

基于一种FGA-ANFIS技术的DMFC温度建模和控制

戚志东¹, 朱新坚²

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 上海交通大学 燃料电池研究所, 上海 200030)

摘要: 为了提高直接甲醇燃料电池(DMFC)的发电性能, 采用自适应神经模糊推理技术(FGA-ANFIS)对电池的工作温度进行建模与控制. 首先, 基于实验的输入输出数据建立了DMFC电堆温度的自适应神经模糊辨识模型, 避开了DMFC电堆的内部复杂性. 然后, 将训练好的网络模型作为DMFC控制系统的参考模型, 采用一种改进的模糊遗传算法对神经模糊控制器的参数和模糊规则进行自适应调整. 最后, 通过仿真, 将所提出的算法与非线性PID和传统模糊算法进行比较, 结果表明所设计的神经模糊控制器具有较好的性能.

关键词: 直接甲醇燃料电池; 自适应神经模糊推理系统; 模糊遗传算法

中图分类号: TP183 **文献标识码:** A

Temperature modeling and control of DMFC based on FGA-ANFIS technology

QI Zhi-dong¹, ZHU Xin-jian²

(1. Automation Department, Nan Jing University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. Fuel Cell Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: To improve the performance of a direct methanol fuel cell (DMFC), the adaptive neural fuzzy inference (FGA-ANFIS) technology is applied to the modeling and control of a DMFC temperature system. First, an adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) identification model of DMFC stack temperature is developed based on the input-output sampled data, getting around the internal complexity of DMFC stack. Then, taking the well-trained network model as the reference model of the control system of DMFC stack, we use a novel fuzzy genetic algorithm (FGA) for adaptively adjusting the parameters and fuzzy rules of a neural fuzzy controller. Simulation results demonstrate better performance of this neural fuzzy controller in comparison with those of the nonlinear PID and traditional fuzzy algorithm.

Key words: direct methanol fuel cell; adaptive neural fuzzy inference system; fuzzy genetic algorithms

1 引言(Introduction)

燃料电池是一种清洁高效的发电技术, 它是一种不经过燃烧直接以电化学反应方式将燃料和氧化剂的化学能转变为电能的高效连续发电装置. 直接甲醇燃料电池(简称DMFC)直接以甲醇为燃料, 其水溶液易于携带和存储, 无需中间转化装置, 系统结构简单. 在DMFC中, 甲醇具有较高的电化学活性, 体积能量密度较高. 在相同的功率密度下, DMFC体积小, 成本低, 特别适用于便携式电源和车用动力电源^[1].

为了提高DMFC发电系统的运行性能, 延长其使用寿命, 保障系统安全、可靠、低成本地运行, 必须对其进行有效地控制. 例如: 目前影响DMFC性能的两大关键问题是甲醇电化学氧化催化剂活性低和膜渗透甲醇, 评判DMFC性能最重要的指标是燃料

电池的电压/电流密度特性, 而这些都与电池的工作温度有密切关系^[2]. 因此, 如何保证电池工作在一个合适的温度是提高电池运行性能和使用寿命的关键. 本文应用一种改进的自适应神经模糊技术对DMFC的工作温度进行建模和控制.

2 基于 ANFIS 的 DMFC 系统温度建模(DMFC temperature modeling based on ANFIS)

根据实验数据和专家经验, 电堆的工作温度与系统的循环冷却水流速和入口温度、阴极空气流速、阳极甲醇流速和入口温度、负荷大小等主要因素有关. 由于电池在工作时产生化学反应热, 使工作温度持续上升, 而工作温度过高会降低电池的使用寿命, 循环冷却水是保证电池工作在设定温度范围内

的重要手段^[3,4]. 同时, 阴极空气、阳极甲醇流速也会影响电池的工作温度: 当流速较小时, 电化学反应充分, 热量损失小, 最终稳定的温度高; 当流速较大时, 反应不充分, 并带走部分热量, 最终稳定的温度低. 本文在不同的工况条件下, 动态模拟出电堆工作温度的变化曲线, 使输入到输出呈动态非线性映射. DMFC系统温度模型可描述如下:

$$T(k+1) = \Phi(\nu_a(k), \nu_c(k), \nu_w(k), T(k)). \quad (1)$$

式中: $V(k) = [\nu_a(k), \nu_c(k), \nu_w(k)]^T$ 为控制输入矢量. $\nu_a(k), \nu_c(k), \nu_w(k)$ 分别为甲醇(阳极)、空气(阴极)和冷却水流速; $T(k)$ 为电堆工作温度.

