

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209096

基于变论域模糊理论的 PEMFC 热管理系统控制研究*

金红超 何 锋 胡耀宗
(贵州大学机械工程学院 贵阳 550025)

摘要: 针对传统控制器在燃料电池功率较大且负载电流动态变化时,存在燃料电池温度控制的灵敏度和精确度较低等问题,提出一种变论域模糊 PID 控制策略,变论域部分通过伸缩因子来实时变化模糊 PID 控制器中的量化因子和比例因子,实现对模糊论域的收缩与膨胀来提高控制的稳定性。搭建 55 kW 燃料电池模型并验证模型的可行性。设置传统 PID 及模糊 PID 控制器为对照实验组,研究结果显示:变论域模糊 PID 控制器超调量减小,稳态误差减小,调节时间缩短,对 PEMFC 热管理系统具有更好的抗干扰性能。

关键词: 燃料电池城市客车;PEMFC;温度控制;变论域模糊 PID 控制

中图分类号: U469.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Thermal management system control of PEMFC based on variable universe fuzzy theory

Jin Hongchao He Feng Hu Yaorong
(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the problems of the insensitivity and inaccuracy of conventional controllers when the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) power is high and the load current changes dynamically, a variable universe fuzzy PID control strategy was proposed in this paper. The proportion factor and scale factor in the fuzzy PID controller can be adjusted in real time by the factor to realize the contraction-expansion of the fuzzy universe, thereby improving the stability of the control. Build a 55 kW fuel cell model and verify the feasibility of the model. Comparative experiments between the traditional control strategy and the variable universe fuzzy PID control strategy. The research results indicate that the variable universe fuzzy PID controller is superior to the traditional controller in the overshoot, the steady-state error, the adjustment time, and the anti-interference performance.

Keywords: fuel cell city bus; PEMFC; temperature control; variable universe fuzzy PID control

0 引 言

燃料电池被认为是最理想的新能源车动力系统之一^[1],氢燃料电池尤其是质子交换膜燃料电池(PEMFC)因其功率密度高、启动迅速及环境友好等优点备受关注^[2-3]。温度对 PEMFC 内气体传输特性、水管理、电化学反应活度及电堆的效率和稳定性等方面均有影响,PEMFC 在工作时约有 50% 的化学能以热能形式输出,因此制定有效热管理策略来保证电堆温度和温度分布均匀性,对于燃料电池性能、安全和使用寿命至关重要^[4]。

近年来,许多学者对 PEMFC 温度控制进行研究并提出一些热管理系统控制策略,传统的控制方法主要采用 PID 控制,陈维荣等^[5]提出冷却水流量跟随电流策略控制

冷却水进出口温差,减少水泵与散热器风扇的耦合作用,通过 PID 控制电堆入口温度。Mahjoubi 等^[6]同时将电堆温度调节和空气化学计量调节结合起来设计控制策略,改善燃料电池系统的性能并预防退化。Zhu 等^[7]利用一个数学模型集模拟了燃料电池系统的动态行为,PID 控制器的热管理策略被应用在这个模型中,目的是减少 PEMFC 的降解和延长其使用寿命。Kim 等^[8]提出了一种递归控制设计方法,以保证电堆温度的鲁棒调节并满足约束。陈立等^[9]采用模型函数确定伸缩因子的变论域模糊 PID 控制器控制电堆温度。李洁^[10]提出了一种基于 PLC 的双循环回路燃料电池温度控制系统,采用模糊 PID 控制器和模糊控制器的热管理控制策略。赵洪波等^[11]提出流量同时跟随电流及功率、神经网络自抗扰两种控制策略,仿真对比显示后

收稿日期:2022-02-27

* 基金项目:贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2021]一般 283)项目资助

者在最大功率工况下的控制效果较差,但总体表现略好。程思亮^[12]设计了卡尔曼滤波的全阶状态观测器对输出功率保持恒定在 30 kW 的城市客车进行温度控制。当负载电流动态变化且燃料电池功率较大时,常规的控制策略存在局限性。变论域模糊 PID 控制适合于非线性且参数不确定的燃料电池系统,通过变论域部分的伸缩因子对模糊控制器的论域进行动态调节,达到缩短调节时间,降低温度波动,加快响应速度的目的。

