

文章编号: 1001-0920(2001)05-0581-05

自适应模糊控制在感应电动机 调速系统中的应用研究

孙笑辉, 韩曾晋, 张曾科
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对基于直接转矩控制的感应电动机调速系统低速运转时由定子电阻变化引起的转速静差问题, 提出一种自适应模糊控制方法。首先给出定子电阻变化量的模糊估计器和感应电动机直接转矩控制的模糊实现, 在此基础上提出自适应模糊控制方案。仿真实验表明, 该方案能够解决调速系统在低速范围内的静差问题。

关键词: 自适应模糊控制; 模糊估计; 调速系统; 直接转矩控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Application Research of Adaptive Fuzzy Control to Speed Regulating System of Induction Motor

SUN Xiao-hui, HAN Zeng-jin, ZHANG Zeng-ke

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Due to the variation of stator resistance in a speed regulating system of induction motor based on direct torque control, static speed error is produced in low speed. A fuzzy estimator of stator resistance variation and a fuzzy adaptive controller based on direct torque control are designed. Then an adaptive fuzzy control scheme is proposed. Simulation results show that a great improvement in speed accuracy can be achieved.

Key words: adaptive fuzzy control; fuzzy estimation; speed regulating system; direct torque control

1 引言

感应电动机直接转矩控制系统(DTC)具有使用电动机参数少、动态响应快等特点, 基于 DTC 可以构造一个闭环调速系统^[1]。在高速运转时, 该系统能够获得动、静态精度较高的转速^[1]。但该系统的一个不足之处表现为: 在低速范围内, 定子电阻变化导致转速产生较大的静差, 不能满足系统对转速的控制精度要求, 降低了系统的控制性能。因此有必要研

究低速范围内能满足对控制性能要求的控制方法。

基于 DTC 的模糊实现比传统的开关表实现具有更好的动态性能^[2], 因此本文采用模糊逻辑来实现 DTC 控制。由于定子电阻的变化量不易测量且很难准确计算^[3], 故采用模糊估计器来估计定子电阻的变化量。据此, 本文提出一种自适应模糊控制方案。其主要思路是: 利用估计出的定子电阻变化量, 计算转矩和磁通中由定子电阻变化量引起的误差, 根据该误差在线实时修改模糊控制器的参数, 使转

收稿日期: 2000-05-26; 修回日期: 2000-08-04

作者简介: 孙笑辉(1968—), 女, 辽宁大连人, 博士生, 从事电气传动、智能控制等研究; 韩曾晋(1932—), 男, 湖北武汉人, 教

© 1994-2011 中国知网, 版权所有。CNKI Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

速保持为设定值,从而改进系统在低速范围内的控制性能。

2 模糊估计器设计

定子电阻的变化量 ΔR_s 与定子电流幅值的变化量 ΔI_s 及其变化率 ζ_{I_s} 之间,是一个复杂的非线性函数的关系,很难用精确的数学模型描述出来,因此适于采用模糊逻辑的方法来估计。关于该方法的原理可以参阅文献[4],这里只概述本文所使用模糊估计器的建立过程。

首先确定输入量和输出量。设实测的定子电流幅值为 $I_s(k)$,可以表示为

$$I_s(k) = \overline{i_{s\alpha}^2(k) + i_{s\beta}^2(k)}$$

其中 $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 分别为定子电流在两相坐标系 α, β 上的分量。在假设定子电阻不变且其它参数都相同的情况下,定子电流幅值为 $I_s^*(k)$,则由定子电阻变化引起的定子电流幅值变化量 $\Delta I_s(k)$ 及其变化率 $\zeta_{I_s}(k)$ 可表示为

