

## Control System of Two-Phase Brushless DC Gyro Motor Based on DSP\*

WU Meixi, FU Luhua, LIN Yuchi\*

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The research of the influence of gyro motor speed stability on the north-finding result is studied in order to improve the gyro north-finding precision. The paper introduces a two-phase brushless DC gyro motor control system based on TMS320LF2407A. First, it expounds the two-phase brushless DC motor's working principle. Then through the design of the hardware and software system, the close-loop control of two-phase brushless DC gyro motor is realized. The experimental results show that, the system can drive the brushless DC gyro motor well starting, braking and smooth running. The precision of the steady speed is less than  $10^{-6}$  and the characteristics of the system satisfy the gyroscope demand.

**Key words:** north-seeking gyro; two-phase brushless DC motor; speed stability; DSP

EEACC: 7630

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.02.009

## 基于 DSP 的两相无刷直流陀螺电机稳速系统\*

吴梅锡, 付鲁华, 林玉池\*

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了进一步提高陀螺仪的寻北精度, 分析研究了陀螺电机转速大小和转速精度对寻北结果的影响。在此基础上设计了一种基于 TMS320LF2407A 的两相无刷直流陀螺电机控制系统, 阐述了两相无刷直流电机的工作原理, 给出了电机的简化结构及数学模型, 并通过对硬件系统和软件算法的设计实现了两相无刷直流陀螺电机的闭环控制。实验结果表明: 系统可以很好地完成电机的启动、制动和平稳运行, 转速精度优于  $10^{-6}$ , 满足陀螺仪的工作要求。

**关键词:** 陀螺寻北; 两相无刷直流电机; 速度稳定性; DSP

中图分类号: V556.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)02-0187-04

陀螺经纬仪是一种全天候、不依赖其他条件测定真北的物理定向仪器, 通过敏感地球自转角速度来完成找北, 广泛应用于测绘、矿山、隧道、军事、航空和航天等领域<sup>[1]</sup>。陀螺电机是陀螺仪的心脏, 要使陀螺仪稳定且寻北精度高, 必须要求陀螺电机在定向工作过程中保持较高的转速精度。

过去的陀螺仪多采用交流电机, 交流电机存在结构复杂、效率较低等缺点, 且很难达到较高的转速精度。随着磁性材料、电力电子器件和控制技术的发展, 无刷直流电机(BLDCM)的应用越来越广泛<sup>[2-3]</sup>。直流电机不仅转速稳定度优于交流电机, 而且体积小、结构简单、调速特性好、效率高<sup>[4]</sup>。目前国内外对无刷直流电机的控制系统进行了大量研究, 而这些研究大都是针对三相电机展开的<sup>[5]</sup>。三相无刷直流电机的优点是只有三根引线, 可以很方便地与其他电机进行替换, 而在目前的控制方式下,

两相无刷直流电机必须有四根引线, 但是两相电机的精度要优于三相电机, 所以在陀螺仪中采用两相无刷直流电机<sup>[6]</sup>。

本文分析了陀螺电机转速对寻北的影响, 再以 DSP 为核心控制器, 在实验的基础上, 设计了两相无刷电机的闭环驱动系统, 很好地完成了对直流电机的控制。

### 1 转速对陀螺寻北的影响

#### 1.1 转速大小对陀螺寻北的影响

实验室采用 JT-15 型陀螺经纬仪, 利用中天法进行陀螺定向的寻北误差为:

$$\Delta N = (T_1^2 / T_2^2) \times m \times \Delta a \quad (1)$$

其中  $m$  为分划板格值,  $\Delta a$  为摆动平衡位置与偏离分划板零位划线的夹角,  $T_1$  为陀螺跟踪摆动周期,  $T_2$  为陀螺不跟踪摆动周期。

项目来源: 天津市自然科学基金项目(10JCYBJC06600)

收稿日期: 2012-10-11 修改日期: 2012-12-14

跟踪周期即陀螺的无阻尼摆动周期<sup>[7]</sup>：

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{H}{M\omega_e \cos\varphi}} \quad (2)$$

