

电动汽车锂电池老化状态下的SOC估算方法研究

赵小巍, 王 林, 陆珂伟

(上海捷能汽车技术有限公司电池系统部, 上海 201800)

摘要: 扩展卡尔曼滤波算法常被用来进行电池荷电状态 (State of Charge, SOC) 估计。该方法以等效电路模型为基础, 因此模型准确度对于估计结果起到了非常关键的作用。随着电池的使用, 电池老化加剧, 内阻增大, 模型准确度降低。通过实验考察了内阻老化对SOC估计算法的影响, 并提出了一种修正方案。测试结果显示, 该方法在电池寿命周期内具有较高的估计准确度。

关键词: 扩展卡尔曼滤波; 荷电状态; 等效电路模型; 内阻; 电池寿命

The SOC estimation method of lithium ion battery used in electric vehicles under aging condition

ZHAO Xiaowei, WANG Lin, LU Kewei

(Energy Storage System Department, Shanghai E-Propulsion Auto Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: Extended Kalman filter (EKF) algorithm is often used to perform battery State-of-Charge (SOC) estimation. This method is based on the equivalent circuit model, so model accuracy plays a key role for estimation results. With the aging of the battery, the internal resistance increases, and the accuracy of the model decreases. The influence of the battery aging on the SOC estimation accuracy is experimentally investigated, and a correction method is proposed. The test results show that the SOC algorithm considering battery aging significantly improve the prediction accuracy.

Key words: extended Kalman filter; SOC; equivalent battery model; internal resistance; battery aging

0 引言

电动汽车动力电池组的性能很大程度上决定了整车性能^[1], 而这其中, 电池管理系统起到了关键作用。电池SOC估计是电动汽车电池管理系统中的一项重要功能^[2-3]。SOC的准确度不仅影响到整车的控制策略, 还关系到用户体验。目前, 量产车上使用的SOC算法主要有: Ah积分法、开路电压法和基于电池模型的估算方法^[4-6]。在

SOC模型算法中, 扩展卡尔曼滤波(EKF)算法常被使用。目前, 大部分文献中, EKF算法的准确度可以控制在5%以内, 但是基于电池寿命周期内的SOC算法修正却较少被报道。随着电池充放电循环次数的增加, 电池容量衰减, 内阻增大, 而基于新电池辨识得到的电池模型参数将无法与实际值相匹配。如果不对模型参数进行修正, 则会大大影响到SOC估计的准确度。

本文通过对电池老化试验数据进行分析,提出了一种电池寿命周期内的模型修正方法。验证结果显示,基于该方法,EKF估算准确度可在寿命周期内控制在11%以内,估计误差降低了54.7%。

1 锂电池模型和EKF算法

1.1 等效电路模型

本试验采用了双极化内阻(DPR)模型来模拟锂电池的动态响应特性^[7],如图1所示。该模型既具备了一阶Thevenin模型的简单结构,又考虑二阶模型所表征的电化学极化和浓差极化现象,因而能够达到较高的准确度。

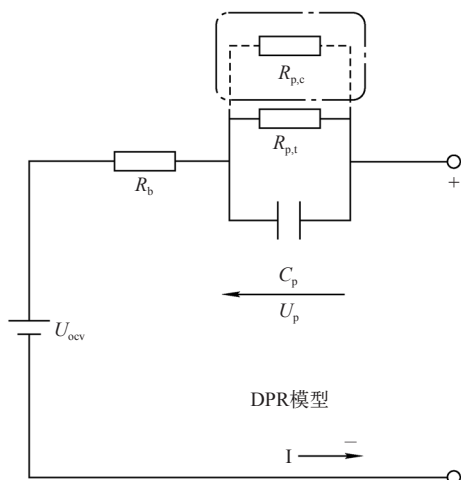


图1 双极化内阻模型

Fig. 1 Bipolar internal resistance model

极化内阻的基本表达式为

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} = -\frac{1}{C_p R_p} U_p + \frac{1}{C_p} I \\ U(t) = U_{ocv} + IR_b + U_p \\ R_p = w_p R_{p,c} + (1 - w_p) R_{p,t} \\ \frac{dw_p}{dt} = f(I, \frac{dI}{dt}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_b 为欧姆内阻; R_p 为极化内阻; C_p 为极化电容; U_{ocv} 为电池开路电压; U_p 为极化电压; w_p 为极化权重因子,取值范围为 $0 \sim 1$; $R_{p,t}$ 为瞬态极化内阻(即脉冲辨识得到的极化内阻)。当电流波动较小时,电池实际工况接近于恒流工况, w_p 应逐渐增大,使 R_p 向 $R_{p,c}$ (恒流极化内阻)逼近;

