

电池 SOE 估算法及在电动汽车工况下的应用

罗 玲^{1,2} 宋文吉¹ 林仕立¹ 冯自平¹

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用电池剩余能量状态(SOE)作为估算对象以提高预测的准确性。基于SOE的传统定义,分析充放电过程中电池能量消耗的形式及对SOE估算的影响,研究不同放电倍率下可用总能量的修正模型,并提出一种改进型SOE估算方法。NEDC、FUDS两种标准工况电动汽车的实验验证表明:改进型SOE算法的误差比传统SOE估算方法分别缩减4.6%和6.7%,可提高实际电池SOE估算的精度。

关键词: 能量状态(SOE); 荷电状态(SOC); 可用能量; 估算方法; 锂离子电池

中图分类号: TM912.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1579(2016)01-0031-04

SOE estimation method and its application in electric vehicle condition

LUO Ling^{1,2} SONG Wen-ji¹ LIN Shi-li¹ FENG Zi-ping¹

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An improved state of energy(SOE) estimation method was put forward by analyzing the influence of energy form to SOE estimation during operation and researching on the revised model of available energy through different discharge rate based on the traditional definition of SOE, then the improved SOE estimation method applied to two standard electric vehicle operating conditions NEDC and FUDS. The improved SOE estimation method had a smaller estimation error compared to traditional SOE estimation method, which could reduce the average accuracy of estimation of the SOE to 4.6% and 6.7% respectively.

Key words: state of energy(SOE); state of charge(SOC); available energy; estimation method; Li-ion battery

传统上,电池状态一般以荷电状态(SOC)进行描述,常见的估算方法有安时积分法、开路电压法和卡尔曼滤波法等^[1]。利用SOC从容量角度描述电池的电量,忽略了端电压的影响,在实际应用中难以与续航里程、续航时间等与能量/功率直接相关的预测参量线性对应;同时,SOC估算方法大部分仅以充放电倍率、温度等外部参数为标准,无法有效考虑电池内部生热等引起的能量损耗,在大电流充放电的工况下,存在较大的误差。

为了更精确地衡量电池的剩余电量,K. Mamadou等^[2-3]提出电池能量状态(SOE),可用于表示电池剩余能量的百分

比。近年来,SOE的定义及估算方法得到不断的完善,SOE估算考虑了高低温、变倍率等因素对释放能量的影响^[4],但电池能量形式与SOE之间的关系、不同情况下可用能量的确定等,仍未得到界定,因此估算仍存在较大的误差。

本文作者在定量比较不同倍率下SOE与SOC显示剩余电量差异性的基础上,结合现有SOE数学估算模型,基于磷酸铁锂(LiFePO₄)正极锂离子电池的电热转换特性,研究了不同放电状态下电池内部的能量损耗及对可用总能量的影响,提出一种改进型SOE估算方法,通过两种典型电动汽车(EV)测试工况,验证该SOE估算方法的精确性。

作者简介:

罗玲(1992-),女,江西人,中国科学院大学、中国科学院广州能源研究所硕士生,研究方向:储电系统热管理;

宋文吉(1978-),男,山东人,中国科学院广州能源研究所副研究员,博士,研究方向:大规模储电系统控制技术,本文联系人;

林仕立(1983-),男,广东人,中国科学院广州能源研究所助理研究员,硕士,研究方向:大规模储能控制技术;

冯自平(1968-),男,宁夏人,中国科学院广州能源研究所研究员,博士,博士生导师,研究方向:先进储能技术。

基金项目:广东省科技平台项目(2014B010128001),广州市科技计划项目(201509010018,201509030005)

1 SOC 与 SOE 的差异

随着电池技术的进步,常温下电池在允许的充放电倍率下一般可进行 100% 满充满放,不同倍率下的 SOC 没有明显差异;但当电池处于不同 SOC 状态时,面对不同的外界功率需求,所能提供的总能量实际上却存在较大差异。

