

# 固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机发电系统 半实物仿真研究

杨晨, 蒋帅, 潘衡尧

(重庆大学动力工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 由于固体氧化物燃料电池 (solid oxide fuel cell, SOFC) 排出的尾气具有较高的潜热, 当它与微型燃气轮机 (micro gas turbine, MGT) 组成混合系统发电时, 系统的发电效率将比 SOFC 或 MGT 单独发电时高, 因此该系统是一种有很大潜力的分布式发电方案。研究以混合发电系统为对象, 建立 SOFC、MGT 两个子系统的动态模型, 分析 SOFC 模型的电化学特性和热力学性质, 并对两个子系统以及耦合系统的性能进行仿真研究。结果表明, 本文建立的 SOFC-MGT 模型稳态性能正常, 两个子系统非耦合状态与耦合状态下的动态性能良好, 该数值模型为 SOFC-MGT 混合发电系统的半实物仿真系统构建提供了理论基础, 并为混合装置的设计和运行提供了重要参考。

**关键词:** 能源系统工程; 半实物仿真; 固体氧化物燃料电池; 微型燃气轮机

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)12-1310-09

## Hardware-in-loop simulation of solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power generation system

YANG Chen, JIANG Shuai, PAN Hengyao

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Because the exhaust gas discharged from the solid oxide fuel cell (SOFC) has a high latent heat, the power generation efficiency of the system will be higher than that of the SOFC or micro gas turbine (MGT) when it is mixed with a MGT. It has a great potential for distributed power generation program. In this paper, the dynamic mathematical modeling of two subsystems of SOFC and MGT is established based on the SOFC-MGT hybrid power generation system. The electrochemical and thermodynamic properties of the SOFC model are analyzed, and the performances of the two subsystems and the coupled system are simulated and analyzed. The results show that the SOFC-MGT system in this paper has good steady-state performance and dynamic performance in non-coupled state and coupled state of the two subsystems. The research of this paper provides a theoretical basis for the construction of the hardware-in-the-loop simulation system, as well as an important reference for the design and operation of the SOFC-MGT hybrid power generation system.

**Key words:** energy systems engineering; hardware-in-loop simulation; solid oxide fuel cell; micro gas turbine

## 0 引言

SOFC 是第三代高温燃料电池, 是一种将燃料的化学能直接转变为电能的装置, 具有工作效率高、运行平稳、绿色环保、噪声低等优势。燃料电池单电池主要由阴极、阳极和电解质组成。电池工作时, 燃料在阳极发生氧化反应, 空气在阴极发生还原反应, 氧化反应生成的电子经过电池外部的回路回到阴

极,参与阴极的还原反应,持续的反应使外部电路不断地有电子通过,从而产生电能。其工作原理决定了可供燃料电池选择的燃料种类十分丰富,而且反应后生成极少的氮氧化物和硫化物,使用氢气作为燃料时更不会生成 $\text{CO}_2$ ,因此具有极高的燃料适应性和环境相容性<sup>[1]</sup>。SOFC不使用贵金属作为催化剂,因此对反应温度有较高的要求,而MGT的尾气有较高的温度和压力,两个子系统在这个问题上能够互相弥补,然而由于它们的系统性能及时间尺度等特性的差异,将二者组合成耦合系统发电时仍然有许多问题亟待解决<sup>[2-3]</sup>。

## 1 SOFC-MGT 系统简介

作为单独的供电系统时,SOFC被证实具有很大的潜力<sup>[4]</sup>。整体来说,燃料电池是将燃料的化学能直接转化为电能的电化学装置,只要反应物持续供应,这种转化就会一直进行,这种能量转化的方式不受卡诺循环的限制,因此燃料电池的工作效率较传统的热机更高。SOFC是燃料电池的一种,种类很多,工作温度主要集中于 $700\sim 1\,000^\circ\text{C}$ ,较高的工作温度使这种燃料电池无需使用贵金属作为催化剂<sup>[5]</sup>,从而降低了其制造成本。同时,高反应温度使SOFC对燃料具有相当高的可容性,其阳极燃料的种类不局限于一种,诸如氢气、天然气等均可作为其燃料。然而,SOFC的制造成本很高,运行损耗也相当严重,对于SOFC的研究大多停留在模型研究的层面<sup>[6]</sup>。