$$\Delta I_s(k) = I_s^*(k) - I_s(k) \quad (1)$$

$$\zeta_{I_s}(k) = \Delta I_s(k) - \Delta I_s(k-1) \quad (2)$$

设定子电阻在 $k-1$ 时刻变化量为 $\Delta R(k-1)$, k 时刻变化量为 $\Delta R(k)$,则输出量选择

$$\delta_{\Delta R_s} = \Delta R_s(k) - \Delta R_s(k-1) \quad (3)$$

然后确定输入量和输出量的模糊子集。综合考虑估计精度、运算效率等多方面的要求,本文对每个输入量、输出量都选择5个模糊子集,即NL(负大),NS(负小),ZE(零),PS(正小),PL(正大)。其中,NL和PL的隶属度函数为梯形,NS,ZE,PS的隶属度函数为三角形,每个模糊子集的取值范围可根据具体的感应电动机参数而定。模糊规则可表示为

$$R_i: \text{If } \Delta I_s(k) \text{ is } A_i \text{ and } \zeta_{I_s}(k) \text{ is } B_i$$

$$\text{then } \delta_{\Delta R_s} \text{ is } C_i$$

其中, R_i 代表第 i 条规则 ($i = 1, 2, \dots, 25$), A_i, B_i, C_i (NL, NS, ZE, PS, PL)。模糊规则库如表1所示。

表1 定子电阻变化量估计模糊规则

$\zeta_{I_s}(k)$	$\Delta I(k)$				
	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	NL	NS	ZE	ZE	PS
NS	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NL	NS	ZE	ZE	ZE
PS	NS	NS	ZE	PS	PS
PL	NS	ZE	ZE	PS	PL

模糊推理包括模糊逻辑与、蕴含和聚合,分别表示为

$$\epsilon_i = \min(\mu_{A_i}(\Delta I_s(k)), \mu_{B_i}(\zeta_{I_s}(k))) \quad (4)$$

$$\mu_i(\delta_{\Delta R_s}) = \sup(\min(\epsilon_i, \mu_{C_i}(\delta_{\Delta R_s}))) \quad (5)$$

$$\mu_C(\delta_{\Delta R_s}) = \max_{i=1}^{25} \mu_i(\delta_{\Delta R_s}) \quad (6)$$

式中, $\mu_{A_i}(\Delta I_s(k)), \mu_{B_i}(\zeta_{I_s}(k)), \mu_{C_i}(\delta_{\Delta R_s})$ 分别为 $\Delta I_s(k), \zeta_{I_s}(k), \delta_{\Delta R_s}$ 相应于模糊集 A_i, B_i, C_i 的隶属度, C 表示 $\delta_{\Delta R_s}$ 的取值范围。

解模糊化采用重心法,可表示为

$$\delta_{\Delta R_s}^0 = \frac{\mu_C(\delta_{\Delta R_s}) \delta_{\Delta R_s} d\delta_{\Delta R_s}}{\int \mu_C(\delta_{\Delta R_s}) d\delta_{\Delta R_s}} \quad (7)$$

式中 $\delta_{\Delta R_s}^0$ 为所求的输出值。

3 感应电动机直接转矩控制的模糊实现

所谓模糊实现就是用模糊控制算法代替传统的开关表控制,其原理参见文献[2]。下面简述本文不同于文献[2]的设计过程。

设 T_e, φ 和 θ 分别为利用不变的定子电阻所估计的电磁转矩、定子磁通幅值和幅角, T_e^* 和 φ^* 分别为电磁转矩和定子磁通幅值的参考值,其误差为

$$E_{T_e} = T_e^* - T_e, \quad E_{\varphi} = \varphi^* - \varphi \quad (8)$$

选择 $E_{T_e}, E_{\varphi}, \theta$ 作为模糊控制的输入量,开关状态 n ($n = 1, 2, \dots, 7$) 为模糊控制的输出量。为了简化计算,本文对 E_{T_e} 和 E_{φ} 分别选择3个模糊子集,即NE(负误差),ZE(零),PE(正误差)。 θ 选择6个模糊子集,即ANG1, ANG2, ..., ANG6。其中NE和PE的隶属度函数选择为梯形,ZE的隶属度函数为三角形,ANG1, ANG2, ..., ANG6的隶属度函数为梯形。输出量 n 是离散值,取单值模糊子集 N_1, N_2, \dots, N_7 ,其隶属度函数取棒状图。各模糊子集的取值范围依感应电动机的具体参数而定,这里不再讨论。

