

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.12.016

# 车用燃料电池堆变负载电流下的出入口温度控制研究\*

陈轶嵩, 兰子剑, 蔡旭, 曹自强, 刘青山, 付佩

(长安大学汽车学院, 西安 710064)

**[摘要]** 为解决车用质子交换膜燃料电池(PEMFC)堆出入口温度在变负载电流下波动大的问题,提出了一种动态变化粒子群优化(PSO)—比例积分微分(PID)算法。首先搭建了额定功率150 kW的PEMFC发动机系统整体仿真模型,基于已有文献,进行了模型中输出功率和电压的准确性验证;随后基于验证结果,使得反应气体供给跟随负载电流需求变化,反映PEMFC发动机系统实际工作情况。根据搭建的模型,基于冷却水泵冷却水质量流量跟随输出功率控制策略,对散热风扇冷却空气质量流量使用PID、PSO-PID和本文提出的动态变化PSO-PID算法,研究三者变负载电流下对电池堆出入口温度和输出功率的控制效果。结果表明:与PID相比,在PSO-PID和动态变化PSO-PID下,电池堆入口温度瞬态超调量下降幅度均为13.7%,出口温度瞬态超调量下降幅度均为36.0%。输出功率均更快达到稳定状态;动态变化PSO-PID达到最优值的时间仅为PSO-PID的57.1%,可以减小更多的非必要计算量,提前于PSO-PID将得到的PID参数输入到电池堆温度控制器中。此动态变化粒子群优化算法能更有效、更快地用于电池堆出入口温度控制,有助于提升车用PEMFC的温度和输出功率的稳定性。

**关键词:** PEMFC整体模型;温度控制;PID;PSO-PID;动态变化PSO-PID;输出功率

## Research on the Inlet and Outlet Temperature Control of Vehicle Fuel Cell Stacks Under Variable Loading Currents

Chen Yisong, Lan Zijian, Cai Xu, Cao Ziqiang, Liu Qingshan &amp; Fu Pei

School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064

**[Abstract]** To solve the problem of large fluctuation of inlet and outlet temperature on vehicle proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under variable loading currents, a dynamic change particle swarm optimization (PSO)—proportional integral derivative (PID) algorithm is proposed. Firstly, the overall simulation model of the PEMFC engine system with rated power of 150 kW is built. Based on existing references, the accuracy of the output power and voltage of the model is validated; and according to the validated results, the supply of reactant gas is set following demand on currents, which reflects real working conditions of the PEMFC engine system. Based on the model built and the control strategy that the mass flow rate of cooling water following output power, PID, PSO-PID and dynamic change PSO-PID are used on the mass flow rate of cooling air from radiating fans to conduct research on the control effect of them on the inlet and outlet temperature and output power of FCs under variable loading currents. The results show that compared with PID, under PSO-PID and dynamic change PSO-PID, the transient overshoots decreasing amplitudes of inlet temperature of FCs are both 13.7%, those of outlet temperature both 36.0% and the output power reaching the stable condition faster. The time when dynamic change PSO-PID reaching the optimum values only accounts for 57.1% of that under PSO-PID, which can reduce more unnecessary computation and input the PID parameters into the stack temperature controller ahead of PSO-PID. The dynamic PSO-PID algorithm

\* 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2021YFE0192900)、国家自然科学基金青年项目(52302427)和陕西省重点研发计划项目(2021LLRH-04-04-02)资助。

原稿收到日期为2024年05月11日,修改稿收到日期为2024年06月20日。

通信作者:付佩,高级工程师,博士,E-mail:peifu@chd.edu.cn。

can be used on actual inlet and outlet temperature control of FCs more efficiently and faster, contributing to improving the stability of the temperature and the output power of vehicle PEMFC.

**Keywords:** overall model of PEMFC ; temperature control; PID; PSO-PID; dynamic change PSO-PID; output power

## 前言

2024年两会政府工作报告重磅指出加快新兴产业发展,且氢能在其中居于首位。作为氢能先导领域,氢燃料电池汽车被广泛重视。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)由于有启动时间短、工作温度低的优势,目前是用途最广、最有前景的车用氢燃料电池<sup>[1-4]</sup>。

电池堆是 PEMFC 发动机系统中的核心部件,其温度对 PEMFC 的安全性和输出功率有决定性的影响。电池堆中氢氧电化学反应放出的热量如果无法排出,将会极大增加电池堆温度,水分快速蒸发,出现“膜干”现象,并大幅增加欧姆极化电压,降低输出功率。长时间“膜干”会导致膜发生破裂甚至烧穿,严重损害膜的寿命。温度过低会导致饱和蒸汽压大幅降低,电池堆水淹的可能性大幅提升,同时,反应速率会降低,输出功率下降。因此,对 PEMFC 电池堆进行优良的温度控制研究符合国家发展氢能的要求。

PEMFC 电池堆温度控制研究主要以削弱冷却水泵的冷却水质量流量和散热风扇的冷却空气质量流量耦合为目标,使得变工况(一般为负载电流阶跃)下电池堆出口温度和入口温度在设定值附近的波动更小。近年来,围绕上述目标,电池堆温度控制研究不断进步。Kim 等<sup>[5]</sup>和 Sankar 等<sup>[6]</sup>分别对冷却水质量流量采取自适应和滑模控制算法。郭爱等<sup>[7]</sup>对冷却空气质量流量使用积分状态反馈控制算法。谢雨岑等<sup>[8]</sup>对冷却水质量流量和冷却空气质量流量采取变论域模糊控制算法。Chen 等<sup>[9]</sup>和牛茁等<sup>[10]</sup>分别提出了冷却水质量流量跟随负载电流和输出功率控制策略,随后在实验平台上验证了两种跟随策略均优于传统比例积分微分(proportional integral derivative, PID)算法。Zhao 等<sup>[11]</sup>在 Chen 等<sup>[9]</sup>的基础上,提出了冷却空气质量流量跟随冷却水质量流量的控制策略。基于 Chen 等<sup>[9]</sup>的策略,许书超<sup>[12]</sup>和 Zhang 等<sup>[13]</sup>均对冷却空气质量流量采取模糊 PID 算法。Liu 等<sup>[14]</sup>基于 Chen 等<sup>[9]</sup>的策略将得到的冷却水

质量流量跟随函数与其得到的节温器传递函数进行结合。Pei 等<sup>[15]</sup>对冷却水质量流量采用线性二次型控制算法。侯荣福等<sup>[16]</sup>对冷却水质量流量使用模糊自抗扰算法。杨孝才<sup>[17]</sup>基于侯荣福等<sup>[16]</sup>的策略,对冷却水质量流量和冷却空气质量流量设计了双线性自抗扰控制器。Chen 等<sup>[18]</sup>和 Yu 等<sup>[19]</sup>分别对冷却空气质量流量采取粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和约束广义预测算法对参数自动寻优。Zhang 等<sup>[20]</sup>同时对冷却水质量流量和冷却空气质量流量采取非线性稀疏变分贝叶斯学习的预测控制算法。

