

无模型自适应控制在永磁同步电机 转速中的仿真研究 *

吴长波¹, 刘林山²

(1. 中冶焦耐(大连)工程技术有限公司, 辽宁 大连 116085;
2. 吉林电子信息职业技术学院 机电技术学院, 吉林 吉林 132021)

摘要: 针对永磁同步电机非线性、时变不确定性及难以建立精确的数学模型等问题, 不同于动态线性时变模型替代一般非线性系统, 提出一种基于模糊过程和系统输出误差的无模型控制器。基于反馈线性化通过自适应模糊推理估计动态系统非线性函数和控制律; 基于系统输出误差提出三个控制规则生成恰当信号控制电机转速。在 Simulink 环境下建立控制器和永磁同步电机转速仿真系统, 仿真分析结果验证了提出方法控制电机转速的可行性和有效性。

关键词: 无模型自适应控制; 模糊过程; 反馈线性化; 输出误差; 永磁同步电机

中图分类号: TP273. +2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2015)08-0073-06

Simulation of Model Free Adaptive Control in Permanent Magnet Synchronous Motor

WU Chang-bo¹, LIU Lin-shan²

(1. ACRE Coking and Refractory Engineering Consulting Corporation (Da lian) MCC, Dalian 116085 China;
2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132021 China)

Abstract: For permanent magnet synchronous motor (PMSM) that is nonlinear, time-varying uncertain and difficult to establish a precise mathematic model, different from the dynamic linear model to replace the general nonlinear system, an approach of model free adaptive control (MFAC) based on feedback linearization and output error of the system is proposed. Nonlinear function of dynamic system is estimated by adaptive fuzzy procedure based on feedback linearization, and three rules based on output errors of the system to generate appropriate control signals to the motor velocity is presented. The simulation model of the velocity control for MFAC and PMSM velocity is established in Simulink. Simulation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: MFAC; fuzzy procedure; feedback linearization; output error; PMSM

1 引言

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 以其简单、高效的优势, 在航空航天、数控机床、工业过程等领域获得广泛应用。然而, PMSM 本身存在非线性、时变不确定, 难以建立数学模型等

问题, 使得实现高性能控制比较困难。尽管, 控制策略已经采用模糊逻辑控制、滑模控制以及自适应控制等智能控制方法。但是, 缺乏系统的分析, 滑动模态的抖振仍是必须解决的问题。因此, 有必要寻求新的方法来进行改进。

相对于其他智能控制理论, 无模型自适应控制 (Model Free Adaptive Control, MFAC) 的不同之处在于不依赖被控对象的数学模型, 仅用受控系统的 I/O 数

* 基金项目: 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究资助项目 (2010476)

收稿日期: 2014-07-10

据来设计控制器。因此，能够为具有非线性、大滞后、大惯性，以及明显的不确定性，采用传统的控制算法有局限性的问题提供思路^[1]。目前，无模型控制已成功用于化工、污水PH值控制^{[1][2]}以及永磁直线电机控制^[3]等。

为此，不同于引入伪偏导数和伪阶数，利用动态线性时变模型代替一般非线性系统的思想^{[1][2]}，基于反馈线性化和系统输出误差提出一种控制器设计方法。基于反馈线性化通过模糊推理估计动态系统非线性函数和控制律；基于系统输出误差提出三个控制规则生成恰当的信号控制电机转速。将控制器用于PMSM转速控制，在Simulink环境下搭建仿真模型，仿真实验结果验证了提出方法的可行性和有效性。

2 无模型自适应控制器

2.1 反馈线性化

SISO非线性系统一般形式：

$$\dot{x} = f(x(t)) + g(t)u(t) \quad (1)$$

反馈线性化方法是通过式(1)中非线性项抑制系统动态方式确定控制律，并采用适当的参考输入替换控制律：

$$u(t) = g^{-1}(x)(-f(x) + v_{rep}(t)) \quad (2)$$

式中 $v_{rep}(t)$ 表示参考输入。无模型控制核心思想是仅

利用系统I/O数据改进性能^[1]。因此，需要利用 $\hat{f}(x(t))$ 和 $\hat{g}(x(t))$ 估计未知系统动态线性函数 $f(x(t))$ 和 $g(x(t))$ ，或者利用 $\hat{u}(x(t))$ 估计控制律 $u(x(t))$ 。为简化后续表示忽略 t ，估计算法采用基本模糊隶属度函数：

$$f(x) \rightarrow \hat{f}(x) = \frac{\sum_{i=0}^l \omega_i \mu_i}{\sum_{i=0}^l \mu_i} \quad (3)$$

