

线电压差法无位置传感器BLDCM 续流影响的研究

姚绪梁,关琦,赵继成,鲁光旭,王景芳

(哈尔滨工程大学 自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:线电压差法无位置传感器无刷直流电机续流过程会导致采样的线电压差通过滤波后发生畸变,使换相信号超前。针对这一问题,从换相期间的续流过程入手,通过分解线电压差信号,分析超前换相的产生机理,并提出了一种无位置传感器无刷直流电机续流影响的补偿策略。仿真与实验结果表明,使用补偿策略的无位置传感器无刷直流电机采样的线电压差信号消除了畸变,实现了无刷直流电机工作在最佳换相时刻换相。

关键词:无位置传感器无刷直流电机;续流;超前补偿

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19423

Research on Freewheeling Interference of Line Voltage Difference Method for Sensorless Brushless DC Motor

YAO Xuliang, GUAN Qi, ZHAO Jicheng, LU Guangxu, WANG Jingfang

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: Line voltage difference method for sensorless brushless DC motor (BLDCM) freewheeling process will cause the sampled line voltage difference to be distorted after filtering, so that the commutation signal leads. Aiming at this problem, started with the freewheeling process during the commutation process, the generation mechanism of the leading commutation by decomposing the line voltage difference signal was analyzed, and a compensation strategy for the freewheeling effect of the sensorless BLDCM was proposed. The simulation and experimental results show that the line voltage difference signal sampled by the position sensorless BLDCM using the compensation strategy eliminates the distortion and realizes the commutation of the BLDCM at the optimal commutation time.

Key words: sensorless brushless DC motor; load current freewheeling; lead compensation

小型水下海洋运载器的推进电动机通常采用无刷直流电机 (brushless DC motor, BLDCM), 电机转子位置是BLDCM三相六状态驱动策略中最重要的参数之一,通常采用霍尔传感器提供BLDCM换相信息。电力推进系统中电磁干扰会严重影响到霍尔传感器对位置信号的采集,因此无位置传感器无刷直流电机的研究成为现阶段电力推进器的研究热点^[1-3]。

目前,研究无位置传感器的控制方案有很多,主要包括反电动势法、续流二极管法以及磁链估计法等^[4-7]。反电动势法无位置传感器无刷直流电机的应用最为广泛,其根据采样方式又可

以分为最为常用的端电压采样法、无需构造虚拟中性点的线电压差采样法以及具有良好的低速性能的3次谐波法^[8-10]。

所有方法都会受到换相误差的影响,换相误差会导致较大的母线电流峰值,产生转矩脉动,影响电力推进系统的运行。因此国内外诸多学者提出了无位置传感器无刷直流电机换相误差检测与补偿的方法。文献[11]提出了一种通过检测同一周期前后30°相电流积分差来检测换相误差的方法,同时提出了自适应换相误差补偿方法;文献[12]提出了一种基于线电压差积分的换相误差检测及校正方法,通过检测线电压差积分

并进行一个近似处理使积分值和换相误差角度呈线性关系,然后计算换相误差角度并补偿;文献[13]提出了一种基于磁链的无位置传感器无刷直流电机自适应换相误差补偿策略,给出了基于线电压偏差的闭环补偿算法,以校正高速范围内的换相误差。上述方法都是通过检测电压或是电流信号来检测换相误差角度,这些方法采用的电机多为高速电机低电感电机,续流对位置信号采集的影响很小,换相误差来源都为滤波产生的滞后和系统延迟。在方波控制下,换相时的续流现象对端电压和线电压差采样影响是不可避免的,这会造成端电压或线电压差通过滤波后的波形发生畸变,检测到的反电动势过零点超前于理想反电动势过零点,比滤波等问题产生的滞后更大,超前换相会使无刷直流电机产生更大的转矩脉动,严重时甚至会导致无位置传感器无刷直流电机换相失败。文献[14]分析了重载条件下无刷直流电机无位置传感器驱动换相续流影响,并提出了一种线下检测及超前误差补偿的方法。但是这种方法不能实时校正系统误差,需要重新构造中性点。