从上述的 2015~2024 年 PEMFC 电池堆温度控制研究的发展史可以看出,其算法发展已经非常全面。但仍有如下问题:

(1)大部分研究均未考虑电池堆流场中反应气体供给跟随负载电流需求变化,难以反映 PEMFC 发动机系统的实际工作情况。

(2)文献[7]中的电池堆输出功率虽然为 150 kW,但冷却水质量流量仍为 PID 控制,难以胜任反应气体供给跟随负载电流需求变化下的控制;其余研究中的电池堆输出功率均未超过 130 kW,当单电池数量更多时,输出功率更大,在同样的电池堆出入口温差下,需要的冷却水和冷却空气就更多。上述研究方法中的参数难以将冷却水质量流量和冷却空气质量流量控制在更大输出功率下各自的平衡值。

本文针对上述问题,开展如下工作:

(1)针对问题 1,建立了额定功率为 150 kW 的 PEMFC 发动机系统的整体仿真模型。以已发表的文献为基础,对模型的输出功率和电压进行准确性验证。设定过氧比为定值,使得氢氧压力跟随负载电流变化,更加真实地反映 PEMFC 发动机系统工作过程。

(2)针对问题 2,基于上述模型,在传统 PID 基础上,采用了 PSO-PID 和 PSO 参数改变的动态变化 PSO-PID 策略改变控制冷却空气质量流量的 PID 参数,研究三者对电池堆温度和输出功率控制效果。

## 1 PEMFC 发动机子系统建模

PEMFC 发动机系统各个子系统的协同工作才能实现优良的电池堆温度控制。通过建立整体仿真模型来反映其真实工作过程,并基于仿真模型设计电池堆温度控制策略具有十分重要的意义。仿真模型主要包括空压机模型、进气管路模型、阴极和阳极流场模型、电池堆输出功率和电压模型、热管理系统模型。

### 1.1 空压机建模

本文选用 ROTREX 公司生产的空压机,其主要的3种型号参数<sup>[21]</sup>如表1所示。根据本文对输出功率大于130 kW的要求,选择型号C15-60。

表1 ROTREX 系列空压机参数<sup>[21]</sup>

型号	最大空气质量流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	适用的电池堆最大输出功率/kW
C15-16	0.15	125
C15-20	0.15	120
C15-60	0.22	175

建立空压机工作时的动力学方程:

$$\begin{cases} \tau_{cp} = \frac{C_p (T_{cp,out} - T_{cp,in}) W_{cp}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \\ \tau_{cm} = \frac{K_t \eta_{cm}}{R_{cm}} (U_{cm} - K_v \omega_{cm}) \\ \omega_{cp} = 12.67 \omega_{cm} \\ J \frac{d\omega_{cp}}{dt} = \tau_{cm} - \tau_{cp} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tau_{cm}$ 为空压机输入转矩,N·m; $\tau_{cp}$ 为空压机实际转矩,N·m; $C_p$ 为空气比热容,J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; $K_v$ 和 $K_t$ 为驱动空压机的电机常数,单位分别为V·rad<sup>-1</sup>·s和N·m·A<sup>-1</sup>; $\eta_{cm}$ 和 $\eta_{cp}$ 分别为电机机械效率和空压机效率; $U_{cm}$ 为空压机电压,V; $W_{cp}$ 为空压机空气质量流量,kg·s<sup>-1</sup>; $R_{cm}$ 为电机电枢的电阻, $\Omega$ ; $T_{cp,out}$ 为空气流出空压机的温度,K; $T_{cp,in}$ 为空气进入空压机的温度,取298.15 K; $\omega_{cm}$ 为电机角速度,rad·s<sup>-1</sup>; $\omega_{cp}$ 为空压机叶轮角速度,rad·s<sup>-1</sup>; $J$ 为空压机转动惯量,kg·m<sup>2</sup>。相关的原始参数见表2。

根据空压机MAP图中的样本点,得到经过中心正则化的压缩比和转速的值,构建出空压机空气质量流量关于此二者的多项式<sup>[24]</sup>。依据文献[23]得到如图1所示的C15-60空压机MAP图。

图1中,压缩比为进气管路压力和大气压比值。

表2 空压机和电机参数

参数	数值	文献
空压机转动惯量 $J$ /(kg·m <sup>2</sup> )	$5 \times 10^{-5}$	[22]
电机常数 $K_t$ /(V·rad <sup>-1</sup> ·s)	0.026	[22]
电机常数 $K_t$ /(N·m·A <sup>-1</sup> )	0.036	[22]
驱动电机效率 $\eta_{cm}$	0.97	[22]
空压机效率 $\eta_{cp}$	0.7	[23]
电机电枢的电阻 $R_{cm}/\Omega$	0.01	[22]

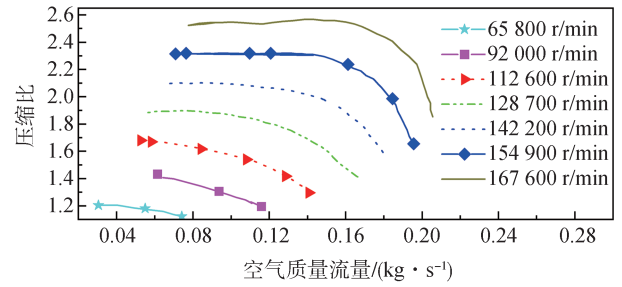


图1 C15-60空压机MAP图<sup>[23]</sup>

相比于空压机空气质量流量的数值,空压机转速至少高了5个数量级。依据文献[24]中的中心正则化过程,首先将压缩比和转速按照式(2)调整为与空压机空气质量流量的数量级接近的数值:

$$\begin{cases} N_{cp} = \frac{30}{\pi} \omega_{cp} \\ N_{cp} = \frac{N_{cp} - 1 \times 10^5}{5 \times 10^4} \\ P_R = \frac{P_{ratio} - 1.726}{0.45} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $N_{cp}$ 为空压机转速,r·min<sup>-1</sup>; $P_{ratio}$ 为空压机压缩比; $N_{cp}$ 和 $P_R$ 为调整后的数值。对 $N_{cp}$ 和 $P_R$ 的中心正则化公式如下:

$$\begin{cases} x = \frac{N_{cp} - 0.6796}{0.5834} \\ y = \frac{P_R - 0.3326}{0.9258} \\ W_{cp} = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_{ij}$ 为拟合参数; $x$ 和 $y$ 分别为空压机转速和压缩比经过中心正则化后的值。基于 $x$ 和 $y$ ,使用MATLAB的多项式拟合工具对 $W_{cp}$ 进行最小残差拟合,结果如图2所示。

