

固体氧化物燃料电池系统的鲁棒反馈模型预测控制

刘欣, 郝晓弘, 杨新华, 安爱民

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要 固体氧化物燃料电池系统工作过程中燃料与氧化剂的压力差和燃料利用率的变化值是衡量系统运行安全、稳定长效、具有较好鲁棒性的重要指标. 本文提出采用离线计算、在线优化相结合的带有输出反馈的鲁棒模型预测控制方法, 分别将燃料与氧化剂的压力差和燃料利用率作为输入和输出约束, 离线计算目标函数上界及其系列渐近稳定域, 在线时对控制量进行精确定位. 仿真结果表明, 采用了状态反馈的模型预测控制方法能有效克服模型失配问题并迅速获得被控量的预测值, 使系统当负载电流发生波动时能克服变化引起的参数偏差, 提高了响应速度, 增强了系统鲁棒性.

关键词 板式固体氧化物燃料电池; 热能传递; 预测控制; 鲁棒性

Robust feedback model predictive control of the solid oxide fuel cell's system

LIU Xin, HAO Xiao-hong, YANG Xin-hua, AN Ai-min

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract In the operating process of the solid oxide fuel cell system, the pressure difference between fuel and air and the fuel utility are the important indexes, which evaluate the system's safety, long-term stability and better robustness. It is proposed in this paper that an output feedback robust model predictive control method is applied which is obtained the offline calculation and online optimal. The pressure difference between fuel and air and the fuel utility are used as input and output constraints, respectively. When offline, calculating upper bounds of the objective function and its series asymptotic stable domain, and online, making accurate position of control parameters. The simulation results show that using the state feedback model predictive control method can effectively overcome the model mismatch problem of the system and parameter deviation caused by the loaded current disturbance, improve the response speed, and enhance system robustness.

Keywords planar solid oxide fuel cell; thermal energy transfer; predictive control; robustness

0 引言

固体氧化物燃料电池 (solid oxide fuel cell, SOFC) 是将含有碳氢化合物的燃料气体与氧化剂气体通过电化学反应产生的化学能直接转化成电能的有效装置, 单独用于分布式发电可达到 55% 左右的效率, 若与燃气轮机 (gas turbine, GT) 实现热电联产后效率可达 70%~80%, 尾气排放的主要成分为水 (气态), 清洁、高效、环保的特点使其具有广泛的应用研究前景^[1-3]. SOFC 反应机理的数学描述形式由于包含了若干中间量的热物理性质和流体动力学计算环节而变得相当复杂, 控制系统的设计需要综合考虑输入输出约束、工艺过程中间量间的耦合和运转安全性的要求等等, 要推广 SOFC 技术并使其在能源市场具有一定的竞争性和占有率仍存在诸多问题^[3-5].

模型预测控制 (model predictive control, MPC) 以及滚动时域控制 (receding horizon control, RHC) 已广泛应用于化工、能源等领域, 例如文献 [6] 和 [7] 中将 MPC 用于经典的化工过程——连续搅拌反应釜

收稿日期: 2013-07-05

资助项目: 国家自然科学基金 (61064003, 51165024); 甘肃省高等学校基本科研业务基金 (1102ZTC143)

作者简介: 刘欣 (1981-), 女, 汉, 甘肃兰州人, 博士, 研究方向: 复杂系统建模与控制优化; 通信作者: 郝晓弘 (1962-), 男, 汉, 甘肃泾川人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 复杂系统建模与控制、网络控制等, E-mail: meteor7136@163.com.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

(CSTR)、PH 值中和过程控制, 文献 [8] 和 [9] 中将 MPC 应用于炼油工艺的蒸馏过程控制, 应用案例表明, 针对含有温度、液位控制环节的这一类大时滞、非线性复杂工艺过程, MPC 相比传统控制方法获得了较好的控制效果. 目前的研究进展表明, 滚动优化的理论虽然提升了控制性能, 但 MPC 控制算法的设计工作量也成倍递增, 针对 MPC 的研究需要进一步深入且不再是单一发展方向, 需要结合智能控制、自适应控制、多模型控制、非线性控制、鲁棒控制等控制思想的特点, 使 MPC 进一步增强处理复杂对象、完成复杂任务和应变复杂环境的能力, 拓展 MPC 的应用领域^[10-11].

