

## SOFC-ICE 集成热电联产系统的分析、建模与控制

尹海<sup>1</sup>, 程岫<sup>2</sup>, 张健<sup>3</sup>, 高金武<sup>1,4</sup>

1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022  
E-mail: yinhai@jlu.edu.cn
2. 齐鲁工业大学, 济南 250353  
E-mail: sean82716@gmail.com
3. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京100190  
E-mail: zhangjian@lnm.imech.ac.cn
4. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022  
E-mail: gaojw@jlu.edu.cn

**摘要** 热电联产系统从单一能源同时提取电能和热能, 是一种高效的能源系统。随着燃料电池技术的发展, 过去几十年电化学燃烧热电联产系统(如 SOFC-GT, SOFC-ICE) 得到了研究。在热电联产系统功率低于兆瓦量级时, ICE 比 GT 更高效, 成本效益更高, 证实了 SOFC-ICE 系统的可行性和优势。为了使这种热电联产系统能够大规模地用于分布式能源系统, 需要对 SOFC-ICE 系统进行更多的研究。但是, 目前尚未定量分析化学能-电能-热能转换的过程, 对如何优化系统效率, 从而最大限度提高系统性能尚不清楚。本文对一种 SOFC-ICE 系统进行了研究。首先介绍了一种 SOFC-ICE 系统的结构, 然后对其各组成部件的模型进行了分析和研究, 并在 Simulink Matlab 中搭建了仿真环境; 在此基础上, 运用工作点优化设计了控制器。仿真结果表明本文给出的方法是有效的。

**关键词** 热电联产; SOFC-ICE; 工作点优化

## Study on a CHP plant using SOFC-ICE integrated system: Analysis, modeling and control

Yin Hai<sup>1</sup>, Cheng Shen<sup>2</sup>, Zhang Jian<sup>3</sup>, Gao Jinwu<sup>1,4</sup>

1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China  
E-mail: [yinhai@jlu.edu.cn](mailto:yinhai@jlu.edu.cn)
2. Qilu University of Technology, Jinan 250353, China  
E-mail: [sean82716@gmail.com](mailto:sean82716@gmail.com)
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Beijing 100190, China  
E-mail: [zhangjian@lnm.imech.ac.cn](mailto:zhangjian@lnm.imech.ac.cn)
4. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China  
E-mail: [gaojw@jlu.edu.cn](mailto:gaojw@jlu.edu.cn)

**Abstract** Combined heat and power(CHP) system has been demonstrated to be an efficient cogeneration energy system, which can supply electricity power and thermal energy from a single source of energy. With the development of fuel cell technology, one kind of electrochemical-combustion CHP system, such as SOFC-GT, SOFC-ICE, was studied in the past

收稿日期:

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目、基于缸压的内燃机瞬态建模与控制、JJKH20190151KJ

作者简介: 尹海、女、1982年1月、工程师、吉林省龙井市, 能源系统控制与优化, 汽车仿真与控制国家重点实验室、130025、yinhai@jlu.edu.cn、0431-85095090。

decades. Especially, the recent researches have validated the feasibility and advantages of the SOFC-ICE system, since the ICE seems to be more efficient and cost effective than GT with a lower power of SOFC that is below several MWs. However, more researches should be done on SOFC-ICE system if this kind of CHP is able to be massively used as distributed energy system. In detail, the process of chemical energy-electricity-heat conversion, has not been quantitatively analyzed, how to optimize the system efficiency, maximize the flexibility of system are not clear yet. In this study, some basic but important technologies will be mentioned on SOFC-ICE system. First, one kind structure of SOFC-ICE is introduced according to the previous research; then its model of each component is analyzed and studied; furthermore, the simulation environment is setup in the Simulink Matlab; based on the above mentioned results, controller design technology of this system using operation point optimization theory is synthesized for electricity generation, power and heat control simultaneously, the simulation results are given to illustrate the control performance and dynamics of this CHP system. At last, the conclusion is drawn to end the study.