在传统的燃气轮机发电系统中,燃料的转化过程为化学能—热能—机械能—电能,而在SOFC-MGT系统中,燃料的化学能通过电化学反应直接转变为电能,从而提高了发电效率。国内外学者对SOFC-MGT的布置系统提出了多种构型<sup>[7]</sup>,主要分为顶层循环和底层循环两种。在顶层循环中,SOFC位于MGT的上游,燃料和空气在电池中进行反应后排出的高温高压尾气进入燃气轮机膨胀做功,并且推动压气机工作,压气机压缩空气进入SOFC的阴极作为电化学反应的氧化剂。在这种模式下SOFC的压力较高,因此也被称为增压型SOFC-MGT系统。底层循环模式中SOFC位于MGT的下游,燃气轮机的尾气进入燃料电池的阴极充当氧化剂,由于燃气轮机排出的尾气压力较低,在这种模式下燃料电池的工作压力较低,因此也被称为低压型SOFC-MGT系统。总的来说,底层循环混合系统效率比顶层循环低,但是顶层循环对SOFC的设计、制造、控制及运行条件提出了更高的要求<sup>[8]</sup>。

本文所讨论的SOFC-MGT系统属于顶层循环系统。其系统结构如图1所示,空气经压缩比约为4:1的压气机(compressor)两级压缩,压缩后的一部分气体通过排气旁路(bleed air bypass)进入大气,一部分气体通过冷空气旁路(cold air bypass)进入燃烧室(combustion chamber),其余的气体与透平(turbine)的排气进行换热进一步提高其温度,换热通过两个并联的表面式换热器(heat exchangers)进行。预热后的高温高压空气一部分经过热空气旁路(hot air bypass)进入燃烧室,其余气体进入SOFC,与重整后的燃料进行电化学反应产生电能,SOFC排出的尾气仍然具有较高的温度和压力,而且存在部分没有燃烧完全的燃料,这些尾气进入燃烧室中充分燃烧,燃烧后的气体通入透平中膨胀做功从而推动发电机(generator)发电,并推动空压机和负载工作。热空气旁路抽取换热器冷端的排气进入燃烧室。冷空气旁路收集部分压气机的排气也通入燃烧室。排气旁路的作用是收集压气机的排气并将其直接排出。在三个旁路都关闭的情况下,系统仍然可以正常运行。

本文以图1所示的系统为研究对象,使用Apros和Matlab进行建模及协同仿真,MGT部分使用Apros搭建,SOFC使用Matlab建模。两个模型利用OPC(object linking and embedding for process control)协议完成Apros和Matlab的实时数据通信。OPC协议是一种基于微软OLE/COM技术的工业标准,它定义了一系列工业软件的端口标准,OPC协议的应用使不同的过程系统、控制系统以及工业软件直接的数据通信和交互成为了可能,目前采取这种标准的会员已经有200多家。

