

人工心脏血泵无刷直流电机无位置 传感器控制研究*

李 阳¹, 张纪元², 赵 哲¹, 代 颖¹

[1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 上海微创医疗器械(集团)有限公司, 上海 201203]

摘 要: 轴流泵电机属于一种永磁微特电机, 具有体积小、流量高以及稳定性好的运行特性, 其在人工心脏上的应用日益广泛。一般的无刷直流电机绕组常采用星形接法, 而轴流泵电机通常将绕组设计为无铁心绕组, 其绕组一般采用三角形接法。当对轴流泵电机进行无位置传感器控制时, 用于星形接法的传统反电动势过零检测方法不再适用。因此, 提出一种新的反电动势过零检测方法实现轴流泵电机无位置传感器控制, 试验结果证明该方法适用于三角形接法的轴流泵电机。

关键词: 人工心脏血泵; 无刷直流电机; 无位置传感器; 反电动势过零检测; 三角形接法

中图分类号: TM301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)06-0037-06

doi: 10.12177/emca.2023.063

Research on Sensorless Control of Brushless DC Motor for Artificial Heart Blood Pump*

LI Yang¹, ZHANG Jiyuan², ZHAO Zhe¹, DAI Ying¹

[1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200072, China;

2. Shanghai MicroPort Medical Devices (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China]

Abstract: Axial flow pump motor is a type of permanent magnet micromotor, which has small volume, high flow rate and good stability. It is more widely used in artificial heart. The winding of general brushless DC motor often adopts star connection method, while the winding of axial flow pump motor is usually designed as coreless winding, so its winding generally adopts triangular connection method. When the sensorless control is applied to the axial flow pump motor, the traditional back EMF zero crossing detection method used for star connection method is no longer applicable. Therefore, a new back EMF zero crossing detection method is proposed to realize the sensorless control of the axial flow pump motor. The experimental results show that this method is suitable for the axial flow pump motor with triangular connection.

Key words: artificial heart blood pump; brushless DC motor; sensorless; back EMF zero crossing detection; triangular connection

0 引 言

人工心脏是一种使用机械或生物机械手段部分

或完全替代自然心脏给人体供血的辅助装置, 大量试验和研究证实了人工心脏的安全性和有效性^[1]。

第一代人工心脏是可产生搏动血流的容积式血泵,

收稿日期: 2023-02-11; 收到修改稿日期: 2023-03-14

* 基金项目: 经皮心室辅助装置关键技术攻关及工程化样机研制(22S31907300)

作者简介: 李 阳(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

代 颖(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机的振动噪声及驱动控制。(通信作者)

其主要采用气体或电动液压驱动方式,属于搏动式血泵^[2]。搏动式血泵的缺点为体积大、噪音大、泵功率高、术后电源导线感染发生率高,限制了其在替代治疗中的进一步应用。第二代人工心脏主要是利用叶轮旋转带动血液流动的叶轮泵,输出的血流是连续流,其克服了搏动式人工心脏的缺点,减小了体积和质量。叶轮泵按血液流动方式可分为轴流式和离心式,轴流式血泵靠螺旋叶片的旋转和导流使血液沿轴向流动;离心式血泵通过转子带动叶轮高速旋转产生的离心力将血液泵出。与离心式血泵相比,轴流式血泵的血流破坏程度更轻^[3]。

由于永磁无刷直流电机具有体积小、效率高、运行可靠等优点,目前普遍应用于人工心脏血泵^[4]。传统的无刷直流电机绕组常采用星形接法,然而在轴流泵电机中,一般将绕组设计为无铁心绕组,星形接法在生产上难于实现,不利于批量生产,因此轴流泵电机的绕组一般采用三角形接法。与星形绕组相比,三角形绕组出线端易于布置,同时在相同的母线电压下,三角形绕组的相电压更高,能应用在高速场合。用在人工心脏的轴流泵电机属于微特电机,由于定子的绝缘骨架强度有限,电机绕组的绕线工艺要求较高,三角形接法比星形接法可采用更多匝数的线圈。

