

无刷直流电机反电势过零检测新方法^{*}

朱俊杰^{1,2}, 粟 梅¹, 陈 程², 杨 龙²

(1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083;
2. 中南林业科技大学计算机与信息工程学院 长沙 410004)

摘要: 无位置传感器无刷直流电机在高速段时反电势信号过大,容易造成检测电路无法正常工作甚至损坏,而在较低速段时,反电势信号又难以有效检测。针对反电势过零检测在极端速段的问题,提出了一种反电势过零检测新方法。在三相采样等效电路上分别并联一组三极管控制的电阻分压开关电路,参考电机转速线性调节控制信号占空比,以此控制三极管通断,从而调节电阻分压开关电路阻值,可以避免高速时反电势幅值高于检测电路供电电压的危险。同时,根据控制信号占空比切换低速区与高速区反电势采样方式,能有效改善在低速区时反电势过零检测效果。实验结果表明,提出的反电势过零检测新方法能保证电机工作于更宽的转速范围内。

关键词: 无刷直流电机; 反电势; 过零检测; PWM 占空比; 宽转速范围

中图分类号: TM383 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Novel BEMF zero-crossing detecting method for brushless DC motor

Zhu Junjie^{1,2}, Su Mei¹, Chen Cheng², Yang Long²

(1. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Computer & Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The (back electromotive force BEMF) signal of brushless DC motor without position sensor is too large and beyond the detecting circuit capacity at high speed, which causes the detecting circuit not to work, even damage the detecting circuit; however, at low speed the signal is too low and is hardly detected effectively. Aiming at the BEMF zero-crossing detection problem in extreme speed region, a novel BEMF zero-crossing detecting method is proposed in this paper. A resistance voltage dividing circuit controlled by a group of transistors is in parallel with the equivalent three-phase sample circuit. The reference rotor speed linearly adjusts the duty cycle of the transistor control signal, which switches the transistors to adjust the resistance dividing ratio of the resistance voltage divider. Therefore, the danger that the BEMF amplitude is greater than the power supply of the detecting circuit can be avoided. Moreover, switching the BEMF sampling manner between high and low speed regions according to the duty cycle of the control signal can effectively improve the BEMF zero-crossing detection effect in low speed region. Experiment result indicates that the proposed novel BEMF zero-crossing detecting method can ensure brushless DC motor operate steadily in a wider speed region.

Keywords: brushless DC motor (BLDCM); back electromotive force (BEMF); zero-crossing detection; PWM duty cycle; wide speed region

收稿日期:2012-07 Received Date: 2012-07

* 基金项目:国家863计划(2009AA05Z209)、国家自然科学基金(61174125)、湖南省自然科学基金(12JJ3042)资助项目

1 引言

无刷直流电机具有体积小、质量轻、效率高、损耗小等特点,不仅已大规模应用于航空、航天、机械、汽车等工业应用领域,还广泛应用于空调、冰箱、电动单车等民用领域。通常,无刷直流电机一般采用位置传感器确定电机转子位置,但安装位置传感器提高了系统成本、增加了系统复杂性,降低了系统可靠性和抗干扰能力,因此无位置传感器无刷直流电机控制技术已成为电机控制领域研究的一个热点。目前,对无位置传感器无刷直流电机的研究主要有反电动势过零检测法^[1-4]、续流二极管导通检测法^[5]、磁链法^[6]、反电动势三次谐波检测法^[7]等方法。由于反电势法实现简单,不需要设计复杂的硬件电路,系统构成成本比较低,技术方案比较成熟,因此是一种应用场合最多的转子位置检测方法^[8-10]。国内外许多学者都对此方法进行了深入研究,提出了很多不同的反电势过零检测方法^[11-13]。反电势过零检测方法不需要实际中性点信号,实现起来简单,但是由于低转速时反电势幅值很小,而且是经过电阻分压后才获取的信号,与虚拟中性点电压相比较电压幅值更低,导致反电势过零电路在电机启动或低速期间无法有效工作。而当电机处于高速运行状态时,过高的反电势将严重影响反电势过零检测电路正常工作,甚至损坏过零检测电路,从而无法保证电机在高速状态下正常运行。因此,基于反电势的无位置传感器无刷直流电机调速范围具有一定的局限性^[14-15]。

