

# 质子交换膜燃料电池温度模型与模糊控制

胡 鹏<sup>1</sup>, 曹广益<sup>1</sup>, 朱新坚<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 自动化系, 上海 200240;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院 燃料电池研究所, 上海 200240)

**摘要:** 为保证质子交换膜燃料电池(PEMFC)安全高效运行, 必须对其进行有效的温度控制, 本文阐述了一种带积分环节的二维增量模糊控制器用于PEMFC的温度控制. 首先从物料平衡和能量平衡角度对PEMFC的电能和热能的动态特性进行分析, 建立了基于控制的PEMFC的温度机理动态模型; 其次根据所建立的温度模型和控制经验规则设计带积分环节的PEMFC温度二维增量模糊控制器; 最后对所建立温度模型及其模糊控制器进行仿真分析, 结果不仅表明该模型能模拟PEMFC的动态特性, 而且验证该控制器能将PEMFC温度控制在理想工作范围内, 并具有较强的鲁棒性, 可用于对PEMFC进行温度实时控制.

**关键词:** 燃料电池; 温度特性; 数学建模; 模糊控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Temperature model and fuzzy control for the proton-exchange-membrane fuel cell

HU Peng<sup>1</sup>, CAO Guang-yi<sup>1</sup>, ZHU Xin-jian<sup>2</sup>

(1. Automation Department, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Institute of Fuel Cell, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** An effective temperature control is the key issue to the safe and efficient operation of the PEMFC's (proton-exchange-membrane fuel cell). The relation between the electrical power and thermal energy dynamic characteristics of a PEMFC are analyzed based on the mass-and-energy balance principle; from which a physical dynamic temperature model for a PEMFC is developed. Based on this model together with the control experience, a 2-dimensional(2D) incremental fuzzy controller with integrator is designed for controlling the PEMFC temperature. The developed temperature model and the fuzzy controller are simulated and analyzed; the result shows that the model represents the PEMFC dynamic characteristics appropriately, and the 2D incremental fuzzy controller with integrator maintains the PEMFC temperature within the desired operation range with excellent robust ability in the real-time temperature control for PEMFC.

**Key words:** fuel cell; temperature dynamic characteristics; mathematical modeling; fuzzy control

### 1 引言(Introduction)

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种清洁高效的分布式电源, 它能将氢燃料的化学能直接转化为电能和热能, 具有电流密度大、工作温度低、响应速度快等优点, 具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>. 在PEMFC的运行中, 大约有一半左右的能量以热能形式输出, 因此有效的温度控制是保证电池性能的关键. 同时温度也影响电池的运行特性, 当温度较低时电池内各种极化增强, 欧姆阻抗也较大, 会使电池性能下降; 而当温度升高时, 会降低欧姆阻抗, 减少极化损失, 利于电化学反应发生, 但过高的温度又会导致质子交换膜脱水, 电导率下降, 电池性能变坏甚至膜破裂<sup>[2]</sup>. 因此, 必须保持PEMFC运行在理想工作温度

范围内. 通常PEMFC的工作范围在60℃~90℃, 而其理想工作范围在70℃. 对于5 kW功率以上的PEMFC通常采用冷却水循环方式排出电池产生的多余热量. 为维持电堆稳定在理想温度70℃运行, 需采用必要的控制方法实时调节冷却水流量.

模糊控制是一种智能控制方法, 它以人的控制经验和专家知识为控制规则, 无需对象的精确数学模型, 具有鲁棒性强、操作简单、响应迅速和易于修改等优点<sup>[3]</sup>. 然而它也存在一些缺点: 常见的二维模糊控制在原点附近被近似为PD控制器, 具有静态误差, 而三维模糊控制器的规则会按立方增长, 使模糊控制的设计和整定复杂化<sup>[4]</sup>. 为设计一个结构简单且无静态误差的温度模糊控制器, 可以在二维增量模

糊控制器基础上, 并入积分环节消除静态误差. 因此为精确控制电堆温度, 可以采用带积分环节的增量模糊控制器实时调节冷却水的流量, 它能够综合反映历史信息对当前控制的影响, 克服外部负载变化的干扰, 并消除系统的静态误差.

