

参数匹配下的城轨列车 ATO 控制研究

成实^{1,2}, 赵鲁^{1,2}, 迟宇航^{1,2}, 罗宇昂^{1,2}, 依克沙·哈力木拉提^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所 高密度电磁动力与系统全国重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:城轨列车自动驾驶系统(ATO)的技术核心在于对牵引电机的高精度控制,这需要对电机闭环参数进行在线辨识与修正,为满足城轨列车 ATO 运行停车精度必须控制在 ± 15 cm 内的高精度要求,提出一种优化转子磁链观测器的模型参考自适应法(MRAS),进行辨识参数匹配,并与一种改进的位置式 ATO 算法进行结合,验证控制优化的实际应用效果。通过仿真分析与实验验证,此方法能够准确辨识出电机参数,与实际值的误差小于 0.1,提升了列车牵引电机的控制性能,在列车停车精度可控制 ± 10 cm 范围内,进一步对列车的 ATO 控制实现优化。

关键词:城轨交通;自动驾驶;参数辨识;转子磁链

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26125

Parameter-matched ATO Control Study of Urban Trains

CHENG Shi^{1,2}, ZHAO Lu^{1,2}, CHI Yuhang^{1,2}, LUO Yuang^{1,2}, YIKESHA Halimulati^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Density Electromagnetic Power and Systems,

Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The technological core of the automatic train operation (ATO) for urban trains lies in the high-precision control of traction motors, which requires online identification and correction of the motor closed-loop parameters. In order to satisfy the high-precision requirement that the ATO operation and stopping accuracy of urban trains must be controlled within ± 15 cm, a model reference adaptive system (MRAS) online identification method was proposed for optimizing the rotor chain observer, carrying out identification parameter matching, and combined with an improved positional ATO algorithm to verify the practical application effect of control optimization. Through simulation analysis and experimental verification, this method can accurately identify the motor parameters, and the deviation from the actual value is less than 0.1, which improves the control performance of the train traction motor, and further optimizes the ATO control of the train within the range of train stopping accuracy can be controlled ± 10 cm.

Key words: urban rail transit; automatic train operation(ATO); parameter identification; rotor magnetic chain

随着我国城市化水平的不断提高,轨道交通在大多数城市中被广泛应用以提高人们的出行效率^[1]。随之而来的是对列车控制日益增高的要求。在这方面,异步电机因其可靠性高、环境适应性强和调速范围广等优点,在轨道交通、航空航天、矿山工业等领域得到了广泛应用。然而,在实际应用中,如何更加高效地控制异步电机成为许多学者研究的重点。由于高温、磁路非线性

等因素的影响,电机长时间运行过程中的一些参数势必会发生变化^[2]。这些参数的不准确性会导致电机的控制性能下降,因此需要进行参数辨识以进一步提升电机的控制性能。

异步电机的参数辨识方法主要分为信号注入法和反电动势模型法两种,其中信号注入法主要包括高频信号注入法、转子谐波法等,其原理是对电机输入特定频率和幅值的电压或电流信

基金项目:国家重点研发项目(2023YFB4302102-2)

作者简介:成实(1998—),男,硕士,主要研究方向为高性能电机控制、大功率电力电子变换器,Email:chengshi22@mails.iee.ac.cn

通讯作者:赵鲁(1984—),男,博士,副研究员,主要研究方向为大功率电力电子与直线驱动技术,Email:zhaolu@mails.iee.ac.cn

号,通过对系统的输出信号检测,并对输入信号与输出响应分析,得到系统所需要辨识的参数。文献[3]针对电流频率变化而导致激磁电感和转子电阻辨识出现的偏差提出一种无需漏感参数的离线电机参数辨识方法,在给电机加入直流电压的基础上叠加小幅值的正弦电压实现转子电阻与激磁电感的辨识;文献[4]根据恒电流辨识原理,通过检测电流给定值的波动情况来调节PWM占空比,以此辨识出电机的定转子电阻、互感等参数。采用信号注入的方法实现较为简单,大多用于电机的离线参数辨识,这种方法不会受到电机参数的影响,但会影响电机的正常运行,使得估计精度有所欠缺。

反电动势模型法主要针对在线参数辨识问题,主要有普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)^[5]、模型参考自适应法(model reference adaptive system, MRAS)^[6]、扩展卡尔曼滤波法(extended Kalman filtering, EKF)^[7]等。许多学者也提出了很多方法。文献[8]研究了强跟踪卡尔曼滤波算法来对感应电机的转速进行估计,将渐消因子引入状态预测矩阵中来调整EKF的增益矩阵以增强其辨识能力;文献[9]基于定子磁链模型提出一种转子时间常数的参数辨识方法;文献[10]提出一种基于滑模控制的异步电机全阶磁链观测器来对转子磁链进行估计,设计滑模控制器来拓宽电机的速度范围;文献[11]提出一种混合型滑模磁链观测器来提高无速度传感器算法的观测精度。

针对城轨列车的自动驾驶系统(automatic train operation, ATO)控制算法,许多学者也做出了很多研究,文献[12]采用一种优化极点配置的方法来设计出一种最优预见跟踪控制算法以满足列车ATO控制;文献[13]利用磷虾群算法对ATO控制策略进行优化;文献[14]利用粒子群万有引力搜索算法对列车ATO目标曲线进行优化,使得列车的ATO跟踪能力得到进一步加强;文献[15-20]针对列车停车精度问题提出了一系列的优化方法,如利用模糊PID算法、遗传算法对列车停车位置进行自适应优化控制,达到既定的停车位置要求。

为了满足列车ATO对电机参数实时性的要求,需要研究在线辨识技术^[4]。在线辨识技术能够在列车运行过程中实时采集数据,对电机参数进行动态更新,从而保证电机控制的准确性。电

