·燃料电池关键材料与系统性能优化技术专题·

燃料电池智能热管理系统设计与性能优化研究

焦红星　单超　李小静　扈伟

（郑州职业技术学院，郑州 450000）

【欢迎引用】焦红星，单超，李小静，等．燃料电池智能热管理系统设计与性能优化研究[J]．汽车文摘，2026(6)：35-39.

【Cite this paper】JIAO H X, SHAN C, LI X J, et al. Research on Design and Performance Optimization of Intelligent Thermal Management System for Fuel Cells[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 35-39.

【摘要】为提高燃料电池安全性，基于某燃料电池智能热管理系统，深入分析了执行型与自适应型2类热管理系统的架构设计、控制策略及性能表现，并详细说明了核心控制器的技术参数与验证结果。基于分层管理与模块化设计的自适应型智能热管理系统，采用PID闭环控制算法实现了±1 ℃的高精度温度控制，有效提升了燃料电池系统的稳定性与经济性。

关键词：质子交换膜燃料电池；热管理系统；智能控制；温度稳定性；冷却控制单元

中图分类号：TM911.4　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250179

Research on Design and Performance Optimization of Intelligent Thermal Management System for Fuel Cells

Jiao Hongxing, Shan Chao, Li Xiaojing, Huwei

（Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450000）

【Abstract】In order to improve full cells, safety, based on an intelligent thermal management system for fuel cells, the paper conducts an in-depth analysis of the architectural design, control strategies, and performance of 2 types of thermal management systems (executive-type and adaptive-type), and elaborates on the technical parameters and verification results of the core controller. Based on hierarchical management and modular design, the adaptive intelligent thermal management system adopts a PID closed-loop control algorithm to achieve high-precision temperature control of ±1 ℃, effectively enhancing the stability and economy of the fuel cell system.

Key words: Proton exchange membrane fuel cells, Thermal management system, Intelligent control, Temperature stability, Cooling Control Unit (CCU)

0　引言

在全球能源转型与“双碳”目标的推动下，氢能作为一种清洁、高效的二次能源，其应用规模越来越大。质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC）作为一种新能源技术，具有能量密度高、环保、噪声小的优点，是目前最有前景的发电装置之一[1]。然而，PEMFC的性能与工作温度密切相关，其最佳工作区间通常为70~80 ℃[2-3]，过高的温度会加速燃料电池组件老化并可能引发安全事故，而过低的温度则会增加燃料电池极化。尤其在0 ℃以下，燃料电池内的水结冰会导致多孔介质堵塞[4]，影响燃料电池的启动和运行效率。因此，开发高效、精准的热管理系统是PEMFC产业化应用的关键技术。

传统燃料电池热管理系统多采用分散式控制架构，由燃料电池控制单元（Fuel Cell Control Unit，FCU）直接驱动散热部件，存在功能冗余、响应滞后、适应性差等问题。随着燃料电池系统功率等级提升与应用场景多元化，市场对热管理系统的智能化、模块化需求日益迫切。风氢扬氢能科技有限公司提出的分层管理与子系统模块化理念，将热管理功能从

FCU中剥离，通过专用冷却控制单元（Cooling Control Unit，CCU）实现集中驱动与智能调控。本文基于该技术路线，系统研究燃料电池智能热管理系统的设计原理、控制策略与性能验证，为相关技术研发与工程应用提供参考。

1 温度对燃料电池性能的影响机制

车用PEMFC的工作温度是决定其电化学性能的核心参数。试验数据表明，当温度低于最佳区间（70~80 ℃）时，质子交换膜的水合程度不足，导致质子电导率下降，内阻损耗增大；同时，反应生成的水难以蒸发，易引发阴极“水淹”现象，阻碍气体扩散。当温度高于80 ℃时，膜材料可能因脱水而老化[5]，且电化学反应的熵变增大，导致开路电压降低。如图1所示，在电流密度变化范围内，70~80 ℃区间的电池电压显著高于65 ℃或85 ℃，验证了最佳温度区间的合理性。

