DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.009

城轨车辆电制动性能优化控制策略研究

刘东辉，赵雷廷，王永翔，刘　衍
（北京纵横机电科技有限公司，北京 100094）

摘　要：针对城市轨道交通车辆启停频繁的特点，为实现精准停车、提升乘坐舒适度、降低损耗、节约能源等目的，文章提出一种异步电机纯电制动至零速停车的控制策略。在车辆运行全速范围内，利用数据与模型双驱动技术预测车辆最大可用减速度；在车辆电制动低速区段，设计减速度控制器针对电机制动转矩指令值进行实时调节；采用离散化闭环全阶转子磁链观测器辨识电机运行频率，从而利用辨识频率值替代速度传感器采集频率值完成停车过程。最终，通过半实物仿真平台和车辆运行试验证明上述研究策略的有效性。

关键词：城市轨道交通；零速电制动；数据与模型双驱动；减速度控制器；全阶转子磁链观测器；半实物仿真平台

中图分类号：U231；U260.352　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）02-0075-06

0　引言

城市轨道交通车辆制动功能通常由空气制动和电制动配合完成，制动停车过程通常采用“电–空”联合方式[1-3]。然而，相比于电制动，空气制动的动态响应速度慢且输出制动力精度低，因此“电–空”联合制动方式在切换过程中难免会引起列车减速度突变，导致乘客舒适度降低[4]、在列车自动运行控制（Automatic Train Operation，ATO）模式下停车位置不准、闸片与车轮之间磨耗增加并产生行车噪声等现象[5-6]。鉴于此，零速电制动（zero speed electric braking，以下简称EB0），即利用纯电制动方式完成停车过程，已成为城轨牵引控制领域热门研究方向和技术难题。文献[7]针对永磁同步牵引系统零速电制动策略展开研究，采用旋转变压器可精确测量转子位置，并且不存在反接制动需求。文献[8]通过对永磁电机的结构特点和电磁性能进行分析，提出了一种将直流斩波器和空间电压矢量方法相结合的控制策略，并在电动汽车试验中得到了验证。文献[9-10]讨论了异步电机牵引系统纯电制动过程中再生制动与反接制动的切换，以及防止列车反向运行的制动切除问题，并且对速度传感器脉冲信号进行特殊处理，一定程度上提高了转速测量精度。文献[11]通过取消磁链闭环优化低速制动过程的系统稳定性。文献[12]通过分析现有再生制动系统的性能，提出了一种搜索列车刹车速度轨迹的优化控制算法，在电制动过程中同时综合考虑机械制动能力，提高铁路车辆再生制动系统的能量回收效率。文献[13]详细描述了牵引系统为了克服低速速度传感器误差和降低机械制动系统总体重量，提出了坡度估计前馈算法和新的转矩控制参数，并在西日本铁道公司的试验线路上进行了测试。

综上所述，异步电机EB0技术在电机制动能力利用、电机制动转矩发挥精度、车辆冲击控制等方面还存在优化空间。本文针对这些问题，分别从车辆最大可用减速度预测、实际减速度优化控制和电机速度在线辨识3个方面进行研究，提出一种高性能纯电制动至零速停车控制策略。

1　控制策略构架

图1为城轨车辆系构架图。由图1可知，基于异步

基金项目：中国城市轨道交通协会科研专项（CAMET-KY-2022039）；中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题（2022YJ230）
通信作者：赵雷廷，男，博士，副研究员，主要从事电力电子与电力传动研究工作；E-mail: z001917@zemt.cn
引用格式：刘东辉, 赵雷廷, 王永翔, 等. 城轨车辆电制动性能优化控制策略研究[J]. 机车电传动, 2024(2): 75-80.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.009.
Citation：LIU Donghui, ZHAO Leiting, WANG Yongxiang, et al. Research on optimal control strategy for electric braking performance of urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives,2024(2): 75-80.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.009.