式中 l 是模糊作用的数量， μ_i 是第 i 个模糊作用的隶属度函数， ω_i 是第 i 个模糊规则的结果，通常可以表示为一系列连续函数 $z(x)$ 的线性组合：

$$z(x) = [1 \ z_1(x) \ z_2(x) \ \dots \ z_{m-1}(x)]^T \quad (4)$$

$$\omega_i = a_{i,0} + a_{i,1}z_1(x) + \dots + a_{i,m-1}z_{m-1}(x) \quad (5)$$

式中 $z_k(x) \in \mathbb{R}, k=1, 2, \dots, m-1$ ，令

$$A^T = \begin{bmatrix} a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,m-1} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{l,0} & a_{l,1} & \dots & a_{l,m-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

于是 $\hat{f}(x)$ 可改写为：

$$f(x) = z^T \cdot A \cdot \zeta + \hat{e}(x) = \omega \cdot \zeta + \hat{e}(x) \quad (7)$$

$$\hat{f}(x) = z^T \cdot A \cdot \zeta \quad (8)$$

其中 $\zeta = [\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_l]/\sum_{i=0}^l \mu_i$ ， \hat{e} 是模糊逼近误差， A 由自适应律更新：

$$\dot{A} = -Q^{-1} \cdot z \cdot \zeta^T \cdot \bar{e}_s \quad (9)$$

Q 通常选择很小的常值， \bar{e}_s 表示系统输出误差：

$$\bar{e}_s = x_{out} - x_{ref} \quad (10)$$

选择模糊规则

$$\text{IF } X \text{ is } F_i \text{ then } \omega_i = f_i(z) \quad (11)$$

$f_i(z)$ 对应用 $z^T \cdot A$ 的第 i 行，于是可用 $\hat{f}(x)$ 估计未知的非线性函数 $f(x)$ 。

2.2 无模型控制器

对于一般连续系统，仅在输出采样，这些样本点用于设计无模型控制器，系统动态估计定义如下：

$$\tilde{f}(k) = \hat{u}_f^T(k) \quad (12)$$

$$\tilde{g}(k) = \hat{u}_g^T(k) \quad (13)$$

式中 $\hat{u}_f(k)$ ， $\hat{u}_g(k)$ 由下式更新：

$$\hat{u}_f(k+1) = \hat{u}_f(k) + \alpha_f e_f^T(k+1) \quad (14)$$

$$\hat{u}_g(k+1) = \begin{cases} \hat{u}_g(k) + \beta_g u_c(k) e_f^T(k+1) & I=1 \\ \hat{u}_g(k) & I=0 \end{cases} \quad (15)$$

式中 α_f ， β_g 是关于 $\hat{u}_f(k)$ ， $\hat{u}_g(k)$ 的常数， $e_f(k)$ 表示滤波跟踪误差：

$$e_f(k) = e_n^f(k) + \lambda_1 e_{n-1}^f(k) + \dots + \lambda_n e_1^f(k) \quad (16)$$

$$e_n^f(k) = y(k) - y_d(k+n-1) \quad (17)$$

式中 $\{\lambda_j\}_{j=1}^n$ 是预测误差系数， y_d 表示期望输出， e_n^f 是系统输出误差。式(2)可表示为：

$$u(k) = \tilde{g}^{-1}(k)(-\tilde{f}(k) + v_{rep}(k)) \quad (18)$$

式中 $v_{rep}(k)$ 定义如下：

$$v_{rep}(k) = k_v r(k) + y_d(k+n) - \sum_{i=0}^{l-2} \lambda_{i+1} e_{n-i}^f(k) \quad (19)$$

