

基于卡尔曼滤波算法的固体氧化物燃料电池的状态预估研究

林厚飞¹, 顾吉鹏², 施亦治¹, 冯昌森²

(1. 国网浙江省电力有限公司平阳县供电公司, 浙江 温州 325000; 2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种多输入多输出、强耦合和强非线性的新型发电装置,对其内部状态变量的预估将有助于了解实际SOFC的运行过程和实现高效控制器的设计。本文采用卡尔曼滤波算法对SOFC的状态进行预估。通过对SOFC发电原理的深入分析,建立其离散时间的状态空间模型;采用卡尔曼滤波算法对SOFC的各气体进气侧压力值进行预估,并将预估值带入输出电压方程,对SOFC下一时刻的电压进行预估。MATLAB/Simulink仿真结果表明,氢气、氧气和水蒸气压力的估计值与真实值的误差分别为 0.425×10^5 , 0.141×10^5 和 0.364×10^5 Pa,远小于各气体压力测量值与真实值的误差 1.479×10^5 , 1.165×10^5 和 1.155×10^5 Pa,同时SOFC输出电压的估计值较为符合真实值的变化,验证了卡尔曼滤波算法在SOFC状态预估中的有效性和实时性。

关键词: 固体氧化物燃料电池;卡尔曼滤波;状态预估;进气侧压力

中图分类号:TK91 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.07.019

[引用本文格式]林厚飞,顾吉鹏,施亦治,等.基于卡尔曼滤波算法的固体氧化物燃料电池的状态预估研究[J].热能动力工程,2022,37(7):146-154. LIN Hou-fei, GU Ji-peng, SHI Yi-zhi, et al. Research on state estimation of solid oxide fuel cell based on Kalman filter algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 146-154.

Research on State Estimation of Solid Oxide Fuel Cell based on Kalman Filter Algorithm

LIN Hou-fei¹, GU Ji-peng², SHI Yi-zhi¹, FENG Chang-sen²

(1. Pingyang Power Supply Company of State Grid Zhejiang Power Co., Ltd., Wenzhou, China, Post Code: 325000;
2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310000)

Abstract: Solid oxide fuel cell (SOFC) is a new type of power generation device with multiple input and output, strong coupling and nonlinear. The estimation of internal state variables of SOFC will help to understand the operation process of practical SOFC and design the efficient controllers. In this paper, the state of SOFC is estimated by using Kalman filter algorithm. The discrete time state space model of SOFC is established through deep analysis of its power generation principle. The Kalman filter algorithm is used to estimate the pressure value of each gas inlet side of SOFC, and the estimated value is substituted into the output voltage equation to estimate the voltage of SOFC at the next moment. MATLAB/Simulink simulation results show that the errors between the estimated values and the real values of hydrogen, oxygen and water vapor pressures are 0.425×10^5 , 0.141×10^5 and 0.364×10^5 Pa respectively, which are far less than the errors between the measured values and the real values of each gas pressure of 1.479×10^5 , 1.165×10^5 and 1.155×10^5 Pa. At the same time, the estimated value of SOFC output voltage is more

收稿日期:2021-07-03; 修订日期:2021-08-29

基金项目:国家自然科学基金(5177070985)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(5177070985)

作者简介:林厚飞(1969-),男,浙江温州人,国网浙江省电力有限公司平阳县供电公司高级工程师。

通讯作者:顾吉鹏(1994-),男,甘肃武威人,浙江工业大学博士。

consistent with the change of the real value, which verifies the validity and real-time performance of Kalman filter algorithm in SOFC state estimation.

Key words: solid oxide fuel cell, Kalman filter, state estimation, inlet pressure

引 言

作为第四代燃料电池的固体氧化物燃料电池 (solid oxide fuel cell, SOFC), 除具有一般燃料电池的优点外, 还具有安静无污染、燃料来源广泛及全固态无腐蚀等一系列优点。此外, SOFC 更适合于区域性供电和联合循环发电, 具有较好的分布式能源特性^[1-4]。但是, SOFC 的内部结构较为复杂, 且涉及化学反应过程的连续变化, 加之易受到外界不确定性环境因素的影响, 使其输出性能难以达到指定要求。

学术界对 SOFC 的建模与状态预估进行了初步研究。文献[5]针对平面堆叠 SOFC 和氧化转化器的组合系统, 引入了新的动力学模型和电力分布模型, 为后续的混合控制方案提供了依据。文献[6]在计及 SOFC 内部多种耦合因素的影响下, 利用质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律, 建立了 SOFC 的多种耦合模型。文献[7]考虑了 SOFC 的重整反应与电化学反应之间的耦合作用, 提出了直接内重整的 SOFC 数学模型。文献[8]在考虑浓差极化、活化极化和欧姆极化的电压损失的基础上, 结合理想气体状态方程和质量守恒定律, 并通过引入可调参数建立了 SOFC 的机理模型。文献[9]使用粒子群 PID 对 SOFC 的氢气进气进行最优控制, 以保证 SOFC 输出电压达到最大且维持稳定。文献[10]以固体氧化物燃料电池和燃气轮机的联合系统为研究对象, 提出在状态约束下的模型预测控制器用于系统输出电特性的控制。文献[11]针对千瓦级 SOFC, 提出一种具有多回路前馈和反馈控制相结合的鲁棒 PID 控制器用于控制系统整体的稳定性能。文献[12]通过对 SOFC 的机理模型的仿真得到了电池的输入输出数据, 之后采用自回归滑动平均模型对其进行辨识, 最后对辨识模型设计了对应的广义预测控制算法, 结果表明在存在外部扰动的情况下

