

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201808005



# 电动汽车永磁无刷直流电机 控制器设计

王维强, 曾晓松, 夏茂树

(武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065)

**摘要:** 对某四轮独立驱动电动汽车轮毂电机进行研究,设计一种永磁无刷直流电机控制器.以 STM32 F103RBT6 芯片为基础,对电机驱动电路、采样电路和保护电路分别进行硬件设计与分析;同时,采用模块化软件设计方案,对该控制器的软件系统进行升级.实验验证表明:所设计的电机控制器能使电机响应迅速、转速稳定、无超调,且电动车动力输出性能良好.

**关键词:** 永磁无刷直流电机;电机控制器;增量式 PID 控制;STM32 单片机

**中图分类号:** U 469 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0020-06

## Design of Permanent Magnet Brushless DC Motor Controller for Electric Vehicle

WANG Weiqiang, ZENG Xiaosong, XIA Maoshu

(School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** A permanent magnet brushless direct current motor controller was designed by studying the hub motor of a four-wheel independent drive electric vehicle. Based on STM32 F103RBT6 chip, the hardware design and analysis of motor drive circuit, sampling circuit and protection circuit were carried out respectively. At the same time, modular software design scheme was adopted to upgrade the software system of the controller. Experimental results show that the designed motor controller can ensure the motor fast response, stable speed, no overshoot, and good power output performances.

**Keywords:** permanent magnet brushless motor; motor controller; incremental PID control; STM32 micro-computer

永磁无刷直流电机由于采用永磁体转子,没有励磁损耗,也没有换向器和电刷等机械换向结构,具有能量密度和效率高、可靠性好、输出扭矩大等特点<sup>[1]</sup>,受到国内外电动车领域的广泛关注.永磁无刷直流电机的控制技术<sup>[2]</sup>和实现方式直接影响电动汽车的整体性能,因此,电机控制器设计具有很强的研究价值和现实意义<sup>[3]</sup>.基于数字信号处理器(DSP)<sup>[4]</sup>和可编程逻辑门器件(FPGA)的无刷直流控制器因成本高、电路设计结构复杂,且功能扩展不好,使用场合有限.而 STM32 具有低功耗、实时性强、高性能、处理速度快,以及众多的外设 I/O 口,功能丰富等特点.基于此,本文选用 STM32<sup>[5]</sup>控制芯片作为永磁无刷直流电机控制器的核心,结合硬件电路设计和软件算法编写,以实现电动汽车性能的提升.

**收稿日期:** 2018-08-08

**通信作者:** 王维强(1967-),男,副教授,主要从事汽车新能源与电子技术的研究. E-mail: wangwq03@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51505345);湖北省科技创新专项重点项目(2018AAA060);中央引导地方科技发展专项(2018ZYDD027)

## 1 控制器的构成

永磁无刷直流电机控制器根据功能的需求可分为 4 个模块: STM32 控制模块、电机驱动与保护模块、采样模块和通信模块. STM32 控制板是控制其他各个模块正常工作的核心模块<sup>[6-10]</sup>. 为达到期望的工作状态, 通过采集电机工作时的相关参数, 作出相应的控制策略, 实时控制电机, 使电机能够响应快速、运行安全稳定. 电机的保护则涉和过流及短路保护, 防止电机因为启动时电流过大出现场效应晶体管(MOS管)烧坏和空气开关冒火等危险情况. 采样电路可以实时采集和监测电机运转时的相关参数, 例如母线电压、母线电流、电机转速等, 保证电机稳定运行. 通信接口包括 RS-232 串口通信及控制器局域网(CAN)通信. CAN 通信主要是电机控制器与整车控制器进行通信, 实现数据交换; 而 RS-232 串口通信则是实现电机控制器与 PC 机之间的数据通信, 通过 PC 机在线监测电机的运行状态, 保证电机稳定运行.

永磁无刷直流电机的参数如下: 额定功率为 3 000 W; 额定转速为  $750 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 额定电压为 72 V; 额定转矩为  $38 \text{ N} \cdot \text{m}$ ; 额定电流为 42 A; 最大转矩为  $152 \text{ N} \cdot \text{m}$ ; 最大电流为 105 A; 极对数为 24. 电机控制系统原理图, 如图 1 所示.