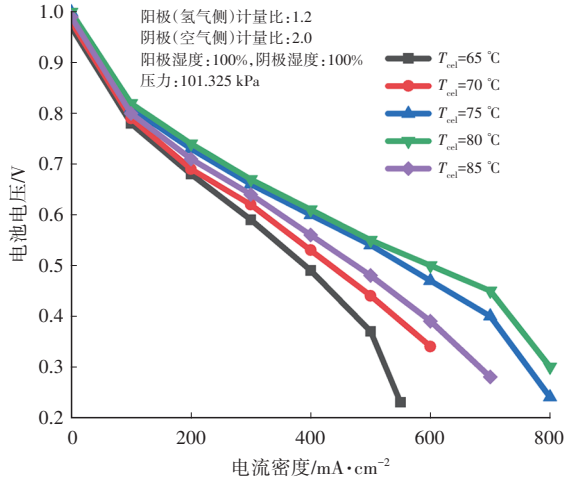


图1 不同工作温度下燃料电池极化曲线

PEMFC的热量来源主要有电化学反应热、欧姆极化热和活化极化热[6]。电化学反应热源于氢氧反应生成水的过程，根据热力学第二定律，可逆电化学反应中存在一定的能量损失，该部分能量以热量的形式释放。电化学反应过程中存在不可避免的能量损耗，如阴极与阳极的激活过电位等不可逆过程会导致大量废热产生。欧姆极化热则由电池内部各组件的电阻在电流通过时产生。活化极化热则是发生在催化剂表面的电化学反应活化能垒导致的能量损失[7]。相关研究表明，燃料电池系统的能量流中，仅约2%的废热通过尾气带走，98%需依赖冷却液散热[7]，这与内燃机存在显著差异，如图2、图3所示。同时，PEMFC的散热温差仅为内燃机的三分之二，却需带走1.5~2倍的热量，这对热管理系统的散热效率提出了更高要求。

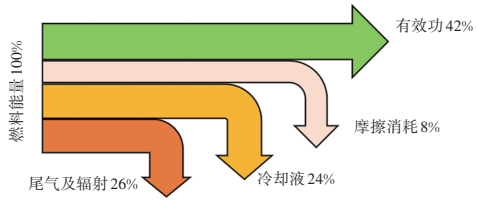


图2 内燃机能量流

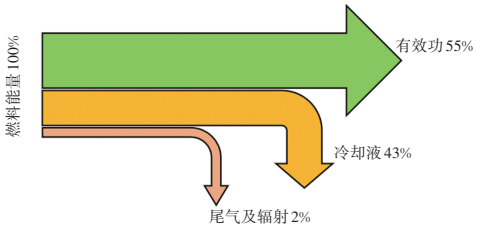


图3 燃料电池能量流

2 热管理系统的核心控制指标

为保障燃料电池安全高效运行，热管理系统需满足3项核心指标：（1）温度范围控制，即通过节温器、正温度系数加热器（Positive Temperature Coefficient，PTC）、风扇等部件将电堆温度稳定在70~80 ℃；（2）温差控制，电堆进出口冷却液温差需≤10 ℃，避免局部过热[8]，这主要通过水泵流量调节实现；（3）安全监控，包括最高温度限制（通常≤90 ℃）、系统压力控制等，需通过温度、压力传感器实时监测。

传统内燃机热管理系统的控制逻辑难以直接适配PEMFC需求。一方面，PEMFC的废热密度更高，且无排气歧管等天然散热通道，需专用高效散热模块；另一方面，其工况响应速度更快，要求热管理系统具备更高的动态调节能力。这些差异使得燃料电池热管理必须采用针对性的设计理念与控制策略。

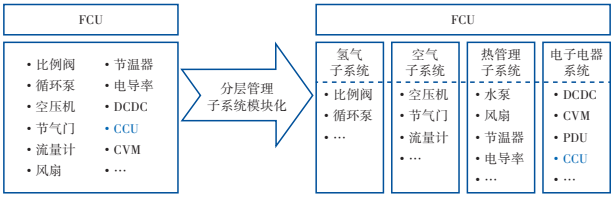
3 燃料电池热管理系统架构的发展趋势

3.1 “分层管理+子系统模块化”架构

燃料电池系统是涉及气、液、电多物理场耦合的复杂系统，FCU需实时采集温度、压力、电压等参数，控制空压机、氢阀、水泵等部件。随着系统功能扩展，FCU面临资源紧张、兼容性差等问题。因此，“分层管理+子系统模块化”的架构成为行业发展趋势，如图4所示。以FCU为顶层决策中心，将系统整体划分为氢、空、水、电、热子系统，各子系统通过专用控制器独立运行，接受FCU的指令并反馈状态。