式中 k_v 表示跟踪误差系数，如果适当选择系数值，能使 $e_f(k)$ 收敛到零，最终限制 $v_{rep}(k)$ 。同时表明 k_v 能获得更好的性能和具有快速到达期望值的趋势；然而，如果选得过大，系统也容易出现不稳定。

由式(18)可知，当 \tilde{g} 逼近零值，产生奇点问题也会使控制信号无界。因此，为避免出现奇点，将控制器分解为两个部分：

$$u_c(k) + 0.5(u_{rep}(k) - u_c(k)) \exp(\gamma(\|u_c(k)\|) - s) \quad (20)$$

$$u_c(k) - 0.5(u_{rep}(k) - u_c(k)) \exp(\gamma(\|u_c(k)\|) - s) \quad (21)$$

式中 s 是影响控制信号 $u(k)$ 的常数， $u_c(k)$ ， $u_{rep}(k)$ 定义为：

$$u_c(k) = \tilde{g}^{-1}(k)(-\tilde{f}(k) + v_{rep}(k)) \quad (22)$$

$$u_{rep}(k) = -\mu \|u_c(k)\| \text{sign}(e_f(k)) / \bar{g} \quad (23)$$

式中 μ 为鲁棒的控制信号, 其值过大或过小会影响控制信号 u 质量; \bar{g} 是常数值, 取小值会降低 u_r 对最终控制信号的影响, u_{rep} 成为决定控制信号 u 更有效的参数。 u 按照 $I=1$ 取式(20), $I=0$ 取式(21), 给出 I 的定义:

$$I = \begin{cases} 1 & \|\tilde{g}(k)\| > \bar{g}, \|u_c(k)\| < s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

式中 \bar{g} 是 \tilde{g} 较低边界, 适当的选择可避免奇点问题。 $\gamma < \ln(2/s)$, $\mu > 0$, $s > 0$ 为设计参数, 如果满足 $u_c \geq 1/\gamma$, 则 $1/\gamma$ 假定取。

据此, 基于以下三个规则设计无模型控制器, 能够产生适当的控制信号:

$$u(k) = \begin{cases} u(k-1) & \text{if } |e_I^f(k)| < th, |e_I^f(k-1)| < th \\ & |e_I^f(k)| \leq |e_I^f(k-1)| \\ -u(k-1) & \text{if } |e_I^f(k)| < th, |e_I^f(k-1)| < th \\ & |e_I^f(k)| > |e_I^f(k-1)| \\ -\eta u(k-1) & \text{if } |e_I^f(k)| > |e_I^f(k-1)| \end{cases} \quad (25)$$

式中 th 表示在上述规则中改变控制信号 u 的阈值, η 为常数。由上式可以看出这些规则能够恰当地使用后级的控制信号给下一级, 如果 k 和 $k-1$ 时刻的误差小于阈值, 如果 k 时刻误差高于前一时刻, 控制器当前时刻以前的控制信号取负值。另外, 提出的方法对非线性函数估计好于前述自适应模糊控制器原因在于系统输出误差在控制效果方面发挥了重要作用。

2.3 稳定性分析

令 Lyapunov 函数

$$V = r^T(k) + \frac{1}{\alpha_f} \text{tr}(\tilde{u}_f^T(k) \tilde{u}_f(k)) + \frac{1}{\beta_g} \text{tr}(\tilde{u}_g^T(k) \tilde{u}_g(k)) \quad (26)$$

$$+ \frac{1}{\beta_g} \text{tr}(\tilde{u}_g^T(k) \tilde{u}_g(k))$$

$I=1$ 时

$$\Delta V \leq -(1-\alpha_3) \|r(k)\|^2 + 2\alpha_4 \|r(k)\| + \alpha_5 - (1-\eta) \left\| \tilde{u}_f^T + \tilde{u}_g^T u_c - \frac{\eta}{1-\eta} k_v r(k) + g u_d + \varepsilon' \right\|^2 \quad (27)$$

