

电动轮式小车控制系统设计与可靠性分析*

张铁民^{1,2}, 陈辉¹, 黄鹏焕¹, 张衡超¹

(1. 华南农业大学工程学院 广州, 510642) (2. 国家生猪种业工程技术研究中心 广州, 510642)

摘要 针对电动轮式小车驱动控制及可靠性问题,建立了动力、转向驱动控制系统。设计了一种电动轮式小车的动力及转向系统,并对其可靠性进行了分析和实验验证。动力部分由 STM32 作为主控制器,通过基于全桥驱动芯片 IR2136 的驱动电路对 4 个无刷直流电机进行驱动控制,转向部分由基于半桥驱动芯片 IR2103 的驱动电路驱动 2 个有刷直流电机进行转向控制,控制系统采用速度环、电流环双闭环,算法上采用模糊自适应比例-积分-微分 (proportion integration differentiation, 简称 PID) 算法。对系统可靠性进行实验并分析的结果表明,能够很好地跟随负载以及降低启动电流,使小车可靠运行。此驱动控制系统负载能力良好,启动电流小,安全稳定,转向精确,满足设施农业作业需求。

关键词 驱动控制; 双闭环; 可靠性分析; 电动轮式小车

中图分类号 TM306; TH112

引言

目前,设施农业作业环境在一个封闭的空间,在封闭空间作业使用的农药、粪肥等更不易挥发,影响人的健康。电动轮式小车采用四轮独立驱动,可以实现全电动自主控制,其可在设施环境中自主作业,电池提供动力,不产生二次污染,节省劳动力,提高效率^[1-2]。

如何针对设施农业作业环境,实现电动轮式小车安全可靠驱动,成为必须解决的关键问题。为此,笔者以 Stm32f103zet6 作为主控芯片,以 IR2136 为核心建立无刷直流电机驱动电路,驱动 4 个轮毂式无刷电机,转向系统以 IR2103 为核心驱动,驱动 2 个有刷直流电机。

1 电动轮式小车驱动控制系统

电动轮式小车驱动控制系统由两部分组成:a. 动力系统,由无刷直流电机驱动电路驱动 4 个轮毂式无刷直流电机,用于小车的动力驱动,使小车平稳运行;b. 转向控制系统,由有刷直流电机驱动电路驱动 2 个有刷直流电机,用于小车的转向。该系统由 Stm32 作为主控芯片,完成接收上位机信号、控

制信号的输出、信号的处理反馈及信号的采集等工作^[3-8]。整车控制系统框图如图 1 所示。

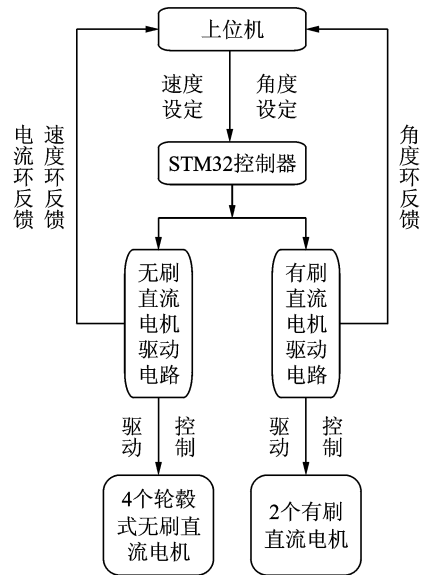


图 1 整车控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of control system

1.1 动力系统

动力系统由 4 个轮毂式无刷直流电机组成,首先输入速度信号,然后通过主控芯片 Stm32 对其进行运算,再经由 4528 芯片对速度进行反馈并运算得

* 广东省科技计划资助项目(2016A020209008);广州市科技计划资助项目(201510010227)
收稿日期:2017-01-12;修回日期:2017-03-10

出 4 个车轮各自的给定速度,并通过电流传感器反馈信号给电流调节器进行电流环控制,从而对无刷直流电机进行驱动控制。控制系统框图如图 2 所示。

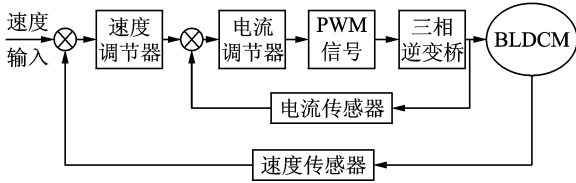


图 2 无刷直流电机驱动控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of BLDC motor drive control system

