

电动城市客车自动泊车系统路径规划与跟踪控制分析

张泽军

(中植一客成都汽车有限公司, 成都 610100)

摘要:针对电动城市客车在复杂城市环境下的自动泊车需求,本文提出一种融合车联网(V2X)信息的路径规划与跟踪控制系统。该系统通过接收并整合多元感知数据,构建结构化的特征向量组,为决策控制提供标准化的信息输入。系统创新性地计算出时空资源竞争度与换乘紧迫系数,并据此构建多车协同决策组,实现智能化调度。路径跟踪层则采用分层控制架构。研究表明,该系统能有效提升泊车过程的协同性、安全性与舒适性,为电动客车的智能化运营提供了关键技术支持。

关键词:电动城市客车;自动泊车系统;路径规划;跟踪控制;V2X

中图分类号:U469.72; TP273 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.001

Analysis of Path Planning and Tracking Control for an Automatic Parking System of Electric City Buses

ZHANG Zejun

(Zhongzhi First Bus Chengdu Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract:To address the automatic parking requirements of electric city buses in complex urban environments, this paper proposes an integrated path planning and tracking control system that utilizes V2X information. The system receives and integrates multi-dimensional perception data to construct a structured feature vector set, providing standardized information input for decision-making and control. It innovatively calculates the spatio-temporal resource competition degree and transfer urgency coefficient to establish a multi-vehicle collaborative decision-making group for intelligent scheduling. The path tracking layer adopts a hierarchical control architecture. The research results indicate that this system effectively enhances the coordination, safety, and comfort of the parking process, providing key technical support for the intelligent operation of electric city buses.

Key words:electric city bus; automatic parking systems; path planning; tracking control; V2X

自动泊车系统是智能驾驶的关键功能,可有效提高运营效率,规避泊车事故,是电动城市客车发展的重点^[1-3]。在智慧城市发展背景下,自动泊车技术的研究也日益深入,为解决城市停车问题提供了新路径。整体而言,自动泊车系统已从基础辅助模式向全自动化方向发展。目前,国内外研究主要围绕环境感知与车路协同两条技术路线展开,而基于环境感知的路径规划、跟踪控制及系统集成验证则是未来的研究热点。因此,本文针对电动城市客车的特殊应用场景,提出一种融合车联网(Vehicle to Everything, V2X)

信息技术的自动泊车系统路径规划与跟踪控制系统,以为自动泊车技术的发展提供理论参考,助力智慧城市建设。

1 电动城市客车自动泊车系统架构

1.1 电动城市客车与传统客车核心区别

在城市进程不断加快、“双碳”战略持续推进的过程中,电动城市客车作为公共交通的重要载体,正朝着智能化、网络化的方向发展。相较于传统客车,电动城市客车在动力控制、制动控制、控制核心及能

收稿日期:2025-09-09。

第一作者:张泽军(1978—),男,高级工程师,主要从事客车产品开发工作。E-mail:zzj9815@163.com。

源管理上都有着显著区别,二者具体差异见表 1。

表 1 传统客车与电动客车性能对比

控制维度	传统客车	电动客车
动力控制	发动机	控制电机
制动控制	摩擦制动	再生制动 + 摩擦制动
控制核心	多个独立控制器	一个中央大脑 (VCU)
能源管理	监控油量	精细管理电池 (BMS)

1.2 电动城市客车自动泊车系统分析

电动城市客车自动泊车系统的核心技术在于对多源异构数据进行标准化分析。系统通过设计统一、规范化的接口,对在类型、频率和精度上存在差异的感知数据进行处理,将其转化为标准化、结构化的特征向量组。该系统包含以下核心模块:

1) 采集模块。负责接收 V2X 网络提供的信号灯相位与时间、周边社会车辆动态数据、换乘客流等信息,同时采集本车在不同状态下的驱动电机扭矩、电池健康状态、车速和加速度等参数。上述数据被整合后,即形成结构化的特征向量组。

