

# 基于航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统性能

胡焦英, 毛军逵, 贺振宗  
(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

**摘 要:** 建立了基于航空煤油重整固体氧化物燃料电池-涡轮发动机(SOFC-GT)混合动力系统仿真模型,比较了两种回热方式的重整装置以及不同涡轮布置位置时的系统性能变化,优选出最佳的混合动力系统架构。进一步分析了压气机压比、燃料利用率、燃油流量以及空气流量等运行参数对 SOFC-GT 混合动力系统性能的影响。研究表明:设计点工况下,最佳混合动力系统的发电效率能达到 45%,体现出良好的系统性能;当燃料利用率为 0.82 时混合动力系统的效率和功率最高;随着燃油流量(0.0511~0.0584 mol/s)的增加,混合动力系统的效率和功率均增加;而随着压气机压比(2.5~3.3)或者空气流量(37~44 mol/s)的增加,混合动力系统的效率和功率都减小。

**关 键 词:** 固体氧化物燃料电池-涡轮发动机 (SOFC-GT); 航空煤油重整; 最佳系统架构; 运行参数; 系统效率

**中图分类号:** V231.1      **文献标志码:** A

## Performance of the SOFC-GT hybrid system based on aviation kerosene reforming

HU Jiaoying, MAO Junkui, HE Zhenzong  
(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,  
College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A simulation model of the solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system on the basis of the aviation kerosene reforming was established. The effect of two heat recovery methods on the reformers and the effect of the turbine positions on the system efficiency were studied to obtain the optimal system architecture. The performance of the SOFC-GT hybrid system was evaluated by studying the effects of the compressor pressure ratio, fuel utilization ratio, fuel flow rate and air flow rate. Results showed that the efficiency of the best hybrid system can reach 45% at the design condition, and the system demonstrated excellent performance. The efficiency and power of the system reached the peak with the fuel utilization ratio equaling to 0.82. Moreover, the efficiency and power could be improved with the growing fuel flow rate (from 0.0511 mol/s to 0.0584 mol/s), while the increasing compressor pressure ratio (from 2.5 to 3.3) or air flow rate (from 37 mol/s to 44 mol/s) could result in the reduction of the efficiency and power.

**收稿日期:**2019-09-18

**基金项目:**国防基础科研计划重点项目(JCKY2018605B006); 国家自然科学基金(51806103)

**作者简介:**胡焦英(1995—),男,硕士生,主要从事混合动力系统综合能量管理研究。

**引用格式:**胡焦英,毛军逵,贺振宗. 基于航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统性能[J]. 航空动力学报,2020,35(2):325-336.  
HU Jiaoying, MAO Junkui, HE Zhenzong. Performance of the SOFC-GT hybrid system based on aviation kerosene reforming[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 325-336.

**Key words:** solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system;  
aviation kerosene reforming; optimal system architecture;  
operating parameters; system efficiency

飞机辅助动力装置(auxiliary power unit, APU)是安装在飞机上的一套不依赖机外任何能源、自成体系的小型发动机,其为飞机电力系统提供大部分电力,例如发动机起动和机舱空气系统,并且用作备用电源<sup>[1]</sup>。传统的 APU 是基于涡轮发动机(gas turbine, GT)的循环,由于其体积相对较小以及使用时间较短,排放和效率低等问题早期并未引起关注。考虑到未来飞机传感器、客舱服务以及通信应用等的增加,飞机需要的电力负荷将持续增长,APU 的使用时间也会逐渐增加<sup>[2-6]</sup>。因此有必要尽快开发一种高效、低排放的系统来取代传统的辅助动力装置,燃料电池技术就是解决这些问题的方法之一。

固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)因其燃料适应性广以及高效率等特点,近年来受到了广泛的重视。SOFC 是一种将储存在燃料中化学能直接转化为电能的装置,由于不受卡诺循环的限制,其能量转换效率比传统的涡轮发动机装置要高出很多,能达到 60%~80%<sup>[7]</sup>。但受限于单个 SOFC 装置低能量密度、起动时间长以及动态响应慢等<sup>[8]</sup>缺点,研究者们提出了将 SOFC-GT 混合动力系统来代替现有的辅助动力装置来提高效率的想法。如 Panne 等<sup>[9]</sup>建立了以甲烷为燃料的 SOFC-GT 混合动力系统的数值仿真平台,并且计算了在不同压比对系统各部件的功率的影响,以及电池数量对系统性能的影响。Freeh 等<sup>[10]</sup>也建立了以甲烷为燃料的带有外部重整装置的 220 kW SOFC-GT 混合动力系统,并且研究了不同工作压力、温度以及燃料不同组分等条件下 SOFC 电堆的输出电压与电流密度之间的关系。

然而考虑到当今主流飞行器上使用的燃料是航空煤油而并非甲烷,因此对于航空用 SOFC-GT 以航空煤油为燃料进行研究是支撑未来工程应用所必须展开的工作。如 Rajashekara 等<sup>[11]</sup>将正十二烷代替作为航空煤油进行计算,建立了以航空煤油水蒸气重整的 SOFC-GT 混合动力系统,并且讨论了以客舱尾气和环境大气为气源对系统的影响以及不同高度下系统效率的变化。Braun 等<sup>[12]</sup>使用航空煤油为工质,建立了自热重整式 SOFC-GT 飞机辅助混合动力系统,系统的额定功率为 300 kW,其在地面和巡航时的效率分

别为 0.53 和 0.7; Steffen 等<sup>[13]</sup>模拟了一架可坐 300 人的商用飞机的辅助动力系统,所仿真的是 440 kW 的航空煤油部分氧化重整的 SOFC-GT 混合动力系统,其热效率能够达到 62%左右。

目前虽然对于以航空煤油重整的 SOFC-GT 辅助混合动力系统已经有初步研究成果,但是关于航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统的架构及方案仍比较匮乏,同时就影响系统的参数及其影响规律也有待进一步深入研究。

本文对航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统架构展开研究并进行性能分析,比较了不同架构方案对系统效率的影响,基于最优架构方案进行性能分析,探究了压气机压比、燃料利用率、燃油流量以及空气流量对 SOFC-GT 混合动力系统性能的影响,相关研究可以为航空煤油为燃料的高温 SOFC-GT 混合动力系统的设计和应用提供支撑。

## 1 航空煤油重整的 SOFC-GT 系统架构方案

为了选出最佳混合动力系统架构,本文提出并比较了 5 种不同的 SOFC-GT 混合动力系统架构。具体架构方案如图 1~图 3 所示。

图 1、图 2 和图 3 显示了本文设计的不同架构 SOFC-GT 混合动力系统。该系统主要由压气机、涡轮、换热器、水泵、燃油泵、重整一体装置(重整器与回热器)、SOFC 以及燃烧室等部件组成。架构 1 如图 1 所示,空气(绿色线标识)通过压气机增压进入系统,经过两级换热后进入 SOFC 的阴极,航空煤油(红色线标识)与经过泵加压、换热器 2 预热的水蒸气(黑色虚线标识)在重整室中进行重整反应,重整后的混合气体(紫色线标识)进入 SOFC 的阳极部分,重整反应所需要吸收的热量来自于高温 SOFC 电堆的部分阴极气体(绿色线标识),电堆阴极剩余的部分气体(绿色线标识)与阳极未被反应的气体(紫色线标识)在燃烧室进行充分燃烧,燃烧后的气体(蓝色线标识)与经过重整装置后的气体(绿色线标识)在混合器中进行混合,混合后的气体(黑色线标识)经过各级换热器换热充分利用这部分的热量。

