文章编号:1674-7607(2026)10-0052-10 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250433

基于模糊控制的质子膜燃料电池热管理系统的设计与仿真

边洋震[1], 肖宗亮[1], 杨 健[1,2], 钟泉鸣[1], 丁 毅[1], 张 林[3]
(1. 浙江大学 能源工程学院,浙江杭州 310027; 2. 浙江省白马湖实验室有限公司,浙江杭州 310007; 3. 中国人民解放军海军舰艇学院,山东青岛 266042)

摘 要: 为提高质子交换膜燃料电池(PEMFC)在水下动力平台中的热管理性能,解决其强耦合、非线性导致的温控响应慢问题,设计了基于模糊比例-积分-微分(PID)控制的双执行器协同热管理系统。通过建立 PEMFC 电-热耦合数学模型,构建了包含电堆、水泵、散热器的系统仿真平台。结果表明:在动态电流工况下,对比传统 PID 控制,模糊 PID 通过实时调节水泵流量与散热器风量,实现电堆温度的快速稳定,模糊 PID 将温度稳定时间缩短了 323.1 s,超调量降低,效率提升,且温控误差不超过±0.05 K;该系统显著提升了 PEMFC 在复杂工况下的鲁棒性。

关键词: PEMFC; 水下动力平台; 电-热耦合模型; 热管理系统; 模糊 PID 控制
中图分类号:TK91 **文献标志码**:A **学科分类号**:480.99

Design and Simulation of a Fuzzy Control-based Thermal Management System for Proton Exchange Membrane Fuel Cells

BIAN Yangzhen[1], *XIAO Zongliang*[1], *YANG Jian*[1,2], *ZHONG Quanming*[1], *DING Yi*[1], *ZHANG Lin*[3]
(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 2. Zhejiang Baimahu Laboratory Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China; 3. PLA Naval Ship Academy, Qingdao 266042, Shandong Province, China)

Abstract: To improve thermal management performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) in underwater power platforms and to address the slow temperature control response caused by strong coupling and nonlinearity, a dual-actuator cooperative thermal management system based on fuzzy proportional- integral-derivative (PID) control was designed. An electro-thermal coupled mathematical model of the PEMFC was established, and a system simulation platform comprising the stack, water pump, and radiator was constructed. Results show that under dynamic current conditions, compared with conventional PID control, the fuzzy PID controller achieves faster and more stable stack temperature regulation by adjusting the water pump flow rate and radiator airflow in real time. The fuzzy PID reduces the temperature stabilization time by 323.1 s, lowers overshoot, improves efficiency, and maintains temperature control error within ±0.05 K. The system significantly enhances the robustness of PEMFCs under complex operating conditions.

Key words: PEMFC; underwater power platform; electro-thermal coupling model; thermal management

收稿日期:2025-07-07 **修订日期**:2025-08-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075487、52442113)
作者简介:边洋震(2000—),男,浙江诸暨人,硕士研究生,研究方向为燃料电池系统设计与智能控制,E-mail:2430633899@qq.com。

system；fuzzy PID control

质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有零排放、功率密度高等优点，适合于家用、分布式发电、汽车和便携式电源等领域[1]。质子交换膜燃料电池作为动力能源，在水下动力平台还具有高能量密度、环境适应性强、静音性与隐蔽性等优势，尤其适用于潜艇、无人潜航器(UUV)、深海探测等场景。

PEMFC 作为水下动力源，其高能量密度、环境适应性强、静音性等优势显著。然而，其温度波动易引发膜脱水或水淹，导致性能衰退。目前，PEMFC 热管理研究集中于空冷与液冷策略，其中液冷系统是通过调节冷却液流量实现精准控温，成为大功率和特殊场景应用的主流方案。Benchenina 等[1]设计的先进数字孪生系统能复现现实燃料电池模型的复杂特性，更直观地对燃料电池热量进行控制，但缺乏在动态情况下的自动调节。Zhu 等[2]提出了基于比例-积分-微分(PID)控制器的热管理策略，提高了燃料电池的热管理效率，但应对复杂工况时略有不足。郭硕[3]构建了基于模型预测控制(MPC)理论的燃料电池热管理系统控制策略，经仿真验证，该策略使热管理系统总能耗减少了 12.5%。为了实现冷却水与电堆温度的精准调控，Chen 等[4]构建了一种基于双 PID 控制器的温度管理系统模型，可以降低控制电堆温度时的超调量，但延长了控制时间。

本文的创新点在于建立了电-热强耦合模型，整合电压损失模型与热平衡方程，以量化温度对输出电压的非线性影响；提出双执行器模糊 PID 协同策略，以电堆温度 T_{st} 与入口水温为反馈，同步优化水泵流量与散热器风量控制规则，解决系统惯性导致的响应滞后；通过突加/突卸电流仿真(模拟 UUV 机动工况)，验证系统在动态负载下的温控鲁棒性。

1　PEMFC 电压模型仿真

1.1　质子膜燃料电池的数学模型与仿真

燃料电池由多个相同的单片燃料电池串并联而成[5]，燃料电池的输出电压 V_n 为

$$V_n = n_{cell} \cdot V_o \tag{1}$$

式中：n_{cell} 为单片燃料电池的数量；V_o 为单片燃料电池的输出电压。

在单片燃料电池内部，存在 3 种主要的电压损失，分别是欧姆电压损失 V_{ohmic}、活化电压损失 V_{act} 以及浓差电压损失 V_{con}。燃料电池的实际输出电压[6]为

$$V_o = E - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \tag{2}$$

式中：E 为燃料电池的热力学电动势。

$$E = \frac{\Delta G - \Delta s(T - T_o) + 0.5RT(\ln p_{H_2} + \ln p_{O_2})}{2F} \tag{3}$$

式中：ΔG 为吉布斯自由能，J/mol；F 为法拉第常数，C/mol；Δs 为标准摩尔熵，mol·K；T 为热力学温度，K；T_o 为参考温度，K；R 为通用气体常数，J/(mol·K)；p_{H_2} 为氢气的压力，Pa；p_{O_2} 为氧气的压力，Pa。

活化电压损失与电流的关系可由 Butler-Volmer 方程[7]表示。

$$V_{act} = \zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T \ln C_{O_2} + \zeta_4 T \ln I \tag{4}$$

$$\ln C_{O_2} = p_{O_2} / [5.08 \times 10^{-6} \times \exp(-498/T)] \tag{5}$$

式中：ζ_1、ζ_2、ζ_3、ζ_4 为常数；C_{O_2} 为氧气浓度；I 为电流，A。

欧姆电压损失遵循欧姆定律[8]，公式为

$$V_{ohmic} = IR_{ohmic} \tag{6}$$

$$R_{ohmic} = r_M l / A \tag{7}$$

$$r_M = \frac{181.6[1 + 0.03i + 0.062(T/303)^2 i^{2.5}]}{\lambda - 0.634 - 3i \times e^{4.18(T-303)/T}} \tag{8}$$

$$i = I/A \tag{9}$$

式中：R_{ohmic} 为燃料电池内阻；l 为燃料电池膜的厚度，cm；A 为燃料电池膜的面积，cm^2；r_M 为燃料电池等效内阻；i 为燃料电池的电流密度，A/cm^2；λ 为燃料电池膜的含水量。

