

# 质子交换膜燃料电池低温冷启动研究

邓精涛, 邵宝坤, 张 晔, 陈旭波, 杨顺林, 叶 立\*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月27日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月28日

## 摘 要

质子交换膜燃料电池(PEMFC)汽车在低温环境中的限制主要是冷启动问题。本文以某款车用PEMFC系统为参照, 使用AMESim软件建立了仿真模型, 研究PEMFC无外源低温冷启动问题, 提出一个综合的低温冷启动方案, 包括蓄热器辅助启动、系统分级启动、电堆分堆启动等策略, 为实验研究提供了参考。仿真结果显示, 在 $-20^{\circ}\text{C}$ 的低温环境下, PEMFC在63 s内输出功率达50%, 成功冷启动, 启动成功率100%, 启动时间缩短了81%, 显著改善了PEMFC的低温冷启动性能。

## 关键词

质子交换膜燃料电池, 氢, 低温冷启动, 电化学, 数值模拟

# Research on Optimization of Low Temperature Cold Start Strategy of PEMFC for Automotive Application

Jingtao Deng, Baokun Shao, Ye Zhang, Xubo Chen, Shunlin Yang, Li Ye\*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2024; published: May 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Cold start of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) in low temperature environment is a main problem which limits the performances of PEMFC. Numerical simulations of a PEMFC system for vehicles are carried out by using AMESim software in this paper, and the cold start strategy and performance of PEMFC at the low environment temperature are studied. 5 cold start strategies are designed with the orthogonal method, by changing operation parameters such as the auxiliary

\*通讯作者。

文章引用: 邓精涛, 邵宝坤, 张晔, 陈旭波, 杨顺林, 叶立. 质子交换膜燃料电池低温冷启动研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2727-2741. DOI: 10.12677/mos.2024.133248

preheating of heat accumulator and the heating modes of stacks, etc. Simulation results show that the output power of PEMFC rise to 50% within 63 s at  $-20^{\circ}\text{C}$ , start-up success rate is 100%, start-up time is reduced by 81%, the cold start performance of PEMFC is improved significantly.

## Keywords

PEMFC, Hydrogen, Cold Start-Up, Electrochemistry, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 简称 PEMFC)是一种清洁、高效的绿色环保电源。PEMFC 通过氢气和氧气在阳极和阴极发生反应,将化学能直接转化为电能,具有能量转化率高、工作噪声小、无排放等诸多优点,在汽车、固定电站、便携式发电装置、潜艇和航天飞机等领域都具有很大的应用潜力[1]。但在 PEMFC 的推广应用[2] [3] [4]中还存在一些亟待解决的难题,其中  $0^{\circ}\text{C}$  以下的低温冷启动成功率和启动速度是最主要的限制[5]。通过对冷启动过程分析发现,电堆内部水的结冰堵塞是造成冷启动困难的主要原因。水结冰,体积膨胀高达 9%;电池温度达到熔点,体积恢复,反复相变会对电池及组件材料、结构造成不可逆的损伤,严重时大幅衰减电池性能和寿命[6]。

因此,汽车冷启动在近年来一直是学者们热议的话题。张新丰等人[7]利用 MATLAB/Simulink 作为仿真工具,建立了混合式燃料电池汽车动力系统零下冷启动过程的仿真模型,研究不同加热功率对电堆升温能量消耗与动力电池状态变化的影响。宋泽华等[8]提出并建立了一种基于热泵和蓄热装置联合的燃料电池电动车模型,对比有无蓄热装置辅助的系统对车辆运行过程的影响,发现寒冷运行环境下蓄热装置可确保驾驶循环工况下循环冷却液热量来源的连续性。宋东方等[9]设计了在冷却液流路上安装加热器来提高燃料电池汽车的低温启动能力,模拟结果表明其通过低温舱的风洞实验表明采用预热系统后电堆能够在  $-25^{\circ}\text{C}$  成功启动,并且启动电流越大,启动的时间越短。不采用外部加热系统,电堆只能在  $-5^{\circ}\text{C}$  成功启动,而在  $-20^{\circ}\text{C}$  下燃料电池电堆仅仅运行 100s 就停止工作。

目前较为普遍的冷启动方案有电池组电加热法、冷却液电加热法、防冻液法、氢外部燃烧法、反应物饥饿法[10] [11]。而上述方案均存在“起始热源”缺乏或不足和堆内温差过大的问题,为解决该问题,提出了一种新的水热管理方案来改善“起始热源”和控制电堆温度及温差。在改善“起始热源”方面,提出了蓄热器辅助启动和电堆分层启动策略,在控制电堆温度及温差方面,提出了阴极气体过量和电堆系统分级启动策略,并对其进行了仿真研究。

## 2. 模型建立

### 2.1. 系统模型

图 1 是 PEMFC 冷启动系统模型图,该系统由氢气供应系统、空气供应系统、PEMFC 电堆系统、加热/冷却系统和电路控制系统组成。其中,加热/冷却系统也称作温度控制系统,能够调节电堆温度和温差,空气供应系统提供反应所需氧气,氢气供应系统提供反应所需氢气,PEMFC 电堆是气体反应装置,额定功率为 60 KW,最大效率为 65%。