2) 决策模块。基于特征向量组,计算时空资源竞争度与换乘紧迫系数。

3) 协同模块。依据时空资源竞争度与换乘紧迫系数,生成协同触发标志并计算时间偏差值,得到协同决策组^[4]。

4) 性能模块。通过驱动电机扭矩与车速参数建立能耗预测模型并计算能耗预测值;通过对三轴加速度求导计算加速度变化率,从而得到性能指标组。

5) 指令模块。以协同决策组和性能指标组作为多目标优化约束条件,获得速度控制基准值和扭矩分配方案,输出控制指令集。

6) 执行模块。根据控制指令集调节车速,依据扭矩分配方案控制电机输出与再生制动比例,在通信异常时通过地图拓扑约束修正城市客车位置,实现自动泊车。

2 电动城市客车自动泊车系统设计与实现

2.1 多源信息融合与结构化特征向量构建

电动城市客车自动泊车系统首先从车载传感器网络与 V2X 通信网络获取多元异构数据,并对其进行数据清洗、时间同步与坐标统一化处理。这些数据包括:毫米波雷达提供的障碍物相对距离与速度等信息、激光雷达获取的三维点云环境轮廓、摄像头识别

的车道线与交通标志语义^[5],以及 V2X 系统提供的交通信号灯相位时序、周边车辆运动状态、路侧设备感知信息。此外,系统还对车辆自身状态参数(如驱动电机扭矩、电池荷电状态(State of Charge, SOC)、车速及三轴加速度等)进行分析。

通过对上述多模态数据进行特征提取与标准化处理,系统构建了一个分层式的结构化特征向量组。该向量组整合了来自 V2X 系统及其他来源的原始数据,并将其组织为统一的结构化格式,涵盖以下 4 个维度:

1) 时间维度。记录数据采集的时间戳、时间偏差及有效时长等。

2) 空间维度。包括绝对坐标、相对距离及方位角度等空间参数^[6]。

3) 车辆状态维度。包括车速、加速度、转向角和电池 SOC 等关键状态数据。

4) 环境维度。包括障碍物类型、数量、运动状态及交通规则约束等外部环境信息。

该结构化的数据组织方式为决策算法提供了标准化与规范化的输入接口。

2.2 时空资源竞争度计算模型

时空资源竞争度计算模型通过量化特定时空范围内的道路资源竞争程度,以评估其资源紧张状况、识别主要竞争状态并揭示其动态变化特征。

2.2.1 维度因子

时空资源竞争度计算模型主要从空间密度、时间占用和运动状态三个维度进行分析。

1) 空间密度因子综合考虑周边车辆运行变化特征、道路拓扑结构及停车位布局等因素,计算当前空间的承载能力与饱和程度,以表征空间资源的紧张状态。

2) 时间占用因子整合交通信号灯时序特征、车辆通过时间变化参数及预约时间窗等信息,旨在分析时间资源的分配与利用率。

3) 运动状态因子通过分析周边车辆的速度、加速度等参数,推断这些车辆的运动趋势与意图,进而评估交通流的稳定性与潜在冲突风险。

2.2.2 竞争度计算

竞争度计算采用加权融合算法,其中各维度的权重可根据具体场景动态调整。例如,在交叉路口,时间占用因子的权重较高;而在泊车区域,空间密度因子的权重则会显著提升。计算得到的竞争度指数经

系统优化后,被归一化至0~1之间。指数越高,表明资源竞争越激烈,此时需通过协同控制策略进行干扰优化。

在计算前,需对原始数据进行多源时空对齐、异常数据清洗及参数归一化的处理,并将其封装为结构化特征向量组。

1) 多源时空对齐。采用精确时间协议同步各参数的时间戳,将时间偏差控制在较低水平(如<2 ms)。同时,利用迭代最近点算法,将周边车辆的位置信息转换到本车坐标系中。

