

微型电动车用永磁无刷电机转矩脉动控制研究

龙波¹, 曹秉刚¹, 周好斌^{1,2}, 白志峰¹, 刘小波²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安石油大学机械工程学院, 710065, 西安)

摘要: 针对微型电动车用永磁无刷电动机转矩脉动大、低速运行时噪声明显等主要问题,采用模糊控制和滑模控制相结合的方法,克服了未建模参数的影响,保证了滑模到达阶段的鲁棒性,同时抑制了转矩脉动。采用单周期内各功率管均衡调制的方式,不仅消除了反向电流,而且与其他调制方式相比,可使转矩脉动较小。针对永磁无刷电机在换相过程中,非导通相对转矩脉动的影响,提出了以瞬间提高开通相电流上升斜率的方式,来减小由非导通相造成的转矩脉动,使其电流恒定,低速运行转矩脉动降低了30%,有效地降低了微型电动车的起动噪声,不仅骑行舒适,而且具有较强的实用价值。

关键词: 微型电动车; 转矩脉动; 模糊控制; 无刷电机

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0576-04

Research on Torque Ripple Control of Brushless DC Motor for Mini-Battery Electric Vehicle

Long Bo¹, Cao Binggang¹, Zhou Haobin², Bai Zhifeng¹, Liu Xiaobo²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at permanent brushless DC motor in mini-BEV (battery electric vehicle) with torque ripple and violent noise during low speed running, the fuzzy control method is combined with slide mode control method to suppress the influence due to un-modeling parameters, and to ensure the robustness in the process of reaching slide mode plane. Compared with existing modulating method, torque ripple is greatly reduced by uniform modulating in one monocyte, increasing current slope of upcoming conducting phase instantaneously suppresses the torque ripple by 30% during low speed with obviously lower initiating noise. This method has the merits of easy in realization and being able to obtain good effect.

Keywords: mini-battery electric vehicle; torque ripple; fuzzy control; brushless DC motor

近年来,电动车的使用在我国越来越普遍,目前的微型电动车大多采用永磁直流无刷电机,虽然它具有效率高、控制方法简单的优点,但其固有的转矩脉动问题却限制了它在高精度场合的应用^[1-4]。如何减小无刷电机的转矩脉动,已成为工业应用中急需解决的问题。

本文以电机的驱动及制动电流为研究对象,分别以控制方式、瞬间提高开通相电流上升斜率和主电路的调制方式,对转矩脉动的影响作了详细分析。控制电

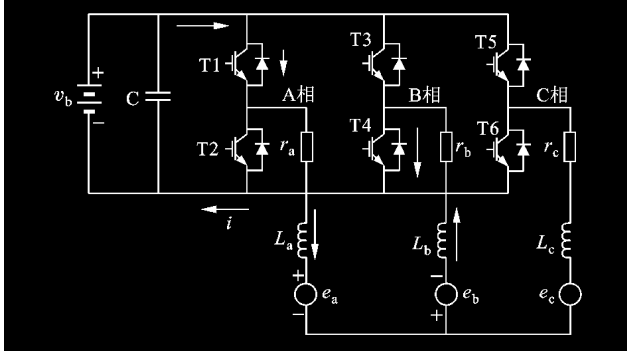
路采用模糊控制和滑模控制相结合的电流闭环控制策略来抑制转矩脉动,以前 60°的脉宽调制、后 60°脉宽恒定导通的方式,结合换相时刻来提高开通相电流的上升率,使得非换相相电流波动最小,并且从各个角度在不同的运行状态下有效抑制了转矩脉动的影响。

1 模糊滑模控制器设计与仿真

1.1 驱动控制主电路

电动车用三相永磁直流无刷电机由三相对称绕

组的定子和材料为永磁体的转子组成,目前使用的直流无刷电机一般采用两相导通,即根据转子位置传感器输出的3个位置信号来决定逆变器各功率器件的导通和关断(见图1)。

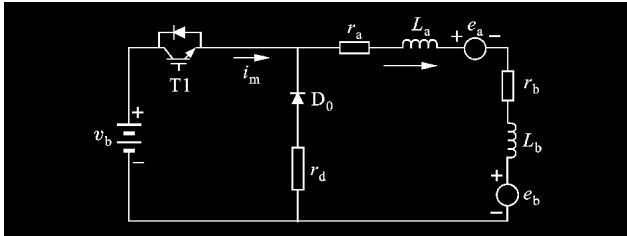


v_b : 电池电压; C : 电容; $T1 \sim T6$: 场效应晶体管; L_a, L_b, L_c : 定子的三相电感; e_a, e_b, e_c : 定子的三相反电动势; r_a, r_b, r_c : 定子的三相内阻; i : 驱动电流

