

无刷直流电机的控制研究

李利平, 益斌, 徐卫忠

(上海 711 研究所, 上海 200090)

摘 要: 设计了一种采用 TMS320LF2407 DSP 作为主控制器, 集成 IGBT 作为功率驱动元件的无刷直流电机控制器, 对电机转速和电流的双闭环 PID 调节。通过在跑步机上的试验表明该控制器调速性能好、响应快、精度高、扭矩大的特点。

关键词: DSP; 双闭环; PWM 控制; HALL 传感器

[中图分类号] TM33 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2012)03-0015-03

Design And Control Of Dc Brushless Motor

LI Li-ping, YI Bin, XU Wei-zhong

(Shanghai 711 Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: A kind of DC brushless motor controller with TMS320LF2407 as main controller and integrated IGBT power driver component is designed, Double closed loop PID is applied to control the speed and current of motor. The result of experiment of show the controller designed has good performance of speed adjustability, quick response, high precision and big torque.

Keywords: DSP; Double closed loop; PWM control; HALL sensor

0 引言

无刷直流电机以其高效率、长寿命、低噪声以及较好的转速-转矩特性等优点, 在汽车、航天、家用电器等行业得到了较好的发展。由于成本及技术等要求, 目前电动跑步机采用无刷直流电机作为动力还是空白, 受有关单位委托于研制出一种适合于大功率 ($>1500\text{ W}$) 无刷直流电机调速的控制器, 该控制器输入电压范围位: AC 110 ~ 230 DC 170 ~ 320, 转速控制范围为 200 ~ 4000 r/min, 调速精度为 3%。

1 系统组成及控制结构

1.1 系统组成

该系统由控制部分和电机部分组成, 系统框图如图 1 所示。控制部分主要由 DSP 处理器、集成 IGBT 功率驱动元件、HALL 传感器的滤波整形以及人机接口等电路组成。而电机部分则在内部安装了能够感应磁场的 HALL 传感器。

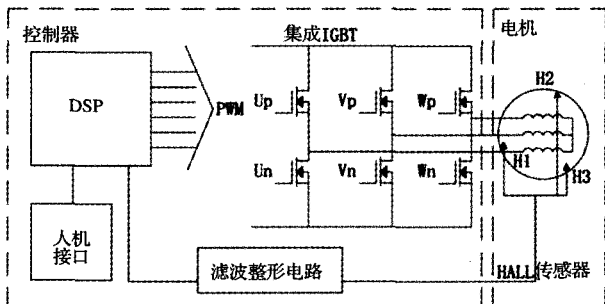


图 1 系统组成框图

1.2 无刷直流电机的控制结构

直流无刷电机是同步电机的一种, 电机转子的转速受电机定子旋转磁场的速度及转子极数 (P) 影响: $N = 120f / P$ 。在转子极

数固定情况下, 改变定子旋转磁场的频率就可以改变转子的转速。直流无刷电机即是同步电机加上电子式驱动器, 控制定子旋转磁场的频率并将电机转子的转速回授至控制中心反复校正, 以达到接近直流电机特性的方式。也就是说直流无刷电机能够在额定负载范围内当负载变化时仍可以控制电机转子维持一定的转速。直流无刷驱动器是通过将直流电压转换成 3 相电压来驱动电机。转换器一般由 6 个功率 IGBT ($U_p/V_p/W_p/U_n/V_n/W_n$) (如图 1) 连接电机作为控制流经电机线圈的开关。DSP 控制器则提供 PWM 决定 IGBT 开关频率及换相的时机。直流无刷电机一般希望使用在当负载变动时速度可以稳定在设定值而不会变动太大的速度控制, 所以电机内部装有能感应磁场的霍尔传感器 ($H1/H2/H3$) 作为速度闭环控制, 同时也做为换相的依据。

2 控制系统的硬件组成及功能

控制系统的硬件主要由主控制器、人机接口、功率驱动、A/D 转换以及电源转换电路等部分组成。

主控制器采用 TI 的 C2000 型 TMS320LF2407A^[1] 作为主控芯片, 它的最高主频可以达到 40MHz, 采用增强型哈佛结构其存储空间可以通过三种并行总线进行访问, 在给定的机器周期里中央算术逻辑单元可以同时执行三种存储操作。内部集成了 8 路 PWM 输出控制, 其中 2 路由定时器产生, 另外 6 路由 3 个带死区控制的比较单元产生, 内部还集成了 6 个输入捕捉单元以及 8 路 10bit 的 A/D 转换器, 特别适合于电机控制。

