

城市轨道交通信号系统中应答器的布置方法^{*}

赵德生 薄宜勇

(南京铁道职业技术学院通信信号学院,210031,南京//第一作者,讲师)

摘 要 介绍了城市轨道交通中常见的控车模式,主要包括 CBTC(基于通信的列车控制)模式和点式控车模式。研究了有源应答器的布置方法,包括主应答器和填充应答器的合理布置;分析了无源应答器的合理布置方法,包括列车定位应答器、站台精确停车应答器和轮径校准应答器。提出了欧式应答器和美式动态信标的异同点。

关键词 城市轨道交通;信号系统;应答器布置方法

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.041

Arrangement Method of Balise in Urban Rail Transit Signaling System

ZHAO Desheng, BO Yiyong

Abstract The common train control mode in urban rail transit is introduced, including CBTC (communication based train control) mode and punctual automatic train control mode. The layout of active balise is emphatically studied, including the rational layout of main balise and infill balise. The rational arrangement of fixed balise is studied, including train positioning balise, platform accurate stopping balise and wheel diameter calibration balise. Finally, differences and similarities between European balise and American beacon layouts are presented.

Key words urban rail transit; signaling system; balise arrangement method

Author's address Nanjing Institute of Railway Technology, 210031, Nanjing, China

在城市轨道交通信号系统中,CBTC(基于通信的列车控制)系统作为目前主流的信号控制系统已被多家地铁公司所采用。为了提高可靠性并保证行车安全,CBTC系统通常具有3种运行模式:CBTC模式、点式ATP(列车自动防护)模式和联锁模式^[1]。多数情况下,均以CBTC和点式ATP为主要控车模式。在这两种模式中均用到了应答器,因此应答器的

布置是否合理,直接关系到城市轨道交通的运营效率及行车安全。本文主要以欧式应答器为例,对应答器在线路上的合理布置进行了详细研究。本研究可为信号系统的工程图纸设计提供理论基础。

1 城市轨道交通控车模式

1.1 CBTC 控车模式

CBTC控车模式示意图如图1所示:CC(车载控制器)通过轨旁无源应答器和测速电机计算列车的位置,CC将列车位置信息通过无线传输发送给ZC(区域控制器),ZC计算移动授权并发送给每个车载,同时ZC也将列车的位置信息送给ATS(列车自动监控),最后由CC计算出列车制动曲线,从而实现列车间的移动追踪。

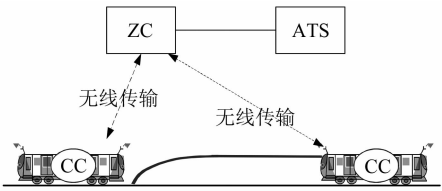


图1 CBTC控车模式示意图

Fig.1 Schematic diagram of CBTC mode

1.2 点式 ATP 控车模式

当车-地通信设备、轨旁ZC设备故障以及其他原因导致的连续式ATP功能丧失时,转为点式ATP控车模式^[2]。此时,系统通过信号机旁的有源应答器将报文信息发送给车载控制器,车载控制器生成速度-距离控车曲线(正方向上,从本架信号机到次一架信号机)。点式控车曲线示意图如图2所示。如果信号机S1开放,速度-距离曲线1将通过有源应答器B1传输给列车,有源应答器B2和B3被安装在信号机S2之前的安全制动距离外。由于以信号机S2为始端的进路有2条,所以需要2个有源应

^{*} 2020年度江苏省轨道交通控制工程技术研发中心开放基金项目(KFJ2001);江苏省高校自然科学基金项目(20KJB580007);2021年江苏高校青蓝工程优秀青年骨干教师培养项目(500RCQL202101)

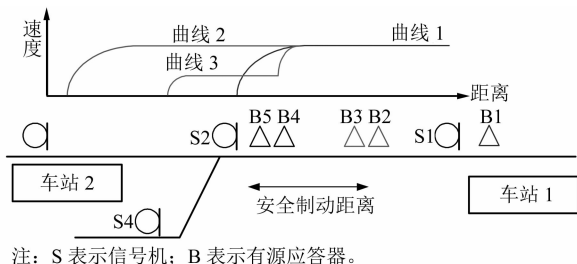


图2 点式控车曲线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of punctual train control curve

