

# 基于 DSP 和 CPLD 的无刷陀螺马达 锁相环数字控制系统

马悦, 赵忠, 邓钧君

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

**摘要:**介绍了一种使用高性能数字信号处理器(DSP)和复杂可编程逻辑器件(CPLD)作为核心元件的无刷陀螺马达全数字稳速系统。其中采用基于 DSP 的软件锁相环(PLL)算法实现了高精度速度闭环,采用 CPLD 实现了无刷电机的电子换相和逻辑保护。经过实际样机测试,电机在较宽的转速范围内均能进入相位锁定状态,电机转子霍尔(Hall)位置传感器的反馈信号能稳定跟踪给定的基准频率信号,达到同频和接近于同相位的效果,且转速稳定精度较高,具有工程实用价值。

**关键词:**无刷直流电机;全数字控制;DSP;CPLD;软件锁相;高精度

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2012)01-0110-04

陀螺仪作为导航自动控制系统中的一个高精度敏感元件,广泛应用于航空、航天和航海领域。无刷直流电机由于其效率高、体积小、重量轻,而且电机本体无失步、驱动逆变器无直通短路等问题,因此可用作长寿命的陀螺马达。一般陀螺电机的转速稳定度要求很高,需要达到万分之一的控制精度<sup>[1]</sup>,而采用运算放大器的 PI 控制和常规硬件电路,常常会因为器件的温漂而达不到要求的速度精度。另外,采用专用的锁相环集成器件(如 MC4044)进行控制,又会使用系统的硬件复杂,同时给定的频率参数会因振荡电路、分频电路漂移和锁相器件本身的漂移,往往也达不到较好的效果。

本文使用高性能 DSP 器件作为软件锁相环(SPLL)的实时控制核心,结合 CPLD 器件来完成大量的逻辑运算,并利用无刷直流电机自身所固有的转子霍尔(Hall)位置传感器信号与电机转速之间的固定关系,通过软件进行无刷直流电机转子频率信号的锁相控制,进而实现了无刷陀螺马达的高精度稳速。

## 1 系统硬件结构和工作原理

本文介绍的无刷陀螺马达是一种外转子稀土永磁无刷直流电机,其锁相稳速控制系统的原理框图如图 1 所示。

系统中,DSP 接收到外部起/停控制信号,实时检测电机的三相转子 Hall 位置传感器信号,经过软件锁相换算法,根据无刷直流电机调压调速的基本原理,输出电机的 PWM 斩波信号给 CPLD。而 CPLD 则根据电机的三相转子 Hall 位置传感器信号,按照无刷直流电机 120° 三相六状态换相方式,产生三相桥式逆变器功率器件的六路 PWM 调制信号,实现无刷陀螺马达的稳速控制。其中,在主功率驱动电路、电机转子 Hall 位置传感器、保护和故障输出电路与 CPLD 电路信号之间均采用光电耦合器隔离,以防止强弱电之间的高频干扰。

### 1.1 DSP 电路

根据需求分析,本文采用的 DSP 器件为 TMS320F2811,其单指令执行周期为 6.67 ns,能在一个周期内完成  $32 \times 32$  或两个  $16 \times 16$  位的乘法累加运算;同时还集成了 Flash 存储器(128KB)、引导 ROM(4KB)、数学运算表和 OPT ROM(2KB),从而大大改善了微处理器应用的灵活性;16 通道高性能 12 位 ADC 单元可以实现对多通道模拟信号的采样<sup>[2]</sup>。

TMS320F2811 主要完成外部起/停信号、三相转子位置传感器信号的实时采样;实现无刷陀螺马达的阶梯式软起动、转速给定、软件锁相控制算法、给 CPLD 占空比可调的 PWM 信号等功能。

