

基于参数辨识的磁场定向感应电机自适应控制^{*}

徐小增, 李叶松, 秦 忆

(华中科技大学自动控制系统, 湖北武汉 430074)

摘 要: 在矢量控制感应电机的数学模型的基础上, 通过理论推导和分析, 建立了恒磁链矢量控制感应电机转矩扰动和转子电阻辨识模型及在线辨识的方法和方案, 提出了矢量控制感应电机的自适应控制方案, 理论推导分析和仿真结果表明该方法正确可行且具有快速简单等优点。

关键词: 转矩扰动和转子电阻; 在线辨识; 自适应控制; 矢量控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 06-0026-04

磁场定向控制是感应电动机高性能驱动中应用得最为成熟最为普遍的一种技术, 使感应电动机的控制性能有了很大的提高。但磁场定向控制技术对系统和电机参数的依赖性强, 运行过程中参数的变化将使系统的动、稳态性能变坏。负载转矩扰动和转子电阻变化是电机控制中最常见的参数变化和扰动情况, 电机转子电阻在运行过程中随着温度的增加而增大, 将改变电机的转子时间常数, 使得系统响应速度降低, 引起额外的损耗^[1, 2]。同样运行过程中负载的扰动将使系统的快速响应性能变差。目前感应电动机自适应控制多采用非线性控制理论和非线性控制器^[2-4], 算法较复杂, 电机的响应速度较慢, 特别是目前工业上普遍使用的 PID 控制器对参数变化和负载扰动的鲁棒性差。因此研究适用于 PID 控制的基于参数辨识的感应电动机自适应控制方法是很有意义的。

本文针对负载转矩扰动和转子电阻的变化, 建立了恒磁链转子磁场定向矢量控制情况下负载转矩扰动和转子电阻的辨识模型和方法, 提出了相应的自适应控制方案, 提高了系统的鲁棒性, 自适应控制方案和参数辨识方法具有结构简单、物理概念清晰和便于应用等优点。

1 参数辨识数学模型

当以定子电流为输入量, 在同步旋转 $d-q$ 坐标系下, 且保持坐标系的 d 轴同转子磁场方向一致并采用恒磁链工作方式, 则考虑转子电阻变化和负载扰动下恒磁链转子磁场定向感应电动机的数学模

型为^[5]:

$$\begin{aligned} \Psi_{dr}^* &= \Psi_r = \text{常数}, \Psi_{qr}^* = 0 \\ \Delta \Psi_{dr} &= 0, \Delta \Psi_{qr} = 0, i_{dr}^* = 0, \Delta i_{dr} = 0, \\ \Delta i_{ds} &= 0, \Psi_{dr}^* = L_m i_{ds}^* \\ \omega_s^* + \Delta \omega_s &= \frac{(R^* + \Delta R_r) L_m (i_{qs}^* + \Delta i_{qs})}{L_r \Psi_{dr}^*} \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_e^* + \Delta T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (i_{qs}^* + \Delta i_{qs}) \Psi_{dr}^*$$

$$T_e^* + \Delta T_e - T_L = J \frac{d(\omega_m^* + \Delta \omega_m)}{dt} + B(\omega_m^* + \Delta \omega_m)$$

其中, 带 * 项为转子电阻为额定参数时对应的各物理量, 带 Δ 项为转子电阻变化引起的各物理量的变化量。在 (1) 式中将 Δ 项全取为零时就不考虑转子电阻变化情况下电机的数学模型。同时额定负载转矩归入系统转动惯量中考虑, T_L 为负载转矩扰动, 且假设负载转矩扰动为瞬时脉冲型扰动, 出现负载转矩扰动时转子电阻保持不变, 即将负载转矩扰动和转子电阻变化分离开来进行分析。 i_{ds} 、 i_{qs} 分别是定子电流在 d 、 q 轴的分量, i_{dr} 为转子电流在 q 轴的分量, R_r 是每相的转子电阻, L_r 为转子每相的自感, L_m 为互感, ω_m 是转子机械角速度, ω_0 是 $d-q$ 坐标系相对于定子的旋转角速度, $\omega_s = \omega_0 - p\omega_m$ 为滑差角速度, p 为极对数, Ψ_{dr} 、 Ψ_{qr} 是转子磁链在 d 、 q 轴的分量, T_e 是电磁转矩, J 是系统转动惯量, B 是黏滞摩擦系数。

