

燃料电池稳态输出功率与效率的双目标优化

吴字强,王 伟,黄 亮,谢长君
(武汉理工大学自动化学院,武汉 430070)

摘要:目前对燃料电池性能的研究基本上都是对燃料电池的某一个目标进行分析,这可能会导致其他重要参数产生重大偏差,从而影响燃料电池系统的性能,并且对于一个发电装置来说,其功率和效率是一对不可分割的重要参数。为此,提出了一种针对燃料电池系统稳态输出功率与效率的双目标优化算法。通过模型分析得到燃料电池稳态输出功率和效率与影响变量的关系,采用控制变量的方法实现对输出功率和效率的最优化。因系统复杂的非线性关系,仿真中采用一种带约束处理机制的自适应差分进化多目标优化算法以实现优化目标。

关键词:燃料电池系统;稳态输出功率与效率;差分进化;双目标优化

Bi-objective Optimization for Steady-state Output Power and Efficiency of Fuel Cell

WU Ziqiang, WANG Wei, HUANG Liang, XIE Changjun
(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: At present, the research on the fuel cell performance basically focuses on analyzing one single objective of the fuel cell, which may lead to significant deviation of other important parameters and affect the performance of the fuel cell system. Moreover, for a power generation device, its power and efficiency are an inseparable pair of important parameters. In this paper, a bi-objective optimization algorithm for the steady-state output power and efficiency of a fuel cell system is proposed. The relationship between the steady-state output power and efficiency of a fuel cell and the influencing variables is obtained through the model analysis. On this basis, a control method for these variables is used to achieve the optimal output power and efficiency. However, due to the system's complex non-linearity, an adaptive differential evolution multi-objective optimization algorithm with constraint mechanism is adopted in simulations to realize the optimization of objectives.

Keywords: fuel cell system; steady-state output power and efficiency; differential evolution algorithm; bi-objective optimization

完整的燃料电池系统包括燃料电池堆和其必须的辅助工作系统,辅助系统由氢气供给与循环系统、空气供给系统、水与热管理系统和控制系统组

成。燃料电池输出功率依赖于合适的温度和湿度以及阴极侧氧气和阳极侧氢气的供给,因此对一个燃料电池系统来说,提高氧气和氢气的供给就能提高燃料电池输出功率。但氧气和氢气的供给也需要消耗功率,此功率为燃料电池的寄生功率,寄生功率主要是由风机构成的空气压缩机产生^[1-3]。文中使用输出效率来体现燃料电池的净输出能力,输出效率为燃料电池的净输出功率与输出功率的比值,而净输出功率为燃料电池系统输出功率减去寄生功率。

当燃料电池驱动的负载发生变化需要提高输

收稿日期:2018-11-29;修回日期:2019-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助面上项目(51477125);湖北省自然科学基金资助杰青项目(2017CFA049);湖北省技术创新资助重大项目(2018AAA059)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51477125); the Hubei Science Fund for Distinguished Young Scholars(2017CFA049); the Hubei Province Technological Innovation Major Project(2018AAA059)

输出功率时,如果一味地提高燃料的供给虽然可以提高输出功率,但同时也会导致损耗即寄生功率的增大,从而可能降低燃料电池的输出效率和产生不必要的燃料消耗。因此对于燃料电池发电系统来说,在不断提高其输出功率的同时,使其输出效率得到优化,从而避免资源的浪费,这对于燃料电池应用的深入发展具有实际意义。但目前,对燃料电池的性能研究或集中在其输出功率上面,追求输出功率的最大化^[4];或针对其空气供给系统提出的氧匮乏控制来降低所消耗寄生功率^[1,3],两者都忽略了在燃料电池系统中输出功率和效率的不可分割性。这是一个痛点,也是目前急需解决的重要问题。

本文,利用 Simulink 对燃料电池系统进行建模,采用由 Li 等^[5]提出的已在大型工业二氯乙烷裂解多目标优化上取得优秀表现的带约束处理机制多目标自适应差分进化多目标优化算法 SMODE-CD(self-adaptive method of optimal differential evolution algorithm with a-constrained-domination principle)对燃料电池稳态输出功率和效率问题进行优化。仿真结果表明模型在此算法的优化下,在负载条件变化时可以达到提高燃料电池系统稳态输出的功率和效率的目的。