机参数辨识的最终目的是应用于列车自动驾驶系统的控制策略中,提高列车的运行性能,将辨识结果与ATO算法相结合,能够实现更为精确的电机控制,从而提高列车的运行精度和安全性。对此,本文提出一种优化转子磁链观测器的模型参考自适应法(MRAS),并将辨识参数实时更新到列车的ATO控制方案中,以获得更好的列车动态性能。

1 电机参数的敏感性分析

1.1 异步电机数学模型

异步电机是一种多变量、非线性、强耦合的电气设备,其数学模型中通常在三个坐标系下进行建模,分别为:*a-b-c*三相静止坐标系、*α-β*两相静止坐标系、*d-q*两相旋转坐标系。本文在两相静止坐标系下建立异步电机的数学模型。

电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \\ \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

转矩方程如下:

$$T_e = n_p L_m (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (3)$$

式中: R_s, R_r 分别为定、转子电阻; L_s, L_r, L_m 分别为定、转子电感和励磁电感; p 为微分算子; ω_r 为转子角速度; n_p 为电机极对数。

1.2 参数变化对列车ATO的影响

在列车高速运行过程中,随着工况与环境的变化,异步电机内部的参数也会随着发生变化。电机作为一种机电能量转换装置,在高速运动中会产生一定的损耗,主要包含铜耗、铁耗和机械损耗等损耗,从能量守恒的角度考虑,这些损耗最终会以热能的形式散发,这势必会使得电机的温度上升,进而影响到电机的定、转子电阻的参数变化,由文献[11]可知,其变化规律可以表示为

$$R_1 = \frac{K + T_1}{K + T_0} R_0 \quad (4)$$

式中: R_1 为温度 T_1 时电阻值; R_0 为温度 T_0 时电阻

值; K 为电机材料的温度系数。

在交变电流通过线圈时会产生集肤效应,使得电流集中于线圈的表面,电流的分布不均匀,导致线圈的阻值变大,在频率增大时,会使得集肤效应更加明显,线圈阻值增大,电感值则会减小。

励磁电感的大小由电机的空间气隙和铁心的饱和程度共同决定。在异步电机的内部,空间气隙长度是稳定不变的,但转子铁心的磁饱和程度会随着电机的运行频率和转子电流的变化而发生变化,表现为磁通量减少、磁饱和程度降低、电感增大的变化趋势。磁饱和的变化进一步对转子电阻、漏感产生一定的影响,同时,由于有漏磁通的作用,集肤效应会加剧电机参数的改变。在集肤效应与磁饱和等现象的共同作用下,励磁电感和定转子漏感会出现不同程度的改变。

当电机进入稳态时,定子电流的实际值与参考值有如下关系:

$$\hat{i}_{sq}^2 + \hat{i}_{sd}^2 = \hat{i}_{sq}^2 + \hat{i}_{sd}^2 \quad (5)$$

“ $\hat{\cdot}$ ”表示参数变化情况下的变量。稳态时,电机的实际转差角频率与参考转差角频率相等,有:

$$\omega_s = \frac{\hat{i}_{sq}}{T_r \hat{i}_{sd}} = \frac{\hat{i}_{sq}}{T_r \hat{i}_{sd}} \quad (6)$$

在异步电机的控制中,电机参数的变化会对电机的输出转矩造成影响,因此由式(5)和式(6)可以得到参数变化后的电磁转矩:

$$\hat{T}_e = n_p \frac{\hat{L}_m^2 \hat{i}_{sd} \hat{i}_{sq}}{\hat{L}_r} \quad (7)$$

转子时间常数 T_r 也随转子电感、转子电阻的变化而变化,有:

$$T_r = \frac{\hat{L}_r}{\hat{R}_r} \quad (8)$$

为直观地表达出参数变化对输出转矩以及转子时间参数的影响,基于上式分别画出电磁转矩、励磁电感、转子时间常数随电机参数变化影响的三维图,如图1和图2所示。

由图1、图2可以看出,电磁转矩与转子电感、励磁电感相互间的联系是紧密的,电机参数的变化会使得电磁转矩的误差增大,导致电机的性能降低,另外,转子时间常数的变化也会影响到电机的响应速度,使得电机的控制性能下降。通过上述分析可知电机参数的准确对于电机的控制而言是至关重要的。

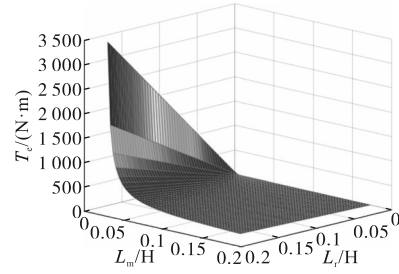


图1 参数变化对输出转矩的影响

Fig.1 Effect of parameter variation on output torque

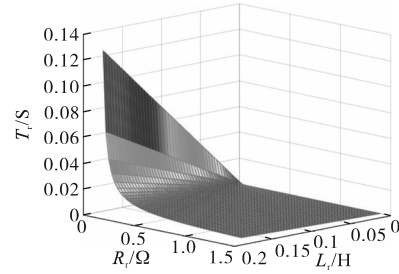


图2 参数变化对转子时间常数的影响

Fig.2 Effect of parameter variation on rotor time constant

1.3 相关参数辨识需求

通过上述分析可以看出,精确的电机参数可以提高电机的控制性能,这对于城轨列车的ATO控制是尤为重要的,电机的精准控制则需要对电机的参数变化情况进行分析。为保证控制效果,控制方案应考虑电机参数对控制模型的影响。因此,在控制策略中需要加入参数辨识算法,对电机参数进行在线辨识,并将辨识结果匹配到控制策略中。这将有助于提升电机的控制性能和效率。

