

文章编号: 1001-0920(2005)07-0778-04

一种自适应 CMAC 在交流励磁水轮发电系统中仿真研究

李 辉

(重庆大学 a 高电压与电工新技术教育部重点实验室, b 电气工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 在分析常规 CMAC 结构的基础上, 针对一类非线性、参数时变和不确定的控制系统, 提出了一种自适应 CMAC 神经网络的控制器。该控制器以系统动态误差和给定信号量作为 CMAC 的激励信号, 并与自适应线性神经网络相结合构成系统的复合控制。为了验证其有效性, 将其应用到交流励磁水轮发电系统的多变量非线性控制中, 并与常规的 PD 控制效果进行了比较。仿真结果表明, 该控制器具有较强鲁棒性和自适应能力, 控制品质优良。

关键词: CMAC 神经网络; 自适应控制; 交流励磁; 水轮发电机

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Simulation Research of an Adaptive CMAC for Hydrogenerating System with AC Excitation

L I H u i

(a. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology in Ministry of Education, b. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China. E-mail: cqulh@163.com)

Abstract: Based on the conventional structure of the cerebellar model articulation controller (CMAC), an adaptive CMAC neural network controller is presented for a class of nonlinear uncertain systems with time-varying parameters. Combining it with the adaptive linear neuron network, the multiplex control strategy takes the dynamic errors and given signals of the system as input signals to the CMAC neural network. The digital simulation of multivariable and nonlinear control for the hydrogenerator system with AC excitation is studied and the conventional PD controller is used to compare with it. The simulation results show that the proposed adaptive CMAC is of good robustness, and adaptive ability and excellent control quality.

Key words: CMAC neural network; Adaptive control; AC excitation; Hydrogenerator

1 引 言

CMAC 即小脑模型关联控制器, 是一种采用局部学习结构的神经网络, 它能有效克服常规多层前馈网络学习速度慢的缺点, 其结构简单, 具有处理非线性、自学习、一定泛化能力和学习速度快等优点^[1-6]。将 CMAC 应用于控制系统中有多种控制形式, 如 CMAC 前馈控制、CMAC 反馈控制、CMAC 直接逆运动控制等^[1-3], 目前较为常用的是 CMAC 的前馈控制和固定增益反馈控制器相结合构成的复合控制。因 CMAC 能在不改变原有系统结构情况下直接用计算机实现, 所以对现存的大量以 PD 为控制器的系统而言, 倍受关注^[3,4]。

文献[4]将一种自适应 CMAC 控制器应用到常

规水轮机调速系统中, 得到了较好的控制效果。然而, CAMC 控制器结构采用的二阶参考模型, 在一定程度上影响了控制器的在线训练效果, 同时控制对象并未考虑系统负荷变化以及发电机系统的非线性等因素。由于 CMAC 控制对象是个复杂系统, 对于不同被控对象, 其控制参数应该有所不同, 另外当系统参数发生时变时, 其控制参数也应跟着变化。基于此, 文献[5]通过对不同被控对象的反复试验表明, 固定增益大小影响着控制系统的稳定性和抗干扰能力, 特别是在系统开始运行阶段和发生扰动阶段表现更为明显, 并提出采用遗传算法对固定增益控制器进行最优设计; 文献[6]证明了采用固定增益的 PD 控制器在 CMAC 估计有偏和随机干扰存在

