

基于直接反电动势法的无刷直流电机准确换相新方法

林明耀 周谷庆 刘文勇

(东南大学伺服控制技术教育部工程研究中心, 南京 210096)

(东南大学电气工程学院, 南京 210096)

摘要: 分析了上桥臂 PWM 调制、下桥臂恒通调制方式时的端电压波形, 讨论相应的反电动势过零点检测方法. 在 PWM 调制信号开通状态结束时刻对端电压进行采样, 由软件算法确定反电动势过零点. 针对电机运行时存在超前换相或滞后换相的情况, 通过设置合理的延迟时间来实现最佳换相. 针对实际电机存在反电动势过零点分布不均匀的情况, 根据过零点间隔时间存在着周期性规律, 提出一种新的延迟时间设置方法, 使换相点位于相邻过零点的中间位置, 实现了电机的准确换相. 实验验证了所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 反电动势法; 端电压; 过零点检测; 换相; 无刷直流电机

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2010)01-0089-06

New accurate commutation method based on direct back-EMF method for brushless DC motor

Lin Mingyao Zhou Guqing Liu Wenyong

(Engineering Research Center for Motion Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The sensorless control drive for brushless direct current machine (BLDCM) is investigated based on direct back electromotive force (back-EMF) detection method. The terminal voltage waveform is analyzed for the H₁ PWM-L₁ on type of modulation, and the zero-crossing point detection methods are discussed. The terminal voltage is sampled at the end of pulse width modulation (PWM) on-state and the zero-crossing point is extracted from the proposed algorithm. The effects of the leading and the lagging commutation on the operation performance are analyzed, and the condition of the optimal commutation is presented. Because the zero-crossing points distribute asymmetrically in the BLDCM, a new setting method of delay time is suggested and the more accurate commutations are achieved. The experiment results have verified the feasibility and validity of the proposed method.

Key words: back electromotive force method; terminal voltage; zero crossing point detection; commutation; brushless direct current machine

无刷直流电机 (BLDCM) 具有结构简单、运行效率高和调速性能好等优点, 在工业和商业领域得到广泛应用. 近年来, 无刷直流电机的无位置传感器控制一直是国内外的研究热点, 较为常见的转子位置信号检测方法有反电动势法、定子电感法、续流二极管法、磁链估计法和状态观测器法等^[1-2], 其中反电动势法最为有效实用. 文献 [3] 在低速和高

速时, 分别在 PWM 关断和开通阶段检测反电动势, 采用 2 个不同的参考电压获得反电动势过零点, 而不需位置传感器和电流传感器, 但增加了硬件电路的复杂性. 文献 [4] 通过比较悬空相绕组端电压和逆变器直流环中点电压的关系, 获得反电动势过零点. 该方法无需重构电机中性点, 不使用滤波电路, 但需采用硬件电路比较得到过零点. 文献

收稿日期: 2009-05-27. **作者简介:** 林明耀 (1959-), 男, 博士, 教授, mylin@seu.edu.cn.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 ((BK2008306)).

引文格式: 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准确换相新方法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 89-94. [doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2010.01.017]

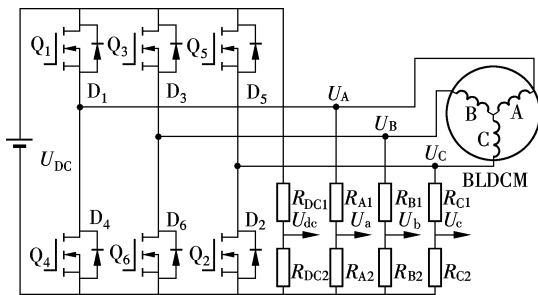
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

[5]提出了在 on_pwm 调制方式时的反电动势过零点检测方法,采用内置 AD 的微控制器在 PWM 开通时检测悬空相端电压,软件算法中使用简单的代数运算,获得准确的过零点信号.目前,关于反电动势法的研究多集中在反电动势过零点的检测电路方法和由滤波电路引起的相位误差的消除或补偿方法,但在准确换相方面的研究尚不够深入.

