



DOI: 10.16257/j.cnki.1681-1070.2020.0305

一种基于BLDC电机的矢量控制电路设计

耿 永, 王贤会

(中科芯集成电路有限公司, 江苏 无锡 214072)

摘 要: 以CKS 32为主控芯片, 研制了一种基于直流无刷电机(BLDC)的控制系统。该系统主要功能模块包括三相驱动系统、电流采样系统、保护系统和电源系统。传统采集三相电流的方式是三电阻采样和霍尔传感器采样, 为进一步节省成本, 提出一种基于MOS管内阻采样三相电流的方法。测试结果表明, 该设计方案具有良好的性能。

关键词: CKS 32; 直流无刷电机; 矢量控制器; 电源

中图分类号: TM33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1681-1070 (2020) 03-030303

中文引用格式: 耿永, 王贤会. 一种基于BLDC电机的矢量控制电路设计[J]. 电子与封装, 2020, 20(3): 030303.

英文引用格式: GENG Yong, WANG Xianhui. Design of controller system based on BLDC motor [J]. Electronics & Packaging, 2020, 20(3): 030303.

Design of Controller System Based on BLDC Motor

GENG Yong, WANG Xianhui

(China Key System & Integrated Circuit Co., Ltd., Wuxi 214072, China)

Abstract: Based on the CKS 32 as the controller chip, this paper designs a control system for Brushless DC Motor. The main functions of this system are three phase drive system, current sampling system protection system, power system. The traditional way of sampling three-phase current is three resistance sampling and Hall sensor sampling. In order to save cost, a method for sampling three-phase current was especially proposed which is based on internal resistance of MOS. The test results showed that this design has good performance.

Keywords: CKS 32; brushless DC motor; FOC controller; power supply

1 引言

永磁无刷直流电机在结构上采用无换向器、转子永磁体和电枢绕组的设计方式, 无励磁损耗, 具有电机能量密度和效率高、输出扭矩大、可靠性高等

优点^[1]。当下直流无刷电机(BLDC)已经成为主流的车用电机, 既有交流电机运行可靠的优点, 又有传统有刷直流电机的优越调速性能^[2], 广泛应用于汽车、工具、工业工控、自动化以及航空航天等领域。而直流无刷电机优异的性能要依靠控制器实现, 控制器就像系统的大脑, 控制电机的启动、停止、正传、

收稿日期: 2019-11-22

E-mail: gengyong_sir@163.com

反转等。控制器主要包括电源电路、开关逆变电路、无刷直流电机转子位置检测电路、转把检测电路、电流检测、过流保护电路和 MCU 部分^[3]。

本文提出了一种基于 BLDC 的电动车用控制器硬件电路设计方案,所使用的主控芯片是 CKS32F103C8T6,该芯片集成了丰富的外设,并为电机控制提供了接口优化。三相电流采样使用 MOS 管内阻采样电流。试验表明,结合硬件电路设计和矢量控制软件算法,实现了电机的控制,通过测功机测试,结果表明该方案具有良好的性能,可广泛应用于控制水泵、平衡车、割草机、电动自行车等领域。

2 BLDC控制器硬件结构设计

无刷直流电机控制器通过不断检测转子的位置信号来控制功率开关管按照一定的规律和方法导通或者关断^[4]。

控制器控制电路主要包括 MCU 部分、电源电路、电机驱动电路、霍尔检测电路、转把检测电路、电流检测、相线电压检测及过流保护电路。图 1 是电路系统总体结构。

从图 1 可以看出,直流电源对系统进行供电,经过开关电源转换成电路和芯片所需要的 15 V、5 V、

3.3 V 等。主控芯片接收到外部来的输入信号,经过处理给驱动电路输出信号,控制驱动电路通断,从而控制逆变电路各开关管的导通,进而控制电机的运转。逆变电路可将直流输入电源逆变成电机所需的三相交流电。霍尔位置检测可有效获取电机转动位置,达到精确控制。反电动势和电流的检测可有效控制电路的稳定性和安全性,更好地保护电路。整个电路达到了对电机的有效控制。

