

## PEMFC 动态建模与模糊分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制

戚志东<sup>†</sup>, 周 茜, 卞慧娟, 马 倩

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

**摘 要:** 针对氢气在扩散过程中的分数阶特性, 建立 PEMFC 系统的温度和输出电压分数阶模型. 基于此模型, 将分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制与模糊控制相结合, 提出一种模糊分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器, 控制氢气流量实现负载扰动下电堆的输出电压最佳. 仿真结果表明, 模糊分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制系统在提高控制系统的实时性和抗干扰性的同时, 能够改善系统的稳态性.

**关键词:** 分数阶模型; 氢气流量; 模糊分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## The dynamic model of pemfc and study on fuzzy fractional $PI^\lambda D^\mu$ controller

QI Zhi-dong<sup>†</sup>, ZHOU Xi, BIAN Hui-juan, MA Qian

(Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Since the diffusion process of the stack anode gas exists fractional properties, the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) temperature and output voltage fractional order model is established. Based on the fractional model, the fractional  $PI^\lambda D^\mu$  controller is proposed by combining fractional order  $PI^\lambda D^\mu$  control and fuzzy control. The PEMFC output voltage can maintain the best state under the load disturbance by controlling the hydrogen flow rate. Simulation results show that the fuzzy fractional  $PI^\lambda D^\mu$  controller can improve the performance of the real time anti-jamming and steady-state of the system.

**Keywords:** fractional order model; hydrogen flow rate; fuzzy fractional order  $PI^\lambda D^\mu$  controller

### 0 引 言

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 是一种通过电化学反应将储存在燃料中的化学能直接转换为电能, 具有高功率、高能量转换效率、低温启动、无环境污染等优点, 应用前景广阔<sup>[1]</sup>. 数学建模在质子交换膜燃料电池发展上扮演了一个重要角色, 一些学者也应用数学建模知识建立起了各种 PEMFC 的模型. 张明<sup>[2]</sup> 建立了 3 种燃料电池分数阶传递函数模型, 但这种模型没有涉及具体的运行参数对电池输出特性的影响, 不能直接用来作为控制的模型. Xue 等<sup>[3]</sup> 详细叙述了燃料电堆系统的数学模型, 包括电池堆模型、空气系统模型、冷却系统模型等, 并对电池对系统的优化提出了相应的设计与验证. 该模型能够很好地描述电池的输出特性, 也能说明输出特性与具体的温度、压力和流量等参数的关系, 但没有考虑

气体在扩散过程中存在的分数阶特性. 张旭<sup>[4]</sup> 分析出热能溢出具有分数阶特性, 由此建立了 PEMFC 电特性和温度特性的分数阶动态模型, 仿真结果表明分数阶模型能更好地描述燃料电池实际运行状态, 依此建立的控制器的控制效果.

本文考虑到 PEMFC 电堆氢气流量扩散过程中存在分数阶特性以及温度对输出电压的影响, 基于 PEMFC 氢气压力和温度的分数阶动态子模型建立了 PEMFC 输出电压的动态模型. 为了提高 PEMFC 系统的运行可靠性和稳定性, 采用一种合适有效的控制方法. 由于 PEMFC 输出电压控制系统是一个大滞后、大惯性、非线性、具有时变不确定性因素的多变量系统, 采用常规的分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器很难达到要求, 本文提出一种模糊分数阶 PID 控制器, 基于模糊推理思想对分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  的多个参数进行在线优

收稿日期: 2016-05-03; 修回日期: 2016-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61403199, 61374153); 国家留学基金项目.

