

基于轻制动指令的 ATO 二次对标跳跃方法优化

华志辰¹ 乔志远² 金捷³

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海;
3. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海)

摘 要 [目的]当全自动运行列车第一次停站对标超出开门允许的范围时,需要 ATO(列车自动运行)系统自动进行重新准确对标。仅使用牵引和制动指令的传统 ATO 二次对标方法耗时久,单次移动的距离不能满足性能需求,会影响运营服务。对此,有必要基于轻制动指令对 ATO 二次对标方法进行优化。[方法]引入车辆在实际运行过程中的牵引系统及空气制动系统延时,分析了仅使用牵引指令和制动指令的传统 ATO 二次对标方法时单次移动距离超过了 1 m 的原因,基于轻制动指令对 ATO 二次对标方法进行优化。优化后的 ATO 二次对标方法通过提前施加固定级位制动,在停车过程中消除了空气制动延时的影响,使得单次移动的过程仅存在牵引系统的延时,从而缩短了单次移动的距离,满足了 ATO 二次对标功能的性能需求。对基于轻制动指令优化后的 ATO 二次对标方法的单次移动距离进行理论计算,验证该方法的可行性。[结果及结论]目前,开门授权精度范围为 ± 0.5 m,二次对标功能必须实现小于 1.0 m 的列车单次移动距离,才能满足停站精度纠偏的需求。传统 ATO 二次对标方法中,空气制动系统响应时间和执行时间过长,致使单次移动距离超过了 1.0 m,无法满足停站精度纠偏需求。理论计算表明,基于轻制动指令优化后的 ATO 二次对标方法可以满足列车单次移动小于 1.0 m 的需求。

关键词 城市轨道交通;全自动运行;ATO 二次对标;空气制动;最小移动距离;轻制动

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.008

Optimization of ATO Re-benchmarking Method Based on Light Braking Command

HUA Zhichen¹, QIAO Zhiyuan², JIN Jie³

(1. CASCO Signal Ltd., 200072, Shanghai, China; 2. Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China; 3. Technical Center, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] When the initial parking of an FAO (fully automatic operation) train in station exceeds the permitted range for door opening, the ATO (automatic train operation) system needs to re-benchmark accurately. The conven-

tional ATO re-benchmarking method using only traction and braking commands is time-consuming, and the distance of train single movement does not meet performance requirements, affecting operational service. Therefore, it is necessary to optimize the ATO re-benchmarking method based on light braking commands. [Method] By considering the delays in the traction and air brake systems during actual train operation, the reason for train single move distance exceeding 1 m in case of the above-mentioned ATO method using only traction and braking commands is analyzed, and the ATO re-benchmarking method is optimized based on light braking commands. The optimized one applies fixed-level braking in advance, eliminates delays caused by air brake system during the parking process, making the process of a single movement involve only the traction system delay, thereby shortening the single move distance and meeting the performance requirements of the ATO re-benchmarking function. The feasibility of the optimized ATO re-benchmarking method based on light braking commands is validated through theoretical calculations of a single move distance. [Result & Conclusion] At present, the door opening authorization accuracy range is ± 0.5 m, and the re-benchmarking function must achieve a train single move distance of less than 1.0 m to meet the stopping accuracy correction requirements. In the conventional ATO re-benchmarking method, the longer response time and execution time of the air brake system result in single move distances exceeding 1.0 m, failing to meet the stopping accuracy correction requirements. Theoretical calculations indicate that the optimized ATO re-benchmarking method based on light braking commands can meet the requirements for a train single move distance within 1.0 m.

Key words urban rail transit; FAO; ATO re-benchmarking; air brake; minimum move distance; light braking

ATO(列车自动运行)二次对标功能为全自动运行线路信号系统的标准配置^[1]。当全自动运行列车第一次停站对标精度超出开门允许的范围(以下简称“对标失败”)时,ATO 二次对标功能需要自

动二次起动列车,修正在第一次对标的对位偏差,再次对标,以完成上下客作业。目前,开门授权精度通常为 $\pm 0.5\text{ m}$,故在 ATO 二次对标功能中,单次起动-停车的最小位移必须小于 1.0 m ,才能满足开门授权精度要求。这对 ATO 二次对标的精度控制提出了较高要求。

在第一次对标失败后的列车已延误,若多次对标失败,则需要司机上车处置,使列车延误情况更严重。为了尽量减少列车延误,快速、有效、精确地完成对标作业,本文基于 LBD(轻制动指令)对 ATO 二次对标方法进行优化。

