# 安全操控下5kW固体氧化物燃料电池电堆预测控制器设计

张 琳<sup>1,2†</sup>, 汪 枫<sup>1</sup>, 谢 超<sup>1</sup>, 唐文辉<sup>1</sup>, 方群乐<sup>1</sup>, 谢洪途<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军空军预警学院 预警技术系, 湖北 武汉 430019;

2. 武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081;

3. 中山大学 电子信息学院, 广东 广州 510275)

摘要: 基于5 kW固体氧化物燃料电池(SOFC)电堆,考虑建模仿真—2温度层模型在模型精度与复杂度上做了更好的折中,可以更有效地应用于控制器设计.本文首先对2温度层模型在常用稳态工作点附近采用泰勒级数展开,获得其状态空间方程. 然后考虑其安全操作特性,设计了两种带约束的预测控制器:即面向SOFC电堆的快速负载跟踪与燃料亏空控制器与面向SOFC电堆温度安全的控制器. 重点分析了不同切换速率工况下的温度及其梯度、功率以及燃料亏空特性,使得系统在快速进行功率跟踪的同时工作在安全范围以内. 结果发现随着电流调节速率的增大,跟踪过程虽然加快,但其存在安全风险也相应增大;此外,安全指标相对避免燃料亏空指标而言,对电流调节速率的要求更加苛刻,在控制器设计时必须综合进行考虑.

关键词: SOFC电堆; 建模仿真; 状态空间方程; 安全操作; 预测控制器

**引用格式**: 张琳, 汪枫, 谢超, 等. 安全操控下5 kW固体氧化物燃料电池电堆预测控制器设计. 控制理论与应用, 2021, 38(8): 1238 – 1246

DOI: 10.7641/CTA.2020.00328

# The constrained predictive controller design based on safe operating of a 5 kW solid oxide fuel cell stack

ZHANG Lin<sup>1,2†</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, XIE Chao<sup>1</sup>, TANG Wen-hui<sup>1</sup>, FANG Qun-le<sup>1</sup>, XIE Hong-tu<sup>3</sup>

(1. Department of Early Warning Technology, Air Force Early Warning Academy, Wuhan Hubei 430019, China;

2. Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Measurement Technology of Ministry of Education,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China;

3. School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510275, China)

Abstract: Based on the 5 kW solid oxide fuel cell (SOFC) stack, considering its stack modeling and simulation with two temperature layers can not only dramatically reduce the modeling complexity, but also shows higher precision, which should be preferred in controller design. In the light of the above thinking, this paper firstly obtain the state-space equations by the applications of the Taylor series extension theory to the common static working points. Then, considering the safe operating, two constrained predictive controllers are designed, namely the fast load tracking and fuel exhaustion avoidance oriented controller and the thermal safety oriented controller. Especially, the temperature and its gradient, output power, and fuel exhaustion are emphatically analyzed under different current regulation rate in this paper, which can ensure fast power tracking and safe operating simultaneously. The result shows that although power tracking process accelerated with the increase of the current regulation rate, the risk coefficient of operating safety is increasing too. Moreover, control standards of fuel exhaustion shows more rigorous compared to operating safety, which should comprehensively consider during controller design.

Key words: SOFC stack; modeling and simulation; state-space equations; safe operating; predictive controller

**Citation:** ZHANG Lin, WANG Feng, XIE Chao, et al. The constrained predictive controller design based on safe operating of a 5 kW solid oxide fuel cell stack. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(8): 1238 – 1246

收稿日期: 2020-06-05; 录用日期: 2020-12-31.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: 759758922@qq.com; Tel.: +86 15871730768.

本文责任编委:张承慧.

国家自然科学基金项目(61801510),湖北省自然科学基金青年项目(2019CFB263),冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心2019年度开放基金 项目(MADT0F2019B02)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61801510), the National Natural Science Foundation of Hubei Province (2019CF-B263) and the Open Fund Projects of Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Measurement Technology of Ministry of Education (MADT0F2019B02).

