文章编号:1001-2060(2023)09-0141-11

燃料重整固体氧化物燃料电池发电系统性能分析及多变量参数优化

王金平[1],毕小龙[1],陆玉正[2]
(1. 南京工程学院 能源与动力工程学院,江苏 南京 211167; 2. 南京晓庄学院 电子工程学院,江苏 南京 211171)

摘 要:以燃料重整的固体氧化物燃料电池发电系统为研究对象,通过数值模拟方法对固体氧化物燃料电池发电系统的性能、㶲损、㶲效率以及多变量运行参数优化进行了分析。研究结果表明:重整反应中燃料利用系数、电池工作温度、水碳比、电堆电流密度等参数对系统性能影响显著;电堆工作在不同电流密度下都有其对应的最佳工作温度、最佳燃料利用系数工况点;水碳比会改变重整反应产氢量,从而影响电化学反应速率,空气加热器的㶲损所占份额最大;优化后的系统效率及㶲效率为0.480 9和0.462 6,效率提升约4%。

关 键 词:燃料重整;燃料电池;㶲分析;性能;参数优化

中图分类号:TM911.4 **文献标识码**:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.09.017

[**引用本文格式**]王金平,毕小龙,陆玉正.燃料重整固体氧化物燃料电池发电系统性能分析及多变量参数优化[J].热能动力工程,2023,38(9):141-151. WANG Jin-ping,BI Xiao-long,LU Yu-zheng. Performance analysis and multivariate parameter optimization for fuel reforming solid oxide fuel cell system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(9):141-151.

Performance Analysis and Multivariate Parameter Optimization for Fuel Reforming Solid Oxide Fuel Cell System

WANG Jin-ping[1],BI Xiao-long[1],LU Yu-zheng[2]
(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Engineering, Nanjing, China, Post Code: 211167;
2. School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, China, Post Code: 211171)

Abstract: Taking the fuel reforming solid oxide fuel cell (SOFC) system as the research object, the performance of the system, exergy loss, exergy efficiency and multivariate operating parameter optimisation were simulated and analyzed by the numerical simulation method. The research results show that the fuel utilization factor, cell operating temperature, water to carbon ratio and electric stack current density in the reforming reaction have a significant impact on the performance of the system; there are optimum operating temperatures and fuel utilization factor operating points for electric stack at different current densities; the water to carbon ratio can change the amount of hydrogen produced by the reforming reaction and thus the electrochemical reaction rate. The air heater accounts for the largest share of the exergy loss; the optimized system efficiency and exergy efficiency are 0.480 9 and 0.462 6 with an improved efficiency of 4%.

Key words: fuel reforming, fuel cell, analysis of exergy, performance, parameter optimization

收稿日期:2022-11-17; **修订日期**:2022-12-13
基金项目:江苏省产学研合作项目(BY2021057)
Fund-supported Project:Jiangsu Province Industry University Research Cooperation Project (BY2021057)
作者简介:王金平(1977-),男,南京工程学院副教授.

引　言

固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell，SOFC）是一种通过直接氧化燃料来实现电化学转换的装置[1]，具有发电效率高、稳定可靠、运行无噪声、燃料适应性好以及低排放等优点[2]，以 SOFC 电池为核心的发电系统已应用于分布式发电系统、移动电源、冷热电综合供能系统等多个领域[3-8]。

通过气体重整，甲烷可以作为 SOFC 发电系统的燃料[9-10]，将甲烷直接通入到 SOFC 的阳极，同时发生甲烷重整制氢反应和氢燃料电池电化学反应，电化学反应所释放的热量提供给燃料重整吸热反应，这种方式称为内部重整（Internal Reforming，IR）。内部重整分为非直接型和直接型[11-12]，实现了燃料在电池内部物质和能量的传递，能有效提升发电效率，且不需要外部设备，简化了燃料供给系统[13-17]。内部重整主要缺点有：在阳极入口快速吸热会引起电堆温度梯度增加，易造成阳极及电解质材料产生过大热应力，影响电堆的使用寿命[7,18]；此外，重整燃料在阳极催化热解过程中容易发生积碳导致催化剂活性下降[19]，以及电池发电功率受到限制等问题[9]。在商业化的 SOFC 系统中，外部重整（External Reforming，ER）是一种较成熟的技术[20]。

相关文献对燃料重整 SOFC 发电系统的燃料利用系数、电堆操作温度、电池电流密度、水碳比等参数对 SOFC 系统的影响进行了研究[21-24]，而燃料重整 SOFC 系统是一个多维变量构成的包含传热、传质和电化学反应的复杂过程系统，目前对燃料重整 SOFC 发电系统进行系统分析以及对多变量参数优化的相关文献还较少。

本文构建了燃料重整固体氧化物燃料电池发电系统仿真模型，包括组分的物质传递、能量传递、SOFC 一维电化学模型，对 SOFC 发电系统的重整性能进行了分析研究，对 SOFC 发电系统进行多变量参数优化研究。

1　系统及数学模型

1.1　系统介绍

燃料重整 SOFC 发电系统如图 1 所示。空气经过空气压缩机（Air Compressor，AC）、空气加热器（Air Heater，AH）升压加热后送到 SOFC 电堆的阴极入口，水经过水泵（Water Pump，WP）和水加热器（Water Heater，WH）升压加热后，与经过燃料压缩机（Fuel Compressor，FC）和燃料加热器（Fuel Heater，FH）升压加热的燃料在重整器（Reformer，RF）中发生重整转换反应，然后送入到 SOFC 阳极。在 SOFC 电堆中发生电化学反应后的尾气经过阳极、阴极排出到后燃烧器（After Burner，AB）进行燃烧，燃烧后的高温尾气经过水加热器（WH）、燃料加热器（FH）及空气加热器（AH）后排出到大气。