本文首先建立PEMFC的温度特性机理模型, 其次根据控制经验规则设计带积分环节的PEMFC温度增量模糊控制器, 最后对所建立的数学模型及其模糊控制器进行仿真验证.

## 2 PEMFC温度动态建模(PEMFC temperature dynamic modeling)

PEMFC是复杂非线性系统, 为简化分析作了一些假设: 质子交换膜内水完全饱和, 电堆的压力和温度都是统一分布的. 可将质子交换膜燃料电池划分为电功率动态模型和温度动态模型进行建模分析.

### 2.1 电功率动态模型(Electrical power dynamic model)

PEMFC的电化学模型由一组经验公式组成, 用于预测燃料电池的输出电功率. 单电池的输出电压主要由开路电压 $E$ 、极化过电压 $\eta_{act}$ 和欧姆过电压 $\eta_{ohm}$ 组成<sup>[5]</sup>:

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohm}. \quad (1)$$

单电池的开路电压可由电堆温度 $T_{st}$ 和阳极氢气/阴极氧气分压力 $P_{H_2/O_2}$ 表示,

$$E = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{st} - 298.15) + (RT_{st}/2F) \times \ln[P_{H_2}(P_{O_2})^{0.5}]. \quad (2)$$

其中:  $R$ 为理想气体常数,  $F$ 为法拉第常数.

电流密度 $i$ 为电堆电流 $I_{st}$ 除以电池面积 $A$ :

$$i = I_{st}/A. \quad (3)$$

电池内的水蒸气含量会影响到电池内压力和温度等的热动态特性, 因此假设燃料电池内水蒸气完全饱和, 饱和水蒸气压力 $P_{sat}$ (kpa)可以表示为温度 $T$ 的函数<sup>[6]</sup>:

$$\lg P_{sat}(T) = -1.69 \times 10^{-10}T^4 + 3.85 \times 10^{-7}T^3 - 3.39 \times 10^{-4}T^2 + 0.143T - 20.92. \quad (4)$$

阳极氢气/阴极氧气分压力可表示为阳极/阴极压力 $P_{an/ca}$ 、电堆温度 $T_{st}$ 和电流密度 $i$ 的函数:

$$P_{H_2} = \{P_{an}/[P_{sat}(T_{st}) \times \exp(1.635i/T_{st}^{1.334})] - 1\} \times P_{sat}(T_{st}), \quad (5)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{ca} - P_{sat}(T_{st})}{[1 + 3.762 \exp(0.291i/T_{st}^{0.832})]}. \quad (6)$$

氢气和氧气浓度是温度和各分压力的函数,

$$C_{H_2} = 9.174 \times 10^{-7} \times P_{H_2} \times \exp(-77/T_{st}), \quad (7)$$

$$C_{O_2} = 1.97 \times 10^{-7} \times P_{O_2} \times \exp(498/T_{st}). \quad (8)$$

极化过电压可以由Tafel等式表示如下:

$$\eta_{act} = \xi T_{st} + 7.6 \times 10^{-5} T_{st} [\ln C_{O_2}] - 1.93 \times 10^{-4} T_{st} [\ln I_{st}] - 0.948, \quad (9)$$

$$\xi = 2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln A + 4.3 \times 10^{-5} \ln C_{H_2}. \quad (10)$$

欧姆过电压可由下式表示:

$$\eta_{ohm} = -iR_{int}. \quad (11)$$

单电池膜电阻 $R_{int}$ 可以通过膜厚度 $t_m$ 、膜水合含量 $\lambda_m$ 和温度 $T_{st}$ 表示<sup>[7]</sup>:

$$R_{int} = t_m / [(0.005139\lambda_m - 0.00326) \times \exp(1.155 - 350/T_{st})]. \quad (12)$$

$N$ 个单电池串联构成电堆, 其输出电功率为

$$P_{st} = NI_{st}V_{cell}. \quad (13)$$

### 2.2 温度动态模型(Temperature dynamic model)

根据能量守恒定律, 电化学反应产生的总功率 $\dot{Q}_{reacted}$ 、输入/输出气体热流动率 $\dot{Q}_{in}/\dot{Q}_{out}$ 、负载电功率 $P_{st}$ 、电堆表面环境热损失率 $\dot{Q}_{amb}$ 和冷却水散热流动率 $\dot{Q}_{cw}$ 维持动态平衡.