收稿日期: 2004-09-01; 修回日期: 2004-11-15

作者简介: 李辉(1974—), 男, 浙江永康人, 讲师, 博士, 从事智能控制算法、新型电机控制的研究

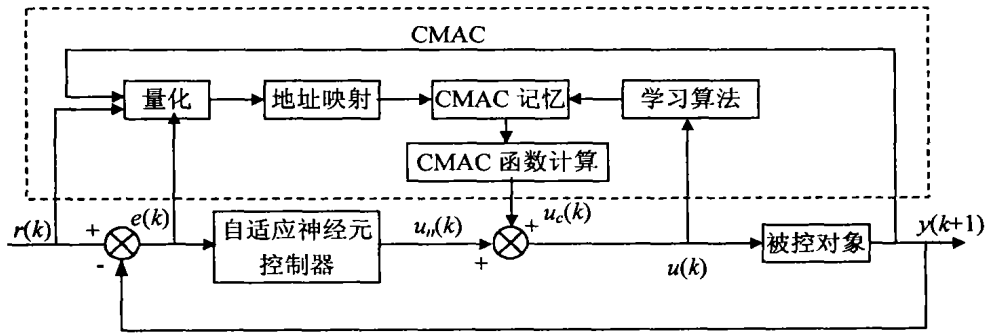


图 1 自适应 CMAC 神经网络控制器结构图

时只能实现局部有界稳定 尽管最优固定增益可使系统品质得到改善,但在控制系统过程中,加入固定增益反馈控制器是为了评判 CMAC 控制器的性能,在工作过程中 CMAC 的输出还是起主要控制作用^[3,4]。

基于此,针对控制对象的非线性和不确定性等特点,本文提出一种自适应 CMAC 神经网络控制器,该控制器算法以给定期望输出和当前动态误差信号作为 CMAC 的输入矢量,在结构上与自适应神经元构成复合控制器 为了验证该自适应 CMAC 控制器的性能,本文将其应用到交流励磁水轮发电机的多变量非线性综合控制中,并对控制器的鲁棒性和自适应能力进行了数值仿真研究

2 自适应 CMAC 神经网络控制器设计

2.1 控制器结构和算法

在常用的 CMAC 前馈复合控制器中,CMAC 神经网络只实现被控对象的局部逆动态模型^[1,3]。为了使 CMAC 网络的学习过程包括被控对象和 CMAC 本身在内的动态逆过程,提高控制系统的稳定性和抗干扰能力,本文提出采用一种自适应 CMAC 神经网络控制器,其结构如图 1 所示 该控制器结构与 Miller 等人所提出的常用前馈-反馈复合控制结构类似^[1,2],但它改变了 CMAC 的激励信号,即以系统的给定信号和动态误差信号作为 CMAC 输入,以 CMAC 的实际输出与系统总输入之差来调整权重 另外,为了提高 CMAC 控制器的稳定性,使其适应控制系统工况变化和不确定因素的干扰,本文利用自适应神经元控制器取代常规比例(P)或比例微分(PD)固定增益控制器,并与 CMAC 神经网络控制器构成复合控制

基于 CMAC 自适应控制器的工作过程分为控制和学习两个过程 初始状态 CMAC 的所有权重值均为零,控制时将系统给定值 $r(k)$ 与当前误差 $e(k)$ 量化后作为地址输入到 CMAC,在 CMAC 的存储器中找到与之对应的 C 个单元,并将这 C 个单元中的

权重值相加,得到 CMAC 的输出,即

$$u_c(k) = \sum_{i=1}^C \omega^{(k)} a_i(k). \quad (1)$$

式中: $a_i(k)$ 为 CMAC 存储器地址选择向量, C 为泛化常数^[3], $\omega^{(k)}$ 为对应的权值

然后将 CMAC 输出值与自适应神经元控制器的输出 $u_n(k)$ 相加,得到被控对象总的控制输入,即

$$u(k) = u_c(k) + u_n(k). \quad (2)$$

在控制周期结束时,则采用实际输出 $y(k+1)$ 和实际误差 $e(k+1)$ 作为地址输入到 CMAC 网络中,计算出相应的 CMAC 输出值 $u_c(k)$,并与总控制输入 $u(k)$ 相比较,修正权重 进入学习过程,其权重调整规则为

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \beta \frac{u(k) - u_c(k)}{C}, \quad (3)$$

式中 $\beta(0 < \beta < 1)$ 为 CMAC 神经网络的学习速率

2.2 自适应神经元控制器

为了不改变原有常规固定增益控制器的结构和参数,本文提出采用线性神经元控制器实现固定增益的自适应调节 通常提供 CMAC 学习信号的是系统当前的误差及其变化量,因此固定增益控制器通常为 P 或 PD 控制器,而不是 PID 控制器^[1,3,4]。以常规 PD 控制器为例实现自适应神经元控制器的输出为

$$u_n(k) = \omega(k)x_1(k) + \omega(k)x_2(k) = K_p(k)e(k) + K_d(k)[e(k) - e(k-1)] \quad (4)$$

