DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.171 **中图分类号**：TP308; P754 **文献标志码**：A

海底数据中心用 SOFC 热管理方法研究

蒋 鹏[1](中国电源学会会员)，陈 鑫[1](中国电源学会会员)，周海峰[1,2]，
陈星汝[1]，郑东强[3]，黄金满[4]
(1.集美大学轮机工程学院，厦门 361021；2.福建省船舶与海洋工程重点实验室，厦门 361021；
3.集美大学海洋装备与机械工程学院，厦门 361021；4.厦门安麦信自动化科技有限公司，
厦门 361021)

摘要：热管理是保证海底数据中心正常运作的一项重要技术。针对海底数据中心特殊的工作环境，将固体氧化物燃料电池 SOFC(solid oxide fuel cell)作为海底数据中心的应急电源，改进了以海水为唯一冷却液的 SOFC 热管理系统模型。然后建立了 SOFC 总散热量模型和动态热模型，采用遗传算法优化用于 SOFC 的模糊控制策略，并基于 MATLAB 对非支配排序遗传算法 NSGA-Ⅱ(non-dominated sorting genetic algorithm-II)和其他算法的实施效果进行对比。最后在仿真实验中对不同电压下电堆温度分布和平均电流密度进行分析，实验结果验证了所提的改进热管理方法能够有效提高海底数据中心 SOFC 系统的散热效率，保证其安全运行，有利于提高海底数据中心运行的稳定性。

关键词：海底数据中心；固体氧化物燃料电池；模糊-遗传算法；水冷散热

Research on SOFC Thermal Management Method for Submarine Data Center

JIANG Peng[1], *Member, CPSS*, CHEN Xin[1], *Member, CPSS*, ZHOU Haifeng[1,2], CHEN Xingru[1],
ZHENG Dongqiang[3], HUANG Jinman[4]
(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China; 3. School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 4. Xiamen Anmaixin Automation Technology Co., Ltd., Xiamen 361021, China)

Abstract: Thermal management is an important technology for ensuring the normal operation of submarine data centers. Aimed at the special working environment of a submarine data center, the solid oxide fuel cell (SOFC) is used as its emergency power source, and an SOFC thermal management system model with seawater as the only coolant is improved. Then, the total heat dissipation model and dynamic thermal model of SOFC are established, the fuzzy control strategy used for SOFC is optimized by a genetic algorithm, and the implementation effects of non-dominated sorting genetic algorithm-II(NSGA-II) and other algorithms are compared based on MATLAB. Finally, the temperature distribution and average current density of the power stack under different voltages are analyzed in simulation experiments. Experimental results verify that the improved thermal management method can effectively improve the heat dissipation efficiency of the SOFC system in the submarine data center and ensure its safe operation, which is helpful for improving the operation stability of the submarine data center.

Keywords: Submarine data center; solid oxide fuel cell (SOFC); fuzzy genetic algorithm; water cooling and heat dissipation

收稿日期：2022-12-23；**修回日期**：2023-02-28，2023-03-14；
录用日期：2023-03-23；**网络首发日期**：2023-06-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51179074)；福建省自然科学基金资助项目(2021J01839)；福建省大学生创新创业训练资助项目(202210390056)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51179074; Natural Science Foundation of Fujian Province under the grant 2021J01839; Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students in Fujian Province under the grant 202210390056

互联网时代，数据中心为互联网的正常运作提供基本保障[1-2]。当下社会正处于信息化快速发展阶段，对数据分析和云计算服务等需求旺盛，数据中心作为大型的能源消耗者[3-6]，在土地、能源等方面资源矛盾突出。海底数据中心可以有效解决占地问题，利用海水温度低、比热容大的优势对数据中心进行冷处理[7]，达到降温的目的[8]。但由于海底数据中心的发展刚起步，能量管理和散热处理等问题依然是研究的重点和难点[9]。

应用在海底数据中心中的固体氧化物燃料电池 SOFC(solid oxide fuel cell)是 1 种新型绿色储能系统[10-11]，在海底中具有稳定性好、发电效率高、原材料取材简单、联合发电时发电效率可高达 80%以上等优点[12-13]，应用在海底数据中心十分合适[14-15]。当前主要采用通入空气[16]或者利用 NH_3 分解吸收[17]热量的方式对 SOFC 进行散热，但在海底缺氧的环境下传统 SOFC 散热具有局限性。文献[18]首先提出了在 SOFC 电池连接件下侧插入水冷导管，利用饱和水[19]相变传热控制 SOFC 的温度分布，模拟结果表明，水冷导管可使管式 SOFC 的温差由 295 K 降至 62 K，平板式 SOFC 的温差由 185 K 降至 26 K。文献[20]开发了一个综合的方法来设计一个高效的小通道冷却系统，其中包括热力学、流体动力学和结构分析，研究结果表明：温差从 8.087 8 K 减小到 7.626 7 K，减小了 5.70%；标准温度偏差从 2.134 6 K 减小到 2.117 2 K，减小了 0.82%；压降从 302.14 Pa 减小到 167.60 Pa，减小了 44.53%。文献[21]采用管道作为制冷介质来冷却电池组，并利用 GA 代码对影响锂离子电池组冷却的因素进行了研究和优化，优化了管径和进气速度，以增加冷却系统的传输单元数 NTU(number of transfer units)。文献[22]将遗传算法 GA(genetic algorithm)和粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法与模糊逻辑相结合，提出了传热问题的多目标优化方法。文献[23]提出了基于工况识别的 FLC 策略优化，采用遗传算法对 FLC 隶属度函数的中心和宽度分别进行优化，仿真得到的等效耗氢量分别降低了 16.55%和 40.50%，但忽略了系统的安全性和稳定性。文献[24]提出了 1 种新型热阻抗测试系统及控制策略，通过数字信号处理器及温控散热器共同实现了高效准确的热阻抗测量，提高了试验效率，并搭建试验样机，验证了测试系统及控制方法的有效性和可重复性。

