

文章编号: 1001-0920(2010)01-0153-04

一种时间最优参数自调整模糊矢量控制方法的研究

徐 凯

(重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074)

摘 要: 针对某卫星发射场活动勤务塔电气传动控制系统非线性、时变、难以精确建模等问题, 提出一种时间最优参数自调整模糊控制方法. 该方法采用 Bang-Bang 控制改善系统动态性能, 用参数自调整的自适应解析模糊控制改善系统稳态性能, 实现高精度控制. 由于在控制过程中的不同阶段采用不同的控制方式, 既继承了 Bang-Bang 控制动态性能好, 同时又具有无静差的优点. 仿真实验表明, 该控制系统动态性好、稳态精度高, 且鲁棒性好, 能满足电气传动控制系统的要求.

关键词: Bang-Bang 控制; 细调解析模糊控制; 参数自调整; 电气传动控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on most superior time and parameters-adjustable fuzzy logic vector controlling system

XU Kai

(College of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China. E-mail: xkxjxwx@hotmail.com)

Abstract: To a series of problems, such as nonlinearities, time variations and the difficulties in getting mathematic models, for the complicated characteristics of electric drive controlling system in the mobile service tower at a certain satellite launching base, the superior time and parameters-adjustable fuzzy logic control strategy is proposed. The dynamic characteristic of electric drive controlling system is enhanced by using Bang-Bang control. The adaptive analytical fuzzy logic control strategy with adjusted parameters is used in the controlling process. As a result, the static performance is improved, which realizes the high accuracy control. Because different control schemes are used in different methods of the whole control process, the controller keeps good dynamic performance of Bang-Bang control, and has the merit of non-static errors. The simulation result shows that the system has good dynamic and static performance, and the robustness is good as well, which can satisfy the request of electric drive control system.

Key words: Bang-Bang control; Fine adjusted analytical fuzzy logic control; Parameters-adjustable; Electric drive control

1 引 言

某卫星发射中心活动勤务塔主要用于完成火箭各子级、卫星的吊装、对接, 并为火箭、卫星的测试、检查提供良好的工作环境及勤务保障. 其运行机构的主动台车使用了 8 台 42 kW 的异步电动机, 在吊装和发射时驱动整个勤务塔沿轨道运行. 随着我国航天事业的快速发展, 对勤务塔的电气传动控制系统提出了更高的要求, 主要体现在控制系统的快速性、控制精确度和抗扰动力等方面. 当发射进入负小时准备程序时, 要求运行机构的主动台车能迅速起动, 并在较短时间内驱动活动勤务塔沿轨道运行.

同时, 在运行中通过电动机、减速器对速度调节后, 整个勤务塔运行的速度应平稳、准确. 由于发射场所环境气候条件多变, 通常会带来一些不确定的负载扰动, 如由于风载荷带来的负载扰动. 这就要求主动台车的电机控制系统在运行中还应具有较强的抗扰动力. 电气传动系统的被控对象是异步电动机, 其特点是强耦合、时变和非线性. 对于强耦合可按转子磁链定向的矢量控制策略, 通过坐标变换来实现定子励磁电流分量与转矩电流分量的解耦. 电机在运行中, 由于温度和磁路饱和的变化, 引起了电机参数的变化, 导致其模型难以做到精确, 采用传统控制的

收稿日期: 2009-03-03; 修回日期: 2009-05-21.

基金项目: 重庆市教委应用基础研究项目 (KJ090427); 总装备部国防预研基金项目.

作者简介: 徐凯 (1970—), 男, 重庆人, 教授, 从事自动化、机电系统的智能控制等研究.

