

# 基于模糊 RBF-PID 的张紧装置电机控制研究

杨威,戴劲松,王茂森

(南京理工大学 机械学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**为解决某航炮射击时供弹系统易拥弹问题,设计双电机张紧装置,采用模糊控制方法与径向基神经网络相结合的控制算法对传统 PID 耦合控制器进行优化,提高两个电机的速度同步性能。通过仿真试验表明:该方案对双电机同步性能提升明显,对现有装备升级改造具有参考价值。

**关键词:**航炮;无链供弹系统;双电机同步;交叉耦合控制;模糊控制;径向基神经网络

**中图分类号:**TJ30 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0193-06

## Research on Motor Control of Tensioner Based on Fuzzy RBF-PID

YANG Wei, DAI Jinsong, WANG Maosen

(School of Mechanic Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094 China)

**Abstract:** In order to solve the problem of uneven tension of the elastic belts on both sides in chainless feeding system, a double-motor tensioning scheme is designed. The traditional PID coupled controller is optimized by combining the fuzzy control method with the radial basis neural network control algorithm in so as to improve the speed synchronization performance of the two motors. The simulation test shows that the scheme can significantly improve the synchronous performance of dual motors, and has reference value for the upgrading and transformation of existing equipment.

**Keywords:** aircraft gun; chainless ammunition feeding system; dual-motor synchronization; cross-coupling control; fuzzy control; radial basis neural network

## 0 引言

在电机控制领域,多电机在协同运行情况下,如何保证多电机运行的同步性以及如何增强系统的抗干扰能力是主要研究内容之一。为了解决以上问题,研究人员提出了多种同步控制策略。潘亮等<sup>[1]</sup>基于主从控制策略,有效改善了多电机系统的稳定性和动态性能;李言民等<sup>[2]</sup>采用交叉耦合控制,设计了基于运动控制卡的多轴电机控制系统,并实现了多电机同步位置误差的检测和补偿修正;文献[3]中运用改进速度补偿器的偏差耦合控制,实现了3台伺服电机的比例同步;根据文献[4]中交叉耦合控制结构主要应用于电机之间所产生的实际输出的差值并对两台电机起到补偿作用,可以明显提高电机的同步性且在抗干扰方面具备很大的优势,该控制策略常适用于双电机的控制系统中。在交叉耦合控制中,控制效果在很大程度上取决于耦合控制器的性能。文献[5]使用传统 PID 控制器作为交叉耦合控制的耦合控制器,仿真实验表明传统 PID 控制器在对强耦合对象的控制过程中,由于参数无法实时调整,系统的抗干扰能力明显不足,针对该问题,文献[6]采用模糊 PID 控制器,提高了系统的同步性能,有效改善了当同步偏差较大时易出现超调和反应滞后的现象。

由于模糊规则极大程度上依赖于专家的主观经验,不

具备广泛的适用性<sup>[7]</sup>,因此,本文在模糊控制的基础上引入了神经网络控制,设计了一种基于模糊神经网络的 PID 控制器,并应用于双电机控制系统。

## 1 某型航炮供弹系统

图1为拨弹轮结构示意图。某航炮在射击过程中,由于自动机高低、方向实时变化,导致供弹传动单元长度变化,并引起该航炮拨弹轮处极易出现拥弹现象,使得弹链停止运动,进而造成航炮的停射。为在不更改弹链本身运动规律的基础上解决该问题,需设计一种张紧装置通过控制拨弹轮部分的运动来调整该处弹链的张紧与放松,从而避免拥弹现象的发生。

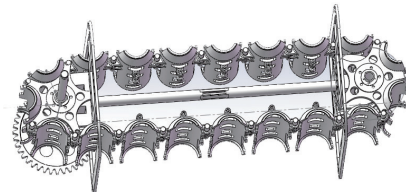


图1 拨弹轮结构示意图

本文提出了一种基于双永磁同步电机的张紧装置,弹链张力的控制需要两个电机协同运动,因此,双电机协同控制算法的选择显得尤为重要。目前,两电机驱动的供输

弹系统常采用同一给定控制或主从控制,在该控制方案下,两台电机状态互不影响,但在受到扰动冲击时,同步性将大大降低。因此,本文采用交叉耦合控制,并设计了一种基于模糊神经网络的 PID 控制器,大大提高了两电机的速度同步性和抗冲击性。

