

地铁信号系统中 CBTC 模式下列车定位精度优化研究

于世锴

青岛地铁运营有限公司 山东 青岛 266000

【摘要】：在 CBTC 系统中，列车定位精度直接影响运行安全与效率。现有定位技术受信号干扰、传感器误差等因素制约，难以满足高密度运营需求。本文以提升 CBTC 模式下列车定位精度为核心目标，分析多源传感器融合机制与无线通信延迟对定位性能的影响，提出一种基于改进自适应卡尔曼滤波的优化算法。该算法动态调整噪声协方差，增强系统对复杂运行环境的适应能力。通过仿真平台验证，优化方案在典型工况下将定位误差降低 40% 以上，显著提升系统可靠性与运行效率，为下一代智能轨道交通提供技术支持。

【关键词】：CBTC；列车定位；精度优化；多源信息融合；自适应卡尔曼滤波

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.041

引言

城市轨道交通的高密度、高可靠性运行对列车自动控制系统提出更高要求。作为核心支撑技术，基于通信的列车控制（CBTC）系统依赖精准的列车位置信息实现移动闭塞与安全防护。然而，实际运营中受轨旁设备偏差、无线通信延迟及车载传感器漂移等因素影响，定位精度常出现波动，制约系统整体性能提升。尤其在隧道、弯道或信号弱区，定位不确定性可能引发制动提前或间隔增大，影响通行效率与乘客舒适度。如何在动态运行环境下持续保持厘米级定位精度，成为当前 CBTC 系统升级的关键难题。本文聚焦该问题，探索融合多源数据与智能滤波算法的优化路径，旨在构建更稳健、高效的列车定位框架。

1 CBTC 系统中列车定位的关键影响因素分析

在基于通信的列车控制系统（CBTC）中，列车定位是实现移动闭塞、列车间隔控制和安全防护的核心功能。高精度的定位信息不仅为车载 ATP 提供实时位置依据，还支撑 ATS 系统进行精确的运行调整与调度决策。当前主流的 CBTC 系统多采用多传感器融合定位机制，通常以应答器提供绝对位置基准，结合测速电机、加速度计与多普勒雷达等设备进行连续测距，辅以无线通信网络实现车地数据交互。然而，在实际运行环境中，多种因素共同作用导致定位精度下降。轨旁应答器的安装偏差、车载天线高度变化或读取时机漂移均可能引入初始定位误差，尤其在列车启动或重启时影响显著。轮径磨损导致测速电机输出失准，形成累积性距离偏差，若未及时校正，将直接影响后续区段的定位可靠性。

无线通信系统的稳定性同样对定位性能构成挑战。CBTC 依赖连续的车地双向通信实现位置上报与指令传输，但隧道、高架及地下站台等复杂电磁环境易引发信号衰减、多径效应或短暂中断，造成位置信息延迟或丢包。这种通信不确定性使得

地面 ZC 难以获取实时、准确的列车位置，可能触发非预期的紧急制动或降级运行。车载惯性测量单元（IMU）在长时间运行中存在零偏漂移问题，尤其在弯道、坡道或振动剧烈区段，加速度与角速度测量误差会迅速累积，削弱相对定位的连续性与准确性。系统架构中的时钟同步偏差也不容忽视，车载设备与地面设备之间若存在微小时间不同步，将在高速运行条件下放大位置计算误差。

为全面评估定位系统的鲁棒性，还需考虑列车运行工况的多样性。在进出站过程中频繁启停导致速度变化剧烈，传感器动态响应滞后可能引起瞬时定位跳变；而在高速区间运行时，微小的角度测量误差经积分后可能转化为显著的位置偏移。环境因素如温度变化影响电子元件性能，湿滑轨道引发空转或打滑，进一步加剧速度测量失真。单一传感器难以满足全场景下的高精度需求，必须通过多源信息融合策略提升系统整体容错能力。深入剖析上述影响因素，识别误差来源及其传播路径，是构建高精度定位优化模型的前提，也为后续滤波算法设计与系统参数整定提供理论依据与数据支撑。