鲁棒性不尽人意。

近年来,电气传动系统的智能控制成为研究热点。模糊控制对受控对象的时变性、非线性和时滞具有一定的适应能力,抗干扰和鲁棒性较好。模糊控制对参数的变化不敏感,不需要被控对象精确的数学模型。但它也有缺点,如控制精度不高、存在静态余差,特别是在设定点附近会形成极限环振荡^[1],限制了它在那些对稳态精度要求高的工程中应用。经典的模糊控制在设计时,没有考虑在不同时域偏差大时快速跟踪、偏差小时精确定位的问题,而这两个要求是相互矛盾的。

基于以上分析,本文提出一种时间最优参数自调整模糊控制方法,该方法复合了 Bang-Bang 控制的快速性和参数自调整模糊控制精度高的优点。该方法的使用不仅改善了控制系统的动、稳态性能,且鲁棒性较高,并通过实验验证了该方法的有效性。

2 时间最优参数自调整模糊控制器设计

2.1 算法结构

单纯的 Bang-Bang 控制超调量大,其静态指标难以令人满意,而采用带参数自调整的细调模糊控制则能实现精确的定位。在实际控制中,可将 Bang-Bang 控制和参数自调整的细调模糊控制相结合,形成复合控制器,其控制算法如图 1 所示。

该控制器工作原理是:根据控制系统能实现在误差较大时快速跟踪,误差较小时精确定位的要求,根据系统实际情况,取一个特定误差 e 作为阈值。按实际误差大于或小于阈值 e 分两种不同情况设计一个复合控制器:在给定与输出偏差的绝对值大于阈值时,使用 Bang-Bang 控制,以提高系统响应速度,获得良好动态性能;在小于阈值时,采用带参数自调整的细调模糊控制,以提高系统的阻尼程度,使其超调量小,消除稳态误差。这样设计的复合控制器能满足控制系统动、稳态性能的要求。

2.2 Bang-Bang 控制器的设计

输出开关量的 Bang-Bang 控制是现代控制理论最大值原理在工程中的一个重要应用,它可使系统从一个初始状态到另一个状态的过渡时间最短。

图 1 中的 Bang-Bang 控制器是一个随偏差 e 正负变化的开关量输出装置。控制算法中分界点的选取是一个关键,需进行多次调整。可选择 Bang-Bang 控制与参数自调整模糊控制的分界点在给定信号的 60% 处,即当 $|e| > 0.4e$ 时,表示给定值与输出偏差较大的阶段,采用 Bang-Bang 控制;当 $|e| < 0.4e$ 时,表示给定值与输出偏差较小的阶段,则完全实施参数自调整模糊控制。当输入给定信号作用时,先是 Bang-Bang 控制器运行一段时间;当给定值与输出的偏差减小到分界点后才自动切换到参数自调整模糊控制。Bang-Bang 控制使系统响应达到过渡时间最优,具有快速的上升速度和惯性,保证了系统的动态性能。

2.3 细调解析模糊控制器的设计

要提高模糊控制的精度和跟踪性能,就必须将档分得较细,但此时规则数和系统计算量也大大增加,影响控制实时性。因此,在工程应用中,必须选择一个合适的分档次数,使得控制系统既能满足控制精度和实时性要求,又易于实现。鉴于此,建立一个模糊控制细调表,将模糊控制器的误差 E , 误差变化率 E_c 和输出量化总等级分为 13 级。细调阶段是控制稳定性的主要阶段,对振荡、超调量等控制品质起着决定性作用。

为达到性能更高的控制效果,采用自适应的解析模糊控制策略。当误差较大时,控制系统的主要任务是尽快消除误差,此时误差对控制规则的影响应大于误差变化的影响,即应增大 E 的权值;而当误差较小时,控制系统的主要任务是使系统尽快实现稳定,减小超调,提高系统的稳态精度,必须增大误差变化对控制规则的影响,即应增大 E_c 的权值。该阶段的不同偏差域取值如下式所示:

$$U = \begin{cases} -21E + (1-21)E_c, & E = 0; \\ -22E + (1-22)E_c, & E = \pm 1, \pm 2; \\ -23E + (1-23)E_c, & E = \pm 3, \pm 4; \\ -24E + (1-24)E_c, & E = \pm 5, \pm 6. \end{cases} \quad (1)$$

