

## 双堆燃料电池热管理系统自抗扰控制

程博源<sup>1,2</sup>, 刘志恩<sup>1,2</sup>, 刘昌伟<sup>3</sup>, 李晨雨<sup>1,2</sup>, 李永超<sup>1,2</sup>, 卢焯华<sup>1,2</sup>

- (1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;  
2. 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心 (佛山仙湖实验室), 广东, 佛山 528200;  
3. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

**摘要:** 为对双堆燃料电池热管理系统进行有效控制, 基于试验数据建立了电堆模型, 并耦合水泵、换热器等关键零部件模型形成完整的热管理系统模型。为保证阶跃工况下电堆温度的稳定, 设计了基于比例积分与线性自抗扰算法的联合控制策略, 并进行仿真验证。提出了基于前馈解耦及串级LADRC的改进控制策略, 通过仿真对比改进前后的控制效果。结果表明, 改进后的控制策略能有效减小超调量, 反映温控精度的时间乘绝对误差积分量最高可降低66.39%。

**关键词:** 双堆燃料电池系统; 热管理; 自抗扰; 串级控制

中图分类号: TM911.42 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.04.10

## Active Disturbance Rejection Control for a Dual-Stack Fuel Cell Thermal Management System

CHENG Boyuan<sup>1,2</sup>, LIU Zhien<sup>1,2</sup>, LIU Changwei<sup>3</sup>, LI Chenyu<sup>1,2</sup>, LI Yongchao<sup>1,2</sup>, LU Chihua<sup>1,2</sup>

- (1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Foshan Xianhu Laboratory of the Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China;  
3. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** To effectively control the thermal management system of a dual-stack fuel cell system, this paper establishes a fuel cell stack model based on test data, and couples it with key component models such as pumps and heat exchangers to form a complete thermal management system model. To stabilize the stack temperature under disturbances, a control strategy combining proportional-integral (PI) with linear active disturbance rejection control (LADRC) was proposed and verified by simulation. Finally, an improved control strategy based on feedforward decoupling and cascade LADRC was proposed. The control effects before and after the improvement were compared through simulation. The results show that the improved control strategy can effectively reduce overshoot, and the integral time absolute error (ITAE), reflecting temperature control accuracy, can be reduced by up to 66.39%.

**Keywords:** dual-stack fuel cell system; thermal management; active disturbance rejection control; cascade control

收稿日期: 2024-01-12 改稿日期: 2024-03-27

基金项目: 国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项(2023YFB2504201); 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心(佛山仙湖实验室)燃料电池系统与整车技术研发中心运行经费(323-14010)

参考文献引用格式:

程博源, 刘志恩, 刘昌伟, 等. 双堆燃料电池热管理系统自抗扰控制[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(4): 661-673.

CHENG Boyuan, LIU Zhien, LIU Changwei, et al. Active Disturbance Rejection Control for a Dual-Stack Fuel Cell Thermal Management System[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(4): 661-673. (in Chinese)



未来汽车行业大力发展氢燃料电池发动机是一种理想的节能减排技术路线<sup>[1]</sup>,重载、长距离运输等商用车应用场景,对燃料电池的功率密度等级、使用寿命及系统效率等提出了更高要求。由多个电堆组成的多堆燃料电池系统可显著提高整个系统的功率等级与可靠性,在重载、长距离运输等高功率需求场景中有较大的应用潜力<sup>[2]</sup>。适当的热管理是保证燃料电池正常工作的关键,如果电堆产热与散热无法达到平衡,那么其温度难以保持在正常范围内,可能会出现水淹、膜干等故障从而影响电堆工作性能及耐久性。不同于单堆燃料电池系统,多堆系统的热管理控制策略需兼顾多个热源,因此,传统针对单堆燃料电池系统设计的热管理控制策略难以直接用于多堆系统中,这也是当前多堆燃料电池系统技术落后于单堆系统的原因之一。

在多堆燃料电池系统中,由于电堆参数、功率分配方式的差异,各个电堆的工作条件往往不同,因此,与单堆燃料电池系统相比,多堆燃料电池系统热管理模块的结构与控制逻辑更复杂<sup>[3]</sup>。目前,关于多堆燃料电池热管理系统的研究较少,主要集中于热管理系统结构优化与控制策略方面。SHEN Wei等<sup>[4]</sup>提出了集成式与分布式2种多堆燃料电池热管理系统结构,并在稳态工况与C-WTVC工况下对2种结构的性能进行了比较。WOO等<sup>[5]</sup>为多堆燃料电池热管理系统设计了3个PI控制器,在负载阶跃变化的测试工况下,比较了串联式、并联式与独立式热管理系统结构下电堆温度的控制效果,同时计算并比较了3种结构的寄生功率损耗。沈伟等<sup>[6]</sup>应用模型预测控制算法实现了多堆燃料电池系统的温度控制,通过增加参数辨识点和提高预测模型数量,进一步改善了温度控制效果。ZHOU Su等<sup>[7]</sup>基于无迹卡尔曼滤波实现了多堆燃料电池热管理系统中传感器的故障信号修正,提出了基于滑模控制的主动容错控制策略,实现了多堆燃料电池热管理系统的故障诊断与温度控制。

文献[6]~[7]中的多堆燃料电池热管理系统控制策略均采用基于模型的控制方法,需在局部点处线性化或通过系统辨识来得到近似线性模型,从而

根据系统的近似模型来设计控制器,这种方法虽在特定条件下可达到相当的控制精度及响应速度,但在系统运行条件改变后,实际系统中的非线性部分以及未被建模的动态过程将会导致控制量偏离所需的设定值<sup>[8]</sup>。在双堆燃料电池热管理系统中,各个电堆的输出功率不可能时刻保持一致,因此,电堆温度控制的难点主要体现在系统扰动(如电堆功率波动)下温度的稳定控制以及多热源之间的温度协同控制。

本文提出的控制策略不完全依靠系统的数学模型,而根据实际台架运行数据建立了完整的双堆燃料电池热管理系统模型,设计了基于线性自抗扰(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)控制算法的双堆燃料电池热管理控制策略,并对其进行改进,引入前馈控制策略实现系统的解耦,利用串级LADRC控制实现冷却水流量的精确控制,通过对比仿真验证了改进后控制策略的有效性,从而实现多堆燃料电池系统中多热源高精度协同温度控制,可为双堆燃料电池系统的开发提供一定参考。

## 1 双堆燃料电池热管理系统模型

### 1.1 热管理系统结构

双堆燃料电池热管理系统采用了基于液冷换热方式的管壳式换热器,其换热效率高于常规风冷管翅式换热器<sup>[9]</sup>。在内部冷却水循环回路中,冷却水流经水泵获得能量,同时流入2个电堆支路对电堆进行冷却,每个冷却支路中均有一个可调节进入支路冷却水流量的调节阀。冷却水流出各电堆并汇合后,通过电动三通阀开度的变化来控制进入大小循环的冷却水流量分配,如图1所示。

### 1.2 电堆模型

本文建立的电堆模型考虑了电堆内部的极化电压损失、热量传递与水传输3个理化过程,2个电堆的额定功率均为15 kW。限于篇幅,本文仅对电堆热量传递过程的建模原理进行介绍,其他过程的

