

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.05.007

电动叉车的平滑显示 SOC 估算

李 光¹, 龙 吟^{1, 2}, 朱 浩²

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南宏迅亿安新能源科技有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对电动叉车实车运行充放电过程中在充电末端以及放电初端会出现 SOC 跳变的情况, 基于传统的安时积分法, 并与开路电压法相结合, 探索了开路电压和 SOC 的内在联系。结合最大电压、最小电压融合算法, 提出两种 SOC 平滑显示方案, 通过 Simulink 对两种方案进行了建模与仿真测试, 观测仿真结果以确定最优方案, 并将该方案实施至电动叉车中, 且根据 QC/T 897—2011《电动汽车用电池管理系统技术条件》进行 SOC 精度测试。测试结果表明, 最优方案下, 在整个充放电过程中 SOC 不发生跳变, 在 SOC 不低于 80% 的情况下, 估算精度为 1.30%; 在 SOC 不高于 30% 的情况下, 估算精度为 2.42%。

关键词: 电动叉车; SOC 平滑显示; 安时积分; 开路电压; 融合算法

中图分类号: TH242

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)05-0036-08

引文格式: 李 光, 龙 吟, 朱 浩. 电动叉车的平滑显示 SOC 估算 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(5): 36-43.

SOC Estimation for the Smooth Display of the Electric Forklift

LI Guang¹, LONG Yin^{1, 2}, ZHU Hao²

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Hongxun Yi'an New Energy Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the SOC jump occurring at the charging ending and the beginning of the discharge during the charging and discharging process of the electric forklift, based on the traditional ampere-time integration method and combined with open-circuit voltage method, an exploration has been made into the internal relationship between open-circuit voltage and SOC. With the maximum voltage and minimum voltage fusion algorithm combined, a proposal has been made of two SOC smooth display schemes, which are modeled and simulated by Simulink. The simulation results are observed to determine the optimal scheme, which will be implemented in the electric forklift truck, with a SOC accuracy test to be carried out according to Technical Conditions of Battery Management System for Electric Vehicles (QC/T 897—2011). The test results show that, under the optimal scheme, SOC does not experience any jump during the whole charging and discharging process, where the estimation accuracy is 1.30% with SOC no less than 80%, and 2.42% with SOC no more than 30%.

Keywords: electric forklift; smooth display of SOC; ampere-time integration; open-circuit voltage; fusion algorithm

收稿日期: 2018-10-29

基金项目: 湖南省重点研发计划基金资助项目 (2017GK2201)

作者简介: 李 光 (1963-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事复杂机电一体化系统建模与控制方面的教学与研究, E-mail: liguanguw@126.com

1 研究背景

近年来,随着能源的日趋紧张以及环境污染的日益严重,具有广泛应用前景的新能源汽车的发展日益受到重视,而新能源行业中的电动叉车更是发展迅速^[1]。电动叉车的能源管理策略开发对于电动叉车的实车运行尤为重要^[2]。对于电池能源开发来说,实时监控电池的相关参数,准确估算其荷电状态(state of charge, SOC),更有利于电动叉车的能源管理,也更有利于电动叉车进行均衡控制、充放电控制以及安全运行。

准确地估算电动叉车电池的荷电状态是电动叉车电池管理系统研究的热点问题以及重点问题, SOC的准确估算对于电动叉车的充放电策略、电池的循环寿命等都具有较大的影响。对于SOC估算,国内外的科研工作者们提出了很多经典的算法:主要有开路电压法^[3]、安时积分法^[4]、卡尔曼滤波法^[5]、神经网络法^[6],以及由安时积分法与开路电压法相结合^[7]的结合算法等。基于实车上的SOC估算方法一般为安时积分法,但是由于传统的安时积分法存在电流传感器的精度不够、电池老化等问题,在充电末端和放电初端会产生SOC跳变。在电动叉车实车工作运行过程中,传统的安时积分法在充电末端跳变,是因为电池循环次数增多导致其标称容量减少、电池电压达到截止电压而SOC未充满造成满电矫正等问题导致的;在放电初端跳变,是由于电池寿命问题开路电压(open circuit voltage, OCV)对应的SOC会产生变化,而因为重新上电SOC需要重新查SOC-OCV表,从而导致SOC跳变。

本文基于传统的安时积分法,并与开路电压法相结合;再结合最大电压和最小电压估算SOC融合算法,对电动叉车提出两种SOC平滑显示方案。最后,以DST(dynamic stress test)工况实验数据为基础,对两种方案进行建模仿真,并根据仿真结果确定最优方案,且将最优方案实施至电动叉车实车运行的充放电过程中。实车数据表明,该算法能够保证SOC不产生跳变;且由SOC精度测试结果表明,其具有较高的SOC估算精度。