**keywords** Combined heat and power;SOFC-ICE; Operation point optimization

## 引言

目前, 燃气轮机已广泛应用于分布式电厂。当其功率达到几十兆瓦时, 效率可达 40-45%<sup>[1]</sup>。作为动力和热力联合工作时, 效率会更高。为了进一步提高系统效率, 减少对环境的影响, 组合系统的概念被引入。例如, 固体氧化物燃料电池(SOFC)已被证明是最有吸引力的燃料电池发电技术, 但因阳极中 CH<sub>4</sub>重整后产生的含有可利用化学能的一氧化碳不能被 SOFC 使用, 影响了其效率。

SOFC 与燃气轮机技术的集成已经得到了广泛的研究。文献[2]对一种 SOFC-GT 结构进行了调研, 证明了这种混合系统对于分布式发电厂具有很高的可行性和巨大的潜力。文献[3]通过评估混合 SOFC-GT 系统的工作范围, 选择所需的工作线, 以实现在不同工作点的最佳系统效率。文献[4]表明, 为了保持这种混合系统的高性能, 根据所需功率的变化找到系统的最优控制策略是很重要的。然而, 以往的研究主要集中在组件控制上, 对系统控制的研究较少。

SOFC 与发动机结合的混合动力系统方案也被提出并得到研究。文献[5]表明, 在完全均匀和分层的发动机条件下, 一种先进的内燃机可以与 SOFC 结合使用获得较高的电气效率。特别是当较小的功率时, 内燃机比小型燃气轮机具有更高的效率和更低的成本。这种新型的混合系统被证明是一种有前景的能量转换系统。为促进该混合系统的研究, 文献[6]介绍了一种可用于 SOFC-engine 系统的 HCCI 发动机并进行了相应的实验评价, 揭示了在系统中使用 HCCI 发动机是可行的。文献[7]对 5 千瓦级 SOFC-ICE 混合动力系统进行了分析, 并将内燃机的实验结果与其他系统部

件的仿真模型进行了整合, 找到了混合系统中 SOFC 的工作特性, 确定了混合系统的工作设计点。这些研究揭示了 SOFC-engine 混合动力系统的可行性和稳态运行特性。

SOFC-GT、SOFC-engine 等 SOFC 的混合动力系统已经引起了科研人员的重视, 其可行性、部件优化和稳态工况参数分析都得到了全面的研究。但是, 这种混合系统只有在系统瞬态控制得到解决的情况下才能被分布式电站使用。故本文尝试研究了一种 SOFC-ICE 系统的控制技术。本文参考文献[7], 建立了系统中各部件的动态模型, 并在此基础上完成了控制器设计和仿真验证。仿真表明, 基于工作点优化设计的电-热跟踪控制器, 优化了系统的效率。

## 1 系统结构与建模

### 1.1 系统结构

本文研究 SOFC-ICE 系统的瞬态控制问题。该系统由外部重整器、换热器、SOFC 系统和 ICE 系统(SI 发动机)等部件组成, 这些部件通过燃气管道或冷却水管道连接, 如图 1 所示<sup>[7]</sup>。

换热器是将热量从高温侧传递到低温侧的组件, 图 1 中由 HEX1、HEX2、HEX3 表示。其中, HEX1 用于将天然气和水加热并送至外部重整器 1 中, HEX2 用于加热进入 SOFC 的空气, 而 HEX3 则用于冷却进入发动机的气体。

系统的能量来源于天然气, 天然气和水同时进入系统。起初由于外部重整器的温度较低(常温), SOFC 无法工作, 内燃机直接燃烧天然气产生电能, 产生的废气经过换热器 HEX1 加热天然气和水并送至外部重整器 1。当外部重整器 1 达到其工作温度时, 水将和天然气一起注入系统,