具体建模原理可参考文献[10]。电堆建模过程中使用的部分试验数据见表 1。

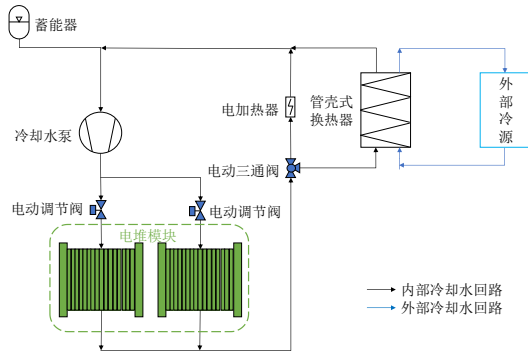


图 1 双堆燃料电池热管理系统

表 1 电堆输出特性测试数据

序号	电流/A	电压/V	功率/kW
1	7.40	208.20	1.54
2	15.10	202.70	3.06
3	22.90	198.70	4.55
4	31.90	195.20	6.23
5	39.90	191.90	7.54
6	48.00	188.40	9.04
7	57.00	185.20	10.56
8	65.10	182.50	11.88
9	75.70	178.70	13.53
10	85.60	175.10	14.99
11	95.50	173.90	16.61

根据试验数据对模型进行标定，标定后电堆中单体电池的电压输出特性如图 2 所示，模型在标定工况下具备足够的精度。

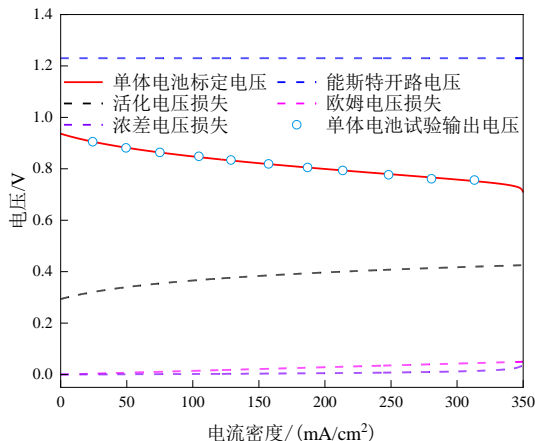


图 2 单体电池输出电压标定结果

电堆的进口冷却水温度  $T_{st, in, i}$  与出口冷却水温度  $T_{st, out, i}$  存在如下关系：

$$\Delta T_{st, i} = T_{st, out, i} - T_{st, in, i} \quad (1)$$

电堆温度  $T_{st, i}$  的动态平衡过程可表示为：

$$\frac{dT_{st, i}}{dt} = \frac{Q_{st, i} - hA(T_{st, i} - T_{st, out, i})}{C_{st, i}M_{st, i}} \quad (2)$$

式中： $Q_{st, i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为电堆产热功率，单位 W； $h$  为冷却水与电堆的对流换热系数，单位  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； $A$  为冷却水与电堆的对流换热面积，单位  $m^2$ ； $C_{st, i}$  为电堆比热容，单位  $J/(kg \cdot K)$ ； $M_{st, i}$  为电堆质量，单位 kg。

电堆产热中，超过 95% 的部分会被热管理系统中的冷却水排出<sup>[11]</sup>，冷却水排出的热量可表示为：

$$Q_{w, i} = C_w m_{w, i} (T_{st, out, i} - T_{st, in, i}) \quad (3)$$

式中： $Q_{w, i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为冷却水散热功率，单位 W； $C_w$  为冷却水比热容，单位  $J/(kg \cdot K)$ ； $m_{w, i}$  为各冷却支路中冷却水质量流量，单位  $kg/s$ 。

由于在实际中电堆温度相对难以测量，本文的控制目标为使电堆入口与出口冷却水温度分别稳定在  $60^\circ C$  与  $65^\circ C$ ，假设电堆内部冷却水温度与出口冷却水温度相同，电堆内部冷却水的温度变化过程可表示为：

$$\frac{dT_{st, out, i}}{dt} = \frac{hA(T_{st, i} - T_{st, out, i}) - Q_{w, i}}{M_{w, st, i} C_w} \quad (4)$$

式中： $M_{w, st, i}$  为电堆内部冷却水质量，单位 kg。

本文的 2 个电堆模型参数一致，模型参数均通过查询产品手册获得，单个电堆模型的具体参数见表 2。

表 2 电堆模型参数

参数	值
单电池片数/ $N_{cell}$	230
电堆质量( $M_{st}/kg$ )	27.50
电堆比热容 $C_{st}/[J/(kg \cdot K)]$	1 200
电堆对流换热面积( $A/m^2$ )	1.77
冷却水比热容 $C_w/[J/(kg \cdot K)]$	4 200
电堆内部冷却水质量( $M_{w, st}/kg$ )	2.76

### 1.3 冷却水泵模型

冷却水泵提供的冷却水流量由水泵转速和回路

流阻来决定,模型在实际计算过程中以相似定律为基础,根据热管理回路中冷却水的压力损失与水泵的转速,通过水泵外特性曲线来确定该时刻水泵提供的冷却水流量,试验测试得到的水泵外特性曲线如图 3 所示,在测试过程中水泵转速保持在额定值(2 630 r/min)。

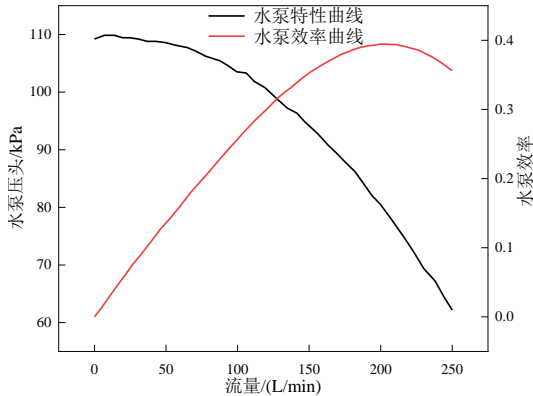


图 3 水泵外特性曲线

水泵的相似定律可表示为<sup>[12]</sup>:

$$\frac{(p_{\text{pump, out}} - p_{\text{pump, in}}) \rho_{\text{ref}} D_{\text{ref}}^2 n_{\text{ref}}^2}{\rho_w D_{\text{pump}}^2 n_{\text{pump}}^2} = f\left(\frac{m_w D_{\text{ref}}^3 n_{\text{ref}} \rho_{\text{ref}}}{D_{\text{pump}}^3 n_{\text{pump}} \rho_w}\right) \quad (5)$$

式中:  $p_{\text{pump, out}}$  为水泵出口冷却水压力, 单位 Pa;  $p_{\text{pump, in}}$  为水泵入口冷却水压力, 单位 Pa;  $D_{\text{pump}}$  为水泵叶轮直径, 单位 m;  $n_{\text{pump}}$  为水泵转速, 单位 r/min;  $\rho_w$  为冷却水密度, 单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $m_w$  为冷却水质量流量, 单位  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $D_{\text{ref}}$  为水泵参考叶轮直径, 单位 m;  $n_{\text{ref}}$  为水泵参考转速, 单位 r/min;  $\rho_{\text{ref}}$  为水泵参考工质密度, 单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $f$  为冷却水质量流量  $m_w$  与水泵压头  $\Delta P$  之间的映射关系。

冷却水泵模型参数通过查询厂家提供的产品手册获得, 具体参数见表 3。

表 3 冷却水泵模型参数

参数	值
水泵叶轮直径 $D_{\text{pump}}/\text{m}$	0.125
冷却水密度 $\rho_w/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 000
水泵参考叶轮直径 $D_{\text{ref}}/\text{m}$	0.125
水泵参考转速 $n_{\text{ref}}/(\text{r}/\text{min})$	2 630
水泵参考工质密度 $\rho_{\text{ref}}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 000

