

机器人手指用无刷直流电动机驱动系统设计

汪为庆, 金明河

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 在机器人多指仿人灵巧手的设计之中, 手指的灵巧性在很大程度上依赖于手指机械结构及其尺寸大小, 这对手指驱动系统的设计提出了严格的要求。简要描述了灵巧手手指电气系统的结构, 详细介绍了基关节基于 FPGA 的电机驱动电路。

关键词: 灵巧手; 手指电气系统; 无刷直流电机; 驱动系统; FPGA

Design of BLDC Motor Driving System for Robot Hand

WANG Wei-qing, JIN Ming-he

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: In the design of robot hand, the limited small spaces place strict requirements on the size of motor driving system. The paper briefly describes the structure of the electrical system in the finger of a new dextrous hand, introduces driving system based on FPGA in the base joint of the finger.

KEY WORDS: Robot hand; Electrical system of finger; BLDCM; Driving system; FPGA

1 灵巧手手指电气系统概述

图 1 是灵巧手手指系统的电气及通信结构。灵巧手手指共有 3 个自由度, 分别由 3 个电机控制。在其机械结构中, 基关节部分装配有两个电机, 实现俯仰和侧摆运动; 指节部分装配一个电机, 控制指节的屈伸运动^[1]。为了达到精确地抓取操作, 必须实现位置反馈和力反馈, 因此手指的每个关节还增加了位置传感器和力矩传感器。此外, 指尖处的 6 维力/力矩传感器可以检测到灵巧手与外部环境的接触力, 进而为灵巧手的力控制提供力感信息^[2]。

基于模块化设计, 整个灵巧手手指驱动系统分为: 基关节部分和指节部分。基关节模块采用 FPGA 芯片 EP2C8f256I7 驱动两个电机, 同时负责基关节位置传感器信号的采集与传输。指节模块采用 DSPIC30F4011 芯片驱动一个电机, 同时负责指节位置传感器、基关节力矩传感器、指节力矩传感器、指尖 6 维力/力矩传感器信号的采集与传输。

在通信方面, 基关节模块在灵巧手手指系统

中起着承上启下的作用: 一方面它把指节模块所获取的传感器信号传送给上位机(手掌控制器), 同时又把从上位机接收到的控制信号传送给指节, 以控制指节部分的运动。在驱动控制方面, 基关节模块控制两个无刷直流电机的运行。

本文主要介绍基关节模块基于 FPGA 的无刷直流电机驱动电路系统及其软件设计。

2 驱动电路硬件设计

机器人多指仿人灵巧手狭小的机械整体空间给驱动电路设计人员提出了严格的尺寸要求。通过手指的结构优化设计和减小驱动电路的体积是提高机器人手的灵巧性能和结构紧凑性的两个重要途径^[3]。传统三相无刷直流电机的驱动电路具有很大的体积, 并且驱动电路复杂, 而如果直接利用 FPGA 内部丰富的硬件资源实现传统驱动芯片的功能, 驱动三相桥电路, 可以简化驱动电路并最大限度地减小电路尺寸。基关节模块驱动电路框图如图 2 所示。基关节模块的 FPGA 将实现以下功能。

a) 电机数字霍尔信号采集。对两个电机的 6 路数字霍尔信号采集;