2 基于转子磁链观测器的电机在线参数辨识

2.1 转子磁链模型

在两相静止坐标系下建立异步电机的磁链观测器数学模型,异步电机转子磁链电压模型为

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_{rx}^r}{dt} \\ \frac{d\Psi_{ry}^r}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} R_s + \sigma L_s p & 0 \\ 0 & R_s + \sigma L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} + \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$

式中: σ 为漏感。

异步电机转子磁链电流模型为

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Psi_{rx}^i}{dt} \\ \frac{d\Psi_{ry}^i}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\omega_r \\ \omega_r & -1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{rx}^i \\ \Psi_{ry}^i \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

从上式可以看出,建立的数学模型中存在积

分项,这会使得磁链的估算存在直流偏置和初始相位偏差,为减少这种偏差对系统的影响,在磁链的实际运算中采用低通滤波器来代替纯积分环节,并且截止频率随频率的变化而变化,以减小磁链估算的误差,有效抑制传统电压模型在低速时积分漂移问题,提升全速域磁链观测精度。由于引入低通滤波器来解决积分器的误差问题,这会引入输出的幅值和相位有一定的偏差,为减小低通滤波器所带来的估计误差问题,改善系统的动态控制性能,对低通滤波器输出的转子磁链进行幅值和相位补偿。优化后的磁链估计模型如图3所示。

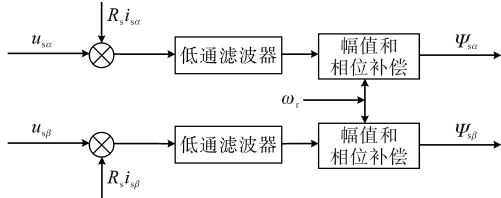


图3 转子磁链电压-电流的优化模型

Fig.3 Optimization model of voltage-current of rotor magnetic chain

2.2 R_s 与 T_r 同时在线辨识

观测器的性能与电机参数密切相关,电机在运动过程中的参数变化也会使得磁链的精度发生变化。基于电压模型的转子磁链模型的精度,不受转子电阻的影响,受励磁电感的影响也较小,但易受到定子电阻变化带来的影响。基于电流模型的转子磁链模型则相反,易受到转子电阻与励磁电感的影响。正因如此,在参考模型与可调模型的选取上二者形成互补关系,在定子电阻的在线辨识过程中,电压模型作为参考模型,电流模型作为可调模型,与此相反,在转子时间常数的在线辨识过程中,电流模型作为参考模型,电压模型作为可调模型,图4所示为辨识的结构图。通过二者的相互参照,在线辨识出电机参数的变化,并反馈到电机的控制系统中,自适应机制动态补偿温度变化引起的转子电阻漂移、磁饱和和导致的电感变化等非线性干扰,保持参数辨识稳定性,使电机的控制性能不会因为参数的变化而下降,能够进一步优化城轨列车的ATO控制。

建立定子电阻估计方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\Psi}_{r\alpha}^i}{dt} \\ \frac{d\hat{\Psi}_{r\beta}^i}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\hat{R}_s & 0 \\ 0 & -\hat{R}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} - \sigma L_s \begin{bmatrix} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{bmatrix} \quad (11)$$

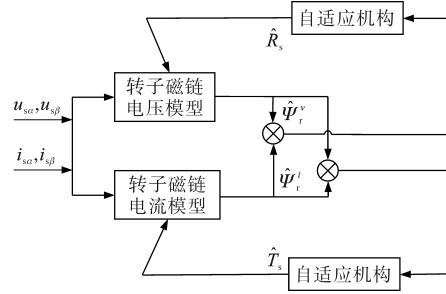


图4 辨识结构图

Fig.4 Diagram of the identification structure

建立转子时间常数估计方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\Psi}_{r\alpha}^i}{dt} \\ \frac{d\hat{\Psi}_{r\beta}^i}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{T}_r & -\omega_r \\ \omega_r & -\hat{T}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^i \\ \hat{\Psi}_{r\beta}^i \end{bmatrix} + L_m \hat{T}_r \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由此可计算出实际磁链与估计磁链间的误差为

$$\begin{bmatrix} \frac{d\varepsilon_{R,\alpha}}{dt} \\ \frac{d\varepsilon_{R,\beta}}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{L_r}{L_m} (R_s - \hat{R}_s) \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d\varepsilon_{T,\alpha}}{dt} \\ \frac{d\varepsilon_{T,\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_r & -\omega_r \\ \omega_r & -T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{T,\alpha} \\ \varepsilon_{T,\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_r - \hat{T}_r & 0 \\ 0 & T_r - \hat{T}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^i \\ \hat{\Psi}_{r\beta}^i \end{bmatrix} - (T_r - \hat{T}_r) L_m \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{R,\alpha} \\ \varepsilon_{R,\beta} \\ \varepsilon_{T,\alpha} \\ \varepsilon_{T,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T_r & -\omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & -T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{R,\alpha} \\ \varepsilon_{R,\beta} \\ \varepsilon_{T,\alpha} \\ \varepsilon_{T,\beta} \end{bmatrix} - W \quad (15)$$

即

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A\varepsilon - W \quad (16)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T_r & \omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & -T_r \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_{T,\alpha} \quad \varepsilon_{T,\beta} \quad \varepsilon_{R,\alpha} \quad \varepsilon_{R,\beta}]^T$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{L_r}{L_m} (R_s - \hat{R}_s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_r}{L_m} (R_s - \hat{R}_s) \\ T_r - \hat{T}_r & 0 & -(T_r - \hat{T}_r) L_m & 0 \\ 0 & T_r - \hat{T}_r & 0 & -(T_r - \hat{T}_r) L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^i \\ \hat{\Psi}_{r\beta}^i \\ i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

