

青岛地铁 13 号线 ATO 停车精度不准 原因分析及控制措施

吕 平¹ 牛成刚² 徐明功³

(1. 青岛地铁集团有限公司, 266400, 青岛; 2. 山东交控科技有限公司, 266400, 青岛;
3. 青岛地铁集团有限公司, 266400, 青岛)

摘 要 [目的]为解决青岛地铁 13 号线冲欠标问题,需深入分析列车 ATO 进站停车的控制原理及影响其精度的各项因素,并据此制定有效的控制措施。[方法]简述了青岛地铁 13 号线列车 ATO 进站停车精度控制的原理;分别从信号系统因素和车辆系统因素两方面,分析了造成列车冲欠标的原因;提出了精确停车的优化控制措施。[结果及结论]①信号系统方面:通过优化测速逻辑、应答器布局及 ATO 算法,提升列车定位与停车精度;②车辆系统方面:精细调整制动转换时机,匹配信号系统需求,实现精准停车。这些优化措施共同提高了列车停车精确度,显著增强了运营效率。

关键词 地铁; 停车精度; 冲欠标; 控制措施

中图分类号 U231.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.047

Cause Analysis and Control Measures for Inaccurate ATO Parking Accuracy of Qingdao Metro Line 13

LYU Ping¹, NIU Chenggang², XU Minggong³

(1. Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266400, Qingdao, China; 2. Shandong Jiaokong Technology Co., Ltd., 266400, Qingdao, China; 3. Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266400, Qingdao, China)

Abstract [Objective] In order to solve the stop mark exceeding/failing problem of Qingdao Metro Line 13, it is necessary to deeply analyze the control principle of ATO (automatic train operation) parking and the factors affecting its accuracy, and formulate effective control measures accordingly. [Method] The principle of ATO parking accuracy control for Qingdao Metro Line 13 trains is briefly described. The causes of train stop mark exceeding/failing are analyzed from the aspects of signal system factors and vehicle system factors respectively. Optimization control measures for accurate parking are proposed. [Result & Conclusion] ① Signal system factors: by optimizing the speed measurement logic, balise layout and ATO algorithm, the train positioning and parking accuracy are improved; ② Vehicle system factors: through fine-tuning the

braking conversion timing to match the signal system requirements, the train accurate parking is achieved. These optimization measures jointly improve the train parking accuracy and significantly enhance the operational efficiency.

Key words metro; parking accuracy; stop mark exceeding/failing; control measures

青岛地铁 13 号线起于西海岸新区嘉陵江路站,终于董家口火车站,其正线全长约为 70 km。其中嘉陵江路站至两河站为地下站点,隐珠站至董家口火车站为高架站点。该线路列车采用 4 辆编组的 B 型车辆。自 2018 年 9 月 1 日试运行以来,该列车频繁出现停车窗显示为红色、停车精度超出 ± 50 cm 范围的情况,这导致车门与站台门无法自动联动打开,必须依赖司机手动驾驶列车重新对准停车位,才能开启车门与站台门。此举不仅增加了停站作业的时间,还直接影响了正线运营的服务质量和列车的准点率。为解决列车冲欠标问题,确保列车停在停车点 ± 30 cm 内的概率达到 99.995 0%,且停在停车点 ± 50 cm 内的概率提升至 99.999 8%,以满足合同要求,需深入分析列车 ATO 进站停车的控制原理及影响其精度的各项因素,并据此制定有效的控制措施。本线路在广泛查阅相关文献的基础上,结合已有的 ATO 停车精度优化方法,在测速测距技术、ATO 控车算法及车辆控制系统等 3 个方面进行了创新性改进,以期满足运营的实际需求。

1 ATO 车站停车精度控制原理简述

在站台对标停车,需要通过信号车载测速定位系统来实现。为了保证停车点设定位置的精度,需要在站台停车区域布置用于精确定位的无源应答器,对停车过程中列车的走行位置进行准确校正。通过采集在站台区域布置应答器的走行间距信息

与车载电子地图中应答器间距数据不断地进行比较,校正列车的停车曲线。

进入站台停车阶段,ATO 根据列车当前速度和车辆确定的制动率,同时根据到停车点实际距离,计算出列车进站停车的制动曲线;通过不断变化的牵引和制动指令的输出,使列车按照计算制动曲线停车。ATO 采用连续的一次性制动、恒定的制动率,一次性制动至目标停车点。