与架构 1 不同的是,架构 2 中航空煤油重整所需要的热量由燃烧室的排气提供。

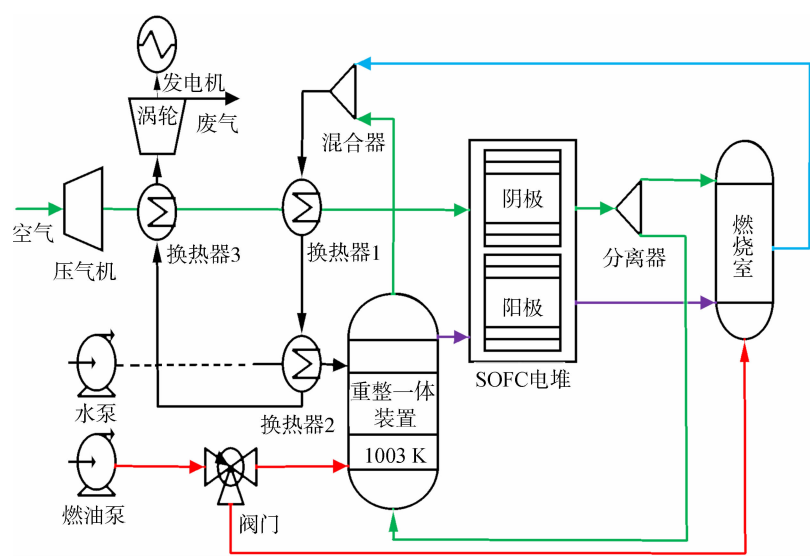


图 1 SOFC-GT 混合动力系统(架构 1)

Fig. 1 Architecture of the SOFC-GT hybrid system (the 1st architecture)

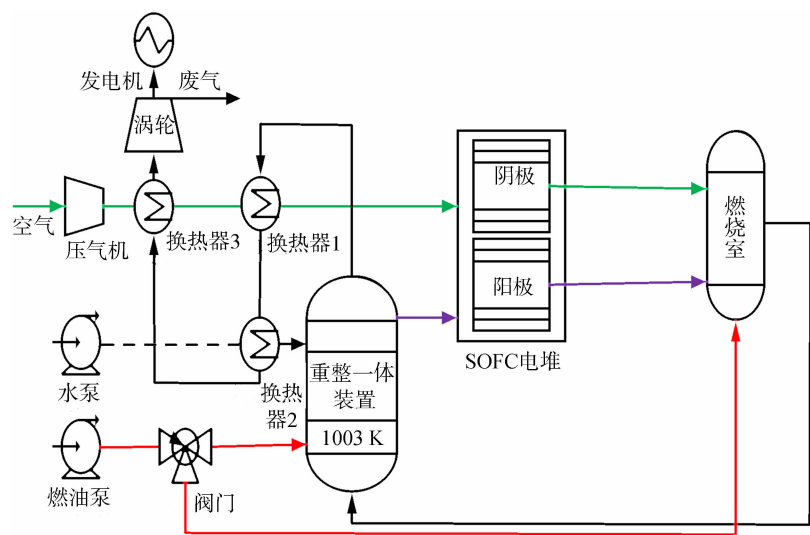


图 2 SOFC-GT 混合动力系统(架构 2)

Fig. 2 Architecture of the SOFC-GT hybrid system (the 2nd architecture)

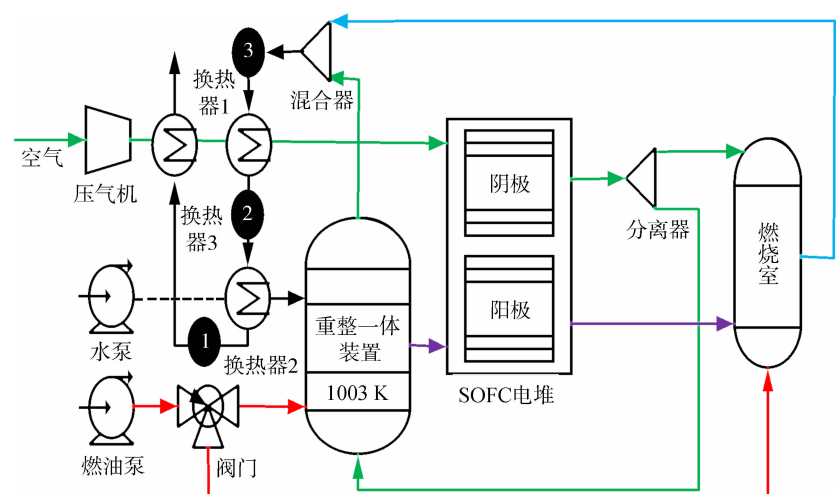


图 3 不同涡轮位置的 SOFC-GT 系统架构图(架构 3、架构 4、架构 5)

Fig. 3 Architecture of SOFC-GT hybrid system with different turbine positions (the 3th, 4th and 5th architecture)

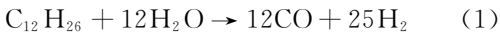
考虑到涡轮在混合动力系统中的主要作用是利用废气余热做功进行发电,将涡轮布局在回热路线的不同位置时,由于涡轮进口温度的不同,涡轮做功能力也会发生变化。因此在架构 3-5 方案中,将涡轮布局在系统回热路线上的 3 个不同布置,如图 3 所示。其中架构 3 方案中,涡轮是布置在换热器 2 与换热器 3 之间的位置 1,架构 4 方案中,涡轮位于换热器 1 与换热器 2 之间的位置 2,架构 5 方案中,将涡轮设计放在位置 3,即换热器 1 之前。

## 2 航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统建模

本文基于 Matlab/Simulink 软件平台,根据化学及电化学反应、质量守恒及能量守恒等建立 SOFC-GT 混合动力系统数学模型。主要包括对重整一体装置(重整室和回热器)、SOFC、换热器、GT 等部件的模拟。

### 2.1 航空煤油重整模型

正十二烷是航空煤油替代组分的常用化合物<sup>[11,14]</sup>,因此,本文也以正十二烷( $C_{12}H_{26}$ )作为工质进行研究。常见的航空煤油重整方式有水蒸气重整、部分氧化重整和自热式重整 3 种不同的重整方式<sup>[15]</sup>,其中水蒸气重整技术不仅技术成熟、控制简单,而且效率也是 3 种重整方式中最高的,因此本文采用带有水蒸气重整的 SOFC-GT 混合动力系统,具体的化学反应过程如下:

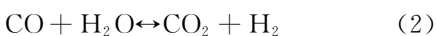


### 2.2 SOFC 模型

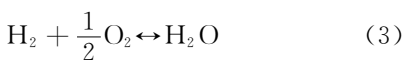
#### 2.2.1 化学及电化学反应模型

航空煤油重整后的气体进入 SOFC 阳极,CO 在 SOFC 阳极处与水蒸气发生反应产生  $H_2$ ,  $H_2$  与阴极处空气中的  $O_2$  进行电化学反应产生水,SOFC 内部的化学反应具体如下:

置换反应



电化学反应



在通常情况下置换反应是非常迅速的,可认为反应式(2)能够达到平衡状态,其平衡常数 $K_{ps}$ 为<sup>[16]</sup>

$$K_{ps} = \exp(A_K T_{sofc}^4 + B_K T_{sofc}^3 + C_K T_{sofc}^2 + D_K T_{sofc} + E_K) \quad (4)$$

