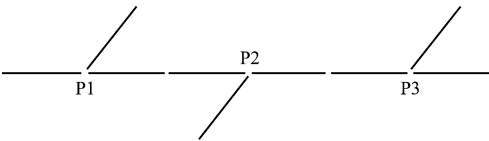


图 3 静态链路示意图

Fig. 3 Static link diagram

表 1 静态链路配置数据示意图

Tab. 1 Diagram of static link configuration data		静态链路	
		道岔列表 (道岔状态)	链路长度/m
P1 (发散方向)	P1 (发散方向)	无	0
P2 (汇聚方向)	P1 (发散方向)	无	20
P3 (发散方向)	P1 (发散方向)	P2 (定位)	40

3.2 包络的实时处理

3.2.1  $L_B$  的动态更新

在 ZC 每个计算周期开始时,将 SrcPV 上记录的  $L_B$  设为 0。在计算通信/非通信列车包络时,当包络扩展被失表道岔阻挡时,在该失表道岔对应方向的 SrcPV 上记录其  $L_B$ 。如果一个失表道岔的定位和反位在道岔的汇聚方向上都存在包络被阻挡的情况,则对应的 SrcPV 上只记录最大的  $L_B$ 。

3.2.2 创建非通信包络

ZC 每个计算周期对所有的道岔状态进行检查。如果道岔处于失表状态,以该道岔的汇聚方向和发散方向分别作为 DstPV,检查是否满足创建非通信包络条件。在满足下列全部条件时,ZC 认为 SrcPV 处的包络被阻挡,需要在 DstPV 处创建新的包络:

- 1) SrcPV 阻挡了包络的扩展。此时 SrcPV 关联的道岔处于失表状态,SrcPV 上记录的阻挡包络

扩展距离  $L_B > 0$ , 且从静态链路可达性角度判定该 SrcPV 可能会对 DstPV 产生影响 (即 SrcPV 属于 DstPV 关联的 SrcList 的成员)。

2) SrcPV 与 DstPV 间的链路可能连通。此时在 SrcPV 与 DstPV 间的链路路径上若存在道岔 (即链路内的道岔数大于 0), 并且每个道岔都位于指定位置或处于失表状态, 则判定该链路可能连通; 如果链路上不存在道岔, 则直接判定该链路连通。

3) SrcPV 上记录的阻挡包络扩展距离大于 SrcPV 与 DstPV 间的链路长度 (即  $L_B > L_S$ )。

上述全部条件满足时, 需要在所有直接关联 DstPV 的区段上创建非通信包络, 此时新创建包络的长度  $L_C = L_B - L_S$ , 新包络的一端覆盖到 DstPV 关联的道岔位置, 另一端为从该道岔位置沿着 DstPV 方向搜索  $L_C$  长度得到的新位置。

如果存在多个 SrcPV 都满足上述全部条件, 则每个 SrcPV 可能计算出不同的  $L_C$ , 此时应采用最大的  $L_C$  长度来创建新包络。

### 3.2.3 删除无效的包络

为了减少对正常运行列车的影响, 当构建的包络覆盖区域内计轴/轨道电路区段已全部出清, 则表明列车不会进入该区域, 此时可将该包络删除。

ZC 每个计算周期执行一次上文的“ $L_B$  的动态更新”“创建非通信包络”“删除无效的包络”3 个步骤, 即可实现包络对列车通过失表道岔的防护。

## 4 道岔失表时包络防护示例

以一系列非通信列车通过失表道岔时的 4 个场景为例, 说明本文提出的列车安全防护新方案。4 个场景均基于以下假设: 道岔 P1、P3 状态为失表但其实际位置为定位, 道岔 P2、P4 状态为定位; 列车位于非通信包络 1 中, 从 P1 向 P3 运行。

场景 1: 如图 4 所示, 列车未越过道岔 P1, ZC 在列车可能进入的道岔定位和反位区域内构建了非通信包络 2、非通信包络 3 和非通信包络 4。此时因 P2 为定位, P2 指向 P4 方向的区域是列车不可到达的区域, 所以 P2—P4 链路上不需要创建包络。