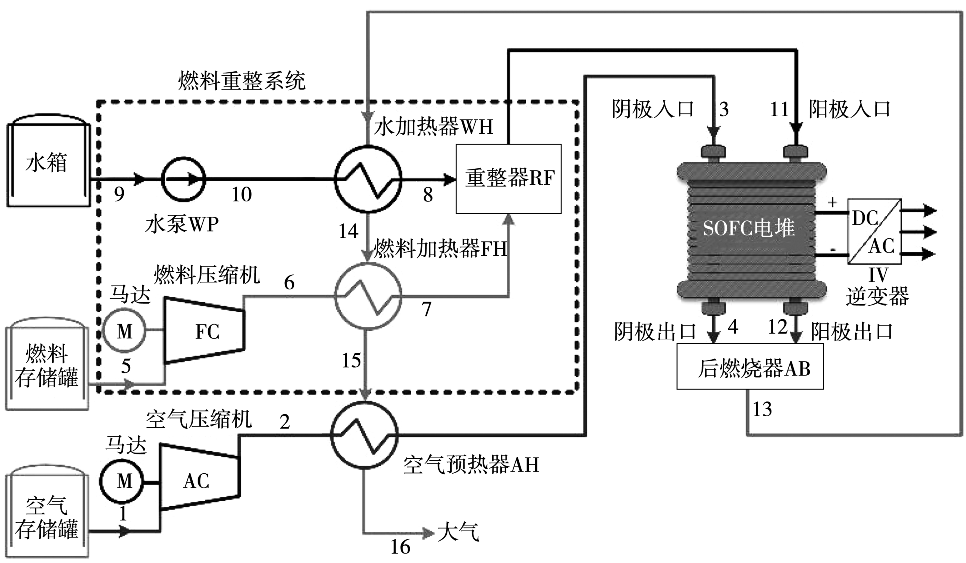

图 1　燃料重整 SOFC 发电系统流程图

Fig. 1 Flow chart of a fuel reforming SOFC power generation system

1.2　燃料重整系统反应模型

燃料重整系统包括后燃烧器（AB）、水加热器（WH）、水泵（WP）、燃料压缩机（FC）、重整器（RF）等设备。以 CH_4 为燃料，通过燃料重整系统，将 CH_4 重整为 SOFC 发电系统的可用燃料 H_2。系统通过 SOFC 反应后剩余的可燃气体在后燃烧器（AB）中继续燃烧产生的热量作为加热水、空气和燃料所需的热量，水泵（WP）的水在水加热器（WH）中进行加热汽化成水蒸气，天然气通过燃料压缩机（FC）升压，在燃料加热器（FH）中进行加热后，在重整器（RF）通过重整、转换反应产生 H_2，反应过程如表 1 所示[25]。

SOFC 发电系统燃料利用系数为[24]：

$$U_f = \frac{v_c}{3v_r + v_t} \tag{1}$$

SOFC 发电系统燃料氧气利用系数为：

$$U_{O_2} = \frac{v_c}{2n_{O_2}} \tag{2}$$

SOFC 发电系统水碳比为：

$$r = \frac{n_{CH_4}}{n_{H_2O}} \tag{3}$$

式中：n_{O_2}，n_{H_2O}，n_{CH_4}—氧气、水、甲烷的摩尔流量，mol/s；v_r，v_t，v_c—重整反应、转换反应、电化学反应速率，mol/s。

表 1　燃料重整反应化学反应过程

Tab. 1 Chemical reaction process for fuel reforming reactions

反应类型	化学反应式	反应速率
燃料重整反应	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	v_r
转换反应	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	v_t
电化学总反应	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	v_c

1.3　SOFC 单电池电化学及功率模型

SOFC 模型阳极材料为镍参杂的钇稳定的氧化锆（NiYSZ），阴极材料为钇稳定的氧化－镧锶磁铁矿（YSZ-LSM），电解质材料为钇稳定的氧化锆（YSZ）[9,26]。

SOFC 电堆的输出电势 V_{cell} 是在最大开路电压（能斯特电势 V_N）考虑内电势 V_{ohm}、活化过电势 V_{act}、浓差过电势 V_{conc} 等因素得出的，计算式为[27]：

$$V_{cell} = V_N - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc} \tag{4}$$

能斯特电势 V_N 的计算式为[23]：

$$V_N = -\frac{\Delta \bar{g}_f^0}{2F} + \frac{RT_{SOFC}}{2F}\ln\left(\frac{\alpha_{H_2}\sqrt{\alpha_{O_2}}}{\alpha_{H_2O}}\right) \tag{5}$$

式中：F—法拉第常数，取 96 485 C/mol；R—通用气体常数，取值为 8.314 J/(mol·K)；T_{SOFC}—电堆运行温度，K；α_{H_2}，α_{O_2}，α_{H_2O}—SOFC 电池氢、氧和水的活度；$\Delta \bar{g}_f^0$—SOFC 电堆中各反应物及生成物的 Gibbs 自由能差，J/mol，计算式为[23]：

$$\Delta \bar{g}_f^0 = \Delta \bar{g}_{H_2O}^0 - \Delta \bar{g}_{H_2}^0 - \frac{1}{2}\Delta \bar{g}_{O_2}^0 \tag{6}$$

式中：$\Delta \bar{g}_{H_2O}^0$，$\Delta \bar{g}_{H_2}^0$，$\Delta \bar{g}_{O_2}^0$—水、氢气和氧气的 Gibbs 自由能，计算式为：

$$\begin{cases} \Delta\bar{g}_{H_2O}^0 = h_{H_2O}(T = T_{SOFC}) - T_{SOFC}s_{H_2O}(T = T_{SOFC}) \\ \Delta\bar{g}_{H_2}^0 = h_{H_2}(T = T_{SOFC}) - T_{SOFC}s_{H_2}(T = T_{SOFC}) \\ \Delta\bar{g}_{O_2}^0 = h_{O_2}(T = T_{SOFC}) - T_{SOFC}s_{O_2}(T = T_{SOFC}) \end{cases} \tag{7}$$

式中：h—摩尔焓，J/mol；s—摩尔熵，J/(mol·K)。

内电势 V_{ohm} 的计算式为[28]：

$$V_{ohm} = (\rho_e L_e + \rho_a L_a + \rho_c L_c + \rho_i L_i)j \tag{8}$$

式中：L_e，L_a，L_c，L_i—SOFC 单电池的电解质、阳极、阴极和交界面的厚度，m；j—SOFC 电池电流密度，A/m^2；ρ_e，ρ_a，ρ_c，ρ_i—SOFC 电池的电解质、阳极、阴极以及交接面的电阻率，Ω·m，其计算式为[28]：

$$\begin{cases} \rho_e = [3.34 \times 10^4 \exp(-10\,300/T_{SOFC})]^{-1} \\ \rho_a = [95 \times 10^6/T_{SOFC}\exp(-1\,150/T_{SOFC})]^{-1} \\ \rho_c = [42 \times 10^6/T_{SOFC}\exp(-1\,200/T_{SOFC})]^{-1} \\ \rho_i = [42 \times 10^6/T_{SOFC}\exp(-1\,100/T_{SOFC})]^{-1} \end{cases} \tag{9}$$