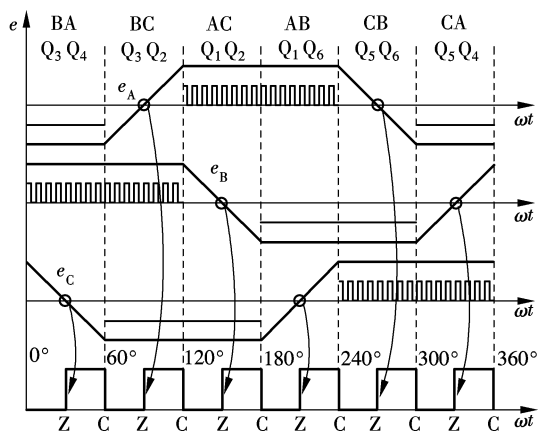
1 直接反电动势法原理

无刷直流电机一般采用“两相导通三相六状态”运行方式,每个工作状态只有两相绕组导通,第三相绕组处于悬空状态,被用来检测反电动势过零点.在检测到反电动势过零点后,根据换相点滞后过零点 30°电角度,设置对应的延迟时间.当延迟时间到达后,电机换相进入下一个工作状态.

本文采用基于端电压的直接反电动势检测电路,通过检测悬空相绕组的端电压信号来获得反电动势过零点.采用分压电阻对端电压和直流侧电压进行同比例分压,使分压后的被测信号落在采样单元允许的输入范围内.图 1(a)为主电路和直接反电动势法分压电路,端电压 U_A , U_B , U_C 和 U_{DC} 经过分压后分别为 U_a , U_b , U_c 和 U_{dc} .



(a) 主电路结构图



(b) 反电动势波形和过零点检测波形

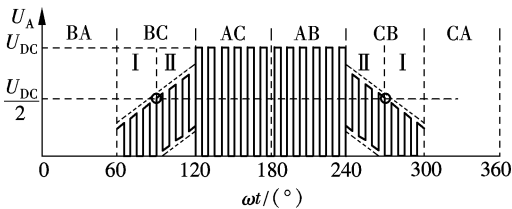
图 1 无刷直流电机控制系统

理想的反电动势波形为正负交变的梯形波,且以电机中心点为参考点.图 1(b)中, e_a , e_b , e_c 分别

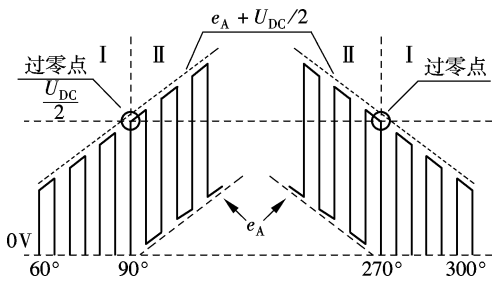
表示三相反电动势.电机在一个周期内共有 6 个工作状态,每隔 60°电角度工作状态改变一次,每个功率开关导通 120°电角度.工作状态可以由导通的两相绕组和 2 个功率开关表示,如图 1(b)所示, BA 表示电流从 B 相绕组流入,从 A 相绕组流出; Q_3Q_4 表示 B 相上桥臂和 A 相下桥臂的 2 个功率开关导通.过零点检测波形表示反电动势过零点和换相点,其中, Z 为反电动势过零点, C 为换相点.反电动势过零点和换相点均匀分布,彼此间隔 30°电角度.

2 反电动势过零点检测方法

无刷直流电机控制可以采用多种 PWM 调制方式^[1].采用的调制方式不同,呈现的端电压波形也不同.本文采用上桥臂 PWM 调制,下桥臂恒通 (H_pwm-L_on) 的调制方式.以 A 相为例,假设 PWM 占空比为 50%,忽略高频开关噪声和换相续流产生的脉冲毛刺,理想的端电压波形如图 2(a)所示.在一个周期范围内,将 A 相端电压波形划分为 BA, BC, AC, AB, CB 和 CA 六个区域,每个区域对应一个工作状态.端电压波形的上升部分和下降部分分别为 BC 区和 CB 区,此时 A 相处于悬空状态.



(a) A 相一个周期的端电压波形



(b) A 相悬空阶段的端电压波形

图 2 PWM 调制时的端电压波形

BA 和 CA 区为 A 相下桥臂开关导通阶段, Q_4 处于恒通状态, A 相绕组与直流侧电压的负极相连,端电压被钳制到直流侧电压的负极电位.由于直流侧电压的负极为端电压的参考点,此时端电压为零.