从图2中得到拟合结果误差均方根值为0.0102,且绝大部分误差来源于超出安全范围的154 900和167 600 r/min两条曲线。因此忽略这两条曲线后,可以认为拟合效果较好。多项式详细参数见表3。

根据不同的工况,实际的空气质量流量往往需

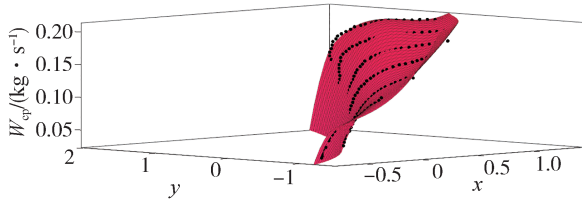


图2 C15-60空压机空气质量流量拟合结果

表3 多项式拟合参数

参数	数值	参数	数值
$a_{00}$	-0.126	$a_{21}$	-0.309
$a_{10}$	-0.178	$a_{12}$	0.321
$a_{01}$	-0.125	$a_{03}$	-0.1
$a_{20}$	-0.175	$a_{40}$	0.005
$a_{11}$	-0.374	$a_{31}$	0.044
$a_{02}$	-0.178	$a_{22}$	-0.09
$a_{30}$	0.076	$a_{13}$	0.045

要在拟合结果中进行修正<sup>[25]</sup>:

$$W_{cp, corrected} = 10^{-5} W_{cp} p_{atm} \sqrt{\frac{T_{cp, in}}{288.15}} \quad (4)$$

式中: $p_{atm}$  单位为 bar; $T_{cp, in}$  单位为 K。

### 1.2 进气管路建模

气体从空压机流出后,会经过进气管路到达流场。此过程中由于管路阻力的作用,气体流量进入流场时会损失小部分。由道尔顿定律可得:

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{R_{air}}{V_{sm}} (T_{cp, out} W_{cp, corrected} - T_{sm} W_{sm, out}) \quad (5)$$

式中: $p_{sm}$  为进气管路压力, Pa; $R_{air}$  为空气的气体常数,取  $286.9 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $V_{sm}$  为进气管路体积,  $\text{m}^3$ ;  $W_{sm, out}$  为流入阴极流场的空气质量流量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $T_{sm}$  为进气管路温度, K;  $T_{cp, out}$  为空压机出口温度, K。

$$T_{cp, out} = \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[ (P_{ratio})^{\frac{2}{\gamma}} - 1 + \eta_{cp} \right] \quad (6)$$

进气管路温度和气体质量按照下面方程组计算:

$$\begin{cases} T_{sm} = \frac{p_{sm} V_{sm}}{m_{sm} R_{air}} \\ \frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp, corrected} - W_{sm, out} \end{cases} \quad (7)$$

假设阴极流场压力和进气管路压力相差不大,可以线性化:

$$W_{sm, out} = K_{sm, out} (p_{sm} - p_{ca}) \quad (8)$$

式中: $K_{sm, out}$  为管路阻力系数,  $\text{kg}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , 其与管路的本身特性有关,决定进入阴极的空气质量流量,此值越大,管路对气体阻力越小; $p_{ca}$  为阴极流场压力,

Pa。

### 1.3 阴极和阳极流场建模

本文建立的流场模型是传统直通、面向控制的黑箱模型。根据质量守恒定律,阴极和阳极流场压力满足:

$$\begin{cases} p_{ca} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{v, ca} \\ p_{air} = p_{N_2} + p_{O_2} \\ p_{an} = p_{H_2} + p_{v, an} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p_{air}$  为空气压力, Pa;  $p_{an}$  为阳极流场压力, Pa;  $p_{N_2}$  为氮气压力, Pa;  $p_{O_2}$  为氧气压力, Pa;  $p_{H_2}$  为氢气压力;  $p_{v, ca(an)}$  为阴极(阳极)流场内水蒸气压力, Pa。  $p_{v, ca(an)}$  与饱和蒸气压下湿度的关系为

$$\begin{cases} \lg(p_{sat}(T_{st})) = 1.4454 \times 10^{-7} T_{st}^3 - 9.1837 \times 10^{-5} T_{st}^2 + 0.02953 T_{st} - 2.179 \\ RH_i = \frac{p_{v, i}}{p_{sat}(T_{st})}, i = ca, an \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_{st}$  为电池堆出口温度, °C;  $p_{sat}(T_{st})$  为电池堆出口温度下的饱和蒸气压, Pa;  $RH_i$  为阴极或阳极流场湿度。

流场中,各气体压力关于质量的函数关系如下:

$$p_{i, j} = \frac{m_{i, j} R_{i, j} T_{st}}{V_j}, \quad j = ca, i = N_2, O_2, v \text{ 或 } j = an, i = H_2, v \quad (11)$$

式中: $j$  为阴极或阳极流场;  $i$  为对应流场的某气体名称;  $m_{i, j}$  为气体质量, kg;  $V_j$  为阴极或阳极流场体积,  $\text{m}^3$ ;  $R_{i, j}$  为气体质量常数,  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。各气体的质量常数见表4。

表4 气体质量常数

参数	数值
氧气质量常数 $R_{O_2}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	259.8
氮气质量常数 $R_{N_2}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	296.9
氢气质量常数 $R_{H_2}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	4157.0
水蒸气质量常数 $R_{H_2O}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	461.9

阴极空气成分的质量与质量流量关系为

$$\begin{cases} \frac{dm_{O_2, ca}}{dt} = W_{O_2, in} - W_{O_2, reacted} - W_{O_2, out} \\ \frac{dm_{N_2, ca}}{dt} = W_{N_2, in} - W_{N_2, out} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $W_{O_2, in}$  为流入阴极流场的氧气质量流量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , 进入阴极流场的氧气质量可以看作是进入阴极流场空气质量的 23.2%;  $W_{N_2, in}$  为流入阴极流场的氮气质

量流量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $W_{\text{O}_2, \text{out}}$  和  $W_{\text{N}_2, \text{out}}$  分别为流出阴极流场的氧气和氮气质量流量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $W_{\text{O}_2, \text{reacted}}$  为反应的氧气质量流量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

$$W_{\text{O}_2, \text{reacted}} = \frac{NI_{\text{st}}}{4F} G_{\text{O}_2} \quad (13)$$

式中:  $N$  为单电池片数;  $I_{\text{st}}$  为负载电流,  $\text{A}$ ;  $F$  为法拉第常数, 取  $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $G_{\text{O}_2}$  为氧气的摩尔质量,  $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

为了保证氧气量足够, 需要设定合适的过氧比 (oxygen excess ratio, OER) 来限制反应参与的氧气质量流量:

$$\lambda_{\text{O}_2} = \frac{W_{\text{O}_2, \text{in}}}{W_{\text{O}_2, \text{reacted}}} \quad (14)$$