外部重整器 1 将天然气重整为氢气、一氧化碳和二氧化碳。当 SOFC 达到了工作温度，阴阳极气体在电池内发生电化学反应产生电能，同时剩余的可燃气体通过 SOFC 流入内燃机进行燃烧，将热量提供给外部重整器 2。当外部重整器 2 的温度高于气体重整的温度，外部重整器 2 开始工作，并与外部重整器 1 共同工作提高重整率。为了防止 SOFC 工作温度过高，应控制气流以保持 SOFC 的温度恒定，并将这些额外的热量提供给外部重整器 1。通过这种热耦合，以及 SOFC 和内燃机的配合，跟单台 SOFC 系统或单台内燃机系统相比，明显提高了发电效率。另外，为满足热需求，经过 HEX1 和 HEX3 的余热也被回收存储。

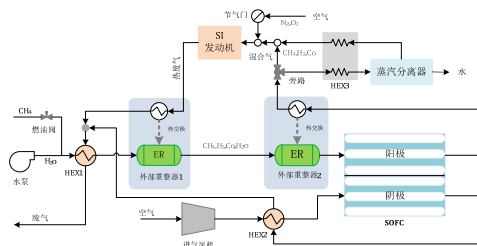


图 1 SOFC-ICE 系统的结构<sup>[7]</sup>

### 1.1 系统建模

系统的主要组成部分包括外部重整器、换热器、SOFC 系统和 ICE 系统 (SI 发动机)。接下来，对这些部件进行逐一建模。

#### 1.1.1 换热器模型

系统中存在三个换热器 HEX1-HEX3。由于这三个换热器具有相同的结构，故具有相同的模型，只是具体的结构参数会有所不同。通常，采用简单的逆流换热模型描述传热动力学<sup>[8]</sup>。



图 2 换热器的图解模型

图 2 是换热器的图解模型。其中， $\delta Q$  是从高温侧转移到低温侧的热总量， $T_{f,i}$  是进入重整器的气体温度， $T_{f,o}$  是重整器的输出温度， $T_{e,i}$  是进入的高温废气， $T_{e,o}$  是经过热交换后的废气温度。在不考虑热损失的前提下，可得

$$\rho_f c_f V_f \frac{dT_{f,o}}{dt} = c_f \dot{m}_f (T_{f,i} - T_{f,o}) + \delta Q \quad (1)$$

$$\rho_e c_e V_e \frac{dT_{e,o}}{dt} = c_e \dot{m}_e (T_{e,i} - T_{e,o}) - \delta Q \quad (2)$$

式(1)和式(2)表示内部热平衡。其中  $\delta Q$  可用如下简化模型表示：

$$\delta Q = kA(T_{e,o} - T_{f,o})$$

模型中参数  $k$  和参数  $A$  是由结构和底面积决定的。将上述  $\delta Q$  的表达式代入式(1)和式(2)，得到式(3)和式(4)。

$$\tau_f \frac{dT_{f,o}}{dt} + T_{f,o} = \mu_f T_{f,i} - (1 - \mu_f) T_{e,o} \quad (3)$$

$$\tau_e \frac{dT_{e,o}}{dt} + T_{e,o} = \mu_e T_{e,i} - (1 - \mu_e) T_{f,o} \quad (4)$$

其中

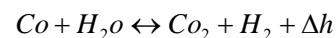
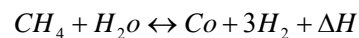
$$\tau_f = \frac{\rho_f c_f V_f}{c_f \dot{m}_f + kA} \quad \mu_f = \frac{c_f \dot{m}_f}{c_f \dot{m}_f + kA}$$

$$\tau_e = \frac{\rho_e c_e V_e}{c_e \dot{m}_e + kA} \quad \mu_e = \frac{c_e \dot{m}_e}{c_e \dot{m}_e + kA}$$