由模糊控制输入量、输出量所描述的规则如下

$$R_i: \text{if } E_{T_e} \text{ is } A_i \text{ and } E_{\varphi} \text{ is } B_i \text{ and } \theta \text{ is } C_i$$

$$\text{then } n \text{ is } N_i$$

其中, R_i 代表第 i 条规则, A_i, B_i (NE, ZE, PE), C_i (ANG1, ANG2, ..., ANG6), N_i (N_1, N_2, \dots, N_7), 模糊规则库如表2所示。模糊推理及解模糊化法参阅文献[2]。

表 2 开关状态规则库

θ	E_r	E_φ		
		NE	ZE	PE
ANG1	NE	2	3	3
	ZE	1	1	3
	PE	6	1	1
ANG2	NE	3	4	4
	ZE	1	1	4
	PE	7	1	1
ANG3	NE	4	5	5
	ZE	1	1	5
	PE	2	1	1
ANG4	NE	5	6	6
	ZE	1	1	6
	PE	3	1	1
ANG5	NE	6	7	7
	ZE	1	1	7
	PE	4	1	1
ANG6	NE	7	2	2
	ZE	1	1	2
	PE	5	1	1

压、电流和电阻, n_p 为极对数。

下面分析定子电阻变化如何引起转速中存在大的静差。假设定子电阻不变时, 磁通和转矩的估计量分别为 φ 和 T_e 。实际上, 定子电阻是随工况变化而变化, 有时其变化量可达到初值的 70%。考虑到定子电阻变化的实际情况, 设磁通和转矩的真实值分别为 φ_r 和 T_{er} 。当感应电动机在中、高速范围内运行时, 式(9) 中由 R_s 的变化量引起的电压降相对 u_s 是一个非常小的量, 磁通和转矩的估计误差 $\varphi - \varphi_r$ 和 $T_e - T_{er}$ 都可忽略不计。而在低速范围内, 由 R_s 的变化量引起的电压降相对 u_s 是一个不能忽略的量, 有 $\varphi > \varphi_r, T_e > T_{er}$ 。在这种情况下, 若仍以 T_e 作为真实值去控制转矩, 根据转矩与速度的关系 $\omega = \frac{n_p}{J} (T_e - T_L) dt$, 此时应有 $\omega = \omega_{ref}$ 成立。但实际速度 $\omega = \frac{n_p}{J} (T_{er} - T_L) dt$, 因为 $T_e > T_{er}$, 所以 $\omega < \omega_{ref}$, 这便导致静差。

本文采用自适应模糊控制方法来解决上述问题。首先利用模糊估计器估计定子电阻, 然后计算被控制量的估计误差, 利用该误差来调整模糊控制器。修改模糊控制器有 3 种选择方案: 调整控制规则, 修改隶属度函数, 修改规范因子。这里所用的模糊控制器是采用连续的 Mamadani 型, 不存在规范化因子。调整控制规则就是根据情况增加或删除控制规则, 实现起来较为困难, 因此选择修改隶属度函数的方法。系统总体结构可分为 3 部分: 定子电阻变化量估计部分, 自适应模糊控制部分, 速度控制部分, 其结构如图 1 所示。其中速度控制器选择 PID 控制。