活化过电势 V_{act} 包含阳极 $V_{act,a}$ 和阴极 $V_{act,c}$ 的活化过电势，计算式为[29]：

$$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c} \tag{10}$$

$$V_{act,a} = \frac{RT_{SOFC}}{F}\left[\sinh^{-1}\left(\frac{j}{j_{oa}}\right)\right] \tag{11}$$

$$V_{act,c} = \frac{RT_{SOFC}}{F}\left[\sinh^{-1}\left(\frac{j}{j_{oc}}\right)\right] \tag{12}$$

式中：j_{oa}，j_{oc}—阳极和阴极的交换电流密度，A/m^2。

浓差电势 V_{conc} 包含阳极浓差电势 $V_{conc,a}$ 和阴极

浓差电势 $V_{conc,c}$ 两部分,其计算式为[25]:

$$V_{conc} = V_{conc,a} + V_{conc,c} \tag{13}$$

$$V_{conc,a} = \frac{RT_{SOFC}}{2F}\left[\ln\left(1+\frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}}\times\frac{j}{j_{as}}\right)-\ln\left(1-\frac{j}{j_{as}}\right)\right] \tag{14}$$

$$V_{conc,c} = -\left[\frac{RT_{SOFC}}{4F}\ln\left(1-\frac{j}{j_{cs}}\right)\right] \tag{15}$$

式中:j_{as},j_{cs}—阳极和阴极的极限电流密度,A/m^2,其计算式为[25]:

$$j_{as} = \frac{2Fp_{H_2}D_{aeff}}{RT_{SOFC}L_a} \tag{16}$$

$$j_{cs} = \frac{4Fp_{O_2}D_{ceff}}{\left(\frac{p_4-p_{O_2,4}}{p_4}\right)RT_{SOFC}L_c} \tag{17}$$

式中:D_{aeff},D_{ceff}—阳极和阴极气体扩散率,m^2/s;

在计算出电流密度、输出电势后即可得出 SOFC 电堆输出的直流侧功率:

$$P_{SOFC} = NjA_{cell}V_{cell} \tag{18}$$

式中:N—单电池个数;A_{cell}—SOFC 单电池的活化面积,m^2。

系统输入的能量为:

$$Q_{in} = v_r \times LHV \tag{19}$$

式中:LHV—天然气的低位发热量,kJ/mol。

系统净输出功率 P_{net} 为:

$$P_{net} = P_{SOFC} - P_{WP} - P_{FC} - P_{AC} \tag{20}$$

式中:P_{WP},P_{FC},P_{AC}—水泵、燃料压缩机以及空气压缩机的功率,kW。

SOFC 电堆发电系统的系统效率为:

$$\eta_{sys} = P_{net}/Q_{in} \tag{21}$$

1.4　㶲分析模型

能量转换系统的㶲定义为当系统与热动力环境处于完全热力学平衡,而系统仅与该环境相互作用时可获得的最大理论有用功。SOFC 发电系统涉及工质流动与电化学反应,其过程㶲包含物理和化学㶲,计算式为[22]:

$$E = E_{ph} + E_{ch} \tag{22}$$

物理㶲 E_{ph} 和化学㶲 E_{ch} 计算式为[22]:

$$\begin{cases} E_{ph} = \sum_i n_i[(h_i - h_0) - T_o(s_i - s_0)] \\ E_{ch} = n(\sum_i \alpha_i e_i^{ch} + RT_0 \sum_i \alpha_i \ln\alpha_i) \end{cases} \tag{23}$$

式中:e_i^{ch}—物质的标准化学㶲,kJ/mol;α_i—物质组分的比例;h_i—对应工况下物质的摩尔焓,kJ/mol;h_0—环境工况下物质的摩尔焓,kJ/mol;T_0—环境温度,K。

各化学物质的标准化学㶲如表 2 所示。

表 2　各化学物质标准化学㶲[22]

Tab. 2 Standard chemical exergy of each chemical species[22]

物质名称	标准化学㶲/kJ·mol^{-1}
CH_4	831.65
H_2	236.1
气态 H_2O	9.5
液态 H_2O	0.9
CO	275.1
CO_2	19.87
O_2	3.97
N_2	0.72

系统单个设备的㶲损及㶲效率为:

$$E_{dj} = \sum_i E_i - \sum_e E_e - P_{out} \tag{24}$$

$$\psi_j = \frac{\sum_e E_e + P_{out}}{\sum_i E_i} \tag{25}$$

式中:E_i,E_e—流入设备工质㶲、流出设备工质㶲;P_{out}—设备输出功率,kW。

系统输入㶲为:

$$E_i = v_r \cdot e_{CH_4} \tag{26}$$

系统的㶲效率为:

$$\psi_{sys} = P_{net}/E_i \tag{27}$$

2　系统参数及模型验证

采用 EES 软件进行建模,利用方程求解器进行求解[30]。

2.1　系统参数

根据文献[23]确定 SOFC 系统参数,SOFC 单电池的活化面积 0.01 m^2,单电池的额定电流密度 8 000 A/m^2,共 11 000 块单电池构成了 SOFC 电堆,工质流过主要设备及管道均考虑压力损失,主要参数如表 3 所示。模型的输入参数:燃料为 CH_4,低位发热量为 800 kJ/mol,环境温度为 298.15 K,参考压

力 101.3 kPa，电堆工质温度 1 000 K，燃料利用系数为 0.85。

表 3　SOFC 发电系统主要参数[23]

Tab. 3 Main parameters of SOFC power generation system[23]