1 燃料电池模型建立

1.1 燃料电池电化学稳态模型

电化学反应是燃料电池发电的关键部分,而电化学动力学则是作为燃料电池输出功率的主要因素,燃料电池电化学反应如图 1 所示。

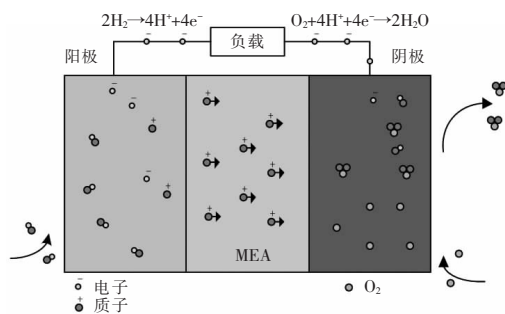


图 1 燃料电池电化学反应

Fig.1 Fuel cell electrochemical reaction

其输出电压可以表示为开路电压与各种过电压的差值^[6,7],即

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{cell}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}} \quad (1)$$

式中: E_{cell} 为燃料电池内部电势(电池两级之间的电压); V_{act} 为活化过电压; V_{ohm} 为欧姆过电压; V_{con} 为浓度差过电压。

根据文献[8-10]的 Nernst 方程以及吉布斯自由能的变化,可得到电池内部电势的表达式为

$$E_{\text{cell}} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{\text{st}} - 298) + 4.308 T_{\text{st}} \cdot [\ln P_{\text{H}_2} + 0.5 \ln P_{\text{O}_2}] \quad (2)$$

式中: T_{st} 为电池工作温度; P_{H_2} 为氢气压力(atm); P_{O_2} 为氧气压力(atm)。

活化过电压的产生主要是由于电子在移动过程中需要消耗能量,随着对活化过电压研究的不断深入,研究人员将活化过电压总结为经验公式,其表达式为

$$V_{\text{act}} = \alpha_1 + \alpha_2 T_{\text{st}} + \alpha_3 T_{\text{st}} \ln(C_{\text{O}_2}) + \alpha_4 T_{\text{st}} \ln i \quad (3)$$

式中: i 为电流密度; T_{st} 为电池温度; C_{O_2} 为阴极氧气浓度;其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为参数,其经过研究人员的不断实验得到,取值分别为

$$\begin{cases} \alpha_1 = -0.9514 \\ \alpha_2 = 0.00286 + 0.0002 \ln A + 4.3 \times 10^{-5} \ln C_{\text{H}_2} \\ \alpha_3 = 7.4 \times 10^{-5} \\ \alpha_4 = 1.87 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (4)$$

式中, A 为质子交换膜的有效活化面积; C_{H_2} 为阳极氢气浓度。氧气和氢气的浓度计算公式分别为

$$C_{\text{H}_2} = \frac{P_{\text{H}_2}}{1.09 \times 10^6 \exp(77/T_{\text{st}})} \quad (5)$$

$$C_{\text{O}_2} = \frac{P_{\text{O}_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T_{\text{st}})} \quad (6)$$

欧姆过电压的产生主要是由于离子在电解质中移动所受到的阻抗和电子通过电极时所受到的阻抗。其中

$$V_{\text{ohm}} = I_{\text{st}} R = I_{\text{st}} (R_m + R_c) \quad (7)$$

式中: I_{st} 为负载电流; R_m 为质子交换膜阻抗; R_c 为电池内阻。

其中

$$R_m = \frac{r_m l}{A} \quad (8)$$

$$r_m = \frac{181.6[1+0.03\frac{I_{st}}{A}+0.062(\frac{I_{st}}{303\frac{A}}{A})^2(\frac{I_{st}}{A})^{2.5}]}{[\lambda-0.634-\frac{3I_{st}}{A}]\exp[4.18(\frac{T_{st}-303}{T_{st}})]} \quad (9)$$