## 2 交叉耦合控制器设计

### 2.1 交叉耦合控制

传统交叉耦合控制原理如图 2 所示,这种控制策略是基于观测两种误差:跟踪误差和轮廓误差<sup>[8]</sup>。在双电机控制系统中,通过检测各电机的速度信息,并将实际转速差作为反馈信号,各电机控制器接收该反馈信号后对电机运行状态进行调节。因此,在交叉耦合控制系统中,任意电机受扰时,另一电机可以根据反馈信号迅速调整自身运行状态,整个系统具有较高的控制精度以及鲁棒性。

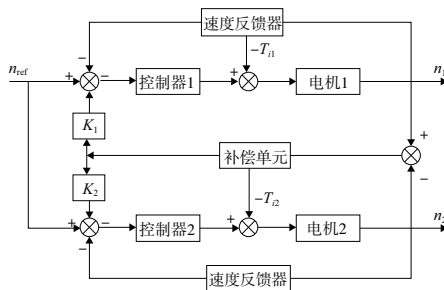


图 2 交叉耦合控制原理图

以传统 PID 控制器作为耦合控制器时,由于传统 PID 控制器过于依赖其比例系数、积分系数、微分系数的给定,在负载变化的环境中,传统 PID 控制器无法及时调整自身参数,从而影响控制效果。模糊控制具有推理能力强的特点,将模糊控制与 PID 控制相结合,可以一定程度上实现 PID 参数的自整定,但模糊控制规则过于依赖专家的主观经验,虽然直观,但同时也具有一定的不确定性,使其无法在控制过程中对控制规则进行合理的调整,无法明显降低系统的稳态误差。神经网络控制具有自学习、自适应能力强的特点,弥补了模糊控制没有学习能力的缺点,将两者相结合,可以实现 PID 控制器参数灵活的在线自整定功能。

### 2.2 基本模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器结构如图 3 所示,其工作原理为:模糊控制器将转速误差  $e$  与误差变化率  $de/dt$  作为输入<sup>[9]</sup>,输出为 PID 控制器的比例系数、积分系数以及微分系数,通过该处理流程实现 PID 参数的实时自整定。

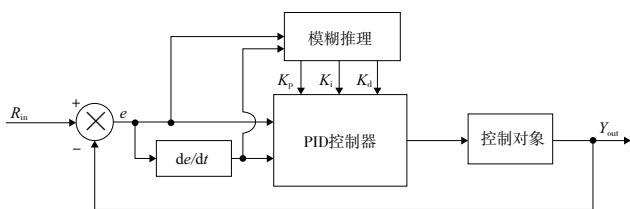


图 3 模糊 PID 控制原理图

### 2.3 RBF 模糊神经网络 PID 控制器

径向基函数(RBF)神经网络是一种具有单隐层的三层前馈网络,它是一种局部逼近的神经网络,避免了局部极小的问题,非常适合用于实时控制。基于 RBF 模糊神经网络的 PID 控制器如图 4 所示。

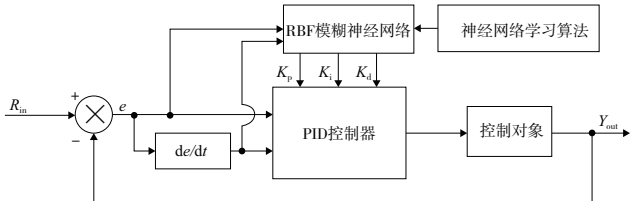


图 4 基于模糊 RBF 神经网络的 PID 控制器

该控制器在模糊 PID 控制器的基础上引入了神经网络学习算法,利用神经网络的自学习、自适应特性,在线调整神经网络高斯隶属函数的中心值和宽度、输出层权值等参数。

## 3 模糊 RBF 神经网络结构

图 5 为模糊 RBF 神经网络拓扑结构,其包括输入层、模糊化层、模糊推理层以及输出层。

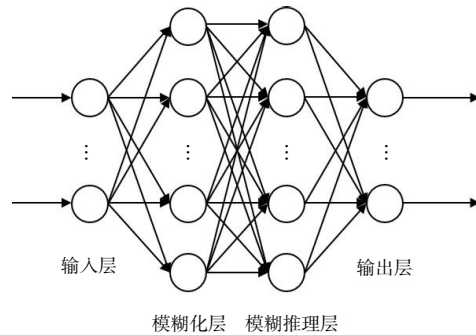


图 5 模糊 RBF 神经网络结构

该神经网络结构中各层输入输出关系如下。

第一层:输入层。该层不进行数据处理,而是将输入数据直接传入下一层,其节点与下一层各个节点相连。输入层的每个节点  $i$  的输入输出表示为

$$f_1(i) = I_1(x) = X_i (i = 1, \dots, A) \quad (1)$$

第二层:模糊化层。该层主要将从输入层传入的数据进行模糊化处理,并对输入分量的隶属函数进行计算,该层节点数量等于输入变量的模糊子集数。选定隶属函数为高斯基函数:

$$f_2(i, j) = \exp(I_2(i, j)) \quad (j = 1, 2, \dots, B) \quad (2)$$

$$I_1(i, j) = \frac{(f_1(i) - c_{ji})^2}{2\sigma_{ij}^2} \quad (3)$$

式中:  $c_{ji}$  为第  $i$  个输入变量的第  $j$  个模糊集合的隶属函数的均值;  $\sigma_{ij}$  为隶属度函数的宽度值。

第三层:模糊推理层。该层主要进行模糊规则的匹配,该层的每个神经元节点都相当于一一条模糊规则,执行 and 操作,用乘积代替取小运算。

$$f_3(l) = I_3(l) = \prod_{i=1}^2 f_2(i, l) \quad (l = 1, 2, \dots, B) \quad (4)$$



电机参数如表 1 所示,电机 PID 参数为  $K_p = 0.2, K_i = 10, K_d = 0$ 。

表 1 电机参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	0.4	额定转速/(r/min)	1 500
定子电阻/ $\Omega$	0.958	极对数	4
阻尼系数/(Nm · s)	0.008	采样时间/ $\mu$ s	10
母线电压/V	311	d 轴电感/mH	5.25
q 轴电感/mH	12	磁链/wb	0.182 7

建立两套相同的伺服驱动单元,并利用交叉耦合控制器将两套驱动单元连接,交叉耦合控制器以两电机的转速差为控制对象,在原有转速反馈上加上控制器的输出。模糊 RBF-PID 控制器模块利用 S 函数编写。基于模糊 RBF 神经网络 PID 控制器的双电机交叉耦合控制模型如图 7 所示。

分别对以传统 PID 控制器作为耦合器的交叉耦合双电机系统及以模糊 RBF-PID 为耦合器的双电机系统进行突加载与突卸载仿真,并对两种控制策略的控制效果进行对比。

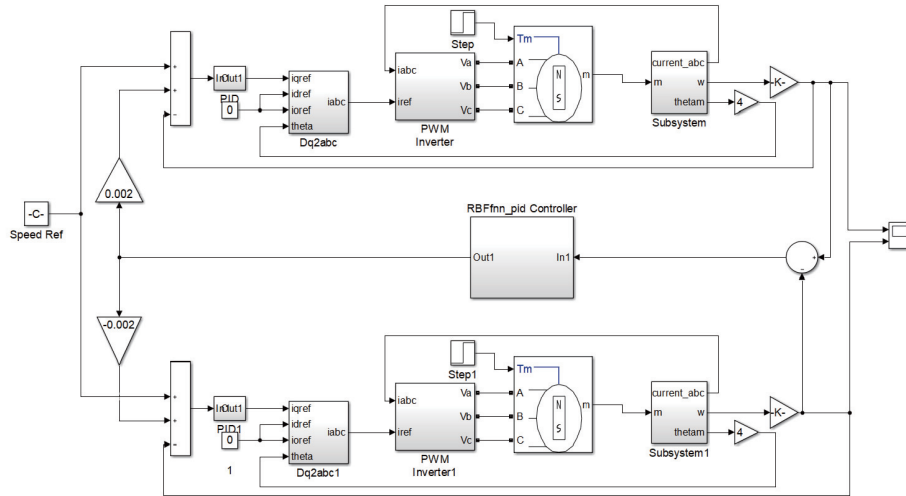


图 7 基于模糊 RBF-PID 的双电机交叉耦合控制仿真模型

## 4.2 突加载仿真

给定两电机参考转速为 1 200 r/min,两电机空载启动。在 0.10 s 时刻,电机 2 负载转矩从 0 阶跃到 3.5 Nm,不同控制策略下,两永磁同步伺服电机的转速  $w_1$ 、 $w_2$  如图 8 所示,同步误差如图 9 所示。

