

张铁民, 张衡超, 甘展宇, 等. 病死猪搬运车底盘驱动系统设计 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 111-116.
ZHANG Tiemin, ZHANG Hengchao, GAN Zhanyu, et al. Design on a chassis driving control system of vehicle carrying dead pigs[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 111-116.

病死猪搬运车底盘驱动系统设计

张铁民^{1,2}, 张衡超¹, 甘展宇¹, 梁 莉¹

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

摘要:【目的】解决病死猪搬运车的大功率永磁有刷直流电机驱动控制问题。【方法】以 STM32 单片机为主控制器, 采用电流闭环控制方法, 通过硬件电路设计, 建立基于大功率永磁有刷直流电机的驱动控制系统。设计了以继电器为转换开关的电机正反转控制电路、调速电路、电流检测电路与过流保护电路。通过脉宽调制 (Pulse width modulation, PWM) 方式调节电机转速, 在病死猪搬运车上对该驱动控制系统进行了试验分析。【结果】该驱动系统能有效驱动 1.1 kW 的大功率有刷直流电机, 启动转矩大、启动平稳。PWM 占空比为 16%~95%, 转速从稳定启动后的低速至满转, 调速范围大且稳定。双电机协同较好, 具有可靠的隔离保护和过流保护措施。在持续过大电流的情况下, 系统能稳定工作, 满足搬运车负载大的使用需求, 基本实现了病死猪搬运车的预定功能。【结论】该驱动控制系统启动稳定, 调速性能好, 为解决大功率永磁有刷直流电机的驱动问题提供了一种有效方案。

关键词: 搬运车; 驱动系统; 大功率直流电机; 继电器; 闭环控制
中图分类号: TM32; TH39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)03-0111-06

Design on a chassis driving control system of vehicle carrying dead pigs

ZHANG Tiemin^{1,2}, ZHANG Hengchao¹, GAN Zhanyu¹, LIANG Li¹

(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 National Engineering Research Center for Breeding Swine Industry, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 To solve the driver control problem of carrying dead pig vehicle based on high-power permanent-magnet brush DC motor. 【Method】 We used STM32 MCU as a main controller, used the current closed-loop control method, and built the driving control system based on high-power permanent-magnet brush DC motor through hardware circuit design. We designed motor forward and reverse control circuit, speed regulating circuit, current detection circuit and over-current protection circuit with relay as the change-over switch. The motor speed was adjusted by Pulse Width Modulation (PWM). The driving control system was tested and analyzed on vehicle carrying dead pigs. 【Result】 The drive system could effectively drive 1.1 kW high-power brush DC motor, and stably start with a large starting torque. The speed regulation of motor was stable with a large range. When the duty ratio of PWM ranged from 16% to 95%, the rotating speed of motor changed from low speed after stable start-up to full speed. Dual motors had good coordination, reliable isolation protection and over-current protection measure. Under the continued large current, this system could work stably, met the needs of heavy load of vehicle, and basically achieved the intended function of carrying dead pig vehicle. 【Conclusion】 The drive control system has start-up stability and good performance of speed regulation, which provides a solution to solve the driving problem of high-power permanent-magnet brush DC motor.

Key words: vehicle; driving system; high-power DC moter; relay; closed-loop control

直流电机具有起动转矩大、制动性能好、调速平滑且调速范围宽、过载能力强、清洁环保等优良特性,被广泛应用于工农业生产的各个领域^[1-5]。现有直流电机驱动的研究中,最常见的就是基于 PWM 的 H 型全桥驱动电路,这种驱动方式具有快速、精确、高效、低功耗等特点^[6-10],但在大功率电机应用场合, MOSFET 过流很大,高达几十安,电路发热严重,不适合长时间工作。病死猪搬运车采用 2 台较大功率永磁有刷直流电机驱动,需要低速大转矩驱动,电机启动电流大,目前还没有商业化的专用驱动系统。本研究结合病死猪搬运车所用的永磁有刷直流电机底盘驱动需求,设计了用于病死猪搬运车的底盘驱动控制系统并开展了试验研究,为解决病死猪搬运车的大功率永磁有刷直流电机驱动控制问题提供一种方案。