$$R_c = 0.016\ 05 - 3.5 \times 10^{-5} T_{st} + 8 \times 10^{-5} i \quad (10)$$

式中： r_m 为半透膜的电阻率； l 为半透膜的厚度； λ 为燃料电池工作时半透膜的含水量。

浓度差过电压是因为反应物浓度变化而损失的电压，其表达可以表示为

$$V_{con} = -B \ln(i/i_{max}) \quad (11)$$

式中： i 为负载的电流密度； i_{max} 为负载的最大电流密度； B 为与燃料电池工作温度有关的经验参数，表示为

$$B = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-6} (T_{st} - 273.15) & T_{st} \geq 312.15 \text{ K} \\ 3.3 \times 10^{-3} - 8.2 \times 10^{-5} (T_{st} - 273.15) & T_{st} < 312.15 \text{ K} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(1)~式(11)可知，单位燃料电池电压 V_{cell} 与众多耦合非线性的参数有关，即 $x_{NL1} = [i, P_{H_2}, P_{O_2}, T_{st}, \phi_{ca}, \phi_{an}]^T$ ，其中 ϕ_{ca} 、 ϕ_{an} 分别为阴极和阳极的湿度，则可将燃料电池电压写成 $V_{cell}(i, P_{H_2}, P_{O_2}, T_{st}, \phi_{ca}, \phi_{an})$ 。多片燃料电池单元串联在一起形成燃料电池堆，所以总燃料电池电压为 $V_{st} = nV_{cell}$ ，总输出功率应为 $P_{st} = nAV_{cell}i$ 。为了研究方便，本文中把 3 个温度(温度电池的工作温度、阴极气体的加湿温度、阳极气体的加湿温度)整合为 1 个平均温度^[11]，同时忽略与散热相关的慢动态行为，假定平均温度对建模和分析都易于调节。

1.2 燃料电池阴阳极气流模型和空气压缩机模型

一般燃料电池系统的阴极氧气是通过歧管将压缩机空气导入的。本文为了研究方便，去除歧管。则阴极侧气体的流量动态方程为

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,ret} \quad (13)$$

式中： m_{O_2} 为阴极中氧气的质量； $W_{O_2,in}$ 、 $W_{O_2,out}$ 和 $W_{O_2,ret}$ 分别为阴极的入口氧气流量、出口氧气流量和氧气反应流量，其中，

$$W_{O_2,in} = y_{O_2} \frac{1}{1 + \Omega_{atm}} W_{sm} \quad (14)$$

$$W_{O_2,ret} = M_{O_2} \frac{nI_{st}}{4F} \quad (15)$$

式中： y_{O_2} 为大气中氧的质量分数， $y_{O_2} = \chi_{O_2} M_{O_2} / M_{atm}^{atm}$ ， $\chi_{O_2} = 0.21$ ； W_{sm} 为歧管流量； Ω_{atm} 为标准大气压下的湿度率； n 为燃料电池堆单元数量； F 为法拉第常数。

根据阴极侧道尔顿定律计算，阴极空气压力为 $P_{ca} = P_{O_2} + P_{N_2} + P_{v,ca}$ ，其中 $P_{O_2} = RT_{st} m_{O_2} / M_{O_2} V_{ca}$ ， $P_{N_2} = RT_{st} m_{N_2} / M_{N_2} V_{ca}$ ，水蒸气压力 $P_{v,ca} = \phi_{ca} P_{sat}^t$

根据质量守恒定律和理想气体法则，阳极侧气体流量动态方程为

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = W_{H_2,in} - W_{H_2,purge} - W_{H_2,ret} \quad (16)$$

$$W_{H_2,in} = \frac{1}{1 + \Omega_{an,in}} W_{an,in} \quad (17)$$

式中： m_{H_2} 为阳极中氢气的质量； $W_{H_2,in}$ 、 $W_{H_2,purge}$ 、 $W_{H_2,ret}$ 分别为阳极的入口氢气流量、排出氢气流量和氢气反应流量； $\Omega_{an,in}$ 为阳极入口湿度率； $W_{an,in}$ 为阳极入口气体流量。

阳极压力用道尔顿定律计算为

$$P_{an} = \frac{RT_{st}}{M_{H_2} V_{an}} m_{H_2} + \min \left[1, \frac{RT_{st} m_{w,an}}{M_v V_{an} P_{sat}^t} \right] P_{sat}^t \quad (18)$$

其中： $m_{w,an}$ 为水蒸气的质量； R 为普适气体常数； V_{an} 为电推阴极体积； P_{sat}^t 为阳极水蒸气压力。

压缩机模型用压缩机转速的动态特性表示为

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = \tau_{cm} - \tau_{cp} \quad (19)$$