图1 三相全桥电路结构图

1.2 驱动数学模型

为简化分析,以反电动势为梯形波的三相两极永磁直流无刷电机在驱动调制两两导通的情况下,建立的等效电路及其数学模型如图2所示。



i_m : 电枢电流; D_0 : 二极管; $T1$: 场效应晶体管; r_d : 二极管导通电阻

图2 驱动降压斩波电路的拓扑结构

在电机三相对称的情况下,分别对 T1 导通和截止的情况建立数学模型,当 T1 导通($0 \leq t \leq dT_s$)时

$$2Lp i_m = v_b - 2e - i_m(r_b + 2r)$$

式中: p 为微分算子; T_s 为调制周期时间; d 为调制占空比; r 为电阻。根据电机转矩平衡方程

$$Jp\omega = K_t i_m - T_L \text{ 且 } e = K_e \omega$$

式中 K_t 为转矩时间常数, K_e 为反电动势系数, J 为转动惯量, ω 为转子角速度, T_L 为负载扭矩,取状态变量 $x = [i_m \ \omega]^T$,得到 T1 导通情况下的状态方程

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -(r_b + 2r)/2L & -K_e/L \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} v_b/2L \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (1)$$

当 T1 截止($dT_s \leq t \leq T_s$)时

$$2Lp i_m = -2e - i_m(r_b + 2r + r_d)$$

同理,得到 T1 关断情况下的状态方程

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -(r_b + 2r + r_d)/2L & -K_e/L \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设输出 $y = i_m$,由平均化处理方法对降压斩波电路经摄动法处理^[5]、分离稳态和瞬态变量后得到

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-2(r_b + 2r) + r_d - (1 - d_1)(r_b + 2r + r_d)}{2L} \\ K_t/J \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{-K_e}{L} \\ 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{r_b + 2r + r_d}{2L} & \frac{-K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} Xd + \begin{bmatrix} v_b/L \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (3)$$

$$y = [1 - d_1 \ 0]x + [-1 \ 0]Xd$$

$$X = [i_m \ \omega]$$

式中: d_1 为稳态工作点的占空比。

1.3 模糊滑模控制器设计

模糊滑模控制器^[6]结合了模糊控制器和滑模控制器的优点,其中之一就是控制对象从跟踪误差转换为滑模函数,控制目标使得系统的 s 函数和跟踪误差趋近于 0。另一个优点是对高阶系统,普通滑模函数的输入为变量导数的多维系统,但对模糊滑模函数却是关于 $(s, \dot{s})$ 的二维系统。

考虑到不确定性控制系统后得到

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + (D + \Delta D)f \quad (4)$$

$$x, u, f \in \mathbb{R}^n$$

式中: A 是系统矩阵; B 为控制矩阵; D 是干扰系数矩阵; f 为干扰系数。假定系统满足匹配条件^[6],则

$$\dot{x} = (A + B\tilde{A})x + (B + B\tilde{B})u + (D + B\tilde{D})f \quad (5)$$

$$\tilde{A} = B^{-1}\Delta A; \tilde{B} = B^{-1}\Delta B; \tilde{D} = B^{-1}\Delta D$$

令 $E(t) = \tilde{A}x + \tilde{B}u + \tilde{D}f$, 则

$$\dot{x} = Ax + B(E(t) + u(t)) \quad (6)$$

式中: $E(t)$ 为不确定部分项矩阵。假定可以表示为 $K(t) = \max(|E(t)| + h)$, h 为不确定项摄动量。若实现滑模到达条件,则 $s = x + C\dot{x} - K(t)$, 在 $K(t)$ 满足一定条件时,才能满足滑动条件,得到

$$u(t) = (CB)^{-1}K(t) - (CB)^{-1}(I + CA) - E(t) \quad (7)$$

式中: C 为系数滑模矩阵。由式(7)设计的模糊隶属函数为

$$s \dot{s} = \{\text{负大, 负中, 零, 正中, 正大}\} \quad (8)$$

$$\Delta K = \{\text{负大, 负中, 零, 正中, 正大}\} \quad (9)$$

当 $ss < 0$ 时, $K(t)$ 减小, 当 $ss > 0$ 时, $K(t)$ 增大。

仿真实验中将系统中的 $E(t)$ 描述为

$$E(t) = 150e^{-(t-f)^2/b^2}$$

式中: b 为高斯函数系数. 选择 $b=0.2, f=0.7, h=0.86$, 仿真参数如下: 定子电阻 $r_s=2.875 \Omega$, 定子三相绕组电感 $L=8.5 \text{ mH}$, 永磁磁通量 $\Phi=0.175 \text{ Wb}$, 霍尔电角度 $\theta=120^\circ$, 转动惯量 $J=0.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦系数 $k=0.001$, 极对数 $n=4$, $v_b=36 \text{ V}$, 电机功率 $P=350 \text{ W}$, $T_L=8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 仿真结果如图 3 所示。