SOFC 系统建模过程中由于系统工艺的复杂性往往需要附加一些理想假设条件, 忽略一些包含强非线性的电化学反应过程描述, 这就使得用于 MPC 的精确建模难以实现; 另一方面, 输出电压的稳定性还与负载电流、环境温度这些外部扰动量的变化息息相关, 这些因素都会使得采用传统 MPC 的 SOFC 系统控制效果变差^[5,12]. 本文的研究工作旨在针对带有输入和输出约束、时滞环节的 SOFC 系统采用反馈鲁棒模型预测控制策略, 以不变集理论为基础和 LMI (linear matrix inequation) 为工具的结合了最优控制思想的鲁棒模型预测控制方法, 可以采用显式的形式来描述 SOFC 机理模型中的部分不确定性, 并根据输入量压力差值和输出对象动态电压的约束采用最小化目标函数最大值 (Min-max) 的方法来进行控制, 提高控制的动态效果和稳定性. 针对 MPC 在线计算量大、负担重的问题, 受到文献 [13] 的启发, 本文将算法部分分为离线和在线两种方式实现, 离线状态时建立一系列相互嵌套的渐近稳定不变集, 为每一不变集对应不同的控制参数, 当在线时再搜索最近的集, 并采用插值法计算在线控制参数, 在保证鲁棒性的基础上提高系统响应速度.

1 问题的提出与数学描述

中、高温 SOFC 系统的工作环境温度一般在 $800\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 左右, 其间电解质的离子导电率才能保持在一个较高的水平^[4,12], 工作环境温度高、中间变量多, 且主要控制目标需要包括燃料利用率、燃料与氧化剂压力差两个实质为针对输入量的约束条件, 此外, 还需将负载的变化以负载电流波动的形式表述, 作为系统的外部扰动处理. 本节主要针对上述问题, 给出 SOFC 系统的数学描述形式并加以改进.

1.1 板式 SOFC 工作原理

SOFC 是一个把燃料 (富氢气体) 和氧化剂 (空气) 的化学能直接转化为电能的电化学装置, 常见的平板式对流型 SOFC 结构如图 1 所示, 主要由两个电极、两个气体通道、电解质层构成, 具有一定压力的燃料气体和氧化剂气体通过通道源源不断地加载在电解质的两侧, 微观系统工作原理如图 2 所示, 在电解质层两侧发生的化学反应为:

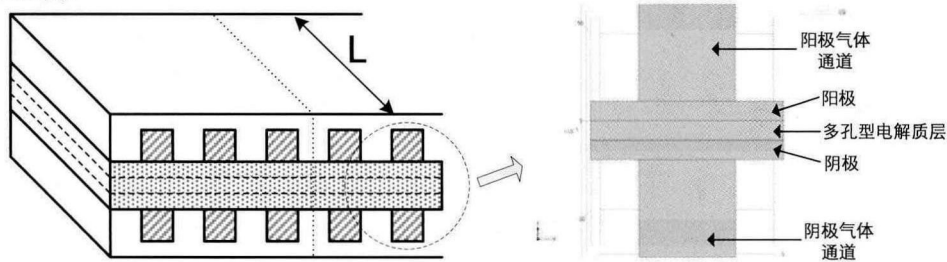


图 1 平板式对流型 SOFC 结构示意图

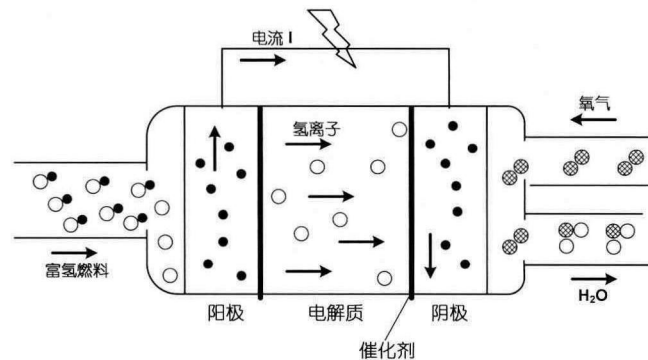


图 2 SOFC 工作原理微观示意图



整体 SOFC 系统结构则相对复杂, 需要包括气体预处理、升温、换热、尾气处理等诸多环节, 如图 3 所示。

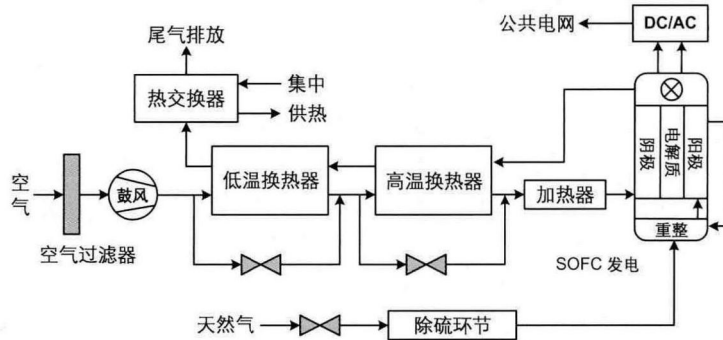


图 3 SOFC 系统工作原理示意图

为了简化前期气体预处理环节, 本研究中为 SOFC 本体结构拟定了以下几个假设条件 [16]:

- 1) SOFC 本体结构如图 1 所示, 由两个通道、两个多孔气体扩散电极和夹在中间的电解质层 (YSZ, 即氧化钇稳定氧化锆) 构成, 集总结构为阳极支撑;
- 2) 两极气体通道中的气体流动方向为对流形式, 且 TPB (triple-phase-boundary) 反应界面扩散现象、能量转化和热传递为均匀态;
- 3) 阳极通道中燃料为含有 12% 左右水分的纯氢, 所以暂不考虑燃料气体的重整装置, 阴极通道中的氧化剂空气成分为氧和氮, 同样含有少量水分。

1.2 数学描述

SOFC 系统中至关重要、也是最复杂的环节之一是热的动态行为 [4], 分析燃料电池内热量的来源, 主要包括入口处对燃料及氧化气体进行预热, 电化学反应过程生成热, 电极、电解质层、连接件部分阻性发热。结合之前数值模拟的工作, 描述突出与系统运转的工艺参数 (时间、温度等)、电池性能 (电压、电流、效率等) 联系密切的与热性能有主要关联的动态行为, 弱化随时间、扰动变化不明显或者微量级的部分, 可得出主要针对 TPB 界面的热扩散现象描述, 如下式 (3)~(5), 以及 TPB 界面的压力分布描述, 如下式 (6)~(8):

$$f''_{\text{H}_2\text{-cell}} = -\alpha_1 f_{\text{H}_2\text{-cell}} - \alpha_2 f'_{\text{H}_2\text{-cell}} + \alpha_1 \frac{i}{2F} + \alpha_3 \zeta'_{\text{H}_2\text{-s}} \quad (3)$$

$$f''_{\text{O}_2\text{-cell}} = -\beta_1 f_{\text{O}_2\text{-cell}} - \beta_2 f'_{\text{O}_2\text{-cell}} + \beta_1 \frac{i}{4F} + \beta_3 \zeta'_{\text{O}_2\text{-s}} \quad (4)$$

$$f''_{\text{H}_2\text{O-cell}} = -\gamma_1 f_{\text{H}_2\text{O-cell}} - \gamma_2 f'_{\text{H}_2\text{O-cell}} + \gamma_1 \frac{i}{2F} + \gamma_3 \zeta'_{\text{H}_2\text{O-s}} \quad (5)$$

$$P''_{\text{H}_2\text{-TPB}} = -\alpha_1 P_{\text{H}_2\text{-TPB}} - \alpha_2 P'_{\text{H}_2\text{-TPB}} - \alpha_4 \frac{RT_{\text{cell}}}{2F} i - \frac{4}{L_{\text{an}}} \frac{RT_{\text{cell}}}{2F} i' + \alpha_1 P_{\text{H}_2\text{-s}} \quad (6)$$

$$P''_{\text{O}_2\text{-TPB}} = -\beta_1 P_{\text{O}_2\text{-TPB}} - \beta_2 P'_{\text{O}_2\text{-TPB}} - \beta_4 \frac{RT_{\text{cell}}}{4F} i - \frac{4}{L_{\text{ca}}} \frac{RT_{\text{cell}}}{4F} i' + \beta_1 P_{\text{O}_2\text{-s}} \quad (7)$$

$$P''_{\text{H}_2\text{O-TPB}} = -\gamma_1 P_{\text{H}_2\text{O-TPB}} - \gamma_2 P'_{\text{H}_2\text{O-TPB}} + \gamma_4 \frac{RT_{\text{cell}}}{2F} i + \frac{4}{L_{\text{an}}} \frac{RT_{\text{cell}}}{2F} i' + \gamma_1 P_{\text{H}_2\text{O-s}} \quad (8)$$