使用事件管理器 EV 模块中的定时器产生转速给定信号(频率),作为电机稳速的基准信号。由事件管理器 EV 模块中捕获单元 CAP 对无刷直流电机转子 Hall 位置传感器输出信号的电平跳变进行中断捕获,并计算出电机转速的实际反馈信号。将给定信号和反馈信号经 DSP 内部的比较和锁相算法,通过 PWM 完全比较单元产生一路 PWM 信号,并输入给 CPLD 芯片。

### 1.2 CPLD 电路

本文采用的 CPLD 器件 EPM7064AE,是一种高性能 3.3 V 电擦除的可编程逻辑器件,基于 Altera 公司的第二代 MAX 结构,运用了先进的 CMOS 技术且支持 JTAG 接口。其规模为 1250 个可用门,工作频率可达 222.2 MHz。逻辑处理能力很强,使用 Altera 公司的 MAX + PLUS II 软件开发环境,使用 VHDL 语言可对 CPLD 内部逻辑进行编程<sup>[3]</sup>。

系统中,CPLD 芯片的主要任务是根据检测的 Hall 转子位置传感器信号,实现无刷陀螺电机的电子换相,完成六路综合 PWM 信号的输出分配,同时 will 起/停信号、驱动芯片故障信号以及电源过压、欠压信号进行逻辑综合。

收稿日期:2011-12-06

基金项目:2011 年西北工业大学本科毕业设计(论文)重点扶持项目资助。

作者简介:马悦(1989—),主要从事电机数字控制技术研究。

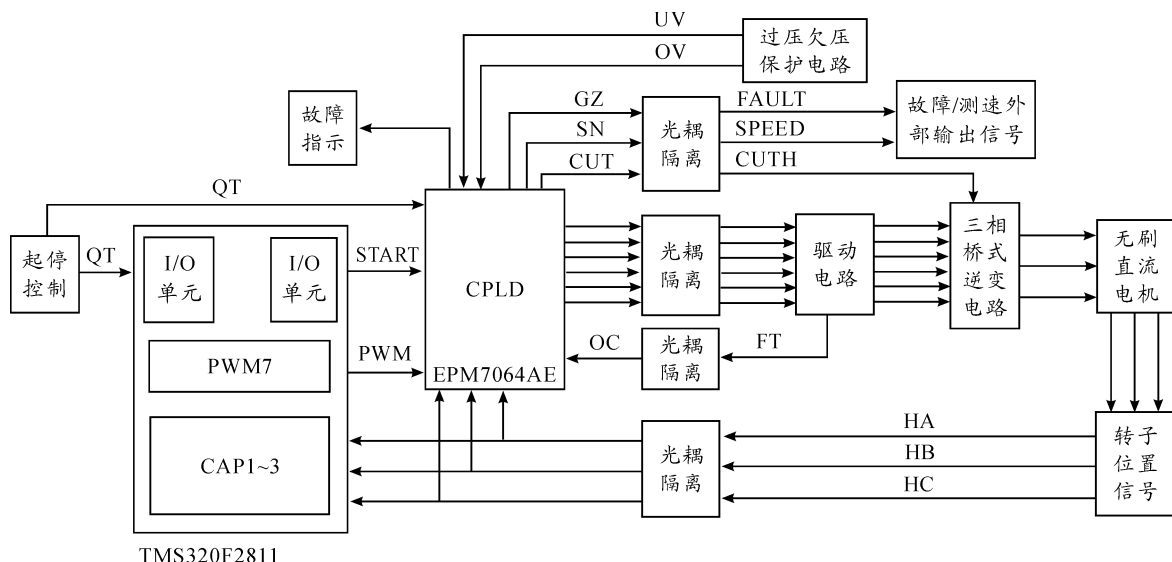


图1 陀螺马达控制系统原理框图

## 2 转速控制策略

### 2.1 阶梯式软起动

由于陀螺电机的惯量较大,在电机起动的瞬间,由于电源电压突然加到电机绕组上,由于转速为零,绕组反电势也为零,这时电机内会产生很大的起动电流,一般为电机额定工作电流的十几倍,会对电机机械轴产生扭伤,或对逆变器功率管产生不可修复的损坏。因此,系统中采用了一种阶梯式软起动方法,以抑制起动电流尖峰的影响。