第8期

## 1 引言

固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC) 电堆作为系统的核心部件,进行闭环动态响应分析对 后续进行系统级设计具有重要参考以及对比意义<sup>[1-2]</sup>. 同时,由于在SOFC系统中,电堆直接与电控单元相 接,讨论电堆与电控单元的耦合控制,对后续能量管 理工作具有重要参考价值<sup>[3-4]</sup>.

SOFC电堆具有高阶复杂非线性的特性,在建模及分析研究工作中,需对SOFC模型的温度分层及层次降阶进行分析.对于具有4个温度层的SOFC电堆分布式模型的简化,目前已有学者进行了深入的研究.胡鹏,Xi等人<sup>[5-6]</sup>与蒋建华<sup>[7]</sup>研究电堆内部4个温度层的动态特性,两者均发现PEN温度层、连接体层和燃料层具有相似的温度动态响应曲线,同时1温度层模型产生偏差较大,而2温度层与3温度层模型都能比较准确的反应原模型的动态特性.而2温度层模型不仅大幅度地减少了模型的复杂度,而且具有更高的精度特性,在模型精度与复杂度上做了更好的折中,在控制器设计中应该优先采用.所以,为了方便进行控制器设计,可将电堆温度层简化为2温度层(以下简称2T).

因此,针对SOFC的具有复杂的高阶非线性、多状态变量以及时变特性特点,近年来很多专家学者对该领域控制方法进行了研究,文献[8-10]进行了电堆温度控制;文献[11]考虑功率输出、进行电堆热控制;文献[12]直接指出,当前国际领域并未解决由于未能实现有效热管理带来的寿命问题.上述国际领先团队的研究提供了有价值的方法和思路,但尚未发现有学者对系统热管理、燃料亏空与系统负载跟踪协同来设计

控制器.

本文重点针对性建立可定量分析与验证的有效方 法体系并以此实现SOFC系统热电协同优化控制.其 基本控制思路如下:基于所搭建的SOFC 2T电堆模型, 设计基于机理模型控制的控制器.首先,本文在2T 简 化模型常用稳态工作点附近采用泰勒级数展开并且 忽略高阶项,得到基于电流控制的2T电堆的状态空间 方程,证明了其有效性;然后,通过设计带输入约束的 广义预测控制器,讨论了电控单元对电堆单元的控制 作用:包括不同电流切换速率工况下的电堆温度、功 率跟踪响应以及燃料亏空特性,使得系统在快速进行 负载功率跟踪的同时工作在安全范围以内.

#### 2 SOFC电堆降阶及其线性化

#### 2.1 SOFC电堆降阶

根据SOFC电堆结构可以分成4个温度层,主要包含三合一电极层(positive-electrolyte-negative, PEN)、连接层、空气层、燃料层.一般SOFC电堆模型搭建采用1D模型,并且基于"节点"思想进行建模,每个节点单元的模型相当于一个0D模型<sup>[7,13]</sup>,如图1所示.电堆内包含温度特性与流体特性,温度特性中包括4个温度层温度,即空气温度、燃料温度、连接层温度以及PEN温度,流体特性包含空气、燃料、水蒸气的摩尔分数特性.假设电堆总节点数J = 5,可知SOFC单电池片内部包含4个温度状态与3个物质状态,35个状态变量.从控制的角度出发,SOFC独立发电系统电堆动态模型的系统状态参数过多,不利于控制器的设计,需进行降阶简化.



Fig. 1 The schematic diagram of overall SOFC stack control structure

如图1所示, 2温度层主要思想是将燃料层看做固体层的一部分, 即阳极气体温度=连接体温度=PEN 温度=固体层区温度. 燃料层与PEN层, 以及连接层之间无传热, 则电堆温度层可简化为固体层温度( $T_{sol}$ )、空气层温度( $T_{air}$ ). 固体层与空气层间存在热传递 ( $\dot{Q}_{conv}$ ), 节点与节点之间存在热传导( $\dot{Q}_{cond}$ ). 图1中 各物理量对应的符号及含义如附录1所示. 其具体的 模型搭建、降阶方法、静态简化方法及其验证在本文 作者及其团队前期工作中已经做了相关工作<sup>[14-18]</sup>, 在 本文中就不做具体介绍.