综合上述分析，由于目前关于海底数据中心 SOFC 水冷热管理系统的相关研究有限，基于现有的海底数据中心结构，本文改进了适用于海底数据中心的 SOFC 热管理系统，采用海水对电堆进行散热冷却，建立 SOFC 总散热量模型和动态热模型 2 个目标函数，并利用改进的模糊−遗传算法解决该目标问题。

1 SOFC 系统模型

1.1 SOFC 系统组成

本文研究的 SOFC 系统由核心部分堆栈和堆栈周围的辅助设备，即：空气压缩机、空气换热器、燃料换热器、转化炉、蒸汽发生器、烟囱和燃烧室等组成，电堆和辅助设备相互作用，以满足负载要求。系统操作流程为：①甲烷经燃料热交换器预热后，与蒸汽发生器产生的蒸汽在重整炉内进行重整反应，该过程产生富氢混合气体；②混合气体送入堆栈的阳极通道，经空气热交换器预热的空气流入堆栈的阴极通道，它们在堆内发生电化学反应产生电能；③阳极剩余的混合气体和阴极过量的空气，在燃烧室中充分燃烧，与风机新补充的空气混合，产生高温废气；④高温废气在内部交换能量后排放到外部。海底数据中心 SOFC 系统基本结构如图 1 所示。

本文搭建的 SOFC 系统动态模型遵循以下假设：

(1)系统燃料入口成分：燃料采用甲烷和水蒸气，甲烷和水蒸气之比为 0.4；

(2)在仅考虑空气中氧气和氮气的情况下，氧气的含量为 21%且氮气的含量为 79%；

(3)SOFC 系统工作平稳，具有一定的稳定性；

(4)SOFC 电堆阴阳极出口气体温度与电堆内部温度相等；

(5)重整过程与水汽的置换反应处于相对的平

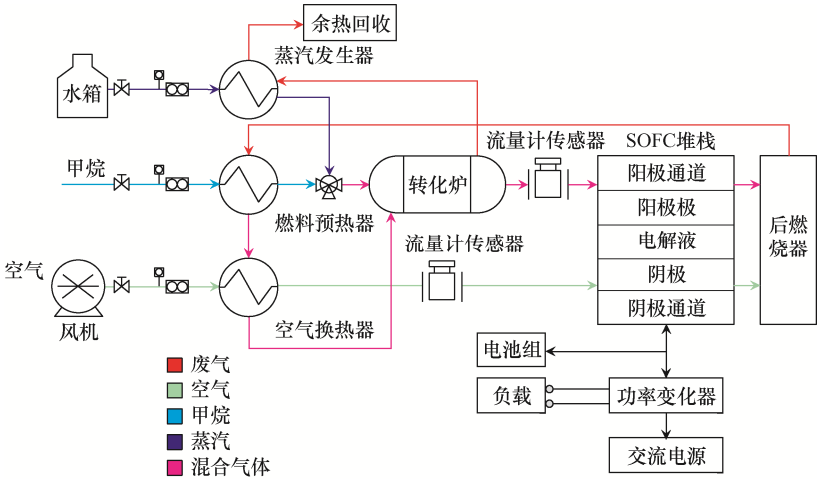


图 1　SOFC 系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of SOFC system

衡状态；

(6)所有可燃气体在后燃烧器中完全燃烧。

1.2 SOFC 热管理系统模型

本文设计的 SOFC 热管理系统模型由冷却液泵、可调节流阀、温度传感器、冷却液管和电堆组成。在海底数据中心运行的过程中，SOFC 提供电力的同时会产生大量的热量，为了使电堆工作温度在合理的范围内，需要冷却液泵和散热器一起工作来将多余的热量带走。由于海底数据中心一般放置在水下 50 m 左右位置，海水温度长期处于较低且恒定的状态，可以很好地为电池散热系统提供冷却液。

本文假设其他辅助系统处于正常工作状态下，不影响电堆的工作温度，SOFC 热管理系统中，冷却液泵从海洋中抽取海水作为冷却液，电堆产生的热量被冷却液泵通过控制冷却液流量进行降温，然后将冷却液直接排到海洋环境中。SOFC 热管理系统示意如图 2 所示。

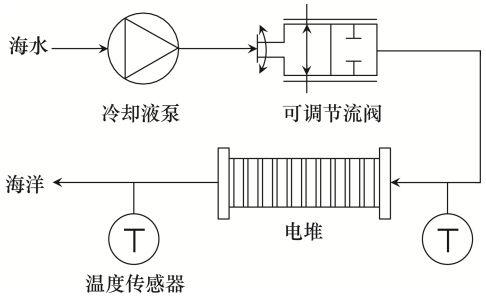


图 2　SOFC 热管理系统示意

Fig. 2 Schematic of SOFC thermal management system

1.3 SOFC 动态模型

1.3.1 SOFC 总散热量模型

根据牛顿冷却定律，可以得到电池与冷却液发生对流传热散热总热量计算公式为

$$Q_S = hA(T_b - T_f) \tag{1}$$

式中：Q_S 为电池散热热量；h 为流体与固体接触表面间的对流换热系数；A 为换热面积；T_b 为电池的温度；T_f 为冷却液温度。

对于冷却管道传热的计算，其对流传热系数可用努赛尔数 Nu 求得，Nu 可以代表对流传热系数与流体导热系数之间的数值关系。本文采用方管对 SOFC 进行散热，则方管内电池与冷却液之间的对流传热系数 h 与努赛尔数 Nu 的关系为