电化学反应的进程是引起 SOFC 系统工作温度变化的决定因素之一, 热的传递、扩散则决定了温度的分布情况, 温度是系统状态稳定、响应速度的重要考量指标, 根据热力学第一定律以及能量平衡理论可以导出:

$$\frac{d\rho_{\text{cell}} C_{\text{p-cell}} T_{\text{cell}}}{dt} = \sum f_{i\text{-cell}} H_i - V_{\text{out}} i - Q_{\text{con}} - Q_{\text{rad}} - Q_{\text{ref}} \quad (9)$$

其中

$$Q_{\text{con}} = H_{\text{an}}(T_{\text{cell}} - T_{\text{fuel}}) + H_{\text{ca}}(T_{\text{cell}} - T_{\text{air}})$$

$$Q_{\text{rad}} = \frac{\sigma}{R_{\text{rad}}}(T_{\text{cell}}^4 - T_{\text{lay}}^4)$$

$$Q_{\text{ref}} = R_{\text{ref}} \Delta H_{\text{ref}}$$

则温度转述为:

$$\frac{dT_{cell}}{dt} = \frac{1}{\rho_{cell}C_{p,cell}} \frac{2r_3}{r_3^2 - r_2^2} \left[f_{H_2-cell}H_{H_2} + \frac{r_2}{r_3}f_{O_2-cell}H_{O_2} + f_{H_2O-cell}H_{H_2O} - (V_{ct} - \rho_{R_0}L_{R_0}i) \right] - A \quad (10)$$

$$A = H_{an}(T_{cell} - T_{fuel}) + \frac{r_2}{r_3}H_{ca}(T_{cell} - T_{air}) + \frac{r_2}{r_3} \frac{\sigma}{R_{rad}}(T_{cell}^4 - T_{lay}^4) + R_{ref}\Delta H_{ref}$$

$$\frac{dT_{lay}}{dt} = \frac{1}{\rho_{lay}C_{p,lay}} \frac{2r_1}{r_1^2 - r_0^2} \left[-H_{ca}(T_{lay} - T_{air}) - \frac{r_0}{r_1}H_{inj}(T_{lay} - T_{inj}) + \frac{r_2}{r_1} \frac{\sigma}{R_{rad}}(T_{cell}^4 - T_{lay}^4) \right] \quad (11)$$

稳态电压输出可以描述为:

$$E_N = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2}^a P_{O_2}^c}{P_{H_2O}} - \eta \quad (12)$$

其中 η 为三种极化损耗带来的 EMF 变化量, 它可以转述为 TPB 界面的电流密度、交换电流密度、压力的函数, 式 (3)~(8) 中模型的参数可参考文献 [14]. 则非线性状态空间模型为:

$$u = [I \quad P_{fuel, in} \quad T_{fuel, in} \quad P_{air, in} \quad T_{air, in}]^T \quad (13)$$

$$y = [V_{out} \quad T_{fuel, out} \quad T_{air, out} \quad \chi_{H_2, out} \quad \chi_{O_2, out}]^T \quad (14)$$

$$x = [f_{H_2-cell} \quad f'_{H_2-cell} \quad f_{O_2-cell} \quad f'_{O_2-cell} \quad f_{H_2O-cell} \quad f'_{H_2O-cell} \quad P_{H_2-TPB} \quad P'_{H_2-TPB} \quad P_{O_2-TPB} \quad P'_{O_2-TPB} \quad P_{H_2O-TPB} \quad P'_{H_2O-TPB} \quad T_{cell} \quad T_{lay} \quad T_{fuel} \quad T_{air} \quad \chi_{H_2} \quad \chi_{O_2} \quad \chi_{H_2O}] \quad (15)$$

其中主要符号示意如表 1 所示.