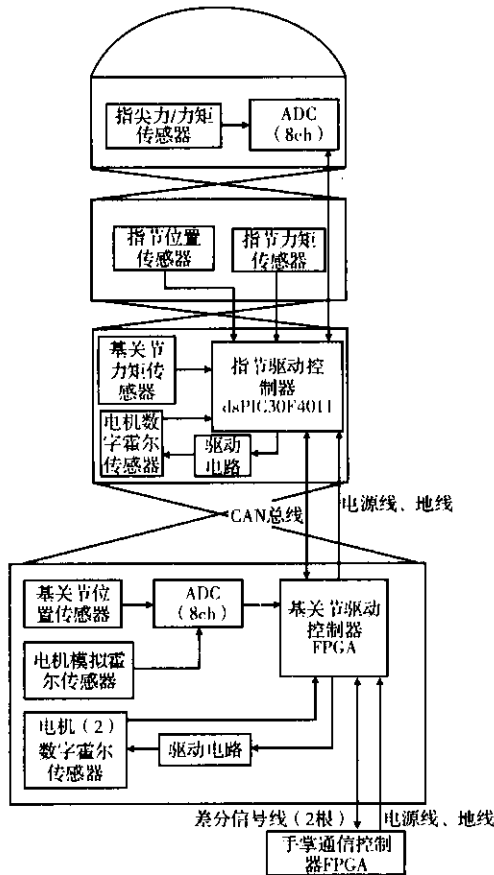


图1 灵巧手系统的电气及通信结构

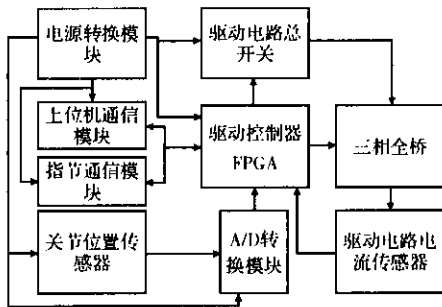


图2 基关节驱动电路框图

b)传感器信号的采集。包括基关节位置传感器、电机模拟霍尔传感器信号的采集；

c)数据通讯。与上一级(手掌)的通讯采用 PPSec(Point to Point Serial Communication)通信模块,将所有传感器信息打包上传,接收控制信号^[4];与指节模块的通讯采用 CAN 总线;

d)电机驱动。根据上一级(手掌)的指令需要产生电机控制信号来驱动 mosfet,进而控制电机的运行;

e)控制两路电机主回路电流的通断。当上电复位时,需要让电机不通电,这时 FPGA 控制功率开关管控制流向电机的主回路电流的通断;

f)电机电流反馈的保护。当电机电流过大时,

FPGA 发出控制信号,使电机电流关断。

2.1 三相全桥驱动电路模块

本文采用 EC20 型无刷直流电机作为手指的驱动元件。电机内部集成了霍尔位置传感器,具有 3 路数字霍尔信号输出。FPGA 根据这些霍尔信号产生基本的电机换向逻辑,实现无刷电机的无接触换向。驱动电路采用 FDC6327C 芯片的 MOSFET 组成三相逆变桥,来控制电机三相电流的通断。FPGA 发出的指令信号 MPA_P、MPA_N、MPB_P、MPB_N、MPC_P、MPC_N 控制电机三相电流的通断,采用两两通电方式,PWM 信号加载于上半桥,即 MPA_P、MPB_P、MPC_P 信号中包含了占空比信息,通过调节占空比信息,即可进行电机的调压调速^[5]。

图3是无刷直流电机三相全桥驱动电路。T2、T3、T5、T6、T8、T9 是 N 沟道的 mosfet, T1、T4 和 T7 是 P 沟道的 mosfet。当 MPA_P 信号为高电平时,T3 管导通,再通过 R1 和 R2 的分压使 P 沟道的 T1 管导通;此时如果 MPB_N 为高电平,则 T5 管导通,这样,电流经过 T1 管、电机、T5 管构成闭合回路。

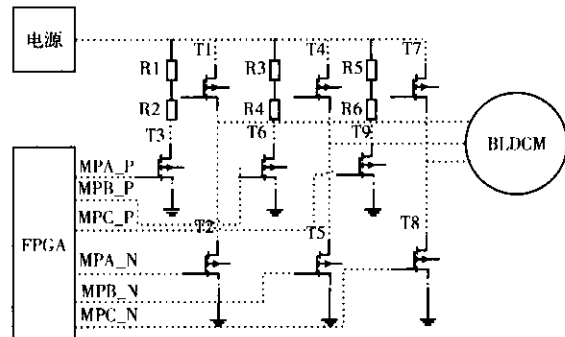


图3 三相全桥电路

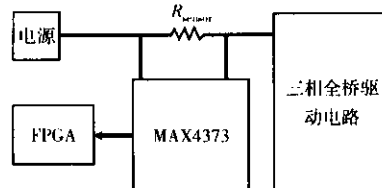


图4 电流检测电路

2.2 电流检测

为了防止通过电机的电流太大而发生意外,系统中增加了驱动电路的电流检测环节。基关节的电流检测采用 MAX4373 芯片,将采集到的电压(经过一个电阻)放大 20 倍,然后与内部自带的 0.6 V 的参考电压进行比较,如果比 0.6 V 高,则

输出一个高电平,进入 FPGA。在 FPGA 中根据这个电平的变化,进行相应的电流保护措施(切断三相全桥驱动电路)。

MAX4373 芯片的特点有:工作电流低、典型值为 50 μA ;工作电压范围宽,从 2.7 V 到 28 V;控制的阈值电流精度高,典型值为 0.66%;电流检测放大器有 3 种固定增益(+20、+50、+100,分别用型号后缀 T、F、H 表示),无需外接设定增益电阻;有极宽的共模电压范围,从 0 V ~ 28 V;工作温度范围 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$;8 引脚 μMAX 或 SO 封装。该器件内部由电流检测放大器、输出锁存型电压比较器及基准电压源等组成,具有高度集成的特点,并且满足电流检测的性能要求。