1.2 转向系统

转向系统由 2 个有刷直流电机组成,首先输入角度信号给 STM32,再经由角度传感器反馈信号给 STM32,使有刷直流电机按照设定角度偏转。控制系统如图 3 所示。

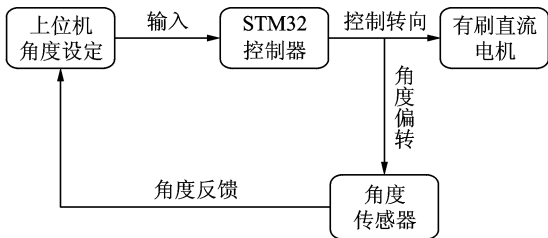


图 3 直流有刷电机转向系统框图

Fig. 3 Block diagram of DC brush motor

2 系统硬件电路设计

系统硬件电路分为两大部分:a. 无刷直流电机驱动控制电路,负责电动轮式小车的动力支持,主要包含无刷电机驱动电路、电流检测电路及速度检测电路等;b. 有刷直流电机驱动控制电路,负责电动轮式小车的转向,主要是有刷电机驱动电路。

2.1 无刷直流电机驱动控制电路

驱动电路采用全桥驱动芯片 IR2136 驱动 6 个 MOSFET,如图 4 所示。

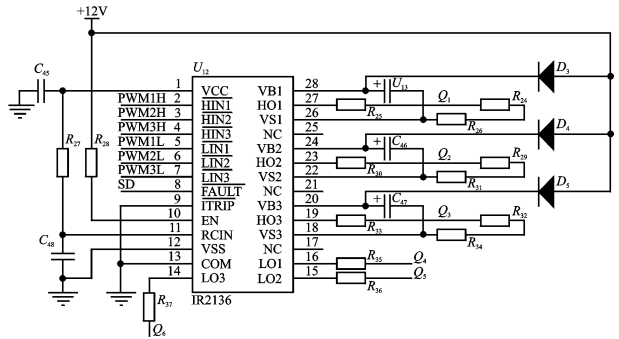


图 4 IR2136 驱动电路

Fig. 4 IR2136 driver circuit

速度检测电路由双精密单稳态触发器 4528 和频压转换器 LM2917 构成,并反馈信号给 Stm32 进行速度闭环控制,如图 5 所示。

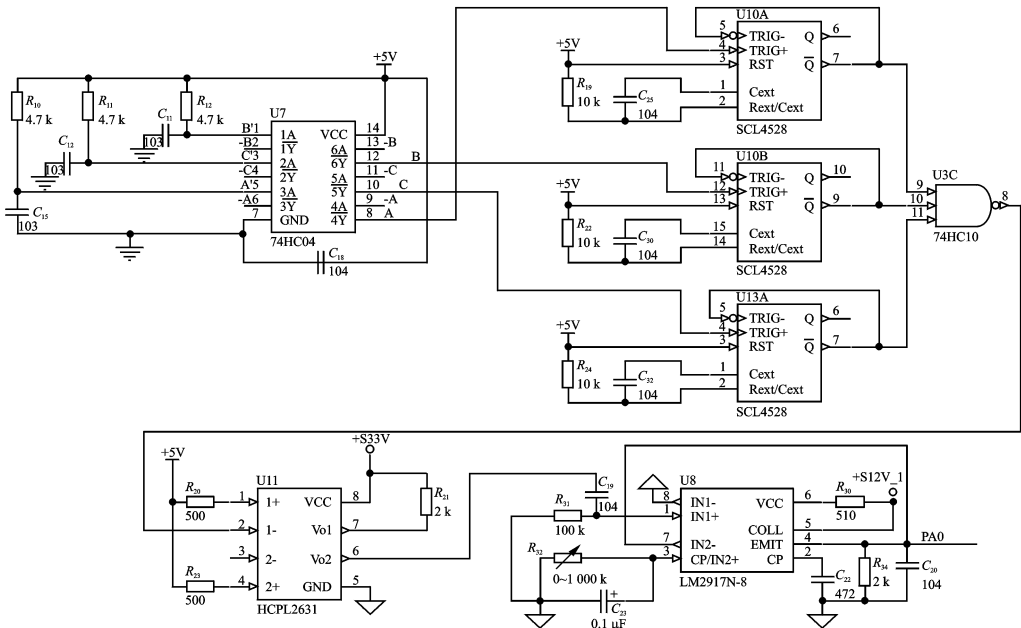


图 5 速度检测电路

Fig. 5 Speed detecting circuit

电流检测电路由 ACS712-20A 霍尔电流传感器对电流进行检测,并反馈信号给 Stm32 进行电流环闭环控制,如图 6 所示。

2.2 有刷直流电机驱动控制电路

有刷直流电机驱动电路采用 IR2103 对 Mosfet 进行驱动,如图 7 所示。

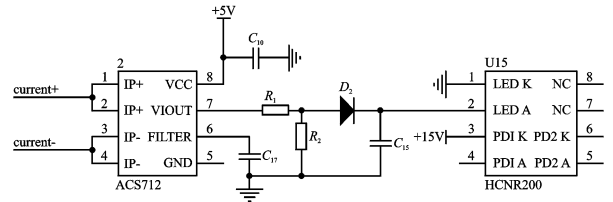


图 6 电流检测电路

Fig. 6 Current detecting circuit