浓差电压损失[6]的计算式如下：

$$V_{con} = -B\ln(1 - i/i_{max}) \tag{10}$$

式中：B 为比例系数；i_{max} 为最大电流密度。

实际 PEMFC 的主要参数如表 1 所示。

表 1　PEMFC 主要参数

Tab. 1　Main parameters of PEMFC

参数	数值
燃料电池比热容 c_{st}/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})	0.71
燃料电池工作温度 $T_{工作温度}$/K	323
p_{H_2}/Pa	50 000
p_{O_2}/Pa	30 000
i_{max}/(A·cm^{-2})	1.5
PEMFC 长宽高/(mm×mm×mm)	104×67×120
理想工作温度/K	318.15～327.15
l/cm	0.04
A/cm^2	60
λ	20
B	0.016
燃料电池工作电流 $I_{工作电流}$/A	16
n_{cell}	35
燃料电池质量 m_{st}/kg	1.08

PEMFC 是一个多输入多输出、强耦合、非线性的动态系统。

1.2 PEMFC 的 Simulink 仿真

在 Matlab 的 Simulink 中搭建 PEMFC 模型并进行仿真，如图 1 所示。

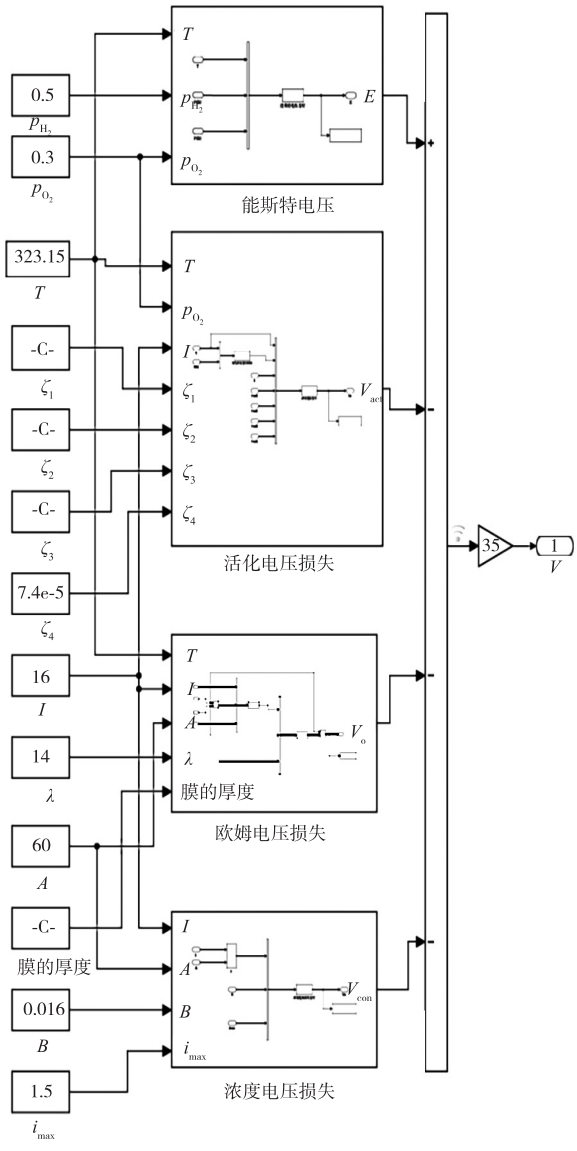


图 1 PEMFC 仿真图

Fig. 1 PEMFC simulation diagram

PEMFC 电压仿真系统由 4 大子系统组成，分别是能斯特电压、活化能电压、欧姆电压和浓度差电压。图 2 为实际 PEMFC 测试的实验台，包括 PEMFC、泵和水箱、散热风扇、温度传感器和显示器、氢氧输入和输出管路以及控制台。测试时采用恒定电流(CC)模式使电流从低到高依次增大，观察电压、功率等参数的变化。测试时的动态变化是模拟了 PEMFC 在水下平台所面对的复杂工作需求(包括冷启动和突然卸载并快速达到工作条件等情

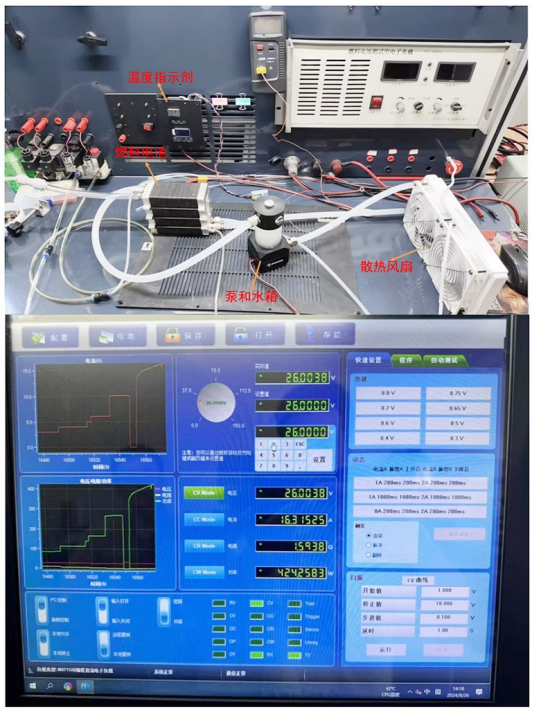


图 2 PEMFC 实验测试台与测试结果

Fig. 2 PEMFC experimental test bench and test results

景)，但因为实验条件所限，电流变化形式只能采用阶跃，故只能模拟部分场景。

以真实 PEMFC 测试的 CC 模式进行仿真，电流输入如图 3 所示。仿真数据来自实际测试，仿真周期设置为 800 s，如表 2 所示。PEMFC 输出电压仿真结果与实验结果的对比见图 4。

