

# 两相无槽无刷直流电机的无位置传感器控制

钟德刚, 方 浩

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 为消除无刷直流电机基于霍尔位置传感器控制存在的缺点, 实现两相无槽无刷直流电机的无位置传感器控制, 首先在分析了两相无槽无刷直流电机的定、转子结构、绕组连接方式以及反电势过零点检测法的工作原理基础上, 论述了两相无槽无刷直流电机无位置传感器控制的硬件系统和软件系统的设计方案, 并对两相无刷直流电机进行了试验。试验结果证明了系统的可行性、稳定性。结果表明, 该控制方案具有线路简单、成本低、转矩脉动小、系统运行稳定等优点。

**关键词:** 无槽; 无刷直流电机; 反电势过零点检测法; PIC12F629 单片机

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1502-04

## Sensorless control of two-phase slotless brushless DC motor

ZHONG De-gang, FANG Hao

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In order to eliminate the shortcomings of brushless DC motor control based on hall sensors and realize the sensorless control of two-phase slotless brushless DC motor, the structure of stator and rotor, the winding connections of two-phase slotless brushless DC motor and the zero-crossing of back EMF detection method were analyzed. The hardware system and software system designs of two-phase slotless brushless DC motor were presented. The test results indicate the feasibility and stability of control system. A simple control circuit, low cost, less torque ripples and high stability are the advantages of the design presented.

**Key words:** slotless; brushless DC motor; zero-crossing of back EMF detection method; PIC12F629 single-chip microcomputer(SCM)

## 0 引 言

目前, 无刷直流电机广泛应用于家用电器、办公设备、医疗器械等场合, 但由于普通无刷直流电机的齿槽效应、定位转矩等原因, 往往导致电机的转矩脉动较大, 噪声大。近年来发展起来的无槽无刷直流电机, 能够很好地消除齿槽效应, 提高电机的性能。目前, 无刷直流电机的转子位置检测大多是通过安装霍尔位置传感器来实现, 但霍尔位置传感器对电机有很多不利影响, 主要表现为: 电机的体积增大; 传感器信号线太多, 系统易受外界干扰; 位置传感器容易受外界工作条件的影响, 可靠性低; 位置传感器的安装精度直接影响电机的运行性能<sup>[1]</sup>。因此, 无刷直流电机的无传感器控制是无刷直流电机的研究热点之一。目前

国内外出现的转子位置信号检测方法有反电势法、状态观测器法、锁相环技术法、传感器第二相导通法、电感法、磁链估计法、电流法等<sup>[2-4]</sup>。反电势过零点检测法是目前最为成熟的一种方法, 它具有线路简单、成本低、实用、可靠等特点<sup>[5-6]</sup>。

本研究拟设计一种基于反电势过零点检测法的两相无槽无刷直流电机的控制方案, 去除霍尔位置传感器, 逆变驱动电路线路简单, 具有上、下桥臂互锁功能, 对于小功率无刷直流电机来说, 具有较高的实际意义。

## 1 电机结构及运行原理

### 1.1 电机结构

本研究所讨论的两相无刷直流电机为无槽永磁无刷直流电机, 其结构特点为电枢铁心上没有齿槽, 因此

收稿日期: 2011-06-27

作者简介: 钟德刚(1965-), 男, 浙江上虞人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电机及控制技术、电力电子传动技术、自动化装置等方面的研究。

E-mail: zdg@zjut.edu.cn

相对于普通的永磁无刷直流电机而言,它消除了齿槽效应,具有转矩脉动小、噪声低、定位转矩小等优点<sup>[7]</sup>。

两相无槽无刷直流电机的结构图如图 1 所示。图 1 中,该电机为圆柱式电机,即电机永磁体为径向磁场。定子铁心为圆环形结构,定子绕组由均匀间隔设置在定子铁心上的 A 相绕组和 B 相绕组组成,共 8 个线圈,A、B 两相绕组各占 4 个线圈,为两相 4 极,且 A、B 两相绕组通过中性点连在一起。

