

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.07.001

考虑运行参数可寻优范围的PEMFC系统净功率优化*

徐寅嵩¹, 李文浩^{1,2}, 杜常清^{1,2}, 颜伏伍^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070)

[摘要] 质子交换膜燃料电池电堆的运行参数对电堆输出性能和空压机、循环水泵和散热风扇等辅助设备的寄生功率都会产生影响, 可通过对电堆运行参数进行优化来实现系统最大净功率输出目标。实际系统受到空压机性能和背压阀调节能力的限制, 阴极运行参数的调节范围存在界限, 本文基于 MATLAB/Simulink 软件建立 62 kW 燃料电池系统模型, 通过仿真分析确定了各负载电流下的参数可优化范围, 采用遗传算法对电堆温度、阴极压力和过氧比进行了优化。结果表明: 在各负载电流下, 提升电堆温度都有利于增加系统净功率, 最优运行温度均为 80 °C。而过氧比和阴极压力在不同的负载电流下的优化方向是不同的; 在低负载电流(50、100 A)下增加过氧比和阴极压力时, 电堆输出功率的增长小于寄生功率, 提供较低的过氧比和阴极压力有利于提升系统净功率; 高负载电流(300 A)下, 低过氧比和阴极压力会限制电堆输出功率, 最低净功率仅为 35.530 kW; 合理增加过氧比和阴极压力后, 获得的最优净功率为 53.271 kW, 通过运行参数优化可实现 49.9% 的净功率提升。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 运行参数优化; 系统净功率; 遗传算法

Optimization of Net Power for PEMFC System Considering the Achievable Range of Operating Parameters

Xu Yinsong¹, Li Wenhao^{1,2}, Du Changqing^{1,2} & Yan Fuwu^{1,2}

1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

2. Wuhan University of Technology, Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070

[Abstract] The operating parameters of the PEM fuel cell stack have an impact on the performance of the stack output as well as the parasitic power of auxiliary devices such as air compressor, recirculation pump and cooling fan. System maximum net power output goals can be achieved by optimizing the operating parameters of the fuel cell stack. For the actual system, constrained by the performance of the air compressor and the regulating capacity of the backpressure valve, the adjustment range of cathode operating parameters is limited. In this paper, the 62 kW fuel cell system model is established based on MATLAB/Simulink. Through simulation analysis, the achievable ranges of parameters optimization under various load currents are determined. Genetic algorithm is employed to optimize the fuel cell stack temperature, cathode pressure, and oxygen excess ratio. The results show that increasing the temperature of the fuel cell stack at various load currents is advantageous for enhancing the system's net power, with the optimal operating temperature being 80 °C. However, the optimization direction for the oxygen excess ratio and cathode pressure varies at different load currents. At low load current (50, 100 A), increasing the oxygen excess ratio and cathode pressure results in a smaller growth in stack output power compared to the parasitic power. Providing lower oxygen excess ratio and cathode pressure is advantageous for enhancing the net power of the system. At high load current (300 A), low oxygen excess ratio and cathode pressure will limit the output power of the stack, with the lowest net power of only 35.530 kW. After the oxygen excess ratio and cathode pressure are reasonably in-

* 国家重点研发计划项目(2022YFB4003703)资助。

原稿收到日期为 2024 年 01 月 12 日, 修改稿收到日期为 2024 年 02 月 22 日。

通信作者: 李文浩, 博士, E-mail: liwh@whut.edu.cn。

creased, the optimal net power is 53.271 kW, and the net power can be increased by 49.9% through the optimization of operating parameters.

Keywords: PEMFC; operation parameter optimization; net power of the system; genetic algorithm

前言

质子交换膜燃料电池作为一种清洁的新型能源,因其具有高电化学效率、低运行温度、快速启动和低污染排放等优点,成为解决能源问题的一个重要的研究方向,得到国家政策的大力支持。质子交换膜燃料电池的适用性非常广泛,在交通运输、移动电源以及工业能源系统等领域都得到广泛使用,在商用车领域的应用已经取得了一定的成果^[1-2]。尽管具有诸多的优点,但同样也面临一些挑战。在质子交换膜燃料电池系统中,需要大量的辅助设备维持电堆运行,如空气压缩机、循环水泵和散热器等,这些辅助设备的寄生功率严重影响了燃料电池的净输出功率和效率。空气供给系统所消耗的功率占电堆输出功率25%之多,因此,对于空气供给系统的运行参数进行优化,可以有效提升系统效率^[3]。通过改变燃料电池运行条件来提升电堆输出性能的同时会增加系统附件设备消耗功率,如何平衡两者,是实现燃料电池系统净功率提升的关键。

李先允等^[4]针对降低寄生功率在燃料电池系统输出功率中的占比、提升净功率输出的问题,采用一种非支配排序遗传算法(NSGA2)进行优化。Tan等^[5]基于MATLAB/Simulink建立了PEMFC的系统级动态模型,分析不同运行条件下的电堆功率和系统效率。利用粒子群算法优化电堆功率和系统的整体效率,得到了系统的最佳运行条件。Yin等^[6]针对电堆温度和过量空气系数等系统运行参数的非线性和高耦合问题,提出了一种双回路多变量协调管理(DLMCM)方法,以实现质子交换膜燃料电池系统净输出功率的提升。Rezk等^[7]采用基于自适应网络的模糊推理系统(ANFIS)建立基于实验数据集的模型,再利用灰狼优化器(GWO)确定最大功率时PEMFC对应的氢气压力、氧气压力、氢气流量和氧气流量的最佳值。Feng等^[8]将神经网络数据驱动代理模型与随机优化算法相结合,实现多变量全局优化,通过优化运行条件,提高了PEMFC的功率密度。Li等^[9]提出了基于指数逼近律的滑模变结构控制(SMVSC)的PEMFC系统最大净功率策略的实时

