

无刷直流伺服电机换向最优控制¹⁾

许镇琳 吴忠 王秀芝 江伟

(天津大学自动化系 天津 300072)

摘 要

为改善无刷直流伺服电机的换向转矩性能,本文利用逆变器电压控制矢量优化调制的思想,提出了基于非换向相电流的恒频采样 PWM 控制的最优换向方案,该方案能有效地抑制换向转矩脉动,缩短换向时间. 实验结果表明,上述方案是可行的.

关键词: 电压控制矢量,最优换向方案,换向转矩脉动.

1 引言

无刷直流机 (BLDCM) 交流伺服系统,由于惯量小、输出转矩大、控制简单、动态响应良好等优点,发展迅速,具有广阔的应用前景,在高性能、高精度的伺服驱动领域,将逐步取代传统的直流伺服系统.

但是,无刷直流机依然存在转矩脉动,无法实现更精确的位置控制和更高性能的速度控制,相电流换向是引起转矩脉动的主要原因之一. 对于换向转矩脉动,文献[1]曾作过理论和仿真分析,但就如何克服却没作深入的探讨;文献[2]虽提出中性点电压补偿控制的思想,但仅限于仿真分析,且实现较困难;文献[3,4]曾利用重叠换向法来抑制此种脉动,但控制效果亦不理想.

因此,为改善无刷直流机的换向转矩性能,抑制各速度段的换向转矩脉动,本文利用逆变器电压控制矢量优化调制的思想,提出了基于交流侧电流反馈的最优换向方案,并给出了实验结果.

2 换向转矩脉动简介

2.1 无刷直流机模型

无刷直流机由永磁同步电动机 (PMSM)、转子位置检测器和电流控制的电压型逆变器组成,如图1所示. 其理想的相反电势波形应是具有 120° (电角度)平台的梯形波,并由 120° 方波电流(相电流)供电,可以写出其电压平衡方程式