不跟踪周期：

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{H^2}{M(H\omega_e \cos\varphi + D_B)}} \quad (3)$$

式中： $M$  为陀螺重力矩； $\omega_e$  为地球自转角速度； $\varphi$  为观测地点的地理纬度； $D_B$  为悬带扭矩系数； $H$  为陀螺动量矩。当观测地点确定后， $M$ 、 $\omega_e$ 、 $\varphi$ 、 $D_B$  为常数，因此不跟踪周期  $T_2$  与动量矩  $H$  成比例。 $H = Jw$ ，一般来说  $J$  是个常量，由此看出，转速  $w$  对陀螺定向有显著的影响。

结合中天法陀螺定向公式，可以知道，转速越高，动量矩越大，寻北精度越高，而且指向力矩越大，干扰力矩相对减少，也有利于提高寻北精度，但是  $H$  的提高会使陀螺仪的摆动周期加长，增加寻北时间，这可以用于定向精度要求高，但是对寻北时间要求不高的场合；转速越低，陀螺仪的摆动周期就会减小，缩短寻北时间，但是寻北精度会降低，可以用于寻北精度要求不太高，但是希望快速找出北向的场合<sup>[8]</sup>。在实际应用中，要权衡各个方面来选择陀螺马达的转速。

### 1.2 转速精度对陀螺寻北精度的影响

陀螺转子的转速变化  $\frac{d\omega}{dt}$  对陀螺寻北结果的影响为：

$$\Delta N = \frac{J}{M} \tan\varphi \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中  $M$  为陀螺仪重力矩， $\varphi$  为陀螺定向处的地理纬度<sup>[9]</sup>。

根据式(4)，分析交流电机和直流电机不同的转速精度对寻北误差的影响：实验室所用交流电机的转速精度为 0.2%，代入陀螺经纬仪的各个参数，可得： $\Delta N = 7.96''$ ，直流电机转速精度设为 0.01%，代入可得： $\Delta N = 0.39''$ ，可见电机转速精度对陀螺寻北精度有显著的影响，当转速精度小于 0.01% 时，由电机转速误差引起的寻北误差可以控制在 1'' 以内。

## 2 电机运行原理

### 2.1 电机数学模型

两相无刷直流电机采用两相四极的结构，如图 1 所示。

电机的运行原理如图 2 所示，A 相导通时，电流由 A 相正相流入，从 A 相负相 X 流出，电流形成的磁场推动转子转动。转子转过 90° 时，B 相通电，产

生新的磁场继续推动转子转动，一个周期内换相四次，按照四种状态往复循环，即可控制电机平稳地转动。根据电磁感应定律，当电机运行时，会在 A、B 两相绕组中产生反电势，通过分析两相无刷直流电机的结构，可知反电势波形为正弦波，转子永磁场在定子绕组中产生的反电势宽度为 180°，两相反电势的相位差为 90°。

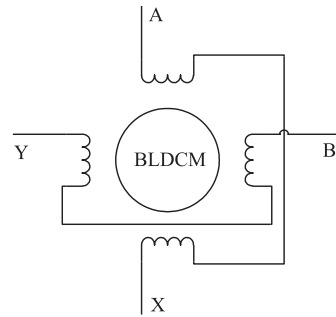


图 1 两相无刷直流电机结构图

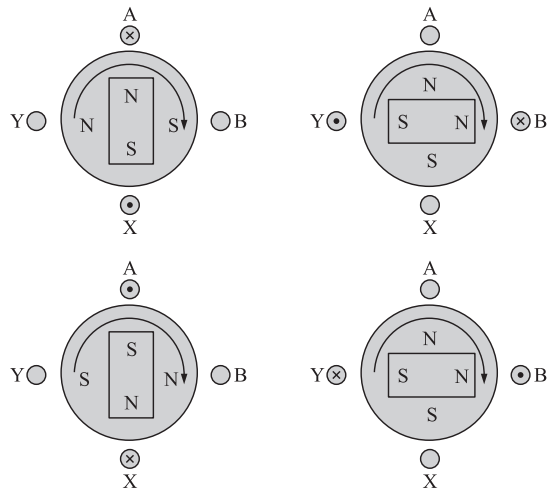


图 2 电机运行原理图

因为两相无刷直流电机两套绕组空间正交，没有互感作用，电路数学模型很简单。设相电压为  $u_a$  和  $u_b$ ，绕组电阻、电感分别为  $R_a$ 、 $L_a$  和  $R_b$ 、 $L_b$ ，反电势为  $e_a$ 、 $e_b$  则电压方程为：

