

# 城市轨道交通列车自动控制停站舒适度研究

黄璞<sup>1</sup> 张琨<sup>1</sup> 杜庆<sup>2</sup>

(1. 浙江众合科技股份有限公司, 310051, 杭州; 2. 新誉庞巴迪信号系统有限公司, 213166, 常州//第一作者, 工程师)

**摘要** 针对城市轨道交通列车在采用自动控制技术停站过程中乘客舒适性较差的现象,提出了通过提升车辆跟随性,以及改善ATO(列车自动运行)控制算法来提高ATO停站舒适度的措施。对ATO停站舒适度进行了分析,列车制动舒适度需满足列车纵向冲击率 $\leq 0.75\text{ m/s}^3$ ;通过人工驾驶列车运行试验得出将列车制动级位控制在40%以内时,乘客舒适度体感更舒适;对列车停站过程中空气制动对车辆跟随性的影响进行了分析,提出在列车停站过程中采用纯电制动的措施提升列车跟随性改善舒适度的方法;提出改善ATO控制算法,采用PID(比例-积分-微分)控制算法调整参数,来改善ATO控车曲线使列车以较小制动级位停车。在此基础上,优化了PID控制算法,选择自适应PID控制算法。较传统PID控制算法,自适应PID控制算法可更高效地解决舒适度难题。

**关键词** 城市轨道交通;全自动运行;列车;停站舒适度

**中图分类号** U284.48

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.06.007

## Research on Urban Rail Transit Train Stopping Comfort Level under Automatic Control

HUANG Pu, ZHANG Kun, DU Qing

**Abstract** Targeting the phenomenon that passengers are experiencing poor comfort in the process of urban rail transit train stopping at station using automatic control technology, measures to improve the train stopping comfort level in ATO (automatic train operation) mode through increasing vehicle followability and optimizing ATO control algorithm are proposed. From analysis of ATO train stopping comfort level, the train braking comfort should meet the condition of train longitudinal impact rate  $\leq 0.75\text{ m/s}^3$ ; through manual operation test, it is concluded that passengers can experience more physical comfort when train brake level is controlled under 40%; the influence of air braking on vehicle followability during train stopping process is analyzed, and the measure of pure electric braking is adopted to elevate train followability during station stopping process which in turn improves the comfort level; an improved ATO control algorithm is proposed, and PID (proportion-integration-differentiation) control algorithm is used to ad-

just parameters to optimize ATO train control curve so that the train stops at a lower brake level. On this basis, the PID control algorithm is optimized, and the self-adaptive PID control algorithm is selected. Compared with the conventional PID control algorithm, the comfort issue can be treated more efficiently with self-adaptive PID control algorithm.

**Key words** urban rail transit; fully automatic operation; train; comfort level of train stopping

**First-author's address** UniTTEC Co., Ltd., 310051, Hangzhou, China

FAO(全自动运行)技术的应用,减轻了驾驶员劳动强度,降低了人为误操作风险,提升了运营效率。但在列车FAO过程中,由于软件控车逻辑以及驾驶员在操作性上存在差异,列车的舒适度无法与娴熟驾驶员的人工驾驶相媲美。尤其在站台对标停站过程中,受限于停站精度的要求,ATO(列车自动运行)系统控车停站时易产生顿挫感,舒适度较差。近年来随着人工智能技术、数据挖掘技术的不断成熟,ATO系统控车的舒适度将大为改善。

## 1 ATO 停站原理

### 1.1 停站原理概述

ATO根据预编程的控制算法,通过控制列车的加、减速来实现列车的FAO功能。列车运行的工况主要有牵引、制动、惰行、起动和停站。完整的一次ATO站间运行过程,均由不同工况相结合形成。ATO根据ATP(列车自动防护)系统授权速度,结合线路设计计算出相对应的ATO速度曲线,如图1所示。

ATO控车时,由于新建站台均安装了站台门,要求ATO系统必须实现不影响乘客上、下车效率的站台精确停车。目前各项目规定停车精度需在 $\pm 0.3\text{ m}$ 内<sup>[1]</sup>。停站过程中,ATO系统需与车辆牵引系统、制动系统通过TCMS(列车控制与管理系统)接口进行数据交换,以及间接通过轨旁ATC(列

