DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.149 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

基于分数阶模型和 FOMICKF-FOUKF 算法的锂电池 SOC 估计

宋杨皖豪(中国电源学会学生会员)，李 昕
(安徽理工大学电气与信息工程学院，淮南 232001)

摘要：针对离线参数辨识方法仅能辨识单一固定的参数而导致荷电状态 SOC(state of charge)估计不够准确，以及传统卡尔曼滤波算法对不同温度适应性差的问题，提出了分数阶多新息容积卡尔曼滤波联合分数阶无迹卡尔曼滤波 FOMICKF-FOUKF(fractional order multi-innovation cubature Kalman filter-fractional order unscented Kalman filter)算法估计锂电池 SOC。算法采用多时间尺度方法，在宏观时间尺度下以 FOUKF 进行在线参数辨识，在微观时间尺度下用 FOMICKF 估计 SOC。不同算法收敛能力不同，对多种算法进行收敛性对比实验。此外，在不同温度下，电池内部活性不同，要准确估计电池 SOC 较为困难，为了验证所提算法对不同温度的适应能力，分别在 0、25 和 45 ℃下估计 SOC。结果表明，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法估计 SOC 精度高、收敛性好，对不同温度具有较好的适应性。

关键词：荷电状态估计；分数阶；多新息容积卡尔曼滤波；联合估计

SOC Estimation of Lithium-ion Battery Based on Fractional Order Model and FOMICKF-FOUKF Algorithm

SONG Yangwanhao, *Student Member*, *CPSS*, LI Xin
(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Aiming at the problems that the offline parameter identification method can only identify a single fixed parameter which leads to insufficiently accurate state of charge (SOC) estimation, and that the traditional Kalman filtering algorithm is poorly adapted to different temperatures, a fractional-order multi-innovation cubature Kalman filtering combined with fractional-order unscented Kalman filtering (FOMICKF-FOUKF) algorithm is proposed to estimate the SOC of lithium-ion batteries.The algorithm adopts a multi-timescale approach to carry out the online parameter identification with the FOUKF in the macro time scale, and the SOC estimation with the FOMICKF in the micro time scale. The convergence ability of different algorithms varies, and in order to verify the convergence of the algorithms, the algorithms were subjected to the convergence comparison experiment. In addition, it is more difficult to accurately estimate battery SOC at different temperatures where the internal polarization reaction varies significantly. SOC estimation experiments were conducted at 0°C, 25°C and 45°C to verify the adaptability of the proposed algorithm to different temperatures. The results show that the FOMICKF-FOUKF dual Kalman online joint algorithm estimates the SOC with high accuracy and good convergence, and has good adaptability to different temperatures.

Keywords: State of charge estimation; fractional order; multi-innovation cubature Kalman filter; joint estimation

收稿日期：2024-01-17；**修回日期**：2024-03-11，2024-04-02；
录用日期：2024-04-27；**网络首发日期**：2024-05-15
基金项目：安徽省高校自然科学基金资助项目(KJ2019A0106)；2020 年安徽省教育厅资助项目(2020JYXM0460)
This work is supported by Natural Science Foundation of Anhui Province Universities under the grant KJ2019A0106; 2020 Anhui Provincial Department of Education Project under the grant 2020JYXM0460

锂电池荷电状态 SOC(state of charge)的准确估计具有重要意义，常见的估计 SOC 的方法有以下几种。第一种是安时积分法[1]，其本质是电流对时间积分，用初始 SOC 减去安时积分变化量与电池容量的比值获取剩余 SOC，该方法简单，但随时

间积累误差增大。第二种是基于神经网络的方法[2-3]，该方法仅需研究电池的输入和输出，不需要考虑电池内部极化反应，可以通过对大量数据进行训练得到 SOC，该方法计算烦琐、难度高。第三种是基于等效电路模型的方法[4]，将电池等效成含有电压源、电阻、电容等元件的电路来估计电池 SOC，但整数阶电路模型精度较低，因此分数阶等效电路模型被提出[5]，其能够较好地表达电池非线性特征及分数阶性质，精度更高。

目前，国内外常用扩展卡尔曼滤波 EKF(extended Kalman filter)算法估计 SOC，EKF 基本思想是利用一阶泰勒展开处理非线性问题。接着无迹卡尔曼滤波 UKF(unscented Kalman filter)算法被提出[6]，其通过无迹变换解决非线性问题，精度较 EKF 有所提升，但算法稳定性较低。容积卡尔曼滤波 CKF(cubature Kalman filter)算法与 UKF 递推过程较为相似[7-8]，但 CKF 严格遵循三阶球面-径向容积准则，并且 CKF 权重值计算更为简单，Sigma 点数量较少，稳定性更高。此外，传统参数辨识多采用离线辨识方法，但是电池充放电时内部化学反应是时变的、非线性的，其特性随着温度的变化更为明显，若采用单一固定参数估计 SOC，则会导致估计不准确。

为了提高锂电池 SOC 估计精度，并解决传统算法对温度适应性差的问题，本文基于分数阶模型提出了分数阶多新息容积卡尔曼滤波联合分数阶无迹卡尔曼滤波 FOMICKF-FOUKF(fractional order multi-innovation cubature Kalman filter-fractional order unscented Kalman filter)算法。其中，分数阶多新息容积卡尔曼滤波 FOMICKF(fractional order multi-innovation cubature Kalman filter)是在分数阶容积卡尔曼滤波 FOCKF(fractional order cubature Kalman filter)基础上引入多新息理论[9]，对算法在迭代过程中产生的误差信息进行校正更新，降低误差。FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法将 SOC 估计部分和参数辨识部分划分在 2 个时间尺度下进行[10]，在微观时间尺度下用 FOMICKF 算法估计 SOC；当微观时间尺度序列增大到宏观时间尺度时，时间尺度切换，在宏观时间尺度下用 FOUKF 算法进行在线参数辨识，循环递推。FOUKF 在线辨识方法相较于传统离线方法能够大大提高 SOC 估计精度，让模型参数更准确。离线参数辨识方法是通过优化算法计算出 1 组全局最优参数，但等效电路模型参数会随着 SOC 的变化而变化，而 SOC 又会受到电池放电工况的影响。因此，基于离线辨识方法的参数估计结果无法适应电池放电工况的变化，会导致 SOC 估计误差增大，在线参数辨识方法可以较好地适应电池放电工况的变化。

