

基于 TI C2000 系列 DSP 的无刷直流电机 无位置传感器驱动控制系统设计^{*}

傅贵武, 王宇华

(佛山科学技术学院 机电工程学院, 广东 佛山 528000)

摘要: 叙述了从传统的有刷直流电机到当前被广泛应用的无刷直流电机 (BLDCM) 发展的巨大进步, 同时也分析了 BLDCM 传统控制系统存在的问题与不足, 并基于 TI C2000 系列数字信号处理器 (DSP) 芯片及 DRV8301 前置驱动器芯片设计了一套解决这些问题与不足的 BLDCM 无位置传感器驱动控制系统。给出了该控制系统主要电路设计及主程序流程。该方案相较于传统控制系统方案具有运行稳定性好、控制性能优越、成本低、体积小、易于使用等诸多优点。

关键词: 无刷直流电机; 数字信号处理器; 电机驱动; 传感器

中图分类号: TM 33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)07-0082-07

Design of Brushless DC Motor Sensorless Drive Control System Based on TI C2000 Series DSP^{*}

FU Guiwu, WANG Yuhua

(School of Mechatronics Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: The great progress in the development of brushless DC motor (BLDCM) from the traditional brush DC motor to the widely used BLDCM was described. Based on the TI C2000 series digital signal processing (DSP) chip and DRV8301 front-drive chip, a set of BLDCM sensorless drive control system to solve these problems and deficiencies was designed, and the main circuit design and main program flow were given. This control system scheme had many advantages such as good operation stability, superior control performance, low cost, small volume, and easy to use compared with the traditional control system scheme.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); digital signal processing (DSP); motor drive; sensor

0 引言

无刷直流电机 (BLDCM)^[1] 是一种新型机电一体化直流电机, 是现代电子技术 (包括电力电子和微电子技术)、控制理论和电机技术相结合的产物。不同于采用机械换向的传统有刷直流电机, BLDCM 采用电子换向技术, 具有运行效率高、安全可靠、噪声低、散热性能好、体积小、寿命长、控制灵活等一系列优点, 广泛应用于工业控制、医疗设备、汽车电子、家用电器、计算机数码设备等领域^[2]。

BLDCM 传统控制电路多采用单片机作为主控制器, 但单片机运算速度较慢, 难以实现复杂的电机控制算法, 其控制系统的运行稳定性、精度等不足以满足使用者对其的性能要求。随着半导体电子技术的迅速发展, 数字信号处理器 (DSP)^[3] 逐渐应用于电机控制领域, 使得实现高精度的信号处理、复杂的非线性控制算法成为可能, 促进了电机控制技术的发展。专门用于运动控制的数字信号处理芯片不仅运算速度快, 而且还集成了大量的专用外设功能, 包括模数转换 (ADC)、脉宽调制 (PWM) 波形输出、电平捕获 (CAP) 等, 降低

^{*} 基金项目: 广东省省级科技计划项目 (2015B010101014)

作者简介: 傅贵武 (1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为机电控制工程。

了电机控制系统的电路复杂度,对于提高电机控制系统性能、加快控制系统开发有着重大意义。

本文基于 TI C2000 系列 DSP 的 BLDCM 无位置传感器驱动控制系统的设计,可供同行们参考。

1 电机控制原理

在电机控制系统中,转子位置检测是非常重要的一个环节。传统 BLDCM 控制系统在电机安装有转子位置传感器以检测转子位置,常见的有霍尔传感器和光电编码器^[4]。由于传感器方案增加了传感器及其周围电路、连接件等,使得电机控制器体积增大,成本上升,且传感器的精度限制了电机的控制性能,为降低电机控制系统成本,故无位置传感器控制方案应运而生。常用无位置传感器转子位置信号获取方法有:磁链观测法、反电动势过零检测法、反电动势 3 次谐波积分法、续流二极管法等^[5-6]。

无位置传感器转子位置检测方案的软件通常较为复杂。为了简化、加速电机控制系统开发,TI (德州仪器)在其部分型号 DSP 芯片中固化了 FAST 估计器。FAST 软件估计器只需检测电机三相电压、电流以及母线电压共 7 个电参数即可得到精度较高的电机 flux (反电动势)、angle (转子位置角度)、speed (转子速度)、torque (转矩) 估计值,基于此 4 个参数,用户可以轻松定制自己的控制算法。