首先计算由定子电阻变化引起的磁通和转矩误差。设 ΔR_s 是模糊估计器估计出的定子电阻的变

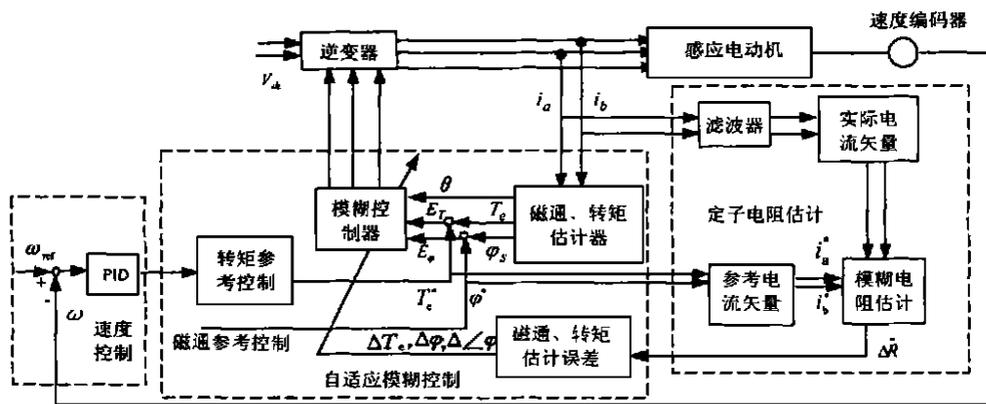
4 基于直接转矩控制的感应电动机自适应模糊调速系统

在感应电动机 DTC 系统的外层增加一个反馈回路, 可以构成基于 DTC 的双闭环调速系统。转速可利用速度传感器测量得到, 磁通和转矩可利用下列数学模型估计得到

$$\varphi = (u_s - i_s R_s) dt \tag{9}$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\varphi_{\beta} i_{\alpha} - \varphi_{\alpha} i_{\beta}) \tag{10}$$

式中, φ 为磁通, T_e 为转矩; u_s, i_s 和 R_s 分别为定子电



化量,则定子电阻变化时的感应电动机定子磁通 ϕ_{sa} 和电磁转矩 T_{ea} 估计模型为

$$\phi_{sa} = (u_s - I_s(R_s + \hat{\Delta R}_s)) dt \quad (11)$$

$$T_{ea} = \frac{3}{2} n_p (\phi_{sa} i_{s\beta} - \phi_{sa\beta} i_{s\alpha}) \quad (12)$$

假设定子电阻不变时感应电动机估计的定子磁通 ϕ_{se} 和电磁转矩 T_{ee} 估计模型为

$$\phi_{se} = (u_s - I_s R_s) dt \quad (13)$$

$$T_{ee} = \frac{3}{2} n_p (\phi_{se} i_{s\beta} - \phi_{se\beta} i_{s\alpha}) \quad (14)$$

式(14)减式(12),得到由 ΔR_s 引起的电磁转矩的误差为

$$\Delta T_e = T_{ee} - T_{ea} = \frac{3}{2} n_p \left[i_{s\beta} i_{s\alpha} \Delta R_s dt - i_{s\alpha} i_{s\beta} \Delta R_s dt \right] \quad (15)$$

式(13)减(11),得到由 ΔR_s 引起的定子磁通幅值的误差

$$\begin{cases} |\Delta \phi| = \overline{\Delta \phi_{s\alpha} + \Delta \phi_{s\beta}} \\ \Delta \phi_{s\alpha} = i_{s\alpha} \Delta R_s dt, \quad \Delta \phi_{s\beta} = i_{s\beta} \Delta R_s dt \end{cases} \quad (16)$$

设由 ϕ_{sa} 计算出的定子磁通实际幅角为 ϕ_{sa} , 由 ϕ_{se} 计算出的定子磁通实际幅角为 ϕ_{se} , 则由 ΔR_s 引起的定子磁通幅角的误差为 $\Delta \phi = \phi_{se} - \phi_{sa}$ 。

在模糊控制系统中,输入量的隶属度是决定输出量准确与否的关键因素。上述模糊控制器控制性能差的主要原因是:定子电阻的变化导致求得的输入量隶属度不准确,使输出量有误差。这可以通过调整隶属度函数来解决。调整隶属度函数可有两种方法:①调整中心点位置;②调整隶属度函数形状。方法②计算比较复杂,因此这里选择计算量较小的方法①。

以转矩为例说明如何调整中心点位置。转矩的参考值与假设定子电阻不变时估计值的误差为 E_{T_e} 。假设定子电阻不变时估计值与定子电阻变化时估计值之间的误差为 ΔT_e , 则参考值与定子电阻变化时估计值之间的误差为 $\lambda_{T_e} = E_{T_e} + \Delta T_e$ 。图2中B点所示为 E_{T_e} , A点所示为 λ_{T_e} , 它们对应模糊子集 PE 的隶属度分别为 ρ_1 和 ρ_2 。这里 ρ_2 是所要得到的准确的隶属度,当转矩误差的输入量为 E_{T_e} 时,为了得到准确的隶属度,应把隶属度函数 PE 向左平移至 PE1, 平移量由几何关系求得为 ΔT_e , 此时 B 点对应新的模糊集 PE1 的隶属度等于 ρ_2 。设 $m_{PE}^{old}(i)$ 为模糊子集