式中： J_{cp} 为压缩机转动惯量； ω_{cp} 为压缩机转速； τ_{cm} 为压缩机电动机驱动力矩， $\tau_{cm} = \eta_{cm} k_t (v_{cm} - k \omega_{cp}) / R_{cm}$ ； τ_{cp} 为空气压缩机的负载力矩， $\tau_{cp} = C_p T_{atm} F_{cp} [(P_{sn} / P_{atm})^{(\gamma-1)\gamma} - 1] / \omega_{cp} \eta_{cp}$ 。其中， k_t 、 R_{cm} 、 k_v 为电动机常数， v_{cm} 为电动机的极端电压， η_{cm} 为电动机的机械效率， F_{cp} 为空气质量流量， P_{sn} 为压缩机出口压力(因为已去除歧管，所以 $P_{sn} = P_{ca}$)。通常输入空气 $P_{atm} = 1 \text{ atm}$ ， $T_{atm} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

基于状态方程式(12)~式(18)的非线性阴阳极和压缩机模型包含的状态变量为

$$x_{NL2} = [P_{ca}, P_{an}, W_{sm}, W_{an,in}, \omega_{cp}]^T \quad (20)$$

综合第 1.1 节与第 1.2 节所述可以得到，本文所建燃料电池稳态功率与效率模型有关变量为

$$x_{NL} = [i, P_{ca}, P_{an}, T_{st}, W_{sm}, W_{an,in}, \omega_{cp}, \phi_{ca}, \phi_{an}]^T \quad (21)$$

式中： P_{ca} 、 P_{an} 分别为阴极空气压力和阳极氢气压

力; W_{sm} 、 $W_{an,in}$ 分别为阴极质量流量和阳极氢气质量流量(可以使用体积流量计算); 压缩机电动机电压 v_{cm} 在负载电流 I_{st} 变化时(功率变化)受到控制。

则模型方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{NL} = f(x_{NL}, u, \delta) \\ u = v_{cm} \\ \delta = I_{st} \end{cases} \quad (22)$$

那么此时燃料电池稳态输出功率 $P_{st} = f_1(x_{NL}, I_{st})$, 净输出功率为 $P_{net} = f_1(x_{NL}, I_{st}) - f_1(x_{NL}, v_{cm})$, 则其电堆输出效率为

$$\eta = \frac{P_{net}}{P_{st}} = \frac{f_1(x_{NL}, I_{st}) - f_1(x_{NL}, v_{cm})}{f_1(x_{NL}, I_{st})} \quad (23)$$

2 优化算法

在进行两个或多个优化目标时,往往通过加权和等传统技术将各个目标结合起来,将问题变为单个目标优化问题,这种传统的优化方法对初始点的选择依赖性大,容易陷入局部最优问题,而且对于很多问题没有办法计算目标函数的下一次迭代点,会导致无法完成优化求解。随着高效进化算法的发展^[12,13],特别是多目标优化算法,研究的重点已经转向同时处理多目标的优化算法。本文将采用由 Li^[5]等提出的已在大型工业二氯乙烷裂解多目标优化上取得优秀表现的带约束处理机制多目标自适应差分进化多目标优化算法(SMODE- ϵ CD),利用该算法对燃料电池稳态输出功率和效率这一对目标进行优化。

2.1 优化目标和决策变量的选择

本文中燃料电池2个重要的优化目标为:稳态输出功率和效率,这两个目标之间相互矛盾。根据以上建模过程可以构成一个典型的双目标优化模型,即

$$F(X) = [\max(P_{st}), \max(\eta)]^T \quad (24)$$

其中, P_{st} 和 η 均为影响变量 X 的函数。

根据上述模型,本文对阴极和阳极湿度进行简化处理,固定为标准相对湿度,同时保持理想情况温度不变。根据 x_{NL} 可以得到,对于性能有显著的

影响变量有:阴极空气压力、阳极氢气压力、燃料电池工作温度、载电流、阴极质量流量和阳极氢气质量流量(用体积流量计算)。总结决策向量为 X , $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。其中 $x_1 = P_{ca}$, $x_2 = P_{an}$, $x_3 = V_{sm}$, $x_4 = V_{an,in}$, $x_5 = \omega_{cp}$, $x_6 = I_{st}$ 。