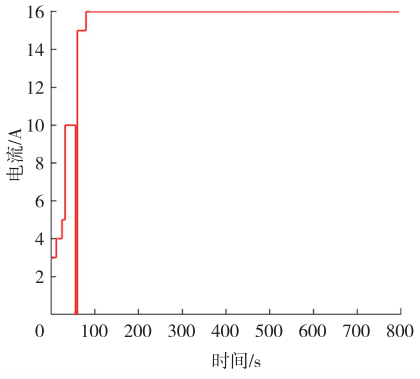


图 3 电流输入

Fig. 3 Current input

表 2 输入电流数据

Tab. 2 Input current data

时间/s	电流/A	时间/s	电流/A
0	3	56	0
12	4	60	15
25	5	80	16
32	10	800	16

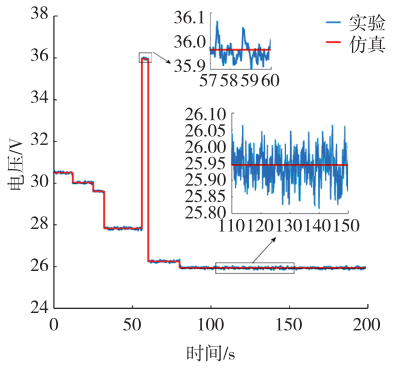


图 4　PEMFC 输出电压实验与仿真对比

Fig. 4　Comparison of PEMFC output voltage between experiments and simulations

从图 4 可以看出，PEMFC 的电压随着电流的变化而变化，在电流逐步增大的情况下 PEMFC 的输出电压逐步减小，在 56 s 时电流突变为 0 A（即模拟突然断电后接通的情况），在第 80 s 后电流才稳定输出。与实验电压相比，仿真结果除了缺少微小的电压波动（范围在 ±0.1 V 以内）外基本吻合，证明了仿真模型的准确性。测试时的动态变化是为了模拟 PEMFC 在水下平台面对的复杂工作需求，这使得 PEMFC 系统在本身具有强耦合、非线性的特点下更加需要增强系统的动态响应速度与鲁棒性。

2　PEMFC 水冷系统设计与仿真

PEMFC 水冷系统分为燃料电池堆与冷却系统，冷却系统由水箱、水泵、散热器和冷却系统控制系统组成。PEMFC 水冷却系统工作时控制系统采集冷却水出口温度作为燃料电池堆参考温度 T_{st}，冷却水入口温度作为散热器冷却水出口温度 T_{out}，通过调节水泵的冷却水质量流量和散热器风扇转速来控制冷却水的散热量[9-11]，从而控制燃料电池的温度稳定，原理图如图 5 所示，仿真系统如图 6 所示。

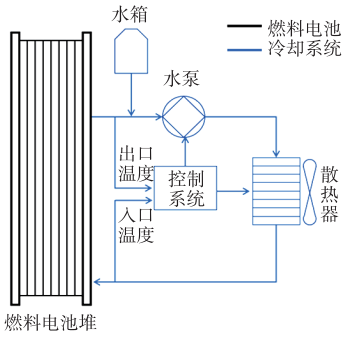


图 5　燃料电池水冷系统

Fig. 5　Water cooling system of fuel cell

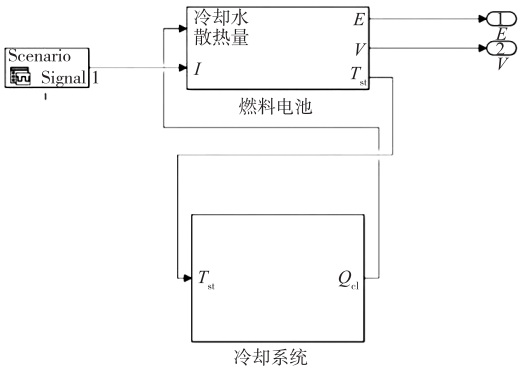


图 6　PEMFC 热管理系统仿真示意图

Fig. 6　Simulation diagram of PEMFC thermal management system

2.1　PEMFC 热量模型

从产热和散热 2 个方面来考虑 PEMFC 内部的能量变化。根据热量守恒，PEMFC 系统总的热量平衡方程[10,12]为

$$Q_{tot}-Q_{cl}-Q_{gas}-Q_r-P_{st}=c_{st}m_{st}(\mathrm{d}T_{st}/\mathrm{d}t) \quad (11)$$

式中：Q_{tot} 为氢氧反应化学能，kJ/s；Q_{cl} 为冷却液散热，kJ/s；Q_{gas} 为未反应气体带走的热量，kJ/s；Q_r 为环境辐射散热，kJ/s；P_{st} 为电堆输出电功，kJ/s；t 为时间，s。

因此，PEMFC 电堆的温度 T_{st} 为

$$T_{st}=\int_0^t[(Q_{tot}-Q_{cl}-Q_{gas}-Q_r-P_{st})/(c_{st}m_{st})]\mathrm{d}t \quad (12)$$

2.1.1　产热分析

PEMFC 电堆的热量来源于电化学反应，电堆产热[12] Q_{react} 为

$$Q_{react}=Q_{tot}-P_{st}=n_{cell}I_{st}(E_0-V) \quad (13)$$

式中：I_{st} 为工作电流，A；E_0 为可逆电压，V；V 为输出电压，V。

氢氧反应化学能[12-14] Q_{tot} 为

$$Q_{tot}=n_{cell}q_{m,react}\Delta H \quad (14)$$

式中：$q_{m,react}$ 为反应物摩尔流量，mol/s；ΔH 为反应的焓变，kJ/mol。

实际上，燃料电池的能量输出，无论是电能还是热能，都直接来源于氢气和氧气中化学键断裂和形成过程中释放或吸收的能量，即化学反应过程的焓差 ΔH[12,15]。

$$2H_2+O_2\longrightarrow 2H_2O \quad (15)$$

$$\Delta H=-571.6\ \mathrm{kJ/mol}$$

电荷量 Q_e 和化学反应产物中物质的量 n 之间的关系[12]如下：

$$Q_e=nF\zeta \quad (16)$$

式中：ζ 为电化学进度，mol。

反应物摩尔流量 $q_{m,react}$ 为

$$q_{\mathrm{m,react}}=I/(nF) \tag{17}$$

2.1.2 散热分析

废热为

$$Q_{\mathrm{gas}}=(q_{\mathrm{O_2,rec}}c_{\mathrm{O_2}}+q_{\mathrm{H_2,rec}}c_{\mathrm{H_2}}+q_{\mathrm{H_2O,l,rec}}c_{\mathrm{H_2O,l}})\times(T_{\mathrm{st}}-T_{\mathrm{atm}}) \tag{18}$$

式中：$q_{\mathrm{O_2,rec}}$为参与反应的氧气流量，mol/s；$q_{\mathrm{H_2,rec}}$为参与反应的氢气流量，mol/s；$q_{\mathrm{H_2O,l,rec}}$为生成的水蒸气流量，mol/s；$c_{\mathrm{O_2}}$为氧气比热容，kJ/(kg·K)；$c_{\mathrm{H_2}}$为氢气比热容，kJ/(kg·K)；$c_{\mathrm{H_2O,l}}$为水蒸气比热容，kJ/(kg·K)；T_{atm}为环境温度，K。

PEMFC 电堆通过对流换热的方式与冷却液进行热量交换，根据冷却水进出口温差可以得到冷却水的散热量[12,16-18]。

$$Q_{\mathrm{cl}}=c_{p,\mathrm{w}}q_{m,\mathrm{w}}(T_{\mathrm{st}}-T_{\mathrm{out}}) \tag{19}$$

式中：$c_{p,\mathrm{w}}$为冷却液比定压热容，kJ/(kg·K)；$q_{m,\mathrm{w}}$为冷却液质量流量，kg/s；T_{out}为冷却水出口温度，K。

