

# 电动轮式畜禽巡检车负载驱动试验及分析\*

张铁民<sup>1,2</sup>, 张衡超<sup>1</sup>, 陈辉<sup>1</sup>, 梁莉<sup>1</sup>

(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** 针对电动轮式小车的轮毂电机驱动控制及其稳定性问题, 笔者采用嵌入式控制器和电流、速度双闭环控制方法, 建立了轮毂电机的驱动控制系统。设计了电机驱动电路、速度检测电路、电流检测电路及过流过载保护电路, 采用模糊自适应比例积分微分(proportion integration differentiation, 简称 PID)控制算法, 在测功机平台上模拟电动轮式小车在受突变负载时的实际运行状况, 对该控制系统的稳定性进行试验与分析。试验结果表明: 该小车启动稳定, 在施加不同负载情况下能够维持稳定的速度运行, 在过流过载情况下触发保护系统, 防止电流过大烧毁硬件电路, 进行堵转试验系统未出现故障。此驱动控制系统安全可靠, 稳定性好, 可为分析验证电动轮式小车驱动控制系统的稳定性提供参考。

**关键词** 驱动控制; 双闭环; 模糊自适应 PID; 稳定性分析

**中图分类号** TM32; TH39

## 引言

电动轮式移动平台在工业、农业生产过程中的应用越来越广泛, 电动轮式移动平台不但可以在生产过程中减轻劳动力, 提高生产效率, 而且采用电池作为动力电源, 具有少污染等环保特性, 防止农药、化肥等对人体的伤害<sup>[1-2]</sup>。以电动轮式移动平台为基础, 开发应用于工农业等领域的作业机器, 是替代人类从事高强度体力劳动和代替人做一些具有危害性工作的最佳选择。由于其污染小、效率高且智能化程度高等优点, 必将成为未来工农业装备发展的重点方向。

陈亮等<sup>[3]</sup>以永磁无刷直流电机为控制对象, 提出了一种基于平均速度的双电机协调控制策略, 但仅研究低速双电机的控制, 不够全面。张京等<sup>[4]</sup>研究了农用轮式机器人, 采用四轮独立转向驱动控制系统, 具有更好的复杂路况适应能力, 但缺少电流、转速的反馈, 控制不够精准。文献<sup>[5-8]</sup>为轮毂电机驱动的电动汽车设计动力总成试验台, 利用该平台对轮毂电机驱动电动汽车的性能和整车控制策略测试, 但其测试对象比较局限, 只能测量轮毂电机<sup>[9-12]</sup>。

笔者在自主研制的电动轮移动平台基础上, 对其稳定性进行研究, 优化其硬件电路, 采用双闭环控制对电机转速转矩进行了优化, 并在测功机平台上进行试验验证其稳定性。

## 1 控制系统设计

### 1.1 速度、电流双闭环控制系统设计

速度、电流双闭环控制系统如图 1<sup>[2]</sup>, 速度调节器作为控制系统的主要调节器, 使输出速度能快速的跟随给定速度的变化, 可以减小稳态误差, 抑制速度波动, 对负载变化起抗扰作用。电流调节器作为控制内环的调节器, 使电流及时跟随速度环的输出而变化, 对电压的波动起及时抗扰的作用。当电机出现过载堵转时, 电流环能够限制电枢电流的最大值, 起自动保护作用, 当故障消失后, 控制系统能立即自动恢复正常运行状态。

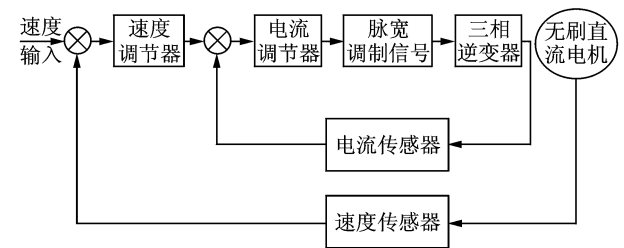


图 1 无刷直流电机的双闭环控制结构图

Fig. 1 Double closed-loop control structure of brushless DC motor

### 1.2 模糊自适应 PID 控制系统设计

模糊自适应 PID 的设计过程主要分为模糊化、

\* 广东省科技计划资助项目(2016A020209008)  
收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-07-01