2 SOC 及其测试环境

2.1 SOC 概述

根据美国先进电池联合会(The United States Advanced battery Consortium, USABC)发布的《电动汽车电池实验手册》,定义SOC为电池在一定的放电倍率下,剩余电量与相同条件下的额定电量的比

值^[8],即:

$$SOC=Q_c/Q_L \quad (1)$$

式中: Q_c 为电池剩余容量;

Q_L 为相同条件下的额定容量。

对于SOC估算,功能需求不一样对其定义可能有所区别;比如对于用户来说,用户主要需要从可用能力以及续航里程的角度去衡量SOC,对电池的剩余可用能量以及剩余的续航里程进行评估,确定电动汽车电池的使用寿命;而对于电池管理系统本身来说, SOC的数值直接与充放电策略相关, SOC低于20%时系统便会报警,这是从充放电策略以及报警机制的角度去衡量SOC。

影响SOC分析因素大致有可恢复因素与非恢复因素。其中,可恢复因素包括充放电倍率、温度、电池组的一致性;非恢复因素包括电池容量的衰减等,这是电池循环次数增加所不可避免的^[9]。

2.2 测试环境

SOC估算是用户观察续航里程的重要依据,也是电动汽车电池管理系统中的核心部分,整个电动叉车的电池管理系统如图1所示。

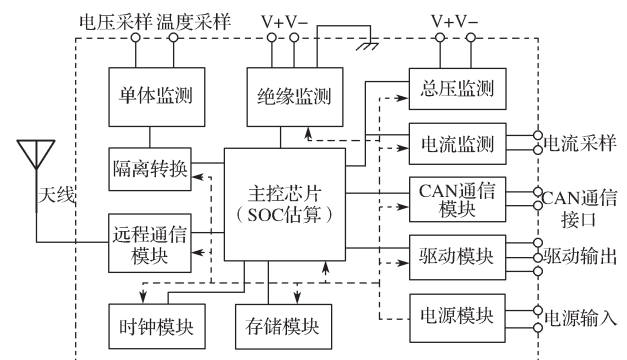


图1 电池管理系统框图

Fig. 1 Block Diagram of the battery management system

电动叉车以0.5C(C为充放电倍率)进行充放电,实时利用电池管理系统监控温度、电压等变量的变化,基于电动叉车的SOC估算环境分为硬件环境和软件环境。

1) 硬件环境。主芯片为MC9S12XEP100;电压平台为48V;电池管理系统(battery management system, BMS)电源输入为9~15 V_{DC} ,由电池包总电压经DC/DC转换为12V后给BMS供电;模拟前端芯片选型为LTC6804IG-1(工作温度为-40~85℃);磷酸铁锂电池(标称电压为3.2V,充电截止电压为3.65V,放电截止电压为2.8V,标称容量为400A·h)4组电池并联后再15组串联,且内阻基本一致。

2) 软件环境。采用状态切换、时间计时、优先级排序规划BMS执行任务时间,具体如图2所示。

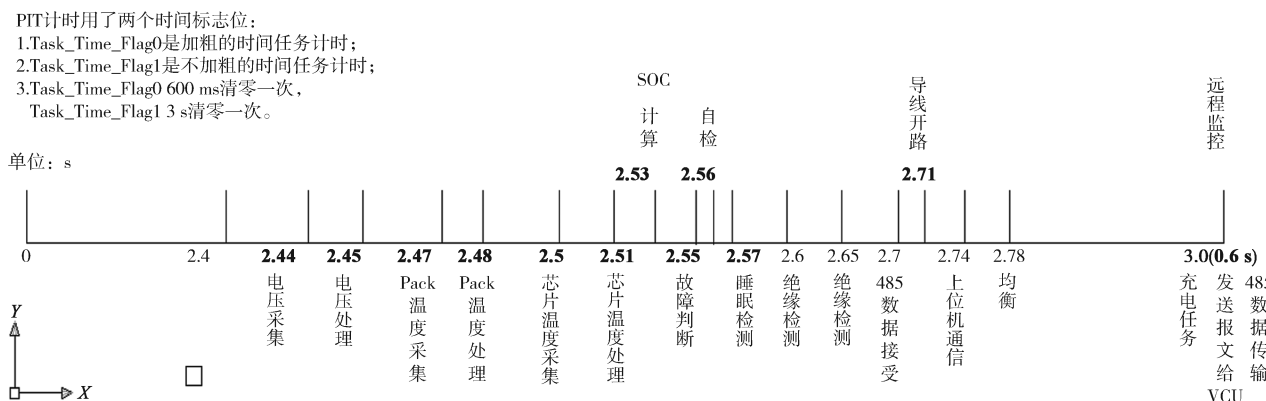


图2 BMS 软件任务时间分配图

Fig. 2 BMS software task time allocation diagram

3 安时积分 - 开路电压法

3.1 开路电压法

动力电池经长时间静置,其开路电压将会与电动势近似,因为电动势与 SOC 之间存在对应的函数关系,故可以根据测量的开路电压估算 SOC,这便是开路电压法,也称查表法。由于在实车运行中很难实现长时间静置,故常与其他算法相结合,以确定 SOC 的初值。