#### 1.4 管壳式换热器模型

换热器模型通过效能-传热单元数方法 ( $\varepsilon$ -NTU) 来建立<sup>[13]</sup>, 该方法通过高温、低温冷却液之间的理论最大换热量来计算 2 种冷却液之间的实际换热量, 管壳式换热器的效能  $\varepsilon$  的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{2(1 - e^{-NTU \cdot \sqrt{1+Cr^2}})}{(1+Cr)(1 - e^{-NTU \cdot \sqrt{1+Cr^2}}) + \sqrt{1+Cr^2}(1 + e^{-NTU \cdot \sqrt{1+Cr^2}})} \quad (6)$$

式中: NTU 为换热器传热单元数, 该值通过 AMESim 软件中换热器标定程序得到, 在此不展开讨论, 详细标定过程可参考文献 [14];  $Cr$  为换热器两侧流体的比热容之比。

换热器的换热功率可根据换热器两侧流体的进口温度按式 (7) 计算。

$$Q_r = C_{\text{min}}(T_{r, \text{in}} - T_{c, \text{in}})\varepsilon \quad (7)$$

式中:  $Q_r$  为换热器的实际换热量, 单位 W;  $C_{\text{min}}$  为换热器冷热两侧流体比热容较小者, 单位  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T_{r, \text{in}}$  为换热器进口热侧流体温度, 单位  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{c, \text{in}}$  为换热器进口冷侧流体温度, 单位  $^\circ\text{C}$ 。

假设换热器热侧出口冷却水温度等于换热器内部冷却水温度, 则可建立换热器出口水温动态平衡关系式如式 (8) 所示。

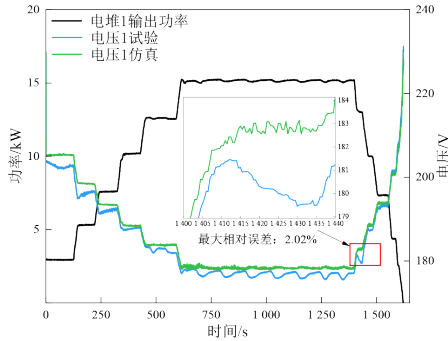
$$\frac{dT_{r, \text{out}}}{dt} = \frac{C_w m_b (T_{r, \text{in}} - T_{r, \text{out}}) - Q_r}{M_{w, r} C_w} \quad (8)$$

式中:  $T_{r, \text{out}}$  为换热器热侧出口流体温度, 单位  $^\circ\text{C}$ ;  $m_b$  为流经换热器的热侧冷却水流量, 单位  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $T_{r, \text{in}}$  为换热器进口热侧流体温度, 单位  $^\circ\text{C}$ ;  $M_{w, r}$  为换热器内部冷却水的质量, 单位 kg, 本文取值 14.825 kg。

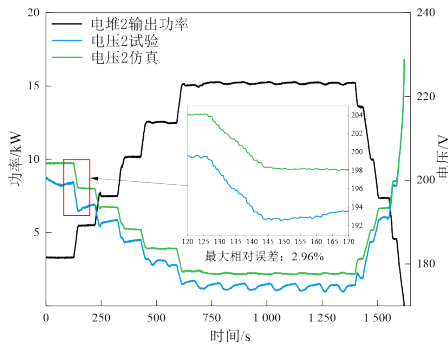
#### 1.5 模型可靠性验证

为验证电堆模型在非标定工况下具备足够的输出电压预测能力, 以实际台架测试工况为仿真模型输入边界条件, 测试工况由拉载、稳载、降载 3 部分组成, 持续时间为 1 623 s, 仿真与试验采样周期保持一致, 均为 0.50 s。仿真与试验得到的各电堆输出电压变化曲线如图 4 所示, 电堆 1 与电堆 2 的输出电压仿真值与试验值最大相对误差分别为 2.02% 与 2.96%, 误差均在可接受范围内, 各电堆

输出电压的仿真值与试验值具有良好的 consistency。



(a) 电堆 1 输出电压验证



(b) 电堆 2 输出电压验证

图 4 仿真与试验下的电堆输出电压对比

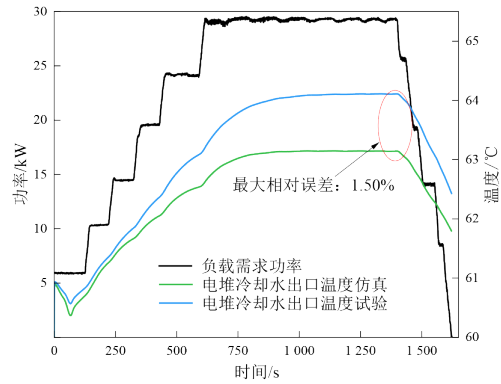
为进一步对热管理系统仿真模型进行验证，本文对各电堆出口冷却水温度的仿真值与试验值进行比较，结果如图 5 所示。电堆 1 与电堆 2 的出口冷却水温度仿真值与试验值变化趋势相同，最大相对误差分别为 1.50% 与 2%，表明所建立的热管理系统模型具有足够的精度。

## 2 控制器设计与仿真分析

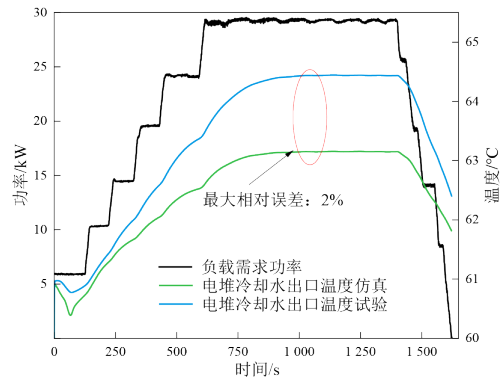
### 2.1 电堆入口水温控制器设计

为对电堆入口冷却水温度进行有效控制，本文设计了以电动三通阀为执行机构的 PI 控制器。该控制器以电堆入口水温为采样信号，以采样信号值与目标值之间的误差为输入，经过比例、积分计算环节，最终输出三通阀开度值。控制器输出开度信号  $k$  如式 (9) 所示。

$$k = K_p (T_{st, in, ref} - T_{st, in}) + K_i \int_0^t (T_{st, in, ref} - T_{st, in}) dt \quad (9)$$



(a) 电堆 1 出口冷却水温度验证



(b) 电堆 2 出口冷却水温度验证

图 5 仿真与试验下的电堆出口冷却水温度对比

根据仿真结果，控制器参数最终整定结果为：比例环节增益系数  $K_p$  设定为 7.62，积分环节增益系数  $K_i$  设定为 4.31。

### 2.2 电堆出口水温控制器设计

在系统运行过程中，环境温度变化、负载需求功率突变均为外部扰动，外部扰动与系统内部的扰动均会导致电堆温度波动。为使系统具备观测并补偿未知扰动的能力，本文结合被控对象的特点，为电堆出口冷却水温度设计了一阶 LADRC 控制器。

#### 2.2.1 扩张状态观测器设计

将式 (3) 代入式 (4) 中，整理得：

$$\frac{dT_{st, out, i}}{dt} = \frac{hA(T_{st, i} - T_{st, out, i})}{M_{w, st, i} C_w} - \frac{(T_{st, out, i} - T_{st, in, i})}{M_{w, st, i}} m_{w, i} \quad (10)$$