2.3 保护电路

当系统刚上电时,FPGA 的输出引脚为状态不定,有可能导致三相全桥电路的上下桥臂的直通而烧毁电路。为防止意外发生,应该首先切断驱动电路总回路的电流。这是通过一个功率开关管 FDC6330L 来实现的。正常情况下,FDC6330L 的 ON/OFF₂ 引脚通过一个下拉电阻接地,使功率开关管处于关断状态。当电机正常运行时,可以通过 FPGA 编程,向 FDC6330L 发出指令,打开总回路电流。其电路图如图 5 所示。

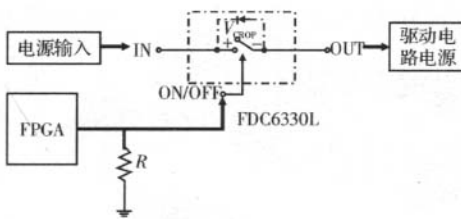


图 5 保护电路图

FDC6330L 内部集成有一个 N 沟道小功率 Mosfet 和一个 P 沟道大功率 Mosfet。N 型 Mosfet 的输出用来驱动 P 型 Mosfet,从而实现弱电控制强电的功能。

2.4 驱动电路硬件编程

FPGA 实现的驱动芯片的功能主要是:为无刷电机控制提供诸如控制信号输入、产生换向逻辑、门驱动输出和保护电路等一些功能。所有输入控制信号,如 PWM、方向和刹车信号,是由上层控制器(手掌)发给手指的 FPGA 的。无刷电机霍尔位置传感器提供的霍尔信号通过 FPGA 的内部逻辑电路产生换向逻辑,从而实现电机无接触换向。换向逻辑和输入控制信号通过内部综合产生的 6 路高、低端门驱动信号,从而控制电机。FPGA 的外围保护电路提供限流和短路保护。

驱动电路的软件设计主要包括以下几个方面^[6]:1)对于输入的电机霍尔位置传感器信号,能够通过基本的逻辑操作,产生保证电机正常换相的 6 路控制信号的输出;2)对于上层给定的占空比,能够产生一路相应的 PWM 信号,用这个信号来调整电机的转速^[7];3)能够根据复位、刹车、使能、方向等信号进行相应的操作;4)当检测到驱动电路电流超过所允许的最大值时,必须使电机关断。

图 6 是电机正转时的电路仿真^[8]。系统的输入时钟为 75 MHz,输入的三相数字霍尔信号周期为 600 μs ,间隔为 120°。当地址位为 00 时,通过片选信号 ChipSelect 为高电平和 Write_n 为低电平,将 16 位数据 WriteData 写入,其中 WriteData 的最高位表示使能,第 14 位是刹车位,第 13 位是方向位,第 11 位到第 1 位为 11 位的 PWM 占空比信号。Reset_n 为复位信号,当它为低电平时,系统输出全为零。Limit_Mot 信号是电流检测环节的输出量,如果为高电平,表示整个驱动电路电流已经达到最大值,此时 6 路控制信号 MPA_P、MPA_N、MPB_P、MPB_N、MPC_P、MPC_N 输出全为零,即切断驱动电路,起到保护电路的目的。

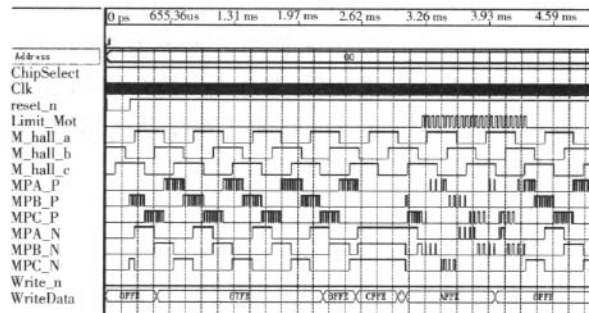


图 6 FPGA 驱动电路信号处理电路仿真图

3 软件开发

在系统的软件设计过程中,灵巧手指单个关节的无刷直流电机伺服系统采用角度、角速度双环从属控制结构。电机的换相、转速和加速度以及电机输出转矩是伺服系统设计必须考虑的因素。电机的旋转输出与手指关节的运动存在一个固定的关系,这个关系由灵巧手机械系统的结构决定。位置传感器获得旋转关节位置作为控制系统的位置反馈。在灵巧手抓握某个物体或者手指与外界环境接触时,系统利用关节转矩传感器反馈信号以实现精确的转矩控制。霍尔传感器的输出信号除了实现电机换向逻辑转换外,另外一个重要的功能是计算电机转子

