

混合动力全地形车用动力电池SOC算法研究

辛龙威, 虎普军, 漆利国

(赛格威科技有限公司, 江苏 常州 213161)

摘要: 针对混合动力全地形车用动力电池 SOC 准确度难以控制问题, 对不同的 SOC 算法进行了分析, 最终选定安时积分法加开路电压法与扩展卡尔曼滤波算法进行仿真测试, 测试过程分别给初值 SOC 和实时测量电流值注入误差, 试验结果表明基于扩展卡尔曼滤波的 SOC 算法鲁棒性更强, 能够有效消除初始 SOC 值和电流测量准确度带来的误差, 在测试的动态工况下, SOC 误差小于 2%, 很好地满足混合动力全地形车的实际应用要求。

关键词: 混合动力; 全地形车; SOC

The research of SOC for hybrid all-terrain vehicle power battery

XIN Longwei, HU Pujun, QI Ligu

(Segway Technology Co., Ltd., Changzhou 213161, China)

Abstract: In order to solve the problem that the SOC accuracy of the power battery for hybrid all-terrain vehicles power battery is difficult to control, different SOC algorithms were analyzed, ampere-hour integral method plus open-circuit voltage method and the Extend Kalman filter algorithm are selected for simulation test, errors are injected into the initial SOC and the real-time measurement current value respectively. The test results show that the SOC algorithm based on extended Kalman filter is more robust and can effectively eliminate the error caused by the initial SOC value and current measurement accuracy. Under the dynamic conditions of the test, The SOC error is less than 2%, which satisfies the practical application requirements of hybrid all-terrain vehicles.

Key words: hybrid; all-terrain vehicle; SOC

0 引言

全地形车, 国内一般称作“沙滩车”, 已经广泛应用于户外娱乐、工作和军事等各个领域。2019年11月5号, 赛格威发布了全球首款混合动力全地形车系, 正式进入 Powersports 领域。动力电池系统作为混合动力全地形车的重要组成部分, 其性能和健康状态严重影响全地形车的使用寿命, 电池管理系统对于动力电池的使用非常重要, 而 SOC 的准确估算是保证电池管理安全可靠的关键因素之一^[1]。不同于电压、温度和电流, SOC 无法直接测量, 必须通过能够测量的

信号值进行计算, 而混合动力全地形车的工况比较复杂, 充放电倍率较大且存在恶劣的工作环境(如沙漠、雪地等), 准确的 SOC 计算是难点之一。常用的 SOC 算法一般包括安时积分法、开路电压法、充电修正法和扩展卡尔曼滤波算法等。文献[2]中研究了基于容量修正的安时积分法, 该方法对初值依赖过高。文献[3]和[4]中均是将开路电压法运用于电动摩托车, 无法实现在线修正, 必须充分静置。本文对 SOC 的误差进行了分析, 详细分析了不同 SOC 算法的原理, 并首次将扩展卡尔曼滤波算法运用于全地形车领域, 与采用开路电压法和安时法的效果进行对比。

1 SOC定义与误差分析

1.1 SOC定义

SOC定义为荷电状态(State of Charge)，国标定义为当前蓄电池中按照规定放电条件可以释放的容量占可用容量的百分比，简化的公式为

$$\text{SOC} = \frac{\text{Cap_left} \pm \int i t}{\text{Cap_total}} \times 100\% \quad (1)$$

式中，Cap_left为剩余容量； $\int i t$ 为实时充放电容量；Cap_total为可用总容量。

1.2 SOC误差分析

从式(1)中SOC的计算过程可以看到，SOC的误差主要来源于电流的误差和电池容量的误差，电流误差主要是由传感器误差和BMS采集误差产生的，电池容量误差主要来源于容量不一致、电池自放电、电池老化和温度的变化。

2 SOC方案

为了准确地计算SOC，一般的方法包括安时积分法、开路电压法、充电修正法和扩展卡尔曼滤波算法。

2.1 安时积分法

安时积分法即通过电流和时间的乘积，累积电池在充电和放电过程中的容量值来估算SOC，计算简单，软硬件容易实现，在工程中应用最为广泛，但是存在累积误差以及对初值SOC值准确度依赖过高的问题，需要通过有效的修正策略对SOC累积误差进行标定。