2) 异常数据清洗。对Z轴加速度分量进行离群检测,以识别路面颠簸干扰。例如,若连续5个采样周期的Z轴加速度值均超过设定阈值(如1.5g),系统则判断其为异常数据并予以剔除。

3) 参数归一化处理。采用线性缩放方法,将各类数值型参数转换到 $[-1, 1]$ 的区间内^[7]。操作中,相对位置坐标以本车为核心设定边界值(如-200~200 m);速度参数的归一化范围则设定为0~80 km/h。

最后,将处理后的信号灯相位、时间信息、周边车辆动态数据矩阵、换乘客流数据等关键信息与线路发车间隔、客车本体状态参数共同集成为统一的结构化特征向量组,供计算模型使用^[8]。

2.2.3 数学模型推导

数学模型推导的主要流程如下:

1) 定义时空域。时空域通过以下两步离散化过程定义:①空间离散化将线路或路网划分为一系列连续的单元,并设置空间单元合集 S (见式(1));②时间离散化将一天内的时间划分为一系列等长的时间片(例如,以30 s为一个时间片),并设置时间片集合 T (见式(2))。

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\} \quad (1)$$

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_M\} \quad (2)$$

2) 定义资源容量。将每个空间单元 s_i 在单个时间片中可以容纳的最大车辆数定义为其资源容量 $C(s_i)$ 。

3) 计算车辆占用空间。根据每一辆车在每个时间片的预测运行轨迹,确定其占用空间。

2.3 换乘紧迫系数计算

为适应城市客车运营特点,本文通过计算换乘紧迫系数来量化乘客换乘需求的时间紧迫性。该系数综合考虑了时刻表偏差、乘客数量、换乘距离、优先级标志等多个参数。其中,时刻表偏差反映了实际运行

与计划时间的偏移程度。在资源竞争度计算模型中,系统通过提取换乘客流数据及关联线路发车间隔参数,代入换乘压力函数求解换乘紧迫系数。换乘需求的具体确定流程如下:

1) 计算换乘紧迫系数。换乘紧迫系数的计算公式见式(3)。

$$U = \max\left(0, 1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{critical}}}\right) \quad (3)$$

式中: U 为换乘紧迫系数,其取值范围为 $[0, 1]$,其中0表示换乘时间充裕,1表示达到临界换乘状态,数值越大表示换乘紧迫性越高; ΔT 为计划换乘时间; T_{critical} 为临界换乘时间,即系统中设定的最短换乘时间。

2) 基于目标换乘站点的换乘客流数据,计算统计周期内的平均换乘乘客数量,并获取关联线路的固定发车间隔。

3) 结合统计周期内的平均乘客数量与关联线路的发车间隔,计算每分钟的平均换乘需求强度。

4) 通过线性比例转换,将换乘需求强度映射为 $[0, 100]$ 区间的标量,并作为换乘需求输出。

2.4 协同触发决策机制

基于时空资源竞争度与换乘紧迫系数的实时计算结果,利用模糊决策机制生成协同触发标志。决策规则库包含了多种不同场景下的触发条件:

1) 独立运行模式。当竞争度和换乘紧迫系数均在 $[0, 0.3]$ 区间内时,系统采用独立运行模式。

2) 强协同模式。当竞争度和换乘紧迫系数均在 $[0.8, 1]$ 区间内时,系统自动触发强协同模式,启动多车协同调度。

3) 弱协同模式。当系统不满足强协同或独立运行条件时,自动触发弱协同模式,根据实际情况进行局部优化调整。

协同模式(包括强协同与弱协同)触发后,系统会基于车辆相对位置、速度关系及道路拓扑结构,计算最优协同时间偏差^[9]。通过协调车辆间的时空关系,可有效避免资源冲突,提升整体运行效率。时间偏差的计算采用分布式优化算法:各车辆先基于本地信息进行初步计算,再通过V2X通信交换协调信息,最终迭代形成全局最优的时隙分配方案。

