

基于双核控制器的有轨电车制动信号切换智能控制方法

郭团生

(昆明地铁建设管理有限公司, 650051, 昆明)

摘要 [目的] 由于有轨电车制动信号切换需要充分考虑交通路口间距以及交通流量实际情况, 导致控制效果难以得到保障, 为此, 提出基于双核控制器的有轨电车制动信号切换智能控制方法。[方法] 将 STMicroelectronics STM32 双核多协议无线微控制器作为具体的中心装置, 在 DMA (直接内存访问) 控制器的 3 个通道分别设置了 3 个不同的动作, 同时以时间步 t 为基准, 对制动信号的相位控制调整矩阵进行多维设置, 构建制动信号动作空间。以当前有轨电车信号的状态为基础, 从动作价值的角度定义切换制动信号的确定性梯度参数, 利用 STM32 无线 MCU (微控制单元) 对反馈动作的价值损失与反馈动作的价值奖励进行训练, 计算切换制动信号的确定性梯度参数, 作为制动信号切换控制基准。搭建仿真测试环境, 设置对照组进行对比测试, 验证控制方法的性能。[结果及结论] 基于双核控制器的有轨电车制动信号切换智能控制方法控制延迟始终稳定在 0.4 s 以内, 制动信号 (红灯) 的实际执行时长与设置时长的偏差稳定在 0.04 s 以内, 等待队列长度始终低于对照组, 在实时性、准确性及可靠性等方面优于对照组, 能提高有轨电车的运行效率和安全性。

关键词 有轨电车; 双核控制器; 制动信号切换; 相位控制调整矩阵

中图分类号 U283.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.015

Intelligent Control of Tram Braking Signal Switching Based on Dual-core Controller

GUO Tuansheng

(Kunming Metro Construction management Co., Ltd., 650051, Kunming, China)

Abstract [Objective] As the tram braking signal switching requires fully considering the distance between traffic intersections and the actual traffic flow, the specific control effect is hard to be guaranteed. Therefore, an intelligent control method for the tram braking signal switching based on dual-core controller is proposed. [Method] With STMicroelectronics STM32 dual-core multi-protocol wireless microcontroller as the specific central device, three different actions are set respec-

tively in three channels of DMA (direct memory access) controller, at the same time, the phase control adjustment matrix of the brake signal performs multi-dimensional settings based on the time step to establish the brake signal action space. Based on the current tram signal status, the deterministic gradient parameter of switching brake signal is defined from the perspective of action value. STM32 wireless MCU (micro-control unit) is used to train the value loss and value reward of feedback action, and the deterministic gradient parameter of switching brake signal is calculated as the benchmark of brake signal switching control. The simulation test environment is built and the control group is set for comparative test to verify the performance of the control method. [Result & Conclusion] The control delay of the intelligent control method for tram brake signal switching based on dual-core controller always remains stable within 0.4 s, and the deviation between the actual execution time and the setting time of the brake signal (red light) keeps within 0.04 s, and the waiting queue length is always lower than that of the control group, superior to the control group in terms of real-time, accuracy and reliability. The above method can improve operation efficiency and safety of the tram.

Key words tram; dual-core controller; brake signal switching; phase control adjustment matrix

对有轨电车制动信号切换控制进行针对性研究具有多方面的实际价值^[1], 能够提高制动系统的稳定性和可靠性, 从而保障有轨电车的运行安全^[2]; 可以更好地控制列车的减速和停车, 提高列车的运行效率; 可根据实际情况优化制动系统的资源配置^[3], 避免资源浪费; 能推动相关技术的进步和创新, 提高我国在有轨电车领域的核心竞争力^[4]。现有有轨电车制动信号切换控制方法存在平均等待时间过长, 从而影响有轨电车线网整体运行效率的问题。文献[5]引入了多 Agent (人工智能代理) 技术, 以缩短等待时间作为导向, 通过协调控

制多个 Agent 实现对交通信号的高效控制;文献[6]从运行维护成本角度出发,设计了一种采用容器技术,以 COTS (商用现成品或技术) 云计算架构为基础,提高了轨道交通信号控制的可伸缩性。

在上述研究基础上,本文提出了基于双核控制器的有轨电车制动信号切换智能控制方法,并结合具体案例仿真结果,与上述两种方法进行对比,验证了该控制方法的性能。

1 控制方法设计

1.1 构建制动信号动作空间

有轨电车制动信号切换控制需要结合实际的车流状态以及相关路况信息,对制动信号动作空间进行合理构建^[7]。这就意味着需要综合分析不同数据源的数据,以此保障最终控制效果。为此,本文在设计阶段引入了双核控制器装置作为逻辑执行的中心。