1 锂电池分数阶模型

1.1 分数阶定义

分数阶微积分理论由 Newton 和 Leibniz 提出。整数阶微积分理论较容易理解，但生活中的事物均体现出极强的非线性特征及分数阶性质。目前主要有 3 种分数阶微积分理论：Riemann- Liouville(R-L)定义、Caputo 定义和 Grünwald-Let- nikov(G-L)定义，本文采用 G-L 定义，可表示为

$$\begin{cases} D^a x(t)=\lim\limits_{h\to 0}\dfrac{1}{h^a}\sum\limits_{j=0}^{[t/h]}(-1)^j\binom{a}{j}x(t-jh) \\ \binom{a}{j}=\begin{cases}1 & j=0\\ \dfrac{a(a-1)\cdots[a-(j-1)]}{j!} & j>0\end{cases}\end{cases} \tag{1}$$

式中：D^a 为分数阶算子；x 为状态变量；h 为步长；a 为阶次；t 为时间；j 为记忆因子。

1.2 分数阶锂电池电路

锂电池分数阶模型 FOM(fractional order model)如图 1 所示，采用分数阶二阶 RC 电路模型。分数

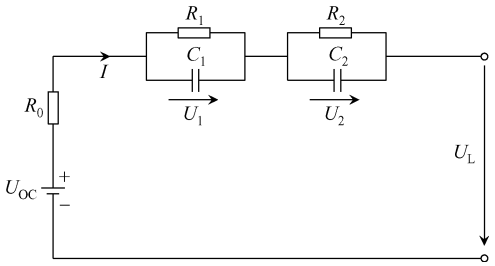


图 1 锂电池 FOM

Fig. 1 Lithium-ion battery FOM

阶模型采用恒相位元件替代传统电容器，可以更好地反映电池特性。在该电路模型中，R_0 为欧姆电阻，反映锂电池在充放电瞬间端电压 U_L 的变化；U_{OC} 为开路电压；R_1 和 R_2 为电阻；U_1 和 U_2 为电阻电压；C_1 和 C_2 为分数阶电容。

1.3 锂电池 FOM 状态空间方程

锂电池 FOM 方程表达式为

$$\begin{cases} D^{\alpha}U_1 = -U_1 / R_1C_1 + I / C_1 \\ D^{\beta}U_2 = -U_2 / R_2C_2 + I / C_2 \\ U_L = U_{OC} - U_1 - U_2 - R_0 I \end{cases} \tag{2}$$

式中：D^{α}、D^{β} 分别为 U_1 和 U_2 的分数阶算子；I 为电流。

锂电池 SOC 表达式为

$$\mathrm{SOC}_{k+1} = \mathrm{SOC}_k - I_k T_s / C_N \tag{3}$$

式中：k 为时间；I_k 为 k 时刻电流；T_s 为采样间隔；C_N 为容量。

结合式(1)得到分数阶状态空间方程表达式为

$$\begin{cases} x_{k+1} = \boldsymbol{A}x_k + \boldsymbol{B}I_k - \sum_{j=1}^{k+1}(-1)^j \boldsymbol{K}_j x_{k+1-j} \\ y_k = \boldsymbol{C}x_k - R_0 I_k + U_{OC,k} \end{cases} \tag{4}$$

式中：x_k 为状态变量；$\boldsymbol{A} = \mathrm{diag}(-T_s^{\alpha}/R_1C_1, -T_s^{\beta}/R_2C_2, 1)$，$T_s^{\alpha}$ 和 T_s^{β} 分别为 T_s 的 α 和 β 次幂；$\boldsymbol{B} = [T_s^{\alpha}/C_1 \quad T_s^{\beta}/C_2 \quad -T_s/C_N]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{K}_j$ 为系数，$\boldsymbol{K}_j = \mathrm{diag}(\boldsymbol{\omega}_j^{\alpha}, \boldsymbol{\omega}_j^{\beta}, 0)$，$\boldsymbol{\omega}_j^{\alpha}$ 为和 $\boldsymbol{\omega}_j^{\beta}$ 为二项式权重系数，$\boldsymbol{\omega}_j^{\alpha} = [\alpha \quad j]^{\mathrm{T}}$；$y_k$ 为输出变量端电压；$\boldsymbol{C} = [-1 \ -1 \ 0]^{\mathrm{T}}$。

2 模型参数辨识与验证

2.1 U_{OC}-SOC 曲线

实验数据来自马里兰大学 GLACE 电池研究小组，电池型号为 INR18650-20R，测得不同温度下电池增量开路电压 OCV(open circuit voltage)、公路驾驶工况(US06)和联邦城市运行工况 FUDS(federal urban driving schedule)及动态应力测试 DST(dynamic stress test)工况数据。U_{OC}-SOC 曲线表示 SOC 与端电压的对应关系[11]，对锂电池 SOC 估计起着重要作用。先从增量 OCV 实验数据中获取 SOC(从 0 到 1，间隔为 0.1)与 U_{OC} 的对应关系，然后将 U_{OC} 与 SOC 进行多项式拟合，最后得到在不同温度下的 U_{OC}-SOC 曲线，如图 2 所示。