本文针对 SOC 与开路电压的函数关系,参考文献 [10] 进行简单介绍:当电池的两个电极处于平衡中时,每个电极都停留在晶体结构中的特定电位和固定锂含量,分别为 c_s^c 、 c_s^a (s 代表特定电位, c 代表正极, a 代表负极); SOC 可以由浓度向量表示如下:

$$\vec{c}_s = (c_s^c, c_s^a) \quad (2)$$

但由于电解质中的锂含量很难直接测量得到,因此选取了一个单值参数在平衡状态下可测量 -OCV,表达锂含量的浓度差异如公式 (3) 所示:

$$OCV = f_c(c_s^c, c_e^c) - f_a(c_s^a, c_e^a) \quad (3)$$

式中: f_c 和 f_a 分别为正负电极的锂离子浓度函数;

c_e^c 、 c_e^a 分别为与阴极和阳极相邻的电解质阶段浓度,平衡状态下 $c_e^c = c_e^a$,此时 OCV 只和 c_s^c 、 c_s^a 有关:

$$OCV = f_{\text{cell}}(c_s^c, c_s^a) = f_{\text{cell}}(\vec{c}_s) \quad (4)$$

OCV 和锂离子浓度有相应的关系,所以当电化学平衡时,可以通过 OCV 推断电池的 SOC。

文献 [11] 提出一种基于指数恢复电压的快速 OCV 预测方法,在恢复过程中只需要测量 3 个电压值,并且可以从二次方程中预测 OCV;文献 [12] 不考虑平衡电路的类型和存在,基于一个电池容量最小的电池重新定义 OCV-SOC 的关系,估算电池组的 SOC 和容量;文献 [13] 利用卡尔曼滤波器研究电池老化和电流变化对开路电压和 SOC 之间关系的影响;文献 [14] 通过使用 H 无穷滤波,从任何存在的

电流 - 电压测量中得到 SOC-OCV 关系;文献 [15] 利用增值 OCV 测试与低电流 OCV 测试方法,在尽可能短的时间内对 OCV 进行在线估计,能够保证估算的 SOC 精度在 1% 以内。

本文中,拟通过 BTS20-5V/4*200A 型充电机对单体电池进行脉冲放电实验,获取 SOC-OCV 关系曲线,从而配合安时积分法确定其初值。具体的实验操作步骤如下:

- 1) 0.5 C 恒流恒压将单体电池充至满电,再静置 1 h (0.5C 是由于实车充放电都是 0.5C);
- 2) SOC 为 90%~100% 时,0.5C 放电每隔 2% 静置 1 h; SOC 为 0~90% 时,放电每隔 10% 静置 1 h;
- 3) 记录静置 1 h 后的电压数据,一一对应 SOC,得到的 SOC-OCV 曲线如图 3 所示。

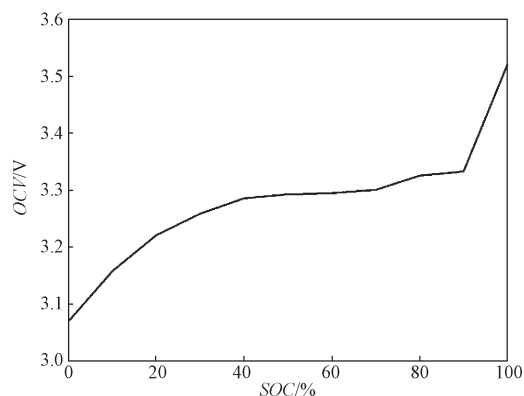


图3 SOC-OCV 曲线图

Fig. 3 Curve diagram of SOC-OCV

3.2 安时积分法

若记 SOC 的初始值为 SOC_0 ,则通过计算充放电电流和时间的积分,可由式 (5) 表示 SOC^[16]:

$$SOC = SOC_0 - \int_0^t \eta \times Idt / C_N \quad (5)$$

式中: C_N 为电池的标称容量;

I 为充放电电流 (其中放电为正,充电为负);

η 为库伦效率。

安时积分法不是对电池内部特性以及相关各参数之间的联系进行研究,而是将电池作为一个封闭的系统,实时监控进出这一封闭系统的电量,能够得出任意时刻的剩余电量。安时积分法相比其他算法,受电池内部特性的影响较小,不会发生回跳;但其精度十分依赖电流传感器的精度,如果电流采集不准确,就会导致累积误差,影响 SOC 的估算精度;电池的标称容量也会随温度、充放电次数的变化而变化,从而影响 SOC 的估算精度。