使用去离子水作为冷却液，因此 $c_{p,\mathrm{w}}=4.2$ kJ/(kg·K)。

电堆产生的热量一部分通过热辐射的形式散发到外界，辐射散热[19] Q_{r} 为

$$Q_{\mathrm{r}}=\varepsilon\sigma A_{\mathrm{st}}(T_{\mathrm{st}}^4-T_{\mathrm{atm}}^4) \tag{20}$$

式中：ε 为辐射系数；σ 为玻尔兹曼常数，J/K；A_{st} 为电堆表面积，$\mathrm{m^2}$。

据测量，PEMFC 表面积为 0.054 976 $\mathrm{m^2}$，取 T_{st}等于工作温度 323.15 K，计算可得 $Q_{\mathrm{r}}=2.05\times10^{-15}$ W，可以忽略不计。

PEMFC 温度计算模型如图 7 所示。

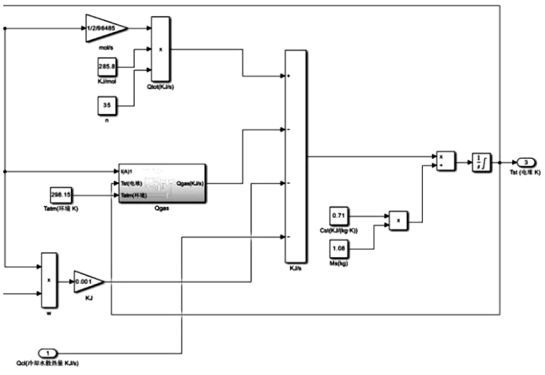


图 7 PEMFC 温度计算模型

Fig. 7 PEMFC temperature calculation model

由模型可知，PEMFC 温度会影响 PEMFC 的电压/功率输出，同时 PEMFC 的电压/功率输出也会影响 PEMFC 的温度，温度模型与电压模型是一个耦合系统，这也进一步印证了 PEMFC 系统是一个多输入多输出、强耦合、非线性的动态系统。

2.2 PEMFC 水冷却系统模型

2.2.1 水泵

在 PEMFC 系统中循环水泵驱动冷却水通过管路进入 PEMFC 内部，带走 PEMFC 工作产生的热量。水泵功能是驱动冷却液循环，保证电池堆产生的热量快速、有效地散发。由工程经验可得，对于同一水泵，其转速与质量流量为一次函数关系[19]。

水泵质量流量(冷却水质量流量)$q_{m,\mathrm{cl}}$为

$$q_{m,\mathrm{cl}}=(n_{\mathrm{c}}/n_0)q_{m,0} \tag{21}$$

式中：$q_{m,0}$为额定质量流量，kg/s；n_{c}为瞬时转速，r/min；n_0为额定转速，r/min。

本实验采用的水泵为 OC-H09D 水冷泵箱一体式水泵，具体参数如表 3 所示。

表 3 水泵参数

Tab. 3 Parameters of water pump

参数	数值	参数	数值
$q_{m,0}/(\mathrm{kg\cdot s^{-1}})$	0.2	$n_0/(\mathrm{r\cdot min^{-1}})$	600
扬程/m	6	工作电压/V	12
额定功率/W	16	工作寿命/h	≥30 000

2.2.2 散热器

在 PEMFC 产生的高温冷却液流入散热器内部后，通过散热器的散热鳍片管壁将热量传递出去[19-20]。风扇将冷空气吹过这些管道，将热量散发到外界，使得冷却液温度下降，之后冷却液再次循环回到 PEMFC，继续吸收并带走多余的热量。

散热器热量为

$$Q_{\mathrm{cl}}=A_{\mathrm{cl}}K(T_{\mathrm{ra}}-T_{\mathrm{atm}}) \tag{22}$$

式中：A_{cl}为散热器主体的散热面积，$\mathrm{m^2}$；K 为散热器传热系数，$\mathrm{W/(m^2\cdot K)}$；T_{ra}为散热器温度，K。

$$T_{\mathrm{ra}}=0.5(T_{\mathrm{out}}+T_{\mathrm{st}}) \tag{23}$$

$$K=-13.68q_{V,\mathrm{air}}^2+70.56q_{V,\mathrm{air}}+5.13 \tag{24}$$

$$q_{V,\mathrm{air}}=(n_{\mathrm{c}}/n_0)q_{V,0} \tag{25}$$

式中：$q_{V,\mathrm{air}}$为风量，$\mathrm{m^3/h}$；$q_{V,0}$为额定风量，$\mathrm{m^3/h}$。

本实验采用的散热器为 OC-240 铜水冷排散热排风扇，具体参数如表 4 所示。

表 4 散热器参数

Tab. 4 Parameters of radiator

参数	数值
尺寸(长宽高)/(mm×mm×mm)	275×121×28
风扇数	2
散热面积/$\mathrm{m^2}$	1.25
$n_0/(\mathrm{r\cdot min^{-1}})$	2 100
$q_{V,0}/(\mathrm{m^3\cdot h^{-1}})$	240

3　控制系统

3.1　控制系统设计

PEMFC 水冷系统如图 8 所示，其中 $q_{m,\mathrm{cl_rad}}$ 为单位换算得到的冷却水质量流量，$T_{\mathrm{st_in}}$ 为散热器出口温度，$q_{V,\mathrm{cl}}$ 为冷却水体积流量。除了散热器与水泵，PEMFC 的水冷系统还包括控制器和风扇，分别用于控制冷却水散热量和稳定 PEMFC 的工作温度。

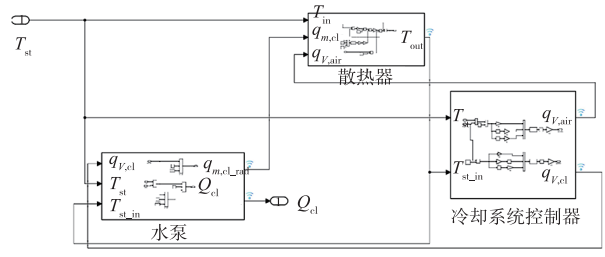


图 8　PEMFC 水冷系统

Fig. 8　PEMFC water cooling system

燃料电池的产热主要通过冷却液进行散发，因此控制器的主要目标是调节循环水泵和散热风扇的转速。通过调整循环水泵的转速，可以改变冷却液的流速，从而影响燃料电池与冷却液之间的换热量。如果保持入口水温不变，出口水温将相应变化；而散热器风扇转速的调整则会改变散热器中耗散的热量，进而影响温降，从而改变入口水温。综合考虑这些因素，在系统设计中主要考虑以下几点：电堆温度的适合工作温度为 45～54 ℃，因此 PEMFC 应快速升到工作温度后进行控温，误差应小于±2 K；冷却水入口温度与冷却水出口温度的温差不应超过 2 K，防止对 PEMFC 造成损伤；在 PEMFC 功率变化时水冷系统应快速响应，以满足 PEMFC 的工作要求。