参　数	数　值
SOFC 电池活化面积/m^2	0.01
SOFC 电池进口温度/K	1 000
SOFC 电池进出口温差/K	100
阳极电流交换密度/$A \cdot m^{-2}$	6 500
阴极电流交换密度/$A \cdot m^{-2}$	2 500
单电池电流密度/$A \cdot m^{-2}$	8 000
阳极有效气体扩散率/$m^2 \cdot s^{-1}$	0.2×10^{-4}
阴极有效气体扩散率/$m^2 \cdot s^{-1}$	0.5×10^{-5}
阳极厚度/m	0.5×10^{-3}
阴极厚度/m	0.5×10^{-4}
电解质厚度/m	0.1×10^{-4}
交接面厚度/m	0.3×10^{-2}
单电池个数	1.1×10^4
燃料压缩机绝热效率	0.85
空气压缩机绝热效率	0.85
水泵绝热效率	0.85
后燃烧室效率	0.99
SOFC 电堆压力损失/%	2
后燃烧室压力损失/%	3
换热器压力损失/%	2
天然气低位发热量/$kJ \cdot mol^{-1}$	800
参考压力/kPa	101.3
环境温度/K	298.15

计算电堆电流密度 – 输出电势、电流密度 – 功率密度曲线，并与文献[23]的实验结果进行对比，如图 2 所示。可以看出，随着电流密度的升高，电堆的输出电势逐步降低，电流密度为 2 000 A/m^2 时输出电势为 0.77 V，电流密度为 10 000 A/m^2 时输出电势下降到 0.42 V。

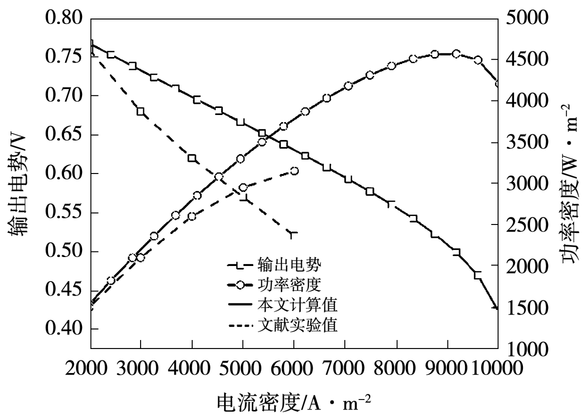

图 2　计算与实验结果对比曲线

Fig. 2 Comparison curves between calculated and experimental results

从图 2 可以看出，随着电流密度的升高，功率密度先逐步升高，达到峰值后下降，功率密度峰值为 4 570 W/m^2，对应的电流密度为 9 100 A/m^2。

2.2　模型验证

将计算结果与文献[23]实验数据进行对比，如表 4 所示。输出电势的计算值与文献实验值最大误差约为 0.11 V，功率密度的计算值与文献实验值最大误差约为 0.06 W/cm^2。

表 4　本文模型计算结果与实验数据的对比验证

Tab. 4 Comparison and verification of the model calculation results and experimental data

电流密度/	输出电势/V			功率密度/$W \cdot m^{-2}$		
$A \cdot m^{-2}$	计算值	实验值[23]	绝对误差	计算值	实验值[23]	绝对误差
2000	0.767 7	0.76	0.007 7	0.153 5	150 0	35
3000	0.733 0	0.68	0.053 0	0.219 9	210 0	99
4000	0.698 8	0.62	0.078 8	0.279 5	260 0	195
5000	0.648 8	0.57	0.078 8	0.332 4	295 0	374
6000	0.630 4	0.52	0.110 4	0.378 3	315 0	633

3　燃料重整性能分析

3.1　燃料利用系数分析

对天然气进行重整反应与转换反应，重整为氢气在 SOFC 电堆中进行电化学反应，实现化学能和电能的转换。图 3 是燃料利用系数 0.85 条件下系统进口燃料摩尔流量变化对电堆电流密度及其他组分摩尔流量的影响。可以看出，随着燃料摩尔流量增加，电流密度呈现线性增加趋势，燃料摩尔流量从 0.35 mol/s 增加到 1.73 mol/s，电流密度从 2 000 A/m^{2}增加到 10 000 A/m^2，气体重整所需的水的摩尔流量从 0.87 mol/s 增加到 4.33 mol/s。随着燃料摩尔流量的增加，所需氧气的摩尔流量出现大幅增加，电堆入口氧气摩尔流量从 2.5 mol/s 升高到 36.7 mol/s，经过电堆电化学反应后电堆出口氧气的摩尔流量从 1.95 mol/s 升高到 33.84 mol/s。图 4 是燃料重整系数为 0.85 条件下，电流密度对重整反应速率、转换反应速率、电化学反应速率以及氧气利用系数的影响曲线。从图 4 可以看出，随着电流密度的增加，电化学反应速率变化较快，电流密度从 2 000 A/m^{2}增加到 10 000 A/m^2，电化学反应速率从1.14 mol/s 增加到 5.7 mol/s，重整反应速率从 0.35 mol/s 增加到 1.73 mol/s，转换反应速率从 0.3 mol/s增加到 1.5 mol/s。

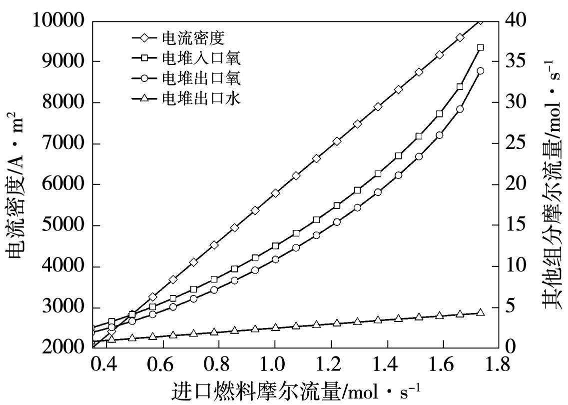

图 3　SOFC 电堆进口燃料摩尔流量对电流密度和其他组分摩尔流量的影响

Fig. 3 Effect of molar flow rate of fuel entering SOFC on current density and molar flow rate of other components

燃料利用系数 U_f代表了电化学反应、重整与转换反应的关系。图 5 是重整系统在不同电流密度条件下燃料利用系数与系统效率的关系曲线（$U_f - \eta_{sys}$曲线）。可以看出，随着电流密度增加曲线向下移动，系统效率下降。随着燃料利用系数增加，系统效率会先增加后下降，每条不同电流密度下的曲线都有效率最大时的最优燃料利用系数，电流密度从 2 500 A/m^{2}增加到 10 000 A/m^{2}时，对应的最优燃料利用系数从 0.9 降低到 0.77，最大系统效率由 0.57 减小到 0.34。