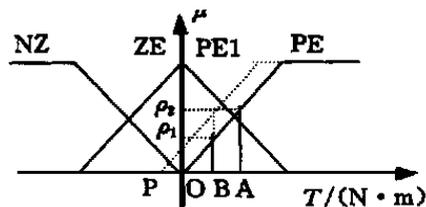


图2 转矩的隶属度函数调整

PE 的一个中心点 i 的位置, m_{PE}^{new} 为修改后的中心点位置, 则二者之间有下列关系

$$m_{PE}^{new}(i) = m_{PE}^{old}(i) - \gamma \Delta T_e \quad (17)$$

式中 γ 是学习率,其作用是调整控制器收敛速度,可根据定子电阻的估计精度取“1”附近的一个值。NE 和 ZE 隶属度函数的调整及其它量模糊子集的调整与此类似。同理,可以得到磁通幅值、幅角的模糊子集的中心点位置修改方法。磁通幅值、幅角的模糊子集分别以 PE, ANG1 为例,其中心点的修改方法分别为

$$h_{PE}^{new}(i) = h_{PE}^{old}(i) - \gamma |\Delta \phi| \quad (18)$$

$$d_{ANG1}^{new}(i) = d_{ANG1}^{old}(i) - \gamma \Delta \phi \quad (19)$$

下面讨论如何提高计算效率。对于一个 m 维的 MISO 系统, 设第 k 个输入变量的论域被划分的模糊子集可表示为: $A_{k1}, \dots, A_{kj}, \dots, A_{kn}$, 设相邻子集的重叠度

$$\delta = A_{kj} \cap A_{k,j+1} / \min(A_{kj}, A_{k,j+1})$$

当 $\delta > 0.5$ 时, 则对于任意一个输入 Y , 被激发的规则总数为 2^m 个。根据这一原理, 当该自适应模糊控制器中的每个输入量模糊子集的重叠度 $\delta > 0.5$ 时, 每次被激发规则数 > 8 条。因此, 只需修改这些被激发的规则所对应的模糊子集的中心点, 而不必每次把所有的模糊子集都修改一次, 这样可降低计算的复杂度, 提高计算效率。

5 仿真实验

选用 Matlab 的动态仿真工具 SimuLink 2.2 进行仿真。三相感应电动机的定子、转子电阻值分别为 0.5Ω 、 0.472Ω 。参考转矩由速度控制器计算得到, 磁通的参考值为 0.4 Wb 。定子电阻变化及其估计结果如图 3 所示。图 4 是当定子电阻变化时自适应模糊调速系统(AFTS)的速度, 以及当 γ 取不同值时所得到的多组速度。比较这多组值可知, 当 $\gamma = 0.95$ 时所得结果比较理想(实际速度与设定值重合)。由于篇幅所限, 该系统的磁通和转矩图没有给出。

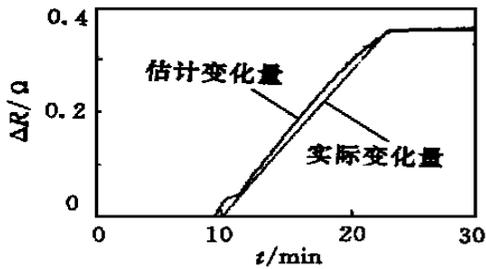


图 3 模糊电阻估计

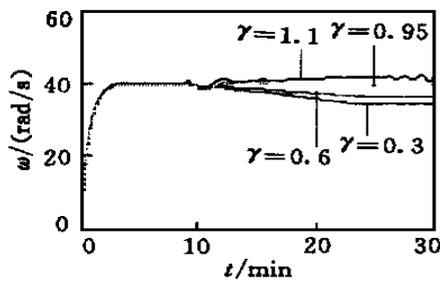


图 4 本方案的速度曲线

6 结 论

仿真实验表明, 当定子电阻变化较大且电动机在低速范围内运行时, 本方案能使磁通、转矩和速度都保持为设定值。当定子电阻不变时, ΔT_e 、 $|\Delta \Phi|$ 和