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \tag{2}$$

式中：d 为流体管道的当量直径，$d = 2ab/(a+b)$，其中 a 为方管的宽度，b 为方管的高度；λ 为流体的导热系数。

由于海水处于紊流状态且无相变湍流，海水动力黏度较小，故采用迪图斯-贝尔特公式[25]来计算努赛尔数 Nu，有

$$Nu = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \left(\frac{\mu_f}{\mu_b}\right)^{0.11} \tag{3}$$

$$Re = \frac{ud}{v_f} \tag{4}$$

式中：Re 为管内流体雷诺数；Pr 为管内流体普朗特数；μ_{f}、μ_{b} 分别为按流体平均温度和管壁温度计算的流体动力黏度；u 为管内流体的平均速度；v_{f} 为管内流体的运动黏度。

由式(2)~(4)可得，电池与冷却液之间的对流传热系数 h 与方管内冷却液流速 u 之间的关系为

$$h=\frac{0.023Pr_{\mathrm{f}}^{0.4}\mu_{\mathrm{f}}^{0.11}\lambda}{\mu_{\mathrm{b}}^{0.11}v_{\mathrm{f}}^{0.8}d^{0.2}}u^{0.8} \tag{5}$$

其中，冷却液的热物性参数 Pr_{f}、v_{f}、μ_{f} 均可通过查询冷却液热物理性能参数表中管内流体平均温度后得到，μ_{b} 可通过查询流体黏度随温度对照表中的管壁附近流体温度后得到。此外，方管的固定尺寸 a、b 在电池工作期间不会发生改变，则对流换热系数 h 主要是关于冷却液流速 u 的函数。令

$$e=\frac{0.023Pr_{\mathrm{f}}^{0.4}\mu_{\mathrm{f}}^{0.11}\lambda A}{\mu_{\mathrm{b}}^{0.11}v_{\mathrm{f}}^{0.8}d^{0.2}} \tag{6}$$

将式(5)和(6)代入式(1)中可得，电池散热模型中电池散失的总热量为

$$Q_{\mathrm{S}}=-e(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{f}})u^{0.8} \tag{7}$$

1.3.2 SOFC 的动态热模型

由于能量守恒公式和质量守恒公式具有形式上的一致性，此处给出了该公式的统一形式。通过围绕燃料电池堆进行能量平衡，得到电池温度 T_{s} 的动态模型，其能量守恒方程公式为

$$\begin{aligned}m_{\mathrm{s}}\overline{C}_{\mathrm{ps}}\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t}=&q_{\mathrm{an}}^{\mathrm{in}}\left[\sum_{i=1}^{4}(x_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{in}}-h_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{o}})\right]-\\&\sum_{i=1}^{4}h_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{o}}q_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{o}}+q_{\mathrm{ca}}^{\mathrm{in}}\left[\sum_{i=1}^{3}x_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{in}}(h_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{in}}-h_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{o}})\right]-\\&\sum_{i=1}^{3}h_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{o}}q_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{o}}-P_{\mathrm{dc}}\end{aligned} \tag{8}$$

式中：m_{s}、$\overline{C}_{\mathrm{ps}}$ 分别为不含气体的燃料电池材料的质量和平均比热；$q_{\mathrm{an}}^{\mathrm{in}}$、$q_{\mathrm{ca}}^{\mathrm{in}}$ 分别为阳极、阴极入口总摩尔流量；$q_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{o}}$、$q_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{o}}$ 分别为阳极、阴极出口第 i 组分的摩尔流量；$x_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{in}}$ 为阴极入口第 i 组分的摩尔分数；$h_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{in}}$ 为阴极入口第 i 组分的偏摩尔焓；$h_{\mathrm{an},i}^{\mathrm{o}}$、$h_{\mathrm{ca},i}^{\mathrm{o}}$ 为阳极、阴极出口第 i 组分的偏摩尔焓；P_{dc} 为燃料电池的直流功率。

在理想气体的假设下，偏摩尔焓 h_i 的计算公式为

$$h_i=h_i^{\mathrm{ref}}+\int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T}c_{\mathrm{p},i}(u)\mathrm{d}u \tag{9}$$

式中：h_i^{ref} 为组分 i 在参考温度 T_{ref} 下的参考偏摩尔焓；T 为电池实际温度；$c_{\mathrm{p},i}$ 为比热系数，$c_{\mathrm{p},i}$ 在标准参考表中均有涉及，其关系式为

$$c_{\mathrm{p},i}=a_i+b_iT+c_iT^2+d_iT^3 \tag{10}$$

式中，a_i、b_i、c_i、d_i 为组分 i 的定压摩尔比热容多项式拟合系数。

燃料电池(电堆)的直流输出功率 P_{dc} 计算公式为

$$P_{\mathrm{dc}}=V_0I_0 \tag{11}$$

式中，V_0 和 I_0 分别为电堆/直流端电压和输出电流。

2 基于模糊-遗传算法的控制优化

2.1 算法总体设计

在模糊管理系统中，模糊控制的性能取决于各变量隶属度函数的构造和模糊规则的合理性。传统的模糊控制器的规则提取和维护依赖于人工专家的经验和知识，人工工作量大、主观性强，在模糊子集的划分和模糊规则的制定上存在主观的缺陷，难以实现在客观意义上的最优化。模糊系统结构示意如图 3 所示。