记式 (10) 中系统总扰动  $f = hA(T_{st, i} - T_{st, out, i}) / M_{w, st, i} C_w$ ，补偿系数  $b_0 = -(T_{st, out, i} - T_{st, in, i}) / M_{w, st, i}$ ，被控量  $y = T_{st, out, i}$ ，控制量  $u = m_{w, i}$ ，则可得到

式 (11)。

$$y = f + b_0 u \quad (11)$$

定义系统状态变量  $x_1$  为被控量  $y$ , 扩张状态变量  $x_2$  为总扰动  $f$ , 将式 (11) 改写为状态空间表达式, 如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f \\ y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

将  $x_1$  的观测值记为  $z_1$ ,  $x_2$  的观测值记为  $z_2$ , 对系统设计线性扩张状态观测器为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} (y - \hat{y}) \\ \hat{y} = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

为满足观测器的稳定性, 记观测器带宽为  $\omega_o$ , 将状态观测矩阵特征方程的极点配置在  $-\omega_o$  处, 可得到  $\beta_1 = 2\omega_o$ ,  $\beta_2 = \omega_o^2$ 。

### 2.2.2 线性控制器设计

在扩张状态观测器对系统扰动和状态进行估计后, 需通过状态反馈和扰动补偿将系统改造为积分串联型, 一阶线性自抗扰控制中, 如果被控量的参考值为定值, 则可取消输入参考信号的过渡环节<sup>[15]</sup>, 被控量观测值  $z_1$  与参考值  $r$  的状态误差为:

$$e = r - z_1 \quad (14)$$

针对状态误差可引入比例控制:

$$u_0 = k_p e = k_p (r - z_1) \quad (15)$$

记控制器带宽为  $\omega_c$ , 将闭环极点配置在  $-\omega_c$  处, 则有  $k_p = \omega_c$ 。

为对观测出的系统扰动值  $z_2$  进行补偿, 令控制量表达式为:

$$u = \frac{u_0 - z_2}{b_0} \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (11) 中, 得到:

$$y = f + b_0 \left( \frac{u_0 - z_2}{b_0} \right) = f + b_0 \left( \frac{u_0 - \hat{f}}{b_0} \right) \approx u_0 \quad (17)$$

由式 (17) 可知, 通过扰动补偿可将系统改造为积分串联型, 此时根据式 (15) 的比例控制便可调节被控量。

### 2.2.3 系统参数整定

由式 (10) 与式 (11) 可知, 一阶 LADRC 算法中补偿系数  $b_0$  与电堆进出口冷却水温差、电堆内部冷却水质量有关, 在双堆燃料电池系统模型中, 取燃料电池冷却水套容积为 2.76 L, 当冷却水充满燃料电池冷却流道时, 内部冷却水质量  $M_{w, st, i} = 2.76 \text{ kg}$ , 同时为将电堆进出口冷却水温差控制在  $8^\circ\text{C}$  以内, 取  $T_{st, out, i} - T_{st, in, i} = 5^\circ\text{C}$ , 所以 LADRC 控制器中增益系数  $b_0 = -(T_{st, out, i} - T_{st, in, i}) / M_{w, st, i} = -1.81$ 。式 (11) 可表示为:

$$\frac{dT_{st, out, i}}{dt} = f - 1.81 m_{w, i} \quad (18)$$

常见的大部分工程对象, 观测器带宽  $\omega_o$  均可取值为控制器带宽  $\omega_c$  的 3~5 倍<sup>[16]</sup>, 本文的 LADRC 控制器取  $\omega_o = 5 \omega_c$ , 至此, 出口水温控制器只有观测器带宽  $\omega_o$  需进行整定。采用试凑法通过仿真将  $\omega_o$  从 1.00 逐渐增加到 2.50, 该值每增加 0.05 进行一次仿真, 发现  $\omega_o$  超过 1.95 后观测器会出现震荡问题, 所以将  $\omega_o$  取值为 1.95。

双堆燃料电池系统中, 如果分配给 2 个电堆的需求功率不同, 那么电堆的产热功率也不同, 进而影响热管理系统的温度控制。为在实际工况下, 系统能根据各电堆散热需求, 使电堆温度稳定在设定值, 需在各冷却支路中布置可控的电动调节阀, 调节阀开度根据各支路的冷却水流量需求进行在线调整, 在调节阀开度与流量成正比的前提下, 各支路调节阀开度可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\alpha_i = \frac{m_{w, i}}{m_{w, 1} + m_{w, 2}} \quad (19)$$

式中:  $\alpha_i$  为电堆  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 冷却支路调节阀开度。

热管理回路中冷却水需求总流量  $m_w$  为各支路的冷却水流量总和, 可表示为:

$$m_w = m_{w, 1} + m_{w, 2} \quad (20)$$

在水泵的参考叶轮直径与实际叶轮直径相同, 工质的参考密度与实际密度相同的前提下, 根据相似定律, 水泵提供的冷却水流量与其转速成正比<sup>[17]</sup>:

$$m_w = k_{\text{pump}} n \quad (21)$$

式中:  $k_{\text{pump}}$  为水泵的相似比例系数;  $n$  为水泵转速,

单位 r/min。

在基于LADRC的反馈控制策略中，系统的电堆出口温度控制器包含2个电堆的LADRC控制器。每个LADRC控制器根据采样得到的电堆出口水温，

按图6所示流程计算得到各支路所需的冷却水流量，出口温度控制器分别按照式(19)与式(21)计算得到电堆1支路调节阀开度、电堆2支路调节阀开度和水泵转速。

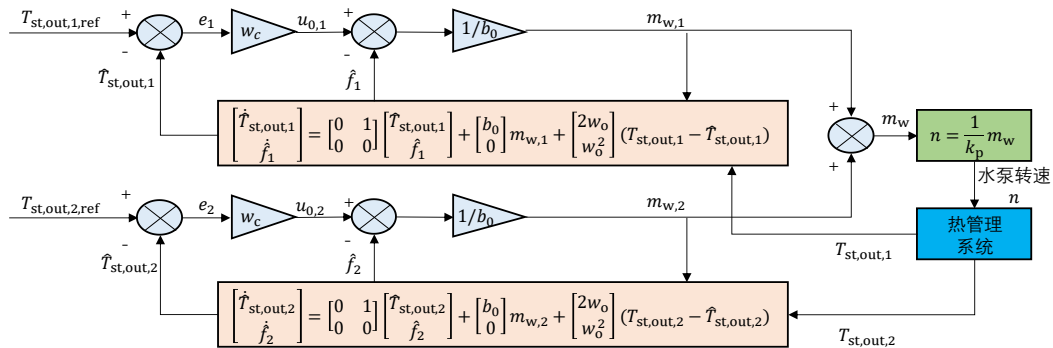


图6 热管理系统LADRC算法原理

### 2.3 系统仿真分析

#### 2.3.1 热管理控制目标与仿真工况

本文双堆燃料电池系统的热管理控制目标如下：

- 1) 为保证热管理效果，电堆入口冷却水温度需控制在 55~65 °C 之间，三通阀处入口水温控制器设定目标参考温度为 60 °C；
- 2) 为保证电堆内部温度分布均匀，进出口冷却水温差需控制在 8 °C 内，各电堆支路出口水温控制器设定目标参考温度为 65 °C；
- 3) 为避免温度频繁波动使电堆寿命缩短，在外部扰动作用下，要求电堆出口冷却水温度的波动范围在 ±4% 以内，即出口冷却水温度相对于设定值的偏离量不应超过 2.60 °C。