文献 [17] 基于传统安时积分法,初始 SOC 与实时 SOC 由开路电压法和卡尔曼滤波算法不断修正,以减少初始 SOC 误差与电流误差;文献 [18] 提出了一种通过将可用容量与电极粒子中可分解锂离子含量相关联的方法对 SOC 进行修正,可以在脉冲放电操作期间捕捉 SOC 的动态响应;文献 [19] 分析了影响安时积分法精度的有关参数,利用最小二乘法建立数学模型,实现对参数校正因子的确定。

3.3 融合算法

由于开路电压法能够确定初值,但不能在实车运行中实现随时确定;相较安时积分法,其初值不易确定,故将开路电压法和安时积分法相结合,以保证初值的准确性,同时将电流传感器带来的精度误差所引起的累积误差相对减少。本文采用的安时积分法与开路电压法相结合的 SOC 估算流程见图 4。

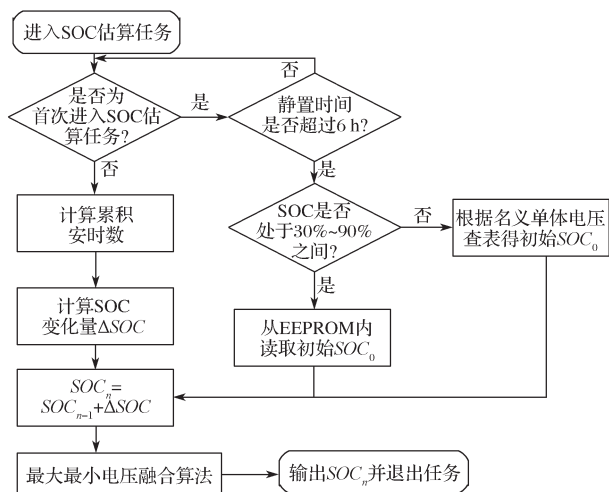


图 4 SOC 估算流程图

Fig. 4 Flow chart of SOC estimation

基于安时积分与开路电压的算法基础上,将最大电压和最小电压融合算法与其结合;融合算法是在查初始值时,由于在从控板进行电压采集的过程中存在最大电压和最小电压,故将最大电压和最小电压分别查 SOC-OCV 表得到对应的 SOC,再根据式 (6) 进行相关融合计算。

$$SOC_{cal} = SOC_{min_v} \times (1 - SOC_{cal}) + SOC_{max_v} \times SOC_{cal} \quad (6)$$

式中: SOC_{cal} 为计算的 SOC 值;

SOC_{min_v} 为最小电压查表计算的 SOC 值;

SOC_{max_v} 为最大电压查表计算的 SOC 值。

在放电过程中, SOC 低的时候,最小电压进行的 SOC 估算所占的比例大;同理, SOC 高的时候,最大电压进行的 SOC 估算所占的比例大。

4 SOC 平滑显示方案

4.1 问题描述

在电动叉车实际工况中,一般在充满电后,如果不直接进行实车工作,会先断电(比如前一天晚上充满电,第二天再进行工作);这种情况下就会重新上电,会再一次进行初值的确定,从而重新查取 SOC-OCV 表,由于静置较长时间和其他因素等带来的误差,会使得重新查表的过程中产生跳变: SOC 从 100% 跳到 96%;这在电动叉车实车运行中是不允许出现的,具体的现象由上位机提供原始数据(6 s 读取一次数据),如图 5 所示。

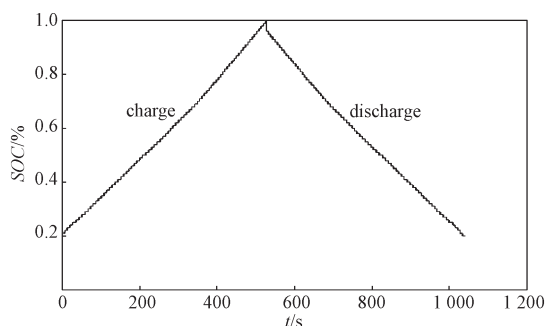
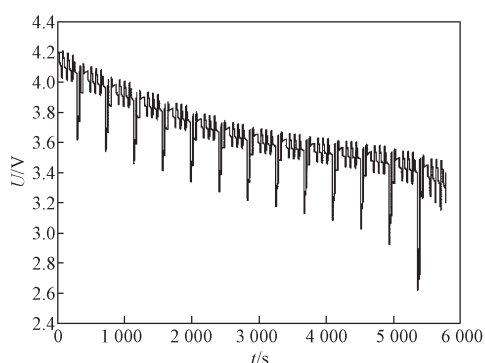