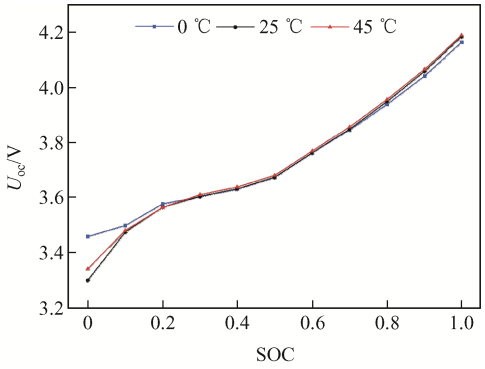


图 2　U_{OC}-SOC 曲线

Fig. 2 U_{OC}-SOC curve

2.2 锂电池 FOM 离线参数辨识

在 US06 工况下用自适应遗传算法 AGA(adaptive genetic algorithm)辨识电路参数[12]，并将 AGA 离线辨识方法与在线参数辨识方法作对比。遗传算法通过效仿生物演化法则，搜索全局最优解得到所需结果。AGA 在遗传算法 GA(genetic algorithm)基础上对交叉概率和变异概率进行自适应更新，使其有着更好的全局搜索能力和精度，AGA 主要流程如图 3 所示。将分数阶电路模型 R_0、R_1、R_2、C_1、C_2、α、β 作为 7 组基因，每个基因由二进制编码构成，循环交叉变异，直到找到最优解。

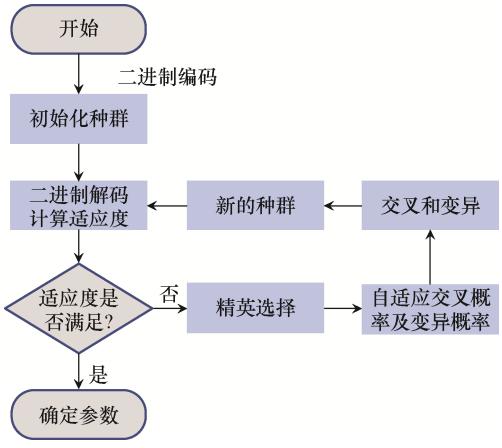
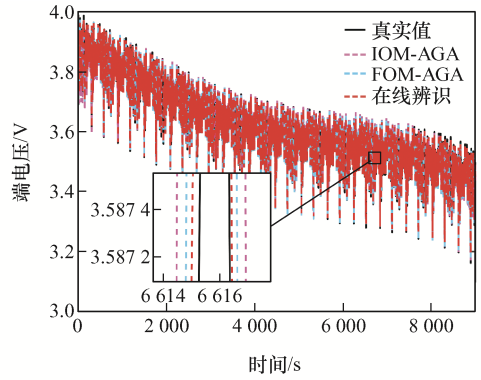


图 3　AGA 主要流程

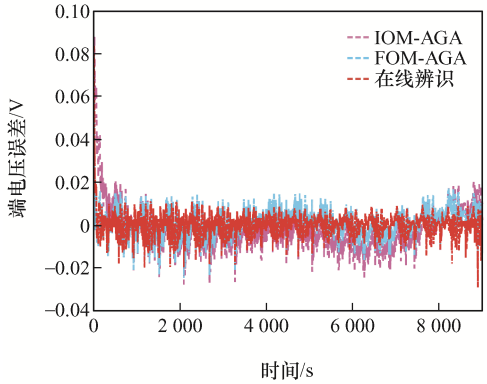
Fig. 3 Main flowchart of AGA

2.3 模型算法验证

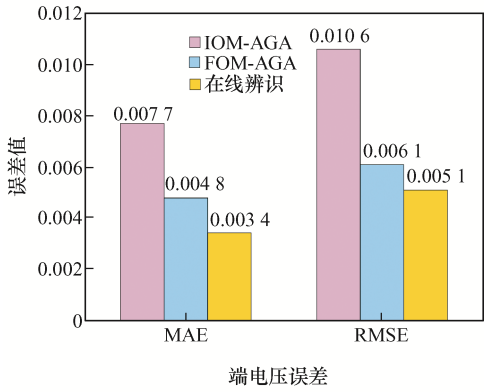
US06 工况下各模型算法端电压对比如图 4 所



(a) 端电压估计曲线



(b) 端电压误差曲线



(c) 端电压误差值

图 4 US06 工况下各模型算法端电压对比

Fig. 4 Terminal voltage comparison of different model-algorithm combinations under US06 conditions

示，可以看出，FOM 的端电压估计曲线比整数阶模型 IOM(integer order model)更贴合真实电压，端电压误差波动较小，说明分数阶模型更契合锂电池 SOC 估计。其中 FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法采用 FOUKF 算法对电路参数在线辨识，与 AGA 离线辨识方法相比，在线辨识方法的端电压平均绝对误差 MAE(mean absolute error)和均方根误差 RMSE(root mean square error)均比离线辨识方法小，因为离线方法仅能辨识单一固定的参数，但是电池充放电时内部化学反应是时变的、非线性的，通过在线辨识方法能够让电池参数实时更新，所以模型精度更高。

3 FOMICKF-FOUKF 联合估计

FOMICKF 在 FOCKF 基础上融合了多新息理论，新息定义为观测值与预测观测值的差值[13]。多新息方法是将标量新息扩展为新息矩阵，充分利用每个时刻的新息数据，提高算法数据利用率，降低误差，可表示为

$$\boldsymbol{E}_{p,k}=\begin{bmatrix}e_k\\e_{k-1}\\e_{k-2}\\\vdots\\e_{k-p+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y_{(k)}-\hat{y}_{(k|k-1)}\\y_{(k-1)}-\hat{y}_{(k-1|k-2)}\\y_{(k-2)}-\hat{y}_{(k-2|k-3)}\\\vdots\\y_{(k-p+1)}-\hat{y}_{(k-p+1|k-p)}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{p,k}$ 为多新息矩阵；e_k 为新息；p 为新息长度。

联合状态变量与参数变量后的状态空间方程为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\theta}_{k+1}=\boldsymbol{\theta}_k+\rho_k\\x_{k,l+1}=f(x_{k,l},\theta_k,u_{k,l})+\omega_{k,l}\\y_{k,l}=g(x_{k,l},\theta_k,u_{k,l})+\upsilon_{k,l}\end{cases} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{\theta}$ 为参数变量，$\boldsymbol{\theta}=[R_0\ \ R_1\ \ C_1\ \ R_2\ \ C_2\ \ \alpha\ \ \beta]^{\mathrm{T}}$；$\rho_k$ 为参数过程噪声；l 为微观时间尺度；$f(\cdot)$ 为状态转移函数；ω_k 为系统过程噪声；$g(\cdot)$ 为观测函数；υ_k 为系统测量噪声。