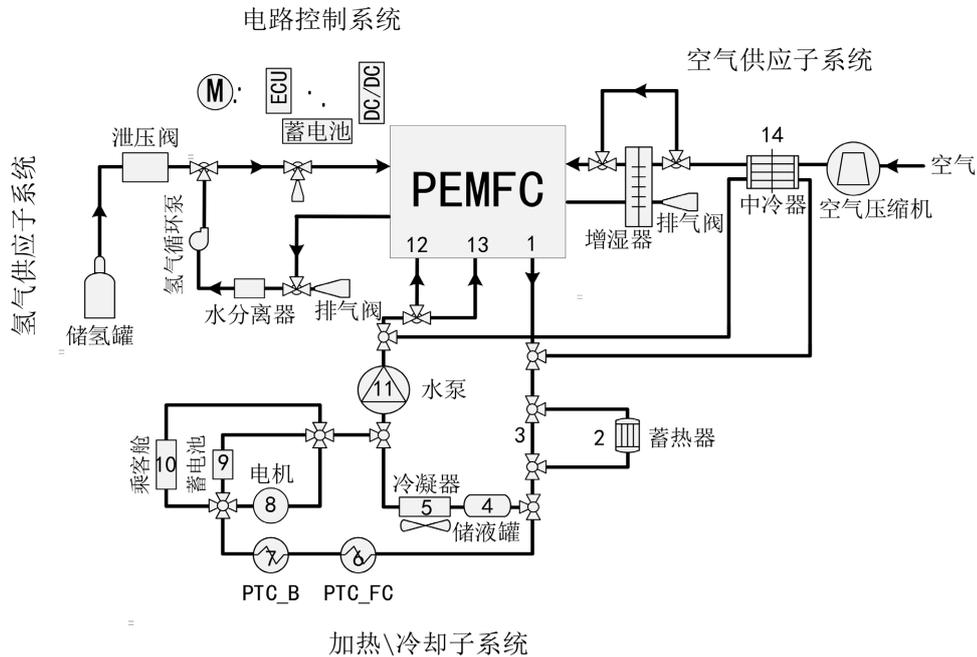


Figure 1. Cold start system model diagram of PEMFC  
图 1. PEMFC 冷启动系统模型图

## 2.2. PEMFC 电堆系统建模

为简化起见合理假设：1) 堆内气体均为理想气体；2) 堆内过冷水的极限温度为 $-5^{\circ}\text{C}$  [12]。

### 2.2.1. 电压模型

基于极化现象建立电堆电压数值模型，并对其进行实验验证。电压可看作可逆电动势与内部极化的差值，电池的可逆电动势主要取决于反应物的活度，此关系可由能斯特方程描述，内部极化是活化极化、欧姆极化和浓差极化之和，分别用巴特勒-福尔摩极化方程、欧姆定律和面电阻方程表征，表示如下：

$$V_{stack} = N_{cell} (E_{nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{cons}) \quad (1)$$

式中： $V_{stack}$  为电堆电压； $N_{cell}$  为单体数； $E_{nerst}$  为能斯特电压； $V_{act}$  为活化极化电位； $V_{ohmic}$  为欧姆极化电位； $V_{cons}$  为浓差极化电位；

基于机理-数据建模方法建立电堆电压数值模型，表示如下：

$$V_{stack} = 1.195 + \frac{RT}{2F} \ln \left( a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) - R_{ohmic} \cdot I_{stack} - I_{stack} \frac{\delta_{mem}}{\sigma_{mem}} \quad (2)$$

式中： $F$  为法拉第常数； $R$  为气体常数； $a_x$  为气体活度； $\alpha$  为电荷转移系数； $R_{ohmic}$  为欧姆内阻； $I_{stack}$  为电流密度 $[\text{mA}/\text{cm}^2]$ ； $\delta_{mem}$  为膜厚度 $[\text{cm}]$ ； $\sigma_{mem}$  为离子电导率 $[\text{S}/\text{cm}]$ 。

试验在自建 PEMFC 测试系统平台上进行，系统结构和框架如图 1 所示。燃料电池系统主要由燃料电池电堆、氢气供应子系统、空气供应子系统、热管理系统、控制及监测系统组成。对于氢气供应子系统，来自高压氢罐(15 MPa)的高纯氢气(大于 99.99%)经减压阀和比例阀减压后进入电堆阳极流道，阴极反应产生的水扩散到阳极作为氢气增湿。阳极气体压力由控制器控制，与外部负载有关。在空气供应子系统，空气经过滤器由鼓风机供给电堆阴极，为电堆阴极提供氧气。为保证 PEMFC 电堆的输出性能，进电堆前加湿器对干空气加湿，电堆阴极出口湿空气配合冷凝系统为中冷器提供冷量。

热管理子系统旨在使电堆运行在目标工作温度，包含装有 PTC 加热器的回路，主要用于电堆低温启动模式；冷却系统回路，用于电堆的正常运行。冷却水泵循环将电堆产生的热量送入系统进行耗散，使电堆温度保持在目标值范围内。所有传感器均能在冷启动工况下工作，温度、压力、湿度传感器的精度分别为 0.5%、0.25%和 0.5%。在中心控制和监控子系统中，试验采用了电子负载 7000-04，最大功率达到 7000W。测试平台配有单电池电压监测设备(CVM)，用于随时监测单体电池的电压信息。

图 2 是单体的极化曲线对比图，对比发现仿真模型和实验测得的变化趋势一致，误差小于 5%，验证了数值模型的正确性和准确性。

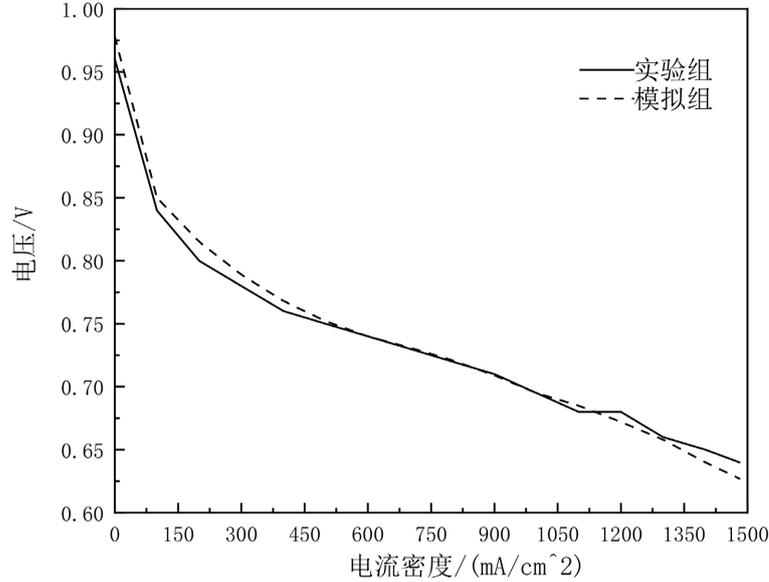


Figure 2. Polarization curve comparison diagram  
图 2. 极化曲线对比图

### 2.2.2. 阴极流道模型

阴极流道是外界空气进入电堆内部的通道，直接参与化学反应的气体的氧气，其守恒方程为：

$$\dot{P}_{O_2}^{ca} = \frac{RT_{stack}}{V_{an}} \left\{ \dot{n}_{air}^{ca_{in}} * \chi_{O_2}^{ca_{in}} \left[ 1 - \frac{\phi_{ca}^{in} P_{sat}(T^{ca_{in}})}{P_{air}^{ca_{in}}} \right] - \frac{k^{ca}}{M^{ca}} (P^{ca} - P^{ca_{back}}) * \chi_{H_2}^{ca_{out}} * \left[ 1 - \frac{\phi_{ca}^{in} P_{sat}(T^{ca_{in}})}{P_{air}^{ca_{in}}} \right] - n_{cell} \frac{I_{st}}{2F} \right\} \quad (3)$$

式中： $\dot{P}$  为气体压力[Pa]； $\dot{n}$  为气体摩尔流量[mol/s]； $\chi$  气体体积占比； $\phi$  为气体湿度； $k$  为流道流量非线性校正参数； $M$  为流道气体马赫数。