轴流泵的特殊使用场景限制了其通过安装位置传感器获得转子位置,其只能采用无位置传感器控制技术。无位置传感器的无刷直流电机的优势为电机整体结构小、可靠性高、可维护性强、效率高等^[5]。国内外学者对无刷直流电机的无位置传感器控制方法进行了很多研究,提出了包括反电动势过零检测法、续流二极管法、状态观测器法、磁链法、电感法及智能控制法等一系列转子位置估计方法。其中反电动势过零检测法是目前最常用、实现最简单的一种控制方法^[6]。当对绕组为三角形接法的轴流泵电机进行无位置传感器控制时,用于星形接法的传统反电动势过零检测法不再适用。因此,本文提出一种新的反电动势过零检测方法实现轴流泵电机的无位置传感器控制,试验结果证实该方法适用于三角形接法的轴流泵电机,可实现更高转速。

1 人工心脏轴流泵电机的特点

人工心脏轴流泵电机的电枢无铁心、无齿槽

效应,电枢直接由绕组线圈绕成杯状,电枢支架起支撑和固定的作用,这种结构具有以下优势。

(1) 体积小,质量轻^[7-8]。由于人工心脏轴流泵需要通过颈动脉或股动脉植入人体,体积小、质量轻的特点便于手术,减小心脏的负荷。

(2) 损耗小,输出功率密度大,转矩波动小^[9]。由于含有铁心的电机形成涡流,产生涡流损耗,功耗较高。无铁心的电机涡流损耗几乎可以完全消除。由于轴流泵电机无铁心,与同等条件下的齿槽电机相比,其输出功率密度更大,转矩波动更小。

(3) 电气时间常数小,转子转动惯量小。转动惯量小的电机有更好的起停动态特性,可以实现快速响应,伺服特性优良。

(4) 高速应用。人工心脏轴流泵的额定转速较高,与星形接法的绕组相比,采用三角形接法的电机绕组在同样的直流母线电压下相电压更高,在设计电机时可以采用更多匝数的线圈。由于定子的绝缘骨架强度有限,采用更多匝数的线圈可以使绕线工艺有所保障。

(5) 噪声小。机电系统的振动往往伴随着作用力,无铁心电机可以有效地降低振动,消除有槽铁心产生的电磁噪声^[10]。

2 轴流泵电机的无位置传感器控制

2.1 轴流泵电机的数学模型

假定电机的三相绕组完全对称,气隙磁场为正弦波,定子电流和转子磁场分布对称且不计磁路饱和的情况下,轴流泵电机的三相绕组相电压平衡方程的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_A 、 U_B 、 U_C 为电机三相绕组相电压; I_A 、 I_B 、 I_C 为电机三相绕组相电流; e_A 、 e_B 、 e_C 为电机三相绕组反电动势; R 为各相定子绕组电阻; L_s 为各相定子绕组自感; M 为每两相定子绕组间的互感。

绕组为三角形接法的无刷直流电机驱动电路如图 1 所示。

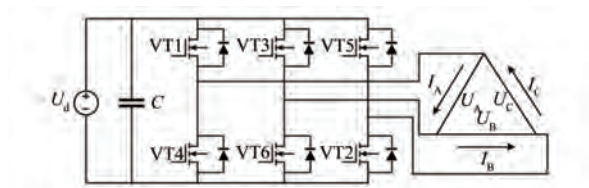


图 1 三角形接法的无刷直流电机驱动电路

2.2 轴流泵电机的换相分析

反电动势过零检测法是通过检测电机旋转时非导通相的反电动势,得到非导通相的反电动势过零点延时 30° 电角度即为对应换相时刻。但是反电动势过零点延时 30° 电角度这种方法适用于绕组为星形接法的电机采取两两导通驱动方式的情况。电机绕组为星形接法,采取两两导通驱动方式的无刷直流电机的理想反电动势及相电流波形如图 2 所示。

