

文章编号:1671-8879(2016)01-0105-07

无刷直流电机基于线间反电动势的转子位置估计

张新荣¹, 张理伟², 刘红平³, 曾春艳¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 重庆齿轮箱有限责任公司, 重庆 402263; 3. 中船重工海声科技有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要:为了准确、高效地估计无位置传感器无刷直流电机的转子位置,在分析无刷直流电机线间反电动势过零检测原理和 PWM_ON_PWM 调制方式的基础上,提出了一种利用简化的线间反电动势的倒数来构造 F 函数的无刷直流电机转子位置检测新方法。通过理论分析和对无刷直流电机线间反电动势与转子位置对应关系的分析,得出了线间反电动势过零点对应于电机实际换相时刻的结论;根据 PWM_ON_PWM 调制方式的不导通相不产生续流的特点,采用 PWM_ON_PWM 调制方式对 F 函数进行实时简化计算,利用简化的 F 函数对无刷直流电机的转子位置进行估计;最后利用 MATLAB/SIMULINK 软件对采用该方法的无刷直流电机的控制系统进行了仿真。研究表明:提出的改进型线间反电动势过零检测方法计算简单,能有效地对转子位置及换相时刻进行估计;与其他线间反电动势法相比,无需相位延迟的补偿,无需测量定子绕组电感和定子绕组间互感,只需检测两路电流信号和电压信号就可实现对电机转子位置的实时估计,具有一定的应用价值。

关键词:机械工程;无刷直流电机;转子位置;估计;线间反电动势;PWM_ON_PWM 调制

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A

Rotor position estimation based on line-to-line back-EMF for brushless DC motors

ZHANG Xin-rong¹, ZHANG Li-wei², LIU Hong-ping³, ZENG Chun-yan¹

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CN Gpower Gearbox Co. Ltd., Chongqing 402263, China; 3. CSIC Haisheng Techonology Co. Ltd., Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: In order to determine the rotor position of brushless DC Motors accurately and effectively, a novel method using reciprocal of simplified line-to-line back-EMF to constructing F functions was proposed for detecting the rotor position of brushless DC motors based on characteristics of the principle of line-to-line back-EMF zero crossing detection method and PWM_ON_PWM modulation method. Through theoretical analysis of relationship between line-to-line back EMF and rotor position of brushless DC motor, it was proved that the zero-crossing point of line-to-line back-EMF was corresponding to the instant of actual commutation. According to the fact that there is no diode freewheeling of the inactive phase under PWM_ON_PWM modulation,

收稿日期:2015-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51105043);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011TD016);教育部留学回国人员科研启动基金项目(201011174)

作者简介:张新荣(1968-),男,陕西三原人,教授,工学博士,E-mail:zxr-68@126.com。

the F function was simplified and real-time calculated by use of PWM-ON-PMN modulation, and the rotor positions of brushless DC motor were estimated by use of simplified F function. Finally the control system of brushless DC motor by use of the rotor position estimation method was simulated by MATLAB/SIMULINK. The results show that the rotor position commutation signal can be detected effectively and simply using the proposed methods. This method does not need to measure the stator inductance or mutual inductance between the stators, only needs to measure the currents and voltages of two phases. In addition, the phase delay compensation is unnecessary. The method has practical engineering value. 1 tab, 6 figs, 18 refs.

Key words: mechanical engineering; brushless DC motor; rotor position; estimation; line-to-line back-EMF; PWM_ON_PWM modulation

0 引言

无刷直流电机 (brushless DC motor) 具有结构简单、噪声低、效率高和调速性能好等优点, 广泛应用于家用电器、伺服控制、航天航空、机器人等领域^[1]。传统无刷直流电机依靠安装在电机内部的位置传感器检测其转子位置, 但位置传感器的安装会增大电机系统的体积, 使其可靠性差, 不适合高温高压、强腐蚀性环境等^[2], 限制了它在一些特殊场合中的应用, 因此无位置传感器的转子位置检测方法研究是无刷直流电机的重要研究方向。

对于无位置传感器式的无刷直流电机, 其转子的位置可以通过检测和计算无刷直流电机运行过程中的电流、电压等物理量和在线检测电机参数, 间接地获得转子位置信号, 目前使用的方法主要有反电动势法^[3-5]、三次谐波法^[6]、状态观测器法^[7-8]以及人工智能^[9-10]等方法, 其中反电动势法控制算法简单, 软硬件容易实现, 可靠性高, 应用很广泛。