$$m_{st}c_{p,st} \frac{dT_{st}}{dt} = \dot{Q}_{react} + \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - P_{st} - \dot{Q}_{cw} - \dot{Q}_{amb}. \quad (14)$$

反应或产生的气体流量分别表示为

$$N_{an,H_2}^{react} = N_{ca,H_2O}^{gen} = 2N_{ca,O_2}^{react} = NI_{st}/(2F). \quad (15)$$

电化学反应产生的总功率表示如下:

$$\dot{Q}_{react} = N_{an,H_2}^{react} \times \Delta H. \quad (16)$$

设定氢气输入流量 $N_{an,H_2}^{in}$ 和空气输入流量 $N_{ca,air}^{in}$ 分别为其反应气体流量的 $\lambda_{H_2}$ 和 $\lambda_{O_2}$ 倍:

$$N_{an,H_2}^{in} = \lambda_{H_2} N_{an,H_2}^{react}, \quad (17)$$

$$N_{ca,air}^{in} = \lambda_{O_2} N_{ca,O_2}^{react} / 21\%. \quad (18)$$

气体输入热流动率(式中 $c$ 为定压比热容):

$$\dot{Q}_{in} = (N_{an,H_2}^{in} c_{p,H_2} + N_{an,H_2O}^{in} c_{p,H_2O}^g)(T_{an}^{in} - T_0) + (N_{ca,air}^{in} c_{p,air} + N_{ca,H_2O}^{in} c_{p,H_2O}^g)(T_{ca}^{in} - T_0), \quad (19)$$

而阳极氢气和阴极空气输入系统前都需饱和加湿处理, 则阳极和阴极输入水流量分别为

$$N_{an,H_2O}^{in} = \frac{P_{sat}(T_{an}^{in})N_{an,H_2}^{in}}{P_{an} - P_{sat}(T_{an}^{in})}, \quad (20)$$

$$N_{ca,H_2O}^{in} = \frac{P_{sat}(T_{ca}^{in})N_{ca,air}^{in}}{P_{ca} - P_{sat}(T_{ca}^{in})}. \quad (21)$$

气体输出热流动率

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{out} = & (N_{an,H_2}^{out} c_{p,H_2} + N_{an,H_2O}^{out} c_{p,H_2O}^g + N_{ca,O_2}^{out} c_{p,O_2} + \\ & N_{ca,N_2}^{out} c_{p,N_2} + N_{ca,H_2O,g}^{out} c_{p,H_2O}^g + \\ & N_{ca,H_2O}^{gen} c_{p,H_2O}^l)(T_{st} - T_0). \end{aligned} \quad (22)$$

阳极氢气和 水蒸气输出气体流量分别为

$$N_{an,H_2}^{out} = N_{an,H_2}^{in} - N_{an,H_2}^{react}, \quad (23)$$

$$N_{an,H_2O}^{out} = N_{an,H_2O}^{in} - \frac{P_{sat}(T_{st})N_{an,H_2}^{react}}{P_{an} - P_{sat}(T_{st})}. \quad (24)$$

阴极氧气、氮气和 水蒸气输出流量分别为

$$N_{ca,O_2}^{out} = N_{ca,O_2}^{in} - N_{ca,O_2}^{react}, \quad (25)$$

$$N_{ca,N_2}^{out} = 0.79N_{ca,air}^{in}, \quad (26)$$

$$N_{ca,H_2O,g}^{out} = N_{ca,H_2O}^{in} - \frac{P_{sat}(T_{st})N_{ca,O_2}^{react}}{P_{ca} - P_{sat}(T_{st})}. \quad (27)$$

燃料电池由多块单电池组成, 空间上各点温度不一, 通过循环冷却水对 PEMFC 散热后, 可视冷却水输出温度为电堆温度, 且冷却水进出温差不要太大, 则冷却水带走的热量流动率为

$$\dot{Q}_{cw} = W_{cl}c_{p,H_2O}(T_{st} - T_{cw}^{in}). \quad (28)$$

电堆环境热损失率为环境温差与热阻之比:

$$\dot{Q}_{amb} = (T_{st} - T_{amb})/R_t. \quad (29)$$

至此建立了 PEMFC 的温度模型, 可通过模糊控制器调节冷却水流量来控制电堆温度.