软起动功能通过DSP软件实现。在主程序中,从初始状态开始,让DSP输出的PWM斩波信号占空比按规定的步长以幅值阶梯增大,并不断检测电机实时转速,当电机转速到某一预定值时,改变软起动状态标志,软起动结束,程序进入转速锁相环稳速阶段。

### 2.2 软件锁相环原理

由于无刷直流电机采用稀土永磁励磁,其磁场不可调节。通常通过改变PWM斩波信号占空比的方式,调节加到无刷直流电机绕组上的平均电枢电压。所以尽管采用锁相环控制策略,无刷直流电机的转速闭环依然采用调压调速<sup>[4]</sup>。

传统的硬件锁相环多采用专用集成芯片,如MC4344和MC4044等。一般的锁相环都包含有鉴频鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)等三个部件。为了节省空间、降低成本,论文利用功能强大的DSP芯片来实现软件锁相功能。

软件锁相环就是通过软件编程来实现锁相环的功能,采用的是数字信号处理方法,将锁相环软件算法置入微处理器中,对电机进行稳速控制,如图2所示。软件锁相环技术可以使反馈信号和给定信号的频率一致,而信号相位差为零或保持某一常数,也就是说使给定和反馈信号同步。如果两信号的频率不同或是相位差不固定,系统会通过图2的闭环反馈自动进入锁相状态,直到给定和反馈信号频率相同,相位差保持为零或常数为止。

理论上,传统的PI控制可以使转速反馈信号与转速给定信

号之间的静差为零,但一般情况下静差很难达到理想的零误差。软件锁相环将相位作为控制信号,由于相位是转速的积分,因此即使稳态时,给定和反馈信号的相位也存在误差,对转速的一致性也没有影响。当反馈信号和给定信号进入锁定状态时,电机的平均速度误差将为零,只存在很小的瞬时高频抖动,稳态精度很高<sup>[5]</sup>。因此,软件锁相环技术相比于传统的PI控制,其精度和稳度更好<sup>[6]</sup>。

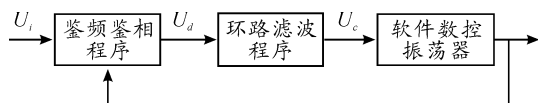


图2 软件锁相环原理框图

### 2.3 软件锁相环的实现

在高性能DSP芯片TMS320F2811中,使用事件管理器模块(EV)设置给定频率(代表转速),并使用捕获单元CAP对来自Hall转子位置传感器的转速反馈信号进行中断捕获。在对给定信号和反馈信号进行边沿检测后,通过鉴频鉴相(PFD)算法,得到给定与反馈信号的相位差,再经过PI控制和上下限幅后,输出PWM斩波信号。

根据锁相环原理可知,鉴频鉴相(PFD)的状态由给定信号 $f_r$ 和反馈信号 $f_b$ 所决定,如图3所示。

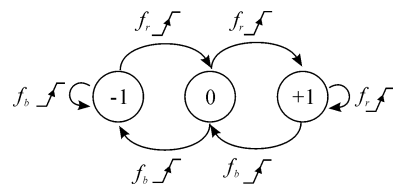


图3 PFD状态转移图

PFD的状态有三种,分别为“-1”、“0”、“+1”状态。假设PFD只在给定与反馈信号出现上升沿时动作,如图4所示,给定信号 $f_r$ 的上升沿会使PFD进入下一个更高的状态,除非其原来就在“+1”状态。

