

微型 UUV 无刷直流电机驱动控制系统

段凯原, 胡利民, 陈彦勇, 张国楠

(中国船舶重工集团公司第 705 研究所昆明分部, 云南 昆明 650101)

摘要: 无刷直流电机(BLDCM)具有高功率密度、高效节能、高可控性、低噪声等优点,尤其适用于对占用空间有着严格限制的应用场合。针对微型无人潜航器(UUV)内部空间狭小问题,对其电力驱动系统硬件方面进行小型化设计,在满足功率要求的前提下合理运用集成功能芯片对电路功能模块所占空间的压缩,实现系统中控制电路、驱动电路的小型化设计。经功率试验验证,在微型 UUV 内部空间限制条件下,所设计的电机驱动控制系统在速度控制精度、带载驱动性能方面均满足了微型 UUV 对电力的性能需求。

关键词: 无刷直流电机; 微型无人潜航器; 数字信号处理器; 霍尔传感器

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0035-05

doi: 10.12177/emca.2019.185

Drive Control System for Mini Unmanned Underwater Vehicle BLDCM

DUAN Kaiyuan, HU Limin, CHEN Yanyong, ZHANG Guonan

(Kunming Branch of the 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Kunming 650101, China)

Abstract: With the advantages of high power density, high efficiency, high controllability, and low noise, brushless DC motors (BLDCMs) are especially suitable for mini unmanned underwater vehicle (UUV) whose interior space is strictly limited. Hardware miniaturization design is carried out for the power drive system of mini UUV. On the premise of meeting the power requirements, the integrated functional chips are used to reduce the space of functional module to achieve the compactness of the control circuits and drive circuits of the system. It is verified by experiments that the speed control accuracy and load performance of the drive control system with satisfactory compactness can meet the requirements of the mini UUV.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); mini unmanned underwater vehicle (UUV); digital signal processor (DSP); Hall sensor

0 引言

随着多学科技术交叉程度加深和对水下领域的不断研究,微型无人潜航器(UUV)技术研究已成为当前水下无人系统领域中最核心的研究课题之一。不同 UUV 的性能、应用与任务不同,如中大型 UUV 可作为水下武器平台搭载外部负载执行水下情报侦测^[1]和反雷、反潜等军事对抗任务^[2],也可作为后勤补给和运输平台使用^[3]。相

较于中大型 UUV 而言,微型 UUV 可控性相对更高,在执行多个体间的协同编队作业时具有更强的兼容性^[4]。

随着应用领域日益广泛,某些工作场景对微型 UUV 的动力驱动能力有了更高的需求^[5]。由于狭小的壳体空间给功率和能量存储带来了无法避免的限制作用,微型 UUV 的动力驱动能力将是其短板所在。虽然研究人员对 UUV 展开了多方面研究,但针对微型 UUV 空间体积

收稿日期: 2019-12-26; 收到修改稿日期: 2020-02-25

作者简介: 段凯原(1993—),男,硕士研究生,研究方向为能源动力推进技术。

优化和进一步提升其电驱动能力方面的相关研究较少。

本文以某型微小型 UUV 的无刷直流电机 (BLDCM) 驱动系统为研究对象, 在可用空间体积严格受限情况下, 对控制系统的硬件小型化展开研究, 并设计了符合其性能需求的高效率、高功率密度的电力驱动控制系统。

1 BLDCM 与 UUV

为了增强对不同工况的适应能力和协同作业时的协调性, 微小型 UUV 动力系统在具备可靠驱动动力的同时应具备快速的转速、转矩响应能力。BLDCM 有着大转矩特性和转速高度可控等优点, 且结构紧凑、功率和转矩密度高, 非常契合本文对动力驱动系统小型化的选择要求; BLDCM 的高效节能特性可间接有效地降低 UUV 对电池体积质量的需求。本文将基于 BLDCM 展开系统的控制原理分析和硬件系统的小型化设计。