2.1 DMFC 工作温度辨识结构与算法^[5,6] (Identification structure and algorithm of DMFC temperature)

DMFC系统工作温度ANFIS辨识模型结构如图1所示.

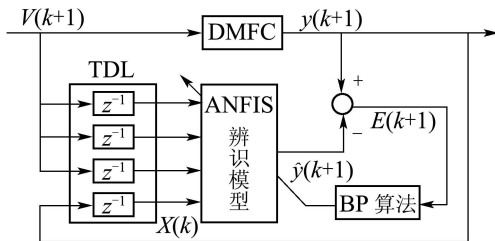


图1 DMFC系统工作温度ANFIS辨识模型结构图

Fig. 1 Structure of the operating temperature identification model with ANFIS

图中: $X(k)$ 是通过TDL(时间延迟阵列)的ANFIS输入, $y(k+1)$ 为电堆的实际温度输出, $\hat{y}(k+1)$ 为辨识器的输出, $E(k+1)$ 是 $\hat{y}(k+1)$ 和 $y(k+1)$ 之间的误差. ANFIS为模糊推理系统与5层前馈BP神经网络的结合.

自适应神经模糊推理系统(adaptive neural fuzzy inference systems, ANFIS)是将模糊推理系统与神经网络相结合的产物. 模糊推理系统广泛用于模糊控制, 它巧妙的引入了“隶属度”的概念, 使规则数值化, 从而处理结构化的知识. 神经网络一般不能处理结构化的知识, 但神经网络具有自适应自学习的功能, 通过对大量数据的学习, 估计输入输出数据之间的映射, 并具有很强的泛化能力. ANFIS则充分利用模糊推理系统与神经网络各自的优良特性, 使之在模糊控制、模式识别等领域都获得了应用. ANFIS作为一种颇具特色的神经网络, 同样具有以任意精度逼近任何线性或非线性函数的功能, 且收敛速度快、误差小、所需训练样本少, 使ANFIS运用于非线性系统辨识成为可能. 假设系统的模糊规则共有 M 条 ($l = 1, 2, \dots, M$), 其形式为

$$P^l: \text{If } x_1^l \text{ is } F_1^l \text{ and } x_2^l \text{ is } F_2^l \text{ and } x_3^l \text{ is } F_3^l \text{ and } x_4^l \text{ is } F_4^l, \text{ then } y^l = G^l.$$

其中: $x_i^l \in F_i^l, y^l \in G^l$.

ANFIS辨识模型包括5层节点, 各层节点依次为: 隶属度函数节点、模糊规则前件节点、归一化节点、模糊规则输出节点、模糊系统输出节点. 带有 n 个输入 M 条规则的ANFIS结构如图2所示.

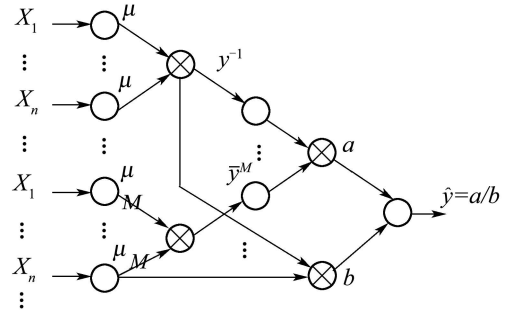


图2 ANFIS辨识模型结构图

Fig. 2 Structure of the ANFIS identification model

根据误差函数 $E = \frac{1}{2} [y(k) - \hat{y}(K)]^2$, 并设输入的隶属度函数为高斯函数:

$$\mu_{F_i}^l(x_i(k)) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right]. \quad (2)$$

ANFIS模型输出表达式为

$$\hat{y}(k) = \frac{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{F_i}^l(x_i(k)) y^l(k)}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{F_i}^l(x_i(k))}. \quad (3)$$

式中设

$$y(k) = \frac{a}{b}, \quad b = \sum_{l=1}^M z^l, \\ z^l = \prod_{i=1}^n \exp\left[-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right].$$