作者简介: 戚志东 (1976—), 男, 副教授, 博士, 从事分数阶建模及控制系统等研究; 周茜 (1992—), 女, 硕士生, 从事分数阶控制器设计及应用的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: qizhidong@sina.com

化,使PEMFC输出电压稳定工作在理想工作点附近,有效地提高了系统的发电性能。

### 1 PEMFC分数阶动态模型

目前已建立的许多模型只考虑了电堆稳定运行状态下的情况,并未考虑电堆运行工况是随参数变化而变化的<sup>[5-6]</sup>,例如电堆负载的变化、阳极氢气流速的变化、电堆温度的变化等。目前,对电堆模型进行整数阶建模的研究较多,很少涉及分数阶领域,但一些实际系统的某些特性或过程会受到或多或少的非整数阶次的影响,如具有记忆性、遗传性的粘性物质和大规模扩散或热传导等过程。燃料电池反应过程中的气体扩散、热量传输恰好满足这一特征,因此可以利用分数阶微积分建立更加精确的模型,以便后续研究的深入。

#### 1.1 PEMFC阳极分数阶子模型

PEMFC反应过程中,氢气流量与氢气压力之间的关系可以表示为

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = k_{H_2}. \quad (1)$$

其中:  $q_{H_2}$  为氢气流量,单位为 mol/min;  $p_{H_2}$  为氢气分压,单位为 atm;  $k_{an}$  为阳极阀常数;  $M_{H_2}$  为氢气摩尔质量。有

$$\frac{d^n P_{H_2}}{dt^n} = \frac{RT_{stack}}{V_{an}}(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r). \quad (2)$$

其中:  $R$  为气体常数;  $T$  为电池的工作温度;  $q_{H_2}^{in}$  为流入氢气流量;  $q_{H_2}^{out}$  为输出氢气流量,输入氢气压力与排出氢气压力相关;  $q_{H_2}^r$  为反应氢气的流量。氢气压力表达式为

$$\frac{d^n P_{H_2}}{dt^n} = \frac{RT_{stack}}{V_{an}} \left( q_{H_2}^{in} - k_{H_2}(P_{H_2} - P_{H_2,B}) - \frac{Ni}{2F} \right). \quad (3)$$

其中:  $N$  为单电池数量;  $P_{H_2,B}$  为氢气排出压力;  $F$  为法拉第常数;  $i$  为PEMFC负载电流;  $n$  为分数阶阶次,其取值范围一般在(0,1)之间;  $V_{an}$  为阳极流场总体积,本文取值为0.005 cm<sup>3</sup>。

模型利用Matlab/Simulink搭建如图1所示。

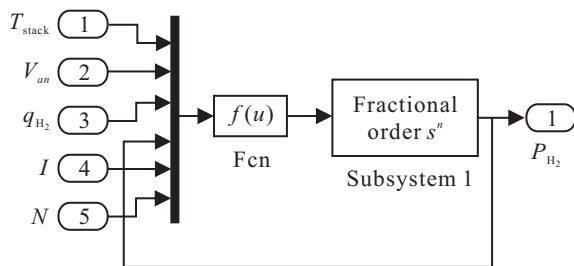


图1 PEMFC阳极分数阶子模型

#### 1.2 PEMFC温度的分数阶子模型

PEMFC电堆的工作温度是影响电堆输出性能的关键因素之一,在高温条件下极化损失电压较小,能够得到较高的输出电压。但是,温度过高可能会导致质子交换膜脱水,电池性能下降,甚至会造成交换膜的不可逆损坏和加快电堆的老化。所以一般情况下,在质子交换膜燃料电池系统中,保持电堆温度在50°C能够得到较高的输出电压,此时电堆效率较高。根据能量守恒定律,电化学反应产生的总功率  $Q_{react}$ 、负载电功率  $P_{st}$ 、环境热对流损失和辐射损失  $Q_{loss}$ 、冷却系统的热损失  $Q_{cool}$  与电堆吸收的热量  $Q_{absorb}$  维持动态平衡:

$$Q_{absorb} = Q_{react} - P_{st} - Q_{loss} - Q_{cool}. \quad (4)$$

燃料电池的温度和电堆吸收的热量可以用一阶微分方程表示为

$$Q_{absorb} = MC_t \frac{dT_{stack}}{dt}. \quad (5)$$

其中:  $M$  为电堆质量,  $M = 0.75 \text{ kg}$ ;  $C_t$  为电堆的比热容,本文基于文献[5]设定电堆的比热容为22 J/kg·K。文献[6]表明了半固体中热量扩散与温度是典型的分数阶关系,在燃料电池工作过程中,当质子交换膜中有一定的水含量时,呈现半固体的特性,产生的热量与温度是具有分数阶特性的。因此,在燃料电池的热扩散过程中,热能溢出  $Q_{absorb}$  与温度  $T_{stack}$  之间存在如下非整数阶关系:

$$Q_{absorb} = MC_t \frac{dT_{stack}}{dt}. \quad (6)$$

即可得到

$$\frac{d^n T_{stack}}{dt^n} = Q_{react} - P_{st} - Q_{loss} - Q_{cool}. \quad (7)$$