本文所采用的电堆模型由134片(10×10) cm<sup>2</sup>的单 电池片组成,电流取值范围为10 A~80 A,输出功率 范围为1 kW~5 kW,为了使得电堆安全操作,其固体 层最大温度与温度梯度分别应该不大于1173 K与 8 K/cm.

#### 2.2 电堆的状态空间方程

电堆作为SOFC系统的核心部件,可知2T SOFC电 堆每个节点只有两个温度状态,其总状态一共有10个, 在接受范围以内.通过公式推导,在其2.5 kW稳态工 作点附近采用泰勒级数展开并且忽略高阶项,可以导 出如下基于电流控制的2T电堆的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) = Ax + Bu, \\ y = g(x, u) = Cx + Du, \end{cases}$$
(1)

其中:

$$\begin{cases} x = [T_{\text{air}}^{1} \ T_{\text{sol}}^{1} \ T_{\text{air}}^{2} \ T_{\text{sol}}^{2} \ \cdots \ T_{\text{air}}^{5} \ T_{\text{sol}}^{5}]^{\mathrm{T}}, \\ u = [I_{\text{s}} \ \dot{N}_{\text{air,in}} \ \dot{N}_{\text{H}_{2},\text{in}}]^{\mathrm{T}}, \\ y = [P_{\text{net}} \ U_{\text{cell}}]. \end{cases}$$
(2)

原模型的精确度在之前研究成果中已经做了相关 讨论,可参考文献[7,14],因此观察线性化的系统是否 能够良好地反应原模型的动静态特性,是保证所设计 控制器的有效性的关键.为此,本文观测了各个节点 的状态空间模型与2T简化模型的温度特性差值.每 2000 s分别给定系统通入气体流量(空气、氢气)和电 堆输出电流5%,10%,15%的扰动,如图2(a)所示.





Fig. 2 Verification of the state space equation

其状态空间模型与2T简化模型的温度输出特性如 图2(b)所示,从图中可以看出,当给定系统阶跃扰动 时,各个节点的温度偏差在0.18 K以内,说明此状态空 间模型能够很好地反应原模型的动静态特性.

# 3 带约束的广义预测控制器设计

#### 3.1 广义预测控制器设计

CARIMA线性模型的表达式为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + \frac{c(z^{-1})\omega(k)}{\Delta}, \quad (3)$$

式中: u(k)和y(k)分别是系统的操纵变量和被控变量,  $\omega(k)$ 是一个零均值的白噪声.为了简化模型,可以将多项式 $c(z^{-1})$ 设定为1,  $z^{-1}$ 是后移算子,  $\Delta$ 是差分算子.

$$\Delta = 1 - z^{-1}.\tag{4}$$

A(z<sup>-1</sup>), B(z<sup>-1</sup>)的多项式表达式可如下所示:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}, \qquad (5)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}.$$
 (6)

广义预测控制(generalized predictive control, GP-C)算法的最优控制序列是通过最小化一个多阶的目标函数*J*而得到的.

$$J = \mathrm{E}\{(y - y_{\mathrm{r}})^{\mathrm{T}}(y - y_{\mathrm{r}}) + \lambda u^{\mathrm{T}}u\},\qquad(7)$$

$$y = [y(k+1 \cdots y(k+N)]^{\mathrm{T}},$$
 (8)

$$y_{\rm r} = [y_{\rm r}(k+1) \cdots y_{\rm r}(k+N)]^{\rm T},$$
 (9)

$$u = [\Delta u(k) \cdots \Delta u(k+M-1)]^{\mathrm{T}}, \quad (10)$$

 $\lambda = \lambda I$ , (11) 式中: E{·}表示数学期望, N表示预测步长, M表示 控制步长,  $\lambda(j) > 0$ 是一个控制加权因子序列,  $y_r(k+j)$ 表示在第(k+j)采样周期系统的输出参考轨迹. 式(7) 所示的目标函数中, 通过设定控制权重 $\lambda(j)$ 的大小可 以有效约束操纵变量的变化量的大小.