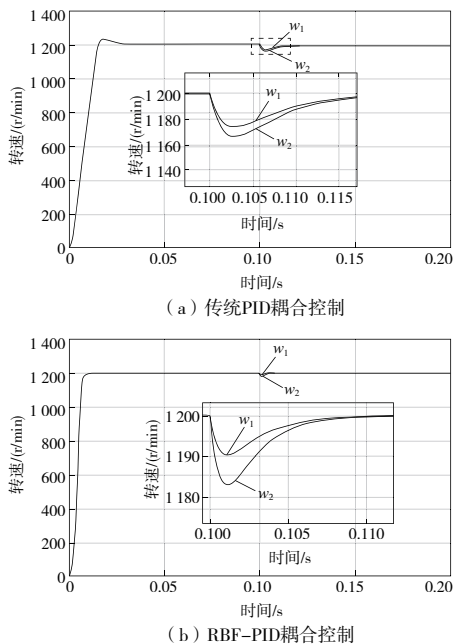


图 8 突加载时两种策略下电机转速曲线

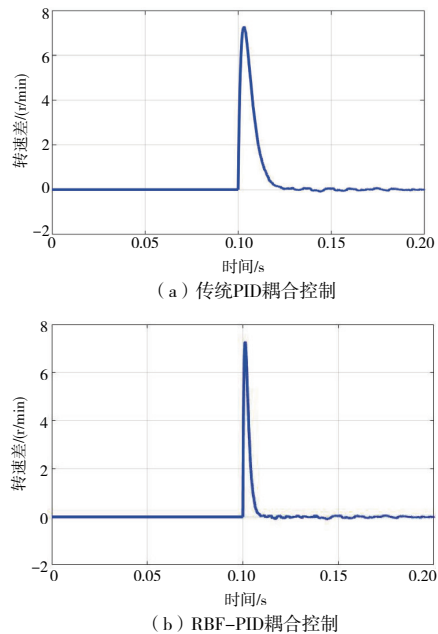


图 9 突加载时两种策略下同步误差曲线

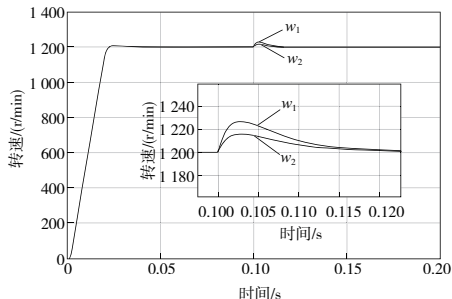
从图 8—图 9 中可以看出,在以传统 PID 控制器为耦合器的交叉耦合控制中,两电机空载启动时超调量较大,在 0.03 s 左右,两电机达到给定值 1 200 r/min,进入稳定状态;在 0.10 s 时刻,对电机 2 突加 3.5 Nm 的负载,此后经过了约 0.02 s 后恢复到参考转速,负载扰动期间,电机转



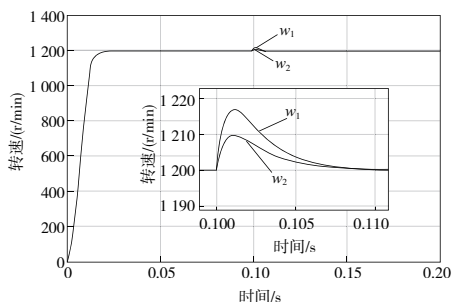
速最大改变量约为  $34 \text{ r/min}$ , 同步误差峰值为  $7 \text{ r/min}$ ; 而在模糊 RBF-PID 耦合控制系统中, 电机转速最大改变量约为  $17 \text{ r/min}$ , 同步误差峰值约为  $7 \text{ r/min}$ , 但在后续过程中迅速变小直至为 0, 调节时间仅为  $0.01 \text{ s}$ , 系统同步性能提升明显。

### 4.3 突降负载仿真

给定两电机参考转速为  $1\ 200 \text{ r/min}$ , 两电机带载启动, 负载为  $4 \text{ Nm}$ 。在  $0.1 \text{ s}$  时刻, 电机 1 负载转矩突降至  $0 \text{ Nm}$ , 不同控制策略的两永磁同步伺服电机的转速  $w_1$ 、 $w_2$  如图 10 所示, 同步误差如图 11 所示。