本文提出了一种在低速段时能改善反电势过零检测效果,在高速段时能避免反电势幅值过高给检测电路造成损坏的反电势过零检测新方法。

2 反电势过零检测原理

无位置传感器无刷直流电机常见的导通方式可分为两两导通和三三导通2种工作方式。两两导通方式是指无刷直流电机在任意时刻均有两相绕组导通,另外一相绕组处于悬空状态。三三导通方式指每一瞬间逆变桥均有3只功率器件同时通电。本文采用两两导通方式,如图1所示,功率开关管T₁~T₆共有6种开关组合状态,每隔1/6周期换相一次,每次换相切换一个功率开关管,每一个功率开关管导通120°的电角度。电机顺时钟方向旋转时,功率开关管导通规律如表1所示,按照空间360°电度角将转子位置均分成I~VI共6个区域,在不同位置区域切换功率开关组合。表1中,正通表示某相电流从功率电路流向电机绕组,反通表示某相电流由电机绕组流回功率电路。在电机运行过程中,由于定子绕组切割转子磁场,在定子绕组中将产生反电势e,反电势e的大小正比于电机的转速和气隙磁密,并随转子极性的改变而改变。当反电势e的方向确定后,反电势e将随转子极性的改变而出现正负变

化。如图2所示,在两两导通全桥驱动电路中,假设导通相流过的电流为矩形波,则在定子三相绕组中将产生梯形波反电势e,将反电势e过零信号点延时30°电度角即可得到功率开关管换相点^[16]。因此,反电势过零检测法一般是在获取电机三相绕组中不通电相(悬空相)反电势信号的基础上,将其与参考信号进行比较获得过零信号,再通过对该过零信号进行相应的角度延时即可得到转子的位置信息,从而控制电机换相。在理想状态下电机绕组反电势过零信号点超前电机换相点30°电角度,但实际应用中,如图3所示,通常将不通电相相绕组端点电压V_c经过电阻r₁和r₂分压,采用电容c₁滤波后得到更加稳定的信号V_t,然后将其送入专用比较器与参考信号进行比较,即可获得反电势的过零点信号。

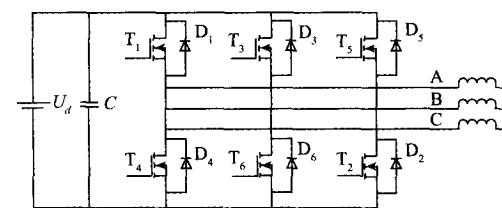


图1 主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topological structure

表1 三相星形绕组全控桥式无刷直流电机的运转规律
Table 1 The operation law of brushless DC motor with 3-phase star winding in full-controlled bridge

方向	反转(顺时针)					
	I	II	III	IV	V	VI
区域编号						
转子位置	0° ~	60° ~	120° ~	180° ~	240° ~	300° ~
(电角度)	60°	120°	180°	240°	300°	360°
开关管	T ₆ T ₁	T ₁ T ₂	T ₂ T ₃	T ₃ T ₄	T ₄ T ₅	T ₅ T ₆
A 相	正通	正通	悬空	反通	反通	悬空
B 相	反通	悬空	正通	正通	悬空	反通
C 相	悬空	反通	反通	悬空	正通	正通

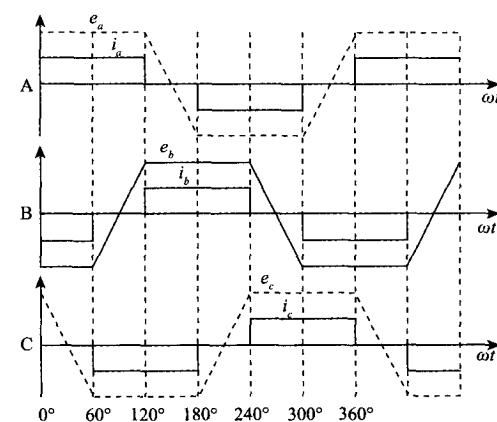


图2 反电势与电流波形

Fig. 2 BEMF and current waveforms

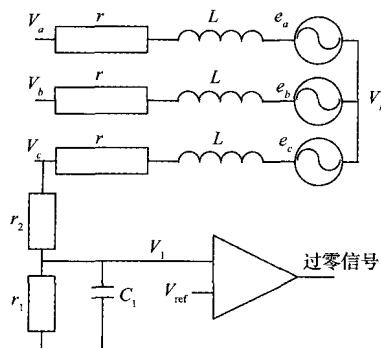


图3 反电势过零信号检测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of BEMF zero-crossing detection

