

基于 DSP 的多采样率直接转矩控制系统研究

蔡华斌, 肖建, 严殊

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Multirate Direct Torque Control Based on DSP

CAI Hua-bin, XIAO Jian, YAN Shu

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Based on multirate digital control theory, a novel method to calculate stator flux of induction motor is proposed. This novel method uses different time intervals between sampling of stator currents and voltages and switching operations of inverter devices. The flux computation is a static process without problems such as initial values and error accumulation. Two testing plans are put forward to verify the flux calculation that is based on Matlab and DSP. However, there is a phenomenon of flux fluctuation. In order to overcome this problem, an improved algorithm is presented to compensate for the stator flux amplitude. The multirate direct torque control system for induction motor is set up based on TMS320F240. Computer simulation and experimental results demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method.

KEY WORDS: multirate digital control; direct torque control; induction motor; flux calculation

摘要: 基于多采样率控制理论, 提出一种多采样率磁链计算新方法, 该方法对电机电压电流的测量与逆变器开关的控制采用不同的周期, 磁链的计算是静态的, 无初值和误差累计问题。基于实际控制系统, 以 Matlab 和 DSP 为工具, 提出 2 种检验方法, 相互印证, 检验了该算法的正确性。针对实验中出现的磁链波动问题, 提出一种幅值补偿的磁链改进算法。将检验后的磁链算法运用于直接转矩控制系统中, 构造了基于 TMS320F240 的多采样率直接转矩控制系统并成功进行了控制实验。计算机仿真与实验表明磁链计算新方法的正确性和可行性。

关键词: 多采样率数字控制; 直接转矩控制; 感应电机; 磁链计算

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674057); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060613003)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60674057)

0 引言

直接转矩控制技术是继矢量控制之后发展起来的又一种高性能交流调速控制技术, 它采用空间矢量分析的方法, 基于定子磁场定向, 直接在定子坐标系下计算并控制电机的磁链与转矩。它不需要复杂的坐标变换, 对电机参数依赖性小, 具有动态响应迅速、结构简单、易于实现等优点。随着计算机技术与电力电子技术的发展, 直接转矩控制研究取得了新的进展。

多采样率数字控制是近年来提出的一种新的控制策略, 由于多采样率控制方案具有提高系统性能、适应多种复杂的实际情况和便于数字实现等诸多优势, 使得多采样率数字控制系统在现代工业社会中的应用日益广泛, 成为一种常用的采样控制系统^[1-2]。目前, 多采样率控制理论的应用主要集中在数字信号处理^[2-3,8]等领域, 还没有实际运用在直接转矩控制系统^[5-6,9-17]中。本文结合电机离散数学模型^[18-20], 推导出一种感应电机多采样率磁链计算新方法, 以实际控制系统为基础, 同时运用 Matlab 仿真与 DSP 程序计算两种方法来检验该多采样率磁链算法的正确性。在检验该算法的过程中, 针对实际计算出的磁链存在的波动, 提出了一种磁链幅值补偿抑制波动的方法, 使得实际计算出的磁链能够更好反应出磁链的真实值。在检验了该算法的合理性之后, 构造了基于 TMS320F240 的多采样率直接转矩控制系统, 设计了一种采样周期为 100 μs , 控制周期为 200 μs 的多采样率数字控制系统, 并成功进行了 DSP 控制实验, 取得了相关数据, 实验取得了很好的控制效果, 同时验证了基于幅值补偿抑制磁链波动的改进算法的优越性。

1 基于多采样率控制的磁链计算新方法

首先定义如下矩阵：

$$A_{11} = \frac{R_s L_r + R_r L_s}{L_s L_r - L_m^2} I + \omega_r J, \quad A_{12} = \frac{R_r}{L_s L_r - L_m^2} I - \frac{L_r \omega_r}{L_s L_r - L_m^2} J, \quad A_{21} = -R_s I, \quad A_{22} = 0, \quad B_{11} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} I, \quad B_{21} = I, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = [I \quad 0],$$