将 (1) 式中变化增量 Δ 部分取为零, 则得到在额定参数情况下恒磁链矢量控制的方程:

* 收稿日期: 2002-06-13

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (020118)

作者简介: 徐小增 (1963 年生), 男, 在职博士生, 佛山科技学院副教授; E-mail: keyarh@fosu.edu.cn

$$\omega_s^* = \frac{L_m R_r^* i_{qs}^*}{L_r \Psi_{dr}^*}$$
$$T_e^* = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{qs}^* \Psi_{dr}^* \tag{2}$$
$$T_e^* - T_L = J \frac{d\omega_m^*}{dt} + B\omega_m^*$$

将(1)式中的后三项减去(2)式,并整理后可得:

$$\Delta\omega_s = \frac{L_m}{L_r \Psi_{dr}^*} [(R_r^* + \Delta R_r) \Delta i_{qs} + \Delta R_r i_{qs}^*]$$
$$\Delta T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Delta i_{qs} \Psi_{dr}^* = K_t \Delta i_{qs} \tag{3}$$
$$\Delta T_e = J \frac{d(\Delta\omega_m)}{dt} + B(\Delta\omega_m)$$

其中, $K_t = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_{dr}^* = \text{常数}$

令 $K_1 = \frac{L_m R_r^*}{L_r \Psi_{dr}^*} = \text{常数}, K_2 = \frac{\Delta R_r}{R_r^*}, K_3 = K_1(1 + K_2)$, 对(3)式取拉氏变换,并考虑到

$$\omega_s = \omega_o - p\omega_m, \omega_s^* = \omega_o - p\omega_m^*$$
$$\Delta\omega_s(s) = -p(\omega_m - \omega_m^*) = -p\Delta\omega_m(s)$$
$$i_{qs} = i_{qs}^* + \Delta i_{qs}$$

经整理后可得:

$$I_{qs}(s) = \frac{K_1 J_s + K_1 B + pK_t}{K_3 J_s + K_3 B + pK_t} I_{qs}^*(s) =$$
$$G_q(s) I_{qs}^*(s) \tag{4}$$

其中, $G_q(s) = \frac{K_1 J_s + K_1 B + pK_t}{K_3 J_s + K_3 B + pK_t}$,

由 $T_e = K_t I_{qs}$ 和 $T_e^* = K_t I_{qs}^*$ 可得

$$T_e(s) = \frac{K_1 J_s + K_1 B + pK_t}{K_3 J_s + K_3 B + pK_t} T_e^*(s) =$$
$$G_q(s) T_e^*(s) \tag{5}$$

因此考虑转子电阻变化影响下恒磁链矢量控制方式的电机数学模型如图 1 和图 2 所示。

由图 1 和图 2 可见,考虑转子电阻变化后,数学模型在前向通道上多串联了一个 $G_q(s)$ 。当转子电阻 R_r 随温升增加时,则 K_3 大于 K_1 , $G_q(s)$ 相当于