为了提高GPC控制系统的控制品质,选用带有柔 化因子α的参考轨迹:

$$y_{\mathbf{r}}(k) = y(k), \tag{12}$$

$$y_{\rm r}(k+j) = \alpha y_{\rm r}(k+j-1) + (1-\alpha)y_{\rm r}(k),$$
 (13)

其中 $\alpha \in (0,1)$ .

设目标函数J的梯度等于零,则最优控制序列为

$$u = (G^{\mathrm{T}}G + \lambda I)^{-1}G^{\mathrm{T}}[y_{\mathrm{r}} - Fy(k) - H\Delta u(k-1)].$$
(14)

在第*k*个采样周期,发送到被控对象的控制信号是 最优控制序列的第1个元素,即

 $u(k) = u(k-1) + [1 \ 0 \ \cdots \ 0]_{1 \times M} u,$  (15)

式中:

$$F_j(z^{-1}) = f_0^j + f_1^j z^{-1} + \dots + f_{n_a}^j z^{-n_a}, \qquad (16)$$

$$G_j(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{j-1} z^{-j+1},$$
 (17)

$$H_j(z^{-1}) = h_0^j + h_1^j z^{-1} + \dots + h_{n_{\rm b}-1}^j z^{-n_{\rm b}+1}.$$
 (18)

## 3.2 二次规划

在式(14)中u(k)的控制作用是在无约束的情况下 得出的,若控制量存在约束情况,则需要求解带有约 束的二次规划.本小节根据控制需求,主要考虑控制 过程中的控制量极限约束与控制量增量约束这两个 方面.其中,控制量表达形式为

$$u_{\min}(k+i-1) \leq u(k+i-1) \leq u_{\max}(k+i-1),$$
(19)

其中 $i = 0, 1, \cdots, M$ . 控制增量约束表达形式为  $\Delta u_{--}(k+i) \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u(k+i)$ 

$$\Delta u_{\min}(k+i) \leqslant \Delta u(k+i) \leqslant \Delta u_{\max}(k+i),$$
(20)

其中
$$i = 0, 1, \cdots, M - 1$$
. 本文设定  
 $\Delta u_{\min}(k+i) = -\Delta u_{\max}(k+i).$ 

综上所述,具有约束的GPC的滚动优化是在满足 约束式(18)--(19)的情况下使得性能指标目标函数(7) 最小.其约束条件为

$$Cx \ge h,$$
 (21)

. . . 0 1 0 0  $^{-1}$ 0 0 . . . 0 0 1 0 . . . 0 0  $-1 \quad 0$ . . . 0 ÷ ÷ ÷ 0 0 0 . . . 1  $0 \quad 0 \quad \cdots \quad -1$ 0 C =(22)1  $0 \quad 0 \quad \cdots$ 0  $-1 \ 0 \ 0 \ \cdots$ 0  $1 \quad 0 \quad \cdots$ 1 0 -1 -1 0. . . 0 ÷ : 1 . . . 1 1 1 -1 -1 -1  $\cdots$ -1 $4M \times M$  $du_{\min}$  $-du_{\rm max}$  $du_{\min}$  $du_{\rm max}$ :  $du_{\min}$  $du_{\rm max}$ h =(23) $u_{\min} - u(k-1)$  $-(u_{\max}-u(k-1))$  $u_{\min} - u(k-1)$  $\left(u_{\max} - u(k-1)\right)$  $u_{\min} - u(k-1)$  $-(u_{\max}-u(k-1))$  $\Delta u(t)$  $\Delta u(t+1)$ (24)x = $\Delta u(t+N_{\rm u}-1)$ 

则本小节带输入约束的SOFC问题可变为如下的 二次规划问题:

$$\begin{array}{l} \min \ J, \\ \text{s.t.} \ Cx \ge h. \end{array}$$
(25)

本文选用拉格朗日乘子算法处理输入幅值的约束 和变化率问题.