反电动势法是将检测获得的反电动势过零点信号延迟 30° 电角度得到电机的实际换相时刻。该方法实际中经常利用硬件电路来间接获得不导通相反电动势, 并通过滤波电路进行滤波, 从而导致相移。反电动势的计算会在移相过程中引入误差, 使得换相位置检测不准确, 严重时会导致控制失败, 且不适合低速场合。

线间反电动势过零检测法是通过无刷直流电机的三相反电动势的计算公式构造线间反电动势^[11-16], 利用线间反电动势过零点来获得转子位置信号的新方法。它采用线间反电动势来检测无刷直流电机的转子位置, 不存在延迟角的计算, 不需要相移, 适用转速范围广, 原理简单, 容易实现。文献^[11]、^[12]通过对无刷直流电机结构参数和运行特性进行分析, 忽略定子电感和定子间互感, 对线间反电动势的计算公式进行了简化。该方法采用 RC 滤

波器对电机线电压、相电流进行滤波, 然后通过相移进行相位补偿。根据 RC 滤波器带来的相位滞后可以设计一个阈值, 当线反电动势达到此阈值时为电机的实际换相时刻, 但该阈值与速度有关, 不能保证在全速范围内相位滞后值基本不变, 且不能保证滤波器在全速范围内有较好的滤波效果。文献^[13]根据 PWM_ON_PWM 调制方式的特点, 对线间反电动势进行了简化, 采用滤波器进行滤波, 根据相位滞后设计阈值进行换相, 该方法能在很宽的速度范围内对转子位置进行估计, 但该方法也不能保证在全速范围内具有较好的滤波效果。文献^[14]根据无刷直流电机 ON_PWM 调制方式的特点, 得出换相前换相相的电流为恒定值, 不导通相的电流为 0 的结论, 对线间反电动势的计算公式进行了简化, 实现了无位置传感器无刷直流电机的转子位置检测, 该方法能够在较宽的转速范围内对转子位置进行估计, 但只适合特殊的 PWM 调制。为了提高线间反电动势检测法的精度和适用范围, 文献^[15]、^[16]利用线间反电动势的倒数构造 F 函数来估计无刷直流电机的转子位置。该方法不需要相位延迟和补偿, 也不需要构造电机中性点, 在全速范围内可以对转子的位置进行准确估计, 但很难精确测量电机的电感和定子间互感, 且随着工作状态发生变化, 计算 F 函数有一定难度。

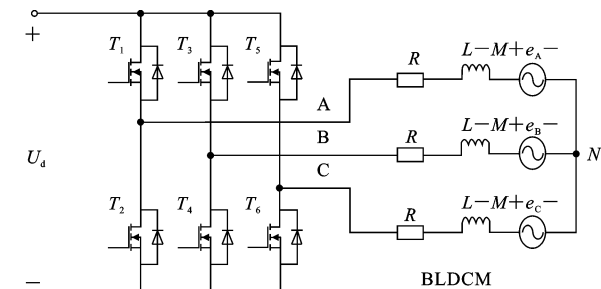
为此, 本文在对线间反电动势法检测原理进行深入分析的基础上, 采用 PWM_ON_PWM (开关管在 120° 导通期间, 前 30° 和后 30° 采用 PWM 调制, 中间保持恒通) 调制方式构造 F 函数, 并通过对 F 函数实时简化来检测转子位置, 最后通过仿真试验进行了验证。

1 改进的线间反电动势过零检测原理

1.1 无刷直流电机的数学模型

三相六状态无刷直流电机采用两两导通控制方

式,定子绕组呈 Y 型连接,电机中性点不引出,图 1 所示为其等效电路。



注: U_d 为母线电压; T_1, T_2, \dots, T_6 为 6 个功率管; e 为反电动势; A、B、C 为电机三相; R 、 L 、 M 分别为绕组电阻、电感和互感; N 为中性点; e_A 、 e_B 、 e_C 分别为电机三相反电动势

图 1 三相无刷直流电机主电路等效电路

Fig. 1 Three phase brushless DC motor equivalent circuit of main circuit

假设三相无刷直流电机定子绕组电感和定子绕组间互感是不随时间变化的常量,假设不计齿槽效应,并忽略电枢反应,则三相绕组的端电压方程可表示为^[17]

$$\begin{cases} u_A = Ri_A + (L - M) \frac{di_A}{dt} + e_A + u_N \\ u_B = Ri_B + (L - M) \frac{di_B}{dt} + e_B + u_N \\ u_C = Ri_C + (L - M) \frac{di_C}{dt} + e_C + u_N \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 分别为电机三相定子绕组的端电压; i_A 、 i_B 、 i_C 分别为电机三相定子绕组相电流; u_N 为中性点电压; t 为时间。