1 驱动系统总体结构

系统总体框图如图 1 所示。以单片机 STM32-F103ZET6 为主控制器,将产生的脉宽调制 (PWM) 信号和方向控制信号 (DIR) 通过信号线传输至电机驱动电路^[11]。电机驱动电路分为功率驱动电路和继电器驱动电路。PWM 信号经过光电耦合芯片 TLP250 后,多个 MOS 管的栅极并联连接 TLP250 的输出,由 TLP250 驱动 MOS 管,构成功率驱动电路;方向控制信号经逻辑运算后产生新的控制信号,通过继电器驱动电路分别控制 2 组继电器的关断,从而控制电机的正转或反转^[12]。稳压供电电路为整个电机驱动系统提供所需电压。由于所用电机工作电流较大,大电流的冲击很容易烧坏芯片,因

此设计过流保护电路很有必要,当电机电流超出设定值时,通过过流保护电路使继电器失电停止工作,电机停转^[13]。利用 LM358 设计电流检测和反馈电路,通过闭环反馈稳定电机工作电流,当电流过大时,反馈信号和 PWM 信号经逻辑运算后产生的信号使继电器关断,从而保护整个驱动电路^[13-17]。

2 硬件电路和控制方法

2.1 硬件电路设计

硬件电路是控制系统的重要组成部分,是实现系统控制目的的载体。本驱动控制系统的硬件电路主要包括功率驱动电路、继电器驱动电路、稳压供电电路、电流采样与转换电路以及过流保护电路。

2.1.1 功率驱动电路 在功率驱动电路中,采用光耦芯片 TLP250 经三极管放大后驱动 8 个 MOS 管 IRF3205,多个 MOS 管并联起到分流作用,查看 IRF3205 的芯片资料可以知道,该芯片在 25 ℃ 下,最大漏源极电压 (耐压) $U_{DSS}=55\text{ V}$ 、持续漏极电流 $I_D=110\text{ A}$ 。对于大功率永磁有刷直流电机,单个 MOS 管的持续电流虽满足要求,但在实际工作中要留 3~4 倍的余量,且随着电流的增大, MOS 管发热,内阻也随之增大,影响持续漏极电流,因此采用多颗 MOS 管并联的方式来分流。功率驱动电路如图 2 所示。图 2 中, R1、R3、...、R15 为栅极驱动电阻,每个 MOS 管都由独立的栅极驱动电阻隔离驱动,可以防止各个 MOS 管的寄生振荡,起到阻尼作用; R2、R4、...、R16 是栅极下拉电阻,主要作用是在驱动芯片损坏开路的情况下防止 MOS 管误导通。采用多个 MOS 管并联的方式,漏极和源极的走线