STMicroelectronics STM32 双核多协议无线 MCU(微控制单元)作为一款超低功耗 2.4 GHz MCU 片上系统,支持蓝牙/BLE 5.0(低功耗蓝牙)以及技术标准 IEEE 802.15.4 的通信协议。以 STMicroelectronics STM32 双核多协议无线微控制器作为中心装置,可满足不同有轨电车制动信号管理应用的客观需求。不仅如此,STM32 无线 MCU 还具有丰富灵活的外设集,为本文的制动信号切换控制提供了充分的拓展条件。

以上述装置为基础,在构建有轨电车制动信号动作空间时,分别为 STM32 无线 MCU 中 DMA(直接内存访问)控制器的 3 个通道设置了 3 个不同的动作,并将其作为控制阶段的执行动作,具体可以表示为:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_{\text{RG}} \quad \mathbf{A}_{\text{GY}} \quad \mathbf{A}_{\text{YR}}] \quad (1)$$

式中:

\mathbf{A} ——有轨电车制动信号控制的动作组矩阵;

\mathbf{A}_{RG} ——红色信号灯(制动信号)切换为绿色信号灯的動作;

\mathbf{A}_{GY} ——绿色信号灯切换为黄色信号灯的動作;

\mathbf{A}_{YR} ——黄色信号灯切换为红色信号灯(制动信号)的動作。

常规的车辆制动信号切换动作区分方向,例如前后制动分配、左右制动分配、制动模式切换等;而有轨电车制动信号因其特殊性,切换动作不涉及方

向。因此本文不对涉及方向的切换动作进行细化分析。

本文以时间步 t 为基准,对制动信号的相位控制调整矩阵进行多维设置。从制动信号控制动作的角度出发,将一个动作作为一个向量,STM32 无线 MCU 对应的动作矩阵在时间步的尺度下拓展表示为:

$$\mathbf{A}_{\text{mtspc}}(t) = \left(1 - \frac{d_{ik}}{D}\right)\mathbf{A} \quad (2)$$

式中:

$\mathbf{A}_{\text{mtspc}}(t)$ ——时间步 t 尺度下,STM32 无线 MCU 对应的动作矩阵;

d_{ik} ——道路路口的间距参数;

D ——道路路口的间距阈值参数。

动作矩阵 $\mathbf{A}_{\text{mtspc}}$ 作为有轨电车制动信号动作空间,为后续的切换控制提供执行基础。

1.2 制动信号切换控制

在对有轨电车制动信号切换动作进行控制过程中,引入了梯度策略,实现周期性控制。以当前有轨电车信号的状态为基础,对切换制动信号的确定性梯度参数进行计算:

$$\nabla = E(\mathbf{A}_{\text{mtspc}}(t)) = (\nabla\mu(a)Q(s,a))\mu(s) \quad (3)$$

式中:

∇ ——切换制动信号的确定性梯度参数;

$E(\mathbf{A}_{\text{mtspc}}(t))$ ——切换制动信号的动作价值;

$\mu(a)$ ——反馈动作 a 的价值损失;

$\mu(s)$ ——调整动作 s 下反馈动作 a 的价值奖励;

$Q(s,a)$ ——有轨电车环境在切换制动信号动作下的不稳定性值。

反馈动作 a 的价值损失 $\mu(a)$ 与反馈动作 a 的价值奖励 $\mu(s)$ 均与状态向量有关。因此,应对上述两个参数进行适应性训练,具体的执行方式为:以 STM32 无线 MCU 为基础,对双核分别进行集中式训练及分布式训练,图 1 为具体训练方式示意图。

反馈动作 a 的价值损失 $\mu(a)$ 与价值奖励 $\mu(s)$ 集中式训练的方式分别表示为:

$$\mu(a) = \mathbf{A}(h_{u,k-1}, \forall u \in N(\mathbf{A})) \quad (4)$$

$$\mu(s) = \mathbf{A}(h_{N,k-1}, \forall N \in \mathbf{A}) \quad (5)$$

式中:

$h_{u,k-1}$ ——动作尺度下的动作价值;

$h_{N,k-1}$ ——单位周期内动作次数下的动作价值;