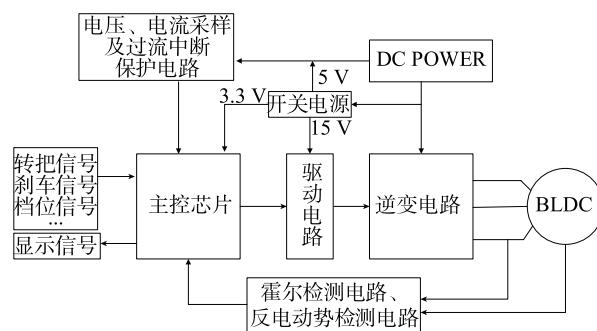


图1 电路系统总体结构

2.1 MCU系统

本文所采用的 MCU 是 CKS32F103C8T6 芯片,外接 3.3 V 电源,采用内部 8 MHz 晶振提供主频,图 2 是芯片电路原理图。

CKSF103C8T6 芯片是由中科芯集成电路有限公司自主研发的高性能 MCU。该芯片主要特点如下。

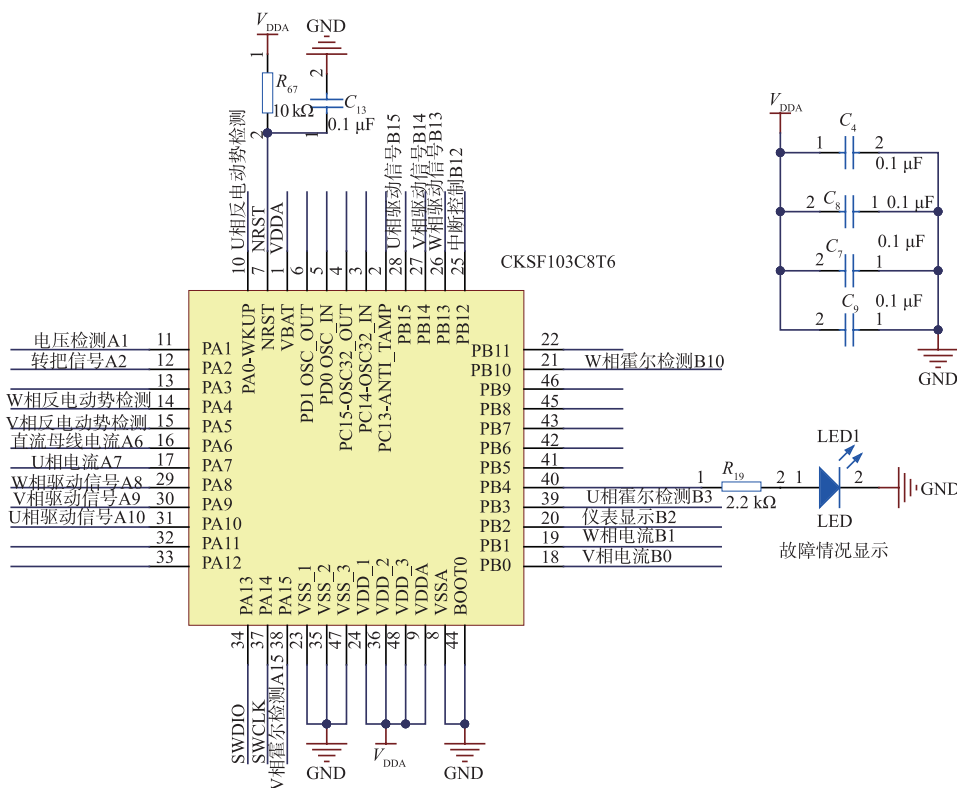


图2 MCU电路

(1) 完善的程序保护 :多重、多样化保护机制,自定义分级读写保护 ;