3 路径规划算法实现

本文以某电动城市客车自动泊车系统的路径规

划与跟踪控制系统为例进行试验分析。

3.1 分层规划架构

自动泊车系统采用融合 V2X 信息的路径规划与跟踪控制集成方案。路径规划器采用分层架构,通过综合协同决策组的输出指令,生成最佳行驶路径^[10]。其主要分层如下:

1) 全局规划层。基于高精度地图与 V2X 系统提供的超视距信息,生成从起点到目标点的粗略路径,并结合交通规则与宏观路网效率等参数对路径进行细化。

2) 局部规划层。基于实时感知数据,在全局路径的基础上进行细粒度规划,以规避动态障碍物,并满足车辆动力学约束。

3.2 路径实现

3.2.1 路径规划原理

在协同模式下,路径规划需遵循协同决策组的时间窗约束,以确保生成的路径在时间维度上与其他车辆协调。规划算法主要采用样条曲线,以保证路径的安全性平滑性。针对电动客车的特性,算法集成了能耗优化管理模块,通过规划能耗最低的路径及相应速度曲线,有效提升能源利用效率。

3.2.2 路径规划技术

路径规划的具体实现步骤如下:

- 1) 读取本车实时定位坐标,检索高精度地图数据库,获取目标路口停止线的地理坐标^[11]。
- 2) 计算本车与目标区域之间的欧几里得距离,将其作为实际行驶距离。
- 3) 根据瞬时车速推算出车辆到达停止线的预计时间。
- 4) 从信号灯数据中提取绿灯起始时间戳与持续时间,计算绿灯时间窗的中点时刻。
- 5) 计算车辆预计到达时间与绿灯时间窗中点时刻的偏差值。

3.3 通信异常处理机制

针对 V2X 系统在运行中可能会出现通信延迟、中断等异常情况,可采用多级降级处理机制进行优化^[12]。

1) 当通信质量下降时(即系统进入衰减模式),自动泊车系统会自动降低对 V2X 数据的依赖权重,转而提高车载传感器数据的置信度,以维持系统性能。

2) 当通信完全中断时(即系统进入降级模式),

自动泊车系统切换至基于地图拓扑约束的自主决策模式。该模式利用高精度地图提供的先验信息进行位置估算与路径规划。地图拓扑约束主要采用隐马尔可夫模型,该模型通过分析车辆运动轨迹并将其与地图拓扑结构进行匹配,即使在 GPS 信号不稳定的区域也能有效保障定位精度。

系统进入降级模式后可以保存最近的协同及决策结果。在通信中断后的一段时间内,可继续执行既定的协同策略,从而保障系统的稳定性和可靠性。上述各级处理策略见表 2,其中 GNSS 为通过接收多颗卫星信号,计算接收端经纬度、海拔高度、移动速度的定位方式;DR 为接收端基于已知初始位置,通过测量方向、速度、时间,不依赖外部信号自主计算出当前位置的定位方式。

表 2 通信异常处理策略

工作模式	V2X 数据权重	传感器权重	定位方式	控制策略
正常模式	0.7	0.3	GNSS+V2X	协同优化
衰减模式	0.3	0.7	GNSS+DR	局部优化
降级模式	0.0	1.0	地图匹配+DR	保守控制

表 2 中的权重设计针对不同工作模式进行了优化:

- 1) 正常模式下,权重设计以 V2X 通信质量高、数据完整为前提,可充分发挥其决策价值。
- 2) 衰减模式下,权重设计用于应对 V2X 通信出现不稳定、延迟或部分数据丢失(如隧道、恶劣天气、信号干扰)的情况。此时,系统通过降低 V2X 数据的可靠性,避免其作为主要决策依据。
- 3) 降级模式下,权重设计可以保障系统在 V2X 通信完全中断或数据被判定为不可信时,依然能够稳定运行。