而当电流波动较大时,电池实际工况接近于瞬态变电流工况, w_p 应减小,使 R_p 向 $R_{p,t}$ 逼近。同时, dw_p/dt 为电流 I 以及电流变化速率 dI/dt 的函数。

1.2 测试台架及参数辨识

如图2所示,实验中使用的充放电仪为德国生产的Digatron UBT300-600。设备的最大充放电电流可以达到300 A,其具体参数如表1所示。通过该设备对电池进行脉冲充放电,可以辨识得到电池模型相关参数。同时,由国内某公司生产的高低温环境实验箱可以为电池提供恒定的环境温度。测试对象为国内某公司生产的10 A·h磷酸铁锂电池。

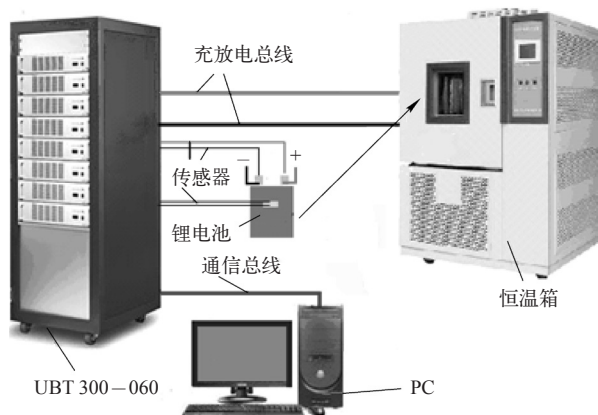


图2 实验设备及测试用电池

Fig. 2 Laboratory equipment and test batteries

表1 Digatron电池测试仪设备参数

Tab. 1 Digatron equipment parameters of battery tester

最大放电 电流/A	最大充电 电流/A	电压范围 /V	电流测量 误差/mA	电压测量 误差/mV	温度测量 误差/K
300	300	0~60	±50	±5	±0.1

文献[7]中详细描述了基于双极化内阻模型的参数辨识方法,本文中不再赘述。新电池的参数辨识结果如图3所示。

1.3 EKF算法

卡尔曼滤波算法提供了一种在动态环境下,对系统状态向量进行最优估计的方法。该方法在使用时,必须作一些假定:系统噪声 w_k 和观测噪声 v_k 为互不相关的高斯白噪声,即满足

