

# 基于 DSP 的高压巡线机器人伺服控制系统

白玉成<sup>1</sup>, 吴功平<sup>1</sup>, 肖晓晖<sup>1,2</sup>, 肖 华<sup>1</sup>

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 430072; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**在分析和研究高压巡线机器人原控制器的基础上,设计了一种基于 DSP 的全数字化控制器。该控制器采用主从式多处理器工作模式,用 6 个 DSP 对机器人 12 个关节的无刷直流电机进行伺服控制,采用高速 CAN 总线实现上位机和下位机的通讯。与原控制器相比,该控制器具有较高的集成度和优良的性价比,便于降低成本,减少机电系统体积。试验表明,该控制器性能稳定可靠,可满足机器人多轴控制的需要。

**关键词:**无刷直流电动机; 伺服控制; 机器人/数字信号处理

**中图分类号:**TM921.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-100X(2005)02-0103-03

## Research on Servo Control System of High Voltage Cable Patrolled Robot based on DSP

BAI Yu-cheng<sup>1</sup>, WU Gong-ping<sup>1</sup>, XIAO Xiao-hui<sup>1,2</sup>, XIAO Hua<sup>1</sup>

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:**A type of full-digital controller using DSP was designed, which was based on analyzing and researching the former controller of high voltage cable patrolled robot. The controller possessed principal and subordinate mode. Six DSPs were used to servocontrol twelve BLDC motor in the joint of robot. High speed CAN bus was applied to keep communication between the principal part and subordinate part. Comparing with the former controller, this controller has many advantages, such as high degree integration, excellence performance at low cost, occupying litter room. The experiment indicates that the controller performs credibility and can meet the requisition of robot controlling.

**Key word:**brushless DC motor; servo control; robot/DSP

**Foundation Project:**Supported by National 863 Foundation of China (No.2002AA420110)

## 1 引言

高压巡线机器人是针对高压输电线路的一种全自动化巡线装置。该机器人共有 12 个关节电机需要伺服控制,其中涉及到对机器人姿态位置调整的位置伺服控制,对巡线轮的同步速度控制,以及对夹爪夹紧力的力矩控制,其控制电机的数量和种类相对比较繁多,所以机器人的控制系统相对比较复杂。本文的巡线机器人原控制系统采用了基于 PMAC 的多轴控制器,因其单板只能实现对 8 根轴的伺服控制,且采用以模拟控制为主的控制模式,不太适合在强电磁环境下工作,控制器的体积大、价格昂贵,因此需要自行开发一套适合该机器人的控制系统。

为弥补原系统的不足,研制了以电机控制专用芯片 TMS320LF2407 为核心的全数字化无刷直流电机控制系统。该系统采用全数字化控制方式,避免了模拟控制中不稳定因素的干扰,特别是电磁场对工

作电路的场效应干扰。另外,机器人过障动作复杂,线路种类繁多,为了使机器人系统具有更好的柔性,方便硬件扩展和软件升级,采用 CAN 总线通讯的主从控制模式。

## 2 机器人控制系统总体结构设计

图 1 示出高压巡线机器人控制系统总体结构图。

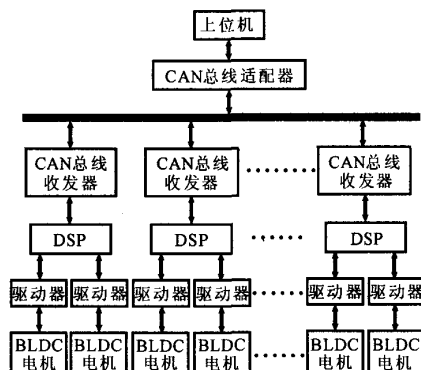


图 1 系统结构示意图

上位机主要负责对机器人当前状态的识别以及对一些辅助功能的管理,此外还指挥下位机完成一定的控制任务。下位机主要负责对电机的速度、位置

基金项目:国家 863 项目(2002AA420110)资助

定稿日期:2004-12-15

作者简介:白玉成(1979-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为机器人智能控制技术。

或力矩进行闭环伺服控制。上位机是管理决策层控制,下位机是直接对电机的底层控制。

考虑到直流无刷电机既具备交流电机结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点,又具备直流电机运行效率高、相同功率下的体积小等优点,该系统选择此种电机作为机器人的轴驱动。