2 影响列车 ATO 停车精度的原因分析

青岛地铁 13 号线经过近 1 年分析、总结、整改及验证,发现影响列车进站精确停车的因素主要有 3 个方面:信号系统影响、车辆系统影响和环境影响。

2.1 信号系统影响因素分析

2.1.1 测速系统

青岛地铁 13 号线信号系统的测速系统是利用车轮速度传感器和雷达传感器进行测速。由于超过 40 km 为高架线路,雷达测速易受雨雪等环境因素干扰,导致列车测速不准。

2.1.2 应答器安装位置

影响进站停车对标的另一个重要影响因素是列车能否高精度定位。如果列车无法精确掌握目前的位置或无法实时更新当前位置,车载 ATO 系统就无法实时运算出列车距离停车点的距离,而列车定位是通过车载应答器查询器读取轨旁布置的应答器发给列车的报文来完成的,故应答器布置位置和应答器中报文的正确性,以及车载应答器查询器获取应答器报文的及时性,便成了列车定位的重要组成部分。

2.1.3 车载 ATO 系统控车的算法

ATO 控车算法设计不当,会造成计算出的列车制动曲线不够精确,导致列车进站停车冲欠标。ATO 系统控车算法根据列车运行的当前速度、停车距离、列车的安全位置、系统命令从产生、传输到执行的响应时间、列车载荷、累积走行距离、当前所处位置的坡度、曲率半径等信息,ATO 系统实时调整输出的制动模拟量,从而保证列车精确停车。

2.2 车辆系统因素分析

ATO 控车模式下,列车进站停车过程中,车辆系统完全根据信号系统给出的制动力模拟量控制车辆的运行,因此,车辆系统对于制动指令响应的及时性与制动力减速度的大小是影响停车精度的

另一个重要因素。

2.3 环境因素分析

在下雨、下雪或大雾等天气时,环境湿度较大,轮对与闸瓦、轮对与钢轨摩擦力变小,车轮易打滑,此时列车制动命令不能完全作用到车辆上,导致列车减速度变小,也直接影响列车停车精度。

3 保证精确停车的优化控制措施

通过上述分析,可以了解到影响列车停车精度的相关因素,为保证列车进站停车时精准停车,青岛地铁 13 号线在信号系统、车辆系统及特殊天气下运营组织等方面进行优化控制。

3.1 信号系统控制措施

3.1.1 测速逻辑修改

故障前测速算法原理图如图 1 所示,始终使用雷达测速作为参考速度,来判断速传是否空滑。一旦雷达测速精度下降,系统测速要求严格,会判定空滑,速度无效,输出紧急制动。全程实时使用雷达测速作为参考速度,对雷达测速精度存在较大依赖。

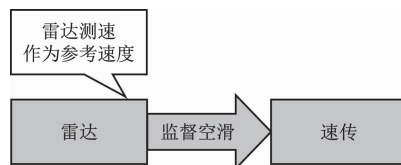


图 1 故障前测速算法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the pre-fault speed measurement algorithm

新测速算法原理图如图 2 所示,优先使用速传测速变化判断列车空滑,无空滑则用速传测速作为列车速度,同时监督雷达测速精度;当列车空滑时,短时使用雷达测速,用雷达与速传测速对比判断空

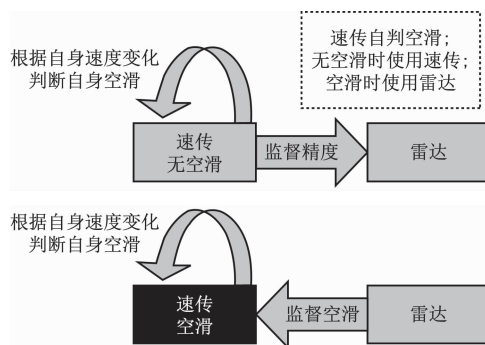


图 2 新测速算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the new speed measurement algorithm

滑恢复。

新算法降低了雷达测速的使用强度,更能抵抗环境变化对测速系统的影响,保证了精确停车的稳定性。

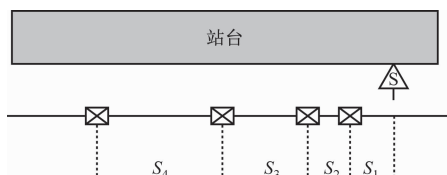
3.1.2 应答器定位

列车运行过程中,实时采集轨旁安装的应答器报文信息,重新精确定位,应答器布置得越多,位置校正次数越多,所产生的定位误差越小,停车精度就越高。由于区间应答器布置间距为 300 m 左右,列车的测距误差较大,不能满足精确停车的要求,为保证列车在站台停车点处精确停车,站台应答器布置数量和距离应满足以下设计原则。

