工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 9 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

基于信号系统反馈的城轨列车精确停车控制算法设计与仿真

张楠
中铁二院工程集团有限责任公司　四川省成都市　610031

DOI：10.32629/ems.v8i9.22152

［**摘　要**］列车精确停车控制作为实现城市轨道交通列车自动驾驶和与站台安全屏蔽门的联动，提高客运效率的核心技术，取决于车载和地面信号系统实时反馈的质量。传统 PID 停车控制算法在适用性上较差且没有针对列车在进行制动过程中信号存在反馈延时的特点而提出改进算法，并且在列车制动过程中控制效果不够理想，本文根据城轨 CBTC 系统中列车位置信息、速度信息及列车制动状态等信号的反馈关系，提出了适用于城轨信号传输特点的改进型模糊 PID 列车停车控制算法，此方法依据车载信号系统中所获得的相关信息，利用实时的信号数据对算法参数进行及时的修正和调节，解决了在列车采用电空制动态下切换过程中由于信号轻微波动而产生的列车位置偏差以及在轨道阻力变化条件下列车出现位置偏差的问题。基于 MATLAB/Simulink 搭建列车在停车场区段内停车控制系统仿真平台，复现列车的实际运行工况并验证所提出算法的有效性，仿真结果证实，所提出的控制算法可有效地适用于城轨信号系统的传输特性，增强了列车停车稳定性与准确度，满足了列车自动驾驶中的停车控制要求，具备工程实际价值。

［**关键词**］城轨列车；信号系统反馈；精确停车；模糊 PID 算法；自动驾驶；仿真分析

一、引言

随着国内城轨交通全自动运行技术的推广与应用，列车自动驾驶（ATO）已成为城轨列车运营不可或缺的部分，其中精准停车是 ATO 控制中最关键的控制过程。目前各城轨线路大多采用基于 CBTC 的信号系统，通过车载设备与地面设备之间的双向实时通讯向列车提供了包括位置、速度及线路条件等重要反馈信息。因此由列车至车载设备的信号实时性、稳定性和准确性直接影响到列车停车精确度。列车运行过程中传统列车停车控制方法存在着一定的不足，许多算法只是基于简单的位置和速度的数据实现对列车控制，而忽略了在信号系统中存在的诸如传输延时、数据抖动以及电空制动切换信号延迟等一些特有的因素，这可能会引起列车停车超差或者对标不准的问题。由此可能造成屏蔽门无法同步车门开关、列车晚点甚至降低列车的效率等一系列问题。

目前的研究都侧重于改进算法和研究列车车辆的性能，忽视了信号系统的反馈和停车的联系。远离现场信号控制，比较泛化、工程适应性不好。因此，本文从专业的信号角度出发以 CBTC 信号系统反馈作为依据，结合城市轨道交通列车在实现全过程停车的过程中信号信息传输的特点以及制动控制的特点，改善传统控制算法中不足，设计符合信号条件下的精确停车控制算法，并通过仿真的形式模拟实际信号反馈情况对所提方法进行检验。为城轨列车高精度停车控制提供贴近现场的技术解决方案。

二、城轨信号系统反馈和列车停车控制耦合原理

（一）CBTC 信号系统停车反馈框架

城市轨道 CBTC 信号系统通过无线的双向车地通信为基础来完成精确停车，其整个闭环都是通过信号系统的反馈数据来实现的。地面信号设备以轨道电路、应答器和无线设备作为信息采集装置，实时收集列车的绝对位置信息、运行速度、停车参考点等信息，并将其传输至车载系统；车载信号系统对接收到的数据做解析、检验和过滤，并采集了自身的牵引及制动状态信号，从而形成了完整的列车状态反馈数据，并将其上传给 ATO 控制器来调节停车算法相关参数。

在列车进站停车过程中，对来自信号系统的反馈具有较高的优先级。车载信号系统实时将列车位置与站台精准对标位置进行比对，并且监测其对应的制动指令反馈信号以及速度反馈信号同步性。相对于正常运行阶段来说，在该阶段要求信号具有更高的传输精度，细微的信号延迟或者数据偏差均会被制动控制放大并最终反映在停车误差上，这是由于信号系统工况决定着停车控制性能。

（二）停车控制中的信号干扰因素

基于信号现场工作经验，影响列车准确定停的信号问题主要分为以下 3 类，即传统控制算法难以适应的情形。其一是传输时延的问题，车地无线通信存在隧道屏蔽和设备负载

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

带来的毫秒级动态传输延迟，造成 ATO 装置接收到的位置和速度信息滞后于列车实际状态，使得控制命令输出与列车当前实际状况不同步。其二是数据抖动问题，由于受到列车振动及电磁干扰的影响，来自轨道电路及测速传感器的数据出现小幅高频波动现象，传统固定参数控制易受数据波动影响而出现反复调整以及制动抖动的现象。其三是反馈偏差的问题，当列车进站末期电制动切换为空气制动的过程，制动转换后的制动状态反馈信息存在一定延迟，容易造成制动力度调节不及时而产生停车过冲或欠位的现象。