1.1 控制系统结构

除电机本体外, BLDCM 控制系统通常还包括:控制单元、驱动单元和转子位置检测单元^[7]。BLDCM 控制系统结构如图 1 所示。



图 1 BLDCM 控制系统结构

在电机运转过程中,转子位置检测单元实时获取转子位置,并向控制器发送位置信号。该信号与控制信号经控制器处理,控制驱动电路中功率器件的通断。直流电源经驱动电路逆变为交流电,使电机定子绕组按照一定的次序通断,实现自动电子换相,从而使电机连续运转。

1.1.1 电机本体

从结构上看, BLDCM 由定子和转子组成,电枢绕组置于定子侧,而转子是永磁体。其结构示意图如图 2 所示。BLDCM 转子永磁材料通常采用铝镍钴、钕铁硼等稀土材料;定子铁心则由硅钢片叠压构成,其中嵌有电枢绕组。对于有传感器的电机,其定子上还装有位置传感器。

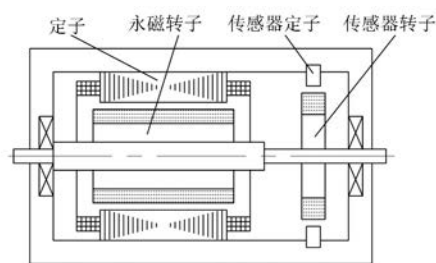


图 2 BLDCM 本体结构

1.1.2 控制单元

控制单元是电机驱动系统的核心单元,是电机正常运行和调速的关键组成部分。目前 DSP、FPGA、MC 系列等均为常用的驱动控制器。控制器通过接收系统反馈的电流、电压信号和位置信号,使定子绕组按照控制器中设定好的控制算法与逻辑换相策略依次通断,形成近似圆形的旋转磁场,维持电机平稳运转。

1.1.3 驱动单元

驱动单元由逆变电路及其驱动元件构成。驱动元件负责将 PWM 控制信号进行调理放大,控制逆变电路中具有开关功能的功率管 (MOSFET、IGBT) 的导通与关断,使电源输入的直流信号,依次逆变成交流信号,电机内产生圆形的旋转磁场,带动转子转动。逆变电路通常有三相全桥式和三相半桥式 2 种组成形式。BLDCM 驱动电路通常选用三相全桥式逆变电路,如图 3 所示。

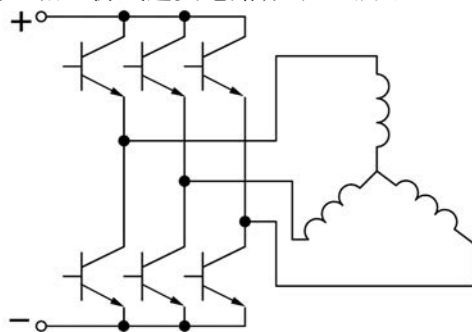


图 3 三相全桥式逆变电路

1. 1. 4 转子位置检测单元

在有位置传感器电机控制系统中,转子位置检测单元主要由位置传感器及其外围电路组成,而在无位置传感器方案中,转子位置检测单元则一般是由电参数(电压、电流等)检测电路和转子位置软件估计器(作用相当于软件实现的位置传感器)构成。

1. 2 电机工作原理

BLDCM 三相全桥逆变电路有 2 种导通方式:二二导通和三三导通。二二导通主要指电机运行过程中一共有 6 种状态,每种状态都有两相导通,转子每旋转 60°,逆变电路就变换一次导通相,使定子磁场随之变换。三三导通主要指电机运行过程中有三相导通,间隔 60°电角度改变一次通断相,通断周期是 180°。假定三相 BLDCM 磁极对数为 1,工作在二二导通状态,定子绕组为星型连接,如图 4 所示。表 1 所示为三相 BLDCM 工作在三相六状态、正向转动时,功率管 (VT1~VT6) 的通断规律。