人机接口是用于连接上位机和控制器, 采用 RS485 通讯, 设定电机转速、改变 PID 参数以及显示电机实际转速和电流。

功率驱动部分采用了 MITSUBISHI 公司的第 4 代集成驱动芯片 PS21765, 该功率元件集成了 6 个 IGBT (IGBT1 ~ IGBT6) 开关, 内置 HVIC 具有电平转移功能 (level shift function) 使得 DSP 与模块之间可不再需要隔离电路即实现了无光耦直接驱动, 并具有过电流自关断保护系统, 大大增强了系统抗干扰能力, 如下图 2 所示。DSP 输出的 6 路 PWM 信号经过限流电阻后直接接 PS21765

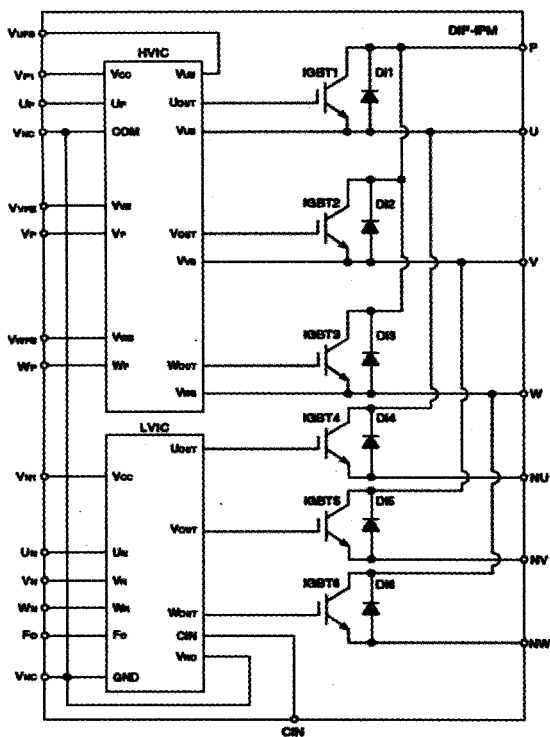


图2 第4代集成驱动芯片 PS21765

的 Up/Vp/Wp/Un/Vn/Wn 端, IGBT1 ~ IGBT3 组成上桥臂, IGBT4 ~ IGBT6 组成下桥臂, U/V/W 连接电机, Fo 端为故障输出端, DSP 一旦检测到电平跳变就应该关闭 PWM 输出。

A/D 转换用于检测电机电流, 选用 FHS40 - P 芯片, 该芯片是利用电磁感应原理, 通过检测流过导线电流感生出的磁场, 反算出导线电流, 经过芯片转换为与电流对应的电压, A/D 转换得到电机电流, 根据芯片厂商提供的资料, 按照下面方式布线, 具体见下图3所示。

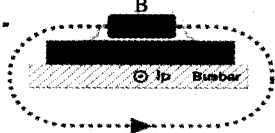


图3 双闭环PID框图

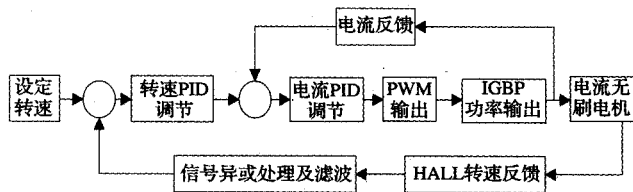


图4 直流电机电流检测模块

电源模块主要是为主控制器、功率驱动模块以及各个芯片供电, 强电转换模块比较复杂, 该模块包括整流(将 220VAC 转换成 220VDC 直流电)、变压(将 220VDC 转换成 5VDC 及 15VDC)以及隔离模块。由于 PS21765 需要稳定的 15VDC 给模块预充电, 所以采用了自整定的 PWM 进行自动调节。

3 控制系统软件设计

无刷直流电机控制器基本设计思路是: HALL 传感器反馈回的三路脉冲信号经硬件异或, 滤波后用于检测电机转速, 将它与设

定转速比较后得到偏差, 经过第一级 PID 计算, 得到直流电机电流设定值, 然后设定值与电流检测芯片反馈回的值进行二次比较, 得到电流偏差, 再做第二级 PID 计算, 得到的调节量输出到 PWM 端口去控制 IGBT 开关时间。双闭环 PID 控制框图如图4所示。

系统软件设计主要包括两大部分: 主控制流程和各个子流程, 子流程又包括: 转速捕捉测量、两级 PID 计算、定时器中断响应、电机换向流程; 主流程是在系统初始化完成后循环执行的一段程序,