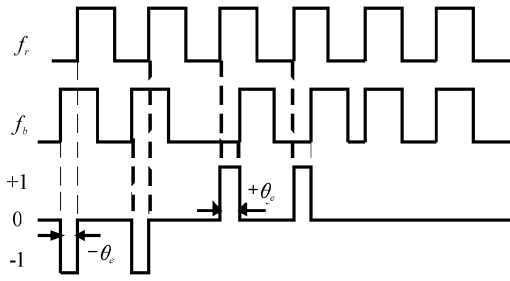


图4 PFD 信号波形图

依此类推,反馈信号  $f_b$  会使 PFD 进入下一个更低的状态,除非其原来就在“-1”状态。当给定与反馈两信号的上升沿“同时”出现时,其分别产生的影响可以相互抵消,PFD 则一直保持在“0”状态。如果给定信号  $f_r$  远大于反馈信号  $f_b$ ,则 PFD 大部分时间处在“+1”状态;如果反馈信号  $f_b$  远大于给定信号  $f_r$ ,则 PFD 大部分时间处在“-1”状态<sup>[5]</sup>。

上述可知,只要给定信号  $f_r$  和反馈信号  $f_b$  之间存在相位差,PFD 就保持在“-1”或是“+1”状态。因此,可以在 DSP 中对 PFD 保持非“0”状态的时间进行计时,通过计算能得到给定信号  $f_r$  和反馈信号  $f_b$  之间的相位差。PFD 算法的作用是实现鉴幅鉴相功能。

本文采用两种控制策略对电机转速进行控制,即在 DSP 芯片中设定一个转速误差范围,并仅在此预设的误差带内对电机使用锁相控制。当电机实际转速超出该预设的误差带时,采用简单的上下限幅方式,使电机的转速误差(频率误差)迅速减小,