电堆输出功率的阶跃变化工况测试是考察热管理系统性能的重要方法，整个阶跃测试工况持续 2 000 s，对负载需求功率及电堆输出功率共设置了 20 个工况点，每个工况点的持续时间为 100 s，持续时间结束后阶跃变化至下一个工况点。为了研究所提出控制算法的鲁棒性，本文在 3 组不同功率分配方式下验证热管理系统控制策略的有效性，系统的具体阶跃工况如图 7~9 所示。工况 1 中，电堆 1 与电堆 2 之间采用了功率平均分配策略，即 2 个电堆的输出功率时刻保持一致；工况 2 及工况 3 中，

电堆 1 与电堆 2 均存在功率输出差异，其中，工况 3 中 2 个电堆的功率输出差异更大，因此，工况 3 中电堆的温度控制难度也最大。3 组仿真工况对热管理控制策略的要求从高至低分别为：工况 3、工况 2、工况 1。仿真过程假设电堆已完成热机，热管理系统中冷却水初始温度为 60 °C，环境温度为 25 °C。

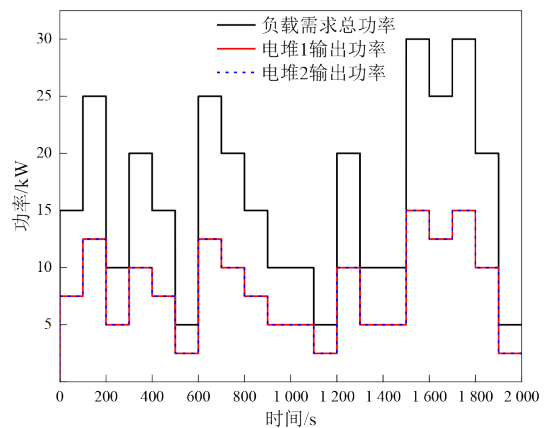


图7 工况1功率分配

#### 2.3.2 仿真结果

图 10 为工况 1 下各电堆的温度变化曲线，工况 1 中 2 个电堆采用功率平均分配策略，电堆 1 与电堆 2 的出口冷却水温度基本一致。随着各电堆输出功率的变化，电堆产热量也随之变化。电堆出口冷却水温度在产热量增加时随之升高，但由于热管理控制策略的介入，经历调节过程后便重新稳定在设定值处，出口冷却水温度最大偏差量均在 ±0.35 °C 内，

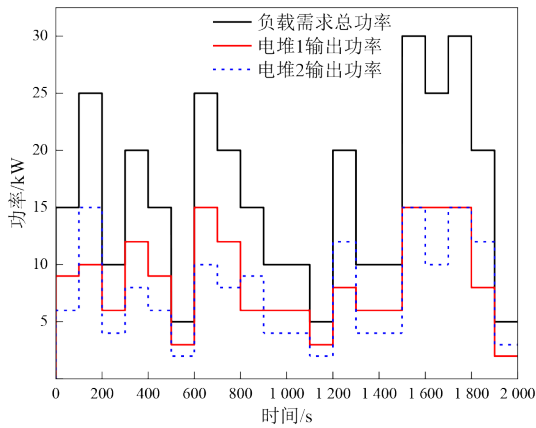


图8 工况2功率分配

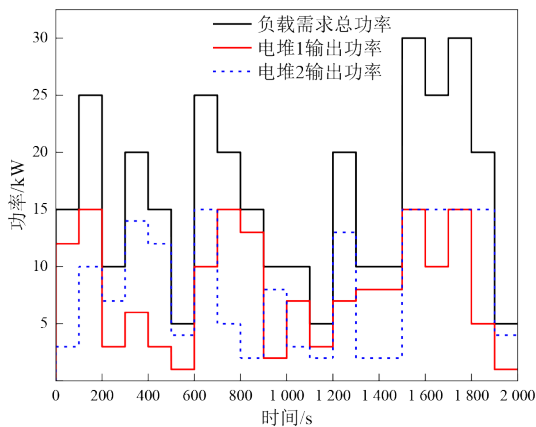
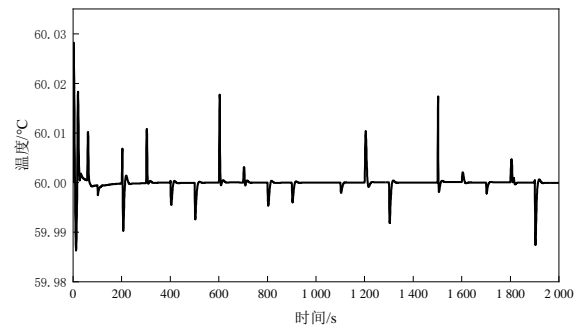


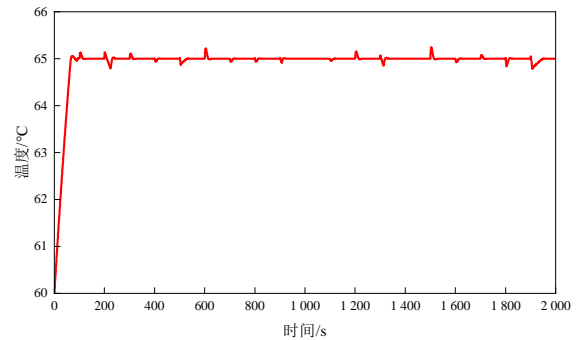
图9 工况3功率分配

满足电堆出口水温控制要求。在设定的外部冷却水流量下，管壳式换热器能提供足够的散热量，因此，整个热管理系统的散热需求能被充分满足。在三通阀的调节作用下，大小循环冷却水汇合后，电堆入口冷却水温度能稳定在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且波动幅度远小于出口水温，证明在换热器具备足够散热能力的前提下，控制三通阀开度能有效地将电堆入口冷却水温度稳定在设定值处。

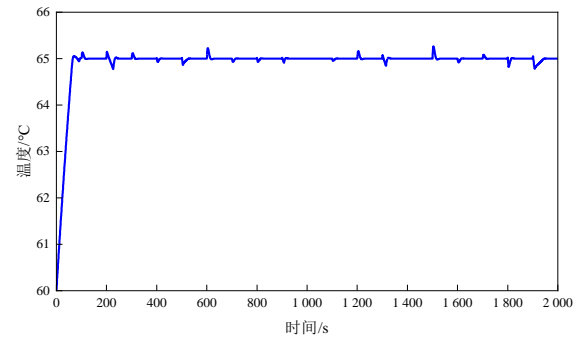
图 11 为工况 2 下各电堆的温度变化曲线，由于 2 个电堆的功率输出存在差异，所以各电堆的产热量也存在差异，此时为满足多热源之间的温度协同控制，调节阀根据控制算法输出的冷却水流量比例对开度进行调节，从而使各支路冷却水流量能满足电堆相应的散热需求。电堆 1 的出口冷却水温度在  $1\ 900\text{ s}$  前基本稳定在  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大温度偏离量为  $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；在  $1\ 900\text{ s}$  时电堆 1 的输出功率由  $8\text{ kW}$  降至  $2\text{ kW}$ ，电堆 1 的出口冷却水温度持续下降直至工