2.2 开路电压法

在工作电流为0或接近0且长时间的静置后，可以认为电池的开路电压为其电动势，开路电压变化曲线如图1所示。电池先进行20 A电流放电之后，电流为0，经过1 h电池电压趋于稳定，此电压称之为OCV。在温度恒定的情况下，SOC与OCV存在对应的关系，该方法假定环境温度是恒定的，且没有考虑电池老化的影响。图2为某三元电池在25℃环境下OCV与SOC的关系曲线。

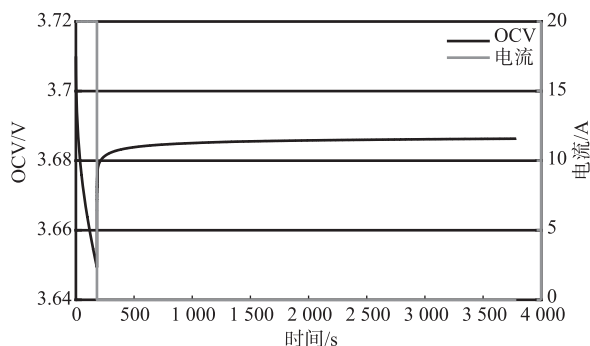


图1 开路电压变化曲线

Fig. 1 Open circuit voltage curve

当电池下电或者静置足够长时间后再次上电时，可以通过对应温度的OCV-SOC来对SOC初值进行标定，但是该方法也有局限性，需要静置足够长时间，无法实时对SOC误差进行修正，而且磷酸铁锂电池的OCV-SOC曲线存在较长的平台区，在平台区OCV变化较小，无法有效通过OCV-SOC的关系来对SOC进行修正。

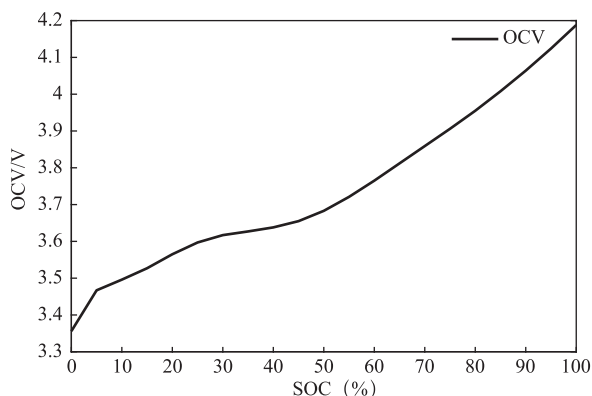


图2 OCV-SOC 曲线

Fig. 2 OCV-SOC curve

2.3 充电修正法

充电修正包括满充修正和充电过程中修正，满充修正比较简单，当电池通过外接充电机充电到截止电压时，将SOC修正为100，这里重点阐述充电过程中修正。

在不同环境温度、不同倍率电流持续充电情况下，测试电池在SOC为30%、50%、80%和90%四个点的端电压数据，当电池进行充电时，充电电流和电池温度进入某个数据区间，根据测得的数据对SOC进行修正，由于本文所研究的车

型不具备外接充电功能, 不考虑此方法。

2.4 扩展卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波 (EKF) 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。EKF算法包括如下两个方程: 状态方程 (2) 和量测方程 (3), 即

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k \quad (2)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (3)$$

式中, w_k 为系统噪声; v_k 为观测噪声。

图3为基于EKF的SOC算法的基本工作原理, 电流和初始SOC作为输入, 通过状态方程计算出SOC值, 并通过电池模型估算出端电压, 与实测端电压进行对比, 计算出卡尔曼增益并对SOC值进行修正, 经修正后的SOC值作为下次迭代预测模块的输入值, 再次进行上面的步骤, 直至寻找到全局最优的SOC估算值。

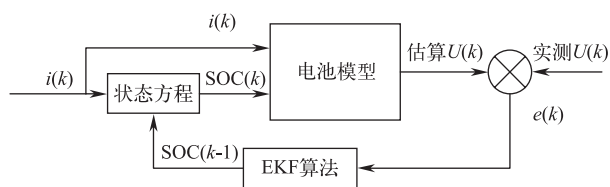


图3 基于EKF的SOC算法工作原理

Fig. 3 Work principle of SOC algorithm based on EKF

EKF算法的主要开发过程依次为电池数据测试、电池模型搭建、算法开发、仿真测试、代码转换、系统集成和实车验证。电池数据测试主要包括容量标定、HPPC测试和OCV-SOC测试。电池模型选用一阶RC等效电路模型, 又称戴维南等效电路模型, 如图4所示。图4中 R_0 为欧姆内阻; R_p 为极化内阻; C_p 为极化电容。通过HPPC测试的数据进行拟合可以分别得到相应的值。