设  $\text{OER}=2$ , 对空压机电压采取 PID 控制策略, 取  $P=100$ 、 $I=50$  和  $D=0$ , 便可以使空气质量流量跟随负载电流变化。

在 PEMFC 发动机系统工作时, 由于氢气消耗速率远比氧气快, 容易造成阳极失压, 因此阳极流场压力一般比阴极流场压力高; 同时为了保证质子膜不因为过大压差而损坏, 设定此压差为  $15 \text{ kPa}$ 。

#### 1.4 电池堆输出功率和电压建模

电池堆输出功率为

$$P_{\text{st}} = NUI_{\text{st}} \quad (15)$$

式中  $U$  为单电池实际输出电压,  $\text{V}$ 。由于受到活化极化、欧姆极化和浓差极化影响, 导致其小于理论开路电压。因此,  $U$  的方程为

$$U = E_{\text{nernst}} - U_{\text{act}} - U_{\text{ohm}} - U_{\text{con}} \quad (16)$$

式中:  $E_{\text{nernst}}$  为单电池开路电压,  $\text{V}$ ;  $U_{\text{act}}$  为单电池活化极化电压,  $\text{V}$ ;  $U_{\text{ohm}}$  为单电池欧姆极化电压,  $\text{V}$ ;  $U_{\text{con}}$  为单电池浓差极化电压,  $\text{V}$ 。每一种电压均可定量算得。

根据 PEMFC 的能斯特电压方程, 单电池开路电压<sup>[26]</sup>为

$$E_{\text{nernst}} = 1.229 + 4.3 \times 10^{-5} T_{\text{st}} (0.5 \ln(p_{\text{O}_2}) + \ln(p_{\text{H}_2})) - 8.5 \times 10^{-4} (T_{\text{st}} - 298.15) \quad (17)$$

式中:  $p_{\text{O}_2}$  和  $p_{\text{H}_2}$  单位均为  $\text{bar}$ ;  $T_{\text{st}}$  单位为  $\text{K}$ 。

Pukrushpan 等<sup>[27]</sup>给出了适用于整个负载电流范围的活化极化电压公式:

$$\begin{cases} U_{\text{act}} = u_0 + u_a (1 - e^{-ci}) \\ i = \frac{I_{\text{st}}}{A_{\text{fc}}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $i$  为负载电流密度,  $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $A_{\text{fc}}$  为电池堆催化面积,  $\text{cm}^2$ ;  $u_0$  为负载电流密度为 0 时的压降,  $\text{V}$ ;  $c$  为拟合参数, 本文取  $3.3$ 。  $u_a$  和  $u_0$  均为与氧气压力、阴极压力和温度有关的参数, 具体表达式为

$$u_0 = 0.279 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{\text{st}} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{\text{st}} \left( \frac{\ln(p_{\text{ca}} - p_{\text{sat}}(T_{\text{st}}))}{1.01325} \right) + 0.5 \ln \left( \frac{0.1173(p_{\text{ca}} - p_{\text{sat}}(T_{\text{st}}))}{1.01325} \right) \quad (19)$$

$$u_a = (-1.618 \times 10^{-5} T_{\text{st}} + 1.618 \times 10^{-2}) \times \left( \frac{p_{\text{O}_2}}{0.1173} + P_{\text{sat}}(T_{\text{st}}) \right)^2 + (1.8 \times 10^{-4} T_{\text{st}} - 0.166) \left( \frac{p_{\text{O}_2}}{0.1173} + P_{\text{sat}}(T_{\text{st}}) \right) + (5.8 \times 10^{-4} T_{\text{st}} + 0.5736) \quad (20)$$

式中: 压力项的单位均为  $\text{bar}$ ;  $T_{\text{st}}$  单位为  $\text{K}$ 。

欧姆极化电压主要取决于质子膜的厚度和其电导率, 其公式为

$$U_{\text{ohm}} = \frac{L}{\delta_{\text{mem}}} i \quad (21)$$

式中:  $L$  为质子膜的厚度,  $\text{cm}$ ;  $\delta_{\text{mem}}$  为质子膜电导率,  $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 其与质子膜的含水量和工作温度有关。美国杜邦公司生产的 Nafion 质子膜的电导率可以通过拟合获得<sup>[28]</sup>:

$$\delta_{\text{mem}} = (a\lambda_{\text{mem}} - b) \exp \left( c \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{\text{st}}} \right) \right) \quad (22)$$

式中:  $a$ 、 $b$  和  $c$  均为拟合参数, 具体取值见表 5;  $\lambda_{\text{mem}}$  为膜的含水量, 其按照式 (23) 计算。

表 5 欧姆极化电压参数<sup>[29]</sup>

参数	数值
$a$	0.005 139
$b$	0.003 26
$c$	1 268

$$\lambda_{\text{mem}} = \begin{cases} 0.043 + 17.81RH_{\text{mem}} - 39.85RH_{\text{mem}}^2 + 36RH_{\text{mem}}^3, & RH_{\text{mem}} < 1 \\ 14 + 1.4(RH_{\text{mem}} - 1), & RH_{\text{mem}} \geq 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中  $RH_{\text{mem}}$  为质子膜湿度, 计算中看作是阴极流场湿度和阳极流场湿度的平均值。

浓差极化电压的值根据下式计算<sup>[30]</sup>:

$$U_{\text{con}} = -\frac{RT_{\text{st}}}{2F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{\text{max}}} \right) \quad (24)$$

式中  $i_{\text{max}}$  为电池堆工作时允许的最大负载电流密度。

将表 6 中的电池堆参数作为第 2 节模型验证的基础参数。

#### 1.5 热管理系统建模

##### 1.5.1 水泵冷却水建模

PEMFC 电化学反应总功率为

表6 电池堆参数

参数	数值	文献
电池堆出口温度 $T_{st}/K$	330	[26,28,31-32]
单电池片数 $N$	762	[26,28,31-32]
催化面积 $A_{fc}/cm^2$	500	[26,28,31-32]
最大负载电流密度 $i_{max}/(A \cdot cm^{-2})$	0.8	[31]
阳极流场湿度 $RH_{an}$	1.18	[32]
阴极流场湿度 $RH_{ca}$	1.76	[32]
膜湿度 $RH_{mem}$	1.47	[32]
膜含水量 $\lambda_{mem}$	14.66	[32]
空气压力 $p_{air}/bar$	2.06	[32]
氧气压力 $p_{O_2}/bar$	0.21 $p_{air}$	[32]
氢气压力 $p_{H_2}/bar$	0.9504	[32]
阴极流场体积 $V_{ca}/m^3$	0.02	[28]
阳极流场体积 $V_{an}/m^3$	0.01	[28]

$$P_{total} = \frac{\Delta_r H_m I_{st}}{2F} \quad (25)$$

式中  $\Delta_r H_m$  为氢氧反应焓变,取  $-285.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。电池堆总功率与输出功率的差值为其产热功率,主要由以下途径散发:冷却水散热、空气对流散热、辐射散热和尾气散热。其中,冷却水散热占据了总散热的95%以上<sup>[33]</sup>,因此建模时可以忽略其他方式的散热。假设放出的热量能够100%被冷却水吸收,则有如下的热力学公式:

$$m_{st} c_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = P_{total} - P_{st} - W_{cl} c_{cl} (T_{st} - T_{st,in}) \quad (26)$$