实现。

针对运行参数的优化问题已经有了很多的研究,但是很多研究多是对单一运行参数进行优化,或者未根据实际条件对运行参数的优化范围进行约束。因此,本文建立了质子交换膜燃料电池系统模型,考虑了空压机、循环水泵以及散热风扇3个主要部件的功耗。针对空气供给系统中质量流量和阴极压力耦合的问题,本文采用前馈解耦的方法,基于静态查找表实现质量流量和阴极压力与空压机转速和背压阀开度之间的映射关系。基于对系统模型的仿真,分析了运行参数变化的约束条件。并利用遗传算法(genetic algorithm, GA)对运行参数进行优化,实现了系统净功率的提升。

1 燃料电池电堆建模

1.1 电压模型

燃料电池的输出电压表示为理论最大电压的热力学电动势和由极化现象所引起的活化损失、欧姆损失以及浓度损失之差:

$$U_{st} = E_{Nernst} - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc} \quad (1)$$

热力学理论电动势用能斯特方程表示:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T_{st} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{st} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (2)$$

式中: T_{st} 为电堆温度,K; p_{H_2} 为氢气分压,bar; p_{O_2} 为氧气分压,bar。

活化损失方程^[10]:

$$U_{act} = U_0 + U_a(1 - \exp(-c_1 i)) \quad (3)$$

式中: U_0 为零电流密度下的电压损失,V; U_a 与电堆温度和氧气分压相关,V; c_1 为常数; i 为电流密度,A/cm²。

U_0 和 U_a 的计算公式如下:

$$U_0 = 0.279 - 1.95 \times 10^{-3}(T_{st} - 298.15) + 9.519 \times 10^{-6} \times T_{st} \left[\ln \left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325} \right) \right] \quad (4)$$

式中: p_{ca} 为阴极压力,bar; p_{sat} 为水的饱和蒸汽

压, bar。

$$U_a = (-1.618 \times 10^{-5} T_{st} + 1.617 \times 10^{-2}) \times \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 + (1.6 \times 10^{-4} T_{st} - 0.166) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-5.919 \times 10^{-4} T_{st} + 0.5696) \quad (5)$$

欧姆损失方程:

$$U_{ohm} = i \times R_{ohm} \quad (6)$$

式中 R_{ohm} 为内部电阻, $\Omega \times \text{cm}^2$, 其计算方法如下。

$$R_{ohm} = \frac{\delta_{mem}}{\sigma_m} \quad (7)$$

式中: δ_{mem} 为质子交换膜厚度, cm; σ_m 是膜水含量 λ_m 和电堆温度的函数, 计算方法如下。

$$\sigma_m = (0.008751 \lambda_m - 0.00257) \exp \left(1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{st}} \right) \right) \quad (8)$$

式中 λ_m 为膜水含量, 取值在 0~14 之间, 与相对湿度相关。

浓度损失方程:

$$U_{conc} = i \left(c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \quad (9)$$

式中 c_2, c_3, i_{max} 为经验参数。

1.2 电堆流道模型

电堆阴、阳极的流道模型由理想气体状态方程和质量守恒定律构建。由质量守恒定律得到各个气体组分的质量流量:

$$\frac{dm_x}{dt} = W_{x,in} - W_{x,out} - W_{x,reacted} \quad (10)$$

式中: m_x 为氧气、氮气和氢气的气体质量, kg; $W_{x,in}$ 为进入流道气体质量流量, kg/s; $W_{x,out}$ 为流出气体质量流量, kg/s; $W_{x,reacted}$ 为反应消耗的氧气和氢气质量流量, kg/s。

$$\frac{dm_w}{dt} = W_{v,in} - W_{v,out} + W_{v,ca,gen} \pm W_{v,mem} - W_{l,ca,out} \quad (11)$$

式中: m_w 为水蒸气的质量, kg; $W_{v,in}$ 为进入流道的水蒸气质量流量, kg/s; $W_{v,out}$ 为流出水蒸气质量流量, kg/s; $W_{v,ca,gen}$ 为阴极反应生成水, kg/s; $W_{v,mem}$ 为水的跨膜传输, 由阳极到阴极, kg/s; $W_{l,ca,out}$ 为生成的液态水, kg/s。

气体分压计算:

$$p_x = \frac{m_x R_x T_{st}}{V_x} \quad (12)$$

式中: p_x 为气体分压; m_x 为气体质量; R_x 为气体常数; V_x 为流道体积。

1.3 膜水合模型

该模型主要用于计算膜水含量和跨膜水传输, 这两个参数主要与电堆电流以及流道内的相对湿度相关。膜水含量 λ_m 的计算方式如下:

$$\lambda_m = \begin{cases} 0.043 + 17.81\phi_m - 39.85\phi_m^2 + 36.0\phi_m^3, & 0 < \phi_m \leq 1 \\ 14 + 1.4(\phi_m - 1), & 1 < \phi_m \leq 3 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\phi_m = 0.5(\phi_{ca} + \phi_{an})$; ϕ_{an} 、 ϕ_{ca} 分别为阳极和阴极流道的相对湿度。

水的扩膜传输有两方面原因造成: 一是氢质子将水分子从阳极拖曳到阴极; 二是由于水的浓度分布差形成的反扩散现象, 使得水分子从阴极到阳极运动。水的跨膜传输速率计算如下:

$$W_{v,mem} = N_{v,mem} \times M_v \times A_{st} \times n \quad (14)$$

式中: M_v 为水的摩尔质量, kg/mol; A_{st} 为膜活性面积, cm^2 ; n 为电堆电池片数。

$$N_{v,mem} = n_d \frac{i}{F} - D_w \frac{c_{v,ca} - c_{v,an}}{\delta_m} \quad (15)$$

式中: n_d 为电渗拖曳系数; D_w 为水的扩散系数。

1.4 电堆模型验证

模型所涉及的相关常量及参数如表 2 所示。为了验证仿真模型的准确性, 将模型仿真数据与 62 kW 电堆额定功率测试数据进行比较。电堆功率从 0 逐渐增加至 63.8 kW, 峰值电流为 300 A, 电流密度 1.06 A/cm²。根据图 1 可知, 仿真数据较好地拟合了测试数据。所建立的模型能够有效地模拟电堆性能随运行参数的变化。