2 BLDCM 驱动控制原理

2.1 驱动换向控制

图 1 所示为电机及三相全桥功率开关电路的一体化等效模型。BLDCM 驱动过程中, 三相全桥功率开关工作状态决定了定子三相绕组中电流通电方向, 而不同定子绕组电流可在电机磁路气隙内产生不同空间相位的定子磁场, 当磁场方向与转子永磁体磁场方向不一致 (180° 夹角除外) 时就可以牵引转子运动。三相定子绕组仅两相通电, 因此三相之间存在 2 种开关状态, 如图 2 所示^[6]。控制定子绕组电流进行周期性切换, 依次产生不同方向的定子磁场, 即可实现全相位的转子驱动作用。

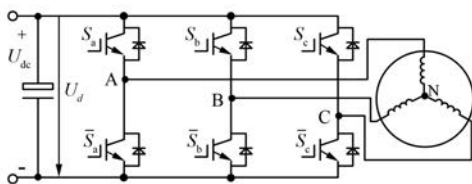


图 1 驱动电路及电机等效模型

转子位置的获取是实现电机合理控制的前提, 通过 120° 空间位置分布的霍尔 (Hall) 传感

器, 将电机转子空间相位均匀分为 6 个区间, 每个相位区间可对应一种 Hall 信号状态, 同时每个相位区间内又对应着一种最优开关状态。图 2 将每个开关状态与 Hall 信号状态进行对关联控制, 便实现了无刷电机驱动全相位的转子最优电磁驱动。

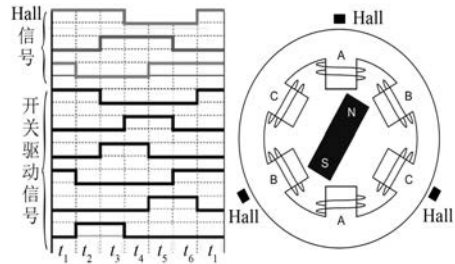


图 2 开关逻辑图及 Hall 传感器

2.2 控制系统逻辑结构

在 BLDCM 控制系统中, 定子上电压与电机转速呈正相关关系, 控制三相绕组上的电压有效值大小可实现电机转速控制^[7], 因此只需确定电压脉宽调制 (PWM) 斩波占空比的控制逻辑即可实现电机的转速控制。

图 3 所示为电机控制系统逻辑关系结构图。主控系统接收 Hall 传感器的实时转子位置信号后, 经计算可得到转子实时速度与目标速度间的误差, 而控制过程中所需母线电压斩波占空比便是由 PI 控制器依该速度误差值计算所给出。

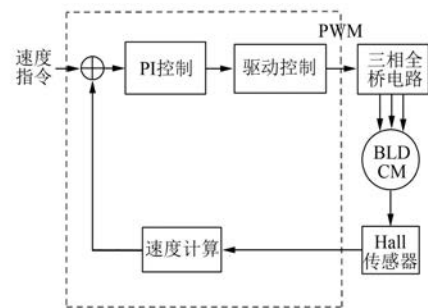


图 3 电机控制系统逻辑关系结构图

3 控制系统功能模块设计

针对高功率密度的设计需求, 并考虑实际需求, 选用 1 台高功率密度 BLDCM 为控制对象, 额定功率为 400 W, 额定转速为 3 000 r/min。

驱动控制板主要由数字信号处理器(DSP)主控电路、三相驱动电路、电源供电电路、信号检测电路、CAN 通信电路、Hall 信号处理电路等组成。BLDCM 控制系统结构如图 4 所示。