式中:  $m_{st}$  为电池堆质量,  $\text{kg}$ ;  $c_{st}$  为电池堆比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $W_{cl}$  为冷却水质量流量,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $c_{cl}$  为冷却水比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_{st,in}$  为电池堆入口温度,  $\text{K}$ 。

### 1.5.2 散热器建模

假设散热器入口温度与电池堆出口温度相等:

$$T_{st} = T_{rad,in} \quad (27)$$

则有如下热量守恒关系:

$$\rho_{cl} V_{rad} c_{cl} \frac{dT_{rad,out}}{dt} = W_{cl} c_{cl} (T_{st} - T_{rad,out}) - K_{rad} A (T_{rad,out} - T_{atm}) \quad (28)$$

式中:  $T_{rad,out}$  为散热器出口温度,  $\text{K}$ ;  $V_{rad}$  为散热器冷却水体积,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为散热器有效散热面积,  $\text{m}^2$ ;  $K_{rad}$  为散热器的热量传递系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。  $K_{rad}$  采用如下经验公式计算<sup>[34]</sup>:

$$K_{rad} = 1000 \times (-1.4495 W_{air}^2 + 5.9045 W_{air} - 0.1157) \quad (29)$$

式中  $W_{air}$  为散热风扇冷却空气质量流量,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

两部分支路中水进行汇合将进行热量交换,根据浓度三角原则,最终平衡的电池堆入口温度为

$$(1 - k_{the}) T_{st} + k_{the} T_{rad,out} = T_{st,in} \quad (30)$$

根据式(26),冷却水质量流量在跟随功率控制策略下的表达式为

$$W_{cl} = \frac{P_{total} - P_{st}}{(T_{st} - T_{st,in}) c_{cl}} \quad (31)$$

冷却水、电池堆和散热器初始参数见表7。

表7 散热系统参数

参数	数值	文献
电池堆比热容 $c_{st}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	710	[7]
冷却水比热容 $c_{cl}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	4000	[7]
散热器散热面积 $A/\text{m}^2$	1	[7]
电池堆质量 $m_{st}/\text{kg}$	355	[26,28,31-32]
冷却水体积 $V_{rad}/\text{m}^3$	0.01	[7]

## 2 模型输出功率和电压验证

对文献[26]和文献[32]中的负载电流—输出电压关系曲线、负载电流—输出功率关系曲线以及3种极化曲线的关键数据点进行提取,将其与本文的仿真模型结果进行对比,结果如图3~图6所示。

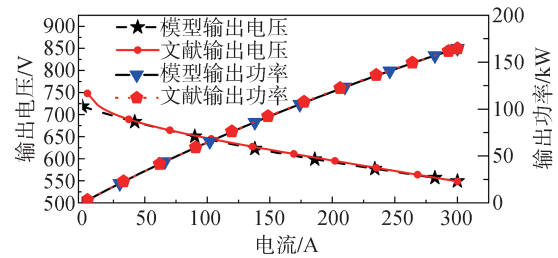


图3 负载电流—电压与输出功率关系曲线对比

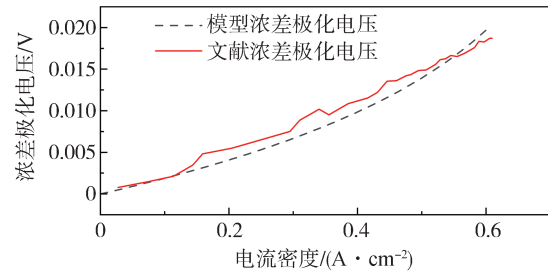


图4 浓差极化曲线对比

从图3~图6可以看出,除初始阶段的活化电压降之外,负载电流密度从  $0.02 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  开始,仿真曲线的趋势与文献数据趋势基本一致。由于单电池片数非常多,设定电池堆电压最大绝对误差限为  $7.62 \text{ V}$  (每个单电池电压绝对误差限不大于  $0.01 \text{ V}$ )。选取特

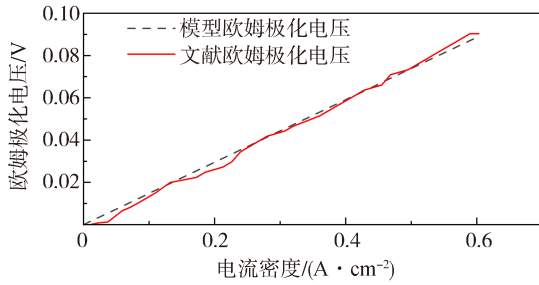


图5 欧姆极化曲线对比

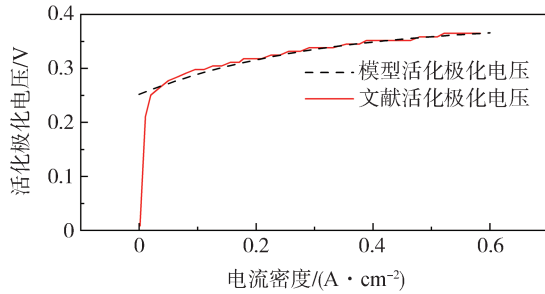


图6 活化极化曲线对比

殊点,比较文献和模型数据误差,结果见表8~表10。

表8 电压误差分析

特殊点	文献数据 <sup>[26,32]</sup>	模型数据
标称电压	(563.9 V, 267 A)	(563.4 V, 267 A)
最大电压	(550 V, 300 A)	(549.4 V, 300 A)

表9 输出功率误差分析

特殊点	文献数据 <sup>[26,32]</sup>	模型数据
标称输出功率	(151.7 kW, 267 A)	(151.39 kW, 267 A)
最大输出功率	(165 kW, 300 A)	(164.82 kW, 300 A)

表10 极化电压最大误差分析

特殊点	文献数据 <sup>[32]</sup>	模型数据
浓差极化	(0.019 V, 300 A)	(0.019 71 V, 300 A)
欧姆极化	(0.027 V, 125 A)	(0.031 V, 125 A)
活化极化	(0.029 77 V, 4.8 A)	(0.028 77 V, 4.8 A)