电机的网络系统向各动车牵引控制单元发送电制动转矩指令值（TERF）、减速度指令值（AREF）、电制动零速停车激活信号（EB0ACT），以及其他动车当前最大可用电制转矩值（TMAXA）；同时，各动车牵引控制单元需要向网络系统发送当前最大可用电制动转矩值（TMAX）和电制动零速停车使能信号（EB0EN）。

单节动车EB0策略构架如图2所示。其中，微控制单元（Micro-controller Unit，MCU）利用预测模型实现最大可用电制动转矩值预测，通过结合车体动力学模型，计算车辆最大可用减速度预测值；减速度控制器用于输出EB0模式下电制动转矩指令值；制动模式选择用于判断动车是否具备EB0条件，其逻辑为当最大可用电制动转矩预测值小于设定阈值，则认为该动车不具备EB0条件，而网络系统判定只要有任一动车不具备条件，进而取消整车EB0，所有动车选择“电-空”联合制动模式，否则，所有动车选择减速度控制器的输出作为最终转矩指令值，并发送至数字信号处理器（Digital Signal Processing，DSP）；DSP可实现电机频率在线辨识，当EB0激活时，利用辨识频率值参与电机控制，反之采用速度传感器采集频率值；最终，通过现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）实现电机驱动脉冲生成。