### 4 不考虑安全操作的SOFC控制器设计

SOFC在动态响应过程中主要存在快速负载跟踪, 燃料亏空,以及热安全的问题<sup>[19-22]</sup>.传统的SOFC控 制算法中,往往没有考虑燃料亏空与热安全问题,采 用普通控制算法进行负载跟踪,其控制效果不是很 好<sup>[12,23-24]</sup>.而且SOFC电堆为一个多约束的控制系统, 考虑到预测控制的滚动优化能够使得控制器在目标

其中:

函数中方便地考虑各种约束条件,实现约束预测控制. 而在自适应控制技术中,广义预测控制(GPC)改善了 控制器和模型失配的鲁棒性,采用了长时段的优化性 能指标,结合辨识和自校正机制,具有较强的鲁棒性 和对模型要求低等特点,其控制效果好,非常适合于 SOFC系统<sup>[12]</sup>.因此重点考虑采用预测控制算法对 SOFC电堆进行控制.

如图3所示,分别采用PID与预测控制器对电堆进 行控制,其基本控制参数如下:1)GPC控制器:控制 权重 $\lambda = 7$ ,柔化因子 $\alpha = 0.1$ ,预测步长N = 4,控制 步长M = 4,采样周期 $T_s = 0.01$  s,燃料供应延迟 $t_d$ = 5 s; 2)PID控制器比例增益 $K_p = -1.04e - 4$ ,积 分增益 $K_I = -7.05e - 5$ ,微分增益 $K_D = -9.53e - 5$ ,燃料供应延迟 $t_d = 5$  s.







图3(a)可以发现,预测控制器相比PID控制器反应 更加迅速;图3(b)显示虽然SOFC能够快速进行负载 跟踪,但是其在功率上升阶段,尤其在预测控制器快 速控制作用下,出现燃料亏空.如图1所示,通过前面 的分析可知,电堆单元存在两个重要的温度安全约束, 即电堆固体层最大温度(对2T模型而言,也可以看做 PEN层)及其温度梯度,即保证温度热安全的条件是

923 K 
$$\leq Max. T_{PEN}^{j} \leq 1173$$
 K,  
Max. $|\Delta T_{PEN}^{j}| \leq 8$  K  $\cdot$  cm<sup>-1</sup>.

图3(c)和图3(d)分别显示电堆最大温度与温度梯度超 过热安全约束1173 K和8 K·cm<sup>-1</sup>,存在热安全隐患. 这表明,在控制器设计时,需带入操作安全性问题综 合进行考虑.本文因此设计基于安全操作的电堆预测 控制器.

#### 5 基于安全操作的SOFC控制器设计

#### 5.1 控制目标分析

本文重点考虑燃料亏空与热安全问题的安全操作 问题,采用带约束的控制算法对电堆进行控制.基于 以上分析,本文分别针对不同的控制目的,设计了两 种输入约束预测控制器: 1) 面向SOFC电堆的快速负 载跟踪与燃料亏空控制器.用于研究不同约束条件 下SOFC电堆的输出工况,包括电堆输出功率,燃料亏 空情况,使得SOFC在不产生燃料亏空的前提下进行 快速负载跟踪; 2) 面向SOFC电堆的温度安全的控制 器.用于分析温度响应特性情况,使得SOFC电堆在快 速负载跟踪的同时能够安全运行. 其控制器相关参数 如下: 1) 快速负载跟踪与燃料亏空控制: 控制权重 $\lambda$ = 1.5,柔化因子 $\alpha = 0.1$ ,预测步长N = 5,控制步长 M = 3,采样周期 $T_s = 0.5$  s,最大调节速率Max. $R_{L_s}$ [0.5, 1, 1.5, 2] A/s, 燃料供应延迟t<sub>d</sub> = 5 s; 2) 温度安 全控制权重 $\lambda = 1$ ,柔化因子 $\alpha = 0.4$ ,预测步长N =15, 控制步长M = 8, 采样周期 $T_s = 0.5$  s, 最大调节

速率 $Max.R_{I_s}[0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4]$  A/s, 燃料供应延迟  $t_d = 5$  s.

本文所设计的面向SOFC电堆的快速负载跟踪与燃料亏空控制器必须满足如下几个性能指标:

1) 进行快速功率跟踪;

2)保证控制过程中的工作电流约束,防止电流密度过载: 10 A ≤ *I*<sub>s</sub> ≤ 80 A;

3) 操纵变量的变化量电流调节速率*R<sub>I</sub>*。约束: 根据具体切换工况设定.