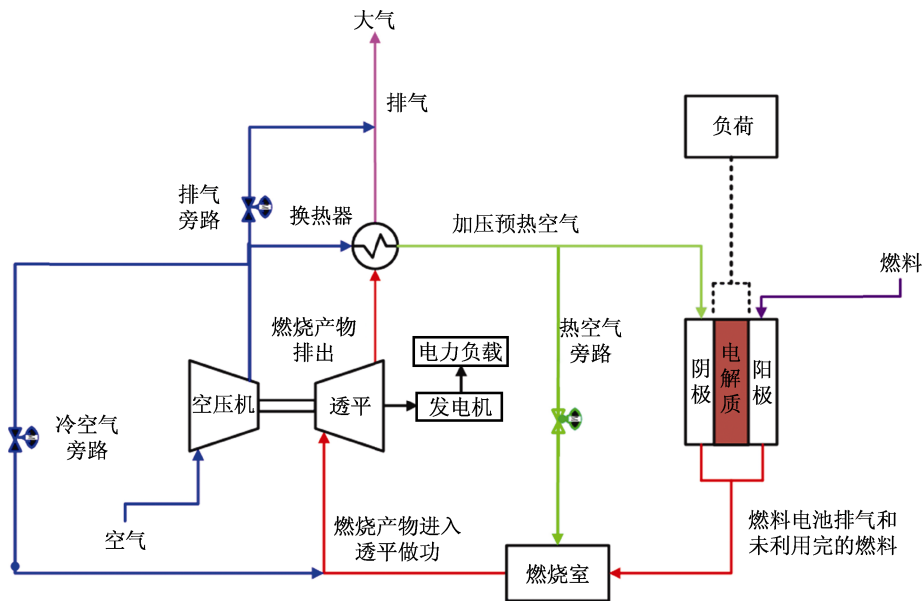


图 1 SOFC-MGT 混合系统

Fig. 1 SOFC-MGT hybrid system

Apros 软件是一款先进的动态过程实时仿真软件, 由欧洲富腾 (Fortum) 公司和芬兰国家研究院共同开发, 它是一款具有高度可视化界面的过程建模和动态仿真软件, 可以实现可行性研究、安全瞬态分析、严重事故分析、工业过程分析、设计工程、操作培训等功能。由于 Apros 使用模块化的建模方式, 内置较高精度的压气机、透平、换热器、管道等 MGT 部件的模块, 故采用 Apros 建立 MGT 系统模型。本文采用数值模拟的方式对即将构建的半实物仿真系统进行验证, 如图 1 所示, 在将要构建的半实物系统中, SOFC 由于成本高、运行损耗大故采用模型, 而使用 MGT 及 BOP 构建实物系统。在搭建半实物仿真系统之前, 先在 Apros 中建立 MGT 系统模型, 采集与燃气轮机排气进行换热的压缩空气, 其温度、压力和流量作为 SOFC 阴极的输出参数, 这点与半实物仿真系统中的数据采集方式一致, 而且 Apros 软件能够实现实时模拟, 因此对于该 SOFC 模型来说, 不论与之连接的是实物系统还是模型系统, 它都能在同样的模式和状态下工作。综上所述, 可以采用全数值模拟的方式分析该半实物仿真系统, 这种方法也能对 SOFC 和 MGT 两个系统的耦合性能进行研究。

在 Apros 中, 压力和流量求解器具有以下功能:

- 1) 在两相非平衡状态下, 水/蒸汽两相流中的非冷凝气体 (六方程模型), 也支持更简单的单相求解器 (三方程模型或单方程模型);
- 2) 使用基于质量守恒、能量守恒和动量守恒的动态守恒方程的第一原理模型;
- 3) 求解器网格由用户给定的参数自动生成。

而传热过程中求解器的功能为

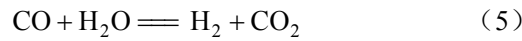
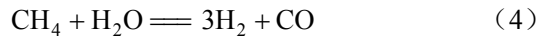
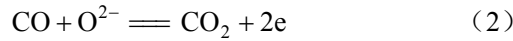
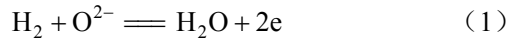
- 1) 考虑对流换热、层流和湍流模型; 炉膛和烟道的模拟使用三维辐射换热模型。
- 2) 一维的导热模型, 考虑换热器、管道和水冷壁等的材料热量存储。

能量守恒、动量守恒、质量守恒方程贯穿整个模型系统动态计算的始终。其中, 三方程模型适用于水和水蒸气均匀混合的状态, 六方程模型则是将 3 种守恒方程分别应用于水和水蒸气中 (如图 2 所示)。

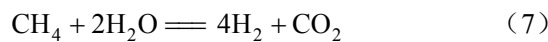
## 2 SOFC 模型

SOFC 数值模拟子系统为一维实时动态模型。当 SOFC 燃料的主要成分为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  时, 其内部

主要考虑以下几个化学反应：



总的化学反应为



SOFC 的理想电压  $E_{\text{Nernst}}$  使用 Nernst 方程求解：

$$E_{\text{Nernst}} = -\frac{\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}^0}{2F} + \frac{R_u T}{2F} \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0.5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}\right), \quad (10)$$

其中， $\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}^0$  为标准压力下摩尔吉布斯自由能变化； $F$  为法拉第常数； $R_u$  为通用气体常数； $T$  为温度；

$p_{\text{H}_2}$ 、 $p_{\text{O}_2}$ 、 $p_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为  $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  在 SOFC 中的压力。

输出电压  $E_{\text{out}}$  为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{conc}}, \quad (11)$$

其中， $\eta_{\text{act}}$  为活化极化损失； $\eta_{\text{ohm}}$  为欧姆极化损失； $\eta_{\text{conc}}$  为浓差极化损失。3 种极化损失对电池的输出电压有一定的影响，是分析 SOFC 电化学特性时不可缺少的部分<sup>[9]</sup>。

活化极化损失  $\eta_{\text{act}}$  的计算公式如下：

$$\eta_{\text{act}} = \left(\frac{R_u T_{\text{PEN}}}{\alpha n F}\right) \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_0}\right), \quad (12)$$

其中， $T_{\text{PEN}}$  为电池阴极、阳极和电解质的温度； $\alpha$  为阳极和阴极的电荷转移系数，取值 0.5； $n$  为阳极和阴极的电荷转移量，取值 1； $i$  为电流密度； $i_0$  为交换电流密度。

极化损失包括阳极和阴极的极化损失，因此阳极和阴极的交换电流密度  $i_0$  应分别计算：

$$i_{0,\text{an}} = \gamma_{\text{an}} \left(\frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{amb}}}\right) \left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{amb}}}\right) \exp\left(-\frac{E_{\text{act,an}}}{R_u T_{\text{PEN}}}\right), \quad (13)$$

$$i_{0,\text{ca}} = \gamma_{\text{ca}} \left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{amb}}}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{\text{act,ca}}}{R_u T_{\text{PEN}}}\right), \quad (14)$$