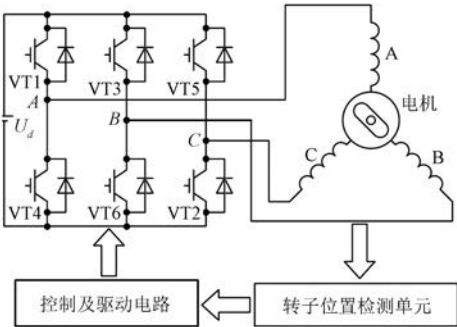


图 4 三相 BLDCM 驱动原理

表 1 三相六状态导通顺序表

转子位置/(°)	0~60	60~120	120~180	180~240	240~300	300~360
功率管	VT1, VT6	VT1, VT2	VT3, VT2	VT3, VT4	VT5, VT4	VT5, VT6
A 相	+	+	0	-	-	0
B 相	-	0	+	+	0	-
C 相	0	-	-	0	+	+

注:“+”表示正向通电;“-”表示反向通电;“0”表示不通电。

2 硬件电路设计

本文采用 TI C2000 系列 DSP 中的 TMS320F28027F 芯片作为主控制器,使用

DRV8301 前置驱动器和 CSD18533Q5A MOSFET 功率管构成驱动电路,针对 BLDCM 无传感器驱动调速进行控制系统设计。该设计支持 6~60 V 的直流电源输入。相较于传统采用分立元件设计的电机驱动,使用所提方案可以简化系统的软硬件设计,且电机运行时的稳定性和效率更好^[8]。系统硬件电路整体结构设计如图 5 所示。

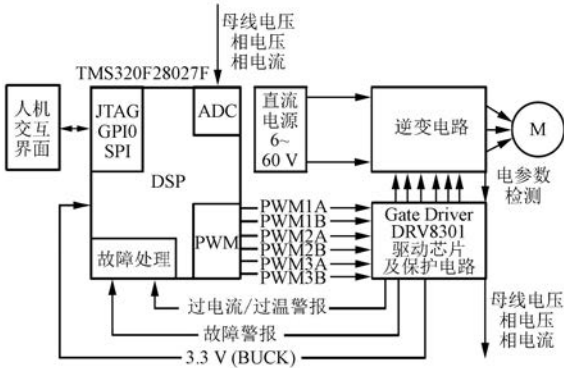


图 5 系统硬件电路整体结构设计

DSP 芯片输出 PWM 信号,经 DRV8301 调理、放大后送至三相逆变电路,控制 MOSFET 管的通断。三相逆变电路根据驱动信号输出三相电机电源,驱动电机转动。相电压、相电流及母线电压经检测电路输送给 DSP 芯片的 ADC,经 DSP 处理后获取转子位置信号,对电机进行闭环控制。

2. 1 主控单元电路设计

控制电路以 TMS320F28027F 为核心。TMS320F28027F 及其外围电路如图 6 所示。TMS320F28027F 由 3.3 V 单电源供电,拥有高效 32 位中央处理单元,运算主频达 60 MHz,片上集成有丰富的外设资源,包括 SPI、ePWM、eCAP、ADC 等等,提高了数字信号的响应及处理过程,增强了控制器对电机的实时调控能力。本文采用 3 对 PWM 输出电机控制信号,7 路 ADC 分别采集驱动电路三相交流相电压、直流输入电压和三相电流。