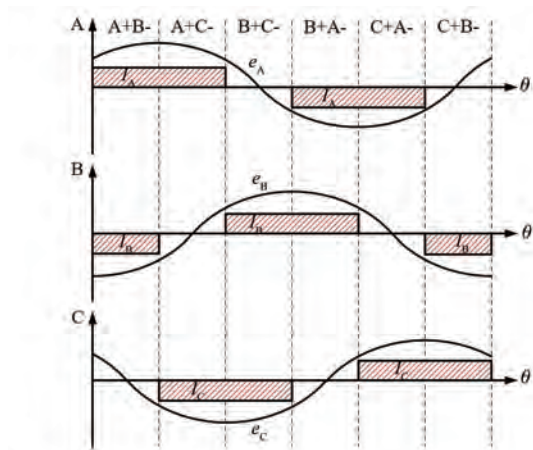


图 2 星形接法下的理想反电动势及相电流波形

图 2 中,每个换相区间为 60° 电角度,与 x 轴的交点即为电机反电动势过零点,从图 2 中可以看出反电动势过零点延时 30° 电角度正好对应着相电流边沿,相电流边沿即为电机换相点。因此检测电机反电动势过零点延时 30° 电角度便可得到电机的准确换相点,实现电机的无位置传感器控制。

针对绕组为三角形接法的轴流泵无刷直流电机,反电动势过零检测法依然适用,但并不是反电动势过零点延时 30° 电角度作为换相信号。其反电动势过零检测法分析如下,星形接法和三角形

接法的相电压矢量图如图 3 所示,其中, U_A, U_B, U_C 为电机绕组为三角形接法时的相电压; U'_A, U'_B, U'_C 为电机绕组为星形接法时的相电压。

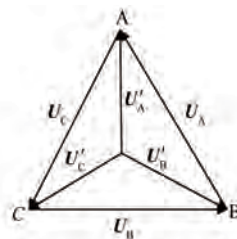


图 3 相电压矢量图

由相电压矢量图可知:

$$U_A = \sqrt{3} U'_A \angle 30^\circ \quad (2)$$

由前文分析可知,采用星形接法时实现无刷直流电机无位置传感器控制的方式是电机反电动势过零点延时 30° 电角度即换相。根据式(2)可知,星形接法检测到反电动势过零点时,再延时 30° 电角度即可得到三角形接法的反电动势过零点。因此采用三角形接法时实现无刷直流电机无位置传感器控制的方式是电机反电动势过零点延时 60° 电角度即换相,其理想反电动势及相电流波形如图 4 所示。

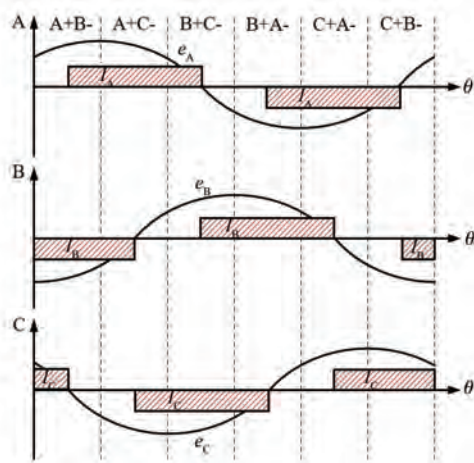


图 4 三角形接法下的理想反电动势及相电流波形

2.3 三角形绕组的反电动势过零检测方法

电机绕组采用三角形接法时,在两两导通驱动方式下,电机的三相中均有电流流动。当功率开关管 VT1、VT6 导通时,电流从 VT1 流入,经 VT6 流出,其电流回路如图 5 所示。

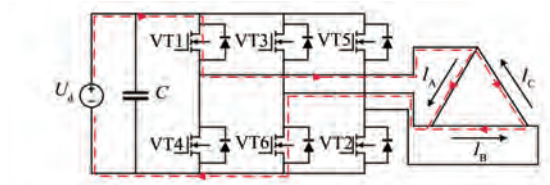


图5 三角形接法的无刷直流电机的电流回路

根据式(1)可得:

$$U_B = I_B R + (L_s - M) \frac{dI_B}{dt} + e_B \quad (3)$$

$$U_C = I_C R + (L_s - M) \frac{dI_C}{dt} + e_C \quad (4)$$

由图5可知,当功率开关管VT1、VT6导通时:

$$I_B = I_C \quad (5)$$

$$U_A = U_d \quad (6)$$

$$-(U_B + U_C) = U_d \quad (7)$$

由式(3)~式(5)可得:

$$U_B - U_C = e_B - e_C \quad (8)$$

由式(6)和式(8)可得:

$$-U_B = \frac{U_d}{2} + \frac{e_C - e_B}{2} \quad (9)$$

因为此时B相接地,所以:

$$U_{B0} = 0 \quad (10)$$

$$U_{C0} = -U_B = \frac{U_d}{2} + \frac{e_C - e_B}{2} \quad (11)$$

式中: U_{B0} 、 U_{C0} 为电机绕组为三角形接法时的端电压; U_d 为直流母线电压。

由式(11)可知,当 $e_C = e_B$ 时,此时电机C相端电压 $U_{C0} = \frac{U_d}{2}$,A相反电动势 e_A 处于最大时刻,如图6所示。