为了提高温度及温差控制精度和灵敏度,在 MATLAB/Simulink 平台上搭建包括 PEMFC 和散热设备在内的热管理系统模型。基于模型基础上设计水泵及散热器风扇的变论域模糊 PID 控制器,实现燃料电池温度和温差的控制。并与模糊 PID 及 PID 控制策略对比,分析当负载电流阶跃变化时,水泵与散热器风扇流量变化曲线,电堆的温度和温差控制情况。

1 PEMFC 电压模型

日前大功率电堆采用冷却水循环系统,其热管理系统结构如图 1 所示,主要包括电堆、冷却液、水泵、散热器及风扇、水箱及相应的温度检测设备。热管理系统工作时冷却水从电堆流到水箱再经管路依次到水泵及散热器最终流回电堆,将废热带出,控制器接收电堆进出口的温度传感器输出信号,控制散热模块内水泵和风扇。

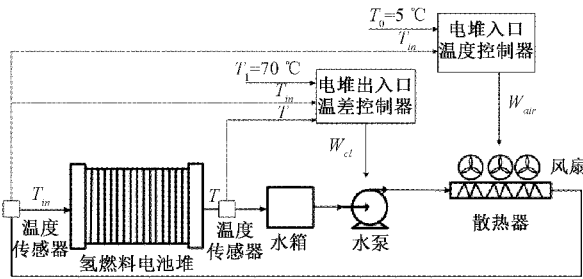


图 1 PEMFC 热管理系统结构图

单片 PEMFC 输出电压 V 主要由能斯特开路电压 E 、活化极化电压 V_{act} 、浓差极化电压 V_{con} 和欧姆极化电压 V_{ohm} 4 部分组成^[13],即:

$$V = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (1)$$

能斯特开路电压可以由环境温度 T_a , 电堆的工作温度 T , 阴极中氧气分压 P_{O_2} 以及阳极中氢气分压 P_{H_2} 表示。即:

$$E = E_0 - 8.5 \times 10^4(T - T_a) + 4.31 \times 10^{-5} T \ln(P_{H_2}) \ln(P_{O_2})^{0.5} \quad (2)$$

活化极化电压 V_{act} 与阴极氧气浓度 C_{O_2} , 实际电流密度 i 有关, i 为电堆负载电流 I 与单片 PEMFC 有效面积 A 的比值,表达式如下,式中 ξ_1, ξ_2, ξ_3 及 ξ_4 由 Amphlett 等通过实验确定。

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \ln(i) \quad (3)$$

欧姆极化电压 V_{ohm} 与膜水含量 σ_w 和质子交换膜的厚度 t_0 有关, b_1 和 b_2 是相关经验系数。即:

$$V_{ohm} = i \frac{t_0}{(b_1 \cdot \sigma_w - b_2) \cdot e^{350(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})}} \quad (4)$$

浓差极化电压 V_{con} 与最大电流密度 i_{max} 以及质量运输损失系数 C 有关, C 在阳极侧为 $RT/2$, 阴极侧为 $RT/4$, R 为普适气体常数。即:

$$V_{con} = -C \cdot \ln(1 - \frac{i}{i_{max}}) \quad (5)$$

2 PEMFC 热模型及附件模型

2.1 温度动态热模型

根据能量守恒定律可以搭建 PEMFC 电堆的动态热模型^[14],表达式如下, M 为 PEMFC 电堆质量; C_p 为电堆比热容。

$$MC_p \frac{dT}{dt} = Q_{tot} - P - Q_{gas} - Q_{cl} - Q_{amb} \quad (6)$$

单位时间内参与反应物存储的化学能 Q_{tot} 可以表示为电堆单片电池片数 n , 法拉第常数 F , 以及氢的燃烧焓 ΔH 的函数。即:

$$Q_{tot} = \Delta H \frac{nI}{2F} \quad (7)$$

电堆的输出功率 P 表达式如下,其中 V 由上一节 PEMFC 电压模型得到。即:

$$P = nVI \quad (8)$$

冷却水流经电堆带出的热量 Q_{cl} 可以表示为冷却水的质量流速 W_{cl} 和冷却水的比热容 $C_{p,cl}$ 及电堆进口冷却水温度 T_{in} 及 T 的函数。即:

$$Q_{cl} = W_{cl} C_{p,cl} (T - T_{in}) \quad (9)$$

单位时间内反应气体带出的热量 Q_{gas} 可以由 T, T_{in} 及进出电堆的各种物质的比热容 C_j , 进出电堆阴阳极的各种气体的质量流量 N_j ($j = H_2, N_2, O_2, air, H_2O$) 表示。即:

$$Q_{gas} = (T - T_a) \sum_{j=H_2, O_2, N_2, H_2O} C_j^{out} N_j^{out} - (T_{in} - T_a) \sum_{j=H_2, air, H_2O} C_j^{in} N_j^{in} \quad (10)$$