图 5 问题现象描述

Fig. 5 Problem description

4.2 方案对比

针对上述电动叉车在实际工作过程中的充电末端与放电初端由于重新上电而产生跳变的问题,以型号为 BTS20-5V/4*200A 的单体充放电电机对 2.2 A·h 单体电池进行 DST 工况实验,实验数据包括累计安时、电流和电压 3 部分,通过对电池进行恒功率放电、恒功率充电,以及静置得到实验数据,如图 6 所示。



a) 电压

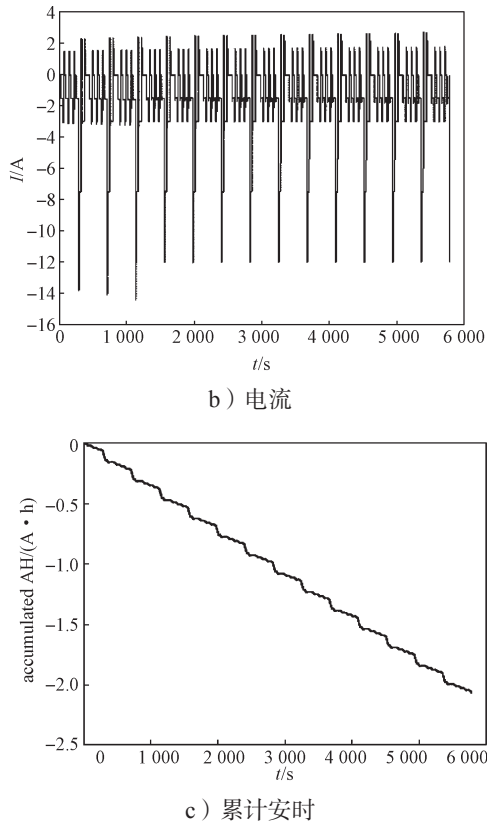


图 6 DST 工况的电压、电流、累计安时曲线

Fig. 6 Voltage, current, and cumulative AH curves under DST operating conditions

本研究以 DST 工况实验为基础, 提出两种 SOC 平滑显示方案, 通过 Simulink 建立相关的模型 (见图 7) 进行对比仿真实验, 以确定最优方案, 并进行电动叉车实车测试。

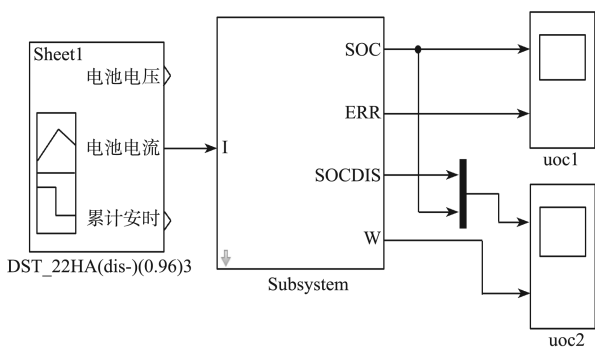


图 7 仿真模型全景图

Fig. 7 Panorama of simulation model

4.2.1 方案一

考虑重新上电会导致重新查表, 从而导致 SOC 跳变的问题, 让 SOC 读取存储在 MC9S12XEP100 里面的 eeprom 值, 这样保证不会跳变, 再根据公式 (7) 使初值读取的 eeprom 值的计算 SOC 平滑地逼近传统计算的 SOC, 从而解决电动叉车发生跳变的问题 (每隔 1 s 记录一次数据)。

$$SOC_{display_k} = SOC_{lookup} \times \left(\frac{SOC_{display_k-1}}{SOC_{eeprom}} \right) + SOC_{cal} \times \left(1 - \frac{SOC_{display_k-1}}{SOC_{eeprom}} \right), \quad (7)$$

式中: $SOC_{display_k}$ 为 k 时刻的显示 SOC;

$SOC_{display_k-1}$ 为 $k-1$ 时刻的显示 SOC;

SOC_{lookup} 为初值读取 eeprom 值的计算 SOC;

SOC_{cal} 为实际工作查表的计算 SOC;

SOC_{eeprom} 为重新上电读取的 eeprom 值。

通过 DST 工况实验的数据导入, 并通过 Simulink 的基础模块建模, 对初值不同的 SOC_{cal} 和 $SOC_{display}$ 进行仿真测试, 所得结果如图 8 所示。在仿真过程中, 设定 SOC_{cal} 初值为 0.92, $SOC_{display}$ 初值为 1。观测图 8 可得: $SOC_{display}$ 线性逼近 SOC_{cal} , 误差 (如图 9 所示) 呈线性减小, 但逼近的速度略显缓慢。