热管理子系统实现模块化设计，可实现部件标准化、驱动集中化与监控智能化。模块化设计体现在

2个方面：(1)物理集成方面，将散热器、风扇、膨胀水箱及其液位监控、电导率监控功能整合为统一模块，减少管路连接与空间占用；(2)驱动集成方面，CCU燃料电池版控制器，集中实现冷却风扇驱动、液位检测、电导率监测等功能。通过将散热器、风扇、膨胀水箱及传感器集成为独立模块，由专用CCU控制，可显著减轻FCU负担，提升系统可靠性与扩展性，为热管理系统的智能化升级奠定了基础。

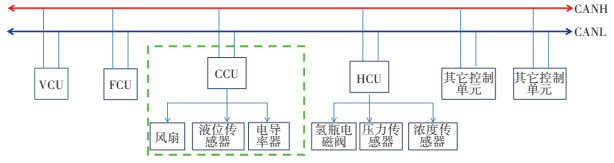


注：电堆电压监测模块(Cell Voltage Monitor，CVM)，电源分配单元(Power Distribution Unit，PDU)

图4 “分层管理+子系统模块化”架构

3.2 执行型热管理系统的设计与实现

将散热器、风扇、膨胀水箱及其液位监控、电导率监控视为整体进行定义及设计，是模块化设计常用方案。基于风氢扬GP-CCU燃料电池版热管理系统控制器，满足冷却风扇驱动、膨胀水箱液位监控、冷却液电导率监控等需求，实现热管理子系统驱动功能下移，提高系统架构稳健性并减轻FCU负担，如图5所示。



注：整车控制单元(Vehicle Control Unit，VCU)，氢系统控制单元(Hydrogen Control Unit，HCU)

图5 执行型热管理系统分层管理网络架构

3.3 执行型热管理系统工作原理与通信机制

执行型系统的工作流程遵循“指令-执行-反馈”闭环，FCU根据电堆实时温度计算风扇转速需求，通过CAN总线发送控制报文；GP-CCU接收报文后，通过脉冲宽度调制信号(Pulse Width Modulation，PWM)驱动对应风扇运转；同时，CCU实时采集风扇故障信号、膨胀水箱液位、冷却液电导率，并将数据打包为CAN报文反馈至FCU，如图6所示。

FCU发出风扇转速要求的CAN报文，CCU根据报文指令驱动风扇转动(最多驱动5组风扇)；CCU检测风扇故障、液位信号、电导率数值并通过CAN上报FCU。CCU在架构上减轻FCU负担，实现热管理子系驱动功能下移；在结构上，实现散热模块部件就近管理，简化系统设计。

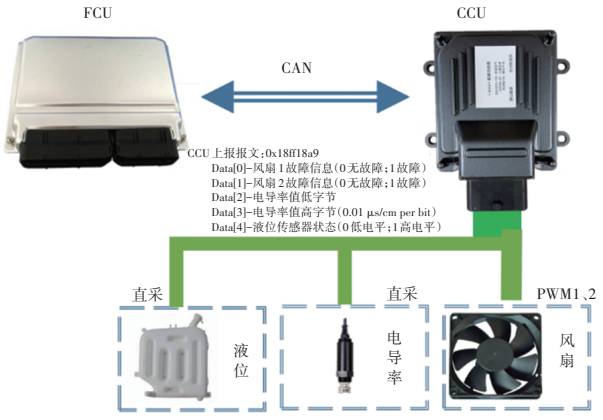


图6 执行型热管理系统工作原理

4 自适应型智能热管理系统的控制策略与性能优化

4.1 智能控制架构与决策逻辑

自适应型智能热管理系统是在执行型基础上的升级方案，其核心是引入环境感知与智能算法，实现温度的主动调控。系统架构在保留传统执行型热管理系统层级的基础上，新增环境温度传感器、电堆进出水温度传感器等感知节点，使CCU具备自主决策能力，如图7所示。