其中， $\gamma_{\text{an}}$  和  $\gamma_{\text{ca}}$  分别为阳极和阴极的交换电流系数； $E_{\text{act,an}}$  和  $E_{\text{act,ca}}$  分别为阳极和阴极的活化能； $P$  为各组分和环境的分压，下标 **amb** 代表环境属性。

欧姆极化损失  $\eta_{\text{ohm}}$  主要由电池内部的电阻引起，计算方法如下：

$$\eta_{\text{ohm}} = i \times A_{\text{eff}} \times R_{\text{PEN}}, \quad (15)$$

其中， $A_{\text{eff}}$  为电池导电的有效面积； $R_{\text{PEN}}$  为阴阳极材料和电解质材料的内阻。

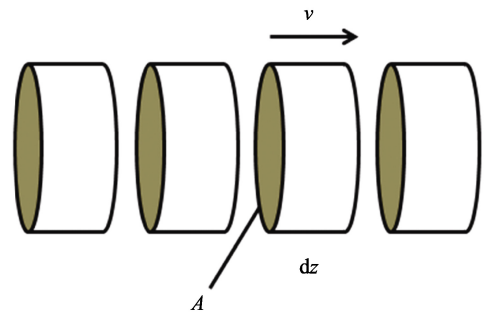


图 2 六方程模型解释

Fig. 2 6-equation model explanation

浓差极化损失  $\eta_{\text{conc}}$  是电池内部传质过程中, 由于反应物和生成物的迁移速率不同所导致的极化, 计算如下:

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{R_u T}{2F} \left[ \ln \left( \frac{X_{\text{H}_2, \text{bulk}}}{X_{\text{H}_2, \text{TPB}}} \frac{X_{\text{H}_2\text{O}, \text{TPB}}}{X_{\text{H}_2\text{O}, \text{bulk}}} \right) + 0.5 \ln \left( \frac{X_{\text{O}_2, \text{bulk}}}{X_{\text{O}_2, \text{TPB}}} \right) \right], \quad (16)$$

浓差极化现象往往发生在电池内部三相界面, 其中,  $X$  为各组分在不同位置的物质的量, 下标 TPB (triple phase boundary) 表示三相界面, bulk 表示流道。三相界面处的物质的量计算方法为

$$X_{\text{H}_2, \text{TPB}} = X_{\text{H}_2, \text{bulk}} - \frac{R_u T}{2F} \frac{i \delta_{\text{an}}}{p_{\text{an}} D_{\text{an}, \text{eff}}}, \quad (17)$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}, \text{TPB}} = X_{\text{H}_2\text{O}, \text{bulk}} + \frac{R_u T}{2F} \frac{i \delta_{\text{an}}}{p_{\text{an}} D_{\text{an}, \text{eff}}}, \quad (18)$$

$$X_{\text{O}_2, \text{TPB}} = 1 + (X_{\text{O}_2, \text{bulk}} - 1) \exp \left( \frac{R_u T}{4F} \frac{i \delta_{\text{ca}}}{p_{\text{ca}} D_{\text{ca}, \text{eff}}} \right), \quad (19)$$

其中,  $\delta_{\text{an}}$  和  $\delta_{\text{ca}}$  分别为阳极和阴极的厚度;  $p_{\text{an}}$  和  $p_{\text{ca}}$  分别为阳极和阴极的压力;  $D_{\text{an}, \text{eff}}$  和  $D_{\text{ca}, \text{eff}}$  分别为阳极和阴极的有效扩散系数。

模型温度计算方法<sup>[10]</sup>为

$$\beta \left[ \frac{k A_c}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}) + h A_g (T_\infty - T_i^{n+1}) \right] + (1 - \beta) \left[ \frac{k A_c}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + q''' A_c (\Delta x) = \rho C_p (\Delta x) \left[ \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{(\Delta t)} \right], \quad (20)$$

其中,  $\beta$  为显隐式差分格式权重系数, 取值 0.74;  $k$  为导热系数;  $A_c$  为换热面积;  $x$  为流道上所划分的每一个网格之间的距离;  $h$  为对流换热系数;  $A_g$  为对流换热面积;  $q'''$  为 SOFC 内部反应热;  $\rho$  为密度;  $C_p$  为比热容;  $t$  为迭代的时间步长。

### 3 MGT 模型

MGT 透平模型主要包括压力计算与焓计算两部分。

透平中不同的流量下会有不同的出口压力, 针对这一现象采用 Stodola 公式计算透平模型的前后压力<sup>[11]</sup>。

Stodola 系数计算如下:

$$K = m \cdot \sqrt{\frac{p_1 v_1}{(p_1)^2 - (p_2)^2}} = m_0 \cdot \sqrt{\frac{p_{10} v_{10}}{(p_{10})^2 - (p_{20})^2}}, \quad (21)$$