由图6可知,C相反电动势过零点1延时 60° 电角度即为最佳换相点2,而C相反电动势过零点1延时 30° 电角度为A相反电动势 e_A 最大时刻处3,此时电机C相端电压 $U_{C0} = \frac{U_d}{2}$ 。实际工程应用中,由于无法检测到反电动势信息,可以通过检测C相端电压 $U_{C0} = \frac{U_d}{2}$ 的位置信号后延时 30° 电角度来确定最佳换相点。

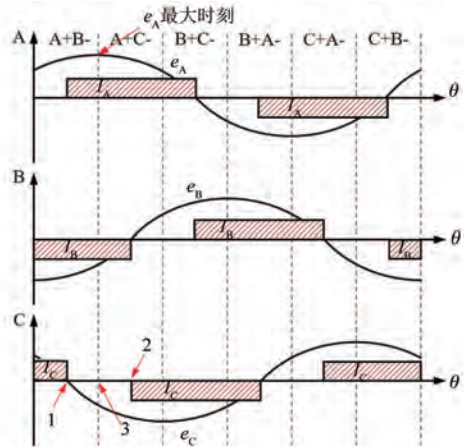


图6 反电动势波形及换相信号

3 仿真及试验分析

3.1 仿真结果及分析

利用MATLAB/Simulink搭建轴流泵无刷直流电机无位置传感器控制系统的仿真平台。控制系统总体仿真框图如图7所示。轴流泵无刷直流电机的各项参数为极对数 $p=1$,定子电阻 $R=4.49\ \Omega$,定子电感 $L_s=0.015\text{ mH}$,额定电压 $U=24\text{ V}$,额定电流 $I=1.5\text{ A}$,额定转速 $n=33\ 000\text{ r/min}$ 。

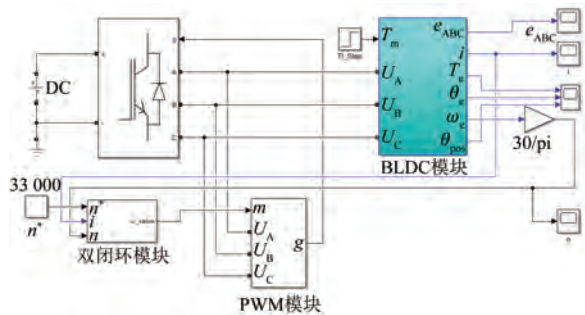


图7 轴流泵无刷直流电机控制系统仿真框图

在额定转速 $n=33\ 000\text{ r/min}$ 下对轴流泵无刷直流电机无位置传感器控制系统进行仿真,在 0.1 s 时突加 $0.001\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载,在 0.15 s 时调节电机转速,由 $33\ 000\text{ r/min}$ 调节至 $30\ 000\text{ r/min}$,转速响应波形如图8所示。

由图8可以看出,该系统具有较好的动态响应特性,系统响应快速且平稳,在通电后不到 0.03 s 时即可达到稳定。电机起动后,在 0.1 s 时突加 $0.001\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载的转速响应曲线如图9所示,可以看出整个控制系统能较好地跟随给定转速,控制性能良好。图10为基于反电动势过零检测

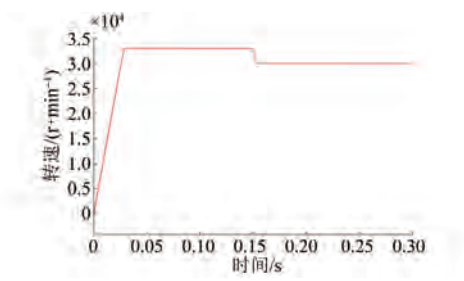


图8 调节转速时的转速响应波形

法的电机换相信息,电机每进行一次换相,换相逻辑值则加1,当换相逻辑值为5时,下一次换相后逻辑值将被清零,换相逻辑值会在0~5区间循环。换相逻辑值波形图验证了无位置传感器控制系统功能的正确性,每一个值对应一组开关管的导通情况。每一个值跳变的时刻就是无刷直流电机的换相时刻。