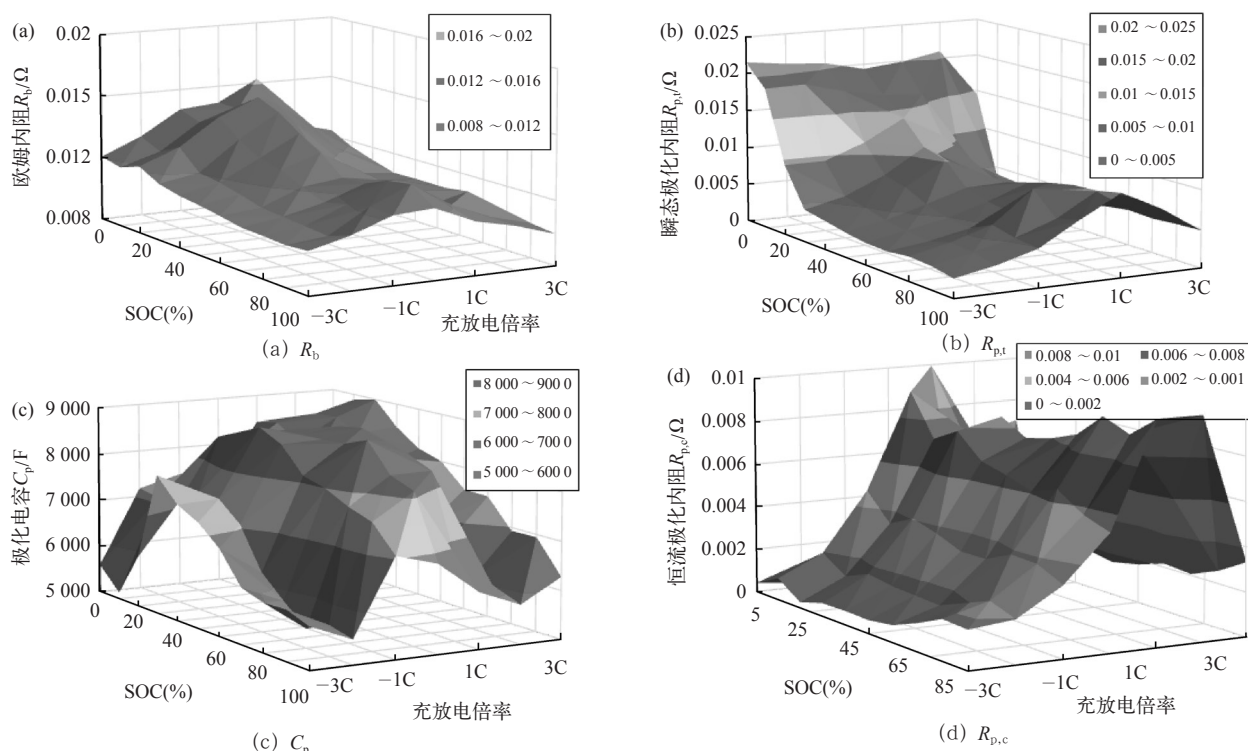


图3 双极化内阻模型参数辨识结果

Fig. 3 Parameter identification results of bipolar internal resistance model

$$E[w_n w_k^T] = \begin{cases} Q & n = k \\ 0 & n \neq k \end{cases} \quad (2)$$

$$E[v_n v_k^T] = \begin{cases} R & n = k \\ 0 & n \neq k \end{cases} \quad (3)$$

式中, E 为数学期望。

卡尔曼滤波的主要任务是在已知输入变量 $\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$ 和输出变量 $\{y_0, y_1, \dots, y_k\}$ 的情况下寻找系统状态变量的最优估计, 也就是根据上述假设和已知量, 求解下列方程

$$\hat{x} = \arg \min E[(x_k - \hat{x})^T (x_k - \hat{x}) | u_0, u_1, \dots, u_k, y_0, y_1, \dots, y_k] \quad (4)$$

卡尔曼滤波算法的流程图如图4所示。

在上述表达式中, A_k 、 B_k 、 C_k 和 D_k 共同描述了整个系统的动态特性。其具体参数可参考文献[6]。

2 锂电池老化过程参数变化

电池在使用的过程中, 随着电池寿命的衰

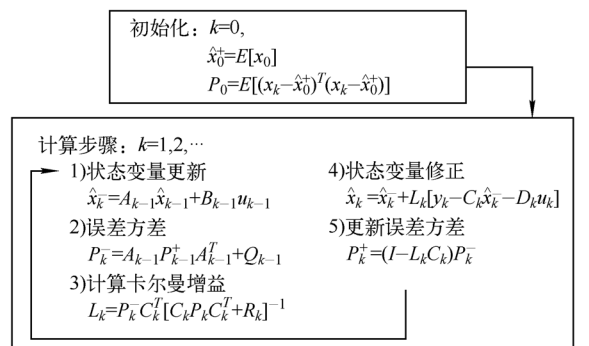


图4 卡尔曼滤波算法流程图

Fig. 4 Kalman filter algorithm flow chart

减, 电池容量不断减小, 电池内部电化学结构也会发生一定改变, 这些变化必定会对电路模型中的各项参数产生影响。如果电路模型忽略了电池寿命的影响, 那么SOC算法在使用过程中, 其估计准确度会大大降低。