其中:

$$\alpha_3 = \alpha_1 k_{vmax}^2 + 2\alpha_2 \omega_I k_{vmax} + \alpha_1 \omega_I^2$$

$$\alpha_4 = \alpha_2 \omega_0 k_{vmax} + \alpha_1 \omega_0 \omega_I$$

$$\alpha_5 = \alpha_1 \omega_0^2$$

k_{vmax} 是线性化系数 k_v 的最大值, $\eta = \alpha_f + \beta_g \|uc\|^2$, $\alpha_1 = 1 + \eta + \frac{\eta}{1-\eta}$, $\alpha_2 = \eta + \frac{\eta}{1-\eta}$, 当 $\alpha_f > 0$, $\beta_g > 0$, η 为正定, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 都大于零, 若满足

$$\|r(k)\| > \delta_{rI} \quad (28)$$

$$\|\delta_{rI}\| > \frac{\alpha_5 + \sqrt{\alpha_5^2 + \alpha_6(1-\alpha_4)}}{(1-\alpha_1)} \quad (29)$$

式(28)有非负值, 即

$$\Delta V \leq 0 \quad (30)$$

无模型控制器是李雅普诺夫渐进稳定的^[4]。

3 MFAC-PMSM 仿真

3.1 MFAC 模块

MFAC 模块作为速度控制器, 结构较为简单, 参考转速和实际转速的差值为单输入项。输出为控制信号 u 。在 Matlab 环境下, 利用 Simulink 模块搭建嵌入 S-Function 的方法, 即基本的信号由 Simulink 中提供的模块搭建, 具体的过程在 S-Function 中完成。开发出 MFAC 模块, 并进行了封装, 选中所有的模块, 在上方的 Edit 栏里选择 Create-subsystem, 如图 1 所示。

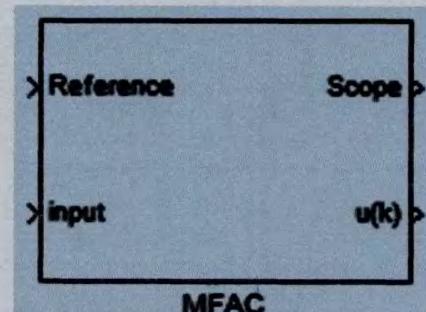


图 1 MFAC 模块

3.2 PMSM 本体模块

在 Matlab 环境下, 利用 Simulink 的 SimPower System Toolbox2.3 提供的交-直轴磁链理论建立的定子绕组按 Y 型联接的 PMSM 模块, 共有 4 个输入端, 其中前 3 个分别为 A 相、B 相、C 相输入端, 第 4 个为转矩输入端。