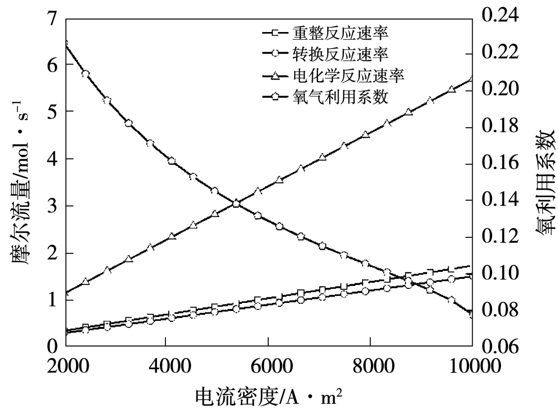

图 4　电流密度对反应速率、氧气利用系数的影响

Fig. 4 Effect of the current density on the reaction rate and oxygen utilization factor

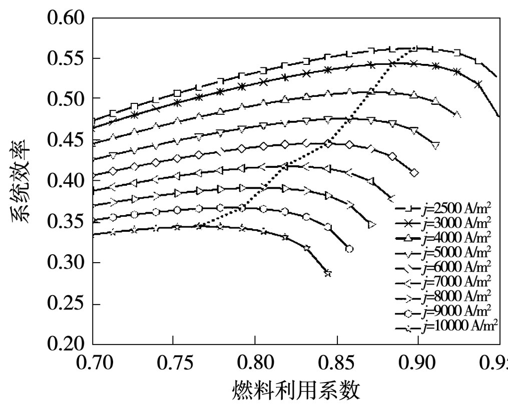

图 5　不同电流密度条件下燃料利用系数 - 效率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of fuel utilization factor vs. efficiency at different current densities

3.2　电流密度性能分析

图 6 是电流密度对输出电势的影响，电流密度变化会引起输出电势的变化。从图中可以看出，电流密度从 2 000 A/m^{2}增加到 10 000 A/m^2，电池的输出电势从 0.78 V 下降到 0.42 V，能斯特电势变化不大，约为 0.84 V，活化过电势从 0.05 V 升高到 0.204 V，浓差电势从 0.012 V 升高到 0.174 V，内电

势从 0.009 升高到 0.044 V。可以看出，电流密度增加引起输出电势下降主要是由活化过电势和浓差过电势增加引起的，内电势的影响较小。

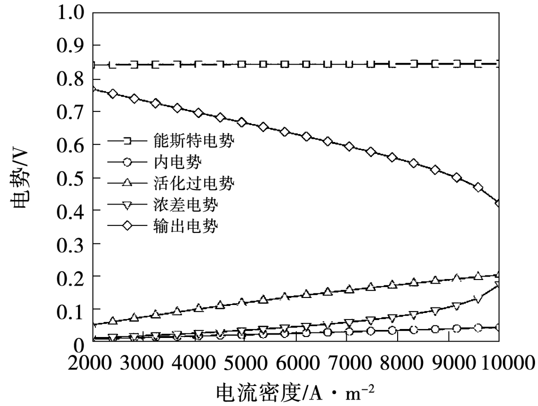

图 6　电流密度对输出电势的影响

Fig. 6 Effect of the current density on the output potential

图 7 是电流密度对系统效率和输出功率的影响。从图中可以看出，随电流密度增加系统效率会出现下降，电流密度从 2 000 A/m^2 增加到 10 000 A/m^2，系统效率从 0.57 下降到 0.26，而输出功率先升高然后下降，最高点为电流密度 8 316 A/m^2 时的 422.33 kW。

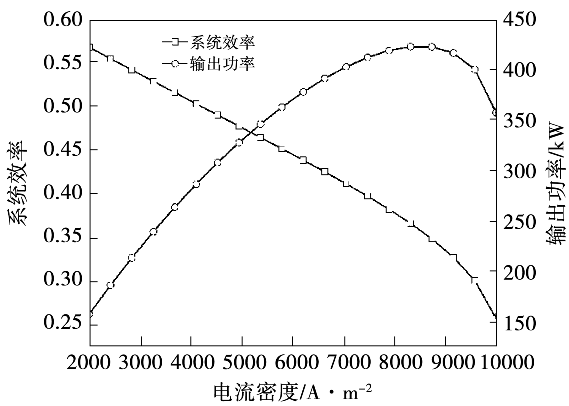

图 7　电流密度对系统效率和输出功率的影响

Fig. 7 Effect of the current density on the system efficiency and output power

3.3　电堆工作温度性能分析

图 8 是电堆工作温度对输出电势的影响。可以看出，电堆工作温度对 SOFC 电堆的电势影响明显，随着电堆工作温度的增加，输出电势逐步增加，在 900 K 时电势达到最大值 0.59 V，随后输出电势随之下降。与电流密度对电势的影响不同，温度对内电势的影响较大，并且随着温度的升高内电势出现下降，而活化过电势与浓差电势随温度的增加而逐步升高。

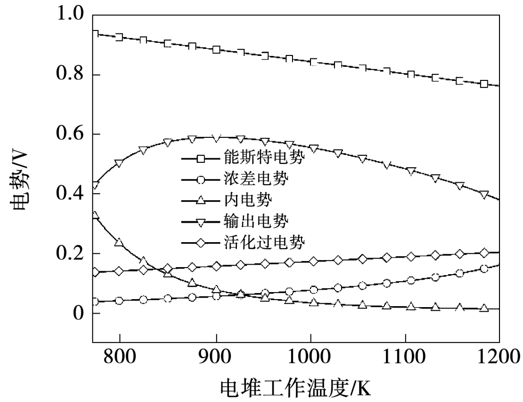

图 8　电堆工作温度对输出电势的影响

Fig. 8 Effect of the operating temperature of electric stack on the output potential