答器,且由联锁设备根据 S2 的显示进行控制。

当列车按照速度曲线 1 行驶并接近信号机 S2 的位置时,列车读到了有源应答器 B2 或 B3。当信号机 S2 开放绿灯(直向进路),列车读取 B2 所传送的报文信息,并按照速度曲线 2 以最大线路速度运行到下一站停车。当信号机 S2 开放黄灯(侧向进路),通过有源应答器 B3 的报文,列车将释放速度曲线 1 并按速度曲线 3 行驶,速度曲线 3 将使列车减速通过道岔运行至信号机 S4。当信号机 S2 关闭(显示红灯)时,列车将被迫在信号机 S2 处停车。此种情况下,当信号机 S2 显示绿灯或黄灯时,列车会读取到有源应答器 B4 或 B5 所传送的信息。当列车读取到 B4 所传送的信息后,列车按速度曲线 3 (通过道岔反位)行驶到信号机 S4 处;当列车读取到 B5 所传送的信息后,列车按速度曲线 2 行驶到下一个出站信号机处。

2 有源应答器的布置

应答器按照报文是否可变,可分为无源应答器和有源应答器。无源应答器又称固定应答器,有源应答器按用途分为主应答器和填充应答器两种。固定应答器报文不可变,主应答器与填充应答器报文可变,主应答器布置在其对应的信号机外方,填充应答器布置在主应答器外方^[3]。

2.1 主应答器布置

在具备正向通过能力的信号机前方布置有源应答器,以保证列车通过此应答器时,可以获得有效的点式移动授权。

2.1.1 主应答器至计轴点的距离计算

信号机外方的有源应答器与内方计轴点的距离因项目的不同而存在差异。但在工程设计时,通常都要考虑以下几个因素:列车筛选距离、系统延时走行距离、应答器安装误差及旁瓣误差、应答器天线至车钩距离等。

2.1.1.1 列车筛选距离

为确保行车安全,从非 CBTC 列车转换到 CBTC 列车的过程中,需要一个筛选过程,对于已经定位的列车,在接近或者离开计轴点时,如果与相邻计轴分隔点的距离小于最小列车长度且相邻区段空闲,则该列车可以确定为在其两端没有隐藏其他车辆^[4-5]。列车筛选示意图如图 3 所示,其中, l_1 和 l_2 分别为车头和车尾的列车筛选距离。列车筛选距离是有源应答器至计轴点距离的重要参数之一。

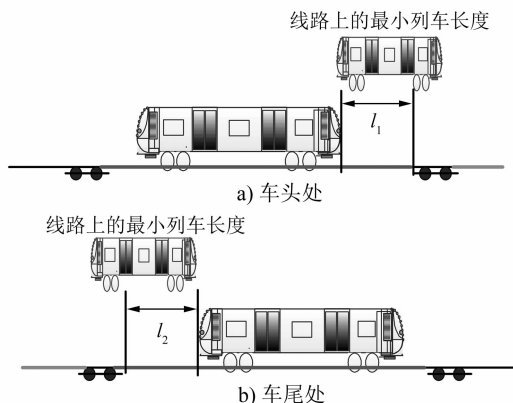


图3 列车筛选示意图

Fig. 3 Schematic diagram of train selection

2.1.1.2 系统延时期间的走行距离

计算主应答器至信号机内方计轴点距离时,还需要考虑系统延时所产生的距离。系统延时主要包括计轴从出清到占用的系统检测延时时间 t_a (包括设备变化及联锁检测时间)、联锁信息到应答器的写入时间 t_w 以及 CC 处理延时时间 t_c (包括应答器读取时间以及内部处理时间)等。

1) 计轴从出清到占用的系统检测延时。主要包括计轴设备由出清到占用的反应时间 t_1 、联锁 I/O (输入/输出) 口输入采集的最大延迟时间 t_2 、主备同步时间 t_3 、联锁处理时间 t_4 、平台对联锁 I/O 口输入的宽恕时间 t_5 ^[6],总计轴延时时间为:

$$t_a = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \quad (1)$$

2) 联锁信息写入时间。欧式应答器通过 LEU (轨旁电子单元) 方式写入,包括 LEU 采集轨旁信号设备信息且处理完成时间、LEU 写入应答器时间,该延时时间即为 t_w 。

假设延时期间,列车以 RM (限制模式) 行进时的速度定义为 v_{rm} ,同时,考虑安全速度余量为 5 km/h 时的车速 $v_r = v_{\text{rm}} - 5 \text{ km/h}$,则在延时期间内,列车的走行距离为:

$$l_{rm} = v_r(t_a + t_w + t_c) \quad (2)$$

2.1.1.3 最大距离的确定(应答器至计轴)