参考模型与可调模型的输出矢量均通过状态矢量表示,故有:

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{I}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (17)$$

根据 Popov 超稳定性理论,设计的自适应系统需满足以下条件:1)建立的转递函数矩阵 $\boldsymbol{H}(s) = \boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}$ 必须是正定矩阵;2)控制系统非线性时变反馈部分必须满足 Popov 积分不等式:

$$\eta(0, t) = \int_0^t \boldsymbol{v}^T \boldsymbol{W} dt \geq -\gamma_0^2 \quad t \geq 0 \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}^T \boldsymbol{W} = & -(T_r - \hat{T}_r) [(L_m i_{s\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i)(\Psi_{r\alpha}^i - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i) + \\ & (L_m i_{s\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}^i)(\Psi_{r\beta}^i - \hat{\Psi}_{r\beta}^i) - \frac{L_r}{L_m} (R_s - \hat{R}_s) \cdot \\ & [i_{s\alpha}(\hat{\Psi}_{r\alpha}^v - \Psi_{r\alpha}^v) + i_{s\beta}(\hat{\Psi}_{r\beta}^v - \Psi_{r\beta}^v)] \end{aligned}$$

其中, γ_0^2 为一个正常数。

由于 T_r 的变化相对于转子磁链的变化而言是缓慢的,因此可将参考模型中的 T_r 视为不变量,根据以下不等式可得:

$$\int_0^{t_1} k \left[\frac{df(t)}{dt} \right] f(t) dt = \frac{k}{2} [f^2(t_1) - f^2(0)] \geq -\frac{k}{2} f^2(0) \quad (19)$$

对此可计算得出自适应律:

$$\begin{aligned} \frac{d(\hat{T}_r - T_r)}{dt} = \varepsilon_{T_r} = & \lambda [(L_m i_{s\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i)(\Psi_{r\alpha}^i - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i) + \\ & (L_m i_{s\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}^i)(\Psi_{r\beta}^i - \hat{\Psi}_{r\beta}^i)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\hat{R}_s - R_s)}{dt} = \varepsilon_{R_s} = & \lambda \frac{L_r}{L_m} (R_s - \hat{R}_s) [i_{s\alpha}(\hat{\Psi}_{r\alpha}^v - \Psi_{r\alpha}^v) + \\ & i_{s\beta}(\hat{\Psi}_{r\beta}^v - \Psi_{r\beta}^v)] \end{aligned} \quad (21)$$

自适应律通常采用比例积分调节,以获得最好的动态性能,即可得到定子电阻与转子时间常数的估计方程:

$$\begin{aligned} \hat{R}_s = & K_p i_{s\alpha} [(\hat{\Psi}_{r\alpha}^v - \Psi_{r\alpha}^v) + i_{s\beta}(\hat{\Psi}_{r\beta}^v - \Psi_{r\beta}^v)] + \\ & K_i \int [i_{s\alpha}(\hat{\Psi}_{r\alpha}^v - \Psi_{r\alpha}^v) + i_{s\beta}(\hat{\Psi}_{r\beta}^v - \Psi_{r\beta}^v)] dt \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \hat{T}_r = & K_p [(L_m i_{s\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i)(\hat{\Psi}_{r\alpha}^v - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i) + (L_m i_{s\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}^i) \cdot \\ & (\hat{\Psi}_{r\beta}^v - \hat{\Psi}_{r\beta}^i)] + K_i \int [(L_m i_{s\alpha} - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i)(\hat{\Psi}_{r\alpha}^v - \hat{\Psi}_{r\alpha}^i) + \\ & (L_m i_{s\beta} - \hat{\Psi}_{r\beta}^i)(\hat{\Psi}_{r\beta}^v - \hat{\Psi}_{r\beta}^i)] dt \end{aligned} \quad (23)$$

3 城轨列车ATO控制算法研究

城轨列车ATO算法的研究,最重要的是保证列车安全、准时地到站精准停车。本文提出了一

种改进的位置式列车ATO控制策略,控制流程如图5所示。

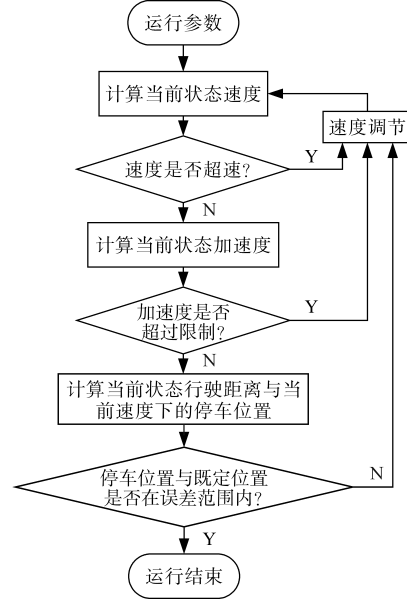


图5 列车ATO控制流程图

Fig.5 Train ATO control flow chart

利用列车加速度实现自动驾驶的核心方法是通过实时调节牵引与制动力,实时计算目标加速度、列车速度和行驶距离,对列车状态进行判断,并根据判断结果对列车速度进行修正,将加速度指令转化为牵引电机功率或制动力矩输出,使列车精准跟踪目标速度曲线并保障运行安全。

对牵引电机力矩的精准调控是实现列车自动驾驶加速度控制的核心环节。系统通过实时解算目标加速度指令,将其转化为电机转矩需求,采用准确辨识的电机参数能够实时解算出准确的电机转矩值,使得列车ATO控制系统计算的牵引特性曲线达到当下所需转矩要求,进一步满足列车的速度控制需求,在停车精度、列车运行舒适度方面也进行了一定的多目标优化。