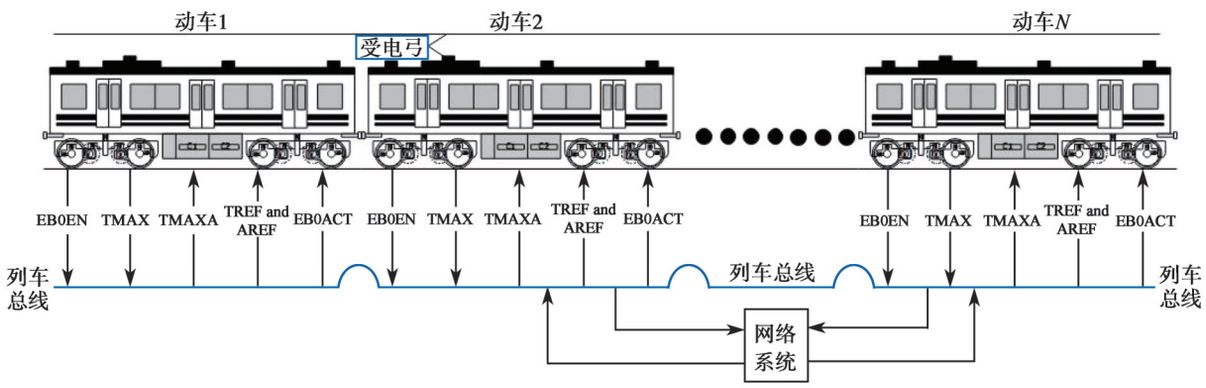


图1 城轨车辆系统构架

Fig. 1 System architecture of urban rail vehicles

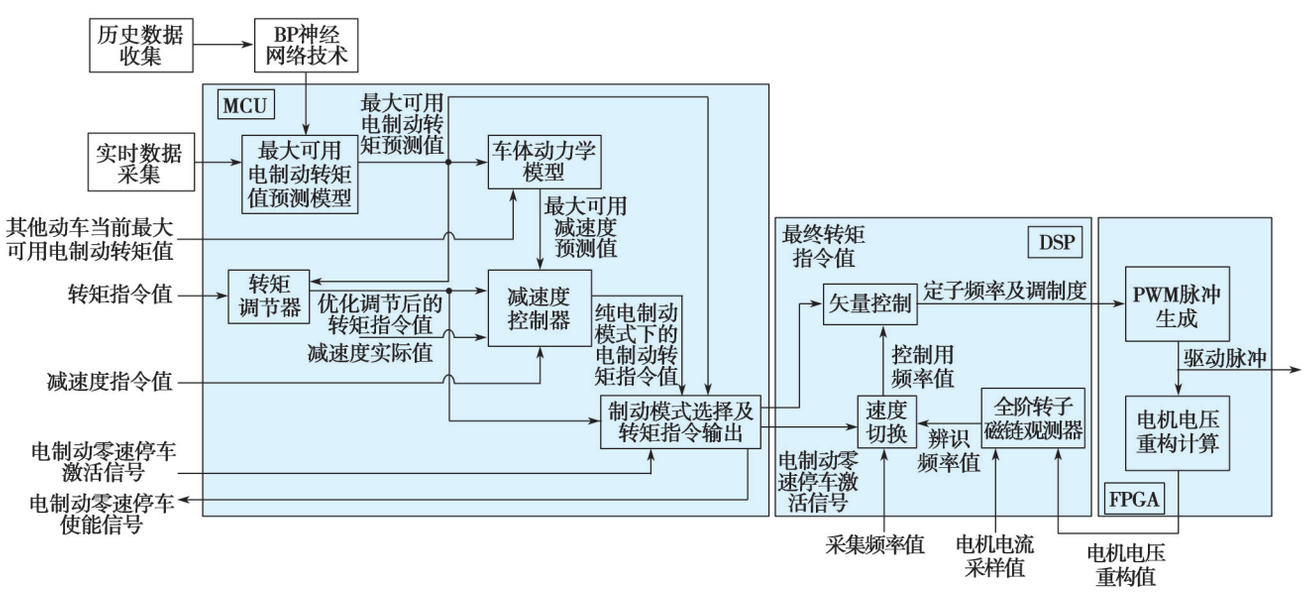


图2 纯电制动至零速停车控制策略框图

Fig. 2 Block diagram for control strategy of pure electric braking of motors to zero speed

2 控制策略设计

2.1 车辆电制动能力预测

如何判定车辆当前状态是否具备EB0停车条件，本文采用基于数据与模型双驱动的方法实时预测车辆制动能力[14]。

首先，明确当前最大可用电制动转矩作为神经网络输出层变量，在离线工况下构建BP神经网络如图3所示。

历史行车数据作为输入层参数，行车数据包含轮径差、直流网压、电机特性曲线、轮轨黏着信息、电机温度、滤波电抗器温度等参数。由于输入参数量级不相等，为统一所有因素对最大可用制动转矩的影响（0~100%），对原始数据样本进行归一化处理。

其次，隐含层神经元传递函数采用S型正切函数tansig，输出层神经元传递函数采用S型对数函数

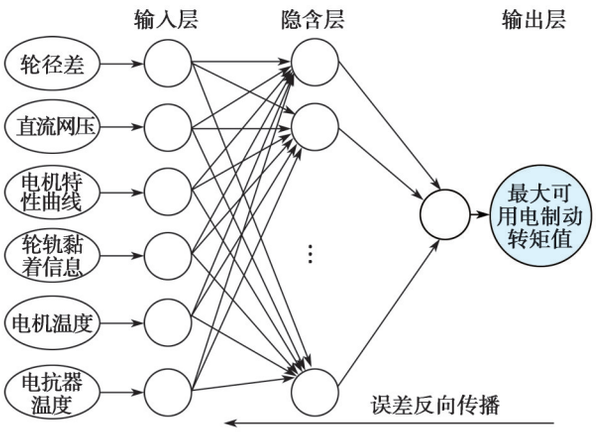


图3　性能预测神经网络结构

Fig. 3　Neural network structure for performance prediction

logsig，满足网络输出在[0, 1]内的要求。训练函数trainlm利用Levenberg-Marquardt算法对网络进行训练，从而得到制动能力预测模型，并分别运行于车辆每节动车牵引控制单元的MCU中，实时输出该动车最大可用电制动转矩，并作为车体动力学模型输入[15]，最终获取车辆最大可用减速度预测值α。

2.2　减速度控制器设计

在通常保持制动施加点为0.5 km/h的基础上，综合考虑停车精度要求、瞬时冲击率限制（0.75 m/s^3）、平均冲击率优化、坡道工况、软件工程化实现难度等因素，结合当前车辆最大可用减速度预测值、减速度指令值、减速度反馈值、实际速度进行减速度控制器设计，实现如图4所示的EB0停车曲线。