2.2 约束条件的确定

燃料电池工作条件可调整的幅度必须满足一些约束条件,主要有:系统过氧比 OER (oxygen excess ratio) 表征燃料电池系统的供氧状况,是衡量系统发电性能的重要指标,综合参考文献[5,14]的建议,本文设定 OER 不超过 2.4; 燃料电池输出功率不能超过额定功率太多,选择 50 kW 仿真模型其峰值功率不超过 55 kW; 燃料电池输出效率不可能达到 100%。结合实际数据和经验,燃料电池稳态输出功率和效率问题的约束条件为

$$\begin{cases} g_1(X) = \lambda_o - 2.4 \leq 0 \\ g_2(X) = P_{st} - 55 \leq 0 \\ g_3(X) = \eta - 1 \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

其中决策变量 X 为了满足稳定运行条件以及安全要求也有一定的规定范围变化。在仿真模型中阴极空气压力、阳极氢气压力、阴极质量流量与阳极质量流量的界限为燃料电池模型额定 50 kW 输出范围内各参数的最大值; 负载电流为额定输出功率时负载的最大电流; 压缩机模型空气压缩机由实验数据构建^[1], 设定最大扭矩不超过 2 000 转, 则有

$$\begin{cases} 1 \leq x_1 \leq 3 \\ 0.5 \leq x_2 \leq 5 \\ 0 \leq x_3 \leq 2\ 100 \\ 0 \leq x_4 \leq 417.3 \\ 0 \leq x_5 \leq 2\ 000 \\ 0 \leq x_6 \leq 240 \end{cases} \quad (26)$$

2.3 SMODE- ϵ CD 变异过程的自适应调整策略

差分进化算法的变异过程会改变实验解向量的种类和大小,从而会影响种群进化变异的方向。而变异过程完全是受参数 F 直接控制,所以需要设定 F 。如果 F 选择大点,那么就会得到更多的实验解向量,意味着会产生更多的子代,将会导致算法寻找最佳解的时间更长,反而更不容易找到最佳解的。若 F 选

择小点,那么就会减少子代的数目,虽然会更容易找到最佳解,但是却丢失了种群的多样性,导致寻找到的最佳解为目前子代的最佳解,并不是整个优化目标的最佳解,导致算法进入一个死点。

因此设计了一种指数变化的变异算子自适应更新策略,通过在每一代的变异过程中增均改变 F 来适应每一个的种群规模和特性。这样就可以使得 F 前期较大,保持种群多样性,后期 F 逐渐减小,保持最优个体的收敛性分布性。变异算子自适应更新公式为

$$F(t) = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \exp(-t/\text{gen}) \quad (27)$$

式中: F_{\max} 、 F_{\min} 分别为 F 的上、下限, F 的变化范围为 $[0, 1]$; t 为当前进化代数; gen 为总进化代数。

2.4 SMODE- ε CD 交叉过程的自适应调整策略

差分进化算法的交叉过程改变实验解向量中变异个体的种类和大小,从而会影响种群的规模和分布。而交叉过程也完全是受参数 C_r 直接控制的,也需要设定 C_r 。若 C_r 选择大点,那么就会使得到的实验解向量中含有更多的变异个体,就会与父代种群进行区分,可以通过这种不同从而更快地找到优化目标的最佳解,但是因为与父代不同的成分太多,可能会造成算法的鲁棒性变得很差;若 C_r 选择的小点,那么实验解向量中含有更少的变异个体,这就与父代形成很小的差别,不利于最佳解的寻找。

差分进化算法过程中,对于种群的特性要求是不断变化的,所以若保持交叉因子在进化过程中一直不变,显然不能很好地适应种群进化的要求。因此与变异过程类似,通过在每一代的交叉过程中都改变 C_r 值来适应每一个种群规模和特性。交叉因子随迭代次数自适应更新的公式为

$$C_r(t) = C_{r,\min} + (C_{r,\max} - C_{r,\min}) \exp(-t/\text{gen}) \quad (28)$$

2.5 SMODE- ε CD 基于 ε 约束处理机制的选择策略

在处理多目标问题中往往具有很多约束条件,而这些约束条件会使多目标问题的求解变得非常困难。为了简化多条件下的求解过程,应当采用合适科学的方法提高优化解的准确度。本文采用一种比较排序与差分进化相结合的方法,约束种群的搜索能力,保证最优解的求解质量。水平排序是该类

搜索方法的主要手段,顺序依次为优质可行解、劣质可行解、违约程度低不可行解。选择过程为从高到低的选择,保证可行解的数目,在某些可行解不足的时候补充违约程度低的不可行解。