（三）信号反馈及停车控制逻辑

精确停车的控制流程是一个信号采集-信号传输一算法运算一命令输出-状态反馈的信号闭环过程。列车的实时信息由信号系统连续地进行检测，并把当前的信息返回到控制算法中，算法依据对标误差和速度误差对列车牵引或制动的命令做出最佳决策，通过车载信号系统传递给列车执行机构，并将执行的结果反馈给控制系统再次修正控制动作，从而实现列车的精确停车。在此间信号系统不仅是数据载体，同时也是约束精度的主要因素，在对算法进行优化的同时就必须考虑其在实际工程应用中的适应问题，也就是必须满足系统的特性及误差特征才能使用。

三、列车精确停车控制算法设计

（一）传统 PID 算法缺陷分析

目前大多数城轨 ATO 系统采用传统 PID 控制算法实现停车，传统 PID 结构简单，可靠性高但适应能力差，无法适应信号系统的反馈动态特性。传统的 PID 控制具有固定的比例积分微分系数，只根据当前的速度位置偏差做线性处理，没有考虑信号延迟、数据震荡等非线性信号工况。在理想的情况下信号数据稳定,线路工况良好可以完成基本的停车对标，在现实场景下，遇到信号小幅抖动、制动信号切换滞后和实时反馈的数据偏差等现象，PID 不能调整力度大小容易造成前期制动力度弱、后期制动力度大、停车末端摇晃等现象，造成停车精度不足，完全不适用于复杂的信号反馈工况。

（二）改进型模糊 PID 算法整体设计思想

本文基于信号系统反馈特性设计改进的模糊 PID 控制算法，其核心在于结合信号系统实时反馈偏差信息，动态自适应调整 PID 参数以应对信号延时、信号波动、制动信号切换等非线性工况。以列车停车位置偏差、速度偏差及信号反馈抖动幅度作为输入变量，经过模糊规则推理过程实时在线调整 PID 的比例、积分和微分参数来克服传统的 PID 控制存在固定的参数不易受外界干扰的问题。同时针对信号系统的数据加入滤波判断，能够将信号系统所反馈出来的无效抖动值过滤，使信号工况与控制算法深度融合应用。

（三）算法主要模块设计

1.信号数据预处理模块。该模块是算法前序核心，主要针对信号系统的反馈特性设计出适合车地通信延时以及数据抖动问题的数据预处理方法。以信号时间对比为基础，对多个周期内的连续反馈数据进行校验，将异常突变值消除；并基于信号传输延时特征，对有效反馈数据进行时间补偿，对数据延后的现象进行修正，确保进入算法的状态数据符合列车运行状态，从而降低由信号工况造成的停车误差。

2.模糊参数调节部分。以列车位置对标偏差、速度对标偏差变化率、信号抖动系数作为三元输入量，构建了模糊控制规则。针对城轨停车制动的信号特点，设计不同的误差模式：当信号平稳、误差较小时减弱微分项，保证制动的平滑；当信号波动较大且误差变化速率较大时增大比例作用，尽快校正控制偏差；在制动力切换信息延迟的情况下调整积分作用，防止末段停车过冲。通过多重条件模糊规则使 PID 的参数得到在线自适应整定。

3.制动分区控制模块。基于进站停车的信号反馈特点，对停车过程分为减速制动、精准对标、制动保持等阶段，并设置不同阶段下相匹配的参数调节模式。其中，减速制动过程着重适配速度信号反馈，平稳地进行减速处理；精准对标过程着重适配位置信号反馈，提升对标准确性：制动保持阶段监测制动状态的反馈信号，避免制动力度过大过小现象的发生。全方面地适配了全过程下的信号反馈工况。

四、仿真平台搭建与工况设置

（一）仿真平台搭建

利用 MATLAB/Similink 构建符合城轨信号系统的列车精确停车仿真平台，该模型无理想化假设，全面反映现场信号与控制的互动关系。其主要包括 CBTC 信号反馈模拟模块、列车动力学模块和基于改进模糊 PID 控制模块以及工况干扰模块四大部分。信号反馈模拟模块能真实反映车地通信延迟、数据微幅抖动、制动指令变换时存在延时等现象；列车动力学部分能够反映城市轨道列车电空制动切换的特点；在控制算法中加入了本文设计的改进算法，并提供了传统 PID 算法作为对照的接口；通过工况干扰模块可以对电磁干扰和设备加载变化引起的信号干扰情况进行了模仿，保证了仿真结果的真实有效。