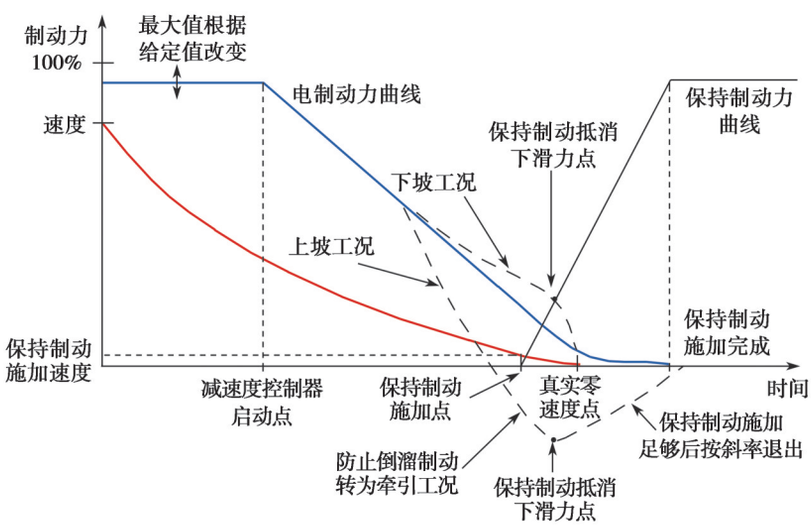


图4　EB0停车曲线

Fig. 4　Stopping curve of EB0

当实际车速$v(t)$降至减速度控制器启动点v_a之后，电制动转矩指令值转换为减速度控制器输出的转矩指令值$T_{EB0}(t)$，$T_{EB0}(t)$的计算如下：

$$T_{EB0}(t)=T_T(t)\sqrt{\frac{v(t)}{v_a}}+\left[a_c(t)\sqrt{\frac{v(t)}{v_a}}-a_f(t)\right]k_p+k_i\int\left[a_c(t)\sqrt{\frac{v(t)}{v_a}}-a_f(t)\right]\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：$T_T(t)$为经过转矩调节器优化的转矩指令值；$a_c(t)$为减速度指令值；$a_f(t)$为减速度实际值。

2.3　转速辨识及电机优化控制

低速停车阶段DSP采用矢量控制如图5所示。

以定子电流i_s、电压重构值u_s作为输入，选择定子电流i_s与转子磁链φ_r作为状态变量，设计反馈增益矩阵$\boldsymbol{G}=[G_s, G_r]^T$，最终得到离散闭环全阶转子观测器模型，模型的数学表达如下：

$$\left.\begin{aligned}i_s^s(k+1)&=(1-\frac{T}{\tau_\sigma'})i_s^s(k)+\frac{k_rT}{L_\sigma}(\frac{1}{\tau_r}-\mathrm{j}\hat{\omega}_r)\varphi_r^s(k)+\frac{T}{L_\sigma}u_s^s(k)+G_s(\hat{i}_s^s(k)-i_s^s(k))\\\varphi_r^s(k+1)&=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\hat{\omega}_r(k)T}\frac{L_mT}{\tau_r}i_s^s(k)+\varphi_r^r(k)+\mathrm{e}^{\mathrm{j}\hat{\omega}_r(k)T}(1-\frac{T}{\tau_r})\varphi_r^s(k)+G_r(\hat{i}_s^s(k)-i_s^s(k))\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：T为离散周期；j为虚数单位；τ_σ'为瞬时时间常数；$\hat{\omega}_r$为电机运行频率辨识值；$\hat{i}_s$为定子电流观测值；k_r为转子磁耦合因子；τ_r为转子时间常数；L_m为励磁电感；L_σ为总漏感；上标s、r分别代表定子和转子坐标系。

根据李雅普诺夫稳定性理论，结合比例积分控制原理，设计转速自适应率，最终得到电机运行频率辨识值$\hat{\omega}_r$，具体为

$$\hat{\omega}_r=k_p(e_{i_s\alpha}^s\varphi_{r\beta}^s-e_{i_s\beta}^s\varphi_{r\alpha}^s)+k_i\int(e_{i_s\alpha}^s\varphi_{r\beta}^s-e_{i_s\beta}^s\varphi_{r\alpha}^s)\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：$e_{i_s\alpha}^s$, $e_{i_s\beta}^s$分别为定子电流观测值与实际值之间偏

