

# 某履带式全方位平台的电机控制器设计

史浩楠<sup>1</sup>, 张豫南<sup>1</sup>, 董政<sup>1</sup>, 余建莹<sup>2</sup>

(1. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072; 2. 大连理工大学 盘锦校区, 辽宁 盘锦 124000)

**摘要:** 针对某履带式全方位平台实际工况要求, 介绍了平台总体方案, 选取一款 1000 W 无刷直流电机 (BLDC) 作为平台驱动电机, 阐述了 BLDC 控制原理及其控制方案, 基于 DSP28335 设计了电机控制器, 搭建了硬件电路, 编写并调试了软件程序, 采用速度、电流双闭环控制方案, 设定电机转速为 3 000 rpm, 测定了电机相电压、电流等数据, 进行了实物实验, 结果表明该控制器性能稳定, 响应迅速, 具有较高的实际应用价值, 且为后续控制策略研究奠定了基础。

**关键词:** 履带式全方位平台; 控制器; 直流无刷电机

## Design of Motor Controller for A Tracked Omnidirectional Platform

Shi Haonan<sup>1</sup>, Zhang Yunan<sup>1</sup>, Dong Zheng<sup>1</sup>, Yu Jianying<sup>2</sup>

(Weaponry and Control Department, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Aiming at the actual working condition requirements of a tracked omnidirectional platform, introduce the overall plan of the platform is introduce, and select a brushless DC motor (BLDC) of 1000 W is selected as the driven motor, the BLDC control principle and its control scheme are expounded. Based on DSP28335, the motor controller is designed, the hardware circuit is set up, and the software program is written and debugged. The double closed loop control scheme of speed and current is used. The speed of the motor is set to 3000rpm, and the phase voltage and current of the motor are measured, and the experiment shows that the controller has a stable performance, rapid response, and high practical application value, in the other hand it lays a foundation for the study of further control strategy.

**Keywords:** tracked omnidirectional platform; controller; brushless DC motor

## 0 引言

履带式全方位平台采用特殊的全方位履带设计, 在兼顾全方位平台灵活性的同时利用履带式设计增大了行动装置接地面积, 解决了通过性不高的问题, 具备了较高的越野能力, 具有很高的军事、民用前景。同时为满足履带式全方位平台的特殊运行工况对电机控制系统提出更高的要求: 1) 为实现全方位移动, 多电机独立协调控制; 2) 爬坡时具有低转速高转矩特性; 3) 高功率密度; 4) 较大的调速范围; 5) 具有较快的转矩响应速度以适应复杂的越野环境<sup>[1-2]</sup>。无刷直流电机 (brushless DC motor, BLDC) 具有运行效率高、调速性能好的优点, 同时结构简单、运行可靠, 越来越多的应用于地面平台的研制<sup>[3-4]</sup>。本文设计了一种以 DSP28335 为主控芯片的无刷直流电机控制器。并对控制器进行了调试试验, 结果表明该控制器运行稳定, 响应快速, 基本满足平台要求。

## 1 总体设计及电机控制方案

### 1.1 平台总体设计方案

平台包括控制子系统、驱动子系统、电源子系统、移

动机构 4 个部分<sup>[5]</sup>, 平台的总体结构如图 1 所示。

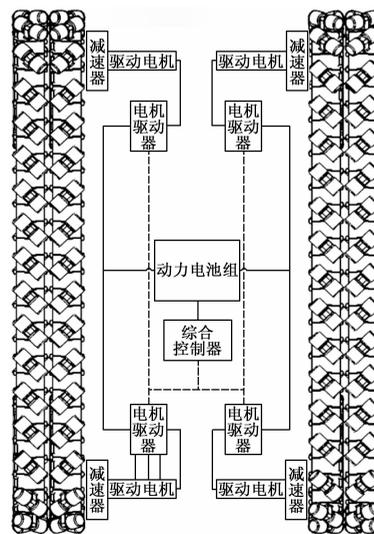


图 1 平台的总体方案结构图

平台采用独特的履带设计与电机控制策略。通过综合控制器解算运动轨迹, 并控制信号分配给 4 个电机控制器进行多电机协调控制, 实现平台特定的运动轨迹<sup>[6]</sup>。

### 1.2 控制原理及方案

本文以该履带式全方位平台所用的直流无刷电机为控制对象, 平台选用 AMETEK 公司的 IB340006 电机, 其具体参数如表 1 所示。

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-06-01。

作者简介: 史浩楠(1993-), 男, 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 主要从事电机驱动与控制方向的研究。