$N(\mathbf{A})$ ——动作组的集合。

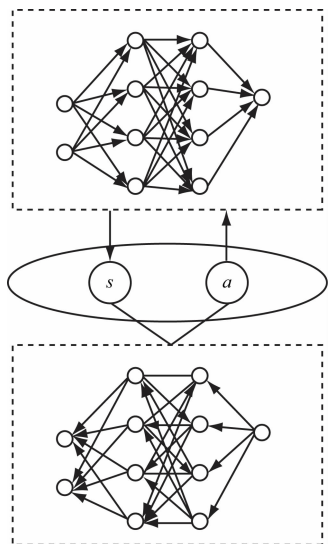


图1 动作价值训练方式

Fig. 1 Action value training method

对反馈动作 a 的价值损失 $\mu(a)$ 与价值奖励 $\mu(s)$ 分布式训练分别表示为:

$$\mu(a) = \sigma(h_{u,k-1}, \forall u \in N(A)) \quad (6)$$

$$\mu(s) = \sigma(h_{N,k-1}, \forall N \in A) \quad (7)$$

式中:

σ ——分布式训练的残差系数。

上述两种训练方式的处理方式不同但训练结果一致,其中分布式训练通过并行计算和梯度归约来加快训练速度,而集中式则更侧重于简单的管理和维护。在实际应用中,需根据具体的需求和资源情况选择合适的训练方式。

本项目采用集中式训练方式,即通过式(4)和式(5)计算出 $\mu(a)$ 和 $\mu(s)$,将训练得到的结果代入到式(3)中计算对应的切换制动信号的确定性梯度参数,并以此作为控制执行基准,实现对有轨电车制动信号切换的智能控制。

2 测试环境

为了测试有轨电车制动信号切换智能控制方法的性能,设置了对比测试试验。具体的测试环境以仿真软件为基础进行搭建。以某地级市的有轨电车主干道交汇构造为基础设置的测试路网结构如图2所示。

图2中的主干道用于建立城市各分区干路之间的连接关系,核心功能为交通功能。对应支路的平均间距设置为600 m,按照从左到右的顺序,对交叉口进行编号,分别为JC001、JC002和JC003。

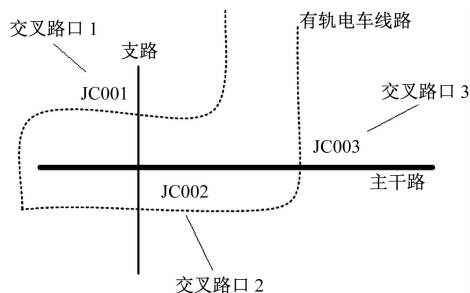


图2 测试路网结构设置

Fig. 2 Setting of test road network structure

在构造上,3个交叉口基本相同,对应每条道路均为双向车道。

以实际运行管理阶段的有轨电车交通信号相位方案为基础,对具体的有轨电车制动信号管理规则进行分析。结合交通信号控制设计执行的动作空间需求以及路网区域实际车流状态,各个信号灯的控制规则主要包括:信号灯色——恒为红绿黄红顺序;不同信号灯时长——绿灯动态控制,黄灯固定为3 s,全红时长动态控制;相位顺序——对称四相位。

在上述测试环境中,分别以基于双核控制器有轨电车制动信号切换智能控制方法、文献[5]以及文献[6]提出的轨道交通信号控制方法,对图2所示测试路网进行仿真测试。通过对比分析上述3种不同方法在系统测试环境下的测试结果,对基于双核控制器的有轨电车制动信号切换智能控制方法性能进行综合评价。

3 测试结果分析

对有轨电车制动信号切换的控制效果主要以制动信号切换控制的实时性、准确性和可靠性来衡量。

在实时性测试阶段,以固定的信号控制周期为基础,分别统计了3种控制方法下,制动信号切换执行实现与设置时间之间的关系,具体的测试结果如图3所示。

由图3可知,在不同控制方法下,对应的制动信号(红灯)切换实时性表现出了不同的特征。按照文献[5]提出的方法进行测试,红绿信号灯切换阶段以及黄红信号灯切换阶段的延迟时长相对稳定,延迟时长分别在0.3~0.6 s以及0.4~0.5 s区间范围内,延迟时长存在进一步缩短的空间;按照文献[6]的方法进行测试,红绿信号灯切换阶段以及