模糊推理和模糊规则及反模糊化3个步骤。

结合本研究可得出  $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  的模糊控制规则分别表1所示。其中：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)分别对应7,6,5,4,3,2,1;  $e$  为误差量,  $ec$  为误差变化量。

表1  $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  模糊控制规则表  
Tab.1  $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  fuzzy control rules table

$\Delta K_P / \Delta K_I / \Delta K_D$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	7/1/5	7/1/3	6/2/1	6/2/1	5/3/1	4/4/2	4/4/5
NM	7/1/5	7/1/3	6/2/1	5/3/2	5/3/2	4/4/3	3/4/4
NS	6/1/4	6/1/3	6/3/2	5/3/2	4/4/3	3/5/4	3/5/4
$e$	ZO	6/2/4	6/2/3	5/3/3	4/4/3	3/5/3	2/6/3
	PS	5/2/4	5/2/4	4/4/4	3/5/4	3/5/4	2/6/4
	PM	5/4/7	4/4/3	3/5/5	2/5/5	2/6/5	2/7/5
	PB	4/4/7	4/4/6	2/5/6	2/6/6	2/6/5	1/7/6

选用重心法进行反模糊化

$$y(\epsilon) = \frac{\int_y u_B(y) y dy}{\int_y u_B(y) y dy} \quad (1)$$

其中： $u_B(y)$ 为模糊输出集合。

经过反模糊计算后，利用 Matlab 可以得出  $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  的模糊控制查询表，最后得到模糊PID控制中3个新整定的参数，如式(2)所示。

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \quad (2)$$

其中： $K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}$  为PID控制器的初始值； $K_P, K_I, K_D$  为PID控制器的新的参数。

$K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}$  的初始值分别为 0.004, 0.077 和 0.002, 其量化因子分别为 2 000, 100 和 3 000, 由此可得模糊自适应PID参数表达式为

$$\begin{cases} K_P = 0.004 + \Delta K'_P / 2\,000 \\ K_I = 0.077 + \Delta K'_I / 100 \\ K_D = 0.002 + \Delta K'_D / 3\,000 \end{cases} \quad (3)$$

其中： $\Delta K'_P, \Delta K'_I, \Delta K'_D$  为由模糊控制查询表得到的值。

### 1.3 系统硬件设计

无刷直流电机驱动控制系统硬件部分主要包括无刷直流电机驱动电路、速度检测电路和电流检测电路。控制器采用 STM32F103ZET6 作为主控制器，负责输出控制指令以及采集反馈信号并分析处理。系统硬件电路构成如图2所示。