1) 国家自然科学基金资助课题.
本文于1994年7月7日收到

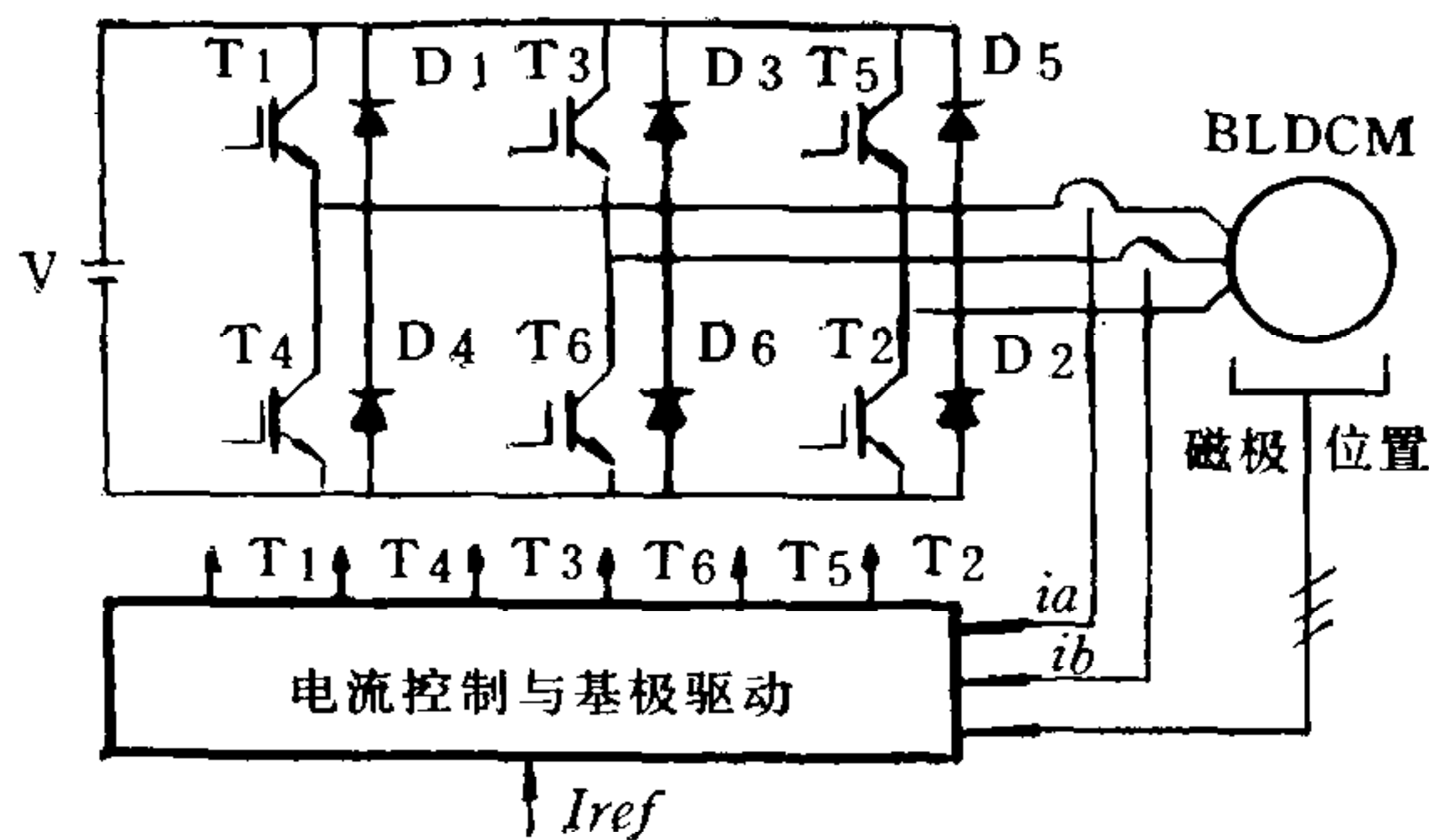


图1 BLDCM 主回路结构

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_n \\ V_n \\ V_n \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中 V_n 为电机中性点电压, R 为定子绕组电阻, L 为每相绕组自感, M 为两相绕组互感. 其电磁转矩为

$$T_e = \frac{1}{\omega} (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C). \quad (2)$$

其中 ω 为电机角速度.

2.2 换向转矩脉动

定理 1. 设无刷直流机具有理想的反电势, 则其电磁转矩的绝对值与非换向相电流绝对值成正比.

证明. 不妨设 i_C 为非换向相电流, $\therefore i_A + i_B + i_C = 0$, $\therefore i_A + i_B = -i_C$, 又由于非换向电流与其它两相电流异号, 则由式(2), 得: $|T_e| = \frac{1}{\omega} |E i_A + E i_B - E i_C|$, \therefore

$$|T_e| = \frac{2E}{\omega} |i_C|, \text{ 令 } K_e = \frac{2E}{\omega} \text{ 为反电势系数, 则 } |T_e| = K_e |i_C|, \text{ 则定理 1 得证.}$$

证毕.

推论 1. 在定理 1 的假设下, 换向转矩脉动与非换向相电流的脉动成正比.

由推论 1, 可知换向转矩脉动的抑制可归结到非换向电流的控制问题.

3 换向最优控制

在采用非换向相电流反馈控制的 BLDCM 交流伺服系统中, 低速换向转矩脉动可以得到控制, 但对高速的情况却无能为力, 非换向相电流是不可控的, 为此, 需寻求优化的换向方案, 以得到较好的换向转矩性能.

3.1 逆变器开关状态的表征

定义 1. 第 k 个换向过程的第 i 个开关状态 $Q_{k,i}$ 可以表示为: $Q_{k,i} = (S_A, S_B, S_C)$ 其中

$$S_j = \begin{cases} 1 & j \text{ 相上桥开关导通,} \\ 0 & j \text{ 相上、下桥开关皆关断,} \\ -1 & j \text{ 相下桥开关导通,} \end{cases}$$

$j = A, B, C; k = 1, 2, \dots, 6.$

3.2 换向过程有效开关状态的选取

换向过程中逆变器的有效开关状态应按下述规则选取:

规则 1. 遵循当前的转子位置,即关断应消失相对应的开关,开通应建立相对应的开关.

规则 2. 在规则 1 的前提下,可采用单、双极性控制.

规则 3. 允许应消失相对应的开关延时关断.

