

---

# 阴极催化加热耦合机器学习——质子交换膜燃料电池冷启动优化新研究

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41669.html>

**本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！**

阴极催化加热耦合机器学习——质子交换膜燃料电池冷启动优化新研究。质子交换膜燃料电池（PEMFCs）凭借高能量密度及零排放特性，成为氢能交通领域的核心动力，但其低温冷启动性能直接制约寒区商业化应用。传统自启动策略依赖电化学反应产热，但低温下反应动力学迟缓，且产热与产水过程强耦合，极易在催化层内形成冰堵，导致启动失败或性能衰减。近日，中南大学杨声教授团队与上海交通大学朱礼涛副教授小组提出一种阴极H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>原位催化产热，耦合机器学习与多目标优化的冷启动新策略，可用于燃料电池在低温环境下的无外部辅助加热启动，初步为燃料电池寒区工程化应用提供了兼具系统简洁性与智能调控潜力的新路径。

## 研究方法

本研究构建了一套机理建模-代理预测-优化决策的闭环框架（图1）。核心创新在于采用阴极催化H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>非电化学反应加热策略：通过向阴极通入H<sub>2</sub>/空气混合气，在催化剂表面触发燃烧放热，实现产热与产水解耦，从源头避免过多低温水生成而结冰。为兼顾工程安全性与能耗效率，启动过程分为两阶段：预热阶段（开路状态，纯催化加热至冷却液达30℃）；电化学加热阶段（切断阴极H<sub>2</sub>供应，施加额定负载，依靠电堆自生热升至70℃工作温度）。

为高效筛选复杂工况下的最优操作参数（如混合气中H<sub>2</sub>流量、背压、预热温度等），研究引入XGBoost等机器学习算法构建高精度代理模型，结合SHAP可解释性分析厘清参数非线性交互机制，最终通过NSGA-II多目标遗传算法寻优，实现升温速度与抑冰效果的全局权衡。

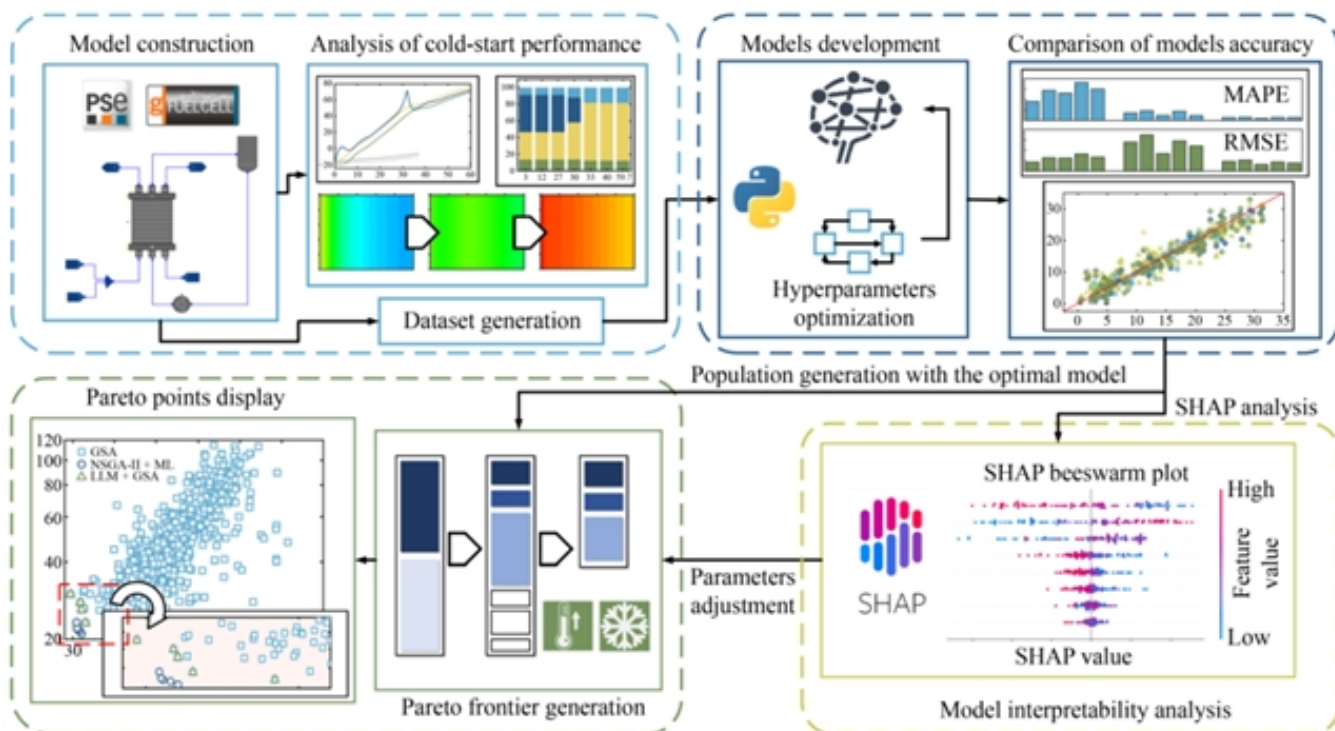


图1.本研究各步骤的工作流程。

## 核心结果

### 机理模型验证精准

冷启动多物理场模型与实验极化曲线高度吻合（皮尔逊相关系数0.99，MAPE为0.03），可精准捕捉电堆内部电-热-流-相变耦合动态，为后续策略优化提供较为可靠的数字样本。

### 阴极催化策略优势突出

在 $-20^{\circ}\text{C}$  无外载预热阶段，阴极催化方案全流程仅用59.7 s即将电堆冷却液温度提升至 $70^{\circ}\text{C}$ （温升超 $30^{\circ}\text{C}$ ），且阴极催化层冰体积分数峰值被压制在3.28 vol%，膜电极（MEA）面内温差 $< 5^{\circ}\text{C}$ 。

对比之下，传统阳极催化因热量分布不均且产水易在阴极侧迁移结冰，37 s内无法突破0，最终启动失败。该结果验证了阴极原位加热+热-水解耦机制的工程优越性。

### 机器学习模型性能择优

对比RF、SVR、GPR、ANN等算法，XGBoost在预测预热时间、电化学加热时间及峰值冰体积分数时展现出最优的鲁棒性与泛化能力。SHAP可解释性分析进一步揭示，阳极背压与反应物温度主导冰生成动力学，而泵流量系数则显著影响预热效率。值得注意的是，预热阶段的反应物供给水平会对后续电化学阶段产生热惯性效应，某种程度上影响整体启动节奏。

### 参数机制与优化效果明确

NSGA-II算法成功寻得Pareto最优解集，使峰值冰体积分数降至2.38

---

vol%，优化后的预热时间与电化学加热时间分别降至28和22 s，优化幅度达14.3%与18.5%。但研究也客观指出，代理模型的静态映射特性难以完全拟合冷启动瞬态多物理场耦合，导致优化边界在极端工况下与真实物理极限存在一定偏差。这一发现为后续机理-数据融合建模指明了改进方向。

## 结论与展望

阴极催化H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>反应加热耦合机器学习方案，无需外接辅助设备，可快速升温 and 高效抑冰，大幅提升PEMFCs低温冷启动性能。针对当前数据驱动模型在瞬态物理边界刻画上的局限，未来将融合物理机理模型，扩充极端工况数据，修正模型边界误差，拓展超低温场景适用性，推动燃料电池寒区工程化应用。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fcse/EN/10.1007/s11705-026-2643-9>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：邵枫等 来源：《工程·化学工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发