3.2　控制策略

模糊 PID 的 Simulink 仿真是在传统 PID 的基础上加上模糊控制器，在该系统中模糊 PID 控制其输入与输出关系[20-23]如下：

$$d(t)=K_{\mathrm{p}}(t)E(t)+K_{\mathrm{i}}(t)\int_0^t E(t)\mathrm{d}t+K_{\mathrm{d}}(t)E_{\mathrm{C}}(t) \tag{26}$$

$$\begin{cases}K_{\mathrm{p}}(t)=K_{\mathrm{p}}(0)+K_{\mathrm{p1}}(t-1)\\K_{\mathrm{i}}(t)=K_{\mathrm{i}}(0)+K_{\mathrm{i1}}(t-1)\\K_{\mathrm{d}}(t)=K_{\mathrm{d}}(0)+K_{\mathrm{d1}}(t-1)\\K_{\mathrm{p1}}(t-1)=X_{\mathrm{p}}\Delta K_{\mathrm{p}}\\K_{\mathrm{i1}}(t-1)=X_{\mathrm{i}}\Delta K_{\mathrm{i}}\\K_{\mathrm{d1}}(t-1)=X_{\mathrm{d}}\Delta K_{\mathrm{d}}\end{cases} \tag{27}$$

式中：$d(t)$ 为模糊 PID 控制器的输出；$K_{\mathrm{p}}(t)$、$K_{\mathrm{i}}(t)$、$K_{\mathrm{d}}(t)$ 分别为 t 时刻的比例增益 K_{p}、积分增益 K_{i}、微分增益 K_{d}；$K_{\mathrm{p1}}(t-1)$、$K_{\mathrm{i1}}(t-1)$、$K_{\mathrm{d1}}(t-1)$ 分别为 $t-1$ 时刻模糊控制器的 K_{p}、K_{i}、K_{d}；X_{p}、X_{i}、X_{d} 分别为模糊控制器中 K_{p}、K_{i}、K_{d} 的量化因子；ΔK_{p}、ΔK_{i}、ΔK_{d} 分别为 K_{p}、K_{i}、K_{d} 的变化量；$E(t)$ 为温度设定值与测量值的差值；$E_{\mathrm{C}}(t)$ 为 E 的变化率。

模糊控制器的模糊规则如表 5 所示，本研究采用的模糊语言集如下：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}={NB，NM，NS，Z，PS，PM，PB}。

表 5　模糊控制器的模糊规则

Tab. 5　Fuzzy rule for fuzzy controller

E	E_{C}						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z/NB/NS	Z/NB/NS	Z/NM/NS	Z/Z/NS	PS/NM/NS	PS/NM/PS	PS/Z/PS
NM	Z/NB/NS	Z/NB/NS	Z/NM/NS	Z/NS/NS	PS/NS/NS	PS/Z/PS	PS/Z/PM
NS	PS/NB/NS	PS/NM/NS	PS/Z/NS	PS/Z/Z	PS/Z/Z	PM/PS/PS	PM/Z/PM
Z	PS/NM/NS	PS/NM/NS	PS/NS/NS	PS/Z/Z	PS/PS/Z	PM/PM/PS	PM/PM/PM
PS	PM/Z/NS	PM/NS/NS	PM/Z/Z	PM/PS/Z	PM/PS/Z	PB/PM/PS	PB/PB/PM
PM	PM/Z/NS	PM/Z/NS	PM/PS/Z	PM/PM/PS	PM/PM/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PB
PB	PM/Z/NS	PM/Z/NS	PM/PS/Z	PM/PM/PS	PM/PM/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PM

本文采用 PID 控制策略来控制循环水泵和散热风扇的转速，为提高控制速率与精度，同时应对工况突变的情况，本文使用模糊 PID 控制来优化控制系统。水冷系统的 PID 和模糊 PID 控制策略如图 9 所示。

控制系统主要根据温度采集量（即冷却水入口温度与冷却水出口温度）来控制循环水泵和散热风扇的脉冲宽度调制（PWM）占空比来调节转速，从而调节水泵的流量和散热器的排风量，进而控制冷却水的散热量。传统 PID 只能先求得 E，再根据设定好的 K_{p}、K_{i} 和 K_{d} 来控制风扇和泵的转速，从而控制冷却水的散热量，来控制PEMFC和冷却水的温度

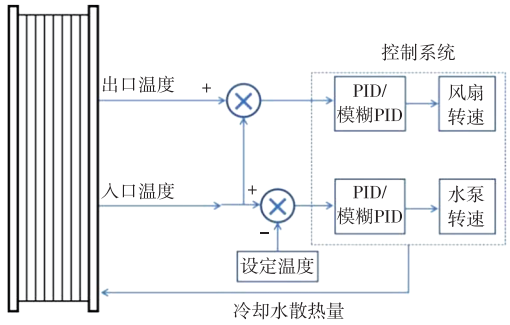


图 9 控制系统控制策略

Fig. 9 Control strategy of control system

达到设定值；而模糊 PID 可以根据 E 和 E_C，通过模糊规则映射得到合理的 K_p、K_i和 K_d在这一时刻的变化量，来得到合理的 K_p、K_i和 K_d，这一过程可以有效提高调节速度和减小调节过程中的超调量和波动。其中，冷却水质量流量由电池与冷却水入口温差来控制，而风扇的转速由 T_{out}来控制。其中散热器控制中的 $K_p=0.5$，$K_i=0.005$，$K_d=0.001$；水泵控制中的 $K_p=0.05$，$K_i=0.01$，$K_d=0.001$，上述参数均是根据系统和经验进行调参得到的。模糊 PID 中散热器的参数需要进行量化处理，其中 E 和 E_C的量化因子分别为 0.2、0.01，而 K_p、K_i和 K_d的量化因子分别为 1、0.025 和 0.005。同理，水泵中 E 和 E_C的量化因子分别为 0.6、0.3，而 K_p、K_i 和 K_d 的量化因子分别为 0.1、0.05 和 0.005。

4 PEMFC 热量模型结果分析

仿真中输入的电流为测试时实际电流。图 10 为不同控制下 PEMFC 电堆和冷却水的温度变化曲线，可以看出电堆和冷却水开始运行时温度从室温开始逐渐上升，同时在控制器的调节下温升速度越来越慢，电堆与冷却水的温差也逐渐变大，此时 2 种控制器的控制效果相差不大，但随着冷却水温度逐渐逼近设定温度 323.15 K，以及电池与冷却水的温差稳定在设定值 2 K 时，2 种控制器的差距明显。在模糊控制下，第 206.1 s 温度上升至 325.2 K 时开始大幅控制温度，经过 7.7 s(即第 213.8 s)使温度控制在 325.15 K，达到与目标值 0 K 的误差；而传统 PID 控制下第 263.2 s 电堆温度升至 326.68 K 时才开始控制温度，且需要经过 273.7 s 系统才稳定在 325.2 K。传统 PID 控制在控制精度不如模糊控制的同时，其控制速度(从开始控制到系统稳定)比模糊控制慢 266 s，稳定时间(从运行开始到系统稳定)比模糊控制慢 323.1 s，冷却水温度变化与电堆类似，在 200 s 左右一直保持 2 K 的温差。