水冷型燃料电池约 90% 的废热是通过冷却液散热的^[15]。故忽略电堆向外辐射的热功率 Q_{amb} 。

2.2 散热器模型

散热器将燃料电池中产生的剩余热量排出到大气中,它通过冷却风扇将冷却水中的热量散发到周围环境中,可以认为散热器的热传递正比于环境温度和冷却水温度的差值。经过散热器后,冷却水的温度为:

$$T_{rad}^{out} = T_{rad}^{in} - \frac{(T_{air}^{out} - T_a) \cdot C_{air} \cdot W_{air}}{W_{cl} \cdot C_{cl}} \quad (11)$$

式中: T_{rad}^{out} 为散热器冷却水出口温度; T_{rad}^{in} 为散热器冷却水入口温度; T_{air}^{out} 为散热器空气出口温度,等于散热器冷却水的出入口温度的平均值; W_{air} 为空气流量。

2.3 水箱模型

水箱是冷却系统中储存水的容器。水箱中装水具有较大的惰性,可以借用前面温度系统建模的公式,即:

$$M_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt} = W_{cl} C_{pcl} (T - T_s) - h(T_s - T_a) \quad (12)$$

式中: M_s 是水箱中水的质量; C_{ps} 是水箱中水的比热容; T_s 为水箱温度; h 为水箱自然热传导系数。

3 模型验证

设计控制策略的前提是有效的燃料电池模型,城市客车 55 kW 燃料电池模型参数如表 1 所示。为验证 PEMFC 动态模型的有效性及其可行性,依据 GB/T 24554-2009《燃料电池发动机性能试验方法》得到城市客车燃料电池稳态特性测试数据,在电堆工作范围内均匀选择 10 个工况点,加载到每个工况点,每个工况运行 3 min,作为稳态特性测试工况,如图 2 所示。

表 1 仿真参数表

电池参数	值	电池参数	值
电堆功率/kW	55	工作电流/A	330
工作电压/V	217	n /片	315
工作温度/°C	75	T_a /°C	25
P_{O_2} /atm	1.3	M /kg	75
P_{H_2} /atm	1.3	t_o /μm	90
A /cm ²	280	σ_w	14

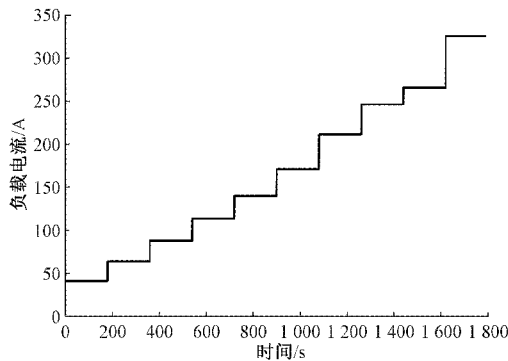


图 2 稳态特性测试工况

选用的城市客车燃料电池电堆工作温度最佳为 75 °C,根据搭建的城市客车 PEMFC 电压功率模型,进行加减速实验,当输入负载电流如图 2 所示阶跃变化时,该型城市客车的燃料电池稳态特性测试数据与仿真得到的电堆输出性能对比如图 3 所示。

模型仿真输出的燃料电池功率电压曲线与试验测试输出性能基本一致。10 个工况点中,电压最大绝对误差为 5.2 V,最大相对误差 0.024 7;功率最大绝对误差为 1.41 kW,最大相对误差 0.025 5。根据对比结果,验证所搭建模型能反映城市客车 PEMFC 在负载变化下的输出性能与动态响应变化。

