

# 基于 STM32 的无刷直流电机控制系统研究

王 聪

(中国电子科技集团公司第四十七研究所, 沈阳 110000)

**摘 要:** 为进一步挖掘无刷直流电机的应用潜力, 通过对其结构及工作原理的研究, 设计一种基于 STM32F407 的无刷直流电机控制系统。系统的控制部分利用 STM32 内部的高级定时器产生 PWM 控制信号, 利用霍尔信号检测电机的转子位置并计算转速, 结合 PID 算法提高控制系统的鲁棒性和自适应能力。驱动部分添加了隔离电路, 能够使系统更加稳定地运行, 提高了其抗干扰的能力。基于 LABVIEW 搭建了系统的调试平台, 能够实时观测电机的运行速度, 使 PID 参数整定更加便捷。该系统成本低、性能高, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** STM32 单片机; 无刷直流电机; 高级定时器; 霍尔信号; 转子位置; PID 算法; 隔离电路

**DOI:** 10.3969/j.issn.1002-2279.2022.02.003

**中图分类号:** TP273; TM33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-2279(2022)02-0011-05

## Research on Brushless DC Motor Control System Based on STM32

WANG Cong

(The 47th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** In order to further tap the application potential of brushless DC motor, a brushless DC motor control system based on STM32F407 is designed by studying its structure and working principle. In the control part of the system, the advanced timer in STM32 is used to generate PWM control signals, and Hall signals are used to detect the rotor position of the motor and calculate the speed. Combined with PID algorithm, the robustness and adaptive ability of the control system are improved. In the part of the driver an isolation circuit is added, which can make the system run more stably and improve its anti-interference ability. The debugging platform of the system is built based on LABVIEW, which can observe the running speed of the motor in real time, and make PID parameter tuning more convenient. The system has low cost, high performance and certain engineering application value.

**Key words:** STM32; Brushless DC motor; Advanced timer; Hall signal; Rotor position; PID algorithm; Isolation circuit

## 1 引 言

电机能实现机电能量的转换, 随着科学技术的发展, 其应用遍及现代经济社会的每一个环节。在众多类型电机中, 无刷直流电机因具有较快的动态响应能力、良好的调速性能以及相对较长使用寿命, 与有刷直流电机和交流电机相比, 有着更高的使用价值<sup>[1-2]</sup>, 比如汽车制造领域用来驱动空调风机的电机。在航空航天领域, 无刷直流电机应用于陀螺仪、机械臂、高速离心泵和摄像机等设备。在家用电器领域, 日本 90% 以上的空调产品中, 异步电机被无刷直流电机所取代。此外, 无刷直流电机还应

用于 CD、VCD、DVD 机等产品中。在办公领域, 电脑、数码相机、复印机、传真机和碎纸机等产品中也应用了无刷直流电机<sup>[3]</sup>。

无刷直流电机控制系统综合了有刷直流电机和异步电机控制系统的优点。随着稀土永磁材料技术的发展和电子器件性能的提高, 无刷直流电机控制系统广泛应用于工业中, 比如医疗器械、纺织机械、印刷机械和数控机床等行业。目前很多国家的半导体厂商都开发出无刷直流电机控制专用的集成电路, 此类电路构成的控制器结构简单、外围器件少、性价比更高, 但在使用时功能不全面, 不利于产品后期的变化和升级。因此, 有必要通过软硬件结合来搭

作者简介: 王聪(1992—), 女, 辽宁省昌图县人, 硕士, 工程师, 主研方向: 微电子技术。  
收稿日期: 2022-01-05

建无刷直流电机控制系统。

## 2 系统整体方案

STM32 系列产品以其高性能低功耗的特点在嵌入式领域被广泛应用,它的高级定时器能够输出带有死区时间的三路互补 PWM 波形,恰好用以控制直流无刷电机,并且相较于 DSP,STM32 的价格更低廉,因此设计基于 STM32F407 进行。

### 2.1 系统构成

控制无刷直流电机的一般步骤是:控制器通过霍尔传感器反馈的信号判断电机转子当前所在的位置,以此控制三相桥驱动电路中开关管的通断。开关管通断的连续变化使电机内形成变化的磁场,带动转子转动<sup>[4]</sup>。同时,控制器还要通过调节 PWM 占空比来调节电机的转速,使电机按特定的转速旋转。整体系统框图如图 1 所示。