为了消除续流影响对无位置传感器无刷直流电机线电压差的影响,实现无位置传感器无刷直流电机的可靠换相。本文提出了一种可以实时补偿无位置传感器无刷直流电机续流影响的方法,通过分析续流过程,提取出线电压差中的续流干扰信号,并将其抵消,消除线电压差的畸变问题,对超前的换相信号进行补偿,实现无位置传感器无刷直流电机精确换相。

1 线电压差法反电动势过零点检测

1.1 忽略续流情况下的线电压差

定子绕组为三相星型接法的无刷直流电机每相绕组可以等效为由电阻、电感和反电动势串联而成。无刷直流电机和三相全控逆变桥的等效电路图如图1所示。

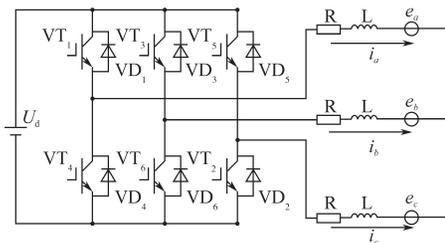


图1 无刷直流电机等效电路

Fig.1 Brushless DC motor equivalent circuit

假设电力推进电机使用的是永磁体结构,电机三相对称,忽略电机的电枢反应,每相绕组具有相同的特性和参数。图1中, R, L 分别为每相绕组的电阻和电感(电感为自感和互感的差值); e_a, e_b, e_c 为相反电动势; i_a, i_b, i_c 为相电流; U_d 为电机的母线电压; u_a, u_b, u_c 为端电压; u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} 为线电压。

三相相电压两两相减得到线电压表达式:

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b \\ = R(i_a - i_b) + \frac{Ld(i_a - i_b)}{dt} + e_a - e_b \\ u_{bc} = u_b - u_c \\ = R(i_b - i_c) + \frac{Ld(i_b - i_c)}{dt} + e_b - e_c \\ u_{ca} = u_c - u_a \\ = R(i_c - i_a) + \frac{Ld(i_c - i_a)}{dt} + e_c - e_a \end{cases} \quad (1)$$

若将 u_{ab} 与 u_{bc} 相减得到:

$$u_{ab} - u_{bc} = R(i_a + i_c - 2i_b) + L \frac{d(i_a + i_c - 2i_b)}{dt} + (e_a + e_c - 2e_b) \quad (2)$$

假设 A 相、 C 相导通, B 相不导通, $i_a + i_b + i_c = 0$, 线电压差表达式为

$$u_{ab} - u_{bc} = -3Ri_b - 3L \frac{di_b}{dt} - 2e_b \quad (3)$$

若忽略电机续流,即 i_b 立刻变为0,得到反电动势与线电压差的关系为

$$2e_b = u_{bc} - u_{ab} \quad (4)$$

在 B 相不导通时,反电动势和线电压差有相同的过零点,采样得到的过零点再延迟 30° 就是电机的换相点。

1.2 考虑到续流情况下的线电压差

电机在任意时刻两相导通,因电机电感的存在,电流不能突变为0,此时关断相电流将通过反向并联的二极管续流。

续流时电流流向示意图如图2所示, A 相、 B 相导通切换至 A 相、 C 相导通, B 相作为电机的关

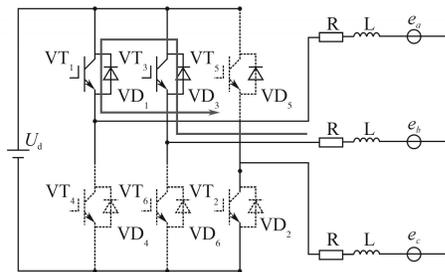


图2 续流时电流流向示意图

Fig.2 Diagram of current flow during freewheeling

断相,关断相相电流通过续流二极管续流,使关断相相电压钳位。此时,线电压信号 $u_{bc}=U_d, u_{ab}=0$ 。电流续流过程线电压差信号为 $u_{bc}-u_{ab}=U_d$ 。

1.3 位置信号的检测

为了分析续流过程对线电压差的影响,将线电压差信号进行分解,在续流期间可以把线电压差信号看作续流干扰信号 $u_a(t)$ 与 2 倍反电动势信号 e_b 的叠加。续流干扰信号为一个近似梯形的脉冲信号,将它等效成一个矩形的脉冲信号,线电压分解如图 3 所示。等效的续流干扰信号随时间的方程为

$$u_a(t) = \begin{cases} U_d & 0 < t \leq T_a \\ 0 & T_a < t \leq T_{60^\circ} \end{cases} \quad (5)$$