### 3 温度模糊逻辑控制器设计(Temperature fuzzy logic controller design)

在实际的工业过程中, 由于被控对象过程的非线性、参数间的强烈耦合或大量的随机干扰等原因, 传统的控制方法(PID, PI等)难以取得令人满意的控制效果, 这时模糊控制方法就具有吸引力和实用性. PEMFC 是一个多输入多输出非线性系统<sup>[8]</sup>, 许多因素会影响到其温度特性, 例如输入气体的流量、温度、压力和外部负载等. 当外部负载变化时, 输入气体的流量也随之改变, 同时系统产生的电能和热能也变化. 为保持电堆温度稳定在 70℃, 采用带积分环节的二维增量模糊控制器, 根据温度误差和温度误差变化率实时调节冷却水流量, 克服外部负载变化所带来的扰动, 并且消除系统的温度静态误差.

带积分环节的二维增量模糊控制器基本原理如图 1 所示, 二维模糊控制器包括两个输入量: 一个是给定温度与实际输出温度之间的误差值:  $e = T_{ref} - T$ ; 另一个是温度误差变化率:  $\Delta e = \frac{de}{dt}$ . 通过数字采样实时获取精确的温度误差和误差变化率, 并将这两个精确值模糊化成模糊量, 然后根据经

验推理的合成规则进行模糊决策得到模糊控制量输出, 进而对其进行反模糊化, 得到被控对象的精确控制量. 当电堆温度高于设定值时, 需要增加冷却水流量以便带走更多的热量达到降温的目的; 反之, 则需要降低冷却水流量. 控制量的由 3 部分组成: 第 1 部分是上一采样时刻的控制量  $u(kt_s - t_s)$ , 第 2 部分是积分环节增量  $u_i(kt_s)$ , 第 3 部分是模糊控制器的输出增量  $\Delta u(kt_s)$ , 其中  $f_\Lambda$  为模糊推理函数, 表示为

$$\begin{aligned} u(kt_s) = & u(kt_s - t_s) + u_i(kt_s) + \Delta u(kt_s) = \\ & u(kt_s - t_s) + K_e K_i e(kt_s) + K_u F_\Lambda(e(kt_s)), \end{aligned} \quad (30)$$

$$F_\Lambda(e(kt_s)) = f_\Lambda(K_e e(kt_s), K_{ec} \Delta e(kt_s)), \quad (31)$$

$$e(kt_s) = T_{ref} - T(kt_s), \quad (32)$$

$$\Delta e(kt_s) = \frac{de(kt_s)}{dt} = \frac{e(kt_s) - e(kt_s - t_s)}{t_s}. \quad (33)$$

对式(33)取 z 变换得

$$u(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} [K_e K_i e(z) + K_u F_\Lambda(e(z))]. \quad (34)$$

上式中第 1 项是积分环节输入, 第 2 项是控制器提供的增量输出, 在 z 域中,  $1/(1 - z^{-1})$  具有累加的性质, 相当于连续域中的积分, 只有当误差  $e = 0$  时, 控制量  $u$  才能停止变化, 达到无静差控制.

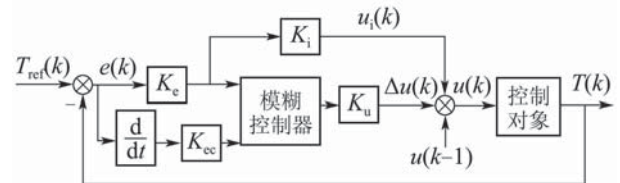


图 1 带积分环节的二维增量模糊控制器基本原理图  
Fig. 1 A schematic diagram of the 2D incremental fuzzy controller with integrator