控制系统具有较好的跟踪性能。此外, 还有部分关于 SOFC 并网的研究都采用上述文献提及的数学模型, 并基于此类模型开展并入交直流微电网方面的研究^[13-16]。上述研究多是从 SOFC 建模与控制等角度展开研究, 对于考虑不确定性的 SOFC 状态预估研究较少。对 SOFC 内部状态变量进行预估, 将对 SOFC 实际运行过程中内部状态的变化有更加清晰的认知, 从而制定出能更符合 SOFC 特性和提高 SOFC 能源利用率的高效控制策略, 并对交直流微电网的并入提供更有利的约束条件, 以符合微电网的运行要求。

基于上述背景, 本文采用卡尔曼滤波算法对 SOFC 进行状态预估。首先, 在对 SOFC 运行机理进行有效分析的基础上, 建立了 SOFC 的离散状态空间模型。然后, 采用卡尔曼滤波算法对 SOFC 的输出电压进行估计。最后, 基于 MATLAB/Simulink 仿真验证所提模型和方法的有效性。

1 SOFC 的原理分析和模型建立

1.1 SOFC 物理结构及发电原理

SOFC 由热交换器、电池堆和燃烧室 3 部分组成。氧气、氢气经热交换器预热后送入电池堆的阴、阳两极, 之后气体在电池堆内部发生电化学反应生成电能, 而未能完全反应的气体和生成的气体(废气)会送入燃烧室内进一步反应, 将产生的热能用于热交换器的预热。SOFC 的物理结构及发电原理示意图如图 1 所示。

1.2 SOFC 状态空间模型的建立

1.2.1 SOFC 进气侧各气体压力的状态方程

文献[17-22]中, 在建立 SOFC 模型时, 均假设其温度维持不变。温度是影响 SOFC 内部各气体活性程度的关键因素, 因此 SOFC 内部各气体被认为是均匀分布的。本文在 SOFC 建模过程中继续沿用这一假设。文献[13]指出这一假设在数秒以内的动态过程分析中是合理的, 而在长达数十秒以上的

动态过程分析中需考虑温度变化造成的影响。所以在 SOFC 建模时可使用理想气体定律进行分析。

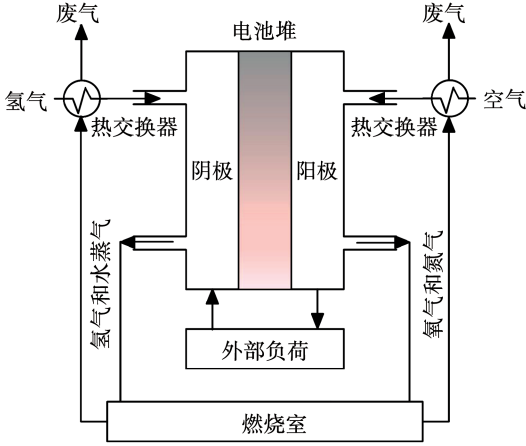


图 1 SOFC 物理结构及发电原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SOFC physical structure and power generation principle

理想气体定律是一种经验定律,在标准情况下大多数实际气体的物理行为接近理性气体,可用理性气体状态方程进行描述。理想气体状态方程是热力学领域中描述气体宏观行为的一种表达式,表示为:

$$pV = nRT \quad (1)$$

式中: p —理想气体的压力, 1.01325×10^5 Pa; V —理想气体所占的体积, m^3 ; n —理想气体的物质的量, mol; R —通用气体常数; T —理想气体的热力学温度, K。

存在于 SOFC 内部的参与电化学反应的各种气体均可视为理想气体,上式两端对时间进行求导得:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

文献[1]中将理想气体所占的体积表示为:

$$V = \tau KRT \quad (3)$$

式中: τ —气体量的动态响应时间常数; K —气体的摩尔阈值常量。

将式(3)带入式(2)得:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{\tau K} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (4)$$

气体的物质的量的变化可以应用质量守恒定律求得:

$$\frac{dn}{dt} = n^{in} - n^{out} - n^r \quad (5)$$

式中: n^{in} —气体的输入摩尔流量, mol; n^{out} —气体的输出摩尔流量, mol; n^r —参与反应的气体的摩尔流量, mol。

将式(5)带入式(4)得:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{\tau K} (n^{in} - n^{out} - n^r) \quad (6)$$

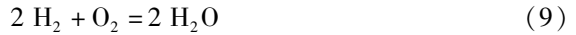
文献[8]中给出了气体输出摩尔流量的计算式。

$$n^{out} = Kp \quad (7)$$

将式(7)带入式(6),得:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{\tau} p + \frac{1}{\tau K} (n^{in} - n^r) \quad (8)$$