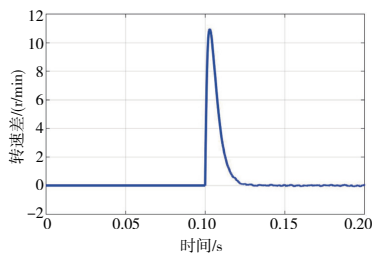


(a) 传统PID耦合控制

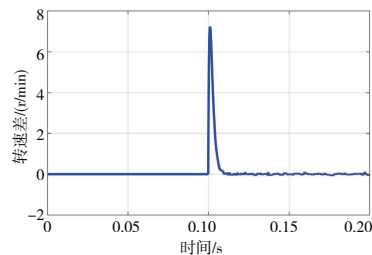


(b) RBF-PID耦合控制

图 10 突降负载时两种策略下电机转速曲线



(a) 传统PID耦合控制



(b) 模糊RBF-PID耦合控制

图 11 突降负载时两种策略下同步误差曲线

当两电机中一台电机出现突降负载扰动时, 在以传统 PID 控制器为耦合器的交叉耦合控制策略下, 电机转速最大改变量达到了  $27 \text{ r/min}$ , 同步误差峰值达到了  $11 \text{ r/min}$ ; 而在模糊 RBF-PID 耦合控制策略下, 电机转速最大改变量约为  $16 \text{ r/min}$ , 同步误差峰值为  $7 \text{ r/min}$ , 且调节时间相对于传统交叉耦合明显降低。

## 5 实验验证

为了验证上述控制算法实际控制效果, 本文搭建了双电机同步性能测试系统。系统采用 DSP 28335 作为主控芯片, 采用两台型号为 60CST-M01330 的电机作为被控对象, 该电机额定功率为  $400 \text{ W}$ , 额定转矩  $T_s = 1.27 \text{ Nm}$ , 最大转矩  $T_{\max} = 3.9 \text{ Nm}$ , 电机转子惯量  $J_M = 0.29 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。上位机通过 CAN 总线与下位机通信并实时采集电机转速数据, 双电机同步控制试验平台如图 12 所示。为了模拟真实环境下电机负载变化情况, 实验使用型号为 HB-05ML-L 的磁滞阻尼器作为电机负载, 该阻尼器通过控制输入电流来控制输出转矩, 将该阻尼器与电机 1 连接。该阻尼器主要参数如表 2 所示。



图 12 双电机同步控制试验平台

表 2 HB-05ML-L 磁滞阻尼器主要参数

参数	数值
额定转矩/(Nm)	0.5
额定电流/mA	250
电压(VDC)/V	24
额定滑差功率/W	120
最高转速/(r/min)	15 000

本方案所研究航炮的射速为每分钟 200 发, 射击频率约为  $3.3 \text{ Hz}$ 。随航炮射击时高低俯仰角变化, 电机运转阻力变化情况与脉冲状曲线大约一致, 因此设计阻尼器电压以  $3.3 \text{ Hz}$  方波输入。设置电压方波低电平为  $12 \text{ V}$ , 高电平为  $24 \text{ V}$ , 则电机负载转矩最低为  $0.187 \text{ Nm}$ , 最高为  $0.487 \text{ Nm}$ 。

给定电机参考转速  $1\ 000 \text{ r/min}$ , 运行时间  $10 \text{ s}$ , 在模糊 RBF 交叉耦合控制策略下, 两电机转速以及转速差曲线如图 13—图 14 所示。实验结果表明, 在使用模糊 RBF 交叉耦合控制策略时, 在某一电机外加变化负载情况下, 两电机转速差始终保持在  $8 \text{ r/min}$  以内, 满足实际运行要求。