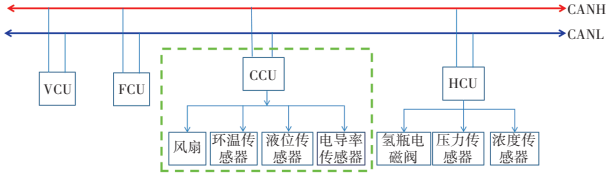


图7 智能型热管理系统网络架构

4.2 智能型热管理系统工作原理与通信机制

风氢扬氢能科技有限公司智能热管理系统控制器(GP-CCU)采集环境温度、电堆进出水温度、电流、功率等信息，并根据电堆进口(出口)的目标温度请求，智能控制风扇工作。控制逻辑采用“目标-感知-调节”的闭环策略，FCU仅下达电堆进口(或出口)目标温度，不再直接指定风扇转速；GP-CCU采集环境温度、电堆功率、进出水温度等参数，通过内置算法计算散热需求，自主实现风扇分组控制，如图8所示。分组控制策略将多组风扇划分为不同逻辑单元，根据热负荷动态激活，低负荷时仅启动1-2组风扇，高负荷时全组运行，既保证散热效率又降低能耗。

4.3 PID控制算法与参数优化

为实现高精度温度控制，系统采用增量式比例-积分-微分(Proportion Integral Differential，PID)控制算法[9-10]，算法核心公式为：

$$\Delta u(k)=K_p[e(k)-e(k-1)]+K_i e(k)+K_d[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)] \quad (1)$$

式中：$\Delta u(k)$为控制器输出，$e(k)$为当前温度偏差，K_p、K_i、K_d分别为比例、积分、微分系数。

通过参数整定，系统可快速响应温度波动，比例环节减小瞬时偏差，积分环节消除稳态误差，微分环节抑制超调。试验表明，在70~80 ℃目标区间内，PID算法可将温度控制精度稳定在±1 ℃，远高于传统开关控制（±5 ℃）。算法优化聚焦于动态工况适应性：针对车辆加减速导致的功率突变，采用变参数PID策略，高负荷时增大K_p以加快响应，低负荷时减小K_d以避免震荡；引入温度前馈补偿，根据电堆功率变化预判热负荷，提前调整风扇转速，缩短动态响应时间。

4.4 多工况性能验证

为验证智能热管理系统性能，在实验室环境下模拟了3种典型工况，所用PEMFC电堆核心参数如表1所示。验证结果如下：（1）环境舱条件：环境温度设定在25±2 ℃，相对湿度控制在50%±10%，进水温度控制在75 ℃。（2）恒定功率工况：当电堆功率稳定在77 kW时，进水温度T_{in}在目标值70 ℃附近波动，最大偏差≤0.1 ℃，如图9所示。系统通过微调风扇转速（±5%）抵消环境温度微小变化，保持了温度稳定性。（3）升载工况（25~50 kW）：功率从25 kW阶跃至50 kW时，电堆产热快速增加，T_{in}初始下降0.3 ℃后逐步回升，90 s后稳定在目标值，波动范围±0.1 ℃，如图10所示。这表明系统能快速响应热负荷增加，避免温度过度偏离。