(2)低功耗 提供停止、睡眠、闲置等工作模式；

(3) 定制化开发：专用芯片研发，裸芯提供，SiP 技术支持。

在设计过程中,为了提高电路的抗干扰能力,同时防止电源的耦合噪声对电路的影响,需要在电源和地之间接 $0.1\ \mu\text{F}$ 的滤波去耦电容。

2.2 驱动系统设计

电机驱动电路主要包括 MOS 管 U、V、W 三相全桥电路和三极管驱动电路，三相电路原理图一致，其中一相电路原理图如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 电路中上桥臂的 MOS 管 V1、V2 的漏极即 D 极直接与直流母线电压 D+ 相接,

下桥臂的 MOS 管 V3、V4 的源极即 S 极接地，因此必须保证上下桥臂不能同时导通。MOS 驱动电阻为 E1、W1 等，具体参数调整需参考 MOS 型号。

上桥臂驱动电路工作原理分析：

当 U 相驱动信号 A10 为低电平时, 三极管 Q11 导通, 导通发射极和基极导通压降为 0.3 V, 发射极电流 $I_{e}=3.27 \text{ mA}$, $I_{e}=1 \text{ mA}$; 三极管 Q20 发射极基极压降为 1 V, 三极管导通, Q21 基极电压大于发射极电压, 处于截止状态; 此时 MOS 管 V1、V2 导通。

当 U 相驱动信号 A10 为高电平时, 三极管 Q11 截止, 集电极电流为 0 ; 则三极管 Q20 发射极和基极压降为 0, Q20 截止 ; Q21 基极电压下拉为 0, Q21 管导通, MOS 管 V1、V2 门极电压为 0, V1、V2 关闭。