根据以上原则,以电流从 A 相上桥换向到 B 相上桥为例(电动状态),可得到此换向过

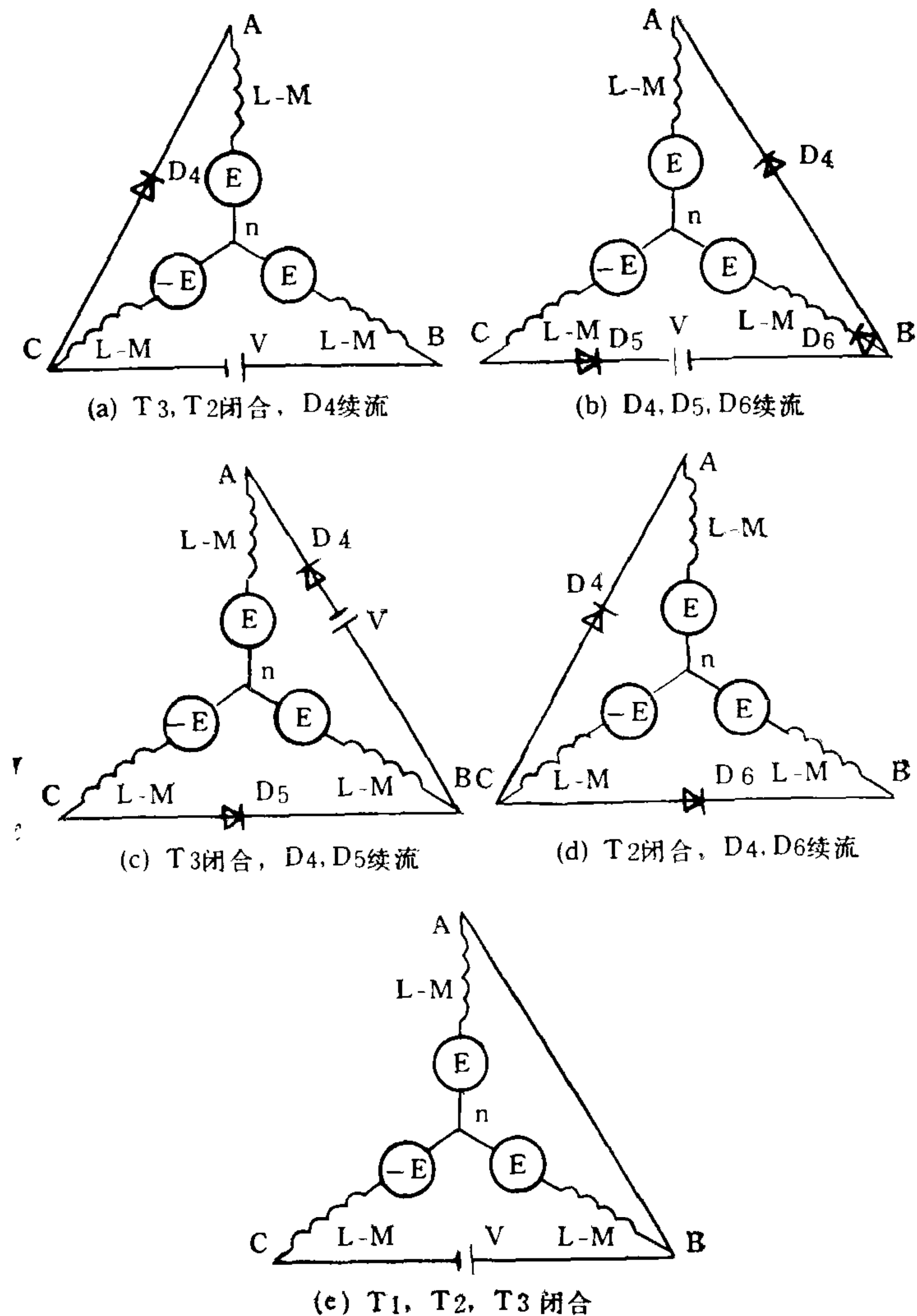


图 2 换向过程的几种开关状态示例

程的有效开关状态,如图 2 所示. 设换向期间反电势保持恒定,且忽略定子电阻的影响,设 $n^* = 2E/V$ 为转速的标称值, $K_I = V/(L - M)$ 为堵转时电流的变化率.

1) 方式 0. 如图 2(a) 所示, $Q_{k,0} = (0, 1, -1)$, 且存在 $i_A = -\frac{2}{3} K_I (1 + n^*)$, $i_B = \frac{2}{3} K_I (2 - n^*)$, $i_C = -\frac{2}{3} K_I (1 - 2n^*)$.