FOMICKF-FOUKF 算法流程如图 5 所示。

步骤 1 初始化系统状态协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_0$、系统状态量 x_0、状态噪声协方差 Q_0、观测噪声协方差 R_0；初始化参数协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_{\theta 0}$、参数状态变量 θ_0、参数过程噪声协方差 $Q_{\theta 0}$、参数观测噪声协方差 $R_{\theta 0}$。

步骤 2 划分宏观时间尺度 L 和微观时间尺度 $l\in(1,L)$，先在微观尺度下采用 FOMICKF 算法进行 SOC 估计。

(1)时间更新，生成容积点，即

$$\begin{cases} P_{k-1}=\boldsymbol{S}_{k-1}\boldsymbol{S}_{k-1}^{\mathrm{T}} \\ \xi_i=\sqrt{m/2}\left[\boldsymbol{E},-\boldsymbol{E}\right] \\ \omega_{(i)}=1/m \\ x_{k-1}^{i}=\hat{x}_{k-1}+\boldsymbol{S}_{k-1}\xi_i \end{cases} \tag{7}$$

式中：P_{k-1} 为状态协方差；$\boldsymbol{S}_{k-1}$ 为协方差矩阵的 Cholesky 因子；ξ_i 为容积点；$m=2n$，n 为状态向量维数；$\boldsymbol{E}$ 为单位矩阵；$\omega_{(i)}$ 为容积点权重；x_{k-1}^{i} 为 k–1 时刻第 i 个容积点；$\hat{x}_{k-1}$ 为 k–1 时刻后验状态估计值。

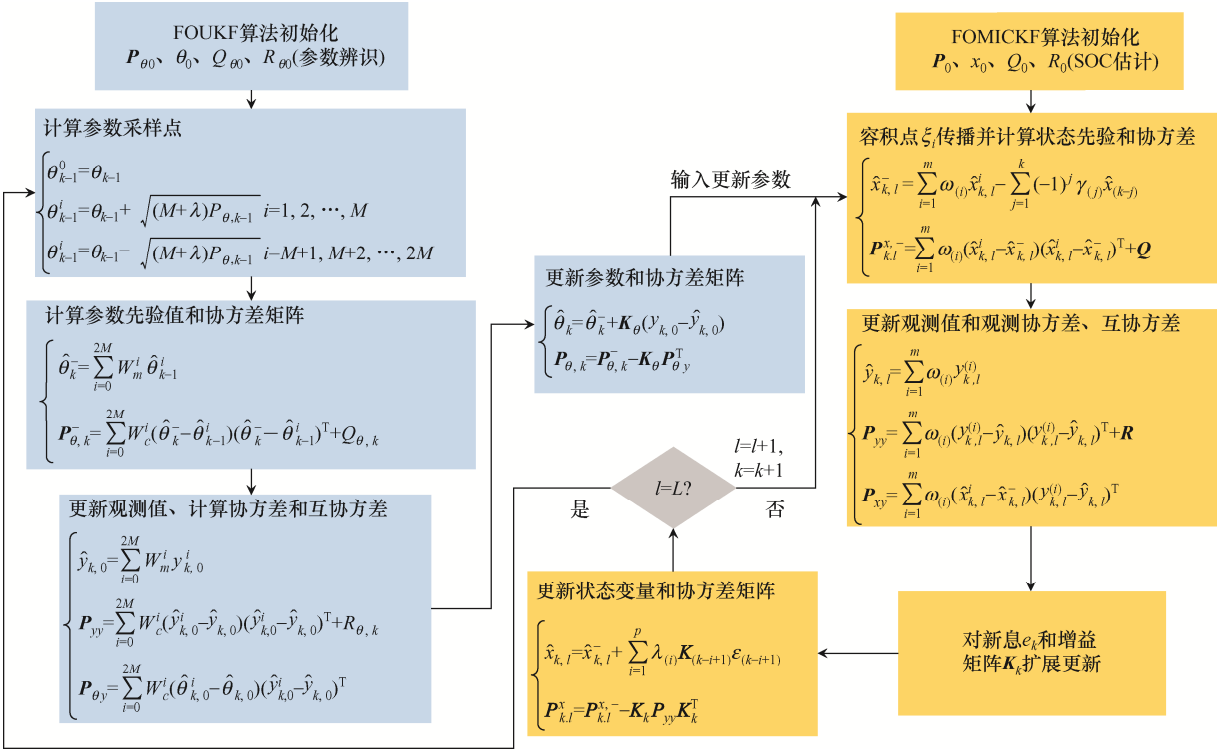


图 5　FOMICKF-FOUKF 算法流程

Fig. 5 Flowchart of FOMICKF-FOUKF algorithm

计算先验状态估计值 $\hat{x}_{k,l}^-$ 和状态协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_{k,l}^{x,-}$

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,l}^{i}=f(x_{k-1,l-1}^{i},\hat{\theta}_{k-1}^-,u_{k-1,l}) \\ \hat{x}_{k,l}^-=\sum_{i=1}^{m}\omega_{(i)}\hat{x}_{k,l}^i-\sum_{j=1}^{k}(-1)^j\gamma_{(j)}\hat{x}_{(k-j)} \\ \boldsymbol{P}_{k,l}^{x,-}=\sum_{i=1}^{m}\omega_{(i)}(\hat{x}_{k,l}^i-\hat{x}_{k,l}^-)(\hat{x}_{k,l}^i-\hat{x}_{k,l}^-)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$u_{k-1,l}$ 为 k–1 时刻第 l 步的系统输入变量电流；$\gamma_{(j)}$ 为分数阶差分记忆系数；$\boldsymbol{Q}$ 为过程噪声协方差矩阵。