4 变论域模糊 PID 控制器设计

PEMFC 的最佳工作温度一般在 60 °C ~ 90 °C,本文研

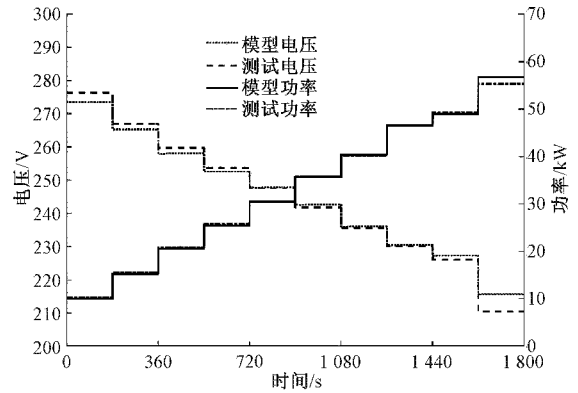


图 3 模型仿真与测试数据对比

究的电堆的最佳温度在 75 °C,在变论域模糊 PID 控制器的控制下,通过实时调节散热器风扇流量来控制 PEMFC 的温度,保持适当电堆温度,将 PEMFC 电堆的进口温度稳定在 70 °C;调节冷却水流量来控制电堆的温差,为保证温度分布均匀性,将电堆进出口温度稳定在 5 °C,该控制器基本原理图如图 4 所示。

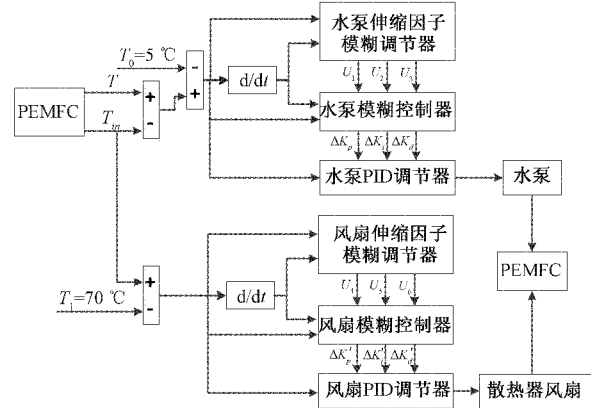


图 4 变论域模糊 PID 控制器基本原理

4.1 模糊 PID 控制器设计

水泵和散热器风扇模糊控制器的结构均为二输入三输出系统,水泵模糊控制器的两个输入分别是实际电堆进出口温度差值与设置温差的偏差 $e = (T - T_m) - T_0$ 及偏差变化率 ec 。散热器风扇模糊控制器的输入分别是实际电堆入口温度值与设置入口温度值的偏差 $e' = T - T_1$ 及其偏差变化率 ec' 。量化因子 K_e 和 K_{ec} 分别将输入的两个物理论域映射为模糊论域。其模糊论域均为 $[-6, 6]$,模糊子集为 {NB, NS, ZO, PS, PB}, 隶属度函数选择高斯型函数,具体隶属度函数曲线如图 5 所示。3 个输出量分别为:PID 的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的调整值 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。输出量通过比例因子 K_u 变换为物理论域。 ΔK_p 、 ΔK_i 以及 ΔK_d 的模糊论域为 $[-1, 1]$,模糊子集均为 {NB, NS, ZO, PS, PB}, 隶属度函数选择高斯型函数,具体隶属度函数曲线如图 6 所示。