式中常数  $A_K$ 、 $B_K$ 、 $C_K$ 、 $D_K$ 、 $E_K$  的取值可参考文献

[16],  $T_{sofc}$  为 SOFC 的工作温度。

电化学反应式(3)反应速率  $r_{H_2}$  如下:

$$r_{H_2} = \frac{N_0 I}{2F} \quad (5)$$

式中  $I$  为 SOFC 电堆电流(A);  $N_0$  表示电池个数;  $F$  表示法拉第常数,  $F=96485\text{C/mol}$ 。

SOFC 实际工作中的电压为理想可逆电压  $V_{nernest}$  减去各种不可逆损失,即<sup>[17]</sup>

$$V_{fc} = V_{nernest} - V_{act,a} - V_{act,c} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (6)$$

式中  $V_{fc}$  为 SOFC 的实际输出电压(V);  $V_{nernest}$  为理想可逆电压(V);  $V_{act,a}$ 、 $V_{act,c}$  分别表示阳极活化损失和阴极活化损失(V);  $V_{ohmic}$  为欧姆损失(V);  $V_{conc}$  为浓度差损失(V)。

SOFC 的燃料利用率  $u_f$  是指参加电化学反应的氢气量与燃料供应量的比值

$$u_f = \frac{r_{H_2}}{\dot{n}_{H_2,in}} = \frac{IN_0/2F}{\dot{n}_{H_2,in}} \quad (7)$$

式中  $\dot{n}_{H_2,in}$  为进入 SOFC 电堆的氢气的摩尔流量(简称为流量, mol/s)。

SOFC 输出功率可表示为

$$P_{sofc} = N_0 IV_{fc} \quad (8)$$

#### 2.2.2 质量守恒

假设 SOFC 电堆的内部各化学反应均处于平衡状态,根据质量守恒定律,可以求出电堆内各物质的浓度变化,质量守恒方程如下所示:

$$\dot{n}_{i,in} + \sum_k C_{i,k} r_k = \dot{n}_{i,out} \quad (9)$$

式中  $C_{i,k}$  表示组分  $i$  在反应  $k$  中的化学反应计量系数;  $r_k$  为第  $k$  个反应的化学反应速率(mol/s);  $\dot{n}_{i,in}$  为 SOFC 电堆的进口组分  $i$  的流量;  $\dot{n}_{i,out}$  为 SOFC 电堆的出口组分  $i$  的流量。

#### 2.2.3 能量守恒

本文建立温度动态模型时采用的是集总参数模型,假定在 SOFC 内部不存在温度梯度,即 SOFC 内部电极、连接器和通道内气体等组件在任何情况下,都保持着相同的温度;然后对整个 SOFC 电堆进行能量平衡计算

$$\begin{aligned} T_{sofc,out} = & \frac{\sum_i \dot{n}_{i,in} C_{p,mi} T_{sofc,in} + \sum_i r_k (-\Delta H_m) - P_{sofc}}{\sum_i \dot{n}_{i,out} C_{p,mi}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $C_{p,mi}$  为各物质的摩尔定压热容(kJ/(mol·K));  $\Delta H_m$  为反应  $k$  的摩尔焓变(kJ/mol);  $P_{sofc}$  为

SOFC 电堆的功率(kW); $T_{\text{sofc},\text{in}}$ 、 $T_{\text{sofc},\text{out}}$  为燃料电池入口气体温度和出口气体温度(K)。

2.3 涡轮发动机模型

2.3.1 压气机模型

外界空气经过压气机压缩进入混合动力系统中,空气经压缩后温度和压力都得到提高,根据绝热压缩过程理论并且考虑压气机的等熵效率,压缩机出口的空气温度及耗功为

$$T_{\text{c},\text{out}} = T_{\text{c},\text{in}} + \frac{T_{\text{c},\text{out},\text{s}} - T_{\text{c},\text{in}}}{\eta_{\text{c},\text{s}}} \tag{11}$$

$$P_{\text{c}} = H_{\text{c},\text{out}} - H_{\text{c},\text{in}} \tag{12}$$

式中  $T_{\text{c},\text{out}}$ 、 $T_{\text{c},\text{in}}$  分别为压气机实际出口和进口温度(K); $T_{\text{c},\text{out},\text{s}}$  为压气机等熵条件下的出口温度(K); $H_{\text{c},\text{in}}$ 、 $H_{\text{c},\text{out}}$  为压气机进出口焓值(kW); $\eta_{\text{c},\text{s}}$  为压气机等熵效率,取值为 0.78; $P_{\text{c}}$  为压气机所消耗的功率(kW)。

2.3.2 燃烧室模型

燃烧室是利用 SOFC 阳极剩余燃料发生燃烧反应,产生高温气体的系统。在燃烧室反应中,假设 SOFC 排出气体充分燃烧。根据热平衡原理,输入燃烧室的总热量与消耗的总热量相等,燃烧室出口温度  $T_{\text{b},\text{out}}$  为

$$T_{\text{b},\text{out}} = \frac{\dot{n}_{\text{a},\text{out}} C_{p,\text{ma}} T_{\text{b},\text{in}} + \dot{n}_{\text{f},\text{out}} (e_{\text{f}} \eta_{\text{b}} + H_{\text{m},\text{f}})}{\dot{n}_{\text{g},\text{out}} C_{p,\text{mg}}} \tag{13}$$

式中  $\dot{n}_{\text{f},\text{out}}$ 、 $\dot{n}_{\text{a},\text{out}}$ 、 $\dot{n}_{\text{g},\text{out}}$  分别为 SOFC 出口气体流量、燃烧室入口空气流量和燃烧室出口气体流量(mol/s); $T_{\text{b},\text{in}}$  为燃烧室入口空气温度(K); $e_{\text{f}}$  和  $H_{\text{m},\text{f}}$  分别为 SOFC 废气的低热值和摩尔焓(kJ/mol); $\eta_{\text{b}}$  为燃烧效率值,取 0.98。

2.3.3 涡轮模型

燃烧室后的废气通过涡轮膨胀做功,气体温度和压力都降低,涡轮出口废气的温度及耗功为

$$T_{\text{t},\text{out}} = T_{\text{t},\text{in}} - \eta_{\text{t}} (T_{\text{t},\text{in}} - T_{\text{t},\text{out},\text{s}}) \tag{14}$$

$$P_{\text{t}} = H_{\text{t},\text{in}} - H_{\text{t},\text{out}} \tag{15}$$

式中  $T_{\text{t},\text{out}}$ 、 $T_{\text{t},\text{in}}$  分别为涡轮实际出口和进口温度(K); $T_{\text{t},\text{out},\text{s}}$  为涡轮等熵条件下的出口温度(K); $H_{\text{t},\text{in}}$ 、 $H_{\text{t},\text{out}}$  为涡轮进出口焓值(kW); $\eta_{\text{t}}$  为涡轮等熵效率,取 0.82; $P_{\text{t}}$  为涡轮所产生的功率(kW)。