图 9 是不同电流密度条件下电堆工作温度对系统效率的影响（温度 – 效率曲线）。可以看出，电堆温度对 SOFC 发电系统效率有较大影响，在电流密度一定时，随着电堆温度升高，系统效率会随之升高，达到峰值后然后出现降低，每条温度 – 效率曲线都有一个最优的电堆工作温度，在该温度下对应的系统效率最大。电流密度分别是 2 500，6 000，7 000和 8 000 A/m^2 时，对应的最优电堆温度分别 848，852，872 和 894 K，最大系统效率分别为 0.51，0.48，0.44 和 0.41。

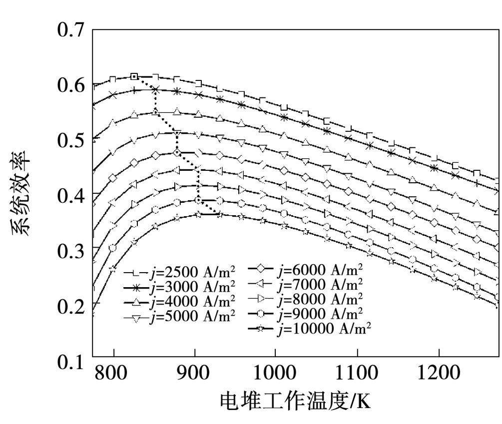

图 9　不同电流密度条件下电堆工作温度对系统效率的影响

Fig. 9 Effect of the operating temperature of electric stack on the system efficiency at different current densities

电堆工作温度对效率影响的主要原因是温度影响了电堆输出电势,不同的电流密度下都有一个最佳的电堆工作温度,在此温度下系统效率最高。

3.4　水碳比性能分析

图 10 是燃料利用系数为 0.85、摩尔流量为 1.2 mol/s 条件下,水碳比对电堆电流密度、电堆尾气摩尔分数的影响。随着水碳比从 2 增到 4,电堆的电流密度从 6 896 A/m^2 增加到 6 981 A/m^2,说明重整反应产氢量增加促进了电化学反应。但是尾气中氢气的摩尔分数从 0.112 下降到 0.084,而水的摩尔分数从 0.684 升高到 0.773,主要原因是过量的水蒸气促进了重整反应和转换反应,使产氢量增加,但是过量的水蒸气稀释了尾部的氢气,所以氢气的摩尔分数降低。

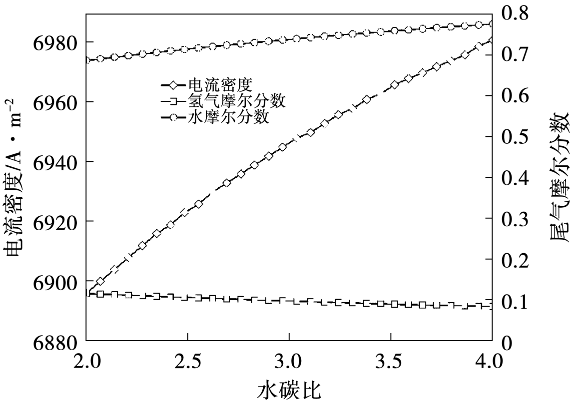

图 10　水碳比对电堆电流密度、尾气摩尔质量分数的影响

Fig. 10 Effect of the water to carbon ratio on the current density and tail gas molar mass fraction of electric stack

3.5　㶲损及㶲效率分析

图 11 是系统各设备的㶲损计算结果。可以看出,随着电流密度的增加,系统设备的㶲损都有所增加,水泵、燃料压缩机和空气压缩机的㶲损较小,空气加热器(AH)的㶲损所占份额最大。电流密度从 2 000 A/m^2 增加到 10 000 A/m^2,空气加热器(AH)㶲损从 26 kW 增加到 352.6 kW,SOFC 电堆的㶲损从 17.79 kW 增加到 204.5 kW,后燃烧室(AB)与水加热器(WH)的㶲损接近,约从 25 kW 增加到 138 kW,燃料加热器(FH)㶲损从 3.3 kW 增加到 22.41 kW。

图 12 是㶲效率计算结果。电流密度从 2 000 A/m^2 增加到 10 000 A/m^2,系统㶲效率从 0.546 下降到 0.247 7。从各设备的㶲效率情况来看,水加热器(WH)的㶲效率最低约为 0.4,燃料加热器(FH)的㶲效率约为 0.67,电堆的㶲效率变化较大,从 0.9 下降到 0.69。其他设备的㶲效率总体较高且随电流密度变化不大。

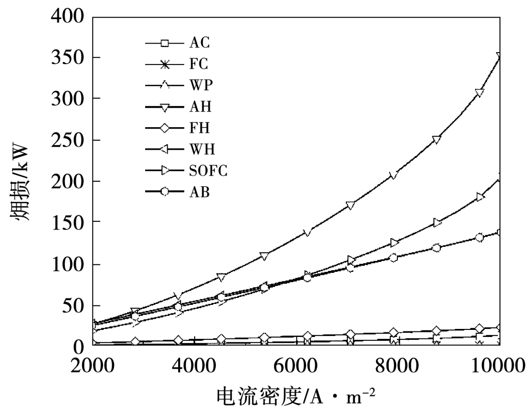

图 11　系统各设备㶲损

Fig. 11 Exergy loss of system devices

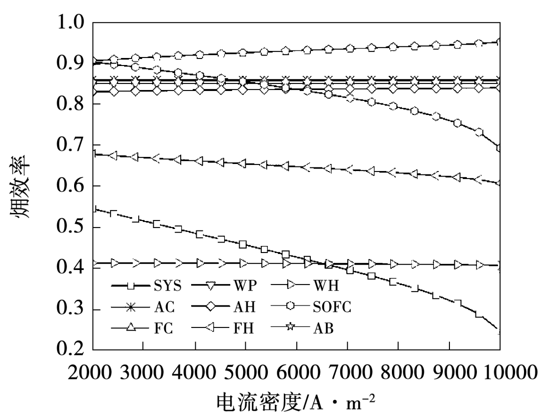

图 12　㶲效率曲线

Fig. 12 Exergy efficiency curves

4　多变量参数优化

4.1　GA 算法参数优化流程

通过上述分析可知,SOFC 发电系统的燃料利用系数、电流密度、水碳比和电堆工作温度等参数相互关联与影响。以最大系统效率为目标函数,对多维变量进行最优化求解可以获得最佳运行方式。遗传算法(Genetic Algorithm,GA)是一种模拟生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法[31-32]。

