

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904920

基于 SEPIC 变换器的无位置传感器无刷 直流电机换相误差校正^{*}

龚文倩, 朱俊杰, 郑志安, 蒋峰, 何明芳

(中南林业科技大学计算机与信息工程学院 长沙 410004)

摘要:传统反电势法的滤波器硬件结构设计将导致无位置传感器无刷直流电机的换相误差,当换相误差较大时将大大降低系统的性能指标。针对换相误差造成系统换相转矩脉动、失步等问题,通过分析理想反电势过零点与实际反电势过零点间相位差值的关系,提出在增加单端初级电感变换器(SEPIC)前级驱动电路的基础上,采取PWM-ON-PWM调制方式,通过检测非导通相(即悬空相)电压与校准后的电压大小进行比较,获取换相信号,实现对换相误差的校正。相比于传统反电势法,只需检测一路相电压,在降低系统转矩脉动的同时,对换相误差进行精准校正。仿真与实验结果验证了所提出的换相误差校正策略在全速范围内的有效性。

关键词:无刷直流电机;无位置传感器;换相误差;SEPIC电路;反电势过零点

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

Commutation error correction of position sensorless brushless DC motor based on SEPIC converter

Gong Wenqian, Zhu Junjie, Zheng Zhian, Jiang Feng, He Mingfang

(College of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The filter hardware structure design of traditional back EMF method will lead to the commutation error of the position sensorless brushless DC motor. When the commutation error is large, the performance index of the system will be greatly reduced. Aiming at the problems of system commutation torque ripple and out-of-step caused by commutation error, the relationship between the ideal back-EMF zero-crossing point and the actual back-EMF zero-crossing point is analyzed; on the base of adding a single-ended primary inductor converter (SEPIC) pre-driver circuit, this paper adopts PWM-ON-PWM modulation method, which detects and compares the voltage value of the non-conducting phase (i.e., the suspended phase) and the calibrated voltage value, then a commutation signal is obtained and the commutation error correction is realized. Compared with the traditional back-EMF method, the proposed method needs only to detect one phase voltage, then the commutation error is accurately corrected and the torque ripple of the system is reduced at the same time. Simulation and experiment results verify the effectiveness of the proposed commutation error correction strategy in full speed range.

Keywords: brushless DC motor; position sensorless; commutation error; SEPIC circuit; back-EMF zero-crossing point

0 引言

无刷直流电机因其动态响应快、体积小、效率高、结构简单,已广泛应用于家电、工业和汽车产品等领域^[1]。无刷直流电机在运行过程中需要获得转子磁极的位置信息,为逻辑开关电路提供正确的换相信息。在传统的采

用位置传感器获取转子位置的方法中,高精度传感器通常价格昂贵,增加了系统成本,同时传感器的安装增大了电动机轴的摩擦,电机与控制系统的接口接线的引入,会降低系统的可靠性,限制了无刷直流电机的广泛应用。因此,无位置传感器无刷直流电机换相控制策略成为近年来的研究热点之一^[2-5]。

目前,无刷直流电机无位置传感器换相位置检测应

用得最为广泛的方法是反电势过零点法^[6-7]。但是反电势过零点法往往需要在检测过程中加入低通滤波器以消除电路中的噪声影响,而低通滤波器的引入,会造成相位滞后,带来严重的换相误差。文献[8]通过检测线反电势过零点为电机换相点,提出的相移补偿策略,将检测的线反电势值与设定的换相阈值进行比较,通过相移补偿减小了滤波器带来的误差,但是换相的精确度会受到换相续流的影响。文献[9]通过调节电路参数,保证实际换相点在理论换相点的前后 30° 电角度,但是对于高精度场合,该方法不适用。文献[10-12]中,刘刚等人提出最优滞环切换法,针对高低速段进行不同的相位补偿,以换相前后 30° 范围内非换相相电流积分相等为目标,将前后非换相相电流积分差值做反馈量,通过比例积分(PI)控制器的自动调节来校正换相信号。在采用PI控制的校正方式中,文献[13]将虚拟中性点与电机驱动电压中性点之间的电压差引出,以换相点前后采样电压差的差值作为反馈量,以该反馈量趋近于0为目标,同样通过PI闭环回路校正换相误差。但是该方法不适用于梯形波反电势的无刷直流电机,因此具有一定的局限性。文献[14]以换相瞬间前后断开相端电压差为反馈量,电压差趋近于0为目标,通过PI调节器校正误差,该方法存在一定的测量偏差,且容易受到续流二极管在换相期间续流的影响。文献[15]通过分析换相误差角与直流母线电流间的关系,提出一种无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)方法,通过控制器实时校正误差。文献[16]针对低电感,非理想反电势的高速无刷直流电机提出一种两段式误差补偿方法,通过变换线电压以及对高低速段进行不同的滤波设计,来实现对误差的补偿,分别在1 000、5 000、10 000 r/min等转速下进行实验取得较为精确的换相效果,但是该方法增加了硬件电路,控制较为复杂。