涡轮发动机输出功率

$$P_{\text{gt}} = \eta_{\text{gen}} (P_{\text{t}} - P_{\text{c}}) \tag{16}$$

式中  $\eta_{\text{gen}}$  为发电机效率,取 0.94。

2.3.4 换热器模型

通过加入换热器使得系统能够充分利用高温

气体的高品质热能,本文采用集总参数法建立换热器的数学模型<sup>[18]</sup>

能量平衡方程

$$Q_{\text{ex}} = (\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_1 \Delta T_{\text{ex1}} = (\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_2 \Delta T_{\text{ex2}} \tag{17}$$

式中  $\dot{n}_{\text{ex}}$  为工质的流量(mol/s); $C_{p,\text{m}}$  为工质的摩尔定压热容(kJ/(mol·K)); $\Delta T_{\text{ex1}}$ 、 $\Delta T_{\text{ex2}}$  分别为换热器冷边与热边工质的进出口温差(K)。

换热器的性能指标为传热效能

$$\varepsilon = \frac{(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_1 \Delta T_{\text{ex1}}}{(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_{\text{min}} \Delta T} = \frac{(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_2 \Delta T_{\text{ex2}}}{(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_{\text{min}} \Delta T} \tag{18}$$

式中  $(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_{\text{min}}$  为  $(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_1$  和  $(\dot{n}_{\text{ex}} C_{p,\text{mex}})_2$  中的较小者(kJ/(K·s)); $\Delta T$  为换热器冷热流气体的入口温差(K)。

2.4 性能评价指标

为了分析系统在设计点工况和非设计点工况下的热力性能,本文选用系统效率  $\eta_{\text{elec}}$  作为 SOFC-GT 混合动力系统的性能指标,其计算公式如下:

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{P_{\text{gt}} + P_{\text{sofc}}}{\dot{n}_{\text{f}} e_{\text{f}}} \tag{19}$$

2.5 混合动力系统运行参数

为了便于混合动力系统不同架构方案的比较,本文研究中参考了文献[19]中系统的运行设计点,具体的参数如表 1 所示。

表 1 SOFC-GT 混合动力系统运行参数  
Table 1 Operation parameters of the SOFC-GT hybrid system

| 部件   | 参数                       | 数值及说明  |
|------|--------------------------|--------|
| 重整器  | 重整温度/K                   | 1 003  |
|      | 水碳摩尔流量比                  | 3 : 1  |
|      | 重整方式                     | 水蒸气重整  |
|      | 催化剂材料                    | ISR-7G |
| SOFC | 电池个数                     | 1 152  |
|      | 工作压力/MPa                 | 0.29   |
|      | 工作温度/K                   | 1 273  |
|      | 电堆电流/A                   | 267    |
| 发动机  | 单个电池有效面积/cm <sup>2</sup> | 834    |
|      | 压比                       | 2.9    |
|      | 压气机等熵效率/%                | 78     |
|      | 涡轮等熵效率/%                 | 82     |
|      | 空气流量/(mol/s)             | 41     |

续表

| 部件  | 参数           | 数值及说明    |
|-----|--------------|----------|
| 燃油泵 | 额定转速/(r/min) | 1 420    |
|     | 额定流量/(mol/s) | 1. 296   |
|     | 实际转速/(r/min) | 60       |
| 水泵  | 额定转速/(r/min) | 5 500    |
|     | 额定流量/(mol/s) | 3. 394 6 |

3 模型验证

为了验证本文计算模型和相关计算方法的准确性,首先针对 SOFC 的仿真精度同参考文献[20]进行了对比验证。基于本文的建模方法,同样输入文献[20]中 SOFC 的运行参数,计算了该 SOFC 的性能,最终比较结果如图 4 所示。从图中可以看出 SOFC 在 1273 K 设计点温度时,模拟出的 SOFC 在不同电流密度下的电压仿真值与文献[20]中的实验数据吻合良好,误差在 1% 以下,表明本文构建的 SOFC 的建模方法具有较好的精度。

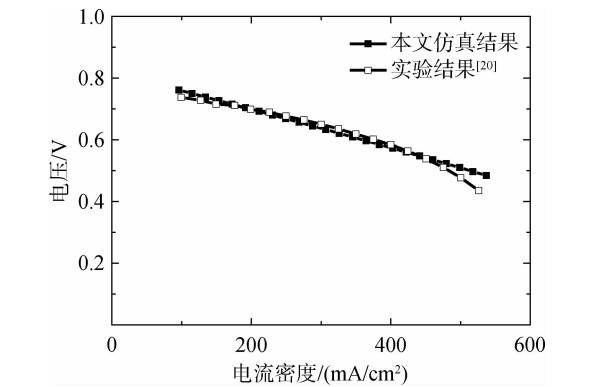


图 4 SOFC 电堆的伏安特性图

Fig. 4 Voltammetric diagram of the SOFC stack

考虑到本文所使用的以航空煤油为燃料的 SOFC-GT 混合动力系统的独特性,目前尚无法从公开发表的文献中获得实验数据,因此本文进一步参考了文献[21]的研究数据。在该文献中,建立了以甲烷为燃料的 SOFC-GT 混合动力系统,且 SOFC 的参数同文献[20]一致。本文构建了相应的仿真模型,对 SOFC-GT 混合动力系统设计点进行性能计算,对比结果如表 2 所示。通过表 2 对比,最大误差是 1.5%,可以得出本文建立的 SOFC-GT 混合动力系统建模方法和仿真计算是精确可靠的。

最后,再专门针对航空煤油重整器这个组件,开展建模和仿真计算,并同参考文献[22]中的实验结果进行了对比,如表 3 所示,对比数据表明,最大误差为 1.6%,说明本文建立的航空煤油重整器模型具有较好的精度。

通过上述 3 种不同层级的模型验证,充分表明了本文所建立的以航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统建模方法和仿真计算是可靠的。

表 2 SOFC-GT 混合动力系统仿真模型与文献[21]对比

| Table 2 Comparison between simulation results and experiment results in Ref. [21] about the SOFC-GT hybrid system |         |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|
| 参数                                                                                                                | 本文仿真结果  | 实验结果 <sup>[21]</sup> |
| 电压/V                                                                                                              | 0. 619  | 0. 61                |
| SOFC 功率/kW                                                                                                        | 174. 51 | 176                  |
| 涡轮发动机功率/kW                                                                                                        | 45. 09  | 47                   |
| 总功率/kW                                                                                                            | 219. 6  | 223                  |
| 系统效率                                                                                                              | 58. 61  | 59. 52               |

表 3 重整后仿真结果与文献[22]实验结果对比

| Table 3 Comparison between simulation results and experiment results in Ref. [22] after reforming |        |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------|
| 参数                                                                                                | 本文仿真结果 | 实验结果 <sup>[22]</sup> |
| 温度/K                                                                                              | 1 003  | 1 003                |
| CO 摩尔分数/%                                                                                         | 16. 45 | 18                   |
| CO <sub>2</sub> 摩尔分数/%                                                                            | 12. 07 | 12                   |
| H <sub>2</sub> 摩尔分数/%                                                                             | 71. 48 | 70                   |

4 结果与讨论

4.1 设计工况下混合动力系统的性能分析

基于表 1 中的运行工况参数,构架 1 和构架 2 的混合动力系统的性能模拟结果,如表 4 所示。

通过表 4 对比的结果发现,在相同运行条件下,架构 1 的 SOFC-GT 系统输出功率值以及系统效率值要高于架构 2,这是因为相对于架构 1,架构 2 中重整一体装置内的不可逆损失更大。