### 2.2.3. 阴极气体扩散层、气体催化层模型

扩散层(CL)和催化层(GDL)均为气体传输介质，由微孔通道组成。实际传递过程中，微孔通道里存在气相不充满(水蒸气液化堵塞)和气道弯曲现象(物质不均匀)，引入孔隙率  $\varepsilon$ 、扩散通道弯曲系数  $\tau$  以及水通过流道影响因子  $S$  进行描述，阴极气体扩散层和催化层内氧气浓度表示为：

$$c_{O_2}^{ca_{CL-GDL}} = c_{H_2}^{ca} - \frac{i_{st} (\delta_{GDL}^{ca} + \delta_{CL}^{ca})}{4FD_{H_2}^{ca} * (S\varepsilon)^\tau} \quad (4)$$

式中， $c$  为气体浓度； $\varepsilon$  为孔隙率； $\delta$  为膜厚度[mm]； $D$  为扩散阻力系数。

### 2.2.4. 质子交换膜模型

在质子交换膜中，主要发生氢离子和水分子以及氮气分子的扩散，本文不考虑氮气穿膜现象，只考虑氢离子和水分子穿过膜现象，质子交换膜的水扩散规律可以描述为：

$$\dot{n}_{mem}^{ca} = D_{H_2O}^{mem} \frac{\lambda_{H_2O}^{mem} - \lambda_{H_2O}^{ca_{mem}}}{\delta/2} c_{mem} A n_{cell} n_d n_{cell} \frac{I_{st}}{F} + n_{cell} \frac{I_{st}}{2F} \quad (5)$$

$$\dot{n}_{mem}^{an} = D_{H_2O}^{mem} \frac{\lambda_{H_2O}^{mem} - \lambda_{H_2O}^{ca_{mem}}}{\delta/2} c_{mem} A n_{cell} - n_d n_{cell} \frac{I_{st}}{F} \quad (6)$$

式中： $\lambda$  为膜含水量[g/m<sup>3</sup>]； $A$  为膜有效面积； $n_d$  为电渗拖拽系数。

### 2.2.5. 阳极气体扩散层、气体催化层模型

电堆结构从物理的角度来看是完全对称的，不同于阴极的是：阳极侧传输的是氢气，氢气浓度表示为：

$$c_{O_2}^{an_{CL-GDL}} = c_{H_2}^{an} - \frac{i_{st} (\delta_{GDL}^{an} + \delta_{CL}^{an})}{2FD_{H_2}^{an} * \epsilon^\tau} \quad (7)$$

### 2.2.6. 阳极流道模型

阴极流道是氢气进入电堆内部的通道，直接参与化学反应，其守恒方程为：

$$\dot{P}_{H_2}^{an} = \frac{RT_{stack}}{V_{an}} \left\{ \dot{n}_{H_2}^{an_{in}} \chi_{H_2}^{an_{in}} - \frac{k^{an}}{M^{an}} (P^{an} - P^{an_{back}}) - n_{cell} \frac{I_{st}}{2F} \right\} \quad (8)$$

### 2.2.7. 电堆产热、散热模型

PEMFC 的氢化学能转换效率在 50%左右，其余转化成热能等。电堆的产热量主要取决于电堆的实时功率和电堆状态，纯机理建模难度较大，图 3 为实验得到的产热曲线。

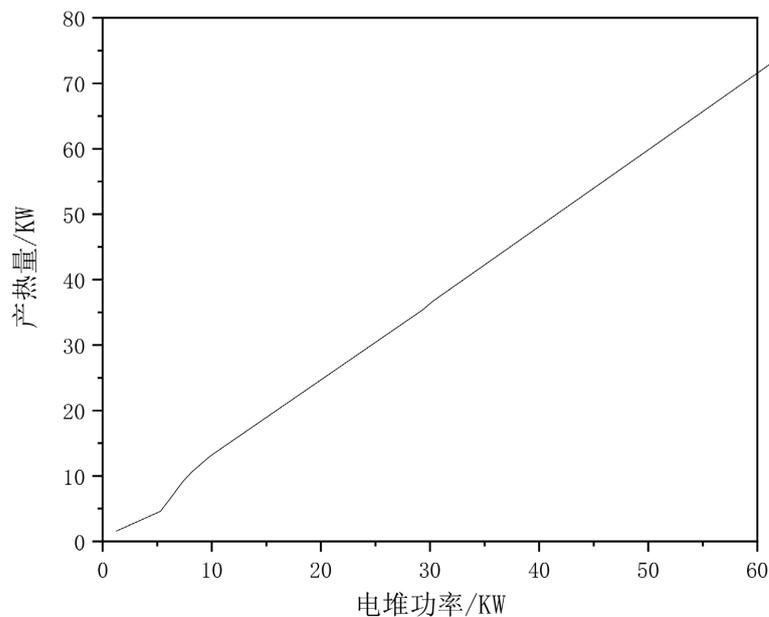


Figure 3. Curve of quantity of heat production  
图 3. PEMFC 产热曲线

### 2.3. 加热/冷却系统模型

为简化起见合理假设: 1) 低温启动时, 电堆及组件用绝热材料包裹, 忽略向外散热; 2) 电堆停机后, 使用 55°C 的干空气对电池进行两次吹扫, 吹扫间隔和吹扫时间都为 120 s [13], 忽略电堆内原始含水量。

#### 2.3.1. 热模型

电堆是冷启动模型中的热汇, 加热设备是冷启动模型中的热源, 冷却液是换热的唯一媒介, 其热平衡关系如下:

$$M_{st}c_{st}(T_{st}-T_0)=M_{EG}c_{EG}(T_{outlet}-T_{inlet})=Q_{react}+Q_{ptc}+Q_{pcma}+Q_B \quad (9)$$

式中,  $M_{st}$  为电堆质量[g];  $c_{st}$  为电堆比热容[J/(g·K)];  $T_{st}$  为电堆温度[K];  $T_0$  为启动温度[K], 取 253.15 K;  $M_{EG}$  为冷却液(50%的乙二醇水溶液)质量[g];  $c_{EG}$  冷却液比热容[J/(g·K)];  $T_{outlet}$ 、 $T_{inlet}$  为冷却液出堆、进堆温度[K];  $Q_{react}$  为电堆产热量[KJ];  $Q_{ptc}$  为 PTC 加热器产热量[J];  $Q_{pcma}$  为相变蓄热器产热量[J];  $Q_B$  为蓄电池产热量[J]。

#### 2.3.2. 蓄电池加热模型

蓄电池为锂离子动力电池, 其单体生热模型可以描述为[14] [15]:

$$Q_B = I_B(U - E) + IT \frac{\partial U}{\partial T} \quad (10)$$

基于欧姆定律的 PTC 电加热器的产热模型可以描述为:

$$Q_{PTC} = I_{PTC}^2 R \quad (11)$$

综上, 蓄电池加热模型为[16]:

$$q = q_B + q_{PTC} = I_B(U - E) + I_B T \frac{\partial U}{\partial T} + I_{PTC}^2 R \quad (12)$$