1.2 线间反电动势过零检测原理

若采用反电动势过零检测法检测无刷直流电机的转子位置,反电动势的计算会使估算的换相位置信号产生一定的误差,使得无刷直流电机的转子位置估计信号不准确,因此考虑用任意两相反电动势的差值来构造线间反电动势,估算无刷直流电机的转子位置信号。

根据式(1),可得线间反电动势方程为

$$\begin{cases} e_{AB} = u_{AB} - R(i_A - i_B) - (L - M) \frac{d(i_A - i_B)}{dt} \\ e_{BC} = u_{BC} - R(i_B - i_C) - (L - M) \frac{d(i_B - i_C)}{dt} \\ e_{CA} = u_{CA} - R(i_C - i_A) - (L - M) \frac{d(i_C - i_A)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)可知,线间反电动势可根据电机运行过程中的线电压 u 、相电流 i 和电机的定子电阻 R 、定子绕组等效电感 L 来实时计算。

理想情况下,无刷直流电机的反电动势波形为

平顶宽度 120° 的梯形波,但由于受电机设计、漏磁等因素的影响,梯形波平顶宽度小于 120° 。

假设反电动势的平顶宽度为 $180^\circ - 2\theta$,其中 θ 为电滞角。由于梯形波平顶宽度小于等于 120° 且对称,可知 $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 。以 A 相为例,反电动势波形如图 2 所示,图中 k_e 为反电动势常数, ω 为电角速度。

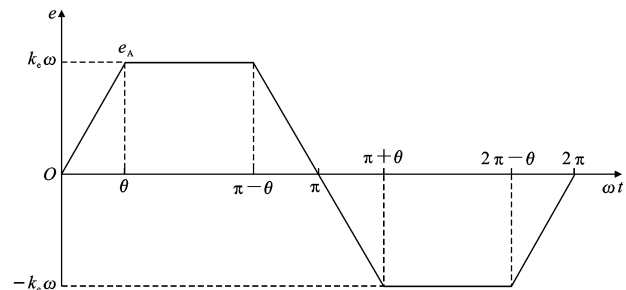


图 2 非理想的梯形波反电动势波形

Fig. 2 Non-ideal trapezoidal back EMF waveform

根据无刷直流电机反电动势过零检测原理可知,对于反电动势波形为理想梯形波的无刷直流电机,通过检测不导通相反电动势过零点并延迟 30° 可得无刷直流电机的实际换相时刻。

由图 2 可知,A 相反电动势的过零点时刻为 0° 和 180° ,延迟 30° 即无刷直流电机对应的 2 个实际换相时刻为 30° 、 210° ;同理由 B 相得到电机的实际换相时刻为 150° 、 330° ;由 C 相得到电机的实际换相时刻为 90° 、 270° 。故根据反电动势法得到无刷直流电机的实际换相时刻为 30° 、 90° 、 150° 、 210° 、 270° 和 330° 。下面采用解析法分析无刷直流电机线间反电动势的过零点时刻。

对于具有任意平顶宽度梯形波反电动势的无刷直流电机,根据图 2 可知,无刷直流电机 A 相反电动势的数学表达式为

$$e_A(\theta) = \begin{cases} \frac{k_e \omega^2 t}{\theta} & 0 \leq \omega t < \theta \\ k_e \omega & \theta \leq \omega t < \pi - \theta \\ -\frac{k_e \omega^2 t}{\theta} + \frac{k_e \omega \pi}{\theta} & \pi - \theta \leq \omega t < \pi + \theta \\ -k_e \omega & \pi + \theta \leq \omega t < 2\pi - \theta \\ \frac{k_e \omega^2 t}{\theta} - \frac{2k_e \omega \pi}{\theta} & 2\pi - \theta \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