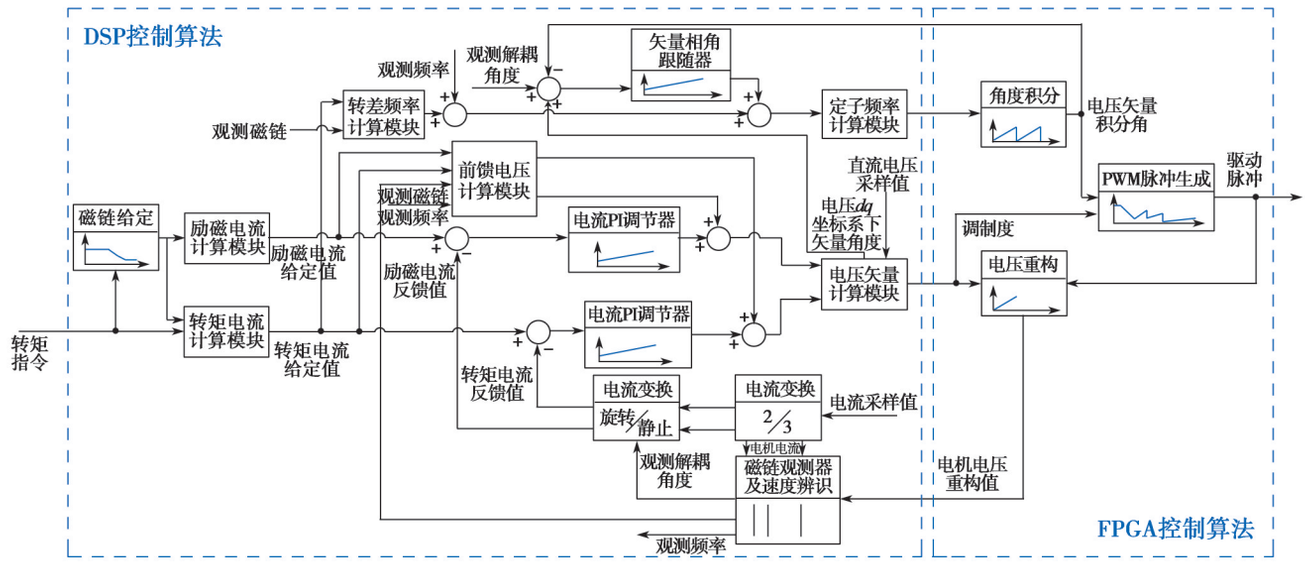


图5 电机矢量控制框图

Fig. 5 Block diagram of motor vector control

差在静止坐标系下α、β轴的分量；$\varphi^{s}_{r\alpha}$,$\varphi^{s}_{r\beta}$分别为转子磁链观测值在静止坐标系下α、β轴分量；k_p为比例系数；k_i为积分系数。

当EB0功能启用后，为提高系统的动态响应，DSP采用辨识频率值替代速度传感器采集频率值，完成控制算法中定子频率给定值和前馈电压计算。如转差频率在保持制动施加前小于上述电机运行频率辨识值，则系统维持回馈制动；反之，则自然切换为反接制动。