本文作者以 20 Ah 软包装 LiFePO₄ 正极锂离子电池(尺寸为 7.2 mm × 174 mm × 250 mm,河南产)为研究对象,用 CT2001B 电池充放电设备(武汉产),以 0.5 ~ 2.5 C 的 5 种倍率对电池进行以 10% SOC 为单位的间歇性放电,在不同倍率下、不同 SOC 区间段内,电池释放的能量值见图 1。

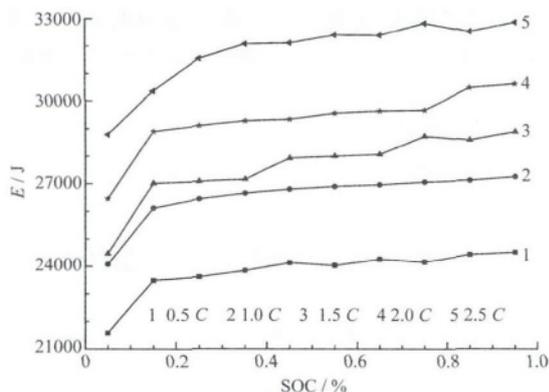


图 1 不同 SOC 区间段内锂离子电池释放的能量值

Fig. 1 Amounts of released energy of Li-ion battery at different SOC intervals

从图 1 可知,在同一放电倍率下,电池在较高 SOC 状态区间释放的能量较多;在较低 SOC 状态区间所能提供的总能量相应变小。在相同的 SOC 状态下,不同工况时电池的放电能力存在较大的差异,在电池允许的放电倍率下,释放的总能量随着倍率的增加而增加。

以 SOC 代表的电池当前状态,不能与外部功率有效对应,实际运行中的电池端电压变化也无法精确模拟,导致难以以为续航里程、续航时间等提供准确的预测条件,带来较大的估算误差。SOE 避免了 SOC 参数的不足,指代的电池能量与功率有较好的线性度,能更有效地反映电池当前时刻及之前充放电工况的影响,更适用于对续航的参数进行预测。

2 SOE 估算方法的改进

SOE 定义为电池剩余能量占可用总能量的百分比,数学表达式见式(1)。

$$\text{SOE}(t) = \frac{E_{\text{remaining}}}{E_{\text{rated}}} \times 100\% = 1 - \frac{W_e + W_h}{E_{\text{rated}}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:SOE(*t*)为电池运行过程中任一时刻的能量状态, $E_{\text{remaining}}$ 为电池的剩余能量, W_e 为消耗电能, W_h 为消耗热能, E_{rated} 为电池的额定能量。

在放电过程中,传统 SOE 估算方法的额定能量通过额定电压与额定电流的乘积得到,可认为是一个固定的参数;而消耗的能量则定义为电能与热能的总和。由于电池充放电过程属于电化学反应过程,可释放的能量受活性材料激发程

度的影响较严重。在不同的环境温度、充放电倍率和老化程度下,电池的可用能量不同,而内部热能的消耗,在电池不同状态下也存在较大的差异。需要从电池内部热能的组成形式及各种因素对可用总能的影响等方面着手,对传统 SOE 估算方法进行修正,以提高估算精度。

2.1 电池电热转换特性

电池充放电过程中的能量,一部分来自于外部的电能,另一部分为伴随着充放电过程在电池内部产生的热能。电池内部温升是热能损耗的直接体现,而不同工况下的升温情况对电池的应用存在较大影响,因此,考虑生热效应有助于提高电池 SOE 的估算精度。

电池内部热能主要由 4 个部分组成:由化学反应产生的反应热 Q_r 、欧姆电阻产生的欧姆热 Q_j 、电极溶解产生的极化热 Q_p 及气体生成产生的副反应热 Q_s [5]。在正常情况下,电池充放电过程可认为是一个可逆过程,在一定的温度和压力下,满足不变的热力学关系 [6]。电池反应热可由温度 T 与熵变 ΔS 的乘积表示,且化学反应产生的能量等于充放电过程中吉布斯自由能的变化,因此充放电过程中的反应热可由式(2)得到 [7]:

$$Q_r = T\Delta S = T(-\delta\Delta G/\delta T) = nFT(\delta E_c/\delta T) \quad (2)$$