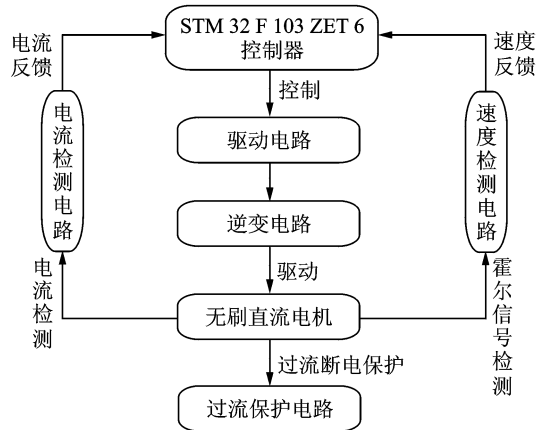


图2 系统硬件构成

Fig.2 System hardware structure

驱动电路采用 IR2136 构成，如图3所示。IR2136

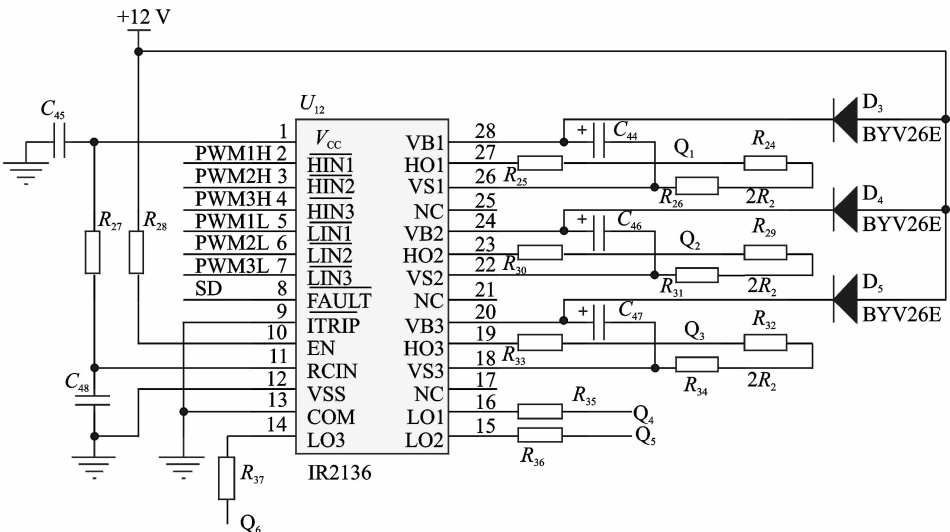


图3 IR2136 驱动电路

Fig.3 IR2136 drive circuit

为全桥驱动芯片,通过 IR2136 可以控制  $Q_1 \sim Q_6$  6 个 MOS 管的导通与关断来驱动电机运转,并且其内置死区控制,防止上下桥臂 MOS 管同时