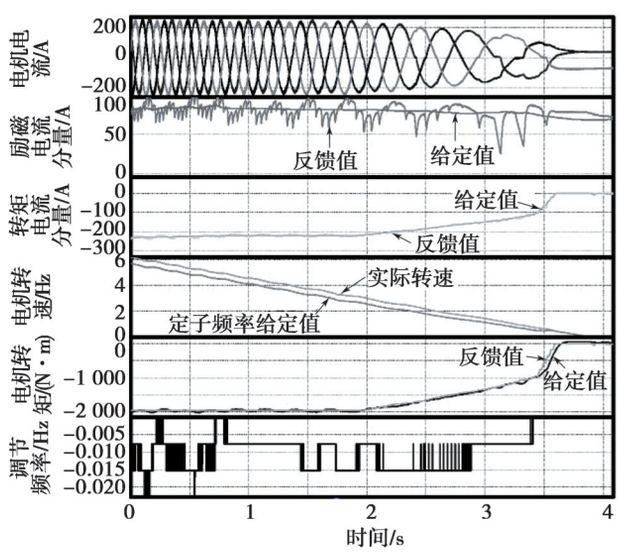
3 半实物仿真及线路验证

构建半实物仿真平台分别模拟牵引变流器直流电抗器温度正常和超温2种工况，并针对上述研究进行仿真测试。本文中使用的异步电机和半实物仿真平台参数如表1所示。当直流电抗器温度正常时，预测模型输出最大可用电制动转矩100%，如图6(a)所示；当直流电抗器超温预警时，为确保电气部件安全，系统按照既定逻辑降低制动功率，此时预测模型输出最大可用电制动转矩为50%，如图6(b)所示。依次记录电机电流、励磁电流分量给定值和反馈值、转矩电流分量给定值和反馈值、电机实际转速和定子频率给定值、电机转矩给定值和实际值及相角调节频率值。

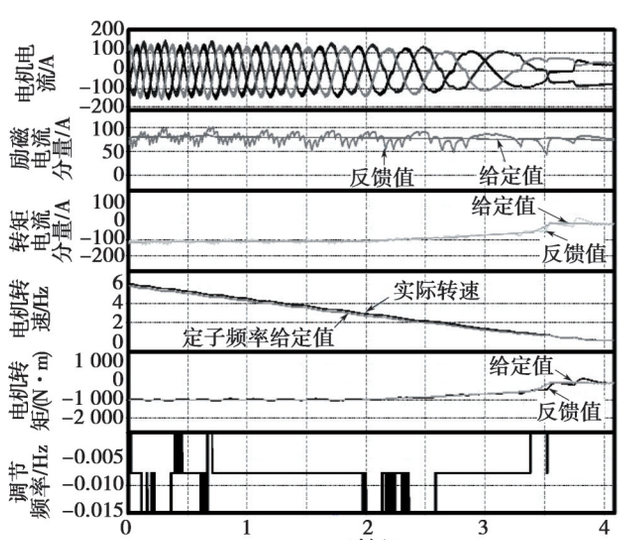
表1 半实物仿真模型和电机参数

Table 1 Hardware-in-the-loop model and motor parameters

	参数名称	参数值		参数名称	参数值
异步电机	额定频率/Hz	74.3	半实物仿真平台	转动惯量/(kg·m²)	573
	额定电流/A	144		线路阻抗/Ω	0.04
	额定电压/V	1 146		输入电抗器/mH	5.85
	极对数	2		中间支撑电容/μF	3 800
	起动转矩/(N·m)	2 300		预充电电阻/Ω	3×42
控制策略	双电流环k_{cp}	0.300	控制策略	速度辨识k_{sp}	0.010
	双电流环k_{ci}	0.075		速度辨识k_{si}	15



(a) 100%级位



(b) 50%级位

图6 EB0过程仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of EB0 process

由图6可知，在不同级位工况下，在减速度控制器启动之前，转矩维持恒定，并且发挥稳定；当减速度控制器启动之后，转矩指令值按照既定曲线变化，切换过程中电机电流平稳无畸变，反馈励磁电流和转矩电流准确跟踪给定值，相角调节频率值实时补偿定子频率给定值，实际转矩动态响应良好，停车过程平缓。

为验证本文提出的优化控制策略实际工程应用有效性，利用天津某地铁线路车辆在正线开展ATO测试，该条线路共计29站，测试数据如表2所示，表2记录了车辆上行/下行过程的对标精度。在该模式下为实现精确停车作业，误差应满足屏蔽门中心与车门中心差值不大于30 cm的要求。