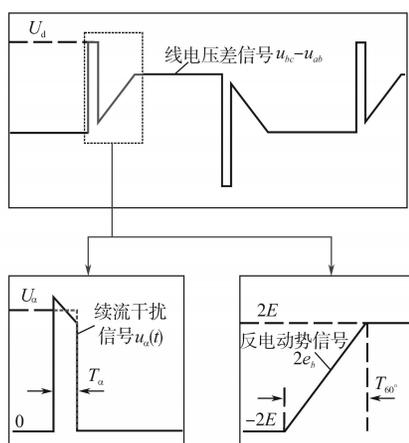


图3 线电压差分解

Fig.3 Line voltage difference decomposition

求解续流时间 T_a ,需要 B 相电流变化率 di_b/dt 和换相瞬间 B 相相电流 I_b , A 相、 C 相导通,换相时 $u_a=U_d, u_b=U_d, u_c=0$ 。换相点处有 $e_b=-E$ 。 $E=K_c n$, 其中 K_c 为电机反电动势系数。得到 B 相电流的变化率为

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{U_d + 2E}{3L} \quad (6)$$

根据 B 相电流的变化率,得到续流时间为

$$T_a = \frac{3L|I_b|}{U_d + 2E} \quad (7)$$

U_a 为续流干扰信号的大小,其值为

$$U_a = U_d + (2E - \frac{2T_a E}{T_{60^\circ}}) \quad (8)$$

线电压差信号通常含有高频 PWM 分量,为了获取反电动势的过零点,需要在检测电路中加入低通滤波器,滤除高频分量。本文以一阶 RC 滤波器为例,电阻电容分别为 R_1, C_1 。

续流干扰信号 $u_a(t)$ 经过低通滤波器后的响应 $y_a(t)$ 为

$$y_a(t) = \begin{cases} U_a(1 - e^{-t/R_1 C_1}) & 0 < t \leq T_a \\ U_a(e^{-(t+T_a)/R_1 C_1} + e^{-t/R_1 C_1}) & t > T_a \end{cases} \quad (9)$$

线电压差通过滤波后发生畸变,这个信号相当于滤波后的 2 倍反电动势信号 $2y_c(t)$ 与续流干扰信号 $y_a(t)$ 相叠加,滤波后的线电压差如图 4 所示。续流干扰信号滤波输出未衰减到 0 时和反电动势的滤波响应相叠加,叠加信号等于零的位置提前于反电动势过零点,形成了超前的换相信号。当负载越大,续流时间就会越长,续流干扰的滤波响应衰减到 0 的时间越长,超前现象越严重。

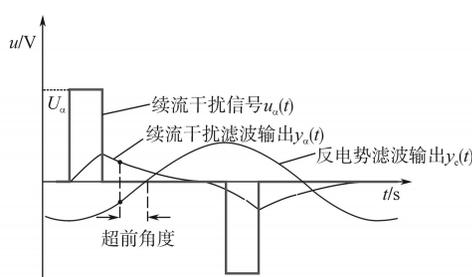


图4 滤波后的线电压差

Fig.4 Filtered line voltage difference

2 续流干扰的补偿策略

通过对线电压的分解可知,负载状态下无位置传感器无刷直流电机超前信号的产生原因是由于续流信号的影响。而这个续流干扰信号的特性是由负载和转速来决定的,因此通过对关断相电流和电机转速的测量可以计算并提取出等效的续流干扰信号。