车自动控制)系统与站台门系统建立数据连接。ATO 系统架构如图 2 所示。

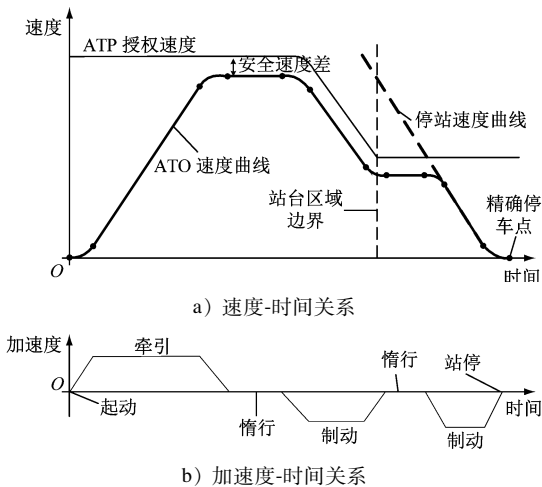
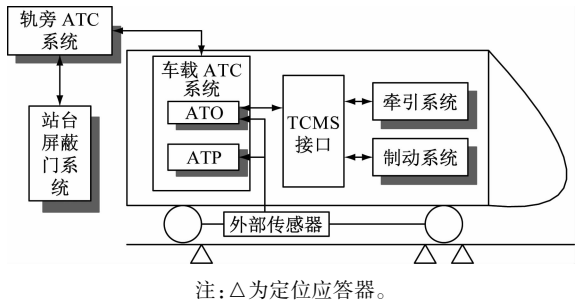


图 1 ATO 站间运行速度、加速度随时间变化曲线  
Fig. 1 Curve of ATO station interval operating speed and acceleration changing over time



注:△为定位应答器。  
图 2 ATO 系统架构  
Fig. 2 ATO system architecture

### 1.2 ATO 停站技术方案

ATO 的主要功能是控制列车速度和位移,使列车在最优行车间隔及最佳节能模式下实现最精确停车。列车在区间运行过程中,ATO 系统在 ATS (列车自动监控) 系统下发的运行曲线中选择与发车和到站时间最匹配的运行曲线,使列车按照运行图规定的区间走行时分行车,从而自动完成对列车的牵引、制动、惰行等工况的控制,从而实现列车准点运行<sup>[2]</sup>。

当 ATO 系统控制列车由区间接近站台时,对于非系统设定的跳停站,根据已存储的线路电子地图信息,更新 ATO 目标停车点、左/右侧开门等信息。当列车通过站台应答器时,车载应答器传输模块将准确的定位信息发送给车载信号设备,车载信号设备利用定位信息将对列车位置进行精确校准,从而减少 ATO 控制列车停站的误差值。

列车停站过程中,ATO 系统将根据列车当前速度、预定的制动率、当前位置与停车点距离的差值计算出停站速度曲线,从而通过改变所需的牵引力与制动力来控制列车遵循此曲线停车。目前,主流信号厂家在设计 ATO 停站逻辑时,为提升停站效率均采用到站一次制动的方式,即以恒定减速度的方式进行列车制动,同时在停站前对制动率微调以保障列车精确停车。典型的 ATO 车站停车曲线如图 3 所示。

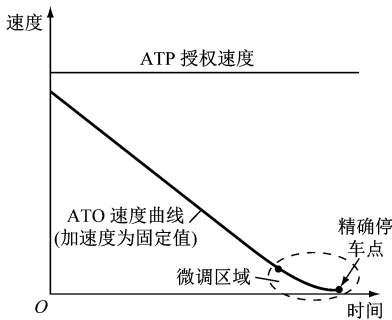


图 3 典型的 ATO 车站停车曲线  
Fig. 3 Curve of typical ATO station stopping

### 1.3 ATO 停站的关键技术

ATO 停站在整个运行过程中需满足准点性、舒适度、节能性的要求。而在列车停站过程中,基于站台区域的特殊性以及满足乘客上、下车的客服需求,ATO 停站需满足以下关键技术要求:

1) 列车精确停车要求。精确停车是实现乘客在站台高效上、下车的保证,即车门要能够完整地对乘客开放。为提升 ATO 停站精度,各信号系统厂商已进行了深入研究,典型的如泰雷兹的接近盘辅助停车方式、阿尔斯通及早期阿尔卡特的感应环线停车方式,以及目前通用的通过优化应答器布置的方式实现 ATO 精确停车。目前,国内外各主流信号系统厂家的 ATO 系统在列车停站过程中,均完全能满足列车停车精度在  $\pm 0.3\text{ m}$  内 99.99% 的性能指标要求。

2) 列车准点性要求。目前,城市轨道交通的运行密度大、运能高,对列车运行过程的准点性要求非常高。对 ATO 系统而言,只有根据 ATS 系统的指挥保证准点运行,才能实现全系统的高效运行。ATO 系统通过实时调整列车运行控制曲线,实现对列车运行准点性要求的满足。而列车准点性是从起点站起动到在终点站停车的整个过程中,实际运行时间与计划运行时间的差值。在列车各站台

停站过程中,ATO 系统通过到站一次制动的停站方式,采用一条恒定制动率的制动曲线可高效且以最少的时间实现列车停站过程。

3) 列车停站舒适度要求。在列车运行过程中,无论牵引、制动、惰行、起动及停站均应保证列车的平稳运行。尤其在停站过程中,ATO 运行不平稳时将导致站立乘客摔伤事件的发生。但受限于对 ATO 精确停站的需求,停站舒适度的整体要求并不高。

随着近年来 ATO 技术的不断成熟,ATO 系统在列车精确停车及准点运行等方面已实现了成熟化运行,同时与乘客服务相关的停站舒适度要求也越来越受到乘客与 FAO 技术研究人员的重视。

## 2 ATO 停站舒适度分析

### 2.1 列车舒适度表征方法

列车作为公共交通运输工具,在 ATO 运行过程中,除了保证行车安全、运输效率外,还应保证乘客乘车舒适度,即在列车牵引、制动、惰行、起动和停站过程中,均应保证列车平稳运行,对站立或坐着的乘客均无不适感。但由于人与人之间的差别,不同的人对舒适度的感知程度不同,故提出用加速度的变化率,即冲击率直接表征舒适度<sup>[3]</sup>:

$$J_{\text{erk}} = \int \left| \frac{da}{dt} \right| dt \tag{1}$$

式中:

- $J_{\text{erk}}$ ——冲击率;
- $a$ ——行车过程中的加速度;
- $t$ ——运行时间。

式(1)中, $J_{\text{erk}}$  值越小,乘客的舒适度越高。

目前,我国城市轨道交通行业均以冲击率指标作为舒适度的衡量标准。GB 50490—2016《城市轨道交通技术规范》规定:牵引及制动力变化时的冲击率应符合人体对加、减速度变化的适应性。GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》规定:列车纵向冲击率不应大于  $1.0 \text{ m/s}^3$ 。中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会发布的 CZJS/T 0005—2015《城市轨道交通车辆电空制动系统通用技术规范》规定:制动冲击率为列车在制动力变化过程中瞬时减速度的变化率,列车常用制动的纵向冲击率不应大于  $0.75 \text{ m/s}^3$ ,紧急制动无冲动限制。ISO 2631-1—1997《机械振动与冲击 人体处于全身振动的评价 第 1 部分:一般要求》对舒适度的评定结果

如表 1 所示。

表 1 ISO 2631-1—1997 对舒适度的评定结果  
Tab. 1 Comfort level evaluation results by ISO 2631-1—1997

舒适度等级	振动加速度/( $\text{m/s}^2$ )	评定结果
1 级	$<0.315$	非常舒适
2 级	$0.315 \sim 0.630$	舒适
3 级	$0.500 \sim 1.000$	还算舒适
4 级	$0.800 \sim 1.600$	不舒适
5 级	$1.250 \sim 2.500$	非常不舒适
6 级	$>2.000$	极不舒适