式中,  $I_B$  为电池电流[A];  $U$  为电池开路电压[V],  $E$  为电池电动势[V];  $T$  为电池温度[K];  $I_{PTC}$  为 PTC 电加热器电流[A];  $R$  为 PTC 电加热器电阻[Ω]。

#### 2.3.3. 蓄热器加热模型

锂电池放电的极限温度为-40°C左右, 实际上, 环境温度为-20°C时, 锂电池有效容量仅有 60%左右, 且放电倍率非常有限[16]。因此, 相变蓄热器是冷启动成功的关键热源, 蓄热器在车辆运行时收集电堆余热, 由相变材料储存[17] [18] [19] [20], 热模型可以描述为:

$$Q_{pcma} = V_{PCM} I_{PCM} \rho_{PCM} - Q_{loss} \quad (13)$$

式中,  $V_{PCM}$  为相变材料体积[cm<sup>3</sup>];  $I_{PCM}$  为相变材料相变潜热[J/g];  $\rho_{PCM}$  为相变材料密度[g/cm<sup>3</sup>];  $Q_{loss}$  为蓄热器损失热量[J]。

蓄热器内的填充相变材料为三水合醋酸钠基[21], 其材料物性见表 1。

**Table 1.** Properties of trihydrate sodium acetate composites

**表 1.** 三水合醋酸钠基复合材料物性

名称	相变开始温度/°C	相变结束温/°C	相变潜/(J/g)	导热率/(W/m/K)
三水合醋酸钠基	51	61	307.76	2.12

### 3. 仿真方案和结果分析

#### 3.1. 方案设计和边界设置

选取蓄热器预热开度、冷却液体积、电堆分层启动分堆数、阴极气体过量系数、起始需求功率等 5 个可能影响冷启动的参数, 采用正交设计方法提出一种集 5 种启动策略的综合方案, 并对每一种启动策略进行递进式比较[22] [23]。模拟条件表如表 2 所示, 仿真方案如表 3 所示, 模拟组 1 为基本对照组。

**Table 2.** Table of simulation parameter values

**表 2.** 模拟条件表

模拟条件	工况 A	工况 B	工况 C
参数 1: 蓄热器预热开度/%	100	0	
参数 2: 冷却液体积/L	10	18.5	
参数 3: 分堆数/个	1	2	
参数 4: 阴极气体过量系数	1	2	
参数 5: 起始需求功率 w/s	100	300	1000

**Table 3.** Orthogonal design table of simulated condition

**表 3.** 模拟条件正交设计表

模拟组	参数 1	参数 2	参数 3	参数 4	参数 5
1	B	B	A	A	A
2	B	A	A	A	A
3	A	A	A	A	A
4	A	A	B	A	A
5	A	A	A	B	A
6	A	A	A	B	B
7	A	A	A	B	C

在无任何外加电源和外加热源条件下, 从 $-20^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下冷启动, 当电堆温度达到 $-5^{\circ}\text{C}$ (过冷水极限温度)时, 反应生成水不会冻结, 开启氢气泄压阀, 通氢发电。将电堆到达该温度前的启动过程称作预热阶段, 电堆到达该温度后的启动过程称作启动阶段。在预热阶段, 由蓄热器、蓄电池和 PTC 加热器共同预热, 在阴极气体过量启动时, 在电堆温度达到 $-7^{\circ}\text{C}$ 时开启空气压缩机, 向阴极流道内通入空气。启动时间为预热阶段和启动阶段的时间总和, 启动成功的标志为电堆输出功率达到 30 KW (即额定功率的 50%)。

#### 3.2. 模型有效性验证

为了验证模型的有效性, 模型的计算结果与 Tajiri 等人[24]实验结果进行了对比。选取金属双极板单电池环境温度分别为 $-10^{\circ}\text{C}$ 和 $-20^{\circ}\text{C}$ 的两个工况, 膜结合水的初始值为 6.2, 膜厚 30  $\mu\text{m}$ , 阴阳极反应气无

加湿，启动模式为初始电流斜坡为  $0.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，持续 80 s，然后电流密度保持在  $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，直到电池电压降至  $0.3 \text{ V}$  截止电压以下。图 1 为相同单体电池输出电压随时间变化的实验与仿真结果对比。由图 4 可以看出，实验数据与仿真数据变化趋势基本相同，相对误差大部分在 10% 以内，这表明本文所建立的仿真模型可用于预测燃料电池低温启动下的性能。

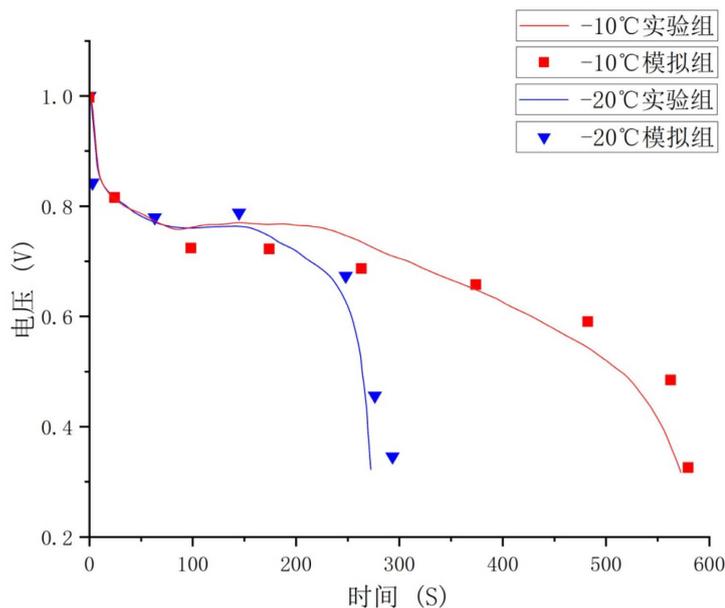


Figure 4. Comparison of experimental and simulation data  
图 4. 单体电池低温启动实验与数值模拟对比图