从表8~表10可以得到文献和模型之间的单电池极化电压曲线最大绝对误差均不超过0.005 V,电池堆输出功率和电压的最大相对误差均低于0.1%,从数学角度上可以认为上述电池堆仿真模型符合实际运行情况。可以此模型为基础,进行下一步关于电池堆出入口温度控制的深入研究。

### 3 电池堆温度优化控制

文献[18]说明 PSO-PID 有简单容易实现、不需

要手动调节参数、收敛速度快等优势,因此是电池堆温度控制研究中常用的方法之一。

#### 3.1 PSO-PID 算法设计

PSO-PID 是一种模仿鸟群觅食所创造的优化 PID 算法,其以满足最初设定的适应度函数的某个逻辑关系为基础来寻找 PID 参数综合考虑下的最优值,核心公式为

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(P_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(P_{gd}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $w$ 为粒子惯性权重; $x_{id}^k$ 为位于第 $d$ 维度的第 $i$ 个粒子进行第 $k$ 次迭代后的位置; $v_{id}^{k+1}$ 为对应粒子进行第 $k+1$ 次迭代后的速度; $P_{id}^k$ 和 $P_{gd}^k$ 分别代表对应粒子第 $k$ 次迭代的个体和群体最优值; $c_1$ 和 $c_2$ 分别为每一个粒子的个体和群体学习因子; $r_1$ 和 $r_2$ 分别为个体和群体在(0,1)内产生的随机数。

按照式(33)初始化粒子位置和速度:

$$\begin{cases} x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})\text{rand} \\ v = v_{\min} + (v_{\max} - v_{\min})\text{rand} \end{cases} \quad (33)$$

式中 $[x_{\max} \ x_{\min}]$ 和 $[v_{\max} \ v_{\min}]$ 分别为位置和速度的最大值和最小值矩阵。

本文使用时间乘绝对误差积分准则(integral of time multiplied by the absolute value of error criterion, ITAE)作为适应度函数,其公式为

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (34)$$

式中: $|e(t)|$ 为目标值与仿真值的误差的绝对值, $K$ ; $t$ 为仿真的第 $t$ 时刻, $s$ ; $T$ 为所设仿真时间, $s$ 。此准则突出的优点是综合了瞬态超调量和瞬态超调时间的共同影响,评价角度全面,瞬态响应特性振荡较小,参数选择性较好。根据所使用适应度函数的性质,要求其取最小值。

综合文献[7]给出的参数并经过有效性测试,初步选取如表11所示的 PSO-PID 参数。

表11 PSO-PID 参数

变量名称	变量符号	数值或范围
迭代次数	$gen$	90
种群规模	$n_p$	20
种群维度	$n$	3
惯性权重	$w$	1
个体学习因子	$c_1$	1.4
群体学习因子	$c_2$	1.4
比例常数	$K_p$	[0.058, 0.078]
积分常数	$K_i$	[0, 0.01]
微分常数	$K_d$	[0, 0.002]
适应度函数	$ITAE$	

### 3.2 动态变化 PSO-PID 算法设计

一般而言,迭代初期重点关注全局搜索能力,后期重点为局部搜索能力。 $w$ 的递增、 $c_1$ 的递减和 $c_2$ 的递增均不利于最优值搜索。为了探究三者同时变化对最优值搜索的影响,设定 $w$ 对最优值搜索有利; $c_1$ 和 $c_2$ 对最优值搜索不利的动态变化 PSO-PID 策略,则按照式(35)进行 $w$ 、 $c_1$ 和 $c_2$ 的设置:

$$\begin{cases} w = w_{\max} + (w_{\min} - w_{\max}) \frac{k}{k_{\max}} \\ c_1 = c_{1,\max} + (c_{1,\min} - c_{1,\max}) \frac{k}{k_{\max}} \\ c_2 = c_{2,\min} + (c_{2,\max} - c_{2,\min}) \frac{k}{k_{\max}} \end{cases} \quad (35)$$

式中: $c_{1,\min}$ 和 $c_{1,\max}$ 分别为个体学习因子最小值和最大值; $c_{2,\min}$ 和 $c_{2,\max}$ 分别为群体学习因子最小值和最大值; $w_{\min}$ 和 $w_{\max}$ 分别为惯性权重最小值和最大值。按照表12设置动态变化 PSO-PID 中与 PSO-PID 不同的参数。

表 12 动态变化 PSO-PID 参数

变量名称	变量符号	数值或范围
惯性权重最小值	$w_{\min}$	0.8
惯性权重最大值	$w_{\max}$	1.2
个体学习因子最大值	$c_{1,\max}$	2
个体学习因子最小值	$c_{1,\min}$	1
群体学习因子最大值	$c_{2,\max}$	1.8
群体学习因子最小值	$c_{2,\min}$	0.9

### 3.3 仿真条件的设置和关键参数的控制结果对比

#### 3.3.1 仿真条件的设置

根据式(15)~式(20),阴极流场压力、氢气压力和氧气压力均对输出电压有影响,且在设定的 OER 数值下会跟随负载电流变化。为了遍历所有工况,将负载电流在 50~267 A(文献[26]和文献[32]中的标称电流)之间进行阶跃,负载电流阶跃和气体压力阶跃随时间变化如图 7~图 10 所示。

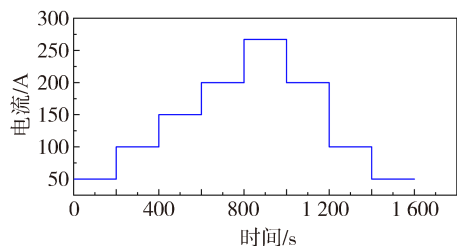


图 7 负载电流变化曲线

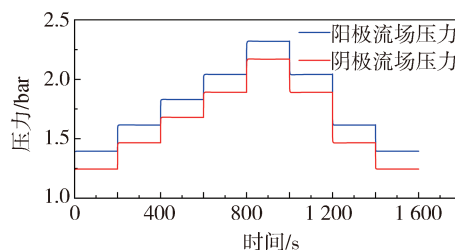


图 8 阴极和阳极流场压力变化曲线

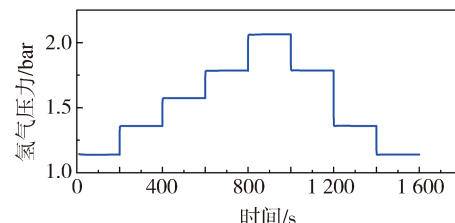


图 9 氢气压力变化曲线

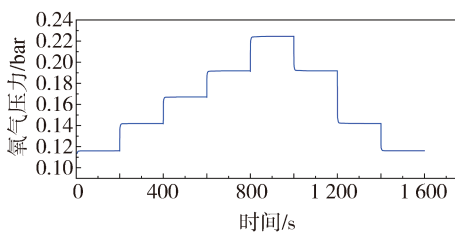


图 10 氧气压力变化曲线

以图 7~图 10 为基础,进行电池堆温度控制研究。使用 PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 分别进行 90 次迭代后,各自的适应度函数值随迭代次数变化的曲线如图 11 所示,最小适应度函数值和对应的最早迭代次数见表 13。