下桥臂的MOS管驱动原理同上桥臂MOS管类似。

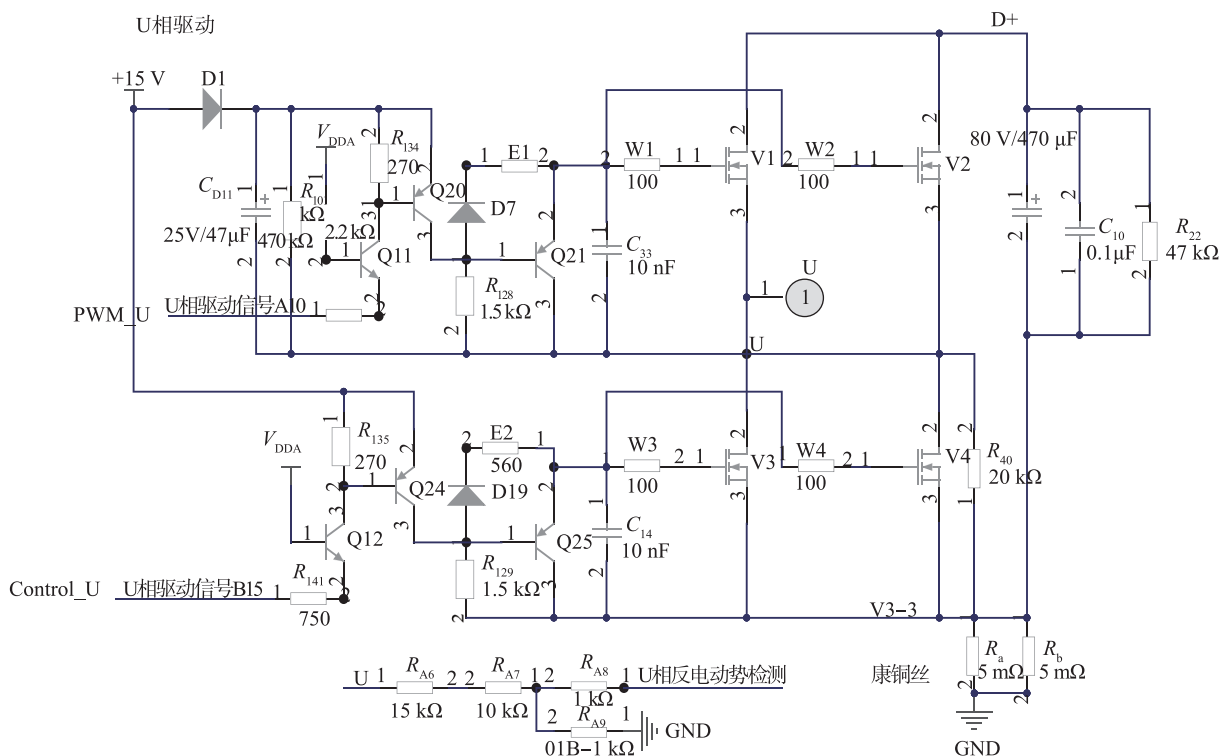


图3 电机U相驱动电路

电路中, C_{D11} 为自举电容, 上电时单片机会使下管导通很短时间, C_{D11} 通过下 MOS 管进行充电。

C_{10} 和 R_{22} 构成母线吸收电容, 当 MOS 开通和关断的时候会产生尖峰电压, C_{10} 和 R_{95} 可以吸收此尖峰电压。

R_a 和 R_b 为采样电阻 (常用康铜丝), 用于采样电路电流, 进行电路限流设计。

2.3 电源系统结构设计

电源系统是控制器不可或缺的部分，是整个系统的“心脏”，它为电路提供动能输出。完善的电源电路设计是系统能够高性能运转的重中之重^[5]。

2.3.1 防反接电路设计

在常用控制器设计过程中,一般直接接入线性电源,没有正负反接保护功能,易造成正负反接短路。为了保证供电安全,本设计加入了正负反接保护电路,如图4所示。

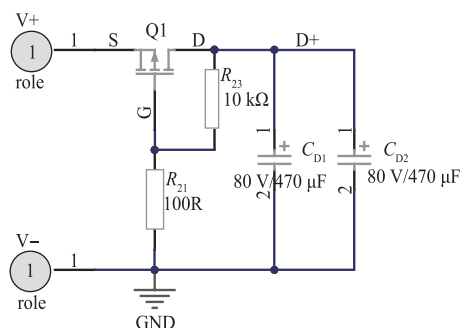


图4 电源防反接电路

采用P型MOS管,P型MOS管导通条件为栅极与源极之间电压 V_{GS} 为负值,并且电压绝对值大于最低开启电压。而在输入电源正负反接时,栅极与源极之间电压 V_{GS} 为正值,P型MOS管截止关断,电路电源不导通,从而保护了整体电路。

2.3.2 电压检测电路设计

电路设有电压检测电路,其原理图如图5所示。

电压检测分欠压检测和过压检测两部分。图中 R_{10} 、 R_{26} 、 R_{18} 为分压电阻。欠压检测是在蓄电池电量过低导致电压下降的情况下检测低压状态,并中断电源输出,保护蓄电池。过压检测在使用直流稳压电源时使用,用来检测直流稳压电源的输入电压是否超过系统可承受电压,检测高压状态,中断电源输出,保护电路中电容和MOS管等器件,保证电路正常运转。

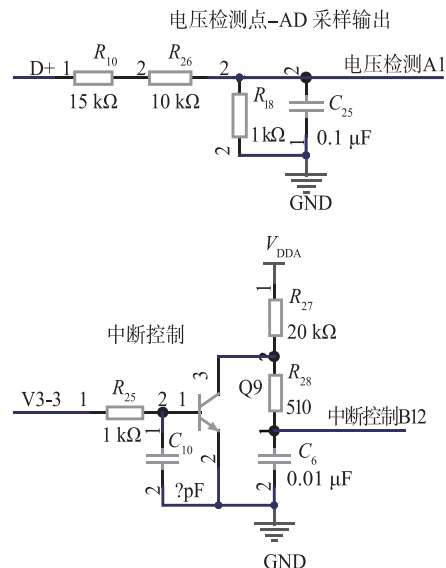


图5 电源电压检测电路

2.3.3 开关电源设计

常规控制器一般使用直接降压式线性电源,此电源应用于不同功率控制器,需要调整降压电阻和电源IC芯片,以适应不同功率控制器的电源输出要求。另外线性电源对电源IC要求较高,且降压电阻和电源IC等器件发热严重,效率较低。静态工作下,耗电过大,不够节能。为了改善这一问题,采用开关型电源代替线性电源,发热问题得到解决,转换效率较高,静态工作下耗电小。其电路结构图如图6所示。