本文采用SEPIC变换器作为前级驱动电路,同时采用PWM-ON-PWM(前 30° PWM调制,中间 60° 恒通,后 30° PWM调制)的调制方法,可以完全消除非导通相二极管续流现象。通过检测一路相电压与计算值进行比较,得到2个反电势过零点,采用DSP分别延时相应电角度依次得到其余各个过零点。实验证明该方法能实时有效地校正换相位置信号,避免了传统反电势法中因滤波器在换相过程中带来的换相滞后问题,并且降低了系统的转矩脉动。

1 原理和误差分析

1.1 原理分析

为降低电机换相过程中的转矩脉动^[17-18],本文采用基于SEPIC的无刷直流电机驱动电路拓扑结构如图1所

示。对于三相六态星形连接的无刷直流电机,通常采用两两导通方式,在每个电周期,每相绕组正反向各通电 120° ,每一时刻只有两相导通,非导通相悬空。

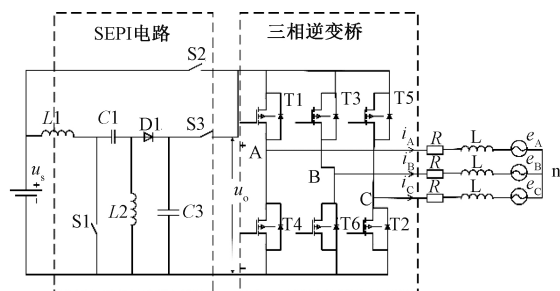


图1 基于SEPIC变换器无刷直流电机驱动电路拓扑

Fig.1 The driving circuit topology of BLDC motor based on SEPIC converter

忽略电机铁芯饱和,不计涡流损耗和电枢反应等因素,假设电机工作在理想状态下,三相绕组完全对称,反电势为平顶宽度为 120° 的理想梯形波。则三相电压平衡方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_A/dt \\ di_B/dt \\ di_C/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_n \\ u_n \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_A, u_B, u_C 分别为三相定子端电压; i_A, i_B, i_C 分别为三相定子电流; e_A, e_B, e_C 分别为三相相反电势; R 为绕组电阻; L 为绕组电感; u_n 为中点电压。

SEPIC变换器电路拓扑如图2所示。SEPIC电路既可以实现升压输出也可以实现降压输出,与其他开关电源类似,通过电路中电感电容及功率管的通断配合实现对输出电压值的调整。

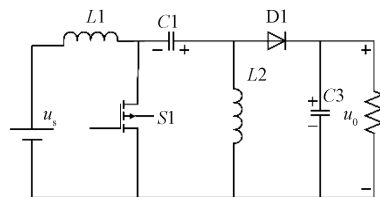


图2 SEPIC电路拓扑

Fig.2 SEPIC circuit topology

逆变桥输入电压与直流电源之间的关系为:

$$u_o = \frac{D}{1-D} u_s \quad (2)$$

式中: D 为占空比,由功率开关管S1控制。可以通过调

节占空比的大小,来得到所需的直流母线输出电压。当 $D < 1/2$ 时,SEPIC 表现为降压型变换器;当 $D > 1/2$ 时,SEPIC 表现为升压型变换器。由于反电势与角速度成正比,有:

$$E_m = K_e \omega \quad (3)$$

式中: K_e 为反电势系数; ω 为角速度。当换相期间直流侧电压等于 4 倍反电势时能完全消除换相转矩脉动^[19]。

$$D = \frac{4K_e \omega}{u_s + 4K_e \omega} \quad (4)$$

无刷直流电机起动后,转子永久磁铁产生的磁通切割定子绕组产生反电势 e ,其大小正比于电机转速和气隙中的磁密 B ,并且当转子极性改变时,反电势波形的正负也随之改变。假设在理想状态下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 ,波形如图 3 所示。反电势过零检测法通常是在获取电机三相绕组断开相(悬空相)端电压信号的基础上,与参考信号进行比较,得到反电势 e 的过零点,再将反电势 e 过零信号点延时 30° 电角度即可得到转子位置信息,进而控制电机换相。

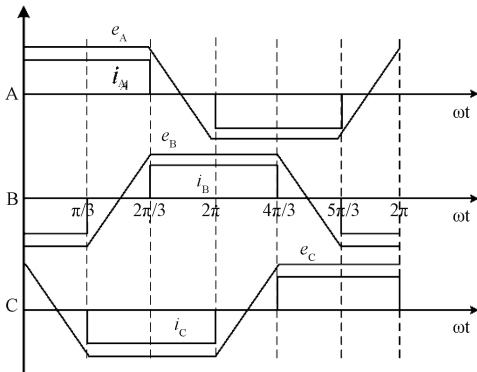


图3 理想反电势和电流波形

Fig.3 Ideal back EMF and current waveforms

以 A 相换相到 B 相为例,换相初始时刻, A、C 两相导通, B 相悬空,对应于图 3 中换相点 $\omega t = 2\pi/3$ 。此时, T1、T2 导通,电流从 A 相流向 C 相,如图 4 所示, $i_A = -i_C$, $i_B = 0$, $u_A = u_o$, $u_C = 0$,由式(1)可得,端电压可表示为:

$$\begin{cases} u_A = Ri_A + Ldi_A/dt + e_A + u_n = u_o \\ u_B = Ri_B + Ldi_B/dt + e_B + u_n = e_B + u_n \\ u_C = Ri_C + Ldi_C/dt + e_C + u_n = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由图 4 以及电机原理可知,在 A、C 相组成的回路中, A、C 相反电势大小相等方向相反,即 $e_A = -e_C$,可得到中性点电压为:

$$u_n = \frac{u_A + u_C}{2} = \frac{u_o}{2} \quad (6)$$

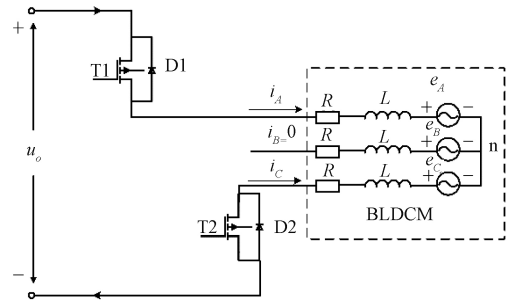


图4 换相初始时刻

Fig.4 Commutation initial time

由式(5)和(6)得到 B 相(悬空相)反电势为:

$$e_B = u_B - \frac{u_o}{2} \quad (7)$$

根据 SEPIC 特性式(2),联合式(7), B 相反电势与直流母线电压间的关系为:

$$e_B = u_B - \frac{D}{2(1-D)}u_s \quad (8)$$

无刷直流电机换相过程中存在 2 种状态:非续流状态和二极管续流状态。以上分析的是第 1 种状态下的悬空相反电势,第 2 种状态分析如下。

在传统反电势法中,以 B 相为例,非导通区间为 $\pi/3 \sim \pi/2$ 、 $\pi/2 \sim 2\pi/3$ 、 $4\pi/3 \sim 3\pi/2$ 、 $3\pi/2 \sim 5\pi/3$ 。非导通相续流发生在 PWM OFF(调制管关断)期间^[20],当 $e_B > 0$ 时,即 $\pi/2 \sim 2\pi/3$ 、 $4\pi/3 \sim 3\pi/2$ 区间内,若为下桥调制,则绕组通过二极管续流,若为上桥调制则绕组不通过二极管续流;在 $e_B < 0$ 时,即 $\pi/3 \sim \pi/2$ 、 $3\pi/2 \sim 5\pi/3$ 区间内,若为上桥调制则绕组通过二极管续流,若为下桥调制,则绕组不通过二极管续流。本文采用的 PWM-ON-PWM 调制方式,逆变器的各相输出在导通期间,前 30° 采用 PWM 调制,中间 60° 保持恒通,后 30° 再次采用 PWM 调制。即在 $\pi/2 \sim 2\pi/3$ 、 $4\pi/3 \sim 3\pi/2$ 区间内,逆变器为上桥调制;在 $\pi/3 \sim \pi/2$ 、 $3\pi/2 \sim 5\pi/3$ 区间内,逆变器为下桥调制,彻底消除非导通相二极管续流问题。因此, B 相反电势无需考虑当开关管 T1 关断,二极管 D4 续流,开关管 T2 导通的情况,即续流二极管 D4 与 C 相下桥臂 T2 构成回路。同理,其他两相也无需考虑续流时的反电势状态。

1.2 换相误差原因分析

电机初始换相信号通过检测反电势过零点,然后相移 30° 电角度依次得到电机 6 个换相点。为了消除高频噪声和电磁干扰的影响,通常采用如图 5 所示的低通滤波器检测电路,将悬空相端电压信号($u_A/u_B/u_C$)经过两个分压电阻($R_1R_2/R_3R_4/R_5R_6$)进行分压,再采用滤波电容($C_1/C_2/C_3$)进行滤波,即得到一个更为稳定的输出信号($u_{AF}/u_{BF}/u_{CF}$)。

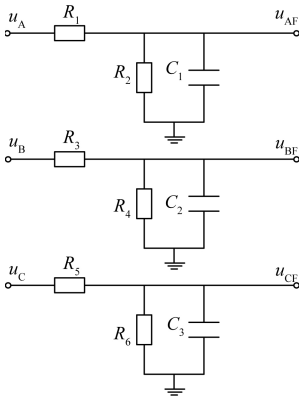


图5 低通滤波器检测电路

Fig.5 The low pass filter detection circuit

造成反电势换相误差的主要因素包括:硬件电路误差,软件估算误差,电机固定安装因素误差,以及滤波器误差。根据文献[6]实验推导证明,其中滤波器所带来的误差延时为导致电机换相误差的主要因素,并且误差角度随着转速增加而增加,因此,本文主要针对滤波器所带来的误差延时进行校正。

滤波器带来的端电压延迟角度为:

$$\theta_f = \arctan \frac{\omega R_1 R_2 C_1}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