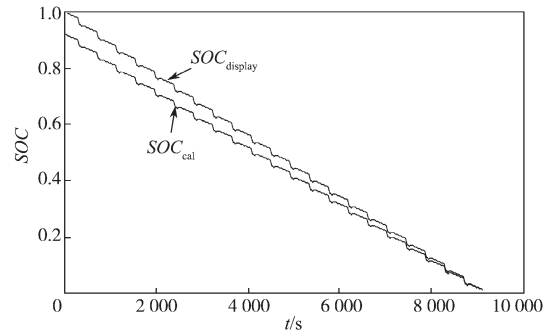


图 8 第一种方案的 SOC 仿真曲线

Fig. 8 SOC simulation curves under the first scheme

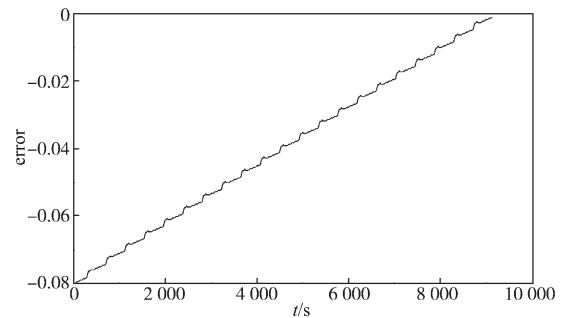


图 9 第一种方案的误差曲线

Fig. 9 Error curve of the first scheme

4.2.2 方案二

第二种方案采取的方法为 $SOC_{display}$ 的初值是读取 eeprom 的 SOC 值 (即重新上电时, 读取下电是 SOC 值), 通过公式 (8) 平滑地逼近计算 SOC, 从而保证 SOC 不再跳变, 并能够保证较高的精度。

$$SOC_{display_k} = SOC_{display_k-1} - \Delta t \times I / C_N + K(SOC_{cal} - SOC_{display_k-1}). \quad (8)$$

式中: $SOC_{display_k}$ 为 k 时刻初值读取 eeprom 值的显示 SOC;

$SOC_{displayk-1}$ 为 $k-1$ 时刻初值读取 eeprom 值的显示 SOC;

I 为 $0.5C$ 充放电电流;

C_N 为电池标称容量;

K 为修正速率系数。

通过对 DST 工况实验数据的导入, 并且结合 Simulink 的建模工作, 设定 SOC_{cal} 的初值为 0.92, $SOC_{display}$ 的初值为 1; 所得仿真结果如图 10 所示, 可见, $SOC_{display}$ 能够很迅速地逼近 SOC_{cal} , 误差 (如图 11 所示) 呈二次函数减小, 保证了足够高的 SOC 估算精度。

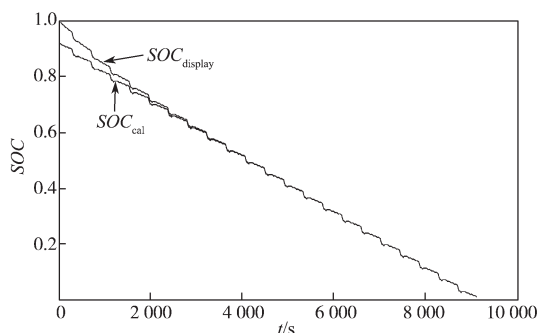


图 10 第二种方案的 SOC 仿真曲线

Fig. 10 SOC simulation curves under the second scheme

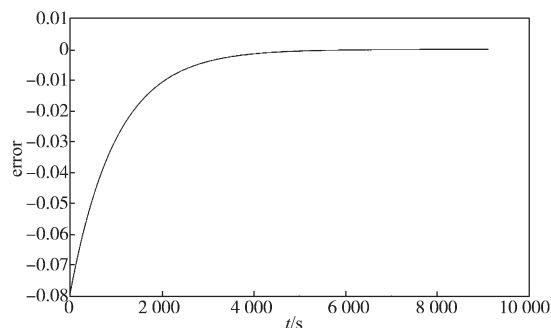


图 11 第二种方案的误差曲线

Fig. 11 Error curve under the second scheme

对比两方案的实验结果可以发现, 就逼近速度和误差的减小速度来看, 第二种方案更适用于实车, 能够保证足够高的 SOC 估算精度, 故接下来选取第二种方案用于实车中, 并进行电动叉车实车测试, 考查温度、电流、工况的不断变化是否对 SOC 平滑显示方案产生影响, 从而验证方案的可行性。

4.3 电动叉车实车测试

在上述仿真测试中, 第二种方案的逼近速度与误差减小速率更贴近电动叉车的实车运行情况。为了验证仿真测试的可行性, 本文将 Simulink 建立的 SOC 平滑显示模型思路植入电池叉车的软件编程语言中, 对 $SOC_{display}$ 和 SOC_{cal} 的实时变化进行观测, 并对比 Simulink 的仿真测试, 保证方案在电动叉车上的可行

性。实车测试如图 12 所示。



图 12 实车测试图

Fig. 12 Real picture of vehicle test

由于在电动叉车实车运行中, SOC 记录都为整数, 即 1%、2% 之类, 为了方便测试和观测数据, 改成 600 ms 读取一次数据, 并编写 0x1800C0F4 帧 ID 专门存放 $SOC_{display}$ 和 SOC_{cal} 的高字节和低字节, 以保证 SOC 的计算值出现小数, 更有利于观测两者之间的差值以及逼近速率。设置 SOC 的放电倍率为 $0.5C$, 记录的 SOC 曲线见图 13。