根据控制过程经验,得到模糊规则如表 2 所示,采用的

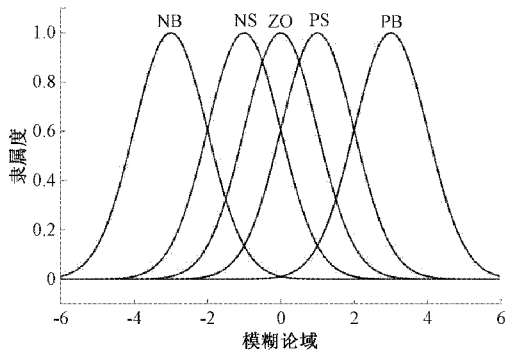


图 5 e 、 ec 和 e' 、 ec' 的隶属度函数

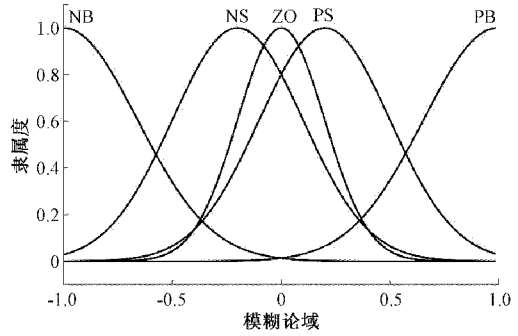


图 6 ΔK_p 、 ΔK_i 以及 ΔK_d 的隶属度函数

模糊判定规则为 if e is NB and ec is NB then ΔK_p is PB,

ΔK_i is PB and ΔK_d is PB 模式。采用 Mamdani 法去模糊化,重心法清晰化。

表 2 温度控制器的模糊规则

e	ec				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB/PB/PB	PS/PS/PS	ZO/ZO/ZO	NS/NS/NS	NB/NB/NB
NS	PB/PS/PS	PS/ZO/ZO	PS/PS/ZO	PS/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO
ZO	PB/ZO/ZO	PB/NS/NS	PB/PB/ZO	PB/PB/PS	PB/PB/PB
PS	ZO/NS/NS	PS/NS/NS	PS/PS/ZO	PS/PS/PS	PB/PB/PB
PB	NB/NB/NB	NS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	PS/PS/PS	PB/PB/PB

4.2 变论域模糊控制器设计

变论域部分是一个二输入三输出的伸缩因子模糊调整器,输入为电堆温度偏差 e 和温度偏差变化率 ec , 其模糊化过程与上节模糊控制器一致,输出分别为 e 的伸缩因子 a_1 , ec 的伸缩因子 a_2 , 模糊控制器输出 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的伸缩因子 b , 变论域处理方法选择将模糊 PID 中 K_e 和 K_c 分别除以 a_1 和 a_2 , 实现模糊论域的调整,将比例因子 K_u 乘以伸缩因子 b , 实现物理论域的调整^[16]。 a_1 、 a_2 及 b 模糊论域均为 $[-6, 6]$, 模糊子集为 {NB, NS, ZO, PS, PB}, 根据文献[17]可以得到伸缩因子各自的模糊规则图,如图 8~10。采用 Mamdani 法去模糊化,重心法清晰化。

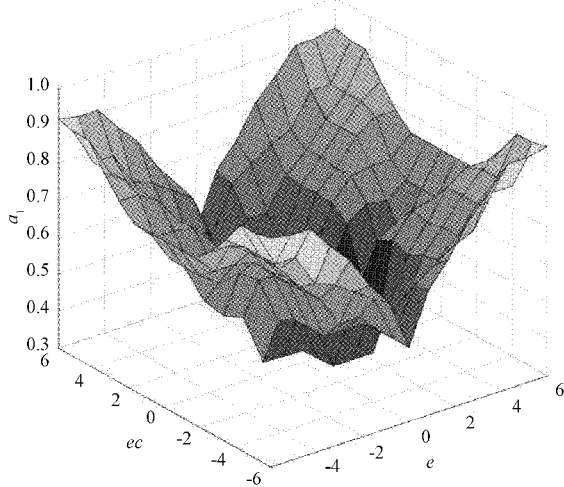


图 7 a_1 的模糊规则图

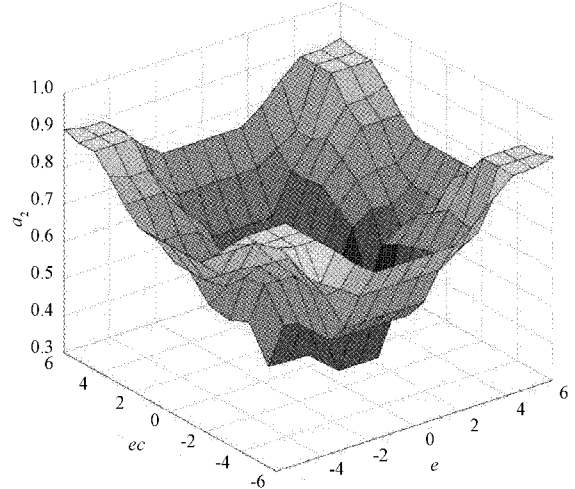


图 8 a_2 的模糊规则图

5 实验仿真与比较

为验证提出的变论域模糊 PID 控制器在 PEMFC 热管理系统控制过程中的性能,将如图 2 所示的 1 800 s 稳态特性测试电流输入 PEMFC 的热管理系统模型中,将 PID 控制器、模糊 PID 控制器作为对照组研究变论域模糊 PID 控制在 PEMFC 热管理系统中的应用,并说明变论域模糊 PID 控制器的有效性。3 种控制策略下的散热器风扇处的空气流量如图 10 所示,冷却水流量如图 11 所示。图 12 所示为 PEMFC 电堆温度变化曲线,图 13 所示为 PEMFC 电堆进出口温差曲线。当负载电流阶跃变化时,3 类控制器