2.1 直流内阻变化

本研究中, 对磷酸铁锂电池进行大电流循环老化试验, 并得到了直流内阻变化情况。试验过程如下。

1) 将电池的环境温度设置为25℃。

2) 采用充电电流2C和放电电流4C对电池进行循环充放电, 截止电压上下限分别为3.6 V和2 V, 每次充放电后电池静置5 min。

3) 在前200次循环中, 每隔50次循环测量一次电池在不同SOC点的直流放电内阻, 此后, 每隔100次循环进行一次, 电池直流内阻测试过程为: ①根据电池容量数据, 每隔10%SOC点将电池静置1 h; ②采用3C放电电流脉冲对电池放电1 s, 测量电池直流内阻。

图5为25 °C下电池部分充放电循环的电流电压曲线。从图5中可以看出, 在最初几个循环中, 充放电时间较长, 即电池充入和放出的电量较多, 随着循环过程的继续, 充放电时间逐渐缩短, 电流电压曲线变得更加密集。这一现象说明, 大电流充放电过程中电池极化效应显著, 前一循环的充放电过程会对后一循环充入电量产生影响。同时, 随着电池寿命的不断衰减, 电池的充放电时间会进一步缩短。图6以新电池在100%SOC时的直流内阻作为分母, 显示了直流内阻随循环次数的增长倍率(经线性化处理)。

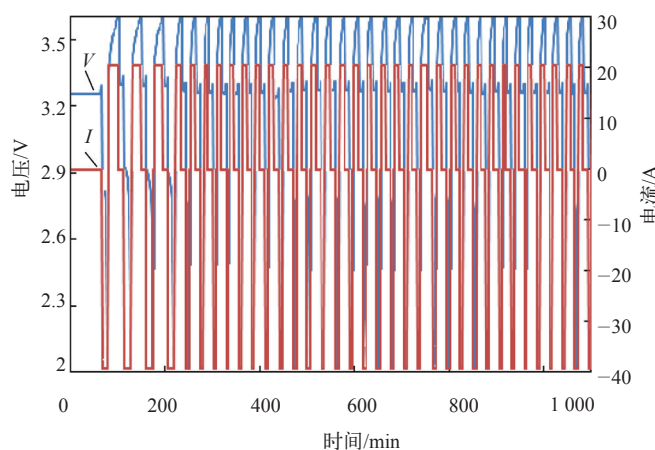


图5 25 °C下锂电池循环充放电电流电压曲线

Fig. 5 Current and voltage curves of recycling charging and discharging for lithium batteries at 25 °C

2.2 RC环节参数变化

研究对比了短时间恒流测试过程中, 新旧电池的电压响应曲线, 如图7所示。从图7中可以看出, 新电池和旧电池的电压曲线存在明显差异。在充电过程中, 旧电池的电压曲线要高于新电池, 而在放电过程中, 旧电池的电压曲线要低

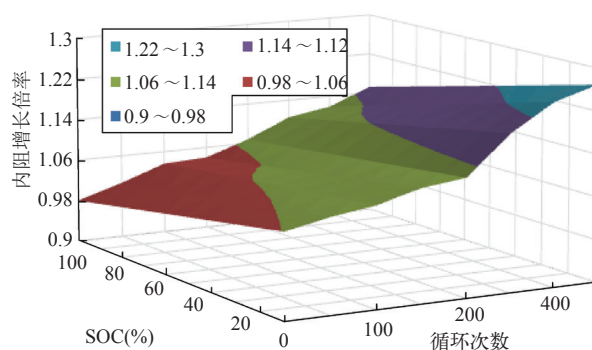


图6 直流内阻随循环次数的增长倍率

Fig. 6 The increase rate of DC internal resistance with cycle number

于新电池。同时, 在对电池施加电流的最初几秒内, 新旧电池的电压差迅速增大, 而在随后的过程中, 充电或放电过程的两条电压曲线近似平行。对于一阶电池模型而言, 欧姆内阻决定了电池的瞬时响应过程, 该过程发生在电流突变的瞬间; 而RC环节决定了电池的极化响应过程, 该响应过程往往要持续数十秒或更长时间。通过测试结果可以判断, 欧姆内阻的变化对电池电压响应曲线产生了较大影响, 而在之后的1 min内, 电压差值并没有发生显著改变, 这说明RC环节中的参数对电池寿命变化并不敏感。