3 反电势过零检测新方法理论依据及实现

3.1 反电势过零检测新方法理论依据

3.1.1 H_PWM_ON-L_ON 状态

反电动势过零检测法的关键是如何准确检测到反电动势过零点,现以电机转子位置处于区域I时,即A、B两相绕组导通,C相绕组悬空时(不通电相)来进行分析与推导,其他5个区域可进行类似推导(略)。本文采用H_PWM-L_ON(上桥臂采用PWM调制,下桥臂采取恒通方式)调制方式,即在一个1/6导通周期内上桥臂开关管将出导通与关断2种情况,也就是在区域I周期内可分为H_PWM_ON-L_ON(上、下桥臂开关管都导通)和H_PWM_OFF-L_ON(上桥臂开关管关断,下桥臂开关管导通)2种调制状态,即功率开关管将出现T₁、T₆同时导通与T₁关断(D₄续流)、T₆导通2种工作方式。当功率开关管T₁、T₆同时导通时,简化电路及电流流向如图4所示,当功率开关管T₁关断(D₄续流)、T₆导通时简化电路及电流流向如图5所示。

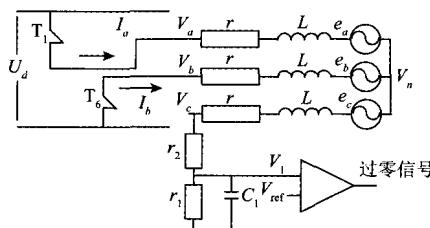


图4 H_PWM_ON-L_ON 状态

Fig. 4 H_PWM_ON-L_ON state

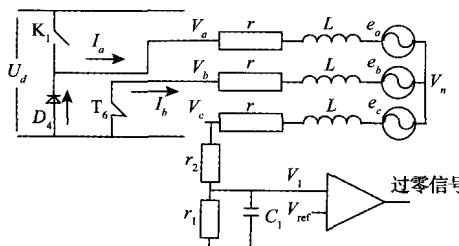


图5 H_PWM_OFF-L_ON 状态

Fig. 5 H_PWM_OFF-L_ON state

如图4所示,当T₁、T₆同时导通时,如果忽略IGBT的管压降时可得式(1):

$$\begin{cases} V_a = U_d = rI_a + L \frac{dI_a}{dt} + e_a + V_n \\ V_b = 0 = rI_b + L \frac{dI_b}{dt} + e_b + V_n \\ V_c = e_c + V_n \\ I_c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:V_a、V_b为a、b相端电压,U_d为母线电压,I_a、I_b为a、b相相电流,e_a、e_b为a、b相反电势,V_n为实际中点电位,x代表a、b、c。

由图4及电机原理可知在由A、B两相绕组组成的回路中,A、B两相相电流方向相反、大小相等,同时反电势也方向相反,大小相等,即:

$$\begin{cases} I_a = -I_b \\ e_a = -e_b \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:电机绕组的实际中心点电压为:

$$V_n = \frac{V_a + V_b}{2} = \frac{U_d}{2} \quad (3)$$

由式(1)和(3)可求得电机C相绕组(不通电相)的反电势为:

$$e_c = V_c - \frac{U_d}{2}, \begin{cases} e_c > 0, V_c > U_d/2 \\ e_c = 0, V_c = U_d/2 \\ e_c < 0, V_c < U_d/2 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,当开关管在H_PWM_ON-L_ON状态时,可通过将V_c(可测点信号)与母线电压U_d进行比较,即可以获得e_c的过零点信号。同理,可以得到其他5个区域时反电势过零检测表达式。