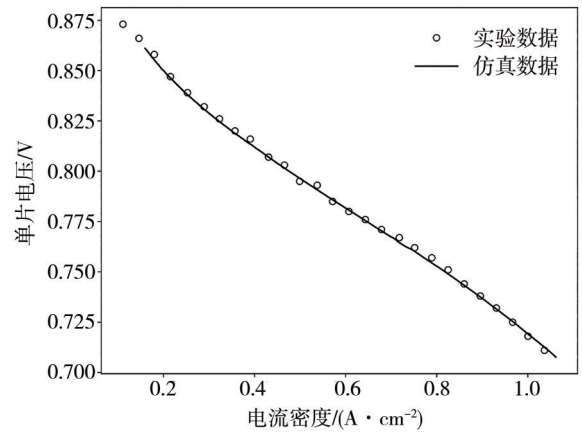


图 1 模型可靠性验证

2 辅助设备建模

质子交换膜燃料电池的附件系统包括空气供给系统、氢气供给系统和热管理系统3大部分。氢气使用高压储氢罐供气,通过阀门控制气体流量。由于供给的是纯净的氢气,且处于高压系统中,因此,阳极一侧的压力和流量调节响应速度快。为了保证交换膜两侧压差最小,防止对质子交换膜造成机械损伤,须控制阳极压力快速跟随阴极压力变化^[11]。而反应所需要的氧气来自于空气,氧气仅占空气的20.9%,为了保证反应的正常进行,须使用空气压缩机为系统提供充足的空气。同时空压机是燃料电池系统的主要耗能部件,故本文将对空压机的性能和功耗进行建模。热管理系统将电堆的运行温度维持在合理的范围内,其主要部件是循环水泵和散热器。这两个部件产生的寄生功率同样会影响系统的输出功率。

2.1 空压机及管道压力模型

空压机的流量-压力比-转速MAP图是空压机的重要性能指标。本文根据蜂巢蔚领动力科技VF-25型空压机的性能测试数据绘制如图2所示的MAP图。基于测得的实验数据,采用多项式拟合的方法获得流量、压力比和转速的函数关系。根据文献[12]采用2阶多项式拟合得到的函数关系如式(16)所示,拟合系数如表1所示。

$$W_{cp} = p_{00} + p_{10}\omega_{cp} + p_{01}P_r + p_{20}\omega_{cp}^2 + p_{11}\omega_{cp}P_r + p_{02}P_r^2 \quad (16)$$

式中: W_{cp} 为空气流量,kg/s; ω_{cp} 为空压机转速,r/min; P_r 为空压机出口和入口压力比。

空压机对入口气体进行压缩,须消耗大量的电堆功率,直接影响电池系统的净功率和效率,其计算公式如下:

$$P_{com} = T_{atm} \frac{C_p}{\eta_{cp}} \left[P_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (17)$$

式中: C_p 为定压空气比热,J/(mol·K); η_{cp} 为空压机效率; γ 为气体的比热容比,空气为1.4。

表1 空压机拟合参数

| | |
|---------------------|----------------------------------|
| $p_{00} = 0.2477$ | $p_{10} = 1.068 \times 10^{-6}$ |
| $p_{01} = -0.2588$ | $p_{20} = -2.679 \times 10^{-5}$ |
| $p_{11} = 0.004527$ | $p_{02} = 0.05998$ |

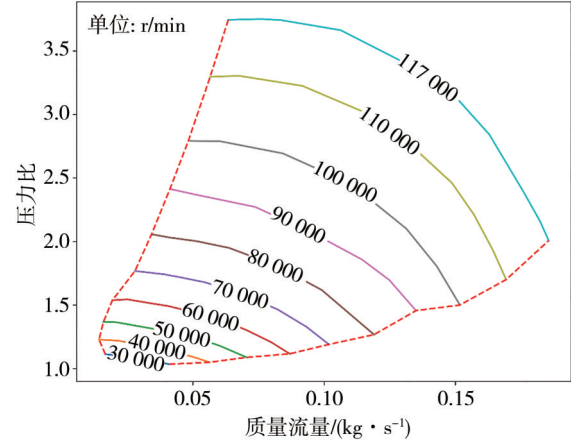


图2 空压机MAP图

空气供给和回流管道内的压力由理想气体状态方程得出:

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R_g}{V_{sm}} (W_{cp} T_{cp,out} - W_{sm,out} T_{sm,out}) \quad (18)$$

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_g T_{rm}}{V_{rm}} (W_{rm,in} - W_{rm,out}) \quad (19)$$

式中: p_{sm} 、 p_{rm} 为气体压力; V_{sm} 、 V_{rm} 为管道容积。

由于回流管路出口通过背压阀与大气相连,背压阀两端压差较大,因此根据非线性喷嘴方程对出口质量流量建模:

$$W_{rm,out} = \begin{cases} \frac{C_D A_T p_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, & \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right) > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{C_D A_T p_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, & \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right) \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: C_D 为流量系数; A_T 为喷嘴截面积; p_{atm} 为大气压力; R 为通用气体常数。将背压阀开度 θ_{vm} 定义为当前喷嘴截面积和最大面积之比^[13],通过背压阀开度调节阴极压力。

2.2 热管理模型

燃料电池中电功率和热量都来自于氢气和氧气的氧化还原反应所释放的能量。反应所释放的总能量与氢气消耗的速率相关,可计算为

$$Q_{\text{total}} = \Delta H \times n \times N_{\text{H}_2, \text{rec}} \quad (21)$$

式中: ΔH 为氢气的焓值, kJ/mol; $N_{\text{H}_2, \text{rec}}$ 为氢气反应速率, mol/s。

燃料电池系统产生的热量可以通过多个途径散失,主要有冷却系统散热、排气散热以及电池与环境的对流换热,其中大部分热量需要由冷却系统散失。综合燃料电池的产热和散热,建立电堆的动态温度模型:

$$Q_{\text{total}} - P_{\text{elec}} - Q_{\text{cool}} - Q_{\text{gas}} = C_{\text{st}} M_{\text{st}} \frac{dT_{\text{st}}}{dt} \quad (22)$$