式中: ω 为角速度; R_1 、 R_2 为分压电阻; C_1 为滤波电容。

滤波器高截止频率可以减少换相滞后,但是滤波效果差,且随着电机转速加大,电磁干扰严重。而当采用低截止频率时,能带来更好的滤波效果,但是会造成不可避免的换相误差,因此必须采用合适的相位校正策略进行补偿,否则电机性能将受到影响,例如换相位置检测不准确造成电机失步。

2 换相误差校正

2.1 误差校正策略

在传统的反电势检测法中,是通过检测悬空相端电压与母线电压进行比较,即断开相电压为直流母线电压的一半,此时的断开相反电势为0。然而在电机实际运行中,由于滤波器的存在,检测到的反电势过零点存在延迟。以悬空相B相为例,反电势波形如图6所示。

由图6可知,理想状态下的反电势过零点,对应于实际换相下反电势为 E_θ 的时刻。也就是,当悬空相反电势等于 E_θ 时,此时应为反电势的理想过零点时刻,再延时 30° 即为电机理想的准确换相点。

假设反电势为平顶宽度为 120° 的理想梯形波,则:

$$E_\theta = \frac{2E_m}{\pi/3} \times \theta_f \quad (10)$$

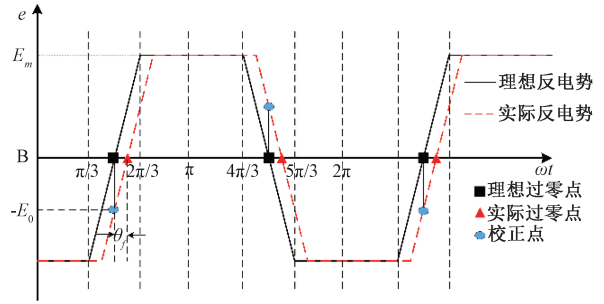


图6 B相反电势

Fig.6 B phase back EMF

将式(3)和(9)代入式(10)得:

$$E_\theta = \frac{6K_e \omega}{\pi} \times \arctan \frac{\omega C R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

式(11)表明, E_θ 会随电机转速变化而变化,因此该方法适用于电机不需要频繁加减速的场合。

由式(8)可得,电机理想反电势过零点为:

$$E_\theta = u_B - \frac{D}{2(1-D)} u_s \quad (12)$$

即:

$$u_B = E_\theta + \frac{D}{2(1-D)} u_s = \frac{6K_e \omega}{\pi} \times \arctan \frac{\omega C R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{D}{2(1-D)} u_s \quad (13)$$

2.2 误差校正算法

首先,由式(9)可知,根据电机转速,可以得到相位误差延迟角度 θ_f ,进而根据式(4)和(11)分别计算出最小转矩脉动时的占空比大小 D 和理想反电势过零点时对应的实际反电势大小 E_θ ,从而可以由式(13)得到此时悬空相电压计算值大小。通过检测任意一相的端电压大小,与计算值进行比较,当检测电压等于电压计算值时,即为一个理想反电势过零点,一个周期内可以得到该相反电势的两个理想过零点。每当检测到一个反电势过零点时,通过 DSP 分别延时 60° 、 120° ,可依次得到一个周期内的六个准确的反电势过零点信号。控制结构框图如图7所示。无刷直流电机换相条件如表1所示。

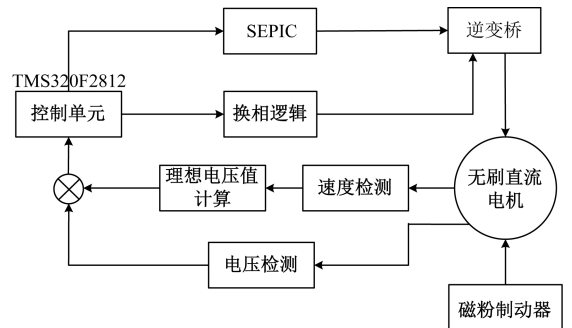


图7 控制结构框图

Fig.7 Control structure block diagram

表 1 无刷直流电机换相条件
Table 1 Phase commutation conditions of BLDC motor

工作状态	换相时刻	导通相	导通器件
1	$e_C = E_\theta$	A+, B-	T1, T6
2	$e_B = -E_\theta$	A+, C-	T1, T2
3	$e_C = E_\theta$	B+, C-	T3, T2
4	$e_B = -E_\theta$	B+, A-	T3, T4
5	$e_C = E_\theta$	C+, A-	T5, T4
6	$e_B = -E_\theta$	C+, B-	T5, T6

3 仿真与实验

3.1 仿真结果

为验证上述基于 SEPIC 变换器无位置传感器无刷直流电机换相误差校正控制策略的有效性, 在 MATLAB2016/SIMULINK 环境中搭建了系统仿真平台。电机采用永磁同步电机反电势为梯形波模块, 极对数 $p = 4$, 额定电压为 36 V, 定子相电阻为 4.765 Ω , 定子电感为 8.5 mH, 额定转速为 3 000 r/min, 转动惯量为 $J = 8 \times 10^{-3}$ kg·m²。图 8 所示为转速为 3 000 r/min 时, 加入校正策略前的三相电流仿真波形, 图 9 所示为校正后的电流仿真波形, 其中, i 为校正前相电流波形, i^* 为校正后相电流波形。从图 8~9 中黑色圆圈标识部分可以看出, 在加入了 SEPIC 前级驱动电路以及采用 PWM-ON-PWM 调制方式后, 换相期间的相电流脉动得到了有效的抑制, 且无二极管续流问题, 电机运行更加平稳。