1 传统的 ATO 二次对标方法

在传统的 ATO 子系统与车辆之间的驾驶接口中,仅有牵引和制动两个指令,传统 ATO 二次对标方法仅使用这两个指令完成整个二次对标作业。文献[2]已对使用该方法的理论距离计算有初步的研究。其理论计算基于的牵引加速度为 0.3 m/s^2 ,制动减速度为 -1.0 m/s^2 ,并且仅考虑空气制动响应的延时(从列车收到 ATO 制动命令开始,到列车开始减速的延时时间)。

而二次对标过程是一个短时间、低速度的起动-停车过程,考虑乘客的舒适性及安全性(避免在列车低速运行时的突然大级位停车导致乘客摔倒受伤),整个二次对标过程的加速度(含牵引加速度及制动减速度)应控制在 $-0.3 \sim 0.3\text{ m/s}^2$ 范围内。在实际应用的过程中,还存在牵引-惰行的转换延时,牵引系统空气制动系统的执行延时(从列车的加度开始变化,到列车的加速度达到目标值之间延时)。

对于使用传统 ATO 控制方式进行二次对标时的单次最小位移,在更精细的理论计算中,主要应考虑两个牵引系统的延时及两个空气制动系统的延时。其中:

1) 牵引响应延时 t_1 : t_1 为从 ATO 输出的牵引指令状态发生变化(由非牵引到牵引,或者由牵引到非牵引),或者 ATO 请求的牵引级位由 L_1 变为 L_2 开始,至检测到列车的加速度发生变化的时间。

2) 牵引执行延时 t_2 : t_2 为从列车的加速度开始发生变化(t_1 延时结束),到列车加速度达到目标值的时间。

3) 空气制动响应延时 t_3 : t_3 为从 ATO 指令由非制动指令变为制动指令开始,到检测到列车的减

速度开始发生变化的时间。

4) 空气制动执行延时 t_4 : t_4 为从列车的减速度开始发生变化(t_3 延时结束),到列车的减速度达到目标值的时间。

牵引系统及空气制动系统延时示意图如图 1 及图 2 所示。

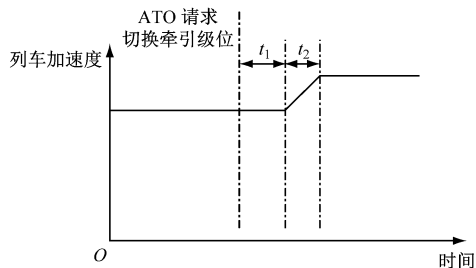


图 1 牵引系统延时示意图

Fig. 1 Diagram of traction system delay

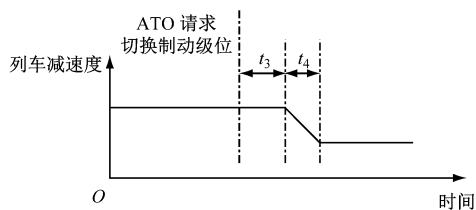


图 2 空气制动系统延时示意图

Fig. 2 Diagram of air brake system delay

使用传统 ATO 二次对标方法时的列车单次最小位移按以下 ATO 指令输出方式进行理论计算:

一阶段 输出牵引指令及恒定的牵引级位,牵引级位等效的列车加速度为 a_1 ,直至列车速度达到停止牵引速度 v_{st} 。

二阶段 输出制动指令及恒定的制动级位,制动级位等效于列车减速度为 a_2 ,直至列车停车。

在使用传统 ATO 控制方式进行二次对标的单次移动过程中,各阶段产生的位移计算如下:

1) 一阶段:在牵引响应延时 t_1 内,列车还未开始移动,没有产生位移。在牵引执行延时 t_2 内,列车的加速度由 0 变为 a_1 。在 t_2 时间内看作以 $a_1/2$ 为等效加速度的匀加速过程,产生的位移为 S_1 。 t_2 时间结束后,列车的速度为 v_1 。随后列车以加速度 a_1 ,由 v_1 加速到 v_{st} ,该阶段为匀加速过程,产生的位移为 S_2 。