式中: $\omega(k)$ 和 $\omega(k)$ 为神经元权重,分别对应常规 PD 控制器的比例、微分调节系数 $x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 为神经元输入信号,分别对应给定信号的误差和误差变化量

自适应神经元网络的整定指标为

$$J = \frac{1}{2} (r(k+1) - y(k+1))^2 = \frac{1}{2} e(k+1)^2 \quad (5)$$

神经元权重值的调整采用梯度下降法,即

$$\Delta\omega(k) = -\eta \frac{\partial}{\partial \omega} = \eta_e(k+1) \frac{\partial_i(k+1)}{\partial u_n(k)} x_i(k). \quad (6)$$

式中: η 为神经网络的学习速率, $0 < \eta < 1$; ω 为神经元权重值, 其初始值可选为常规PD控制的对应控制参数

3 CMAC在交流励磁水轮发电系统中仿真

3.1 系统控制方案

交流励磁水轮发电机在水电站水头或流量变化时, 可通过改变励磁电流频率相应地调节电机转速, 同时兼顾出力要求并发出恒频电能, 使系统始终运行于水轮机最优单位转速附近, 实现系统负荷的优化调节, 从而提高水轮机的运行效率。这是国内外正在开发的一种新型水力发电设备^[7]。交流励磁水轮发电机系统是一个涉及水力、水轮机、发电机的综合系统。由于水流惯性带来的水锤效应, 水、机、电各环节的非线性和大惯性, 系统具有高度不确定性、非线性和参数时变, 以及交流励磁发电机具有多变量、强耦合的特点^[7], 使得交流励磁水轮发电机系统的调节较为复杂。结合交流励磁水轮发电机系统的综合控制模型^[7]以及自适应CMAC控制器, 可得基于自适应CMAC的交流励磁水轮发电机系统的控制方案, 其框图如图2所示。

图2中CMAC-P, CMAC-Q, CMAC-u为3个CMAC神经网络, 分别承担着交流励磁发电机励磁系统的有功通道、无功通道和水轮机调节通道的自学习控制。其中CMAC-P的输入空间维数为4, 分别代表交流励磁发电机有功功率、转差率给定值以及有功功率偏差和转差率偏差; CMAC-Q的输入空间维数为2, 分别代表发电机无功功率给定值和无功功率偏差; CMAC-u的输入空间维数为2, 分别代表

有功功率和转差率的综合及其偏差。图2中的A-K_p, A-K_s, A-K_q和A-PDu为4个自适应神经元控制器, 分别承担着交流励磁水轮发电机系统综合控制模型中对应的比例、微分系数的自适应调整。其中A-K_p, A-K_s和A-K_q神经元的输入只有一个, 即 ΔP_e , Δs 和 ΔQ_e ; 自适应调整系数分别为 K_p , K_s 和 K_q ; 而A-PDu神经元的输入为水轮机调节通道中的有功和转差率的综合偏差及其变化量^[7], 自适应调整的系数为 K_{pu} 和 K_{Du} 。控制初始状态3个CMAC的所有权重值均为0, 4个自适应神经元的权重初始值可选为原常规PD控制方案中的反馈系数。控制时将当前输出期望值和相应的当前误差值通过量化后作为地址分别输入到CMAC中, 在CMAC的存储器中找到与之对应的C个单元, 并将这C个单元中的权重值相加分别得到3个CMAC的输出 $u_{cp}(k)$, $u_{cq}(k)$ 和 $u_{cu}(k)$, 然后与对应的自适应神经元控制器的输出 $u_{np}(k)$, $u_{nq}(k)$ 和 $u_{nu}(k)$ 相加得到相应的输出值, 即

$$\begin{aligned} \Delta U'_{rd}(k) &= u_{cp}(k) + u_{np}(k), \\ \Delta U'_{rq}(k) &= u_{cq}(k) + u_{nq}(k), \\ \Delta u(k) &= u_{cu}(k) + u_{nu}(k). \end{aligned} \quad (7)$$

交流励磁发电机励磁控制的输入为

$$\begin{aligned} U'_{rd}(k) &= U'_{rd0} + \Delta U'_{rd}(k), \\ U'_{rq}(k) &= U'_{rq0} + \Delta U'_{rq}(k). \end{aligned} \quad (8)$$