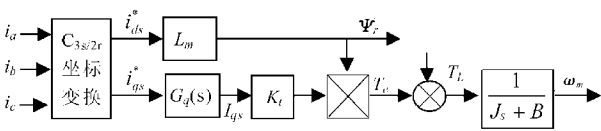


图 1 恒磁链矢量控制电机数学模型

Fig 1 Mathematics model of vector-controlled induction motor

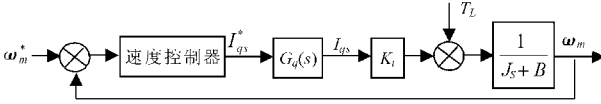


图 2 感应电机驱动控制框图

Fig 2 Block diagram of induction motor driving control

在系统中串入了一个串联滞后网络,因此若不加补偿和按额定参数指令值 I_{qs}^* 进行控制时, $G_q(s)$ 的作用将削弱电机的响应速度和快速性,电机转矩也将偏离指令值,但由于电机速度闭环作用,电阻变化不会影响稳态精度,而只是影响响应速度。

2 自适应控制方案和参数辨识

2.1 自适应控制方案

由图 2 可见,要消除转子电阻变化的影响,可采用在控制系统的前向通道上串入校正装置 $G_c(s)$,并取 $G_c(s) = 1/G_q(s)$ 。同时为消除负载扰动的影响,引入负载扰动补偿回路和反馈校正装置 $G_t(s)$,并取 $G_t(s) = 1/k_t$,系统的自适应控制框图如图 3 所示。通过在线实时测量电机转速和定子电流,在线辨识负载扰动和转子电阻,动态地调整校正装置 $G_c(s)$,就可有效地消除负载扰动和转子电阻变化的影响,提高系统的性能。

2.2 转子电阻辨识方案

假设负载转矩扰动为瞬时脉冲型扰动,即假设出现负载转矩扰动的瞬间转子电阻保持不变,而在转子电阻辨识过程中没有瞬时脉冲型转矩扰动,即 $T_L = 0$,从而将负载转矩扰动和转子电阻变化分离开来进行分析。为了提高转子电阻的辨识速度,引入中间变量 $u(s)$ 。由图 2 可见:

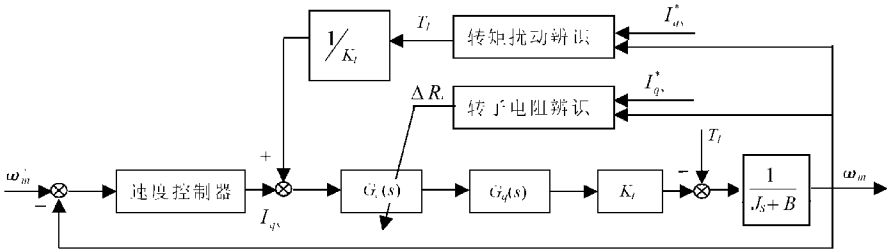


图 3 系统自适应控制框图

Fig. 3 Block diagram of adaptive control system

$$\omega_m(s) = \frac{G_q(s) K_t I_{qs}^*(s)}{J_s + B} = \frac{1}{K_3 J_s + K_3 B + p K_t} u(s) \quad (6)$$

其中, $u(s) = \frac{K_t(K_1 J_s + K_1 B + p K_t)}{J_s + B} I_{\varphi}^*(s)$ 。

中间变量 u 虽然不具有物理意义, 但能大大方便计算机的参数辨识。转子电阻 R_r 的辨识步骤如下:

(1) 由式 $u(s) = \frac{K_t(K_1 J_s + K_1 B + p K_t)}{J_s + B} I_{\varphi}^*(s)$

计算 $u(s)$ 。

(2) 由 u 和 ω_m 对 K_3 进行辨识, 方案如下:

$$\omega_m(s) = \frac{u(s)}{K_3 J_s + K_3 B + p K_t} = \frac{1}{J' + B'} u(s) \quad (7)$$

其中, $J' = K_3 J, B' = K_3 B + p K_t$ 。

(7) 式对应的时间离散化方程为:

$$\omega_m(z) = \frac{\beta u(z)}{z - \alpha}$$
$$\omega_m(k+1) = \alpha \omega_m(k) + \beta u(k) \quad (8)$$