### 3 系统控制模型

(1) 无刷直流电机的伺服控制就是利用给定量和反馈量形成偏差,经一系列数字化调节后形成 PWM 占空比的控制量,实现电机的闭环控制。

(2) 无刷直流电机的速度控制模块主要负责机器人行走速度的控制和机器人自身姿态调整速度的控制。图 2a 示出速度控制框图。

(3) 无刷直流电机的位置控制模块主要实现电机的位置控制。该控制模块主要负责机器人位置姿态的调整。图 2b 示出位置控制框图。

(4) 电机的力矩控制模块主要负责电机的夹爪夹紧力矩的调整。控制电流的大小可以达到控制力矩的目的。图 2c 示出力矩控制框图。

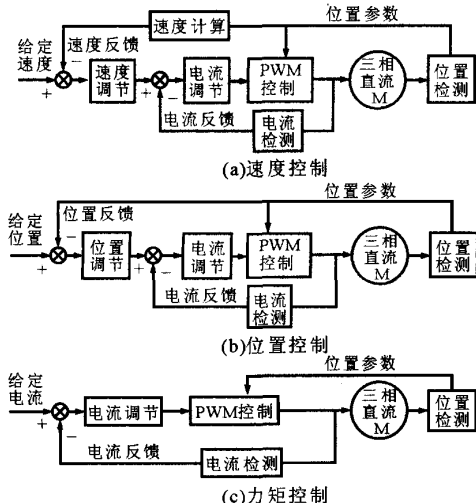


图 2 速度控制、位置控制及力矩控制框图

### 4 系统硬件设计

#### 4.1 反馈信号的获取

由于该机器人系统本身是一个浮动的系统,没有固定的参考位置,过障动作完全采用自适应的控制方式,对位置精度要求较低,所以位置量是直接利用霍尔传感器的边沿触发计数得到的。在电机的每个机械转动周期内霍尔传感器产生有 6 个跳变,所以该系统的位置控制精度为  $60^\circ$  机械角。

速度反馈是通过霍尔位置传感器输出的位置量,经过 M/T 算法得到的。

电流的反馈量是通过检测电阻  $R$  上的压降,再

经过滤波放大后,由 DSP 的 ADCIN 口采集得到,采集精度为 10 位。

图 3 示出电流检测电路。它是以标准电阻做电流检测元件,通过检测电阻两端电压,再经滤波放大电路,使输出电压达到适合 DSP 采样口 ADCIN 的检测范围,从而使 DSP 达到对电流的检测和控制,使 DSP 起到保护输出和力矩控制输出的目的。

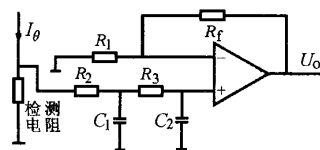


图 3 电流检测电路

该电路是利用集成运算放大器加上外围的电阻、电容等器件,构成二阶低通滤波器加放大器,主要用来对高频(8kHz 以上)的 PWM 波进行截止,以提取低频电流信号。

#### 4.2 驱动电路的设计

图 4 示出驱动电路示意图。电机控制驱动器采用 IR2130 芯片。IR2130 芯片可同时控制 6 个大功率管的导通和关断顺序,通过输出 HO<sub>1</sub>, HO<sub>2</sub>, HO<sub>3</sub> 分别控制电路上半桥 VQ<sub>1</sub>, VQ<sub>3</sub>, VQ<sub>5</sub> 的导通关断,通过 IR2130 的 LO<sub>1</sub>, LO<sub>2</sub>, LO<sub>3</sub> 分别控制三相全桥驱动电路下半桥 VQ<sub>2</sub>, VQ<sub>4</sub>, VQ<sub>6</sub> 的导通关断,从而达到控制电机转速和正反转的目的。该系统设置了各种保护措施。驱动芯片本身为功率器件提供了过电压保护。IR2130 内部有逻辑保护电路,一旦出现对级直通逻辑(即 PWM<sub>1,3,5</sub> 和 PWM<sub>2,4,6</sub> 同时为高电平),芯片立即输出全部低电平,关断所有的 MOSFET 管,以防止功率管的正相大电流击穿。另外,在功率回路保护器件中串入检测电阻,当电流过大,超过设定值时,检测信号经过逻辑判断后,将 PDPINT 脚置为低电平,使得 DSP 内部计数器立即停止计数,所有的 PWM 都输出低电平,关断驱动电路,实现过流保护<sup>[1]</sup>。

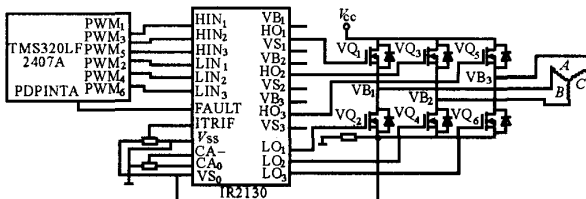


图 4 驱动电路示意图

### 5 系统软件设计

DSP 控制系统是底层控制系统,各控制功能由管理层上位机调用,软件设计采用模块调用的设计思想。图 5 示出 DSP 主程序流程、CAP 捕捉中断子程序

及 A/D 中断子程序。其中, DSP 主程序流程始终处于循环等待上位机命令状态, 在循环等待过程中打开了 CAP 捕捉中断口和 A/D 转换中断口, 在命令回应子程序中将当前系统工作状态反馈给上位机。CAP 捕捉中断处理程序主要完成对位置量的计数, 并计算速度参考量, 同时调整换相控制字, 使电机始终处于一定方向的转矩中。A/D 转换中断子程序主要完成对位置、速度或电流的 PID 调节, 以及电流的采样, 其中 A/D 转换中断由定时器 2 的周期匹配事件启动, 在中断处理程序中对电流进行一次采样, 同时对控制电机进行一次 PID 调节。PWM 脉宽调制周期由定时器 1 控制<sup>[2]</sup>。