选择 $21 = 0.3, 22 = 0.5, 23 = 0.6, 24 = 0.7$ 。由

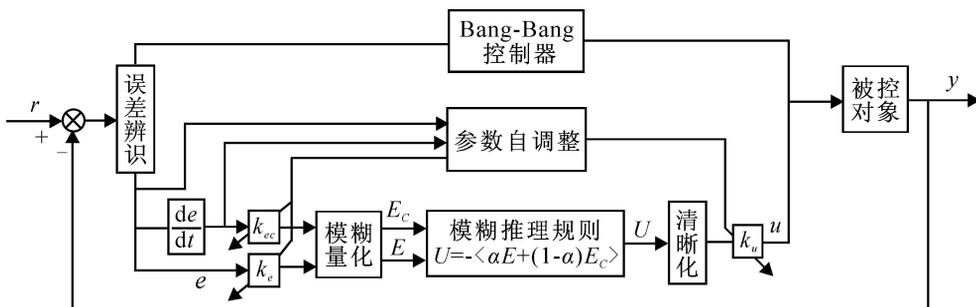


图 1 时间最优参数自调整模糊控制器结构图

式(1)便可生成模糊控制细调规则表。

2.4 参数的自动调整

在应用中,如何根据系统的性能快速确定量化因子 k_e, k_{e_c} 和比例因子 k_u ,目前尚无统一标准。 k_e, k_{e_c} 和 k_u 三者互相影响和牵制,选择它们时应综合考虑。通常在一个复杂控制系统中,用一组固定的量化和比例因子很难得到性能优良的控制效果。因此,在控制过程中动态地改变量化和比例因子的值,可实现在控制不同阶段的参数自调整,从而改善模糊控制器性能^[5,6]。采用的调整策略分两个阶段:当误差 e 和误差变化率 e_c 较大时,取较小的 k_e 和 k_{e_c} 值,同时取较大的 k_u 值,降低对 e 和 e_c 的分辨率,加快系统响应速度;当系统接近于稳态,误差 e 和误差变化率 e_c 较小时,取较大 k_e 和 k_{e_c} 值,同时取较小的 k_u 值,提高对 e 和 e_c 的分辨率,减小系统超调和稳态误差。

具体实施可为量化和比例因子增加一个调整因数,在控制过程中参数可以根据误差 e 和误差变化率 e_c 的大小获得对应的调整因数 值,实现参数的在线自调整。由于系数 同时受 e 和 e_c 的影响,所以可将参数调整因数 构造为如下函数:

$$= K(e, e_c) = K_1(E) \cdot 2(E_c). \quad (2)$$

将 $\mu_1(x), \mu_2(x)$ 均设为指数函数,即

$$\mu_1(x) = \mu_1^{(x)}, 0 < \mu_1 < 1; \quad (3)$$

$$\mu_2(x) = \mu_2^{(x)}, 0 < \mu_2 < 1. \quad (4)$$

可设 $K = 4, \mu_1 = 0.6, \mu_2 = 0.8$,则得到一个参数调整因数 的规则表。参数自调整模块首先根据初始的量化因子 k_e 和 k_{e_c} 对偏差 e 和偏差变化率 e_c 进行量化,并对照模糊参数调整因数规则表获得相应的 值,计算出新的量化和比例因子,如下所示:

$$k_e = k_e, k_{e_c} = k_{e_c}, k_u = k_u/. \quad (5)$$

这样,便可实现图 1 中对量化因子 k_e, k_{e_c} 和比例因子 k_u 的参数自调整,达到自适应控制的目的。

3 系统整体设计方案

本文以异步电机为控制对象,应用电压空间矢量控制技术,采用双闭环结构。系统的控制原理如图 2 所示。系统主要包括:异步电机及其专用测量模块;模糊速度控制外环模块,电流内环 PI 控制模块;坐标变换模块;空间矢量脉宽调制(SVPWM) 模块;逆变器模块等部分。