其中, $\alpha = \exp(-B' T_s / J')$, $\beta = (1 - \alpha) / B'$, T_s 为采样周期。

由于 α 和 β 都为 K_3 的函数, 故只须对 α 进行辨识。由 (7)、(8) 式可得 α 和 β 之间的关系为:

$$\beta = \frac{1 - \alpha}{B'} = \frac{1 - \alpha}{\frac{p K_t T_s}{J \ln \alpha + B T_s} B + p K_t} \quad (9)$$

采用单神经网络和 BP 算法对 α 进行辨识, 辨识用神经网络结构如图 4 所示。

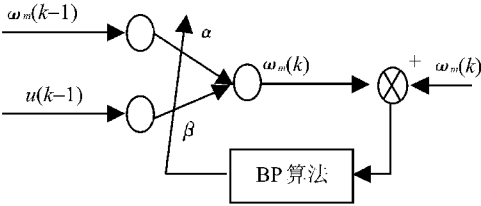


图 4 转子电阻神经网络辨识结构图

Fig 4 Diagram of resistance neural network identification

辨识神经网络以 $\omega_m(k-1)$ 、 $u(k-1)$ 为输入, α 、 β 为网络权重, 输出为转速估计值 $\hat{\omega}_m(k)$ 。定义输出误差函数为:

$$e(k) = \omega_m(k) - \hat{\omega}_m(k) \quad (10)$$

权重 α 按 BP 算法调整, 调整公式为:

$$\alpha(n+1) = \alpha(n) - \eta e(n) \omega_m(n) \quad (11)$$

其中, n 为对应时刻 k 的迭代次数, η 为收敛系数。转速估计值 $\hat{\omega}_m$ 为:

$$\hat{\omega}_m(k+1) = \alpha \omega_m(k) + \beta u(k) \quad (12)$$

不断调整 α 、 β 值, 直至 $e(k)$ 趋于 0。

(3) 由 α 计算 K_3 , 由 K_3 估算出转子电阻 R_2 。

2.3 负载扰动辨识方案

在转子电阻辨识和补偿的基础上, 有 $I_{\varphi}^*(s) = I_{\varphi}(s)$, 则电机的转矩方程为:

$$T_e^*(s) = K_t I_{\varphi}^*(s) = (J_s + B) \omega_m(s) + T_L(s) \quad (13)$$

(10) 式对应的时间离散化方程为:

$$\omega_m(z) = \frac{\gamma I_{qs}^*(z) - \lambda T_L(z)}{z - \theta} \quad (14)$$

$$\omega_m(k+1) = \theta \omega_m(k) + \gamma I_{qs}^*(k) - \lambda T_L(k)$$

其中, $\theta = \exp(-B T_s / J)$, T_s 为采样周期

$$\gamma = \frac{K_t(1 - \theta)}{B}, \quad \lambda = \frac{\gamma}{K_t}$$

负载扰动 T_L 辨识用单神经网络如图 5 所示, 输入为 $I_{\varphi}^*(k-1)$ 、 $\omega_m(k-1)$ 和 λ , T_L 、 θ 和 γ 为神经网络权重, 输出为转速估计值 $\hat{\omega}_m(k)$ 。定义输出误差函数为:

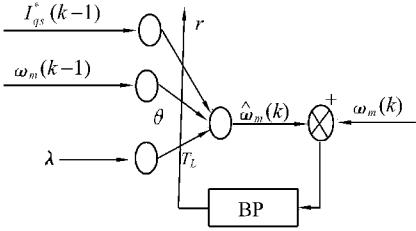


图 5 负载转矩扰动神经网络辨识结构图

Fig 5 Diagram of torque disturbance neural network identification

$$e(k) = \omega_m(k) - \hat{\omega}_m(k) \quad (15)$$

权重 T_L 按 BP 算法调整, 调整公式为:

$$T_L(n+1) = T_L(n) - \eta e(n) \lambda(n) \quad (16)$$

其中, n 为对应时刻 k 的迭代次数, η 为收敛系数。

转速估计值 $\hat{\omega}_m$ 为:

$$\hat{\omega}_m(k+1) = \theta \omega_m(k) + \gamma I_{\varphi}^*(k) - \lambda T_L(k) \quad (17)$$