2) 二阶段:ATO 撤销牵引指令,同时发出制动指令。在 ATO 撤销牵引指令时,列车的行为依旧需要考虑牵引系统的延时。

(1) 在牵引响应延时 t_1 内,列车从 v_{st} 开始,仍

然在以 a_1 加速,该阶段为匀加速过程,产生的位移为 S_3 。在 t_1 结束后,列车的速度为 v_2 。

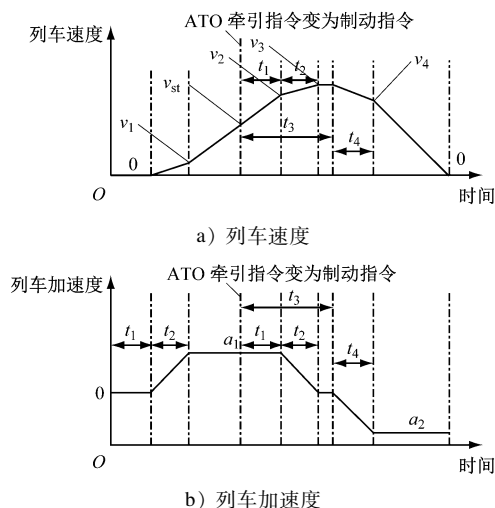
(2) 在牵引执行延时 t_2 内,列车从 v_2 开始继续加速,加速度由 a_1 变为 0。在 t_2 内,等效于以 $a_1/2$ 为等效加速度的匀加速过程,产生的位移为 S_4 。在 t_2 结束后,列车的速度为 v_3 。

(3) 由于牵引的总延时($t_1 + t_2$)一般小于空气制动的响应延时 t_3 ,因此在 t_2 结束后,列车还要以 v_3 的速度,恒速运行($t_3 - t_1 - t_2$)的时间,此阶段产生的位移为 S_5 。

(4) 在 t_3 结束后,列车从 v_3 开始减速,并在 t_4 内列车减速度由 0 达到 a_2 ,在 t_4 内可看作以 $a_2/2$ 为等效减速度的匀减速过程,在 t_4 内产生的位移为 S_6 。

(5) 在 t_4 结束后,列车的速度降为 v_4 ,并从 v_4 开始,以 a_2 减速直至列车停车,该阶段为匀减速过程,产生的位移为 S_7 。

传统 ATO 二次对标过程产生的理论最小总位移 $S_z = S_1 + S_2 + \dots + S_7$ 。传统 ATO 二次对标过程见图 3。



注: $S_1 \sim S_7$ 为各阶段产生的位移。

图 3 传统 ATO 二次对标过程示意图

Fig. 3 Diagram of conventional ATO re-benchmarking process

根据上海轨道交通 18 号线列车牵引系统和空气制动系统的特性,对特征参数取值: $t_1 = 0.5$ s, $t_2 = 0.4$ s, $t_3 = 1.0$ s, $t_4 = 0.5$ s, $a_1 = 0.3$ m/s², $a_2 = -0.3$ m/s², $v_{st} = 1$ km/h。其中 $v_{st} = 1$ km/h 按大部分地铁车辆空气制动系统施加保持制动的速度阈值取值,可避免车辆的保持制动功能对二次对标结

果造成影响。

计算得到 $S_z = 1.055$ m,不能完全满足二次对标功能的要求。

2 基于 LBD 的 ATO 二次对标方法优化

在考虑乘客舒适性及安全性的情况下,传统 ATO 二次对标方法的列车单次移动最小位移过大,无法满足二次对标功能的性能需求。经分析,主要原因在于空气制动对 ATO 指令的响应延时较大,因此, S_4 、 S_5 、 S_6 的实际值大于理论值。据此,本文基于 LBD 对传统 ATO 二次对标方法进行优化。

LBD 为信号系统向车辆输出的一个特殊指令。车辆在收到 LBD 后,会保持施加一个恒定级位的空气制动^[3],并且切除电制动。在二次对标的整个过程中,信号系统持续输出 LBD,车辆在此期间一直处于带闸运行的工况。

2.1 信号-车辆接口设计

LBD 为非安全指令。信号系统可以通过 I/O (输入/输出) 硬线或者 TCMS (列车控制与管理系统) 向车辆发送 LBD。当以下条件都满足时,车辆判断收到的 LBD 有效:①列车处于全自动运行模式;②信号系统发送的 LBD 为高电平;③信号系统同时发送了牵引指令及有效的牵引级位。

车辆判断 LBD 指令有效后,会持续施加一个固定级位为 L_{LBD} 的空气制动,该级位等效于列车产生 a_{LBD} 的减速度。

当二次对标功能启动时,列车是处于静止停车状态的,空气制动系统当时施加着保持制动的级位,因此车辆在收到 LBD 指令后,空气制动系统由保持制动级位下降至 L_{LBD} ,需要的执行时间为 t_{app} 。