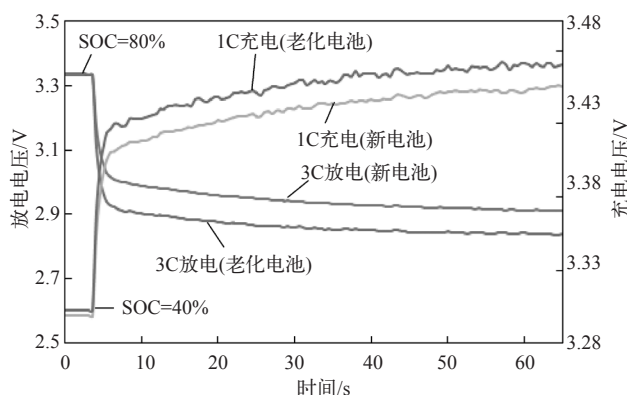


图7 短时间恒流测试

Fig. 7 Short time constant current test

3 EKF算法的寿命修正

为了考察电池老化程度对SOC估计准确度的影响, 本文采用一组测试电流对完全老化的锂电池和半老化锂电池进行了测试, 测试电流如表2所示。由上述可知, 电池老化主要引起直流内阻增大, 而对RC环节影响不明显。因此, 在EKF

算法中,主要应对电池模型中的欧姆内阻进行修正。图8为老化、半老化电池的电压响应曲线。从图8中可以看出,随着内阻值的增大,在充放电过程中,老化电池的电压响应幅度要大于半老化电池。

表2 验证SOC算法所用测试电流

Tab. 2 Testing current for verifying SOC algorithms

步骤1	步骤2	步骤3	步骤4	步骤5	步骤6	循环次数 (1~6)	总时间
1.5C 充电 620 s	UDDS 工况	1.0C 充电 600 s	UDDS 工况	2.5C 放电 150 s	静置 310 s	4	25 856 s

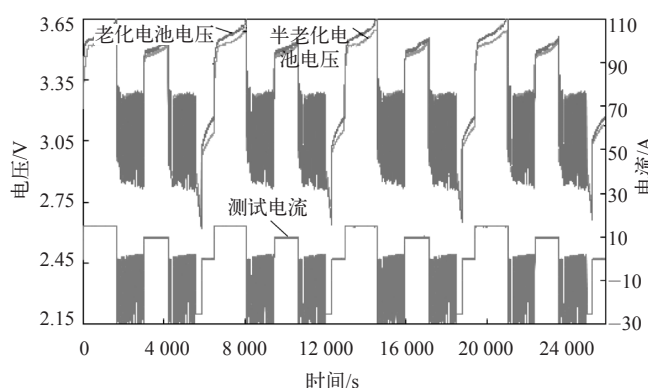
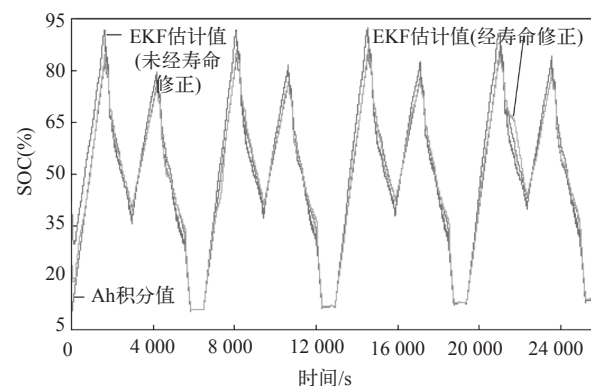


图8 综合工况测试电流电压曲线

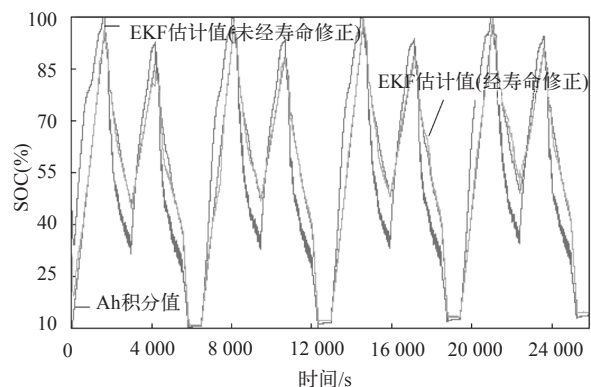
Fig. 8 Current and voltage curve tested under comprehensive working conditions