### 3.3. 模拟结果讨论

#### 3.3.1. 蓄热器辅助启动

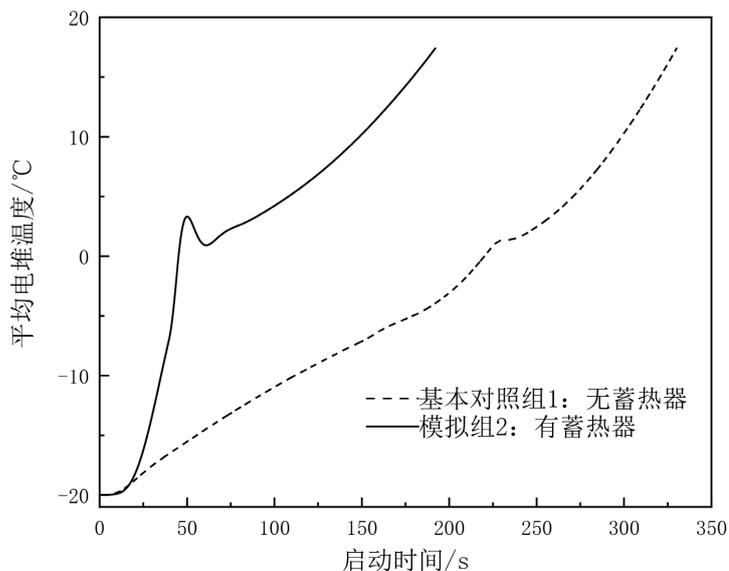


Figure 5. Change of average stack temperature over time  
图 5. 电堆平均温度随时间的变化

蓄热器可以有效解决 PEMFC 冷启动时“起始热量”缺乏的难题。图 5 为电堆平均温度随时间的变化图,由图可知,引入蓄热器后,启动时间从 330 s 减少至 192 s,预热阶段(-20℃至-5℃)时间从 180 s 减少至 42 s,启动终了温度从 17℃提高到 18℃。在 46 s 时,电堆温度会小幅下降到 0℃左右,这是因为蓄热器回路切换后,有少量低温冷却液汇入导致,之后电堆温度迅速回升,逐渐脱离“危险零度”直至冷启动成功。蓄热器热量越多对冷启动过程越有利,但对电堆温差的控制来说难度就越大,对此提出“最小热量”匹配规则,通过华维三[19]等实验测得的蓄热器放热曲线和相变材料体积设定来确定蓄热器需提供的最小热量。图 6 为冷却液进出堆温差随时间的变化图,由图可知,冷却液进出口温差在预热阶段(0~42 s)存在较大波动,此时电堆尚未工作,因而,温度波动不会对系统运行造成影响。在发电阶段,温差越大换热效率越高,同时,由于电堆自产热量的保护作用 and 蓄热器相变储热的缓冲作用,冷却液进口温差反而减小,在 5℃之内,满足要求。

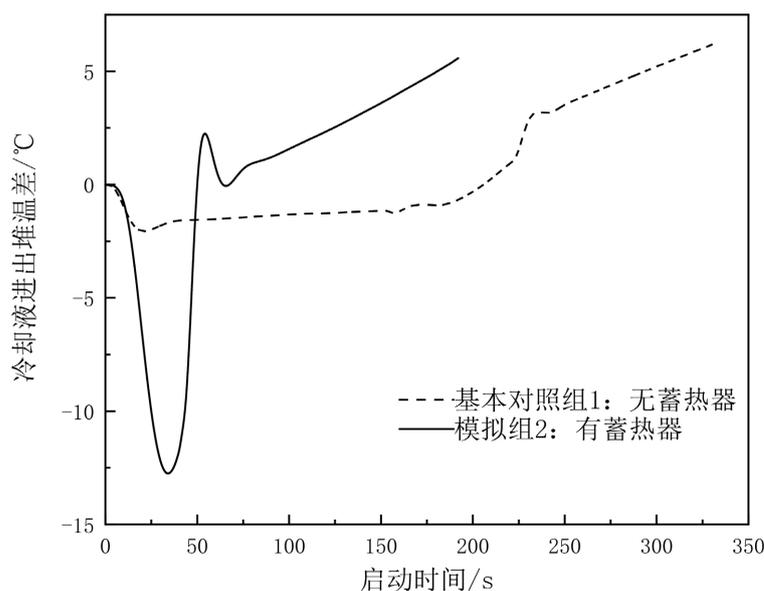


Figure 6. Change of temperature difference over time

图 6. 冷却液进出堆温差随时间的变化

### 3.3.2. 系统部件分级启动

PEMFC 汽车在低温冷启动时加热对象较多,包括燃料电堆、蓄电池、电机、乘客舱等,热负荷和电负荷要求较高。在引入蓄热器的基础上,提出系统部件分级加热策略,按照先主后次得原则,优先加热燃料电堆,再加热蓄电池和电机,最后加热乘客舱等。

图 7 为电堆平均温度随时间变化曲线图,由图可见,启动时间从 192 s 缩短至 182 s,预热时间从 42 s 缩短至 32 s,启动终了温度从 18℃提高到 21℃。图 8 为冷却液进出堆温差随时间的变化图,由图可见,预热阶段的冷却液进出堆温差变大,最大温差为 18℃,在进入发电阶段后,冷却液进出堆温差能更快速地降低至 5℃之内,满足要求。综上,系统分级启动策略能够有效缩短加热回路(冷却液从 18.5 L 减少为 10 L),节约了热量用于优先、快速加热电堆,其次,加热回路越短,反馈响应速度越快,温差控制效果更好。

### 3.3.3. 分堆启动策略

在引入蓄热器辅助启动和系统分级启动策略的基础上,提出分堆启动策略,也称作多堆启动技,2

个分堆之间并联连接，分堆 1 和分堆 2 各有 144 层，优先预热分堆 1，再预热分堆 2。图 9 为分堆 1 和分堆 2 平均温度随时间的变化图，由图可知，启动时间从 182 s 缩短至 174 s，预热时间从 32 s 减少至 24 s，启动终了温度从 21℃ 提高到 28℃，分堆启动策略有效加速了电堆升温，缩短了预热时间。在 40 s 到 50 s 期间，蓄电池停止电加热，电堆温度会小幅下降，此时分堆 1 的产热水平较高，可以弥补缺少热源，保证电堆温度稳定；另一方面，分堆 1 仅用 24 s 达到允许放电温度(-5℃)，开始对外供电，为车辆启动提供动力。图 10 为冷却液分别进出分堆 1、分堆 2 的温差随时间变化曲线图，由图可知，在发电阶段，分堆 2 温差较小且稳定在 2℃ 左右，分堆 1 的温差相对较大但仍稳定在 10℃ 以内，满足要求。