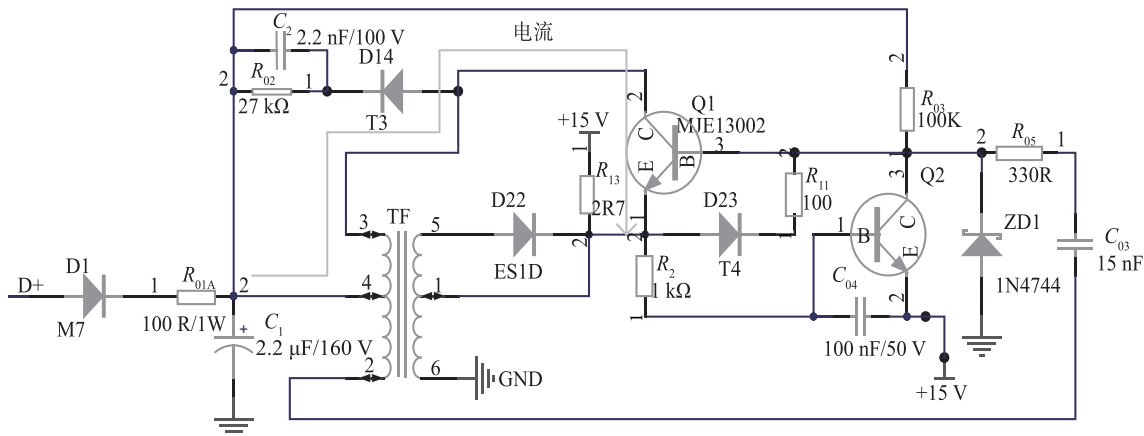


图6 开关电源硬件电路

此开关电源主要是用交变的电流产生变化的磁场。此方案主要元器件为变压器和开关三极管。 R_{01A} 为限流电阻,也可起到电源保险丝的作用。 C_1 为电源主电容。电流从变压器的4脚流入,3脚流出,Q1作为开关,使原本的直流电变成忽大忽小的电流,从而在变压器3、4端产生变化的磁场,3、4端变化的磁场在1、2绕组和5、6绕组间产生互感电压。1、

2绕组产生的电压通过 C_{03} 和 R_{05} 组成充放电电路,主要是给三极管Q1提供开启和关闭的基极电压。5、6绕组为输出绕组,也是我们想得到的电压。ZD1为15V稳压管,确保Q1的基极电压为15V。此电路还具备过流保护电路,Q2为过流保护二极管, R_{13} 为电流采样电阻,当流经 R_{13} 电阻的电流过大时,Q2将导通,将Q1关闭,从而起到电路保护作用。

2.4 电流检测电路设计

电流检测和过流保护电路主要有两种,一种是直接利用电阻分压法测电流并通过三极管电路充当过流保护电路,另一种是利用运放测电流并通过比较器实现过流保护的目[2];母线电流采用电阻采样法,其电路图如图7所示。

如图7所示,它将康铜丝制的采样电阻 R_a 和 R_b 采样过来的电流信号经过放大器进行放大处理,并将放大后的信号送入单片机。单片机对其进行相应分析处理,从而保证电路运行。