2) 方式 1. 如图 2(b) 所示, $Q_{k,1} = (0, 0, 0)$, 且存在 $i_A = -\frac{2}{3} K_I (1 + n^*)$, $i_B = -\frac{2}{3} K_I (1 + n^*)$, $i_C = \frac{4}{3} K_I (1 + n^*)$.

3) 方式 2. 如图 2(c) 所示, $Q_{k,2} = (0, 1, 0)$, 且存在 $i_A = -\frac{2}{3} K_I (2 + n^*)$, $i_B = \frac{2}{3} K_I (1 - n^*)$, $i_C = \frac{2}{3} K_I (1 + 2n^*)$.

4) 方式 3. 如图 2(d) 所示, $Q_{k,3} = (0, 0, -1)$, 且存在 $i_A = -\frac{2}{3} K_I \cdot n^*$, $i_B = -\frac{2}{3} K_I \cdot n^*$, $i_C = \frac{4}{3} K_I \cdot n^*$.

5) 方式 4. 如图 2(e) 所示, $Q_{k,4} = (1, 1, -1)$, 且存在 $i_A = \frac{2}{3} K_I (1 - n^*)$, $i_B = \frac{2}{3} K_I (1 - n^*)$, $i_C = -\frac{4}{3} K_I (1 - n^*)$.

3.3 电压控制矢量的定义

定义 2. 设三相绕组以逆序排列, 则电压控制量可用 Park 矢量来描述, 即称之为电压控制矢量, 即: $\vec{v}_p = u_A + \alpha u_B + \alpha^2 u_C$. 其中 $\alpha = e^{i2\pi/3}$, u_A, u_B, u_C 为每相绕组的端点电压.

类似定义 2 的形式, 可以得到 $\vec{i}_p = i_A + \alpha i_B + \alpha^2 i_C$, $\vec{i}_p = i_A + \alpha i_B + \alpha^2 i_C$, 其中 i_A, i_B, i_C 为每相绕组电流.

3.4 逆变器开关状态与电压控制矢量的关系

定理 2. 设 $D_{Q(k)}$ 为第 k 个换向过程逆变器有效开关状态 $Q_{k,i}$ 的非空集, 即 $D_{Q(k)} = \{Q_{k,i} | Q_{k,i} = (S_A, S_B, S_C), S_A, S_B, S_C \text{ 符合规则 } 1, 2, 3\}$, 设 $D_{\vec{v}_p(k)}$ 为第 k 个换向过程中电机绕组电压控制矢量 \vec{v}_p 的非空集, 即: $D_{\vec{v}_p(k)} = \{\vec{v}_p | \vec{v}_p = u_A + \alpha u_B + \alpha^2 u_C, \alpha = e^{i2\pi/3}, u_A, u_B, u_C \text{ 的选取遵循 } Q_{k,i}\}$, 则必存在映射 $f: D_{Q(k)} \rightarrow D_{\vec{v}_p(k)}$ 为一一映射.

证明. 由换向过程特性可归纳出, $u_j = [Q_{k,i}]_j \cdot V - [Q_{k-1,i}]_j \cdot \text{INT}(\cos([Q_{k,i}]_j)) \cdot V$, 其中 $[Q_{k,i}]_j$ 表示第 k 个换向过程中第 i 个状态下 j 桥臂的开关状态, $k = 1, 2, \dots, 6, j = A, B, C$, 且规定当 $k = 1$ 时, 令 $k - 1$ 为 6. 任给不同的 $Q_{k,i_1}, Q_{k,i_2} \in D_{Q(k)}$, 由上式可知, 对应不同的 (u_A, u_B, u_C) , 由于 $D_{Q(k)}$ 为根据规则 1, 2, 3 组成的有效开关状态的非空集, 则必对应不同的控制效果, 即电压控制矢量 \vec{v}_p 必不同, 因此, 存在映射 $f: D_{Q(k)} \rightarrow D_{\vec{v}_p(k)}$ 为一一映射.

3.5 开关状态对换向转矩脉动的影响机理

定理 3. 换向转矩脉动由电压控制矢量 \vec{v}_p 唯一确定, 且与逆变器的开关状态 $Q_{k,i}$ 相对应.