图 11 为不同控制下 PEMFC 电堆输出电压的变化曲线。这再次印证 PEMFC 电压与电堆电流和电堆温度密切相关。同时可以发现，初始输出电压可达 39 V，在电流不变时温度上升，电压会变小，在电流发生突变时电压也会发生突变。与温度变化类似，使用模糊控制器时从 206.1 s 开始大幅控制电压，比传统 PID 控制快 54.2 s，同时波动更小，速度更快，使 PEMFC 更快达到稳定状态。

通过对比可以发现，模糊 PID 控制比传统 PID 控制的精度更高，速度更快，同时使用模糊控制的系统稳定性也更高。

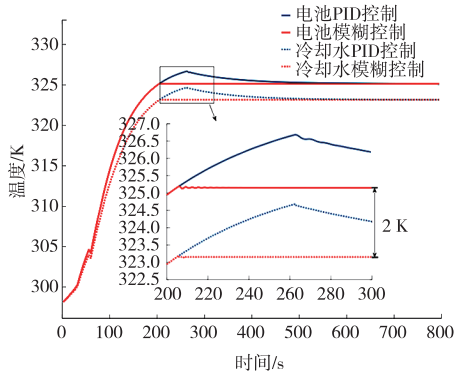


图 10 不同控制器下电堆和冷却水的温度变化

Fig. 10 Temperature variations of fuel cell stack and cooling water under different controllers

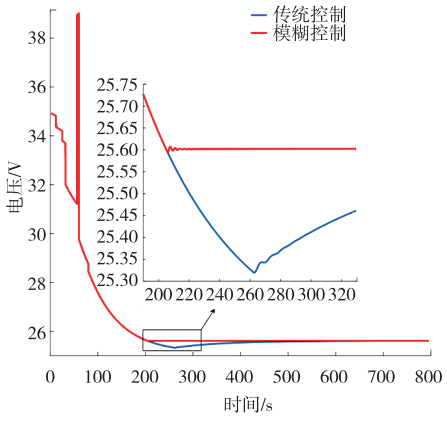


图 11 不同控制器下电堆电压变化曲线

Fig. 11 Voltage variations of fuel cell stack under different controllers

在冷却系统中，控制器通过控制水泵的冷却水质量流量和散热器的风量来控制冷却水的散热量，图 12 为风扇的风量变化曲线，图 13 为水泵的冷却水质量流量和散热量的变化曲线。为了实验方便，电磁阀的开度设定为全开，冷却水质量流量和散热器的风量从一开始设定为最小值 0.044 kg/s 和 35 m^3/h，在第 206.1 s 模糊控制器大幅控制水泵流量

和风扇转速来控制散热器和冷却水的散热量，来确保 PEMFC 的电堆温度尽快在设定温度范围内稳定，在第 213.8 s 冷却水质量流量稳定在 0.066 8 kg/s，而散热器的风量也稳定在 55 m^3/h，使得冷却水的散热量也稳定在 0.419 kJ/s，使电堆达到产热散热平衡温度并最终稳定；而传统 PID 则是在 263.2 s 才开始控制，且控制力度与控制速度均不如模糊控制器。

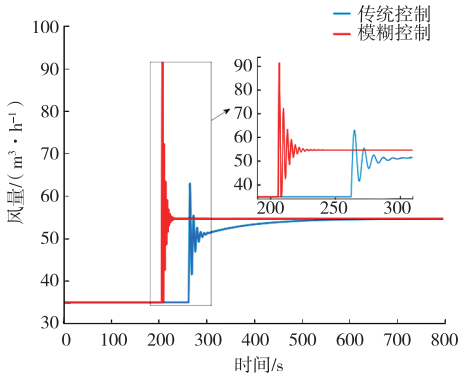
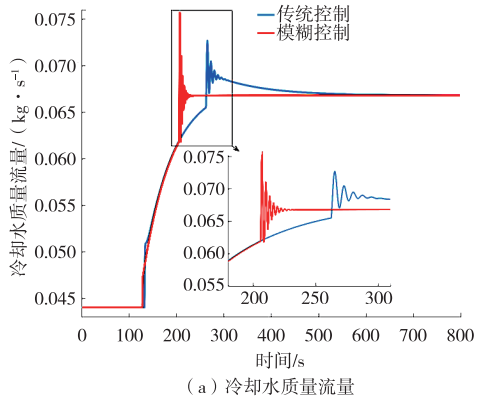
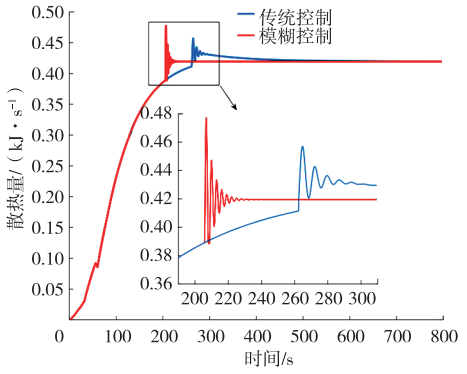


图 12　风扇风量的变化曲线

Fig. 12　Curve of fan air flow rate



（a）冷却水质量流量



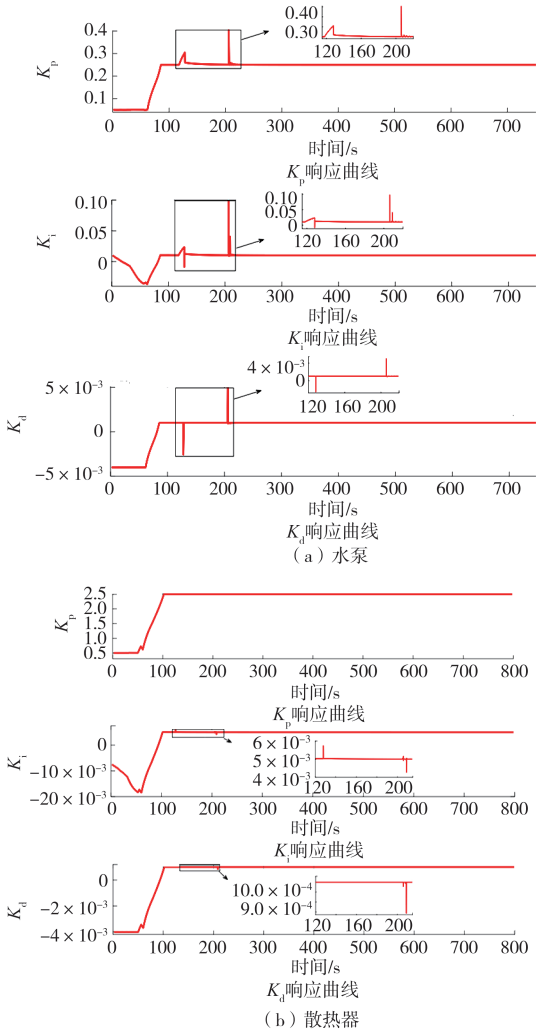
（b）冷却水散热量

图 13　不同控制器下冷却水质量流量和散热量的变化曲线

Fig. 13　Variation curves of cooling water mass flow rate and heat dissipation under different controllers