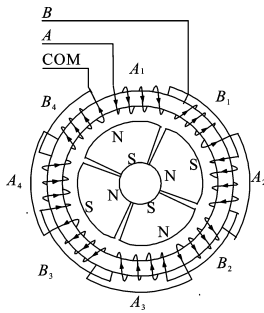


图 1 两相无槽无刷直流电机结构图

转子是径向充磁的瓦形永磁体,为 2 对极。永磁材料采用的是具有大的剩磁、矫顽力和磁能积的钕铁硼永磁材料<sup>[8]</sup>。

### 1.2 电机运行原理

本研究所讨论的无刷直流电机采用反电势过零点检测法检测转子位置信息,以单相绕组轮流换向导通的方式运行。

#### 1.2.1 两相无刷直流电机反电势分析

两相无刷直流电机的数学模型为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_a, u_b$ —两相绕组端电压; $R_a, L_a$  和  $R_b, L_b$ —两相绕组电阻、电感; $i_a, i_b$ —相电流; $e_a, e_b$ —反电势。

由式(1)可知,对于非导通相,相绕组端电压等于相绕组反电势,即  $u_a = e_a, u_b = e_b$ 。因此,非导通相绕组中的反电势可以被测量,而且可用于确定转子的位置。

电机的反电势波形如图 2 所示。通过分析两相无刷直流电机的结构、绕组连接方式可知,该无槽无刷直流电机的反电势波形为正弦波,A、B 两相绕组的反电势分别为  $e_a, e_b$ ,转子永磁场在定子绕组中产生的反电势宽度为  $180^\circ$ ,两相反电势的相位差为  $90^\circ$ 。

#### 1.2.2 反电势过零点检测法原理

两相无刷直流电机的电磁转矩<sup>[10]</sup>:

$$T_e = \frac{ei}{\omega} \quad (2)$$

式中: $T_e$ —电磁转矩; $e, i$ —反电势和相电流; $\omega$ —转子

旋转电角速度。

通常无刷直流电机采用方波电流驱动,两相无刷直流电机的方波驱动波形如图 2 所示。为产生最大的转矩,A 相绕组在  $\omega t = 45^\circ$  时,通入正向电流  $i_a$ ,并持续  $90^\circ$  电角度,电机产生的电磁转矩为  $T_e = e_a i_a / \omega$ 。

根据上述两相无刷直流电机的结构、定子绕组连接方式以及相绕组反电势波形可知,电机正转时,电机将按照  $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$  的方式循环导通(A、B 表示正向导通, $\bar{A}, \bar{B}$  表示反向导通);反转时,电机将按照  $\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B \rightarrow A$  的方式循环导通,为两相四状态。

本研究以电机正转时为例来分析两相无刷直流电机反电势过零点检测法运行原理:

首先 A 相绕组正向导通,即进入状态 A,记录从 A 相绕组正向导通到 B 相反电势过零点所持续的时间  $T_1$ ,检测到 B 相反电势过零点后,延时时间  $T_1' = T_1$ ,使 B 相绕组正向导通,关闭 A 相绕组;

进入状态 B,记录从 B 相绕组正向导通到 A 相反电势过零点所持续的时间  $T_2$ ,检测到 A 相反电势过零点后,延时时间  $T_2' = T_2$ ,使 A 相绕组反向导通,并关闭 B 相绕组。

依次类推,可得到电机正转时,定子绕组按照  $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$  的顺序循环导通的驱动电流波形及换向切换时间,如图 2 所示;同理,可得到电机反转时的定子绕组驱动电流波形及换向切换时间。