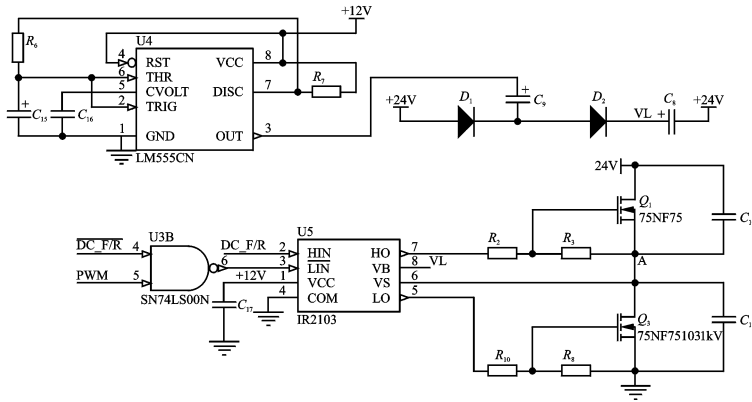


图 7 有刷驱动电路

Fig. 7 Brush drive circuit

3 控制系统设计

结合电动轮小车作业环境需求,采用模糊自适应 PID 控制方法,对无刷直流电机进行控制,该控制方法分为模糊化、模糊推理和模糊规则、反模糊化 3 个步骤。

1) 模糊化。根据本研究的无刷直流电机的实际情况,输入量速度误差 e 范围设定为 $(-300, 300)$, 误差变化率 e_c 范围设定为 $(-300, 300)$, 将 e, e_c 的变化范围均整定到模糊论域 $E = (-6, 6)$ 和 $E_c = (-6, 6)$ 内, 输出量 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D 的模糊论域均设定为 $(-6, 6)$ 。对于输入量 e, e_c 和输出量 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D , 在模糊论域内可分别定义 7 个模糊集合, 对应的语言变量为: 负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PM) 和正大 (PB)。

2) 模糊推理和模糊规则。模糊自适应 PID 控制器就是要找出 PID 的 3 个参数与 e 和 e_c 之间在不同时刻的模糊关系, 在运行过程中通过不断采集电机转速得到反馈值, 计算出不同采样时刻的转速偏差 e 及偏差变化, 最后根据不同的 e 和 e_c 对 PID 控制器的 3 个参数进行实时在线整定, 实现了对电机的优化控制, 使其有较好的静、动态运行特性。

3) 反模糊化。选用了重心法进行解模糊化, 经过反模糊计算后, 利用 Matlab 可以得出 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D 的模糊控制查询表, 如表 1~表 3 所示。