(a) 电堆入口冷却水温度变化曲线



(b) 电堆 1 出口冷却水温度变化曲线



(c) 电堆 2 出口冷却水温度变化曲线

图 10 工况 1 仿真结果

况 2 结束。在  $200$ 、 $500$ 、 $1\ 100\text{ s}$  时，电堆 2 的输出功率分别由  $15$ 、 $6$ 、 $4\text{ kW}$  降至  $4$ 、 $2$ 、 $2\text{ kW}$ ，出口冷却水温度降低并偏离设定值且重新恢复至设定值的稳定时间较长，稳定时间分别为  $63$ 、 $107$ 、 $104\text{ s}$ ，最大偏离量分别为  $0.30$ 、 $0.35$ 、 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。电堆 1 在  $1\ 900\text{ s}$  后温度持续降低，电堆 2 调节过程稳定时间较长均是由于电堆在相应时刻输出功率大幅降低，且电堆在调节过程中持续工作在低功率范围内，产热量较小，而在调节阀开度跟随流量比例的策略下，各冷却支路中的冷却水流量控制精确度欠佳。该策略无法在电堆切换至低功率输出状态下，迅速降低支路冷却水流量从而维持电堆温度的稳定。

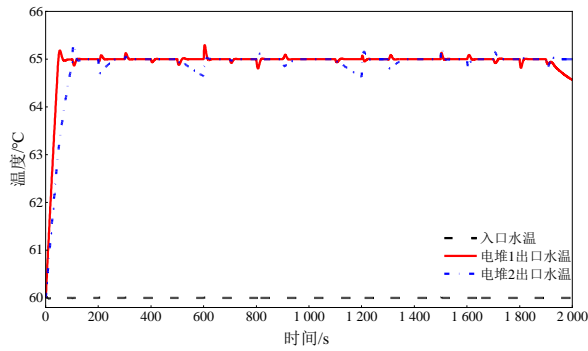


图 11 工况 2 仿真结果

图 12 为工况 3 下各电堆的温度变化曲线，2 个电堆的功率输出差异相比工况 2 更大，各电堆的出口冷却水温度均出现了偏离设定值较大且稳定时间较长的情况。电堆 1 在 600、1 000 s 时，出口冷却水温度偏离量分别为 2.20、1.53 °C；电堆 2 在 900、1 500 s 时，出口冷却水温度偏离量分别为 1.96、2.30 °C。在电堆输出功率变化较大造成热管理系统受到持续扰动的情况下，电堆出口水温控制存在短时失效的情况，尽管本文所提出的热管理控制策略能满足出口水温不超过 2.60 °C 的要求，但仍有优化空间。

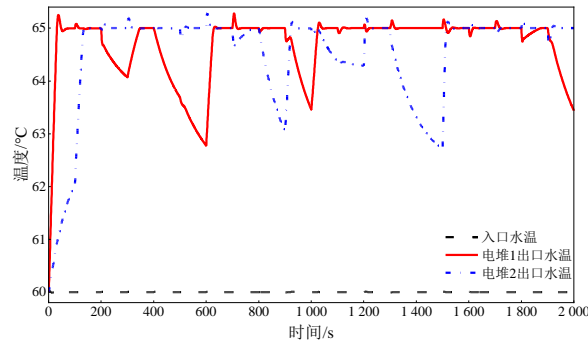


图 12 工况 3 仿真结果

### 3 控制策略改进及仿真对比

#### 3.1 热管理系统控制策略改进

##### 3.1.1 前馈解耦控制策略

电堆出口水温的前馈控制策略执行器件为冷却水泵，为达到预设的电堆出口温度，使用产热与散热特性分析方法，对每个电堆产热功率值所需冷却水流量进行理论计算，基于水泵的相似定律得到水泵提供相应冷却水流量所需的转速。由式 (1) 与

式 (3) 可知，将任一电堆进出口冷却水温差控制在  $\Delta T_{ref, i}$  所需的冷却水流量为：

$$m_{w, i} = \frac{Q_{ref, i}}{C_w \Delta T_{ref, i}} \quad (22)$$

式中： $m_{w, i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为双堆燃料电池系统中任一电堆冷却支路的冷却水需求流量，单位 kg/s； $Q_{ref, i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为任一电堆的产热功率参考值，单位 W； $C_w$  为冷却水比热容，单位 J/(kg·°C)； $\Delta T_{ref, i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为任一电堆的目标进出口温差，单位 °C，本文为使电堆出口温度稳定在 65 °C， $\Delta T_{ref, i}$  取 5 °C。

热管理系统的前馈控制策略原理如图 13 所示。在水泵的前馈控制策略下，水泵的前馈输入信号不是电堆的入口或出口冷却水温度，与三通阀基于电堆入口水温作为输入信号的反馈控制通道相互独立，各控制器之间没有明显的耦合关系。

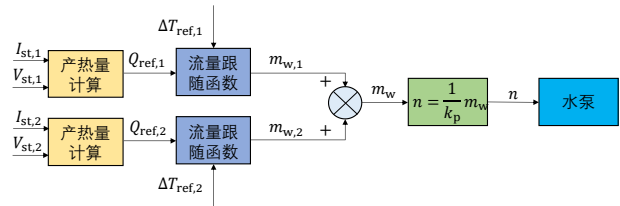


图 13 前馈控制策略原理

##### 3.1.2 基于串级 LADRC 的流量精确控制

采用单个 LADRC 控制器无法对各支路的冷却水流量进行精确控制，从而导致控制策略鲁棒性欠佳。为更精确地控制冷却水流量，设计串级 LADRC 控制器从而实现电堆出口水温控制器的优化，通过控制调节阀开度，对不同支路的冷却水流量进行合理分配。

本文所提出的串级 LADRC 控制器原理如图 14 所示，外环为温度控制环，内环为冷却水流量控制环，外环与内环共同构成电堆出口冷却水温度串级控制器。外环 LADRC 控制器根据温度设定值与温度传感器采样值之间的偏差进行调节，将各支路所需的冷却水流量作为输出信号传递至内环控制器；内环 LADRC 控制器以外环控制器的输出信号作为输入，通过冷却水流量传感器的采样值与外环输出量计算得到冷却水流量偏差，对电动调节阀开度进

行调节, 从而实现对电堆温度的控制。对于串级控制系统而言, 内环主要对被控对象进行粗调, 注重响应的快速性; 外环对被控对象进行细调, 对控制

器的要求较高。一般而言, 内环LADRC算法中观测器与控制器带宽应取外环的4~6倍, 本文中内环带宽取外环的6倍。

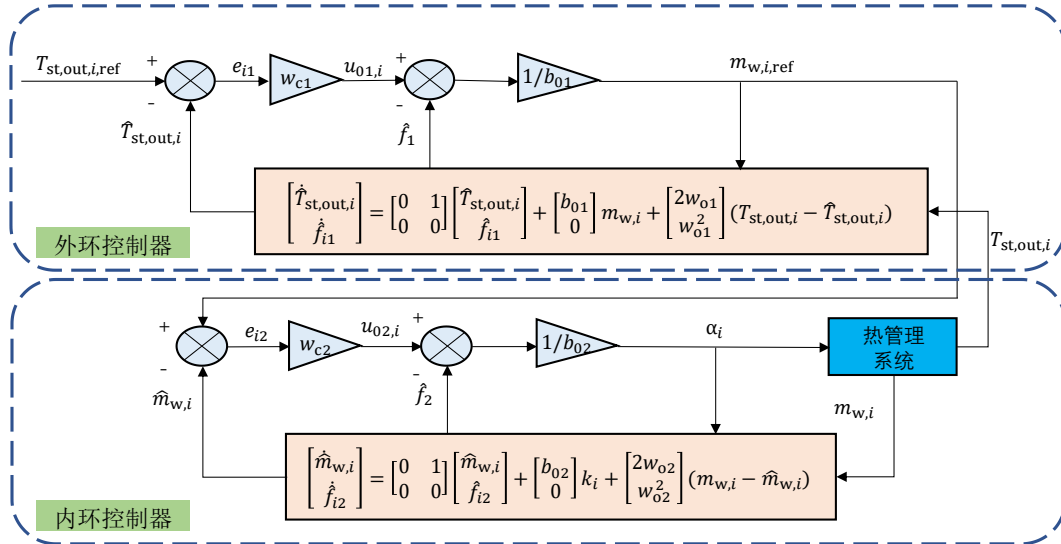


图 14 热管理系统串级LADRC算法原理

### 3.2 改进前后策略对比

由于串级LADRC控制器使用了电堆出口冷却水温度采样信号作为反馈控制信号, 因此, 冷却水泵的转速控制采用了前馈控制, 以避免控制通道之间的耦合导致控制效果不理想。在改进后的热管理系统控制策略中, 串级LADRC控制器负责调节电堆冷却支路的电动调节阀开度, 前馈控制器负责调节冷却水泵转速, PI控制器负责调节三通阀开度。