应用BP误差反向传播算法, 得到高斯隶属度中心和宽度调整公式如下:

$$\bar{x}_i^l(k+1) = \bar{x}_i^l(k) + \eta [e_k (e_k - e_{k-1}) \frac{y^l - f}{b} z^l \cdot \frac{2(x_i(k) - \bar{x}_i^l(k))}{(\sigma_i^l(k))^2}]. \quad (4)$$

2.2 DMFC系统的自适应神经模糊辨识结果 (Identification results of ANFIS identification)

采用上述算法对DMFC系统进行辨识仿真, 通过对输入控制量隶属度函数的参数的调整, 使辨识模型能够在较短的时间里, 较高精度地模拟系统实际的温度动态响应, 最大误差不超过1℃.

图3为DMFC神经模糊辨识模型的辨识结果。

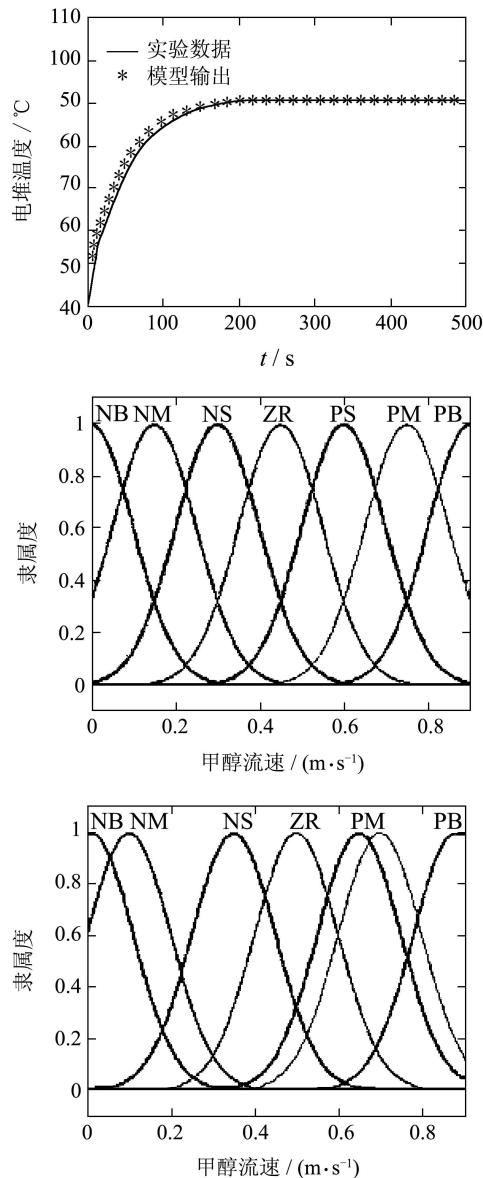


图3 DMFC的自适应神经模糊辨识模型的辨识结果

Fig. 3 Identification results of ANFIS identification model

3 改进型DMFC系统自适应神经模糊控制系统设计(Design of an improved adaptive neural fuzzy controller)

DMFC系统是一个多输入输出、多相循环的复杂化学反应过程,它具有强非线性、强耦合性、参数分布等特点.在控制过程中,过大的甲醇,空气流速会使反应不完全,并且带走热量,降低电池的工作温度,另外,阳极甲醇过多会使渗透增加,阴极极化增强从而影响电池性能;过小的流速无法满足负载要求,电化学反应缓慢.因此,可以根据甲醇流速 ν_a ,空气流速 ν_c 和冷却水流速 ν_w 对电堆温度 T 的影响程度和控制精度的要求,进行分区控制,即在不同的温度范围用不同的控制量进行控制.

3.1 控制器设计(Controller design)

针对本系统,实验数据表明,在电堆工作压力一定的情况下,电堆理想工作温度为80°C.选择电堆工作温度 T 的基本论域是[50°C~130°C],温度误差变化率为[-1.5°C/s~1.5°C/s],甲醇流速为[0.1 L/min~5 L/min],空气流速为[0.5 L/min~12 L/min],冷却水流速为[0.000 L/min~0.032 L/min],采样周期为2s模糊规则建立原则如下:

1) 当温度高于 T_d 时,甲醇、空气、冷却水流速增大,反之减小.