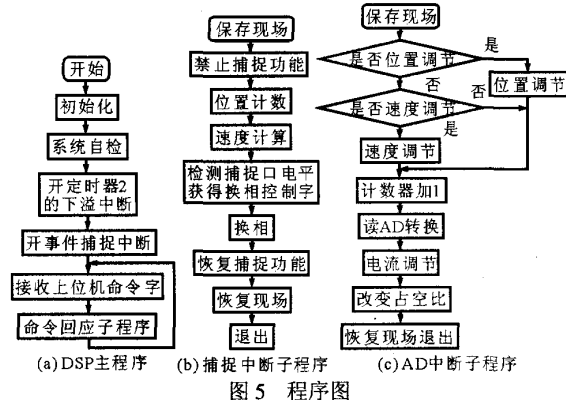


图5 程序图

## 6 实验结果及结论

实验系统的 CPUCLK 为 24MHz, 系统 PWM 频

(上接第 30 页) 采集的动、静态实验波形。图 4a, b 是纯阻性负载时, 两模块输出电压  $u_o$  和环流电流  $i_c$  及输出电流  $i_{L1}, i_{L2}$  的稳态波形。由图可见, 稳态下的环流电流很小。图 4c 是阻性负载时, 两 UPS 由空载阶跃变换到满载时的  $i_{L1}$  和  $i_{L2}$  波形。图 4d 是阻性负载时, 两 UPS 由满载阶跃变换到空载时的  $i_{L1}$  和  $i_{L2}$  波形。由图可见, 两个实验波形都证明了系统具有快速的暂态响应和良好的均流效果。

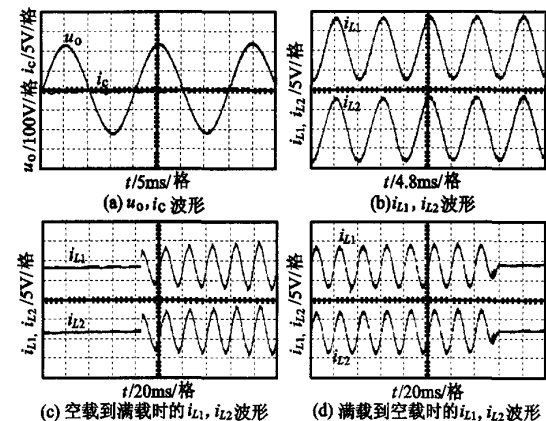


图4 实验波形

率为 8kHz, 电机采用的是 maxon 公司的 167130 型无刷直流电机, 电机参数为 50W, 最高允许转速为 50kr/min。实验转速为 16.2kr/min, 电机绕组成三角形连接, 系统采用 306DF 智能信号采集处理分析仪, 采样频率为 10kHz, 采用 6 个通道同时对电枢电压和霍尔传感器的信号进行采集, 用 matlab 分析软件对采集到数据进行处理和分析, 图 6 示出处理后的波形。

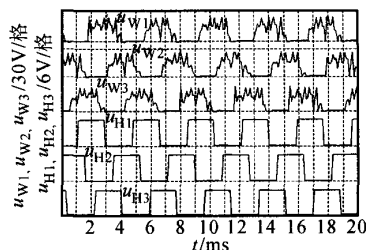


图6 电枢电压与霍尔传感器电压信号关系图

由图可见, 各路电枢电压和霍尔传感器输出之间的关系, 说明系统在软件和硬件上都满足了电机控制的要求。采用全数字化的控制技术, 增加了系统的可靠性, 使系统具有很强的可编程性, 便于系统升级。

## 参考文献

- [1] 孙礼朋. 基于 DSP 的网络化无刷直流电机控制系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2003, (5): 39~42.
- [2] 王小明. 电动机的 DSP 控制——TI 公司 DSP 应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.

## 5 结论

在深入研究分析 UPS 并联均流控制机理的基础上, 提出了先进的无互联线独立控制方式。在多个 UPS 并联模块的输出电压既不同相又不同幅值的情况下, 控制每个模块的有功功率和无功功率的均衡, 可减小或消除环流。此外, 并联模块只在输出母线处相联, 该控制方式降低了系统的复杂性。实验结果表明, 该控制方式具有良好的均流效果。

## 参考文献

- [1] Chen J F. Combination Voltage Controlled and Current Controlled PWM Inverters for UPS Parallel Operation[J]. IEEE, Trans. on Electronics. 1995, 10(5): 547~549.
- [2] Byun Y B. Parallel Operation of Three-phase UPS Inverters by Wireless Load Sharing Control [J]. IEEE Trans. on 2000, 28(2): 526~528.
- [3] 谢力华. 逆变电源的并联运行技术[J]. 电力电子技术, 2000, 34(4): 1~3.
- [4] Moon M S, Johnson R W. DSP Control of UPS Inverter with Over-current Limit Using Droop Method [A]. PESC 30th Annual IEEE '99[C]. 1999, 1: 552~557.