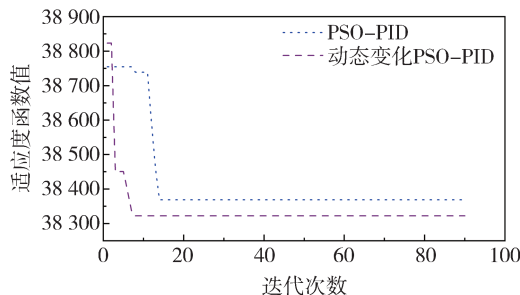


图 11 PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 迭代适应度函数对比

从图 11 中可以看到,在迭代过程中,PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 的 ITAE 值均在第 15 次迭代前达到各自的最小值,但 PSO-PID 比动态变化

表 13 算法结果对比

算法	最小ITAE值	最小ITAE对应的最早迭代次数
PSO-PID	38 364	14
动态变化 PSO-PID	38 325	8

PSO-PID 得到的最小适应度函数值更大。从表 13 中可以看出,动态变化 PSO-PID 到达其最优值的时间是 PSO-PID 的 57.1%。在实际应用中,动态变化 PSO-PID 可以减小更多的计算量,提前于 PSO-PID 将得到的 PID 参数输入到电池堆温度控制器中。

### 3.3.2 电池堆温度控制结果对比

PID、PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 3 种算法控制得到的出入口温度变化如图 12 和图 13 所示。

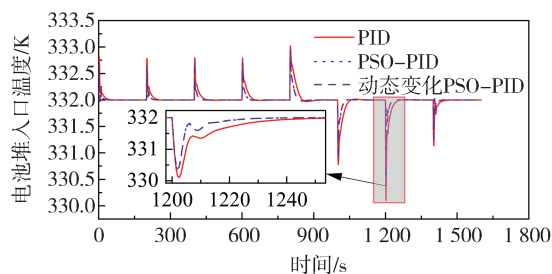


图 12 电池堆入口温度变化对比

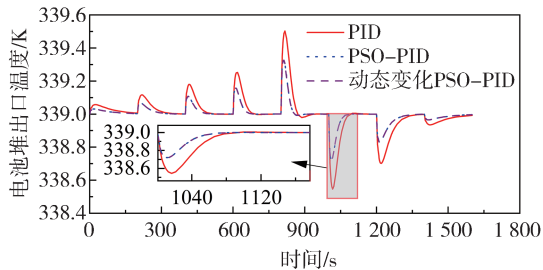


图 13 电池堆出口温度变化对比

从图 12 和图 13 中可以看出:电池堆出口温度阶跃幅度只与初始负载电流值成正比相关;出口温度阶跃幅度与初始负载电流值和负载电流阶跃绝对幅度均有关,且从第 1 000 s 的 267~200 A 和第 1 200 s 的 200~100 A 两个时刻负载电流变化可以看出,负载电流阶跃绝对幅度对温度瞬态超调的影响程度比初始负载电流值更强。动态变化 PSO-PID 和 PSO-PID 均比 PID 减小了更多温度瞬态超调量,3 种方法出入口温度最大瞬态超调量控制效果见表 14 和表 15。

从表 14 和表 15 可以看到,动态变化 PSO-PID

表 14 入口温度控制效果

算法	最大瞬态超调量/K	最大超调量下降幅度/%
PID	1.90	
PSO-PID	1.65	13.7
动态变化 PSO-PID	1.64	13.7

表 15 出口温度控制效果

算法	最大瞬态超调量/K	最大超调量下降幅度/%
PID	0.50	
PSO-PID	0.32	36.0
动态变化 PSO-PID	0.32	36.0

和 PSO-PID 策略下,入口温度的最大瞬态超调量分别比 PID 减小了 0.36 和 0.35 K,下降幅度均为 13.7%;出口温度最大瞬态超调量均减小了 0.18 K,下降幅度均为 36.0%。

### 3.3.3 电池堆输出功率控制结果对比

由于设定的温差为定值,总功率只受负载电流影响,因此输出功率的波动是影响冷却水质量流量是否稳定的关键因素。PID、PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 对电池堆输出功率的影响如图 14 所示,最大负载电流工况下不同时刻的输出功率见表 16。

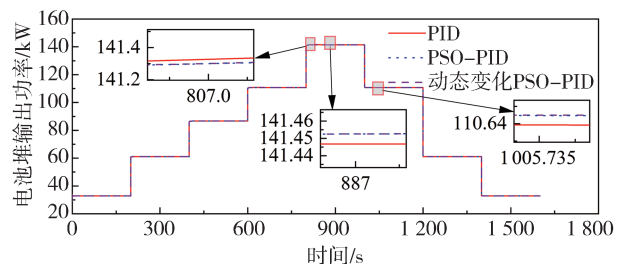


图 14 电池堆输出功率变化对比

表 16 不同时刻电池堆输出功率 kW

算法	807 s 输出功率	887 s 输出功率
PID	141.4	141.44
PSO-PID	141.3	141.45
动态变化 PSO-PID	141.3	141.45

图 14 中,不同算法对输出功率的控制与温度控制的趋势一致。从表 16 中可以得到,相比 PID,输出功率在 PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 下瞬态超调更小,显现了良好的抑制输出功率波动和促进输出功率更快达到稳定的效果。根据图 14 中第 807.0 s 和第 1 005.735 s 的输出功率曲线,可以得出这种效果在电池堆实际工作中均有优势:一方面,在负载电流向上阶跃时,减小电池堆接近满负荷时过

载的可能性;另一方面,可以在负载电流向下阶跃时减小瞬态超调时间,增加平均输出功率。

## 4 结论

对电池堆进行优良的温度控制是改善车用 PEMFC 温度和输出功率稳定性的核心。本文通过对电池堆进行建模仿真和温度控制研究,得到了如下结论。

(1) 建立了 150 kW PEMFC 发动机系统整体仿真模型,对模型中的电池堆输出功率和电压曲线与文献中的曲线进行对比,发现其与文献曲线的相对误差小于 0.1%,符合电池堆实际运行情况。基于此模型,使得反应气体供给跟随负载电流需求变化,反映 PEMFC 发动机系统实际工作情况。

(2) 基于结论(1),发现在电池堆温度控制方面,相比于 PID, PSO-PID 和动态变化 PSO-PID 下的电池堆出口温度瞬态超调量均下降 36.0%;入口瞬态超调量均下降 17.1%;输出功率均更快达到稳定状态。