场景 2: 如图 5 所示, 列车通过定位道岔 P1 后, P1 关联的计轴/轨道电路区段出清, 列车占用的区段位于非通信包络 2 中, 其他包络覆盖的区段均为出清状态。此时保留列车可能进入的非通信包络 1 和非通信包络 4, 删除图 3 中的非通信包络 3 (因列车不可能进入)。

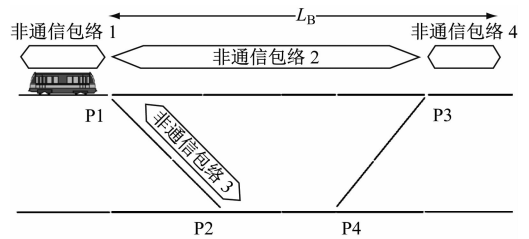


图 4 非通信列车通过失表道岔场景 1

Fig. 4 Scenario 1 of a non-communication train passing through the switch without indication

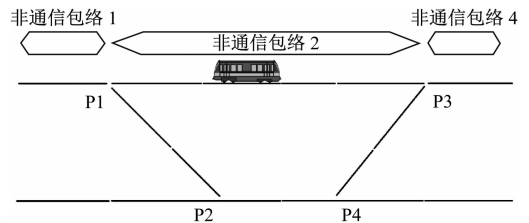


图 5 非通信列车通过失表道岔场景 2

Fig. 5 Scenario 2 of a non-communication train passing through the switch without indication

场景 3: 如图 6 所示, 列车进入 P3 道岔区域, 与 P3 关联的计轴/轨道电路区段被占用, 列车可能进入 P3 的反位区域, 因此 ZC 新建非通信包络 5。此时因 P4 为定位, 列车不可能通过 P4, 所以 P4—P2 链路上不需要创建包络。

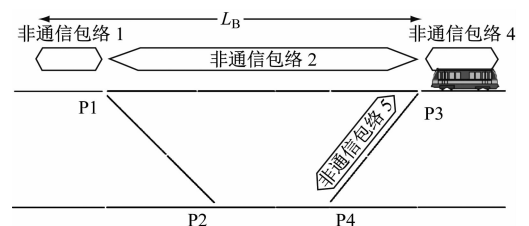


图 6 非通信列车通过失表道岔场景 3

Fig. 6 Scenario 3 of a non-communication train passing through the switch without indication

场景 4: 如图 7 所示, 列车出清道岔 P3 关联的计轴/轨道电路区段, ZC 删除非通信包络 1、非通信包络 2 及非通信包络 5。列车向前移动时, 包络住列车的非通信包络 4 也跟随移动, 若列车占用的区段远离 P3, 则非通信包络 4 也将离开 P3 的关联区段。

## 5 结语

从行车安全角度, 使用包络对列车进行防护是

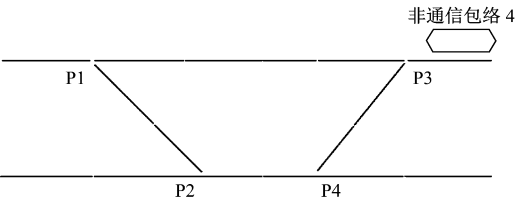


图 7 非通信列车通过失表道岔场景 4  
Fig. 7 Scenario 4 of a non-communication train passing through the switch without indication

一种有效的方法。道岔失表是常见的故障,当列车可能通过失表道岔时,即时创建包络,以覆盖列车可能通过失表道岔后进入的区域,并根据计轴/轨道电路区段的被占用状态推导列车的位置,动态更改包络的覆盖范围。这样,既能避免其他 CBTC 列车进入该区域进而引发碰撞危险,又能避免失表道岔影响范围扩大对其他列车的正常运行造成影响。当线路上多个相邻的道岔同时失表之后,列车可能的运行区域将是一个复杂的网状结构,此时应对各种可能的场景进行离线预计算,用专用的配置数据

将复杂的网络结构转为简单的查表运算,以降低 ZC 的实时运算负担。

本文所述的列车安全防护新方案已经在北京、上海等城市轨道交通项目中得以应用。实践表明,该方案提高了 CBTC 系统的安全性,可有效维持城市轨道交通线路高效、有序的运营。

参考文献

[1] 汪国权,张继营,叶佳琦,等. 基于图像的高速铁路道岔尖密贴监测系统[J]. 中国铁路,2021(1):125.  
WANG Guoquan,ZHANG Jiying,YE Jiaqi,et al. Image-based monitoring system for switch point closure of high speed railway[J]. China Railway,2021(1):125.