导通造成电路的烧毁。图 4 和图 5 分别为电流和速度检测电路,图 5 中 +S 3.3 V 为控制器控制电源。

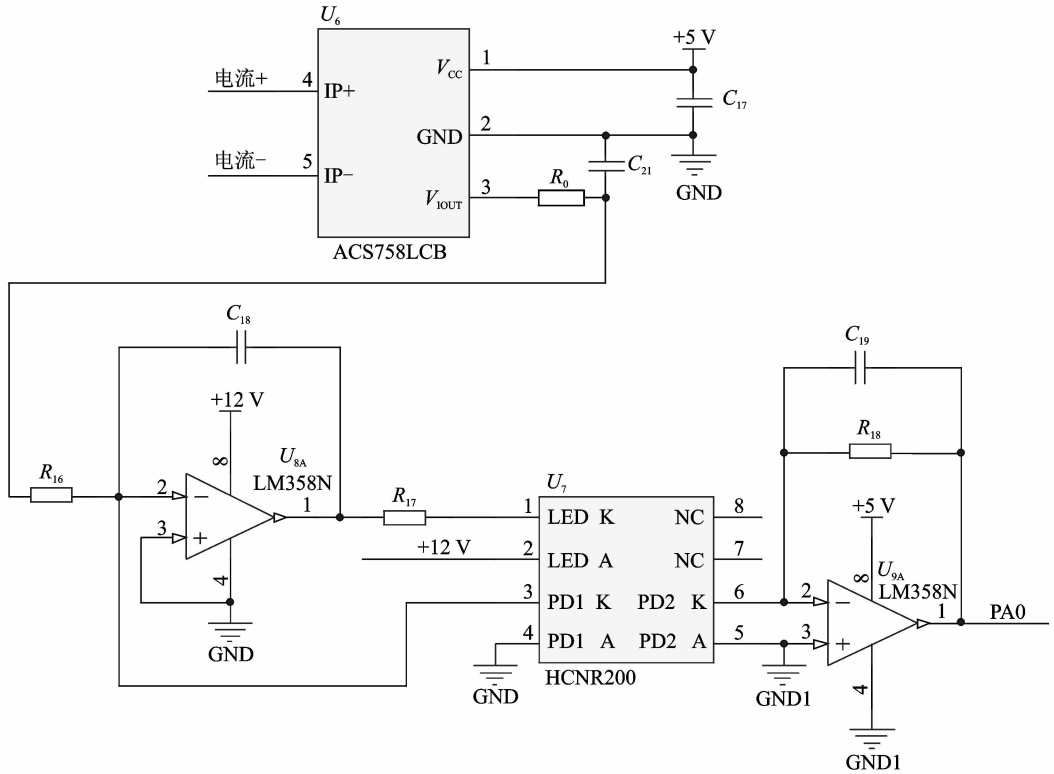


图 4 电流检测电路

Fig. 4 Current detection circuit

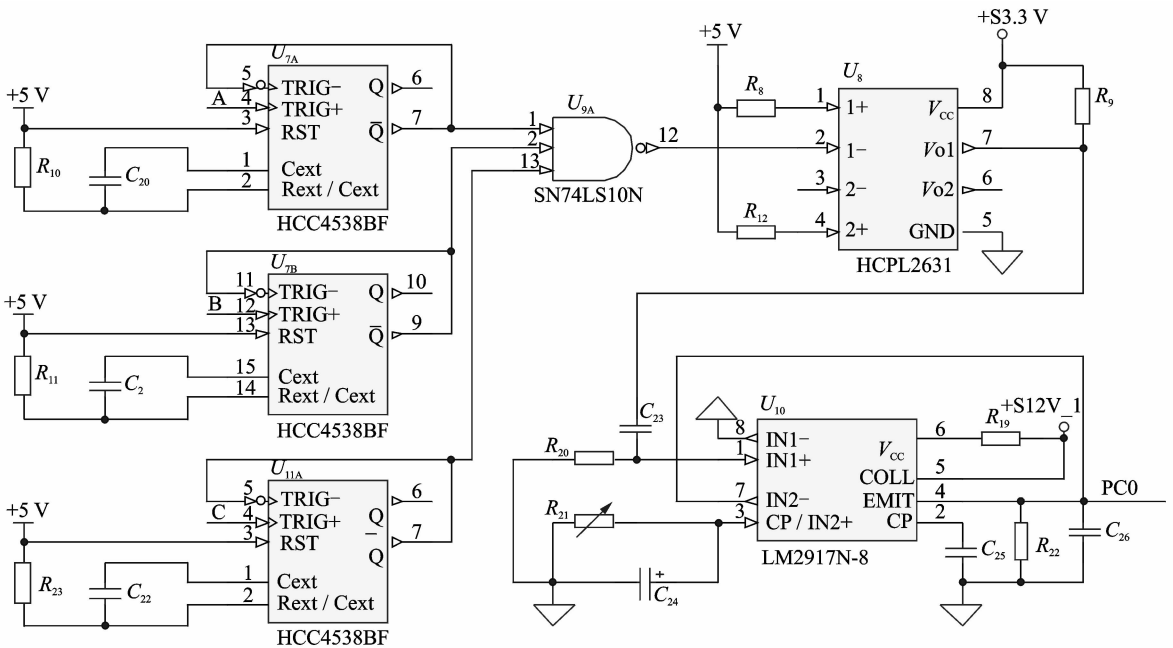


图 5 速度检测电路

Fig. 5 Speed detection circuit

## 2 稳定性试验与分析

系统由 Stm32 控制板发送指令给无刷直流电

机驱动电路板控制直流无刷电机运转,直流无刷电机通过外啮合齿轮以及万向联轴器与测功机联接,如图 6 所示<sup>[2]</sup>,直流无刷电机运行的扭矩、转速均直接在屏幕上显示,通过驱动直流加载电机模拟无刷

直流电机的各种负载。

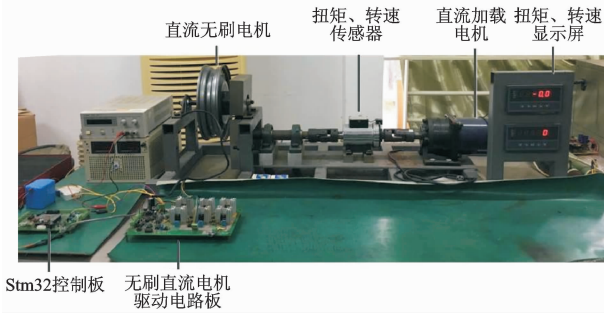


图 6 测功机试验平台

Fig. 6 Dynamometer experimental platform

将启动转速设定在 100 r/min,测试系统在不同负载下的启动可靠性。图 7 为系统在 2.5 N·m 负载下的速度曲线,图 8 为系统在 8.5 N·m 负载下的速度曲线。由图可以看出,在 2.5 N·m 负载下,上升时间为 170 ms,稳定时间约为 1.7 s,稳定后转速维持在 100 r/min;在 8.5 N·m 负载下,上升时间为 880 ms,稳定时间约为 4 s,稳定后转速维持在 100 r/min。