参照 ISO 2631-1—1997,城市轨道交通行业一般采用的制动舒适度标准值为减速度 $\leq 0.8 \text{ m/s}^2$ 、冲击率 $\leq 0.75 \text{ m/s}^3$ 。目前,国内新建轨道交通线路在设计时均要求列车舒适度即列车纵向冲击率 $\leq 0.75 \text{ m/s}^3$ 。

### 2.2 影响列车停站舒适度因素分析

#### 2.2.1 影响列车舒适度因素分析

列车运行的工况比较复杂,当列车使用牵引、制动、惰行、起动及停站等不同工况时,均可能使列车产生纵向冲动。根据分析,使列车产生纵向冲动而降低舒适度的原因,主要有以下因素:

1) 列车牵引、制动切换频繁度<sup>[4]</sup>。列车牵引、制动切换的过程是加速度与减速度的切换,频繁的变换将导致  $J_{\text{erk}}$  上升。

2) 列车减速停车过程中,一般情况下电空转换存在时差,其制动力不能完全与制动需求一致,从而产生冲击感;同时,由于车辆与 ATO 指令间的跟随性变差,引起牵引、制动的过度切换。

3) 线路设计条件,如坡度、弯道等。ATO 控制算法通过其对不同线路条件的适应性,提升列车停站舒适度。

目前,基本所有列车停站舒适度较差的运营线路,乘客的反馈主要表现在停站瞬间顿挫感强烈、舒适度较差。经分析,在 ATO 停站过程中,为了满足站台停车精度  $\pm 0.3 \text{ m}$  的要求,当车辆跟随性较差或受 ATO 控车模型算法的影响,ATO 系统计算出列车可能发生冲标或欠标时,将在短时间内切换牵引、制动指令,以较大级位的制动力停车。

#### 2.2.2 停车制动级位分析

为确认人工驾驶模式下列车的舒适度,以及 ATO 停车舒适度良好情况下列车制动级位的理想

范围,在某条正在运营的城市轨道交通线路(采用 C 型车及国产牵引及制动系统)进行了人工驾驶测试。人工驾驶列车时,列车整体舒适度较好。一个完整区间的列车运行速度控制曲线如图 4 所示。

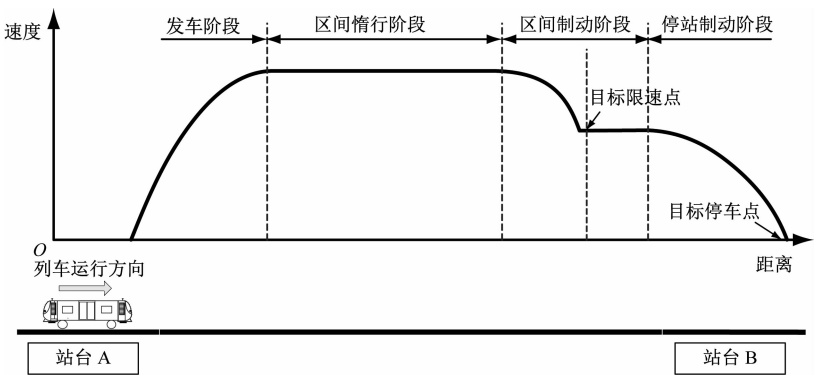


图 4 人工驾驶列车运行速度控制曲线  
Fig. 4 Speed control curve of manual train operation

经分析,驾驶员在列车停车过程中的运行速度控制良好,最终以较小的制动力且均以 30% 内的制动级位停车,故停车体感舒适度较好。

根据列车停车制动级位大小对乘客舒适度的影响,确认 ATO 停站最佳的制动级位范围。分别测试了在人工驾驶模式下,列车以不同制动级位停车时乘客的舒适度(乘客体感由 10 名乘客体验反馈)。具体测试情况如表 2 所示。

由表 2 可见,测试数据均满足冲击率 $\leq 0.75\text{ m/s}^3$ 的要求,且当停车制动级位在 40% 以下(含 40%)时,乘客舒适度较好;停车制动级位在 20% 以内时,乘客非常舒适。故建议 ATO 控车停车时,将制动级位控制在 40% 以内,使得乘客体感更舒适。