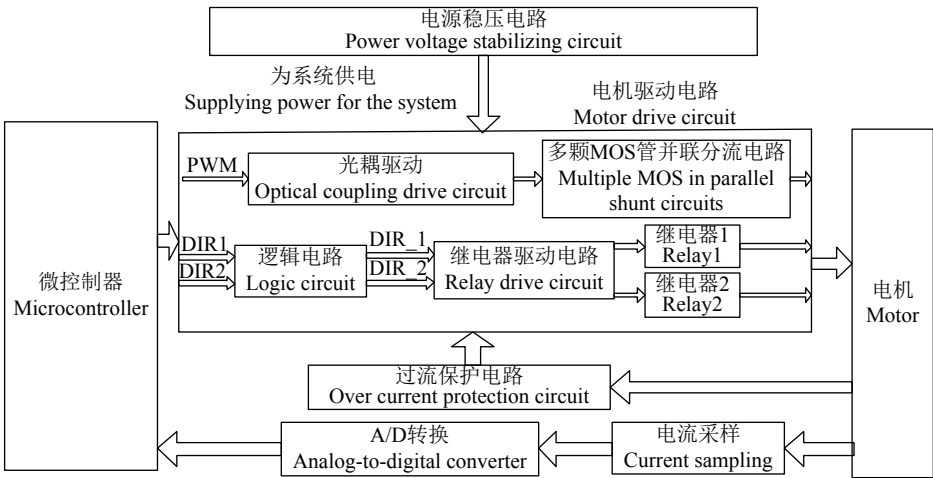


图 1 驱动控制系统框图
Fig. 1 The schematic diagram of drive control system

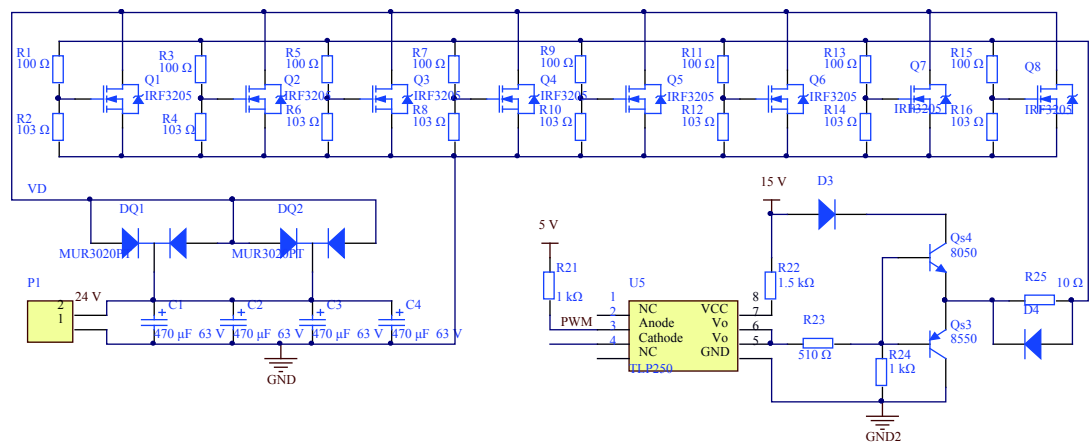


图 2 功率驱动电路图

Fig. 2 The circuit diagram of power drive

要通过多个 MOS 管的电流, 要求其总线上的阻抗控制在所有 MOS 管并联后的内阻的 10% 以内。理论上计算, 单个 MOS 管的电流偏移不能超过平均电流的 10%。IRF3205 的内阻为 8 mΩ, 因此总线上的电阻不能超过 1 mΩ。

2.1.2 继电器驱动控制电路 继电器是用小电流控制大电流的开关器件, 具有驱动简单、动作迅速可靠、维护方便、使用寿命长等特点, 适用于低频率开关场合。本文采用 2 个 JD1914 五脚大电流继电器

器, 由主控制器 STM32F103ZET6 产生的 2 路方向控制信号 DIR1 和 DIR2, 经大电流驱动阵列芯片 ULN2003, ULN2003 可产生高达 500 mA 的电流驱动三极管导通, 从而驱动控制 2 个继电器的导通与关断。继电器驱动电路图如图 3 所示, 当继电器 K1 动作时, 常开触点吸合, 常闭触点断开, 电机反转; 当继电器 K2 动作时, 电机正转; 当 K1 和 K2 的常开触点同时吸合或常闭触点同时吸合时, 电机不工作。