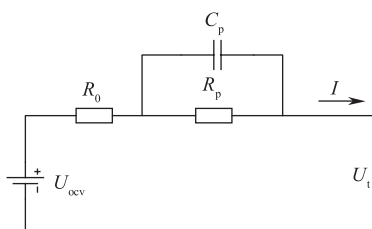


图4 戴维南等效电路模型

Fig. 4 Thevenin equivalent circuit model

EKF算法的主要计算过程为

$$X_k = AX_{k-1} + Bi_k \quad (4)$$

$$y = U_{ocv} + U_{RpCp} + U_{R0} \quad (5)$$

$$X_k^- = AX_{k-1} + Bi_k \quad (6)$$

$$P_k^- = AP_{(k-1)}A^T + Q_k \quad (7)$$

$$C = \frac{\partial y}{\partial z} \quad S_k = C_k P_k^- C_k^T + R_k \quad (8)$$

$$K_k = P_k^- C_k^T S_k^{-1} \quad (9)$$

$$X_k = X_k^- + K_k (u_k - y_k) \quad (10)$$

$$P_k = P_k^- - K_k S_k K_k^T \quad (11)$$

EKF算法能够在充放电过程中对SOC进行实时修正, 需要精确的电池模型, 特别适合于电流变化较快的工况, SOC初值对计算过程影响不大, 能够快速修正, 鲁棒性较高, 但是计算较为复杂, 对软硬件要求较高。

3 仿真验证

3.1 SOC模块框图

图5为整个SOC模块的程序框图, 每个模块均可以使能控制, RSOC为真实计算的SOC, USOC为加入了显示策略的SOC, 静态修正包括开路电压法, 本节分别对采用安时积分法加开路电压法与采用EKF算法的结果进行对比。

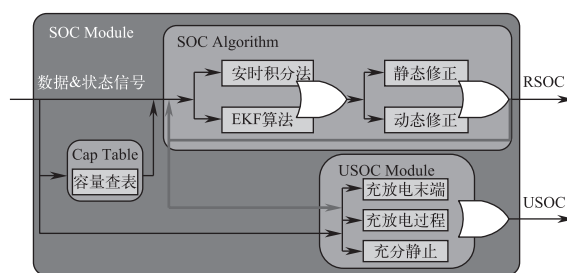


图5 SOC模块框图

Fig. 5 Block diagram of SOC module

3.2 安时积分法加开路电压法

图6为混合动力全地形车一个接近2 h的路测工况, 左侧为电流值, 右侧为SOC值。将该工况在实验室进行复测, 如图7所示。采用科威乐EBD系列电池包充放电测试电源, 通过读取该工况数据进行测试, SOC算法采用的是安时积分法