列车不同制动级位下停车的加速度变化曲线如图 5 所示。其中,加速度变化率(切线方向)即为冲击率。

表 2 列车不同制动级位下的乘客舒适度  
Tab.2 Passenger comfort under different train brake levels

制动级位/%	$J_{\text{cek}}/(m/s^3)$	乘客舒适度
50	0.62	有顿挫感
45	0.54	有顿挫感
40	0.47	舒适
35	0.44	舒适
30	0.41	舒适
20	0.38	非常舒适

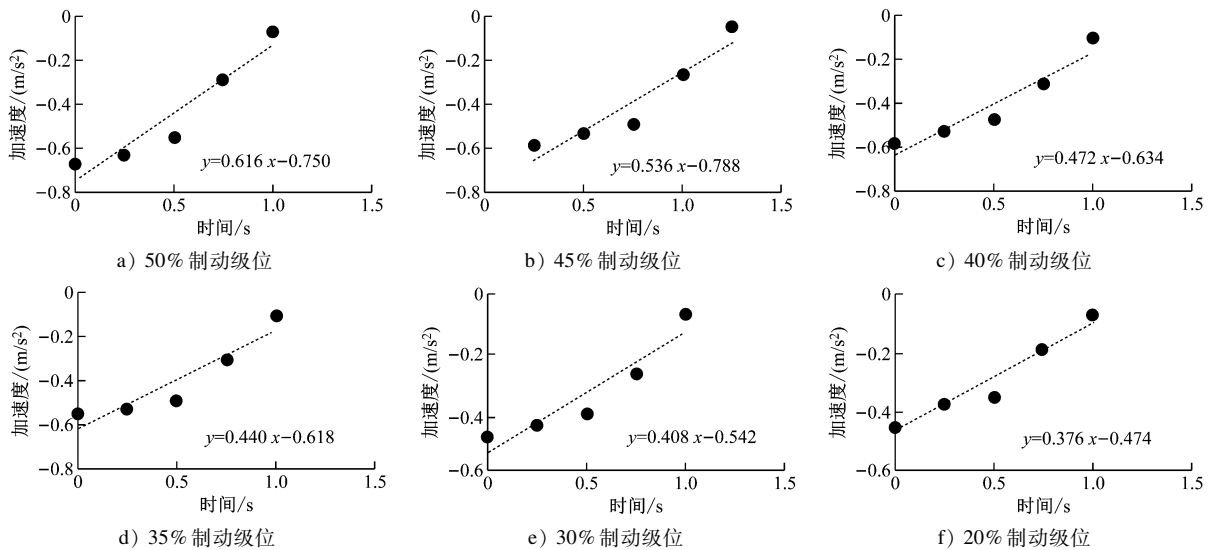


图 5 列车不同制动级位下停车的加速度变化曲线  
Fig. 5 Acceleration change curve of train stopping under different brake levels

### 3 ATO 停站舒适度的提高措施

#### 3.1 提升车辆跟随性

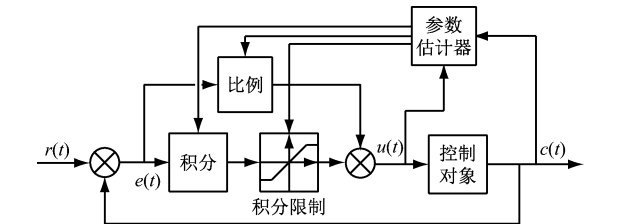
城市轨道交通车辆的制动分为电制动与空气制动。其中:电制动是靠电机切割磁感线将动能转化为电能,再通过外接电阻消耗掉电能来施加列车制动;空气制动又称为机械制动或摩擦制动,主要以压缩空气为动力源,推动摩擦块与制动盘摩擦来施加制动,国内以闸瓦制动和盘形制动为主。电制动在低速时可靠性低,目前国内城市轨道交通项目均在列车速度为 10 km/h 以内时采用空气制动。但由于空气制动的响应时效性不如电制动,其制动力不能完全与 ATO 制动需求一致,即跟随性变差,容易出现 ATO 列车控车不稳、停站舒适度差的情况。

随着电制动技术的发展,为提升车辆在 ATO 控车情况下的跟随性,未来新建轨道交通线路可采用纯电制动、空气制动仅参与紧急制动的方案。目前,阿尔斯通、西门子等厂商在国外已开展了相关试验,并投入了商业运用。ATO 停站过程中使用纯电制动,可有效解决列车停站舒适度问题。