对于三相无刷直流电机,B 相反电动势和 C 相反电动势的波形在相位上与 A 相相差 120° 和 -120° ,故可得 B 相和 C 相反电动势的数学表达式为

$$e_B(\theta) = e_A(\theta + \frac{2\pi}{3}) \tag{4}$$

$$e_C(\theta) = e_A(\theta - \frac{2\pi}{3}) \tag{5}$$

令 $m = k_e \omega$, 将 e_A 和 e_B 相减可得线间反电动势 e_{AB} 的表达式为

$$e_{AB} = \begin{cases} m\omega t + k_e\omega & 0 \leq \omega t < \theta \\ 2k_e\omega & \theta \leq \omega t < 2\pi/3 - \theta \\ -m\omega t + 2\pi m/3 + k_e\omega & 2\pi/3 - \theta \leq \omega t < \pi - \theta \\ -2m\omega t + 5\pi m/3 & \pi - \theta \leq \omega t < 2\pi/3 + \theta \\ -m\omega t + 2\pi m/3 - k_e\omega & 2\pi/3 + \theta \leq \omega t < \pi + \theta \\ -2k_e\omega & \pi + \theta \leq \omega t < 5\pi/3 - \theta \\ m\omega t - 5\pi m/3 - k_e\omega & 5\pi/3 - \theta \leq \omega t < 2\pi - \theta \\ 2m\omega t - 11\pi m/3 & 2\pi - \theta \leq \omega t < 5\pi/3 + \theta \\ m\omega t - 2\pi m + k_e\omega & 5\pi/3 + \theta \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \tag{6}$$

令 $e_{AB} = 0$, 可得无刷直流电机线间反电动势 e_{AB} 的 2 个过零点时刻为 150° 、 330° ; 同理可知 e_{BC} 的 2 个过零点时刻为 90° 、 270° ; e_{CA} 的 2 个过零点时刻为 30° 、 210° 。则无刷直流电机三相线间反电动势的过零点时刻为 30° 、 90° 、 150° 、 210° 、 270° 和 330° 。

综上所述, 对于具有任意平顶宽度梯形波形状反电动势的无刷直流电机, 线间反电动势的过零点时刻就是电机的实际换相时刻。

1.3 改进的线间反电动势过零检测原理

为了便于计算和更准确地利用线间反电动势获得无刷直流电机的转子位置信号, 通过线间反电动势方程式(2), 构造 F 函数来检测无刷直流电机的转子位置信号, 定义 F 函数为

$$\left. \begin{aligned} F_{AB} &= \frac{1}{e_{AB}} \\ F_{BC} &= \frac{1}{e_{BC}} \\ F_{CA} &= \frac{1}{e_{CA}} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

显然, F 函数对应于梯形波平顶部分的值为常量, 其值比较小。在梯形波的斜坡部分按双曲线规律变化, 在梯形波的零点处即换相点处发生突变, 其值为无穷大, 于是利用 F 函数可以精确地估算无刷直流电机的转子位置。此时, 实际换相时刻与 F 函数的关系可用表 1 表示, 其中“正”表示“正无穷大”, “负”表示“负无穷大”。当对应的 F 函数值发生突变, 即 F 函数值由正(负)无穷大突变到负(正)无穷大, 对应的换相相进行换相。

表 1 六状态与 F 函数极性的关系

Tab. 1 Relationship between the six states and the polarity of F function

状态	导通桥臂	换相相	F 函数	F 函数极性
状态 1	VT1、VT4	B→C	F_{BC}	负→正
状态 2	VT1、VT6	A→B	F_{AB}	正→负
状态 3	VT3、VT6	C→A	F_{CA}	负→正
状态 4	VT2、VT3	B→C	F_{BC}	正→负
状态 5	VT2、VT5	A→B	F_{AB}	负→正
状态 6	VT4、VT5	C→A	F_{CA}	正→负

计算无刷直流电机线间反电动势时需要测量电机的定子电阻 R 和有效电感 L , 但 L 易随电机运行状态而发生变化, 同时也很难测量, 若采用式(2)计算线间反电动势过零点比较困难, 因此对 F 函数的计算公式进行简化。