2. 2 驱动单元电路设计

驱动单元电路包括基于 DRV8301 的驱动器及基于 CSD18533Q5A 的逆变电路。

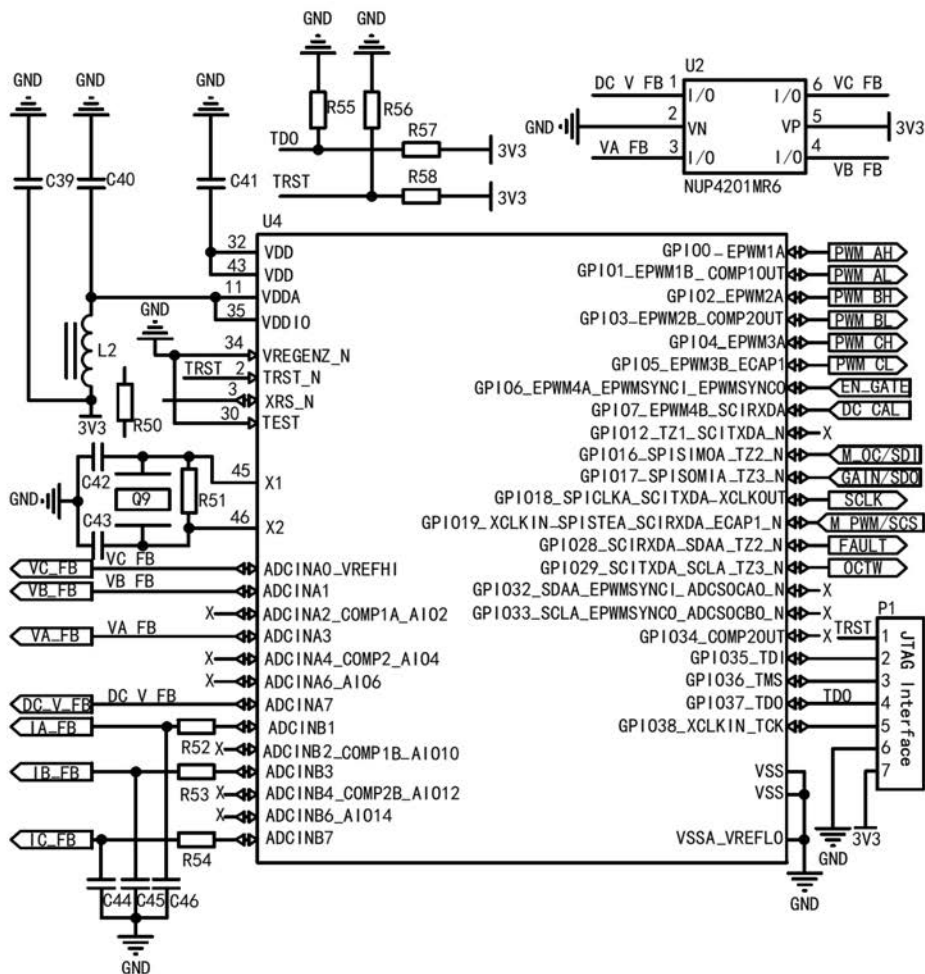


图6 TMS320F28027F 及其外围电路

2.2.1 驱动电路

驱动器由 DRV8301 及其外围电路组成,如图 7 所示。DRV8301 驱动芯片提供 PWM 波控制输出,并配有过温、过流、过压、起动、死区时间保护等功能电路。相对于传统的驱动电路,DRV8301 芯片更高效、稳定。

DRV8301 接收主控单元生成的 PWM 控制信号,将其调理放大输出给逆变电路,并接收逆变电路反馈信号。DRV8301 还内置了 2 个低侧电流感应放大器检测两相电流值。除此之外,DRV8301 可以向主控单元反馈 OCTW 和 FAULT 2 个信号,分别作为过流、过温警告和故障警告指示。

2.2.2 逆变电路

逆变电路由 6 个 CSD18533 MOSFET 功率管组成,接收 PWM 信号,输出 BLDCM 三相交流电

源。部分逆变电路(A 相部分)如图 8 所示。图 8 中,经 DRV8301 放大后的驱动信号 GH_A 和 GL_A 输入 A 相逆变电路,得到 SH_A 和 SL_A,其中 SH_A 作为电机的 A 相电压输入。SH_A、SL_A、A_ISENSE_P 和 A_ISENSE_N 分别作为反馈信号传输给 DRV8301 得到电机 A 相电压及电流。

2.3 电参数检测电路设计

本文所设计的 BLDCM 控制系统采用无位置传感器驱动方案,转子位置检测单元由电参数(电压、电流)检测电路和 FAST 软件估计器实现。因此,转子位置检测电路实际上指电机三相电压、电流检测电路。

该系统需采集电机的三相电压、电流以及母线电压共 7 个参数。由于 DRV8301 内置了双路电流感应放大器(在本文设计中用以检测 A、B 两相电流),所以,电参数检测电路包括三相电压