式中 U'_{rd0} 和 U'_{rq0} 分别为前一运行状态时励磁电压在动态同步轴系d-q轴上分量, 其值可通过测量交流励磁发电机有功、无功和转差率进行计算^[7]。

水轮机调节器的输出可通过一个延迟环节与其输出的增量之和得到, 即

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (9)$$

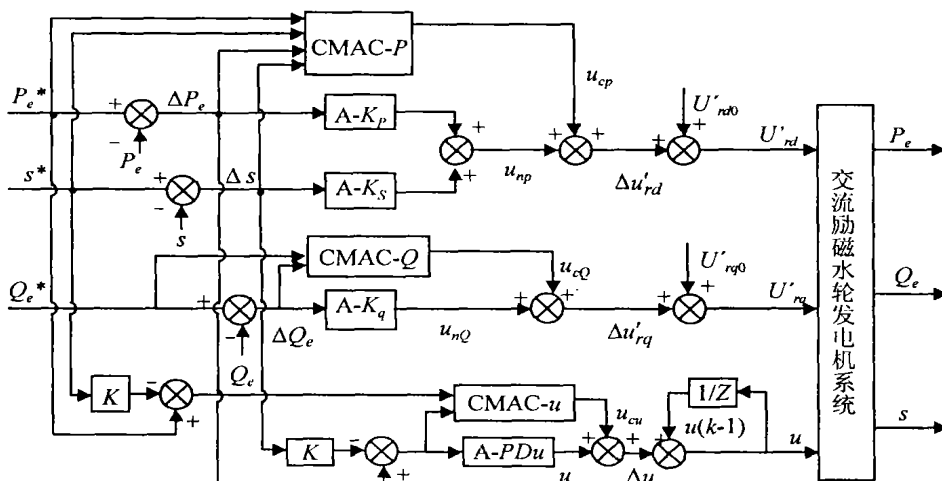


图2 自适应CMAC的交流励磁水轮发电机系统控制结构

总之, 通过式 (8) 可得到当前运行状态时励磁电压在动态同步轴系上的分量 $U_{rd}(k)$ 和 $U_{rq}(k)$; 然后通过动态同步轴系和同步轴系之间的转换以及同步轴系和三相真实坐标系之间的坐标变换可得转子励磁电压瞬时值 $u_{ra}(k)$, $u_{rb}(k)$ 和 $u_{rc}(k)$, 从而作为转子侧变频器的给定信号进行励磁控制, 实现有功、无功和转速的调节^[7]。另外, 通过式 (9) 得到的值 $u(k)$ 直接作为水轮机导叶开度的控制信号, 调节水轮机输出的机械功率, 从而实现系统的有功和转速的粗调节。

3.2 仿真研究及结果分析

根据自适应 CMAC 交流励磁水轮发电机系统的控制方案, 以与无穷大系统并联运行的交流励磁水轮发电机系统为例, 对系统在水力、水轮机和发电机参数不确定性时的鲁棒性进行了仿真研究。为了比较自适应 CMAC 控制器的系统运行性能 (粗实线表示), 同时给出了常规 PD 控制结果 (细实线表示)。其中, 图 3 为水流惯性时间常数 T_w 变化为原值的 10 倍时定子有功负荷优化调节结果; 图 4 为水轮