电堆的总功率由消耗的氢气流量决定,氢气的消耗量取决于电堆电流和燃料电池的数量,电化学生产生的总功率表示为

$$Q_{react} = N_{H_2,used} \times \Delta H = \frac{I \times N_{cell}}{2F} \times \Delta H. \quad (8)$$

其中:  $N_{H_2,used}$  为消耗的氢气流量,  $\Delta H$  为氢气的燃烧焓。输出的电功率表示为

$$P_{st} = V_{stack} \times I. \quad (9)$$

环境热对流损失和辐射损失的总和表示为

$$Q_{loss} = hA_{stack}(T_{stack} - T_{room}) + \sigma\varepsilon(T_{stack} + 273)^4. \quad (10)$$

其中:  $h$  为热交换系数,  $A_{stack}$  为电堆面积,  $T_{room}$  为室温。一般情况下,燃料电池的辐射损失相对于其他损失比较小,所以可以忽略。通过冷却系统损失的热量

表示为

$$Q_{cool} = hA(T_{air,out} - T_{air,in}) + (\ln(T - T_{air,in}) - \ln(T - T_{air,out})), \quad (11)$$

其中  $T_{air,out}$  和  $T_{air,in}$  分别为冷却空气进口温度和出口温度.

### 1.3 建立 PEMFC 分数阶动态特性模型

Amphlett 等<sup>[7]</sup> 和 Kim 等<sup>[8]</sup> 已经建立了 PEMFC 输出特性经验模型, 其基本表达式为

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con}. \quad (12)$$

其中:  $E_{Nernst}$  为热力学电动势,  $V_{act}$  为活化极化过电压,  $V_{ohmic}$  为欧姆极化过电压,  $V_{con}$  为浓差极化过电压. 对于  $N$  个单电池串联在一起的燃料电池输出电压  $V$  可表示为

$$V = N \times V_{cell}. \quad (13)$$

基于以上模型, 再结合本文提出的 PEMFC 阳极分数阶子模型和温度的分数阶子模型, 可以建立一个比较完整的电堆动态模型. 该模型尽可能地考虑到电池内部强耦合现象的存在, 将温度模型里电堆温度的输出及阳极分数阶模型中氢气电压输出作为电压模型的一个输入. 整个动态模型的输入为负载电流、氢气流量, 输出为电堆的温度和电池的输出电压. PEMFC 动态特性模型 (该模型是经过封装和模块化后的结果) 如图 2 所示.

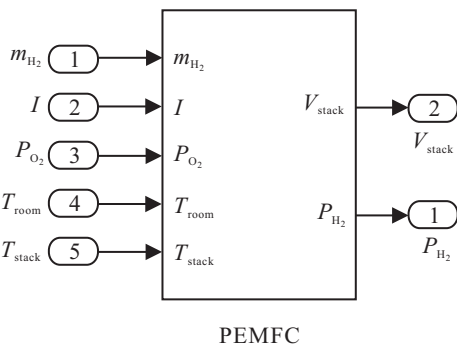


图 2 PEMFC 动态特性模型

## 2 基于模糊分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 的 PEMFC 输出电压控制

### 2.1 模糊分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器结构

针对一些复杂的被控对象, 为获得更优的控制效果, 学者将模糊逻辑与分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器相结合, 实现了分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器参数的自整定, 结果表明, 这一做法切实可行<sup>[9-12]</sup>. 本文基于模糊分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器, 提出了一种 PEMFC 输出电压控制系统. 如图 3 所示, 通过调节电堆的入口氢气流量控制

电堆输出电压的变化, 使输出电压稳定在最佳工作点附近. 其工作过程为, 首先分析  $K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu$  五个参数与误差  $e$  和误差变化率  $ec$  之间的模糊关系, 建立相应的模糊规则; 然后根据误差信号  $e$  与误差变化率  $ec$  的大小通过模糊推理调整分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器的参数, 实现对电堆输出电压的控制.