3.3 MFAC-PMSM 仿真分析

在整个仿真模型中, 除了上述两个模块, 还包括坐标变换模块、三相电源逆变器模块和测量模块^[5], 图 2 为 MFAC-PMSM 仿真模型的结构图。

3.4 仿真结果分析

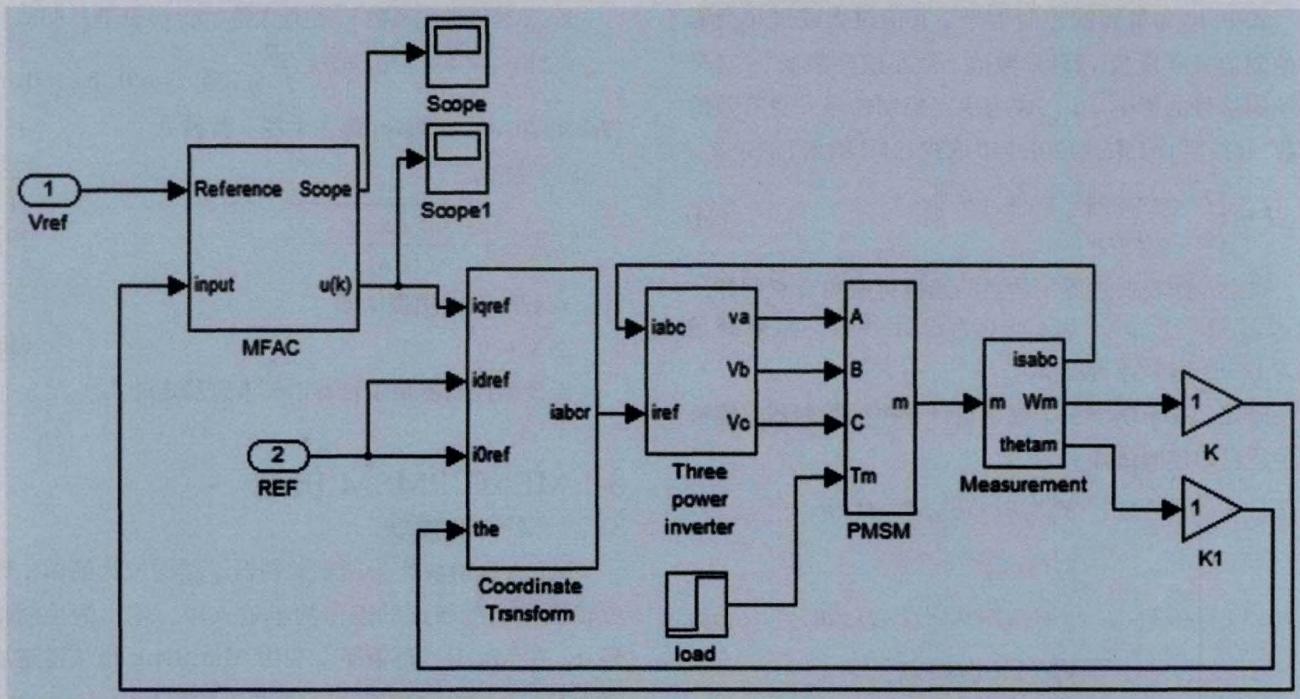


图2 MFAC-PMSM速度仿真结构图

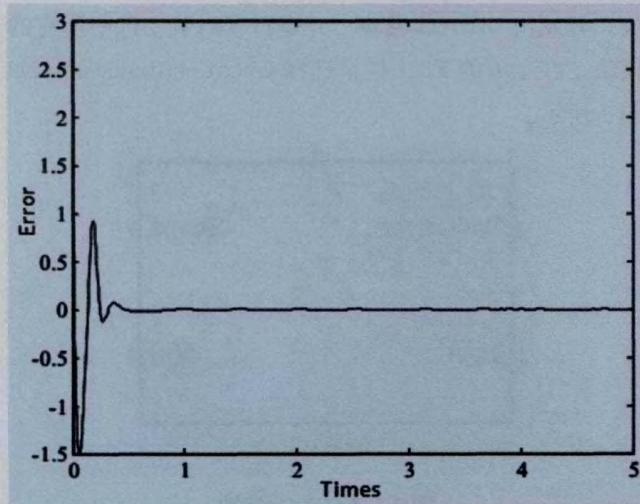


图3 误差信号

基于上述建立的仿真模型,选择电机仿真参数: 电机额定转速: $n_N=1000 \text{r/min}$, 额定功率: $P_N=3000 \text{W}$, 转子磁通: $\phi_f=0.175 \text{Wb}$, 转动惯量: $J=0.0085 \text{H}$, 粘滞系数 $B=0.025 \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$, 最大起制动转矩限定为: $12 \text{N} \cdot \text{m}$ 。MFAC控制器参数: $\mu=9$, $\alpha_f=0.1$, $\beta_g=0.15$, $s=2$, $\gamma=0.05$, $\bar{g}=0.6$, $k_v=[10 \ 0; 0 \ 10]$, $\lambda_1=0.001$, $\varepsilon=0.01$, $\eta=0$, $\hat{\mu}_f=[0.10.1]$, $\hat{\mu}_g=[1 \ 0; 0 \ 1]$ 。图3为系统输出误差信号曲线,从图中可见,误差能够具有趋于稳定的趋势。