其中,  $K$  为 Stodola 系数;  $m$  为通过透平模型的质量流量;  $p_1$  和  $p_2$  分别为模型进出口压力;  $v_1$  为模型入口比容;  $m_0$ 、 $p_{10}$ 、 $p_{20}$ 、 $v_{10}$  均为理想状态下的参数。由式 (21) 也可以得到给定前后压力情况下通过模型的质量流量:

$$m = K \cdot \sqrt{\frac{(p_1)^2 - (p_2)^2}{p_1 v_1}}. \quad (22)$$

实际形式损失系数为

$$k = \frac{2}{K^2 r \left(1 + \frac{p_2}{p_1}\right)}, \tag{23}$$

其中， $r$  为模型中的工质密度。

在工质为蒸汽的情况下，模型焓差为

$$H_S = \left[ h_{1S} - (h_{1S} - h_0) \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\eta}{4.72}} - h_0 \right] \cdot m, \tag{24}$$

其中， $\eta$  为熵膨胀效率； $h_{1S}$  为出口焓； $h_0$  为滞止焓。

包含液滴的情况为

$$\Delta H = X_S \Delta H_S + (1 - X_S) [h_{l1}(p_1) - h_{l2}(p_2)] \cdot m, \tag{25}$$

其中， $X_S$  为工质中的蒸汽质量比。

工质为气体的情况为

$$H = m(h_1 - h_2). \tag{26}$$

### 4 系统性能

图 3 为在入口温度 973 K、压力 3.46 bar (1 bar=0.1 MPa)、阴极空气流量 1 kg/s 的初始条件下，能斯特电势在 10 s 内的变化。由图 3 可以看出，能斯特电势随时间趋于稳定且沿流道方向逐渐减小。这是由于沿电池流道方向，反应进行得越来越彻底，阳极中的  $O_2$  含量及燃料量越来越少<sup>[12]</sup>，生成的  $H_2O$  含量越来越高，反应物浓度减少而生成物浓度增加使能斯特电势逐渐降低。

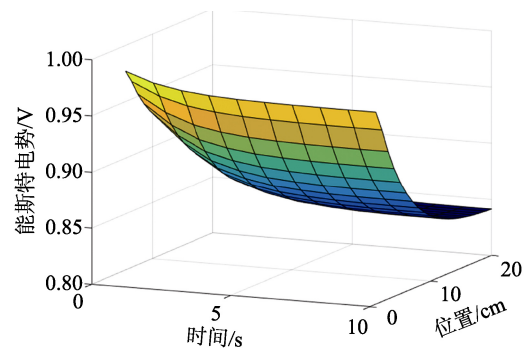


图 3 能斯特电势

Fig. 3 Nernst potential

图 4 为 10 s 内 SOFC 中 3 种极化损失沿流道的分布。

由图 4 可以看出，3 种极化损失均随时间趋于稳定，且均沿流道方向呈现降低趋势，其变化趋势与能斯特电势保持一致。

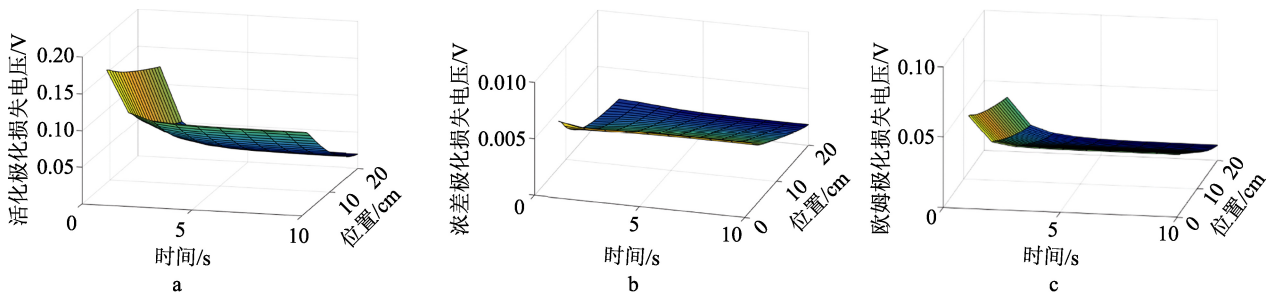


图 4 SOFC 中 3 种极化损失

Fig. 4 Three kinds of polarization losses in SOFC

a—活化极化损失；b—浓差极化损失；c—欧姆极化损失

a-Activation polarization loss; b-Concentration polarization loss; c-Ohmic polarization loss

图 5 为稳态时 3 种极化损失的比较。由图 5 可以看出，活化极化损失在 3 种损失中所占比重几乎达

到电池能斯特电势的 10%，欧姆极化次之，浓差极化对电池输出电压的影响最小，在一些研究中会忽略浓差极化的影响<sup>[13]</sup>。随着反应进行得越来越彻底，3种极化损失在电池出口位置都变得很低。