(2)测量更新，更新观测值 $\hat{y}_{k,l}$，计算观测协方差 $\boldsymbol{P}_{yy}$ 和互协方差 $\boldsymbol{P}_{xy}$ 得

$$\begin{cases} y_{k,l}^{(i)}=g(x_{k,l}^i,\hat{\theta}_k^-,u_{k,l}) \\ \hat{y}_{k,l}=\sum_{i=1}^{m}\omega_{(i)}y_{k,l}^{(i)} \\ \boldsymbol{P}_{yy}=\sum_{i=1}^{m}\omega_{(i)}(y_{k,l}^{(i)}-\hat{y}_{k,l})(y_{k,l}^{(i)}-\hat{y}_{k,l})^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R} \\ \boldsymbol{P}_{xy}=\sum_{i=1}^{m}\omega_{(i)}(\hat{x}_{k,l}^i-\hat{x}_{k,l}^-)(y_{k,l}^{(i)}-\hat{y}_{k,l})^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{R}$ 为观测噪声协方差矩阵。

扩展卡尔曼增益矩阵 $\boldsymbol{K}_k$ 为

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k=\boldsymbol{P}_{xy}\boldsymbol{P}_{yy}^{-1} \\ \boldsymbol{K}_{p,k}=[\boldsymbol{K}_k\ \ \boldsymbol{K}_{k-1}\ \cdots\ \boldsymbol{K}_{k-p+1}] \end{cases} \tag{10}$$

(3)更新状态变量和协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_{k,l}^{x}$

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,l}=\hat{x}_{k,l}^-+\sum_{i=1}^{p}\lambda_{(i)}\boldsymbol{K}_{(k-i+1)}\varepsilon_{(k-i+1)} \\ \boldsymbol{P}_{k,l}^{x}=\boldsymbol{P}_{k,l}^{x,-}-\boldsymbol{K}_k\boldsymbol{P}_{yy}\boldsymbol{K}_k^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{11}$$

式中：权值 $\lambda_{(1)}=1$，$\lambda_{(2)}=\lambda_{(3)}=\cdots=\lambda_{(p)}=u/(p-1)$，$0\leqslant u\leqslant 1$，$u$ 为可调系数；$\varepsilon_{(k-i+1)}$ 为新息。

步骤 3　当 SOC 估计序列达到宏观时间尺度 L 时，从微观时间尺度切换到宏观时间尺度，采用 FOUKF 算法进行在线参数辨识[14-17]，参数在线辨识部分流程如图 5 所示。至此，SOC 估计与参数辨识一轮结束，循环递推。

4 实验验证与分析

4.1 在线辨识及算法对比实验

实验中，当电池 SOC 值小于 0.1 时会造成电池损坏，选用 SOC 值在 0.1~0.8 之间的实验数据，将安时积分法计算得到的 SOC 值作为真实值。实验将多新息容积卡尔曼滤波 MICKF(multi-innovation cubature Kalman filter)、FOCKF、FOMICKF 3 种算法作为对比组，3 种算法均采用 AGA 离线辨识的单卡尔曼滤波算法，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法采用的是 FOUKF 在线辨识方法，参数初值由 AGA 给定。在线辨识的参数结果如图 6 所示，可以看出，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法采用 FOUKF 在线辨识时电路参数是实时变化的，不断更新校正，电池在工作时其内部发生反应，外特性不断变化，离线方法仅能辨识固定参数，因此无法适应电池放电工况的变化，而在线方法通过实时更新校正参数就可以较好地解决电池时变性问题。各算法的对比实验如图 7 所示，FOMICKF- FOUKF 双卡尔曼在线联合算法估计 SOC 的误差波动更稳定，估计曲线更加贴合真实 SOC，能够解决离线辨识单一固定的参数导致估计 SOC 不准确的问题。从图 7(c)中可以看出，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法估计 SOC 的平均绝对误差和均方根误差在所有算法里面最小，体现了其估计锂电池 SOC 的准确性。

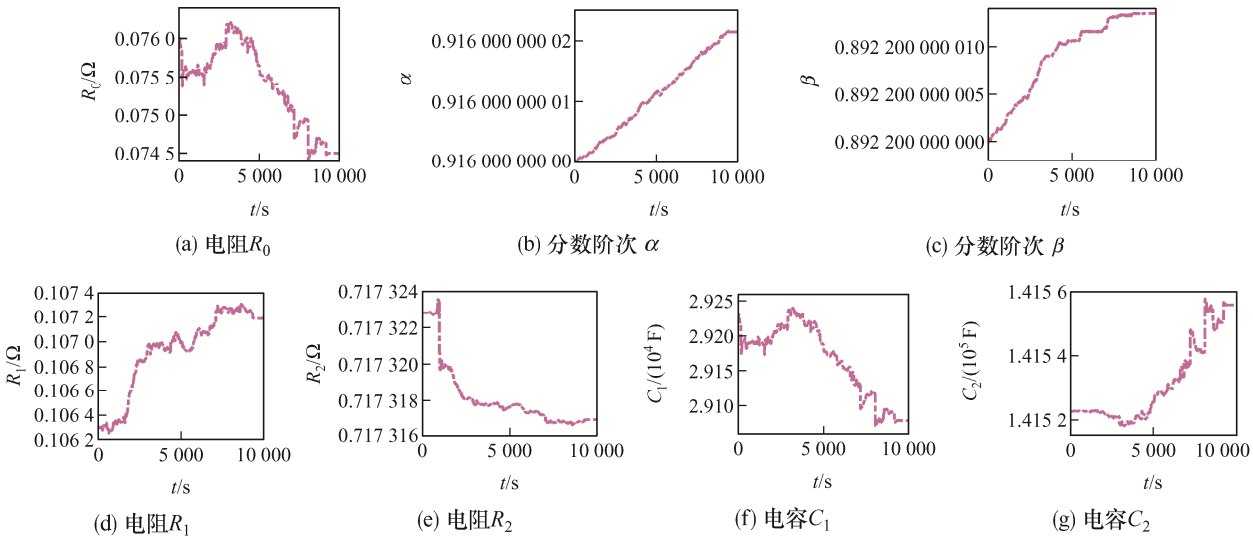


图 6 在线辨识的参数结果

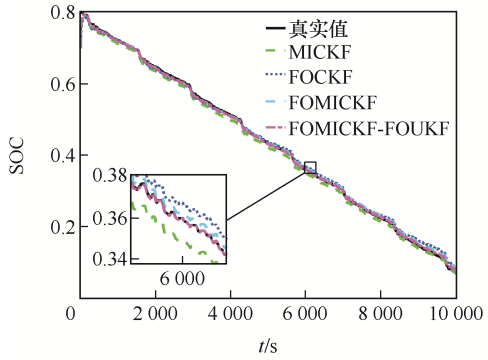
Fig. 6 Online identification results of parameters