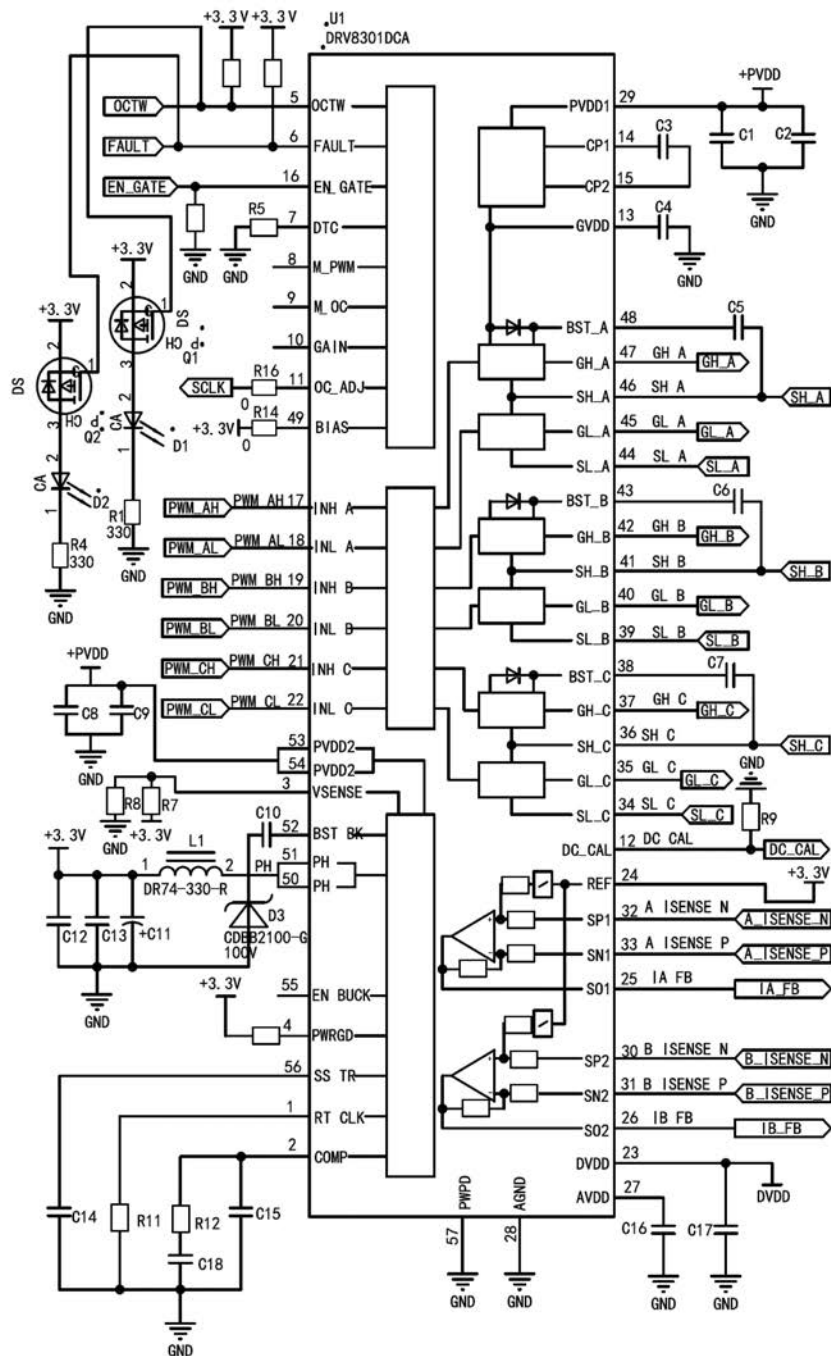


图7 DRV8301 及其外围电路

VA_FB、VB_FB、VC_FB 检测电路, C 相电流 IC_FB 检测电路以及母线电压 DC_V_FB 检测电路(实际上是直流电源输入电路),如图 9~图 11 所示。

3 软件设计

BLDCM 无位置传感器驱动控制系统的软件主要由主程序、PWM 中断程序、ADC 采样程序等

组成。主程序实现了初始化、参数设置、故障处理以及上位机通信等功能。限于篇幅,本文仅给出基于 FAST 估计器的转子位置等参数估计方法以及主程序流程。

3.1 转子位置获取

如图 12 所示, ADC 模块采集电机三相电压 U_a 、 U_b 、 U_c , 电流 I_a 、 I_b 、 I_c 以及母线电压 U_{bus} , 相电