加开路电压法, 图8为最终的SOC对比图, 图9为SOC误差, SOC最大误差值为 -1.3% 。

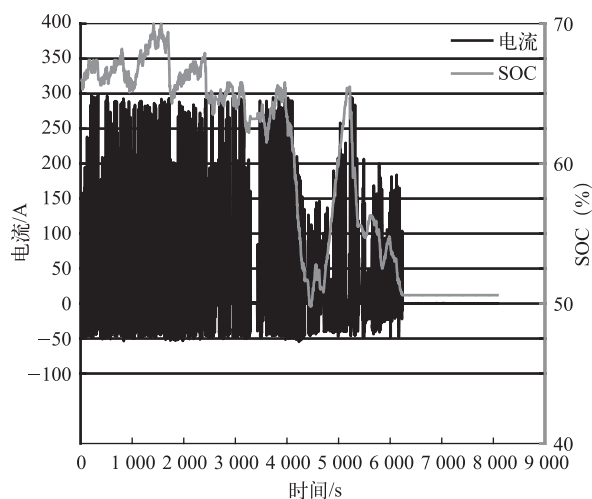


图6 路测工况

Fig. 6 Road test condition

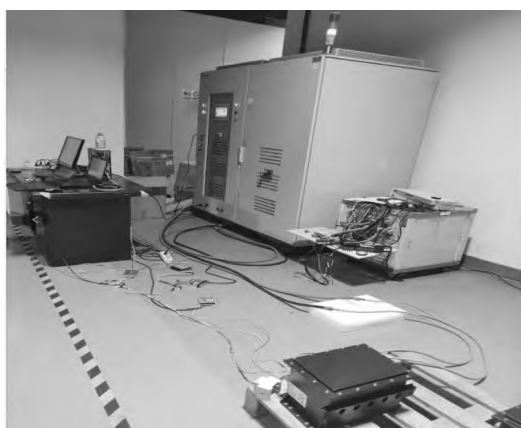


图7 测试台架

Fig. 7 Test bench

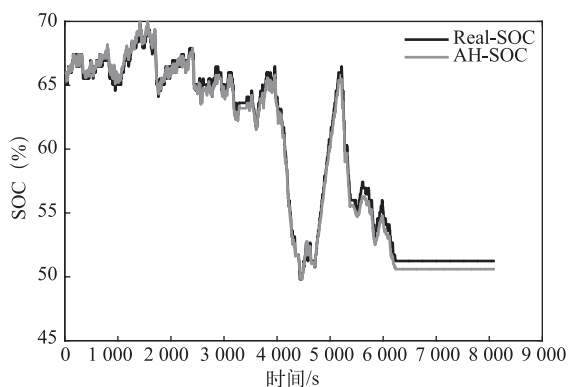


图8 AH-SOC 对比图

Fig. 8 AH-SOC comparison

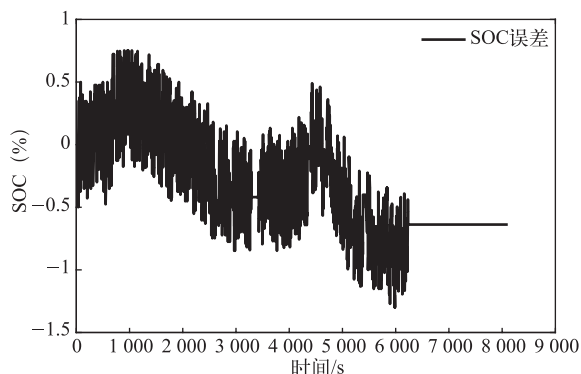


图9 AH-SOC 误差

Fig. 9 AH-SOC error

3.3 EKF算法

重新烧写软件, 采用EKF算法, 调整电池SOC值, 图10为试验得到的SOC图形, 图11为SOC误差, SOC误差最大为 -1.3% 。

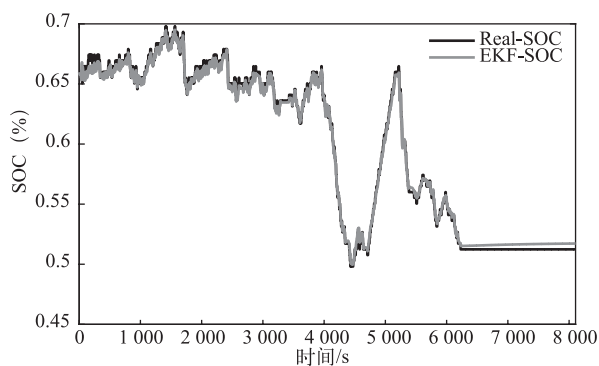


图10 EKF-SOC 对比图

Fig. 10 EKF-SOC comparison

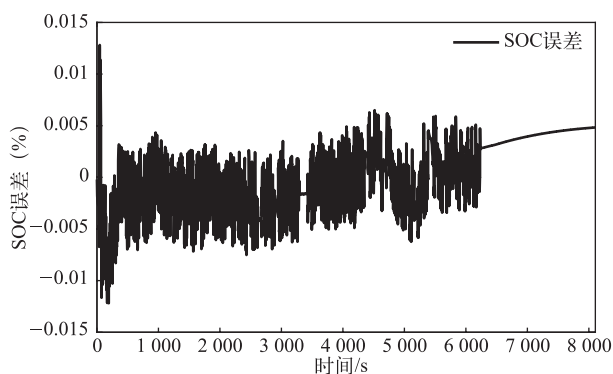


图11 EKF-SOC 误差

Fig. 11 EKF-SOC error

3.4 注入SOC初值误差

为了验证SOC初值对SOC计算准确度的影

响, 给SOC初始值加入5%误差, 图12为采用安时积分法后真实SOC与计算SOC的对比图。SOC最大误差为5.7%, 充放电过程中SOC误差进一步放大, 该算法不具备动态修正能力。