证明. 设 $\vec{e}_p = e_A + \alpha e_B + \alpha^2 e_C$, 其中 e_A, e_B, e_C 为三相反电势, 则由式(1)得 $\vec{v}_p = R\vec{i}_p + (L - M)\dot{\vec{i}}_p + \vec{e}_p$. 忽略定子电阻的影响, 则有 $\vec{v}_p = (L - M)\dot{\vec{i}}_p + \vec{e}_p$. 可写成

$\bar{i}_p = \frac{1}{L-M}(\bar{V}_p - \bar{e}_p)$, 又 $\bar{i}_p = \int_0^t i_p dt$, 则 $\bar{i}_p = \int_0^t \frac{1}{L-M}(\bar{V}_p - \bar{e}_p) dt$. 由推论 1, 知换向转矩脉动由电压控制矢量 \bar{V}_p 唯一确定, 由定理 2, 可知换向转矩脉动与逆变器的开关状态 $Q_{k,i}$ 相对应.

3.6 换向最优控制问题叙述

换向状态下开关控制策略的优劣是由以下两个指标来评价的: 1) 由换向引起的转矩脉动尽可能地小(非换向电流脉动尽可能小); 2) 尽量缩短换向时间. 由此可以定义性能指标函数

$$J = \int_0^{t_f} |\Delta i(t)| dt.$$

其中, t_f 为换向持续时间, $\Delta i(t)$ 为换向区间内非换向电流的调节偏差, 且以换向起始时刻为零时刻.

要寻求第 k 个换向过程的最优开关策略, 只需对数学规划

$$\min J = \int_0^{t_f} |\Delta i(t)| dt,$$

问题求解

$$s.t. \begin{cases} \Delta i(t) = |I_{ref}| - |i_{非换向}(t)|, \\ i_{非换向}(t) = Pr j_{非换向} \left[\frac{1}{L-M} \int_0^t (\bar{V}_p - \bar{e}_p) dt \right], \\ \bar{V}_p \in D\bar{V}_p(k), \\ t_f \leq t_{max}. \end{cases}$$

对此求解, 即可得电压控制矢量序列 $\bar{V}_p(1), \bar{V}_p(2), \dots, \bar{V}_p(m)$, 其对应的控制时间分为 t_1, \dots, t_m , (且存在 $\sum_{i=1}^m t_i = t_f$), 即为所求的最优开关策略.

3.7 恒频采样 PWM 电流控制的最优开关策略

对应不同的电流控制形式, 可以得到不同的优化开关策略, 下面针对恒频采样 PWM 电流控制可得到最优开关控制策略问题的描述.

$$\min J = \frac{1}{2} t_c^2 \sum_{j=1}^{t_f/t_c} J_p(j),$$

$$s.t. \begin{cases} \Delta i(j) = -|i_{非换向}(j)| + |I_{ref}|, j = 0, \dots, t_f/t_c, \\ i_{非换向}(j) = i_{非换向}(j-1) + \frac{t_c}{L-M} Pr j_{非换向}(\bar{V}_p(j) - \bar{e}_p), \\ \left| \sum_{j=1}^{t_f/t_c} Pr j_{消失相} \dot{i}_p(j) \cdot t_c \right| \geq I_{ref}, \\ \left| \sum_{j=1}^{t_f/t_c} Pr j_{建立相} \dot{i}_p(j) \cdot t_c \right| \geq I_{ref}, \\ \bar{V}_p(j) \in D\bar{V}_p(k). \end{cases}$$

其中, t_c 为恒频采样 PWM 控制的间隔时间.

$$J_p(j) = \begin{cases} \left| \sum_{n=1}^{j-1} Prj_{\text{非换向}} \dot{i}_p(n) + \sum_{n=1}^j Prj_{\text{非换向}} \dot{i}_p(n) \right|, & \Delta i(j) \cdot \Delta i(j-1) \geq 0, \\ \frac{2 \left| \sum_{n=1}^j Prj_{\text{非换向}} \dot{i}_p(n) \right| \cdot \left| \sum_{n=1}^{j-1} Prj_{\text{非换向}} \dot{i}_p(n) \right|}{\left| \sum_{n=1}^j Prj_{\text{非换向}} \dot{i}_p(n) \right| + \left| \sum_{n=1}^{j-1} Prj_{\text{非换向}} \dot{i}_p(n) \right|}, & \Delta i(j) \cdot \Delta i(j-1) < 0, \end{cases}$$