式(2)中: ΔG 为吉布斯自由能变, n 为交换电子数, E_c 为电池端电压, F 为法拉第常数。

在忽略极化热及副反应热的情况下,电池充放电过程中内部的总生热量 Q 可由式(3)得到:

$$Q = Q_r + Q_j + Q_p + Q_s = nFT(\delta E_c/\delta T) + I^2(R_p + R_j) \quad (3)$$

式(3)中: R_p 、 R_j 分别为电池的极化电阻、欧姆电阻。

2.2 SOE 可用能量修正

电池可用能量的确定,是 SOE 估算的重要环节。电池内部实际可释放的能量在不同的运行工况下不同,SOE 的估算必须结合多个影响参数,根据实际运行条件进行修正。

电池内部温度是直接影响放电条件下材料活性的因素,环境温度、充放电倍率等导致电池温升的主要参数,均对可用能量有影响。从长时间使用的角度考虑,电池会存在老化问题,随着循环次数的增加,老化程度呈指数增长趋势,存储与释放能量的能力随着循环次数的增加而下降,可用能量也会相应降低 [8]。

考虑到客观条件,本文作者主要分析环境温度和充放电倍率与电池可用能量之间的关系。由于内部温度对材料化学活性的影响,电池在不同运行工况下所释放的能量并不相同。具体表现在:在低倍率、低温的环境下,电池内部的温度较低,受材料特性的影响,可放出的能量较少,但损耗的热能也将减少;在高倍率、高温的环境下,电池内部温度升高,可放出能量及热量的损耗都将增加,但受到安全工作温度的限制,电池温度过高时将自动停止放电,以防止温度继续上升而引起热失效。电池充放电过程存在理论上的最大总能,但实际放出的总能量均小于最大总能。

为了探索各个倍率、温度条件下实际可放出能量与最大总能之间的关系,以 25 °C 为外界环境温度起始点,通过不同

倍率的连续放电实验,得到各种工况下温度、电流对实际放电总能的影响关系,并在实际估算过程中对总能量参数进行动态修正,从而提高 SOE 的估算精度。根据以上分析,改进型 SOE 估算法可由式(4)表示:

$$SOE(t) = SOE_0 + [(\Delta E_e + \Delta E_h) / \eta(I, T) E_T] \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: SOE_0 为电池运行初始时刻的能量状态; ΔE_e 、 ΔE_h 分别为放电过程的电能和热能; E_T 为电池的最大总能量; $\eta(I, T)$ 为根据实验测得的修正参数。

3 标准 EV 测试工况验证

将得到的改进型 SOE 估算法应用到电动汽车领域,并以新欧洲循环工况(NEDC)、联邦城市行驶工况(FUDS)^[9]两种循环工况作为测试标准,用 CT2001B 电池检测设备(武汉产)通过放电实验得到改进型 SOE 估算模型与传统 SOE 估算模型的估算精度。