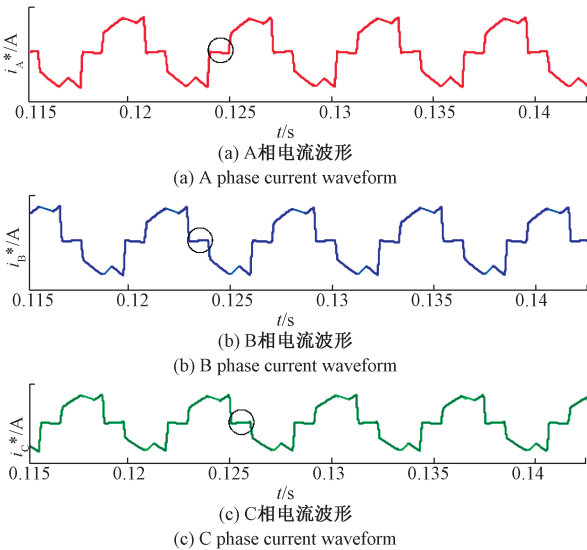
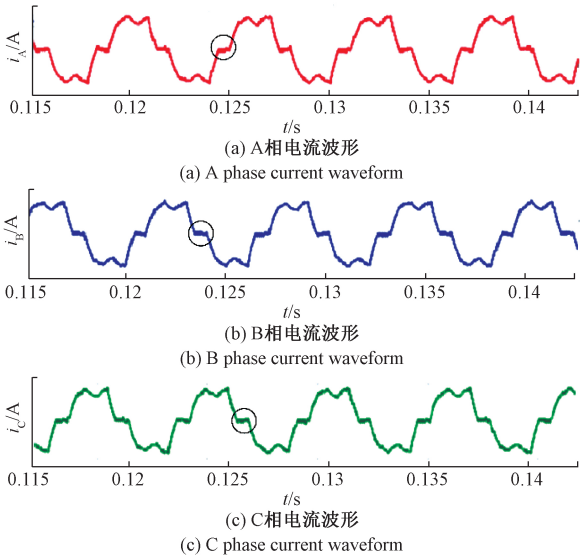


图 9 校正后三相电流波形
Fig.9 Three-phase current waveforms after correction

图 10~12 所示分别为在 500、1 500、3 000 r/min 等不同转速下原始反电势与校正后反电势仿真波形对比, e_B 为校正前反电势波形, e_B^* 为校正后反电势波形。仿真结果表明, 采用本文的误差校正方法可以使反电势实现适当的超前换相, 从而使滤波器带来的换相误差得到校正。

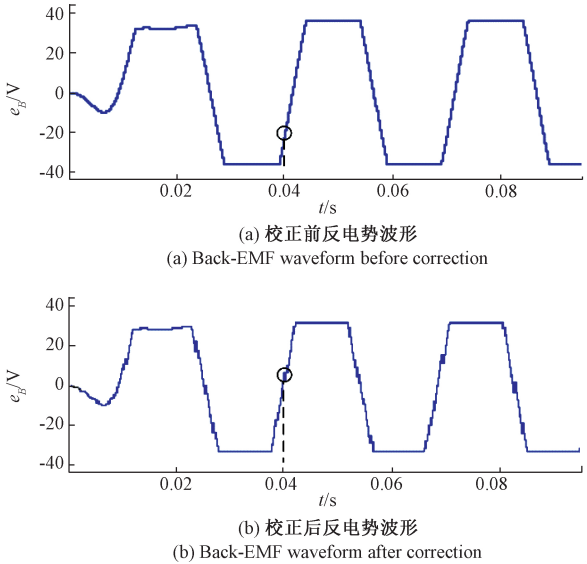


图 10 500 r/min 反电势仿真波形
Fig.10 Back-EMF simulation waveforms at 500 r/min

3.2 实验结果

为了进一步验证本文所提出的方法的有效性, 采用 TI 公司生产的 DSP 芯片 TMS320F2812 作为处理器搭建了 BLDCM 实验平台如图 13 所示。电机参数如表 2 所示。