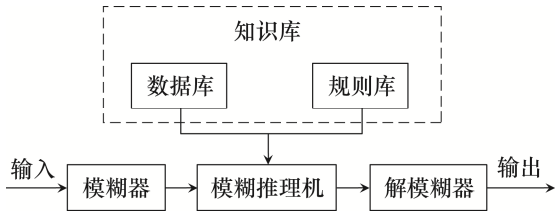


图 3 模糊系统示意

Fig. 3 Schematic of fuzzy system

遗传算法根据自然选择和遗传机制构造的搜索算法，具有较强全局搜索能力，且不受所要解决问题的复杂性和不依赖于目标函数导数的影响。本文进一步研究使用遗传算法进行全局优化，将 SOFC 的总散热量和温度变化量作为优化目标，采用多目标遗传算法解决此目标优化的问题。

2.2 编码和初始种群的构建

设驱动负载的需求功率 P_{n}、蓄电池的荷电状态

SOC(state of charge)、燃料电池的需求功率 $P_{\mathrm{fc_out}}$ 的隶属度函数参数分别为基因段 $X_1(\sigma,c)$、$X_2(\sigma,c)$、$Y(\sigma,c)$，其中 σ 和 c 为高斯型隶属度函数，采用实数编码的方式。2 个输入变量的模糊论域中分别配置有 5 个模糊子集，包括输入的所有排列组合的 25 种情况，即涵盖了所有可能的输入状态。因此，只需将输出变量的索引号编码，即可将矩阵 $\boldsymbol{G}$ 中的第 3 列编码。设 $\boldsymbol{G}=[\boldsymbol{g}_1,\boldsymbol{g}_2,\boldsymbol{g}_3,\boldsymbol{g}_4,\boldsymbol{g}_5]$，使 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{g}_3^{\mathrm{T}}$，则个体基因型的构成为

$$\boldsymbol{v}=[X_1,X_2,Y,\boldsymbol{W}] \tag{12}$$

所以总的基因编码长度为 65，初始种群记为 $V=\{v_k\}_{k=1}^{40}, v_k\in U$，$U$ 为根据约束条件构造的可行域中染色体的集合，种群规模 k 为 40。

2.3 惩罚算子

在研究过程中，考虑到极限工况对各能量源动态输出能力的要求较为严苛，而若输出功率严格跟随需求功率的变化，可能会使 SOFC 的工况恶化，且出现有害变载的概率增大以及等效燃料消耗量增加，所以可引入惩罚算子避免或减少这种情况的出现。此处将惩罚算子定义为

$$G_{\mathrm{p}}=\sum_{k=1}^{n}\left\{\frac{P_{\mathrm{n}}(t_k)-[P_{\mathrm{fc_out}}(t_k)+P_{\mathrm{B_out}}(t_k)]}{1\ 000}\right\} \tag{13}$$

在每一个时间点计算各能量源的总输出功率和需求功率的差值，而差值在经一定比例缩放后将影响目标函数值。对于某一个体对应的控制策略来说，工况工作点出现的差值越大，出现差值的次数越多，目标函数被惩罚得越严重，对环境的适应程度下降使得劣质个体在迭代中被淘汰的概率更大。因此，最终的目标函数为

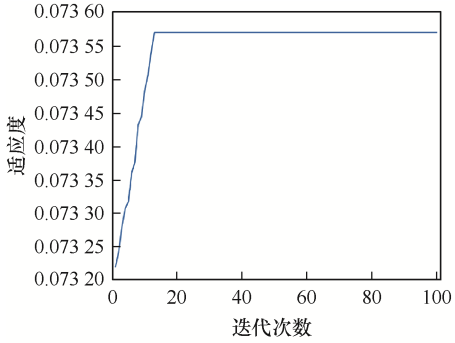
$$\begin{cases}Q_{\mathrm{fitness}}=Q_{\mathrm{S}}+G_{\mathrm{p}}/2.5\\ T_{\mathrm{fitness}}=T'(s)+G_{\mathrm{p}}/3.0\end{cases} \tag{14}$$

对于目标函数 Q_{fitness}，由于 Q_{S} 代表 SOFC 的散热能力大小，因此该函数是最大值问题，Q_{fitness} 越大，则 SOFC 的散热性能越好。对于目标函数 T_{fitness}，$T'(s)$ 为 $T(s)$ 的导数，代表 SOFC 温度随时间变化的快慢程度，因此该函数是最小值问题，T_{fitness} 越小，则 SOFC 的温度变化幅度越小，即 SOFC 的散热性能越好。