（二）仿真工况设定

为了检测算法在信号系统各类工况下的适用性，设置两

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

组对照的仿真工况，不特殊处理仿真数据的输出，只对比控制效果。标准的信号工况为：无延迟、抖动较小的数据平稳传输过程，表示正常的信号反馈过程，如晴天，空旷的区间运行情况；复杂信号的工况人为增加小的信号延迟、数据抖动，较大的制动切换延时等干扰，模拟复杂的工作现场，如隧道区间，设备高负荷，较大的电磁干扰等状况下信号反馈过程。通过算法对以上 2 种状态的仿真实验，重点检验传统 PID 算法与本文改进算法的停车对标精度、平顺性及抵抗信号扰动的能力。

五、仿真结果与性能分析

（一）标准信号工况性能分析

标准稳定信号工况下两种算法均能实现列车正常停车对标，没有明显的停车故障现象。常规 PID 算法控制的列车在减速过程中有一定的速度波动，在列车停车末端有一个轻微震荡，停车对标状况比较一般；本文模糊 PID 算法在准确、稳定的反馈信号的基础上，适时地对控制参数进行调节，列车的速度变化非常平滑，制动过程也没有震荡，停车对标状态稳定。理想信号状况下，改进算法的平稳性远远优于常规算法，算法的控制思想更符合 ATO 准确停车所要求的信号控制思想。

（二）复杂信号工况性能分析

在信号延时叠加、数据抖动以及制动信号滞后的复杂工况中，这两种算法之间的性能差别得到了充分的显示，体现出改进算法对信号适应性的优越性。传统 PID 算法由于参数是固定的，在动态的信号干扰下不能适应信号的变化，受数据抖动影响而频繁地调节制动力度，列车速度曲线波动较大，停控末端有明显的过冲和较大的偏差，不能实现高精度停车的要求。本文中所采用的改进算法利用前置处理模块过滤了无效的抖动数据并运用模糊推理修正控制器参数，并能有效地消除由信号延时以及反馈延时造成的控制偏差，使列车在制动过程中没有明显的震荡和过冲发生，列车的停车精确度及其稳定性几乎不受复杂的信号工况的影响，它具有很强的抗信号干扰能力。

（三）算法专业适用性总结

从信号专业的角度来说，传统停车控制算法的根本缺陷并不在于控制算法的原理上，而是在于其不能满足 CBTC 信号系统中的动态传输特性，没有贴近信号现场工作状态。本文在对传统算法改进时，抓住了信号反馈机制作为出发点来进行优化，从而解决了由于存在信号延时、数据抖动和制动信号反馈滞后等在现场工作中经常遇见的问题，因此该算法充分考虑到了 CBTC 系统的运行情况下的实际情况，实现了与 CBTC 信号系统之间的紧密结合而不是脱离实际情况仅对算法原理上的研究。本文改进的停车控制算法紧密联系城轨信号设备的维护和 ATO 控制的工作现状，实用性强、可实施性强，可以直接运用到现有的城市轨道交通 CBTC 系统的车辆停车控制，而不需要对车辆现有设备进行大量的改动，具有很好的工程应用前景。

结论

本文基于城轨信号专业的知识，为了解决现有停车控制算法忽略信号具体运行条件和不准确的问题，结合 CBTC 信号系统车地反馈原理提出了适用于信号运行工况的改进型模糊 PID 精确停车控制算法。通过分析了信号系统的各项干扰源对列车停车的影响因素，增加信号数据处理模块与分段参数调节项，解决了传统停车控制算法抗信号能力弱、适应能力差的问题。仿真结果表明该停车控制算法在标准工况及复杂工况下都可以实现精准停车控制和稳定停车效果，完全满足现场城市轨道交通中的信号传输要求，并且满足全自动运行线中的停车要求。

在未来的分析中可以针对无人驾驶城轨信号系统新特点以及车车通信、虚拟编组等新型城轨信号架构进行研究，使算法具备更高的动态响应能力适应未来智慧城轨高精度停车控制要求，为城轨信号系统和自动驾驶列车的协同控制提供进一步的技术支持。

[参考文献]

[1]张红洋, 陈盛强. 城市轨道交通列车控制子系统通信信号 Transformer 优化算法[J]. 智慧轨道交通, 2026, 63 (3): 31-36.

[2]池润田. 车载信号设备双系统列车改造方案[J]. 轨道交通装备与技术, 2026, 34 (3): 41-47.

[3]王世强, 罗显光, 石建强. 基于联锁信号设备实时状态的列车进路预告系统设计[J]. 铁路计算机应用, 2026, 35 (3): 75-80.

[4]林静, 邓志翔, 周扬. 市域铁路信号系统 ATO（列车自动运行）动态节能运行优化策略[J]. 城市轨道交通研究, 2026, 29 (3): 125-133.

[5]陈炜, 范亚静, 杨庆欣, 周茂, 金琦, 马驰. 城市轨道交通信号系统列车控制节能策略研究[J]. 铁道通信信号, 2025, 61 (7): 68-73.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.