式中: P_{elec} 为电堆输出电功率; Q_{cool} 为冷却系统散热功率; Q_{gas} 为排气散热功率; C_{st} 为电堆比热容; M_{st} 为电堆质量。

风扇功率为

$$P_{\text{fan}} = \frac{W_{\text{fan}} C_p T_{\text{atm}} \left[\left(\frac{p_{\text{fan}} + p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\eta_{\text{fan}}} \quad (23)$$

式中: W_{fan} 为风扇空气流量; p_{fan} 为风扇的风压; η_{fan} 为风扇的效率。

模型相关参数见表2。

表2 模型相关参数

| 符号 | 参数 | 数值 |
|-----------------------|--------|--------------------------------------|
| c_1 | 经验参数 | 8 |
| c_2 | 经验参数 | 0.7 |
| c_3 | 经验参数 | 2 |
| i_{max} | 最大电流密度 | 1.6 A/cm ² |
| δ_{mem} | 膜厚度 | 1.275×10 ⁻² cm |
| V_{an} | 阳极流道体积 | 1.63×10 ⁻³ m ³ |
| V_{ca} | 阴极流道体积 | 2.85×10 ⁻³ m ³ |
| A_{st} | 膜活性面积 | 282 cm ² |
| n | 电堆总片数 | 300 |
| V_{sm} | 供气歧管体积 | 1.8×10 ⁻³ m ³ |
| V_{rm} | 回流歧管体积 | 1.49×10 ⁻³ m ³ |
| C_D | 流量系数 | 1.24×10 ⁻² |
| A_T | 背压阀截面积 | 2×10 ⁻³ m ² |

热管理系统使用的水泵型号为LQY-P60,该水泵在额定转速6 000 r/min下的额定流量为170 L/min,假设水泵的流量和转速成正比。根据文献[14]中提供的LQY-P60水泵各转速下电流和电压实验数据计算功耗: $P_{\text{pump}} = I \cdot U$ 。

3 结果分析

3.1 运行参数仿真分析

过氧比(oxygen excess ratio, OER)定义为阴极供

给氧气流量和氧气消耗流量之间的比值。在一定的电流密度下,过氧比越高意味着进入阴极流道的空气质量流量越大。由式(12)可知,流道内的氧气分压与氧气质量是正相关的。同时,空气系统的背压阀可以调节流出阴极的气体流量。在过氧比确定的情况下,调节背压阀开度可以调整阴极流道内的压力。为获得过氧比、阴极压力和背压阀开度之间的关系,对MATLAB/Simulink模型进行仿真,收集不同过量空气系数和背压阀开度下的阴极压力数据。过氧比的范围是1~3,步长为0.1。背压阀的开度范围为18%~100%,步长为2.2%。

图3是50 A负载电流下,背压阀开度与过氧比和阴极压力的关系表。通过静态查表的方法来确定一组过氧比和阴极压力所对应的背压阀开度,以实现过氧比和阴极压力的解耦。

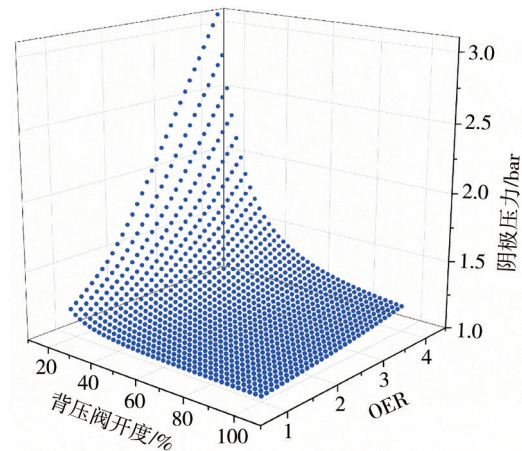


图3 背压阀开度查找表(50 A)

同时,基于仿真所获得的数据分析50 A电流时各过氧比条件下的阴极压力可调节范围。由图4可知,将系统的过氧比控制在1~4之间,则阴极压力的变化范围在1.05~2.92 bar之间。过氧比增大,阴极压力可调节范围也随之增大,每个过氧比都存在一个阴极压力界限。当过氧比为1时,阴极压力可调节范围是1.05~1.26 bar,而过氧比为3时,阴极压力的调节范围则是1.17~3.09 bar。

随着负载电流的增加,相同的过氧比须提供的空气质量流量也会增加。由图5可知,300 A负载电流下的阴极压力明显高于50 A,同时还获得了更大的压力调节范围。过氧比达到3时,阴极压力调节范围内的最小压力为3.43 bar。根据电堆的设计要求,阴极的工作压力应该在1~3 bar之间,所以在高负载电流下,无法达到较大的过氧比。300 A电流时,若要满足设计要求,则过氧比应当小于2.7。

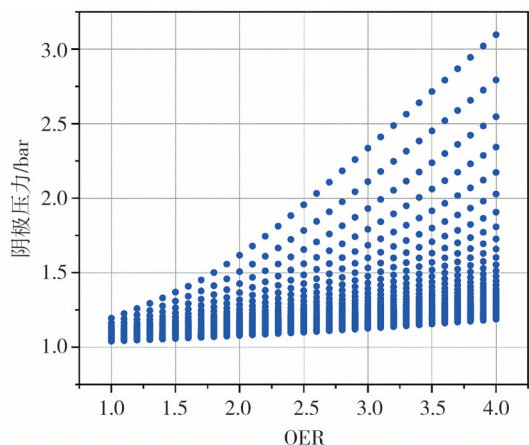


图4 各过氧比下的阴极压力调节范围(50 A)

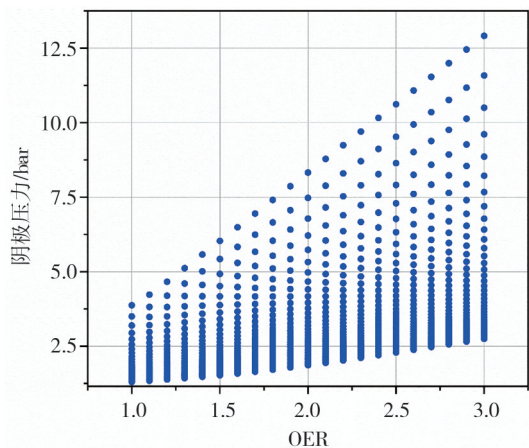


图5 各过氧比下的阴极压力调节范围(300 A)