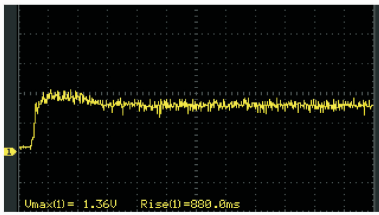


图 7 2.5 N·m 启动速度曲线

Fig. 7 2.5 N·m start speed curve

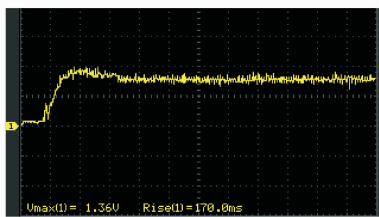


图 8 8.5 N·m 启动速度曲线

Fig. 8 8.5 N·m start speed curve

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 控制算法下的速度响应,其中两图中的位置 1 表示突然增加 2.4 N·m 负载加载瞬间。图 9 中速度由 101 降低到 84 而后逐渐稳定到 100 r/min,图 10 中速度由 101 降低到 79 而后逐渐稳定到 103 r/min。位置 2 表示突然减轻负载,图 9 中速度由 101 增加到 115 而后逐渐稳定到 99 r/min,图 10 中速度由 101 增加到 118 而

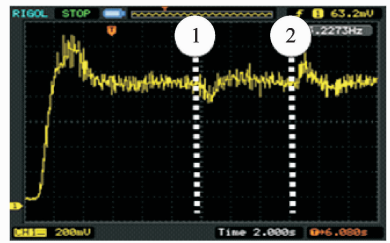


图 9 速度响应

Fig. 9 Speed response

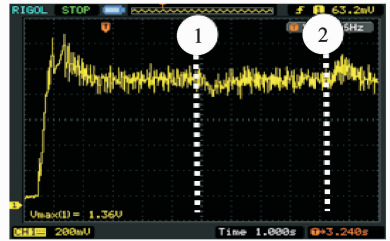


图 10 模糊自适应 PID 速度响应

Fig. 10 Fuzzy adaptive PID speed response

后逐渐稳定到 101 r/min。可以看出两者曲线变化近似一致,图 10 中速度更好地跟随着负载变化,且能稳定在恒定速度。

图 11,12 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,两图中的位置 1 表示启动电流,图 11 中启动电流约为 8 A,图 12 中启动电流约为 1 A,可以看出,采用了模糊自适应 PID 的双闭环控制算法较好地控制了启动电流。两图中的位置 2 表示突然增加负载,位置 3 表示突然减轻负载到空载。可以看出,相对于图 11,12 对于负载的变化较明显,电流(转矩)能较好地跟随负载变化,并且能较好地稳定在相应的数值上。

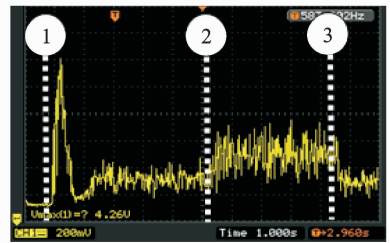


图 11 电流响应

Fig. 11 Current response

将系统分别在较低速和较高速情况下通过直流加载电机施加负载进行试验,试验电压均为 48 V。将转速稳定在 100 r/min,对系统施加负载多次测得数据,随机选取两组数据(1#和 2#),如表 2 所示。