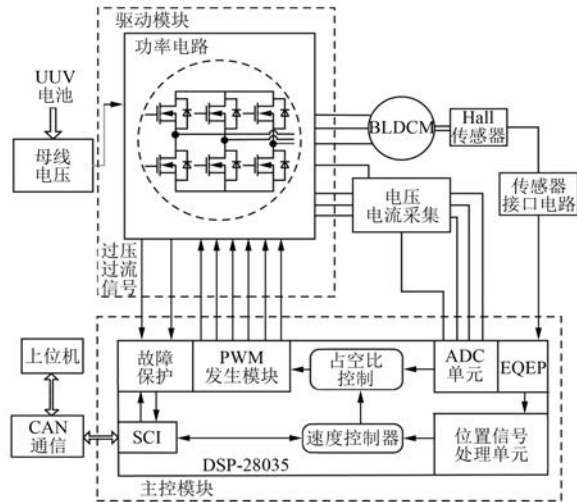


图 4 BLDCM 控制系统结构

3.1 DSP 主控芯片

DSP 芯片主要工作是获取系统实时状态并进行数据处理、操作判断与顺序执行,并对整个系统进行控制指令输出^[8]。本文设计以封装结构为 TQFP 的 DSP-28035 为主控芯片,该芯片具备 32 位微处理器核心,主频高达 60 MHz,拥有快速的中断响应及计算能力,可配置硬件资源丰富。该芯片实际封装尺寸比常用的 DSP-2812/28335 占用硬件电路空间更小,适合该小型化应用场合。

3.2 驱动电路

为了满足系统高功率驱动运行,选用 6 个 N 沟道 MOSFET 功率开关管 IRFB4510 作为电机驱动电路开关,由 IRFB4510 与 IR2108S 驱动芯片组成半桥驱动电路;半桥驱动电路所需有效驱动信号为 5 V 电平,而 DSP 芯片直接输出的 PWM 波形高电平仅 3.3 V,因此通过 74LS244 芯片对 PWM 信号进行电平升压转换,把 PWM 数字信号从 3.3 V 转换为 5 V 电平。电平变换及功率管驱动电路如图 5 所示。

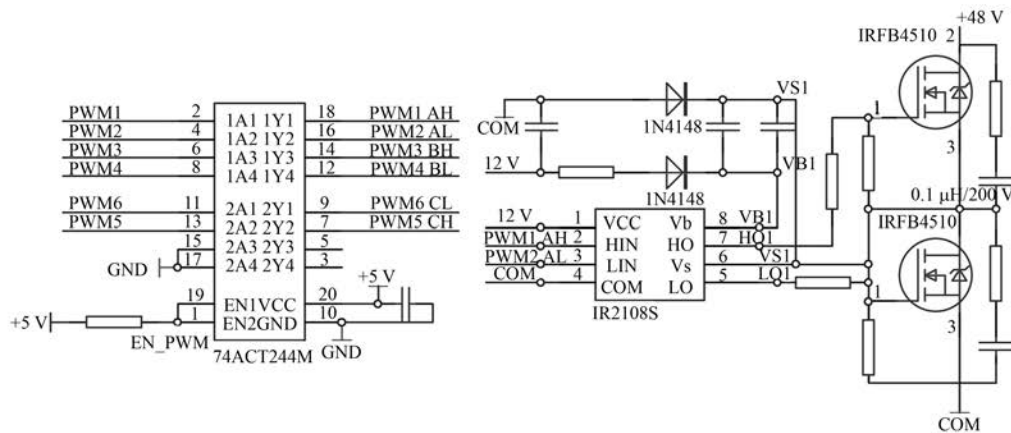


图 5 电平变换及功率管驱动电路

3.3 电源供电电路

驱动电机的直流电压为 48 V,将该电平经 DC/DC 变压芯片和滤波电路,可转换为不同等级的稳压电平,为不同功能系统供电。实际硬件微小化设计过程中,为了减少电源供电系统占用电路面积,尽量通过直流变压芯片实现电平转换。采用高功率降压芯片 LM5575 将 48 V 母线电压转化为 5 V,该电压可为 Hall 传感器电路供电,同时也作为中间电平,通过 TPS76733Q 将 5 V 中间电平变换为 DSP 工作电平 3.3 V;通过 LT3580 将