在 SOFC 发电时,输入的燃料气体为高纯度的氢气,与其发生反应的仅是输入的空气氧气,SOFC 发生的总化学反应方程式为:



根据化学物料平衡原理及文献[8]可得各气体参与电化学反应所消耗的物质摩尔流量。

$$n_{H_2}^r = n_{H_2O}^r = 2 K_r I \quad (10)$$

$$n_{O_2}^r = K_r I \quad (11)$$

式中: $n_{H_2}^r$, $n_{H_2O}^r$, $n_{O_2}^r$ —参与化学反应消耗的氢气、生成的水蒸气、消耗的氧气的物质的量, mol; $K_r = N/4F$ —建模而设置的常量; N —电池堆中串联的单个电池的个数; F —法拉第常数; I —SOFC 内部流经的电流值。

将式(10),式(11)依次代入式(8),并对参与总化学反应的组分气体进行分析,可得:

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = -\frac{1}{\tau_{H_2}} p_{H_2} + \frac{1}{\tau_{H_2} K_{H_2}} (n_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} p_{O_2} = -\frac{1}{\tau_{O_2}} p_{O_2} + \frac{1}{\tau_{O_2} K_{O_2}} (n_{O_2}^{in} - K_r I) \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} p_{H_2O} = -\frac{1}{\tau_{H_2O}} p_{H_2O} + \frac{1}{\tau_{H_2O} K_{H_2O}} (2 K_r I) \quad (14)$$

选取 p_{H_2} 、 p_{O_2} 和 p_{H_2O} 为状态变量, $n_{H_2}^{in}$ 、 $n_{O_2}^{in}$ 为系统的控制变量, I 为干扰,即令 $x_1 = p_{H_2}$, $x_2 = p_{O_2}$, $x_3 = p_{H_2O}$, $u_1 = n_{H_2}^{in}$, $u_2 = n_{O_2}^{in}$, $w = I$, $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$, $u = [u_1 \ u_2]^T$, 则上式可简化为:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dw \quad (15)$$

式中: A —状态转移矩阵; B —控制系数矩阵; D —噪声驱动矩阵, 矩阵 A 、 B 、 D 依次为:

$$A = \begin{bmatrix} -1/\tau_{H_2} & 0 & 0 \\ 0 & -1/\tau_{O_2} & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau_{H_2O} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/\tau_{H_2} K_{H_2} & 0 \\ 0 & 1/\tau_{O_2} K_{O_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$D = \begin{bmatrix} (-2K_r)/(\tau_{H_2} K_{H_2}) \\ (-K_r)/(\tau_{O_2} K_{O_2}) \\ (2K_r)/(\tau_{H_2O} K_{H_2O}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

1.2.2 SOFC 电池堆电压的输出方程

当在不考虑 SOFC 外部输入因素的影响时, 即忽略系统的控制信号的作用, SOFC 的连续时间状态方程进一步简化。

$$\dot{x} = Ax + Dw \quad (19)$$

式(14)可视为 SOFC 状态空间模型中的状态方程。

SOFC 电池堆可近似看作是由很多相同的 SOFC 单电池以串联形式连接构成的, 加之其输出电压是研究和实用过程中最受关注的变量, 所以将 SOFC 电池堆的电特性方程(即输出电压)作为状态空间模型中的输出方程。

SOFC 电池堆的电特性方程由文献[23]可得:

$$U = N U_{\text{cell}} = N(E - U_{\text{act}} - U_{\text{con}} - U_{\text{ohmic}}) \quad (20)$$

式中: N —串联的 SOFC 单电池的数目; U_{cell} —SOFC 单细胞的输出电压, V; E —能斯特电动势; U_{act} —活化极化电压, V; U_{con} —浓差极化电压, V; U_{ohmic} —欧姆极化电压, V。

E , U_{con} , U_{act} , U_{ohmic} 表示为:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (21)$$

$$U_{\text{con}} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{I}{I_L} \right) \quad (22)$$

$$U_{\text{act}} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{I}{2I_0} + \sqrt{1 + \left(\frac{I}{2I_0} \right)^2} \right) \quad (23)$$

$$U_{\text{ohmic}} = rI \quad (24)$$

式中: E^0 —理想标准电动势, V; I_0 —交换电流, A; I —极限电流, A; r —等效内阻, Ω 。

令 $y = U$, 则 SOFC 的输出电压方程表示为:

$$y = U = f(x, w) \quad (25)$$

式中: f —包含变量 x 和 w 的非线性函数。

至此, 已经建立了 SOFC 的连续时间状态空间模型, 式(19)和式(25)分别为 SOFC 的状态方程和输出方程。

2 卡尔曼滤波算法对 SOFC 的状态预估

卡尔曼滤波(Kalman filtering), 也称线性二次估计, 是利用线性系统状态方程和系统输入输出观测数据, 对系统状态进行最优估计的一种算法。因观测数据中必然包含噪声和干扰因素, 所以最优估计也被视为滤波过程^[24-25]。

卡尔曼滤波是一种递归的估计, 即只要知道上一时刻状态的估计值和当前状态的观测值, 就可以计算出当前状态的估计值, 因此不需要记录观测或估计的历史信息数据。本文选择此方法实现 SOFC 状态变量的预估。