4.2 算法收敛性验证

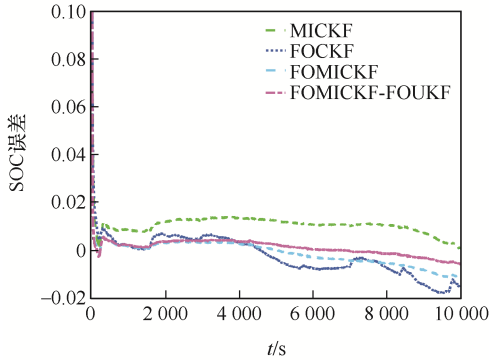
在实际工作中，很难准确得知电池初始 SOC 值，为了验证所提算法的追踪能力和收敛性，将算法 SOC 初始值分别设为 0.4 和 0.5 进行实验。图 8 将 SOC 初值设为 0.5，与真实 SOC 值偏离 0.3，总数据长度为 9 000 s，采样周期为 1 s，定义 SOC 误差小于 1%时算收敛。通过图 8(b)和(c)可以看出，在增大初值偏离情况下，FOMICKF-FOUKF 算法收敛速度较快，收敛周期为 10 s，并且收敛后的误差较小，而 FOMICKF 算法收敛周期为 80 s，FOCKF 算法则在 118 s 才能收敛，说明融合多新息理论的 FOMICKF 改进效果较好。图 9 将 SOC 初值设为 0.4，与真实 SOC 值偏离 0.4，通过图 9(b)和(c)可以看出，FOMICKF-FOUKF 算法收敛速度依然较快，收敛周期为 11 s，而 FOMICKF 算法收敛周期为 107 s，FOCKF 算法则在 128 s 才能收敛。综上可知，FOMICKF-FOUKF 算法具有更强的收敛性，精度更高。

4.3 不同温度下的算法性能验证

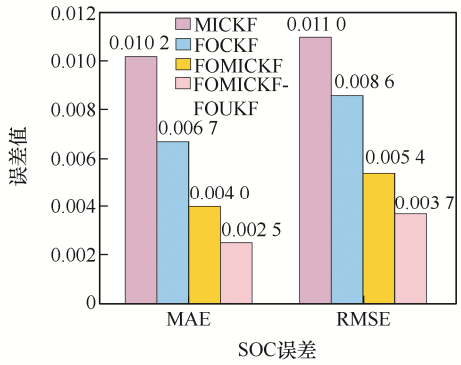
为了验证所提算法对不同温度的适应性，分别



(a) SOC估计曲线



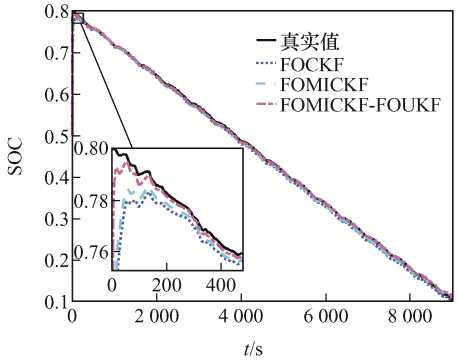
(b) SOC误差曲线



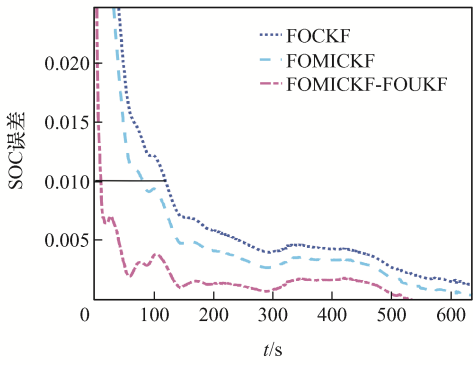
(c) SOC的误差值

图 7　各算法在 FUDS 工况下 SOC 估计对比

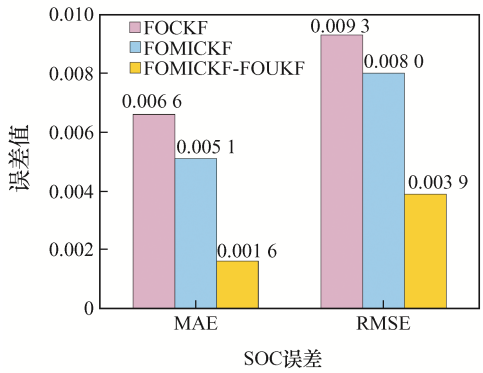
Fig. 7 SOC estimation comparison of different algorithms under FUDS operating conditions



(a) SOC估计曲线



(b) 初值偏离收敛误差曲线



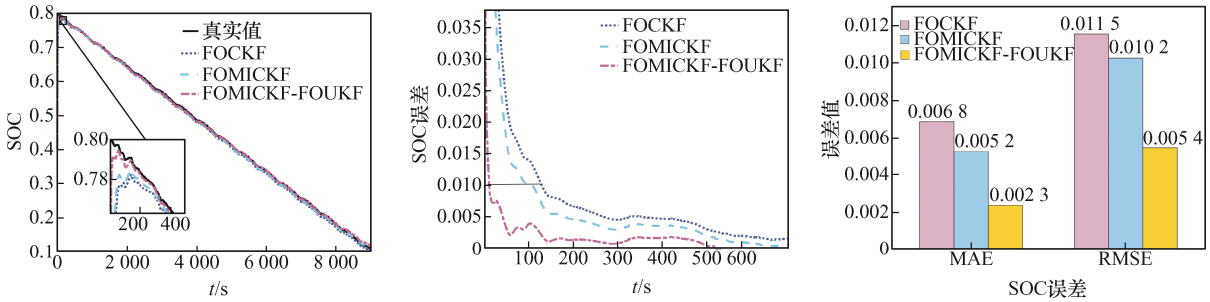
(c) SOC的误差值

图 8　SOC 初值为 0.5 时 US06 工况下 SOC 估计对比

Fig. 8 SOC estimation comparison under US06 operating conditions with initial SOC of 0.5