3.1 NEDC 工况

NEDC 是欧洲根据本地区市区和郊区道路车辆流量工况开发的循环工况,其中的一个典型充放电过程见图 2。

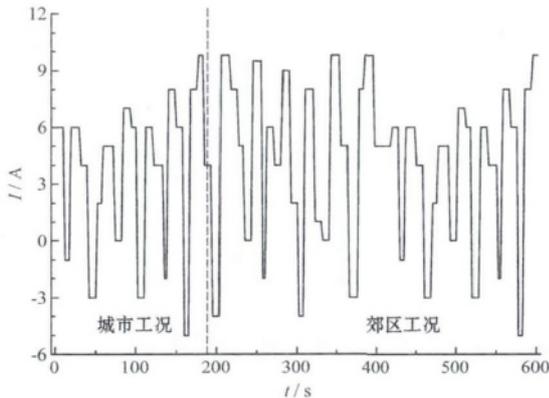


图 2 NEDC 循环工况

Fig. 2 NEDC operating cycle

通过放电实验法计算电池实际能量状态,连续若干个 NEDC 循环工况下两种估算方法的估算情况见图 3。

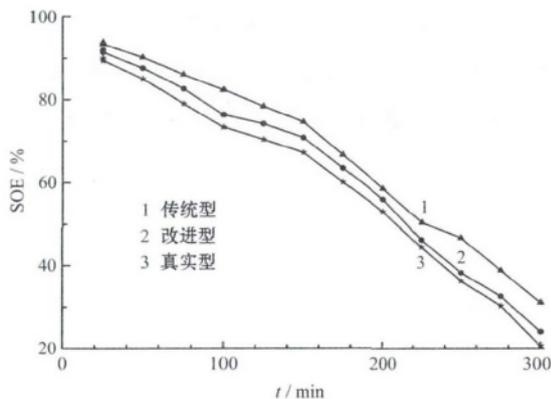


图 3 NEDC 工况循环下两种 SOE 估算方法的对比

Fig. 3 Comparison of two kinds of SOE estimation methods under NEDC operating cycle

从图 3 可知,改进型 SOE 估算法比传统 SOE 算法更趋近于实际值,估算结果具有较高的精度。随着周期性充放电的进行,传统 SOE 估算法由于电流误差与热能损耗误差的不断累积,越来越偏离实际 SOE 值;而改进型 SOE 估算法在整个实验过程中,均可保持较高的一致性。根据实验数据,可以计算得到在整体循环工况下,传统 SOE 估算方法的误差值为 8.2%,而改进型 SOE 估算方法的误差值为 3.6%,缩减了 4.6%,具有更高的估算精度。

3.2 FUDS 工况

FUDS 是由美国先进电池联盟根据电动汽车运行过程中储能元件电池充放电过程中的电流数据得到的,工况全长共 1 372 s,实验测试过程见图 4。

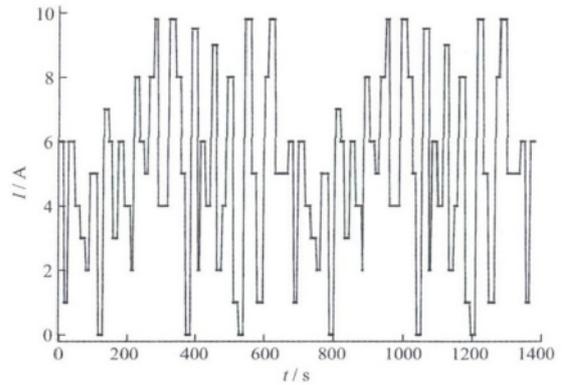


图 4 FUDS 循环工况

Fig. 4 FUDS operating cycle

FUDS 工况循环过程中存在频繁的充电和放电过程,基本类似于 NEDC。为了将两者区别开,本文作者将充电电流倍率转化成对应的放电倍率,以便更好地检验 SOE 估算法在 FUDS 工况中的效果。连续若干个 FUDS 循环工况下,两种估算方法的估算情况见图 5。

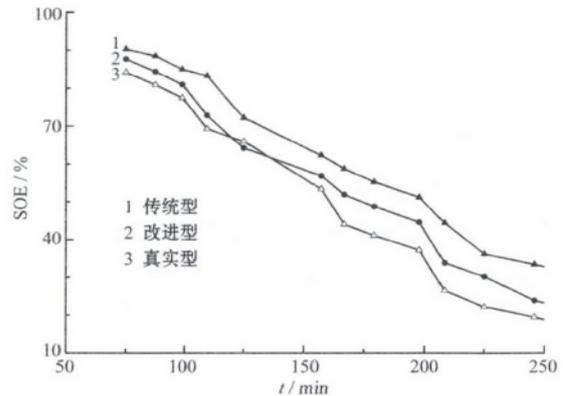


图 5 FUDS 工况循环下两种 SOE 估算方法的对比

Fig. 5 Comparisons of two kinds of SOE estimation methods under FUDS operating cycle

从图 5 可知,改进型 SOE 估算法较传统 SOE 估算法具有更高的估算精度,同时,由于实验过程将充电状态转换为放电状态,整个放电过程的时间缩短,导致单位时间内的累积误差增加,在一定程度上加大了两估算方法的误差精度。根据计算可知:在 FUDS 工况下,传统 SOE 估算法