显然，参数  $\tau_f$ 、 $\mu_f$ 、 $\tau_e$ 、 $\mu_e$  是随时间变化的。故可得式(3)和式(4)描述的换热器动力学系统为线性变参数(LPV)系统。

#### 1.1.2 外部重整器模型

外部重整器动力学特性包括与换热器相似的传热模型和化学重整，也会释放和吸收热量，在外部转换器中考虑到以下化学动力学



$$\Delta H = 206 \text{ kJ/mol} \quad \Delta h = -41 \text{ kJ/mol}$$

$CH_4$  经过重整生成  $CO$  和  $H_2$  时，需要吸收热量；而  $CO$  被氧化成  $CO_2$  时会释放热量。因此，这两种化学反应的比例决定了外部重整器的热平衡。文献<sup>[9,10]</sup>给出的外部重整器表达式如下。

$$\begin{pmatrix} n_{CH_4} \\ n_{H_2o} \\ n_{H_2} \\ n_{CO_2} \\ n_{CO} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{CH_4,i} \\ n_{H_2o,i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \Delta n_0 \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \Delta n_1 \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

在特定条件下，通过实验数据的曲线拟合可获得  $\Delta n_0$  和  $\Delta n_1$ ，从而得出外部转化器 1 的内部热平衡方程：

$$\rho_f c_f V_f \frac{dT_{f,o}}{dt} = c_f \dot{m}_f (T_{f,i} - T_{f,o}) + \delta Q + \delta Q_{che}$$

$$\rho_e c_e V_e \frac{dT_{e,o}}{dt} = c_e \dot{m}_e (T_{e,i} - T_{e,o}) - \delta Q$$

其中

$$\begin{aligned} \delta Q_{che} &= (n_{CO_2} + n_{CO}) \times 206 - n_{CO_2} \times 41 \text{ KJ} \\ &= n_{CO} \times 206 + n_{CO_2} \times 165 \text{ KJ} \end{aligned}$$

### 1.1.3 SOFC 模型

假设热传递理想，即保证整个系统的温度均匀，成立下式

$$\begin{aligned} c_{sofc} m_{sofc} \frac{dT_{sofc}}{dt} &= \delta Q_{gen} - c_f \dot{m}_f (T_{sofc} - T_{f,o}) \\ &\quad - c_a \dot{m}_a (T_{sofc} - T_{a,o}) - k_a A_a (T_{sofc} - T_{atm}) \end{aligned}$$

其中  $\delta Q_{gen}$  受到输出功率和系统效率的影响。

$$\delta Q_{gen} = (V_{ohm} + V_{act} + V_{conc}) I$$

$V_{ohm}$ 、 $V_{act}$ 、 $V_{conc}$  的获取可参考文献

献[11]中的电压-电流强度 (VI) 曲线。

$$V = V_{nernst} - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc}$$

$$P_{output} = VI$$

$$\eta = \frac{VI}{V_{nernst} I} = \frac{V}{V_{nernst}}$$

根据文献中的系统效率曲线和上述表达式得出 SOFC 系统需要的氢气流量表达式。

$$f_{H_2} = \frac{W_{sofc}}{237.2 \times \eta_{sofc}} \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} = \frac{2W_{sofc}}{237.2 \times \eta_{sofc}} \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 1.1.4 内燃机模型

如图 1 所示，SOFC-ICE 系统的发动机系统包括热交换器(HEX3)、蒸汽分离器和 SI 发动机。本文在忽略 HEX3、蒸汽分离器和旁路等部件动态特性的前提下，建立了发动机的热效率模型。众所周知，不同的输出功率下发动机的热效率是不同的。因此，结合发动机的效率曲线，取最佳效率点进行了发动机建模。设  $W_{ice}$  是发动机的输出功率， $r_{CH_4}$ 、 $r_{H_2}$ 、 $r_{CO}$  是对应气体的摩尔比，得到从 SOFC 的阳极进入发动机的的气体流量公式

$$f_{anod} = \frac{W_{ice}}{H_{anod} \times \eta_{ice}} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$$