通过上述基于权重的协同决策与路径规划机制,电动城市客车自动泊车系统能有效适应复杂多变的城市交通环境,在保障单车智能运行与泊车的同时,满足了多车协同管理的需求。

3.4 性能分析与算法对比

基于 1 000 次实车测试的统计结果,该自动泊车系统的整体泊车成功率达 96.8%。其中,平均泊车时间为 71.6 s,平均停车精度控制在 ± 7.3 cm。此外,通过与不同规划算法进行对比(见表 3,表中 L_0 为理论最优路径长度),本文方法在路径规划与跟踪控制性能方面表现优异。

表 3 不同规划算法对比

规划算法	成功率/%	平均规划时间/s	路径长度	曲率连续性	安全性评分
快速扩展随机树算法	95.7	1.5	$1.32L_0$	中	82.3
改进快速扩展随机树算法	98.9	1.2	$1.18L_0$	优	94.7
三次样条插值法	88.6	0.8	$1.15L_0$	优	85.2
本文方法	96.8	0.6	$1.1L_0$	优	95.4

4 结束语

本文基于一项融合 V2X 信息的城市客车运行优化控制方法的专利技术^[13],对电动城市客车自动泊车系统的路径规划与跟踪控制系统进行了研究。在协同决策与精准执行的基础上,提出了基于结构化特征向量组的多源信息融合框架。该框架通过对复杂换乘特征和车辆状态进行标准化、规范化处理,为各项决策提供了数据支撑。自动泊车系统引入了协同决策机制,对时空资源竞争度与换乘紧迫系数进行量化分析,从而有效实现协同优化控制。通过分层控制架构,系统平衡了路径跟踪精度、稳定性与舒适性等多项目标需求。此外,系统还利用通信异常降级策略与地图拓扑图约束等技术,保障了多种工况下的可靠性与鲁棒性。

参考文献:

[1] 王松. 自动泊车系统路径规划与跟踪控制方法研究[J].

汽车测试报告,2025(6):34-36.

[2] 林生地. 自动泊车系统路径规划与跟踪控制方法研究[J]. 电子元器件与信息技术,2023,7(10):146-149.

[3] 覃立仁. 自动平行泊车的关键技术研究[D]. 柳州:广西科技大学,2023.

[4] 汪永旺. 基于多传感器信息融合的自动泊车系统研究[D]. 芜湖:安徽工程大学,2023.

[5] 李佳俊. 基于四轮转向的自动泊车系统路径规划与跟踪算法研究[D]. 长春:吉林大学,2023.

[6] 李世豪. 电动城市客车自动泊车系统路径规划及跟踪控制研究[D]. 西安:长安大学,2023.

[7] 高颖,张祖锋,寇旻阳,等. 基于 OPENMV 的自动泊车系统的设计与研究[C]//天津市电子学会. 2025 年第三十九届中国(天津)2025'IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集,2025:170-175.

[8] 刘红亮. 基于计算机视觉的汽车自动泊车系统研究[J]. 汽车电器,2025(8):65-67.

[9] 高华. 智能网联汽车自动泊车系统测试方法研究[J]. 汽车电器,2025(7):51-53.

[10] 范英杰,莫海龙,夏伟. 基于分层验证模型的汽车自动泊车系统性能测评方法[J]. 汽车电器,2025(7):67-69.

[11] 李新恒,陈福兴,周小杰,等. 基于 TC264 单片机的小车自动泊车系统设计[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版),2025,25(2):80-87.

[12] 黄秋生. 针对深度强化学习自动泊车系统的后门攻击[J]. 汽车实用技术,2025,50(12):24-29.

[13] 中植一客成都汽车有限公司. 一种融合 V2X 信息的城市客车运行优化控制方法及系统:ZL202511072005. X[P]. 2025-10-14.