由于 ε 处理机制随着进化推进不断变化^[15],即 ε 动态排序关系会随着进化时段变化^[16]。倘若优化条件较多则需要统一约束和违反的量值,例如 p 个不等式约束 $g_j(x)$ 以及 q 个等式约束 $h_j(x)$ 。约束条件下的计算方法,主要是统筹所有信息,加权求和处理^[17],即

$$\begin{cases} G_j(x) = \begin{cases} \max \{g_j(x), 0\} & j = 1, 2, \dots, p \\ \max \{|h_j(x)|, 0\} & j = p+1, p+2, \dots, p+q \end{cases} \\ \phi(x) = \sum_{j=1}^{p+q} G_j(x) \end{cases} \quad (29)$$

优化种群的选择特征,早期选择放宽约束条件便于尽快得到子代,后期选择加强限定条件便于得出更优化的子代,弹性的控制约束条件。在整个调节过程中每一代的实际数值为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) (1 - t/T_c)^{cp} \quad 0 < t < T_c \quad (30)$$

式中: T_c 为约束松弛过程的最大进化代数; cp 取值一般在 $[2, 10]$ 范围内; $\varepsilon(0)$ 为初始 ε 松弛值,由初始种群中前 θ 个个体计算得到, $\varepsilon(0) = \phi(x_\theta)$ 。

算法优化计算框架如图 2 所示。本文带约束处理机制多目标自适应差分进化多目标优化算法流程如图 3 所示。

根据第 2.1~2.2 节设定的参数以及变量范围,就可以初始化随机种群,通过差分进化算法不断地

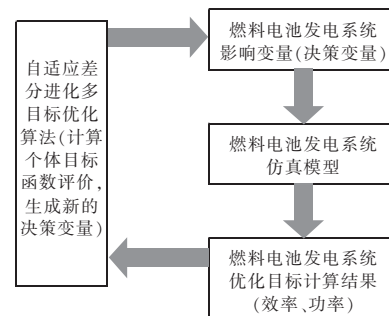


图 2 燃料电池多目标优化计算框架图

Fig.2 Framework diagram for multi-objective optimization calculation of fuel cell

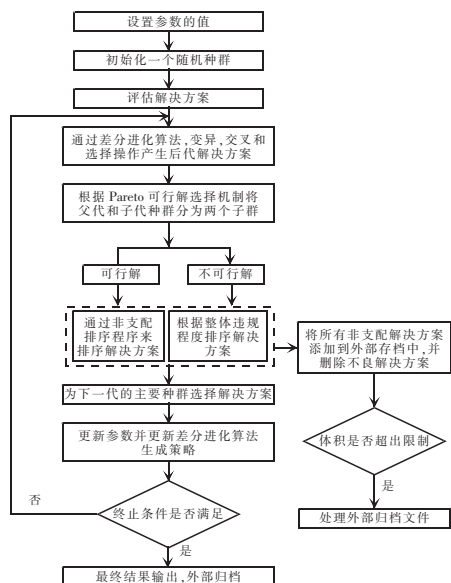


图 3 算法流程

Fig.3 Flow chart of algorithm

变异、交叉和选择产生新的种群,从而根据父子代种群的表现选出可行解和不可行解,可行解根据质量进行选择,不可行解根据不可行的高低差异进行区分,从而选择出最优质可行解,进行保存;不断地修正变异和交叉的参数重复父子代种群的筛选,最终找到功率和效率两个输出目标的最优解。

3 仿真分析

在 Simulink 上建立上述燃料电池系统非线性

模型,并进行仿真实验。采用 50 kW 燃料电池系统模型,控制不同输出电流,使用 SMODE- ϵ CD 算法优化,在自适应差分进化多目标优化算法的参数分别规定如下:种群大小为 250,最大迭代次数 100。仿真模型如图 4 所示。

仿真中使用的影响变量数据(决策变量)来自武汉理工大学研制的 50 kW 级燃料电池系统平台,将实际测试中的输入变量数据送到仿真模型中,算法未优化时模型稳态输出功率和输出效率如图 5 所示。为了减少误差,算法优化前后的燃料电池输出都进行 10 次实验,再分别将 10 次输出的总功率和净输出功率整合为一组数据。