利用 GA 算法对 SOFC 进行多变量参数优化的

计算流程如图 13 所示。目标函数为系统效率，多变量约束条件：1 275.15 K > T_{SOFC} > 873.15 K，0.9 > U_f > 0.7，10 000 A/m^2 > j > 6 000 A/m^2，5 > r > 2。GA 算法主要的超参数为：种群个体数为 120，最大进化代数为 256，交叉率为 0.7，变异率为 0.05。

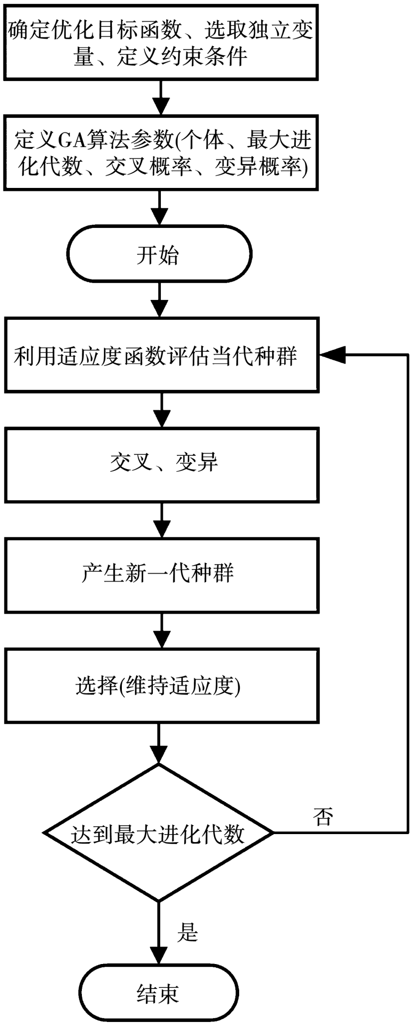

图 13　利用遗传算法的多变量参数优化程序流程图

Fig. 13 Flow chart of multivariate parameter optimization procedure using genetic algorithm

4.2　优化结果

参数优化结果为：T_{SOFC} = 895.05 K，U_f = 0.872，j = 6 030 A/m^2，r = 2.05，优化后的系统效率为 0.480 9，㶲效率为 0.462 6，比最佳燃料利用系数下的最优效率 0.44 提升了 0.04，比最佳工作温度下的最优效率 0.46 提升了 0.02。

优化运行工况点下 SOFC 各设备的㶲损如图 14 所示。可以看出，空气换热器（Y）的㶲损最高为 120 kW，燃料压缩机（FC）、水泵（WP）㶲损可以近似忽略。

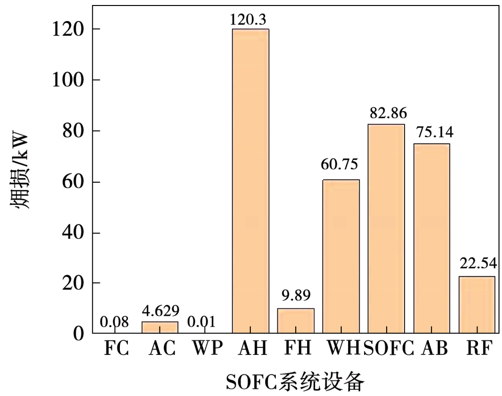

图 14　参数优化后各设备㶲损

Fig. 14 Exergy loss of each device after parameter optimization

5　结　论

利用 EES 软件建立了燃料重整的 SOFC 发电系统模型，对重整反应中燃料利用系数、电流密度、电池工作温度及水碳比等参数对系统性能的影响进行了研究，对系统的㶲损及㶲效率进行了计算分析，并对系统的多变量参数进行优化，得出结论：

（1）在给定的电流密度条件下，随着燃料利用系数增加，系统效率会逐步增加然后下降，每一电流密度下都有其最佳燃料利用系数。电流密度从 2 500 A/m^2 增加到 10 000 A/m^2 时，对应的最优燃料利用系数从 0.9 降低到 0.77，系统最优效率从 0.57 减少到 0.34。

（2）电流密度对输出电势、系统效率、设备的㶲损有显著影响。电流密度从 2 000 A/m^2 增加到 10 000 A/m^2，电池的输出电势从 0.78 V 下降到 0.42 V，系统效率从 0.57 下降到 0.26，活化过电势变化最为显著，从 0.05 V 升高到 0.204 V。随着电流密度增加，系统设备的㶲损都有所增加，水泵、燃料压缩机和空气压缩机的㶲损较小，空气加热器的㶲损所占份额最大。

（3）重整反应中，水碳比增加会使重整反应产氢量增加，从而促进了电化学反应，使电流密度有小幅增加，水碳比从 2 增到 4，电堆的电流密度从 6.896 A/m^2 增加到 6 981 A/m^2，但尾气中氢气的摩

尔分数会降低。

(4)利用遗传算法对燃料利用系数、电流密度、水碳比、电堆工作温度进行多变量参数优化,优化后系统的效率及㶲效率为0.480 9和0.462 6,比单变量最佳参数提升了0.04。

参考文献:

[1] HOSSAIN S, ABDALLA A M, JAMAIN S N B, et al. A review on proton conducting electrolytes for clean energy and intermediate temperature-solid oxide fuel cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,2017,79:750 – 764.

[2] PENG J, HUANG J, et al. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: a review[J]. Journal of Power Sources,2021,505:230058.

[3] WANG S, MA J, LI W, et al. An optimal configuration for hybrid SOFC, gas turbine, and proton exchange membrane electrolyzer using a developed Aquila optimizer[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2022,47(14):8943 – 8955.

[4] DAI H, BESSER R S. Understanding hydrogen sulfide impact on a portable, commercial, propane-powered solid-oxide fuel cell[J]. Applied Energy,2022,307:118163.

[5] CHENG C, JACOB C, MUHAMMAD S , et al. Performance assessment of a novel biomass-based solid oxide fuel cell power generation cycle; economic analysis and optimization[J]. Energy, 2021, 224:120134.

[6] 于泽庭,韩吉田,苏国萍. 固体氧化物燃料电池电热冷联供总能系统的分析[J]. 太阳能学报,2007,28(6):648 – 653.
YU Ze-ting, HANG Ji-tian, SU Guo-ping. Analysis of total energy system based on solid oxide fuel cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2007,28(6):648 – 653.