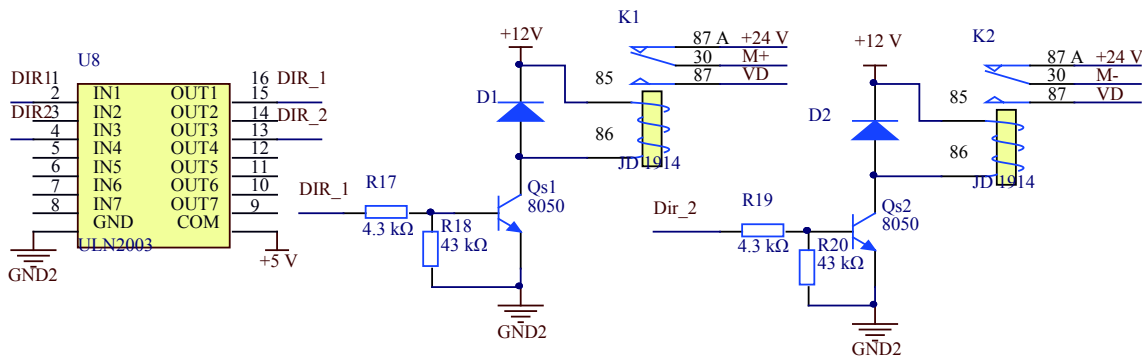


图 3 继电器驱动电路图

Fig. 3 The circuit diagram of relay drive

2.1.3 稳压供电电路 整个系统由 2 块 12 V 的铅酸电池并联提供 24 V 工作电压, 由于 3 个器件 TLP250、JD1914 和 ULN2003 分别需要 18、12 和 5 V 电压供电, 为此, 本系统采用 LM7918、LM7812 和 LM7805 这 3 个三端稳压集成电路芯片, 分别为其提供所需电压。在每个稳压芯片的输出端并联 1 只 0.1 μF 的滤波电容, 能有效滤除低频杂波。由于稳压芯片内阻的存在, 输入、输出两端存在电压差, 在稳压芯片工作电流的作用下, 芯片发热, 因此需要加装散热片, 以增加散热。这 3 种芯片均采用 TO-220 封装, 其引脚图如图 4 所示。



图 4 TO-220 封装引脚图

Fig. 4 Pin diagram of TO-220 encapsulation

2.1.4 电流采样与转换电路 电流反馈控制框图如图 5 所示。在电流采样与控制电路中, 采用霍尔电流传感器 ACS758LCB-050B-PFF-T 电流采样芯片, 其量程为 50 A, 可供大电流采样电路使用, 满足

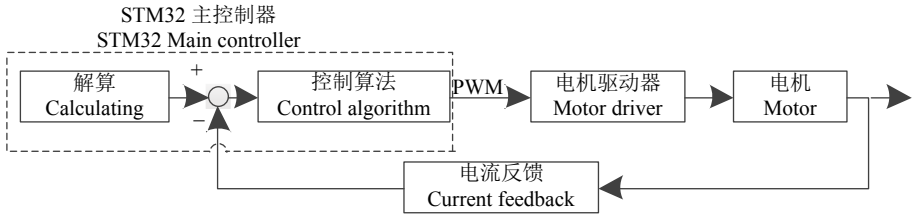


图 5 电流反馈控制框图
Fig. 5 The block diagram of current feedback control

该驱动控制系统的电流采样需求。电流采样后的输出信号经模拟信号隔离器 HCNR200 隔离输出, 然后通过由 LM358 构成的电压跟随器, 最后输出采样信号, 该信号传递到主控制器, 主控制器根据电流调节算法, 调节输出的 PWM 占空比, 进而调节电机的工作电流, 形成电流闭环。电流闭环反馈的目的是调节电机转速、引入电流闭环, 有助于提高搬运车的运行稳定性。

2.1.5 过流保护电路 在过流保护电路中, 利用运放 LM358 及部分电阻、电容构建差分运放电路, 采用 3 个直径为 1.2 mm、长度为 10 cm 的康铜丝并联, 作为电流采样电阻, 并联后电阻为 0.014 Ω。当电流超过设定的最大安全电流值时, 运算放大器的输出信号和控制电机的方向信号经过逻辑电路运算和 ULN2003 放大后, 作用于 2 个继电器, 使 2 个继电器的常开触点同时吸合, 电机两端电压为 0, 电机失电停止工作。