反应物压力是影响燃料电池输出电压的直接因素,更高的反应物压力意味着更高的输出电压。图6反映了不同过氧比下,阴极压力对单电池电压的影响。过氧比较低时,阴极压力并不会对输出电压产生显著的影响。这是因为实际对输出电压产生影响的是氧分压,如果流道内的氧气被消耗殆尽,即使增大阴极压力,也不会增加氧分压。在低负载电流(50 A)下,过氧比至少需要大于2,阴极压力才会对输出电压产生明显影响。

与低负载电流相比,在高负载电流下,增大阴极压力和过氧比会对燃料电池的输出电压有更大的提升。图7是300 A负载电流时,阴极运行参数与单电池电压的关系曲线。从图中可以看出,电压的提升存在一个极限值,最大电压大约为0.8 V,若继续增加压力,电压反而开始下降。这是因为氧分压虽然提升能斯特电压,但是同时阴极压力也会导致活化损失增加。阴极压力在4~5 bar之间时,电池电压达

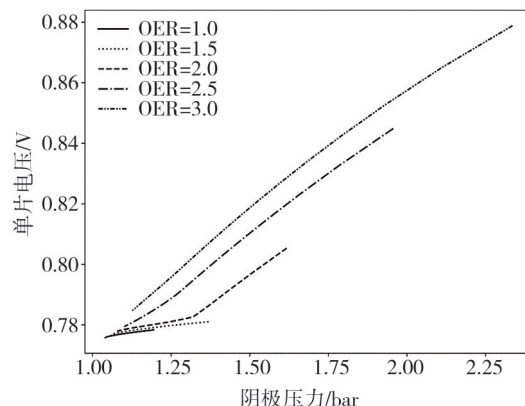


图6 阴极运行参数对电池输出电压的影响(50 A)

到峰值。过氧比大于2.5之后,电压性能曲线的差异较小,因此就电池输出电压而言,没有必要提供更大的过氧比。

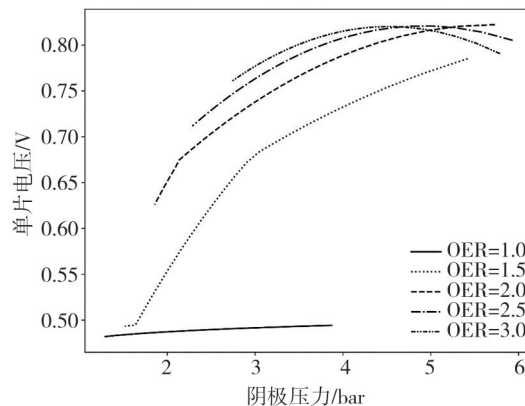


图7 阴极运行参数对电池输出电压的影响(300 A)

电堆温度对于燃料电池的性能也会产生影响。图8是300 A负载电流下,过氧比为3时,不同电堆温度下的电池输出电压。随着电堆温度的增加,相同压力下的电池输出电压得到了提升。因此低温会限制燃料电池的输出性能。

3.2 参数优化边界条件分析

空气供给系统的压力和质量流量等运行条件是由空压机提供的,而空压机本身的性能和工作范围一定程度上限制了阴极压力和过氧比的调节。从空压机的MAP图可知,VF-25型空压机的最大压比约为3.7,质量流量为0.063 5 kg/s。随着质量流量的增加,压比还会不断减小。而系统的需求是质量流量增大,提供的压力也要随之增加。同时,由于喘振线的存在,空压机无法在任意的质量流量和压比条件下工作。

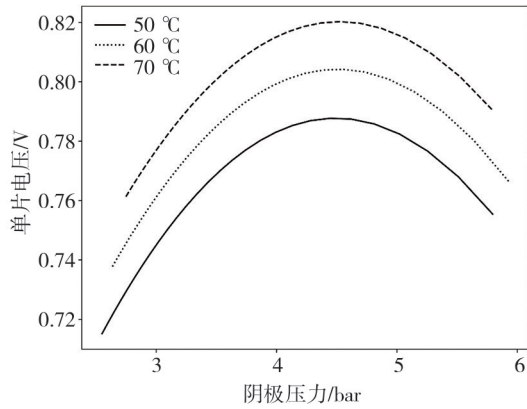


图8 电堆温度对电池输出电压的影响(300 A)

由于空压机在各个质量流量下都存在压比的限制,因此为了满足空压机工作条件,须重新确定阴极能够达到的运行压力。图9是50 A负载电流时,空压机所能提供的过氧比和阴极压力的调节范围。要提供一定的出口压力时,空压机存在一个质量流量下限值。因此,在50 A的低负载电流下,至少应该达到2.3以上的过氧比。

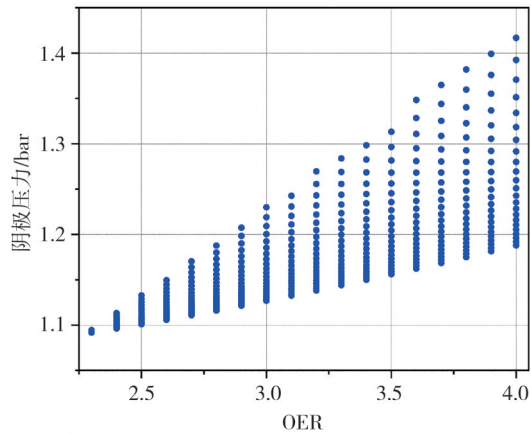


图9 空压机性能限制下的阴极运行参数范围(50 A)