表 1 参变量及其说明

参数名称	参数意义	参数名称	参数意义	参数名称	参数意义
F	法拉第常数	Q_{rad}	辐射热	T_{lay}	极间温度
R	通用气体常数	Q_{ref}	标准参考热	R_{rad}	热辐射系数
L_{an}	阳极极板长度	ρ_i	物质 i 的密度	$T_{air, in/out}$	入/出口空气温度
L_{ca}	阴极极板长度	C_p	常压比热容	$T_{fuel, in/out}$	入/出口燃料温度
T_{cell}	极板温度	E_0	标准潜在电势	$P_{air, in/out}$	入/出口空气压力
Q_{con}	对流热	V_{out}	输出电压	$P_{fuel, in/out}$	入/出口燃料压力

2 鲁棒模型预测控制

2.1 非线性模型预测控制

非线性模型预测控制 (nonlinear model predictive control, NMPC) 的目标在于满足价值函数最小值的前提下得到下一步的输入量值, 这个价值函数可以是描述预测模型输出 $\bar{y}(k+j|k)$ 与参考值 $\omega(k+j|k)$ 间的误差, 如式 (16) 表述^[13], 这里 N_u 为控制域, γ_j 为预测域参考误差权值, λ_i 为控制域控制增量, 考虑操作量、控制量的约束如式 (17) 所示,

$$\min_{\Delta u} J = \min_{\Delta u} \sum_{j=N_1}^{N_2} \gamma_j [\bar{y}(k+j|k) - \omega(k+j|k)]^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \lambda_i \Delta u(k+i|k)^2 \quad (16)$$

$$y_{min} \leq \bar{y}(k+j|k) \leq y_{max}, \quad j = N_1, \dots, N_2$$

$$u_{min} \leq u(k+i|k) \leq u_{max}, \quad i = 0, \dots, N_u-1 \quad (17)$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k+j|k) \leq u_{max}$$

若系统可描述为如下形式:

$$\bar{Y} = A + B\Delta u \quad (18)$$

将式 (16) 也改写为如下向量形式, 即:

$$J = (A + B\Delta u - W)^T P (A + B\Delta u - W) + \Delta u^T Q \Delta u \quad (19)$$

其中 P 、 Q 分别为对应加权系数 γ_j 和 λ_i 的非空对角矩阵, 为了采用二次规划方法解决非线性模型的优化问题, 将上式转述为:

$$J = \Delta u^T [B^T P B + Q] \Delta u + [B^T P (A - W)]^T \Delta u \quad (20)$$

$$J = \frac{1}{2} \Delta u^T \Phi \Delta u + \Theta^T \Delta u \quad (21)$$

对于一类标称模型来说, 反馈控制律通常为常数, 可以独立于系统状态, 但当模型存在不确定性时, 即使没有输入或输出控制的约束条件, 反馈控制律也会与系统的状态密切相关. 在这种情况下, 采用 RHC 在每个采样时刻重新计算状态控制律就要比采用静态状态反馈控制律在性能指标上有明显的提高. 对于 SOFC 系统, 对操作变量的输入约束主要体现在燃料与氧化剂的压力差和流量比, 这两个约束不一定作用于全局, 只需考虑作用在第一个输入序列, 可提高控制的可操作性.

2.2 预测误差与扰动处理

预测误差和扰动是 MPC 用于实际系统时不可避免的问题, 本文采用广义预测控制 (generalized predictive control, GPC) 算法的思路, 设计如图 4 所示结构, 其中低通滤波环节主要用于抑制系统预测误差和噪声, 将滤波后的误差结果送入积分环节, 以 k_i 为积分增益, 其中一个采样时间内的误差表示为:

$$e(k) = y(k) - \bar{y}(k|k-1) \quad (22)$$

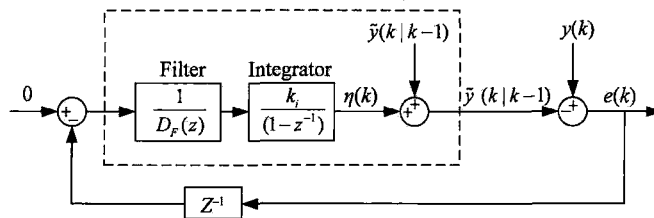


图 4 系统抑制扰动与预测误差方法框图

则有

$$y(k) - \bar{y}(k|k-1) = e(k) \left[1 + z^{-1} \frac{k_i}{1-z^{-1}} \frac{1}{D_F(z)} \right] \quad (23)$$