张豫南(1964-), 男, 江苏省南通市人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事武器系统运动控制方向的研究。

表 1 直流无刷电机主要参数

额定电压/V	75	额定扭矩/N·m	2.32
最大转速/r/min	6000	额定电流/A	14.5
最大电流/A	32.08	电阻/ohms	0.06
额定功率/W	1000	极对数	4

该电机主电路采用星形连接的三相桥式电路, 导通方式为二二导通。

电机控制总体设计方案如图 2 所示。

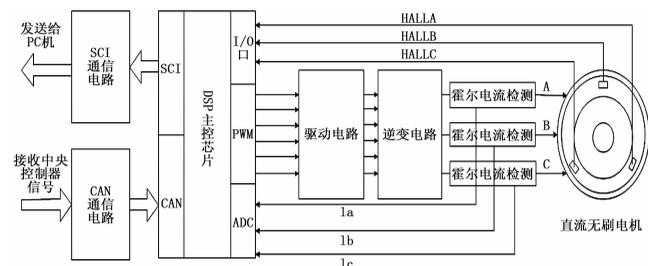


图 2 电机控制总体方案

该电机控制系统采用 DSP28335 为主控芯片, 通过 CAN 总线实现与中央控制通信, 将控制指令解算为 PWM 信号, 经过驱动电路实现对无刷直流电机的控制, 同时主控芯片通过 I/O 口以及 ADC 模块采集电机位置、电流信号实现转速、电流双闭环控制<sup>[7]</sup>。

## 2 控制器硬件电路设计

### 2.1 通信电路设计

电机控制器通过 CAN 总线实现与中央控制器的通信, 实现多电机协调控制。CAN 是一种多主式现场总线, 传输实时性较高、ECU 节点较少, 抗干扰性能较强, 在分布式控制系统方面具有明显优势。TMS320F28335 内部集成两路 CAN 总线控制器, 可以方便的实现 CAN 总线通信, CAN 信号的准确性是电机控制器正常运行的前提, 为减少复杂电磁环境对 CAN 信号的干扰, 采用光耦隔离芯片 6N137 对 CAN 收发芯片 82C250 接收到的信号进行电气隔离以提高系统可靠性, 其具体电路如图 3 所示。

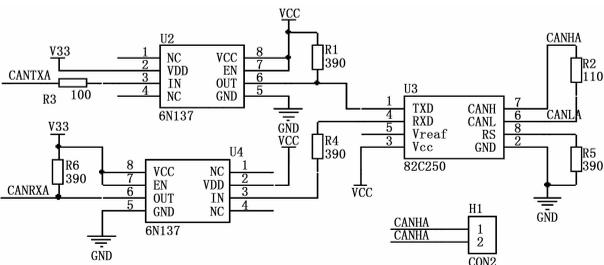


图 3 CAN 通信电路

### 2.2 驱动电路设计

功率驱动电路多用全控型器件 IGBT 或 MOSFET 搭建, IGBT 耐压值较高, 一般适用于低频高压大功率电机, MOSFET 开关速度快, 高频特性较好, 多用于高频低压小

功率电机。针对本平台所用 75 V/1 KW 电机, 选用 MOSFET 器件 IRF3415。

为满足平台复杂越野环境要求, 尤其是爬坡时持续过载运行, 在实现电机额定功率平稳运行的基础上, 对电机的过载性能提出了更高的要求。为减少不同功率开关器件之间的热干扰情况, 上下桥臂均采用 IRF3415。MOSFET 器件 IRF3415 耐压值为 100 V, 最大工作电流 45A, 当平台复杂路面行驶尤其是工作在爬坡工况时, 驱动电机电流较大, 为保证电机具有较大的过载能力, 同时由于 MOSFET 并联使用时具有电流自动均衡能力, 故采用两组 MOSFET 器件并联使用, 增大功率电路过流能力的同时增强了功率器件的散热性能。驱动电路直流侧采用 470 uf/100 V 电解电容与 104/100 V 高频陶瓷电容并联使用以提高直流侧高频滤波能力。栅极串连 100 欧姆电阻为 MOSFET 提供足够的驱动电流的同时抑制了开关毛刺, 栅源极之间并联 47 K 电阻用于抬升驱动电压的能起到一定的泄流作用<sup>[8]</sup>。