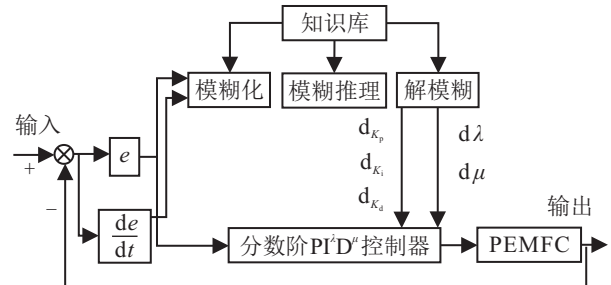


图 3 模型分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器结构

模糊控制规则是整个模糊控制的核心, 本文控制器的输入量取电堆实际输出电压与理想电压值的误差  $e$  和误差变化率  $ec$ , 输出量为模糊控制器中  $dK_p, dK_i, dK_d, d\lambda, d\mu$ . 其中: 3 个增益系数论域取  $[-6, 6]$ ,  $d\lambda, d\mu$  论域取为  $[-0.09, 0.09]$ , 模糊子集取为  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ , 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 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

$$\mu = \exp(-(z - c)^2 / \delta^2). \quad (14)$$

根据操作过程的经验, 采用 if-then 模糊控制规则设计模糊推理系统, 采用加权平均法 (重心法) 进行反模糊化<sup>[10]</sup>.

### 2.2 模糊控制规则的建立

1) 比例系数  $K_p$  整定的模糊规则<sup>[9-11]</sup>.

在控制初期, 为提高系统的响应速度, 规则设定较大的  $K_p$  值; 在控制中期适当减小  $K_p$  以提高系统的稳定性和调节精度; 在控制过程的末期, 应再次增大  $K_p$  的值, 从而减小系统的静差误差, 提高控制精度.

2) 积分系数  $K_i$  整定的模糊规则.

积分环节在整个控制系统中起到消除系统稳态误差的作用. 积分系数  $K_i$  越大, 代表积分速度越快, 其消除系统稳态误差的作用也越强; 但过大的  $K_i$  值, 在系统响应过程初期以及过渡过程中会造成积分饱和和现象, 引起较大的系统超调, 使系统整体的动态性能变差. 但若  $K_i$  过小, 则积分作用太弱, 系统的静差误差又难以消除, 过渡过程时间加长且很难较快达到稳定状态, 从而对系统的调节精度和动态特性产生一定的影响.

3) 微分系数  $K_d$  整定的模糊规则.

在调节过程初期, 加大控制系统的微分环节可以减小和避免超调. 在整个调节过程的中段, 由于调节特性对微分系数  $K_d$  的变化的敏感性, 决定了  $K_d$  需要适当减小, 以保持调节特性不发生大的变化. 调节后期,  $K_d$  要适当减小, 以减轻对被控对象制动作用, 用来补偿调节初期较大  $K_d$  而造成的调节过程时间延长的弊端.

4) 分数阶积分阶次  $\lambda$  的模糊控制规则.

$\lambda$  的取值对系统的稳态精度、稳态误差、调节时间产生一定的影响. 例如:  $\lambda$  过小会造成系统的稳态精度低, 并且存在稳态误差, 调节时间长;  $\lambda$  过大, 则会降低系统的稳定性, 使控制系统的控制精度下降, 最后有可能造成系统不稳定; 当其在小范围内变化时, 对系统稳定性影响较小.

5) 分数阶微分阶次  $\mu$  的模糊控制规则.

$\mu$  对系统的动态性能影响较大.  $\mu$  过小, 系统剧烈振荡, 超调量大, 调节时间长;  $\mu$  过大, 系统的超调量减小, 调节时间明显缩短. 但如果  $\mu$  值过大, 系统调节时间反而会加大, 振荡激烈, 严重时会导致系统不稳定.