2) 在实际操作过程中,先利用铅酸蓄电池将电堆加热至50°C,然后启动系统.为使电堆尽快达到设定温度,在启动后的一段时间内不进行冷却(时间根据电堆大小而定).

3) 根据甲醇流速 ν_a ,空气流速 ν_c 和冷却水流速对电堆温度 T 的影响程度和控制精度的要求,进行分区控制,当温度误差大于4°C时,调节冷却水流速进行控制,当误差小于4°C时,调节甲醇、空气流速进行控制.

DMFC系统实际输出与设定值的误差 e 和误差变化 e_c 作为自适应神经模糊控制器的输入,应用一种新的模糊遗传算法(FGA)对隶属函数参数和模糊规则进行综合调整和更新.通过反复调整使DMFC系统获得良好的控制精度和效果.DMFC控制系统结构如图4所示.

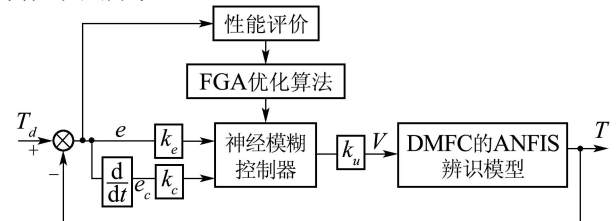


图4 DMFC工作温度控制系统结构图

Fig. 4 Structure of the neural fuzzy control system of DMFC stack

图中: k_e, k_c 为控制器的量化因子, k_u 为比例因子;简记的 V 为控制输入矢量,即甲醇流速 ν_a ,空气流速 ν_c 和冷却水流速 ν_w ,简记的 T 为输出矢量,即DMFC电堆温度; T_d 是目标温度值.

3.2 FGA在控制过程中的应用(Application of FGA in the control process)

自适应神经模糊控制器是Mamdani模糊推理系统与5层前馈神经网络结合而成的,输入量包括温度误差 e 和温度误差变化率 e_c ,输出量包括 ν_a, ν_c, ν_w ,根据分析结果和实际操作经验,确定隶属度函数参数、量化因子、比例因子,以及初始模糊控制规则.神经模糊系统采用单值模糊化,高斯隶属度函数,乘积推理,用中心平均反模糊化法进行解模糊.

具有初始的神经模糊逻辑系统后,开始以

DMFC电堆的神经网络模型为控制对象实施控制. 在控制过程中, 考虑到初始的参数(量化因子, 比例因子及隶属度函数)和规则应用于实际对象时不可能是最佳的, 所以有必要采取优化方法对它们进行优化, 以提高控制性能^[7]. 本文设计了一种模糊遗传算法对模糊控制器的结构, 参数以及控制规则进行改进和优化.

模糊遗传算法的实现思想是: 在群体的遗传算法过程中, 通过模糊控制器及时、自适应地调整交叉、变异概率, 以使遗传算法解的质量更好, 收敛速度更快, 并在此过程中找到最佳的模糊规则. 下面给出模糊遗传算法流程图(如图5所示).

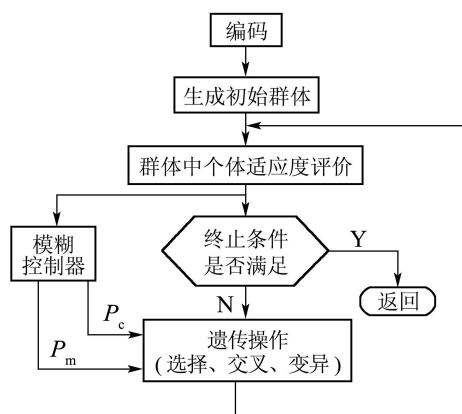


图5 模糊遗传算法流程图

Fig. 5 Flow chart of fuzzy genetic algorithm

从上图可以看出, 模糊遗传算法中 P_c 、 P_m 并不是固定不变的, 而是在每次迭代过程结束后, 根据当前种群中个体适应度的综合情况, 使用模糊控制的方法, 生成下次遗传操作的 P_c 和 P_m , 以加快遗传算法的进程, 改进收敛质量. 其步骤如下:

Step 1 初始化. 设置迭代次数计数器 $k \leftarrow 0$; 设置最大迭代次数 K ; 随机生成 M 个个体作为初始群体 $\text{oldpop}(0)$.