在性能指标1中, Max. $T_{sol}^{j}$ 等同于最大固体层温 度, Max. $|\Delta T_{sol}^{j}|$ 等同于最大固体层温度梯度.由上述 多个性能指标可见, 设定操纵变量u(k)为电堆输出电 流, 分别针对不同的被控变量y(k), 对电堆单元的快 速负载跟踪, 温度控制以及燃料亏空问题展开了分析 探讨.

# 5.2 面向SOFC电堆的快速负载跟踪与燃料亏空 控制器设计

在不同的控制增量条件下,即电流的最大调节速 率绝对值Max.*R<sub>I<sub>s</sub></sub>分别为0.5 A/s*,1 A/s,1.5 A/s以及 2 A/s时,以电流为控制量,电堆输出功率为被控变量, 设计其跟踪功率*P*d从2500 W→4500 W→3500 W →5000 W.基于带约束的预测控制器,观测电堆在不 同电流速率下的动态响应情况,如图4所示.从图4(a) 中可以看出,电堆的快速功率跟踪与电流调节速率呈 现对等关系,其电流调节速率越大,功率响应越快,完 全符合现实.但是相应地,功率响应时间级为几十秒 级,并且功率响应时间随着功率调节路径的增大而逐 渐增大.图4(b)显示了调节参数电流的变化轨迹,其 范围在设定约束值80 A以内,其电流调节速率与设定 值约束能够很好地避免电流密度过载现象.





Fig. 4 Dynamic response of the stack under different current rise rate

在以上条件下,设定燃料供应延迟 $t_d = 5 \text{ s}$ ,观察 系统的燃料亏空特性,如图5所示.从图5(a)可以看出, 通过增加控制器输入约束,电流的调节速率被很好地 控制在设定范围以内.图5(b)在不同电流调节速率下 的电堆输出氢气百分比的动态响应特性,可以看到随 着电流调节速率的增大,其电堆内氢气反应越剧烈, 剩余燃料百分比越小,在Max. $R_{I_s} = 2 \text{ A/s}$ ,SOFC 电堆电堆输出氢气百分比为0,其燃料完全反应,SO- FC来不及进行气体供应,从而产生燃料亏空.其他条件下燃料在电堆负载跟踪过程中充裕,因此可以推断,本小节所设计的功率切换示例中不产生燃料亏空的基本条件为Max.R<sub>L</sub> < 2 A/s.

### 5.3 面向SOFC电堆的温度安全的控制器设计

本小节以电流为控制量,分别以上述两个输出温度为被控变量,设计SOFC电堆单元的带约束的预测控制器,观测不同电堆的温度响应情况.



图 5 燃料亏空分析









从图中更可以看出,在同等的控制器参数下,电堆 的输出最大PEN温度在调节过程中会产生超调.影响 超调量主要有两个因素:一是温度切换路径的长短, 二是电流切换速率.通过局部观测可以发现,随着电 流调节速率与温度切换路径的增大,其超调量增大. 特别地,在500 s进行切换时,由于切换路经过大,电流 切换速率在0.3 A/s与0.4 A/s时电堆最大PEN温度超

过约束范围1173 K. 而在1500 s进行切换时,由于切换 路径相对较小,在本小节所示的电流切换速率条件下, 均能保证温度安全.同时,值得指出的是,由于受到电 流切换速率约束的影响,其切换时间明显延长,为几 十秒级.其中电流切换速率越大,温度响应时间越长. 由此可见,与燃料亏空相似,系统的温度安全操作本 质上是在对"切换时间妥协"的基础上完成的.