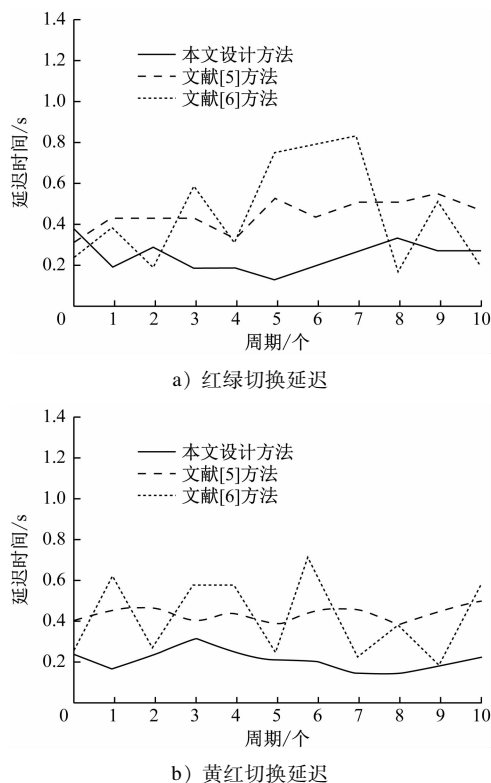


图3 不同控制方法下制动信号切换控制实时性对比图
Fig.3 Comparison diagram of braking signal switch control real-time performance with different control methods

黄红信号灯切换阶段的延迟时长均呈现出了较为明显的波动性,其中最大延迟时长达到了 0.92 s,最小延迟时长仅为 0.20 s;按照本文设计控制方法进行测试,不仅红绿信号灯切换阶段以及黄红信号灯切换阶段的延迟时长相对稳定,且延迟时长始终稳定在 0.4 s 以内,与前述两对照组相比,在实时性方面具有明显优势。

在准确性测试阶段,通过差异化设置制动信号(红灯)的时长,对不同控制方法下的实际执行情况进行分析比较。具体的测试结果如表 1 所示。

表 1 不同控制方法下制动信号切换控制准确性对比表
Tab.1 Comparison table of braking signal switch control accuracy with different control methods

设置制动信号 时长/s	制动信号实际执行时长/s		
	文献[5]方法	文献[6]方法	本文设计方法
10.0	10.04	10.05	10.02
12.0	12.03	12.04	12.00
13.0	13.04	13.06	12.03
15.0	14.95	15.04	15.02
17.0	16.95	17.06	17.04
20.0	20.03	20.05	20.03

由表 1 可知,按照文献[5]的方法进行测试,制动信号(红灯)的实际执行时长与设置时长之间的偏差在 0.05 s 以内,整体误差范围达到了 0.09 s (存在实际制动信号(红灯)时长大于设置时长的情况,也存在实际制动信号(红灯)时长小于设置时长的情况);按照文献[6]提出的方法进行测试,制动信号(红灯)的实际执行时长与设置时长之间的偏差基本处于 0.04 ~0.06 s 区间范围内;按照本文设计的控制方法进行测试,制动信号(红灯)的实际执行时长与设置时长的偏差稳定在 0.04 s 以内,与两对照组相比,在准确性方面具有明显优势。

在可靠性测试阶段,以不同车流场景下的等待队列长度作为具体的评价指标,分析不同有轨电车制动信号动作切换控制方法对信号灯时长控制的合理性。具体的车流量分别设置为 1 000 辆/h、1 200 辆/h、1 400 辆/h、1 800 辆/h、2 000 辆/h。具体的测试结果如图 4 所示。

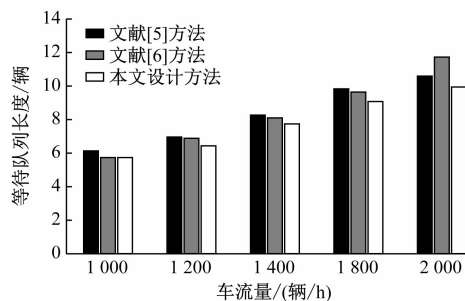


图4 不同控制方法下制动信号切换控制可靠性对比图
Fig.4 Comparison diagram of braking signal switch control reliability with different control methods