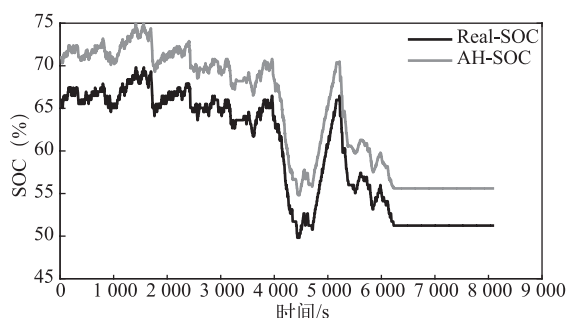


图 12 AH-SOC 对比图
Fig. 12 AH-SOC comparison

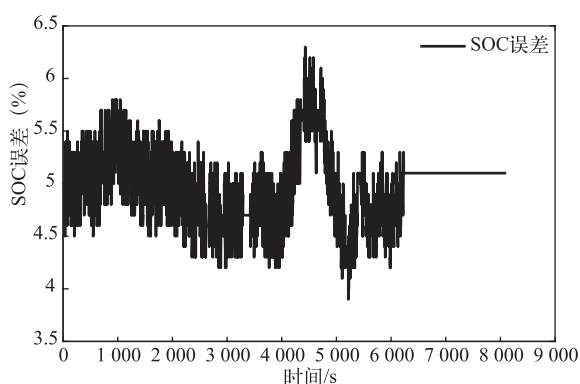


图 13 AH-SOC 误差
Fig. 13 AH-SOC error

图14为真实SOC与采用EKF算法的SOC计算值对比图, 图15为SOC误差, SOC误差快速减小, 除开起始修正阶段, 过程中SOC误差最大为-1.3%, 说明代入5%的初始误差对SOC准确度影响较小。

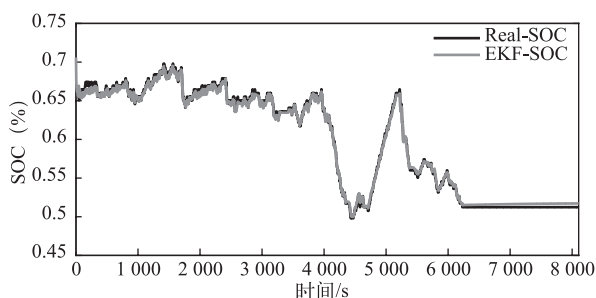


图 14 EKF-SOC 对比图
Fig. 14 EF-SOC comparison

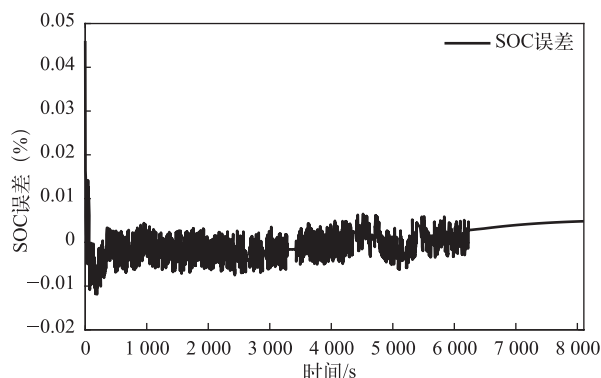


图 15 EKF-SOC 误差
Fig. 15 EKF-SOC error

3.5 注入电流误差

为了验证电流误差对SOC计算准确度的影响, 给采集的电流值加入固定1 A误差, 图16为采用安时积分法后真实SOC与计算SOC的对比图。SOC最大误差为10.08%, 充放电过程中SOC误差进一步放大, 该算法不具备动态修正能力。