#### 3.2 改善 ATO 控制算法

##### 3.2.1 传统比例-积分-微分控制

ATO 过程控制算法一般采用传统的 PID(比例-积分-微分)算法(见图 6),通过对输出进行增量限制实现对冲击加速度的控制。积分限制的使用使 ATO 子系统能更快速地控制列车响应速度指令。参数估计器主要根据不同的场景,给出不同的比例和积分调节系数,使列车在不同场景下以不同的运行速度和方式响应运行指令。



注: $r(t)$  为给定值; $e(t)$  为给定值与测量值之差; $u(t)$  为 PID 控制器的输出信号; $c(t)$  为输出量。

图 6 典型 PID 控制算法示意图

Fig. 6 Diagram of typical PID control algorithm

为减少列车在线路上运行的冲击率以提高列车停站的舒适度,停站过程中需避免牵引制动指令的频繁切换。ATO 软件测试人员需根据线路情况

给出合理的 PID 参数,使列车在进站停车阶段采取一次性连续制动并以较小级位停车,即一次性制动至目标停车点的方式。

##### 3.2.2 自适应 PID 控制

基于传统 PID 控制的 ATO 系统,在测试及运用过程中,发现具有以下不足:

1) 调试难度大、周期长。城市轨道交通线路情况复杂,不同线路、不同站台的物理环境均有差异,测试人员需通过在不同站台不断地测试选取合适的参数值。

2) 人工选取的参数存在大量人为测试因素,导致停车精度不高、舒适度差异大。

3) 车辆及其制动系统经多年使用性能下降,导致 ATO 停车性能改变,需重新手动调整参数。

近年来,随着机器学习技术的快速发展,将自适应 PID 控制算法应用到 ATO 控制软件中,使 ATO 具备自学习、自适应停站功能,可更高效地解决 ATO 停站舒适度及精确度问题。自适应 PID 控制吸收了自适应控制与常规 PID 控制两者的优点,目前应用较成熟的是模糊自适应 PID 控制<sup>[5]</sup>。模糊自适应 PID 控制器将输入信号与反馈信号进行比较,得出偏差信号;再将偏差信号分为两路,一路直接进入 PID 控制器,另一路由自适应控制器进行校正,将校正后的值输入 PID 控制器作为 PID 参数。自适应 PID 控制算法示意如图 7 所示。

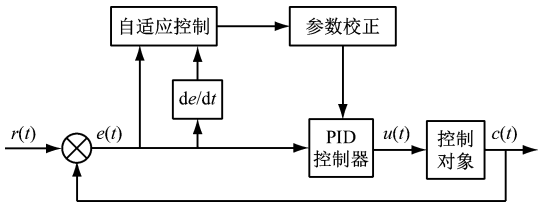


图 7 自适应 PID 控制算法示意图

Fig. 7 Diagram of self-adaptive PID control algorithm

基于自适应 PID 控制的 FAO 列车在运行过程中,通过不断自我学习,自动调整控制器参数,不但提升了停站舒适度,并有效解决了传统 PID 控制的不足。

### 4 结语

城市轨道交通是面向广大乘客的公共服务交通,乘车满意度是对城市轨道交通装备业的最大肯定。无论 ATO 还是基于 ATO 技术发展起来的

(下转第 49 页)

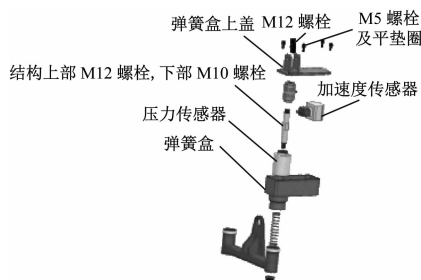


图8 弹簧盒处传感器安装示意图

Fig.8 Diagram of sensor installation at spring box

结构牢固、稳定、轻便。

弓网接触压力检测装置可以实时监测地铁列车运行过程中弓网接触压力的变化情况,根据其变化趋势及时调整接触压力到最佳状态,以保持碳滑板的机械和电气磨耗最小,减少碳滑板出现偏磨、掉块、断裂等异常问题,最终提高碳滑板的正常使用寿命。