应答器安装位置如图4所示。假设车钩到应答器天线中心的距离为 l_h ,应答器的读取旁瓣误差与安装误差之和为 Δ_b ;列车筛选距离为 l_f ,则主应答器至信号机内方计轴点的最大距离 l_{max} 为:

$$l_{max} \leq l_f + l_h - \Delta_b - v_r(t_a + t_w + t_c) \quad (3)$$

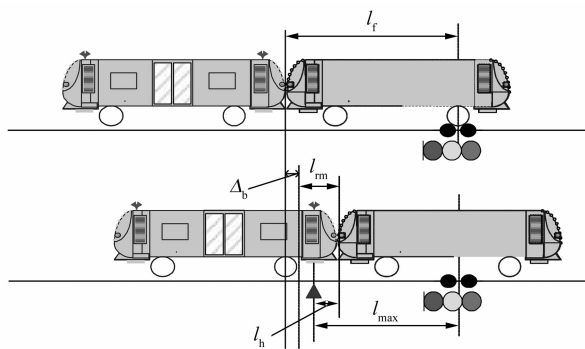


图4 应答器安装示意图

Fig.4 Schematic diagram of balise installation

2.1.2 主应答器至道岔尖端的距离计算

点式ATP发车时,列车以系统限定的释放速度前行读取与信号机关联的有源应答器,如CC在轨道数据库定义的位置未读到允许信息时,CC将立即施加EB(紧急制动)。CC判定未读到应答器信息时,则需考虑列车定位误差、应答器安装误差、读取窗口范围、应答器读取和处理时间等因素。点式释放期间,若司机闯红灯,列车实施紧急制动后停车,为防止列车停车后不会压入道岔岔尖而引起侧翻掉道或列车停车后进入岔后超限等其他危险区域,必须合理设置主应答器距离信号机内方第一道岔岔尖的距离,如图5所示。设置该距离时需要考虑多种参数,列车最大牵引加速度、应答器读取旁瓣误差、应答器安装误差、列车车钩到第一轮对距离、列车车钩到天线中心距离、CC处理周期等等。

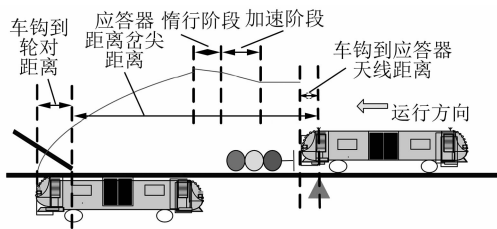


图5 应答器与道岔距离示意图

Fig.5 Schematic diagram of the distance between balise and turnout

假设列车的最大牵引加速度为 a_{max} ;点式释放时的防护限速为 v_{fr} ,该速度的设定需要满足ATO(列车自动驾驶)以及司机人工最低可控运行速度的要求,考虑可用性情况下的ATP安全防护速度最小值为10 km/h,根据ATP推荐速度与安监速度间的余量(取典型值为5 km/h),可计算出列车的推荐速度 v_1 为:

$$v_1 = v_{fr} - 5 \text{ km/h} \quad (4)$$

主应答器到进路内第一道岔区域范围内的最大坡度所引起的分量加速度为:

$$a_g = 9.8 v_m \quad (5)$$

式中:

v_m ——列车最大下坡速度,km/h;

a_g ——加速度, m/s^2 。

CC以推荐速度通过有源应答器,若列车未读到有效的报文信息,则触发紧急制动至停车。在整个过程中,需整体考虑以下因素:

- 1) 列车车钩到天线中心距离 l_a 。
- 2) 应答器读取旁瓣误差以及安装误差之和 Δ_1 。
- 3) 信标读取延时期间走行距离 l_b ,其表达式为:

$$l_b = v_1(t_{zy} + t_{cy}) \quad (6)$$

式中:

t_{zy} ——从应答器读取设备获取到报文信息至交由ATP业务软件的最大延迟;

t_{cy} ——CC获取到有源应答器信息后的处理延时。

- 4) CC以推荐速度通过有源应答器后,若未读到有效的报文信息,列车会触发紧急制动,从制动至停车的走行距离为 l_c 。参照制动模型可知,制动过程包括加速、惰行和制动3个阶段。

加速阶段,走行距离 l_j 即列车由速度 v_1 加速到速度 v_2 时所走行的距离,列车走行时间为 t_{e1} (加速阶段时间)。

惰行阶段,走行距离 l_d 即列车由速度 v_2 加速到速度 v_3 时所走行的距离,列车走行时间为 t_{e2} (惰行阶段时间)。其中, v_2 的计算公式为:

$$v_2 = v_1 + t_{e1}(a_{max} + a_g) \quad (7)$$

制动阶段,走行距离 l_z 即列车由速度 v_3 降至0时所走行的距离,列车走行时间为 t_{e3} (减速阶段时间)。其中, v_3 和 l_c 的计算公式分别为:

$$v_3 = v_2 + a_g t_{e2} \quad (8)$$

$$l_c = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2(a_{\max} + a_g)} + v_2 t_{e2} + \frac{a_g t_{e2}^2}{2} + \frac{v_3^2}{2(a_n - a_g)} \quad (9)$$