本文提出的换相补偿策略的根本思想就是将这个线电压差中的续流干扰信号提取并抵消,在电机的关断相处做出一个和续流干扰信号相反的信号,与线电压差相叠加,用以抵消续流干扰信号对线电压差的影响,消除线电压差的畸变,因滤波环节的存在,采得的位置信号 T_a, T_b, T_c 滞后于精确运行的换相信号,需要进行滤波补偿,续流干扰补偿方法的系统框图如图 5 所示。抵消续流干扰信号后的线电压差信号,经过滤波环节,得到的过零点和理想反电动势的过零点的关系是滞后的,需要进行补偿,其滞后角度与滤波器参数有关,这个滞后角度为

$$\theta(\omega) = \arctan(\omega R_1 C_1) \quad (10)$$

当电机转速为 n ,电机的极对数为 p ,式(10)中角速度 ω 的表达式为

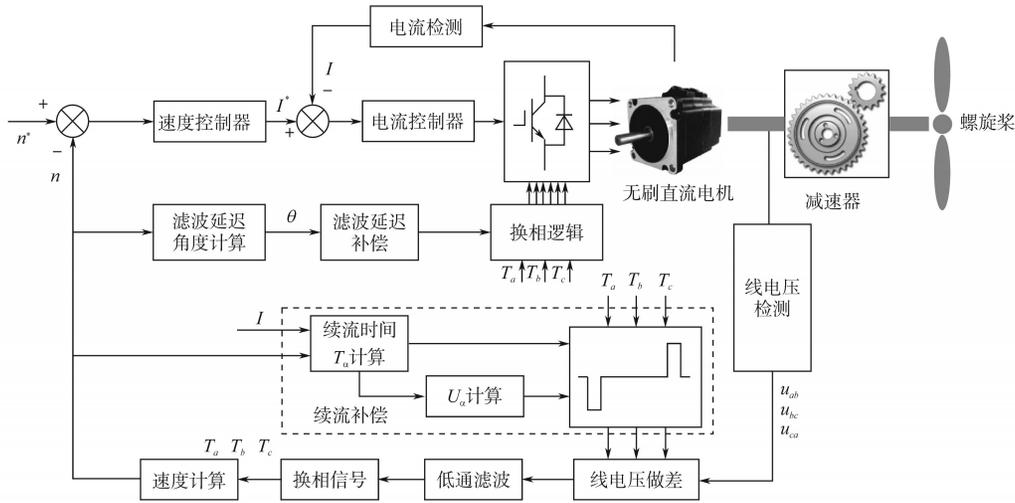


图5 续流干扰补偿方法的系统框图

Fig.5 System block diagram of the freewheeling interference compensation method

$$\omega = \frac{2\pi \cdot np}{60} \quad (11)$$

根据式(10)、式(11)计算滤波产生的滞后,并将其补偿,实现无刷直流电机的精确换相。

3 仿真及实验结果与分析

为了验证本文所提出的续流干扰补偿方法的有效性,在Matlab/Simulink环境下搭建系统仿真模型。仿真中电机参数为:额定功率 $P=3.7$ kW,额定转速 $n=1500$ r/min,极对数 $p=4$,等效电感 $L=0.75$ mH,额定电压 $U=300$ V,反电动势系数 $K_c=0.062$ V/(rad·s⁻¹)。

本文采用传统的三段式启动,由控制程序给定任意两相定子绕组通电一段时间,定子磁场将转子拖到指定的位置,按照开关表给绕组依次通电,待电机转速升高到一定值后,切换到线电压差法无位置传感器控制下运行。

仿真中给电机加 24 N·m额定负载,在额定转速 1500 r/min下运行,采样线电压信号,对其作差,对线电压差信号进行滤波,滤波后的线电压差信号的过零点滞后 30° 作为无刷直流电机无位置传感器控制系统的换相信号,但是因为滤波器的存在,以及续流干扰信号的存在,得到的换相信号具有一定误差。利用换相信号选择续流干扰补偿信号的触发位置,用关断相电流以及转速计算续流干扰补偿信号的大小与持续时间,将这个信号和采样得到的线电压差信号相叠加,实现对线电压差信号的补偿,滤波后得到的信号如图6所示。由图6可见补偿后经滤波的线电压差信号与滤波后的理想反电动势信号具有相同的

过零点,只要再将由滤波产生滞后角度补偿,就可以得到精确的换相信号。

采用直流发电机进行无刷直流电机的加载实验。无刷直流电机的参数与仿真电机参数相同,无刷直流电机输入直流电压 300 V,转速为 1200 r/min,负载为额定负载。分别在补偿前和补偿后进行闭环测试。在实验平台上对所提出