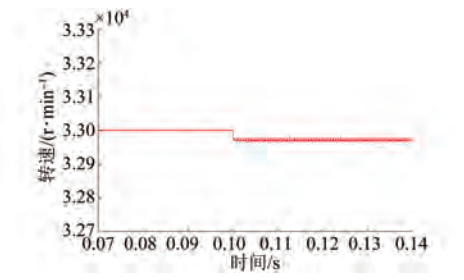


图9 0.1 s时突加0.001 N·m负载的转速响应波形

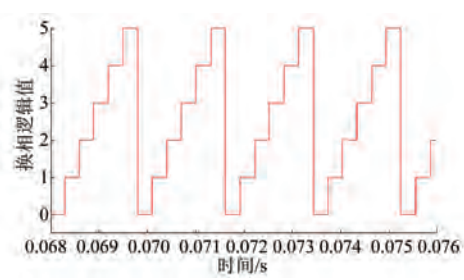


图10 换相逻辑值

图11为额定转速下电机的线电流及三相PWM仿真波形,仿真控制系统可实现准确换相,符合2.2节中对换相原理的分析。图12为额定转速下电机的线电流、端电压及滤波后反电动势仿真波形,从滤波后的反电动势波形可以看出滤波效果良好,可以获得电机换相时的最佳换相点。

3.2 试验结果及分析

本文所使用的试验样机为上海微创医疗器械(集团)有限公司提供的一对极、绕组为三角形接

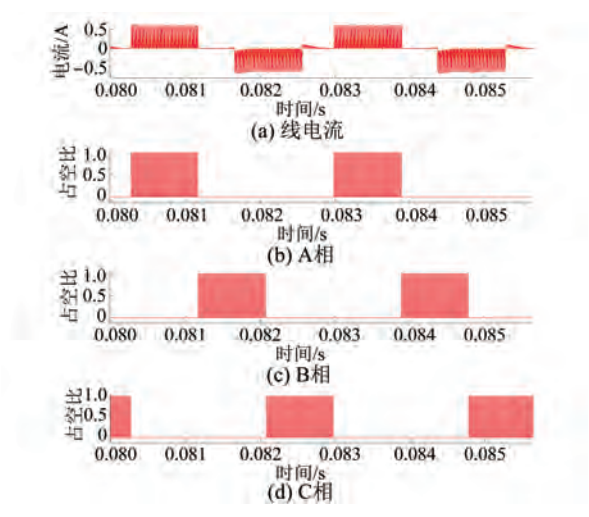


图11 线电流及三相PWM仿真波形

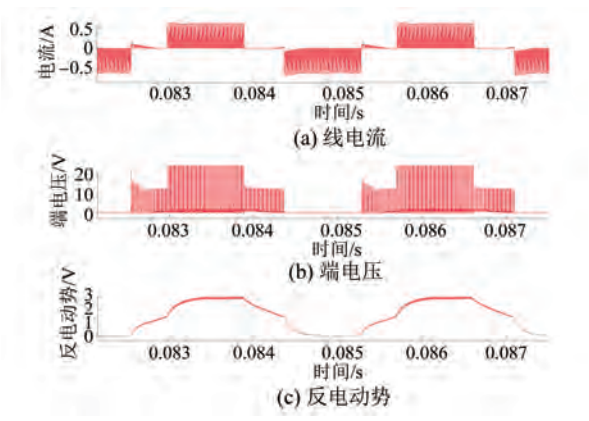


图12 线电流、端电压及滤波后反电动势仿真波形

法的轴流泵无刷直流电机,表1为电机的主要参数。

表1 轴流泵电机参数	
参数名称	参数值
极对数	1
额定转速/(r·min ⁻¹)	33 000
额定电压/V	24
定子电阻/Ω	4.49
定子电感/mH	0.015
转动惯量/(kg·m ²)	2.132 4×10 ⁻⁸