其中 $\bar{y}(k|k-1)$ 为未经校正的预测输出量, 考虑到模型与实际系统间存在差异, 且这种差异可以用如下传递函数的形式描述:

$$H(z) = \frac{D_F(z)(1-z^{-1})}{D_F(z)(1-z^{-1}) + z^{-1}k_i} \quad (24)$$

这里 $H(z)$ 取决于图 4 中滤波、积分环节的值, 若一阶滤波可定义为 $F(z) = \frac{1}{1-f_d z^{-1}}$ 形式, 则上式可改写为:

$$H(z) = \frac{z^2 - (1+f_d)z + f_d}{z^2 - (1+f_d-k_i)z + f_d} \quad (25)$$

采用了上述方法将 MPC 的预测误差、系统不确定扰动进行了有效的抑制, 且通过式 (25) 的方式改善了系统模型失配问题.

2.3 RMPC 的离线计算与在线优化

RMPC 因为在线优化而导致计算量庞大, 无法适用于实际系统, 本文参考文献 [13] 中提出的方法, 结合本文系统的实际情况, 采用基于不变集理论的思想来降低在线优化计算量, 对状态可测的情况采用离线优化算法, 即离线时选定一系列的估计状态和估计误差集合, 然后针对每一估计状态和每一估计误差集合的组合计算唯一的控制器参数和对应的吸引域, 当在线时, 首先计算实时的估计状态和选取实时估计误差集合, 然后搜索包含了当前状态的最近的渐近稳定不变集, 最后通过线性插值的方式获取在线控制器参数.

3 仿真与结果分析

接下来, 将通过在 Matlab 软件中结合 SIMULINK 和 LMI 工具箱进行建模与控制算法的仿真, 来验证所提出的算法的有效性.

3.1 SOFC 模型的建立与测试

首先对非线性状态空间方程描述的 SOFC 系统在 SIMULINK 中进行建模, 并进行阶跃响应测试, 分别将 SOFC 反应过程中的负载电流 $I(d_1)$ 、温度 $T_{cell}(d_2)$ 作为扰动信号, 可以得到如图 5、6 的结果. 图 5、图 6 分别给出的是 SOFC 当负载电流 I 和 T_{cell} 在 100s 发生阶跃值为 100A 的变化时, 对输出电压 V_{out} 产生的影响, 从两图中可以看出, 在外部条件基本一致的前提下, 首先两种响应测试的结果与文献 [12]、[15] 中理论推导、实验论证的结论相符, 与文献 [14] 中给出的试验测试结果也是比较一致的, 也就是说所搭建的模型

能够真实反映出 SOFC 系统的稳态工况; 另一方面, 由这两种扰动 d_1 、 d_2 所产生的影响为响应时间长、幅度较大的变化过程, 这也说明了需要对 SOFC 系统的控制方法研究提出更高的要求。