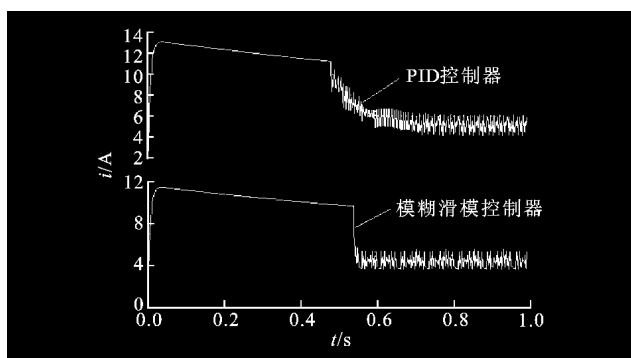


图3 驱动PID与模糊滑模控制器

由仿真结果可以看出, 采用模糊滑模控制方法的控制器, 其稳态误差比使用PID控制器要小得多, 过渡过程比较平稳, 且对不确定性参数的影响表现得不敏感。

2 脉宽调制方式

永磁无刷电机的调速方式主要通过脉宽调制(PWM)来实现, 电机控制方法采用三相六状态 120° 导通方式, 调制方法有 5 种类型^[1], 其中中性点的电压为

$$v_N = (sv_b - (e_a + e_b + e_c))/3 \quad (10)$$

假设 $e_a=e_b=E, e_c=-E$, 其中 E 以反电动势换相时刻作为起始时刻, 则三相电流的初始值和 t 时刻的表达式为

$$i_a(0) = i_b(0) = I; i_c(0) = -I$$

$$i_a(t) = \frac{-d_1 v_b - 2E}{3(L-M)}t + I$$

$$i_b(t) = \frac{2d_1 v_b - 2E}{3(L-M)}t$$

$$i_c(t) = \frac{-d_1 v_b + 4E}{3(L-M)}t - I$$

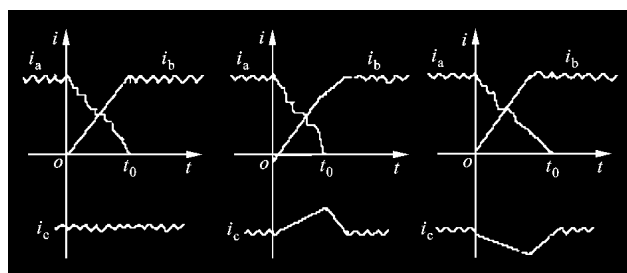
式中: M 为定子和转子之间的互感. 进而得到电磁转矩

$$T_e = 2EI/W + (2d_1 E v_b t - 8E^2 t)/(3(L-M)W) \quad (11)$$

同理, 可以获得其他调制方式的电磁转矩表达式, 以证明控制电路采用前 60° 时的 PWM 调制和后 60° 恒通的调制方式时的转矩脉动最小。

3 非换相相电流控制

在一个脉宽调制周期内, 电流波动最大的地方是霍尔换相时刻, 因此对换相时刻非导通相电流的控制非常重要. 在不同的转速下, 换相时刻的非导相电流变化斜率也不同(见图 1), 假设电机从 A 相到 B 相变换电流, C 相为非导通相, 电机在不同的速度区间, 反电动势、直流母线电压和换相电磁转矩之间的关系如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 电机换相时刻中的关断相和开通相的电流变化率不同, 使得非换相绕组电流在换相期间发生变化, 因此控制电机换相时刻的两换相绕组的电流变化率相等, 是抑制电机换相转矩脉动的关键^[7-8]。



(a)中速($4E=v_b$) (b)高速($4E>v_b$) (c)低速($4E<v_b$)