[2] 石晓雯. 列车安全防护包络对 CBTC 列车影响的研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2021(1):71.  
SHI Xiaowen. Study on influence of train safety protection envelope on CBTC trains[J]. Railway Signalling & Communication Engineering,2021(1):71.

(收稿日期:2022-06-09)

启骥® TACS ——为列车自主运行提供新的解决方案

列车自主运行系统(TACS)是指列车基于运行计划和实时位置实现自主资源管理并进行主动间隔防护的信号系统。启骥® TACS 是卡斯柯于 2020 年 11 月推出的新一代的信号控制系统解决方案。

与传统 CBTC(基于通信的列车控制)系统相比,启骥® TACS 具有更安全、更高效、更灵活、更经济、易部署等特点。该系统已经在深圳地铁 20 号线取得全球范围内首次实际性的工程应用。目前正在进行的上海轨道交通 3 号线、4 号线信号改造项目也采用了该系统。

启骥® TACS 的系统架构如图 1 所示。在功能实现上,启骥® TACS 采用了以简驭繁的设计思路,主要体现在两个方面。一是自主资源管理,即车载子系统基于 ATS 下发的运行任务,根据列车当前位置,自主计算对轨旁资源的需求,并择机向轨旁申请线路资源;获得分配的资源后锁定并使用线路资源,使用后主动及时释放资源;二是主动间隔防护,即车载子系统基于列车的运行任务和当前位置,主动与所有相邻列车进行信息交互,并根据交互信息自主更新移动授权和列车控制曲线。

在系统架构上,启骥® TACS 采用了化繁为简的设计思路。区别于传统的地面联锁系统,TACS 基于车地联锁和车车协同,其系统架构以车载为中心,轨旁设备相对传统 CBTC 大为精简。

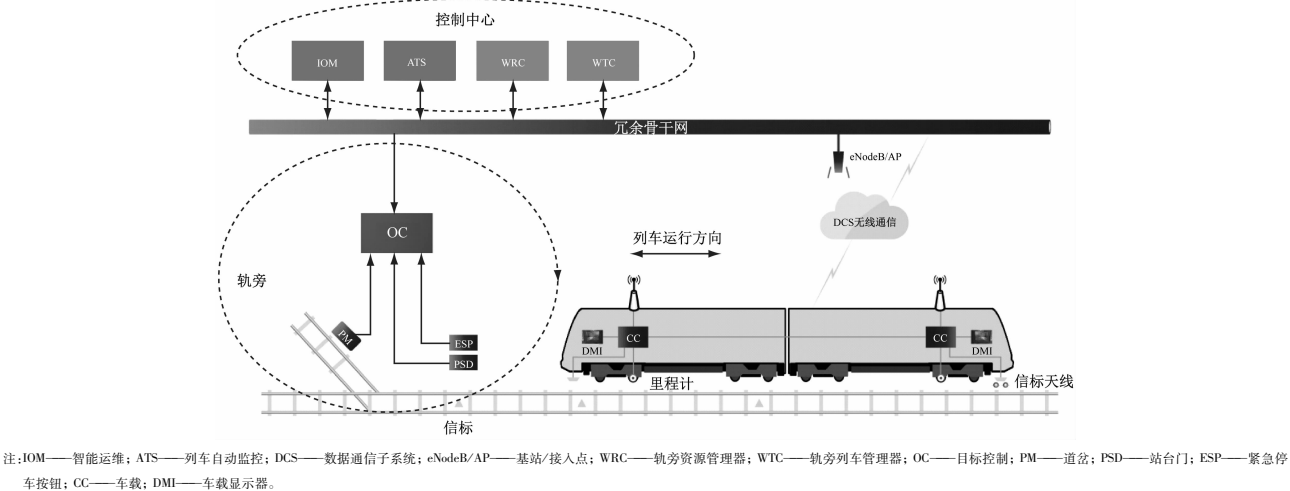


图 1 启骥® TACS 的系统架构图

(卡斯柯信号有限公司供稿)