2.1 SOFC 状态估计的卡尔曼滤波算法设计

为了从受噪声污染的观测数据中使用卡尔曼滤波算法估计出被观察过程的内部状态, 必须在卡尔曼滤波算法的框架下建立系统模型。Kalman 滤波模型假设 k 时刻的真实状态是从 $k-1$ 时刻的状态演化而来:

$$x_k = F x_{k-1} + M w_k \quad (26)$$

式中: k —离散时间; x_k —系统在 k 时刻的状态; F 是作用在 x_{k-1} 上的状态变换矩阵; M 是噪声驱动矩阵; w_k 是过程噪声, 并假定其符合均值为零, 协方差为 Q 的多元正态分布, 即 $w_k \sim N(0, Q)$ 。

时刻 k 的真实状态 x_k 的一个测量值 z_k 满足:

$$z_k = H x_k + v_k \quad (27)$$

式中: H —观测矩阵, 把真实状态空间映射成观测空间; v_k —观测噪声, 并假设其符合均值为零, 协方

差为 \mathbf{R} 的多元正态分布,即 $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R})$ 。

卡尔曼滤波包括预测与更新两个过程。在预测阶段,使用上一状态的估计值得到当前状态的估计值;在更新阶段,利用当前状态的观测值优化预测阶段得到的估计值,用于获得一个更精确的新估计值。

预测阶段计算过程为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{klk-1} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}_{k-1k-1} \quad (28)$$

$$\mathbf{P}_{klk-1} = \mathbf{F} \mathbf{P}_{k-1k-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{MQM}^T \quad (29)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{k-1k-1}$ 一上一时刻的状态估计, $\hat{\mathbf{x}}_{klk-1}$ 一当前时刻的状态估计值; \mathbf{P}_{k-1k-1} 一上一时刻的后验估计误差协方差矩阵,用于度量估计值的精确程度;

\mathbf{P}_{klk-1} 一当前时刻的后验估计误差协方差矩阵。

更新阶段计算过程为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{klk-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{klk-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{klk} = \hat{\mathbf{x}}_{klk-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{y}}_k \quad (31)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{klk-1} \quad (32)$$

$$\mathbf{P}_{klk} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}] \mathbf{P}_{klk-1} \quad (33)$$

式中: \mathbf{K}_k 一最优卡尔曼增益; $\hat{\mathbf{x}}_{klk}$ 一更新的状态估计值; $\tilde{\mathbf{y}}_k$ 一测量余量; \mathbf{P}_{klk} 一更新的协方差估计值。

在应用卡尔曼滤波时,还需满足初始状态 \mathbf{x}_0 与 \mathbf{w}_k 、 \mathbf{v}_k 不相关的前提条件,即存在:

$$E[\mathbf{x}_0] = \boldsymbol{\mu}_0 \quad (34)$$

$$E[(\mathbf{x}_0 - \boldsymbol{\mu}_0)(\mathbf{x}_0 - \boldsymbol{\mu}_0)^T] = \mathbf{P}_0 \quad (35)$$

式中: E 代表均值运算; $\boldsymbol{\mu}_0$ 一计算后得到的均值; \mathbf{P}_0 一计算后的到的方差。

至此,卡尔曼滤波的算法框架已经建立完毕,可以用于系统状态变量的预估,值得注意的是卡尔曼滤波针对离散系统模型。然而,在上一节中建立的 SOFC 模型是连续时间状态空间模型,还必须对其状态方程进行离散化处理和计算,才能符合卡尔曼滤波的基本要求。

2.2 SOFC 状态空间模型的离散化处理

式(19)经过离散化处理后可表示为:

$$\mathbf{x}[(k+1)T] = \mathbf{G}\mathbf{x}(kT) + \mathbf{H}\mathbf{w}(kT) \quad (36)$$

式中: \mathbf{G} 和 \mathbf{H} 可通过线性连续系统的离散化处理的计算公式得出:

$$\mathbf{G} = e^{\mathbf{A}T} \quad (37)$$

$$\mathbf{H} = \int_0^T e^{\mathbf{A}t} dt \cdot \mathbf{D} \quad (38)$$

除式(36)建立的 SOFC 的状态方程外,还需要设计相应的观测方程才可以应用卡尔曼滤波算法。本文主要关注参与 SOFC 电化学反应 3 种气体的压力值,由此建立 SOFC 的观测方程:

$$\mathbf{z}(kT) = \mathbf{C}\mathbf{x}(kT) + \mathbf{v}(kT) \quad (39)$$

式中: \mathbf{C} 一设计的观测矩阵, $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]^T$ 。