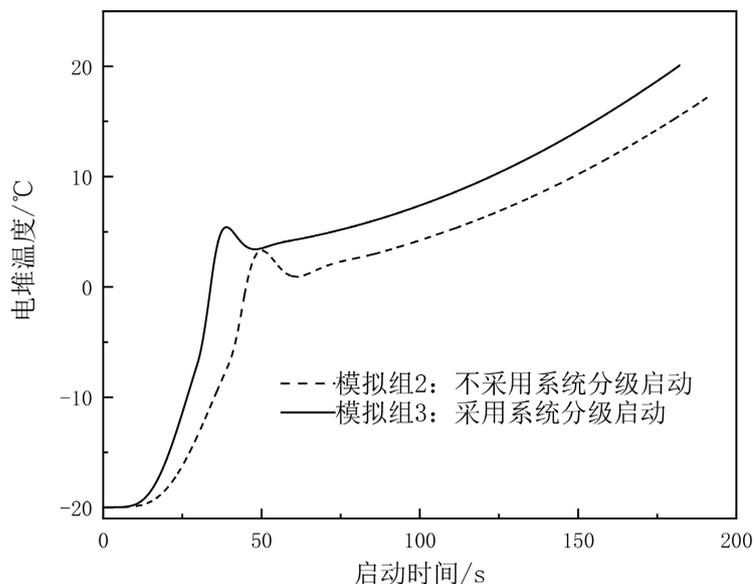


Figure 7. Change of average stack temperature over time  
图 7. 电堆平均温度随时间变化图

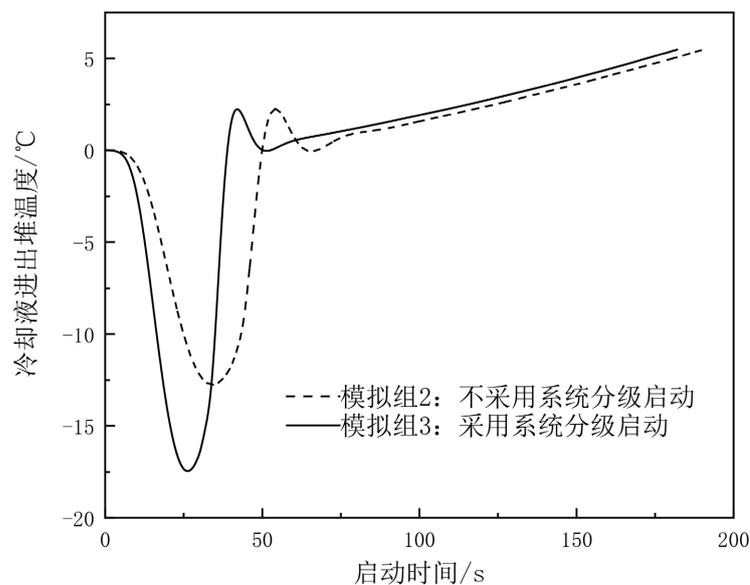


Figure 8. Change of temperature difference over time  
图 8. 冷却液进出堆温差随时间的变化

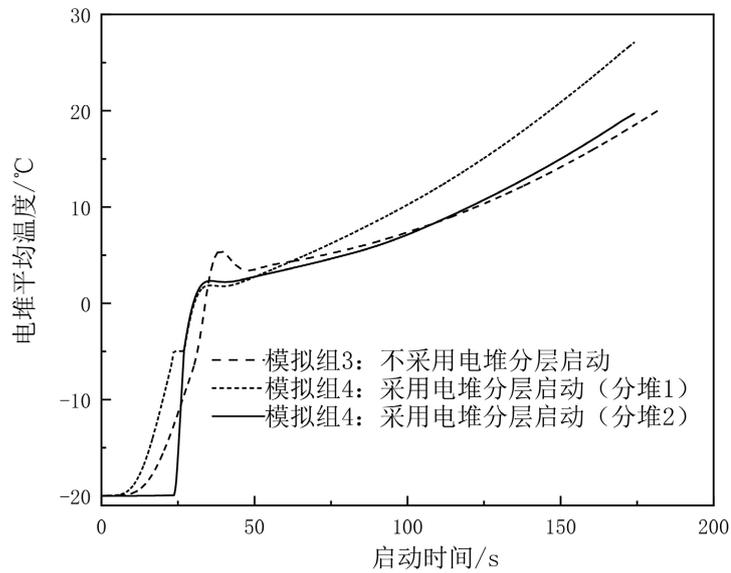


Figure 9. Change of average stack temperature over time  
图 9. 电堆平均温度随时间的变化

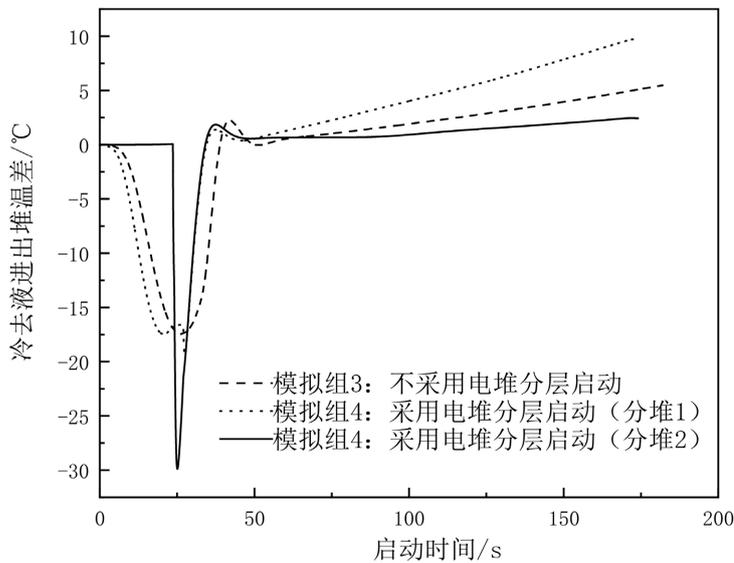


Figure 10. Change of temperature difference over time  
图 10. 冷却液进出堆温差随时间的变化

### 3.3.4. 阴极气体过量的影响

在加入蓄热器辅助启动和系统分级启动策略的基础上，提出阴极气体过量启动策略，空气供应系统在电堆温度为 $-7^{\circ}\text{C}$ 时开启，阴极气体过量系数为 2。图 11 为电堆平均温度随时间变化图，图 12 为冷却液进出堆温差随时间变化图，由图可知，启动时间从 182 s 增加至 183 s，预热时间从 32 s 缩短至 31 s，预热终了温从  $21^{\circ}\text{C}$  提高至  $23^{\circ}\text{C}$ ，冷却液进出堆最大温差为  $6^{\circ}\text{C}$ 。图 13 为阴极气体进出堆湿度差随时间变化图，由图可知，阴极气体湿度明显提高上升。总体来说，阴极气体过量启动策略对温度和启动时间的增益有限，但阴极气体在经过中冷器换热策略对启动和空气压缩机升温之后，显著提高了阴极气体的含水量，降低了阴极流道的湿度，有效避免了生成水结冰、水淹等不良现象。