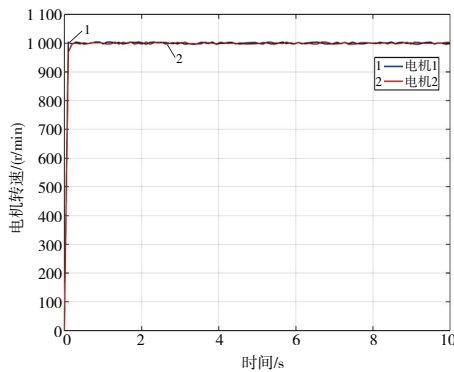


图 13 电机转速

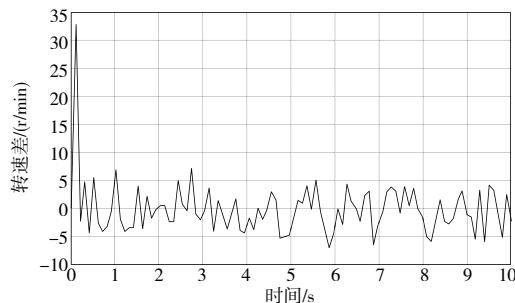


图 14 电机转速差

## 6 结语

在传统交叉耦合控制的基础上,设计了应用于无链供

输弹系统中的基于模糊 RBF-PID 控制器的双永磁同步伺服电机交叉耦合控制方案。相较于以普通 PID 控制器作为耦合器的交叉耦合控制策略,本方案具有良好的抗扰性能,在负载扰动情况下依旧能保证两电机的同步性能,并且明显缩短了系统恢复时间,满足无链供输弹系统中的双电机速度同步性要求。

### 参考文献:

- [1] 潘亮,周武能,张杨. 基于模糊 PID 主从式方法的多电机同步控制[J]. 微型机与应用,2016,35(15):5-7.
- [2] 李言民,苗欣,姜付杰. 基于模糊 PID 控制器的多电机交叉耦合控制同步控制系统设计[J]. 电工技术,2019(6):118-120.
- [3] 彭景辉. 办公屏风板侧面橡胶条自动张紧装置设计及实验研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [4] KOREN Y. Cross - coupled biaxial computer control for manufacturing systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980,102(4):265-272.
- [5] 王建红,陈耀忠,陈桂,等. 基于交叉耦合控制的双电机同步控制系统研究[J]. 南京理工大学学报,2017,41(6):693-697.
- [6] 潘玉成,林鹤之,陈小利,等. 基于模糊 RBF 神经网络的 PID 控制方法及应用[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):215-219.
- [7] 郭占苗. 基于 STC15F2K60S2 单片机波形发生器设计[J]. 国外电子测量技术,2017,36(7):98-102.
- [8] 孙文焕,程善美,王晓翔,等. 多电机协调控制的发展[J]. 电气传动,1999,29(6):3-6.
- [9] 谢雪康,杨晓蓉. 一种雷达模拟信号的产生方法[J]. 电子信息对抗技术,2009,24(3):56-61.

收稿日期:2022-06-20

(上接第 192 页)

### 参考文献:

- [1] 赵树恩,陈文斌,邓召学,等. 基于扩张状态观测器的智能汽车弯道轨迹跟踪控制[J]. 汽车安全与节能学报,2022,13(1):112-121.
- [2] 张志勇,龙凯,杜荣华,等. 自动驾驶汽车高速超车轨迹跟踪协调控制[J]. 汽车工程,2021,43(7):995-1004.
- [3] FENG C J, KUANG W Z. High-speed train speed tracking control based on active disturbance rejection control strategy[J]. Journal of Physics: Conference Series,2022,2246(1):012043.
- [4] 徐佳晨,祖炳锋,周建伟,等. 基于横向稳定的减速变道轨迹与跟踪控制[J]. 公路交通科技,2022,39(2):183-190.
- [5] 童明金. 基于 S 曲线加减速的石油钻机钻速自动控制方法[J]. 机械制造与自动化,2022,51(3):232-235.
- [6] 司明玉,周金应,褚观耀,等. 基于在线学习的车辆经济自适应巡航控制[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):211-215.
- [7] 李静,王晨,张家旭. 基于 UniTire 轮胎模型的汽车行驶速度估计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(5):47-55.

- [8] REN Y, WANG R, RIND S J, et al. Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer[J]. Control Engineering Practice, 2022, 123:105166.
- [9] 姜正伟,李鹏旭,张斌,等. 基于车速依赖静态输出反馈的自主汽车路径跟踪控制[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2021,13(1):41-50.
- [10] 叶珂羽,刘振宇,唐立中,等. 基于非线性三步法的 DCT 两挡起步控制策略研究[J]. 汽车技术,2020(10):39-44.
- [11] WU S B, SU X Q, WANG K D. Time-dependent global nonsingular fixed-time terminal sliding mode control-based speed tracking of permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Access, 2020, 8:186408-186420.
- [12] BARBARISI O, VASCA F, GLIELMO L. State of charge Kalman filter estimator for automotive batteries[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(3):267-275.

收稿日期:2022-08-02