对于 PWM_ON_PWM 调制方式, 定义 S_X 为无刷直流电机绕组端电压的电平矢量, $S_X = 1$ 表示上桥开关管或上桥二极管导通, $S_X = 0$ 表示下桥开关管或下桥二极管导通^[17], 则三相无刷直流电机的端电压方程式(1)为

$$u_X S_X = R i_X + L \frac{di_X}{dt} + e_X + u_N \tag{8}$$

式中: 下标 X 分别为 A、B、C。

假设 A 相为非换相相, B 相为换相相, C 相为不导通相, 即如下页图 3 所示的区间 $[60^\circ, 90^\circ]$ 和 $[240^\circ, 270^\circ]$ 。图中, E 为电动势, I 为母线电流。考虑区间 $[60^\circ, 90^\circ]$ 的情形, 则 A 相与 B 相的电流、反电动势大小相等, 方向相反, 则由式(8)可得

$$u_N = \frac{1}{2} U_d (S_A + S_B) \tag{9}$$

此时, 若忽略无刷直流电机各桥臂的二极管导通压降, 在考虑电机的 C 相绕组时, 当其端电压高于直流母线电压或低于 0 时, 对应桥臂的续流二极管导通, 从而电机的 C 相绕组会产生续流。

无刷直流电机的反电动势满足^[18]

$$|e| < \frac{1}{2} U_d \tag{10}$$

不导通相 C 相的端电压为

$$u_C = e_C + u_N \tag{11}$$

根据上述假设可知

$$-\frac{1}{2} U_d < e_C < 0 \tag{12}$$

当且仅当 $S_A = S_B = 0$ 时, $U_C < 0$, 则 C 相的下桥臂二极管导通, 产生续流。满足条件 $S_A = S_B = 0$ 的调制方式为上桥臂 PWM 调制, 下桥臂恒通。而 PWM_ON_PWM 调制方式在区间 $[60^\circ, 90^\circ]$ 上为下