2.2 控制方法

以单片机 STM32F103 为主控制器, 上位机编写的控制算法通过主控制器的通信串口 USB_232 写入, 主控制器对控制算法进行解算。主控制器产生 2 路 PWM 信号和 4 路方向控制信号, 分别控制 2 个直流有刷电机的运行。PWM1、DIR1 和 DIR2 控制电机 1, PWM2、DIR3 和 DIR4 控制电机 2。

电机在启动时所需克服的阻力要大于正常运行时的阻力, 在启动时, 电机要提供足够的转矩才能使电机正常启动。因所设计的病死猪搬运车要承受很大的负荷, 车子启动需要克服很大的摩擦阻力, 车子在正常行驶时, 车轮所受阻力矩 (M) 为:

$$M = \mu_k F_N, \tag{1}$$

式中, μ_k 为有量纲的滚动摩擦系数, 根据有关资料, 充气轮胎与泥土路的有量纲的滚动摩擦系数最大值为 1.5×10^{-3} ; F_N 是法向量压力, 已知搬运车质量 ($m_{\text{车}}$) 150 kg, 吊升病死猪只的最大质量 ($m_{\text{猪 max}}$) 设定 300 kg, 单个轮子受力按最大计, 单个轮子受力为:

$$F_{N\text{max}} = gm_{\text{车}} + gm_{\text{猪 max}} \approx 4.5 \times 10^3, \tag{2}$$

式中, g 为重力加速度, 取 $g=10 \text{ m/s}^2$ 。计算可得:

$$M_{\text{max}} = 6.75. \tag{3}$$

电机额定电压 24 V, 额定功率 1.1 kW, 额定转速 1 500 r/min, 已知:

$$P = FV_{\text{max}}, \tag{4}$$

$$T = FR, \tag{5}$$

$$F = \frac{T}{R}, \tag{6}$$

$$V_{\text{max}} = 2\pi Rn. \tag{7}$$

由公式 (4)~(7) 可得:

$$P = FV_{\text{max}} = \frac{\pi}{30} Tn. \tag{8}$$

公式 (4)~(8) 中, P 为功率, F 为拉力, V_{max} 为最大线速度, T 为电机输出转矩, R 为作用半径, n 为电机额定转速。由于电机和车轮之间连有蜗轮蜗杆减速器, 其减速比为 7.5:1.0, 计算可得电机实际输出转矩最大值 (T_{max}):

$$T_{\text{max}} \approx 52.52. \tag{9}$$

当搬运车满负荷运行时, 其启动转矩势必非常大, 考虑到搬运车由四轮承力、双电机驱动, 车轮所受摩擦阻力并没那么大。因此, 在启动时, 两路 PWM 占空比设定为 35%, 当检测到车子启动时, 迅速将占空比梯度降低到设定值。

3 试验验证与结果

对搬运车驱动控制系统的硬件和软件设计进行试验验证, 主要验证该驱动控制系统的启动性能、调速性能以及保持直线行驶的性能。

在试验时对驱动控制系统的输出进行数据采集, 调节单片机输出 PWM 的占空比, 用示波器测量驱动器输出波形的变化情况, 并适时测量驱动器的输出电流。试验测得该车在直线行驶时在前进运行状态下, 电机的工作电流随 PWM 占空比变化情况见表 1。由表 1 可知, 向前行驶时, 从 0 调节单片

表 1 搬运车前进方向空载试验结果

Table 1 The results of no-load test of vehicle in the moving direction

左轮电机 Left-wheel motor		右轮电机 Right-wheel motor	
占空比/%	I/A	占空比/%	I/A
Duty ratio		Duty ratio	
0	0	0	0
5.7	0	5.4	0
6.8	0.32	6.9	0.33
8.1	1.26	8.5	1.34
11.8	4.97	11.8	5.07
13.4	5.85	13.7	6.24
16.0	7.41	20.0	8.74
21.3	8.72	28.4	10.31
26.7	10.09	35.6	10.96
33.3	10.94	45.3	11.90
38.7	11.21	58.1	12.40
44.0	11.63	68.9	13.10
54.1	12.11	74.5	13.56
60.0	12.55	82.3	13.88
68.0	12.87	93.9	14.26