4 模型验证及仿真分析

本文利用PSIM仿真软件对上述观测器与参数辨识方法进行仿真模型搭建与方案验证,模拟城轨列车ATO牵引电机的运动过程,电机仿真参数为:直流母线电压700V,转子电阻 $R_r = 1.395 \Omega$,定子电阻 $R_s = 1.405 \Omega$,定、转子电感 L_s, L_r 均为0.178H,励磁电感 $L_m = 0.172$ H,极对数为4,设定转速 ω_r 为500 r/min。系统的控制框图如图6所示,通过转子磁链观测器得到辨识转速 $\hat{\omega}_r$,通过转速调节器对转速进行调节,计算出q轴电流的

参考值;与此同时,估计磁链 $\hat{\psi}_r$ 与辨识转速 $\hat{\omega}_r$ 通过最大转矩电流比控制(MTPA)计算出d轴电流的参考值。逆变器的控制采用SVPWM+SHEPWM混合调制的策略,以减少谐波干扰。

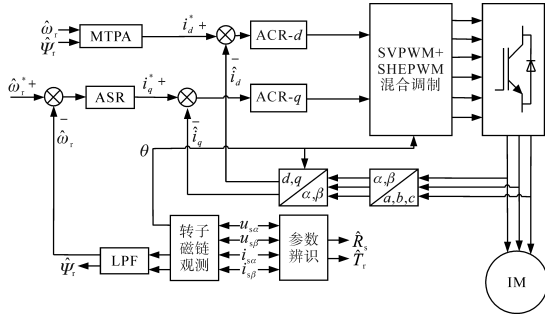


图6 系统的控制框图

Fig.6 Control block diagram of the system

4.1 列车ATO运行仿真验证

列车的ATO运行在仿真结果中通过列车行驶的距离来体现,仿真的工况设计为加速、惰性和减速,当系统判断列车加速与减速距离之和大于总的运行路程时,系统则降低列车运行的最高速度,使得加速与减速距离之和等于总的运行路程,保证列车能够安全、准时到达站点。分别以180 m和400 m为仿真距离、列车行驶最高速度为34 km/h,改变电机参数时的列车ATO仿真运行结果如图7、图8所示。

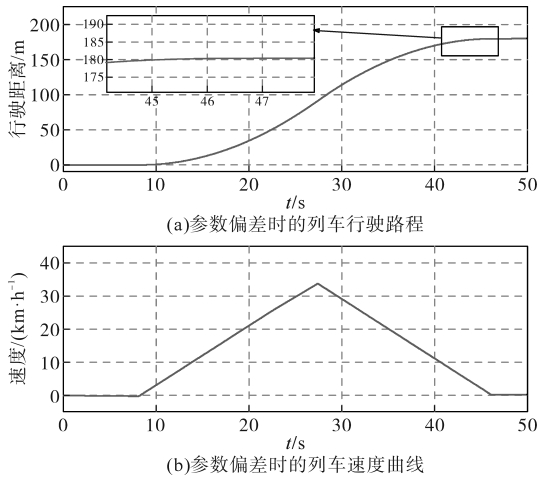


图7 参数偏差时的列车运行180 m仿真结果

Fig.7 Simulation results of train running 180 m with parameter deviation

通过仿真结果发现,在设定行驶距离为180 m时,离停车点的误差为0.4 m,同样条件下,设定行驶距离为400 m时,误差为0.8 m,可以看出,在参数有误差的情况下,列车的停车误差较目标而言还存在一定差距。在电机参数有偏差时,列车在到站精确度上有所欠缺,造成的停车误差较大。

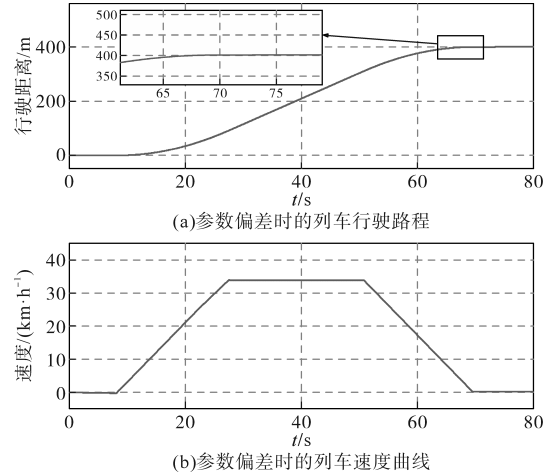


图8 参数偏差时的列车运行400 m仿真结果

Fig.8 Simulation results of train running 400 m with parameter deviation

4.2 电机参数辨识仿真验证

定子电阻 R_s 与转子时间常数 T_r 的辨识结果,分别如图9和图10所示。图中 R_{s_view}, T_{r_view} 分别为定子电阻和转子时间常数的观测值。通过图中结果显示在电机运动达到稳态后,定子电阻 R_s 辨识稳态值为1.412 Ω ,与真实值的偏差为0.017 Ω ,辨识误差为1.2%。通过图中结果显示转子时间常数的辨识值在稳态后的值为0.132 s,与实际值的偏差为0.004 s,辨识误差为3.1%,两者的辨识时间在电机运行4 s时间内对参数进行准确辨识,较以往算法更具时效性,以满足列车ATO系统的计算需求。