质子交换膜燃料电池的工作范围在 40℃~100℃ 之间, 其理想工作温度  $T_{ref}$  为 70℃, 则温度误差  $e$  的物理论域范围为 [-30, 30]℃, 通过量化因子  $K_e$  线性转化为 [-6, 6] 的模糊论域范围, 则  $K_e = 6/30 = 0.2$ . 对温度误差变化率  $\Delta e(t) = \frac{de(t)}{dt} = -\frac{dT(t)}{dt}$ , 因此温度误差变化率与被控对象输出温度变化速率大小相等, 符号相反. 可以在额定电流下进行冷却水输入阶跃测试, 进而获取最大温度误差变化率的物理论域范围. 通过阶跃测试实验, 最大温度误差变化率为 0.107℃/s, 因此  $\Delta e$  的物理论域范围为 [-0.107, 0.107]℃/s, 则  $K_{ec} = 6/0.107 = 56.1$ . 模糊控制器的输出量论域设定在 [-6, 6] 的控制量, 进而通过比例因子  $K_u$  将模糊论域范围线性转换为 [0, 1] 1/s 的物理量范围, 得到适合被控对象的精确控制增量  $\Delta u(kt_s)$ , 这一值与上一采样时刻的控制

量 $u(kt_s - t_s)$ 及积分部分增量 $u_i(kt_s)$ 之和构成了冷却水流量. 冷却水的最大流量为1 l/s, 初选时最大控制增量一般是控制增量最大值的百分之几, 则 $K_u = 1 \times 1.2\% = 0.012$ . 当误差较大时, 起主导作用的是模糊控制器, 反之, 起主导作用的是积分控制器以消除静差. 一般,  $K_i$ 选择得大, 响应快, 过渡时间短, 系统超调较大;  $K_i$ 选择得小, 过渡时间长, 系统超调较小, 初步选择 $K_i = 0.001$ .

将输入输出量划分为7个模糊子集, 即: NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大),  $i = e, \Delta e, f_A$ . 采用高斯型隶属度函数模糊化输入输出变量, 其隶属度表示为:  $\mu = \exp(-(z - c)^2/\delta^2)$ , 对应各变量 $e, \Delta e, u$ 的隶属度函数曲线如图2所示. 采用非均匀分布的模糊隶属度函数, 提高控制灵敏度并保持稳定性. 在较大误差的区域采用较低分辨率的模糊集, 在较小误差的区域采用较高分辨率的模糊集, 在接近零误差时选用宽度小、分辨率高的模糊集. 根据操作过程经验, 采用if-then模糊控制规则设计模糊推理系统, 针对被控变量制定49条模糊规则, 如表1所示. 经过模糊推理后, 通过加权平均法(重心法)进行反模糊化, 即

$$z_0 df = \sum_{i=1}^n z_i \mu(z_i) / \sum_{i=1}^n \mu(z_i).$$

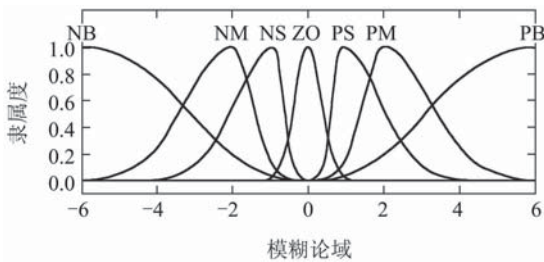


图2  $e, \Delta e, u$ 隶属度定义

Fig. 2  $e, \Delta e, u$  membership degree definition

表1 模糊推理规则表

Table 1 Fuzzy inference rules

$\Delta e$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

### 4 仿真测试(Simulation test)

PEMFC是一个多输入多输出非线性系统, 系统的输入分别为气体输入摩尔流量及温度、冷却水输

入流量及温度和外部负载, 系统的输出分别为电堆电压和温度. 采用MATLAB/Simulink R2009b软件进行PEMFC仿真研究; 同时, 为验证所建立的PEMFC的温度动态模型性能, 通过可编程电子负载和温度采集实验进行数据对比.