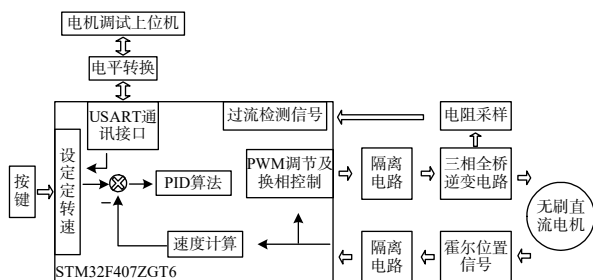


图 1 系统框图

系统在工作时,由 STM32F407 发出 6 路 PWM 信号,经过隔离器件传输给由 IR2110S 构成的驱动电路。驱动电路根据 PWM 信号控制 6 个开关管的通断,形成旋转磁场,使电机转动。霍尔传感器的反馈信号通过隔离芯片传递给 STM32,供其判断转子位置,从而实施换向操作。此外 STM32 还可通过霍尔信号计算转速,然后将实际转速与设定转速对

比,通过 PID 控制算法调节 PWM 的占空比,亦即调节转速,最终使电机按设定转速旋转<sup>[5-6]</sup>。键盘电路通过按键可控制电机的启动、停止、加速、减速和正反转。上位机也可控制电机的启停,还能给定速度值和 PID 值,同时显示实际转速的变化曲线,方便 PID 参数的整定。

在实际应用中,电机要按照需要的速度稳定运行,并且速度调节过程应该迅速而平稳,这在开环系统中是无法实现的,因此需采取运动控制系统常用的 PID 控制算法对速度进行闭环控制。PID 控制就是对偏差进行比例、积分、微分控制,也就是误差控制。比例部分(P)用于缩小实际转速与目标转速的偏差,P 越大偏差降低越快,但是为了避免系统振荡,P 的取值不能过大。积分部分(I)是对速度偏差的累加,直到偏差为 0,积分结果为常数,控制作用稳定,因此积分部分可以消除系统的静差。微分部分(D)可以根据偏差的变化趋势超前调节,减小系统的振荡,使系统趋于稳定。

### 2.2 系统仿真

在搭建硬件电路前,需要首先基于 MATLAB 应用的 SIMULINK 工具箱搭建上述控制系统的仿真模型,通过仿真结果评估该方法的有效性<sup>[7-8]</sup>。电机本体模型是在永磁同步电机模型的基础上搭建的,将其反电动势设为 120V,其它参数相应修改。由于永磁同步电机没有位置传感器,所以额外搭建了霍尔信号模块和换相信号模块。三相桥电路的触发信号亦即 PWM 信号由换相信号和速度信号共同决定。其中速度信号采取了 PID 闭环控制,即通过对速度的设定值和反馈值的差值进行比例、积分、微分控制,实现速度的闭环控制。图 2 为直流无刷电机 PID 控制系统仿真模型;图 3 为对应的速度变化曲线。