AC 和 AB 区为 A 相上桥臂开关 PWM 调制阶段.以 AC 区为例,在 PWM 开通期间, Q_1 和 Q_2 导通, A 相绕组与直流侧电压的正极相连,端电压为

U_{DC} ;在 PWM 关闭期间, Q_1 关闭, Q_2 导通, 由于绕组阻抗呈感性, A 相下桥臂的反并联二极管 D_4 导通续流, 此时 A 相绕组与直流侧电压的负极相连, 端电压为零。

BC 和 CB 区为 A 相悬空阶段, 将 2 个区域各自分为 I 和 II 两个时段, 如图 2(b)所示。以 BC 区为例, 此时电流从 B 相绕组流进, C 相绕组流出, 如图 3 所示。图中, R_s 和 L_s 分别表示定子绕组的等效电阻和电感, U_N 为电机中心点电压, i 为相电流。忽略功率开关和二极管的正向导通压降, 根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_N = U_B - \left\{ R_s + L_s \frac{d}{d} \right\} - e_B \tag{1}$$
$$U_N = U_C - \left\{ R_s + L_s \frac{d}{d} \right\} - e_C \tag{2}$$

由式 (1)和 (2)得到中心点电压为

$$U_N = \frac{U_B + U_C}{2} - \frac{e_B + e_C}{2} \tag{3}$$

B, C 两相绕组的反电动势有如下关系:

$$e_B + e_C = 0 \tag{4}$$

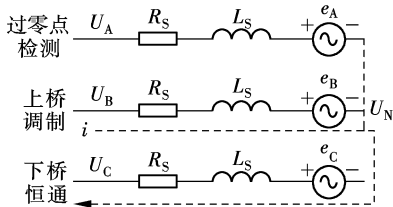


图 3 A 相悬空、BC 相导通时电机等效电路图

PWM 调制开通期间, Q_3 和 Q_2 导通, 此时 $U_B = U_{DC}$, $U_C = 0$, 有 $U_N = U_{DC}/2$, 则过零点检测方程^[6]为

$$U_A = e_A + U_{DC}/2 \tag{5}$$

此时端电压波形呈现为反电动势 e_A 与 $U_{DC}/2$ 叠加, 端电压的包络线如图 2(b)所示。

在 PWM 调制关闭期间, Q_3 关闭, Q_2 和 D_6 导通续流, 此时 $U_B = U_C = 0$, 有 $U_N = 0$, 则过零点检测方程为

$$U_A = e_A \tag{6}$$

1) 在 I 时段, A 相反电动势 e_A 为负, 直流侧电压的负极和 U_N 等电位, 此时 D_4 受正向偏压而导通^[7], 如图 4(a)所示, A 相绕组与直流侧电压的负极相连, 端电压为零。

2) 在 II 时段, A 相反电动势 e_A 为正, D_4 处于关闭状态, 端电压波形呈现为反电动势 e_A , 端电压的包络线如图 2(b)所示。

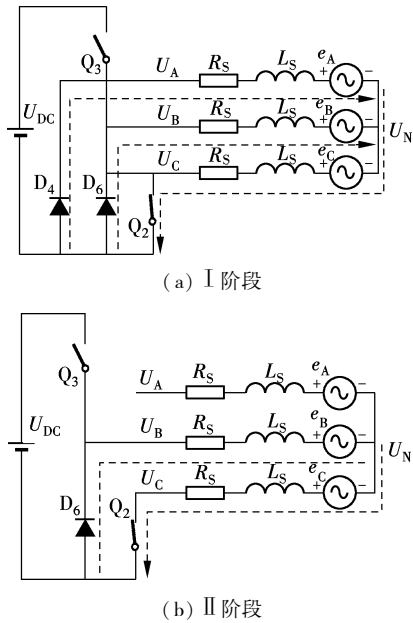


图 4 PWM 调制关闭期间的续流示意图

本文在 PWM 调制开通状态结束时刻对悬空相的端电压进行采样。由于硬件电路存在延时效应, 采样时功率开关尚未关断, 相当于在 PWM 调制开通期间采样, 此时被采样的电压信号受开关噪声影响较小。根据式 (5), 当检测到 A 相端电压值为直流电压值的一半时, A 相反电动势过零, U_A 和 $U_{DC}/2$ 的比较就相当于 e_A 和 0 的比较。