为适应小车作业负载变化, 无刷直流电机采用双闭环控制系统, 内环为电流环, 外环为速度环, 如图 8 所示。

表 1 ΔK_P 查询表

Tab. 1 Query table of ΔK_P

e	e_c												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	5	5	5	4	3	3	3	3	2	1	0	-1	-1
-5	5	5	5	4	3	3	2	2	1	0	0	-1	-1
-4	5	5	5	4	3	3	2	2	1	0	0	-1	-1
-3	4	4	4	4	3	3	2	2	1	0	0	-1	-1
-2	4	4	3	3	3	2	1	0	-1	-1	-1	-2	-2
-1	4	4	3	3	2	2	1	0	-1	-1	-1	-2	-2
0	3	3	3	2	1	1	1	0	-1	-2	-3	-3	-3
1	3	3	2	2	1	0	0	-1	-2	-3	-3	-4	-4
2	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4
3	1	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-5
4	1	1	-1	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-5
5	1	1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-5
6	1	1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5

表 2 ΔK_I 查询表
Tab.2 Query table of ΔK_I

e	e_c												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1	0	0
-5	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1	0	0
-4	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	0	0	1	1
-3	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	0	0	1	1
-2	-5	-5	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	1	1	2	2
-1	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	1	2	2	3	3
0	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	0	1	2	3	3	3
1	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	1	2	3	3	4	5
2	-3	-3	-2	-1	-1	0	1	2	2	3	3	4	5
3	-2	-2	-1	-1	0	1	2	3	3	3	4	4	5
4	-1	-1	-1	0	1	2	2	3	3	4	4	5	5
5	0	0	1	1	2	3	3	3	3	4	5	5	5
6	0	0	1	1	2	3	3	3	3	4	5	5	5

表 3 ΔK_D 查询表
Tab.3 Query table of ΔK_D

e	e_c												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	1	0	-1	-3	-4	-5	-5	-5	-4	-4	-2	-1	0
-5	1	0	-1	-3	-4	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	0
-4	1	0	-1	-3	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-1	-1	-1
-3	0	0	-1	-3	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1
-2	0	0	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1	-1
0	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2
4	2	1	0	1	1	2	2	2	2	1	2	3	3
5	2	1	1	1	2	3	3	3	3	2	3	3	4
6	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3

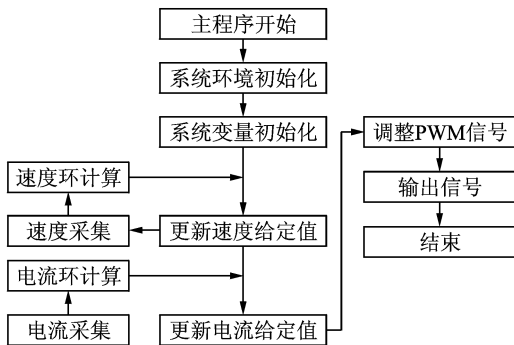


图 8 无刷直流电机的双闭环控制原理图

Fig. 8 Double closed loop control structure of Brushless DC motor

4 可靠性分析及实验结果

4.1 双闭环控制算法响应曲线

图 9 和图 10 分别为没有采用模糊自适应 PID 算

法和采用了模糊自适应 PID 算法的电流响应,两图中位置 1 表示启动电流,图 9 中启动电流约为 8A,图 10 中启动电流约为 1A。可以看出,采用了模糊自适应 PID 控制算法启动电流远小于非模糊自适应控制,避免过流对硬件系统造成损坏^[9-10]。两图中的位置 2 表示突然增加负载,位置 3 表示突然减轻负载。可以看出相对于图 9,图 10 中的电流对于负载变化明显,电流(转矩)能较好地跟随负载变化。