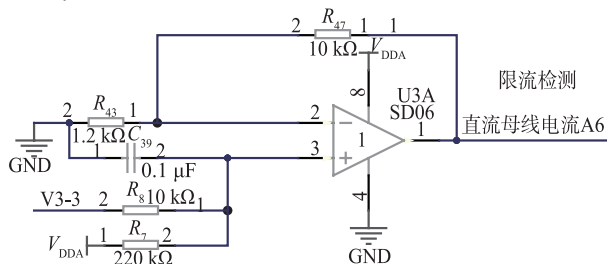
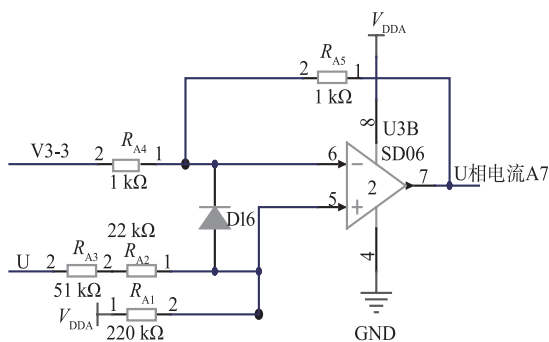
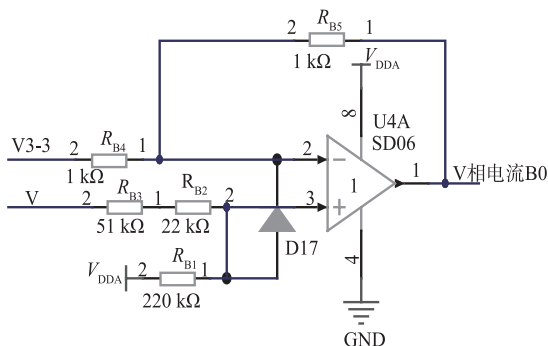


图7 母线电流检测电路

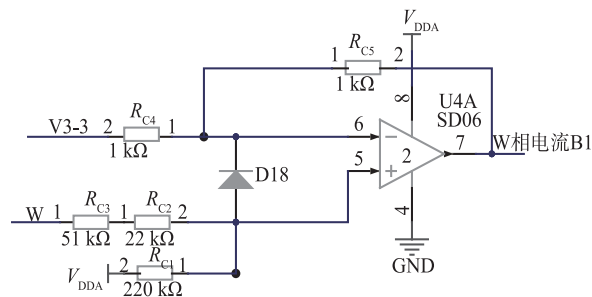
为了达到对电机的高性能控制,采用矢量控制、电流闭环方案,保证电机性能以最佳的扭矩进行高性能运转。图8为三相电流反馈电路的运放电路。



(a) U相电流反馈



(b) V相电流反馈



(c) W相电流反馈

图8 三相电流反馈电路

三相电流采用MOS管内阻采样方式,通过图8三相电流反馈电路的运放电路将采集的信号传送到主控,MOS管采用SKD502T,该MOS管导通内阻为 $4.6\text{ m}\Omega$,在高温下,MOS管内阻会少许增大,导致反馈电流增大,而真实的反馈电流较小,有利于保护控制器。

2.5 霍尔位置信号检测电路

转子位置信号检测采用位置传感器,霍尔位置传感器采用 60° 接法或 120° 接法,获取电机转子的相位,误差在 $-30^\circ\sim+30^\circ$ 之间。电路原理图见图9。

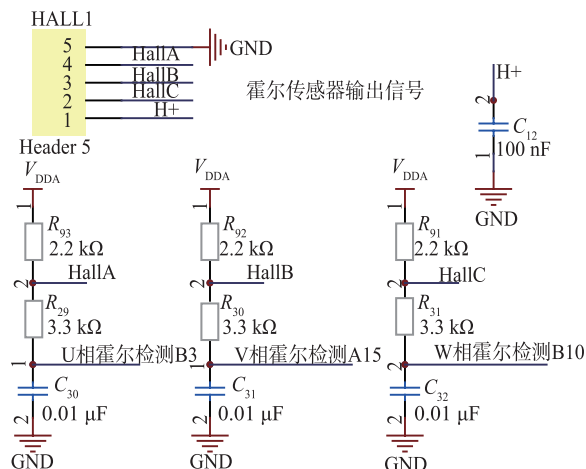


图9 霍尔位置检测电路

位置传感器获取的相位信号是一种开关量,并送入单片机进行相应处理,从而判断当前霍尔位置,从而对相应的相线进行驱动,使电机正常连续运转。图10是霍尔位置波形图。

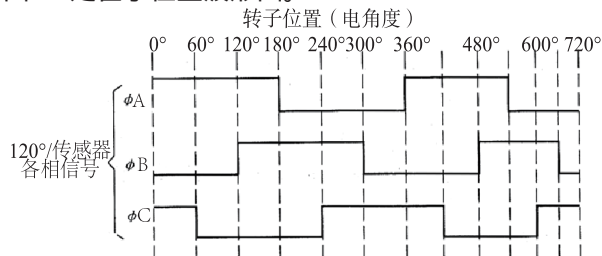


图10 霍尔位置波形图

霍尔位置传感器是一种常见的霍尔位置检测方法。为了获得精确的霍尔相位角度,可采用磁电编码器来捕获霍尔的每一个角度,进行位置检测。它是一种模拟量,可获得连续的物理量,从而提高对霍尔角度的明确控制。