反电动势过零点检测方法简单准确, 使用软件算法判断反电势过零点。硬件电路只要选择阻值和功率都合适的电阻用于分压, 不需要重构电机中心点, 也不需要低通滤波器, 信号没有相位延时, 也不采用比较器来检测过零点。硬件电路结构简单, 适合低成本应用。

3 延迟时间设置方法

最佳换相逻辑是指绕组在梯形波反电势的平顶部分导通^[8], 与之对应的最佳换相位置是指在换相完成后, 定子磁势超前转子磁势 120° 电角度, 如图 5 所示。其中, F_a 和 F_r 分别表示定子磁势和转子磁势。在一个工作状态内定子磁势平均超前转子磁势 90° 电角度, 平均电磁转矩最大。

若在换相时刻转子已经转过最佳换相位置, 则表现为滞后换相, 换相点在时间轴上相对最佳换相位置右移, 端电压波形不对称, 右侧的部分波形被湮没, 过零点到换相点的延迟时间 t_{dc} 偏大, 如图 6 所示。滞后换相时, 转子超过最佳换相位置的角度应小于 30° 电角度, 若换相严重滞后, 下次过零点

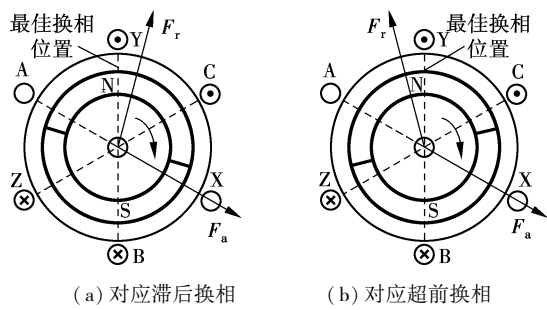


图 5 换相位置示意图

将被湮没而检测不到,引起电机失步.反之,若转子还没有到达最佳换相位置就换相,则为超前换相,换相点在时间轴上相对最佳换相位置左移,端电压的部分左侧波形被湮没,过零点到换相点的延迟时间 t_{zc} 偏小.滞后换相和超前换相都会引起电机电磁转矩波动,转子运转不平稳.实测的端电压波形(通道 1)如图 7 所示,通道 2 为过零点检测波形,上升沿与下降沿分别对应过零点与换相点.

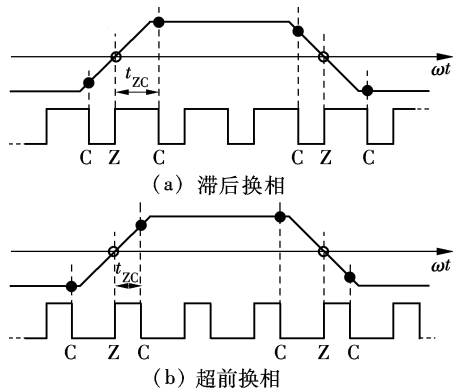


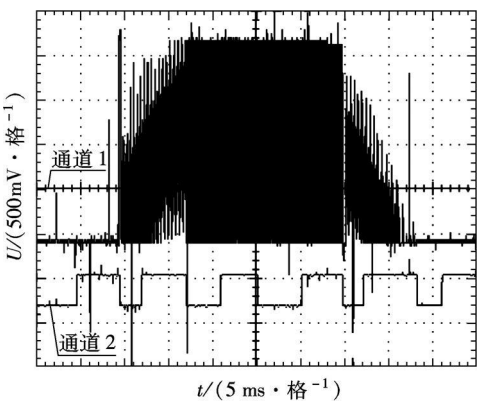
图 6 滞后换相与超前换相的示意图

根据过零点超前换相点 30° 电角度的原理,在检测到过零点后,设置延迟时间 t_{zc} 确定换相点.理想运行状态下,过零点与换相点等间隔分布,彼此相差 30° 电角度.因此,可根据过零点的间隔时间来设置延迟时间,传统的延迟时间设置方法^[9-10]是将延迟时间设置为上次过零点到本次过零点时间的一半,如图 8 所示.图中, $Z(k)$, $C(k)$ 分别表示第 k 次过零点和第 k 次换相点,当检测到第 k 次过零点时,延迟时间如下设置:

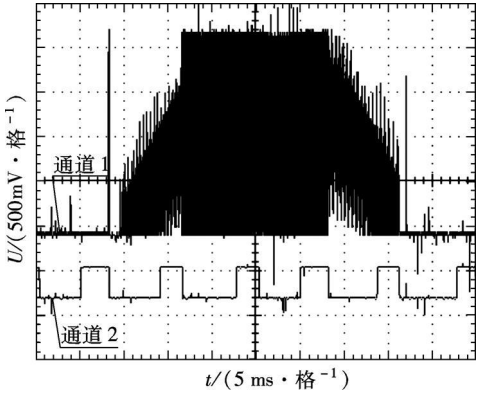
$$t_{zc}(k) = \frac{T_{zz}(k-1)}{2} \tag{7}$$

式中, $T_{zz}(k-1)$ 为第 $k-1$ 次过零点到第 k 次过零点的时间; $t_{zc}(k)$ 为第 k 次过零点到第 k 次换相点的延迟时间.

将设置好的延迟时间载入寄存器,计数器开始



(a) 滞后换相的端电压波形



(b) 超前换相的端电压波形

图 7 2 种换相不准确情况对应的端电压波形

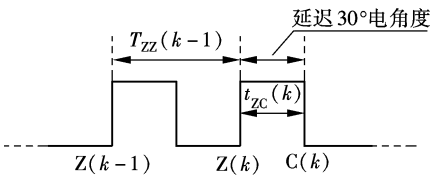


图 8 传统的延迟时间设置方法

计时.到达预设的延迟时间后,电机换相进入下一个工作状态,定子磁势步进一次.换相点位于相邻过零点的中间位置,电机在最佳换相位置换相,平均电磁转矩最大,端电压波形呈对称状态.当反电动势过零点分布均匀时,传统的延迟时间设置方法能较好地实现无刷直流电机的无位置传感器控制.

4 新的延迟时间设置方法

反电动势法重在检测反电动势波形上升和下降部分的 2 个过零点,波形平顶部分对过零点检测方法影响不大.由于电机制造工艺等方面的影响,实际的无刷直流电机存在三相绕组并不完全对称的情况,导致三相反电动势之间存在差异,相邻过零点的间隔时间不完全相等,过零点分布并不均匀.

假设 A 相反电动势存在相位偏移, 波形上升和下降部分上的过零点滞后出现, 导致过零点在时间轴上分布不均匀. 如图 9 所示, 虚线表示理想反电动势, 实线表示存在相位偏移的实际反电动势, 过零点的间隔时间 $T_{zz}(1)$, $T_{zz}(2)$ 和 $T_{zz}(3)$ 不相等. 每相反电动势波形上升和下降部分的 2 个过零点相差 180° 电角度, 过零点间隔时间存在着周期性规律, 如 $T_{zz}(1)=T_{zz}(4)$, $T_{zz}(2)=T_{zz}(5)$ 和 $T_{zz}(3)=T_{zz}(6)$.

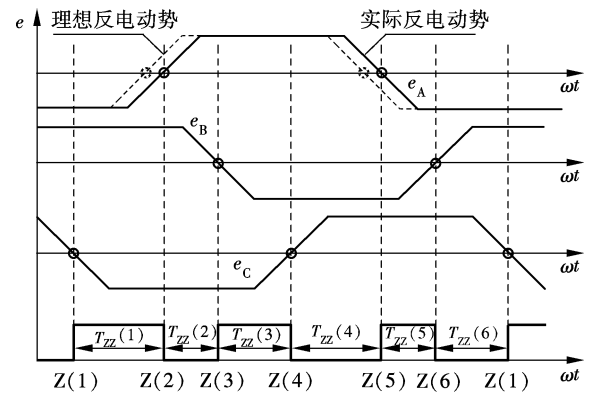


图 9 A 相反电动势存在偏移时的三相反电动势波形

采用传统的延迟时间设置方法, 某些换相点偏离理想换相点较大. 当某次换相严重滞后时, 下次过零点容易被湮没, 导致电机失步, 如图 10 所示.