为保证 IRF3415 充分稳定导通, 栅极驱动电压应在 10 到 20 V 之间, 采用专用的功率驱动芯片 IR2181 对 PWM 信号进行放大, IR2181 采用独立高低端输入通道, 高端通道采用自举电路, 最高耐压 600 V, 兼具光耦及电隔离功能<sup>[9]</sup>, 其具体电路如图 4 所示。

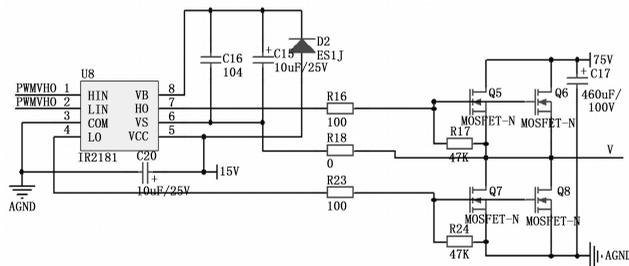


图 4 驱动电路

### 2.3 信号采集电路设计

为实现电机实时控制, 信号采集电路在电路设计中是必不可少的, 该控制器信号采集电路主要由位置检测、电流及电压检测电路等三部分组成。位置检测电路通过上拉电阻将 5 V 霍尔信号转化为 3.3 V 逻辑电平, 同时 RC 滤波电路进行滤波, 并将位置信号输入主控芯片, 完成换向动作与电机转速计算, 其具体电路如图 5 所示。

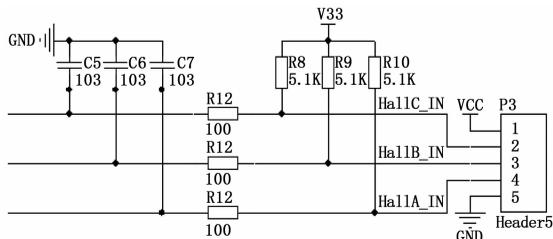


图 5 位置采集电路

由电机参数及平台运行匹配计算得电机最大过载 3 倍运行时电流 43.5 A, 故采用霍尔电流传感器 ACS756 作为

电流检测元件, 该元件最大可测电流 50 A, 测量精度 8%, 5 V 供电, 输出电压:

$$VI_{out} = 0.5 VCC + I \times 50 \text{ mV/A} \quad (1)$$

采用 LM358 设计电压调理电路, 将输出电压转化为稳定 0~3 V 电压, 输入主控芯片 AD 模块, 其具体电路如图 6 所示。

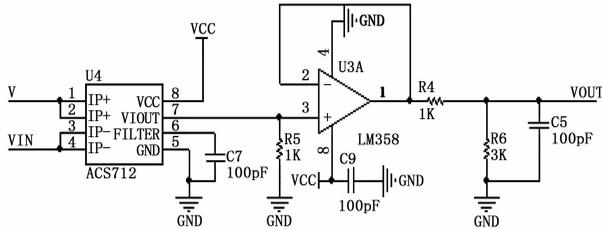


图 6 电流检测电路

电压检测电路采用电阻分压法测量, 电路设计较为简单, 即在直流侧并联大电阻进行电压信号采集。

### 3 控制器软件设计

#### 3.1 主程序设计

主程序采用顺序结构配置, 主要完成系统初始化、外设模块的配置、开中断以及进入主循环, 等待中断请求信号等功能, 具体流程如图 7 所示。

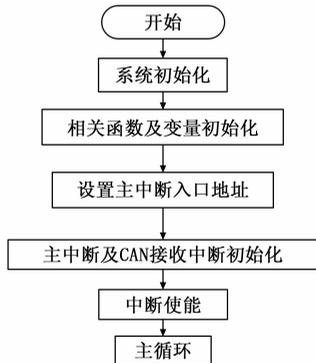


图 7 主中断流程图

#### 3.2 中断子程序

该控制器软件部分主要包括主中断服务子程序、CAN 接受中断子程序以及过电流保护中断子程序等 3 个服务子程序。

##### 3.2.1 主中断程序设计

主中断子程序是本软件设计的核心部分, 也是实现电机控制算法的主要部分, 主要完成电机启动、速度以及正反转信号的处理、转子位置检测、以及转速、电流双闭环 PI 控制等功能。主中断服务子程序入口指针指向 PWM1, 中断周期 80μs。程序流程如图 8 所示。