试验平台的硬件电路中主控芯片为TMS320F28069,电机驱动芯片采用DRV8323,一阶低通滤波电路设计为在额定转速下相移30°电角度,控制系统采用的是转速外环和电流内环的双闭环PI控制,转速环PI参数K_p为0.12,K_i为

0.05, 电流环 PI 参数 K_p 为 0.05, K_i 为 0.01。人工心脏轴流泵无刷直流电机无位置传感器控制系统试验平台如图 13 所示, 在额定转速下得到的试验波形如图 14 所示。

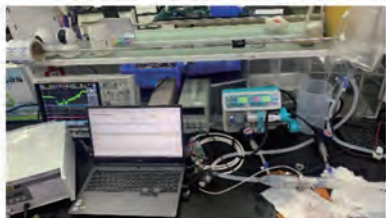


图 13 试验平台示意图

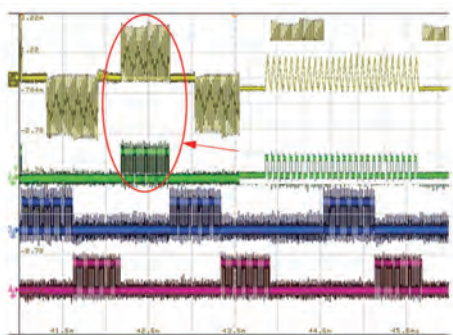


图 14 线电流及 PWM 试验波形

图 14 为线电流及 PWM 波形, 此时使用示波器测得的 PWM 占空比为 42.6%, 可以看出两两导通方式的三相六桥臂的每个功率开关管各导通 120° 电角度, PWM 波形非常纯净, 基本无其他干扰。图 14 中放大区域可以表示出线电流与 PWM 波的对对应关系, 当开关管导通时, 线电流呈现上升的趋势; 当开关管关断时, 通过二极管续流, 线电流呈现下降趋势。放大区域的电流为正, 说明该相对应的上桥臂开关管导通, 下桥臂开关管关断, 反电动势为正, 如图 15 所示。

图 15 中, 采用上桥臂调制、下桥臂恒通的调制方式, 因此端电压由一系列脉冲信号组成, 反电动势中含有大量 PWM 高频斩波信号, 需要经过一阶低通滤波电路后得到反电动势波形。由于低通滤波后会导致采样的端电压信号产生比较大的相移, 在设计分析硬件滤波电路的固有相移特性时, 设计在额定转速下相位延时为 30° 电角度。图 15 端电压波形中存在端电压泵升的情况, 这是因为该端处于低电平时经下桥臂连接至电源负

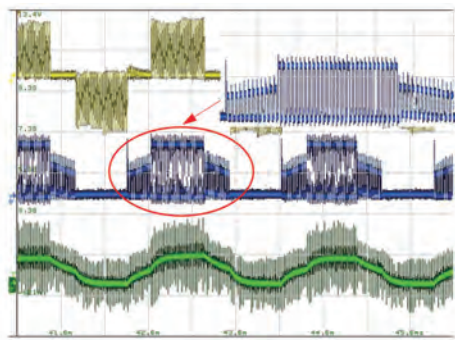


图 15 线电流、端电压及滤波后反电动势试验波形

端, 在进行换相时该端会经过二极管进行续流, 此时端电压幅值会和直流母线电压幅值相等, 续流结束后便会恢复正常状态。从图 15 滤波后的线电流及反电动势波形可以看出, 此时反电动势过零点即为换相点, 检测到反电动势过零点即换相, 与前文分析检测非导通相反电动势过零点延时 30° 电角度即为最佳换相点的结论相符。

由试验波形可以看出, 试验结果与仿真结果吻合, 说明了该方法适用于绕组为三角形接法的轴流泵电机无位置传感器控制。

4 结 语

当采用反电动势过零检测法对绕组为三角形接法的轴流泵电机进行无位置传感器控制时, 用于星形接法的传统反电动势过零检测方法不再适用。经分析对于采用三角形接法的电机而言, 反电动势过零点延时 60° 电角度是其最佳换相点。本文提出一种适用于电机绕组采用三角形接法的无位置传感器控制方法, 该方法先检测非导通端电压的位置信号, 将此位置信号延时 30° 电角度即为最佳换相点。该转子位置检测方法电路简单, 实现容易, 可靠性高, 具有较大的实用价值。

【参考文献】

- [1] 顾汉卿, 徐国风. 生物医学材料学[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1993, 196-203.
- [2] KRABATSCH T, SCHWEIGER M, DANDEL M, et al. Is bridge to recovery more likely with pulsatile left ventricular assist devices than with nonpulsatile-flow systems[J]. The Annals of thoracic surgery, 2011, 91(5): 1335.