在冷却水系统的控制器中模糊 PID 根据误差值 E 与误差的变化率 E_C 对 PID 的参数进行实时调参优化，以此来达到更精确与更快的控制效果。图 14 为模糊控制器水泵、散热器的 K_p、K_i 和 K_d 的变化曲线和不同控制器下水泵与散热器控制误差 E 的变化曲线。自动调参后水泵控制器的 K_p、K_i 和 K_d 最终参数为 0.250、0.010 和 0.001；散热器控制器的 K_p、K_i 和 K_d 最终参数为 2.5、0.005、0.001。

从图 10～图 13 的关联分析中可以得出，冷却水温度与温差变化与其控制的风量和冷却水质量流量高度相关，这也直观表达了控制器的控制原理。



（a）水泵

（b）散热器

图 14　水泵和散热器的 K_p、K_i、K_d 的变化曲线

Fig. 14　Variation curves of K_p, K_i, and K_d of water pump and radiator

图 15 为测得的 PEMFC 实际运行温度曲线。从图 10 和图 15 的对比中可以看出，传统 PID 和模糊 PID 在实际运行中对 PEMFC 的影响基本与仿真时一致，但在实验时 PEMFC 的温升更快，这可能是由于实验开始没有打开散热系统，直到接近设定温度才打开。但这仍然验证了模糊 PID 控制在 PEMFC 运行过程中优异的控制性能和鲁棒性。

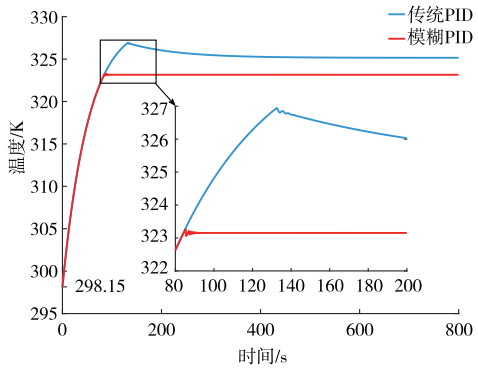


图 15 PEMFC 实际运行温度曲线

Fig. 15 Actual operating temperature curve of PEMFC

5 结论

(1) 建立的 PEMFC 电-热耦合模型可精准复现电堆电压、温度动态耦合特性。本文整合能斯特电动势、三类电压损失方程与系统热平衡方程,量化温度对输出电压的非线性影响;基于实测阶跃动态电流工况完成仿真校验,仿真输出电压与台架实验值整体吻合,仅存在±0.1 V 以内的小幅随机波动,模型具备可靠的动态仿真精度,可用于水下无人潜航器机动变载工况下的系统性能预测。

(2) 相较于传统固定参数 PID 控制,双执行器协同模糊 PID 控制可大幅提升动态工况下温控性能。在模拟潜航器突加、突卸电流的 800 s 阶跃负载工况时,温控响应速度显著提升,模糊 PID 电堆温度稳定耗时较传统 PID 缩短 323.1 s,系统提前至 213.8 s 完成温度收敛;控温精度与平稳性优化明显,电堆温度稳态误差控制在±0.05 K,温度超调量大幅降低,电堆进出口冷却水温差稳定维持在 2 K 以内,避免膜电极干湿失衡;动态工况输出稳定性更强,负载突变时电堆电压波动幅度显著减小,产热-散热可快速达到动态平衡,系统应对复杂变载工况的鲁棒性显著提升。

(3) 模糊 PID 依靠误差 E 与误差变化率 E_c 实时在线修正 K_p、K_i 和 K_d,适配系统非线性动态特性。仿真结果表明,温度偏离设定值阶段控制器可自主增大比例、微分参数,加快调节速度;临近稳态时自动弱化控制增益抑制超调,解决了传统 PID 固定参数无法兼顾动态响应与稳态精度的固有缺陷。

本研究为水下动力平台大功率 PEMFC 液冷热管理系统提供了完整的建模方法与自适应温控方案。后续将基于实测工况数据集优化模糊控制规则库,进一步开展多目标优化研究,在保证温控精度的前提下降低水泵、散热器风机综合能耗,实现热管理系统能效与控温性能协同最优。

参考文献:

[1] BENCHENINA Y, ZEMMIT A, BOUZAKI M M. Enhancing fuel cell efficiency through advanced digital twin modeling[J]. Studies in Engineering and Exact Sciences, 2024, 5(1): 2102-2114.

[2] ZHU D, AIT-AMIRAT Y, N'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, 2019, 202: 112187.

[3] 郭硕. 质子交换膜燃料电池热管理系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
GUO Shuo. Study on proton exchange membranefuel cell thermal management system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.

[4] CHEN Xi, FENG Wentao, YOU Shuhuai, et al. Dual temperature parameter control of PEMFC stack based on improved differential evolution algorithm [J]. Renewable Energy, 2025, 241: 122319.

[5] JIA Jidong, LI Qianmu, WANG Y, et al. Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 283-291.

[6] 韩爱国, 宋福豪, 田韶鹏, 等. 燃料电池系统建模与供气系统控制方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 147-153.
HAN Aiguo, SONG Fuhao, TIAN Shaopeng, et al. Modeling of fuel cell system and control method of air supply system [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 147-153.

[7] 兰洪星. 氢燃料电池系统建模与控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LAN Hongxing. Research on modeling and control strategy of hydrogen fuel cell system[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[8] BAROUD Z, BENMILOUD M, BENALIA A. Fuzzy self-tuning PID controller for air supply on a PEM fuel cell system[C]//2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). Boumerdes: IEEE, 2015: 1-4.

[9] HUANG Yicheng, XIAO Xuelian, KANG Huifang, et al. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a critical review of heat transfer mechanisms, cooling approaches, and advanced cooling techniques analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115221.

[10] CHEN Junhong, HE Pu, CAI Saijie, et al. Modeling

and temperature control of a water-cooled PEMFC system using intelligent algorithms[J]. Applied Energy, 2024, 372: 123790.

[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.
ZHAO Hongbo, LIU Jie, MA Biao, et al. Control strategy and simulation research of water-cooled PEMFC thermal management system [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2139-2150.

[12] 刘波，赵锋，李骁. 质子交换膜燃料电池热管理技术的进展[J]. 电池，2018，48(3)：202-205.
LIU Bo, ZHAO Feng, LI Xiao. Review on thermal management technology of PEMFC[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(3): 202-205.

[13] 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.
HOU Jian, YANG Zheng, HE Ting, et al. Research progress on thermal management of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(1): 19-30.