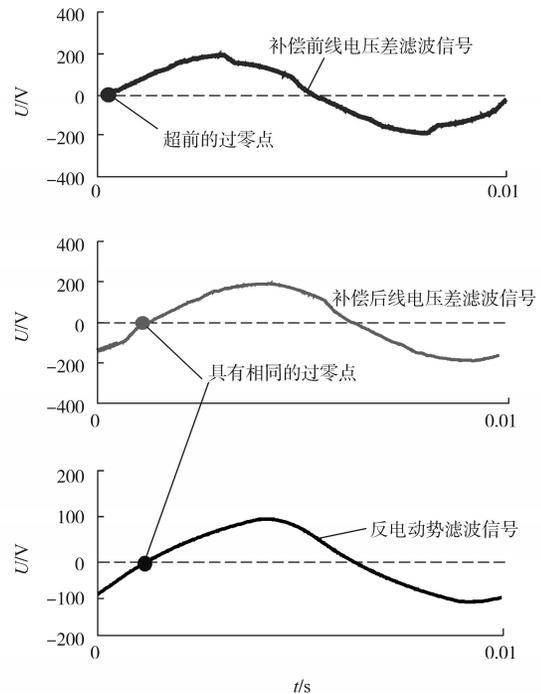


图6 补偿前经滤波的线电压差信号、补偿后经滤波的线电压差信号,滤波后的理想反电动势信号

Fig.6 The filtered line voltage difference signal before compensation, the filtered line voltage difference signal after compensation, and the filtered ideal back electromotive force signal

的换相误差检测和校正进行验证。控制器选用的是TI公司的TMS320F28335,开关器件选用三菱公司的IPM,型号为PM50RL1A060。利用DL750示波器进行检测。采样的线电压信号如图7所示,在额定负载下,线电压信号的采样会受到续流的影响。

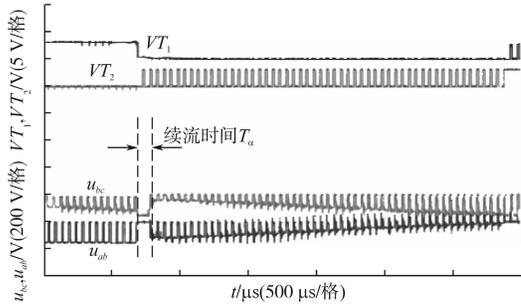


图7 导通周期内的线电压信号

Fig.7 Line voltage signal during the conducting period

在额定转速下,不添加补偿策略时,检测不同负载时采样的线电压差信号形成的超前角度 γ 的关系,随着负载增大,超前角度越大,负载与超前角度的关系如图8所示。

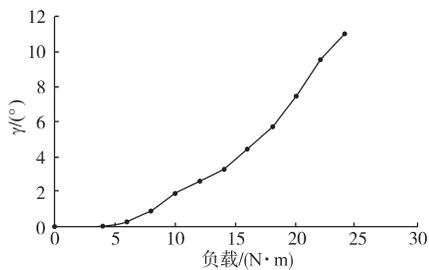


图8 负载与超前角度的关系

Fig.8 The relationship between load and lead angle

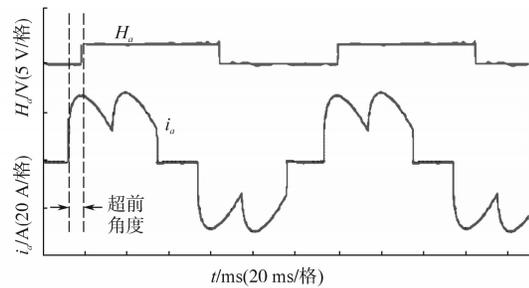
本文所用的调制方式为ON-PWM,续流补偿前后A相电流波形和霍尔信号对比如图9所示。

图9a为补偿前的A相相电流波形与霍尔信号的对比。从图9a中,可以看出,由于续流影响线电压差,补偿前的相电流波形正如文中分析的一样,产生了超前的现象,线下测算的超前角度为 11.84° 。