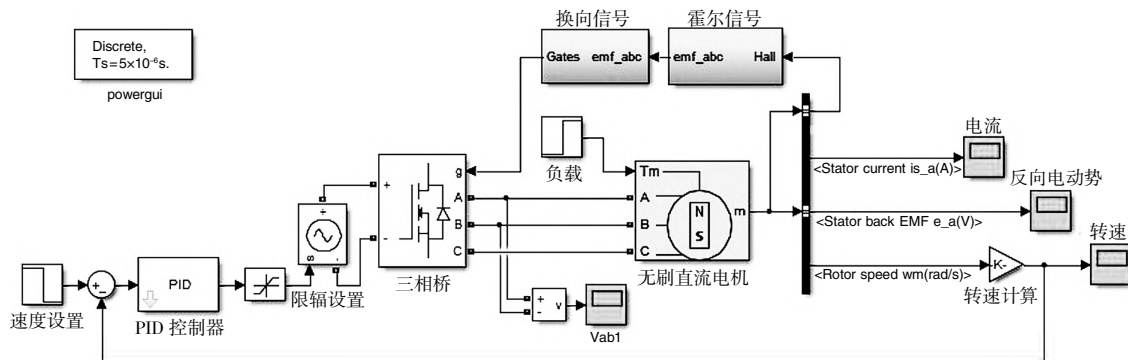


图 2 直流无刷电机 PID 控制系统仿真模型

图 3 中电机空载时初始转速设为 1000 r/min,启动后速度迅速从 0 上升至 1000 r/min,耗时不足 1 s。

在 5 秒处将速度的设定值调整为 600 r/min,电机转速又迅速而平滑的下降为 600 r/min,可见该控制系

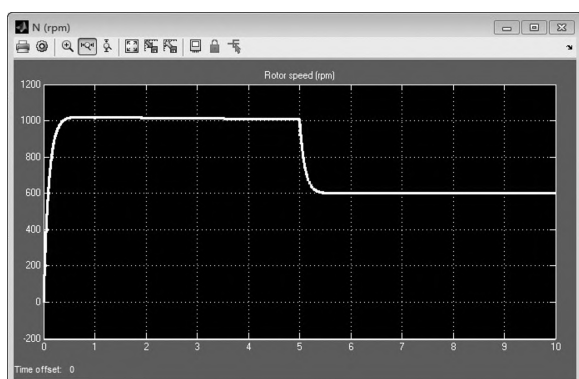


图3 速度变化曲线

统性能良好,静态、动态特性都较为理想。

### 3 硬件电路设计

#### 3.1 驱动电路设计

驱动电路由 3 只 IR2110S 和三相全桥逆变电路构成,IR2110S 内部有自举悬浮电路,具有欠压保护功能,并设有外部保护端口,可以外加电路实现过流保护的功能。这种设计在中小功率变换装置中被广泛应用,此处也选取 IR2110S 搭建无刷直流电机控制系统。由于每片 IR2110S 的外围电路相同,此处只给出其中一只 IR2110S 及其外围电路的原理图,如图 4 所示。

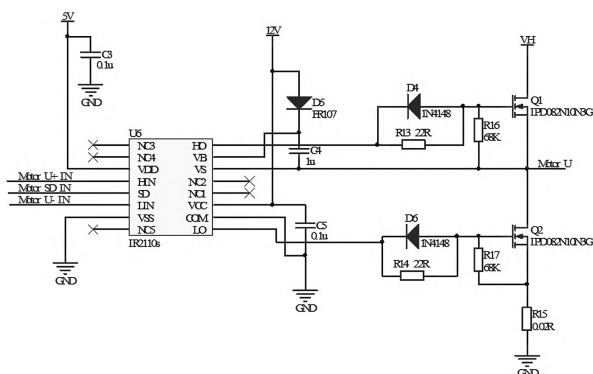


图4 驱动电路(局部)

三相全桥电路的母线电压为 24V,IR2110S 的工作电压是 10V~20V,将其引脚 VCC 连接至 12V 电源;VDD 连接 5V 电源;VB 与 VS 之间连接自举电容 C4;VCC 通过二极管向自举电容充电,其储存的能量用来确保 MOSFET 稳定导通。VCC 和 VDD 分别对地连接旁路电容 C3 和 C5。STM32 产生出的 PWM 信号通过光耦隔离芯片传输给 HIN 和 LIN,然后经由引脚 HO 和 LO 输出到 MOSFET,以控制其通断。电阻 R13 和 R14 可以调节 MOSFET 的开通速度,一般阻值较小。R16、R17 为 MOS 管 Q1、Q2 的下拉电阻,防止在静电作用下由于电荷没有释放回

路引起 MOS 管击穿,同时还能避免上电时产生的不受控漏极电流引起烧管。D1 和 D2 是续流二极管,能使 MOSFET 快速关断。

#### 3.2 位置检测电路

直流无刷电机内部集成 3 只间隔 120°电角度的霍尔传感器,即 120 度电机。电机转动时 STM32 根据收到的霍尔信号产生对应的 PWM 信号控制 MOSFET 的通断。

位置检测电路如图 5 所示。其中,HU、HV、HW 为霍尔传感器反馈的信号,VCC 连接 5V 电源为位置检测电路供电。当霍尔信号为低电平时,以 U1 为例,5V 电源通过 R2 和 D1 产生电流,使得光耦输出端为低电平。当霍尔信号为高电平时,光耦输出端被 R1 上拉为高电平。这样霍尔信号就通过光耦传送给 STM32,用来控制电机换向的同时还能用以计算电机的转速。