的位置及速度。由于霍尔传感器本身具有较高的分辨率,而关节位置传感器的位置信号输出具有相对较大的噪声,因此驱动器控制采用霍尔信号折算得到的关节速度作为控制系统的速度反馈。FPGA根据这些信号,对电机进行闭环控制。传感器模拟输出信号通过串行AD转换成串行数字信号,串行AD通过SPI总线与FPGA实现通信。FPGA对这些信号进行处理产生PWM、方向和刹车控制信号,然后产生驱动控制信号的输出给三相全桥驱动电路,实现对无刷直流电机的驱动和灵巧手关节的转矩和位置闭环控制。

在本系统中,程序的任务是在规定的控制周期内,通过SPI模块控制AD7927芯片的同步采样,将电机霍尔传感器、关节位置传感器、转矩传感器的数字量以及指节模块的传感器数字量送至中央处理器32位CPU,CPU将各传感器信号进行预处理后,得到实时的电机速度、关节位置、关节转矩等状态参数;通过PPSeCo通信模块得到上位机发出的控制任务及控制参数,如期望关节位置、期望关节转矩等;这些控制参数一部分通过CAN通信模块传送给指节模块,另一部分由CPU实现无刷直流电机的闭环控制算法并将控制信号(PWM、方向、刹车)送入电机控制模块,实现实时控制^[9]。图7是简要流程图。图8为基于FPGA的驱动电路板。它是(25×46)mm²的6层PCB板,包括FPGA芯片、配置电路和两路驱动电路,它可以同时驱动2个无刷电机。

4 结论

本文简要介绍了灵巧手指电气系统结构,着重阐述了基于FPGA的无刷直流电机驱动系统的硬件结构和软件设计。该电路能够实现三相无刷直流电机的驱动控制。通过采用FPGA的在线可编程技术^[10],整个驱动系统结构灵活紧凑、易于调试,极大地简化了驱动电路的结构,便于在以后的工作中实现驱动系统的微型化。

参考文献

[1] 王念峰. HIT-DLR 多指灵巧手指结构设计及其位置控制的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2002:14-15.
 [2] 姜力. 具有力感知功能的机器人灵巧手指及控制的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2001:79-80.
 [3] 何平,金明河,刘宏. 采用Si9979的无刷直流电动机驱动电路设计[J]. 微特电机,2003,32-34.
 [4] 魏然,金明河. LVDS在仿人灵巧手高速串行中的应用[J]. 工厂自动化,2004,90-91.
 [5] 谭建成. 电机控制专用集成电路[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

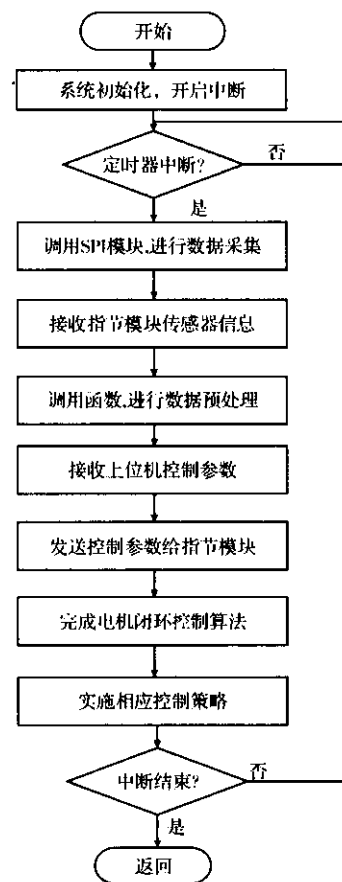


图7 主程序流程图

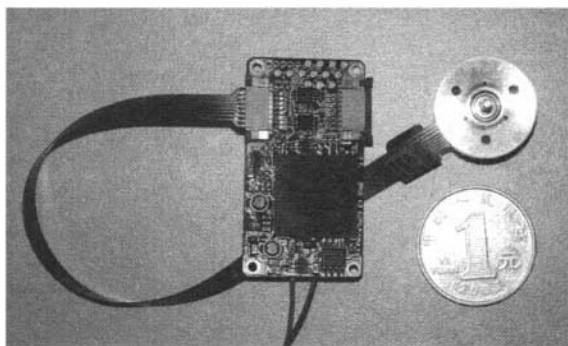


图8 FPGA驱动电路板

[6] A Compact Controller for Brushless DC Motor. Vishay Siliconix, Number: 70585.
 [7] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
 [8] 林明权等. VHDL数字控制系统设计范例[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
 [9] 魏然,金明河等. 基于NIOS软核处理器的直流无刷电机控制系统设计[J]. 电气传动,2005:19-21.
 [10] 刘常澍,赵雅兴. 数字电路与FPGA[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.

作者简介:汪为庆(1983-),男,安徽人,硕士研究生,研究方向为机器人技术。

金明河(1970-),男,副研究员,研究领域为机器人技术及机电一体化技术。