综上所述,用于卡尔曼滤波预测的 SOFC 的离散时间状态方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{H}_2}(k+1) \\ \mathbf{P}_{\text{O}_2}(k+1) \\ \mathbf{P}_{\text{H}_2\text{O}}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{T}{\tau_{\text{H}_2}}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T}{\tau_{\text{O}_2}}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T}{\tau_{\text{H}_2\text{O}}}} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{H}_2}(k) \\ \mathbf{P}_{\text{O}_2}(k) \\ \mathbf{P}_{\text{H}_2\text{O}}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2TK_r e^{-\frac{T}{\tau_{\text{H}_2}}}}{\tau_{\text{H}_2} K_{\text{H}_2}} \\ -\frac{TK_r e^{-\frac{T}{\tau_{\text{O}_2}}}}{\tau_{\text{O}_2} K_{\text{O}_2}} \\ \frac{2TK_r e^{-\frac{T}{\tau_{\text{H}_2\text{O}}}}}{\tau_{\text{H}_2\text{O}} K_{\text{H}_2\text{O}}} \end{bmatrix} \mathbf{w}(k) \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1(k) \\ \mathbf{z}_2(k) \\ \mathbf{z}_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{H}_2}(k) \\ \mathbf{P}_{\text{O}_2}(k) \\ \mathbf{P}_{\text{H}_2\text{O}}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{v}(k) \quad (41)$$

3 仿真实验分析

基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型以验证所提算法和模型的有效性。将式(28)~(35)表示的卡尔曼滤波算法应用于式(40)、(41)表示的 SOFC 离散时间状态方程和观测方程,得到 SOFC 中参与电化学反应的氢气、氧气、水蒸气压力的估计值,将各气体压力估计值与 Simulink 模型观测值做差可得相应的估计误差,将各气体压力估计值带入 SOFC 输出电压方程,则可对其输出电压进行估计。

3.1 SOFC 的各项指标参数

在搭建 SOFC 仿真实验模型时,采用各指标的具体参数值如表 1 所示。

表1 SOFC 模型具体参数

Tab.1 Parameters of SOFC model

参数	数值
绝对温度 T/K	1 273
法拉第常数 $F/C \cdot \text{mol}^{-1}$	96 486
理想标准电动势 E^0/V	1.18
通用气体常数 $R/kJ \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1}$	8.314
电堆串联单个电池的数目 N	450
氢气的摩尔阈值常量 $K_{\text{H}_2}/\text{mol} \cdot (\text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$	8.43×10^{-1}
氧气的摩尔阈值常量 $K_{\text{O}_2}/\text{mol} \cdot (\text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$	2.52
水蒸气的摩尔阈值常量 $K_{\text{H}_2\text{O}}/\text{mol} \cdot (\text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$	2.81×10^{-1}
常数, $K_r = N/4FK_r/\text{mol} \cdot (\text{s} \cdot \text{A})^{-1}$	0.417×10^{-3}
氢气的动态响应时间常数 $\tau_{\text{H}_2}/\text{s}$	26.1
氧气的动态响应时间常数 $\tau_{\text{O}_2}/\text{s}$	2.91
水蒸气动态响应时间常数 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}$	78.3
每个电池的等效电阻 r/Ω	3.281×10^{-4}
交换电流 I_0/A	12.112
极限电流 I_L/A	300

3.2 SOFC 的状态预估仿真实验

文献[26]、文献[27]在进行 SOFC 相关研究的仿真实验中均设定其阴阳两极进气侧的压力为 $1.013\ 25 \times 10^5$ Pa。这一数值被认为是 SOFC 的合理运行值,本文将 $1.013\ 25 \times 10^5$ Pa 作为阴阳两极气体(即氢气、氧气和水蒸气)压力的期望值,但真实的压力值不可能是这样的。

氢气、氧气和水蒸气压力的真实值,可能受到电化学反应程度、电解液浓度、外界环境等因素的影响而发生波动,这部分不确定因素以噪声形式在 SOFC 的状态方程中体现。

氢气、氧气和水蒸气压力的测量值,通常被认为是通过实验仪器测量所得到的值。然而在卡尔曼滤波算法中,这一过程被视为是由过程噪声伴随的测量过程,由建立的 SOFC 的测量方程进行模拟。

氢气、氧气和水蒸气压力的估计值是经过卡尔曼滤波算法得到的值,是基于当前时刻计算得到的下一时刻的一组数据序列(通过递推算法获得,因此仅需知道初值即可)。

为了更好地体现卡尔曼滤波算法的有效性,在作图过程中将重点关注变量(即氢气、氧气和水蒸

气的压力)的期望值、真实值、测量值和经卡尔曼滤波的估计值绘制在一幅图中,以便于观察分析。

MATLAB/Simulink 仿真实验结果如图 2 ~ 图 9 所示,图 2 ~ 图 7 为 SOFC 电池堆氢气、氧气和水蒸气的压力估计值及其估计误差,图 8 和图 9 为 SOFC 电池堆输出电压的估计值及其估计误差。