因此本文在后续的涡轮位置(架构 3、4、5 方案)研究中,都是基于架构 1 进行研究。

表 5 给出了不同位置时,混合动力系统性能的模拟结果。从表中可以看出架构 5 的系统效率最高,可以达到 48% 左右,因为此时涡轮进口的高温废气由于没有经过换热器换热,其温度

是最高的,依据式(14)和式(15)可知,此时涡轮能输出更多的功,所以整个系统的效率最高。但此时 SOFC 阴极的进口空气温度为 800 K 左右,与 SOFC 的工作温度相差接近 500 K,这会导致电堆产生明显的热应力从而影响 SOFC 的使用寿命。

表 4 不同回热方式的 SOFC-GT 混合动力系统性能比较

| 参数                | 数值     |        |
|-------------------|--------|--------|
|                   | 构架 1   | 构架 2   |
| 燃料利用率             | 0.8277 | 0.8272 |
| SOFC 电压/V         | 0.5862 | 0.5838 |
| SOFC-GT 系统输出功率/kW | 97.81  | 95.08  |
| SOFC 输出功率/kW      | 173.1  | 172.4  |
| 涡轮发动机输出功率/kW      | -75.28 | -77.3  |
| 系统效率/%            | 23.82  | 23.16  |
| 重整一体装置焓损失/kW      | 45.2   | 49.3   |

表 5 不同涡轮位置对 SOFC-GT 混合动力系统的影响  
Table 5 Effect of different turbine positions on SOFC-GT hybrid power system

| 参数                | 数值     |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
|                   | 架构 1   | 架构 3   | 架构 4   | 架构 5   |
| 燃料利用率             | 0.8277 | 0.829  | 0.8279 | 0.8286 |
| SOFC 电压/V         | 0.5862 | 0.5871 | 0.5857 | 0.5763 |
| SOFC-GT 系统输出功率/kW | 97.81  | 178.73 | 186.1  | 200.5  |
| SOFC 输出功率/kW      | 173.1  | 173.4  | 173    | 170.2  |
| 涡轮发动机输出功率/kW      | -75.28 | 5.384  | 13.15  | 30.27  |
| 系统效率/%            | 23.82  | 43.53  | 45.32  | 48.81  |
| SOFC 阴极进口温度/K     | 1217   | 1214   | 1167   | 878.3  |

架构 4 的系统效率达到了 45% 左右,是除了架构 5 以外系统效率最高的方案。并且该工况下,SOFC 的阴极进口温度为 1167 K,与 SOFC 的工作温度之差为 100 K 左右,属于混合动力系统安全运行的范围内(1 023~1 373 K)<sup>[23]</sup>,因此,综合考虑系统性能和燃料电池使用寿命,本文将选择架构 4 时的混合动力系统作为研究模型。

4.2 非设计工况下混合动力系统的性能分析

系统运行时,一般可以通过调节混合动力系统的压气机压比、燃油流量、空气流量以及燃料利用率来改变系统输出功率,以适应外界负荷的变化。本文在前文设计点下优选架构方案 4 的基础上,进一步分析上述 4 种关键热力参数变化时对混合动力系统热力性能的影响,为系统性能优化和未来的工程应用提供参考。

4.2.1 压气机压比对 SOFC-GT 系统性能影响

图 5 显示了压气机压比对 SOFC 和涡轮发动机功率的影响。由图 5 可知,其他参数不变时,当压气机压比从 2.5 增加到 3.3 时,SOFC 的输出功率从 172 kW 增大到 173.3 kW。这是因为随着压气机压比的增加,SOFC 工作压力的提高可以提高可逆电势,并同时降低活化极化与浓度极化所造成的过电势,使其工作电压增大,则 SOFC 电堆的输出功率增大。

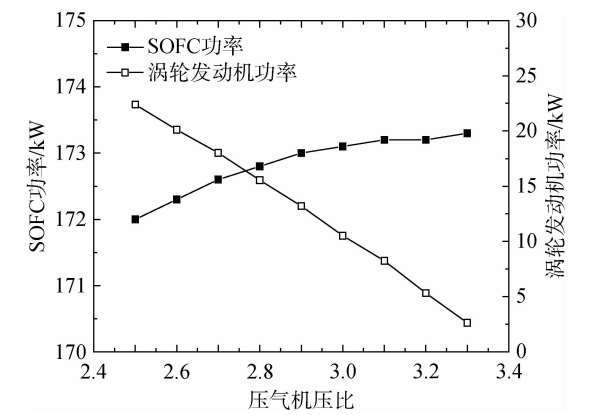


图 5 压气机压比对 SOFC 功率及涡轮发动机功率的影响  
Fig. 5 Effects of compressor pressure ratio on the SOFC power and gas turbine power

此外,图 5 中可以发现涡轮发动机功率随着压气机压比的增加而不断减小,这主要是因为涡轮进口温度的不断下降,导致涡轮发动机做功能力降低。为了更好地分析此时系统内部的运行状态,图 6 进一步给出了不同压气机压比情况下,SOFC 工作温度的变化情况。图中显示,随着压气机压比的增大,SOFC 运行温度会有所降低。由于 SOFC 工作温度降低的时候,涡轮进口温度会降低,涡轮发动机做功能力也会下降,因此当压气机压比增加后,涡轮发动机功率会逐渐减小。

图 7 显示了压气机压比对 SOFC-GT 系统功率和系统效率的影响。由图 7 可知,当压气机压比从 2.5 增加到 3.3 时,SOFC-GT 混合动力系统

的功率逐渐减小。这是因为混合动力系统的功率为各子系统功率之和,随着压气机压比的增加,SOFC 电堆功率逐渐增大的,但是由图 5 可知,当压气机压比从 2.5 增加到 3.3 时,SOFC 功率增大的趋势要小于涡轮发动机功率减小的趋势,即表现为总功率呈现减小的趋势。此外,因为其他参数保持不变,即输入的燃油量是定值,而输出功率降低,则效率也就呈现出减小的趋势。

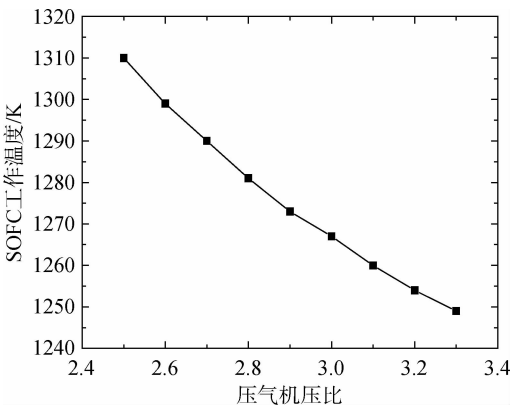


图 6 压气机压比对 SOFC 工作温度的影响

Fig. 6 Effects of compressor pressure ratio on the temperature of the SOFC system