中间电平升压变换为 12 V 电平,送入三相功率开关电路。该供电系统各个电平协调工作,同时具备一定隔离性,可降低局部故障对整个系统的影响。

3.4 信号检测电路

BLDCM 控制系统中,为了提高电机驱动安全性,通过检测电路对系统内关键信息实时监测,监测状态结果进入非正常模式时,控制系统进行应急动作来截断故障的恶化。

检测电路主要对系统电压及电流进行观测,

检测结果用于主控芯片对整个系统展开控制保护的
动作依据。

电流检测包括电池电流和电机母线电流,采用
电流隔离传感器 ACS725 进行检测,该型电流
传感器不仅具备精确性与经济性,其小封装特性

也是小型化的理想之选。

图 6 所示为传感器输出信号的处理逻辑电
路。传感器输出值与电阻分压设定值进行比较,
当电流值大于安全阈值时会向 DSP 主控系统发
送停机指令。

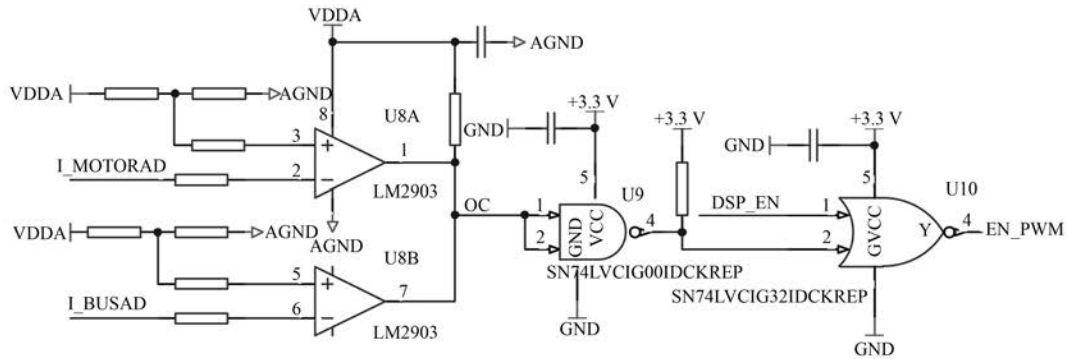


图 6 传感器输出信号的处理逻辑电路

母线电压检测可通过高阻值电阻的分压进行
采集,所得电压经滤波处理后送到 DSP 通用管
脚,由 DSP 直接进行逻辑判断与执行保护措施。

3.5 Hall 传感器电路

本系统中采用小体积 Hall 位置传感器
HAL3725 进行转子位置检测,检测结果用作电机
换相逻辑判断与转速计算的依据。Hall 传感器
HAL3725 的输出为 5 V 电平信号,该信号在与
DSP 芯片上的 I/O 管脚进行交互前需进行电平转
换。出于电路微小化考虑,选用集成度高的四路
三态输出缓冲门电路芯片 SN74LV4T125 进行电
平转换与信号缓冲优化,如图 7 所示。位置信号
检测结果被转换为 3.3 V 电平信号送至 DSP 的
CAP/QEP 管脚直接参与逆变电路控制。

型化设计角度考虑,选用 CAN 接口芯片 CTM1051
对通信模块进行集成化替代,该芯片可处理
1 Mbit/s 的最高数据传递速率,且集成了光耦隔
离功能和高达 2 500 V 电压隔离性能的 CAN 收发
器,不仅提高了信息传递的可靠性,在硬件占用空
间上更是比常规 CAN 功能模块节省了 50% 以上。