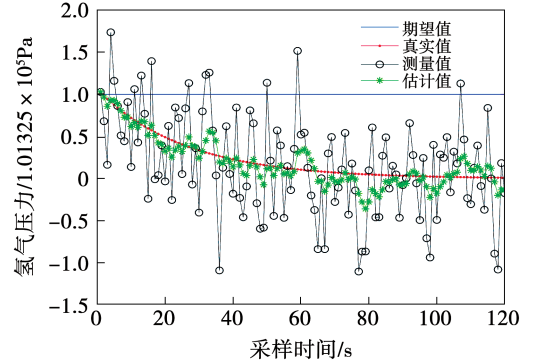


图2 氢气压力估计

Fig.2 Hydrogen pressure estimation

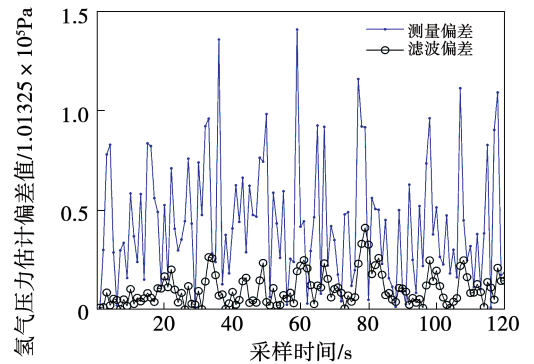


图3 氢气压力误差分析

Fig.3 Hydrogen pressure error analysis

分析图 2、图 3 可得, Kalman 氢气压力估计值较氢气压力测量值更加接近氢气压力真实值;氢气压力测量偏差最大为 1.479×10^5 Pa,最小为 0.121×10^5 Pa,而 Kalman 滤波偏差最大为 0.425×10^5 Pa,最小为 0 Pa,说明 Kalman 滤波能有效降低 SOFC 氢气压力测量过程中存在的过程噪声。

分析图 4、图 5 可得, Kalman 氧气压力估计值较氧气压力测量值,更加接近氧气压力真实值;氧气压力测量偏差最大为 1.165×10^5 Pa,最小为 0.081×10^5 Pa,而 Kalman 滤波偏差最大为 0.108×10^5 Pa,

最小为 0 Pa,说明 Kalman 滤波能有效降低 SOFC 氧气压力测量过程中存在的过程噪声。

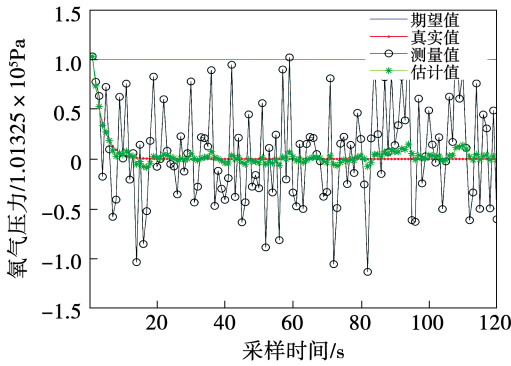


图 4 氧气压力估计

Fig.4 Oxygen pressure estimation

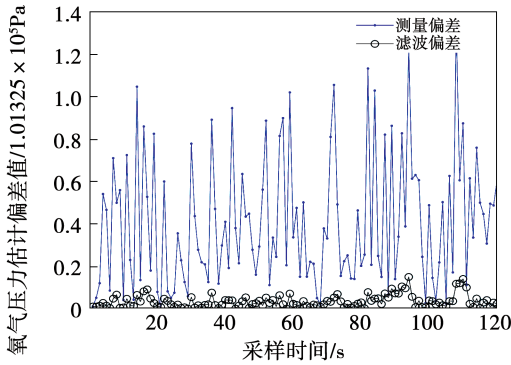


图 5 氧气压力误差分析

Fig.5 Oxygen pressure error analysis

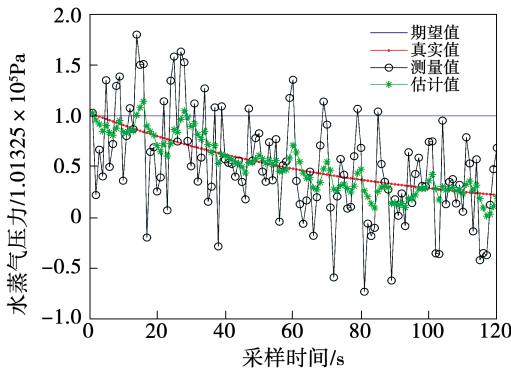


图 6 水蒸气压力估计值

Fig.6 Vapor pressure estimation

分析图 6、图 7 可得,Kalman 水蒸气压力估计值较水蒸气压力测量值更加接近水蒸气压力真实值;水蒸气压力测量偏差最大为 1.155×10^5 Pa,最小为 0.223×10^5 Pa,而 Kalman 滤波偏差最大为 $0.364 \times$