图 8 校正前三相电流波形

Fig.8 Three-phase current waveforms before correction

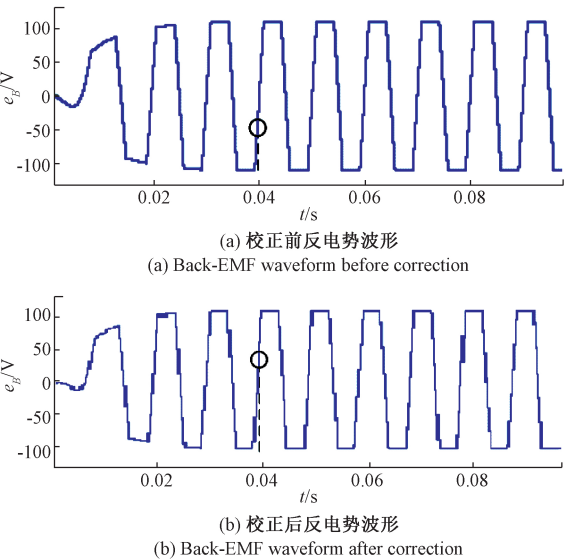


图 11 1 500 r/min 反电势仿真波形

Fig.11 Back-EMF simulation waveforms at 1 500 r/min

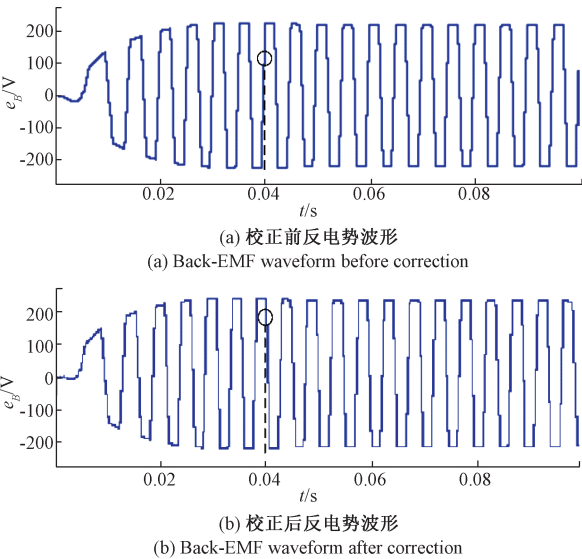


图 12 3 000 r/min 反电势仿真波形

Fig.12 Back-EMF simulation waveforms at 3 000 r/min

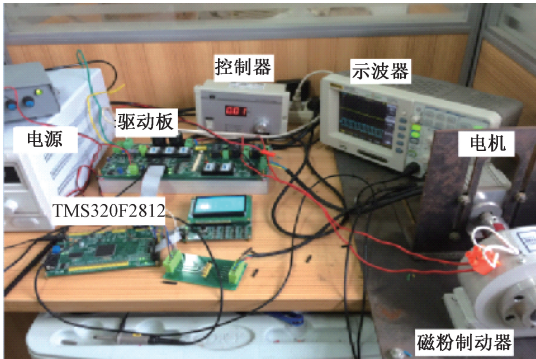


图 13 无刷直流电机实验平台

Fig.13 Experiment platform of BLDC motor

表 2 BLDC 电机参数	
Table 2 Parameters of the BLDC motor	
参数	参数值
额定功率/W	76
额定转速/r·min ⁻¹	3 000
额定扭矩/N·m	0.32
极对数	4
相电阻/Ω	0.875
额定电压/V	36
相电感/mH	0.25
反电势系数/V·(rad/s) ⁻¹	0.04
额定电流/A	2.5

本实验平台主要由 SEPIC 电路、整流滤波电路、三相逆变电路、控制电路、检测电路等主要电路组成。电机由静止启动时,反电势为 0,无换相信号产生,本文采用三段式启动法。首先给任意两相绕组通电,使转子定位在固定位置上,当检测到稳定的换相信号时,再切换至本文提出的无位置换相控制策略。将磁粉制动器作为平台负载,设定扭矩为 0.1 N·m,图 14 所示为在额定转速 3 000 r/min 时的 B 相电流波形, i_B 为加入校正策略前的 B 相电流波形, i_B^* 为校正后的电流波形,由图 14 可以看出,校正后的相电流波形相较于加入校正策略前的电流波形脉动得到了明显降低。

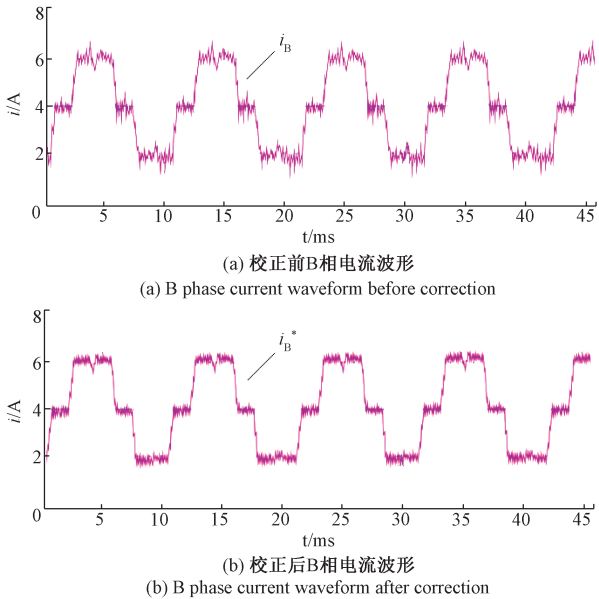


图 14 B 相电流实验波形

Fig.14 B phase current experiment waveforms

图 15~17 所示分别为在设定速度为 500、1 500、3 000 r/min 的情况下,反电势输出波形与霍尔传感器检

测电路的输出波形的实验对比。其中, e_B 为 B 相反电势波形, H_B 为转子位置传感器 B 路信号波形。由图 15~17 可知,反电势信号能与位置传感器的换相信号较好的对应。在本文控制策略下,电机在低速、中速和额定转速下均能较准确的给出换相位置信号。在额定转速时存在细微的误差,是受电机固定安装因素的影响,该误差在工控精度范围内。因此,实验结果进一步验证了本文方法的有效性。