由图 4 可知,以不同控制方法分别进行测试,虽然等待队列长度均呈现出随着车流量的增加逐渐增大的发展趋势,但本文设计的控制方法测试所得等待队列长度明显低于对照组。当车流量低于 1 400 辆/h 时,三种控制方法的差异并不明显;但是当车流量达到 1 800 辆/h 时,本文设计的控制方法下的等待队列长度低于文献[5]控制方法 0.65 辆,低于文献[6]控制方法 0.62 辆;当车流量达到 2 000 辆/h 时,本文设计控制方法下的等待队列长度低于文献[5]控制方法 0.57 辆,低于文献[6]控制方法 1.78 辆。本文设计的控制方法在可靠性方面与对照组相比具有明显优势。

4 结语

本文提出的基于双核控制器的有轨电车制动

信号切换智能控制方法,借助双核控制器具有两个独立处理器核心的配置,可同时处理不同的任务,更快地响应制动信号的切换,更好地控制列车的运行;借助双核控制器的冗余设计,保证了制动信号切换控制的可靠性,大大减少了因控制器故障导致的事故发生,提高了有轨电车运行的安全性;通过对制动信号的智能分析、预测和控制,提高了列车运行的智能化水平。

参考文献

- [1] 谈思韵. 有轨电车信号系统线路数据自动生成系统研究[J]. 现代有轨电车, 2023(11): 36.
TAN Siyun. Research on line data automatic generation systems for urban rail transit signal systems[J]. Modern Urban Transit, 2023(11): 36.
- [2] 丁青. 有轨电车信号系统车地多重无线冗余方案应用研究[J]. 科学技术创新, 2023(25): 112.
DING Qing. Research on the application of vehicle-ground wireless multiple redundancy scheme in urban rail transit signal system[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(25): 112.
- [3] 那哲铭, 丁莹莹. 基于 BIM 技术的有轨电车信号设备运维管理系统[J]. 铁路技术创新, 2023(4): 38.
NA Zheming, DING Yingying. O & M management system of signal facility of urban rail transit based on BIM technology[J]. Railway Technical Innovation, 2023(4): 38.
- [4] 徐峰. 城市轨道交通信号系统冗余设计及备用控制中心配置

方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 244.

XU Feng. Redundancy design of urban rail transit signal system and configuration scheme of backup control center[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 244.

- [5] 孙剑. 基于多 Agent 技术的地铁轨道交通信号智能控制方法[J]. 中国新技术新产品, 2023(17): 8.
SUN Jian. Intelligent control method of subway rail transit signal based on multi-agent technology[J]. New Technology & New Products of China, 2023(17): 8.
- [6] 蒋建金. 一种采用容器技术基于通用硬件的云计算轨道交通信号控制系统安全平台[J]. 科学技术创新, 2023(26): 214.
JIANG Jianjin. The technical research relates to a safety platform of cloud computing rail transit signal control system based on common hardware using container technology[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(26): 214.
- [7] 宋坚. 基于云存储技术的有轨电车信号安全预警研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(15): 79.
SONG Jian. Research on the security early warning of urban rail transit signal based on cloud storage technology[J]. Information & Computer, 2023, 35(15): 79.

· 收稿日期:2024-01-25 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-06-10
Received:2024-01-25 Revised:2024-03-20 Published:2024-06-10
· 作者:郭团生,高级工程师,605541862@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 78 页)

- [2] 王乐欣. 地铁铝合金车体的强度仿真及疲劳寿命评估[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
WANG Lexin. Strength simulation and fatigue life evaluation of subway aluminum alloy car body[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [3] 王生武, 李忠林. 考虑焊缝的 C70 车体疲劳寿命有限元模型分析[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(9): 65.
WANG Shengwu, LI Zhonglin. Finite element model analysis of fatigue life of C70 car body considering weld seam[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(9): 65.
- [4] 王超, 刘潮涛, 郭平波, 等. 高速动车组整车车体疲劳试验方法研究[J]. 机械强度, 2020, 42(3): 539.
WANG Chao, LIU Chaotao, GUO Pingbo, et al. Research on fa-

tigue test method of car body of high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 539.

- [5] 陈逸斐. 地铁车辆端部底架疲劳寿命研究[J]. 机械, 2021, 48(1): 44.
CHEN Yifei. Study on the fatigue life of end-underframe for metro vehicles[J]. Machinery, 2021, 48(1): 44.

· 收稿日期:2021-11-29 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-06-10
Received:2021-11-29 Revised:2022-03-15 Published:2024-06-10
· 第一作者:刘龙玺,高级工程师,liulongxi@cqsf.com
通信作者:王康,硕士研究生,1458824214@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license