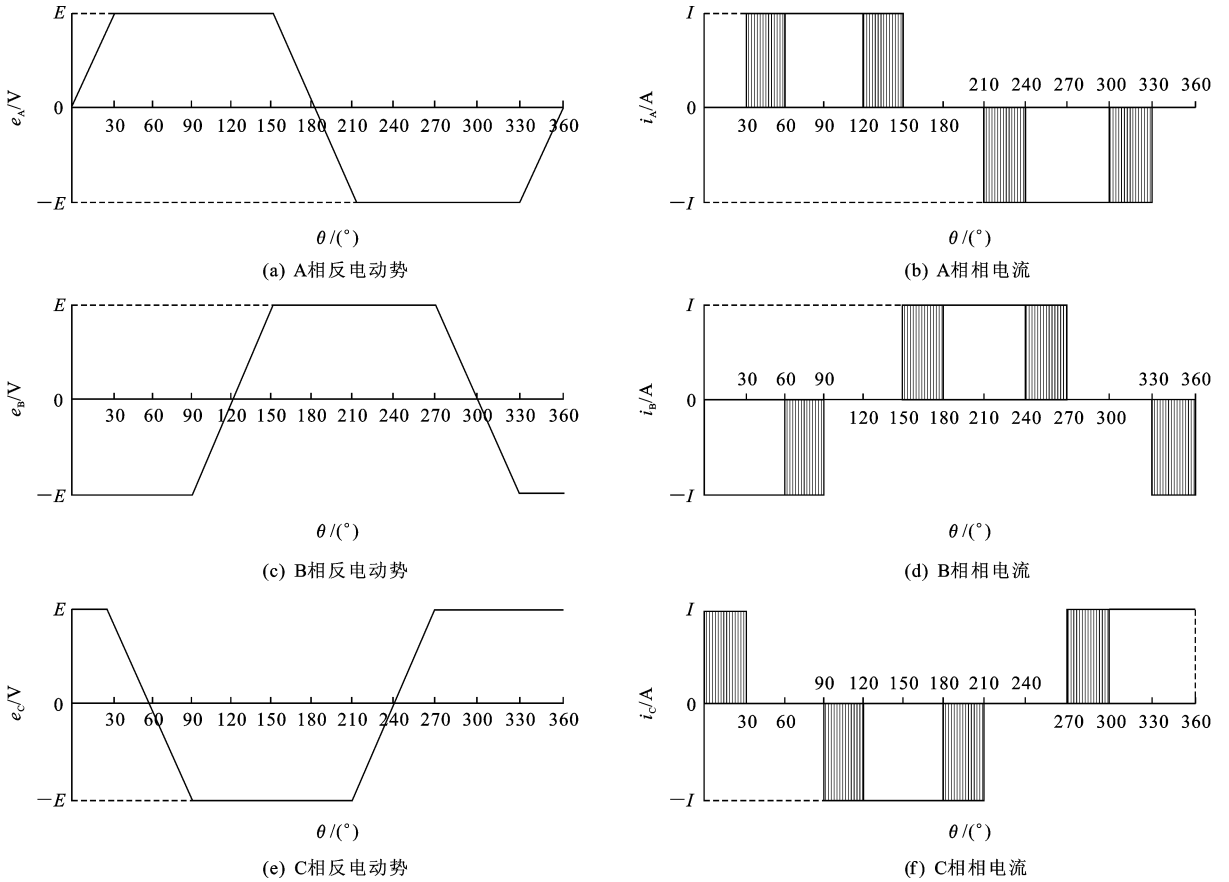


图 3 无刷直流电机的 PWM_ON_PWM 调制方式

Fig. 3 PWM_ON_PWM modulation of brushless DC motor

桥臂 PWM, 上桥臂恒通, 故在该调制方式下不导通相不发生续流。同理, 该调制方式在区间 $[240^\circ, 270^\circ]$ 上不导通相不发生续流。

综上所述, 采用 PWM_ON_PWM 调制方式的不导通相不发生续流。故可知 B 相电流 i_B 在换相前为恒定值, i_C 相电流恒为 0, 则化简后的 F_{BC} 为

$$F_{BC} = \frac{1}{u_{BC} - Ri_B} \quad (13)$$

同理, 可得 F_{AB} 和 F_{CA} 为

$$F_{AB} = \frac{1}{u_{AB} - Ri_A} \quad (14)$$

$$F_{CA} = \frac{1}{u_{CA} - Ri_C} \quad (15)$$

且三相线电流和线间反电动势的关系为

$$u_{CA} = -(u_{AB} + u_{BC}) \quad (16)$$

$$i_C = -(i_A + i_B) \quad (17)$$

可得基于 F 函数的线间反电动势为

$$\begin{cases} F_{AB} = \frac{1}{u_{AB} - Ri_A} \\ F_{BC} = \frac{1}{u_{BC} - Ri_B} \\ F_{CA} = \frac{1}{-(u_{AB} + u_{BC}) + R(i_A + i_B)} \end{cases} \quad (18)$$

根据上述分析可知, 改进的线间反电动势只需要检测两路线电压 u_{AB} 、 u_{BC} , 相电阻 R 和相电流 i_A 、 i_B , 就可通过计算得到各个换相点, 不需要测量电感 L 和互感 M 。根据 F 函数与线间反电动势的关系可知, 简化后的 F 函数与电机运行状态之间的关系与表 1 所示的关系一样。

2 仿真试验及结果分析

根据以上推导可知, 采用改进的 F 函数能够有效地对无刷直流电机的转子位置信号进行估计, 为验证该方法的有效性, 通过 MATLAB/SIMULINK 建立无刷直流电机控制系统的仿真模型。无刷直流电机控制系统参数在仿真中取: 定子绕组电阻 $R = 2.875 \Omega$, 定子绕组电感 $L - M = 8.5 \text{ mH}$, 电机的极对数为 4, 采用 PWM_ON_PWM 调制方式。

若采用简化的 F 函数估计无刷直流电机的转子位置, F 函数在换相点处趋向于无穷大而无法测量, 为了实现无刷直流电机准确换相, 可将计算得到的 F 函数值与预先设定的阈值进行比较, 如果达到这个阈值将产生相应的换相信号并开始换相。阈值的选取可根据超前导通角进行调节; 若不进行超前

换相, 阈值的大小可根据无刷直流电机的转速进行调节。转速较大时, 阈值比较小; 转速较小时, 阈值可取大一点。阈值选取过小或过大都可能丢失换相信息, 因此可根据具体要求通过试验确定。

图 4(a) 为给定转速 $n=1\,000\text{ r/min}$ 时, 采用改进的线间反电动势计算的 F 函数并进行限幅后的仿真波形, 限幅的阈值设定为 5 和 -5, 图 4(b) 为由 F 函数得到的换相脉冲信号 S_{ab} , 图 4(c) 为无刷直流电机的实际霍尔信号 h_b , 由两者比较可以看出, 估算的换相脉冲信号与实际霍尔信号基本一致, 也就是说采用改进的 F 函数可以较好地估算转子的位置。