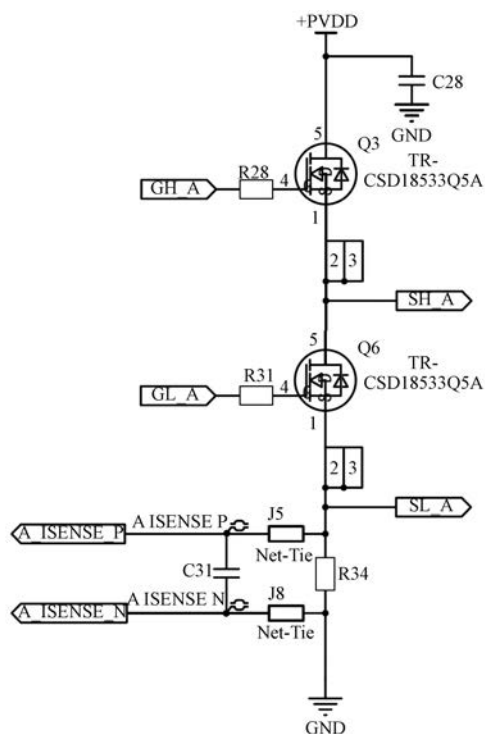


图8 逆变电路(A相部分)

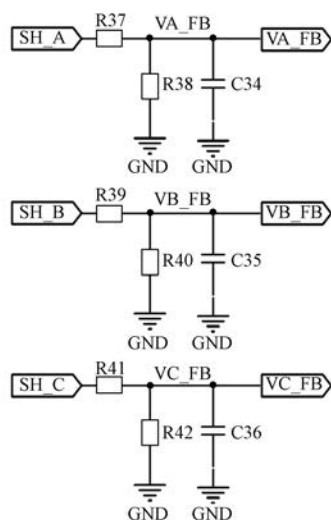


图9 三相电压检测电路

压和相电流经Clarke变换转换为 U_α 、 U_β 、 I_α 、 I_β ，FAST估计器根据变换后的电压、电流矢量以及母线电压估计出电机此时的反电动势、转子位置角度、转子速度、转矩以及电机的额定电流 I_{rated} 。

3.2 主程序流程

主程序流程如图13所示。在主程序中，DSP芯片的初始化包括：

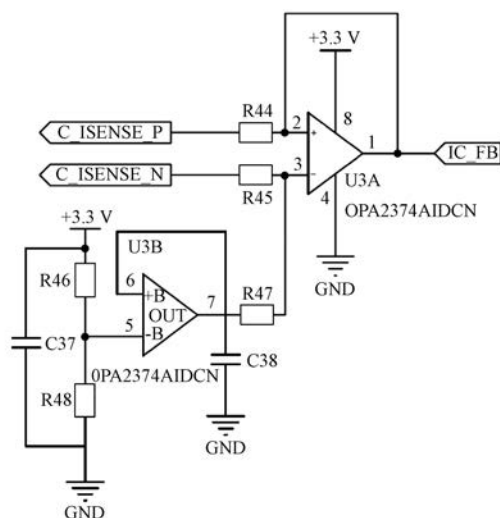


图10 C相电流检测电路

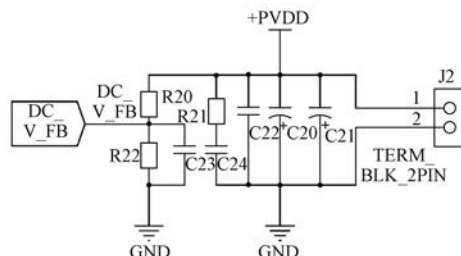


图11 母线电压检测电路(直流电源输入)

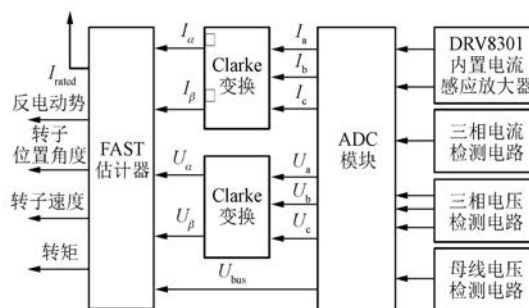


图12 基于FAST的转子位置估计

- (1) 初始化系统状态寄存器,关闭总中断;
- (2) 看门狗初始化,设置看门狗溢出时间;
- (3) 初始化系统控制寄存器,设置CPU时钟,设置各个模块的使能状态;
- (4) IO引脚配置,主要包括PWM、ADC、SPI等外设引脚的复用配置;
- (5) 事件管理器配置,配置PWM生成、霍尔传感器信号捕获等事件。