最后进入预设的误差带;在电机转速误差进入预设的误差带时,再对采用软件锁相控制,DSP 主流程如图 5 所示,软件锁相环中断程序流程如图 6 所示。

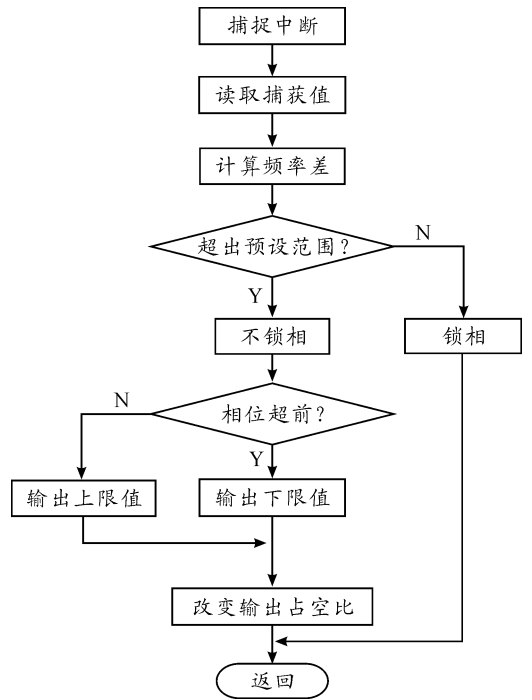


图5 转速控制主流程

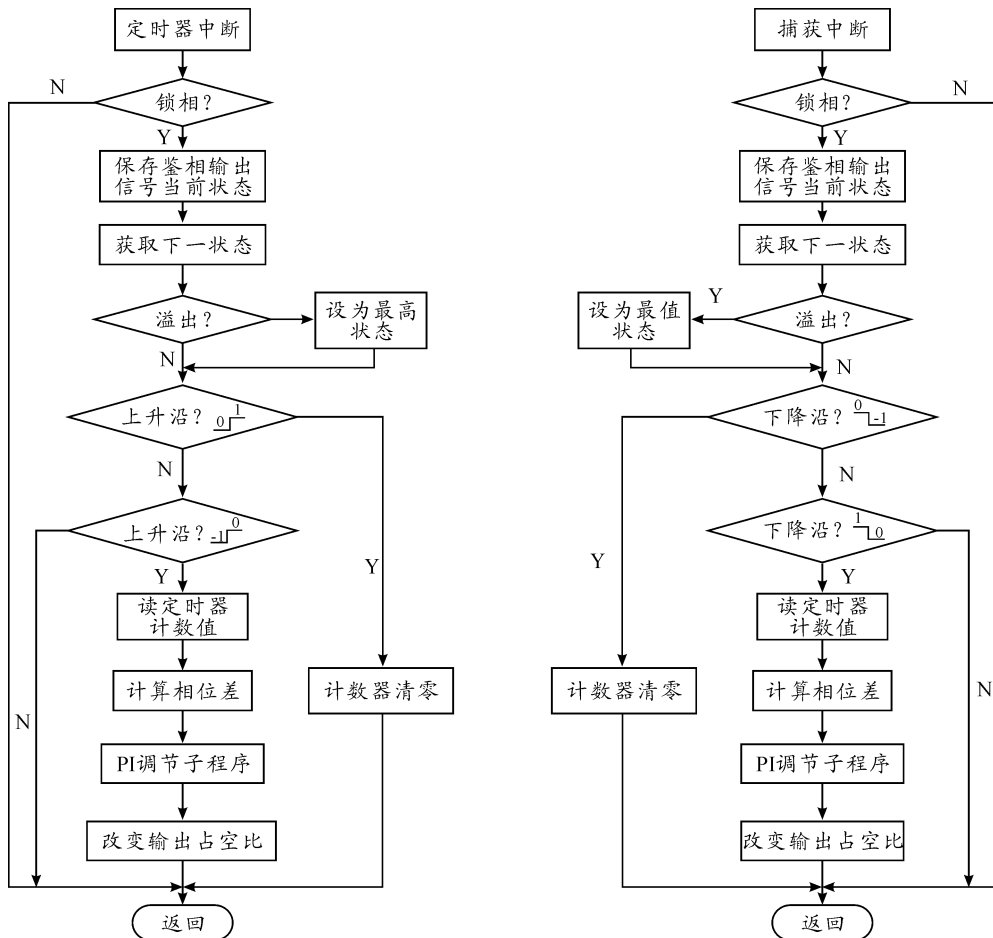


图6 软件锁相环中断程序流程

### 3 实验结果及分析

本文选用一台三相外转子高速无刷直流陀螺马达作为试验样机,电机采用三相Y形接法,额定电压28VDC,额定转速略大于24 000 r/min,极对数为1。使用所研制的无刷陀螺电机控制器对该样机进行实验。

理论上,电机转速稳定在24 000 r/min,那么在DSP芯片中设置对应的Hall转子位置传感器给定频率应为400 Hz(对应周期为2 500  $\mu$ s),实际中给定频率不可能为理想的400 Hz。电机稳速运行时,由示波器得到给定和反馈信号的实测波形如图7和图8所示。可以看出,给定与反馈信号的频率误差很小,且相位误差 $\Delta t$ 不超过80  $\mu$ s。说明本文中使用的软件锁相环法可以实现对电机的锁相稳速控制。