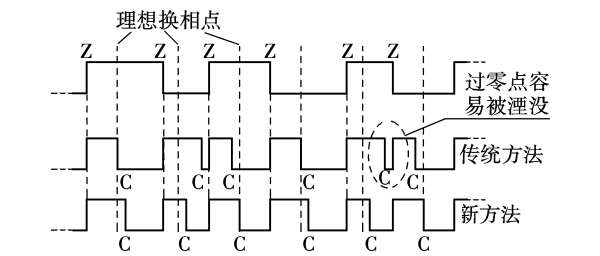


图 10 2 种延迟时间设置方法的比较

为使换相点位于相邻 2 个过零点的中间位置, 本文提出一种新的延迟时间设置方法. 如图 11 所示, 过零点的间隔时间 $T_{zz}(k-3)$ 和 $T_{zz}(k)$ 相等, 当检测到第 k 次过零点时, 从第 k 次过零点到第 k 次换相点的延迟时间 $t_{zc}(k)$ 如下设置:

$$t_{zc}(k)=\frac{T_{zz}(k-3)}{2}$$

(8)

式中, $T_{zz}(k-3)$ 为第 $k-3$ 次过零点到第 $k-2$ 次过零点的时间.

当三相反电动势波形的间隔时间长度不是理想的 120° 电角度, 过零点间隔时间不相等时, 采用

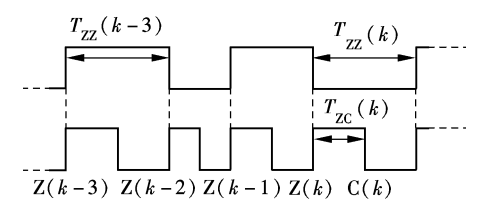
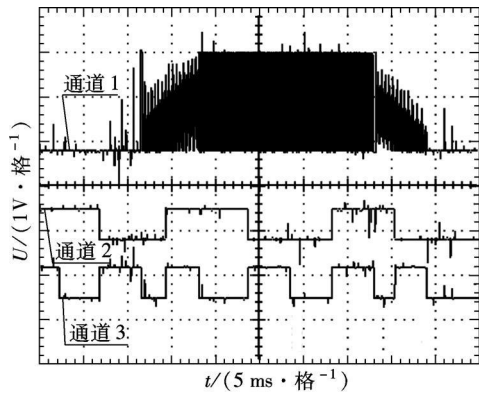


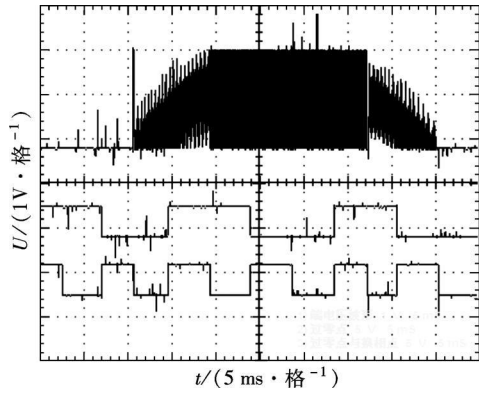
图 11 新的延迟时间设置方法

新的延迟时间设置方法可以使换相更为准确, 换相点落在前后 2 个过零点的中间位置, 过零点不容易被湮没, 电机运行不易失步, 如图 10 所示. 特别是在电机高速运行时, 新方法提高了电机运行的可靠性, 实验很好地验证了新方法的可行性和有效性.

2 种延迟时间设置方法对应的实测端电压波形 (通道 1) 如图 12 所示, 通道 2 和通道 3 为过零点检测波形, 通道 2 的上升沿和下降沿对应于过零点, 而通道 3 的上升沿和下降沿分别对应过零点和换相点.



(a) 传统延迟时间设置方法



(b) 新延迟时间设置方法

图 12 2 种延迟时间对应的端电压波形

图 13 为实测的三相端电压波形 (通道 1~通道 3), 通道 4 的上升沿和下降沿分别对应过零点和换相点.