则有 $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix}$ 。取 $x = [i_s^T \psi_s^T]^T = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \psi_{s\alpha} \ \psi_{s\beta}]^T$, $y = i_s = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]^T$, $u = u_s = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta}]^T$ 。式中： R_s 、 R_r 、 L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定子电阻、转子电阻、定子电感、转子电感、定转子互感； $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 、 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 、 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 分别为定子磁链、定子电流、电压； ω_r 为转子转速。

结合电机离散数学模型，在感应电机两相静止坐标系下，可得到如下状态方程表示的连续系统：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

设系统中保持器为零阶的，令 (G, H, C) 代表其在采样周期为 T 时所对应的离散化系统，则有：

$$G = e^{AT}, H = \int_0^T e^{At} dt B; \text{ 令 } (G_m, H_m, C) \text{ 为其在采样周期为 } T_m = T/N \text{ 时的离散化系统，则 } G_m = e^{AT/N},$$

$H_m = \int_0^{T/N} e^{At} dt B$ 。在时刻 kT ，系统的输入为 $u_k = u(kT)$ ，状态变量为 $x_k = x(kT)$ ，输出为 $y_k = y(kT)$ 。设系统(被控对象)输出的采样周期为 T_m ，输入采样周期为 T ， u_k 在整个采样周期 T 中保持不变，则采用提升方法^[4,20]，可将系统的离散状态方程表示为

$$\begin{cases} x_{k+1} = Gx_k + Hu_k \\ \bar{y}_k = C_0 x_k + D_0 u_k \end{cases} \quad (2)$$

式中：

$$\bar{y}_k = \begin{bmatrix} y(kT) \\ y(kT + T_m) \\ \dots \\ y(kT + (N-1)T_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_0 = [C \quad G_m \quad \dots \quad CG_m^{N-1}]^T \quad (4)$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ CH_m \\ \dots \\ C \sum_{j=0}^{N-2} G^j H_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

如果 C_0 可逆，即 C_0^{-1} 存在，则可求出

$$x_k = C_0^{-1} (\bar{y}_k - D_0 u_k) \quad (6)$$

C_0 可逆的条件是：对于式(1)所示的连续系统 (A, B, C) ，其能观测性指标集为 $\{v_1, \dots, v_p\}$ (p 为系统输出个数)，若式(2)定义的 N 满足 $N \geq v_i (i=1, \dots, p)$ ，则由定义式 C_0 ，对几乎所有的 T 均为可逆^[20]，则可由上式计算得到磁链分量。

令 $N=2$ ，考虑在一个采样周期内，认为转速恒定，则：

$$G = e^{AT} \approx (I + TA) = \begin{bmatrix} I + TA_{11} & TA_{12} \\ TA_{21} & I + TA_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$H = [\int_0^T e^{At} dt] B \approx TB = \begin{bmatrix} TB_{11} \\ TB_{21} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G_m = e^{AT_m} \approx (I + T_m A) = \begin{bmatrix} I + T_m A_{11} & T_m A_{12} \\ T_m A_{21} & I + T_m A_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H_m = [\int_0^{T_m} e^{At} dt] B \approx T_m B = \begin{bmatrix} T_m B_{11} \\ T_m B_{21} \end{bmatrix} \quad (10)$$

在以上的计算中，考虑到控制周期 T 很小，省略了二次方以上项。

根据式(3)、(4)、(5)，有

$$\bar{y}_k = \bar{i}_{sk} = \begin{bmatrix} i_s(kT) \\ i_s(kT + T_m) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_0^{-1} = \begin{bmatrix} C \\ CG_m \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ I + T_m A_{11} & T_m A_{12} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -\frac{1}{T_m} A_{12}^{-1} (I + T_m A_{11}) & \frac{1}{T_m} A_{12}^{-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ CH_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ T_m B_{11} \end{bmatrix} \quad (13)$$