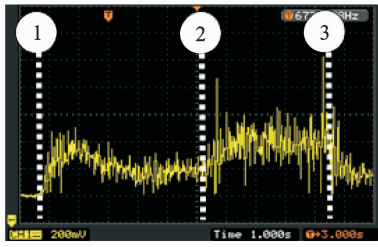


图 12 模糊 PID 电流响应

Fig. 12 Fuzzy PID current response

表 2 100 r/min 加载试验 1

Tab. 2 100 r / min loading experiment 1

1 #			2 #		
电流 / A	转矩 / (N·m)	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )	电流 / A	转矩 / (N·m)	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )
0.8	3.0	101	0.9	3.1	100
1.2	3.7	103	1.3	4.1	102
1.3	4.3	102	1.8	5.5	101
1.5	4.9	101	2.0	6.1	99
1.7	5.6	100	2.4	7.2	100
2.1	6.7	99	2.7	8.2	100
2.5	7.4	101	2.9	9.5	100
2.9	9.6	100	3.0	9.6	101

将转速稳定在 300 r/min,对系统施加负载,试验电压均为 48 V,测得试验数据,随机选择两组数据,记为 1# 和 2#,如表 3 所示。试验结果可以看出,在 100 和 300 r/min 转速下施加负载,转速相对稳定,系统带负载能力较好。将 100 以及 300 r/min 的两组数据进行线性拟合,结果分别如图 13,14 所示,可以看出系统一致性良好。

表 3 300 r/min 加载试验 1

Tab. 3 300 r / min loading experiment 1

1 #			2 #		
电流 / A	转矩 / (N·m)	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )	电流 / A	转矩 / (N·m)	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )
3.1	3.2	302	3.2	3.1	299
3.8	4.4	301	4.0	4.6	303
4.1	4.6	301	5.1	5.8	297
5.1	5.7	303	5.3	5.9	305
6.0	6.5	297	6.3	7.1	299
6.5	7.0	304	7.3	8.1	300
7.1	7.9	300	7.5	8.3	302
7.6	8.2	302	8.5	9.5	292

将转速维持在 300 r/min,突加最大负载,进行多次试验,测试电压均为 48 V,测试系统过流保护能

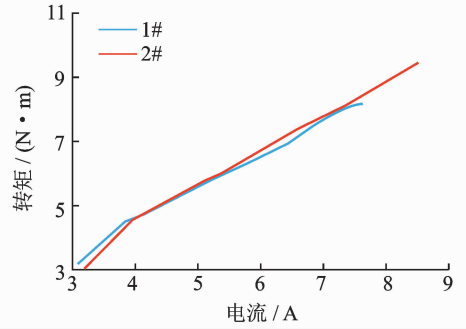


图 13 100 r/min 数据拟合曲线

Fig. 13 100 r/min data fitting curve

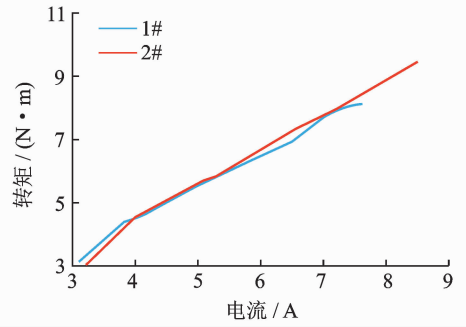


图 14 300 r/min 数据拟合曲线

Fig. 14 300 r/min data fitting curve

力,结果如表 4 所示。由结果看出,设计的双闭环控制系统在施加负载过程中,由于过载触发了过流保护电路,电机转速明显下降,有效保护系统。对被测系统进行堵转试验,电机运转速度为 0 r/min,堵转最大转矩为 28 N·m,系统正常运行,未出现故障。

表 4 300 r/min 过流保护试验

Tab. 4 300 r/min overcurrent protection test

试验编号	电流/A	转矩/(N·m)	转速/(r·min <sup>-1</sup> )
1	9.0	10.1	266
2	8.9	11.0	239
3	8.9	11.2	213
4	9.1	9.9	268
5	8.9	10.5	248
6	8.8	11.2	215
7	8.9	10.6	250
8	9.0	11.1	216
9	8.8	9.8	265
10	8.8	10.8	225

### 3 结束语

笔者研究了电动轮式小车用轮毂电机控制系统的负载驱动特性,并对其进行了可靠性试验,从硬件和软件两方面对无刷直流电机的控制器进行设计、调试和试验,改善无刷直流电机运转时的性能。系