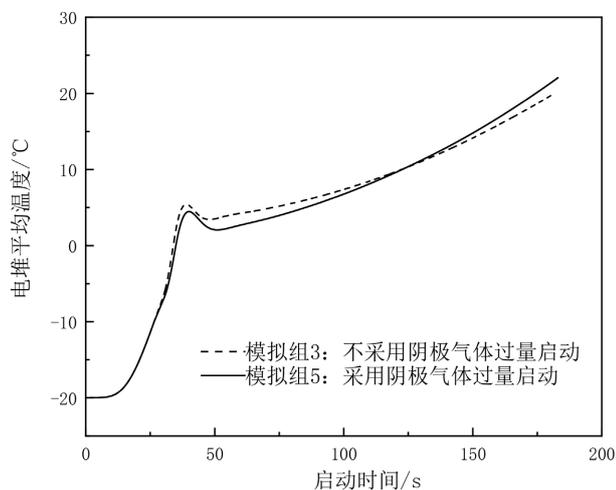


Figure 11. Change of average stack temperature over time  
图 11. 电堆平均温度随时间的变化

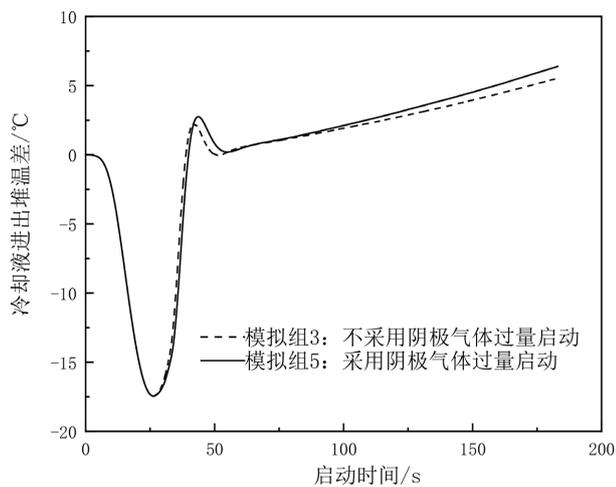


Figure 12. Change of temperature difference over time  
图 12. 冷却液进出堆温差随时间的变化

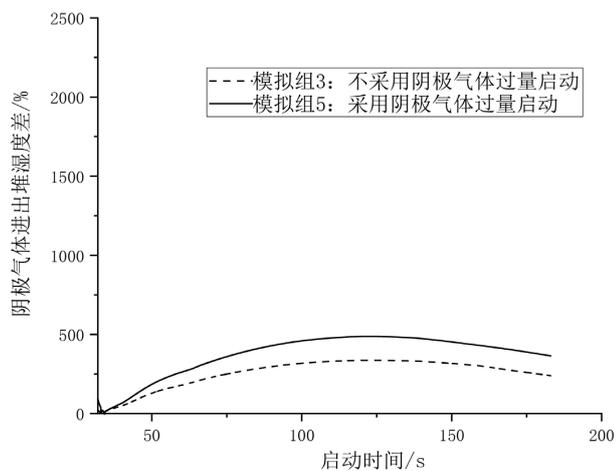


Figure 13. Change of humidity difference over time  
图 13. 阴极气体进出堆湿度差随时间的变化

### 3.3.5. 不同启动功率坡度的影响

燃料电池堆在低温冷启动时，一般是先采用较小的负载启动，待电堆达到稳定工作温度之后，再加载高负载。为研究不同启动功率坡度对系统冷启动的影响，分别按照 100 w/s、300 w/s、1000 w/s 启动功率坡度进行模拟。模拟组 5 的启动负载设定为 100 W/s，模拟组 6 设定为 300 W/s，模拟组 7 设定为 1000 W/s。

图 14 所示为电堆平均温度随时间变化，图 15 所示为冷却液进出堆温差随时间变化，由图可知，在 1000 W/s 的启动功率坡度下，预热阶段时长和冷却液进出堆温差变化不大，启动总时长减少至 63 s，终了温度从 23℃降低到 10℃。所以，改变启动功率坡度对于预热过程没有影响，只是在发电阶段影响燃料电池堆的冷启动速度，且在允许范围内，坡度越大启动速度越快。

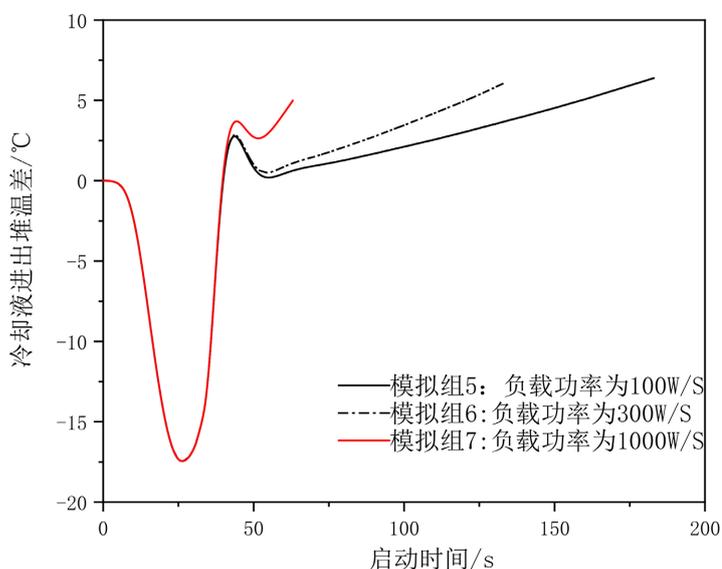


Figure 14. Change of average stack temperature over time

图 14. 电堆平均温度随时间的变化

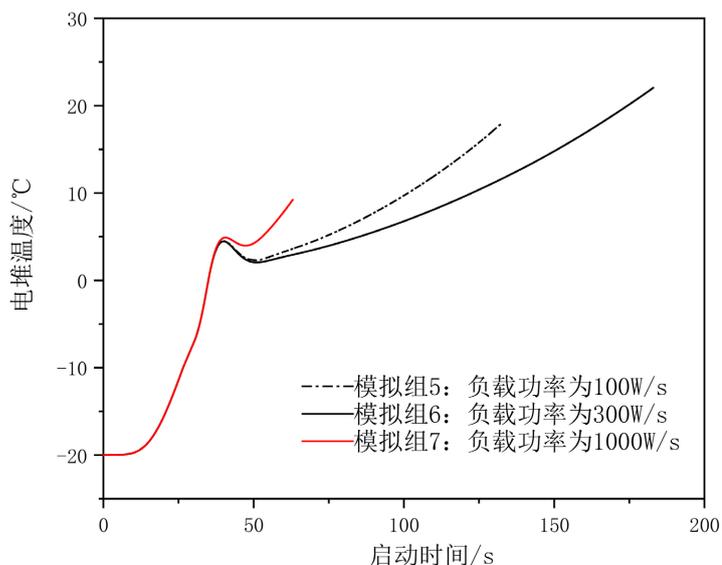


Figure 15. Change of temperature difference over time

图 15. 冷却液进出堆温差随时间的变化

**Table 4.** Comparison of simulation results of various programs**表 4.** 各方案模拟结果对比

方案	启动时长/s	预热时间/s	终了温度/°C	最大温差/°C
1	330	180	17	5
2	192	42	18	5
3	182	32	21	5
4	174	24	28	9
5	183	31	23	6
7	63	31	10	7