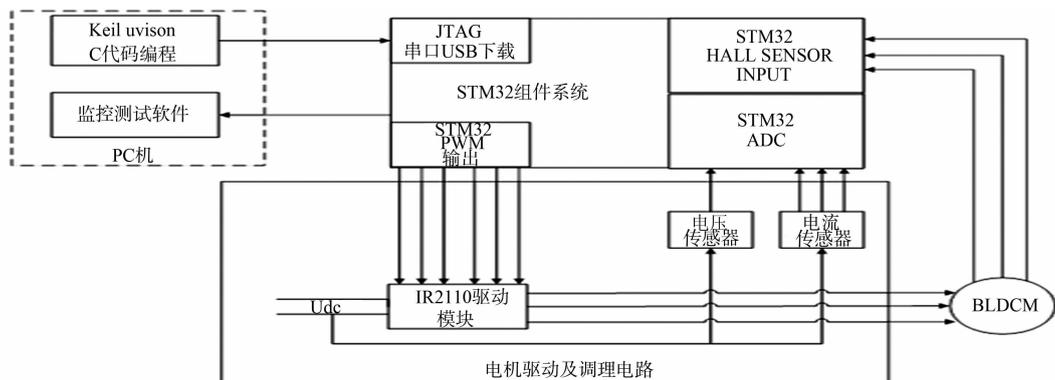


图 1 电机控制系统原理图

Fig.1 Schematic of motor control system

## 2 硬件模块的设计

硬件电路是保证电机正常启停、正反旋转、加减速、稳定运行的执行机构, 起到不可或缺的作用. 根据电机参数及功能需要, 将硬件电路分为以下 5 个部分进行设计.

### 2.1 STM32 控制板

控制板基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F103RBT6 芯片为控制核心, 主要功能是控制电机脉冲调制信号(PWM)的输出、当前转子位置检测、电流采样、速度采样、速度调节、过流, 以及短路保护等<sup>[11-13]</sup>.

PWM 信号的产生来自 STM32 中自带高级定时器 1, 由定时器 TIM1-CH1, TIM1-CH2, TIM1-CH3 产生上桥臂输出, TIM1-CH1N, TIM1-CH2N, TIM1-CH3N 产生下桥臂输出. 其中, CH1 和 CH1N 是互补输出, 通过编程可以保证电机两两导通的时候, 不会出现上、下桥臂同时导通的状态.

转子位置信号检测由定时器 3 的通道 TIM3-CH1, TIM3-CH2, TIM3-CH3 进行输入捕获, 通过检测当前转子位置及电机旋转状态来控制 PWM 信号的产生. 速度和电流的采集分别通过 ADC1-IN11, ADC1-IN12 通道进行捕获, 实时采集电机当前运行状态.

### 2.2 霍尔位置检测电路

永磁无刷直流轮毂电机内部装有磁敏式霍尔位置传感器, 该传感器转子与电机转子同轴转动, 3 个霍尔元件按  $120^\circ$  的机械角度安装在定子上, 用以检测电机转子位置及转速. 电机霍尔传感器接口一共有 5 根线, 分别为 +5 V, HALLA, HALLB, HALLC, GND. 由于传感器为集电极开路输出, 因此, 需要接上拉电阻.

实际中,霍尔传感器输出的霍尔信号不是理想方波信号,而是含有杂波的不规则的方波,同时,电机转动时,电机绕组也会对霍尔信号产生影响.故为了获得理想方波,应将霍尔信号接口输入到施密特触发器 74HC14 中,经过整形后由 STM32 进行捕获.

### 2.3 IR2110 驱动电路

IR2110 是双通道高压高速型功率开关器件,栅极驱动,具有自举浮动电源,驱动电路十分简单,只需要一路电源就可以同时驱动上、下桥臂. IR2110 驱动模块,如图 2 所示.由图 2 可知:由二极管 D1,电容 CAP1 和  $V_B, V_S$  构成自举电路,端电压  $V_{BS}$  给上桥臂 MOS 管提供电压,该电压由 15 V 电源经过 D1, CAP1 提供;当下桥臂 UL 导通时,  $V_S$  被拉到地电位,15 V 电源通过二极管 D1 给自举电容 CAP1 充电,其中,二极管和自举电容是根据充电电流及反向电压选择确定的<sup>[14]</sup>.