图4表示控制信号曲线,三个规则生成的控制信号被映射到一个切换面,控制信号围绕切换面变化。图5

表述速度控制信号,从仿真结果也可以看到,适当的选择参数,无模型控制转速的效果可以达到很好。

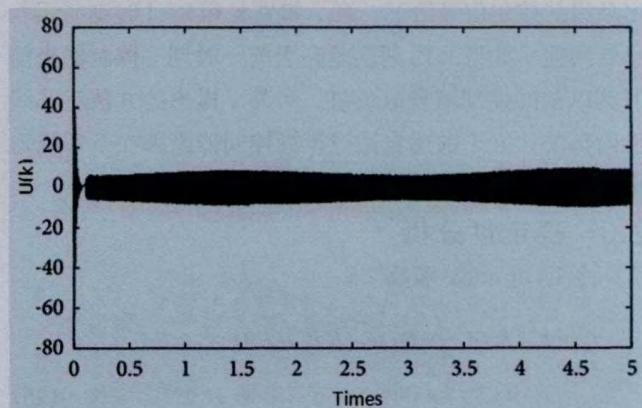


图4 控制信号

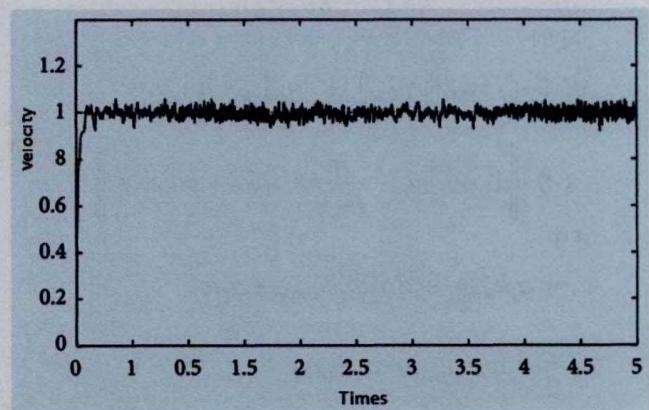


图5 转速响应曲线

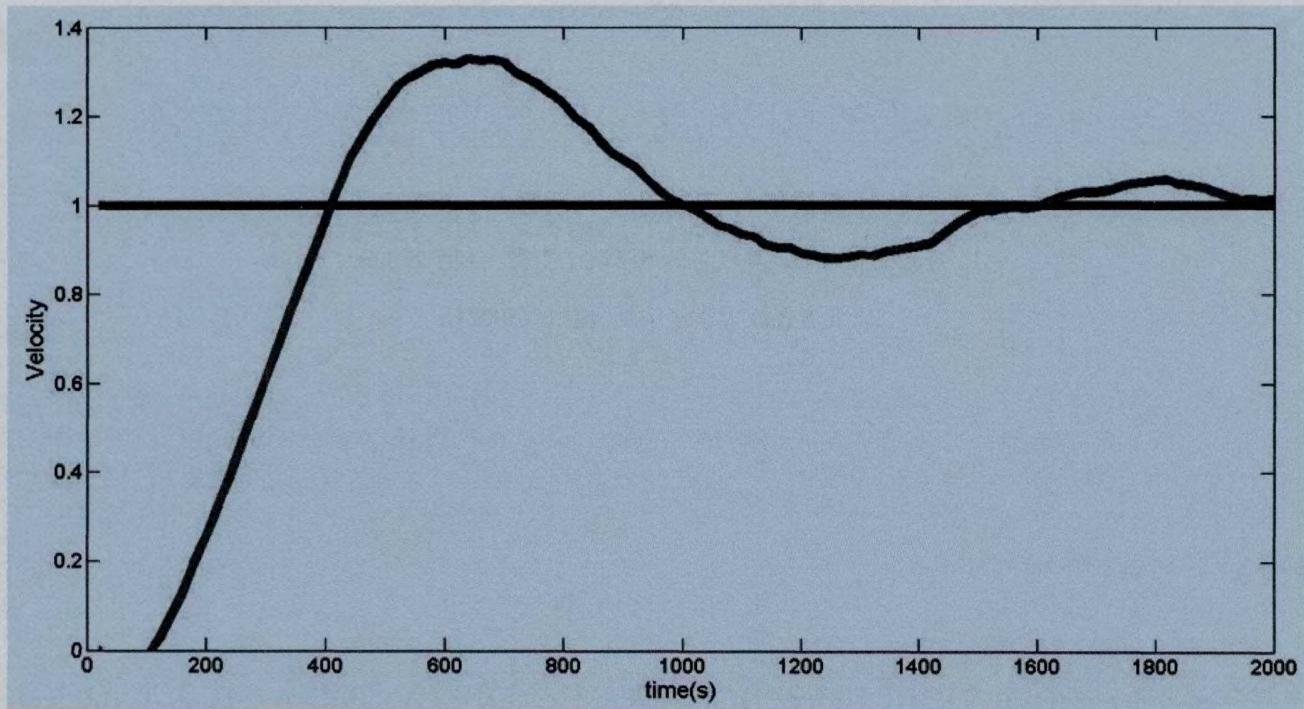


图 6(a) 伪格式方法