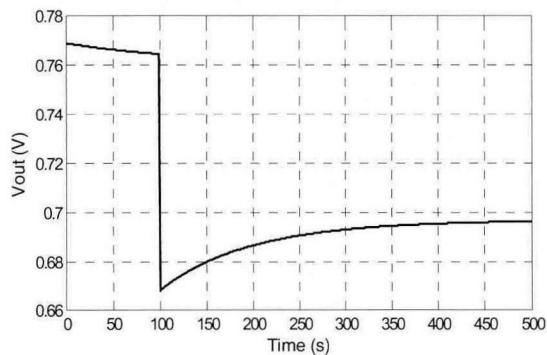


图 5 由负载电流扰动引起的输出电压变化

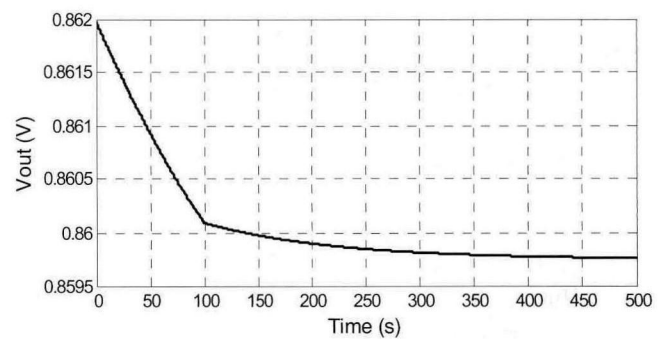


图 6 由温度变化扰动引起的输出电压变化

3.2 RMPC 方法仿真

接下来, 在 3.1 节中所验证的模型基础上, 采用第 2 节中提出的方法, 通过 Matlab 语言编程和 LMI 工具箱进行控制方法的验证. 其中, 燃料初始量为 0.70 atm, 氧化剂初始量为 0.61 atm, 燃料与氧化剂流量比 $R_{H_2-O_2}$ 为 1.147, 且 $R_{H_2-O_2} \in (0, 2)$, 燃料利用率的范围为 $U_f \in [0.8, 0.9]$. 再将压力差作为约束目标之一, 电解质层两侧的压力差绝对值的应力比则需要控制在 8 以内. 通过控制两极气体入口压力及预热温度, 达到响应负载电流变化的要求. SOFC 系统通过两级预热系统后, 初始工作温度设定值为 825 K. 将负载电流值 I 设定在 150 s、300 s 分别发生两次幅值为 100 A 的阶跃变化, 观察系统的输出控制效果. 为了突出本文提出的 RMPC 方法的有效性, 将其结果与常规 MPC 方法进行了对比, 得出如图 7 所示结果. 图 7 中, “- - -” 线为 V_{out} 期望值输出, “*-*-*” 线为常规 MPC 控制输出效果, “+ + +” 线则表示本文提出的 RMPC 方法. 从图 7 可以看出, 在平稳阶段两种 MPC 方法对期望值的跟踪效果基本保持在同一水平, RMPC 相比 MPC 要更稳定一些. 当出现扰动需要建立新的平衡点时, RMPC 显示出了较好的计算性能, 达到新的平衡点只需要常规 MPC 时间的一半.

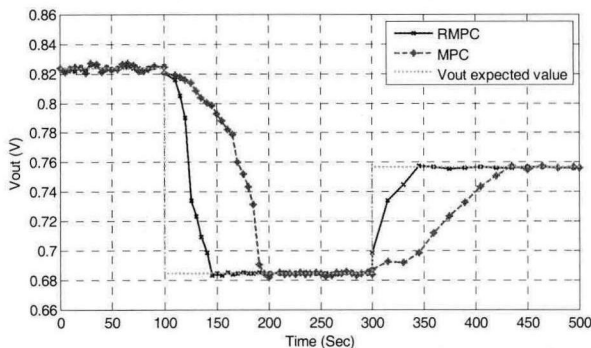


图 7 控制方法效果比较

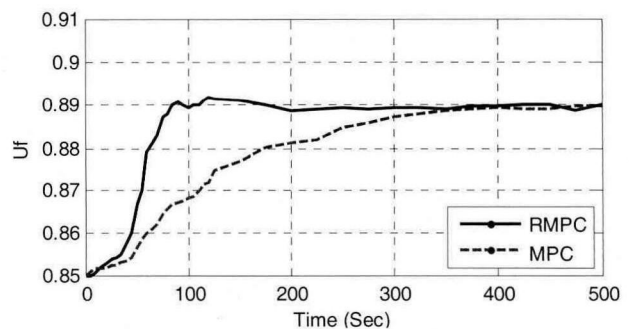


图 8 工作点发生迁移后燃料利用率变化情况

最后, 在初始状态零时刻通过加入负载电流和工作温度点的双重扰动, 使系统改变工作点, 新的工作温度达到 850 K, 理论推导可知, 燃料利用率将增长 0.4. 观测燃料利用率随反应进行的变化, 图 8 中 “—” 为 RMPC 方法, “- - -” 为 MPC 方法, 两者相比, 前者能够使系统在 95s 左右的时间就初次达到 0.89 的燃料利用率稳定值, 然后在接下来的时间里渐近稳定, 比后者 360s 左右的稳定时间缩短了近 3/4. 仿真的主要验证采用了在线离线相结合的算法, 能够有效地提高 MPC 的控制效率。

