

# 地铁列车精确停车算法研究

何浩洋<sup>1</sup> 王 昊<sup>1,2</sup>

(1. 南京恩瑞特实业有限公司, 211106, 南京; 2. 国睿科技股份有限公司, 211106, 南京 // 第一作者, 工程师)

**摘 要** 地铁列车停车精度是列车自动驾驶系统性能的重要指标。结合车辆参数、列车冲击、电空转换等性能建立了列车制动模型, 并提出了利用在线识别的方式对每一列车的空气制动参数进行自学习, 解决了不同列车因空气制动变化导致的制动异常问题, 可较好地提高列车自动驾驶舒适性和精确停车模型的鲁棒性。通过仿真和实际工程项目结果分析, 所提出的制动模型可保证列车的停车精度达到 $\pm 0.25$  m。

**关键词** 地铁列车; 精确停车; 算法

**中图分类号** U284.48

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.012

## Research on Precise Parking Algorithm for Metro Train

HE Haoyang, WANG Hao

**Abstract** Metro train parking precision is an important indicator of train automatic control system. A train control model is established based on the performance of vehicle parameters, train jerk, electro-pneumatic conversion, and a self-learning based on online recognition of the air braking parameters of each train. The braking abnormality problem caused by air braking changes in different trains is solved, and the comfort of automated driving and robustness of precise parking model can be well improved. Through simulation and analysis of actual engineering project results, the proposed braking model can ensure train parking precision within  $\pm 0.25$  m.

**Key words** metro train; precise parking; algorithm

**First-author's address** Nanjing NRIET Industrial Co., Ltd., 211106, Nanjing, China

在中国ATO(列车自动运行)主要功能是代替司机控制列车运行。其根据线路限速、目标停车点、线路状况等生成列车速度曲线, 并结合列车模型, 计算需施加的牵引或制动力大小, 通过电流环输出至车辆; 车辆采集此信息后施加相应的牵引或制动力。列车进站停车采用一次制动方式, 即停车过程中进入制动后不再退出制动直至列车精确停止在运营停车点。

随着城市轨道交通的发展, 目前对乘客舒适度

要求越来越高, 中国城市轨道交通协会编制的《城市轨道交通信号系统用户需求书》《城市轨道交通CBTC信号系统-ATO子系统规范》中指出, 在保证列车舒适度的要求, 即列车纵向冲击率 $\leq 0.75$  m/s<sup>3</sup>的前提下, 列车在车站站台的停车精度为 $\pm 0.3$  m时, 应保证列车停在该停车精度范围内的概率为99.99%; 停车精度为 $\pm 0.5$  m时, 应保证列车停车在该停车精度范围内的概率为99.999 8%。此外, 为保证乘客舒适度, 应尽量减少牵引和制动之间的切换。

目前, 车载ATO系统模型主要考虑列车传输延时和惯性性能, 未考虑列车电空参数不一致和舒适度等相关需求, 因此需建立合适的列车控制模型, 实时计算列车性能参数, 以便于计算更适合于列车驾驶的推荐速度和制动曲线。

## 1 制动系统模型分析

ATO控制列车运行时, 主要控车过程如图1所示。

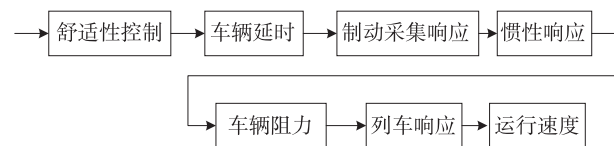


图1 ATO控车过程

ATO根据速度曲线、停车点信息等计算期望加速度, 同时考虑列车运行时舒适性, 主要采用冲击控制和列车牵引制动切换死区限制等方式, 通过电流环输出至车辆。车辆采集ATO输出的电流环值大小, 并发送至牵引、电制动、空气制动各系统, 产生对应的需施加的力。产生的力减去线路或空气产生的阻力, 即为车辆能响应的力。此力作用在运动中的车辆产生对应的加速度, 积分后即可得到真实的速度。

ATO实现精确控车的关键因素为控制对象模型参数的精确性。在计算列车驾驶推荐速度和制动曲线时, 需根据配置的列车性能参数来计算。这些列车性能参数包括牵引加速度、制动能力、牵引切除延

时等。列车牵引系统性能较为稳定,且不影响精确停车,故可根据车辆参数进行建模。

列车制动系统由电制动和空气制动组成。列车采用电制动和空气制动时的响应不一致。列车低速控制对精确停车影响较大,因此需要考虑电制动减速度、空气制动减速度、空气制动施加延时。另一方面,列车在低速时会进行电空转换,当列车制动到一定速度时,会由电制动逐渐转为空气制动。