因为 $A_{12}^{-1} = \frac{(L_s L_r - L_m^2)}{R_r^2 + L_r^2 \omega_r^2} \begin{bmatrix} R_r & -L_r \omega_r \\ L_r \omega_r & R_r \end{bmatrix}$ 总是可逆

的，根据式(12)，则 C_0 可逆，因此，根据式(2)变换可以得到状态向量

$$x_k = [i_{sk}^T \ \psi_{sk}^T]^T = C_0^{-1} (\bar{i}_{sk} - D_0 u_{sk}) \quad (14)$$

从中分离出磁链分量表达式为

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha}(kT) \\ \psi_{s\beta}(kT) \end{bmatrix} = -\frac{1}{T_m} A_{12}^{-1} (I + T_m A_{11}) i_s(kT) + \frac{1}{T_m} A_{12}^{-1} i_s(kT + T_m) - A_{12}^{-1} B_{11} u_s(kT) \quad (15)$$

式(15)计算得到了磁链分量的表达式，根据式(16)计算磁链幅值，根据式(17)计算转矩。

$$|\psi(kT)| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2(kT) + \psi_{s\beta}^2(kT)} \quad (16)$$

$$T_e(kT) = P_n[\psi_{s\alpha}(kT)i_{s\beta}(kT) - \psi_{s\beta}(kT)i_{s\alpha}(kT)] \quad (17)$$

由此可得图 1 所示的感应电机多采样率直接转矩控制系统框图, 将逆变器和电机作为一个整体看作被控对象, 被控对象的输入为逆变器开关状态, 被控对象输出为感应电机电压电流转速信息。直接转矩控制系统以 $f=1/T$ 为控制频率, 即每隔 T 时间对逆变器更新一次开关状态, 而对电机输出(电流、电压、转速)的采样频率为 $f_m=1/T_m$ ($T_m=T/2$)。DSP 系统实现直接转矩控制主要算法, 根据采样数据完成磁链、转矩计算, 最后得出逆变器开关状态。

根据图 2 所示的采样与控制关系, 在 KT 与 $KT+T_m$ 时刻, 分别采样一次电压电流信息, 在 KT 时刻, 保存采样数据, 在 $KT+T_m$ 时刻, 采样数据并保存之后, 运用式(15)计算得到 KT 时刻磁链数值, 然后综合磁链滞环比较信号、转矩滞环比较信号、磁链扇区信息查询状态开关表得出相应控制信号, 在下一周期开始的 $(K+1)T$ 时刻, 输出 PWM 波形, 实现对电机的控制。

综上所述, $(K+1)T$ 时刻的输出向量是由 KT 与 $KT+T_m$ 时刻分别采样的电压电流转速信息以及计算出的转矩确定的, 导致系统存在 1 个控制周期的滞后, 这也是目前绝大多数调速控制系统都会遇到的问题, 它对系统的控制效果有一定的影响。为了弥补其影响, 在 $KT+T_m$ 时刻对 $(K+1)T$ 时刻的电流和磁链值进行预测。

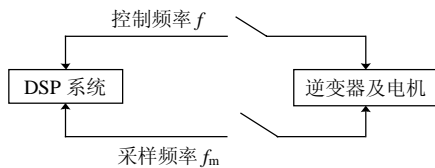


图 1 多采样率直接转矩控制系统
Fig. 1 Direct torque control based on multirate control

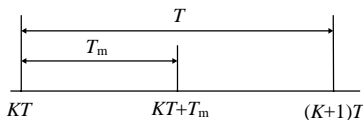


图 2 采样与控制周期
Fig. 2 Sampling and control periods

由式(2)、(7)、(8)可得:

$$\hat{\psi}_s[(k+1)T] = TA_{21}i_s(kT) + (I + TA_{22})\psi_s(kT) + TB_{21}u_s(kT) = \psi_s(kT) - TR_s i_s(kT) + Tu_s(kT) \quad (18)$$