式中:

a_n ——减速度。

5) 列车车钩到第一轮对的距离 l_d 。

6) 道岔岔尖到超限边界点或转换梁等危险点处的距离 l_e 。

综上所述,点式释放期间,若司机闯红灯,列车实施紧急制动后停车:

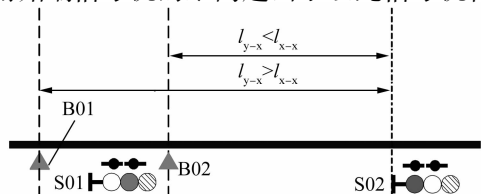
1) 对于信号机内方第一区段是岔前的信号机,为防止列车未停车前车轮压入岔尖引起侧翻掉道等危险,要求主应答器到信号机内方第一道岔岔尖的距离应不小于 $l_a + \Delta_1 + l_b + l_c - l_d$ 。

2) 对于信号机内方第一区段是岔后的信号机,为防止列车停车后进入岔后超限区域对其他列车造成危害或进入转换梁等危险区域,主应答器到信号机内方第一道岔岔尖的距离还应考虑岔尖到超限边界点或转换梁等危险点的距离,即主应答器到信号机内方第一道岔岔尖的距离应不小于 $l_a + \Delta_1 + l_b + l_c + l_e$ 。

2.2 填充应答器的布置

填充应答器布置的目的是保证列车能以较高速度通过填充应答器所在的区段。填充应答器到主应答器之间的距离,应满足列车在通过填充应答器获得移动授权延伸时,不出现因非线路限速原因的减速。

1) 填充应答器至信号机距离。填充应答器与信号机距离示意图如图 6 所示。其中: l_{y-x} 为填充应答器与信号机之间的距离, l_{x-x} 为信号机之间的距离。若填充应答器只预告单条进路,则填充应答器至信号机距离应小于 2 个信号机之间的距离;若填充应答器到下游始端信号机的距离超出了以此信号机作为终



注: B01、B02——填充应答器; S01、S02——信号机。

图 6 填充应答器与信号机距离示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the distance between infill balise and signal machine

端信号机的进路长度,则下游进路可使用上游进路的主应答器作为填充应答器,这种情况下,设计人员需进一步验证点式运行能力是否满足项目的要求。

2) 填充应答器至计轴距离。为防止列车读取到填充应答器信息后,出现列车点式移动授权未回撤而发生列车闯入前方解锁进路的危害,具备点式功能的进路上游最远处的填充应答器应在该进路的接近区段范围内,填充应答器到关联信号机计轴的最小距离 l_{\min} 需根据能力分析的计算结果给出。填充应答器与计轴点距离示意图如图 7 所示。

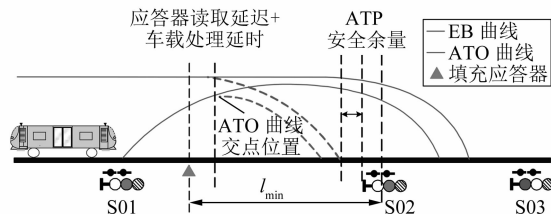


图 7 填充应答器与计轴距离示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the distance between infill balise and axle counter

由图 7 可知,填充应答器的布置位置应至少考虑应答器的读取延迟、CC 处理延时、接近区段安全制动距离以及 ATP 安全余量等问题。此外,填充应答器与计轴的距离应小于接近区段长度,且应大于应答器读取延迟走行距离、CC 处理延时走行距离、接近区段安全制动距离、信号机至关联计轴距离以及 ATP 安全余量距离之和。

3 无源应答器的布置

城市轨道交通中的无源应答器主要用于列车定位、轮径校准、站台精确停车等,为避免两相邻应答器相互干扰,相邻应答器间的距离通常大于 5 m。

3.1 转换轨上的无源应答器布置

首先,考虑到列车出段时,其在转换轨区域完成升级需要实现轮径校准、列车定位及列车筛选功能,列车在读到定位初始化应答器前,应保证列车已完全位于转换轨区段内。其次,考虑到应答器干扰,定位应答器间距应不小于 5 m,转换轨应布置至少 2 个定位应答器以完成列车的定位功能^[7]。最后,考虑到让列车在转换轨即可进入 CBTC 控制等级,距离转换轨出段方向末端计轴点最近的定位应答器到该计轴点的距离 l_{bc} ,应大于应答器读取延迟距离、CC 处理延迟距离、CC 与 ZC 建链时间走行距离以及第一轮对到查询机天线的距离之和(仅适用