的误差值为 11.2% ,改进型 SOE 估算方法的误差为 4.5% ,相比传统方法缩减了 6.7% 。

4 总结

电池能量状态 SOE 从能量角度出发对电池状态进行表征,是电池管理系统中的重要参数之一。本文作者通过分析电池充放电过程中内部的热能形式及其变化特性,对 SOE 估算过程中数学模型的能量消耗参数以及可用总能参数进行修正,提出了一种改进型的 SOE 估算方法。以 NEDC 工况及 FUDS 工况作为测试标准进行实验验证,结果表明:改进型 SOE 算法相比传统 SOE 估算方法具有更小的估算误差,可有效提高实际电池 SOE 估算的精度。

参考文献:

- [1] ZHANG Y H ,SONG W J ,LIN S L *et al.* A critical review on state of charge of batteries [J]. *J Renew Sustain Ener* ,2013 ,5(2) : 1 431 - 1 439.
- [2] MAMADOU K ,DELAILLE A ,LEMAIRE-POTTEAU E *et al.* The state-of-energy: a new criterion for the energetic performances evaluation of electrochemical storage devices [J]. *ECS Trans* 2010 25 (35) : 105 - 112.
- [3] DONG T K ,MONTARU M ,KIRCHEV A *et al.* Modelling of lithi-

um iron phosphate batteries by an equivalent electrical circuit (II) . Model parameterization as function of power and state of energy(SOE) [J]. *ECS Trans* 2011 ,35(32) : 229 - 237.

- [4] WANG Y J ,ZHANG C B ,CHEN Z H. A method for joint estimation of state-of-charge and available energy of LiFePO₄ batteries [J]. *Appl Energ* 2014 ,135(8) : 81 - 87.
- [5] DU S L ,JIA M ,CHENG Y *et al.* Study on the thermal behaviors of power lithium iron phosphate (LFP) aluminum-laminated battery with different tab configurations [J]. *Int J Therm Sci* ,2015 ,89: 327 - 336.
- [6] JI Y ,ZHANG Y C ,WANG C Y. Li-ion cell operation at low temperatures [J]. *J Electrochem Soc* 2013 ,160(4) : A636 - A649.
- [7] YI J ,KIM U S ,SHIN C B *et al.* Modeling the temperature dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery in low environmental temperature [J]. *J Power Sources* ,2013 ,244: 143 - 148.
- [8] LUO Ling(罗玲) ,SONG Wen-ji(宋文吉) ,LIN Shi-Li(林仕立) *et al.* 锂离子电池热模型的研究现状 [J]. *Battery Bimonthly(电池)* 2015 45(5) : 280 - 283.
- [9] USABC. *Electric Vehicle Battery Test Procedures Manual* [S].

收稿日期: 2015 - 11 - 07

46 年精心打造的品牌 荣获首届“国家期刊奖”的杂志

欢迎订阅《电池》杂志

2016 年全年定价为 60 元,邮局、银行汇款均可办理!

《电池》是中国最早对国内外公开发行的电池专业科技期刊,40 多年来,《电池》杂志全心全意为国内外读者服务。

《电池》荣获首届“国家期刊奖”,并进入“中国期刊方阵”“双高”期刊行列,荣获了第二届、第三届国家期刊奖百种重点期刊奖,连续两次被评为全国优秀科技期刊,并多次荣获省、部级优秀期刊一等奖。

《电池》在国内外享有崇高的声誉,已发行到 30 多个国家和地区。

《电池》是中文核心期刊,以报道应用技术和科研成果为主,兼顾国内外生产经验和动态。《电池》可供电池界人士及高校师生、研究人员阅读参考;也为商业、商检、外贸、消费者和电池用具设计生产人员所必备。

联系地址: 湖南省长沙市仰天湖新村 1 号《电池》杂志社

邮政编码: 410015

电 话: 0731 - 85141901

E-mail: batterie@ qq. com

联系人: 李 胜 罗秋珍

传 真: 0731 - 85427570

batterie@ yeah. net

开户行: 中国光大银行长沙劳动路支行

账 户: 湖南轻工研究院有限责任公司

账 号: 79160 1880 0001 9094

batterie@ 126. com