(下转第 51 页)

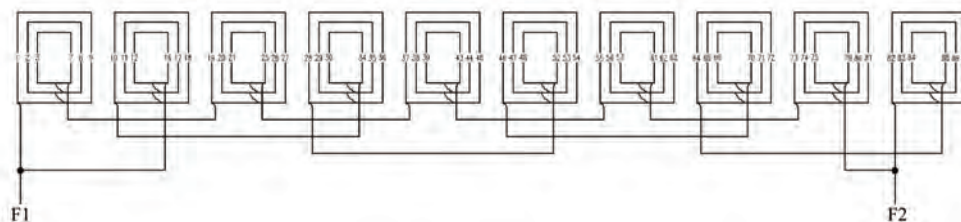


图 A10 转子绕组连接方式 10

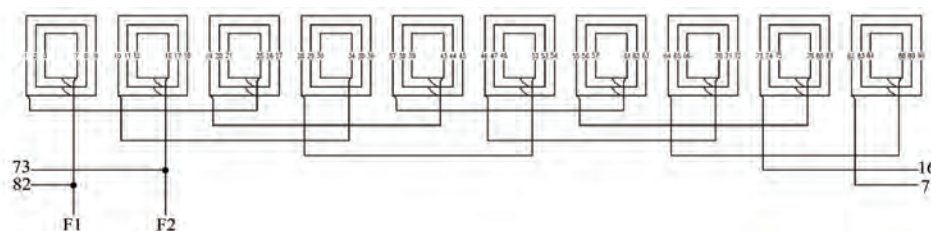


图 A11 转子绕组连接方式 11

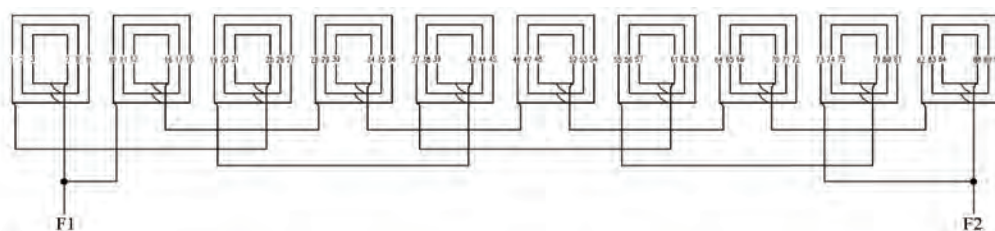


图 A12 转子绕组连接方式 12

(上接第 42 页)

- [3] WAMPLER R K, MOISE J C, FRAZIER O H, et al. In vivo evaluation of a peripheral vascular access axial flow blood pump[J]. ASAIO Transactions, 1998, 34(3): 450.
- [4] 谭亚,尹成科,谈雪丹,等. 左心室辅助装置脉动载荷下无位置传感器无刷直流电机的速度控制[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 43.
- [5] 李雪,王效亮,栾婷,等. 基于无位置传感器电机控制方式的人工辅助心脏控制器研究[J]. 机电工程技术, 2013, 42(3): 43.
- [6] 刘刚,肖烨然,孙庆文. 基于改进反电动势积分的永磁同步电机位置检测[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2): 36.
- [7] 李红伟,范友鹏,张云鹏,等. 轴流式人工心脏泵混合磁悬浮系统的耦合特性[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 105.
- [8] 刘鑫,曲洪一,王聪,等. 第 3 代人工心脏泵研究进展及应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(3): 339.
- [9] 朱俊杰,栗梅,陈程,等. 无刷直流电机反电动势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441.
- [10] 贺玉民,史建萍,崔伟,等. 槽配合对异步电机电磁噪声的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 34.