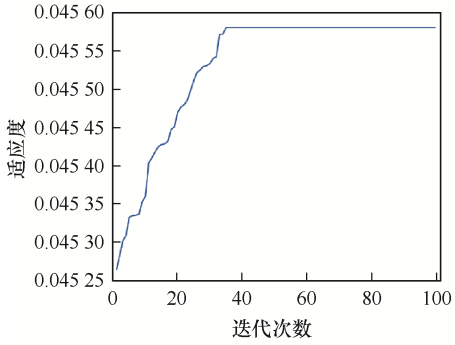
2.4 多目标遗传算法优化和仿真验证

本文采用非支配排序遗传算法 NSGA-Ⅱ(non-dominated sorting genetic algorithm-II)[26]进行求解。该算法目前是最流行的多目标遗传算法之一，其增加了精英策略、拥挤度计算和快速非支配排序策略，可以显著改善传统 NSGA 的不足。为了验证 NSGA-Ⅱ对种群的优化效果和模糊−遗传算法控制策略的优越性，这里分别使用 NSGA-Ⅱ和其他几种常见的寻优算法对本文所建立的模型进行求解，然后对其进行相关的综合评价。设定 SOFC 的冷却管道的截面宽度为 4.0×10^{-3} m，截面高度为 5.0×10^{-3} m，在该条件下以总散热量最大和温度变化量最小为目标函数进行求解。采用 MATLAB2020b 进行仿真实验，对相关算法的实施效果进行对比分析。

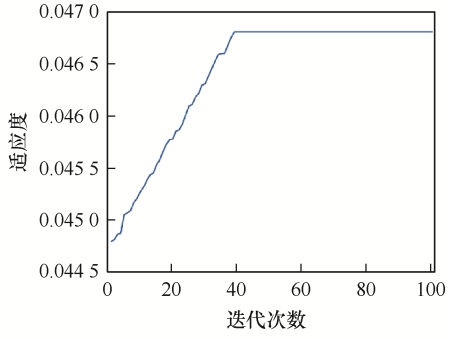
种群在迭代过程中的算法收敛趋势如图 4 所示。对比图 4(a)~(d)，以神经网络算法为例，其收敛速度相对较慢，需要迭代 39 次。而 NSGA-Ⅱ通过引入精英策略缩小了变异范围，交叉概率与变异概率调至目标值的收敛过程更加平滑，仅用 13 次迭代算法即可收敛至趋于稳定，且适应度达到 0.073 57，



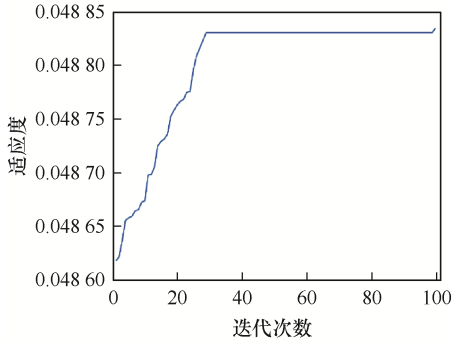
(a)NSGA-Ⅱ算法



(b)模拟退火算法



(c) 神经网络算法



(d) 粒子群算法

图 4 改进前后算法对比

Fig. 4 Comparison of algorithm before and after improvement

全局搜索能力相对较强。NSGA-Ⅱ与其他 3 种算法仿真数据见表 1，这说明 NSGA-Ⅱ引入的拥挤度算法是有效的，且在种群迭代演化的过程中，基本没有出现优质解丢失的现象，说明该算法引入精英策略也是有效的。

表 1 NSGA-II 算法与其他 3 种算法仿真数据

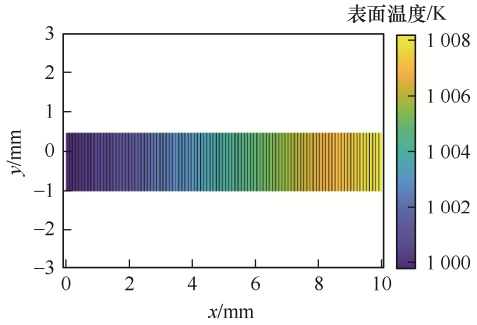
Tab. 1 Simulation data of NSGA-II algorithm and three other algorithms

算法	迭代次数	适应度
NSGA-II	13	0.073 57
模拟退火算法	35	0.455 80
神经网络算法	39	0.468 00
粒子群算法	29	0.048 83

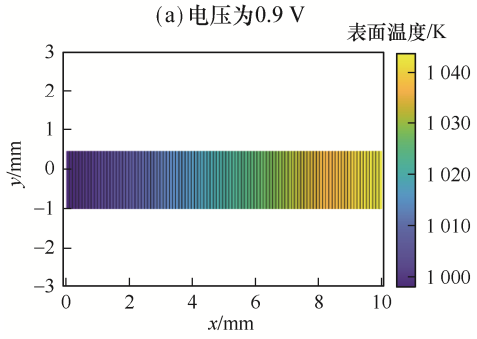
3 仿真实验

3.1 SOFC 的温度分析

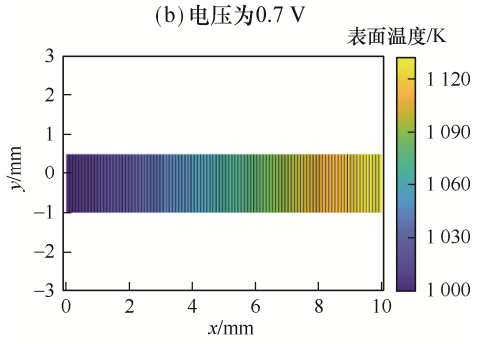
首先分析 SOFC 电堆内部的电压对温度分布的影响。在 SOFC 中，燃料中储存的化学能并不能完全转化为电能，能量损失最终都会以热能的形式散出。由于在不同的电压下，电堆各个部分的产热量有所不同，因此使用 MATLAB 对不同电压下电堆温度分布情况进行仿真。本文改进 SOFC 水冷散热系统的冷却液为海水，冷却液初始温度设为 288 K，流速设为 0.1 m/s，阴极入口燃料 NH_3 的温度设为 1 000 K。通过对温度场(空间位置 x、y 方向)仿真研究，得到不同工作电压(0.5，0.7，0.9 V)下电堆散热效果的影响，仿真结果如图 5 所示。