3 个霍尔传感器相隔 120° 安装, 当位于霍尔传感器位置处的磁场极性发生变化时, 传感器的输出宽度为 180 度的电平信号, 可知每个周期霍尔信号有六个不同的信号状态, 当霍尔信号发生改变时, 进行计时, 假设两次计时时间间隔为  $T$  ( $\mu\text{s}$ ), 则电机的转速约为:

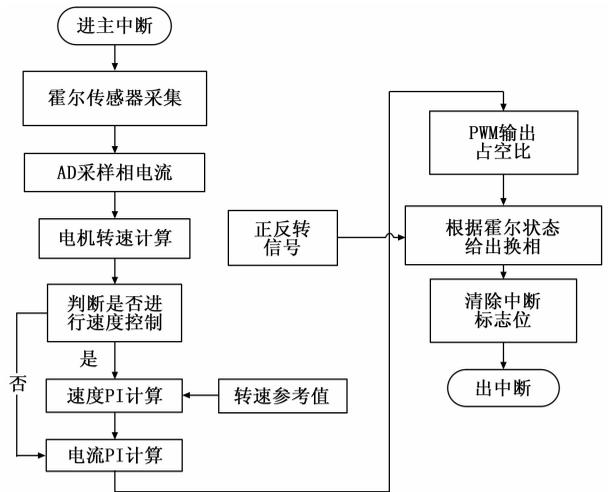


图 8 主中断流程图

$$\Omega = \frac{\omega}{P_n} = \frac{60 \times 10^6}{P_n \times 6 \times T} (\text{rad/m}) \quad (2)$$

这样就完成了电机速度的计算。

主中断中电机控制采用速度、电流双闭环控制, 每进行 25 次电流闭环运算, 对转速换进行一次运算, 即当计时参数 PWMISR 等于 25 时, 进行速度环计算, 速度环运算周期为 2 ms。

##### 3.2.2 CAN 通信中断

CAN 接受中断设置为 CAN0 模式, 当接收到一组 CAN 信号时, 进入中断子程序, 子函数主要实现对中央控制器与驱动器的通信, 用于接收来自中央控制器的电机旋转方向、转速等控制信号, 并为相应的变量赋值, 进入主中断进行运算实现对电机的控制, 程序流程如图 9 所示。

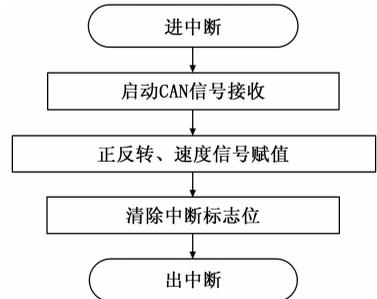


图 9 CAN 接受中断子程序

##### 3.2.3 保护中断

电机母线电流经采样后, 经过比较器电路与 DSP 外部中断引脚 XINT 相连, 一旦产生过流信号, 比较器发送高电平信号, 控制器进入外部中断, 封锁六路 PWM 信号, 禁止 PWM 输出, 实现控制器的过流保护。

#### 3.3 模糊 PID 控制

为满足平台越野工况下非线性以及强耦合的特点。设计了模糊自适应 PID 控制器, 即提高了平台的调速性能, 消除了静态误差, 同时又发挥了模糊控制适应能力强的优势<sup>[10-11]</sup>, 其软件流程如图 10 所示。

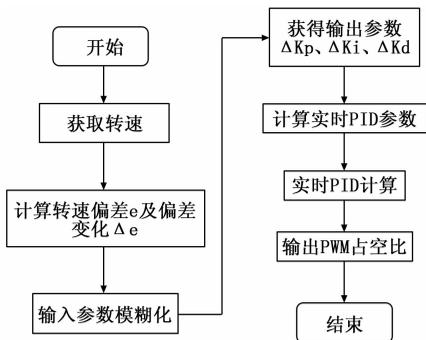


图 10 模糊 PID 计算

### 4 实验验证

采用上述电机与控制器进行了实验验证, 利用上位机 CAN 调试软件通过 CAN 卡发送控制指令, 当给定转速为 3 000 rpm 时, 中途施加一定负载, 利用示波器测得实验结果如下: 图 11 为相电流, 图 12 为相电压, 图 13 为电流响应。