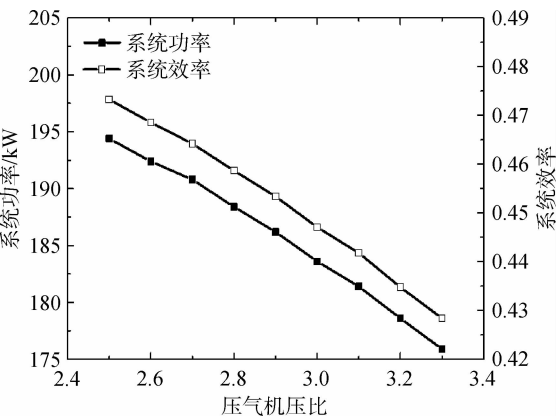


图 7 压气机压比对 SOFC-GT 混合动力系统的影响

Fig. 7 Effects of compressor pressure ratio on the SOFC-GT hybrid system

4. 2. 2 燃料利用率对 SOFC-GT 系统性能影响

图 8 显示了燃料利用率对 SOFC 和涡轮发动机功率的影响。由图 8 可知,其他参数不变时,当燃料利用率从 0.7 增加到 0.9 时,SOFC 功率表现为先增大后减小。这是由于随着燃料利用率的增加,由式(7)可知,系统的电流逐渐增大,当燃料利用率从 0.7 变化到 0.86 时,SOFC 电压损失主要来源于活化损失和欧姆损失,此时 SOFC 电堆

的电压损失较小,则 SOFC 输出功率增大;当燃料利用率从 0.86 变化到 0.9 时,此时由于电池浓度差损失的原因导致 SOFC 电压急剧下降,则 SOFC 输出功率下降,因此 SOFC 功率表现为先增大后减小。

此外,图 8 中可以发现涡轮发动机功率随着燃料利用率的增加先减小后增大,这主要是因为涡轮进口温度先减小后增大,导致涡轮发动机做功能力先减小后增大。为了更好地分析此时系统内部的运行状态,图 9 进一步给出了不同燃料利用率情况下,SOFC 工作温度的变化情况。图中显示,当燃料利用率从 0.7 增加到 0.9 时,SOFC 电堆的工作温度呈现先减小后增大的趋势。这是因为随着燃料利用率的增大,参与电化学反应的  $H_2$  量增大,SOFC 电堆的化学反应热也逐渐增大,而 SOFC 电堆的功率先增大后减小,由式(10)可计算得出,电堆的工作温度先减小后增大。又燃料利用率增加,SOFC 电堆  $H_2$  消耗的量增大,则进入燃烧室的  $H_2$  量下降,涡轮进口温度会降低,当  $H_2$  量减少的影响幅度小于燃烧室入口温度升高的影响幅度时,涡轮进口温度会升高,则涡轮进口温度先减小后增大,涡轮发动机的输出功率表现为先减小后增大。

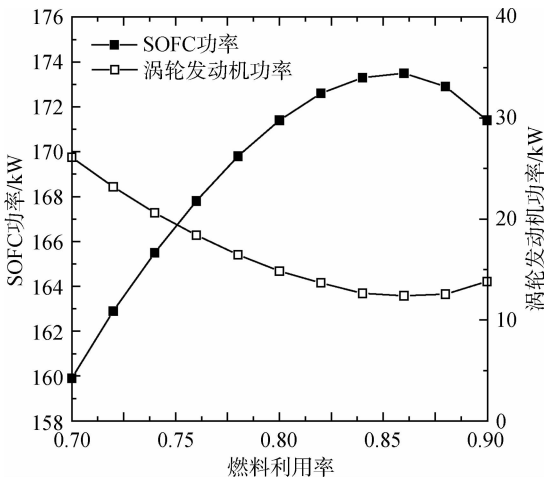


图 8 燃料利用率对 SOFC 功率及涡轮发动机功率的影响

Fig. 8 Effects of fuel utilization ratio on the SOFC power and gas turbine power

图 10 显示了燃料利用率对 SOFC-GT 混合动力系统功率和效率的影响。由图 10 可知,当燃料利用率从 0.7 增加到 0.9 时,SOFC-GT 混合动力系统的功率先增大后减小。这是因为当燃料利用率从 0.7 增加到 0.82 时,SOFC 电堆功率增大趋势要大于涡轮发动机减小的趋势,即表现为总

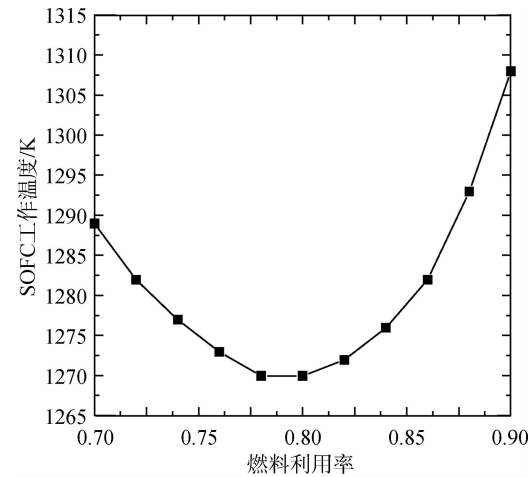


图 9 燃料利用率对 SOFC 工作温度的影响

Fig. 9 Effects of fuel utilization ratio on the temperature of the SOFC system

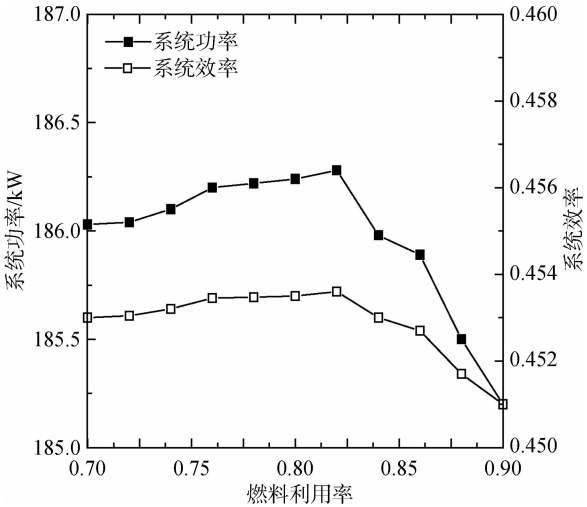


图 10 燃料利用率对 SOFC-GT 混合动力系统的影响

Fig. 10 Effects of fuel utilization ratio on the SOFC-GT hybrid system

功率增大;当燃料利用率从 0.82 增加到 0.9 时,SOFC 电堆功率减小趋势要大于涡轮发动机增加的趋势,即表现为总功率减小;即总功率变化趋势为先增大后减小。此外,因为其他参数保持不变,输入的燃油量是定值,而输出功率先增大后减小,则随着燃料利用率的增加,系统的效率也是先增大后减小。

4. 2. 3 燃油流量对 SOFC-GT 系统性能影响

考虑到燃油泵转速与燃油流量成正比例关系,此时燃油泵转速的变化规律也可定性地表征燃油流量的变化规律。图 11 显示了燃油泵转速对 SOFC 和涡轮发动机功率的影响。由图 11 可知,其他参数不变时,当燃料泵转速从 56 r/min

增加到 64 r/min 时,燃油流量从 0.0511 mol/s 增加到 0.0584 mol/s,SOFC 电堆的输出功率表现为增大。这是因为随着燃油泵转速的增加,也就是燃油流量增加,SOFC 的燃料利用率保持不变,SOFC 的电流也就是逐渐增大的,则 SOFC 电堆的输出功率逐渐增大,但是如图 12 所示,SOFC 温度也会逐渐增高,当 SOFC 的工作温度超过 1373 K 时<sup>[22]</sup>,会影响电堆的密封性以及寿命等,因此在变负载时应合理调控燃油流量。