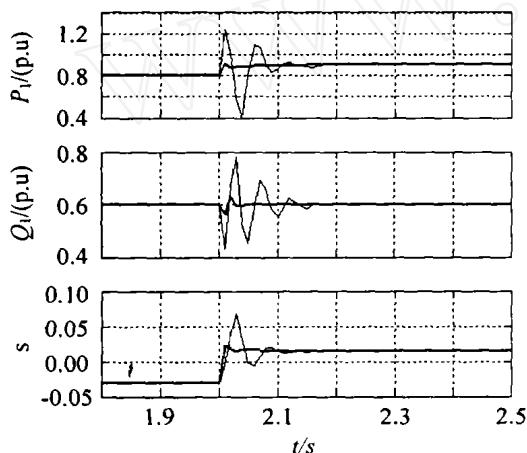


图 3 T_w 变化时的有功调节

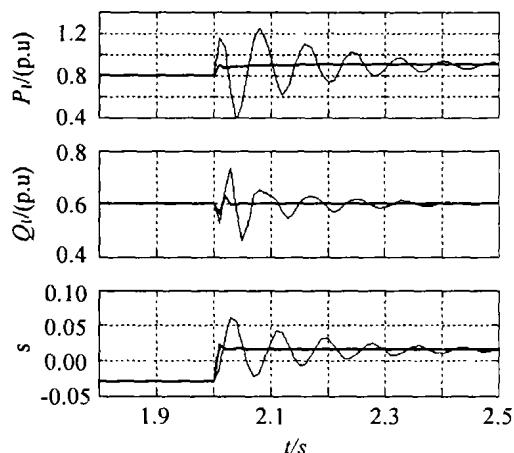


图 4 水轮机对象模型变化时的有功调节

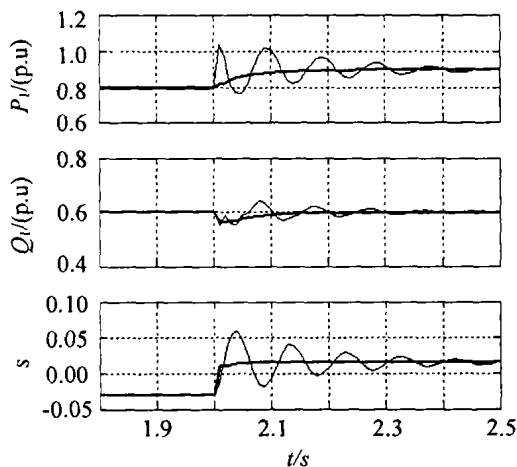


图 5 转子电阻值变化时的有功调节

机引水系统由刚性水击模型变为弹性水击模型时定子有功负荷优化调节结果; 图 5 为交流励磁发电机转子电阻参数变化为原值的 2 倍时定子有功负荷优化调节结果。图 3~ 图 5 的仿真结果比较表明, 无论是水流时间常数发生改变还是水轮机模型结构改变以及交流励磁发电机转子电阻参数发生变化, 与常规 PD 控制效果相比, 通过 CMAC 的自学习, 控制系统具有鲁棒性好和自适应能力强的优点。

4 结 语

针对一类非线性、不确定系统, 本文提出了一种自适应 CMAC 神经网络控制器, 并将其应用到交流励磁水轮发电机系统的综合控制的仿真系统中。通过对交流励磁发电机系统的仿真表明, 对于水、机、电参数变化时, 基于自适应 CMAC 神经网络控制器具有良好的实时性和静态控制品质, 具有优良的鲁棒性和适应性, 可进一步应用于交流励磁变速水轮发电机系统的实际控制中。

参考文献 (References)

- [1] Sang-soon Ku, Gary Larsen, Sabri Cetinkunt. Fast Tool Servo Control for Ultra-precision Machining at Extremely Low Feed Rates[J]. *Mechatronics*, 1998, 8(4): 381-393.
- [2] Larsen G A, Cetinkunt S, Dommez A. CMAC Neural Network Control for High Precision Motion Control in the Presence of Large Friction [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1995, 117: 415-420.
- [3] 蒋志明, 林廷圻, 黄先祥. 一种基于 CMAC 的自学习控制器[J]. *自动化学报*, 2000, 26(4): 542-545. (Jiang Z M, Lin T Q, Huang X X. A New Self-learning Controller Based on CMAC Neural Network [J]. *Automatica Sinica*, 2000, 26(4): 542-545.)

(下转第 785 页)