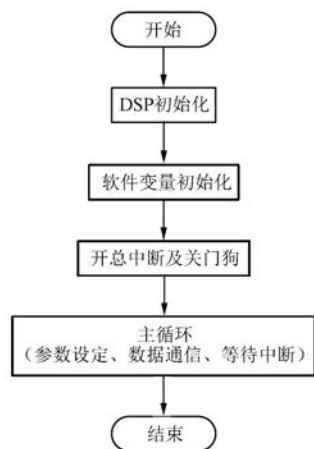


图 13 主程序流程

4 结 语

本文简要介绍了 BLDCM 驱动控制的研究背景,分析了其控制系统的基本组成及工作原理。基于 TI 的 TMS320F28027F DSP 芯片和 DRV8301 前置驱动器芯片进行了 BLDCM 无位置传感器驱动控制系统的设计。硬件方面主要介绍了系统中主控电路、驱动电路、参数检测电路等主要电路;软件方面介绍了基于 FAST 的转子位置估计方法以及控制系统主程序流程。与 BLDCM 传统控制方案相比较,DSP 控制较单片机计算和控制性

能更强,无传感器方案比有传感器方案稳定性更好且成本更低,DRV8301 集成前置驱动器比分立驱动元件体积更小,性能更好。因此,本文所设计的基于 DSP 的 BLDCM 无位置传感器驱动控制系统具有良好的市场应用前景。

【参考文献】

- [1] 夏长亮.无刷直流电机控制系统[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 颜廷玉.直流无刷电机控制系统的设计与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [3] 罗金龙.基于 DSP 的电动执行机构 BLDC 控制系统设计[D].上海:东华大学,2015.
- [4] 李同豪,王友仁,吴勇,等.无刷直流电机无位置传感器矢量控制系统[J].微电机,2016,49(10): 20.
- [5] 刘丁,余志平,杨延西.基于 DSP 的无刷直流电机无传感器控制系统设计[J].电机与控制学报,2002,6(1): 29.
- [6] 胡申旦,杨进,仇志坚,等.无位置传感器永磁无刷直流电机位置检测误差因素分析[J].电机与控制应用,2018,45(6): 91.
- [7] 孙祖光.电动汽车用无刷直流电机控制系统研究与设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [8] 高江,黄向慧.基于 DRV8301 的永磁同步电机控制系统研究[J].电力科学与工程,2017,33(11): 7.

收稿日期: 2019-02-26

(上接第 61 页)

- [8] LIN D, ZHOU P, FU W N, et al. A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1318.
- [9] 陈起旭,周阳,杨来顺,等.大功率盘式交流永磁同步电机温度场流场耦合分析[J].电机与控制应用, 2017, 44(4): 20.
- [10] 陈起旭,梁得亮,徐俊,等.盘式交流永磁同步电机温升影响因素研究[J].电机与控制学报, 2018, 22(3): 33.
- [11] 闫羽佳,赵锦成.盘式无铁心永磁发电机温度场分析和冷却方式研究[J].微特电机, 2018, 46(8): 45.
- [12] 王俊杰,马恩林.无铁心盘式 PMSM 损耗和温度研究[J].鱼雷技术, 2015, 23(5): 359.
- [13] 李玉彬,杨宗霄.非均匀磁极盘式无铁心永磁 ISG 电机设计与分析[J].河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 28.
- [14] 钟义长,黄守道,罗德荣,等.双转子盘式对转永磁电机同步控制策略[J].电工技术学报, 2018, 33(7): 1478.
- [15] 陈水桥,陈洪山.表面材料对红外热成像仪测温准确性的影响和分析[J].实验技术与管理, 2008, 25(11): 41.
- [16] 宋绍京.热辐射参考源对红外图像获取的影响及图像恢复[J].激光与红外, 2005, 35(1): 65.
- [17] 陈木旺,亓洪兴,龚玉梅,等.定标黑体的温度稳定性对热成像的影响分析[J].红外与激光工程, 2006, 35(6): 652.

收稿日期: 2019-02-26