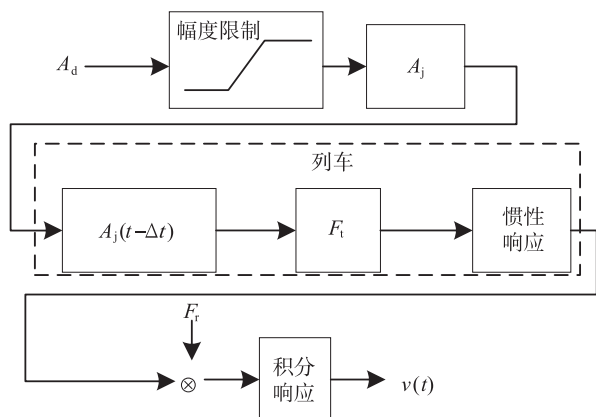
不同的列车在制动性能上也会有差异,同一列车在驾驶过程中,由于车轮、制动闸瓦的磨损及其他原因,会导致列车实际的性能参数与之前配置的值有所不同。如果列车实际性能比配置参数差,可能会导致列车冲标或欠标;如果列车实际性能比配置参数高,则降低了列车实际运行效率。

冲击控制主要对列车加速度变化率进行限制,使其不超过相应的范围。死区限制则主要是由于列车牵引和制动响应参数存在不一致,频繁的牵引制动切换可能会引起列车响应不及时,同时,给乘客带来较差的舒适度。因此,在需要进行牵引制动切换时,应进行相应的限制。

## 2 制动系统模型建立

根据上述分析,可建立列车控制模型,并根据此模型进行相应的列车控制。

图2为本文建立的列车模型:ATO根据列车位置、速度、实际加速度、线路等信息计算列车期望加速度,并对期望输出加速度进行死区和冲击率限制,得到输出至车辆的加速度;车辆考虑传输延时,根据车重等信息转换为需施加的力,考虑列车特性即可



注: $A_d$ 为期望输出的加速度; $A_j$ 为冲击加速度; $t$ 为当前的时刻; $\Delta t$ 为传输延时; $F_t$ 为车辆制动力; $F_r$ 为线路阻力; $v(t)$ 为 $t$ 时刻的列车速度。

图2 列车控制模型

得到当前实际产生的力;综合线路阻力等因素,即可得到列车输出的预期速度。

死区限制则主要是在进行牵引制动切换时,进行相应的限制。具体的限制如式(1)所示。

$$A_d(t) = \begin{cases} \min A_p & -A_{d,0} \leq A_d(t) \leq 0 \\ \min A_b & 0 \leq A_d(t) \leq A_{d,0} \\ A_d(t) & |A_d(t)| > A_{d,0} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$A_d(t)$ —— $t$ 时刻期望输出的加速度;

$\min A_p$ ——最小可输出牵引加速度;

$\min A_b$ ——最小可输出制动减速度;

$A_{d,0}$ ——死区限制加速度。

列车在牵引状态下若需施加较小的制动力,此时不进行制动切换,继续输出最小的牵引;反之,若制动状态下需施加较小的牵引,也不进行制动切换,继续输出最小的制动力;其他情况下则进行牵引制动切换。

冲击控制主要对列车加速度变化率进行限制,保证加速度不会发生突变,以免造成较大的冲击。

$$J = \frac{dA}{dt} < J_l \quad (2)$$

式中:

$J$ ——实时冲击率;

$A$ ——加速度;

$J_l$ ——限制冲击率。

车辆控制系统采集到ATO输出的电流环后,根据需求发送至控制系统。制动系统采集到外部请求后,将电流环值转为相应需施加至车辆的制动力。电制动系统和空气制动特性不一致,相同的力产生的制动效果不同,ATO端可检测到施加相同力产生的加速度不同。

$$F(t) = a(t)b_c \quad (3)$$

$$b_c = \begin{cases} b_{c,e} & v \geq v_e \\ \frac{1}{\lambda} b_{c,e} + (1 - \frac{1}{\lambda}) b_{c,b} & v_b < v < v_e \\ b_{c,b} & v \leq v_b \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$F(t)$ —— $t$ 时刻的制动力;

$a(t)$ ——当前采样的请求加速度系数;

$b_c$ ——系统最大制动力;

$b_{c,e}$ ——最大电制动力;

$b_{c,b}$ ——最大空气制动力;

$\lambda$ ——当前速度下电制动力退出系数;

$v$ ——当前车速;

$v_e$ ——电制动开始退出时的车速;

$v_b$ ——空气制动完全施加时的车速。

列车制动系统可作为一阶惯性系统,与列车特性相关,采集模块发送至电制动和空气制动设备时存在不同的延时。根据电制动和空气制动特性设置不同的惯性参数,来计算车辆的响应力。