图10是300 A负载电流下,空压机所能提供的阴极运行条件。可以看出其压力变化范围远小于理论上阴极所能达到的压力,所能提供的最大压力约为3.5 bar。而电堆输出电压的极限出现在4 bar之后,所以空压机性能以及电堆结构的限制,制约了电堆输出性能的进一步提升。质子交换膜燃料电池的正常工作温度通常为50~90 °C,过高的温度会加剧电堆内部液态水的蒸发,导致质子交换膜脱水,从而阻碍氢离子的传导,并且会损害膜的寿命,故将电堆温度的优化范围确定为50~80 °C^[4]。各个电流下的运行参数优化范围如表3所示。同时设置约束条

件,保证质量流量和压力的工作点在空压机喘振线以内。

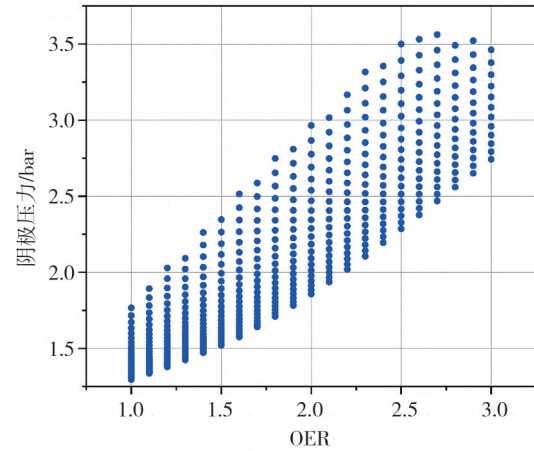


图10 空压机性能限制下的阴极运行参数范围(300 A)

表3 运行参数优化范围

| 负载电流/A | 阴极压力/bar | OER |
|--------|-----------|-------|
| 50 | 1.09~1.42 | 2.3~4 |
| 100 | 1.09~1.79 | 1.2~3 |
| 200 | 1.17~2.98 | 1~3 |
| 300 | 1.29~3 | 1~2.7 |

3.3 运行参数的优化

压力、质量流量和温度等运行参数的改变会使燃料电池的输出性能得到提升,但与此同时会增加辅助设备的寄生功率。通过对运行参数进行优化,实现输出功率提升和寄生功率增加之间的平衡,使得净输出功率最大化。影响燃料电池性能的运行参数众多,根据文献[15]中对参数敏感性的分析,优化阴极压力、温度和过量空气系数3个显著影响电堆输出性能的参数,阳极压力跟随阴极压力变化,并且使阴极和阳极气体的相对湿度保持在95%。

空压机是燃料电池系统的最主要耗能部件,其消耗的功率约占电池输出功率的20%~30%,在全部的辅助设备寄生功率中约占80%^[16]。因此,空压机是影响燃料电池净输出功率的决定因素。基于仿真数据,对燃料电池的净功率进行分析,该净功率仅考虑空压机功率,图11和图12是两个负载电流下阴极运行参数对净功率的影响。在低负载电流的情况下,增加过氧比和阴极压力所带来的电堆功率提升远小于空压机功率的增加。因此,增加过氧比和阴极压力反而会导致净功率下降。为了获得较大的净输出功率,在低负载电流的工况下,阴极的过氧比和

压力应尽可能的低。

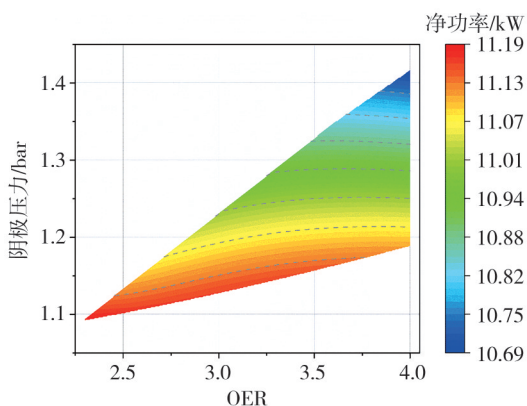


图 11 阴极运行参数对净功率的影响(50 A)

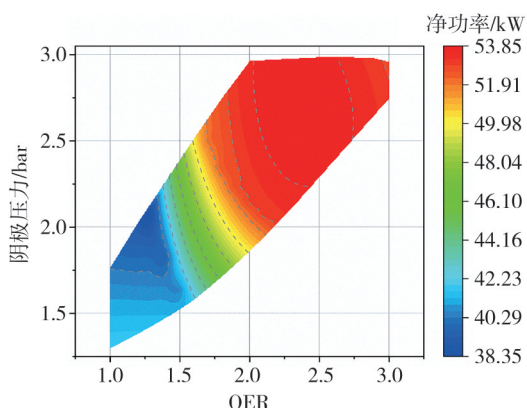


图 12 阴极运行参数对净功率的影响(300 A)

随着负载电流的增加,过氧比和阴极压力能够明显提升电堆的输出功率。此时,电堆输出功率的提升会高于空压机功率的增加,调节电堆的过氧比和阴极压力会使得电堆输出的净功率提升,对参数优化可获得最大的净功率。

为了得到最大的净功率,使用遗传算法对阴极压力、过氧比和温度这3个运行参数进行优化,以确定各负载电流下最优运行参数。系统的寄生功率包括了空压机功率、冷却水泵功率和散热风扇功率,优化目标为净功率最大化。

遗传算法是一种模拟达尔文生物进化论的计算方法,用于解决优化和搜索问题。它是一种进化算法,通过模拟自然选择和遗传机制来寻找问题的最优解或近似最优解。遗传算法的流程如图13所示。首先要对个体进行初始化,这些个体代表问题的潜在解决方案。个体是由几个类似于基因的可变向量组成,对应于待优化的参数变量,也就是过氧比、阴

极压力和温度。在已经确定的参数优化区间内随机生成100个个体。然后对个体进行适应度评估,每个个体都被赋予一个适应度评分,评估其在解决问题时的效果,以每一组运行参数的净功率作为个体的适应度评分。遗传算法采用选择、交叉和变异3种遗传算子来产生新的种群。根据每个个体的适应度,选择一些个体作为“父代”,以用于产生下一代。通常,适应度较高的个体被选中的概率较大,但也要保留一定程度的多样性。选中的父代个体进行交叉操作,产生新的个体。交叉操作模拟了基因的重组过程,将父代的染色体组合起来生成子代。对新生成的个体进行变异操作,引入一定程度的随机性。变异操作模拟了基因突变的过程,有助于保持种群的多样性,避免陷入局部最优解。用新生成的个体替换掉上一代中的一部分个体,形成新的种群。重复以上步骤,直到满足终止条件,本文设置终止条件是最大迭代次数,优化算法参数设置如表4所示。