表2　线路ATO运行停车精度

Table 2　Stopping accuracy of ATO operation　　cm

站名	上行偏差	下行偏差	站名	上行偏差	下行偏差
1站	起点	−10	16站	0	0
2站	0	−10	17站	−10	−20
3站	−10	−5	18站	0	−15
4站	−10	−15	19站	−3	−10
5站	−10	−10	20站	−20	−5
6站	−10	−15	21站	0	−10
7站	−20	−10	22站	0	0
8站	−10	−10	23站	−10	−5
9站	0	−10	24站	−5	−12
10站	0	0	25站	−5	−10
11站	0	0	26站	0	−5
12站	0	−5	27站	0	−10
13站	0	0	28站	−10	−13
14站	−10	−15	29站	−5	起点
15站	−29	−5	平均值	6.32	8.39

由表2可知，搭载EB0控制策略的牵引系统可使车辆在全线上行/下行过程的各站均满足停车精度要求，平均停车精度误差控制在8 cm以内，与之前“电–空”联合方式平均误差12 cm相比，停车精度提升约33.3%。

图7为车辆连续3站“启动–停车”过程数据记录。

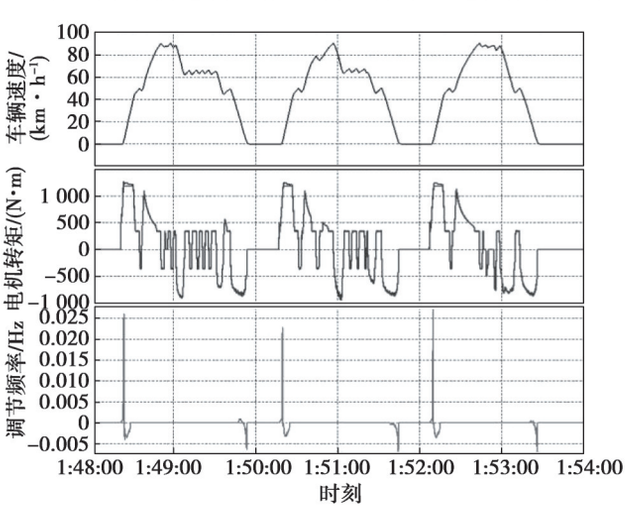


图7　实际车辆ATO运行过程

Fig. 7　Actual vehicle ATO operation process

对图7进行分析可知，车速在低速停车阶段下降平缓，电机转矩实时跟踪指令转矩且无异常冲击，相角调节频率值的输出提升了转矩动态响应。

4　结束语

面对目前城轨车辆对运行安全、智能营运和绿色低碳出行的需求，本文提出了一种高动态响应、高性能的纯电制动至零速停车的控制策略，引入了神经网络模型，用于预测最大可用减速度，并设计了一种减速度控制器，以满足停车精度和冲击率的要求。通过采用离散闭环全阶转子观测器和基于李雅普诺夫稳定性理论设计的转速自适应率，实现电机转速实时辨识。与现有的“电–空”联合方式相比，本方法可使车辆低速制动性能更加可控，显著提升停车精度和乘坐舒适度，同时降低了闸片与车轮之间的磨耗和行车噪声，从而实现显著节能。

参考文献：

[1]　樊贵新, 曹忠林, 李学峰. 城轨车辆国产制动系统的研制及应用[J]. 现代城市轨道交通, 2007(6): 34-38.
FAN Guixin, CAO Zhonglin, LI Xuefeng. Development and application of nationalization of brake system in transit[J]. Modern urban transit, 2007(6): 34-38.

[2]　李小兵, 齐增强. 城轨车辆制动系统国产化研制及应用[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(4): 24-27.
LI Xiaobing, QI Zengqiang. Development and application of localized brake system for urban rail vehicles[J]. Rail transportation equipment and technology, 2020(4): 24-27.

[3]　王仁庆. 地铁车辆制动特性及电空转换参数优化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 92-95.
WANG Renqing. Metro vehicle brake characteristics and improvement of electric-pneumatic conversion parameters[J]. Urban mass transit, 2019, 22(12): 92-95.

[4]　李和平, 严霄蕙, 曹宏发. 动车组旅客舒适度与制动控制[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(5): 111-114.
LI Heping, YAN Xiaohui, CAO Hongfa. Passenger comfort and brake control of EMU[J]. Railway locomotive & car, 2011, 31(5): 111-114.