于查询机天线安装在相对第一轮对远离车头位置的情况)。转换轨的典型布置如图8所示。其中:FB1与FB2为定位应答器,完成初始列车的定位,列车读取定位应答器FB2后完成定位,与ZC建链或通过主应答器VB获取前方进路信息后可完成车头筛选,实现以CBTC模式或点式模式进入正线的条件;WB1与WB2为轮径校准应答器,能够实现轮径校准功能(WB2可兼做初始化定位应答器)。

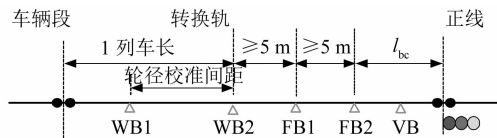


图8 转换轨上的应答器布置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of balise arrangement on switching track

为保证轮径校准结果的正确性,需保证列车在经过两个轮径校准应答器时,能够保持匀速不打滑惰行前进。因此,轮径校准信标应至少设置在坡度不大于18‰且曲线半径不小于300 m的线路处^[8],轮径校准应答器间不宜布置信号机。当转换轨坡度大于18‰或曲线半径小于300 m时,若出入场、段信号机差置,则可将轮径校准信标布置在场、段内与转换轨相邻的坡度较小的无岔区段上;若距离不满足,可延至转换轨上(轮径校准首个信标布置在场内无岔区段上,第2个信标布置在转换轨上)。当转换轨坡度大于18‰或曲线半径小于300 m时,若出入场、段信号机并置,则转换轨上不宜布置轮径校准信标,轮径校准信标建议布置在场、段转换轨与第一站台间坡度较小的无岔区段上。

3.2 用于精确停车的应答器布置

在有精确停车需要的区域,为保证ATO停车精度要求,需在距离列车停稳后应答器天线中心位置范围内布置至少1个应答器以校准列车位置,该位置范围大小为ATO停车精度与列车位置测量误差的比值。通常情况下,ATO停车精度取为0.3,根据T/CAMET 04018.1—2019《城市轨道交通CBTC信号系统规范第1部分:ATP子系统》,列车位置测量误差取为±2%,则该位置范围为7.5 m。

3.3 用于区间定位的应答器布置

为满足列车的定位要求,需要在区间上布置无源应答器。2个无源应答器间的最大距离应满足:在即使丢失1个定位应答器的情况下,测距误差也不会大于最大允许的测距误差。在区间故障重启、接近前方

信号机时,为使故障列车能完成定位功能,除将此主应答器VB兼做定位应答器使用外,还需要在主应答器VB上游布置1个无源应答器FB,为了防干扰,此无源应答器距离主应答器应不小于5 m。

4 欧式应答器与美式运态信标的区别

针对有些项目应用美式动态信标,其设置方法大同小异,但存在些许差别。

1) 欧式应答器,其有源应答器同时也可作为无源应答器供重定位使用,因此在平面图布置时应考虑该种情况。美式动态信标无法作为重定位信标使用,因此在布置区间重定位信标时,不需要考虑其重定位属性。

2) 每个美式动态信标(有源应答器)只能关联1条进路,因此当涉及到多条进路的情况时,使用美式动态信标的项目需依据实际进路情况设置同样数量的动态信标。

5 结语

为保证行车安全,在布置应答器时需充分考虑系统延时、读取误差、安装误差、定位误差、安全余量、线路参数、车辆参数、电磁干扰等多方面因素。本文详细研究了城市轨道交通中各类用途应答器的布置方法,可为信号工程设计人员和运维人员提供有效的技术参考。

参考文献

- [1] 黄苏苏,马浩楠. 基于车车通信的CBTC系统[J]. 城市轨道交通研究,2021(6):188.
HUAUG Susu, FENG Haonan. CBTC system based on train-train communication[J]. Urban Mass Transit, 2021(6):188.
- [2] 贾鹏. CBTC车载设备在线故障诊断系统研究[J]. 铁道运输与经济,2018(11):94.
JIA Peng. A research on online fault diagnosis system of CBTC on-board equipment[J]. Railway Transport and Economy, 2018(11):94.
- [3] 王宏刚. 城市轨道交通信号与通信系统[M]. 北京:人民交通出版社,2020.
WANG Honggang. Signaling and communication system of urban rail transit[M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [4] 季坤. CBTC系统中列车动态头筛的研究[J]. 铁道通信信号,2021(4):81.
JI Kun. Research on train dynamic front discrimination in CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication, 2021(4):81.

(下转第222页)