$$\begin{cases} u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知，相绕组端电压等于加在直流电机上的脉冲控制信号和相绕组反电势的叠加<sup>[10]</sup>。

### 2.2 双 H 桥原理

两相无刷直流电机采用正交四状态的工作方式，输入为四路相差 90° 的脉冲信号，经过如图 3 所示的双 H 桥，由于反相器的存在，上下两个桥臂的导通状态总是互补的，上桥臂导通时下桥臂截止，上桥臂截止时下桥臂导通<sup>[11]</sup>。当输入  $IN_1$  为高电平

$IN_2$  为低电平时,功率管  $V_1$  和  $V_4$  导通, $V_2$  和  $V_3$  截止,电流由 A 流向 X,当  $IN_1$  为低电平  $IN_2$  为高电平时,功率管  $V_1$  和  $V_4$  截止, $V_2$  和  $V_3$  导通,电流由 X 流向 A<sup>[12]</sup>。B 相的导通情况与 A 相类似。电机正转时,将按照 A→B→X→Y 的方式循环导通,电机反转时,按照 Y→X→B→A 的方式导通。

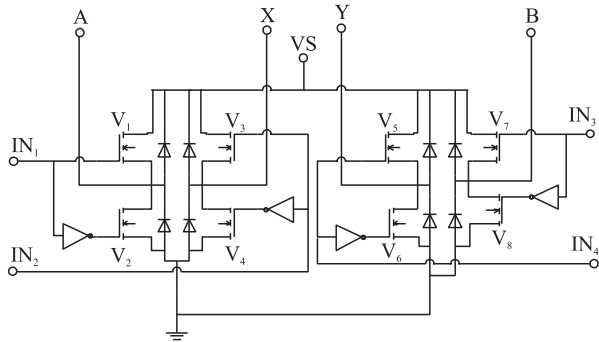


图 3 双 H 桥原理图

### 3 系统设计

#### 3.1 硬件设计

本文介绍的两相无刷直流电机闭环控制系统基本框图如图 4 所示。

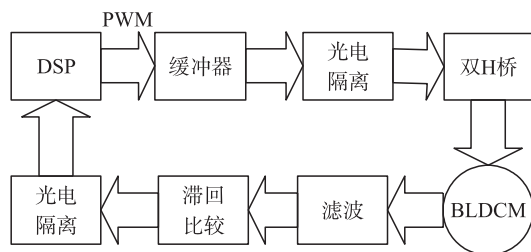


图 4 系统控制框图

本系统采用 TMS320LF2407 来产生四路频率、占空比均可调的 PWM 波。74LS244 作缓冲器既能保持电平不变,又能起到隔离驱动的作用,增强电路的带负载能力。再经过光电隔离后送入双 H 桥。每一路 PWM 波都通过比较器、反相等元件来控制上下两个桥臂,四路 PWM 波通过改变双 H 桥的通断来控制无刷直流电机的启动、调速和停止。

为了得到反电势信号,首先对电机端电压进行滤波,滤除不必要的高频成分,再对信号进行滞回比较。如果使用单限比较器,只要反电势信号在门限值附近有微小干扰,比较器输出电压就会有相应的起伏。滞回比较器既可以得到反电势频率,又可以很好地避免微小电压干扰。