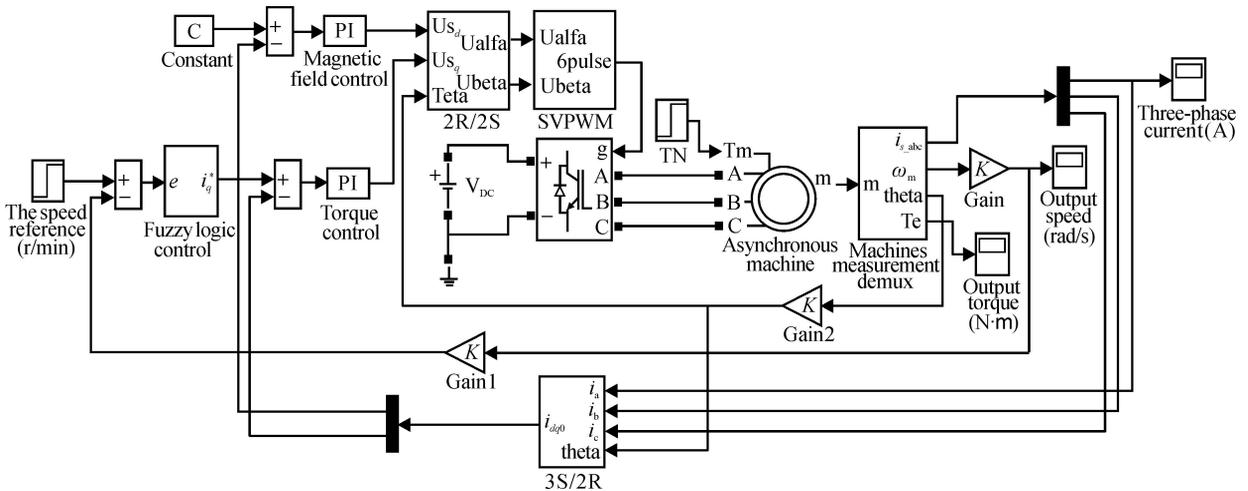


图 2 异步电动机模糊矢量控制系统仿真模型

系统中的速度外环采用本文提出的时间最优参数自调整模糊控制器,模糊控制器的输入语言变量选为电机的给定转速与实际转速之间的误差 e 和误差变化率 e_c ,而其输出语言变量为控制给定转速的 q 轴电流分量。这样便为转速控制确定了一个双输入单输出的模糊速度控制器,使得电机转速快速地跟随指令值的变化,在动态时限制转速超调,稳态时速度无静差,同时减小负载变化对转速变化的影响。

系统采用 Matlab/ Simulink 仿真模块进行仿真。仿真中异步电动机的参数设置如下: $P_N = 30 \text{ kW}, p = 2, n = 1460 \text{ r/min}, R_s = 0.085, R_r = 0.23, L_s = L_r = 35.8 \text{ mH}, L_m = 34.3 \text{ mH}, J = 0.178 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

图 2 中空间矢量脉宽调制 SVPWM 模块较复杂,图 3 是其内部结构图。该模块信号以参考电压的二相静止坐标系下的 U_{α}, U_{β} 分量作为输入,输出为逆变

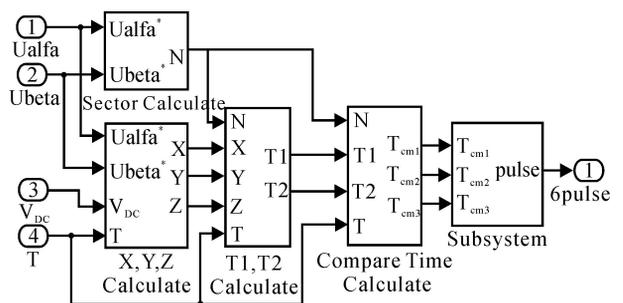


图 3 SVPWM 内部结构图

器提供的6脉冲触发信号。SVPWM模块包括:计算扇区N的模块,能表达每个扇区内两个相邻矢量作用时间的表达式X、Y、Z模块,主辅矢量作用时间T1、T2模块,矢量切换点时间 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 模块。PWM波工作周期和参考电压设置如下: $T = 0.2\text{ms}$, $V_{DC} = 310\text{V}$ 。

4 实验结果及分析

4.1 动态和稳态性能实验

为分析本文设计的时间最优模糊控制的效果,对PID控制、经典模糊控制和时间最优模糊控制进行了实验比较。图4为在给定转速 800r/min ,电机空载运行下3种控制方法的速度响应实验结果。其中:

为PID控制, 为经典模糊控制, 为时间最优模糊控制。

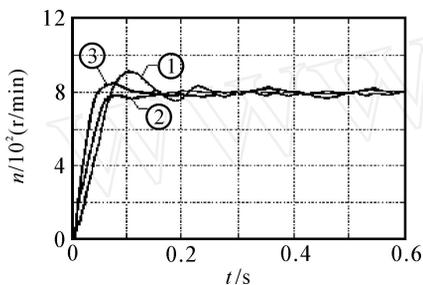


图4 几种控制方法的速度响应实验结果

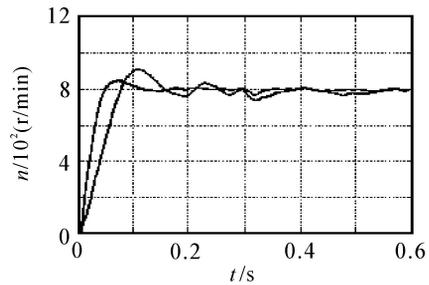
从动态性能实验可看出:采用传统PID控制,上升和调节时间较长,转速波动大。而时间最优模糊控制提高了系统的动态性能和响应速度,转速波动小,超调量明显小于传统PID控制。与经典模糊控制相比,时间最优模糊控制在开始时虽然有一微小超调,但速度上升快,过渡时间短。

从稳态性能实验可看出:传统PID控制的转速要经过一段时间波动才能达到稳态。经典模糊控制的速度存在一定稳态误差,在 38% 以内。而时间最优模糊控制的稳态误差则在 8% 以内,远小于经典模糊控制。时间最优模糊控制具有更好的稳态性能,实际速度能较好地跟踪命令速度。

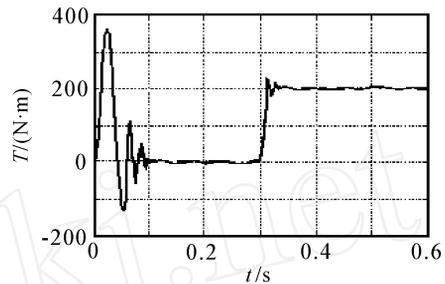
4.2 突加负载性能实验

为检验系统起动后的带载能力,在起动稳定后 0.3s 突然加入 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 负载转矩,此负载转矩比额定值稍大,观察此时速度、转矩的动态变化过程。

图5(a)是时间最优模糊控制与PID控制的速度响应曲线比较。可以看出,PID控制在突加负载时,速度在过渡响应阶段有较大扰动,转速发生了突降,下降幅度较大,速度约经 0.08s 才能重新回到稳态,转速恢复至稳态时间明显延长。而时间最优模糊控制速度响应曲线变化不明显,转速下降幅度较小。由于系统具有在线自调节能力,速度仅经 0.03s 便



(a) 时间最优模糊控制与PID控制响速度应曲线比较



(b) 时间最优模糊控制的响应转矩曲线

图5 在 0.3s 突加 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 负载的速度、转矩响应曲线迅速恢复到稳态,其动态性能强于传统PID控制。

图5(b)是时间最优模糊控制的转矩响应曲线。开始时电机以最大电磁转矩起动,起动后由于是空载,电磁转矩迅速下降至零,在稳定后 0.3s 突加 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 负载,在此动态过程中转矩的超调量和振荡较小,过渡时间短。这是由于SVPWM能够快速地进行连续调节,抑制转矩脉动,产生合适的电磁转矩与负载转矩相匹配,并迅速进入稳态运行。在实际中,它能更有效地降低机械系统振动,使系统具有良好的抗负载能力。

5 结论

针对某卫星发射场活动勤务塔电气传动控制系统,设计了一种时间最优参数自调整模糊控制器,它具有如下优点:

- 1) 复合控制算法中的Bang-Bang控制环节,使系统响应时间最优,提高了响应速度,动态性能好。
- 2) 采用自适应解析模糊控制策略,并在控制中在线调整量化、比例因子等参数,从两个方面提高了对实际转速的跟踪精度,减小了系统超调。
- 3) 系统能进行自适应调节,带载能力和抗扰动能力强,鲁棒性好。

该项目的研究对发射场活动勤务塔电气传动控制系统的设计具有较好的参考价值。

参考文献(References)

- [1] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
(Zhu J. Fuzzy control and system theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.)