统在不同负载下启动性能良好,启动电流为 1 A,在不同负载下维持稳定速度运行,当过载导致电流过大时,触发保护电路有效保护系统,堵转运行时最大扭矩为 28 N·m,堵转试验后系统未出现异常。结果表明,设计的无刷电机驱动控制系统带负载能力良好,稳定性高,安全可靠。

### 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(10): 829-834.  
Zhang Tiemin, Huang Penghuan, Huang Peisheng, et al. Study on the hub type permanent magnet DC dynamometer system [J]. Vibration Measurement & Diagnosis, 2016, 36 (10): 829-834. (in Chinese)
- [3] 陈亮,盛占石,刘钢,等. 低速电动车用双永磁无刷直流电机协调控制的研究[J]. 微电机,2013,46(3):38-41.  
Chen Liang, Sheng Zhanshi, Liu Gang, et al. Low-speed electric vehicle dual permanent magnet brushless DC motor coordinated control research [J]. Micro-Motor, 2013, 46(3):38-41. (in Chinese)
- [4] 张京,陈度,王书茂,等. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与实验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):63-70.  
Zhang Jing, Chen Du, Wang Shumao, et al. Design and experiment of four-wheel independent steering driving and control system for agricultural wheeled robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(18): 63-70. (in Chinese)
- [5] 李鑫,卢刚,李声晋,等. 基于模糊PID算法的轮式机器人驱动轮控制器设计[J]. 微特电机,2011,11:57-64.  
Li Xin, Lu Gang, Li Shengjin, et al. Controller Design of wheeled robot based on algorithm of fuzzy PID [J]. Small and Special Electrical Machines, 2011, 11: 57-64. (in Chinese)
- [6] 厉虹,陈昊. 基于 TMS320F2812DSP 的无刷直流电机调速系统设计[J]. 机床与液压,2009,8:31-34.  
Li Hong, Chen Hao. Based on TMS320F2812DSP brushless DC motor speed regulation system design [J]. Machine Tools and Hydraulic, 2009, 8: 31-34. (in Chinese)
- [7] 刘恩涛,潘宏侠. 高精度无刷直流电机伺服控制系统的设计与仿真[J]. 电子元器件应用,2012,14(4):46-50.  
Liu Entao, Pan Hongxia. Design and simulation of servo control system for high precision brushless DC motor [J]. Electronic Components Applications, 2012, 14 (4):46-50. (in Chinese)
- [8] 郭啸峰,吴森. 轮毂电机式电动汽车试验台的设计与实验[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2013,35(6):859-862.  
Guo Xiaofeng, Wu Sen. Design and experiment study of test bench for in-wheel motor electric vehicles [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2013, 35(6): 859-862. (in Chinese)
- [9] 马琮淦,左曙光,何吕昌,等. 电动车用永磁同步电机电磁转矩的解析计算[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(5):756-761.  
Ma Conggan, Zuo Shuguang, He Lüchang, et al. Analysis and calculation of permanent magnet synchronous motor torque for electric vehicle [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 756-761. (in Chinese)
- [10] 隋妮,王广萍,李仲兴,等. 直流无刷电机再生制动系统试验台的设计与验证[J]. 汽车技术,2011,1:49-53.  
Sui Ni, Wang Guangping, Li Zhongxing, et al. Design and verification of brushless DC motor regenerative braking system test bench [J]. Automobile Technology, 2011, 1:49-53. (in Chinese)
- [11] 许彦峰,孙汉旭,贾庆轩,等. 直流无刷电机故障检测与诊断的仿真模型[J]. 振动、测试与诊断,2005,25(3):190-192.  
Xu Yanfeng, Sun Hanxu, Jia Qingxuan, et al. Simulation model of fault detection for brushless DC motor using parameter estimation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(3):190-192. (in Chinese)



**第一作者简介:**张铁民,男,1961年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为智能检测与控制技术、微机电系统控制及自动化以及机器人技术。曾发表《四旋翼飞行器农田位置信息采集平台设计与实验》《农业机械学报》2018年第44卷第5期)等论文。  
E-mail: tm-zhang@163.com

**通信作者简介:**梁莉,女,1963年7月生,博士、高级实验师。主要研究方向为自动化检测与控制技术及机械设计。  
E-mail: ll-scau@163.com