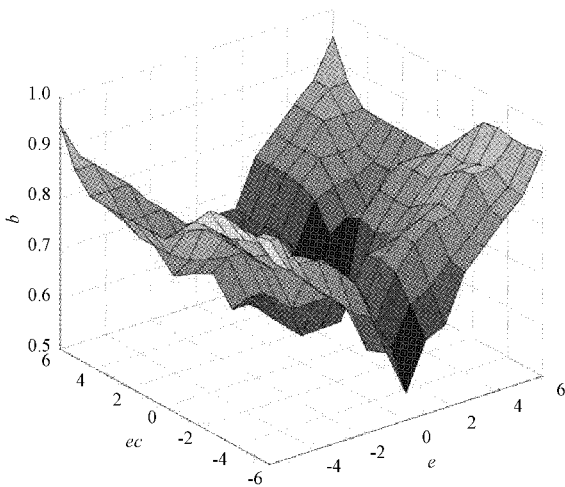


图 9 b 的模糊规则图

均可以将 PEMFC 温度维持在 75 °C,将 PEMFC 电堆出入口温差维持在 5 °C,调节时间不超过 400 s。变论域模糊 PID 控制器具有更快的动态响应速度,更小的瞬时超调。在其控制作用下 PEMFC 电堆进口温度和温差的变化范围均在 2 °C 内,相比于 PID 控制器调节时间缩短 50 s,相比于模糊 PID 控制器调节时间最少缩短 35 s。