以下设计原则以地铁站台长度为 80 m,4B 编组车辆为例进行说明,当站台长度、车辆编组变化时,需进行调整。

3.1.2.1 单向停车单向发车站台

在站内布置 4 个固定应答器(见图 3)作为 ATO 停车位置校正应答器。



注: S_1, S_2, S_3, S_4 为站台应答器布置距离。

图 3 单向停车单向发车站台应答器布置

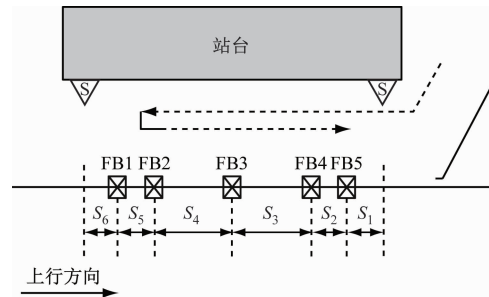
Fig. 3 The layout of balise at one-way parking and one-way departure platform

站台内 ATO 位置校正应答器距离出站方向的停车标的典型距离 S_1 为 8 m, S_2 为 7 m, S_3 为 25 m, S_4 为 24 m,这是一种典型布置间隔,其中要求 S_1, S_2 距离误差在 10 cm 范围内, S_3, S_4 距离可根据站台长度、车辆编组实际情况进行适当调整。

3.1.2.2 双向停车单向发车站台

对于双向停车单向发车站台,在站内布置 5 个 FB(固定应答器)作为 ATO 停车位置校正应答器,其中 FB2、FB3、FB4、FB5 作为车载 ATO 沿上行方向停车(站台右边停车点)前位置校正应答器;FB1、FB2、FB3、FB4 作为车载 ATO 沿下行方向停车(站台左边停车点)前位置校正应答器。

站台内 ATO 位置校正应答器的典型距离 S_1 为 8 m, S_2 为 7 m, S_3 为 25 m, S_4 为 24 m, S_5 为 8 m, S_6 为 8 m,这是一种典型布置间隔,其中要求 S_1, S_2, S_5, S_6 距离误差在 10 cm 范围内, S_3, S_4 距离可根据



注:FB1—FB5 为固定应答器编号。

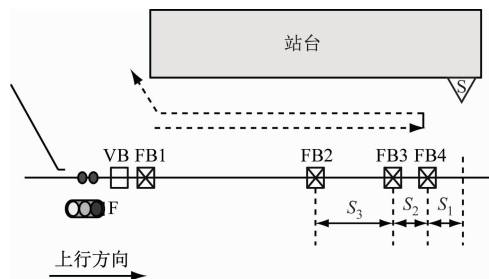
图 4 双向停车单向发车站台应答器布置

Fig. 4 The layout of balise at two-way parking and one-way departure platform

站台长度、车辆编组实际情况进行适当调整。

3.1.2.3 单向停车双向发车站台

对于单向停车双向发车站台,在站内布置 3 个固定应答器作为 ATO 停车位置校正应答器(其中防护信号机前配套 VB 或 FB 可作为站内 ATO 停车位置校正应答器)。



注:VB 为有源应答器;F 为信号机。

图 5 单向停车双向发车站台应答器布置

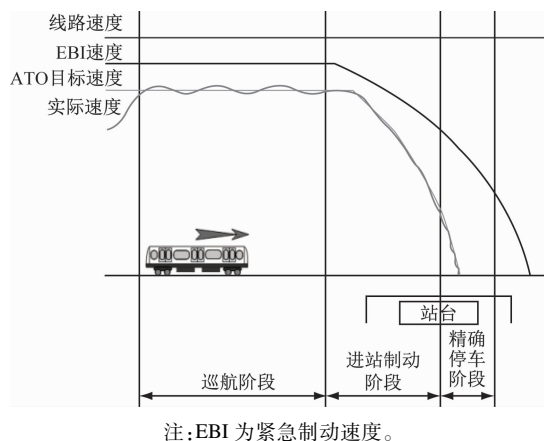
Fig. 5 The layout of balise at one-way parking and two-way departure platform

站台内 ATO 位置校正应答器的典型距离 S_1 为 8 m, S_2 为 7 m, S_3 为 25 m,这是一种典型布置间隔,其中要求 S_1, S_2 距离误差在 10 cm 范围内, S_3 距离可根据站台长度、车辆编组实际情况进行适当调整。

3.1.3 车载 ATO 系统控车的算法

原先的车载 ATO 控车算法在列车减速过程中切除牵引的同时也切除了电制动,导致制动停车阶段制动力不足,车辆无法满足信号系统制动力的需求,致使列车停站出现冲标的现象。为解决这个问题,地铁采用了新的车载 ATO 系统控车算法,在进站制动停车阶段切除牵引的同时不切除电制动,以满足信号系统停车阶段制动力的需求,保证车辆响应减速度曲线应与信号系统需求减速度曲线重合。新的 ATO 控车算法按照 ATO 系统软件控制的加速