式中: $\psi_s(kT)$ 为 $KT+T_m$ 时刻采用多采样率磁链计算法得到的磁链值; $i_s(kT)$ 为 KT 时刻的电流测量值;

$u_s(kT)$ 为 KT 时刻的系统输出电压值; 符号 “^” 表示为预测值。

2 磁链算法的实验检验

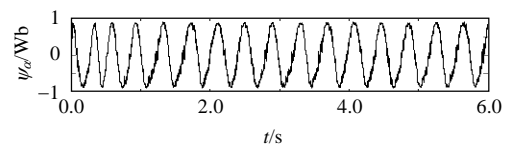
2.1 实验 1

以 TMS320F240 为基础, 运用一种带幅值补偿的定子磁链观测器^[7] 实现了均匀采样直接转矩控制系统, 设定系统采样周期为 $100 \mu\text{s}$, 该系统作为多采样率检验的基础。

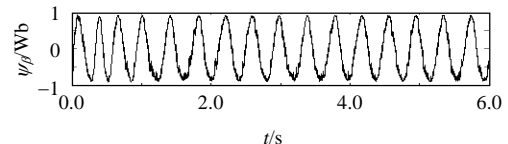
由于系统中断周期很小, 开关状态的改变对定子电流的影响近似忽略, 按照该多采样率算法, 将均匀采样系统的 2 个中断周期看作多采样率算法中的 1 个控制周期。在该周期内, 将第 1 次采样看作奇数次采样, 第 2 次采样为偶数次采样。在控制的同时, 设定一奇偶检验标志位, 来检验 DSP 系统中断的次数属于奇数次中断还是偶数次中断, 若是奇数次中断, 则保存采样数据, 以备偶数次中断计算时调用, 偶数次中断时, 保存采样数据然后按新算法计算磁链, 将计算的磁链数值保存作参考, 以检验该算法计算磁链的正确性。

以上算法是以 DSP 程序的形式来检验。该方法同时可以运用 Matlab 程序计算的方式实现。根据构造的均匀采样直接转矩控制系统, 将电机运行时的奇数时刻和偶数时刻的采样电流电压转速信息分别保存为 .dat 文件的形式, 然后将该数据文件导入 Matlab 中, 运用矩阵计算的方式, 以 Matlab 程序来实现该算法, 经过实验检验, 发现该算法与 DSP 汇编语言计算出的结果一致。

得到磁链分量曲线如图 3 所示。



(a) α 轴磁链分量



(b) β 轴磁链分量

图 3 磁链分量实验曲线

Fig. 3 Experimental curves of flux components

2.2 实验 2

本方案设计一种完全符合多采样率算法的系统来进行检验。在实验 1 的基础上, 检测到奇数次中断时, 保存电压电流等信息, 直接输出上一次计

算得出的PWM波形,当检测到偶数次中断时,计算新磁链。如图 2 所示的控制与采样周期关系,在KT时刻响应中断,输出(K-1)T时刻计算出的开关状态,并且采样一次电压电流信息保存,在KT+T_m时刻响应中断,输出上一次的开关状态(即KT时刻的状态),采样一次电压电流信息,计算新的磁链并保存数值,这样在周期T内奇数次采样和偶数次采样之间没有开关状态的改变,完全符合多采样率算法的计算环境。同时应用该设置,将电压电流转速等信息保存,导入Matlab中,也可以运用M语言实现该算法。经检验,两种方法计算出的结果一致,此时得到的磁链分量曲线如图 4 所示。