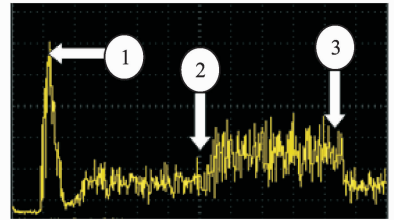


图 9 电流响应图

Fig. 9 Current response

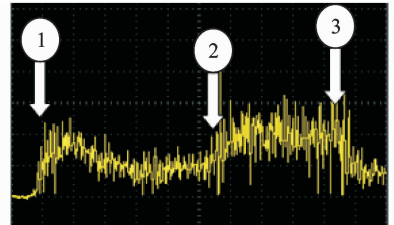


图 10 模糊自适应 PID 算法的电流响应

Fig. 10 Current response of fuzzy adaptive PID

图 11 和图 12 分别为没有采用模糊自适应 PID 控制算法和采用了模糊自适应 PID 控制算法下的

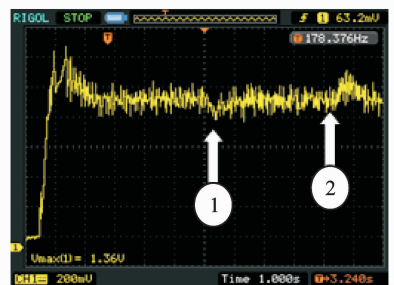


图 11 速度响应图

Fig. 11 Speed response

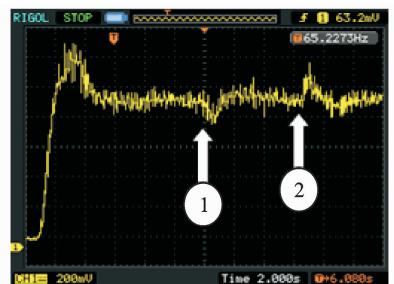


图 12 模糊自适应 PID 速度响应图

Fig. 12 Speed response of uzzu adaptive PID

速度响应,两图中位置1表示突然增加负载,位置2表示突然减轻负载,可以看出采用了模糊自适应PID算法速度更好地跟随了负载变化。

4.2 转向系统实验结果

将角度传感器装入电动轮式小车进行实验,实验结果如表4所示。其中向左偏转记为负,向右偏转记为正。

表4 转向系统实验结果

Tab. 4 Experimental results of steering system

设定值/V	实际值/V	转角/(°)
0.909	0.893	-90
1.034	1.052	-75
1.133	1.125	-60
1.331	1.323	-45
1.405	1.392	-30
1.648	1.641	-15
1.834	1.792	0
1.947	1.930	15
2.211	2.111	30
2.289	2.257	45
2.489	2.565	60
2.800	2.788	75
3.100	2.932	90

由表4可以看出,转向系统可以可靠地控制转向角度按照指令准确执行。

4.3 动力系统实验结果

分别驱动4个轮毂式电机,现将4块驱动板分别记为1号板、2号板、3号板和4号板,在测功机实验平台上将转速稳定在100r/min,施加负载测试其运行可靠性,如表5~表8所示。

将4组数据拟合成曲线,如图13所示。

表5 1号板加载实验

Tab. 5 Loading test of plate 1

U/V	I/A	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)
48	0.9	100	3.1
48	1.1	100	3.8
48	1.3	100	4.3
48	1.7	100	5.4
48	1.9	100	6.3
48	2.3	100	7.0
48	2.7	100	8.2
48	3.0	100	9.9

表6 2号板加载实验

Tab. 6 Loading test of plate 2

U/V	I/A	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)
48	1.1	100	3.1
48	1.3	100	4.2
48	1.7	100	5.4
48	1.9	100	6.0
48	2.3	100	6.9
48	2.4	100	7.2
48	2.5	100	7.5
48	2.9	100	9.5

表7 3号板加载实验

Tab. 7 Loading test of plate 3

U/V	I/A	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)
48	0.9	100	3.0
48	1.2	100	3.7
48	1.3	100	4.3
48	1.5	100	4.9
48	1.7	100	5.6
48	2.1	100	6.7
48	2.5	100	7.4
48	2.9	100	9.6

表8 4号板加载实验

Tab. 8 Loading test of plate 4

U/V	I/A	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)
48	1.0	100	3.1
48	1.3	100	4.1
48	1.8	100	5.5
48	2.0	100	6.1
48	2.4	100	7.2
48	2.7	100	8.2
48	2.9	100	9.5
48	3.0	100	9.9