式中，

$$\begin{aligned} H_{anod} &= 8.9031 \times 10^5 \times r_{CH_4} + 2.858 \times 10^5 \times r_{H_2} \\ &\quad + 2.83 \times 10^5 \times r_{CO} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

### 1.1.5 混合气体的热力学模型

设有两种气体，对应的比热容为  $c_{g,1}$ 、 $c_{g,2}$ ，量纲为  $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ；对应的流量为  $f_{g,1}$ 、 $f_{g,2}$ ，量纲为  $\text{mol/s}$ ；对应的温度为  $T_{g,1}$ 、 $T_{g,2}$ ，量纲为  $\text{K}$ ，那么成立

$$H_{g,1} = c_{g,1} \times f_{g,1} \times T_{g,1}$$

$$H_{g,2} = c_{g,2} \times f_{g,2} \times T_{g,2}$$

假设这两种气体均匀混合（无热损失），则得到如下混合气体的流量、比热容和温度的表达式

$$f_{g,mix} = f_{g,1} + f_{g,2}$$

$$c_{g,mix} = \frac{(c_{g,1} \times f_{g,1} + c_{g,2} \times f_{g,2})}{(f_{g,1} + f_{g,2})}$$

$$T_{g,mix} = \frac{(H_{g,1} + H_{g,2})}{(c_{g,mix} \times f_{g,mix})} = \frac{(H_{g,1} + H_{g,2})}{(c_{g,1} \times f_{g,1} + c_{g,2} \times f_{g,2})}$$

## 2 控制器设计

本文主要研究 SOFC 和 SI 发动机的能量管理策略，考虑到 SOFC 和 SI 发动机均具有各自的控制单元，本文不考虑它们的内部控制问题，重点分析和研究两个部件之间的能量管理策略。

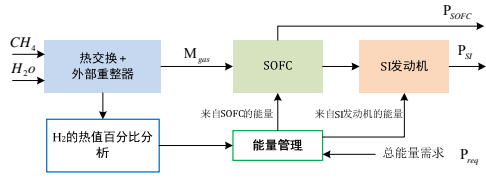


图3 SOFC-ICE系统的能量管理策略

图3是SOFC-ICE的能量管理策略。根据换热器和外部重整器的模型，计算并分析热值和H<sub>2</sub>的含量。在此基础上，根据能量管理策略将总能量需求 $P_{req}$ 分解为来自SOFC的能量 $P_{SOFC}$ 和来自SI发动机的能量 $P_{SI}$ 。假设外部重整器的温度变化非常缓慢，可以忽略其动态特性。根据系统效率，可知

$$P_{SI} = P_{req} - P_{SOFC}$$

$$= \left( H_{gas} M_{gas} - 285.8 \times \frac{P_{SOFC}}{237.2 \times \eta_{SOFC}} \right) \times \eta_{SI}$$

从而，得出进入SOFC的气体 (mol/s)

$$M_{gas} = \frac{P_{req} - P_{SOFC} + 285.8 \times \frac{P_{SOFC}}{237.2 \times \eta_{SOFC}} \times \eta_{SI}}{H_{gas} \times \eta_{SI}}$$

为了获得最佳系统效率，要求最大可能减少SOFC的气体消耗。故能量管理策略转化为如下的优化问题。

$$\min_{P_{SOFC} \in \Omega} \frac{P_{req} - P_{SOFC} + 285.8 \times \frac{P_{SOFC}}{237.2 \times \eta_{SOFC}} \times \eta_{SI}}{H_{gas} \times \eta_{SI}}$$

将上式代入到

$$\frac{P_{SOFC}}{237.2 \times \eta_{SOFC} \times Frac_{H_2}} < \frac{P_{req} - P_{SOFC} + 285.8 \times \frac{P_{SOFC}}{237.2 \times \eta_{SOFC}} \times \eta_{SI}}{H_{gas} \times \eta_{SI}}$$