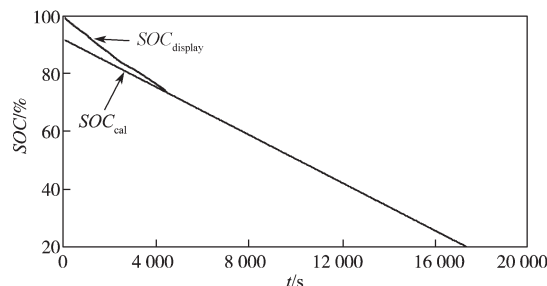


图 13 实车测试曲线

Fig. 13 Curves of real vehicle tests

由图 13 可知, $SOC_{display}$ 读取 eeprom 的初值为 100%, SOC_{cal} 设置初值为 92; $SOC_{display}$ 利用式 (8) 进行递推计算, 可从图中观测到 SOC 约为 74% 左右, $SOC_{display}$ 与 SOC_{cal} 基本一致; 在 74% 以后, $SOC_{display}$ 与 SOC_{cal} 完全一致, 直至放电至 20%; 放电至 20% 的原因是电动叉车程序协议设置中 SOC 低于 20% 就报警。

比较图 10 和图 13 所示的 SOC 变化曲线, 验证了 SOC 平滑显示方案的可行性, 在电动叉车实车运行中能够保证 SOC 不产生跳变, 并且以稳定的二次函数速率逼近计算 SOC, 即 SOC_{cal} , 说明 SOC 平滑显示方案用于电动叉车实车运行是可行的, 并且有不错的效果。

5 结果与分析

验证了方案在电动叉车实车运行的可行性之后,

进行相关的电动叉车跑车测试,在跑车测试中 SOC 在充电末端以及放电初端没有发生跳变。记录观测 SOC、电流、温度等参数的实时变化值,观测 SOC 与电流、温度变化间的联系。电动汽车实车运行工作数据如图 14 所示。

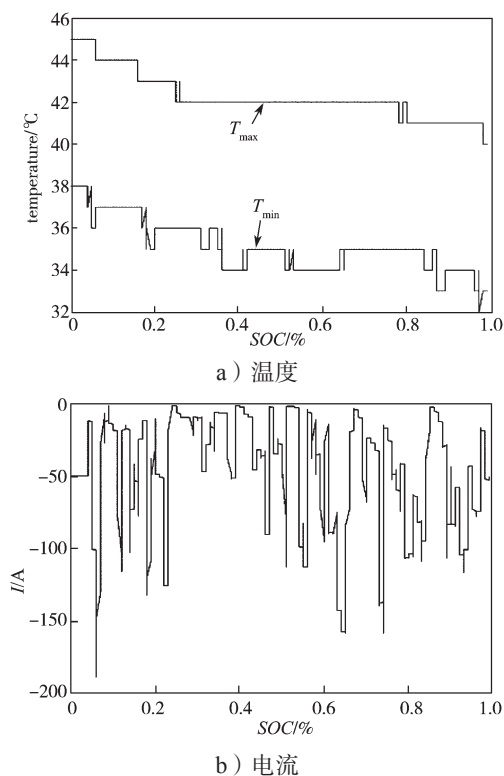


图 14 SOC 与温度、电流的实车曲线

Fig. 14 SOC, temperature and current real vehicle curves

如图 14 所示,电流随着电动叉车的实车运行是无规律不断变化的,温度总体上是随着 SOC 的不断增大而缓慢下降的。

针对基于电动叉车的 SOC 平滑显示方案,观测到实车测试中在充电末端与放电初端均不会产生跳变。本文根据汽车行业标准 QC/T 897—2011《电动汽车用电池管理系统技术条件》,按照 5.5 SOC 估算精度进行实验,比较在不同 SOC 范围内电池管理系统上报的 SOC 值与 SOC 测试真实值的偏差。在本次进行的 SOC 估算精度测试中,结果显示在 $SOC \geq 80\%$ 的情况下,估算精度为 1.30%;在 $SOC \leq 30\%$ 的情况下,估算精度为 2.42%;均具有较高的 SOC 估算精度,满足 QC/T 897—2011 标准中的要求。

6 结论

1) 本文针对电动叉车在实车运行过程中,由于重新上电查表在充电末端和放电初端会产生 SOC 跳变的问题,基于安时积分法-开路电压法与最大电压、

最小电压融合算法,提出了两种 SOC 平滑显示方案,读取存储在主芯片的 SOC_{ceprom} 初值,分别根据相应公式进行递推计算,获取 SOC 值。

2) 通过 DST 工况实验数据,对两种方案在 Simulink 平台上进行建模仿真测试,比较两种方案的仿真结果,最终确定第二种方案更优,并将算法植入电动叉车实车中进行方案可行性判断。将该方案与原始的计算 SOC 进行对比,证明该方案能够使 SOC 不发生跳变,以二次函数逼近计算 SOC。