对此问题求解, 可得 $\{\vec{V}_p(j)\}$ 序列, 对应的 $\{\vec{Q}(j)\}$ 序列即为第 k 个换向过程的最优开关策略。

但是, 要实施控制, 必须对此问题在线求解, 其计算量则是一般的系统难以承受的, 因此, 本文对开关策略进一步简化, 遵循 PWM 方式的实质, PWM-ON 时采用一种状态控制, PWM-OFF 时采用一种状态控制, 这种简化的控制策略可以预置在 EPROM 中, 离线求解, 在线控制。以 3.2 中换向过程为例, 可以得到其离线求解的最优换向方案如表 1 所示, 其它换向过程亦可得到类似的结果。

表 1 某换向过程的最优控制方案

速度范围 (n^*)		.202 以下	(.202, .504]	(.504, .648]	.648 以上
最优开关状态	PWM-ON	(0, 1, -1)	(0, 1, -1)	(0, 1, -1)	(1, 1, -1)
	PWM-OFF	(0, 1, 0)	(0, 0, -1)	(0, 0, 0)	(0, 1, -1)

4 实验结果

理论分析的正确性可以由 IGBT-PWM 逆变器、115ST-CMG02A 型无刷直流伺服电机、80C196 单片机实现的控制器以及接口电路组成的系统得到验证, 如图 3 所示。电流 PWM 控制的恒频采样频率为 40kHz, 电机的额定转速 $n_c = 2000\text{r/min}$, 额定线反电势 $2E_e = 136\text{V}$, 直流侧电压 V 为 195V, 可以得到不同转速下换向过程的实验波形如图 4 所示。

1) $n^* = 0.2$ 时, 如图 4(a) 所示。可以看出在换向最优控制下, 换向转矩脉动得到了抑制。

2) $n^* = 0.5$ 时, 如图 4(b) 所示, 可以看出, 在换向期间非换向相电流的波动几乎为零。

3) $n^* = 0.7$ 时, 图 4(c) 为一般控制下的换向过程, 非换向相电流最大脉动值可达 27% 之多, 图 4(d) 为采用最优控制策略时的换向过程, 电流的脉动主要是由 PWM 控制引起的, 且其值较小。可以看出, 换向最优控制策略在较大程度上抑制了换向转矩脉动, 有较好的控制效