### 3 仿真分析

为了验证模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器对于PEMFC的控制效果. 本文分别采用分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器和模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器对电堆输出电压进行控制<sup>[12]</sup>. 利用遗传算法对分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器参数进行辨识, 得到参数值为  $K_p = 1.2, K_i = 0.3, K_d = 0.4, \lambda = 0.9, \mu = 0.4$ , 该数值也将作为模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器的初值.

将负载电流作为扰动量, 由1 A升至3 A, 再降低到2 A, 观察电堆输出电压的变化曲线.

1) 未加入控制器.

入口氧气压力设为0.21 atm, 环境温度为24°C, 入口氢气流量为0.0167 mol/s, 负载电流在10 s时由1 A增加到3 A, 在20 s时由3 A减小为0.5 A, 电堆输出电压曲线如图4所示. 10 s时负载电流增加, 电堆电压

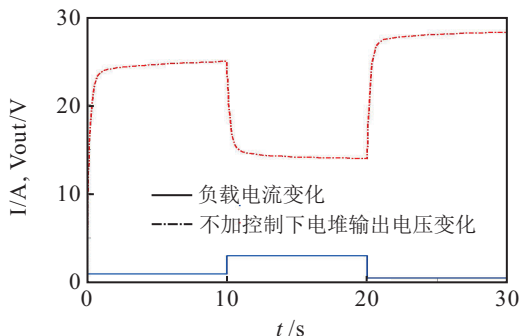


图4 负载扰动下未加控制器的输出电压变化

下降幅度大, 此时如果氢气流量如果不能随之变化, 则会对电池性能造成一定的损坏.

2) 电堆启动时输出电压的控制.

电堆启动前, 由于需要使入口氢气流量充满燃料电池的气道, 前5 s左右时间电堆输出电压为0, 其结果如图5所示. 由图5可见, 模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制作用下的电堆上升时间更短、超调量更小.

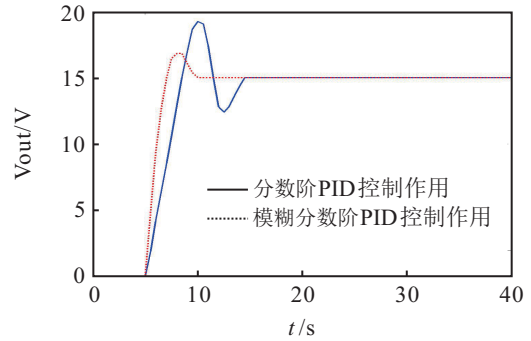


图5 不同控制器下电堆启动电压变化状况

3) 电堆运行过程中输出电压控制.

一旦负载电流变化, 电堆的理想工作电压是变化的, 即电压控制中的设定值不同. 利用模糊控制理论, 在线调整分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器参数. 图6中, 虚线表示的分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制下的电堆电压最大误差超过3 V, 这样在控制过程中很容易损坏电堆性能, 且调节时间较长; 点线表示在模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制下电堆最大偏差在0.8 V以内, 超调量在系统稳定后小于3%, 调节时间小于13 s, 可见该输出电压的控制器具有较高的稳定性和可靠性. 由仿真结果可知, 模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制系统比分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制系统具有更小的超调量和更好的动态响应, 满足PEMFC输出电压控制的要求.

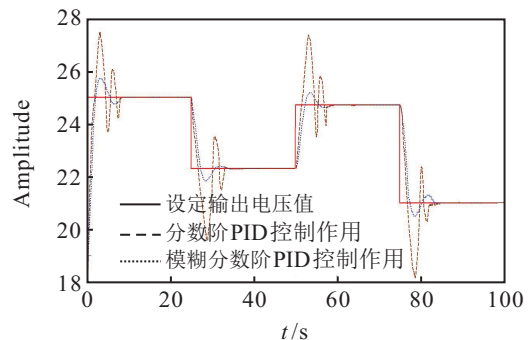


图6 不同控制器下电堆运行过程中电压变化状况

### 4 结论

本文通过分析PEMFC的动态特性, 建立了PEMFC动态模型, 并根据控制经验规则设计了模糊分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器控制电堆输出电压. 根据电压误差和误差变化率实时调节分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器参数进而调节氢气流量, 将负载电流作为扰动信号, 进行