3) 对 SOC 与温度、电流的相关参数进行记录,再根据 QC/T 897—2011《电动汽车用电池管理系统技术条件》进行 SOC 精度测试, SOC 平滑显示方案结果显示,在 $SOC \geq 80\%$ 的情况下,估算精度为 1.30%;在 $SOC \leq 30\%$ 的情况下,估算精度为 2.42%,具有较高的估算精度。

参考文献:

- [1] 孙 慧,王春利,高耀南. 铅酸蓄电池电动叉车电池改造技术的研究[J]. 科技通报, 2017, 33(12): 96-98, 174.
SUN Hui, WANG Chunli, GAO Yaonan. Research on the Transformed Battery Module on the Electric Forklift Used Lead-Acid Storage Battery[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(12): 96-98, 174.
- [2] WANG L L, ZHAO D X, WANG Y, et al. Energy Management Strategy Development of a Forklift with Electric Lifting Device[J]. Energy, 2017, 128: 435-446.
- [3] CHIASSON J, VAIRAMOHAN B. Estimating the State of Charge of a Battery[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3): 465-470.
- [4] 鲍 慧,于 洋. 基于安时积分法的电池 SOC 估算误差校正[J]. 计算机仿真, 2013, 30(11): 148-151, 159.
BAO Hui, YU Yang. State of Charge Estimation Calibration Based on Ampere-Hour Method[J]. Computer Simulation, 2013, 30(11): 148-151, 159.
- [5] KALMAN R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1): 35.
- [6] CHENG Anyu, WANG Yao. A Novel State of Charge Estimation Method of Batteries Using Recurrent Neural Networks[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Network, Communication, Computer Engineering (NCCE 2018). Paris: Atlantis-Press, 2018: 1175-1181.
- [7] DENG Y, HU Y L, CAO Y. An Improved Algorithm of SOC Testing Based on Open-Circuit Voltage-Ampere

- Hour Method[EB/OL]. [2018-10-20]. <http://www.docin.com/P-1356894891.html>.
- [8] FEDER D O, HLAVAC M J. Analysis and Interpretation of Conductance Measurements Used to Assess the State-of-Health of Valve Regulated Lead Acid Batteries[C]//Proceedings of Intelec 94. New York: IEEE, 1994: 282-291.
- [9] 王树明. 车载磷酸铁锂电池组动态工况下 SOC 预估算方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- WANG Shuming. Research on Algorithm of Estimation of SOC for Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicle in Dynamic State[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [10] LI Z, HUANG J, LIAW B Y, et al. On State-of-Charge Determination for Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2017, 348: 281-301.
- [11] DUAN Chen, WANG Caisheng, LIU Mingfang. A Fast Approach for Predicting Battery Open Circuit Voltage Based on Exponential Recovery Voltage[C]//Proceedings of 2017 North American Power Symposium(NAPS). New York: IEEE, 2017: 1-5.
- [12] CHANG Y C, GAB-SUS, SUNG H Y. State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Battery Pack Using Reconstructed Open-Circuit-Voltage Curve[C]//Proceedings of 2014 International Power Electronics Conference (IPEC- Hiroshima 2014 – ECCE ASIA). New York: IEEE, 2014: 2272-2276.
- [13] CAMPESTRINI C, KOSCH S, JOSSEN A. Influence of Change in Open Circuit Voltage on the State of Charge Estimation with an Extended Kalman Filter[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 12: 149-156.
- [14] XIONG R, YU Q Q, WANG L Y, et al. A Novel Method to Obtain the Open Circuit Voltage for the State of Charge of Lithium Ion Batteries in Electric Vehicles by Using H Infinity Filter[J]. Applied Energy, 2017, 207: 346-353.
- [15] LIN C, YU Q Q, XIONG R, et al. A Study on the Impact of Open Circuit Voltage Tests on State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries[J]. Applied Energy, 2017, 205: 892-902.
- [16] 马 燕. 磷酸铁锂电池模型参数与 SOC 联合估算研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- MA Yan. Research on Joint Estimation for Model Parameters and SOC of LiFePO₄ Battery[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [17] GUO Ligeng, HU Cungang, LI Guoli. The SOC Estimation of Battery Based on the Method of Improved Ampere-Hour and Kalman Filter[C]//Proceedings of 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA). New York: IEEE, 2015: 1458-1460.
- [18] YANG N X, ZHANG X W, LI G J. State of Charge Estimation for Pulse Discharge of a LiFePO₄ Battery by a Revised Ah Counting[J]. Electrochimica Acta, 2015, 151: 63-71.
- [19] QIAO Lixian, WANG Jing, ZHENG Baixiang. An Improved SOC Algorithm for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles[C]//Proceedings of 2013 IEEE 4th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. New York: IEEE, 2013: 313-316.

(责任编辑: 廖友媛)