由于 IR2110<sup>[15]</sup> 只有两路输出口,而无刷直流电机的 MOSFET 管驱动电路是 6 路输入信号控制,故采用 3 个 IR2110 单独控制.每个 IR2110 分别控制电机的 U, V, W 相的上、下桥臂.由于电机功率为 3 kW,电源电压为 72 V,额定电流为 42 A,故采用 NCEP01T13D 型 N 沟道增强型 MOS 管(江苏省无锡新洁能公司).该 MOS 管的  $V_{ds}$  电压为 100 V,  $I_d$  可以达到 100 A,因此,能满足电机驱动需要.另经过计算,该 MOS 管需要门极驱动电流约为 0.5 A,而 IR2110 的拉电流和灌电流为 2 A,通过 IR2110 自举电路,可以满足 MOS 管导通及开关频率的要求.由于电机电流较大,桥臂上只有一个 MOS 管存在工作不稳定、容易被击穿或者短路、过流等现象.因此,采用了一个桥臂上 3 个 MOS 管并联的方式,这样能够减少电流在 MOS 管上的功率损耗;同时,采用铝基板制作驱动板,达到快速散热的目的.电机 V 相驱动电路及采样电路,如图 3 所示.

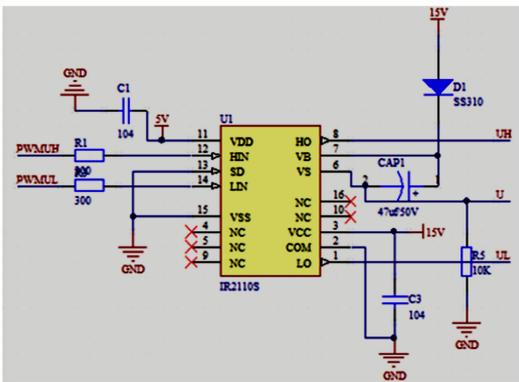


图 2 IR2110 驱动模块

Fig. 2 IR2110 driver module

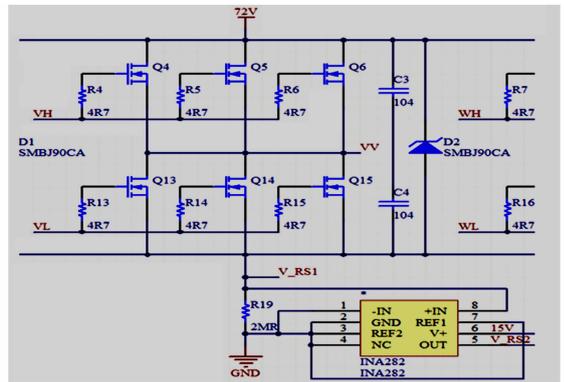


图 3 电机 V 相驱动电路及采样电路

Fig. 3 Motor V phase drive circuit and sampling circuit

### 2.4 采样电路

采样电路主要是采集电机中的母线电流,通过在母线上加精密采样电阻,测得采样电阻的电压值判断当前电流大小(图 3).因此,采用 INA282 三运放仪表放大芯片,INA282 的 +IN 端口接采样电阻上方, -IN 端口接 GND,采样电阻阻值为 2 m $\Omega$ .以电机正常工作时的电流(50 A)为最大电流,则采样电阻分压的最大电压为 100 mV,将此 100 mV 输入 INA282 芯片中,INA282 将 100 mV 放大 50 倍得到的放大电压为 5 V,单片机 STM32 的 I/O 口通过捕获 INA282 芯片输出,得出当前电流值.

### 2.5 保护电路

由于电动汽车行驶工况复杂,电机在启动瞬间或堵转时,电流迅速增大,时间稍长则会有电机烧毁的风险.为了保护电机,应该增设保护电路,主要包括过流保护和短路保护.

过流保护主要是防止电机母线电流过大.因为母线电流过大会影响电机的运转稳定与电机寿命,所以需要进行保护.过流保护电路和短路保护电路,分别如图 4,5 所示.图 4 中:  $V_S$  为经过采样电阻分压后的电压.将  $V_S$  与设定的过流保护对应的电压值通过 AD8052 芯片进行比对,然后,经单稳态 555 电路输出口 SD1 和短路保护输出口 SD2(图 5)进行或门运算后,输入至 IR2110 芯片的 SD 保护端口.若过流,则 SD=1,因此,输送到 IR2110 中后,IR2110 封锁输出,这样就起到了保护作用.