#### 4. 结论

本文参照某款 60 KW 的车用 PEMFC 系统, 使用 AMESim 软件建立了仿真模型, 研究 PEMFC 无外源低温(-20°C)冷启动问题, 以蓄热器开度、冷却液体积、分堆数等参数为变量, 通过正交设计法设计出 5 种冷启动策略, 采用递进式对比分析的方法, 对 PEMFC 系统的水、热管理策略进行优化, 提出一个综合的低温冷启动方案, 包括蓄热器辅助启动、系统分级启动、电堆分堆启动等策略, 为实验研究提供了参考。主要结论如下: 1) 蓄热器辅助预热策略显著缩短了冷启动时间, 提高了蓄电池的充放电温度, 改善了车辆的动态响应水平和能量回收水平; 2) 系统部件分级加热策略可合理分配有限热量, 提高燃料电池冷启动的成功率和稳定性; 3) 分堆启动策略有效缓解了热源热量供给和加热系统传热压力。分堆 1 快速启动之后, 充分发挥了燃料电池比能量大的优势, 不仅能向空气压缩机、水循环泵等供电, 降低蓄电池的负载压力, 且其大量的自产热量能迅速加热整堆。但分堆之间温差较大, 对电堆设计的复杂性和运行稳定性以及供氢系统的控制精度具有更高要求; 4) 阴极气体过量启动策略显著降低了发电初期的阴极催化层含水量, 有效抑制电渗拖曳效应并增强了反扩散作用, 降低了氢耗。5 个冷启动策略的时间增益和温度增益如表 4 所示, 在-20°C 的低温环境下, PEMFC 在 63 s 内输出功率达 50%, 成功冷启动, 启动成功率 100%, 启动时间缩短了 81%, 显著改善了 PEMFC 的低温冷启动性能。

#### 基金项目

国家自然科学基金重点项目(51736007), 国家自然科学基金资助项目(51306122)。

#### 参考文献

- [1] 郭爱, 陈超, 石俊杰, 刘正杰, 陈维荣, 梁嘉懿, 刘楠. 基于价值损耗的有轨电车混合动力能量策略比较研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 572-580.
- [2] Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., et al. (2011) A review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research. *Applied Energy*, **88**, 981-1007. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>
- [3] Dayeni, M.K. and Soleymani, M. (2016) Intelligent Energy Management of a Fuel Cell Vehicle Based on Traffic Condition Recognition. *Clean Technologies & Environmental Policy*, **18**, 1945-1960. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1122-2>
- [4] 邓坚, 吕海全, 张立炎, 全书海. 集成于 DC/AC/DC 的车载燃料电池内阻测试系统研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1925-1934.
- [5] 周怡博, 王健建. 装配压力对燃料电池扩散层影响的研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 991-996.
- [6] 黄明宇, 张政, 邓佳文, 陆琼晔, 倪红军, 周一丹. 基于 ADVISOR 的氢电混合动力场地车仿真模型开发[J]. 系

- 统仿真学报, 2017, 29(5): 1041-1048.
- [7] 张新丰, 罗明慧, 姚川棋, 戴维, 常国峰. 混合型燃料电池汽车动力系统零下冷启动仿真[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 2986-2993.
- [8] 宋泽华, 陈浩, 郭航, 等. 基于蓄热装置辅助的燃料电池电动车供暖系统动态仿真[J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(1): 54-62.
- [9] 宋东方, 武照云, 李丽. 燃料电池汽车冷启动预热性能研究[J]. 机械设计与制造, 2023, 391(9): 59-63.  
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20230321.010>
- [10] 孙桂芝, Sam Park, 林忠玲. 燃料电池/蓄电池混合动力汽车建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4816-4824.
- [11] 胡云峰, 于彤, 杨惠策, 等. 低温环境下燃料电池启动优化控制方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(9): 2034-2043. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220331>
- [12] Hishinuma, Y., Chikahisa, T., Kagami, F., *et al.* (2004) The Designed Performance of a PEMFC at a Temperature Below Freezing. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, **47**, 235-241.  
<https://doi.org/10.1299/jsmeb.47.235>
- [13] Ge, S. and Wang, C.-Y. (2007) Characteristics of Subzero Startup and Water/Ice Formation on the Catalyst Layer in a Polymer Electrolyte Fuel Cell. *Electrochimica Acta*, **52**, 4825-4835. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.038>
- [14] Bernardi, D., Pawlikowski, E. and Newman, J. (1985) A General Balance for Battery Systems. *Journal of the Electrochemical Society*, **132**, 5-12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
- [15] 匡勇, 刘霞, 钱振, 郭成龙, 黄丛亮, 饶中浩. 锂离子电池产热特性理论模型研究进展[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(6): 599-608.
- [16] Ji, Y. and Wang, C.Y. (2013) Heating Strategies for Li-Ion Batteries Operated from Subzero Temperatures. *Electrochimical Acta*, **107**, 664-674. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.03.147>
- [17] 施尚, 余建祖, 陈梦东, 高红霞, 谢永奇. 基于泡沫铜/石蜡的锂电池热管理系统性能[J]. 化工学报, 2017, 68(7): 2678-2683.
- [18] 陈思彤, 李微微, 王学科, 王树博, 谢晓峰, 朱彤. 相变材料用于质子交换膜燃料电池的热管理[J]. 化工学报, 2016, 67(z1): 1-6.
- [19] 华维三, 章学来, 刘锋, 等. 相变材料复合八水氢氧化钡的制备及热性能[J]. 化工进展, 2018, 37(11): 4389-4389.
- [20] 吴东灵, 李延贤, 何峰, 等. 三水醋酸钠基相变储能复合材料改性制备及储/放热特性[J]. 化工学报, 2018, 69(7): 2860-2868.
- [21] 李伟华, 茅靳丰, 李金田, 等. 三水醋酸钠基复合相变储能材料导热能力强化研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 517-520.
- [22] 方川, 黄海燕, 徐梁飞, 李建秋, 洪坡, 江宏亮, 赵兴旺, 胡尊严. 一种多功能燃料电池堆实验台的研发[J]. 汽车工程, 2019, 41(4): 361-365.
- [23] 郭爱, 陈维荣, 李奇, 刘志祥, 李艳昆. 燃料电池机车温度系统建模和控制[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(1): 133-141.
- [24] Tajiri, K., Tabuchi, Y., Kagami, F., Takahashi, S., Yoshizawa, K. and Wang, C.-Y. (2007) Effects of Operating and Design Parameters on PEFC Cold Start. *Journal of Power Sources*, **165**, 279-286.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.017>