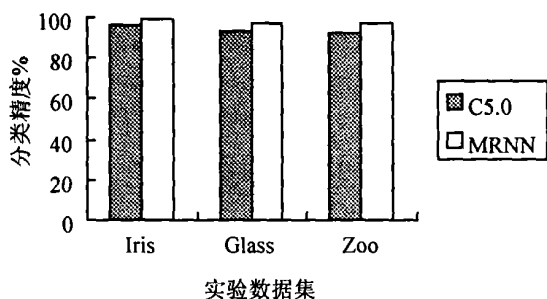


图 3 分类结果比较

6 结 语

本文提出了一种基于粗糙集的神经网络模型, 该模型综合了粗糙集理论在知识获取方面的能力和神经网络在数值逼近上的优势。通过粗糙集智能数据分析, 消除初始决策表中的冗余信息和噪声数据的干扰, 从而抽取针对原始数据的最简规则, 减少了粗糙神经网络中输入层和代表规则层的神经元个数, 简化了神经网络的拓扑结构, 提高了系统的速度。另外, 神经网络训练结果在数值上逼近原系统, 但它依然是一个“黑箱系统”, 各参数的物理意义不明确, 训练结束后, 我们对系统的了解依然很少。而本文提出的方法在输入输出逼近的同时还得出了一些有效的规则, 使我们对系统本身有了一定的认识, 这一点是 ANN 建模所不能完成的。最后通过试验结果对比验证了该模型的有效性。

参考文献(References)

- [1] Pawlak Z. Rough Sets [J]. *Int J of Computer and Information Science*, 1982, 11(5): 341-356
- [2] Pawlak Z. *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning About Data* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3] Skowron A. *Rough Sets and Boolean Reasoning* [M]. New York: Physica Verlag, 2001: 95-124

- [4] Skowron A, Peters J. Rough Sets: Trends and Challenges [A]. *Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 25-34
- [5] Pawlak Z. Rough Sets and Intelligent Data Analysis [J]. *Information Science*, 2002, 11(147): 1-12
- [6] Wu Y W, Zhang Chang-N. A Rough Neural Network for Material Proportioning System [A]. *Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, IEEE 2002 International Conference* [C]. Chendu, 2002, 2: 1189-1193
- [7] Lingras P J. Rough Neural Networks [A]. *Proc of Sixth Int Conf on Information, Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems* [C]. Granada, 1996: 1445-1450
- [8] Peters J F, Han L, Ramanna S. Rough Neural Computing in Single Analysis [J]. *Computational Intelligence*, 2001, 17(3): 493-513
- [9] Pedrycz W. *Computational Intelligence: An Introduction* [M]. Florida: CRC Press, Boca Raton, 1998
- [10] Rosetta. *A rough Set Toolkit for Analyzing Data* [EB/OL]. <http://www.idi.ntnu.no/~aleks/rosetta>, 2002
- [11] 何明, 冯博琴, 马兆丰, 等. 基于增量式遗传算法的粗糙集分类规则挖掘 [J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(6): 579-582
(He M, Feng B Q, Ma Z F, et al. Incremental Genetic Algorithm Based Data Mining Method for Discovering Rough Set Classification Rules [J]. *J of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(6): 579-582)
- [12] Blake C, Keogh E, Merz C J. *UCI Repository of Machine Learning Data Tables* [EB/OL]. <http://www.ics.uci.edu/~mlearn>, 2004-08-16
- [13] Rule Quest Research. C5.0 Effective Data Mining Tools [EB/OL]. <http://www.rulequest.com>. 2004-08-16

(上接第 781 页)

- [4] 金波, 俞亚新. 一种自适应 CMAC 神经网络控制器及其在水轮机调速器中的应用 [J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(6): 905-908
(Jin B, Yu Y X. Adaptive CMAC Controller for Hydraulic Turbine Speed Governor [J]. *Control Theory and Application*, 2002, 19(6): 905-908)
- [5] 周旭东, 王国栋, 李淑华. 小脑模型控制系统的遗传算法最优设计 [J]. *信息与控制*, 1997, 26(6): 455-458
(Zhou X D, Wang G D, Li S H. Genetic Algorithm Based Optimal Design for CMAC Controller [J]. *Information and Control*, 1997, 26(6): 455-458)
- [6] 李世敬, 王解法, 冯祖仁. 层叠 CMAC 补偿的并联机器

- 人变结构控制研究 [J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(8): 1045-1048
(Li S J, Wang J F, Feng Z R. Variable Structure for Parallel Manipulators Based on Cascaded CMAC [J]. *J of System Simulation*, 2002, 14(8): 1045-1048)
- [7] 李辉, 杨顺昌. 可调速双馈水轮发电机组控制系统的稳定性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(6): 152-154
(Li H, Yang S C. Stability Analysis of Control System of Adjustable Speed Hydroelectric Generating Units with Doubly Fed Generators [J]. *Proc of the CSEE*, 2004, 24(6): 152-154)