3 实验测试与分析

在实验测试中采用 CKSF103C8T6 单片机为核心,设计制作了 BLDC 电机控制器,电动车用无刷直流电机为实验对象进行相关实验^[6]。实验平台如图 11 所示。



图11 BLDC控制器

(1) MOS 管驱动信号检测:使用示波器对电路驱动部分的信号进行捕捉,从而得到 MOS 管开关的 PWM 波,如图 12 所示。

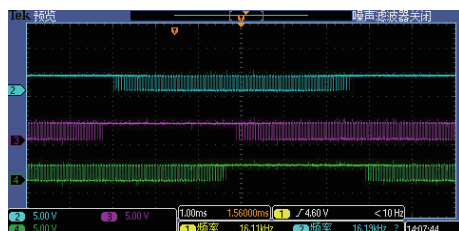


图12 驱动信号波形

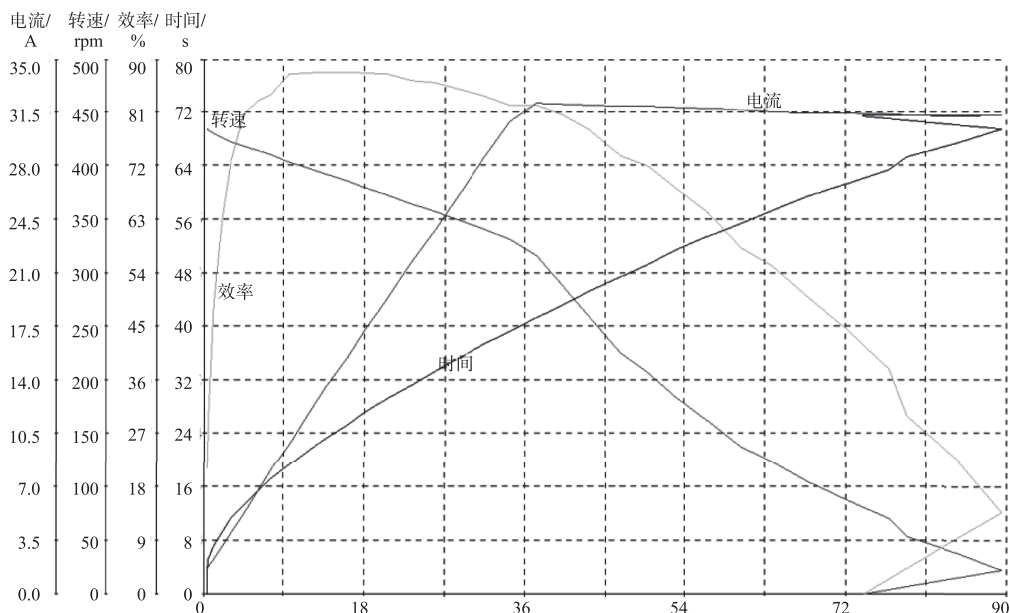


图15 BLDC与控制器测功曲线

图 12 是三相电路各上桥臂的驱动信号,它是一种典型的 FOC 驱动波形,低电平有效,符合驱动电路 MOS 管导通原理,通过这种波形可以拟合输出完整的正弦信号波形。