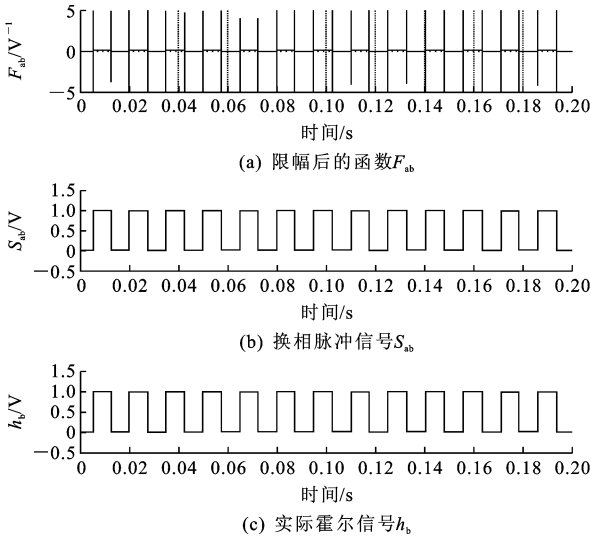


图 4 转速 1 000 r/min 下的仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform under the speed of 1 000 r/min

在电机转速发生突变时, 为了验证此时换相的准确性, 给定初始转速为 $1\,500\text{ r/min}$, 0.1 s 后突变为 $1\,000\text{ r/min}$ 。图 5 为采用改进的 F 函数控制无位置传感器无刷直流电机限幅后的 F 函数 F_{ab} 、换相脉冲信号 S_{ab} 、实际霍尔信号 h_b 。图 6 为转速仿真波形。由图 5 可知, 采用改进的 F 函数能有效估算无刷直流电机转子位置, 并且在给定转速发生突变时也能准确估算转子位置。

3 结 语

(1) 在对无刷直流电机线间反电动势过零检测原理和 PWM_ON_PWM 调制原理进行分析的基础上, 提出一种基于改进的 F 函数来估算无刷直流电机转子位置的新方法, 对该方法进行了理论分析, 并用 MATLAB/SIMULINK 软件对无位置传感器无刷直流电机控制系统进行了仿真。

(2) 该方法能够实时对转子位置进行估算, 与其他的线间反电动势法相比, 无需相位延迟的补偿, 无

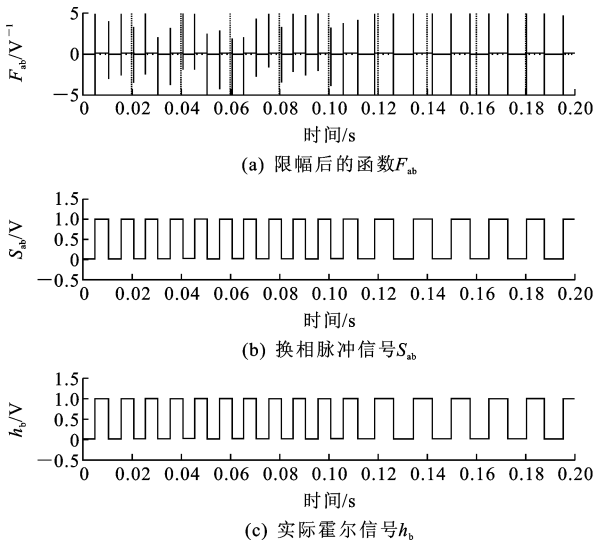


图 5 转速 1 500 r/min 突减为 1 000 r/min 的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform under speed of 1 000 r/min from 1 500 r/min

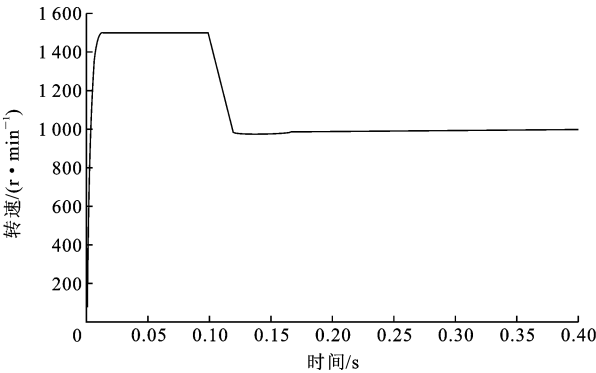


图 6 转速 1 500 r/min 突减为 1 000 r/min 时的速度仿真波形

Fig. 6 Speed simulation waveform under 1 000r/min from 1 500r/min

需测量定子绕组电感和定子绕组间互感, 只需检测两路电流信号和电压信号就可实现对电机转子位置的实时估计, 具有一定的应用价值。

(3) 无刷直流电机转子位置的估计方法很多, 本文研究的方法在实际应用中具有简便性, 今后还需要通过工程实践对其进行适当的优化。

参考文献:

References:

[1] 吴红星, 叶宇骄, 倪天, 等. 无刷直流电机转子位置检测技术综述[J]. 微电机, 2011, 44(8): 75-81.
WU Hong-xing, YE Yu-jiao, NI Tian, et al. Summary of detecting rotor position technique for brushless DC motor[J]. Micromotors, 2011, 44(8): 75-81. (in Chinese)
[2] 邹继斌, 江善林, 张洪亮. 一种新型的无位置传感器无刷直流电机转子位置检测方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 48-53.