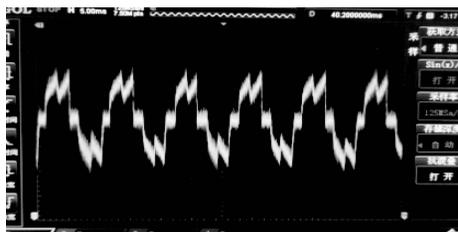


图 11 A 相电流波形

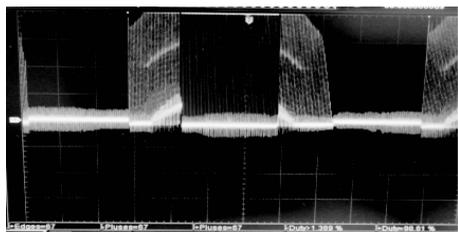


图 12 A 相电压波形

由上述实验结果可知, 该控制器电流、电压波形平稳, 较为理想, 当负载变化时, 电流波形响应迅速, 初步满足平台需求。

(上接第 101 页)

[9] 金以慧. 过程控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.  
 [10] 赵志丹, 党黎军, 刘超. 超(超)临界机组启动运行与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.  
 [11] 闫乃明, 李会玲, 李珊珊, 等. 超(超)临界机组湿态自动转干态控制研究 [J]. 电站系统工程, 2012.  
 [12] Kaneko S, Yamamoto K. Design and operation experience of a 1000mw ultra supercritical coal fired boiler with steam condition of 25. 4mpa602 604 [Z]. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, 1999.  
 [13] 杨献勇. 热工过程自动控制 (第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
 [14] 孙玥. 1000 MW 机组蒸汽温度控制系统分析 [D]. 华北电力大学, 2016.

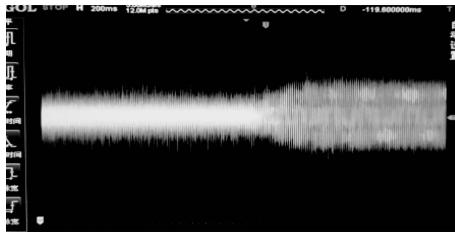


图 13 电流响应波形

### 5 结论

本文立足某履带式全方位平台, 完成了电机控制系统的硬件电路与软件设计利用上位机软件对电机控制器进行了实验测试, 结果表明电机运行稳定, 电压电流波形较为理想, 说明控制器设计正确合理, 初步满足平台需求, 为下一步整车实验与今后的控制策略设计实验奠定了基础。

#### 参考文献:

[1] 孙逢春, 程夕明, 等. 电动汽车动力驱动系统现状及发展 [J]. 汽车工程, 2000, 22 (4): 220-225.  
 [2] 郭建龙, 陈世元. 电动汽车驱动用电机的选择 [J]. 汽车电器, 2007, 1: 9-12.  
 [3] 钱健, 王维亚. 无刷直流电机模型的建立及控制系统仿真研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 1995 (1): 73-77.  
 [4] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
 [5] 黄涛, 张豫南, 田鹏, 等. 一种履带式全方位移动履带的设计与运动学分析 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (21): 206-212.  
 [6] 杨耕, 罗应力, 等. 电机与运动控制系统 [M]. 清华大学出版社, 2006.  
 [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): 25-31.  
 [8] 李方圆, 李晓. 基于 dsp 直流电机调速系统设计 [J]. 数字技术与应用, 2012 (12): 128-130.  
 [9] 顾建平, 夏春燕. 自举电路在 MOSFET 驱动中的应用 [J]. 常州工学院学报, 2000 (4): 38-40.  
 [10] 李晓丹. 模糊 PID 控制器的设计研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.  
 [15] Curtis D. Johnson. Process Control Instrumentation Technology [M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
 [16] 李遵基. 热工自动控制系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.  
 [17] 张雨飞. 超超临界火电机组热工控制技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.  
 [18] 闫顺林. 超临界直流锅炉的过热汽温及其影响因素分析 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25 (1): 66-68.  
 [19] 白焰, 朱耀春, 李新利. 分散控制系统与现场总线控制系统 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.  
 [20] 张启亚, 曾德良, 刘继伟, 等. 内模控制器在锅炉再热汽温调节上的应用 [J]. 电力科学与工程, 2010, 26 (12): 44-48.  
 [21] 于湘涛. 基于内模 PID 控制的火电厂主汽温度控制系统 [J]. 工业控制与应用, 2003, 22 (7): 50-52.