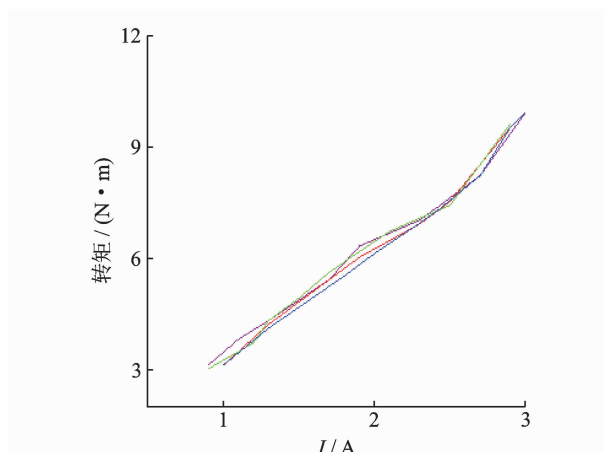


图13 加载实验拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve of loading test

对图 15 中 4 条曲线进行相关性分析,得到相关性检测结果,如表 9 所示。

表 9 相关性检测结果

Tab. 9 Similarity detection results

驱动板号	极数	自由度	残差平方和	相关性
1	8	6	0.483 20	0.984 99
2	8	6	0.486 00	0.980 00
3	8	6	0.537 70	0.980 98
4	8	6	0.545 61	0.984 88

由相关性结果检测可以看出,4 条曲线相关性在 98%以上,表明动力系统中 4 块无刷直流电机驱动板在加载不同负载时一致性良好,安全可靠。

将转速维持在 300 r/min,突加最大负载,进行多次试验,测试系统过流保护能力,结果如表 10 所示。

表 10 过流保护实验

Tab. 10 Over current protection experiment

编号	U/V	I/A	转矩/(N·m)	转速/(r·min ⁻¹)
1	48	8.9	10.5	245
2	48	9.0	10.2	253
3	48	8.9	11.2	235
4	48	8.8	11.1	222
5	48	9.1	9.9	268
6	48	8.9	10.6	250
7	48	9.0	10.1	266
8	48	8.8	11.2	215

由表 10 可看出,双闭环控制系统在过载情况下,触发了过流保护,电机转速下降,有效保护了系统。

5 结束语

设计了电动轮式小车驱动控制系统,并采用模糊自适应 PID 算法实现了轮毂式直流无刷电机的双闭环控制,在测功机上对系统进行可靠性和过载实验,验证并分析了该系统的可靠性。实验结果表明,电动轮式小车驱动控制系统硬件电路稳定可靠,启动电流为 1A,在不同负载下一致性良好,相关度约为 98%,并能够精确可靠地按照使用者指示进行角度偏转。

参 考 文 献

[1] 张铁民,黄翰,黄鹏焕. 电动轮式移动小车控制系统设

计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(19):11-17.
 Zhang Tiemin, Huang Han, Huang Penghuan. Design and experiment of control system for electric wheeled mobile vehicle [J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2014,30(19):11-17. (in Chinese)

[2] 张铁民,黄鹏焕,黄沛盛,等. 轮毂式永磁直流测功机系统的研究[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(4):829-834.
 Zhang Tiemin, Huang Penghuan, Huang Peisheng, et al. Study on the hub type permanent magnet DC dynamometer system [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016,36(4):829-834. (in Chinese)

[3] 汪小锋. 基于 PWM 的直流无刷电机控制系统[D]. 南京:南京理工大学,2008.

[4] 魏再平. 基于 STM32 的电动摩托车无刷直流电机控制器[D]. 成都:西华大学,2011.

[5] 周利强. 永磁无刷直流电机驱动的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[6] 陈小永. 直流无刷电机控制技术研发[D]. 青岛:中国石油大学,2008.

[7] 卢军,李振璧,曹明明. 基于 STM32 的掘进机控制系统设计[J]. 煤矿机械,2013,44:265-267.
 Lu Jun, Li Zhenbi, Cao Mingming. Design of roadheader control system based on STM32 [J]. Coal Mine Machinery, 2013,44:265-267. (in Chinese)

[8] Shao Jianwen, Nolan D, Teissier M, et al. A novel microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps[J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2003,39(6):1734-1740.

[9] Li Hanxiong, Guan Shouping. Hybrid intelligent control strategy, supervising a DCS-controlled batch process[J]. Control Systems IEEE, 2001,21(3):36-48.

[10] Astrom K J, Agglund T. The future of PID control[J]. Control Engineering Practice,2001,9(11):1163-1175.



第一作者简介:张铁民,男,1961 年 11 月生,教授、博士生导师。主要研究方向为智能检测与控制技术、微机电系统控制和自动化以及机器人技术。曾发表《基于 DM642 的高地隙小车的田间路径识别导航系统》(《农业工程学报》2015 年第 31 卷第 4 期)等论文。
 E-mail: tm-zhang@163.com