列车运行过程中存在外部阻力  $F_r$ , 主要为空气阻力  $F_A$ 、坡道阻力  $F_g$  和曲线阻力  $F_R$ 。即:

$$F_r = F_A + F_g + F_R \quad (5)$$

$F_A$  与  $v$  相关,  $F_A = av^2 + bv + c$ , 其中  $a, b, c$  为常数。

为保证 ATO 控制系统的可用性和鲁棒性,需要对不同的车辆进行在线辨识。应对空气制动参数进行在线识别,列车运行一段时间后空气制动闸瓦发生变化,制动无法达到期望施加的大小,故需对空气制动参数进行修改;应对停车精度和特定速度空气制动响应进行统计,若分布区间发生变化,则认为制动系统存在误差,应修正空气制动参数。

$$b_{c,b} = \begin{cases} f(v, t)b_{c,b} & (\text{停车误差超出允许时}) \\ b_{c,b} & (\text{停车误差在允许范围内时}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$f(v, t)$ ——列车在一定时间内根据统计结果而计算的空气制动变化率。

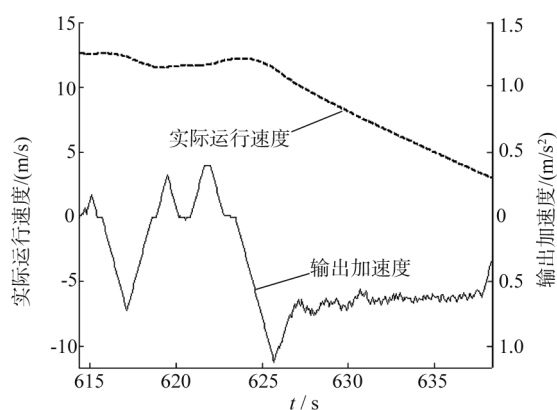
### 3 现场验证

对上述模型,在某线路 ATO 列车上进行现场验证。列车各参数,如 ATO 输出到车辆的采集时间、列车电制动和空气制动响应时间、电制动力等,均按既有车辆设置,并设置死区切换、冲击变化阈值。依据上述模型和设置的参数进行控车,以验证模型的正确性。

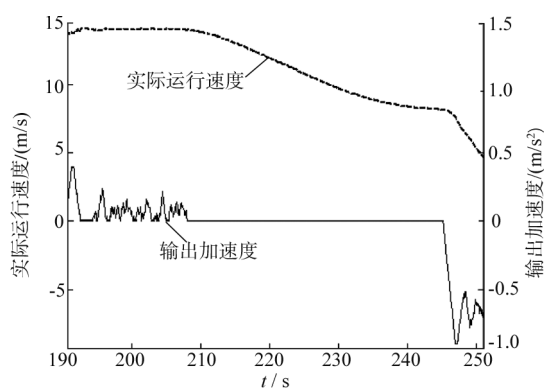
#### 3.1 舒适性控制

在线路上进行了两次试验,分别是添加死区限制模型和不添加模型。死区限制主要考虑线路巡航处坡道,可保证列车在巡航阶段尽量不进行牵引制动的切换。由图 3 a) 中可见,进行过多次牵引制动的切换,乘客乘坐体验较差;由图 3 b) 可见,列车只进行了 1 次牵引制动的切换,过渡平稳,能较好地提高舒适性,且死区限制模型的添加,并未影响列车的运营时间和停车精度。

此外,通过对加速度差进行分析可知,能满足冲击限制,冲击率小于  $0.5 \text{ m/s}^3$ ,且现场乘坐体验较好。



a) 未添加死区限制模型



b) 添加了死区限制模型

图 3 ATO 列车死区限制

#### 3.2 电制动和空气制动能力

现场对两列车进行了试验,其中一列车在正线运营时间较长,另一列车相对运营时间较短,但均在正线相同区间运行。由图 4 可见,在施加相同的制动力时,列车的响应加速度明显不一致。两列车均施加  $1.1 \text{ m/s}^2$  的制动率时,电制动下基本能实现  $1.1 \text{ m/s}^2$  的制动率,而空气制动下两列车存在不一致。

添加在线参数识别模型前,配置相同的参数,其中一列车会出现超停,即列车施加的制动力未能达到期望值;添加在线参数识别模型后,通过记录数据分析,两列车的空气制动力参数计算不一致,但均能满足停车精度。

#### 3.3 模型验证

根据上述建立的模型,列车 ATO 可计算准确的预测速度,并施加合适的牵引制动控制。ATO 系统可实现列车参数自适应,以实现高精度停车,且运行中抖动较小,具备较好的舒适性。对现场实际运行的多列车在半年内精确停车数据进行统计,图 5 列出了列车在进行参数自适应后的精确停车速度与加速度的变化情况。