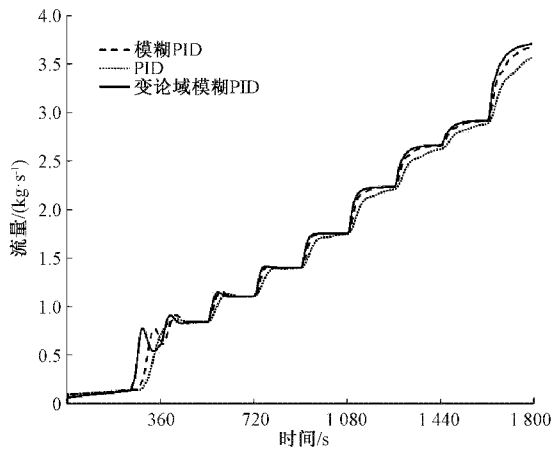


图 10 冷却水流量 W_{c1} 及

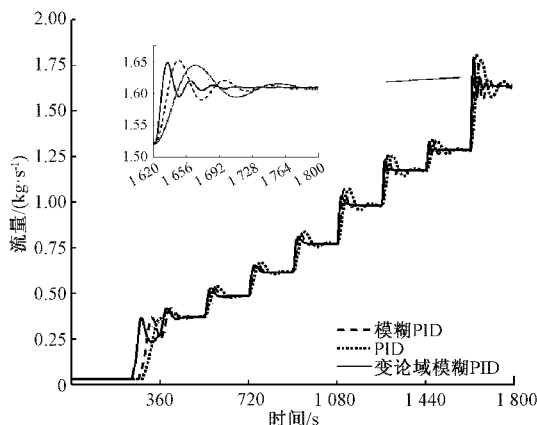


图 11 散热器风扇处空气流量 W_{air}

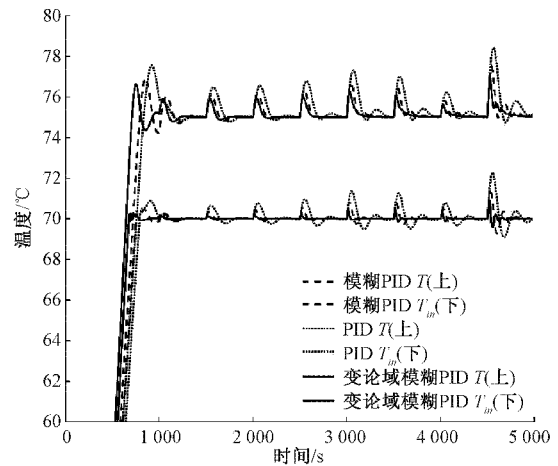


图 12 3 种控制策略下的进出口温度对比曲线

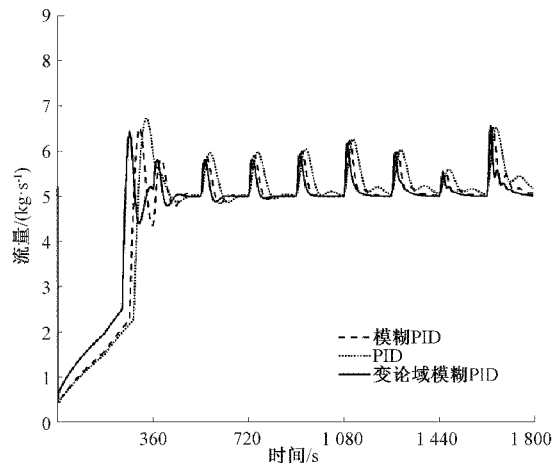


图 13 3 种控制策略下温差对比曲线

6 结 论

对于搭建的 55 kW 城市客车用燃料电池模型的电压功率仿真数据与稳态特性测试数据进行对比验证,对比结果显示误差较小,证明所建立模型能够反应该型城市客车燃料电池的工作过程和输出特性。基于搭建的燃料电池热模型设计了变论域模糊 PID 控制器分别控制冷却水泵和散热器风扇,以 PID、模糊 PID 控制器为对照组,结果表明三种控制策略均能满足 PEMFC 系统的热管理需求,将电堆温度维持在 75 °C,将电堆温差控制在 5 °C,变论域模糊 PID 控制器使得热管理控制系统超调降低,响应速度提高,稳态误差降低,且具有最优的抗干扰性能,相比于 PID 控制器调节时间缩短 50 s,相比于模糊 PID 控制器调节时间最少缩短 35 s。

参 考 文 献

[1] 展茂胜,韩吉田,于泽庭,等. 车用 PEMFC 发动机水热管理与低温启动研究现状[J]. 内燃机与动力装置, 2018,35(5):82-87.

- [2] 侯健,杨铮,贺婷,等. 质子交换膜燃料电池热管理问题的研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(1):19-30.
- [3] 裴后昌. 质子交换膜燃料电池水热管理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [4] KANDLIKAR S G, LU Z. Thermal management issues in a PEMFCstack—A brief review of current status [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(7): 1276-1280.
- [5] 陈维荣,牛苗,韩喆,等. 水冷 PEMFC 热管理系统流量跟随控制策略[J]. 化工学报, 2017, 68(4): 1490-1498.
- [6] MAHJOUBI C, OLIVIER J C, SKANDER M S, et al. An improved thermal control of open cathode proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(22),DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.11.055.
- [7] ZHU D, AMIRAT Y, DIAYE A, et al. Active thermal management between proton exchange membrane fuel cell and metal hydride hydrogen storage tank considering long-term operation [J]. Energy Conversion and Management, Volume 202, 2019,DOI:10.1016/j.enconman.2019.112187.
- [8] KIM B M, YOO S J. Approximation-based adaptive control of constrained uncertain thermal management systems with nonlinear coolant circuit dynamics of PEMFCs[J]. IEEE Access, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2992047.
- [9] 陈立,詹跃东. 水冷型 PEMFC 温湿度建模与智能控制[J]. 自动化仪表, 2021,42(3):54-59.
- [10] 李洁. 燃料电池温度控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
- [11] 赵洪波,刘杰,马彪,等. 水冷 PEMFC 热管理系统控制策略及仿真研究[J]. 化工学报, 2020, 71(5): 2139-2150.
- [12] 程思亮. 质子交换膜燃料电池温度控制研究[D]. 北京:清华大学,2017.
- [13] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Modeling and control for PEM fuel cell stack system [C]. Proceedings of the American Control Conference, 2002, 4: 3117-3122.
- [14] YU X,ZHOU B,SOBIESIAK A,et al. Water and thermal management for Ballard PEM fuel cell stack[J]. Journal of Power Sources,2005,147:184-195.
- [15] AHN J W, CHOE S Y. Coolant controls of a PEM fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(1): 252-264.
- [16] 郑宏,徐红兵,朱贵平. 变论域自适应模糊控制在航机发电中的应用[J]. 控制理论与应用,2008(2):253-256.
- [17] 谢雨岑,邹见效,彭超. 基于变论域模糊增量理论的质子交换膜燃料电池温度控制[J]. 控制理论与应用, 2019,36(3):428-435.

作者简介

金红超,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池热管理系统控制策略。

E-mail:582731077@qq.com