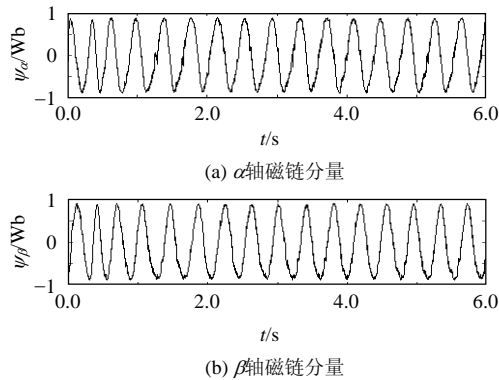


图 4 磁链分量实验曲线

Fig. 4 Experimental curves of flux components

实验取得的数据总体很好,但新算法计算出的磁链有微弱波动。综合分析起来,除了电机运行时参数变化的影响外,由于该算法不像传统电压模型那样有积分器的作用,对波动不会累积,电流波动和电机运行时参数的改变都可能对磁链计算结果产生影响,为此,下节提出了一种基于幅值补偿的改进算法。

2.3 改进实验

针对实际控制中存在的滞后问题,将磁链预测也加上,进行了计算,得到的磁链波动抑制效果不是很明显,为此,提出一种改进的磁链补偿方法,具体做法如下:

首先根据磁链新算法求出电机两相静止坐标系下的磁链分量 $\psi_{s\alpha 1}$ 和 $\psi_{s\beta 1}$,可以求得磁链幅值 ψ_{s1} ,由于磁链分量有很大的波动,导致求出的磁链幅值也有很大的波动,为此,在求出磁链幅值之后,求出磁链分量与幅值之间的相位并保持相位不变,对磁链幅值进行补偿,按照以下公式进行:

$$\psi = \begin{cases} \psi_{s1} + K|\psi_{s1} - \psi_i|, & \psi_{s1} < \psi_G \\ \psi_{s1} - K|\psi_{s1} - \psi_i|, & \psi_{s1} > \psi_G \end{cases}$$

式中: ψ_G 为磁链理想幅值; K 为 0 到 1 之间某个常数,这样对磁链幅值进行平滑之后,再根据 ψ 与相位之间的关系,求出磁链分量数值,这样就能够对磁链分量进行较好的平滑。

由此得到的磁链分量实验曲线如图 5 所示。

由实验 1 得到磁链分量曲线图可以看出,该算法计算出的磁链能够很好的跟随单采样率计算的磁链,由实验 2 得到的磁链再次验证了该算法,由实验 1 与实验 2 计算出的磁链分量对比研究发现,无论是在启动阶段还是稳态阶段,两种算法计算出的磁链,在幅值和相位都很好的相符,验证了实验 1 中由于控制周期很小,开关状态的变化对采样电流的影响是很微弱的假设。

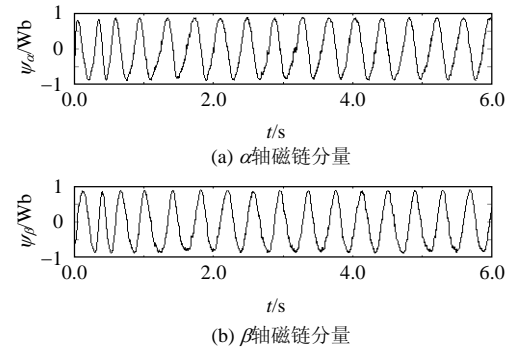


图 5 磁链分量实验曲线

Fig. 5 Experimental curves of flux components

3 新算法的 DSP 控制实验研究

通过以上实验对比发现,改进的算法得到的磁链波动明显减少,为此,运用改进的实验算法进行磁链计算,构造多采样率直接转矩控制系统,分别设定电机转速为 200 和 500 r/min,进行控制实验,此时系统能够很好的实现控制。得到转速为 200r/min 时的磁链轨迹如图 6 所示,转速响应曲线如图 7 所示。