最大PEN温度梯度的响应曲线如图7所示,与电堆的输出最大PEN温度梯度的闭环动态响应相似,最大PEN温度梯度在调节过程中同样受温度切换路径的长短与电流切换速率的影响,且呈现正比例关系.特别地,在1500 s进行切换时,由于切换路径过大,电流切换速率在0.2 A/s,0.3 A/s,与0.4 A/s时电堆最大PEN温度均超过约束范围8 K·cm<sup>-1</sup>.而在500 s切换时由于切换路径较短,其温度梯度相对安全.综上所述可以推断,本小节所设计的功率切换示例中使得系统达到热安全指标的基本条件为Max.*R<sub>Is</sub>* < 0.1 As<sup>-1</sup>.

## 6 总结

在文中,为了分析系统操作参数对SOFC系统的核 心部件--电堆的控制作用,在电堆单元,首先进行了2T 模型降阶并进行了局部线性化并进行了验证.在外围, 考虑到电流调节速率是影响系统安全性能的重要因 素,加入了输入约束,设计了两种输入约束预测控制 器:1)面向SOFC电堆的快速负载跟踪与燃料亏空控 制器;2)面向SOFC电堆的温度安全的控制器.重点分 析了不同切换速率工况下的温度,功率以及燃料亏空 特性.使得系统在快速进行负载功率跟踪的同时工作 在安全范围以内.

结果发现随着电流调节速率的增大,SOFC的热电 特性参数响应时间延长,并存在燃料亏空以及温度或 者温度梯度超标情况,安全风险性增大.通过控制器分 析发现,在本示例的kW级功率间切换时,系统不产生 燃料亏空的电流调节速率小于2 A/s,SOFC达到热安 全指标的电流调节速率为0.1 A/s.这表明热安全指标 相对避免燃料亏空指标而言,对电流调节速率的要求 更加苛刻,在控制器设计时必须综合进行考虑.本文 通过分析发现系统安全操作与快速跟踪是两个相反 的控制过程,即SOFC的安全操作必须以"延缓跟踪 时间"为代价.

#### 参考文献:

- SUI S, XIU G H. Fuels and Fuel Processing in SOFC Applications– High–Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century. 2nd Edition. Salt Lake City, USA: American Academic Press, 2016: 461 – 495..
- [2] ANONYMOUS. *BP Energy Outlook 2019*. 2019 ed. Hawaii, USA: Technology Systems Corporation, 2019: 26 – 27.
- [3] SHAYAN E, ZARE V, MIRZAEE I, et al. On the use of different gasification agents in a biomass fueled SOFC by integrated gasifier: A comparative exergo-economic evaluation and optimization. *Ener*gy, 2019, 171(1): 1126 – 1138.
- [4] ROSSI I, TRAVERSO A, TUCKER D, et al. SOFC/Gas turbine hybrid system: A simplified framework for dynamic simulation. *Applied Energy*, 2019, 238(1): 1543 – 1550.
- [5] HU Peng, CAO Guangyi, ZHU Xinjian, et al. Thermal modeling and fuzzy control of proton exchange membrane fuel cell. *Control Theory* & *Applications*, 2011, 28(10): 1371 – 1376.

(胡鹏,曹广益,朱新坚,等.质子交换膜燃料电池温度模型与模糊控制.控制理论与应用,2011,28(10):1371-1376.)

- [6] XI H D. Dynamic modeling and control of planar SOFC power system. Ann Arbor: University of Michigan, 2007.
- [7] JIANG Jianhua. Dynamic modeling and control of planar solid oxide fuel cell systems. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (蒋建华. 平板式固体氧化物燃料电池系统的动态建模与控制. 武汉:

(特建平. 干板式固体氧化初燃料电池系统的动态建模与控制. 武汉: 华中科技大学, 2013.)