短路保护主要是防止电路发生故障时,电流不经过负载,瞬间产生极大电流造成电机及电源等损

坏,甚至火灾等更严重的结果.由图 5 可知:通过采样电路分压,将实际值  $V_S$  和理想值通过 AD8052 芯片进行比对,将输出值与下端 5 V 复位电路共同输入至 CD4011 组成的 RS 触发器中,其输出结果 SD2 送至 IR2110 的 SD 口.当短路时,SD2=1,则 IR2110 直接持续封锁输出;当电机重新上电后,通过复位按键 RESET 复位,这时系统重新进入正常状态.

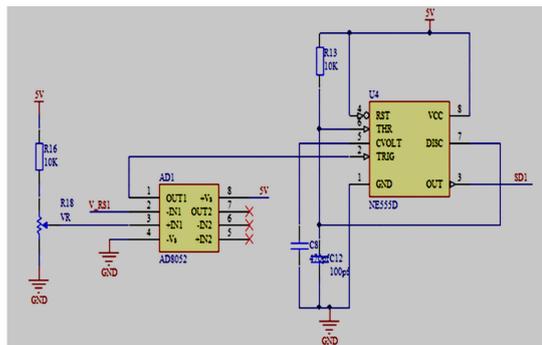


图 4 过流保护电路

Fig. 4 Overcurrent protection circuit

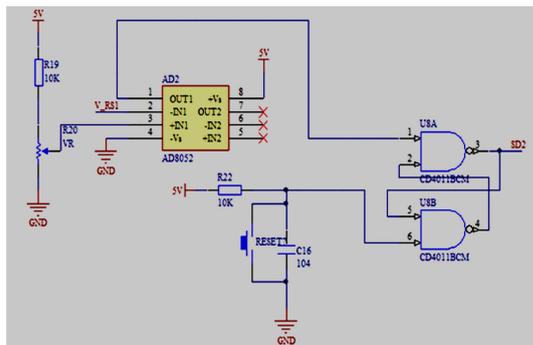


图 5 短路保护电路

Fig. 5 Short circuit protection circuit

## 3 软件程序设计

### 3.1 程序的模块化

由于软件程序代码众多,并且 STM32 在开发时会使用大量库函数,如果全部写在一起会造成开发周期长、错误率增加、错误发现阶段晚等现象.因此,在软件程序设计时,根据电机各功能模块进行划分,将程序进行模块化设计,这样操作简单、移植性强.因此,将软件部分分为以下 7 个模块.

- 1) 系统主程序设计.主程序中主要是进行程序的主循环和上电时对外设和系统进行初始化,如系统时钟、I/O 口、定时器、中断能及系统变量、外部声明等初始化.
- 2) PWM 波的输出.控制系统采用 H\_PWM\_L\_ON 的模式,产生 6 路 PWM 脉冲,控制 MOS 管的通断,从而实现电机的调速.
- 3) 电机启动程序.通过定时器输出 PWM 波,由于启动电流过大,必须限流或缩短 PWM 波启动,才能保证电机稳定启动.
- 4) 电机转子位置的检测.由于电机带有霍尔传感器,通过霍尔传感器检测电机转子位置.
- 5) 电机启停控制及正反转控制程序.读取当前电机转子位置,通过按键触发信号实现启停和电机正反转所对应的导通相.
- 6) 电机速度调节.STM32 控制器通过模数转化器(ADC)的电压变化改变当前电机 PWM 占空比.
- 7) 系统增量式 PID 闭环调节.计算电机当前速度值,然后,与指定值进行做差运算,通过增量式 PID 调节得出期望的 PWM 占空比,从而控制电机转速.

### 3.2 系统主程序设计

在主程序 main() 函数中,根据功能定义任务堆栈,初始化 STM32 芯片的系统时钟及系统所使用的 I/O 口,包含 PWM 端口、按键端口、LED 灯端口、ADC 端口、输入捕获端口等.当系统完成初始化后,进入主程序,等待按键或电位计调速、ADC 的转换、通信等.