从图 5 中可以明显看出,对于同样的输入影响变量,得到的输出功率与效率点并不是都是聚合在一起,有些相差很大;同时对于同一个输出功率,输出效率也不一样。这表明未经过算法优化的燃料电池系统在不同输出功率时,没有实现输出效率的最优化,产生了过多的不必要损耗,影响了整个燃料电池发电系统输出表现。

经过双目标优化算法优化后的燃料电池输出功率和效率如图 6 所示。

将算法优化前后的输出效率和效率进行对比可以发现,算法优化后燃料电池的输出表现更好。图中体现为对于同样的输入影响变量,输出功率和效率点更多地重合在一起,并且对于同样的输出功

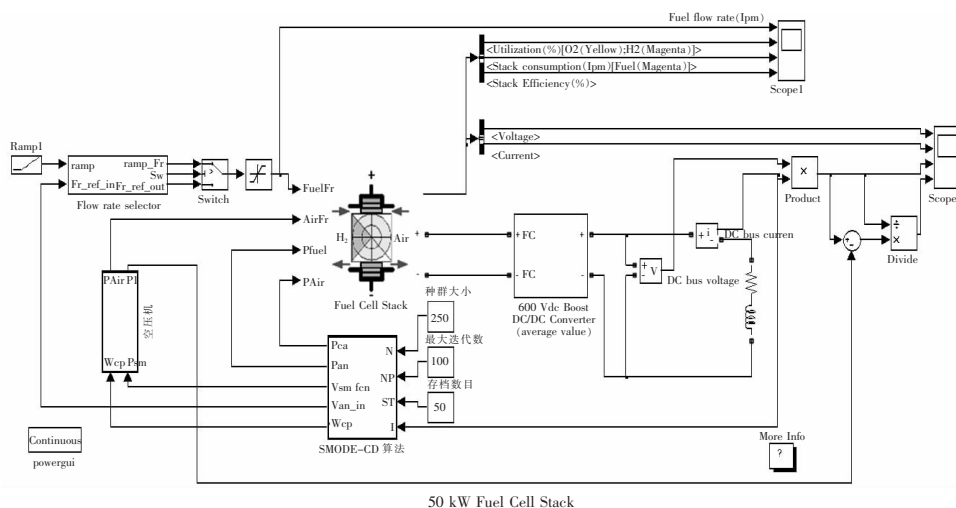


图 4 燃料电池双目标优化算法 Simulink 图

Fig.4 Simulink diagram of fuel cell dual-objective optimization algorithm

率,输出的效率偏移更小。

将图 5 和图 6 的散点图进行曲线拟合,如图 7 所示。从图中可以看出:经过算法优化后,在同样输出功率情况下输出效率更大,同样输出效率情况下输出功率更大;燃料电池的输出效率达到 80% 以上,即空压机等寄生损耗占燃料电池输出功率的比例大约为 20%,此为理想情况下忽略燃料电池与压缩机热损失后的输出效率。

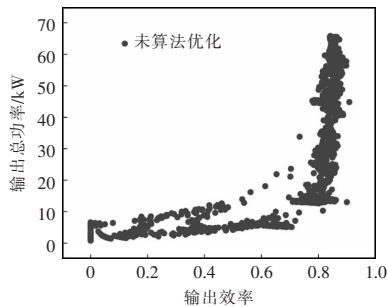


图 5 算法未优化的输出效率与输出总功率

Fig.5 Output efficiency and total output power not optimized by algorithm

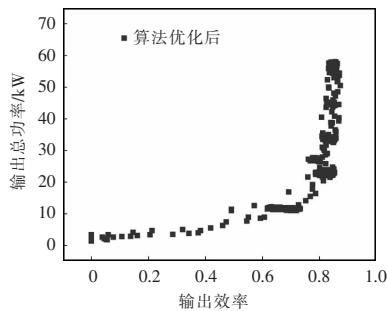


图 6 算法优化后输出效率与输出总功率

Fig.6 Output efficiency and total output power after optimization of the algorithm