- [8] XI H, VARIGONDA S, JING B, et al. Dynamic modeling of a solid oxide fuel cell system for control design. *American Control Conference Marriott Waterfront*. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2010: 423 – 428.
- [9] SPIVEY B J, HEDENGREN J D, EDGAR T F, et al. Constrained control and optimization of tubular solid oxide fuel cells for extending cell lifetime. *American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth 2012*. Montréal, Canada: IEEE, 2012: 1356 – 1361.
- [10] DOTSCHEL T, RAUH A, SENKEL L, et al. Experimental validation of interval-based sliding mode control for solid oxide fuel cell systems. *European Control Conference 2013*. Zürich, Switzerland: IEEE, 2013: 2489 – 2495.
- [11] JIANG J H, LI X, DENG Z H, et al. Modeling and model-based analysis of a solid oxide fuel cell thermal-electrical management system with an air bypass valve. *Electrochimica Acta*, 2015, 177(1): 250 – 263.
- [12] DARKO V, MARKO N, DAMIR V, et al. Feedforward-feedback control of a solid oxide fuel cell power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(12): 6352 – 6363.
- [13] WU Xiaolong, XU Yuanwu, HU Rong, et al. Fault modeling and simulation comparative study of two solid oxide fuel cell system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 408 419.
  (吴肖龙, 许元武, 胡荣, 等. 两种固体氧化物燃料电池系统的故障建模与仿真对比研究. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 408 419.)
- [14] ZHANG L. Optimization and control strategy of SOFC from the perspective of high efficiency. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
  (张琳. 面向高效率负载跟踪的SOFC系统优化与控制研究. 武汉: 华中科技大学, 2015.)
- [15] ZHANG L, LI X, JIANG J H, 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. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(1): 456 – 476.
- [16] ZHANG L, JIANG J H, CHENG H, et al. Control strategy for power management, efficiency-optimization and operating-safety of a 5 kW solid oxide fuel cell system. *Electrochimica Acta*, 2015, 177(2): 237 – 249.
- [17] ZHANG L, SHI S Y, LI X, et al. An optimization and fast loadoriented control for current-based solid oxide fuel cell system. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2018, 22(18): 2863 – 2877.
- [18] ZHANG L, SHI S Y, LI X, et al. Current-based MPC for operatingsafety analysis of a reduced-order solid oxide fuel cell system. *ION-ICS*, 2019, 25(13): 1759 – 1772.
- [19] CHINDA P. The performance improvement of a thick electrode solid oxide fuel cell. *Energy Procedia*, 2013, 37(11): 243 – 261.
- [20] MUELLER F. The dynamics and control of integrated solid oxide fuel cell systems: Transient load-following and fuel disturbance rejection. Irvine: University of California, 2008.
- [21] PARK S H, LEE Y D, AHN K Y, et al. Performance analysis of an SOFC/HCCI engine hybrid system: System simulation and thermoeconomic comparison. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(4): 1799 – 1810.

- [22] WU X L, XU Y W, XUE T, et al. Health state prediction and analysis of SOFC system based on the data-driven entire stage experiment. *Applied Energy*, 2019, 248(4): 126 – 140.
- [23] ADHIKARI P, ABDELRAHMAN M. Modeling, control, and integration of a portable solid oxide fuel cell system. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2012, 9(1): 11010 – 11014.
- [24] DARKO V, MARKO N. Feedforward-feedback control of a solid oxide fuel cell power system. *International Journal of Hydrogen Ener*gy, 2018, 43(12): 6352 – 6363.

附录

表 A1 主要符号表 Table A1 Table of main symbols

符号	意义
J	节点总数为5
$Max.T_{sol}$	最大固体层温度
$Max.T_{sol}$	最大固体层温度梯度
U	电压
p	压力
$\dot{N}$	摩尔流速
T	温度
P	功率
cond	热传导
conv	热对流
sol	固体层
fuel	燃料
air	空气
set	设定值
$H_2$	氢气
in	入
out	出
an	阳极
ca	阴极

#### 作者简介:

**张 琳** 博士,目前研究方向为建模仿真与优化控制、预测控制、故障诊断等,E-mail: 759758922@qq.com;

**汪** 枫 硕士,目前研究方向为建模仿真与信号处理、自适应动态规划等,E-mail: linercool@163.com;

**谢** 超 博士,目前研究方向为控制理论与分析、建模仿真与信 号处理等, E-mail: superxpapa@126.com;

**唐文辉**硕士,目前研究方向为伺服系统与优化控制,E-mail: 1335466738@qq.com;

**方群乐**硕士研究生,目前研究方向为复杂系统建模仿真,E-mail: 54968986@qq.com;

**谢洪途** 博士,目前研究方向为智能化控制,E-mail: xht20041623 @163.com.