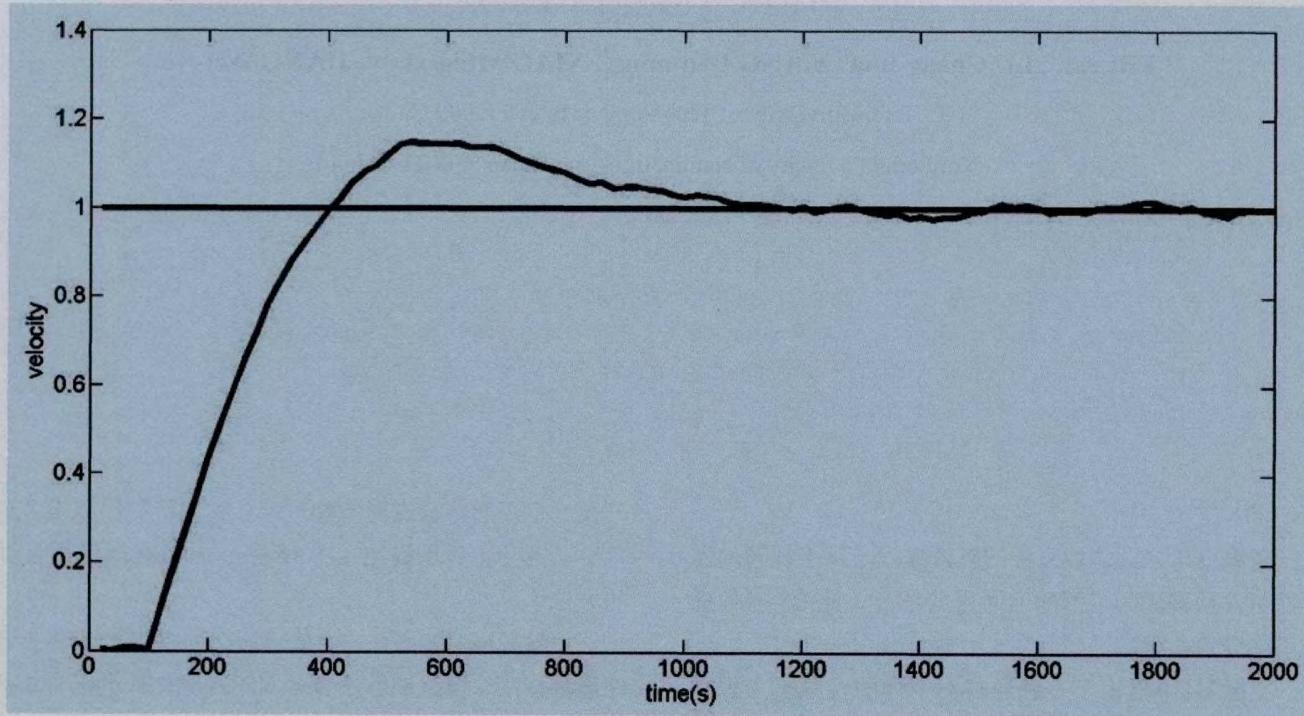


图 6(b) 提出方法

为进一步分析提出方法的可行性与效果,与引入伪格式的无模型控制方法^[3]进行仿真比较,结果如图6所示。

从仿真结果可知,适当的选取参数,提出的无模型PMSM 转速控制效果可以达到很好,而伪格式有较大的速度误差,响应比较慢,且参数敏感,稍微的变化都有

可能使控制效果不好,产生震荡,甚至失稳。在控制中,参数的选择 γ , μ , s 是非常重要的,确切的选择是有待进一步研究的问题。

4 结束语

(下转第 82 页)