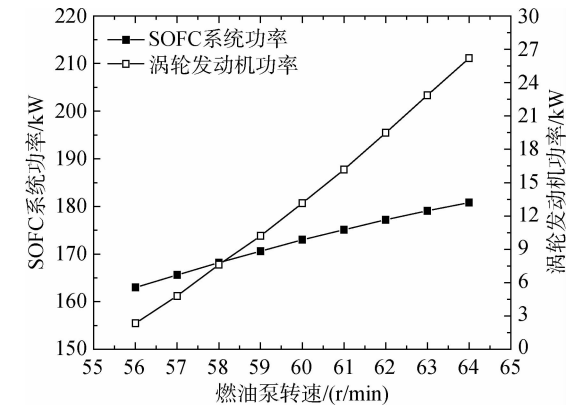


图 11 燃油泵转速对 SOFC 功率及涡轮发动机功率影响

Fig. 11 Effects of the fuel pump speed on the SOFC power and gas turbine power

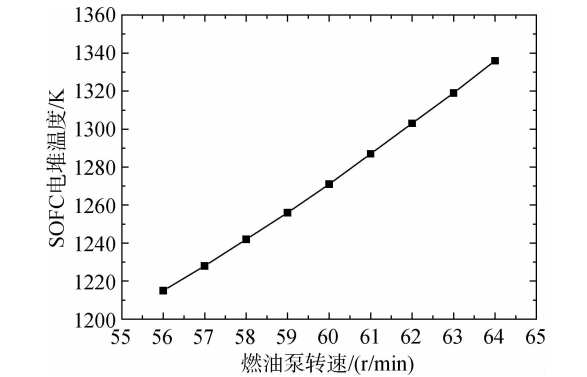


图 12 燃油泵转速对 SOFC 工作温度的影响

Fig. 12 Effects of the fuel pump speed on the temperature of the SOFC system

此外,随着参加化学反应燃料的增多,由于其他参数保持不变,SOFC 电堆的燃料利用率一定,则进入燃烧室的  $H_2$  量也不断增大,燃烧反应热也就不断增加,则涡轮进口温度增大,涡轮发动机的输出功率也就逐渐增大。

图 13 显示了燃油泵转速对 SOFC-GT 系统功率和系统效率的影响。由图 13 可知,当燃料泵转速从 56 r/min 增加到 64 r/min 时,SOFC-GT

系统的功率是逐渐增大的。这是由于系统的功率为各子系统功率之和,从图 11 可知,各子系统输出功率是逐渐增大的,则系统的输出功率也就表现为逐渐增大。此外,从图 14 可知,当燃油泵转速从 56 r/min 增加到 64 r/min 时,SOFC-GT 混合动力系统功率从 165.3 kW 增加到 207 kW,增长率为 25.23%,而航空煤油热量从 383.265 kW 增加到 438.017 kW,增长率为 14.29%,系统功率增加的趋势要高于航空煤油输入到系统的热量的增加趋势,则系统的效率随着燃油流量的增加也趋于增加的趋势。

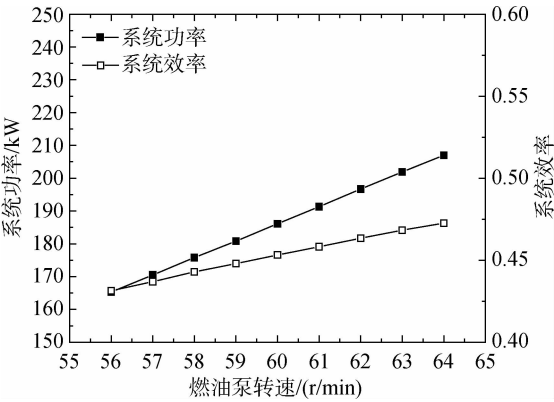


图 13 燃油泵转速对 SOFC-GT 混合动力系统的影响  
Fig. 13 Effects of the fuel pump speed on SOFC-GT hybrid system

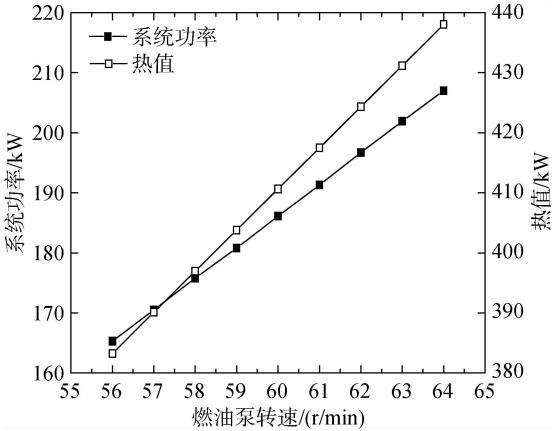


图 14 燃油泵转速对系统功率和燃油热值影响比较  
Fig. 14 Effects of the fuel pump speed on power generation of the system and fuel calorific value

4.2.4 空气流量对 SOFC-GT 系统性能影响

图 15 显示了空气流量对 SOFC 和涡轮发动机功率的影响。由图 15 可知,其他参数不变时,当空气流量从 37 mol/s 增加到 44 mol/s 时,SOFC 的输出功率表现为先增大后减小。这是因

为随着空气流量的增加,过剩的低温空气带走了 SOFC 电堆的热量,导致 SOFC 电堆的温度是逐渐减小的,则 SOFC 的可逆电压是逐渐增大的,SOFC 活化损失也表现为逐渐增大的趋势。

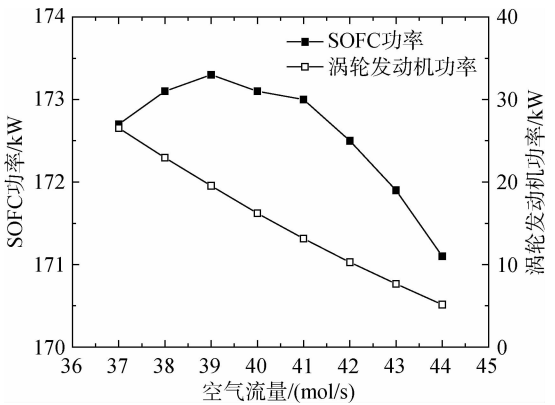


图 15 空气流量对 SOFC 功率及涡轮发动机功率的影响  
Fig. 15 Effects of air flow rate on the SOFC power and gas turbine power

如图 16 中所示,当空气流量从 37 mol/s 增加到 39 mol/s 时,可逆电压增加的趋势大于损失电压增加的趋势,即 SOFC 电压表现为增大;当空气流量从 39 mol/s 增加到 44 mol/s 时,可逆电压增加的趋势小于损失电压增加的趋势,即 SOFC 电压表现为减小,则 SOFC 的输出功率表现为先增大后减小。

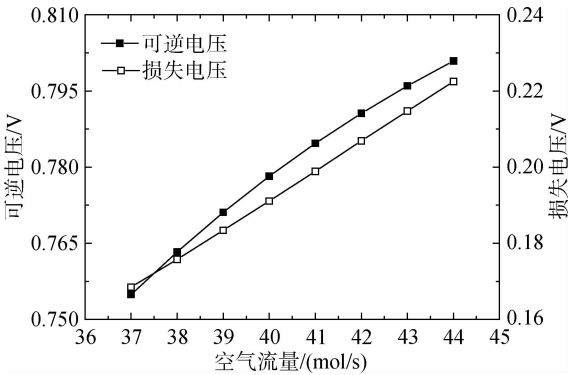


图 16 空气流量对 SOFC 电压的影响  
Fig. 16 Effects of air flow rate on the SOFC voltage

此外,由于 SOFC 电堆的工作温度逐渐降低,使得进入燃烧室的气体温度下降,而反应的氢气量不变,则燃烧室出口温度下降,涡轮进口温度减小,涡轮做功也就减小,则涡轮发动机功率也就降低。