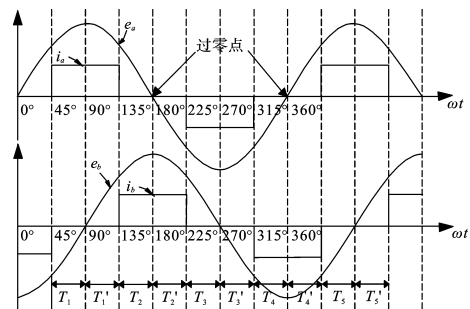


图 2 两相无槽无刷直流电机反电势波形及驱动电流波形

## 2 系统的硬件设计

### 2.1 系统的控制框图

本研究所讨论的两相无槽无刷直流电机的额定功率为 12 W,额定转速为 1 300 r/min。控制系统基本框图如图 3 所示。

系统主电路由交流电网引入 220 V/50 Hz 交流电,经整流桥整流后输出 300 V 直流电,然后由 2 个容量相同的电解电容分压后得到电源电压中点 com 和 +150 V、-150 V 电源,最后经两相桥式逆变电路驱动两相无刷直流电机。反电势检测通过分压电阻实现,单片机通过电平变化中断功能,实现反电势过零点检测,并根

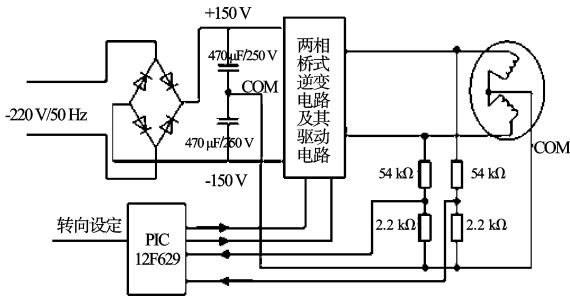


图 3 两相无槽无刷直流电机控制系统基本框图

据反电势过零点法进行相电流换相逻辑控制。该系统采用 PIC12F629 单片机作为主控制器,采用单片机内部高精度的 4 M 的振荡器,上电复位、上电延时、欠电压检测等功能都通过单片机内部功能实现,在提高了系统稳定性的同时,还可以节省成本。

### 2.2 逆变驱动电路

逆变驱动电路通过 4 个 MOSFET 管来控制 A 相和 B 相绕组的流向和导通时间。上桥臂开关管  $V_1$ 、 $V_3$  采用的是 IRFU9310 P 沟道 MOSFET 管,下桥臂开关管  $V_2$ 、 $V_4$  采用的是 IRFU310 N 沟道 MOSFET 管。按照  $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$  的导通顺序, MOSFET 的导通顺序为  $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ , 由于单片机的 I/O 口的驱动能力有限,通过三极管的放大作用给 MOSFET 管提供栅极驱动电压。 $V_1$ 、 $V_3$  对应的三极管为  $Q_1$ 、 $Q_3$ , 采用 MPSA42;  $V_2$ 、 $V_4$  对应的三极管为  $Q_2$ 、 $Q_4$ , 采用 MPSA92。因此单片机只需按顺序  $Q_1 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_4$  使三极管导通,就可使 MOSFET 管按顺序  $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$  导通。 $Ea$ 、 $Na$  和  $Eb$ 、 $Nb$  分别为  $Q_1$ 、 $Q_3$  和  $Q_2$ 、 $Q_4$  的驱动信号,其中,  $Ea$ 、 $Eb$  同时也分别是单片机 I/O 口检测到的 A、B 两相绕组反电势信号。

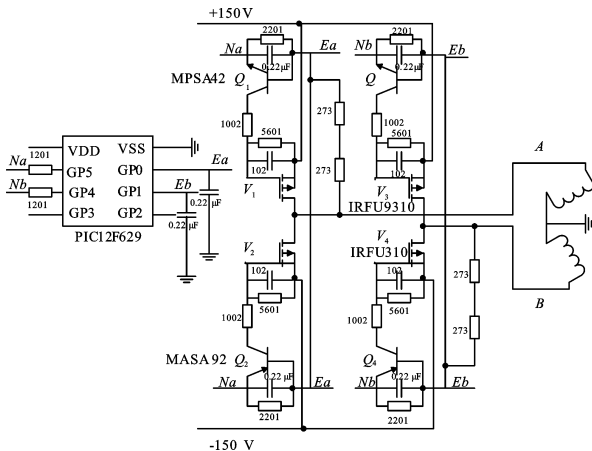


图 4 两相无槽无刷直流电机控制系统逆变驱动电路示意图

该逆变驱动电路的特点:上、下桥臂采用同一组控制信号,当上桥臂导通时,下桥臂必然关闭,下桥臂导通时,上桥臂必然关闭。因此,该逆变驱动电路具有上、下桥臂互锁的特点,消除了上、下桥臂同时导通的