Step 2 个体评价. 计算群体 $\text{oldpop}(k)$ 中各个个体的适应度.

Step 3 选择运算. 将选择算子作用于群体. 本文选用的选择算子为适应度选择法(赌轮选择法).

Step 4 交叉和变异运算. 将交叉算子和变异算子作用于群体, 且其交叉概率 $P_c(k)$ 和变异概率 $P_m(k)$ 来源于模糊控制器的输出. 群体 $\text{oldpop}(k)$ 经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体 $\text{oldpop}(k+1)$.

Step 5 终止条件判断. 若 $k \leq K$, 则 $k \leftarrow k+1$, 转到Step 2; 若 $k > K$, 则将进化过程中所得到的具有最大适应度的个体作为最优解输出, 终止计算.

至于Step 4中用模糊控制器来确定每一组 P_c 、 P_m 值的方法和通过迭代过程获得使遗传算法效果最佳

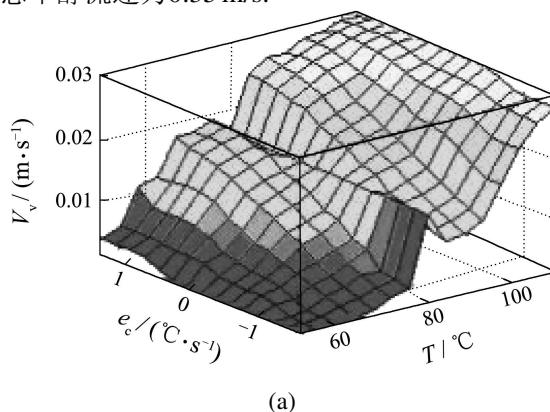
的模糊控制规则的方法详见文献[8].

4 仿真结果(Simulation results)

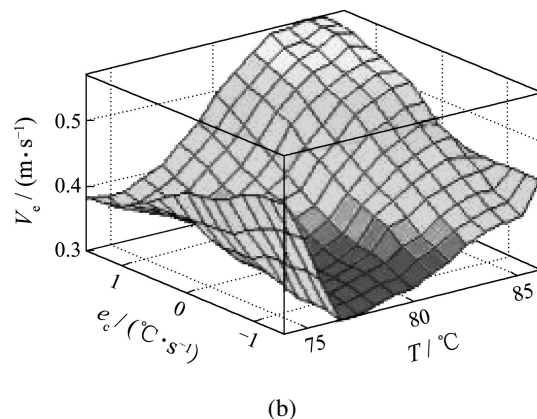
应用如图4所示的系统对DMFC电堆温度进行仿真. 而DMFC电堆的温度模型由上面生成的ANFIS辨识模型代替, 以实现在线计算和仿真, 获得较快的输出特性. 仿真程序由MATLAB编写, 主要工作是将当前状态输入神经网络模型, 计算温度的下一时刻输出值, 与设定温度相减计算得到温度差值 e , 并将前后相邻时刻的 e 值相减得到 e_c , 将 e 和 e_c 作为神经模糊控制器的输入, 经模糊推理运算计算出相应的流速控制量输出, 再将其输入到DMFC电堆的ANFIS模型, 运算得到温度输出值 T .

图6为采用改进自适应神经模糊控制器的DMFC系统仿真结果.

其中: 图6(a)为电堆工作温度的变化范围 $50^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$, 温度误差变化率为 $-1.5^\circ\text{C/s} \sim 1.5^\circ\text{C/s}$ 时的冷却水流速的调节曲面. 由图可见, 在 $76^\circ\text{C} \sim 84^\circ\text{C}$ 区域出现断沟, 这是由于采用分区控制时, 到达此区域冷却水流速不再变化, 通过甲醇和空气流速调节温度的缘故. 稳态冷却水流速为 0.015 m/s . 图6(b)显示甲醇流速在 $76^\circ\text{C} \sim 84^\circ\text{C}$ 范围内的调节曲面, 通过调节甲醇流速, 可以使工作温度平稳、光滑地到达设定值. 稳态甲醇流速为 0.35 m/s .