图 17 显示了空气流量对 SOFC-GT 系统功率和系统效率的影响。由图 17 可知,当空气流量

从 37 mol/s 增加到 44 mol/s 时,SOFC-GT 系统的功率呈现减小的趋势。这是因为当空气流量从 37 mol/s 增加到 39 mol/s 时,涡轮发动机功率减小趋势要大于 SOFC 功率增加的趋势,即表现为总功率减小,当空气流量从 39 mol/s 增加 44 mol/s 时,SOFC 与涡轮发动机的功率都是减小,则系统的功率表现为减小的趋势。因为其他参数保持不变,输入的燃油量是定值,而总功率是减小的,则系统的效率也是减小的。

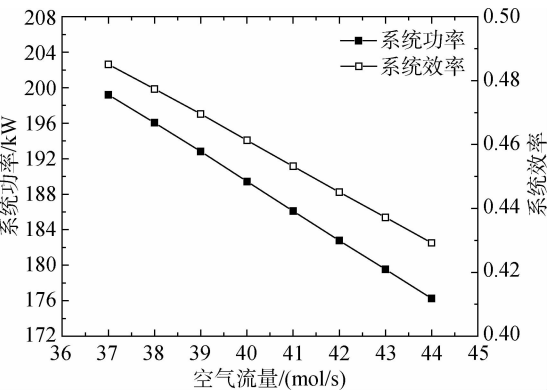


图 17 空气流量对 SOFC-GT 混合动力系统的影响

Fig. 17 Effects of air flow rate on SOFC-GT hybrid system

5 结 论

本文计算了基于航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统,首先根据不同回热方式的重整装置以及涡轮位置,在设计工作参数下确定最优的系统架构,然后基于选择的架构研究压气机压比、燃料利用率、燃油流量以及空气流量对系统性能的影响,得出的主要结论如下:

- 1) 基于航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统的发电效率能达到 45% 左右,具有较好的系统性能。
- 2) SOFC-GT 混合动力系统的效率和功率随着燃料利用率(0.75~0.9)的增大呈现出先增大后减小的趋势,为了使得混合动力系统保持较好的性能,应将燃料利用率维持在 0.82 左右。
- 3) SOFC-GT 混合动力系统的功率和效率随着燃油流量(0.0511~0.0584 mol/s)的增加而逐渐增大,但是 SOFC 温度也会逐渐增高,影响电池堆的密封性以及寿命等。因此,在电池堆合理的温度范围内(1023~1373 K),可以增加燃油流量来提高系统功率和效率。
- 4) SOFC-GT 混合动力系统的功率和效率都

随着空气流量(37~44 mol/s)和压气机压比(2.5~3.3)的减小而逐渐增大,因此减少空气流量和压气机压比可以提高系统的效率,但是考虑 SOFC 工作温度的问题,空气的流量和压气机压比不宜过小。

参考文献:

[1] 赵运生,胡骏,吴铁鹰,等.大型民用飞机辅助动力装置性能仿真[J].航空动力报,2011,26(7):1590-1598.  
ZHAO Yunsheng, HU Jun, WU tieying, et al. Performance simulation of large civil aircraft auxiliary power unit[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1590-1598. (in Chinese)

[2] SARLIOGLU B, MORRIS C T. More electric aircraft: review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 54-64.

[3] 孔祥浩,张卓然,陆嘉伟,等.分布式电推进飞机电力系统研究综述[J].航空学报,2018,39(1):51-67.  
KONG Xianghao, ZHANG Zhuoran, LU Jiawei, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 51-67. (in Chinese)

[4] WATERS D F, CADOU C P. Optimization of gas turbine-solid oxide fuel cell systems for aircraft power generation[R]. AIAA-2015-0024, 2015.

[5] DAGGETT D, EELMAN S, KRISTIANSSON G. Fuel cell APU for commercial aircraft[R]. AIAA-2003-2660, 2003.

[6] DAVIES K, NORMAN P, JONES C, et al. A review of turboelectric distributed propulsion technologies for N+3 aircraft electrical systems[C]//Proceedings of 48th International Universities' Power Engineering Conference. Dublin, Ireland; IEEE, 2013: 1-5.

[7] CHOUDHURY A, CHANDRA H, ARORA A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20(4): 430-442.

[8] ROTH B, GIFFIN R. Fuel cell hybrid propulsion challenges and opportunities for commercial aviation[R]. AIAA-2010-6537, 2010.

[9] PANNE T, WIDENHORN A, BOYDE J, et al. Thermodynamic process analysis of SOFC-GT hybrid cycles[R]. AIAA-2007-4833, 2007.

[10] FREEH J E, PRATT J W, BROUWER J. Development of a solid-oxide fuel cell/gas turbine hybrid system model for aerospace application[R]. NASA TM-2004-213054, 2004.

[11] RAJASHEKARA K, GRIEVE J, DAGGETT D. Hybrid fuel cell power in aircraft[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2008, 14(4): 54-60.

[12] BRAUN R J, GUMMALLA M, YAMANIS J. System architectures for solid oxide fuel cell-based auxiliary power units in future commercial aircraft applications[J]. Journal

of Fuel Cell Science and Technology, 2009, 6(3): 031015. 1-031015. 10.

[13] STEFFEN C J, FREEH J E, LAROSILIERE L M. Solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid cycle technology for auxiliary aerospace power[R]. NASA TM-2005-213586, 2005.

[14] DANIAU E, BOUCHEZ M, BOUNACEUR R, et al. Contribution to scramjet active cooling analysis using n-dodecane decomposition model as a generic endothermic fuel [R]. AIAA-2003-6920, 2003.

[15] 张丽雷. 航空煤油重整制氢负载型镍基催化剂的研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2011.

ZHANG Lilei. Reforming of aviation kerosene for hydro-grn production catalyzed by ordered Ni-based catalysts [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)

[16] YU Zeting, HAN Jitian, CAO Xianqi, et al. Analysis of total energy system based on solid oxide fuel cell for combined cooling and power applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 2703-2707.

[17] COSTAMAGNA P, HONEGGER K. Modeling of solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1998, 145(2): 3995-4007.

[18] 蒙青山. 基于 SOFC-GT 和跨临界 CO<sub>2</sub> 循环的联合发电系统特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

MENG Qingshan. Study on a combined system based on SOFC/GT and transcritical carbon dioxide cycle[D]. Jinan Shandong: Shang Dong University, 2016. (in Chinese)

[19] 吴小娟. 固体氧化物燃料电池/微型燃气轮机混合发电系统的建模与控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

WU Xiaojuan. Modeling and control of solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power generation system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)

[20] SINGHAL S C, KENDALL K. High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications[M]. Killington, UK: Elsevier Advanced Technology, 2003.

[21] GEORGE R A. Status of tubular SOFC field unit demonstrations[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2): 134-139.

[22] FUKUNAGA T, KATSUNO H, MATSUMOTO H, et al. Development of kerosene fuel processing system for PEFC[J]. Catalysis Today, 2003, 84(3): 197-200.

[23] 李杨, 翁一武. 固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合动力系统的性能及控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 94-100.

LI Yang, WENG Yiwu. Performance study and control strategies of temperature solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 94-100. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)