在 0、25 和 45 ℃时，在 DST 工况下进行 SOC 估计，如图 10 所示。图 10(a)~(c)为 0 ℃下电池 SOC 的估计结果，在低温环境下，电池内部活性降低，要准确估计 SOC 较为困难。图 10(d)~(f)为 25 ℃下电池 SOC 的估计结果，可以看出，所提算法估计 SOC 的 RMSE 和 MAE 误差更低，精度更高。通过图 10 可以看出，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法估计 SOC 效果比 FOMICKF 好，因为电池充放电时内部化学反应是时变的、非线性的，所以电池模型参数会发生变化，FOMICKF-FOUKF 算法能够对电池参数在线辨识实时更新，然后将更新的参数传输给 SOC 估计滤波器，因此 FOMICKF-FOUKF 算法估计效果更好。图 10(g)~(i)为 45 ℃下电池 SOC 的估计结果，可以看出，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法估计 SOC 的误差低于 FOMICKF。同理，在高温环境下，电池内部发生大量极化反应，模型参数发生变化，所以

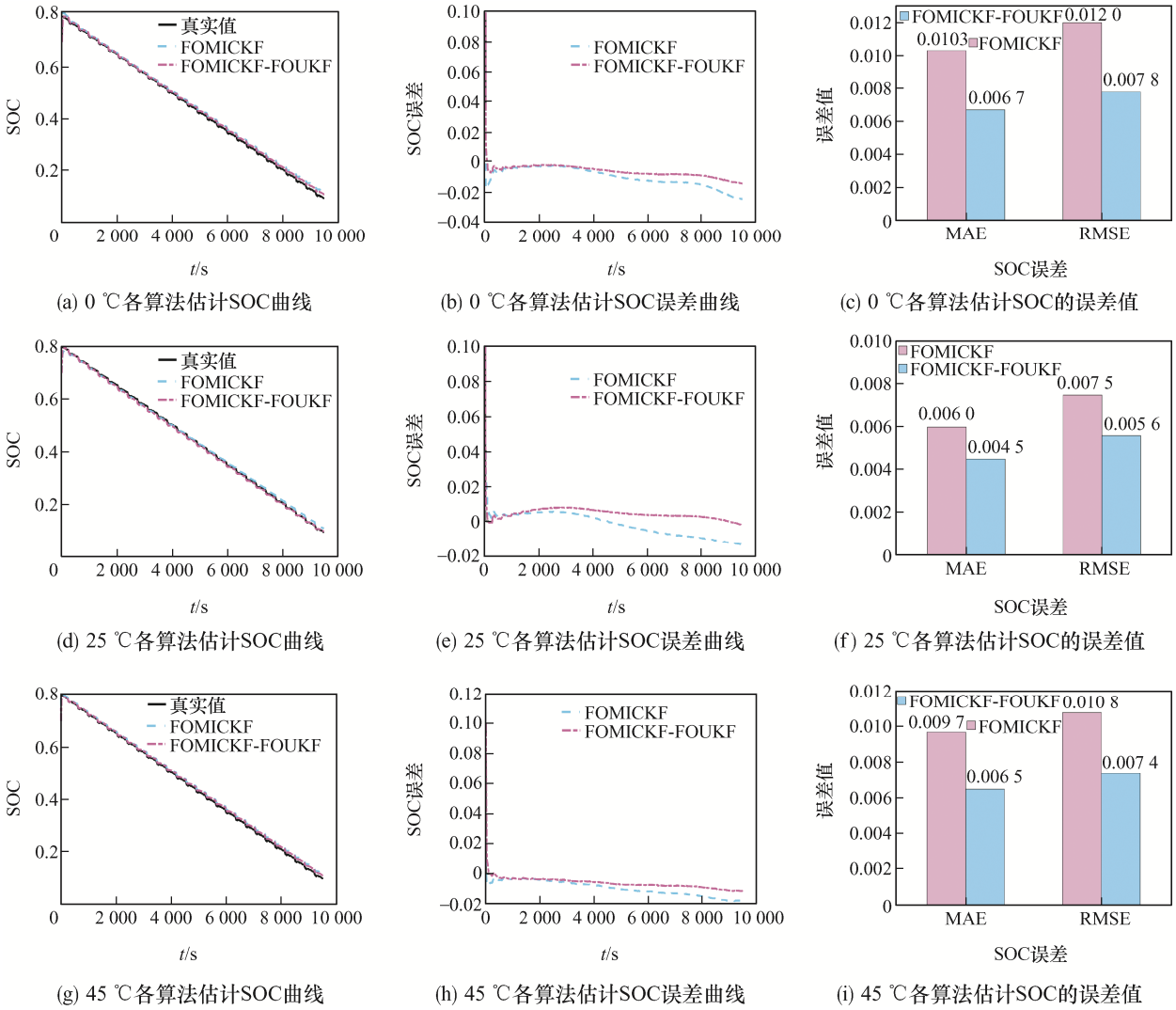
FOMICKF-FOUKF 算法估计效果更好，精度更高。综上，在不同温度环境下，FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法都能够较好地估计锂电池 SOC，对不同温度具有较好的适应能力。



(a) SOC估计曲线 (b) 初值偏离收敛误差曲线 (c) SOC的误差值

图 9 SOC 初值为 0.4 时 US06 工况下 SOC 估计对比

Fig. 9 SOC estimation comparison under US06 operating conditions with initial SOC of 0.4