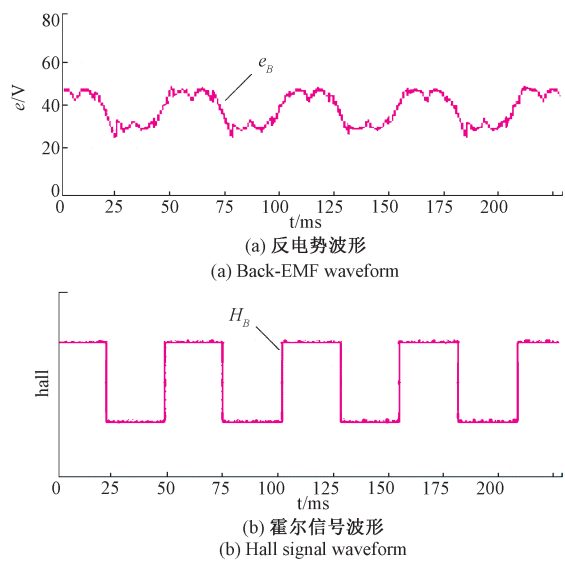


图 15 500 r/min 实验波形

Fig.15 Experiment waveforms at 500 r/min

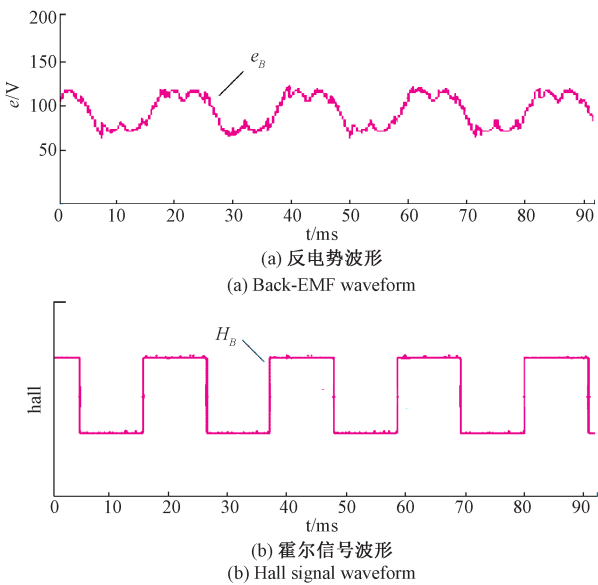


图 16 1 500 r/min 实验波形

Fig.16 Experiment waveforms at 1 500 r/min

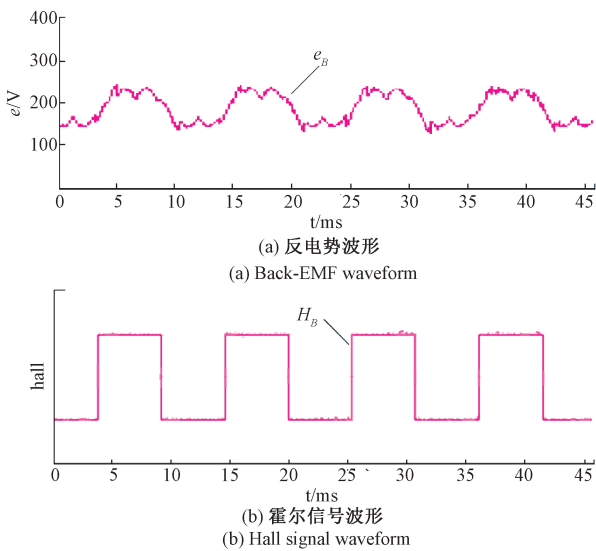


图 17 3 000 r/min 实验波形

Fig.17 Experiment waveforms at 3 000 r/min

4 结 论

本文提出的基于 SEPIC 变换器的无位置传感器无刷直流电机换相误差校正策略,在 PWM-ON-PWM 调制方式下,通过分析理想反电势过零点与实际反电势过零点间对应关系,只需检测一相端电压,与理想端电压计算值进行比较,通过 DSP 进行软件延时,依次可以得到 6 个准确的换相信号,实现对误差校正的目的。该方法硬件电路简单,易于控制,可以消除传统反电势法中因滤波器引起的换相滞后带来的转子位置检测不准确的问题,且降低了电机换相转矩脉动。仿真与实验结果验证了该方法能在不同速度段有效地校正位置误差。