图 6 为 3 种不同温度入口条件下 10 s 内 SOFC 出口温度的变化趋势。出口温度随时间变化逐渐平稳，更高的入口温度也将导致燃料电池出口温度的上升。以上稳态结果表明，该系统在非耦合状态下呈现较好的稳态特性，电化学特性与热力学特性在 10 s 内达到稳定的状态。

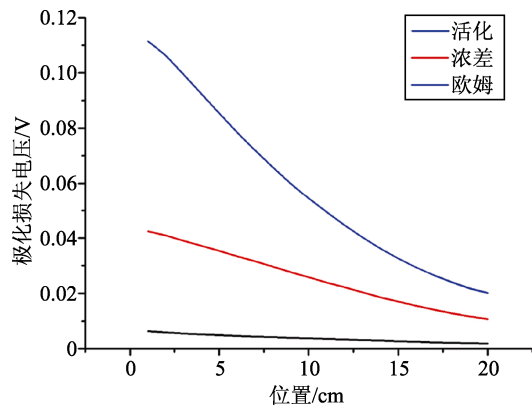


图 5 3 种极化损失的比较

Fig. 5 Comparison of three kinds of different polarization losses

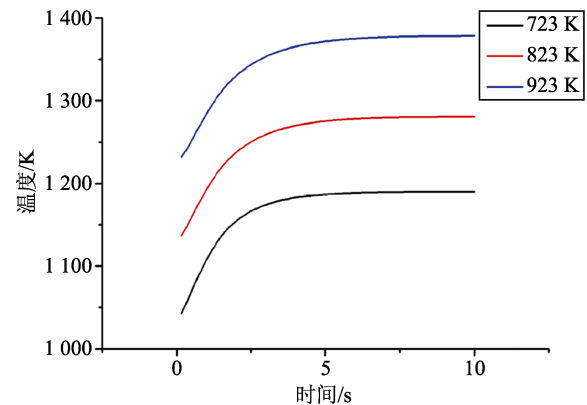


图 6 SOFC 出口温度的比较

Fig. 6 Comparison of SOFC outlet temperatures

以上结果均为 SOFC 模型和 MGT 模型单独运行时的系统特性，当二者处于耦合状态时，它们的响应时间有较大差别，而且系统的两个部分是通过 OPC 协议进行通讯的，因此它们之间耦合性能的研究对于掌握整体系统性能特性具有重要意义。

在 SOFC-MGT 系统中，空气经过压气机压缩并与燃气轮机出口排气换热后，将由半实物仿真界面采集该处的温度、压力和流量，作为 SOFC 的输出参数。该处的空气在实物系统中也将直接通入燃料电池阴极参与其中的电化学反应，因此这里的温度不宜过高或过低，过高可能会引起燃料电池内的安全问题，而 SOFC 是高温燃料电池，其特点是不使用贵金属催化剂，但是对反应温度要求高，因此入口温度过低会影响反应速率甚至会直接导致反应无法进行。

SOFC 出口处的气体在实物系统中将作为 MGT 的进气，该处气体状况对下游的燃气轮机系统影响较大，因此在耦合情况下的稳定性也尤为重要。

在耦合之前首先分别让两个子系统达到稳态，此时热空气旁路阀门开度为 30%，冷空气旁路和排气旁路关闭，SOFC 入口处温度在 500 K 左右，如图 7 所示。图 8 为 SOFC 出口温度试验数据，首先在 MGT 系统与 SOFC 子系统非耦合状态下运行一段时间，由图 9 可知整个耦合系统在较短时间内运行至稳态，在稳态时使两个系统耦合。耦合后出口温度呈现略微下降的趋势，并且在较短时间内稳定在 780 K 附近。因此，基于 Apros 的 BOP 系统和基于 Matlab 的 SOFC 子系统的耦合过程较为稳定。

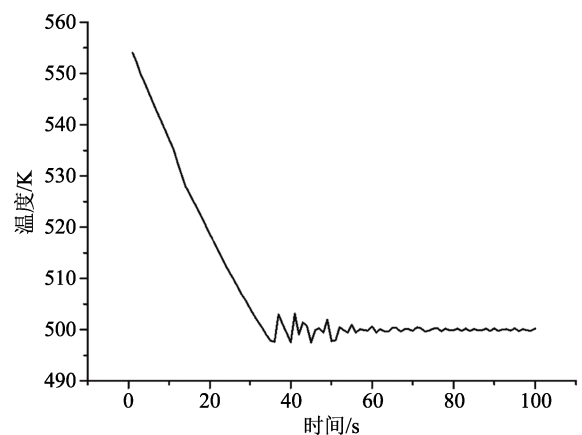


图 7 SOFC 入口温度

Fig. 7 SOFC inlet temperature

当耦合系统达到稳态后，通过改变热空气旁路阀门开度给系统增加扰动。如图 1 所示，热空气旁路将换热后的热空气跳过 SOFC 子系统，通入 SOFC 下游作为 BOP 的进气，因此改变热空气旁路阀门即起