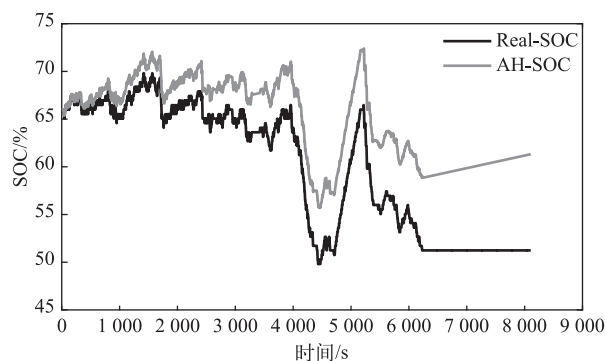


图 16 AH-SOC 对比图
Fig. 16 AH-SOC comparison

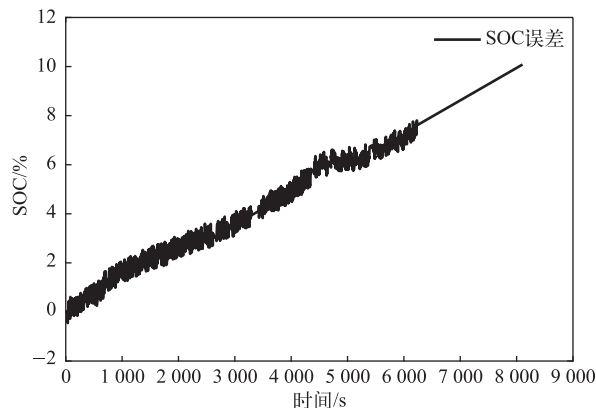


图 17 AH-SOC 误差
Fig. 17 AH-SOC error

图18为真实SOC与采用EKF算法的SOC计算值对比图，图19为SOC误差，整个工况过程中SOC误差最大为-1.98%，并未进一步发散，算法具备在线修正能力。

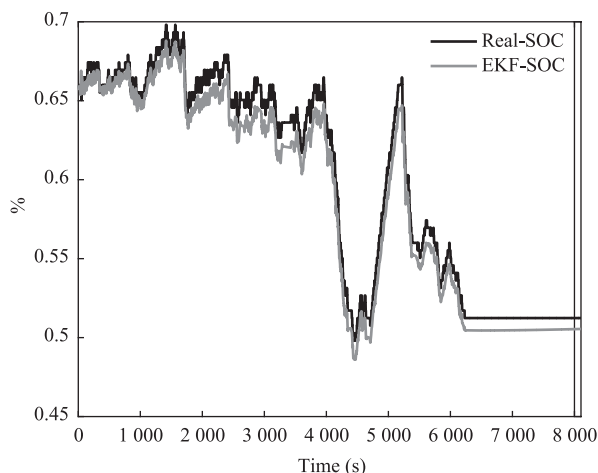


图 18 EKF-SOC 对比图

Fig. 18 EF-SOC comparison

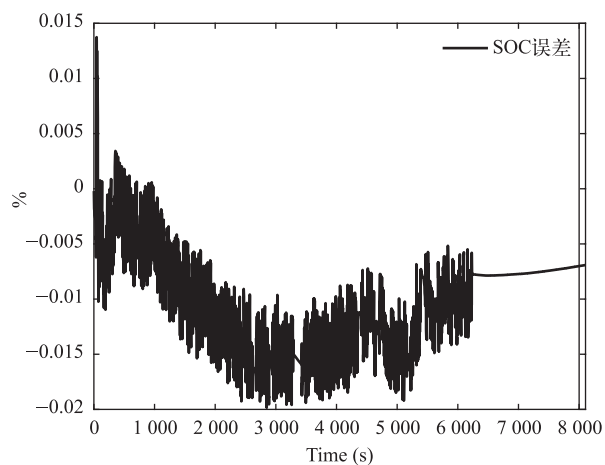


图 19 EKF-SOC 误差

Fig. 19 EKF-SOC error

参考文献

- [1] 赵小巍. 电动汽车锂电池老化状态下的SOC估算方法研究[J]. 电气应用, 2019, 38(8): 14-19.
- [2] 罗勇, 祁朋伟, 黄欢, 等. 基于容量修正的安时积分 SOC 估算方法研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(5): 681-687.
- [3] 苏开宇. 电动摩托车BMS硬件系统设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
- [4] 明莉. 增程式电动摩托车电池管理系统的研究与设计[D]. 重庆: 西南大学, 2014.

作者简介

辛龙威(1988—), 男, 研究生, 高级BMS工程师, 研究方向为新能源车用BMS。

虎普军(1989—), 男, 本科, 电气组负责人, 研究方向为新能源车三电系统。

漆利国(1981—), 男, 本科, 高级BMS工程师, 研究方向为新能源车用BMS。

(收稿日期: 2021-06-02)