改进控制策略沿用了原方案电堆进口冷却水控制策略, 所以本节仅对优化前后电堆出口冷却水温度进行对比, 在各工况下, 优化后系统的仿真条件均与优化前保持一致。图15为工况1下优化前后的热管理效果比较, 由于2个电堆输出功率相同, 所以出口冷却水温度也基本一致。经过优化后, 在外部扰动出现时, 各电堆的出口水温偏差量均有所减小, 其最大偏差量均在 $\pm 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内, 热管理性能优于优化前的控制策略, 满足电堆出口水温控制要求。

图16为工况2下优化前后热管理效果比较, 与优化前控制策略类似, 电堆1的出口冷却水温度在1900s前基本稳定在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在1900s之后, 优化后的电堆1出口水温不会随时间持续下降, 而是维

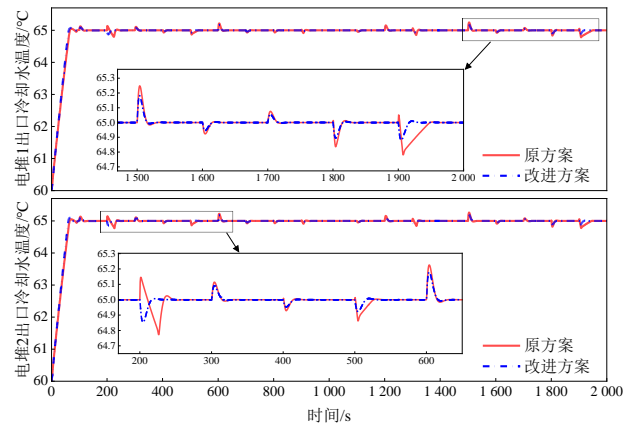


图 15 工况 1 仿真结果对比

持在 $64.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 降低了电堆长时间工作在低功率区域对热管理系统控制带来的干扰。与优化前控制策略相比, 优化后电堆2的出口冷却水温度变化曲线更为平缓, 在出现扰动后的调节过程中, 稳定时间不会过长。

图17为工况3下优化前后热管理效果比较, 在对控制策略进行优化后, 各电堆出口冷却水温度相对设定值的偏离量有所减小, 且各电堆的温度变化曲线也更加平缓。电堆1在600、1000s时, 出口冷却水温度偏离量分别为 $0.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 比优化前的偏离量分别降低了 $1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 电堆2在900、

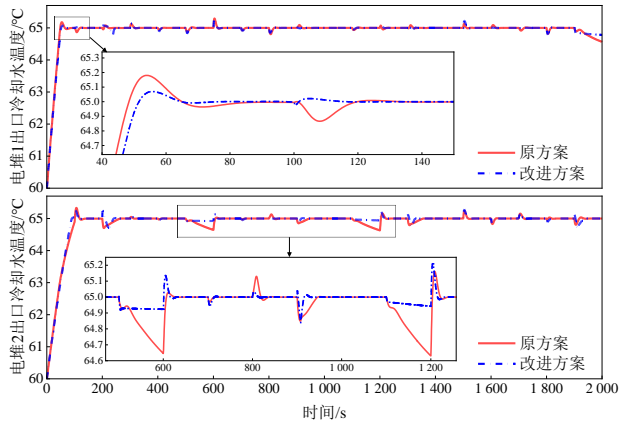


图 16 工况 2 仿真结果对比

1 500 s 时，出口冷却水温度偏离量分别为 0.33、0.46 °C，比优化前的偏离量分别降低了 1.63、1.84 °C。可见，在应用改进后的热管理控制策略后，热管理系统的温控精度得到了提高。

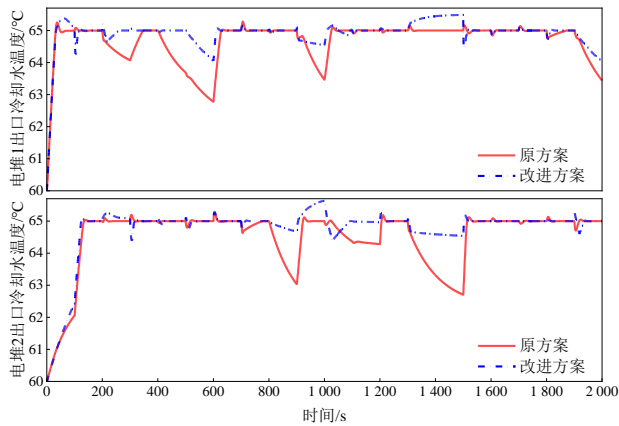


图 17 工况 3 仿真结果对比

在热管理系统控制策略的优化对比研究中，本文引入时间乘绝对误差积分量（Integral Time Absolute Error, ITAE）指标来评价控制策略的性能，该指标将被控量的目标值与实际值的偏差用时间加权并积分，削弱了系统在过渡过程中偏差量对控制性能评价指标的影响权重<sup>[18]</sup>，ITAE 指标的表达式为：

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (23)$$

图 18~20 分别为 3 组工况下，各电堆的出口冷却水温度 ITAE 分布情况对比，ITAE 值越小，意味着电堆出口水温在目标值附近的波动越小，对出口

冷却水温的控制效果越好。3 组工况与原控制策略相比，采用改进控制策略后，各电堆出口水温的 ITAE 值均更小。在电堆功率变化最剧烈的工况 3 中，电堆 2 出口水温的 ITAE 值最终降低了 66.39%，证明采用改进控制方案后，系统的抗干扰能力得到了提升，这与上文的分析结果相吻合。