到了改变 SOFC 阴极入口空气量的作用。阴极空气量对 SOFC 内部的温度分布以及系统的耦合性能有较大的影响，因此通过改变热空气旁路阀门开度来分析系统的动态特性具有一定的实际意义。

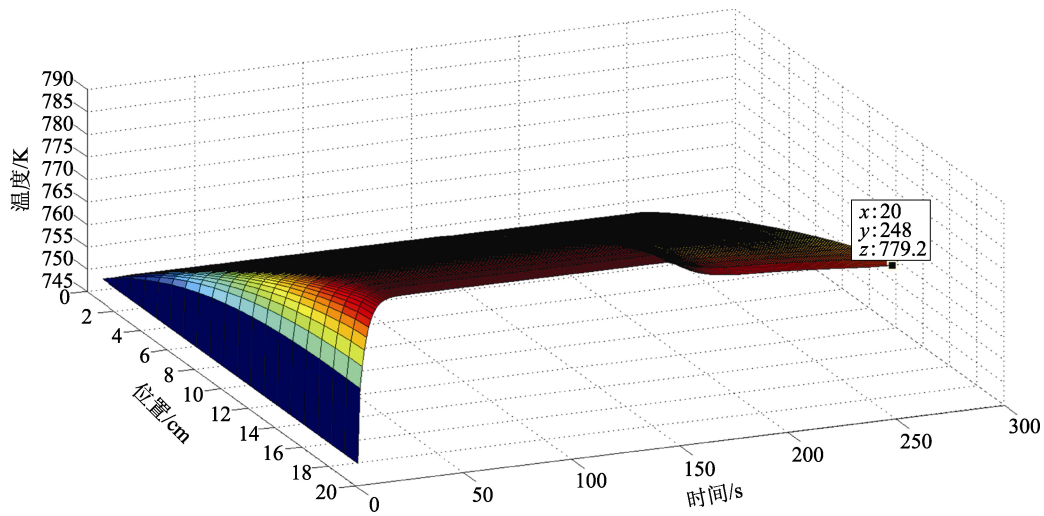


图 8 SOFC 出口温度

Fig. 8 SOFC outlet temperature

将热空气旁路阀门开度由 30% 改变至 0。图 10 为耦合系统中 SOFC 入口温度在受到扰动后的变化情况。由图 10 可知，由于热空气阀门的关闭，入口温度在刚开始时降低，温度数值在振荡一段时间后重新回到了稳态。达到稳态一段时间后，将阀门开度由 0 又回到 30% 时，可以看到温度以相反的趋势回到稳态。

将燃料量增加至 0.1 kg/s，透平功率由稳态下的 1 059 W 升至 1 070 W，动态响应过程也较为迅速（如图 9 所示）。燃料量在短时间内增加后，透平功率在短时间内有迅速升高的趋势，由于燃烧室内燃烧的持续进行，涡轮进气参数在较短时间内达到稳态，在此基础上透平功率相应地回到稳态并且略高于之前的状态。透平转速的稳定对于 MGT 来说至关重要，影响着系统的稳定性和安全性，如图 11 所示，在扰动时刻增大入口空气流量至 0.175 kg/s，模拟结果在短时间内达到了稳态 40 475 r/min 左右。