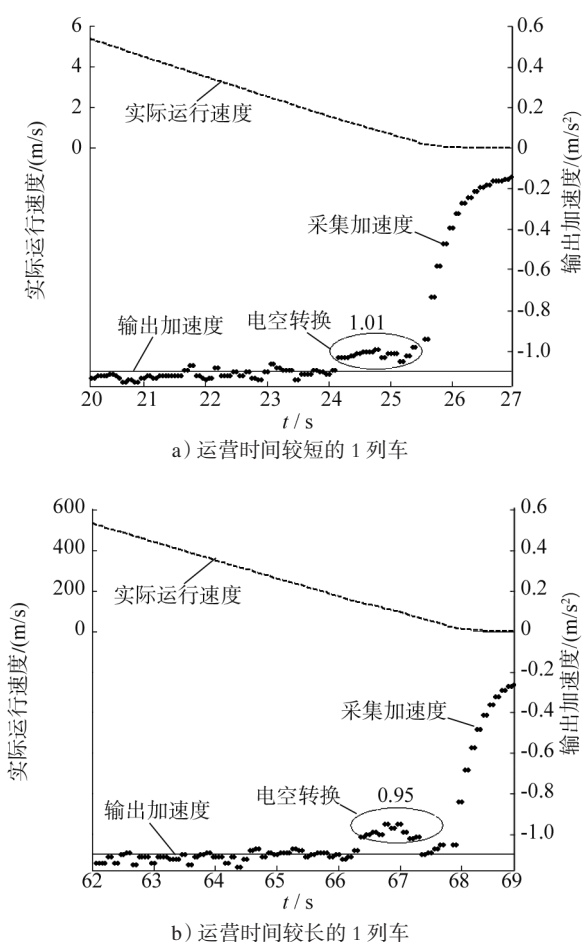


图 4 添加了在线参数识别模型后列车空气制动参数测量

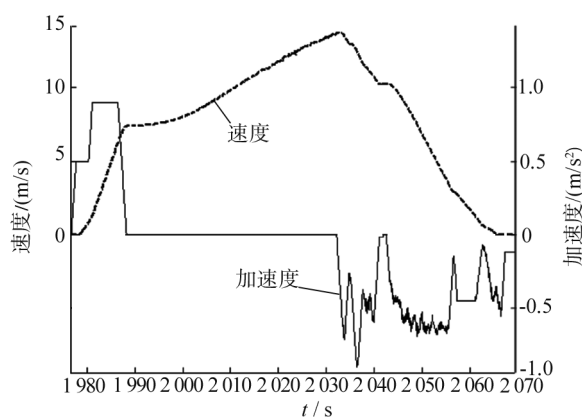


图 5 添加在线参数识别模型后列车运行曲线

通过对列车速度和加速度的变化分析,由图 5 可看出,列车精确停车阶段只进行了 1 次牵引制动的转换,列车运行过程中冲击率变化满足要求,且冲击率小于  $0.5 \text{ m/s}^3$ ;通过死区切换限制,列车运行过程中较少进行牵引制动切换,完全能满足舒适度的要求。由于对制动参数的在线识别,在空气制动率发生了一定的变化的前提下,列车在后续运营中仍基本可确保停在  $\pm 0.25 \text{ m}$  范围内,保证了精确停车的精度。

## 4 结语

随着城市轨道交通的发展,保证列车停准和区间运营时间的基础上,需要更多考虑乘客舒适度。ATO 控制列车运行,通过完善 ATO 列车控制模型可实现更精准的控车。建立电空制动参数分别设置、列车参数在线识别等模型,可实现更精确的控车。通过现场对不同性能的列车进行试验,可证明模型的可用性和自适应性,在精确停车下可实现较好的舒适性。

## 参考文献

- [1] 唐涛,黄良骥.列车自动驾驶系统控制算法综述[J].铁道学报,2003(2):98.
- [2] 于振宇,陈德旺.城轨列车制动模型及参数辨识[J].铁道学报,2011(10):37.
- [3] 罗恒钰,徐洪泽.基于参考模型的 ATO 自适应控制算法研究[J].铁道学报,2013(7):68.
- [4] 禹宏鹏.城轨列车停车位置不精确的原因及对策[J].城市轨道交通研究,2008(9):28.
- [5] 罗智伟.列车牵引计算的传递函数模型研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [6] 袁佳希.列车在线辨识与预测控制研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [7] 罗仁士,王义惠,于振宇,等.城轨列车自适应精确停车控制算法研究[J].铁道学报,2012(4):64.

(收稿日期:2019-03-25)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. com