图9为老化、半老化电池在综合测试工况下,基于双极化内阻模型的SOC估计结果。测试开始前根据电池实际容量,通过放电法将SOC调整至10%,同时设置算法中的初始SOC为50%。从图9中可以看出,当电路模型中的参数未考虑老化因素影响时,EKF算法表现出较大的估计误差,其中半老化电池SOC的最大估计误差达到12.2%,而老化电池达到23.6%。在充电过程中SOC估计值要高于实际值,而在放电过程中估计值要低于实际值,随着老化程度的加深,这一现象更加明显。对此,给出了如下解释:随着电池内阻的增大,老化电池在充电过程中的电压平台要高于新电池,而放电过程中的电压平台低于新电池;由于电路模型中参数未考虑老化因素影响,当模型计算电压和实测电压偏差较大时,自适应算法会将电压差异产生的部分原因归咎于电池SOC的误差,从而造成SOC的过度修正。在考

虑欧姆内阻增大的情况下,根据图6对模型参数进行了修正,其中半老化电池的最大估计误差降低到了8.9%,而完全老化电池的估计误差降低到了10.7%,如图9所示。



(a) 半老化电池



(b) 完全老化电池

图9 不同老化程度电池仿真结果

Fig. 9 Simulation results of batteries with different aging degrees

4 结束语

本研究以双极化内阻模型为SOC算法的基础,考察了电池老化程度对SOC估计准确度的影响。通过实验分析得到,电池老化主要会引起模型中欧姆内阻的增大,而RC环节随循环次数的增加,变化不明显。在电池寿命周期内,当电池模型未进行内阻修正时,老化电池的SOC估计误差达到了23.6%;而修正后的SOC估计误差可以控制在11%以内,大大提高了估计准确度。

参考文献

- [1] 雷治国,张承宁,雷学国,等.电动汽车用锂离子电池热特性和热模型研究[J].电工电能新技术

- 术, 2015, 34(12): 59-64.
- LEI Zhiguo, ZHANG Chengning, LEI Xueguo, et al. Research on thermal characteristics and thermal model of EVs lithium-ion battery[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(12): 59-64.
- [2] 荣雅君, 杨伟, 牛欢, 等. 基于BP-EKF算法的电动汽车电池管理系统SOC精准估计 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(1): 30-35.
- RONG Yajun, YANG wei, NIU Huan, et al. Accurate estimation of SOC value of electric vehicle battery based on EKF algorithm optimized by BP neural network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1): 30-35.
- [3] 杨海学, 张继业, 张晗. 基于改进Sage-Husa的自适应无迹卡尔曼滤波的锂离子电池SOC估计 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(9): 22-28.
- YANG Haixue, ZHANG Jiye, ZHANG Han. States of charge estimation of lithium-ion battery based on improved Sage-Husa adaptive unscented Kalman filters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(9): 22-28.
- [4] 华周发, 李静. 电动汽车动力电池SOC估算方法综述 [J]. 电源技术, 2013, 37(9): 1686-1689.
- HUA Zhoufa, LI Jing. Summary of methods for state of charge estimation of EV power batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(9): 1686-1689.
- [5] 时玮, 姜久春, 李索宇, 等. 磷酸铁锂电池SOC估算方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 769-774.
- SHI Wei, JIANG Jiuchun, LI Suoyu, et al. Research on SOC estimation for LiFePO₄ Li-ion batteries[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(8): 769-774.
- [6] 季迎旭, 杜海江, 孙航. 蓄电池SOC估算方法综述 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(4): 18-22.
- JI Yinxu, DU Haijiang, SUN Hang. A survey of state of charge estimation methods[J]. electrical Measurement and Instrumentation, 2014, 51(4): 18-22.
- [7] Zhao X W, Cai Y S, Yang L, et al. State of charge estimation based on a new dual-polarization-resistance model for electric vehicles [J]. Energy, 2017, 135: 40-52.

作者简介



赵小巍

赵小巍 (1984-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为SOX算法。

(收稿日期: 2018-06-22) **EA**