实验用PEMFC电堆由112个单电池串联组成, 即 $N = 112$ , 单电池有效面积设计为 $225 \text{ cm}^2$ , 即 $A = 225 \text{ cm}^2$ , 质子交换膜采用Nafion117, 则膜厚度 $t_m = 0.0178 \text{ cm}^{[9]}$ , U型双极板面积为 $360 \text{ cm}^2$ , Pt催化剂用量为 $0.6 \text{ mg/cm}^2$ , 采用水冷方式降温. 电堆的输入气体根据负载需求而确定, 一般阳极保持80%的氢气利用率, 即 $\lambda_{\text{H}_2} = 1.25$ , 阴极保持40%的氧气利用率, 即 $\lambda_{\text{O}_2} = 2.5$ , 阳极压力维持 $P_{\text{an}} = 2.9 \text{ atm}$ , 阴极压力维持 $P_{\text{ca}} = 3 \text{ atm}$ , 阳极输入氢气经过升温饱和和加湿度后温度 $T_{\text{an}}^{\text{in}} = 323 \text{ K}$ , 同时阴极输入空气经过升温饱和和加湿度后温度 $T_{\text{ca}}^{\text{in}} = 323 \text{ K}$ , 冷却水输入温度维持 $T_{\text{cw}}^{\text{in}} = 333 \text{ K}$ , 环境温度为室温状态 $T_{\text{amb}} = 298 \text{ K}$ . 在仿真实验中, 输入气体均饱和加湿, 故膜水含量 $\lambda_m = 14^{[10]}$ , 氢气燃烧焓变 $\Delta H = 285.5 \text{ kJ/mol}^{[11]}$ , 热阻 $R_t = 0.145^{[12]}$ , 电堆热容 $m_{\text{st}}c_{p,\text{st}} = 70 \text{ kJ/K}^{[13]}$ .

在系统实际运行中PEMFC的热电效应取决于负载变化, 而负载变化又可通过电流变化反映; 同时, 输入冷却水流量也影响到电堆热效应. 因此可通过改变PEMFC的负载电流和冷却水流量方式来考察动态模型的准确性, 图3给出了PEMFC在工作范围内的负载电流和冷却水流量模型测试信号, 主要由上升沿或下降沿阶跃信号组成. 在模型测试信号作用下, 电堆电压和温度的实验采集数据与模型仿真数据进行比较, 如图4所示. 图4(a)说明电堆电压受负载电流影响较大, 图4(b)则表明负载的增加会导致电堆温度上升, 而冷却水流量的加速会导致温度降低, 并且仿真数据与实验数据基本吻合, 这也验证了本文PEMFC温度模型的准确性.