另外,该装置可以准确找出接触网的硬点,提高了接触网的检修、维修效率。通过分析弓网加速度曲线的变化趋势,可以查找最大波峰和波谷处的加速度值。如果该处的加速度值过大,则说明此处弓网冲击较大,是接触网维修的隐患点。

## 4 结语

针对碳滑板磨耗问题,检修人员要加强碳滑板状态的日常检查,做好其磨耗程度的跟踪和记录。对磨损超限或接近超限的碳滑板要及时打磨或更换,并实

(上接第43页)

UTO(无人值守的列车自动运行),在FAO停站过程中均需保证乘客的体感舒适度。通过提升停车制动阶段车辆的跟随性,以及改善ATO停站算法等有效措施,提高FAO列车停站舒适度,提升乘客满意度,使轨道交通更好地服务于市民。

## 参考文献

- [1] 何之煜,杨志杰,吕旌阳.基于自适应模糊滑模的列车精确停车制动控制算法[J].中国铁道科学,2019,40(2):122.  
HE Zhiyu, YANG Zhijie, LYU Jingyang. Braking control algorithm for accurate train stopping based on adaptive fuzzy sliding mode[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 122.
- [2] 罗松. CTCS2 + ATO 城际铁路列控系统总体技术研究[J]. 铁路通信信号工程, 2015, 12(3): 1.  
LUO Song. General technique research on CTCS2 + ATO intercity railway train control system[J]. Railway Signalling & Communica-

时监测弓网接触压力的变化情况,及时调整锚段关节处接触线间距,同时加强司机驾驶技能培训,提高列车运行平稳性,最大限度减少碳滑板异常磨耗。总之,需在多方面加强技术运用和管理,提高6号线列车的运行品质,为乘客安全出行做出贡献。

## 参考文献

- [1] 朱伟鹏. 深圳地铁11号线受电弓碳滑板磨耗率研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(4): 121.  
ZHU Weipeng. Research on wear rate of pantograph carbon slide in Shenzhen Metro Line 11[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(4): 121.
- [2] 严石,梅炳初,周卫兵. 新型受电弓滑板材料的研究[J]. 机车电传动, 2009(6): 21.  
YAN Shi, MEI Bingchu, ZHOU Weibing. Research on new material for pantograph slide plates[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(6): 21.
- [3] 上海天海受电弓制造有限公司. 北京地铁6号线地铁车辆受电弓使用维护说明书[Z]. 上海:上海天海受电弓制造有限公司,2017.  
China Shanghai Sky & Sea Pantograph Manufacturing Ltd. Operation and maintenance instructions for pantograph of metro vehicles on Beijing Metro Line 6[Z]. Shanghai: China Shanghai Sky & Sea Pantograph Manufacturing Ltd., 2017.
- [4] 东洋电机制造株式会社. 集电装置 PT7203 单臂受电弓操作保养手册[Z]. 东京:东洋电机制造株式会社,2018.  
Toyo Denki Seizo K. K. Operation and maintenance manual of PT7203 single-arm pantograph for current collector[M]. Tokyo: Toyo Denki Seizo K. K., 2018.

(收稿日期:2020-12-04)

tion Engineering, 2015, 12(3): 1.

- [3] 陈德旺. 城轨列车智能驾驶的优化模型及算法[M]. 北京:北京交通大学出版社,2014.  
CHEN Dewang. Optimization models and algorithms for intelligent train operation of urban rail transit[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] 张友兵,陈志强,王建敏,等. 高速铁路ATO系统控车舒适度技术研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 67.  
ZHANG Youbing, CHEN Zhiqiang, WANG Jianmin, et al. Research on the comfort control technology of the ATO system in high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 67.
- [5] 李德仓,孟建军,郝帅,等. 基于模糊自适应PID的列车智能驾驶算法[J]. 兰州交通大学学报, 2018, 37(4): 27.  
LI Decang, MENG Jianjun, HAO Shuai, et al. An intelligent train operation based on fuzzy adaptive PID[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2018, 37(4): 27.

(收稿日期:2020-12-29)