度,通过加速或减速制动级位调节速度,直至列车当前速度达到目标速度为止。当列车进入目标停车点时,便将控制速度合并到停车制动曲线中。ATO 停车算法示意图如图 6 所示。



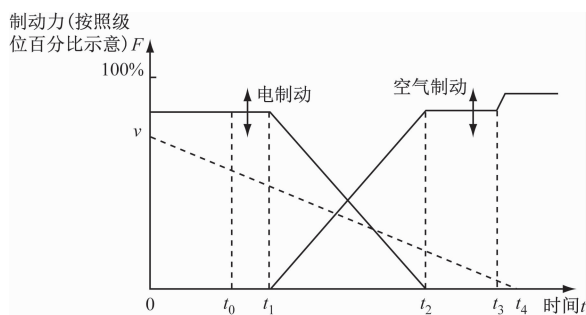
注:EBI 为紧急制动速度。

图 6 ATO 停车算法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ATO parking algorithm

3.2 车辆系统因素

相对于车辆系统而言,列车 ATO 控车模式下的进站停车的停车精度的主要影响因素是车辆响应跟随信号系统制动曲线的减速度的需求的及时性和准确性。即车辆通过调整空气制动介入和电制动撤出的时间对车辆响应信号系统需求进行了优化。理论上的车辆响应减速度曲线应与信号系统需求减速度曲线重合。列车在进站停车制动阶段的制动力输出分为电制动→电空混合→气制动 3 个阶段。电空转换示意图如图 7 所示。



注: t_0 为电制动减弱信号输出的时刻; t_1 为空气制动开始介入的时刻; t_2 为电制动完全退出的时刻; t_3 为速度到定值保持制动输出的时刻; t_4 为列车减速至零速的时刻。

图 7 电空转换示意图

Fig. 7 Schematic diagram of electro-pneumatic brake conversion

3.2.1 电制动阶段

列车利用车轮与钢轨间的黏着力,并根据列车

载荷(从空车到超员范围内)自动调节并输出合适的电制动力,按照公式 $F_b = u(M + 0.5M_t)gp$ 来计算每节动车需发挥的电制动力。其中: F_b 为本节动车需发挥的电制动力; u 为黏着系数,取 $0.16 \sim 0.165$; M 为本节动车的载荷(包含转动惯量); M_t 为本单元的拖车载荷(包含转动惯量); g 为重力加速度,一般取 9.81 m/s^2 ; p 为手柄级位($0 \sim 100\%$)。在保证列车在空载或满载情况下制动减速时,保持基本恒定的减速度。根据信号系统与车辆接口电气接口参数说明的要求,列车电制动的响应值与 ATO 请求实际值偏差不超过 5% ,电制动力与手柄级位跟随曲线越好,ATO 停车精度及稳定性越高。

3.2.2 电空转换阶段

停车制动阶段时列车制动装置要完成电空转换过程,制动控制系统 BCU(列车上一个重要的电子控制单元,主要负责刹车系统的控制与管理)在设定的电制动淡出速度点,按照电制动下降特性斜率进行电制动防滑数值控制,使电制动力按照一定斜率进行下降;同时,空气制动力按照相同斜率进行上升,从而实现电空转换的平滑过渡。电空转换阶段的减速度跟随曲线一般需信号、牵引及制动系统三方共同测试确定。电制动淡出速度点越低(地铁电制动淡出速度点为 5 km/h),电空转换阶段的减速度跟随曲线匹配性最好。信号与车辆接口要求 100% 电制动转换为 100% 空气制动所需要的时间,要求 $\leq 500 \text{ ms}$ 且在转换过程中保证平滑过渡且无速度突变。

3.2.3 气制动阶段

空气制动阶段,总风缸内的压力空气经调压阀、制动阀和列车管向车辆制动缸充风;压力空气推动制动缸活塞压缩弹簧移动,并由基础传动装置将此推力传递到闸瓦上,使闸瓦压紧车轮产生制动作用。实际运行数据表明,车辆闸瓦长时间抱闸运行会发热,为了使车辆闸瓦保持相对恒定的温度,减少对设备损耗,列车每天运行公里数均需 $\geq 60 \text{ km}$,期间需要在空载运行时采用 $60\% \sim 70\%$ 制动级位停站约 50 次左右。摩擦力大小与接触面的粗糙程度及压力大小都有关系,而压力是无法改变的,因此新车上线时,需要经过一定时间的空载运行,从而更好地保持闸瓦与轮对踏面的摩擦效果。