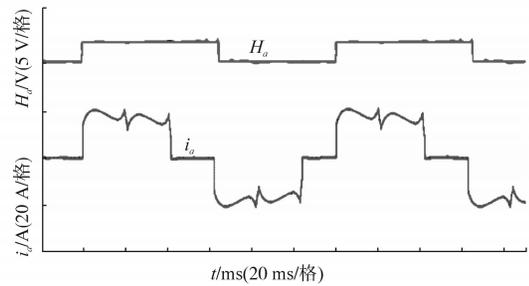
图9b为续流补偿后相电流波形与霍尔信号的对比。从图9b中可以看出,在实验中加入续流补偿方法后,电机根据补偿后的位置信号换相,换相位置与霍尔信号对比,电机的换相位置与霍尔信号相同,实现了电机的精确换相,达到了补偿效果。

通过仿真和实验的结果可以得出,在负载下的线电压差信号经过补偿后,更加接近电机的最

佳换相位置,采用补偿方法后,电流更加平稳,增加了系统的稳定性,拓宽了无位置传感器方法的应用范围。



(a)续流补偿前相电流波形与霍尔信号对比



(b)续流补偿后相电流波形与霍尔信号对比

图9 续流补偿前后A相电流波形和霍尔信号

Fig.9 A-phase current waveform and Hall signal before and after freewheeling compensation

4 结论

本文分析了电力推进系统中无位置传感器无刷直流电机负载状态下电流续流对线电压差产生的影响,将线电压差分解为续流干扰信号和反电动势信号,并得到以下结论:

1) 电机带载运行时,因续流影响使线电压差发生畸变,线电压差法所获取到的反电动势过零点会超前于电机真实反电动势的过零点,导致电机超前换相。

2) 建立了续流干扰信号与关断相电流和转速的数学模型,通过表达式和位置信号提取出续流干扰信号。

3) 基于对线电压差法无位置传感器无刷直流电机续流影响的激励分析,提出一种新型校正方法,将采样得到线电压差中的续流干扰信号抵消,可以解决反电动势过零点相位超前的问题,仿真证明了补偿方法的有效性。

参考文献

- [1] 李志伟,马岭,崔维成.小型载人潜水器的发展现状和展望[J].中国造船,2012,53(3):244-254.

- [2] 韩俊青. 小型船舶直流无刷推进器控制系统[J]. 舰船科学技术. 2015, 37(3): 151-156.
- [3] 王森,戴剑锋,周双喜. 全电力推进船舶电力系统的数字仿真[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 62-68.
- [4] Cui Chenjun, Liu Gang, Wang Kun, *et al.* Sensorless Drive for High-speed Brushless DC Motor Based on the Virtual Neutral Voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3275-3285.
- [5] Lai Y S, Lin Y K. A Unified Approach to Zero-crossing Point Detection of Back EMF for Brushless DC Motor Drives Without Current and Hall Sensors [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2011, 26(6): 1704-1703.
- [6] Scaglione O, Markovic M, Perriard Y. First-pulse Technique for Brushless DC Motor Standstill Position Detection Based on Iron B-H Hysteresis [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2012, 59(8): 2319-2328.
- [7] Gu C, Wang X, Shi X, *et al.* A PLL Based Novel Commutation Correction Strategy for High-speed Brushless DC Motor Sensorless Drive System [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3752-3762.
- [8] Shao J, Nolan D, Hopkins T. A Novel Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC Motor Drives [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002: 33-38.
- [9] 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 Trans. on Energy Conversion, 2010, 25(3): 661-668.
- [10] Kang Wang, Robert D Lorenz, Noor Aamir Baloch. Improvement of Back-EMF Self-sensing for Induction Machines When Using Deadbeat-direct Torque and Flux Control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 579-582.
- [11] Lee An-Chen, Fan Chia-Juei, Chen Guan-Hong. Current Integral Method for Fine Commutation Tuning of Sensorless Brushless DC Motor [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2017, 32(5): 9249-9266.
- [12] Yao Xuliang, Lin Hao. Line Voltage Difference Integral Method of Commutation Error Adjustment for Sensorless Brushless DC Motor [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2018: 841-845.
- [13] Chen Shaohua, Zhou Xiangyu. Adaptive Commutation Error Compensation Strategy Based on a Flux Linkage Function for Sensorless Brushless DC Motor Drives in a Wide Speed Range [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2018, 33(5): 3752-3765.
- [14] 杨明,刘杰,徐殿国. 重载条件下无刷直流电机无位置传感器驱动换相续流影响的分析及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 106-112.

收稿日期:2018-08-18

修改稿日期:2018-10-17