经过滞回比较后得到与反电势信号频率相同的方波信号,经过光电隔离后送入 DSP,由 DSP 根据反电势信号对电机进行闭环控制。

#### 3.2 软件设计

要产生四路相差  $90^\circ$  的方波信号,一般的做法是设置一定的延时时间,两相绕组按顺序导通,这种方法在保证占空比和频率都一直变化的情况下比较复杂,而且在频率较高的时候很难实现,本文设计的方法是利用 TMS320LF2407 中的通用定时器和比较单元来产生 PWM 信号,改变周期值来改变 PWM 波的频率,比较值用于产生 PWM 波的脉冲宽度,但是仅改变比较值是不能产生相差  $90^\circ$  的波形的,因为比较值变大或者变小只能改变占空比的大小,不能产生相位差,为了产生相差  $90^\circ$  的信号,可以采取如下方法:在定时器中断程序中,设置当前某一路信号的比较值为正,其余三路比较值为 0,这样在一个周期内只有一路有波形,其余三路均为低电平,再进入定时器中断时,下一路信号的比较值为正,其余三路为负,这样四个定时周期才得到一个周期的 PWM 波形,且四路波形均相差  $90^\circ$ 。

系统的软件流程图如图 5 所示。首先系统初始化,设定各定时器比较器的值和工作模式,然后进入开环控制,即电机启动模式,定时器 1 和 3 用来产生频率、占空比均可调的相差  $90^\circ$  的四路方波信号,逐渐增大四路信号的频率,与此同时减小占空比。达到设定频率后,进入闭环控制,捕获单元 3 用来采集反电势信号,定时器 2 用作捕获单元的基准定时器,对反电势信号的频率和额定频率进行比较,若反电势频率偏大则减小占空比,否则增大占空比,以此来控制电机稳速转动。

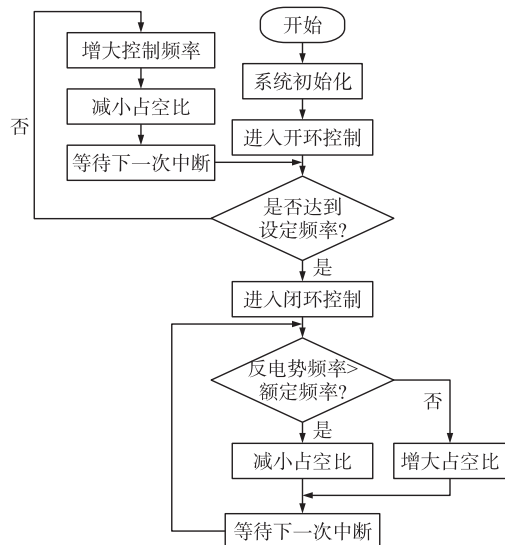


图 5 系统主程序流程图

### 4 实验

本研究对额定功率  $< 10\text{ W}$ , 额定转速为  $7\ 500\text{ r/min}$  的两相无位置传感器永磁无刷直流电机进行空载实验,电机启动初始频率为  $10\text{ Hz}$ ,启动

时间 $<50$  s,电机启动稳定,系统运行稳定。电机的端电压波形如图6所示,从图中可以看出端电压是由控制信号和反电势叠加而成,反电势为正弦波。

采用RIGOL公司的GD4000系列函数/任意波形发生器中的频率计功能对电机稳定运行时的转速频率进行测量。为验证可靠性和稳定性,需要对转速进行不同时间的重复性测量,每次测量的时间为1 h,每隔10 min记录下频率值,测试数据如表1所示。

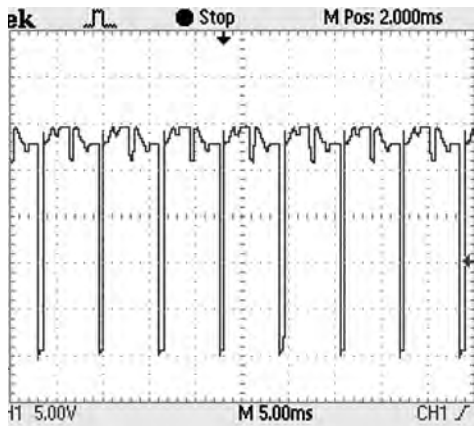


图6 电机端电压波形

表1 电机稳定运行时转速频率(Hz)