(a) 电压为0.9 V



(b) 电压为0.7 V



(c) 电压为0.5 V

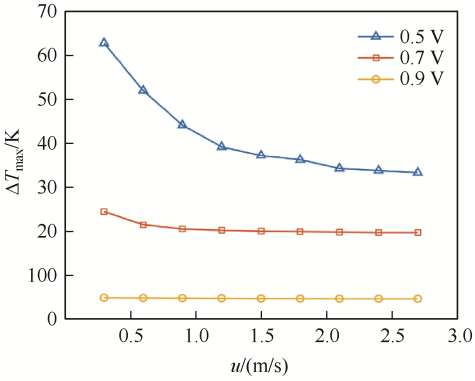
图 5 不同电压下电堆温度分布仿真结果

Fig. 5 Simulation results of power stack temperature distribution under different voltages

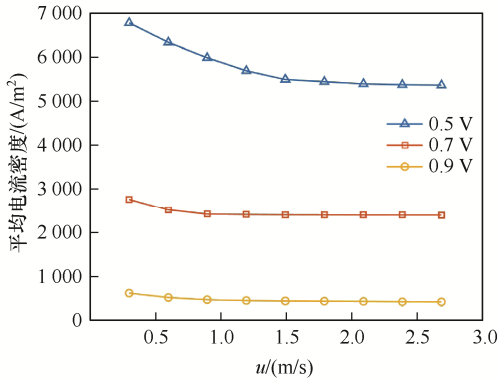
仿真结果表明，电堆的最低温度和最高温度分别出现在电堆入口和出口处，电压为 0.9 V 时，电堆的最高温度为 1 008 K；电压为 0.5 V 时，电堆的最高温度为 1 130 K；最低温度始终为 1 000 K，即电堆的入口位置。可知，随着工作电压的降低，更多的电能转化为热量。

SOFC 的性能通常用电池的平均电流密度来表示，而电流密度可由 Butler-Volmer[27]方程获得。相关研究[28-30]表明，电流密度对电池的平均输出功率具有直接影响作用，当 SOFC 电流密度过大时，浓差极化数值比较大。在低反应物浓度时，反应物浓度的变化会对浓度过电势产生较大影响，即在降低输出功率的同时，造成电解质局部温度过高进而影响质子交换膜的正常功能。故本文采用 SOFC 单电池测试方法[31]对海底数据中心 SOFC 系统的平均电流密度进行测量。

为了详细直观地分析冷却液入口流速对 SOFC 电堆散热性能的影响，在上述 3 种工作电压状态下，改变海水进入电堆的流速。仿真时入口流速 u 分别设为 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4、2.7、3.0 m/s，其他条件不变，基于 MATLAB 仿真得到 SOFC 电堆的最大温度差 ΔT_{max} 和平均电流密度随冷却液入口流速变化的曲线，如图 6 所示。



(a) ΔT_{max}与u的关系



(b) 电堆平均电流密度与u的关系

图 6　改进后冷却液流速对电池性能的影响

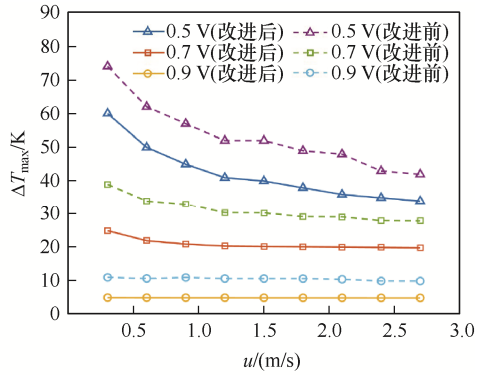
Fig. 6 Effect of coolant flow rate on battery performance after improvement

由图 6(a)可得，当冷却液入口流速大于 1.2 m/s 后，流速的增大对电池的最大温度差几乎没有影响；但电池的电压越低，最大温度差受入口流速的影响越大。相同冷却液入口流速下，电堆电压为 0.5 V 时，电堆的温度差较大，当入口速度从 0.3 m/s 增加到 2.1 m/s 后，电池的最大温度差从 65.0 K 下降到 34.1 K。如图 6(b)所示，在冷却液入口流速大于 1.8 m/s 时，冷却液速度的增加对电池的平均电流密度几乎没有影响；电压为 0.5 V 时，入口流速从 0.3 m/s 增加到 1.8 m/s 后，电池的平均电流密度下降了 1 354 A/m^2；电压为 0.9 V 时，入口流速从 0.3 m/s 增加到 3.0 m/s 后，电池的平均电流密度降低了 282 A/m^2。