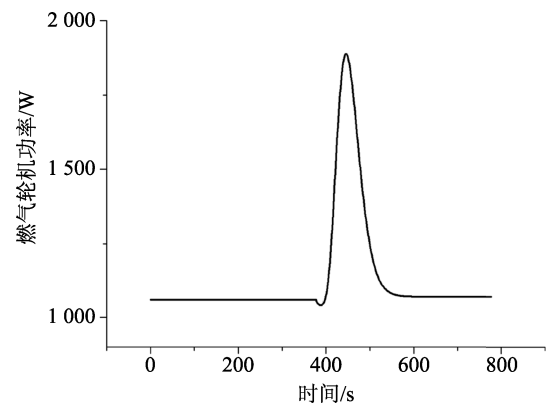


图 9 透平功率动态特性

Fig. 9 Turbine power dynamic characteristics

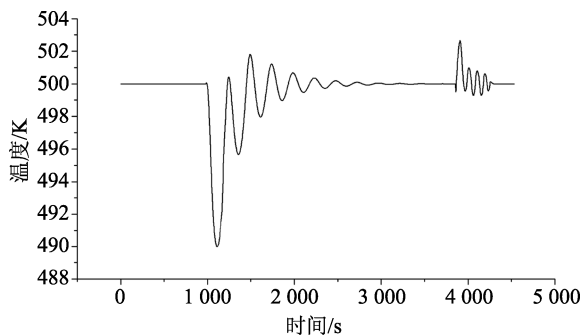


图 10 热空气阀门开度扰动下的 SOFC 入口温度

Fig. 10 SOFC inlet temperature under hot air valve disturbance

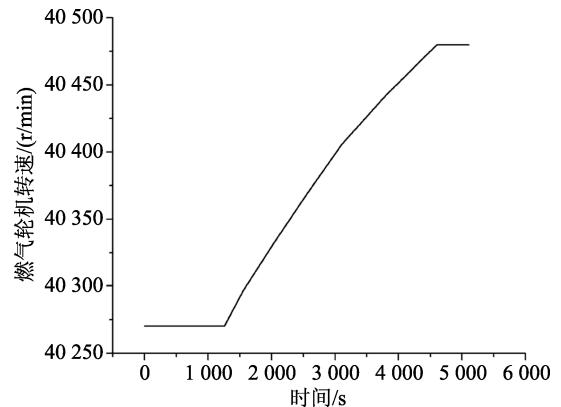


图 11 透平转速动态特性

Fig. 11 Turbine speed dynamic characteristics



## 5 结论

本文使用数值模拟的方法对 SOFC-MGT 系统进行半实物仿真研究, 为下一步构建以 MGT 子系统为实物、SOFC 为模型的半实物仿真发电系统提供了一定的理论基础。

在非耦合状态下, SOFC 模型表现出良好的电化学特性, 浓差极化、欧姆极化和活化极化损失均沿流道方向降低且随时间的变化趋于稳定, 同时分析了不同工况下 SOFC 出口温度的变化情况。在耦合状态下对整个发电系统进行了稳态验证, 并对耦合系统进行了扰动试验, 结果表明, 不论是在非耦合还是耦合的情况下, 该发电系统均能达到正常的工作状态。以上结果表明, 该数值系统能达到良好的系统性能, 基于 Apros 和 Matlab 搭建的 SOFC-MGT 发电系统的数值模型, 在使用 OPC 协议通讯的情况下可以达到稳定的运行状态。

### [参考文献] (References)

- [1] TUCKER D, LAWSON L, GEMMEN R, et al. Evaluation of hybrid fuel cell turbine system startup with compressor bleed[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Nevada: ASME, 2005: 333-341.
- [2] KIRUBAKARAN A, JAIN S, NEMA R K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2430-2440.
- [3] SINGHAL S C, KENDALL K. High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications[J]. Materials Today, 2002, 5(12): 55.
- [4] WANG S Z, JIANG Y, ZHANG Y H, et al. Promoting effect of YSZ on the electrochemical performance of YSZ+LSM composite electrodes[J]. Solid State Ionics, 1998, 113-115: 291-303.
- [5] WILLIAMS M C, STRAKEY J, SUDOVAL W. US DOE fossil energy fuel cells program[J]. Journal of Power Sources, 2006, 159(2): 1241-1247.
- [6] SMITH T P. Hardware simulation of fuel cell/gas turbine hybrids[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [7] 张文书. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机新型混合系统仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
ZHANG W S. Simulation study on new hybrid system of solid oxide fuel cell and gas turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [8] 包成, 蔡宁生. SOFC-MGT 混合发电系统的半实物仿真方案研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31 (6): 475-480.  
BAO C, CAI N S. A hardware-in-the-loop simulation approach for SOFC-MGT hybrid systems[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2011, 31(6): 475-480. (in Chinese)
- [9] HUGHES D, WEPFER W J, DAVIES K, et al. A real-time spatial SOFC model for hardware-based simulation of hybrid systems[C]//ASME 2011 9th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology collocated with ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability. Washington DC: ASME, 2011: 409-428.
- [10] LIESE E A, GEMMEN R S, SMITH T P, et al. A dynamic bulk SOFC model used in a hybrid turbine controls test facility[C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. Barcelona: ASME, 2006: 117-126.
- [11] 施浩波. 基于燃气轮机/燃料电池联合发电的分布式发电系统建模仿真研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.  
SHI H B. Study on modeling and simulation for distributed generation system based on gasturbin/fuelcell combined generation[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011. (in Chinese)
- [12] 刘清华. 英国燃料电池研究与开发[J]. 全球科技经济瞭望, 1999 (1): 28.  
LIU Q H. Research and development of british fuel cell[J]. Global Technology and Economic Outlook, 1999(1): 28. (in Chinese)
- [13] 周娜娜. SOFC/GT 耦合发电系统中燃料电池阴极气流管理的半实物仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
ZHOU N N. Cathode airflow management in a solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system using hardward in the loop simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)