3.1.2 H_PWM_OFF-L_ON 状态

而当电机处于T₁开关管关断(D₄续流),T₆开关管导通状态时,由图5可知,此时电机绕组通过A相下桥的续流二极管(D₄)与B相T₆构成回路。如果忽略续流二极管和IGBT的管压降,可得式(5):

$$\begin{cases} 0 = rI_a + L \frac{dI_a}{dt} + e_a + V_n \\ 0 = rI_b + L \frac{dI_b}{dt} + e_b + V_n \\ V_c = e_c + V_n \\ I_a + I_b + I_c = 0, I_c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

又由电机三相平衡可知三相感应电动势满足方程:

$$e_a + e_b + e_c = 0 \quad (6)$$

因此有:

$$V_n = -\frac{e_a + e_b}{2} \quad (7)$$

将式(6)与式(7)合并可得:

$$3V_n = 3e_c/2 \quad (8)$$

由式(5)与式(8)可得:

$$V_c = 3e_c/2 = 3V_n \quad (9)$$

由式(9)可知,当开关管在 H_PWM_OFF-L_ON 状态时,可通过直接测量 V_c 过零时刻即可获得过零点信号,由于 V_c 大小为反电势的 1.5 倍,这样可以有效提高反电势检测效果。同理,可以得到其他 5 个区域时反电势过零检测表达式。

3.2 反电势过零检测新方法实现

由于主电路功率开关管 IGBT 的 PWM 调制频率是固定的,随着电机转速的增加,PWM 的占空比也随之增加。现仍以转子位置处于第 I 区域时,来分析电机转速与开关管导通与截止之间的关系。当电机转速增加到一定值时,PWM 占空比很大,功率开关管处于 H_PWM_OFF-L_ON 的状态所占 PWM 周期十分有限,无论是采用 AD 检测还是比较器检测电机绕组的反电势过零点都不适用。因此,在转速较高时获得反电势过零点是以 H_PWM_ON-L_ON 的状态为依据进行检测。而转速较低时,情况完全相反,H_PWM_ON-L_ON 状态所占 PWM 周期十分有限,这时宜采用 H_PWM_OFF-L_ON 的状态来获取反电势信号。如图 6 所示,本文提出了一种改进型反电势过零检测新方法。参考电机转速线性调节 DSP_EMF_CONTROL 控制信号的占空比,该信号作为改进型反电势过零检测电路的输入控制信号。当电机转速较低时,DSP_EMF_CONTROL 控制信号占空比小于 50%,则以 H_PWM_OFF-L_ON 时状态获取反电势,这时只需将采样信号直接与 0 进行比较即可获取反电势过零检测信号。当转速增加时,DSP_EMF_CONTROL 控制信号占空比也随之增加,当占空比大于 50% 时,则以 H_PWM_ON-L_ON 状态获取反电势,这时将采样信号与 $U_d/2$ 进行比较即可获取反电势过零检测信号。通过检测 DSP_EMF_CONTROL 信号占空比将较低转速与较高转速时反电势采样方式进行区分,这样能保证在低速时过零检测效果得以改善,但并没有有效解决高速时反电势采样值过大给过零检测电路造成损坏的危险。在此基础上,本文采取在采用星型电阻连接结构来等效电机绕组获得反电势的同时,在三相电阻等效电路上分别并联了一组由三极管控制的电阻分压开关电路来控制反电势的幅值。如图 6 虚线框内所示,增加的 PWM 控制的电阻分压开关电路可以随着转速的增加减小采样电阻阻值,从而可以避免反电势幅值高于图 6 中过零比较器的供电电压。在实验过程中参考电机转速线性调节 DSP_EMF_CONTROL 控制信号的占空比可以控制反电势幅值在一个安全的范围内,这样直接增大了过零检测在高速区时的使用范围。综上所述,本文提出的反电势过零检测新方法不但能有效改善电机在低速时反电势难以检测的问题,还能避免在高速时反电势幅值过高给电路造成的损坏。