了PEMFC系统建模和控制仿真研究. 仿真结果表明, 所设计的模糊分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器能根据质子交换膜燃料电池实际运行过程实时调节氢气流量, 不仅能够有效消除负载扰动带来的影响, 而且具有较好的灵活性, 使PEMFC运行在理想工作点附近, 提高了电堆的动态性.

#### 参考文献(References)

- [1] Yerramall S, Davari A, Feliachi A. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. J of Power Sources, 2013, 124(1): 104-113.
- [2] 张明. 基于分数阶微积分的建模与辨识[D]. 北京: 北京化工大学信息科学与技术学院, 2012. (Zhang M. Modeling and identification of fractional calculus[D]. Beijing: College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, 2012.)
- [3] Xue X, Tang J, Smirnova A, et al. System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell[J]. J of Power Sources, 2004, 133(133): 188-204.
- [4] 张旭. 基于分数阶微积分的PEMFC建模与控制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2013. (Zhang X. PEMFC modeling and control based on fractional calculus[D]. Nanjing: Department of Automation, Nanjing University of Technology and Engineering, 2013.)
- [5] Andrew R, Li X G. Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells[J]. Power Sources, 2001, 102(1/2): 82-96.
- [6] Chen Yang-Quan, Kevin L. Moore, Analytical stability bound for a class of delayed fractional-order dynamic systems[J]. Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando: IEEE, 2001: 1421-1426.
- [7] Amphlett J C, Baumert R M, Mann R F, et al. Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell Mechanistic model development[J]. J of Electrochem Soc, 1995, 142(1): 1-16.
- [8] Kim J, Lees M, Srinivasan S. Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation[J]. J of Electrochem Soc, 1995, 142(8): 670-674.
- [9] 李勇国, 杨丽娟. 神经、模糊、预测控制及其Matlab实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013. (Li Y G, Yang L J. Neural, fuzzy, predictive control and matlab realization[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.)
- [10] 操高城, 张君颖, 王东风, 等. 基于模糊PID控制器的协调控制系统优化[J]. 计算机仿真, 2014, 23(12): 401-404. (Cao G C, Zhang J Y, Wang D F, et al. Optimization of coordinated control system based on fuzzy PID controller[J]. Computer Simulation, 2014, 23(12): 401-404.)
- [11] 胡鹏, 曹广益, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池温度模型与模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1371-1376. (Hu P, Cao G Y, Zhu Z J. Temperature modeling and fuzzy control of proton exchange membrane fuel cell[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10): 1371-1376.)
- [12] 李大字, 刘展, 靳其兵, 等. 基于遗传算法的分数阶控制器参数整定研究[J]. 控制工程, 2006, 13(4): 384-387. (Li D Z, Liu Z, Jin Q B, et al. Parameters tuning of fractional order controller based on genetic algorithm[J]. Control Engineering, 2006, 13(4): 384-387.)

(责任编辑: 郑晓蕾)

## 下 期 要 目

- 果蝇优化算法研究综述 ..... 王 林, 等  
 一种改进的狼群算法 ..... 惠晓滨, 等  
 大加减速轴向移动系统自适应反步边界控制 ..... 刘 屿, 等  
 基于数据驱动残差评价策略的故障检测方法 ..... 蒋栋年, 等  
 交会对接模拟系统姿态跟踪有限时间抗干扰控制 ..... 黄 成, 等  
 基于双变异模式协同的自适应微分进化算法 ..... 王世豪, 等  
 基于虚拟领队的轮式移动机器人自适应编队控制 ..... 崔明月, 等  
 基于切换滑模控制的抖振抑制方法 ..... 方世鹏, 等  
 自适应分组差分萤火虫算法求解连续空间优化问题 ..... 张 强, 等