参考文献

[1] 朱俊杰,刘浩然,蒋峰,等. 无刷直流电机改进型 SEPIC 电路研究[J]. 仪器仪表学报, 2017,38(11): 2866-2873.
ZHU J J,LIU H R,JIANG F,et al. Research on modified SEPIC circuit of brushless DC motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007,38(11):2866-2873.
[2] KIM T, LEE H W, EHSANI M. Position sensorless brushless DC motor/generator drives: Review and future trends [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(4):557-564.
[3] PAUL P A, JOHN F W. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006,

- 53(2):352-362.
- [4] 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.
- [5] 王大方,祝雅琦,金毅,等. 一种新颖的无刷直流电机位置检测方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 139-144.
- WANG D F, ZHU Y Q, JIN Y, et al. A novel research on detecting position of brushless DC motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 139-144.
- [6] 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.
- [7] 朱俊杰,栗梅,陈程,等. 无刷直流电机反电势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441-447.
- ZHU J J, SU M, CHENG CH, et al. Novel BEMF zero-crossing detecting method for brushless DC motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 441-447.
- [8] 李志强,夏长亮,陈炜. 基于线反电动势的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 38-44.
- LI ZH Q, XIA CH L, CHEN W. A position sensorless control strategy for bldcm based on line back-EMF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 38-44.
- [9] 吕腾飞,迟长春,刘红松,等. 基于相反电势比较法的无刷电机换相点检测策略的研究[J]. 微特电机, 2016, 44(10): 74-81.
- LV T F, CHI CH CH, LIU H S, et al. Research on the reversing point capture method of position sensorless control system of BLDCM[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016, 44(10): 74-81.
- [10] 崔臣君,刘刚,郑世强. 基于线反电势的高速磁悬浮无刷直流电机无位置换相策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 119-128.
- CUI CH J, LIU G, ZHENG SH Q. Commutation strategy of high-speed maglev brushless DC motors based on the line-to-line back-EMF without position sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 119-128.
- [11] 刘刚,崔臣君,韩邦成,等. 高速磁悬浮无刷直流电机无位置换相误差闭环校正策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 100-109.
- LIU G, CUI CH J, HAN B CH, et al. Closed loop control strategy to correct the commutation error of high-speed magnetically suspended brushless DC motors without position sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 100-109.
- [12] GANG L, CHENJUN C, KUN W, et al. Sensorless control for high-speed brushless dc motor based on the line-to-line back EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4669-4683.
- [13] 李红,金浩,李海涛,等. 一种基于电机虚拟中性点的无刷直流电机无位置换相误差闭环校正方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 175-182.
- LI H, JIN H, LI H T, et al. Closed loop control commutation strategy of brushless DC motors without position sensor based on virtual neutral point[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 175-182.
- [14] 吴小婧,周波,宋飞. 基于端电压对称的无位置传感器无刷直流电机位置信号校正[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 54-59.
- WU X J, ZHOU B, SONG F. A new control method to correct position phase for sensorless brushless DC motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 54-59.
- [15] LI H T, NING X, LI W Z. Implementation of a MFAC based position sensorless drive for high speed BLDC motors with nonideal back EMF[J]. ISA Transactions, 2017(67): 348-355.
- [16] WENZHUO L, JIANCHENG F, HAITAO L, et al. Position sensorless control without phase shifter for high-speed BLDC motors with low inductance and nonideal back EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1354-1366.
- [17] 张晓峰,胡庆波,吕征宇. 基于BUCK变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2005,

20(9):72-76.

ZHANG X F, HU Q B, LV ZH Y. Torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a buck converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9):72-76.

[18] 李奥, 梅佳胜. 基于 Buck 变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制[J]. 微电机, 2018, 51(1): 54-58, 64.
LI A, MEI J S. Torque ripple suppression of brushless DC motor based on Buck converter[J]. Micromotors. 2018, 51(1): 54-58, 64.

[19] 郭云涛. 永磁无刷直流电机转矩脉动抑制策略研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
GUO Y T. Study on torque ripple suppression technique of permanent magnet brushless DC motor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009

[20] 韦鲲, 胡长生, 张仲超. 一种新的消除无刷直流电机非导通相续流的 PWM 调制方式[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7):104-108.
WEI K, HU CH SH, ZHANG ZH CH. A novel PWM scheme to eliminate the diode freewheeling of the inactive phase in BLDC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7):104-108.

作者简介



龚文倩, 2017 年于长沙学院获得学士学位, 现为中南林业科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电机控制。
E-mail: 892673950@ qq.com。



朱俊杰(通信作者), 分别在 1996 年和 2004 年于湖南大学获得学士学位和硕士学位, 2014 年于中南大学获得博士学位, 现为中南林业科技大学副教授, 主要研究方向为信号处理与电机控制。
E-mail: correspondingemail@ 163.com。

Zhu Junjie (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hunan University in 1996 and 2004, and Ph. D. degree from Central South University in 2014, respectively. Now, he is an associate professor in Central South University of Forestry and Technology. His main research interests include signal processing and motor control.