2.2 优化后的二次对标列车起动方法

在二次对标的列车起动阶段,ATO 输出 LBD 指令及 1% 级位的牵引指令,且持续时间为 t_{app} 。此步骤的目的是使空气制动系统施加的制动力级位稳定为 L_{LBD} 。

随后 LBD 指令持续输出,并且将牵引级位提升至 L_{dep} 。此时的有效牵引加速度 a_{dep} 如图 4 所示。由图 4 可见, a_{dep} 为 L_{dep} 等效加速度 a_e 与 L_{LBD} 等效减速度 a_{LBD} 的差值。

2.3 优化后的二次对标列车停车方法

在二次对标的列车停车阶段,ATO 持续输出 LBD 指令并将牵引级位降至 1%,即利用空气制动系统已经产生的等效减速度 a_{LBD} 来停车,如图 5

所示。

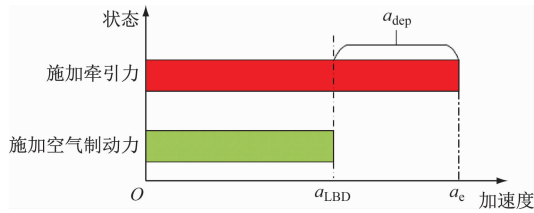


图4 牵引级位为 L_{dep} 时的有效牵引加速度示意图

Fig. 4 Diagram of effective traction acceleration with traction level L_{dep}

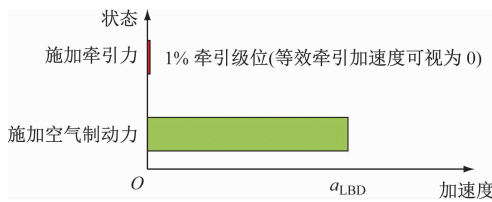


图5 使用等效减速度 a_{LBD} 停车示意图

Fig. 5 Diagram of parking with equivalent deceleration a_{LBD}

该停车方法的优势是空气制动力在列车起动阶段就已经建立并且保持稳定,整个停车的过程没有任何空气制动的施加延时和制动级位变化,仅有牵引系统降低牵引级位至 1% 产生的延时,因此可以大幅缩短停车过程的运行距离。

3 使用 LBD 的二次对标最小列车位移理论计算

图6为使用 LBD 进行二次对标整个过程的列车速度和位移变化。

对标各阶段的列车位移计算如下:

S_1 、 S_2 和 S_3 的计算方式与传统的 ATO 二次对标方法完全一致。

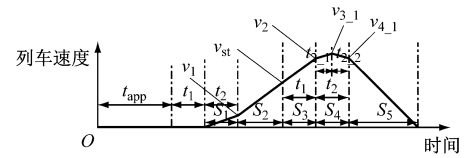
在牵引执行延时 t_2 内,列车的加速度 a_{dep} 变为减速度 a_{LBD} ,需将 t_2 细分为 $t_{2,1}$ 和 $t_{2,2}$ 两个时间段。其中:

$$t_{2,1} = \frac{a_{dep} t_2}{a_{dep} - a_{LBD}}$$

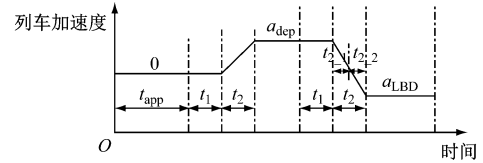
$$t_{2,2} = \frac{-a_{LBD} t_2}{a_{dep} - a_{LBD}}$$

在 $t_{2,1}$ 时间内,列车加速度由 a_{dep} 降为 0,可看作以 $a_{dep}/2$ 为等效加速度的匀加速过程,产生的位移为 $S_{4,1}$ 。在 $t_{2,1}$ 延时结束后,列车的速度为 $v_{3,1}$ 。

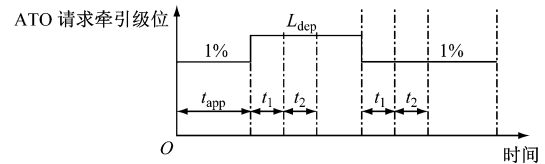
在 $t_{2,2}$ 时间内,列车减速度由 0 变为 a_{LBD} ,看作以 $a_{LBD}/2$ 为等效减速度的匀减速过程,产生的位移为 $S_{4,2}$ 。在 $t_{2,2}$ 延时结束后,列车的速度为 $v_{4,1}$ 。



a) 列车速度



b) 列车加速度



c) ATO 请求牵引级位

注:LBD 指令持续为高电平。

图6 优化后二次对标的过程参数

Fig. 6 Parameters of optimized re-benchmarking process

在整个 t_2 延时结束后,列车从速度 $v_{4,1}$ 开始以 a_{LBD} 作匀减速运动,直至列车停车。在该减速阶段,列车产生的位移为 $S_{5,s}$ 。