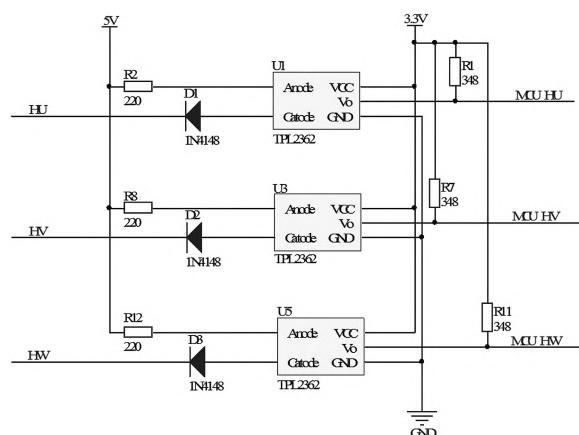


图5 位置检测电路

#### 3.3 过流保护电路

为了避免过流导致控制系统损坏,设计加入了过流保护电路,其设计原理图如图 6 所示。

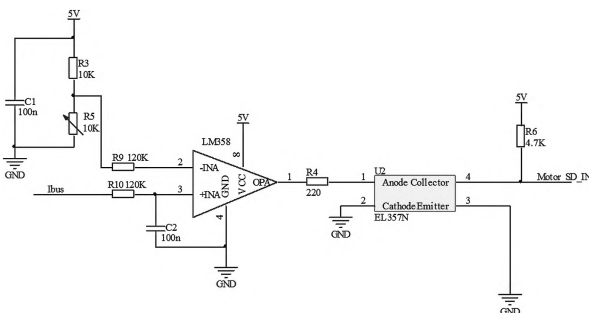


图6 过流保护电路

过流保护电路的工作原理是把系统的最大允许电流通过三相桥电路上的采样电阻 R15 折算成电压值,将其作为比较器反相输入端的阈值;电路的实际阈值通过分压电阻 R5 调节得到,另一端直接从

采样电阻获取电压值。当发生过流情况时,比较器输出高电平,经光耦隔离芯片传送给 IR2110S 的 SD 控制引脚,立即停止控制信号的输出。

## 4 系统软件设计

系统选取 STM32F407IGT6 作为控制芯片,并在 Keil  $\mu$ Vision5 中编写了无刷直流电机 PID 控制程序。系统的软件主要由主程序和中断程序构成。

### 4.1 主程序设计

系统的主程序包括所有模块的初始化,如系统时钟初始化、HAL 库初始化、GPIO 初始化、上位机通讯协议初始化、调试串口初始化、电机初始化和目标速度初始化函数。主程序按照顺序从上至下执行,遇到中断则进入中断,中断结束回到主程序继续执行。主程序流程图如图 7 所示。

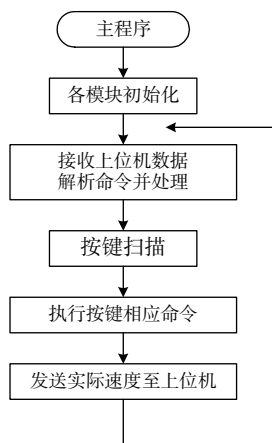


图 7 主程序流程图

### 4.2 中断程序设计

电机控制系统的转速调节、堵转保护等功能都通过中断程序实现。因此,中断程序主要包括霍尔信号获取中断、系统保护中断等。核心控制功能的中断流程图如图 8 所示。

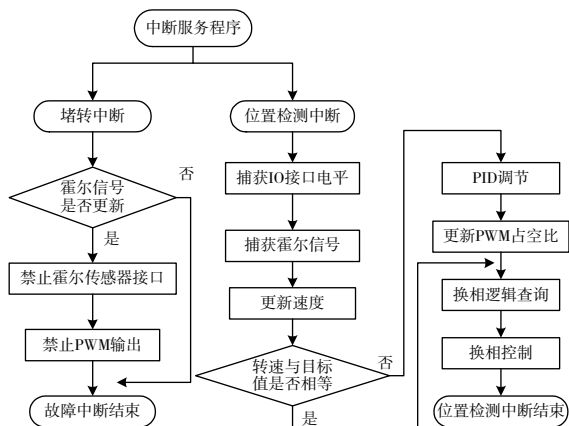


图 8 核心控制功能中断流程图

霍尔信号获取中断程序,主要实现的是在霍尔信号发生改变时控制电机换相的功能,系统保护中断程序主要实现的则是在系统堵转故障发生时关闭控制信号的功能。

## 5 上位机调试软件设计

上位机调试软件是电机控制系统中不可或缺的一部分<sup>[9]</sup>,此处基于 LABVIEW 搭建直流无刷电机调试软件。它能够监测电机的运行状态,尤其是系统开发初期,该软件还能辅助程序调试。PID 算法的参数整定是一个耗时较多的过程,如果每次调参都编译程序耗时更长,而通过搭建的电机调试助手则可以实时调参,能提高系统调试的效率。

### 5.1 调试软件程序设计

在 LABVIEW 中基于 VISA 驱动,结合状态机的方法应用属性节点搭建无刷直流电机控制系统的上位机调试软件。主要用其经过串口发送特定的命令,如启动、停止、复位;此外,还能够实时显示电机的速度曲线,并能在系统运行的条件下修改系统参数,如速度的目标值,PID 闭环控制算法的比例 P、积分 I、微分 D 的参数,以及高级定时器的更新周期。上位机软件流程图如图 9 所示。