如图 8、图 9 所示,通过整改前、后列车的速度曲线对比可以看出,车辆跟随信号的速度变化保持一致,列车的停车精度也非常好,能满足运营需要。

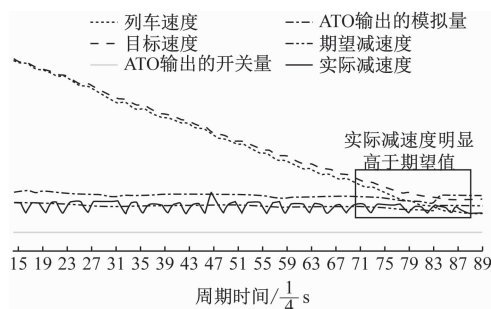


图8 整改前车辆与信号减速度跟随情况

Fig. 8 Vehicle and signal deceleration following situation before rectification

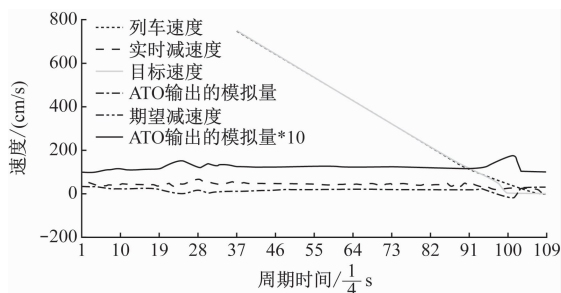


图9 整改后车辆与信号减速度跟随情况

Fig. 9 Vehicle and signal deceleration following situation after rectification

3.3 环境因素

在下雨、下雪或大雾等天气,空气湿度较大时,为减少列车打滑情况的发生,列车运营建议司机改为手动驾驶,避免列车起动或停车阶段列车打滑的产生。

4 结语

综上所述,为解决青岛地铁13号线进站停车精度不足的问题,本文从信号系统与车辆系统两方面入手进行了优化。信号系统方面,通过修改测速逻辑显著提升了测速精度,并合理设置了轨旁应答器的安装位置,进一步提高了列车定位的准确性。同时,还优化了ATO控车算法,从这3个方面综合施策,有效解决了列车停车问题。在车辆方面,精心调整了空气制动介入和电制动撤出的时机,以精准匹配信号系统的制动力需求,确保列车能够在站台

上实现精准停车。这一系列优化措施的实施,不仅提高了列车的停车精度,还显著提升了运营效率。

参考文献

- [1] 交控科技股份有限公司. 青岛市红岛-胶南城际轨道交通工程ATO子系统技术规格书[Z]. 青岛:交控科技股份有限公司,2016.
Jiaokong Technology Co., Ltd. Technical specification for ATO subsystem of Qingdao Hongdao Jiaonan intercity rail transit project [Z]. Qingdao: Jiaokong Technology Co., Ltd., 2016.
- [2] 王亮,郑吴富. 南宁轨道交通1号线电客车停车精度整体欠佳的原因分析及控制措施[J]. 铁道机车车辆,2017,37(3):112.
WANG Liang, ZHENG Wufu. Reason analysis and control measures of the inadequately stopping accuracy of electric rail car in Nanning rail transit line 1[J]. Railway Locomotive & Car, 2017, 37(3): 112.
- [3] 刘洋. 天津地铁2号线列车ATO模式下精确停车的实现[J]. 铁道运营技术,2014,20(2):26.
LIU Yang. Realization of precise parking of train in ATO mode in Tianjin metro line 2[J]. Railway Operation Technology, 2014, 20(2): 26.
- [4] 黄苏苏. 基于模糊PID算法的安全ATO系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
HUANG Susu. Research on safe ATO system based on fuzzy PID algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [5] 关晓磊. 基于QT的CBTC司机驾驶显示单元的设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2013.
GUAN Xiaolei. Design and implementation of CBTC driver driving display unit based on QT[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [6] 徐明功. QDR3-3103-信号系统对车辆的性能参数接口说明书[Z]. 青岛:青岛地铁集团有限公司,2016.
Xu Mingong. QDR3-3103-interface manual for performance parameters of signal system to vehicles [Z]. Qingdao: Qingdao Metro Group Co., Ltd., 2016.

· 收稿日期:2022-05-26 修回日期:2022-07-18 出版日期:2024-10-10

Received:2022-05-26 Revised:2022-07-18 Published:2024-10-10

· 通信作者:吕平,高级工程师,317144713@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