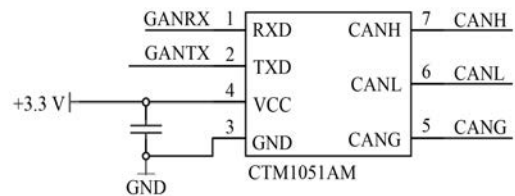


图 8 CAN 通信接口电路

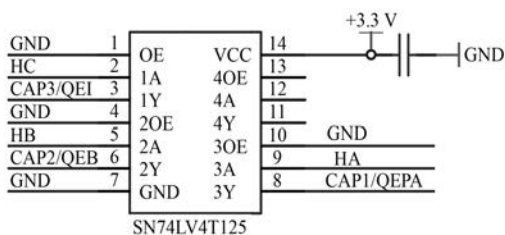


图 7 Hall 信号变换电路

3.6 通信接口电路

控制器与上位机之间的数据传递方式选择具
备抗电磁干扰能力的 CAN 通信方式。从系统小

为了提升系统中强、弱电功能独立性,将电机
驱动控制系统划分为控制板与驱动板,分别布置
在 2 块直径为 80 mm 的圆形 PCB 电路板上。

4 试验验证

为了验证本文所提驱动控制器的驱动能力,
基于 DSP 数字控制芯片,编写了基于 120°导通
的方波控制策略的控制算法,并在固定台架上完
成了陆上功率试验。试验中驱动电机拖动发电
机,发电输出电压经整流后送入电子负载进行功
率消耗。转速设定为电机额定转速 3 000 r/min,
通过调节负载使原电机在目标转速下以额定功
率驱动

运行。

图 9 为控制系统硬件实物图。图 10 为电机稳定驱动时的实测电压、电流波形。图 11 为电机启动后大约 4 s 到达稳态目标转速 3 000 r/min 的转速响应图。整个试验波形体现出该系统具备可控性高、速度响应快的带载驱动性能。

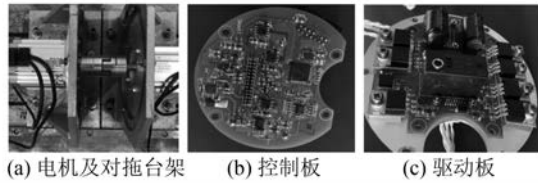


图 9 控制系统硬件实物图

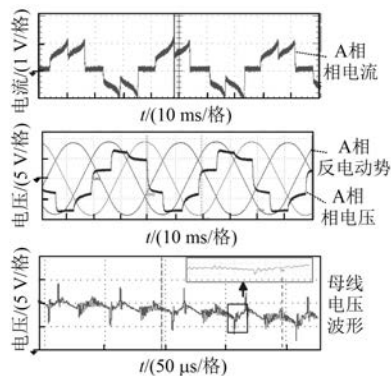


图 10 电机电压及电流波形

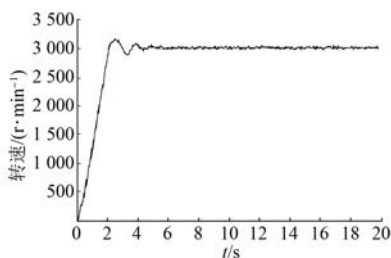


图 11 电机转速响应曲线

5 结 语

本文针对某微小型 UUV 对动力系统所提出的高功率、小型化需求,依据实际空间限制和功率指标,基于 DSP-28035 芯片开展了 BLDCM 控制系统小型化设计。经对各模块逐个展开基于小型化方面的优化后,经试验验证,该系统在满足紧凑化目标的同时实现了目标功率输出。

对 UUV 电机控制系统的硬件小型化进行探索,提高了控制系统设计的空间紧凑化,较好地挖掘在微小型 UUV 固有尺寸限制下提高驱动系统功率的设计潜力。本文研究为后续进行同等或更小的高性能 UUV 驱动控制系统小型化设计积累了宝贵经验。

【参考文献】

- [1] 陈强,兰晓娟,王霜.国外 UUV 系统在海洋调查中的应用[J].舰船科学技术,2012,34(10): 133.
- [2] 吴吉伟,徐先勇,陆文俊.浅谈无人潜航器在反潜作战中的应用[J].军民两用技术与产品,2014(7): 52.
- [3] 钟宏伟.国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J].水下无人系统学报,2017,25(4): 215.
- [4] 王童豪,彭星光,潘光,等.无人水下航行器的发展现状与关键技术[J].宇航总体技术,2017,1(4): 52.
- [5] 于金冶.面向观测探测的微小型 UUV 控制系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [6] 周灏,毛佳珍,李楠,等.无刷直流电动机位置传感器安装位置[J].微电机,2010,43(6): 90.
- [7] 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.
- [8] 崔磊.基于 DSP 的无刷直流电机运动控制系统研究[D].大连:大连理工大学,2015.

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者,可联系编辑部补订

地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编:200063

电话:021-62574990-462

邮箱:eec@seari.com.cn

国内邮发代号:4-199

每册定价:12.00 元

全年定价:144.00 元