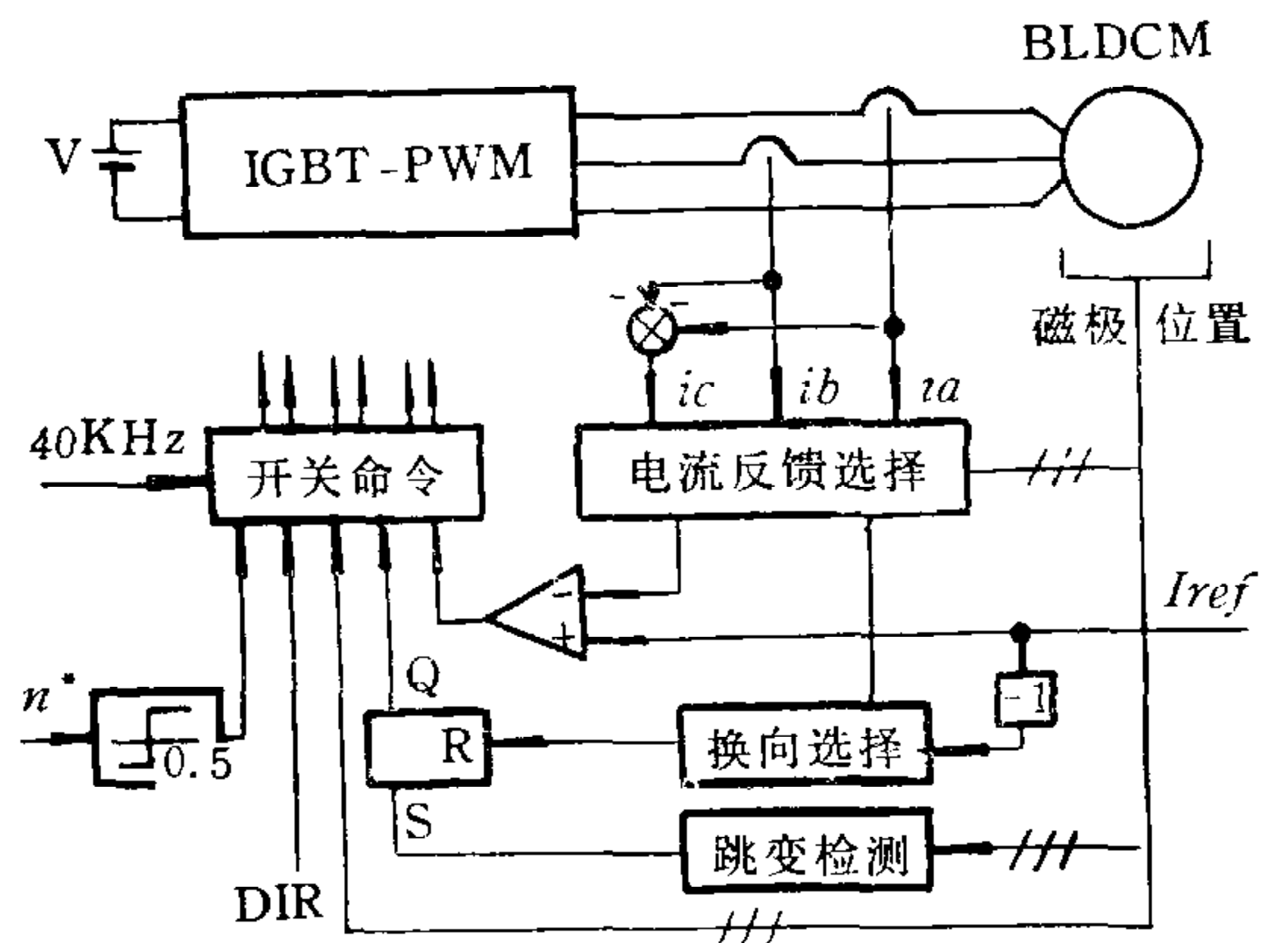


图 3 无刷直流机实验系统原理框图

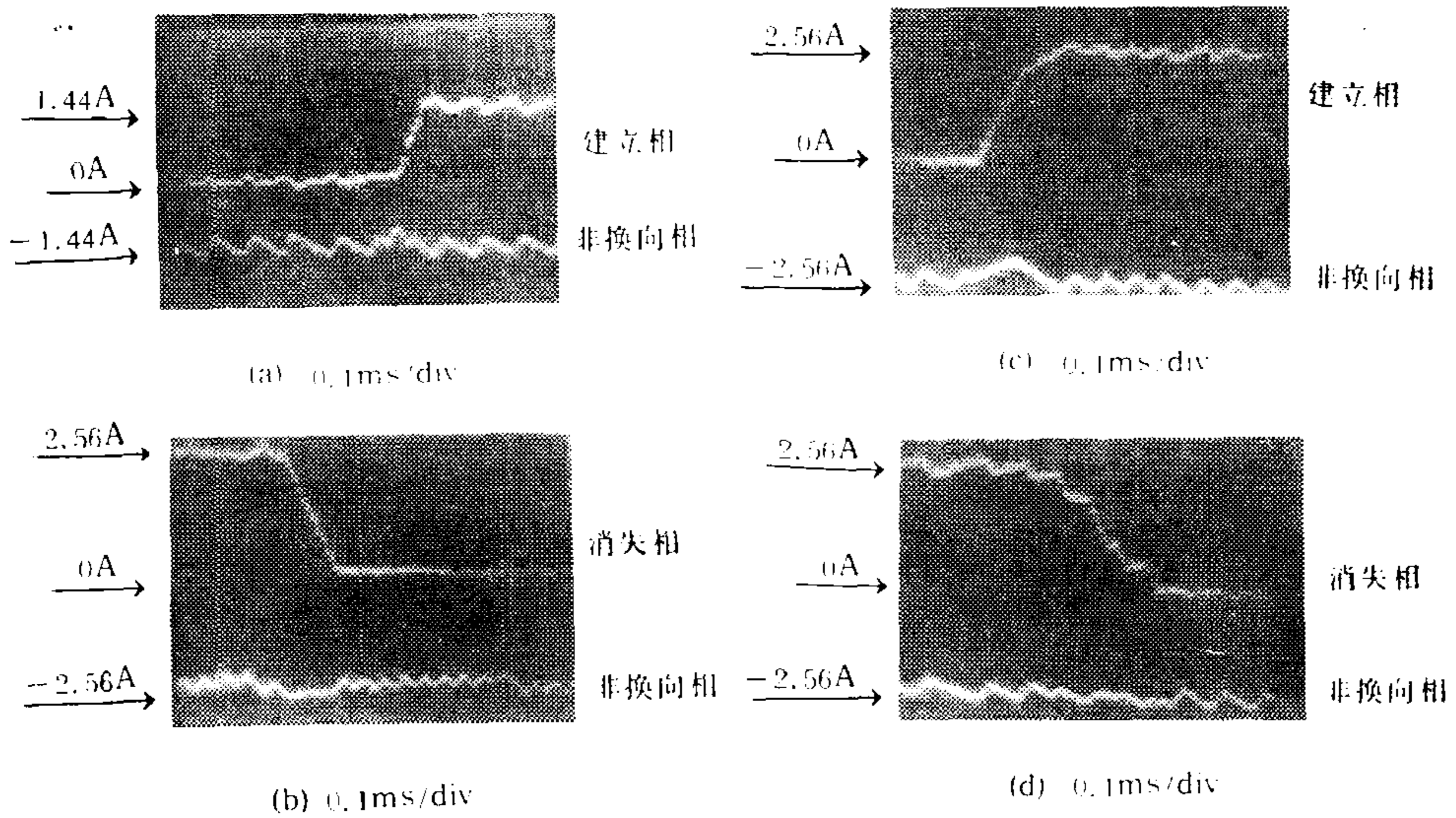


图 4 (a) $n^* = 0.2$ 时的换向过程(最优控制下) (c) $n^* = 0.7$ 时的换向过程(一般控制下)
 (b) $n^* = 0.5$ 时的换向过程(最优控制下) (d) $n^* = 0.7$ 时的换向过程(最优控制下)

果。

5 结论

本文成功地运用逆变器电压控制矢量优化调制的思想,得到了交流侧电流反馈控制下的最优换向方案,实验表明,换向最优控制方案在很大程度上减小了换向转矩脉动,尤其是对高速情况下的换向转矩脉动的抑制,具有更大的意义。

参 考 文 献

- [1] Carlson R, Lajoie-Mazenc M, Fagundes J C., Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless D C machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1992, 28(3):632—638.
- [2] Berendsen C S, Champenois G, Davoine J Commutation strategies for brushless D. C. motors: influence on instant torque. APEC' 90; 394—400.
- [3] Murai Y, Kawase Y, Ohashi K, Nagatake K, Okuyama K. Torque ripple improvement for brushless DC miniature motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1989, 25(3):441—450.
- [4] 许镇琳等. 永磁式 BLDCM 交流伺服系统转矩脉动的最小化研究. 天津大学学报, 1994, (4): 468—474.

OPTIMAL CONTROL OF COMMUTATION IN BRUSHLESS DC SERVO MACHINES