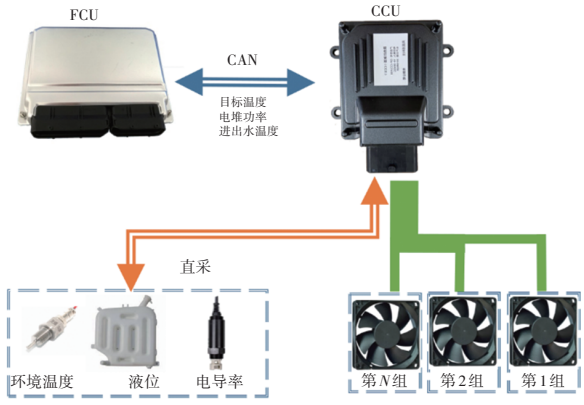


图8 智能型热管理系统工作原理

表1 PEMFC参数

额定功率/kW	额定电压/V	质量功率密度/(W·kg^{-1})	冷启动温度/℃
65	200	500	−30

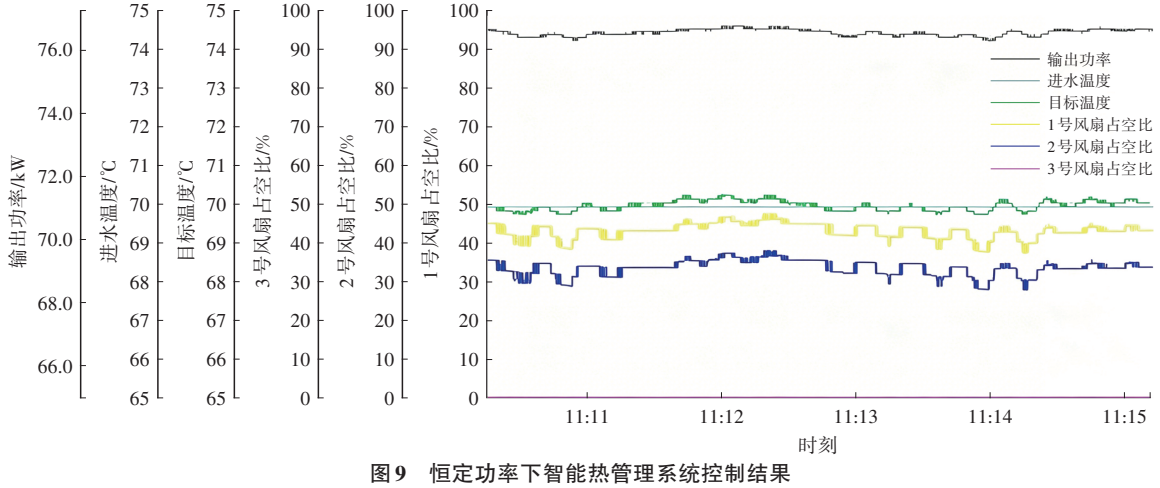


图9 恒定功率下智能热管理系统控制结果

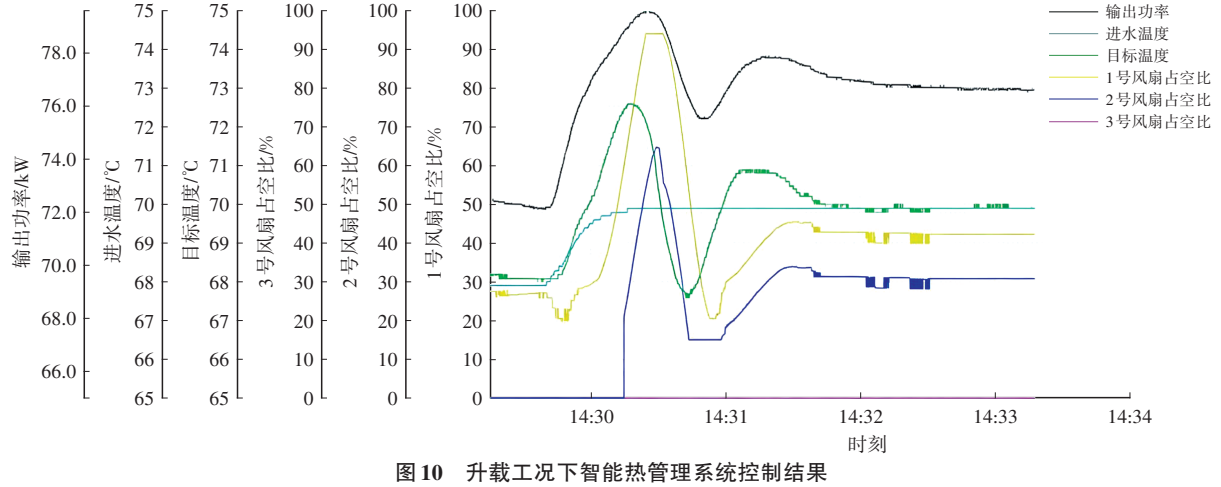


图10 升载工况下智能热管理系统控制结果

减载工况功率从77 kW降至70 kW时，系统产热减少，导致进水温度T_{in}短暂上升0.2 ℃，并在85 s后恢复稳定，偏差控制在±0.1 ℃范围内。风扇转速随热负荷降低同步下调（从80%降至40%），实现了节能运行，控制结果如图11所示。试验数据证明，该自适应型系统在稳态与动态工况下均可以满足高精度温度控制要求，显著优于执行型系统的响应速度与稳定性。