(3) 动态变化 PSO-PID 到达最优值的时间为 PSO-PID 的 57.1%,可以减小更多的计算量,提前于 PSO-PID 将得到的 PID 参数输入到电池堆温度控制器中。

## 参考文献

- [1] 邵志刚,衣宝廉.氢能与燃料电池发展现状及展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):469-477.  
SHAO Z G, YI B L. Development status and prospect of hydrogen energy and fuel cells[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 469-477.
- [2] 谢雨岑.基于深度学习的燃料电池性能衰退预测研究[D].成都:电子科技大学,2021.  
XIE Y C. Research on performance decline prediction of fuel cell based on deep learning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [3] WU D, PENG C, YIN C, et al. Review of system integration and control of proton exchange membrane fuel cells[J]. Electrochemical Energy Reviews, 2020, 3(3): 466-505.
- [4] ZHU Y, ZOU J X, LI S, et al. An adaptive sliding mode observer based near-optimal OER tracking control approach for PEMFC under dynamic operation condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(2): 1157-1171.
- [5] KIM B M, YOO S J. Approximation-based adaptive control of constrained uncertain thermal management systems with nonlinear coolant circuit dynamics of PEMFCs [J]. IEEE Access, 2020, 8: 83483-83494.
- [6] SANKAR K, SARAVANAKUMAR G, JANA A K. Nonlinear multivariable control of an integrated PEM fuel cell system with a DC-DC boost converter[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 167: 141-156.
- [7] 郭爱,陈维荣.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.  
GUO A, CHEN W R. Modeling and control of thermal system of fuel cells for locomotive[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 133-141.
- [8] 谢雨岑,邹见效,彭超.基于变论域模糊增量理论的质子交换膜燃料电池温度控制[J].控制理论与应用,2019,36(3):428-435.  
XIE Y C, ZOU J X, PENG C. Temperature control of PEMFC system based on variable universe fuzzy incremental theory [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(3): 428-435.
- [9] CHEN W R, NIU Z, HAN Z, et al. Flow following control strategy for thermal management of water-cooled PEMFC [J]. CIESC Journal, 2017, 68(4): 1490-1498.
- [10] 牛苗,张玉瑾,邓惠文,等.基于 OPC 技术的水冷 PEMFC 热管理控制系统[J].太阳能学报,2019,40(4):942-949.  
NIU Z, ZHANG Y J, DENG H W, et al. Thermal management system of water-cooled PEMFC based on OPC technology [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(4): 942-949.
- [11] ZHAO H B, LIU J, MA B, et al. Control strategy and simulation research of water-cooled PEMFC thermal management system [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2139-2150.
- [12] 许书超.质子交换膜燃料电池热管理建模仿真与控制研究[D].天津:河北工业大学,2022.  
XU S C. Research on modeling, simulation and control of thermal management of proton exchange membrane fuel cells [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [13] ZHANG R L, JIA Y, ZHANG T, et al. Research on modeling and control of PEMFC cooling system [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122303.
- [14] LIU D B, REN R L, ZHANG S X, et al. Simulation research on temperature control strategy of PEMFC thermal management system [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(15): 25-29.
- [15] PEI X W, CHEN F X, HU Z, et al. Temperature control of proton exchange membrane fuel cell thermal management system based on adaptive LQR control [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(9): 2014-2024.
- [16] 侯荣福,杨君,于蓬,等.基于模糊自抗扰的质子交换膜燃料电池温度控制[J].山东工业技术,2022(6):16-23.  
HOU R F, YANG J, YU P, et al. Temperature control of proton exchange membrane fuel cell based on fuzzy active disturbance rejection [J]. Shandong Industrial Technology, 2022(6): 16-23.
- [17] 杨孝才.水冷型 PEMFC 冷却系统建模与控制研究[D].重庆:重庆理工大学,2022.  
YANG X C. Research on modeling and control of water-cooled PEMFC cooling system [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.

- [18] CHEN J, YUAN S L, LIU Z E. Temperature control of PEMFC based on BAS improved PSO algorithm[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(5): 67-73.
- [19] YU X Z, ZHANG C Z, LI M X, et al. Thermal management of an open-cathode PEMFC based on constraint generalized predictive control and optimized strategy [J]. *Renewable Energy*, 2024, 220: 119608.
- [20] ZHANG Q, WANG L, XU W H, et al. Nonlinear sparse variational Bayesian learning based model predictive control with application to PEMFC temperature control [J]. *Control Engineering Practice*, 2024, 148: 105952.
- [21] XU Z, JI F Z, DING S T, et al. High-altitude performance and improvement methods of poppet valves 2-stroke aircraft diesel engine [J]. *Applied Energy*, 2020, 276: 115471.
- [22] 马智文, 曾怡达, 李伦. 大功率 PEMFC 空气供给系统建模与实验验证 [J]. *化工学报*, 2016, 67(5): 2109-2116.  
MA Z W, ZENG Y D, LI L. Modeling and experimental verification of air supply system in large power PEMFC [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(5): 2109-2116.
- [23] REINIKKA J. Mootorin hyötysuhteen tutkiminen vapaastihengittävässä sekä mekaanisesti ahdettuna [J]. 2012.
- [24] YANG Z R, DU Q, JIA Z W, et al. A comprehensive proton exchange membrane fuel cell system model integrating various auxiliary subsystems [J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113959.
- [25] 王恺. 车载质子交换膜燃料电池建模与进气系统控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
WANG K. Research on modeling of vehicle proton exchange membrane fuel cell and control of intake system [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [26] LI Q, CHEN W R, LIU Z X, et al. Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 279: 267-280.
- [27] PUKRUSHPAN J T, PENG H, STEFANOPOULOU A G. Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004, 126(1): 14-25.
- [28] PENG F, REN L J, ZHAO Y Z, et al. Hybrid dynamic modeling-based membrane hydration analysis for the commercial high-power integrated PEMFC systems considering water transport equivalent [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112385.
- [29] CHEN X C, HUANG R, SONG Q. Electrochemistry modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cell [J]. *Marine Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 36(2): 26-29.
- [30] MUSIO F, TACCHI F, OMATI L, et al. PEMFC system simulation in MATLAB-Simulink® environment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(13): 8045-8052.
- [31] SAPONARO G Z, STEFANIZZI M, FRANCHINI E, et al. Modeling and design of a PEM fuel cell system for ferry applications [C]. SAE Paper 2023-24-0145.
- [32] TUSET J K. Modelling and validation of a fuel cell electric bus [D]. Oslo: University of Oslo, 2021.
- [33] 程子枫. 大功率质子交换膜燃料电池热管理系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
CHENG Z F. Research on thermal management system of high-power proton exchange membrane fuel cell [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [34] AHN J W, CHOE S Y. Coolant controls of a PEM fuel cell system [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(1): 252-264.