可能性,增强了驱动电路的稳定性和可靠性,具有较高的实际应用意义。

### 3 系统的软件设计

系统的软件设计是在 Microchip 公司提供的集成开发环境 MPLAB 中完成的,主程序流程图如图 5 所示。主程序首先进行初始化,然后进入同步启动程序,当检测到满足切换条件时,切换到无刷运行方式。

同步启动程序流程图如图 6 所示。本研究设置一定的延时时间,使 A、B 两相绕组按  $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$  的顺序导通,并在一个循环结束时,检测是否满足切换条件,若满足,切换到无刷运行方式,否则继续进行下一个循环,直到切换条件满足为止。

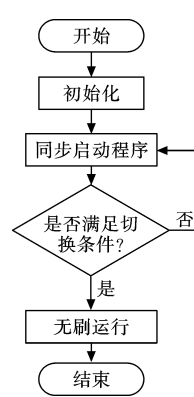


图 5 主程序流程图

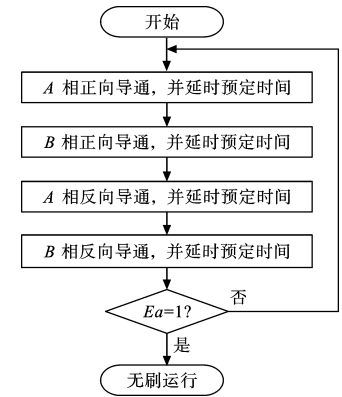


图 6 同步启动程序流程图

无刷运行程序的流程图如图 7 所示。给出换相控制逻辑,开定时器,记录从某相绕组导通到检测到反电势过零点所持续的时间  $T_n$ ,然后延时  $T_n$  切换到下一个换相逻辑,依次循环。

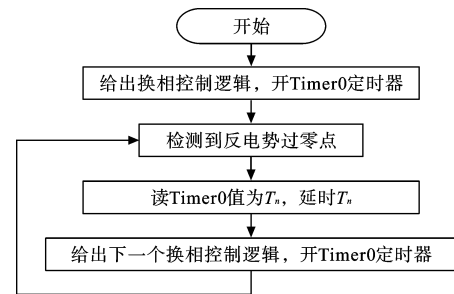


图 7 无刷运行程序流程图

### 4 实验结果分析

本研究对额定功率为 12 W,额定转速为 1 300 r/min 的两相无刷直流电机进行空载试验。空载情况下,在单片机 I/O 口检测到的反电势信号波形如图 8 所示。端电压波形如图 9 所示。试验波形与理论波形吻合。

在电机上安装上风机叶片后,本研究对电机进

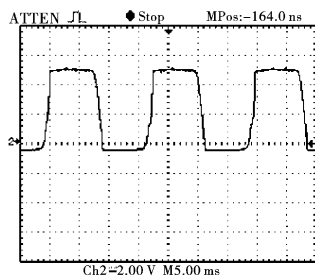


图 8 在  $E_a$  口检测到的 A 相反电势波形

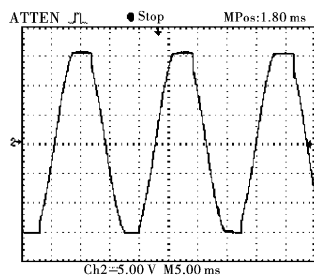


图 9 A 相端电压  $u_a$  波形

行带负载试验,试验结果表明,电机启动稳定,转矩脉动小,系统运行稳定。

## 5 结束语

本研究在分析了两相无槽无刷直流电机的结构特点的基础上,采用反电势过零点检测法实现了两相无槽无刷直流电机的无传感器控制;设计并实现了两相无刷直流电机的控制方案,其硬件系统中的逆变驱动电路具有特殊的上下桥臂互锁功能,使得系统控制线路不仅简单而且可靠。

试验结果表明,所介绍的两相无槽无刷直流电机控制方案,运行稳定、转矩脉动小,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。