$Frac_{H_2}$  和  $H_{gas}$  分别是H<sub>2</sub>的百分比和进入SOFC的气体热值。获得优化后的 $P_{SOFC}$ ，即 $P_{SOFC}^*$ 后，可通过下式得到优化后的 $P_{SI}$ 。

$$P_{SI}^* = P_{req} - P_{SOFC}^*$$

### 3 仿真验证与分析

为了验证所设计控制器的控制性能，

在Simulink Matlab中建立了仿真环境。表1给出了仿真参数列表。仿真环境由6个模块组成，包括混合气，HEX1，重整器1，重整器2，SOFC和SI发动机。混合气模块描述的是图1中HEX1之前混合气的动态特性，包括质量流动特性和热动态特性；HEX1模块描述的是SOFC产生废气与发动机之间的热交换；Reformer1模块和Reformer2模块描述的是电化学和热动态特性；SOFC和SI engine模块描述的是其发电效率。

表1 仿真参数列表

参数	值
换热器和外部重整器导热系数k	384 Jm-2K-1
热交换器和外部重整器底面积A	0.2827 m2
SOFC的温度	1073 K
CH <sub>4</sub> 的比热容	38.88J
H <sub>2</sub> 的比热容	28
CO的比热容	31.20Jmol-1
CO <sub>2</sub> 的比热容	38.64Jmol-1
H <sub>2</sub> O (气体)的比热容	33.30Jmol-1

本文选择两种家庭的日用电量验证所设计控制器的性能，如图4所示。图4中，“家庭A”曲线反映了白天的用电量较低，晚上的用电量较高（即白天所有居住者都不在家），“家庭B”曲线反映了居住者在早上到达并在下午离开，白天的耗电量稳定。仿真中设定环境温度是20°C。

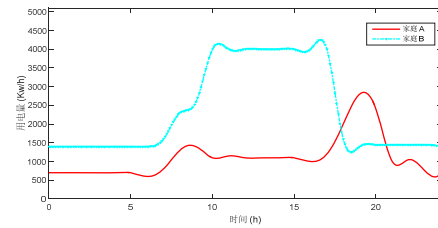


图4 两种家庭日用电量曲线

图5是家庭A的控制性能。可以看出，开始时由于环境温度较低，外部重整器没有启动，外部重整器2输出的H<sub>2</sub>百分比为零。因此，当系统启动时，只有发动机工作并输出功率，该运行模型持续约3小时。此后外部重整器发生化学反应，根据最优化策略，降低发动机功率，增加了SOFC功率。在输出功率不是很高的情况下，SOFC显然具有较高的系统效率。同时也可以看出，CH<sub>4</sub>的气体流量与总功率成正比。



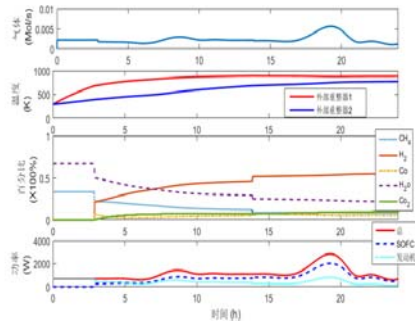


图 5 家庭A的系统控制性能

图 6 是家庭 B 的控制性能。家庭 B 在白天有一个非常稳定和高负荷的电力需求，而在晚上和早上负荷下降到一个相对较低的水平。由于平均功率要求较高，外部重整器的温度也较高，使得最高效的化学反应发生在外部重整器中。这种情况下 H<sub>2</sub> 的比例最大，因为反应与温度成正比。当功率需求下降时，外部重整器的温度和 H<sub>2</sub> 的比例都明显下降。可见，SOFC 一旦开始工作，始终占据主导地位。