机输出 PWM 的占空比, 占空比达到 6.8% 左右时, 克服电机启动时的阻力矩, 电机开始启动, 此时电机转速很小, 不足以正常地启动行驶。占空比的小幅增长即可使电机的工作电流快速增大, 电机转速随之快速增大, 调节占空比至 16% 以后, 电机工作电流随占空比增大呈现线性增长趋势。试验表明, 占空比为 16% 时搬运车空载启动性能较好, 基本实现了稳定平滑启动的功能而没有出现大电流冲击等状况, 利于启动后线性调速。此时电机驱动器输出端输出波形是一个幅值为 24.6 V、频率为 16.7 kHz、周期为 60 μs、占空比为 16% 的方波 (图 6), 与单片机此时输出的 PWM 信号周期、频率及占空比完全一致。表 1 的数据表明: 在占空比为 16%~94% 的区间内, 电机工作电流随占空比的增加呈线性增大, 电机转速也随之越来越快, 转速从稳定启动后的低转速至满转, 调节范围大, 调速效果较好,

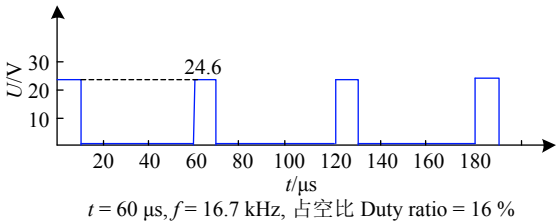


图 6 空载启动驱动电路输出

Fig. 6 Circuit output driven by no-load start

基本实现了预定的调速性能。

试验测得该车在倒车行驶时, 电机的工作电流随 PWM 占空比变化情况见表 2。向后行驶时, 启动与调速的状况与向前行驶时类似, 由于搬运车整体重心在车的前半部分, 前轮受力大, 后轮受力较小, 因此在启动和行驶过程中, 电机克服的阻力矩较向前时要小。表 2 的试验结果也表明, 向后行驶时, 占空比在 12% 左右就能稳定平滑启动, 比向前行驶时稳定启动所需的占空比要小, 在占空比为 12%~95% 的区间内电机转速线性可调。

利用 Microsoft Excel 数据处理软件对表 1 和表 2 的数据进行曲线拟合, 拟合曲线如图 7 所示。图 7 中所示的 4 条曲线分别是左轮电机前进方向、

表 2 搬运车倒车方向空载试验

Table 2 The results of no-load test of vehicle in the reversing direction

左轮电机 Left-wheel motor		右轮电机 Right-wheel motor	
占空比/%	I/A	占空比/%	I/A
Duty ratio		Duty ratio	
0	0	0	0
5.4	0	5.6	0
6.7	0.32	6.8	0.32
8.1	1.20	8.3	1.24
11.8	5.05	11.8	4.94
12.2	5.40	12.7	5.51
22.1	6.88	22.7	6.94
26.8	7.85	32.2	8.20
33.3	8.28	40.9	8.89
37.3	8.57	46.3	9.37
44.0	9.39	54.4	9.61
48.4	9.48	63.8	10.10
55.0	9.88	70.7	10.25
65.8	10.23	81.2	10.51
82.4	10.58	95.9	10.74

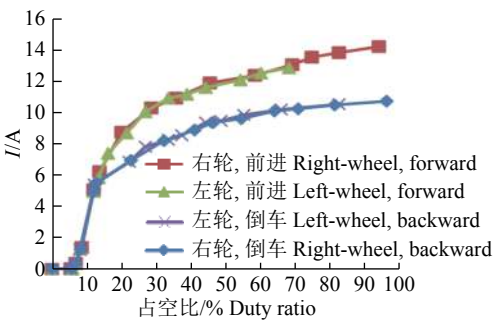


图 7 电机前后行驶占空比与电流拟合曲线

Fig. 7 The fitting curve of duty ratio and current of motor driving forward or backward