[5]　马法运, 钟志宏, 方晓春, 等. 牵引列车纯电制动停车技术研究[J]. 微电机, 2021, 54(4): 85-88.
MA Fayun, ZHONG Zhihong, FANG Xiaochun, et al. Research on pure electric braking parking technology of traction train[J]. Micromotors, 2021, 54(4): 85-88.

[6]　易泽宇. 基于牵引传动模拟平台的高速列车纯电制动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
YI Zeyu. Research on fully electric braking of high-speed trains based on traction transmission simulation platform [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[7]　夏猛, 马法运, 张春磊, 等. 永磁同步牵引系统零速电制动

策略研究[J]. 微电机, 2019, 52(2): 46-49.
XIA Meng, MA Fayun, ZHANG Chunlei, et al. Research on zero speed electric braking strategy of permanent magnet synchronous traction motor[J]. Micromotors, 2019, 52(2): 46-49.

[8] DONG Yugang, ZHANG Chengning, GU Liang, et al. Zero speed braking control strategy for permanent magnet motor [C]//IEEE. 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Wuhan: IEEE, 2010: 3342-3344.

[9] 周美丽. 牵引直线感应电机纯电制动控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
ZHOU Meili. Research on fully electric braking control strategy for traction linear induction motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[10] 周美丽, 杨中平, 林飞. 直线电机地铁纯电制动研究[C]//中国电工技术学会. 2011 中国电工技术学会学术年会论文集. 北京: 中国电工技术学会, 2011: 781-788.
ZHOU Meili, YANG Zhongping, LIN Fei. Research on fully electric braking control for metro linear induction motor [C]//China Electrotechnical Society. Proceedings of the 2011 Academic Annual Conference of the Chinese Electrotechnical Society. Beijing: China Electrotechnical Society, 2011: 781-788.

[11] 王子超, 孙洪亮, 苏丹, 等. 新一代有轨电车全电制动停车技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊2): 79-82.
WANG Zichao, SUN Hongliang, SU Dan, et al. All-electric braking stopping technology of the new generation tram[J]. Urban mass transit, 2021, 24(Suppl 2): 79-82.

[12] LU Shaofeng, WESTON P, HILLMANSEN S, et al. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014, 15(6): 2506-2515.

[13] OGASA M, WATANABE T, IMAMURA Y, et al. Running test result of electric brake to zero speed[J]. Quarterly report of RTRI, 1999, 40(4): 214-218.

[14] 杨思. 数据-模型融合驱动的地铁车轮磨耗预测分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
YANG Si. Prediction of metro wheel wear based on integrated data-model-driven approach[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.

[15] OHISHI K, OGAWA Y, MIYASHITA I, et al. Anti-slip readhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer[C]//IEEE. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. Rome: IEEE, 2000, 2: 1001-1007.

Research on optimal control strategy for electric braking performance of urban rail vehicles

LIU Donghui, ZHAO Leiting, WANG Yongxiang, LIU Kan

(Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: In light of the characteristics of frequent starting and stopping of urban rail transit vehicles, a control strategy was proposed for achieving precise stopping, enhancing ride comfort, reducing losses and saving energy through pure electric braking of asynchronous motors to zero speed. Within the full-speed range of vehicle operation, a dual-drive technology based on data and model was utilized to predict the maximum available deceleration of the vehicle. In the low-speed range of vehicle electric braking, a deceleration controller was designed to adjust the torque command value for motor braking in real-time. A discretized closed-loop full-order rotor flux observer was employed to identify the operating frequency of the motor, enabling the use of the identified frequency value to replace the frequency value collected by the speed sensor to complete the stopping process. Finally, the effectiveness of the above research strategy was validated through a hardware-in-the-loop simulation platform and vehicle operation tests.

Keywords: urban rail transit; zero-speed electric braking; model and data dual drive; deceleration controller; full-order rotor flux observer; hardware-in-the-loop simulation platform

收稿日期：2023-12-06；修回日期：2024-01-17