据上计算,在使用 LBD 的情况下,整个二次对标过程产生的理论最小总位移 S_z 为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 $S_{4,1}$ 、 $S_{4,2}$ 及 $S_{5,s}$ 之和。

根据上海轨道交通 18 号线列车牵引系统和空气制动系统的特性,取: $t_1 = 0.5$ s, $t_2 = 0.4$ s, $a_{dep} = 0.3$ m/s², $a_{LBD} = -0.3$ m/s², $v_{st} = 1$ km/h。

计算得到, $S_z = 0.795$ m。该值可以满足二次对标功能最小位移要求。

在项目实际实施过程中,确定列车实际 a_{LBD} 的方法为:在同一个轨道区段,施加两次相同固定级位的牵引,一次不施加 LBD,一次同步施加 LBD,将两次测得的列车加速度相减,即得到 a_{LBD} 。

4 结语

本文提出了一种基于 LBD 的 ATO 二次对标方法,该方法通过信号-车辆接口中新增 LBD 指令,使得列车可以在单次移动过程中,实现小于 1m 的总位移,从而满足了二次对标功能的性能需求。目前该方法已经应用在上海轨道交通 15 号线、18 号线等全自动运行线路中,可以达到 100% 的 ATO 二次对标成功率。

(下转第 41 页)

$m^{[4]}$,即可满足列车自动入库精准而安全的停车要求。

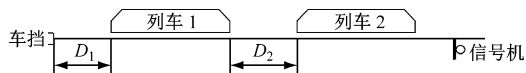


图 7 双列位停车库线长度示意图

Fig. 7 Length design of double-row parking garage line

3 结语

本文基于 TACS 的特性,对城市轨道交通自动化场段所需关键功能进行研究,重点针对场段内调车、列车休眠唤醒、列车出入库作业进行了分析对比。根据分析可以看出,目前 TACS 下的自动化场段具备稳定的唤醒功能、灵活的休眠点,能实现高效的出库作业,对库线要求较低且调车流程简便。对于传统 CBTC 系统下的自动化场段而言,可参考现阶段 TACS 优点进行升级,例如,优化信号系统逻辑实现道岔资源细化,从而提升场段作业效率,亦或通过更新硬件设备增强系统安全冗余及稳定性,降低土建要求等。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 汪小勇. 城市轨道交通自动化车辆段和停车场的关键功能分析[J]. 铁道通信信号, 2016, 52(2): 53.

WANG Xiaoyong. Analysis of key functions of automatic depot and parking lot of urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2016, 52(2): 53.

[4] 陈绍文. 列车自主运行系统下城市轨道交通线路配线需求研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(11): 72.

CHEN Shaowen. Research on line design requirements of urban rail transit under TACS system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(11): 72.

· 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-05-16 出版日期:2024-11-10

Received:2024-03-18 Revised:2024-05-16 Published:2024-11-10

· 通信作者:孙鹤仁,助理工程师,sunhr0428@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 36 页)

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 全自动运行系统规范 第一部分:需求;T/CAMET 04017.1—2019[S]. 北京:中国铁道出版社,2019.

China Association of Metros. Urban rail transit—Fully automatic operation system specification Part 1: requirements; T/CAMET 04017.1—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[2] 王玉冰,高天,林鸿. 二次短距离对标停车方法、列车控制系统及自动驾驶系统;CN202110228554.7[P]. 2022-05-31.

WANG Yubing, GAO Tian, LIN Hong. Rebenchmarking method for parking in short distance, train control system and automatic driving system; CN202110228554.7[P]. 2022-05-31.

[3] 李臣,赵庆刚,李小亮. 系列化标准地铁车辆制动系统与全自动无人驾驶相关的功能需求分析[J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(6): 1.

LI Chen, ZHAO Qinggang, LI Xiaoliang. Analysis on functional requirements of the braking system of serialized standard metro vehicles related to fully automatic unmanned driving[J]. Smart Rail Transit, 2022, 59(6): 1.

· 收稿日期:2024-05-08 修回日期:2024-06-27 出版日期:2024-11-10

Received:2024-05-08 Revised:2024-06-27 Published:2024-11-10

· 通信作者:华志辰,工程师,huazhichen@casco.com.cn

· ©《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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821