## 参考文献(References):

- [1] 吴筱辉,程小华,刘杰. 反电势法检测转子位置的直流无刷电机系统起动方法[J]. 中小型电机,2005,32(5):60-63.
- [2] 姜吉顺,季画,李志永. 无位置传感器无刷直流电机的位置检测方法[J]. 电机与控制应用,2007,34(2):56-60.
- [3] 李自成,程善美,蔡凯,等. 反电动势过零检测无刷直流电机转子位置新方法[J]. 电工技术学报,2009,24(7):52-58.
- [4] 吴春华,陈国呈,孙承波. 一种改进的无刷直流电机无位置传感器检测技术[J]. 电气传动自动化,2005,27(3):31-33.
- [5] WU Hong-xing, LIU Ying, KOU Bao-quan, et al. Research for Brushless Motor Controller using Winding Back-EMF to Detect Rotor Position [C]//2008. ICST 2008.3rd International Conference on Sensing Technology. Lillehammer: [s.n.], 2009: [s.n.].
- [6] 侯磊. 无位置传感器无刷直流电机调速系统的研究[D]. 济南:山东大学控制科学与工程学院,2007.
- [7] 魏静微,张宏宇. 无槽永磁无刷电动机设计研究[J]. 微电机,2010,49(2):9-11.
- [8] 周敏德. 永磁无刷直流电动机设计中的几个问题[J]. 电机技术,1996,(4):39-41.
- [9] 刘小正,赵小春. 两相无刷直流电机及其系统仿真[J]. 微电机,2006,39(4):8-11.
- [10] Atmel Corporation. AVR440: Sensorless control of two-phase brushless DC motor[M]. Atmel Corporation, 2005.

[编辑:李辉]

(上接第 1443 页)

- [3] QIU J, YAMADA N, TANI J, et al. Fabrication of Piezoelectric Fibers with Metal Core [C]//Proceedings Of SPIE's 10th International Symposium on Smart Structures and Materials, Active Materials: Behavior and Mechanics, San Diego, CA, USA: SPIE, 2003: 475-483.
- [4] SATO H, SEKIYA T, NAGAMINE M. Design of the Metal-core Piezoelectric Fiber [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems, Bellingham, WA: SPIE, 2004: 97-103.
- [5] SEBALD G, QIU J, GUYOMAR D. Modeling the lateral resonance mode of piezoelectric fibers with metal core. [J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2005, 38: 3733-3740.
- [6] SEBALD G, BENAYAD A, QIU J, et al. Electromechanical characterization of 0.55Pb (NiNb)O-0.45Pb (Zr0.3Ti0.7)O3 fibers with Pt core [J]. **Journal of Applied Physics**, 2006, 100: 1-6.
- [7] SATO H, NAGAMINE M. Mechanical Properties of Metal-core Piezoelectric Fiber [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 2005: Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA: SPIE, 2005: 623-629.
- [8] TAKAGI K, SATO H, SAIGO M. Robust Vibration Control of

the Metal-core Assisted Piezoelectric Fiber Embedded in CFRP Composite [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA: SPIE, 2004: 376-385.

- [9] TAKAGI K, SATO H, SAIGO M. Damage Detection and Gain-scheduled Control of CFRP Smart Board Mounting the Metal Core Assisted Piezoelectric Fiber [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA: SPIE, 2005: 471-480.
- [10] ASDARI D, ASANUMA H, Mehrdad N, et al. A Comparative Study on Macro-fiber Composites and Active Fiber Composites with Metal-core Piezoelectric Actuators/sensors [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems. San Diego, CA, United States: SPIE, 2006: 1-12.
- [11] SATO H, SEKIYA T, SHIMOJO Y. Fabrication and Vibration Suppression Behavior of Metal Core-piezoelectric Fibers in CFRP Composite [C]//Proceedings of Transducing Materials and Devices. Brugge, Belgium. [s.n.], 2003: 80-87.
- [12] MEIROVITCH L. Analytical methods in vibrations[M]//New York: Macmillan Publishing Co. Inc., 1967: 149-154.

[编辑:李辉]