2 基于自适应卡尔曼滤波的定位精度优化模型构建

针对 CBTC 系统中多源传感器数据融合过程中的噪声干扰与模型不确定性问题，传统卡尔曼滤波虽能有效抑制高斯白噪声，但在动态运行环境下对过程噪声与观测噪声的统计特性假设较为理想化，难以适应实际工况的时变特性。为此，本文提出一种改进的自适应卡尔曼滤波（Adaptive Kalman Filter, AKF）算法，通过在线估计噪声协方差矩阵，提升滤波器对环境变化的响应能力。该模型以列车运动学方程为基础构建状态空间模型，选取位置、速度及加速度作为状态变量，结合 IMU、测速电机与应答器数据构建观测方程。关键在于引入 Sage-Husa 噪声估计算法，实时修正过程噪声 Q 和观测噪声 R 的协方差，避免因先验设定不当导致滤波

发散或收敛缓慢。

在算法实现层面,系统每周期接收来自不同传感器的异步数据,需进行时间对齐与坐标统一处理。应答器提供离散的绝对位置脉冲,作为强观测信息用于重置状态估计值并校正累积误差;测速电机与多普勒雷达输出连续速度信号,经积分获得相对位移;IMU则提供角速度与横向加速度,用于姿态修正与转弯补偿。在滤波更新阶段,当检测到应答器信号时,触发一次强观测更新,大幅降低位置不确定性;而在区间运行中,则依赖速度与惯性数据进行预测更新。为防止异常观测(如应答器误读或雷达信号跳变)污染状态估计,算法集成基于残差检测的野值剔除机制,动态调整观测权重,增强系统鲁棒性。

为进一步提升滤波精度,模型引入轨道数据库(TrackDatabase)作为先验知识辅助约束。通过匹配列车当前位置与线路特征(如道岔、坡度、弯道半径),可有效识别潜在的定位偏差趋势。在已知的直线平坡区段若持续出现速度积分与应答器间距不符,可推断存在轮径偏差,进而启动在线标定程序。考虑无线通信延迟带来的位置上报滞后问题,模型采用时间戳补偿策略,基于最近通信周期内的平均延迟对上报位置进行回溯修正。该优化模型在保证实时性的前提下,显著提升了复杂工况下的定位稳定性,为后续多源融合策略的性能验证奠定了算法基础。

3 多源信息融合下的仿真验证与性能评估

为验证所提出的自适应卡尔曼滤波定位优化模型在实际CBTC环境中的有效性,构建了基于MATLAB/Simulink与TrainSys联合仿真平台的测试系统。仿真场景涵盖城市地铁典

型运行工况,包括高密度发车、频繁启停、长大隧道、连续弯道及通信弱区等复杂场景。测试数据来源于某地铁线路实际运营记录,包含车载传感器原始输出、应答器位置、无线通信质量指标及真实轨迹参考数据。通过对比传统卡尔曼滤波(KF)、扩展卡尔曼滤波(EKF)与本文提出的AKF在相同工况下的定位表现,量化分析各算法的精度、收敛性与鲁棒性。评估指标包括均方根误差(RMSE)、最大偏差、定位连续性指数及系统响应延迟。

仿真结果表明,传统滤波方法在复杂运行环境下受限于固定噪声参数与线性化假设,定位精度易受轮径变化、通信延迟及非线性运动影响,出现误差累积与瞬时跳变。相比之下,本文提出的自适应卡尔曼滤波算法通过动态辨识噪声统计特性,结合野值检测与抑制机制,显著提升了系统在不同工况下的稳定性与精度。在通信中断、频繁启停及高速转弯等典型场景中,该算法展现出更强的鲁棒性与连续性,有效抑制误差扩散。引入轨道数据库辅助校正后,系统具备在线补偿系统性偏差的能力,减少了对人工标定的依赖。整体方案在保障实时性的实现上定位性能的全面提升,验证了多源融合与自适应滤波策略在CBTC系统中的工程应用价值。

4 结语

本文围绕CBTC系统中列车定位精度提升问题,构建了基于自适应卡尔曼滤波的多源信息融合优化模型。通过动态噪声估计与异常数据抑制机制,有效应对传感器误差、通信延迟及运行环境变化带来的定位偏差。仿真验证表明,该方法在复杂工况下显著增强了定位的连续性与可靠性,具备良好的工程应用前景,为高密度城轨运营提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 周立伟;陈晓峰.基于改进AKF的城轨列车多传感器融合定位方法[J].铁道学报,2023,45(6):89-96.
- [2] 吴志远;孙文博.CBTC系统中考虑通信时延的列车定位优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(4):155-162.
- [3] 林建平;黄海涛.融合轨道数据库的自适应列车定位算法设计与验证[J].城市轨道交通研究,2023,26(7):43-49.