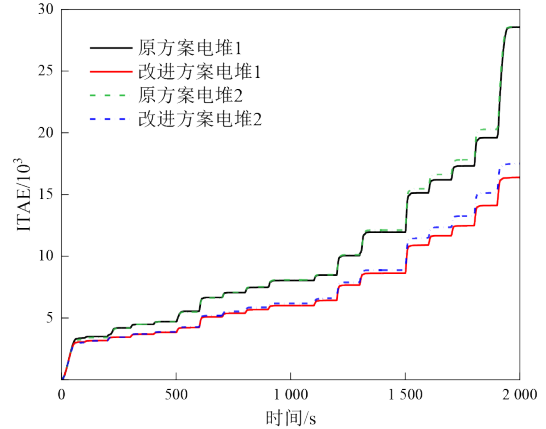


图 18 工况 1 电堆出口水温 ITAE 值

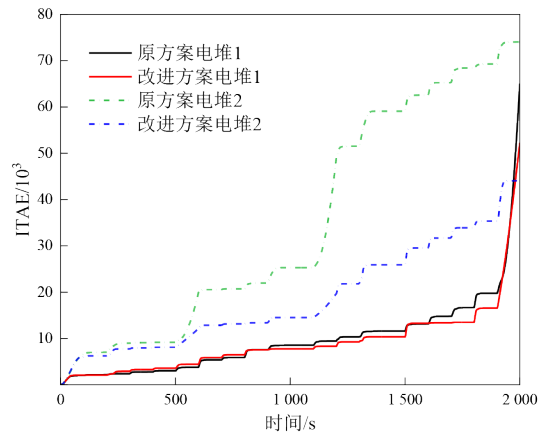


图 19 工况 2 电堆出口水温 ITAE 值

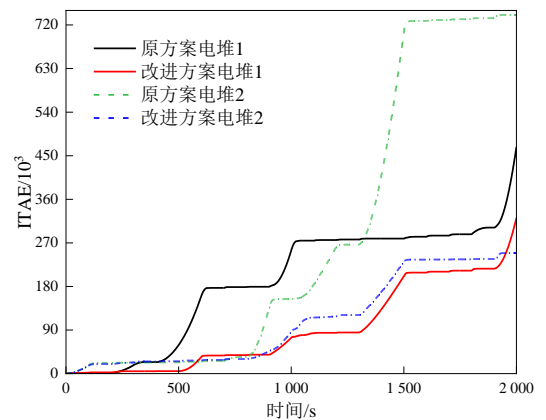


图 20 工况 3 电堆出口水温 ITAE 值

## 4 结论

本文针对双堆燃料电池系统的温度控制问题,分别设计了基于PI算法的电堆进口温度控制器与基于LADRC算法的出口温度控制器,通过仿真计算验证了本文所提出的控制策略具备有效性。为改善控制效果,进一步从解耦角度与冷却水流量精确分配角度改进了原控制策略,为水泵的转速控制设计了前馈控制策略,采用串级LADRC算法控制调节阀开度。结果表明,改进后的控制策略能有效改善双堆燃料电池热管理系统的温度控制效果,系统的

温控精度及抗扰能力均得到提高,具体结论如下。

1) 在换热器能满足系统散热需求的前提下,通过调节电动三通阀开度能将电堆入口冷却水温度稳定在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在PI控制器的作用下,温度波动不超过 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 在2个电堆采用功率平均分配的阶跃工况下,基于LADRC控制的电堆出口水温控制器能将温度波动控制在 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,而在电堆产热功率差异较大的情况下,出口水温波动最大为 $2.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用改进后的控制策略能有效改善控制效果,温度波动量最高能降低 $1.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘建国,任飞龙,颜伏伍,等.考虑电堆寿命的氢燃料电池汽车能量管理策略研究[J].汽车工程学报,2023,13(4):517-527.  
LIU Jianguo, REN Feilong, YAN Fuwu, et al. Energy Management Strategy for Hydrogen Fuel Cell Vehicle Considering Fuel Cell Stack Lifespan[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(4): 517-527. (in Chinese)
- [2] MA Rui, CHAI Xiaoyue, GENG Ruixue, et al. Recent Progress and Challenges of Multi-Stack Fuel Cell Systems: Fault Detection and Reconfiguration, Energy Management Strategies, and Applications [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 285: 117015.1-117015.31.
- [3] 周苏,陈春光,樊磊.质子交换膜燃料电池动力系统热管理综述[J].汽车文摘,2023(2):1-14.  
ZHOU Su, CHEN Chunguang, FAN Lei. Review on Thermal Management of Automotive Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power System [J]. Automotive Digest, 2023(2): 1-14. (in Chinese)
- [4] SHEN Wei, FAN Lei, PAN Zhirong, et al. Comparison of Different Topologies of Thermal Management Subsystems in Multi-Stack Fuel Cell Systems [J]. Energies, 2022, 15(14): 1-16.
- [5] WOO J B, KIM Y H, YU S S. Cooling-System Configurations of a Dual-Stack Fuel-Cell System for Medium-Duty Trucks [J]. Energies, 2023, 16(5): 1-19.
- [6] 沈伟,石霖,陈春光,等.多堆燃料电池系统温度模型预测控制[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(9):1368-1376.  
SHEN Wei, SHI Lin, CHEN Chunguang, et al. Analysis of Temperature Model Predictive Control of a Multi-Stack Fuel Cell System [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(9): 1368-1376. (in Chinese)
- [7] ZHOU Su, GAO Jianhua, PAN Zhirong, et al. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Method for a Multistack Fuel Cell Thermal Management Subsystem [J]. Energy Technology, 2023, 11(10): 1-18.
- [8] SUN Li, JIN Yuhui, YOU Fengqi. Active Disturbance Rejection Temperature Control of Open-Cathode Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. Applied Energy, 2020, 261: 114381.1-114381.13.
- [9] HAN J Y, HAN J S, JI H J, et al. "Model-Based" Design of Thermal Management System of a Fuel Cell "Air-Independent" Propulsion System for Underwater Shipboard [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(56): 32449-32463.
- [10] 朱华美. PEMFC 系统建模与基于氧气过量比的控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
ZHU Huamei. Research on Modeling of PEMFC System and Control Strategy Based on Oxygen Excess Ratio [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [11] XING Lu, CHANG Huawei, ZHU Runqi, et al. Thermal Analysis and Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks for Automotive Vehicle [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(64): 32665-32675.
- [12] CHEN Fengxiang, JIAO Jieran, HOU Zhongjun, et al. Robust Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Temperature Tracking Control Based on Cascade Internal Model Control [J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 229008.1-229008.11.
- [13] ZHU Runqi, XING Lu, TU Zhengkai. Simulations and Analysis of High-Temperature Proton Exchange Mem-

- brane Fuel Cell and Its Cooling System to Power an Automotive Vehicle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 253: 115182.1–115182.10.
- [14] 丁琰. 电动汽车热管理系统一维非稳态仿真研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- DING Yan. An One-Dimensional Simulation Study on Unsteady Characteristics in Thermal Management System of an Electric Vehicle [D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)
- [15] 王星, 孙俊, 陈宁芳, 等. 基于 Simscape 的质子交换膜燃料电池冷却系统建模与温度控制策略[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(3): 857–869.
- WANG Xing, SUN Jun, CHEN Ningfang, et al. Modeling of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cooling System Based on the Simscape Temperature Control Strategy [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(3): 857–869. (in Chinese)
- [16] GAO Zhiqiang. Scaling and Bandwidth-Parameterization Based Controller Tuning [C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, Jun. 4–6, 2003, Denver, CO, USA. 2003: 4989–4996.
- [17] 徐政, 章飞, 何少强. 光伏扬水系统的优化设计[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(12): 2151–2158.
- XU Zheng, ZHANG Fei, HE Shaoqiang. Optimization of Solar Water Pumping System [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2013, 34(12): 2151–2158. (in Chinese)
- [18] 吴迪. 多工况燃料电池发动机建模及控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- WU Di. Modeling and Control Strategy of Fuel Cell System Under Multiple Operating Conditions [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)

#### 作者简介



程博源 (1998–), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源汽车热管理。

Tel: 15102774276

E-mail: 781424528@qq.com

#### 通信作者



刘志恩 (1977–), 男, 湖北荆门人, 博士, 教授, 主要研究方向为燃料电池建模与仿真。

Tel: 13971137799

E-mail: Lzen@whut.edu.cn