由图 7 的转速响应曲线,电机启动到 0.9 s 时转速上升到最大值 260r/min,然后转速下降,到 1.7s 时刻,转速进入稳态阶段。在稳态阶段,转速比较

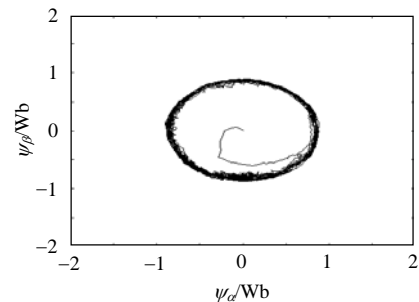


图 6 磁链幅值轨迹曲线

Fig. 6 Locus of stator flux linkage

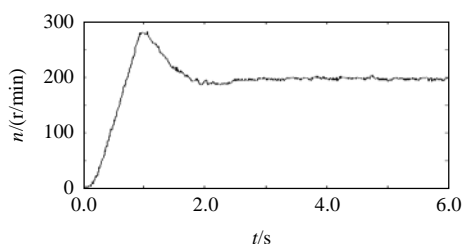


图7 转速为200 r/min时的转速响应

Fig. 7 Speed response with $n=200$ r/min

平稳,波动时刻达到的最高值约为205 r/min,稳态时最大误差为2.5%,此时转速响应的上升时间为0.7s,调整时间为1.8s。

在某些高性能的交流调速控制系统中,系统的负载往往是变化的,通过突变负载来检验系统的转速响应特性是很有必要的,为此,在电机转速为500 r/min时进行了突加负载试验,得到的转速响应如图8所示。

由图8转速曲线发现,在电机平稳运行到7.5s时突加了负载,转速下降,到8s时转速下降到最低约300 r/min,然后转速上升,在9s左右,转速上升到约500 r/min,并经过约2.4s的微弱波动,到11.4s时电机平稳运行于500 r/min。

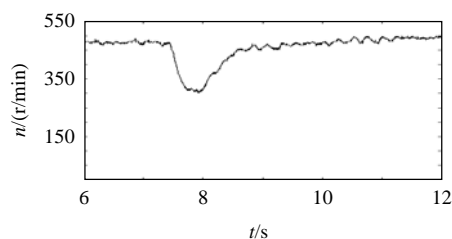


图8 转速响应

Fig. 8 Speed response

4 结论

将多采样率控制理论运用在直接转矩控制系统中,推导出一种新的感应电机定子磁链计算新方法,该方法对磁链的计算是静态的,无初值问题和误差累计问题。分别运用Matlab和DSP系统2种工具,提出了2种方法来检验磁链新算法,针对该算法计算出的磁链存在波动的问题,提出了一种幅值补偿的改进方法,对磁链分量进行了校正,构建了基于多采样率控制的直接转矩控制系统并成功进行了DSP控制实验,取得了很好的实验效果,对比研究表明该幅值补偿的改进算法具有更加优越的控制性能。在现有工作的基础上,在交流调速系统中运用多采样率控制理论进行状态观测,得到的状态信息进行系统极点配置,可以提高系统的快速性,准确性,所涉及的额外的自由度可以提高系统