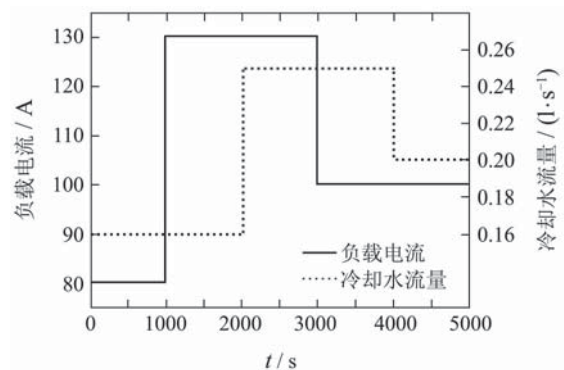


图3 模型测试信号

Fig. 3 Modeling test signal

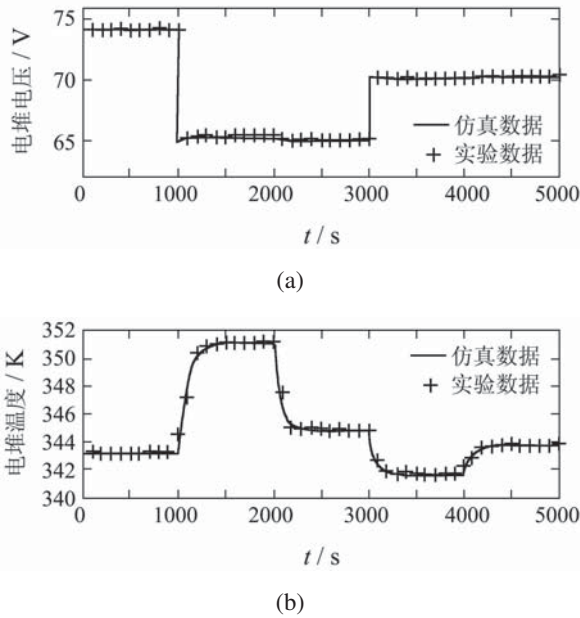


图 4 模型校验  
Fig. 4 Model validation

针对所建立的PEMFC模型, 为维持电堆温度稳定在70℃, 应用带积分环节的二维增量模糊控制方法, 对其进行有效的温度控制. 可将外部负载电流作为PEMFC的主要扰动量(见图5所示), 通过带积分环节的二维增量模糊控制器实时调节冷却水流量来控制电堆温度. 在此模糊控制器作用下的冷却水流量如图6所示, 相应的被控电堆温度如图7所示, 电堆温度经过超调后维持在目标温度343 K, 最大超调小于2 K, 调节时间不超过700 s, 而且当系统稳定后无静态误差. 为检验带积分环节的二维增量模糊控制器的性能, 传统的PI控制器的温度控制效果在图7中用虚线描述, 但图片显示模糊控制器效果仅略优于PI控制器. 为此, 需要进一步比较两者的鲁棒性.

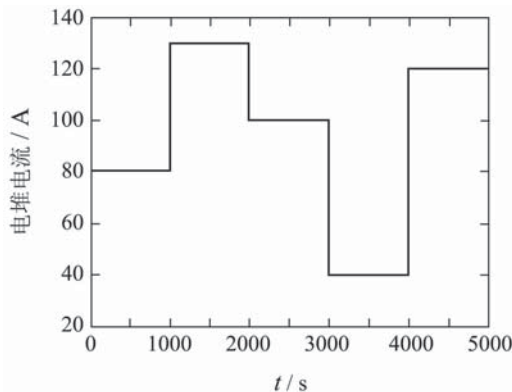


图 5 控制测试信号  
Fig. 5 Control test signal

采用改变PEMFC模型参数来检验控制器鲁棒性, 维持负载电流在130 A运行, 设定控制测试信号

为: 第1000 s时膜水含量 $\lambda_m$ 由8阶跃到14, 第2000 s时环境温度 $T_{amb}$ 由298 K阶跃到308 K, 第3000 s时冷却水输入温度 $T_{cw}^{in}$ 由333 K阶跃到335 K, 第4000 s时热阻 $R_t$ 由0.145 kW阶跃到0.072 kW, 应用带积分环节的二维增量模糊控制器和传统的PI控制器, 对PEMFC进行温度控制, 被控温度动态过程如图8所示. 可见, 模糊控制器的调节时间和超调幅度均小于PI控制器, 因此当模型参数变化时, 带积分环节的二维增量模糊控制器的鲁棒性要优于PI控制器.