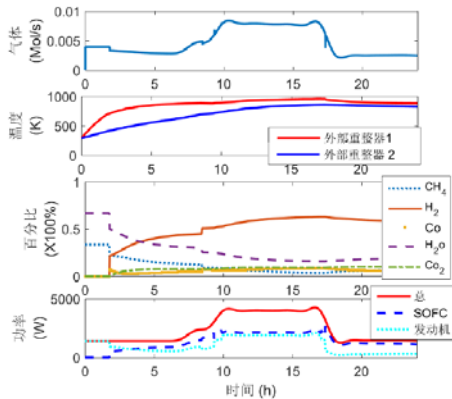


图 6 家庭 B 的系统控制性能

### 3 结论

本文研究了一种将 SOFC 和 SI 发动机相结合的 SOFC-ICE 系统。本文在分析了各部件模型的基础上，提出了适用于瞬态控制的动态模型，并设计了 SOFC 和 SI 发动机的最优能量管理策略，使天然气消耗最小化。Simulink Matlab 环境下的仿真验证说明了所提出能量管理策略的有效性。

然而，本文提出的能量管理策略并没有优化热交换器和外部重整器等热力系统的动态特性。在实际应用中，这些部件也可以通过调节 SOFC 和发动机的功率工作点控制。因此在今后的工作中，将重点放在对整个系统的优化。

### 参考文献

- [1] R. T. Deam, E. Lemma, B. Mace, et al. On scaling Down Turbinees to Millimeter size[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008,130: 052301.
- [2] Annamaria Bunomano, Francesco Caliso, Massimo Dentice d'Accadia, et al. Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power: A review[J]. Applied Energy, 2015,156: 32-85.
- [3] Diamantis P. Bakalis, Anastassios G. Stamatis. Optimization methodology of turbomachines for hybrid SIFC-GT applications[J]. Energy, 2014,70: 86-94.
- [4] Tao Won Song, Jeong Lak Sohn, Tong Seop Kim, et al. Performance characteristics of a MW-class SOFC/GT hybrid system based on a commercially available gas turbine[J]. Journal of power sources, 2006,158: 361-367.
- [5] Flavio D.F. Chuahy, Sage L. Kokjohn. Solid oxide fuel cell and advanced combustion engine combined cycle: a pathway to 70% electrical efficiency[J]. Applied energy, 2019,235: 391-408.
- [6] Wonjae Choi, Jaehyun Kim, Yongtae Kim, et al. Experimental study of homogeneous charge compression ignition engine operation fueled by emulated solid oxide fuel cell anode off-gas[J]. Applied Energy, 2018,229: 42-62.
- [7] Wonjae Choi, Jaehyun Kim, Yongtae Kim, et al. Solid oxide fuel cell operation in a solid oxide fuel cell-internal combustion engine hybrid system and the design point performance of the hybrid system[J]. Applied Energy, 2019,254: 11361.
- [8] M.A. Abdelghani-Idrissi, M.A. Arbaoui, L. Estel, J. Richalet. Predictive functional control of a counter current heat exchanger using convexity property[J]. Chemical Engineering and Processing, 40(2001): 449-457.
- [9] Jianhua Jiang, Xi Li, Zhonghua Deng, et al. Thermal management of an independent stream reformer for a solid oxide fuel cell with constrained generalized predictive control[J]. International journal of hydrogen energy, 2012,37: 12317-12331.
- [10] Hans-Jurgen Jahn, Wolfgang Schroer. Dynamic simulation model of a stream reformer for a residential fuel cell power plant[J]. Journal of Power Sources, 150(2005): 101-109.
- [11] Lin Zhang, Xi Li, Jianhua Jiang, et al. Dynamic modeling and analysis of a 5-Kw solid oxide fuel cell system from the perspectives of cooperative control of thermal safety and high efficiency[J]. International journal of hydrogen energy, 40: 456-476.