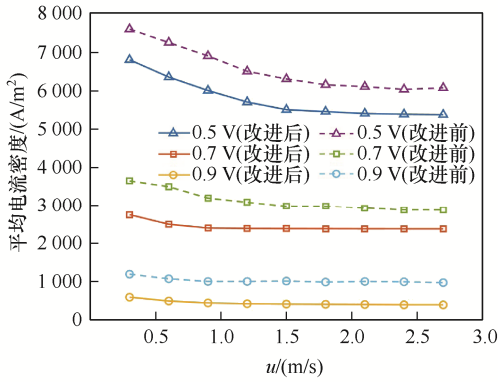
3.2　改进后散热效果对比分析

传统常用的 SOFC 热管理方法是在阴极通入过量的空气，利用空气的流动带走电池多余的热量。为了验证本文改进系统的优越性，此处采用控制变量法，参考 3.1 节的相关参数，通过仿真对比传统 SOFC 热管理方法和本文提出的 SOFC 热管理方法的散热效果。改进前、后冷却物质流速对电池性能的影响对比如图 7 所示。

由图 7 可以看出，本文提出的 SOFC 热管理方法相较于传统的 SOFC 热管理方法，最高温度降低的幅度更大，且平均电流密度降低的百分比更大。由于海底数据中心具有得天独厚的海水冷却液基础，构建合理的冷却循环系统可以大大提高 SOFC 的散热效率。上述仿真实验和相关讨论说明在对海底数据中心 SOFC 进行热管理时，将海水作为冷却液的 SOFC 热管理系统能使电池具有较优的发电



(a) 改进前、后 ΔT_{max}与u关系



(b)改进前、后电堆平均电流密度与u关系

图 7 改进前、后冷却物质流速对电池性能的影响对比

Fig. 7 Comparison of effect of cooling material flow rate on battery performance before and after improvement

性能。相较传统的热管理系统，本文设计的 SOFC 热管理系统对于海底数据中心具有较为良好的适用性。

4 结论

本文基于海底数据中心在水下的特殊工作环境，改进了利用海水冷却 SOFC 的热管理系统。采用数值模拟的方法对 SOFC 热管理系统的散热效果进行仿真验证，得到以下结论：

(1)模糊−遗传算法用于海底数据中心 SOFC 水冷散热系统的传热求解中效果优异；

(2)随着冷却液入口流速 u 增大，SOFC 电堆的最大温度差和平均电流密度降低；当 u 超过约 1.2 m/s (对应最大温度差)和 1.8 m/s(对应平均电流密度)后，进一步提高 u 的降幅趋于不明显(即边际散热收益减小)。同时，更高的入口流速会增加冷却泵的功率消耗；

(3)相较于传统空气冷却的 SOFC 热管理系统，采用海水作为冷却液对电堆进行水冷散热不仅提高了散热效率，降低了功耗，同时适合在海底特殊的环境下工作。

参考文献：

[1] Fernández-Cerero D, Ortega F J, Jakóbik A, et al. DISCERNER: dynamic selection of resource manager in hyper-scale cloud-computing data centres [J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 116: 190-199.

[2] 陈凤，张花，陈月琴，等. 数据中心供电系统的新技术应用研究[J]. 电源学报, 2013, 11(2): 93-100.
Chen Feng, Zhang Hua, Chen Yueqin, et al. Application research of new technology in data center power supply system [J]. Journal of Power Supply, 2013, 11(2): 93-100. (in Chinese)

[3] Huang Pei, Copertaro B, Zhang Xingxing, et al. A review of data centers as prosumers in district energy systems: renewable energy integration and waste heat reuse for district heating [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114109.

[4] Jin Chaoqiang, Bai Xuelian, Yang Chao, et al. A review of power consumption models of servers in data centers [J]. Applied Energy, 2020, 265: 114806.

[5] Amado E A, Schneider P S, Bresolin C S. Free cooling potential for Brazilian data centers based on approach point methodology [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 171-180.

[6] 柏晨，王念春，卓青. 绿色数据中心的供电运行控制和能量管理[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 107-114.
Bo Chen, Wang Nianchun, Zhuo Qing. Power supply operation control and energy management in green data center [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 107-114. (in Chinese)

[7] 赵江，李仁刚，刘宇. 服务器节能技术与标准要求[J]. 信息技术与标准化, 2018(10): 37-39, 59.
Zhao Jiang, Li Rengang, Liu Yu. Energy-saving technologies and standard requirements of server [J]. Information Technology & Standardization, 2018(10): 37-39, 59. (in Chinese)

[8] Mokhtari R, Arabkoohsar A. Feasibility study and multi-objective optimization of seawater cooling systems for data centers: a case study of Caspian Sea [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47: 101528.

[9] Jahangir M H, Mokhtari R, Ali Mousavi S. Performance evaluation and financial analysis of applying hybrid renewable systems in cooling unit of data centers: a case study [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46: 101220.

[10] 陈烁烁. 固体氧化物燃料电池产业的发展现状及展望

[J]. 陶瓷学报, 2020, 41(5): 627-632.
Chen Shuoshuo. Development and prospects of solid oxide fuel cell industry [J]. Journal of Ceramics, 2020, 41(5): 627-632. (in Chinese)

[11] Prater K B. Solid polymer fuel cell developments at Ballard [J]. Journal of Power Sources, 1992, 37(1-2): 181-188.

[12] 李箭. 固体氧化物燃料电池: 发展现状与关键技术[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 683-690.
Li Jian. Solid oxide fuel cells: development status and key technologies [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2007, 13(6): 683-690. (in Chinese)

[13] Peng Jingxuan, Huang Jian, Wu Xiaolong, et al. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: a review [J]. Journal of Power Sources, 2021, 505: 230058.

[14] 宋世栋, 韩敏芳, 孙再洪. 管式固体氧化物燃料电池堆的研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(21): 2035-2045.
Song Shidong, Han Minfang, Sun Zaihong. The progress on research and development of tubular solid oxide fuel cell stacks [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(21): 2035-2045. (in Chinese)

[15] Ritchie A J, Brouwer J. Design of fuel cell powered data centers for sufficient reliability and availability [J]. Journal of Power Sources, 2018, 384: 196-206.