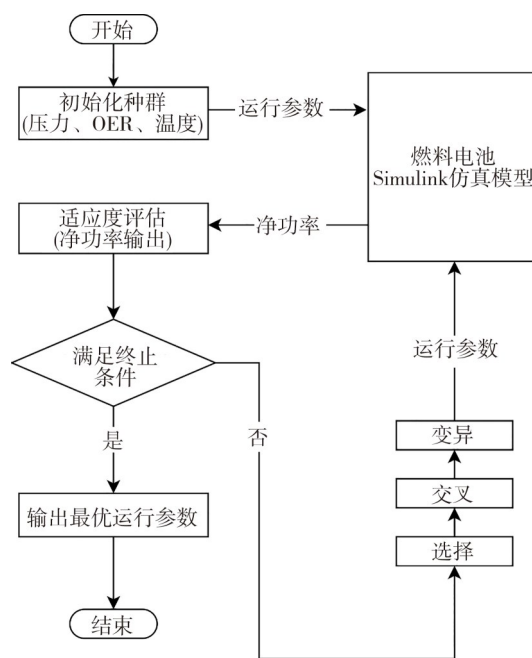


图 13 遗传算法流程图

表 4 算法参数设置

| 优化变量 | 种群规模 | 交叉概率 | 变异概率 | 迭代次数 |
|------|------|------|------|------|
| 3 | 100 | 0.9 | 0.1 | 1000 |

对50、100、200和300 A 4个负载电流分别使用遗传算法优化。遗传算法产生的种群个体表示不同的运行参数,将这些参数传入到燃料电池系统的

Simulink 模型中。通过调用仿真获取参数所对应的系统净功率,将该净功率返回给遗传算法,用于评价个体适应度。

参数优化结果如图 14 所示。4 个负载电流的最优净功率都集中在温度较高的区域,随着温度的增加,净功率不断递增。最优的电堆运行温度均为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,增加温度能提升电堆的输出功率,但是对寄生功率影响较小。50 A 负载电流时,最优净功率集中在 OER 和阴极压力较低的区域,增大 OER 和阴极

压力所获得的电堆输出功率提升不及寄生功率的增大。由表 5 可知,2.43 的 OER 以及 1.15 bar 的阴极压力为最优运行参数,这是参数优化区间内的较低值。100 A 负载电流时,增加 OER 和阴极压力已经可以使系统净功率得到提升,因此,OER 和阴极压力在高和低两个区域内都有相对较大的净功率。但是最优净功率的运行参数依然是低的 OER 和阴极压力。负载电流至少需要高于 100 A 才能通过提升质量流量和压力来获得最优的净功率。

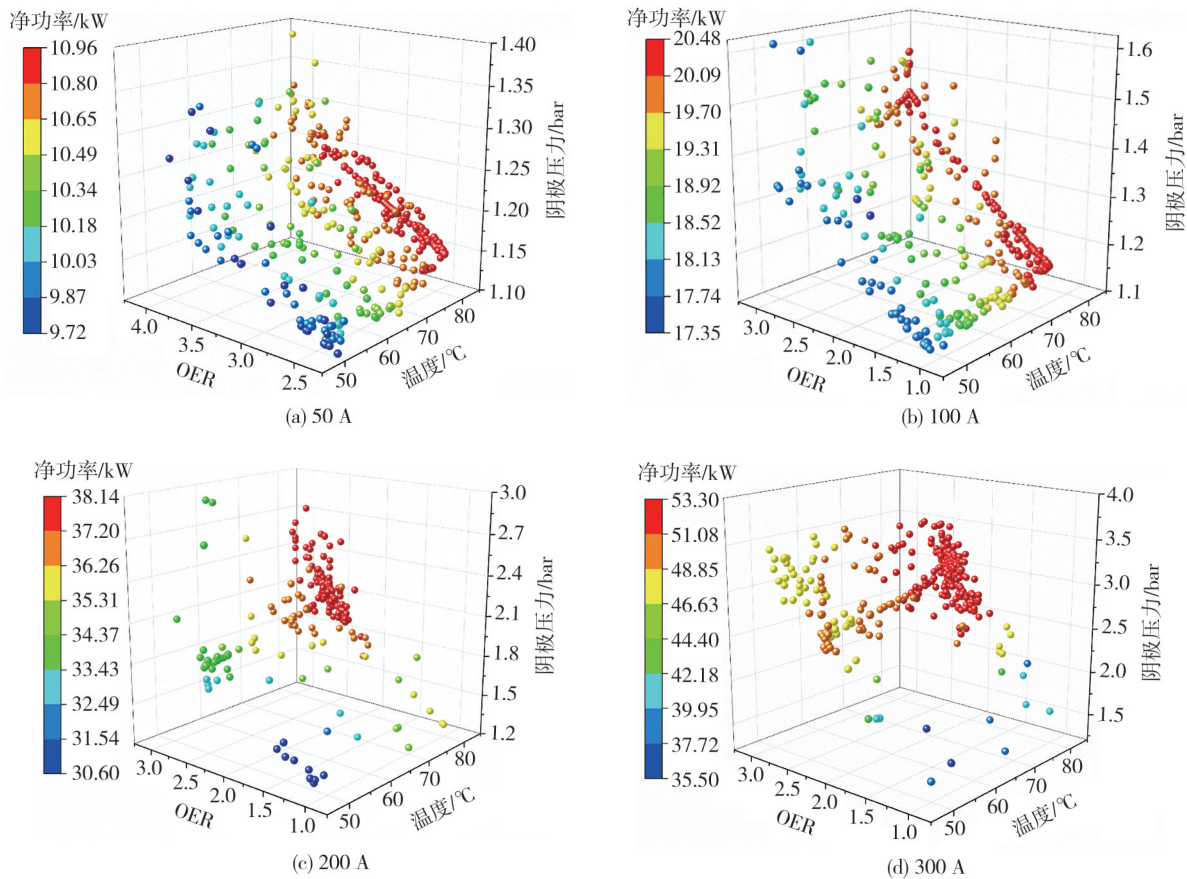


图 14 遗传算法优化结果

在 200 和 300 A 两个高负载电流工况下,合理增加 OER 和阴极压力获得很大的系统净功率提升。由图中可以看出,这两个负载电流下的最优净功率都集中在 OER 和阴极压力相对较大的区域。较低的 OER 和阴极压力会严重降低电堆的输出功率使得系统净功率下降。