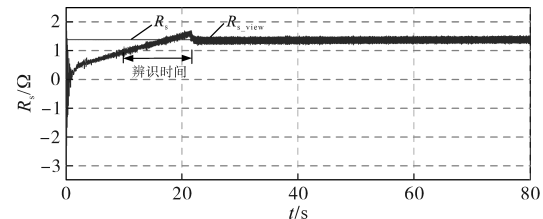


图9 R_s 参数辨识结果

Fig.9 Parameter identification results of R_s

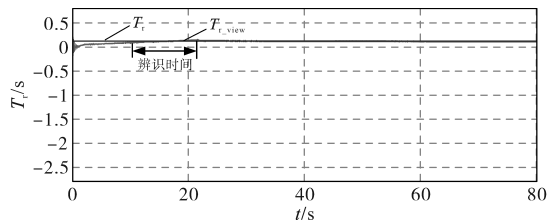


图10 T_r 参数辨识结果

Fig.10 Parameter identification results of T_r

4.3 具有参数辨识的列车ATO运行验证

将辨识的参数更新到电机的控制系统中并与ATO算法相结合。图11a、图11b是列车仿真

运行 180 m 的实际运行路程图和行驶速度曲线,通过与图 7 进行比较可以看出,在结合参数辨识后的 ATO 系统得到了进一步的优化,在列车到站的误差为 +0.06 m,满足精准停车的目标。在图 8 与图 12 的比较中也同样可以看出,在行驶距离为 400 m 的情况下,停车精度为 +0.08 m,整个控制系统也可以实现既定的目标,满足列车 ATO 运行的需求。

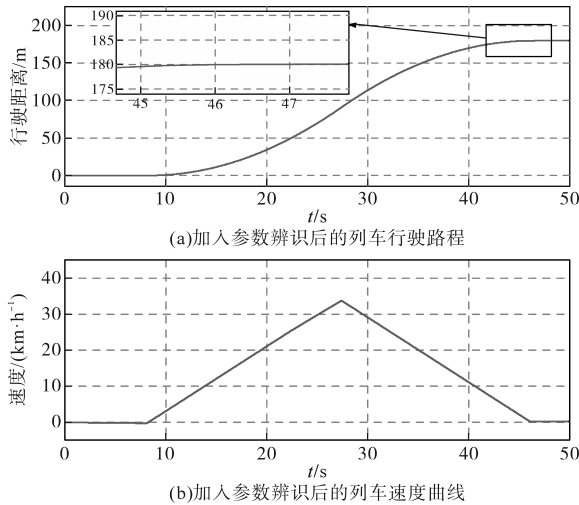


图 11 加入参数辨识后列车运行 180 m 仿真结果
Fig.11 Simulation results of train running 180 m after adding parameter identification

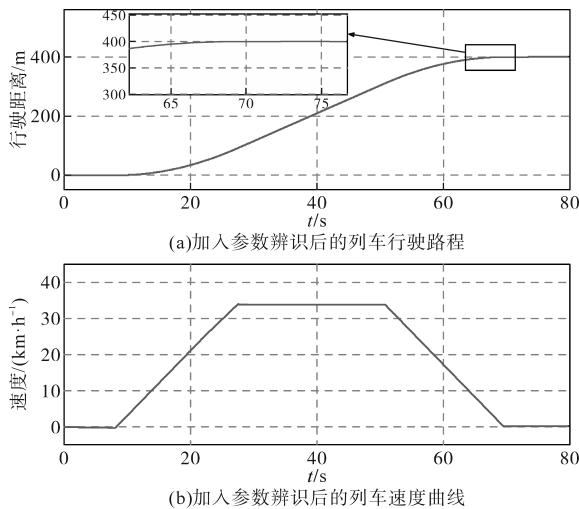


图 12 加入参数辨识后列车运行 400 m 仿真结果
Fig.12 Simulation results of train running 400 m after adding parameter identification

5 实验结果

为验证提出的城轨列车牵引电机参数辨识匹配的准确性与系统运行的可靠性,基于 TMS320F28335 的 15 kW 异步电机实验平台进行参数匹配下的列车 ATO 控制实验,实验平台如图

13 所示。

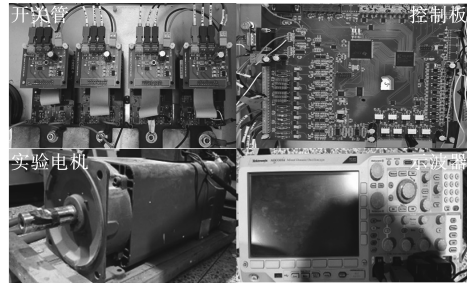


图 13 实验平台结构图

Fig.13 Structure of the experimental platform

电机稳定运行时记录其电流波形,同时利用编码器测得电机的闭环实际转速,根据转速可模拟计算出列车的实际行驶距离。实验所得数据经 DSP 自带的 D/A 转换模块输出至示波器。本次实验所用电机的实际参数如表 1 所示。

表 1 实验电机参数
Tab.1 Experimental motor parameters

电机参数	数值	电机参数	数值
额定功率 P_n	15 kW	定子电阻 R_s	1.405 Ω
空载电压 U	274 V	转子电阻 R_r	1.395 Ω
空载电流 I	18.8 A	转子电感 L_r	0.178 H
额定转速 ω_n	1 500 r/min	定子电感 L_s	0.178 H

图 14 为电机空载启动时测得的三相电流波形,图 15 为参数辨识结果,图 16 为模拟列车行驶 180 m 速度距离曲线,图 17 为模拟列车行驶 400 m 速度距离曲线。

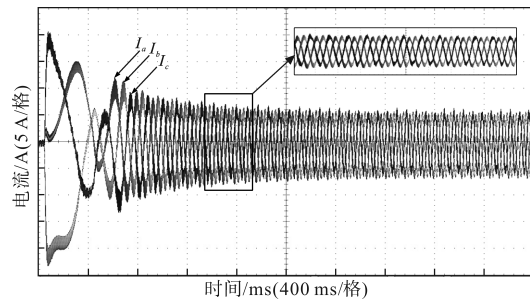


图 14 电机启动三相电流波形

Fig.14 Motor start three-phase current waveforms

图 14 所示为电机空载启动到牵引、制动过程中的三相电流 I_a, I_b, I_c 的波形,在不同运行工况下电流切换稳定,适应性较好。

图 15 为列车运行过程中的定子电阻 R_s 辨识过程。可以看出,电机空载时在启动瞬间的辨识值较大,但在系统稳定后,定子电阻的辨识值与实际值之间的误差较小,辨识值为 1.411 Ω ,与实际值之间的偏差为 0.016 Ω ,误差在 1.15%,电机在稳定后 4 s 内实现准确辨识,结果较启动时更