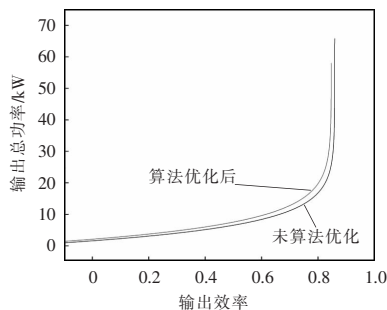


图 7 算法优化前后数据拟合对比图

Fig.7 Comparisons of data fitting before and after optimization of algorithm

4 结语

燃料电池发电系统稳态输出功率与效率是衡量燃料电池性能的一对重要参数,只分析某一个参数往往不够全面。本文基于 Simulink 建立的燃料电池稳态模型,在燃料电池系统中引入 SMODE- ϵ CD 优化算法对输出功率和效率进行双目标优化。仿真结果表明:算法有助于提升燃料电池的输出功率与效率,并且应用在燃料电池中是可行的,且能有效提升燃料电池发电系统输出的能力。此结论为研究燃料电池系统功率和效率问题以及燃料电池车的实际应用提供参考。

参考文献:

- [1] Pukrushpan J T, Stefanopoulou A G, Peng H. Control of fuel cell breathing[J]. IEEE Control Systems, 2004, 24(2): 30-46.
- [2] 张东波. PEM 燃料电池空气供给系统氧匮乏的模型预测控制[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Zhang Dongbo. PEM fuel cell air supply system oxygen starvation model predictive control[D]. Changchun: Jilin University, 2007(in Chinese).
- [3] 于树友, 陈虹, 张东波, 等. PEM 燃料电池空气供给系统氧匮乏的模型预测控制[C]. 中国控制会议, 2008.
Yu Shuyou, Chen Hong, Zhang Dongbo, et al. Model predictive control of oxygen scarcity in PEM fuel cell air supply system[C]. China Control Conference, 2008(in Chinese).
- [4] 童鹏, 卫东. PEMFC 的最大运行功率和广义预测控制[J]. 电源技术, 2016, 40(12): 2355-2357.
Tong Peng, Wei Dong. Maximum operating power and generalized predictive control of PEMFC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(12): 2355-2357(in Chinese).
- [5] 李朝春. 大型工业二氯乙烷裂解炉综合建模及优化[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
Li Chaochun. Comprehensive modeling and optimization of large-scale industrial ethylene dichloride cracker[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014

- (in Chinese).
- [6] Larminie J, Dicks A L. Fuel Cell Systems Explained[M]. 2nd Edition. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2003.
- [7] Jia J, Li Q, Wang Y, et al. Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 283-291.
- [8] Amphlett J C. Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1995, 142(1): 9-15.
- [9] Amphlett J C, Mann R F, Peppley B A, et al. A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 1996, 61(1-2): 183-188.
- [10] Mann R F, Amphlett J C, Hooper M A I, et al. Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1): 173-180.
- [11] 孙佳, 郭桦, 陈士忠, 等. 温度对 PEM 燃料电池性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(3): 518-523.
Sun Jia, Guo Hua, Chen Shizhong, et al. Effect of temperature on the performance of PEM fuel cell[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(3): 518-523(in Chinese).
- [12] La T A, Muelas S, Peña J M. A comprehensive comparison of large scale global optimizers[J]. Information Science, 2015, 316: 517-549.
- [13] Qu B Y, Suganthan P N, Das S. A distance based locally informed particle swarm optimization for multi-modal optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 17(3): 387-402 .
- [14] 李奇. 质子交换膜燃料电池系统建模及其控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
Li Qi. Research on modeling and control method of proton exchange membrane fuel cell system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011(in Chinese).
- [15] Qian F, Xu B, Qi R, et al. Self-adaptive differential evolution algorithm with α -constrained-domination principle for constrained multi-objective optimization[J]. Soft Computing, 2012, 16(8): 1353-1372.
- [16] Deb K, Pratap A, Meyarivan T. Constrained test problems for multi-objective evolutionary optimization [C]. Evolutionary Multi-Criterion Optimization, First International Conference, EMO 2001. Zurich, Switzerland, 2001: 284-298.
- [17] Takahama T, Sakai S. Constrained optimization by applying the α constrained method to the nonlinear simplex method with mutations[M]. IEEE Press, 2005.



吴字强

作者简介:

吴字强(1994-),男,硕士研究生,研究方向:新能源电源,E-mail:2469197205@qq.com。

王伟(1997-),男,硕士研究生,研究方向:新能源电源,E-mail:512986983@qq.com。

黄亮(1979-),男,博士,副教授,研究方向:新能源电源,E-mail:35644519@qq.com。

谢长君(1980-),男,博士,教授,研究方向:新能源电源,E-mail:670934896@qq.com。