4 结束语

SOFC 系统的实际工业过程由于结构、材料性质存在着若干不确定性, 基于机理模型设计的最优控制律当应用于实际过程时可能导致系统性能变差, 甚至不稳定, 导致模型和实际被控对象之间的失配问题. 预测控制鲁棒性研究目的之一正是要通过反馈校正策略减少对模型的依赖性, 并在一定程度上改善系统性能. 另一方面, SOFC 系统包含诸多非线性动态过程, 尤其表现在热能辐射、极化损耗等方面, 而 NMPC 需要求解复杂的非凸非线性规划问题, 即使在变量较少的情况下在线计算也相当庞杂, 采用离线计算控制量可行域,

在线时再搜索包含实时扩展状态且优化性能指标最小的吸引域所对应的控制器参数, 可以有效地提高控制效率.

参考文献

- [1] Surdoval W. Clean economic energy in a carbon challenged world[C]// 10th Annual Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) Workshop, 2009.
- [2] 包成, 蔡宁生. 固体氧化物燃料电池—燃气轮机混合发电系统建模与控制的研究现状与进展 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 1-7.
Bao Cheng, Cai Ningsheng. Research status and advances in modeling and control of solid oxide fuel cell gas turbine hybrid generation system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 1-7.
- [3] Huang B, Qi Y T, Murshed M. Solid oxide fuel cell: Perspective of dynamic modeling and control[J]. Journal of Process Control, 2011, 21(10): 1426-1437.
- [4] 辛显双, 朱庆山. 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 电池稳定性分析 [J]. 化学进展, 2009, 21(1): 227-234.
Xin Xianshuang, Zhu Qingshan. Analyses of solid oxide fuel cells (SOFCs) stability[J]. Progress in Chemistry, 2009, 21(1): 227-234.
- [5] Liu X, Hao X H, Yang X H. Multi-objective optimization methods of plate solid oxide fuel cell's temperature system[J]. Advanced Materials Research, 2013(694-697): 728-733.
- [6] 丁香乾, 杨晓黎. 非线性 CSTR 过程预测控制器设计 [J]. 控制工程, 2009, 16(2): 145-147.
Ding Xiangqian, Yang Xiaoli. Model predictive controller design for nonlinear CSTR process[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(2): 145-147.
- [7] 邹志云, 郭宇晴, 王志甄, 等. 非线性 Hammerstein 模型预测控制策略及其在 pH 中和过程中的应用 [J]. 化工学报, 2012, 63(12): 3965-3970.
Zou Zhiyun, Guo Yuqing, Wang Zhizhen, et al. Nonlinear Hammerstein model predictive control strategy and its application to pH neutralization process[J]. CIESC Journal, 2012, 63(12): 3965-3970.
- [8] Minh V T, Muhamad W M W. Model predictive control of a condensate distillation column[J]. International Journal of Systems Control, 2010, 1(1): 4-12.
- [9] Porfrio C R, Odloak D. Optimizing model predictive control of an industrial distillation column[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(10): 1137-1146.
- [10] Mayne D Q, Rawlings J B. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000(36): 789-814.
- [11] 席裕庚, 李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状 [J]. 自动化学报, 2008, 34(10): 1225-1234.
Xi Yugeng, Li Dewei. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis of model predictive control[J]. ACTA Automatica Sinica, 2008, 34(10): 1225-1234.
- [12] Bhattacharyya D, Rengaswamy R. A review of solid oxide fuel cell dynamic models[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2009, 48(13): 6068-6086.
- [13] 平续斌, 丁宝苍. 动态输出反馈鲁棒模型预测控制离线算法 [J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 790-798.
Ping Xubin, Ding Baocang. An on-line approach to dynamic output feedback robust model predictive Control[J]. ACTA Automatica Sinica, 2013, 39(6): 790-798.
- [14] Fuel cell handbook[M]. 7th ed. US Department of Energy, 2004.
- [15] Singhai S C, Kendall K. High temperature SOFC fundamentals, design and applications[M]. Elsevier, 2003.
- [16] 刘欣, 郝晓弘, 安爱民, 等. 板式固体氧化物燃料电池的数值模拟与动态性能分析 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 1869-1875.
Liu Xin, Hao Xiaohong, An Ai-min, et al. Numerical simulation and dynamic analysis of planar solid oxide fuel cell[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1869-1875.