[16] Achenbach E. Three-dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources, 1994, 49(1-3): 333-348.

[17] Zheng Keqing, Sun Ya, Shen Shuanglin, et al. A novel cooler for the thermal management of solid oxide fuel cell stack [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48: 101564.

[18] Promsen M, Komatsu Y, Sciazko A, et al. Feasibility study on saturated water cooled solid oxide fuel cell stack [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115803.

[19] 吴曦蕾, 杨佳亮, 郭豪文, 等. 数据中心浸没式液体冷却系统的发展历程及关键环节设计[J]. 制冷与空调, 2022, 22(11): 61-74.
Wu Xilei, Yang Jialiang, Guo Haowen, et al. Development history and design of key links in immersion liquid cooling system for data center [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2022, 22(11): 61-74. (in Chinese)

[20] Li Wei, Peng Xiongbin, Xiao Mi, et al. Multi-objective design optimization for mini-channel cooling battery thermal management system in an electric vehicle [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(8): 3668-3680.

[21] Mousavi M, Hoque S, Rahnamayan S, et al. Optimal design of an air-cooling system for a Li-ion battery pack in electric vehicles with a genetic algorithm [C]// 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2011: 1848-1855.

[22] Afzal A, Ramis M K. Multi-objective optimization of thermal performance in battery system using genetic and particle swarm algorithm combined with fuzzy logics [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101815.

[23] Wang Yichun, Zhang Yuanzhi, Zhang Caizhi, et al. Genetic algorithm-based fuzzy optimization of energy management strategy for fuel cell vehicles considering driving cycles recognition [J]. Energy, 2023, 263: 126112.

[24] 刘波, 朱晔, 杨云霄, 等. 功率半导体器件热阻抗自动化测试及其控制策略[J]. 电源学报, 2021, 19(5): 150-157.
Liu Bo, Zhu Ye, Yang Yunxiao, et al. Automatic test and control strategy of thermal impedance extraction of power semiconductor devices [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(5): 150-157. (in Chinese)

[25] 程蔡阳. 浅谈迪图斯——贝尔特公式[J]. 山西化工, 1982, 2(2): 53-56.
Cheng Caiyang. OnDittus-Boelter formula [J]. Shanxi Chemical Industry, 1982, 2(2): 53-56. (in Chinese)

[26] 赵珍珍, 王维庆, 樊小朝, 等. 基于 NSGA-Ⅱ-PSO 算法的微电网多目标优化运行模式[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 118-125.
Zhao Zhenzhen, Wang Weiqing, Fan Xiaochao, et al. Multi-objective optimal operation mode of microgrid based on NSGA-Ⅱ-PSO algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 118-125. (in Chinese)

[27] 王珂, 李星辰, 王永庆, 等. 错列式流道固体氧化物燃料电池及其性能研究[J]. 电源技术, 2022, 46(12): 1438-1442.
Wang Ke, Li Xingchen, Wang Yongqing, et al. Study on

solid oxide fuel cell with staggered flow channel and its performance [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(12): 1438-1442. (in Chinese)

[28] 于潇. 氢燃料电池系统建模与气体供给系统控制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Yu Xiao. Research on modeling of hydrogen fuel cell system and control method of gas supply system [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)

[29] 赵富强, 祁慧青, 范晓宇, 等. PEMFC 新型压差流道传质与电化学性能研究[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 148-158.
Zhao Fuqiang, Qi Huiqing, Fan Xiaoyu, et al. Study on mass transfer and electrochemical performance of PEMFC with novel differential pressure flow channel [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 148-158. (in Chinese)

[30] 赵富强, 贾彦奎, 赵小军, 等. PEMFC 压差流道构型特征参数对电池性能的影响[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 110-118.
Zhao Fuqiang, Jia Yankui, Zhao Xiaojun, et al. Influences of configuration characteristic parameters of PEMFC differential pressure channel on cell performance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 110-118. (in Chinese)

[31] 屠恒勇. SOFC 单电池测试方法[J]. 中国工程科学, 2013, 15(2): 33-38.
Tu Hengyong. Standardization in testing methods for SOFC single cells [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(2): 33-38. (in Chinese)



蒋鹏

作者简介：

蒋鹏(1997—)，男，中国电源学会会员，硕士。研究方向：海底数据中心能量管理与散热优化，SOFC 和电力系统故障诊断。E-mail：jiang_peng666666@126.com。

陈鑫(2001—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：海洋工程储能，海底数据中心散热优化以及改进人工智能算法。E-mail：1497608055@qq.com。

周海峰(1970—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：海底数据中心能量管理与散热优化，智能信息处理以及电力系统故障诊断。E-mail：zhfeng216@163.com。

陈星汝(2001—)，女，博士研究生。研究方向：SOFC 热管理分析，海底数据中心散热结构设计，船舶电力推进。E-mail：c2272956967@163.com。

郑东强(1978—)，男，博士，讲师。研究方向：海洋能源工程，深度学习机器视觉伺服技术以及机电一体化。E-mail：27047440@qq.com。

黄金满(1984—)，男，硕士研究生，高级工程师。研究方向：新能源电池控制与应用，稀土加工处理和机械自动化系统研发。E-mail：anmaixin@163.com。

(责任编辑：陈国珍)