的鲁棒性。本实验的成功进行为这方面的研究奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 肖建. 多采样率数字控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 6-86.
- [2] 肖建. 多采样率数字控制系统的函数空间模型[J]. 控制理论与应用, 2004, 17(2): 296-299.
Xiao Jian. Function space model of multirate digital control systems [J]. Control Theory and Applications, 2004, 17(2): 296-299(in Chinese).
- [3] Er M J, Lee S C, Tan L L. Digital-signal-processor-based multirate PID control of a two-link flexible-joint robot[C]. Digital Signal Processing Applications Conference, Perth, Australia, 1996.
- [4] Xia Xianggen, Suter B W. Multirate filter banks with block sampling [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(3): 484-496.
- [5] 程水英, 陈鹏举, 武传华, 等. 多采样率数字信号处理及其在软件无线电中的硬件实现[J]. 电子工程师, 2001, 27(10): 53-56.
Cheng Shuiying, Chen Pengju, Wu Chuanhua, et al. Multirate digital signal processing and its hardware realization in software radio [J]. Electronic Engineer, 2001, 27(10): 53-56(in Chinese).
- [6] Hu Jun, Wu Bin. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(5): 969-977.
- [7] 黎亚元, 唐浦华. 直接转矩控制中一种磁链估计新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 22-29.
Ni Yayuan, Tang Fuhua. A new flux estimation method of the direct torque control[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 22-29(in Chinese).
- [8] 冯江华, 许峻峰. 基于定子磁链自适应观测的永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 122-127.
Feng Jianghua, Xu Junfeng. Permanent magnet synchronous machines direct torque control system based on adaptive stator flux observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 122-127(in Chinese).
- [9] 金孟加, 邱建琪, 史岑微, 等. 基于新型定子磁链观测器的直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 139-142.
Jin Mengjia, Qiu Jianqi, Shi Cenwei, et al. A novel stator flux estimator for direct torque controlled magnet synchronous motor drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 139-142(in Chinese).
- [10] 贾洪平, 贺益康. 一种适合DTC应用的非线性正交反馈补偿磁链观测器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 101-105.
Jia Hongping, He Yikang. A new nonlinear perpendicular flux observer with compensation feedback suitable for DTC application [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 101-105(in Chinese).
- [11] 年晓红, 王坚, 李祥飞, 等. 基于感应电机定子磁链U-N模型的速度自适应辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 159-162.
Nian Xiaohong, Wang Jian, Li Xiangfei, et al. A method of speed adaptive estimation based on stator flux U-N model of IM [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 159-162(in Chinese).
- [12] 王涛, 肖建, 李冀昆. 感应电机的一种输出反馈控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 154-157.
Wang Tao, Xiao Jian, Li Jikun. Output feedback controller design of induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17):

- 154-157(in Chinese).
- [13] Keyhani H R, Zolghadri M R. An extended and improved discrete space vector modulation direct torque control for induction motors [C]. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [14] 曹家勇, 周祖德, 陈幼平, 等. 一种开关磁阻电动机转矩控制的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 88-93.
Cao Jiayong, Zhou Zude, Chen Youping, et al. A new torque control method for switched reluctance motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 88-93(in Chinese).
- [15] 魏欣, 陈大跃, 赵春宇. 一种基于占空比控制技术的异步电机直接转矩控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 93-97.
Wei Xin, Chen Dayue, Zhao Chunyu. A new direct torque control strategy of induction motors based on duty ratio control technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 93-97(in Chinese).
- [16] 王宇, 邓智泉, 王晓琳. 一种新颖的电机磁链辨识算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 39-43.
Wang Yu, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin. A novel algorithm of motor flux estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 39-43(in Chinese).
- [17] 常进, 张曾科, 钱利民. 基于空间电压矢量的感应电机每安培最大转矩控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(8): 953-956.
Chang Jin, Zhang Zengke, Qian Limin. Maximum torque per ampere control strategy based on space vector for induction motors [J]. Control and Decision, 2006, 21(8): 953-956(in Chinese).
- [18] 郭亮, 卢琴芬, 叶云岳, 等. 基于有限元方法的磁通反向电机定位转矩研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 42-45.
Guo Liang, Lu Qinfen, Ye Yunyue, et al. Study of widening switch angles in selective harmonic elimination inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(2): 42-45(in Chinese).
- [19] 廖晓钟, 周乐芳. 直接转矩控制的磁链控制研究[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(2): 190-195.
Liao Xiaohong, Zhou Lefang. Flux control research in direct torque control(DTC)[J]. Electric Machines and Control, 2005, 9(2): 190-195(in Chinese).
- [20] Griva G, Ilas C, Eastham J F, et al. High performance sensorless control of induction motor drives for industry applications [C]. The 1997 Power Conversion Conference, Nagaoka, Japan, 1997.



蔡华斌

收稿日期: 2007-07-06。

作者简介:

蔡华斌(1981—), 男, 西南交通大学硕士研究生, 主要研究方向为交流传动与计算机控制, caihuabin0712@163.com。

(编辑 刘浩芳)