(下转第160页)

$$\phi_i(v)/v(N) R(N) = \left[\sum_{s \in S} d_s(v)/v(N) \right] R(N) =$$

$$\left[\sum_{s \in S} i(d_s(G), R(N)) \right] R(N) = i^d(G),$$

$$\text{即 } m(G) = i^d(G).$$

定理 1 说明,在随机支付情形下,若合作博弈的各方对合作的收益分配具有线性效用函数和相同的偏好关系,则这两种构造方式得到的解是一致的。

5 结 论

本文以经典合作博弈 Shapley 值的两种不同表述方式为基础,构建了基于随机支付的合作博弈模型,对具有随机支付情形的合作博弈给出了边际值和转换值,并用一个实例说明在具有随机支付情形下边际值和转换值不再一致。最后指出:在随机支付情形下,若合作博弈的各方对合作的收益分配具有线性效用函数和相同的偏好关系,则边际值和转换值是一致的。

参考文献(References)

- [1] Shapley L S Shubik. A method for evaluating the distribution of power in committee system[J]. American Political Science Review, 1954, 48(3): 787-792.
- [2] Aumann R, Maschler M. The bargaining set for cooperative games [J]. Advances in Game Theory Annals of Mathematics Studies, 1964, 52: 443-476.
- [3] Maschler M, Peleg B Shapley L S. Geometric properties of the kernel, nucleolus and related solution concepts [J]. Mathematics of Operations Research, 1979, 4(4): 303-337.
- [4] Schmeidler D. The nucleolus of a characteristic function games[J]. SIAM J of Applied Mathematics, 1969, 17(6): 1163-1170.
- [5] Nishizaki I, Sakawa M. Solutions based on fuzzy goals in fuzzy linear programming games[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115(1): 105-119.
- [6] Peleg B. Introduction to the theory of cooperative game [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [7] Timmer J, Borm P, Tijs S. Convexity in stochastic cooperative situations[Z]. Tilburg: Tilburg University, 2000.
- [8] Harsanyi J C. A bargaining model for the cooperative n person game[J]. Annals of Mathematics Studies, 1959, 40(4): 325-355.
- [9] Mare M. Fuzzy coalitions structures[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(1): 23-33.
- [10] Li D F. Fuzzy constrained matrix games with fuzzy payoffs[J]. The J of Fuzzy Mathematics, 1999, 7(4): 873-880.
- [11] Suijs J. Cooperative decision-making under risk [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [12] Timmer J, Borm P, Tijs S. On three Shapley-like solutions for cooperative games with random payoffs [J]. Int J of Game Theory, 2004, 32(4): 595-613.

(上接第 156 页)

- [2] 汪书苹, 赵争鸣. 带修正因子模糊 PID 控制的 PMSM 交流伺服系统[J]. 清华大学学报, 2007, 47(1): 9-12.
(Wang S P, Zhao Z M. Fuzzy-PID control with tuning factors for PMSM servo system [J]. J of Tsinghua University, 2007, 47(1): 9-12.)
- [3] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 615-618.
(Liu H B, Li S Y, Chai T Y. Fuzzy hybrid controller based on fuzzy switching and its application[J]. Control and Decision, 2003, 18(5): 615-618.)
- [4] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 129-133.
(Xia C L, Guo P J, Shi T N, et al. Control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller [J]. Proc of the CSEE, 2005, 25(11): 129-133.)
- [5] Sungchul Jee, Yoram Koren. Adaptive fuzzy logiccontroller for feed drives of a CNC machine tool[J]. Mechatronics, 2004, 138(4): 299-326.
- [6] Feng Chieh Lin. Adaptive fuzzy logic-based velocity observer for servo motor drives [J]. Mechatronics, 2003, 126(13): 229-241.
- [7] Huang S, Nelson R M. Development of a self-tuning fuzzy logic controller[J]. ASHRAE Trans on Research, 1999, 105(1): 206-213.
- [8] Zhao J, Wan S Y, Xu J B. Improving performance method for fuzzy control AC speed drive[C]. Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2004: 4500-4503.