### 3.3 PWM 输出程序设计

采用上桥臂 PWM 调制,下桥臂恒通的方法(H\_PWM\_L\_ON)进行调速.由于电机采用两两导通的方式,无刷直流电机每转一周要换向 6 次,每  $60^\circ$  换相一次,在每  $60^\circ$  区间内,总有一个上桥臂 PWM 调制,下桥臂横导通.因此,改变上桥臂 PWM 的占空比就可以改变电机电压值,即可进行电机调速控制.在 STM32 中,通过 PA8,PA9,PA10 产生上桥 PWM 波,PA6,PA7,PB0 产生下桥 PWM 信号,使用互补输出的方式.因此,当同一相的上桥臂输出 PWM 信号时,下桥臂都是截止状态.

### 3.4 电机转子位置检测及换向程序设计

当电机转动时,通过读取电机霍尔传感器输送至 STM32 芯片中的值获取当前转子位置,根据换相

标识符判断电机处于正向状态还是反向状态.

### 3.5 电机启停与正反转程序设计

根据换相标识符确定 MOSFET 管的导通关系,在主程序中,通过调用按键子程序实现电机的正反转和停止.正转换相顺序为 AB-AC-BC-BA-CA-CB;反转换相顺序为 CB-CA-BA-BC-AC-AB.

### 3.6 电机调速程序设计

在程序中,电机的调速功能由 STM32 的 ADC 模块实现. ADC 输入参考电压范围为  $0\sim 3.3\text{ V}$ ,可以通过电位器改变 ADC 的输入电压,以实现电机的调速.当 ADC 采样电压为  $0\text{ V}$  时,ADC 采样值为  $0$ ;当 ADC 采样电压为  $3.3\text{ V}$  时,ADC 的采样值为  $4096$ .通过改变单片机的 PWM 输出占空比,对速度进行调节.

### 3.7 转速采集程序设计

转速通过采用光电转速传感器采集,使用 T 法测速. T 法测速通过测量两个脉冲之间的时间间隔计算转速,通过单片机的 I/O 口进行输入捕获,采集脉冲并计算电机转速后,反馈给上位机.

## 4 实验测试

在自行设计的四轮驱动轮毂电机电动汽车上进行实验测试.该车匹配的电机为外转子式永磁无刷直流轮毂电机,无刷直流电机控制器的外观,如图 6 所示.图 6 中:左边为 STM32 控制板;中间为 IR2110 的驱动模块;最右边为 MOS 管驱动电路.电机驱动控制测试平台包含驱动控制器和 PC 机和转速传感器等,如图 7 所示.



图 6 电机驱动控制器

Fig. 6 Motor drive controller



图 7 电机驱动控制测试平台

Fig. 7 Motor drive control test

将控制器、PC 机、无刷直流电机、电机驱动控制器等实物连接起来,检查线路无误后,启动 STM32,接通电动车蓄电池电源,电机空载.电机的响应曲线是由 STM32 经过串口通信传递至 PC 储存,再由 MATLAB 软件对测量数据进行拟合绘制.程序中,第一次是  $0.1\text{ s}$  后启动,将 PWM 占空比调制为  $20\%$ ;第二次则是经过  $0.1\text{ s}$ ,PWM 占空比由  $20\%$  变为  $33\%$ ,程序结果如图 8,9 所示.图 8,9 中: $n$  为电机转速; $t$  为时间.