- ZOU Ji-bin, JIANG Shan-lin, ZHANG Hong-liang. A novel method of detecting for rotor position of a sensorless brushless DC motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 48-53. (in Chinese)
- [3] 林明耀, 周谷庆, 刘文勇. 基于直接反电动势法的无刷直流电机精确换相新方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 89-94.
- LIN Ming-yao, ZHOU Gu-qing, LIU Wen-yong. New accurate commutation method based on direct back-EMF method for brushless DC motor[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(1): 89-94. (in Chinese)
- [4] 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.
- [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 Transactions on Power Electronics, 2011, 26(6): 1704-1713.
- [6] 曹 宽, 万彦辉, 王京锋, 等. 一种改进三次谐波法的无刷直流电动机无位置传感器控制[J]. 微特电机, 2013, 41(3): 40-43.
- CAO Kuan, WAN Yan-hui, WANG Jing-feng, et al. Sensorless control of BLDCM based on the third harmonic component[J]. Small & Special Electrical Machines, 2013, 41(3): 40-43. (in Chinese)
- [7] 郭鸿浩, 周 波, 左广杰, 等. 无刷直流电机反电势自适应滑模观测[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 142-149.
- GUO Hong-hao, ZHOU Bo, ZOU Guang-jie, et al. Adaptive sliding-mode observer for back electromotive force estimation of brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 142-149. (in Chinese)
- [8] LIN Q H, YANG X Y, ZHAO S W. A novel position detection method of sensorless brushless DC motor based on sliding mode observer[C]//IEEE. Proceedings of the 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications. Hong Kong: IEEE, 2011: 1-5.
- [9] 王 雷, 蒋静坪. 无刷直流电机自适应补偿最优状态反馈速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 101-107.
- WANG Lei, JIANG Jing-ping. Brushless direct-current motor optimal state feedback drive control with adaptive compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 101-107. (in Chinese)
- [10] 兰宝华, 刘建成. 一种无刷直流电机转子位置检测方法的研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(12): 97-99.
- LAN Bao-hua, LIU Jian-cheng. A new position detection method for brushless DC motors[J]. Computer Engineering & Science, 2009, 31(12): 97-99. (in Chinese)
- [11] 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 Zhi-qiang, XIA Chang-liang, CHEN Wei. A position sensorless control strategy for BLDCM based on line back EMF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 38-44. (in Chinese)
- [12] 李志强. 无刷直流电机无位置传感器控制及四开关逆变器控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- LI Zhi-qiang. Sensorless control and four-switch inverter control strategy of brushless DC motor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [13] 马 莹. 无位置传感器永磁无刷直流电机控制系统的设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- MA Ying. Design of sensorless control system for permanent magnet brushless DC motor[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] 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(12): 96-100.
- LI Zi-cheng, CHENG Shan-mei, QIN Yi. Novel rotor position detection method of line back EMF for BLDCM[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(12): 96-100. (in Chinese)
- [15] 李自成, 程善美, 蔡 凯. 基于线间反电动势的无刷直流电机转子位置估算[J]. 电气传动, 2008, 38(11): 17-20.
- LI Zi-cheng, CHENG Shan-mei, CAI Kai. Estimation of rotor position of BLDC motor based on line-to-line back-EMF[J]. Electric Drive, 2008, 38(11): 17-20. (in Chinese)
- [16] LI Z C, CHENG S M, QIN Y, et al. A novel line-to-line back EMF calculation for sensorless brushless DC motor drives[C]//IEEE. Proceeding of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan: IEEE, 2008: 1406-1411.
- [17] ZHANG X Z, WANG Y N. A novel position-sensorless control method for brushless DC motors[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(3): 1669-1676.
- [18] 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 kun, HU Chang-sheng, ZHANG Zhong-chao. 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. (in Chinese)