序数	日期		
	2012. 10. 03	2012. 10. 04	2012. 10. 05
1	125.000 087	125.000 042	125.000 025
2	125.000 042	125.000 046	125.000 029
3	125.000 063	125.000 087	125.000 029
4	125.000 042	125.000 042	125.000 029
5	125.000 029	125.000 019	125.000 022
6	125.000 029	125.000 042	125.000 029

由表1可以看出,额定转速为125 Hz,电机的最大转速波动为0.000 087 Hz,转速稳定性为 $0.7 \times 10^{-6}$ ,小于 $10^{-6}$ ,优于 $10^{-4}$ 原预定指标。

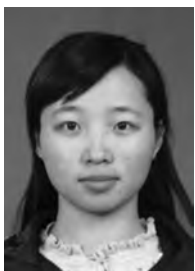
## 5 结束语

本文利用TMS320LF2407A的快速运算处理能力,依靠程序软件的设计,很好地实现了陀螺仪用无

刷直流电机的闭环启动控制,提高了系统的灵活性和稳定性,降低了控制电路的设计成本,这种启动方式实现起来比较简单可靠,转速可调,对于小功率的两相无刷直流电机控制而言,具有较高的实际应用意义。根据前文的分析可知,电机转速稳定在 $10^{-6}$ 之内时,可以把由转速引起的寻北精度稳定在 $1''$ 以内。

## 参考文献:

- [1] 林玉池,林明春,夏桂锁,等.全自动智能陀螺寻北仪中待测广播信号采集模块的设计[J].传感技术学报,2007,20(3):559-562.
- [2] Su GuiJia, McKeever John W. Low-Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors with Improved Speed Range [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 3:296-302.
- [3] Nobuyuki Matsui, Masakane Shigyo. Brushless dc Motor Control without Position and Speed Sensors [J]. IEEE Transaction on Industrial Applications, 1992, 8:120-127.
- [4] Kim Dae-Kyong, Lee Kwang-Woon, Byung-II Kwon. Commutation Torque Ripple Reduction in a Position Sensorless Brushless DC Motor Drive [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2006, 11:1762-1768.
- [5] 孟楠,王淑红.四相无刷直流电动机控制系统研究[J].电气技术,2010,12:18-20,30.
- [6] 刘璐生,潘龙飞,赵慧,等.两相和三相反电势控制的永磁无刷电机[J].中国惯性技术学报,2008,1(16):104-107,118.
- [7] 夏桂锁,林明春,林玉池,等.1/4周期积分法的陀螺智能寻北[J].传感技术学报,2007,20(8):1926-1929.
- [8] 刘春和,霍文才,刘训贵,等.指北陀螺仪和永磁陀螺电机[J].中国惯性技术学报,1992,1:47-56.
- [9] 赵美蓉,赵东升,冯莉.陀螺电源对陀螺寻北结果的影响分析[J].传感器与微系统,2010,12:32-34.
- [10] Chen Zhiqian, Mutuwo Tomita, Shinji Doki, et al. New Adaptive Sliding Observers for Position- and Velocity-Sensorless Controls of Brushless DC Motors [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2000, 6:582-591.
- [11] Salih Baris Ozturk, William C Alexander, Hamid A Toliyat. Direct Torque Control of Four-Switch Brushless DC Motor with Non-Sinusoidal Back-EMF [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2008, 8:4730-4736.
- [12] 王京锋,孙纯祥,林宏,等.高速无刷直流电机控制与无传感器测速研究[J].电力电子技术,2006,5:65-67



吴梅锡(1987-),女,天津大学硕士研究生,主要研究方向为现代传感及测试信息技术,416872189@qq.com;



林玉池(1946-),男,天津大学教授,博士生导师,主要研究方向为光电测控与视觉检测技术以及现代传感与测试信息技术,曾获国家教学成果奖两项,省部级科技进步奖多项。担任中国仪器仪表学会理事、视听工程学会理事长;中国计量测试学会计量仪器专业委员会副主任;中国机械工业教育协会常务理事、仪器仪表类学科委员会副主任;天津市计量测试学会理事、几何量计量专业委员会主任,ychlin@tgu.edu.cn。