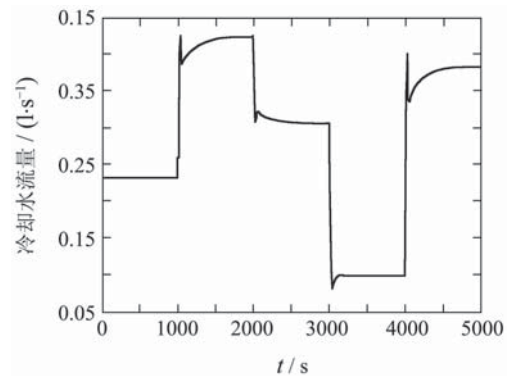


图 6 模糊控制器作用下冷却水流量  
Fig. 6 Cooling water flux under the fuzzy controller

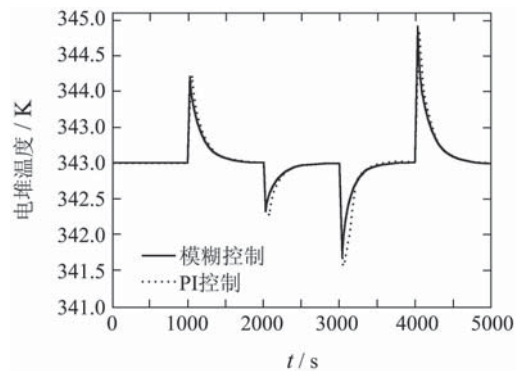


图 7 被控温度动态过程  
Fig. 7 Controlled temperature dynamic process

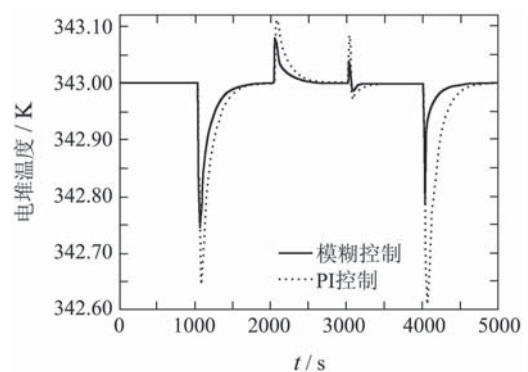


图 8 被控温度动态过程  
Fig. 8 Controlled temperature dynamic process

## 5 结论(Conclusion)

通过对PEMFC电热动态特性的分析,建立了其温度机理模型,并根据控制经验规则设计了带积分环节的PEMFC温度二维增量模糊控制器,根据温度误差和温度误差率实时调节冷却水的流量和冷却水散热流动率,将阶跃负载电流作为测试信号,进行了系统建模和控制仿真实验.仿真不仅表明所建模型能模拟PEMFC的动态特性,而且验证所设计的模糊控制器能随燃料电池电化学反应变化实时调节冷却水流量,不仅有效消除外部负载变动所带来的干扰,而且具有较好的鲁棒性,维持PEMFC运行在理想工作温度范围.

## 参考文献(References):

- [1] KIRUBAKARAN A, JAIN S, NEMA R K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2430 – 2440.
- [2] YU S, JUNG D. Thermal management strategy for a proton exchange membrane fuel cell system with a large active cell area[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(12): 2540 – 2548.
- [3] SCHUMACHER J O, GEMMAR P, DENNE M, et al. Control of miniature proton exchange membrane fuel cells based on fuzzy logic[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 129(2): 143 – 151.
- [4] ZHANG H G, LIU D R. Fuzzy modeling and fuzzy control[M]//*Control Engineering*. Boston, American: Birkhauser, 2006.
- [5] 李奇, 陈维荣, 刘述奎. 质子交换膜燃料电池动态建模及其双模控制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(7): 809 – 811.  
(LI Qi, CHEN Weirong, LIU Shukui. Dynamic modeling of proton exchange membrane fuel cell for double model control[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(7): 809 – 811.)
- [6] YU X C, ZHOU B, SOBIESIAK A. Water and thermal management for Ballard PEM fuel cell stack[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 147(1/2): 184 – 195.
- [7] ARSIE I, DI DOMENICO A, PIANESE C. Modeling and analysis of transient behavior of polymer electrolyte membrane fuel cell hybrid vehicles[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2007, 4(3): 261 – 271.
- [8] 李果, 张培昌, 余达太. 电动车燃料电池控制系统[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 289 – 293.  
(LI Guo, ZHANG Peichang, YU Daitai. A control system for fuel-cell electric vehicles[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 289 – 293.)
- [9] SLADE S M, RALPH T R, LEÓN C P, et al. The ionic conductivity of a nafion 1100 series of proton-exchange membranes re-cast from Butan-1-ol and Propan-2-ol[J]. *Fuel Cells*, 2010, 10(4): 567 – 574.
- [10] PUKRUSHPAN J T. *Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors*[D]. Michigan: University of Michigan, 2003.
- [11] HEINZEL A, ROES J, BRANDT H. Increasing the electric efficiency of a fuel cell system by recirculating the anodic offgas[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 145(2): 312 – 318.
- [12] GOU B, KI NA W, DIONG B. *Fuel Cells: Modeling, Control and Application*[M]. Boca Raton, American: Taylor and Francis Group CRC Press, 2010.
- [13] OSZCIPOK M, ZEDDA M, HESSELMANN J, et al. Portable proton exchange membrane fuel-cell systems for outdoor applications[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 157(2): 666 – 673.

## 作者简介:

**胡鹏** (1982—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为燃料电池系统的建模、优化与控制, E-mail: hupengsh@sjtu.edu.cn;

**曹广益** (1940—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统的分析及控制与智能机器人, E-mail: gyciao@sjtu.edu.cn;

**朱新坚** (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统的分析及控制、燃料电池发电系统的设计与控制, E-mail: xjzhu@sjtu.edu.cn.