10^5 Pa,最小为 0 Pa,说明 Kalman 滤波能有效降低 SOFC 水蒸气压力测量过程中存在的过程噪声。

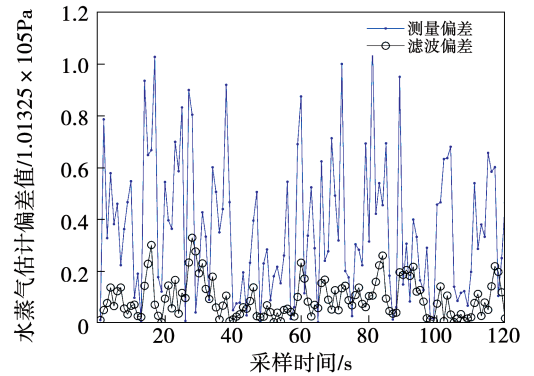


图 7 水蒸气压力误差分析

Fig.7 Vapor pressure error analysis

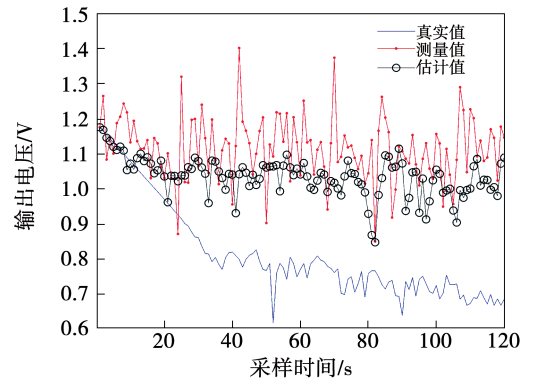


图 8 输出电压估计值

Fig.8 Output voltage estimation

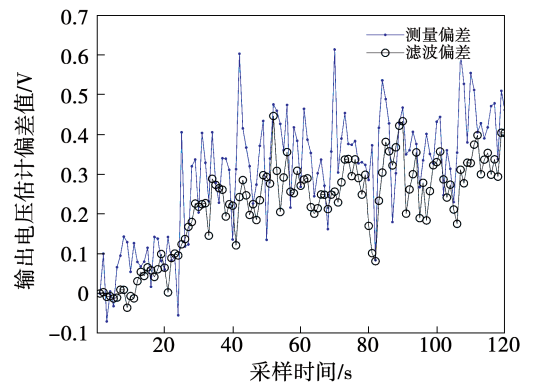


图 9 输出电压误差分析

Fig.9 Output voltage error analysis

分析图 8、图 9 可得,Kalman 输出电压估计值较输出电压测量值更接近输出电压真实值,然而仍存在一定的偏差,说明 Kalman 滤波虽能降低 SOFC 输

出电压测量过程中的过程噪声,但是却不能完全消除。究其原因,主要是由于氢气、氧气、水蒸气各自的卡尔曼滤波误差的累计所致。

4 结 论

SOFC 的状态预估研究有利于深入了解其实际运行过程中内部状态的变化和控制策略的设计。本文依据 SOFC 发电原理,结合理想气体状态方程和质量守恒定律,建立其状态空间模型,并在卡尔曼滤波算法框架下设计 SOFC 内部氢气、氧气、水蒸气压力值和输出电压预估的具体流程,通过实验仿真得到以下结论:卡尔曼滤波算法能有效降低 SOFC 状态变量测量过程中存在的噪声;卡尔曼滤波算法在有效考虑不确定因素的前提下,较高精度地预测 SOFC 中氢气、氧气、水蒸气压力值以及输出电压值。此外,基于卡尔曼滤波算法的 SOFC 状态预估可作为其预测控制的基础,并将在后续研究工作中体现。

参考文献:

[1] 谭勋琼,吴政球,周野,等. 固体氧化物燃料电池的集总建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2010,30(17):104-110.
TAN Xun-qiong, WU Zheng-qiu, ZHOU Ye, et al. Solid oxide fuel cell lumped modeling and simulation[J]. Proceedings of Electric Machine Engineering, 2010, 30(17):104-110.

[2] 宋春宁,钟文瀚,等. 基于启发式动态规划的固体氧化物燃料电池优化控制研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(7):1830-1833.
SONG Chun-ning, ZHONG Wen-han, et al. Study on optimization control of solid oxide fuel cell via heuristic dynamic programming [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(7):1830-1833.

[3] 杨骥,佃松宜,蒲明,等. 固体氧化物燃料电池性能滑模控制研究[J]. 计算机仿真,2016,33(3):99-104.
YANG Ji, DIAN Song-yi, PU Ming, et al. Study on performance of sliding mode control of solid oxide fuel cells[J]. Computer simulation, 2016, 33(3):99-104.

[4] 严晓红,薛滔,李泽华,等. 住宅用固体氧化物燃料电池热电连供系统的设计与仿真[J]. 可再生能源,2018,36(1):151-158.
YAN Xiao-hong, XUE Tao, LI Ze-hua, et al. Design and analysis of residential solid oxide fuel cell combined heat and power supply

system [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(1):151-158.

[5] SLIPPEY A J. Dynamic modeling and analysis of multiple SOFC system configurations[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology Kate Gleason College of Engineering, 2017.

[6] 张彦彬,石裕维. 固态氧化物燃料电池中的电流密度分布敏感性分析[J]. 机电工程技术,2017,46(12):59-63.
ZHANG Yan-bin, SHI Yu-wei. SOFC fuel cell current distribution sensitivity analysis[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(12):59-63.

[7] 朱润凯,梁前超. 直接内重整型固体氧化物燃料电池建模与仿真[J]. 船电技术,2018,38(3):12-17.
ZHU Run-kai, LIANG Qian-chao. Modeling and simulation of direct internal reformation solid oxide fuel cell[J]. Marine Electric Technology, 2018, 38(3):12-17.

[8] GU Ji-peng, WANG Cai-xia. Modeling and simulation of the electrical characteristic of solid oxide fuel cells[C]//Journal of Physics: Conference Series. 2019, Guiyang, 1314:1-6.