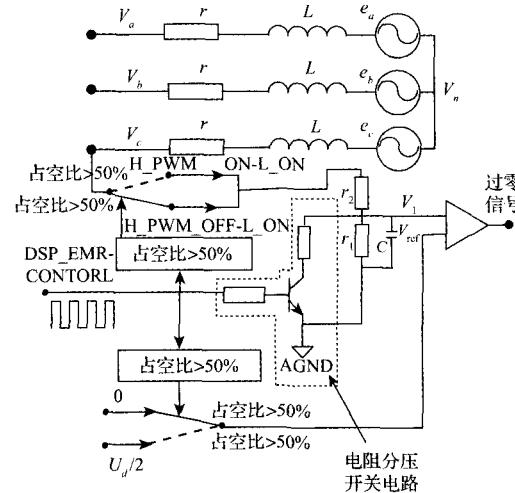


图 6 反电势过零检测新方法

Fig. 6 The improved BEMF zero-crossing detection method

4 实验结果

如图 7 所示,本文以 TMS320F2812 为核心搭建了以本文提出的反电势过零检测新方法为基础的无位置传感器无刷直流电机控制系统^[17-18],图 8 为电机试验平台。该系统包含整流滤波电路、三相功率逆变主电路、以 TMS320F2812 为核心的控制电路、功率驱动电路、反电势检测电路、辅助电源、键盘显示、信号调理等关键电路。单相市电 220 V 交流电通过不可控全桥整流和滤波后作为 IGBT 组成的三相全控逆变功率主电路母线电压。TMS320F2812 控制电路通过接收上位机或者键盘指令,结合反电势检测电路输出 PWM 信号给功率驱动电路,功率驱动电路通过将 PWM 信号隔离放大后来驱动 IGBT,IGBT 不断交替开通与关断来控制电机绕组的通断电,从而驱动电机旋转。TMS320F2812 的 12 位 ADC 单元负责直流母线的电流电压检测,事件管理器 EVA 和 EVB 是专门用于电机 PWM 控制的单元,EVA 输出的 6 路 PWM 信号直接控制三相全桥逆变电路上的 6 个 IGBT,而在系统发生制动作用时,EVB 输出一路 PWM 给直流母线上的制动 IGBT,控制系统完成制动。

试验过程中采用 H_PWM-L_ON 调制方式,PWM 调制载波频率为 20 kHz,电机参数如表 2 所示。磁粉制动器为本电机试验系统负载,在磁粉制动器中通入激磁电流 0.1 A,即设定负载转矩为 1 N·m。图 9 为电机转速分别设定为 600 r/min、1 000 r/min、1 900 r/min、3 000 r/min 时,采用本文提出的反电势过零检测新方法得到的反电势及过零检测信号,其中 e 为不通电相反电势采样信号, T_{out} 为反电势过零比较信号。由图 8 可知,电机在转速较低(600 r/min)或较高时(3 000 r/min),应用本文提出的反电势过零检测新方法能有效对反电势信号进行过零检测,从而保证系统在准确时刻进行换相。