XU ZHENLIN WU ZHONG WANG XIUZH JIANG WEI

(Automation Department of Tianjin University, Tianjin 300072)

ABSTRACT

According to the theory of optimal modulation of the voltage control vector of the inverter, this paper presents an optimal commutation strategy with PWM control method of constant frequency sampling based on the non-commuting current, in order to improve the performance of the torque due to commutation in brushless DC machines. This strategy can attenuate the torque ripple due to commutation and minimize its duration effectively. The experimental results indicate that above strategy is feasible.

Key words: Voltage control, optimal commutation, torque ripple.

许镇琳 1939年5月生,天津大学自动化系教授。长期从事现代电气传动及其计算机控制、计算机过程控制等领域的教学、科研工作,并担任中国自动化学会电气自动化专委会委员、中国电工技术学会电控系统专委会委员等职,发表论文二十多篇。



吴忠 1970年10月生,1995年3月在天津大学自动化系获工学硕士学位,同年4月进入北京控制工程研究所攻读博士学位。主要从事交流伺服系统的研究工作,现在从事鲁棒自适应控制理论及其在航天应用中的研究。



王秀芝 1940年9月生,天津大学自动化系副教授,长期从事计算机过程控制、现代电气传动及其计算机控制等领域的教学、科研工作,曾发表论文十多篇。