该段程序在正常运行过程中反复执行, 用于人机交互以及定时通讯传输, 主流程在运行过程中属于后台程序, 它的执行优先级最低, 详细流程见图5所示。

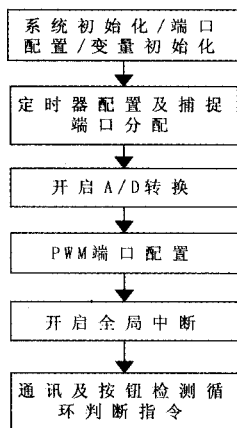


图5 系统控制主流程

3.1 转速捕捉流程

前面硬件系统已经提到, 转速是三个 HALL 传感器经过硬件异或后得到的一路脉冲信号, 利用 DSP 的捕捉端口捕捉该脉冲信号的每个上升和下降沿计算得到脉冲信号的频率, 从而得到电机转速, 根据 DSP 捕捉端口工作原理, 每个脉冲跳变沿到来时, DSP 将进入捕捉中断, 在该中断程序中捕捉寄存器存储这次中断发生的时间, 利用寄存到的时间差就可以得到脉冲周期, 也即脉冲频率, 电机级对数为固定值, 根据公式计算得到电机转速, 为了保证转速的稳定, 在每 10 组转速中进行算术平均处理。

3.2 两级 pid 计算

PID 控制是最早发展起来的线性控制策略之一, 已有多年历史, 目前仍然是工业控制系统中最常用的控制算法。本控制软件采用两级 pid 算法对电机的转速和电流分别进行闭环处理。为了保证响应及时, 两个 PID 计算流程均放在定时器中断中完成, 并且严格执行时间, 本系统中执行周期分别为电流环 1.25ms 转速环 4ms, 也即每 1.25ms 进行一次电流 pid 计算, 每 4ms 进行一次转速 pid 计算。

3.3 定时器中断

定时器作为控制器的“脉搏”为 DSP 运行提供执行节拍, 两个定时器中断分别提供 PID 计算时间节拍 TIMER4 和电流检测节拍 TIMER3, TIMER3 的中断周期为 400us, TIMER4 的中断周期为 300us, 每隔 300us 定时器的计数器将复位为 0, 重新开始计数, 并进入定时器中断服务程序, 中断服务程序中调用了 PID 程序进行计算, 最后将计算结果转换成 PWM 输出到 IGBT 功率驱动器。

3.4 电机换向流程

前面已经提到无刷直流电机在设计过程中在其转子上埋入 3 个 HALL 传感器, 这样电机转动过程中 HALL 传感器就会输出脉冲信号, 根据脉冲信号就可以知道电机的位置, 如下表 1 所示电机的转动角和 HALL 传感器输出电平有这样一个关系, 判断 HALL 传感器的高低逻辑, 软件中我们把它定义成宏加快程序执行速度。

表1 IGBT 导通逻辑与 HALL 信号关系表

| 角度 | HALL 信号 | IGBT 导通逻辑 |
|-----|----------|-------------------|
| 0 | H1 H2 H3 | Up Vp Wp Un Vn Wn |
| 60 | 1 0 1 | 1 0 0 0 1 |
| 120 | 1 0 0 | 0 1 0 0 1 |
| 180 | 1 1 0 | 0 1 0 1 0 |
| 240 | 0 1 0 | 0 0 1 1 0 |
| 300 | 0 1 1 | 0 0 1 0 1 |
| 360 | 0 0 1 | 1 0 0 1 0 |
| 420 | 1 0 1 | 1 0 0 0 1 |

```
#define SetUn PBDATDIR = PBDATDIR|0x0020
#define SetVn PBDATDIR = PBDATDIR|0x0040
#define SetWn PBDATDIR = PBDATDIR|0x0080
#define ClrUn PBDATDIR = PBDATDIR&0xFFDF
#define ClrVn PBDATDIR = PBDATDIR&0xFFBF
#define ClrWn PBDATDIR = PBDATDIR&0xFF7F
```

4 试验情况

根据软硬件的不断改进了调试,硬件先后试验了4版,终于解决了强弱点混合电路板的干扰问题,彻底将强弱电分离开,并最终配机试验获得成功。下表2示出试验结果。

5 结束语

本文设计了一套无刷直流电机控制器,硬件上强弱电分离,

(上接第11页)

2.2.2 ARU 高功率因数整流器

ARU 高功率因数整流器特点:

(1) 有源整流单元允许四象限运行,这使得在整个功率范围内正反两个转向上都可实现再生制动。

(2) ARU 在整个运行范围内将功率因数控制为1,即使在低速范围也是如此。

(3) ARU 能随时补偿连接到同一电网的其他负载产生的无功功率。

(4) ARU 通过使用预定义优化的脉冲模式,降低和消除主电网上的谐波。

通过IGCT来实现这个功能。通过基于IGCT的控制,系统可以很好的将功率因数控制为1,将能量从网侧几乎全部传递到电机,同时将在反向制动时将能量反馈回电网^[5]。

表2 不同整流器的功率因数及特点

| 整流电路种类 | 特点 | 功率因素(电网侧) |
|----------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 相控整流 | 主要取决于移相角 $\cos\alpha$ | $\cos\varphi \approx \cos\alpha$ ($\cos\varphi_{\max} \approx 0.86$) |
| 二极管整流 | 不可控 | $\cos\varphi \approx 1.0$ |
| PWM 整流电路 | 输入电流波形为正弦波 保证电网侧 $\cos\varphi = 1.0$ (可调) 功率可以双向传递,具有再生能力 | $\cos\varphi \approx 1.0$ |

2.2.3 无熔丝跳闸保护系统

基于考虑大容量高速快熔的不可靠性可能会引起设备故障、成本高、难于精确制造、精度差、更换时间较长等缺点,ACS6000系统采用了无快熔全触发保护方式。当某一桥臂的脉冲紊乱或IGCT不能关断导致桥臂直通短路时,故障电流在快速短路保护

表2 实际转速与设定转速对照表(功率1500w)

| 序号 | 设定转速(rpm) | 实际转速(rpm) |
|----|-----------|-----------|
| 1 | 200 | 195~205 |
| 2 | 500 | 495~505 |
| 3 | 1000 | 995~1005 |
| 4 | 1500 | 1495~1505 |
| 5 | 2000 | 1995~2005 |
| 6 | 2500 | 2495~2505 |
| 7 | 3000 | 2995~3005 |
| 8 | 3500 | 3490~3510 |
| 9 | 4000 | 3985~4005 |

软件上采用双闭环PID控制算法对电机的转速和电流分级控制,对电机换向逻辑和驱动逻辑进行了分析,解决了IGBT高频开关造成的脉冲干扰,试验验证该控制器及算法稳定可靠。

参考文献:

[1] 秦永左,杨光,冯涛,等. TMS320LF240X DSP 原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009:218~230.

【作者简介】李利平(1979-),男,湖北汉川人,硕士,主要研究方向:自动控制及机舱自动化。 益斌(1973-),男,上海人,学士,主要研究方向:自动控制及机舱自动化。 徐卫忠(1964-),男,上海人,学士,主要研究方向:电力电子。

装置(FSCD)中感应出异常电源,给INT接口板发出异常光信号。故障单元INT板判断接受到的信号异常时,通过INT板间的光纤链路,快速让所有INT发出全触发脉冲,使所有桥臂的IGCT脉冲导通,分流故障桥臂的过电流^[6]。系统为保证全触发保护的快速性,所有整流和逆变装置的INT接口板之间都有专门的光纤链路。全触发保护同时,主逆变器INT板发出直流高压开关分闸指令,每台逆变器INT发给各自励磁装置电源跳闸指令,避免电源侧和马达侧能量继续流入装置。

3 结束语

ACS6000中传动系统的动态响应快、范围调速宽,不仅提高了传动控制设备的先进性、可靠性,而且由于应用了三电平交一直-交变频传动技术控制同步电机,改善了电网质量,提高了功率因数,省略了谐波补偿装置。该系统自运行以来性能稳定可靠,动态速度波动精度小于1%,并且成功地轧制了不同规格的板材,为公司创造了可观的经济效益。

参考文献:

[1] ABB Switzerland Ltd. ACS6000 Medium Voltage Drives User's Manual [M]. ABB,2004.
[2] ABB Switzerland Ltd. ACS6000 Medium Voltage Variable Speed Drive [M]. ABB,2002.
[3] 吴凤英. ABB 中压传动系统在钢管轧制中的应用[R]. 天津理工大学,自动化学院,2008.
[4] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京:高等教育出版社,2003,4.
[5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003,8.
[6] 张林,王雷,黄志刚,等. ACS6000 无快熔保护方式的分析与探讨[R]. 宝钢股份设备部,2009.

【作者简介】孙坚(1982-),男,上海人,工学学士,工程师,现就读于上海交通大学电气工程系工程硕士,专业:电气自动化。