- [4] ALI S,SHAH M. Floor fields for tracking in high density crowd scenes[M]//Computer Vision ECCV 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 1–14.
- [5] MIHAYLOVA L, CARMI A Y, SEPTIER F, et al. Overview of Bayesian sequential Monte Carlo methods for group and extended object tracking[J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 25(2): 1–16.
- [6] CHOI W, SAVARESE S. Understanding Collective Activities of People from Videos[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2014, 36(6): 1242–1257.
- [7] HORN B K, SCHUNCK B G. Determining optical flow[C]//1981 Technical Symposium East. International Society for Optics and Photonics, 1981: 319–331.
- [8] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487–490.
- [9] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, 5(1): 3–55.
- [10] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//IJCAI. 1981, (81): 674–679.

作者简介：李必然（1990-），男，硕士研究生，研究方向：智能信号检测。

（上接第72页）

站工程项目的实际应用中，开关变压器式高压电机软起动装置一次起动成功，将起动电流控制在1.5倍额定电流以内，母线压降6%，完全符合设计要求。开关变压器技术解决了高压电机的起动问题，在水利领域应用具有良好的发展前景和巨大的推广价值。

参考文献：

- [1] 张世全. 软启动的原理及应用[J]. *机电技术*, 2004, (2): 11–15.
- [2] 甘世红. 高压异步电动机软起动方法综述[J]. *电气传动*, 2005, (10): 3–6.
- [3] 郭秀翠. 三相异步电动机的起动控制[J]. *中国修船*, 2002, (5): 23–26.

（上接第77页）

基于反馈线性和系统输出误差设计无模型控制器，为改进非线性、不确定永磁同步电机速度控制提供思路。利用自适应模糊推理实现反馈线性化，只需系统的I/O数据，提出基于系统输出误差的三个控制规则产生控制信号。对非线性函数估计好于自适应模糊控制器，原因是由于系统输出误差在控制效果方面发挥了重要作用。在Simulink环境下，建立系统仿真模型，仿真结果验证了提出的方法对电机速度控制的可行性和有效性。

参考文献：

- [1] 韩志刚. 无模型控制器理论与应用的进展[J]. *自动化技术与应用*, 2004, 23(2): 1–6.
- [2] H. ZHONGSHENG, J. SHANGTAI. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems*

- [4] 高越农. 磁控软起动[J]. *电气时代*, 2002, (10): 15–16.
- [5] Cadirci I, Ermis M. A Solid State Direct on Line Starter for Medium Voltage Induction Motors with Minimized Current and Torque Pulsations. *IEEE Transactions on Energy Conservation*, 1999, 14(3): 402–412.
- [6] 孟彦京, 谢仕宏, 陈景文. 交流电机软启动技术的发展与分析[J]. *陕西科技大学学报*, 2004, (12): 83–87.
- [7] 孙向瑞. 多副绕组开关变压器式大功率电机软起动装置[P]. 中国 ZL 2009 2 0100823.6.
- [8] 鲁动. 基于PLC的软启动器多拖多自动启动模式的应用[J]. *信息技术*, 2012, (8): 145–147.

作者简介：周广钰（1970-），男，高级工程师，研究方向：水利水电工程电气及自动化系统设计，水利工程信息化。

- Technology, 2011, 19(6): 1549–1558.
- [3] 曹荣敏, 侯忠生. 无模型控制方法在直线电机控制中的仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(10): 2874–2877, 2881.
- [4] PEZESHKI S., BADAMCHIZADEH M. A., GHAEMI S., POOR M. A., Designing of adaptive model-free controller based on output error and feedback linearization, Abstract and Applied Analysis[J]. Hindawi Publishing Corporation, 2013: 1–13.
- [5] 王巍, 侯利民, 李洪珠. 基于Simulink的PMSM矢量控制系统仿真研究[J]. *自动化技术与应用*, 2008, 27(2): 43–45.
- [6] 王巍, 张超, 王志宏, 伦淑娟. 永磁同步电机伺服系统的模糊控制[J]. *信息技术*, 2013, (3): 17–19.

作者简介：吴长波（1974-），男，高级工程师，主要从事工厂电气自动化传动设计与应用的工作。

通信作者简介：刘林山（1974-），男，副教授，研究方向：智能控制理论及应用。