(a) 0 ℃各算法估计SOC曲线 (b) 0 ℃各算法估计SOC误差曲线 (c) 0 ℃各算法估计SOC的误差值

(d) 25 ℃各算法估计SOC曲线 (e) 25 ℃各算法估计SOC误差曲线 (f) 25 ℃各算法估计SOC的误差值

(g) 45 ℃各算法估计SOC曲线 (h) 45 ℃各算法估计SOC误差曲线 (i) 45 ℃各算法估计SOC的误差值

图 10 算法在不同温度 DST 工况下估计 SOC 对比

Fig. 10 SOC estimation comparison of the algorithm under DST conditions at different temperatures

5　结语

本文基于分数阶模型提出了 FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法，采用多时间尺度的方法对 SOC 和电路参数进行在线联合估计。通过与各算法的模型端电压误差及 SOC 误差进行对比可知，所提算法能够有效解决离线辨识方法无法实时更新电路参数而导致 SOC 估计精度较低的问题。然后对 FOMICKF-FOUKF 双卡尔曼在线联合算法与其他算法进行收敛性对比，实验验证了所提算法在 SOC 初值高偏离情况下仍具有较快的收敛速度，实用性较强。最后，针对传统算法对温度适应性差的问题，在 0、25 和 45 ℃温度下进行 SOC 估计对比，结果表明，所提算法在不同温度下仍能够准确地估算电池 SOC，对温度具有较好的适应性。

参考文献：

[1] He Lin, Hu Xingwen, Yin Guangwei, et al. A current dynamics model and proportional-integral observer for state-of-charge estimation of lithium-ion battery [J]. Energy, 2024, 288: 129701.

[2] Miranda M H R, Silva F L, Lourenço M A M, et al. Particle swarm optimization of Elman neural network applied to battery state of charge and state of health estimation [J]. Energy, 2023, 285: 129503.

[3] 张立佳, 徐国宁, 赵向阳, 等. 基于神经网络的老化锂电池 SOC 估算方法的研究[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 54-60.
Zhang Lijia, Xu Guoning, Zhao Xiangyang, et al. Research on SOC estimation method for aging lithium battery based on neural network [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 54-60. (in Chinese)

[4] Wang Lu, Ma Jian, Zhao Xuan, et al. Adaptive robust unscented Kalman filter-based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries with multi-parameter updating [J]. Electrochimica Acta, 2022, 426: 140760.

[5] Chen Lin, Yu Wentao, Cheng Guoyang, et al. State-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on fractional-order modeling and adaptive square-root cubature Kalman filter [J]. Energy, 2023, 271: 127007.

[6] Zhang Shuzhi, Zhang Chen, Jiang Shiyong, et al. A comparative study of different adaptive extended/unscented Kalman filters for lithium-ion battery state-of-charge estimation [J]. Energy, 2022, 246: 123423.

[7] Li Xiaoyu, Huang Zhijia, Tian Jindong, et al. State-of-charge estimation tolerant of battery aging based on a physics-based model and an adaptive cubature Kalman filter [J]. Energy, 2021, 220: 119767.

[8] Linghu J, Kang Longyun, Liu Ming, et al. Estimation for state-of-charge of lithium-ion battery based on an adaptive high-degree cubature Kalman filter [J]. Energy, 2019, 189: 116204.

[9] Xing Likun, Wu Xianyuan, Ling Liuyi, et al. Lithium battery SOC estimation based on multi-innovation unscented and fractional order square root cubature Kalman filter [J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 9524.

[10] Wu Shaojie, Zhang Shuzhi, Li Haoran, et al. A totally coupled multi time-scale framework containing full parameters online identification and SOC real-time estimation of lithium-ion battery based on a fractional order model [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109012.

[11] 王子毅, 朱承治, 周杨林, 等. 基于动态可重构电池网络的 OCV-SOC 在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2919-2928.
Wang Ziyi, Zhu Chengzhi, Zhou Yanglin, et al. OCV-SOC estimation based on dynamic reconfigurable battery network [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022, 42(8): 2919-2928. (in Chinese)

[12] 王亚涛, 陆玮, 倪松挺, 等. 基于改进多种群遗传算法的锂电池参数辨识[J]. 电工技术, 2023(16): 33-36.
Wang Yatao, Lu Wei, Ni Songting, et al. Parameter identification of lithium battery based on improved multi-population genetic algorithm [J]. Electric Engineering, 2023(16): 33-36. (in Chinese)

[13] Ma Lili, Xu Yonghong, Zhang Hongguang, et al. Co-estimation of state of charge and state of health for lithium-ion batteries based on fractional-order model with multi-innovations unscented Kalman filter method [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104904.

[14] Wu Jingjin, Fang Chao, Jin Zhiyang, et al. A multi-scale fractional-order dual unscented Kalman filter based parameter and state of charge joint estimation method of lithium-ion battery [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104666.

[15] Zhu Tao, Wang Shunli, Fan Yongcun, et al. Improved forgetting factor recursive least square and adaptive square root unscented Kalman filtering methods for online model parameter identification and joint estimation of state of charge and state of energy of lithium-ion batteries [J]. Ionics, 2023, 29(12): 5295-5314.

[16] 鲍明堃, 周扬忠. 基于双模型的递推最小二乘永磁同步直线电机电气参数在线辨识[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 343-353.
Bao Mingkun, Zhou Yangzhong. Dual-model-based recursive least squares online identification of electrical parameters of permanent magnet synchronous linear motor [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 343-353. (in Chinese)

[17] 孙丙香, 王家驹, 苏晓佳, 等. 基于阶梯波的锂离子电池电化学阻抗谱低频段在线辨识方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 3064-3072.
Sun Bingxiang, Wang Jiaju, Su Xiaojia, et al. Study on online identification method of low frequency electro-chemical impedance spectroscopy for lithium-ion battery based on step wave [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2023, 38(11): 3064-3072. (in Chinese)



宋杨皖豪

作者简介：

宋杨皖豪(1998—)，男，中国电源学会学生会员，硕士。研究方向：BMS。E-mail：1587443736@qq.com。

李昕(1981—)，女，通信作者，硕士，副教授。研究方向：BMS 及图像处理。E-mail：brightgirl1981@126.com。

(责任编辑：耿越)