50 A 负载电流时,优化范围内的最低净功率为 9.720 kW,通过优化,降低了 OER 及阴极压力,提升运行温度,获得了 12.7% 的净功率提升。100 A 负载电流时的最低净功率为 17.351 kW,优化后为

20.740 1 kW,净功率提升了 19.5%。

高负载电流下,最低净功率的各运行参数都是较低值。200 A 负载电流的最低净功率为 31.207 kW,300 A 负载电流为 35.530 kW,优化后分别提升了 22.2% 和 49.9%。负载电流越高,其系统净功率变化范围也越大,对运行参数进行优化有更大的净功率提升。300 A 负载电流的最低净功率甚至要低于 200 A 时的最优净功率,因此,在高负载电流的工况下,对运行参数进行优化是很有必要的。

表5 参数优化结果

| 负载电流/A | OER | 阴极压力/bar | 温度/°C | 净功率/kW |
|--------|------|----------|-------|--------|
| 50 | 2.43 | 1.15 | 80 | 10.951 |
| 100 | 1.21 | 1.15 | 80 | 20.741 |
| 200 | 2.52 | 2.11 | 80 | 38.129 |
| 300 | 2.29 | 2.97 | 80 | 53.271 |

4 结论

本文建立了质子交换膜燃料电池系统仿真模型,该模型采用半机理半经验方法建立,结合了电化学习理论、流体动力学、传热学等基本原理,以及实验数据拟合得到的参数。既有物理原理对电池内部的物质传输和化学反应等过程的描述,同时又通过调整经验参数来匹配实际测试数据。因此本文的优化方法是对燃料电池系统运行参数进行优化的通用方法。文中相关的模型参数是基于62 kW燃料电池系统设定的,并对该系统的运行参数进行了优化,主要结论如下。

(1)背压阀开度对阴极压力的调节是有限的,调节范围和过氧比相关。负载电流和过氧比的增大,都会导致阴极压力升高,同时调节范围也会增大。空压机的增压能力有限,这限制了阴极内部的压力。

(2)高负载电流时,增大过氧比和阴极压力可获得更大的输出功率提升。且电池输出电压存在极限值,过大的阴极压力和过氧比会导致输出电压下降。

(3)阴极运行参数在不同的负载电流下呈现出不同的优化方向。在低负载电流时,尽可能低的过氧比和阴极压力可获得最优的净功率。而高负载电流时,合理增加过氧比和阴极压力有利提升净功率。各个负载电流下增加运行温度都有利于提升净功率。

参考文献

- [1] 方川,袁殿,邵扬斌,等.面向冬奥示范的新一代燃料电池系统技术突破[J].汽车工程,2022,44(4):535-544.
FANG C, YUAN D, SHAO Y B, et al. Technical breakthrough of new generation fuel cell system for winter olympics application environment [J]. Automotive Engineering, 2022, 44 (4) : 535-544.
- [2] 朱成,刘頔,滕欣余,等.新能源汽车综合经济性对比分析及预测研究[J].汽车工程,2023,45(2):333-340.
ZHU C, LIU D, TENG X Y, et al. Comparative analysis and forecast research on comprehensive economy of new energy vehicles [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(2): 333-340.

- [3] TIRNOVAN R, GIURGEA S. Efficiency improvement of a PEM-FC power source by optimization of the air management [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(9): 7745-7756.
- [4] 李先允,冯瀚飞.基于NSGA2算法的燃料电池系统净功率优化[J].电源技术,2023,47(1):83-87.
LI X Y, FENG H F. Net power optimization of fuel cell system based on NSGA2 algorithm [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(1): 83-87.
- [5] TAN J, HU H, LIU S, et al. Optimization of PEMFC system operating conditions based on neural network and PSO to achieve the best system performance [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(84): 35790-35809.
- [6] YIN L, LI Q, BREAZ E, et al. Net power enhancement of PEM-FC system based on dual loop multivariable coordinated management [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023.
- [7] REZK H, WILBERFORCE T, SAYED E T, et al. Finding best operational conditions of PEM fuel cell using adaptive neuro-fuzzy inference system and metaheuristics [J]. Energy Reports, 2022, 8: 6181-6190.
- [8] FENG S, HUANG W, HUANG Z, et al. Optimization of maximum power density output for proton exchange membrane fuel cell based on a data-driven surrogate model [J]. Applied Energy, 2022, 317: 119158.
- [9] LI Q, YANG W, YIN L, et al. Real-time implementation of maximum net power strategy based on sliding mode variable structure control for proton-exchange membrane fuel cell system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6 (1) : 288-297.
- [10] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design [M]. Springer Science & Business Media, 2004.
- [11] ZHANG B, HAO D, CHEN J, et al. Modeling and decentralized predictive control of ejector circulation-based PEM fuel cell anode system for vehicular application [J]. Automotive Innovation, 2022, 5(3): 333-345.
- [12] 贾玉茹.氢燃料电池发动机进气系统建模与控制策略研究[D].太原:太原理工大学,2021.
JIA Y R. Research on modeling and control of hydrogen fuel cell engine intake system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [13] 杨朵.燃料电池空气供给系统控制与故障诊断策略研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
YANG D. Research on control and fault diagnosis of fuel cell air supply system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [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,2023.
PENG S H. Research of control strategy on thermal management system of proton exchange membrane fuel cell [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.

(下转第1176页)