[7] 张秦玮,张筱松,邓美隆. 一种新型化学链制氢与SOFC集成的能量系统[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5):1804 – 1810.
ZHANG Qin-wei, ZHANG Xiao-song, DENG Mei-long. A novel system integrating chemical-looping hydrogen generation and solid oxide fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(5):1804 – 1810.

[8] 赵 青,吕小静,王蔚国,等. 重整条件对SOFC电池堆性能影响的实验研究[J]. 动力工程学报,2015,35(11):929 – 933.
ZHAO Qing, LYU Xiao-jing, WANG Wei-guo, et al. Effects of reforming conditions on performance of the SOFC stack[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering ,2015,35(11):929 – 933.

[9] 黄尚龙,杨 晨,陈 浩,等. 燃料预重整份额对SOFC-GT混合发电系统设计的影响[J]. 中国电机工程学报,2022,42(10):3691 – 3700.
HUANG Shang-long, YANG Chen, CHEN Hao, et al. Effects of fuel pre-reforming ratio on system design performance of a natural gas solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(10):3691 – 3700.

[10] MOZDZIERZ M, CHALUSIAK M, KIMIJIMA S, et al. An afterburner-powered methane/steam reformer for a solid oxide fuel cells application[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54 (8): 2331 – 2341.

[11] PETERS R, DAHL R, KLÜTTGEN U, et al. Internal reforming of methane in solid oxide fuel cell systems[J]. Journal of Power Sources,2002,106(1/2):238 – 244.

[12] SINGHAL S C, KEVIN K. High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications[J]. Materialstoday, 2002, 5(12):55.

[13] BADUR J, LEMAŃSKI M, KOWALCZYK T, et al. Zero-dimensional robust model of an SOFC with internal reforming for hybrid energy cycles[J]. Energy,2018,158:128 – 138.

[14] FAHEEM H H, ABBAS S Z, TABISH A N, et al. A review on mathematical modelling of direct internal reforming-solid oxide fuel cells[J]. Journal of Power Sources ,2022,520:230857.

[15] 申双林,张小坤,万兴文,等. 固体氧化物燃料电池温升模拟中入口异常高温度梯度研究[J]. 物理学报,2022,71(16):224 – 232.
SHEN Shuang-lin, ZHANG Xiao-kun, WAN Xing-wen, et al. Study on extremely high temperature gradient at entrance of solid oxide fuel cell by preheating model[J]. Acta Physica Sinica, 2022,71(16):224 – 232.

[16] VAN B L, GODJEVAC M, VISSER K, et al. Dynamic modelling of a direct internal reforming solid oxide fuel cell stack based on single cell experiments [J]. Applied Energy, 2019, 250: 976 – 990.

[17] WANG Y, WU C, ZHAO S, et al. Coupling deep learning and multi-objective genetic algorithms to achieve high performance and durability of direct internal reforming solid oxide fuel cell [J]. Applied Energy,2022,315:119046.

[18] KHAN M S, MIURA Y, FUKUYAMA Y, et al. Methane internal steam reforming in solid oxide fuel cells at intermediate temperatures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(29):13969 – 13979.

[19] FINNERTY C M, COE N J, CUNNINGHAM R H, et al. Carbon formation on and deactivation of nickel-based/zirconia anodes in solid oxide fuel cells running on methane[J]. Catalysis Today, 1998,46(2/3):137 – 145.

[20] CIMENTI M, HILL J M. Direct utilization of liquid fuels in SOFC for portable applications: challenges for the selection of alternative anodes[J]. Energies,2009,2(2):377 – 410.

[21] 赵金国,郭 恒. 氢燃料电池氢气利用率提升策略研究[J].

太阳能学报,2022 ,43(8):510 – 516.
ZHAO Jin-guo, GUO Heng. Research on hydrogen utilization rate enhancement strategy of hydrogen fuel cell[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022 ,43(8):510 – 516.

[22] KOO T, KIM Y S, LEE D, et al. System simulation and exergetic analysis of solid oxide fuel cell power generation system with cascade configuration[J]. Energy, 2021, 214:119087.

[23] OZGUR C C, DINCER I, HAMDULLAHPUR F. Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32:787 – 795.

[24] 赵永明,薛华庆,张福东,等. 以煤层气为燃料的固体氧化物燃料电池发电系统的模拟与分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3):1043 – 1052.
ZHAO Yong-ming, XUE Hua-qing, ZHANG Fu-dong, et al. Simulation and analysis of the coal seam methane fueled solid oxide fuel cell power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3):1043 – 1052.

[25] CHAN S H, HO H K, TIAN Y. Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109:111 – 120.

[26] ORYSHCHYN D, HARUN N F, TUCKER D, et al. Fuel utilization effects on system efficiency in solid oxide fuel cell gas turbine hybrid systems[J]. Applied Energy, 2018, 228:1953 – 1965.

[27] ZHAO F, VIRKAR A V. Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters[J]. Journal of Power Sources[J]. 2005, 141(1):79 – 95.

[28] BOSSEL U G. Final report on SOFC data facts and figures[M]. Swiss Federal Office of Energy, 1992.

[29] KIM J W, FUNG K Z, MEHTA K, et al. Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146 (1): 69 – 78.

[30] http://www.fchartsoftware.com/ees/.

[31] JOHN H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. MIT Press, 1992.

[32] SRINIVAS N, DEB K. Multi objective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3):221 – 248.

(丛　敏　编辑)

简　讯

美国能源部资助了 7 项海洋能源技术

美国能源部(DOE)宣布,将为七个项目提供近 1 000 万美元的资金,加速海洋能源技术的开发和测试,并通过其推动“蓝色经济”计划。

这些投资促进了用于海水淡化的波能技术的研究,并支持对潜在的洋流测试设施进行可行性研究。

这七个项目集中在四个方面:

证明波能海水淡化系统的稳健性和可靠性设计;

降低风险及验证波能海水淡化系统中的新组件;

支持更广泛地推进海洋能源脱盐;

评估建立洋流测试设施的可行性,让许多开发人员分摊测试成本,以减少测试障碍。

(孙嘉忆摘译自 www.powerengineeringint.com)