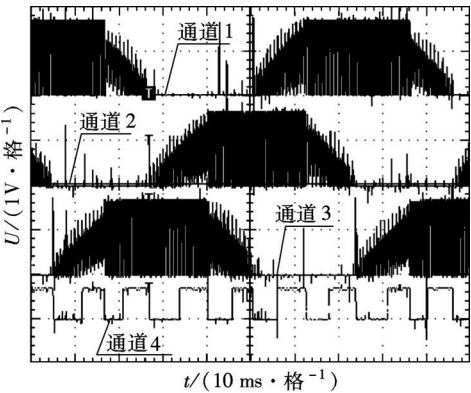


图 13 实测的三相端电压波形

5 结论

- 1) 反电动势法通过检测端电压获得反电动势过零点, 设置延迟时间得到换相点. 本文采用软件算法获得过零点和换相点, 简化了硬件电路, 适用于低成本应用.
- 2) 超前换相或滞后换相都会导致电机运行不平稳, 端电压两侧波形不对称, 通过设置合理的延迟时间, 可使电机在最佳换相位置换相.
- 3) 当反电动势过零点分布均匀时, 可采用传统的延迟时间设置方法, 即将延迟时间设置为上次过零点到本次过零点时间的一半.
- 4) 当实际电机的反电动势过零点分布不均匀, 可使第 k 次过零点到第 k 次换相点的延迟时间等于第 $k-3$ 次过零点到第 $k-2$ 次过零点时间的一半, 这一新的延迟时间设置方法, 使换相点位于相邻 2 个过零点的中间位置, 实现了电机的准确换相. 实验很好地验证了该新方法的可行性和有效性.

参考文献 (References)

[1] 宋海龙, 杨明, 范宇, 等. 无刷直流电动机的无位置传感器控制 [J]. 电机与控制学报, 2002, 6(3): 208-212
Song Hailong Yang Ming Fan Yu et al Review of sensorless control of brushless DC motor[J]. Electric Machines and Control 2002, 6(3): 208-212 (in Chinese).

[2] 周艳青, 尹华杰, 叶长青. 无位置传感器无刷直流电机位置检测技术 [J]. 电机与控制应用, 2007, 34(7): 1-5
Zhou Yanqing Yin Huajie Ye Changqing Position detection for position sensorless brushless DC motor

[J]. Electric Machines & Control Application 2007, 34(7): 1-5. (in Chinese)

[3] Shao Jianwen An improved microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor driver for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2006, 42(5): 1216-1221.

[4] 张磊, 瞿文龙, 陆海峰, 等. 一种新颖的无刷直流电机无位置传感器控制系统 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(10): 26-30.
Zhang Lei Qu Wenlong Lu Haifeng et al A novel sensorless control system of brushless DC motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2006, 21(10): 26-30. (in Chinese)

[5] Kang Yongjin Lee Sang Bin Yoo Jiyeon A microcontroller embedded AD converter based low cost sensorless technique for brushless DC motor drives [C] // IEEE Industry Applications Conference Hong Kong China 2005: 2176-2181.

[6] Lai Yen-Shin Lin Yong-Kai Novel back-EMF detection technique of brushless DC motor drives for wide range control without using current and position sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2008, 23(2): 934-940.

[7] 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 Changshen Zhang Zhongchao 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)

[8] 林明耀, 王永, 李海文, 等. 反电势法无位置传感器无刷直流电机最佳换相逻辑分析 [J]. 电机与控制应用, 2003, 30(5): 14-16.
Lin Mingyao Wang Yong Li Haiwen et al Analysis of best commutation logic in control of brushless DC motor based on back-EMF method [J]. Electric Machines & Control Application 2003, 30(5): 14-16. (in Chinese)

[9] Kim Dae-Kyong Lee Kwang-Woon Kwon Byung-il Commutation torque ripple reduction in a position sensorless brushless DC motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2006, 21(6): 1762-1768.

[10] Zhou Genfu Wu Zhigan Ying Jianping Improved sensorless brushless DC motor drive [C] // Power Electronics Specialists Conference Recife Brazil 2005: 1353-1357.