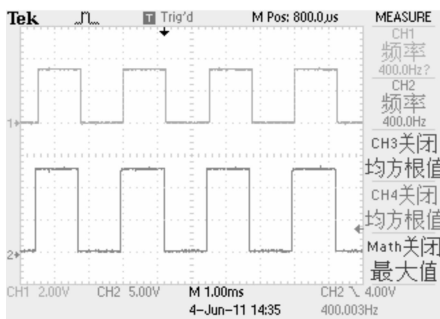


图7 给定与反馈信号的实测波形

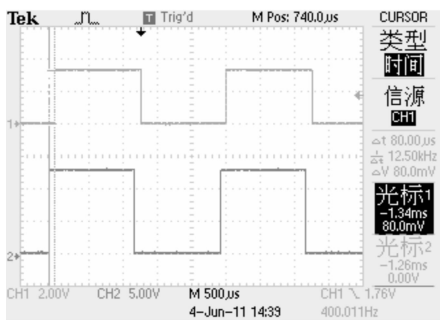


图8 给定与反馈信号的相位差实测波形

图9为电机起动—稳速—停转全过程转速实测曲线,图10为电机软起动过程(放大)实测曲线,可以看出,电机软起动过程比较平稳,没有出现超调。

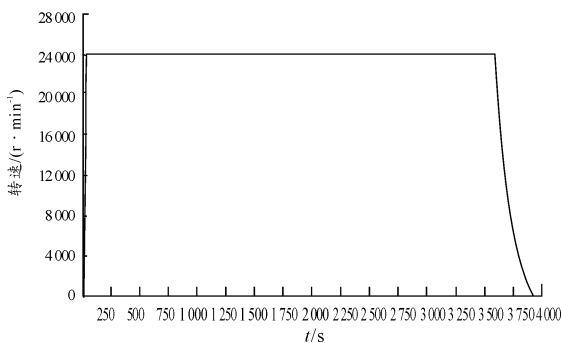


图9 电机起动—稳速—停转全过程转速实测曲线

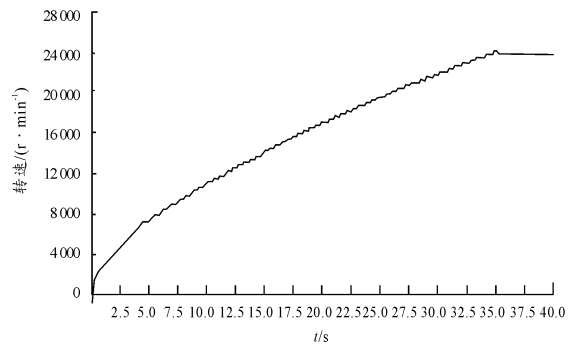


图10 电机软起动过程(放大)实测曲线

图11为电机经过1小时连续运行后的稳速运行过程(放大)实测曲线,可见,电机给定转速设定值实际上为24 003.6 r/min,稳速运行中,转速的实际值绝大多数在24 002.4 r/min和24 004.8 r/min之间,其误差带仅为2.4 r/min。不难算出,电机转速单边误差精度为 $4.999 \times 10^{-5}$ 。电机转速稳定度优于万分之一,可以满足使用要求。

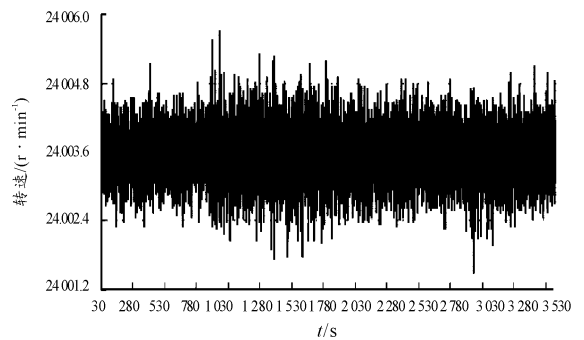


图11 电机稳速运行过程实测曲线

### 4 结论

本文采用DSP和CPLD芯片,实现了无刷直流陀螺电机的软件锁相环速度闭环控制,并借助其转子Hall位置传感器信号,很好地解决了软件鉴频鉴相、锁相稳速的控制问题。系统采用全数字控制,电路简单紧凑,可靠性高,在实际中易于软件调试。

实验表明,从软起动后的20 000 r/min到24 000 r/min之间较宽的调速范围内均能快速进入锁定状态,抗干扰能力强;锁相后的转速反馈频率信号能稳定地跟踪给定的基准频率,并能保持较高的转速稳度高。其控制效果与理论分析一致,有较好的工程实用价值。

### 参考文献:

- [1] 许江宁. 陀螺原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 苏奎峰,吕强,耿庆锋,等. TMS320F2812原理与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [3] 梁森,刘会军. 数字系统电子自动化设计教程CPLD原理与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.