[9] GU Ji-peng, WANG Cai-xia. Particle swarm PID control of solid oxide fuel cell[C]//2019 the 2nd International Conference on Robotics, Lanzhou, Control and Automation Engineering.

[10] OH S P, SUN Jing. Model predictive control for power and thermal management of an integrated solid oxide fuel cell and turbocharger system [J]. IEEE Transaction on Control, 2014, 22(3):911-920.

[11] CAO Hong-liang, LI Xi. Thermal management-oriented multivariable robust control of a kW-scale solid oxide fuel cell stand-alone system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2):596-605.

[12] 李肖,李俊红,沈文兵. 固体氧化物燃料电池建模及广义预测控制[J]. 电池,2018,48(6):381-384.
LI Xiao, LI Jun-hong, SHEN Wen-bing. Modeling and generalized predictive control of solid oxide fuel cell[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(6):381-384.

[13] 李勇汇,冉兵,朱海昱. 固体氧化物燃料电池分布式电源最大效率并网运行方式分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32:108-114.
LI Yong-hui, RAN Bing, ZHU Hai-yu. Analysis of the maximum efficiency operating scheme for an solid oxide fuel cell distributed generator in a grid-connected system[J]. Proceedings of Electric Machine Engineering, 2012, 32:108-114.

[14] 李勇汇,王冰,朱海昱. 固体氧化物燃料电池电厂并网最优效率负载跟踪分层递阶控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1061-1071.
LI Yong-hui, WANG Bing, ZHU Hai-yu. Maximum efficiency

- load-tracking hierarchical control scheme for grid-connected solid oxide fuel cell power plants[J]. Proceedings of Electric Machine Engineering, 2014, 34(7): 1061 - 1071.
- [15] 郑文迪, 蔡金锭. 微电网中 SOFC 发电系统控制策略研究[J]. 电力系统自动化设备, 2012, 32(5): 24 - 28.
ZHEN Wen-di, CAI Jin-ding. Control strategy of SOFC generation system in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 24 - 28.
- [16] 周念成, 李春艳, 王强钢. 固体氧化物燃料电池发电系统建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 120 - 126.
ZHOU Nian-cheng, LI Chun-yan, WANG Qiang-gang. Modeling and control strategy of solid oxide fuel cell generation system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 120 - 126.
- [17] 刘超刚, 丁宝苍. 动态矩阵控制在固体氧化物燃料电池中的应用[J]. 火力与控制系统, 2010, 35(8): 1 - 4.
LIU Chao-gang, DING Bao-cang. Application of dynamic matrix control to solid oxide fuel cell[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(8): 1 - 4.
- [18] 刘欣, 赫晓弘, 杨新华. 内部重整固体氧化物燃料电池发电系统的非线性预测控制[J]. 化学进展, 2014, 33(4): 900 - 906.
LIU Xin, HE Xiao-hong, YANG Xin-hua. Nonlinear model predictive control of the direct internal reforming solid oxide fuel cell system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(4): 900 - 906.
- [19] WANG Qian-ru, WANG Cai-xia. Modeling and simulation of solid oxide fuel cell based on neural network[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1871(1): 1 - 7.
- [20] 佃松宜, 吴璋, 蒲明. 固体氧化物燃料电池气体供应系统的自适应滑模控制[J]. 四川大学学报, 2014, 46(5): 149 - 154.
DIAN Song-yi, WU Zhang, PU Ming. Adaptive sliding mode control for gas feeding system of solid oxide fuel cells[J]. Journal of Sichuan University, 2014, 46(5): 149 - 154.
- [21] MA Rui, LI Zhong-liang, BREAZ E, et al. Numerical stiffness analysis for solid oxide fuel cell real-time simulation applications[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1917 - 1927.
- [22] LAN T, KAI S. Multiphysics transients modeling of solid oxide fuel cells; methodology of circuit equivalents and use in EMTP-type power system simulation[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1309 - 1321.
- [23] 顾吉鹏. 固体氧化物燃料电池的智能控制算法研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2020.
GU Ji-peng. Research on intelligent control algorithm of solid oxide fuel cell[D]. Lanzhou: Northwest Minzu University, 2020.
- [24] 吴春芳. 动力电池 SOC 估算综述[J]. 电源技术, 2017, 41(12): 1795 - 1798.
WU Chun-fang. Review of state of charge estimation for power battery[J]. Power Source Technology, 2017, 41(12): 1795 - 1798.
- [25] 孙东, 许爽, 李超. 锂离子电池荷电状态估计方法综述[J]. 电池, 2018, 48(4): 284 - 287.
SUN Dong, XU Shuang, LI Chao. Review of state of charge estimation method for Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(4): 284 - 287.
- [26] HUANG Biao, QI Yu-tong, MURSHED A K M M. Dynamic modelling and predictive control in solid oxide fuel cell; first principle and data-based approaches[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [27] 丁明, 严流进, 杨为. 分布式发电中燃料电池的建模与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 8 - 13.
DING Ming, YAN Liu-jin, YANG Wei. Modeling and control of fuel cells in distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 8 - 13.

(金圣迪 编辑)