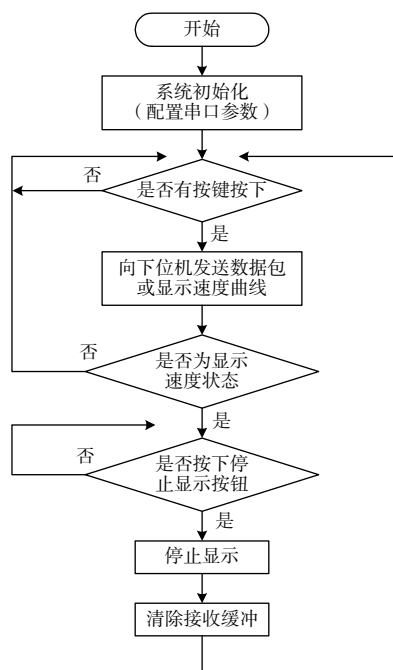


图 9 上位机软件流程

### 5.2 实验结果

实验选用的电机型号为 57BL75S10,其额定功率 100 W,最高转速 2500 r/min。在 Keil 环境下将 C 语言程序通过下载器烧录到 STM32 中,启动系统

电机运行,速度值通过串口输出到上位机显示为速度曲线。上位机软件运行界面如图 10 所示。实验结果表明,空载时电机速度曲线与仿真结果一致。

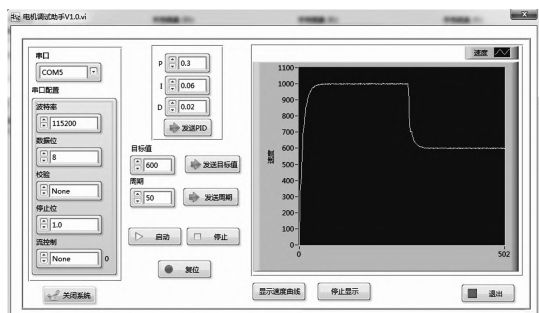


图 10 上位机软件运行界面

## 6 结 束 语

以 STM32F407IGT6 为核心设计了一种无刷直流电机控制系统。与采取 DSP 设计的控制系统相比,外围电路简单、成本低。与采取 8/16 位微控制器设计的系统相比,该系统的控制精度更高。系统还可实时地显示电机运行状态并能够现场调参,极大提高了便利性与经济性,具有较大的工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] SIDHARTHAN P V, KASHYAP Y. Brushless DC hub motor drive control for electric vehicle applications[C]//2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies(ICPC2T), January 3–5, 2020, National Institute of Technology, Raipur, India. Piscataway, NJ:IEEE, 2020: 448–453.
- [2] JEDDI N, AMRAOUI L E, TADEO F. Modelling and simulation of a BLDC motor speed control system for electric vehicles[J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2016, 8(2):178–194.
- [3] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [4] 尹航. 基于 DSP 的无刷直流电机矢量科学系统的研究与设计[D]. 南京:南京邮电大学, 2014.
- [5] YIN Hang. Research and design of BLDCM vector control system based on DSP[D]. Nanjing:Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [6] HAZARI M R, JAHAN E, SIRAJ M E, et al. Design of a brushless DC(BLDC) motor controller[C]//2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, April 10–12, 2014, Military Institute of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh. Piscataway, NJ:IEEE, 2014:182 1–6.
- [7] RAMACHANDRAN R, GANESHAPERUMAL D, SUBATHRA B. Closed-loop control of BLDC motor in electric vehicle applications[C]//2019 IEEE International Conference on Clean Energy and Energy Efficient Electronics Circuit for Sustainable Development(INCCES), December 18–20, 2019, Kalasalingam Academy of Research and Education, Tamil Nadu, India. Piscataway, NJ:IEEE, 2019:169–174.
- [8] 杨晓玫, 彭程, 吴高峰, 等. 基于 MATLAB 的无刷直流电机控制算法建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2019, 15(2):120–125.
- [9] YANG Xiaomei, PENG Cheng, WU Gaofeng, et al. Modeling and simulation of brushless DC motor control algorithm based on MATLAB[J]. System Simulation Technology, 2019, 15(2): 120–125.
- [10] WEN Xiang, LI Zhenqiang. Brushless DC motor speed control strategy of simulation research[J]. MATEC Web of Conferences. 2017, 139(2):00172 1–6.
- [11] 董梦娇. 基于 LabVIEW 的实验室仪器远程控制管理系统[D]. 济南:山东大学, 2019.
- [12] DONG Mengjiao. Remote control and management system of laboratory instrument based on LabVIEW[D]. Jinan:Shandong University, 2019.