[14] 彭书浩. 质子交换膜燃料电池热管理系统控制策略研究[D]. 杭州：浙江大学，2022.
PENG Shuhao. Research of control strategy on thermal management system of proton exchange membrane fuel cell[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[15] 周彩婷，赵晶，马永康，等. 质子交换膜燃料电池热管理技术的研究进展与展望[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版)，2025，22(6)：101-109.
ZHOU Caiting, ZHAO Jing, MA Yongkang, et al. Research progress and prospects of thermal management technology for proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2025, 22(6): 101-109.

[16] YANG Mingguang, QUAN Zhenhua, ZHAO Yaohua, et al. Experimental and numerical study on thermal management of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stack with micro heat pipe arrays [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 275: 116478.

[17] SHEN Jun, DU Changqing, YAN Fuwu, et al. Experimental study on the dynamic performance of a power system with dual air-cooled PEMFC stacks [J]. Applied Energy, 2022, 326: 120025.

[18] 林泽兆. 质子交换膜燃料电池热管理系统研究[D]. 北京：北京交通大学，2021.
LIN Zezhao. Research on thermal management system of proton exchange membrane fuel cell[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[19] ZHOU Yu, MENG Kai, LIU Wei, et al. Multi-objective optimization of comprehensive performance enhancement for proton exchange membrane fuel cell based on machine learning[J]. Renewable Energy, 2024, 232: 121126.

[20] 赵振瑞，欧阳惠颖，田国富，等. 基于模糊逻辑与遗传算法的燃料电池热管理方法研究[J]. 集成技术，2021，10(3)：35-46.
ZHAO Zhenrui, OUYANG Huiying, TIAN Guofu, et al. Research on thermal management method of fuel cell based on fuzzy logic and genetic algorithm [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(3): 35-46.

[21] 李忠信，王大龙，庄佳才，等. 基于遗传模糊控制的风电机组偏航系统疲劳载荷研究[J]. 动力工程学报，2022，42(8)：745-752，768.
LI Zhongxin, WANG Dalong, ZHONG Jiacai, et al. Research on fatigue suppression of wind turbine yaw system based on genetic fuzzy control[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(8): 745-752, 768.

[22] 李丰泽，马素霞. 基于动态论域的循环流化床锅炉燃烧系统的模糊自适应 PID 控制[J]. 动力工程学报，2021，41(3)：195-200.
LI Fengze, MA Suxia. Fuzzy adaptive PID control of circulating fluidized bed boiler combustion system based on dynamic universe[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(3): 195-200.

[23] 王天堃. 火电厂主蒸汽温度 UMDA 整定模糊 PID 控制算法[J]. 动力工程学报，2017，37(7)：546-551，557.
WANG Tiankun. Fuzzy self-tuning PID control of main steam temperature in thermal power boilers based on UMDA[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(7): 546-551, 557.

[24] 章哲玮，蔺琪蒙，熊鑫，等. 考虑多能特性差异的综合能源系统异步优化预测控制[J]. 动力工程学报，2025，45(2)：307-314，324.
ZHANG Zhewei, LIN Qimeng, XIONG Xin, et al. Predictive control with asynchronous optimization for integrated energy systems considering difference in multi-energy dynamic characteristics[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(2): 307-314, 324.

[25] 张钟，安吉振，潘佩媛，等. 基于甲醇重整的燃料电池与有机朗肯循环耦合热电联产系统性能分析[J]. 动力工程学报，2023，43(8)：1068-1076.

(下转第 83 页)

报，2024，44(10)：1611-1619.
ZHOU Jianguo，WU Zhaobo. A two-level optimization scheduling of a virtual power plant based on stackelberg and cooperative game theory under the dual carbon goals[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(10)：1611-1619.

[8] LIU Lintong，ZHAI Rongrong，HU Yangdi. Multi-objective optimization with advanced exergy analysis of a wind-solar-hydrogen multi-energy supply system [J]. Applied Energy，2023，348：121512.

[9] BADE S O，TOMOMEWO O S. Optimizing a hybrid wind-solar-biomass system with battery and hydrogen storage using generic algorithm-particle swarm optimization for performance assessment[J]. Cleaner Energy Systems，2024，9：100157.

[10] GHANBARI K，MALEKI A，REZAEI OCHBELAGH D. Investigating the effect of various types of components in optimal designing of a solar/wind/storage hybrid system[J]. Journal of Energy Storage，2025，110：115273.

[11] SU Wei，LI Qi，ZHENG Wenjin，et al. Enhancing wind-solar hybrid hydrogen production through multi-state electrolyzer management and complementary energy optimization[J]. Energy Reports，2024，11：1774-1786.

[12] 王晋君，苟凯杰，陈衡，等. 平抑风电波动的飞轮-电化学混合储能容量优化配置研究[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：439-446.
WANG Jinjun，GOU Kaijie，CHEN Heng，et al. Allocation optimization of flywheel-electrochemical hybrid energy storage capacity to stabilize wind power fluctuations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(3)：439-446.

[13] MENG Gaojun，DING Yanwen，PAU Giovanni，et al. Multi-objective capacity optimization configuration of independent wind-photovoltaic-hydrogen-battery system based on improved MOSSA algorithm [J]. Frontiers in Energy Research，2023，10：1077462.

[14] BAO Xinyuan，CHEN Liping，LOPES A M，et al. Joint estimation of state-of-charge and state-of-energy of lithium-ion batteries at different ambient temperatures based on domain adaptation and unscented Kalman filter[J]. Electric Power Systems Research，2024，231：110284.

[15] SCHNUELLE C，WASSERMANN T，FUHRLAENDER D，et al. Dynamic hydrogen production from PV & wind direct electricity supply-Modeling and techno-economic assessment[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2020，45(55)：29938-29952.

[16] WU Yan，AZIZ S M，HAQUE M H. Vehicle-to-home operation and multi-location charging of electric vehicles for energy cost optimisation of households with photovoltaic system and battery energy storage [J]. Renewable Energy，2024，221：119729.

[17] ZHANG Jie，XIAO Fei，MA Fan，et al. Capacity optimization allocation method for off-grid RES-h2 microgrid system considering the load-follow-source mechanism[J]. Electric Power Systems Research，2024，231：110378.

[18] LI Junhui，ZHANG Zheshen，SHEN Baoxing，et al. The capacity allocation method of photovoltaic and energy storage hybrid system considering the whole life cycle[J]. Journal of Cleaner Production，2020，275：122902.

[19] REN Yan，JIN Kunyong，GONG Chuanli，et al. Modelling and capacity allocation optimization of a combined pumped storage/wind/photovoltaic/hydrogen production system based on the consumption of surplus wind and photovoltaics and reduction of hydrogen production cost[J]. Energy Conversion and Management，2023，296：117662.

（上接第 61 页）

ZHANG Zhong，AN Jizhen，PAN Peiyuan，et al. Performance analysis of combined heat and power system coupling fuel cell and organic rankine cycle based on methanol reforming[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2023，43(8)：1068-1076.