(a)



(b)

图6 DMFC系统自适应模糊神经网络控制器仿真结果

Fig. 6 Simulation results with the adaptive neural fuzzy controller

本节建立一个仿真,用以验证所设计控制器的性能. 仿真中,采用非线性PID、传统模糊以及自适应神经模糊3种控制算法,对控制性能进行比较. 仿真结果如图7所示. 在控制过程中,在线调整PID控制器参数,但电堆工作温度仍较难快速稳定在设定温度上. 可以看到,比起PID控制器,传统模糊控制的性能已经有了很大的改善,但由于参数的选择不是最佳,规则也未进行优化,系统无法很快地进入稳定状态(大约需要300 s). 与以上两种控制算法相比,基于FGA的自适应神经模糊控制器是一种更为有效的控制方法,它能使电堆工作温度平滑、快速地到达设定温度(需要150 s左右),并稳定在精度范围内. 这表明FGA算法对优化控制器结构,改善控制器性能起了重要作用. 对DMFC系统采用本文设计的神经模糊控制器进行控制是有效的,达到了预定的控制目标,模糊遗传算法(FGA)在提高控制器性能上发挥了重要作用.

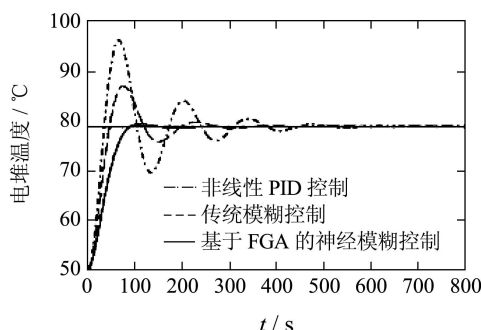


图7 3种不同控制算法的控制性能比较结果

Fig. 7 Experimental results of three different control methods

5 结论(Conclusion)

本文从设计控制器的角度出发,利用神经模糊推理技术对DMFC系统温度进行建模和控制. 在建模过程中,基于实验的输入输出数据建立了DMFC电堆温度的ANFIS辨识模型,避开了DMFC电堆的内部复杂性. 在控制过程中,将训练好的ANFIS网络模型作为DMFC控制系统的参考模型,设计了一

个DMFC电堆的新型自适应神经模糊控制器,并首次采用一种新的模糊遗传算法对模糊控制器的结构,参数和规则进行了综合优化. 由仿真结果可知,采用自适应神经模糊推理技术实现DMFC这类复杂非线性系统的建模是完全可行的,建模的精度也较高,能够满足实时控制的需要;基于FGA算法设计的改进型神经模糊控制器可以调节和控制电堆的温度快速平滑地过渡到设定的稳定值,取得了比非线性PID和传统模糊控制器更好的控制效果.

参考文献(References):

- [1] REN X, ZEL ENAYP, THOMAS S, et al. Recent advances in direct methanol fuel cells at Los Alamos National Laboratory [J]. *Journal of Power Sources*, 2000, 86(1-2): 111 – 116.
- [2] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
(Yi Baolian. *Fuel Cell—Principle·Technology·Application*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.)
- [3] COSTAMAGNA P. Transport phenomena in polymeric membrane fuel cell[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(4): 323 – 332.
- [4] ROWE A, LI Xianguo. Mathematical modeling of proton membrane fuel cells[J]. *Power Source*, 2001, 102(1-2): 82 – 96.
- [5] LIN Fa-Jeng, WAI Rong-Jong, DUAN Rou-Yong. Fuzzy neural networks for identification and control of ultrasonic motor drive with LLC resonant technique[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, 46(5): 1331 – 1342.
- [6] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116 – 132.
- [7] ZHU Weixing, LI xincheng, etc. Research on integrated optimal design of fuzzy controller using genetic algorithms[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 23(1): 68 – 70,93.
- [8] QI Zhidong, ZHU Xinjian, ZHU Weixing. Improved FGA based on the optimization of fuzzy rules[J]. *Mini-micro Systems*, 2005, 26(1): 46 – 49.

作者简介:

戚志东 (1976—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为模糊控制、遗传算法和智能控制在燃料电池控制中的应用, E-mail: qizhi-dong@sina.com.cn;

朱新坚 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为非线性系统、智能控制、燃料电池等, E-mail: xjzhu@sjtu.edu.cn.