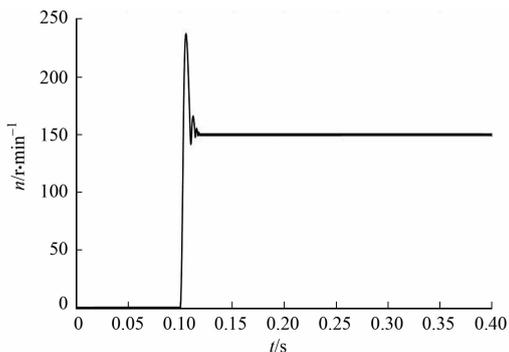


图 8 电机启动转速曲线

Fig. 8 Motor start speed curve

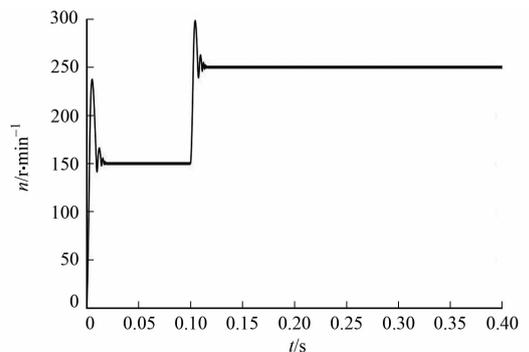


图 9 电机连续变化曲线

Fig. 9 Continuous change curve of motor

由图 8 可知:电机从零速开始启动,经过  $0.13\text{ s}$  达到稳定的给定转速  $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,电机转速响应

较快,但在达到稳定的转速前,转速波动较大.由图 9 可知:电机转速在连续变化的情况下,响应速度快,0.05 s 前就达到了  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,并且在 0.15 s 前就已经变化为  $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,响应更迅速且转速稳定、无超调.

## 5 结束语

对自制控制器进行设计与调试,通过配合 STM 32 的 I/O 口,可以实现 RS232 和 CAN 通信,方便与上位机、上层控制器进行实时通信并实时监控当前电机工作状态、转速、电流等信息.输出 PWM 在 10%~90%之间可调,并且经过增量式 PI 控制之后,电机响应迅速、转速稳定、无超调.该控制器具有集成度高、稳定性好、体积小、功能模块多等特点,能有效地改善电动车行驶稳定性及安全性.

## 参考文献:

- [1] 夏长亮,方红伟.永磁无刷直流电机及其控制[J].电工技术学报,2012,27(3):25-34. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.03.003.
- [2] 戴茵茵,林宇洲.基于 dSPACE 的横向磁通永磁电机控制[J].华侨大学学报(自然科学版),2013,34(2):147-150. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2013.02.0147.
- [3] 李刚,宗长富.四轮独立驱动轮毂电机电动汽车研究综述[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2014(1):47-52. DOI:10.15916/j.issn1674-3261.2014.01.009.
- [4] 何硕彦.基于 DSP 的电动车用无刷直流电机控制系统研究[D].南京:东南大学,2016.
- [5] 张修太,翟亚芳,赵建周.基于 STM32 的无刷直流电机控制器硬件电路设计及实验研究[J].电子器件,2018,41(1):141-144. DOI:10.3969/j.issn.1005-9490.2018.01.027.
- [6] 党璇.基于 STM32 的无刷直流电机控制系统研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2017.
- [7] 黄平,王英,江先志.基于 STM32 的直流电机模糊 PID 调速系统研究[J].机电工程 2017,34(4):380-385. DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.012.
- [8] 李有凯.基于 STM32 无刷直流电动车控制器的研究[D].南京:南京林业大学,2016.
- [9] 郑宏,张佳伟,徐文成.基于 STM32 的直流无刷电机正弦波控制系统[J].电子器件,2016,39(6):1521-1526. DOI:10.3969/j.issn.1005-9490.2016.06.046.
- [10] 刘学俊.基于 STM32 的永磁直流无刷电机的控制及其在绕线机上的应用[D].厦门:厦门大学,2014.
- [11] XIE Yong, SU Xin, HE Yifan, *et al.* STM32-based vehicle data acquisition system for Internet-of-Vehicles[C]// Ieee/acis International Conference on Computer and Information Science, Wuhan: IEEE Press, 2017: 895-898. DOI: 10.1109/ICIS.2017.7960119.
- [12] 唐帅.基于 DSP 的汽车空调中无刷直流电机控制系统研究[D].武汉:武汉工程大学,2014.
- [13] 赵伟.基于 STM32 的无刷直流电机控制系统设计[D].南京:南京信息工程大学,2016.
- [14] 马晓虹,吴延海,尹向雷.直流电机的 IR2110 驱动控制设计及 DSP 实现[J].微型机与应用,2013,32(15):34-36. DOI:10.3969/j.issn.1674-7720.2013.15.012.
- [15] 程时兵,张爱军. IR2110 在无刷直流电机驱动电路中的应用[J].机电元件,2010,30(4):28-31. DOI:10.3969/j.issn.1000-6133.2010.04.006.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)