(2) BLDC 电机相线电压波形如图 13 所示,结果表明,电机稳定运行,达到控制效果。

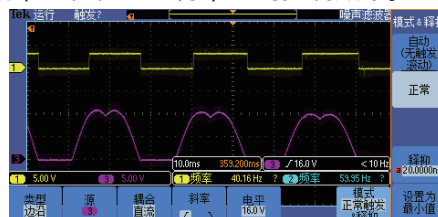


图13 相线电压波形图

(3) 霍尔与反电动势的相位关系如图 14 所示。

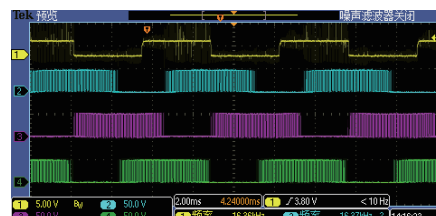


图14 霍尔与反电动势的相位关系

从图 14 可以看出,反电动势是一种马鞍波,随着霍尔位置的转换而变化。在电机加速时,电机所产生的磁场增大,反电动势峰值相对较大,随着电机速度下降,马鞍波峰值逐渐减小。同时通过各相反电动势检测过零点的方法,获得三相电机所需的 6 个转子位置信号,来确保电机可靠启动。

(4) 实验测功曲线图如图 15 所示。

从图 15 中可以看出，在电机正常运转中，电流曲线没有过大波动，较为平整，效率曲线也较为平滑，运行状态性能较高。实验结果表明，BLDC 电机运行稳定，满足电机控制效果。相关数据参见表 1。

表1 曲线数据特征

特征点	电压 /V	电流 /A	输入 功率 /W	转矩 /N·m	转速 /rpm	输出 功率 /W	效率 /%	时间 /s
不加载点 (No_Load)	48.00	1.584	76.05	0.4	433.9	15.99	21.0	0.000
最高效率点 (E_{η_max})	47.57	15.33	729.4	15.9	385.8	640.5	87.8	25.16
最大输出 功率点 (P_{out_max})	47.03	32.11	1510	37.4	316.1	1239	82.1	41.26
最大转矩点 ($Torque_{max}$)	47.05	31.34	1474	89.6	21.5	201.8	13.7	69.44
结束点 (End)	47.05	31.33	1474	74.1	0	0	0	71.45

从表 1 中可以看出，控制器电源使用 48 V 直流输入，最高效率可达 87.8%。控制器整体性能较高，从而验证了硬件结构的准确性和实用性。

4 结 论

本文主要介绍了一种车用 BLDC 电机控制电路的设计，通过实验表明，该方案有较好的控制性能，能满足 BLDC 电机控制器的需求，只需增减 MOS 管个数配置和修改相应的软件程序即可用于不同功率的电机，具有良好的扩展性，可适应于各种中小功率无刷直流电机方案设计，可广泛应用于工业、农业灌溉、电动工具等领域。由于三相电流采用 MOS 管内阻采

样的方式，三相电流的采集容易受到 MOS 管开关的影响，需要规避 MOS 管开关时间段，所以真实可采集稳定电流的区域较少，在重载情况下，电压利用率可能不高，下一步将研究在此基础上提高转矩电流比（MTPA）^[6]，提高重载情况下的控制器性能；对比其他控制器，该设计利用了新型开关电源，更具保护作用；且设有电压检测电路，MOS 管的可靠性变得更高，不会轻易受到高压冲击而出现损坏现象。后续将对磁电编码器进行霍尔位置检测的方法进行深入研究。

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．
[2]徐新国，陈军峰．电动车无刷直流电机控制器系统研究[J]．电子世界，2016（10）：85-85．
[3]徐方建，孙瑜．一种电动车无刷直流电机控制电路的研究设计[J]．工业控制计算机，2014，27（11）：130-131．
[4]胡伯生，孙瑜．一种电动自行车控制器程序架构设计[J]．工业控制计算机，2015，28（10）：131-132，134．
[5]张浩．电动汽车电机控制器的电源完整性分析[J]．电子与封装，2019，19（2）：42-44．
[6]支强，尧骏，张晓飞．基于转速估计的永磁同步电机 MTPA控制[J]．电子与封装，2019，19（7）：29-32．



作者简介：
耿 永（1991—），男，江苏徐州人，本科，硬件工程师，现从事电机控制硬件设计。