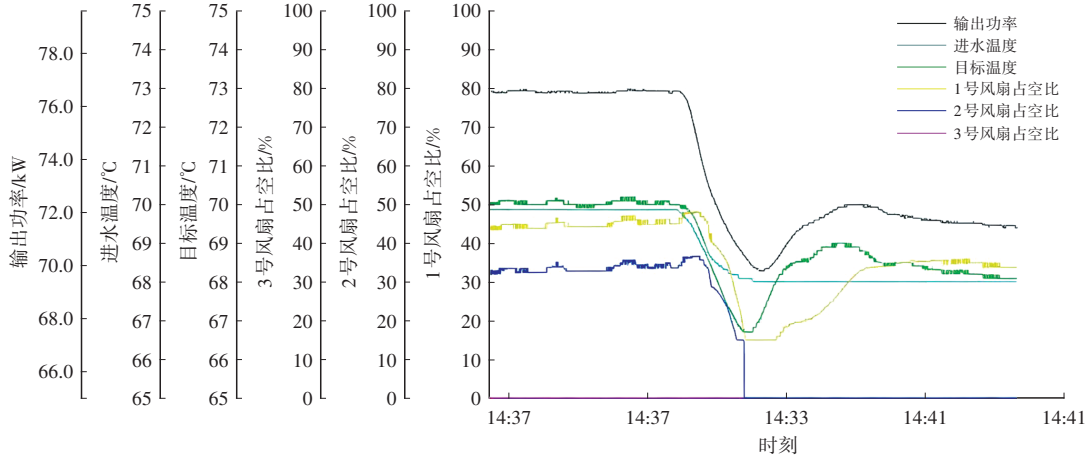


图11　减载工况下智能热管理系统控制结果

5　结束语

本文系统研究了风氢扬燃料电池智能热管理系统控制器的设计逻辑与工作原理。研究表明：分层管理与模块化设计可有效解决传统系统功能冗余问题，提升架构稳健性；自适应型智能控制策略通过PID算法与分组驱动，实现了±1 ℃的高精度温度控制，显著改善了燃料电池在稳态与动态工况下的性能。CCU控制器的高可靠性与丰富功能，为系统产业化应用提供了技术支撑。

未来，传统PDU有望升级为数字配电单元，深度融合CAN总线、半导体及集成电路技术，实现对继电器与保险丝方案的数字化重构，完成配电系统的全面智能化升级。

参　考　文　献

[1] 章雷其, 林沁, 刘敏, 等. 质子交换膜燃料电池退化机制及寿命预测方法综述[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(1): 265-276.

[2] 徐寅嵩, 李文浩, 杜常清, 等. 考虑运行参数可寻优范围的PEMFC系统净功率优化[J]. 汽车工程, 2024, 46(7): 1137-1146+1176.

[3] 韩启沃, 刘永峰, 裴普成, 等. 工作温度对PEMFC水分布、质子传输及性能影响分析[J]. 化工学报, 2025, 76(1): 374-384.

[4] ZHANG Z Y, MAO J, LIU Z X. Advancements and Insights in Thermal and Water Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Challenges and Prospects[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 153: 107376.

[5] 马菁, 马强, 王俊杰, 等. 温度和阴极湿度对质子交换膜燃料电池的影响[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1162-1169.

[6] 武小花, 杨钢, 周鸿旭, 等. 质子交换膜燃料电池水热管理技术现状与展望[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(17): 7031-7039.

[7] 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.

[8] 商蕾, 杨萍, 杨祥国, 等. 基于APSO-BP-PID控制的质子交换膜燃料电池热管理系统温度控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(9): 2401-2413.

[9] 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.

[10] 闵杰, 张学斌, 张忆, 等. 基于改进线性递减权重粒子群算法整定PID参数的研究[J/OL]. 机械工程师, (2025-09-19) [2026-04-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=8kKd7LBMH3w17pJbzCJF5Qyqx848UJ337qz8Mm2lpHiLG40uYre_osHrMJ_mFp11Zz36dIQr32W6Vle8fl4LHSqpdgJGE2bngKdDzzuosGTl2IbGVf29OfEQgR2vexRb084mLqN5CW0eUNFdwzrPv3Eqp5nGGfKo8w-VoDwM4RH0XrXRhSxZjA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

（责任编辑　**梵玲**）