图4 电机不同速度的电流变化率

以电机运转的高速情况为例进行分析, 为了使电机延迟关断, 加速开通相导通电流上升的斜率, 以保证非导通相电流变化很小. 假设关断时刻的占空比为 d_a , 开通相占空比为 1, 电机非换相在换相期间恒定导通, 得到 A、C 相的端电压

$$v_{AC} = -3r_c i_c - 3L p i_c + 4E - v_b = d_a v_b \quad (12)$$

离散化后得到

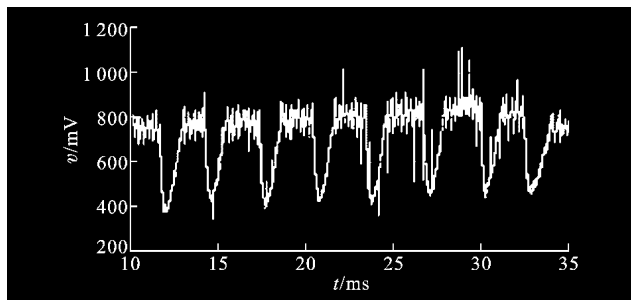
$$v_{AC}(k) = 3r_c i(k) + 3L[i^*(k+1) - i(k)] + 4E - v_b \quad (13)$$

由式(13)可知, 电机在高速段换相期间, 施加 d_a 和 v_b , 使得 $(k+1)$ 时刻的电流为 i^* , 并进行补偿, 就可以使非导通相电流保持不变。

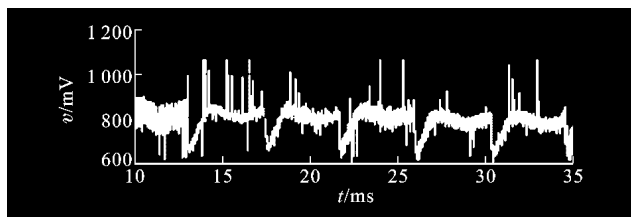
在霍尔换相时刻, 瞬间增大电流开通相调制占空比, 采用硬件控制算法, 使得换相期间加速开通相电流的上升斜率, 从而抑制了非换相相电流的突变. 该方法具有响应速度快、瞬时电流脉动抑制能力强

的特点,因此克服了文献[4]中提出的“重叠换相控制策略”的缺点。

从图5的实验结果中可以看出,电机采用复合控制比采用电流截止负反馈的控制效果好,其转矩脉动电压 v 约减小200 mV。特别是在霍尔换相时刻,电流过渡比较平稳,基本消除了启动噪声的影响,振动感明显降低,使得电动车骑行舒适。



(a)无转矩脉动控制的转矩脉动波形



(b)综合控制策略的转矩脉动波形

图5 电机的转矩脉动抑制效果对比

4 结 论

本文对微型电动车用永磁无刷直流电机的驱动控制进行了数学分析,提出了基于模糊滑模控制理论的转矩脉动控制方法。在一个控制周期内,控制电路采用前 60° 时脉宽调制、后 60° 时恒通调制的方法,以及霍尔换相时刻瞬间增大调制占空比,并与硬件算法相结合的控制方式来抑制转矩脉动,使电机在低速运行时的转矩脉动降低了30%,从而具有很强的实用价值。

参考文献:

[1] 张相军. 无刷直流电机控制系统中 PWM 调制方式对换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2):87-91.

Zhang Xiangjun. The different influences of PWM modes on commutation torque ripples in brushless DC motor control system [J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(2):87-91.

[2] 周波,傅颖. 绕组互感对 C-DUMP 变换器供电无刷直流电机运行特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3):30-33.

Zhou Bo, Fu Ying. Influence of winding mutual inductance on operation characteristics of brushless DC motors based on C-DUMP converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3):30-33.

[3] 夏长亮,文德,王娟. 基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换相转矩脉动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1):54-58.

Xia Changliang, Wen De, Wang Juan. A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on adaptive ANN [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1):54-58.

[4] 林平,韦鲲,张仲超. 新型无刷直流电机换相转矩脉动抑制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3):30-33.

Lin Ping, Wei Kun, Zhang Zhongchao. A novel control scheme to suppress the commutation torque ripple in BLDCM [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3):30-33.

[5] 白志峰. 电动汽车超级电容-蓄电池复合电源系统开发及其 H_∞ 鲁棒控制研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2006.

[6] 刘金琨. 滑模变结构控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:123-127.

[7] 许镇琳,吴忠,王秀芝. 无刷直流伺服电机换相最优控制[J]. 自动化学报, 1996, 22(4):428-434.

Xu Zhenlin, Wu Zhong, Wang Xiuzhi. The optimal control of the brushless DC servo machines [J]. Automatic Silica, 1996, 22(4):428-434.

[8] 许镇琳,江伟. 无刷直流伺服电机换相转矩脉动的分析和消除[J]. 电气传动, 1994(5):36-41.

Xu Zhenlin, Jiang Wei. Analysis and attenuation of torque ripple due to commutation in brushless DC servo machines[J]. Electric Drive, 1994(5):36-41.

(编辑 管咏梅)