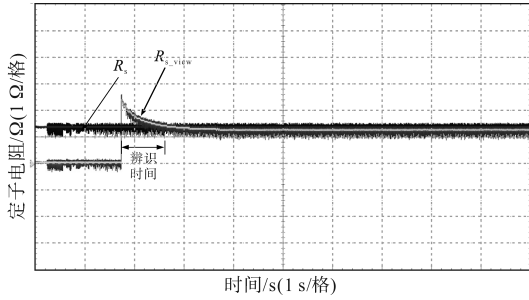
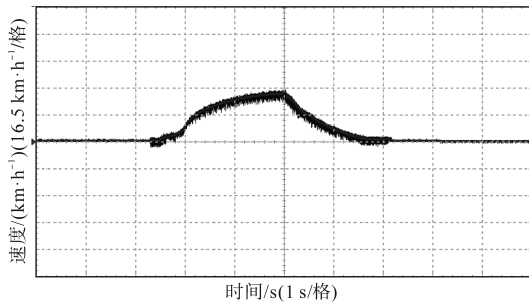


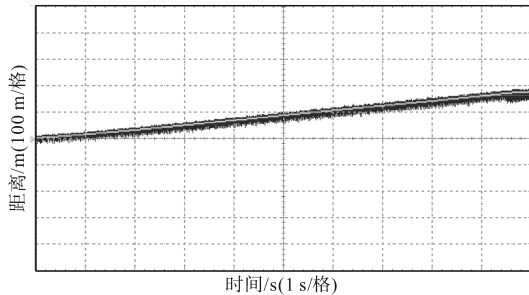
图 15 定子电阻 R_s 辨识值

Fig.15 Identified values of stator resistance R_s

为准确,进一步将实时在线辨识结果反馈回电机控制系统,为模拟城轨列车的运行控制提供参考,能够更好地优化列车的ATO运行控制。



(a)列车行驶180 m速度曲线



(b)列车行驶180 m距离曲线

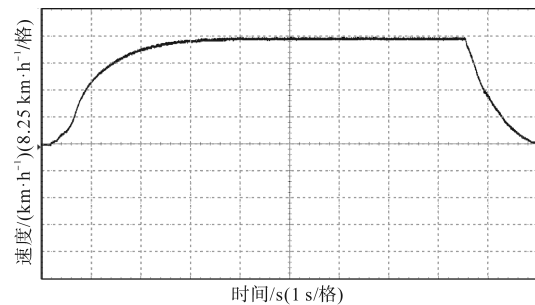
图 16 模拟列车行驶 180 m 速度、距离曲线

Fig.16 Simulated train travelling 180 m speed and distance curve

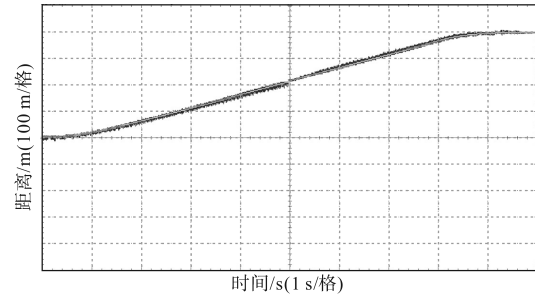
图 16a、图 16b 为模拟列车 ATO 运行 180 m 的速度、行驶距离曲线,由上述位置式 ATO 控制策略和仿真结果可得出,在系统判断列车的制动安全距离与安全速度的前提条件下,如图 16a 所示,列车的行驶工况为加速制动、无巡航工况,且达不到最高设定速度,图 16b 中列车的停车位置与设定的距离误差范围在 ± 0.05 m 范围内,停车精度较高,实现精准停车的目标。

图 17a、图 17b 为模拟列车 ATO 运行 400 m 的速度、行驶距离曲线,在此设定的距离条件下,模拟列车能够达到最大的巡航速度,此时,工况变为加速、巡航和制动。从图 17a 中可看出,在不同工况间的切换平滑,未出现较大的抖动;从图 17b 中可看出列车行驶 400 m 的停车误差在 ± 0.06 m

范围内,在不同距离下实现精准停车的目标。



(a)列车行驶400 m速度曲线



(b)列车行驶400 m距离曲线

图 17 模拟列车行驶 400 m 速度、距离曲线

Fig.17 Simulated train travelling 400 m speed and distance curve

6 结论

本文对城轨列车自动驾驶系统(ATO)牵引电机进行了控制理论分析及仿真研究,通过分析电机参数对列车 ATO 性能的影响,指出了电机参数辨识的重要性。基于此,提出了一种基于转子磁链的电机多参数在线辨识方法,并将该辨识结果与列车 ATO 控制算法中的控制策略相结合,实现参数匹配,并对其进行了理论与仿真实验分析。仿真数据和实验结果均表明,本文所提出的策略能够有效地辨识出定子电阻 R_s 和转子时间常数 T_r ,且能够将辨识结果匹配到电机控制策略中,从而优化列车 ATO 算法,提升列车的整体运行性能。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通发展战略与“十四五”发展思路研究报告[EB/OL]. (2021-11-11)[2024-08-22]. <https://www.camet.org.cn/sy/xhfb/8967.shtml>. China Urban Rail Transportation Association. Research report on the development strategy of urban rail transit and the “14th Five-Year Plan” development idea[EB/OL]. (2021-11-11)[2024-08-22]. <https://www.camet.org.cn/sy/xhfb/8967.shtml>.
- [2] 中国土木工程学会.城市轨道交通技术发展纲要建议[M].北京:中国城市出版社,2021. China Civil Engineering Society. Proposal for the outline of urban rail transportation technology development[M]. Beijing:

- China Urban Press, 2021.
- [3] 夏超英,谷海青,寇丽萍.考虑总漏感随频率变化的异步电机参数离线辨识算法[J].电机与控制学报,2018,22(3):42-49.
- XIA Chaoying, GU Haiqing, KOU Liping. Offline parameter estimation algorithm for induction motor in consideration of leakage inductance variation with frequency[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 42-49.
- [4] 李昱兵,张德春,陈跃.一种变频电机参数离线辨识方法的研究[J].电机与控制应用,2019,46(1):64-69.
- LI Yubing, ZHANG Dechun, CHEN Yue. Research on an offline identification method of inverter motor parameters[J]. Electrical Machines and Control Applications, 2019, 46(1): 64-69.
- [5] 王鸿山,张兴,杨淑英,等.基于最小二乘法在线参数辨识的异步电动机矢量控制仿真[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(4):495-499.
- WANG Hongshan, ZHANG Xing, YANG Shuying, et al. Vector control simulation of asynchronous motor based on least squares online parameter identification[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(4): 495-499.
- [6] 王辉.基于MRAS的感应电机参数辨识方法研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- WANG Hui. Research on parameter identification method of induction motor based on MRAS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [7] 李洪宇,王群京,李国丽,等.基于扩展卡尔曼滤波器的电机参数辨识算法[J].电气工程学报,2015,10(5):34-42.
- LI Hongyu, WANG Qunjing, LI Guoli, et al. Electromagnetic parameter identification algorithm of AC motor based on extended kalman filter[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(5): 34-42.
- [8] 车海军,田颖,杨黎明,等.基于改进EKF的感应电机无速度传感矢量控制[C]/2020中国自动化大会(CAC2020)论文集,2020:232-237.
- CHE Haijun, TIAN Ying, YANG Jingming, et al. Vector control of induction motor without speed sensing based on improved EKF[C]/Proceedings of the China Automation Conference 2020 (CAC2020), 2020: 232-237.
- [9] 刘和平,汤梦阳,刘庆,等.基于定子磁链模型的异步电机转子时间常数辨识[J].电机与控制学报,2014,18(1):56-61.
- LIU Heping, TANG Mengyang, LIU Qing, et al. Rotor time constant identification based on stator magnetic chain model[J]. Electrical Machines and Control, 2014, 18(1): 56-61.
- [10] 蒋林,刘梁鸿,李坤,等.基于滑模控制的异步电机全阶观测器研究[J].电气传动,2019,49(4):19-22.
- JIANG Lin, LIU Lianghong, LI Kun, et al. Study on full order observer based on sliding mode control for asynchronous motor[J]. Electric Drive, 2019, 49(4): 19-22.
- [11] 李孟秋,周志康,廖武,等.异步电机混合型滑模磁链观测器分析与验证[J].中国机械工程,2015,26(19):2646-2651.
- LI Mengqiu, ZHOU Zhikang, LIAO Wu, et al. Analysis and validation of hybrid sliding mode magnetic chain observer for asynchronous motor[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(19): 2646-2651.
- [12] 张彦栋.ATO运行模式曲线最优预见跟踪控制算法研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- ZHANG Yandong. Study on optimal preview tracking control for ATO system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [13] 李琪.高速列车ATO控制策略优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.
- LI Qi. Research on optimization of ATO control strategy for high-speed train[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [14] 朱翼梁.高速列车ATO控制策略优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- ZHU Yiliang. Research on optimization of ATO control strategy for high-speed trains[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [15] 林佳.城际列车自动驾驶系统(ATO)的研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- LIN Jia. Studies on automatic train operation (ATO) in inter-city rail transport systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [16] 高伟民.城市轨道交通ATO精确停车相关问题研究[J].沿海企业与科技,2015(4):24-27.
- GAO Weimin. Research on the problems related to ATO precision parking in urban rail transit[J]. Coastal Enterprise and Science & Technology, 2015(4): 24-27.
- [17] 孟建军,刘震.城轨列车精确停车智能控制算法研究与仿真[J].计算机工程与应用,2019,55(23):257-264.
- MENG Jianjun, LIU Zhen. Research on intelligent algorithm for precise parking of urban rail train transit based on predictive fuzzy PID[J]. Computer Engineering and Application, 2019, 55(23): 257-264.
- [18] 禹宏鹏.城轨列车停车位置不精确的原因及对策[J].城市轨道交通研究,2008(9):28-30.
- YU Hongpeng. Analysis on the stop inaccuracy of urban rail train[J]. Urban Rail Transportation Research, 2008(9): 28-30.
- [19] 罗仁士,王义惠,于振宇,等.城轨列车自适应精确停车控制算法研究[J].铁道学报,2012,34(4):64-68.
- LUO R S, WANG Y H, YU Z Y, et al. Research on adaptive precise stopping control algorithm for urban rail trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 64-68.
- [20] 鲍旭红.位置式PID控制算法在城轨ATO系统中的应用[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2017,14(3):84-89.
- BAO X H. On the application of positional PID control algorithm in the ATO system of urban railway transportation[J]. Journal of Changsha University of Technology(Natural Science), 2017, 14(3): 84-89.

收稿日期:2024-08-22

修改稿日期:2025-04-07