由于在转子电阻变化辨识和补偿后, θ 、 γ 和 λ 参数都为常数, 因此不断通过调节权重 $T_L(k-1)$, 使 $e(k)$ 趋于 0, 就可得到负载扰动 T_L 。

3 计算机仿真结果

应用 MATLAB 软件包对本文的系统和方法进行仿真分析, 仿真时速度调节器采用 PI 调节器, $K_P = 2.65$, $K_I = 1.85$, 仿真所用的电机参数为: $L_m = 0.1363 \text{ H}$, $L_s = 0.1452 \text{ H}$, $L_r = 0.1456 \text{ H}$, $R_s = 1.1 \Omega$, $R_r = 1.3 \Omega$, $U_n = 220 \text{ V}$, $p = 2$, $J = 0.068$

Nms^2/rad , $B=0.005\ 15\ \text{Nms}/\text{rad}$, $T_s=0.1\ \text{ms}$ 。

转子电阻补偿前后和负载扰动补偿前后转速响应曲线如图 6 和图 7 所示。仿真曲线表明系统能有效地抑制和补偿转子电阻变化和负载扰动的影响，系统具有较强的鲁棒性和良好的动、稳态特性。

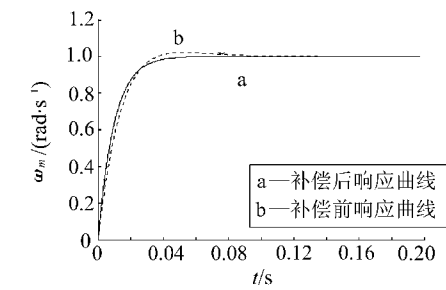


图 6 转子电阻补偿前后转速动响应

Fig 6 Dynamic speed response with resisance compensation

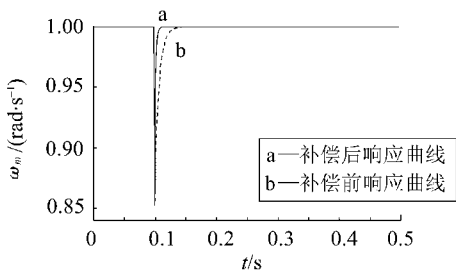


图 7 负载扰动补偿前后转速动态响应

Fig 7 Dynamic speed response with load disturbance

4 结 论

通过理论推导和分析，建立了恒磁链矢量控制感应电机转矩扰动和转子电阻辨识模型及在线辨识的方案，提出了矢量控制感应电机的自适应控制方案，理论推导和计算机仿真都证明了此方法的可行性和有效性。自适应控制方案和参数辨识方法具有结构简单、物理概念清晰和便于应用等优点。

参考文献:

[1] 周箴, 万淑芸, 王 离九. 转子电阻变化对矢量控制的影响[J]. 电气自动化, 1998, 20(3): 18—20.

[2] RICEARDO M, SERGEI P, PATRIZIO T. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42 (5): 508—515.

[3] SHIEH H J, SHYU K K. Nonlinear sliding-mode torque control with adaptive backstepping approach for induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 380—389.

[4] 秦 亿, 李浚源. 现代交流电机控制技术基础[M]. 广州: 广东科技出版社, 1993.

[5] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

Adaptive Control of Vector Controlled Induction Motor
Based on Parameter Identification

XU Xiao zeng, LI Ye shong, QIN Yi

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An on line identification project of load torque disturbance and rotor resistance for vector controlled induction motor is proposed, and then the adaptive control project with load torque disturbance and rotor resistance variation of vector controlled induction motor is also presented. Theoretical analysis and computer simulation demonstrate that the method is effective and simple.

Key words: torque disturbance and rotor resistance; on line identification; adaptive control; vector controlled