$\Delta \Phi$ 都为 0, 自适应模糊调速系统转化为一般的模糊调速系统。该系统高速运行时, 由定子电阻变化量引起的磁通和转矩的误差非常小, ΔT_e 、 $|\Delta \Phi|$ 和 $\Delta \Phi$ 近似为 0, 此时自适应模糊调速系统可近似认为是一个模糊调速系统。因此, 该方案能有效解决基于 DTC 的感应电动机调速系统在低速范围内由定子电阻变化引起的静差问题。

参考文献:

- [1] James N Nash. Direct torque control: Induction motor vector control without an encoder[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1997, 33(2): 333-341.
- [2] Sayeed Mir, Malik E Elbuluk. Fuzzy implementation of direct self control of inductance machines [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1994, 30(3): 729-735.
- [3] Kurt Fischle. An improved stable adaptive fuzzy control method [J]. IEEE Trans on Fuzzy Syst, 1999, 7(1): 27-40.
- [4] Sayeed Mir, Malik E Elbuluk. PI and fuzzy estimators for tuning the stator resistance in direct torque control of inductance machines [J]. IEEE Trans on Power Electr, 1999, 35(2): 279-286.
- [5] 赵振宇, 徐用懋. 模糊理论和神经网络的基础与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

中国自动化学会第 17 届青年学术年会(YAC 2002) 征文通知

中国自动化学会第 17 届青年学术年会(YAC 2002) 将于 2002 年 7 月初在避暑胜地北戴河海滨召开。会议设优秀论文奖和优秀应用论文奖。

会议主题: 未来自动化领域的机遇和挑战

征文范围: 1. 广义系统、大系统、非线性系统、混沌系统、系统稳定与镇定; 2. 自适应、预测、变结构控制、 H 控制和鲁棒控制; 3. 智能控制、模糊控制、人工智能与专家系统; 4. 系统滤波、辨识与建模、参数估计; 5. 频域控制、最优控制、 H 优化、动态规划; 6. 故障诊断与容错控制; 7. 神经网络及应用; 8. 机器人与机器人控制; 9. 离散事件动态系统; 10. 混杂系统及控制; 11. 计算机视觉、图像处理与模式识别; 12. 自动化仪表与过程控制; 13. 电力系统及其自动化; 14. 电机驱动及运动控制; 15. 传感器与检测技术; 16. 软件工程、并行处理; 17. 计算机集成制造系统; 18. 计算机软硬件技术及其应用; 19. 系统工程理论、方法及应用; 20. 自动化指挥系统; 21. 数据融合与软测量; 22. 单片机控制及应用

技术; 23. 企业改革、发展策略及管理决策; 24. 工业过程与生产管理; 25. 图书馆自动化与数字图书馆技术; 26. 其它。

论文要求: 1. 具有一定的学术或实用价值, 未在国内外学术期刊或会议上发表; 2. 第一作者的年龄一般不超过 40 岁; 3. 来稿一式三份, 中英文皆可, 用 word 97 编排, A4 纸打印并附软盘; 4. 写作格式参见《自动化学报》; 5. 来稿请注明文章属“征文范围”的哪一类文稿; 6. 写清联系人的详细通讯地址、电话、电子邮件信箱; 7. 文责自负。

论文出版: 被录用论文将由正式出版社出版

截稿日期: 2002 年 3 月 15 日

录用通知: 2002 年 5 月 15 日以前

联系地址: 066004 秦皇岛燕山大学电气工程学院 YAC 2002 组委会; 联系人: 关新平 罗小元; 电话: 0335-8057041, 8057034; 传真: 0335-8051148; E-mail: xpguan@ysu.edu.cn