右轮电机前进方向、左轮电机倒车方向和右轮电机倒车方向。分析对比图 7 中的 4 条曲线,在平滑路况下,该车直线行驶过程中,无论前进或倒车,该车的 2 个驱动电机都有较好的双机协调运转性能,保证该车直线行驶过程中在没外界强力干扰时能够稳定地直线行驶。

4 结论

该文所设计的病死猪搬运车底盘驱动控制系统驱动功率大、启动平稳,具有调速范围宽、调速平滑的优点,具有较好的双电机协调一致的运行性能和良好的过流过载能力,通过继电器和光耦的隔离作用,使驱动电路与电机及控制器隔离,有效防止驱动电路故障对电机和控制器的冲击损害,很好地实现了大功率永磁有刷直流电机的驱动与控制,实现了搬运车的基本行驶功能。为解决大功率直流电机驱动问题提供一种方案,并具有稳定可靠、成本低廉、实用性强的优点,便于推广使用。

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): 11-18.

[2] 宋洪慧, 李春芾, 朱江. 智能小车直流电机驱动电路设计 [J]. 机电技术, 2015(6): 84-87.

[3] 何登, 华秀洁. 直流电机驱动与控制系统设计 [J]. 电子世界, 2012(21): 52-53.

[4] 刘媛媛, 冯宏伟. 基于 P87LPC768 的大功率直流电机驱动控制电路 [J]. 机械工程与自动化, 2014(3): 158-160.

[5] 韦升俊, 贾定宏, 何智力. 基于继电器的大电流电机驱动设计 [J]. 科技传播, 2010(9): 41.

[6] 陈曦, 隋龙. 低电压大功率直流电机驱动器 [J]. 电机与控制应用, 2009, 36(12): 10-13.

[7] 游志宇, 杜杨, 张洪, 等. 基于场效应管的直流电机驱动控制电路设计 [J]. 国外电子元器件, 2008(2): 3-6.

[8] 周文杰. 基于 ARM 的低电压大功率直流电机驱动控制器的设计与实现 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.

[9] 汪华章, 宰文姣, 马亚宁, 等. 较大功率直流电机驱动电路的设计与实现 [J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2010, 36(4): 649-654.

[10] 胡发焕, 邱小童, 蔡咸健. 基于场效应管的大功率直流电机驱动电路设计 [J]. 电机与控制应用, 2011, 38(4): 21-24.

[11] 李红燕, 魏世民, 廖启征, 等. 基于 STM32 的多电机协同控制系统设计 [J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(5): 120-122.

[12] 张岩, 秦晓芳, 刘根水. 光耦在直流电机驱动系统中的应用 [J]. 电子技术, 2017, 46(10): 67-70.

[13] 张洪伟, 刘思美, 杨斌, 等. 电机驱动控制电路的过流保护 [J]. 科技传播, 2016, 8(11): 198-199.

[14] 杨园格, 李凡阳, 黄继伟. 一种高精度双环反馈的新型过流保护电路 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 65-69.

[15] 申浩锋, 高宁波. 基于 IR2103 的步进电机全桥驱动电路设计 [J]. 微电机, 2016, 49(10): 67-71.

[16] SHANMUGASUNDRAM R. A Low-cost high performance brushless DC motor drive for speed control applications[C]//China Electrotechnical Society. 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference: ECCE Asia Conference Digests. Beijing: China Electrotechnical Society, 2009: 5.

[17] XU Y R. Simulation of brushed DC motor driving system based on fuzzy PID[C]// International Research Association of Information and Computer Science. Proceedings of the 2014 International Conference on Future Information Engineering and Manufacturing Science (FIEMS 2014). Beijing: Xinyongshun Cultural Communication Co., Ltd., 2014: 4.

【责任编辑 周志红】