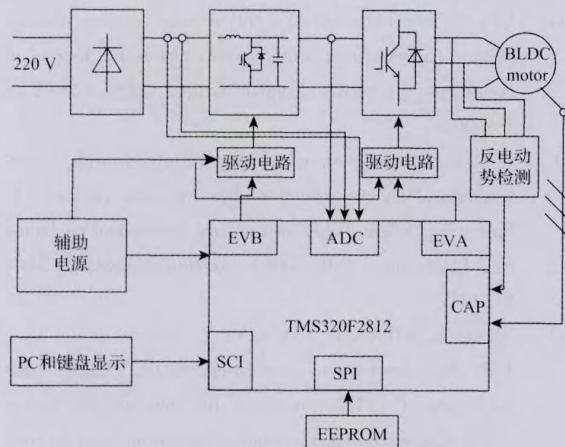


图7 系统结构框图

Fig. 7 System structure block diagram

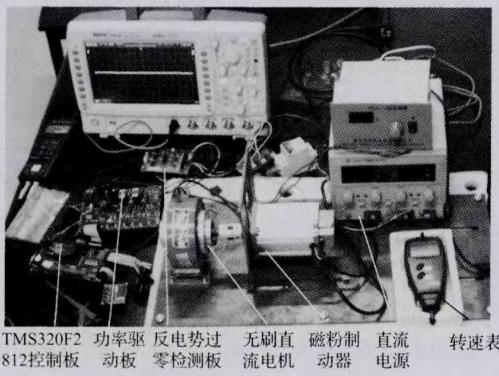


图8 电机试验平台

Fig. 8 The motor experiment testbed

表2 电机参数

Table 2 Motor parameters

参数	参数值
型号	DT80BL145-3130
额定功率/W	550
额定电压/V	310
额定转速 $n_N/(r \cdot min^{-1})$	3 000
额定扭矩/N·m	1.8
电机极对数	4

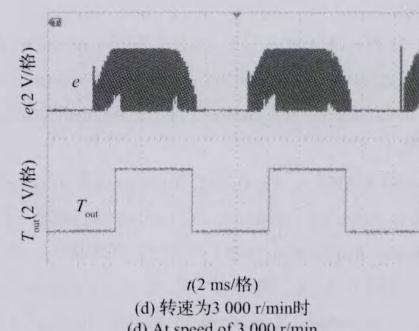
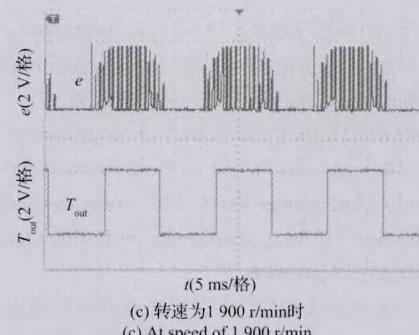
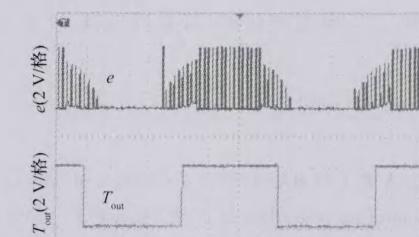
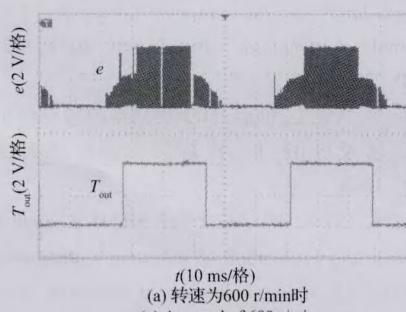


图9 不同转速时反电势波形及过零检测信号

Fig. 9 Waveforms of BEMF and zero-crossing detection signal at different speeds

5 结 论

实验结果表明本文提出的反电势过零检测新方法能保证电机带负载稳定运行于极端速度区域。根据电机转速线性调节控制信号 DSP_EMF_CONTROL 占空比,由其占空比大小切换低速区与高速区反电势采样方式,能有效提高电机在低速区时反电势过零检测效果。在三相采样等效电路上并联三极管控制的电阻分压开关电路,通过控制信号 DSP_EMF_CONTROL 控制三极管通断从而调节电阻分压开关电路阻值,可以避免在高速段时反电势幅值过高造成反电势过零检测电路损坏。因此,本文提出的反电势过零检测新方法,能保证电机工作于更宽

的转速范围,是一种性能较好、可靠性较高、比较实用的方法。

参考文献

- [1] IIZUKA K, UZUHASHI H, KANO M, et al. Microcomputer control for sensorless brushless motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21(4) : 595-601.
- [2] 李自成,程善美,秦忆.线反电动势检测无刷直流电机转子位置方法 [J]. 电机与控制学报 2010, 14(2) : 96-100.
LI Z CH, CHEN SH M, QIN Y. Novel rotor position detection method of line back EMF for BLDCM [J]. Electric Machine and Control, 2010, 14(2) : 96-100.
- [3] DAMODHARAN P, VASUDEVAN K. Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3) : 661-668.
- [4] 崔茂振,张昌凡,朱剑.永磁同步电机滑模调速控制及其实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1) : 84-92.
CUI M ZH, ZHANG CH F, ZHU J. Implementation of PMSM speed drive system based on sliding mode control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(1) : 84-92.
- [5] OGASAWARA S, AKAGI H. An approach to position sensorless drive for brushless DC motors [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1991, 27(5) : 928-933.
- [6] ERUGRUL N, ACARNLEY P. A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1994, 30(1) : 126-133.
- [7] 韦鲲,任军军,张仲超.三次谐波检测无刷直流电机转子位置的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5) : 163-167.
WEI K, REN J J, ZHANG ZH CH. Research on the scheme of sensing rotor position of BLDCM based on the third harmonic component [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 25(5) : 163-167.
- [8] 薛林峰,罗隆福,杨晨.基于 DSP 的无位置传感器无刷直流电机控制技术 [J]. 长沙电力学院学报:自然科学版, 2005, 20(4) : 1-4.
XUE L F, LUO L F, YANG CH. Technology of sensorless Brushless DC motor control based on DSP [J]. Journal of Changsha University of Electric Power: Natural Science, 2005, 20(4) : 1-4.
- [9] ASAEEI B, ROSTAMI A. A novel starting method for BLDC motors without the position sensors [J]. Energy Conversion and Management, 2009(50) : 337-343.
- [10] LIN M Y, ZHANG ZH Y. Anti reverse rotation start up method for sensorless brushless DC motor [J]. Journal of South east University: English Edition, 2009, 125(2) : 199-202.
- [11] BONFE M, BERGO M. A brushless motor drive with sensorless control for commercial vehicle hydraulic pumps [C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2008), Cambridge, England, 2008 : 612-617.
- [12] SHAO J, NOLAN D, HOPKINS T. A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives [C]. Proceedings of the Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2002), Dallas, TX, USA, 2002 : 33-37.
- [13] SHAO J. An improved microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive applications [C]. IEEE Trans. Ind., 2006, 42 : 1216-1221.
- [14] NAIDU M, NEHL T W, GOPALAKRISHNAN S, et al. Keeping cool while saving space and money: A semi-integrated, sensorless PM brushless drive for a 42-V automotive HVAC compressor [C]. IEEE Ind. Appl. Mag. 2005, 11 : 20-28.
- [15] 卢志刚,冀尔康,李伟,等.基于正交神经网络的无刷直流电机控制器设计 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8) : 108-110.
LU ZH G, JI ER K, LI W. Design of BDCM controller based on orthogonal neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8) : 108-110.
- [16] 张磊,肖伟,瞿文龙.直接检测无刷直流电机转子位置信号的方法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(4) : 453-456.
ZHANG L, XIAO W, QU W L. Direct rotor position detection method for sensorless brushless DC motors [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2006, 46(4) : 453-456.
- [17] 杨双龙,徐科军,梁利平.基于 DSP 的浆液型电磁流量计的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9) : 2101-2107.
YANG SH L, XU K J, LIANG L P. Development of DSP based slurry-type electromagnetic flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9) : 2101-2107.
- [18] 张昌凡,黄宜山,邵瑞.基于观测器的感应电机故障检测方法及应用 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6) : 1337-1343.
ZHANG CH F, HUANG Y SH, SHAO R. Fault detection method and application of induction motor based on observer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6) : 1337-1343.

作者简介



朱俊杰,分别于1996和2004年在湖南大学获得学士和硕士学位,现为中南大学博士研究生,主要研究方向为电力电子技术及电机与控制。

E-mail: wenke03@163.com

Zhu Junjie received B. Sc. and M. Sc. degrees from Hunan University in 1996 and 2004, respectively. He is currently working toward Ph. D. degree in Central South University. His research interests include power electronics, and motor and its control.



粟梅,分别于1989、1992、2005年获中南大学学士、硕士、博士学位,现为中南大学教授、博士生导师,主要研究方向为矩阵变换器、电机驱动以及风能转化系统。

E-mail: sumeicsu@mail.csu.edu.cn

Su Mei received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Central South University in 1989, 1992 and 2005, respectively. She is a professor and Ph. D. supervisor in Central South University now. Her research interests include matrix converter, adjustable speed drive, and wind energy conversion system.