

文章编号:1671-251X(2019)01-0065-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018060036

矿用储能电池荷电状态精确估计方法

张建文, 齐明辉, 王政, 严家明

(中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:针对基于安时积分法的矿用储能电池荷电状态估计易产生累计误差的问题,提出一种基于改进安时积分法的矿用储能电池荷电状态精确估计方法。该方法引入温度校正系数、老化程度校正系数和充放电倍率校正系数,通过校正电池容量实现电池荷电状态精确估计;在电池荷电状态为0~15%,90%~100%时,用电池端电压代替开路电压,对改进安时积分法所得结果进行实时校正。实验结果表明,该方法可提高矿用储能电池荷电状态估计精度,估计误差基本控制在±3%以内。

关键词:矿用储能电池; 电池管理系统; 电池荷电状态; 荷电状态估计; 安时积分法; 电池充放电
中图分类号:TD60 **文献标志码:**A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181218.1038.001.html>

An accurate estimation method for state of charge of mine-used energy storage battery

ZHANG Jianwen, QI Minghui, WANG Zheng, YAN Jiaming

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract:For the problem that accumulative error was easy to occur in estimation for state of charge (SOC) of mine-used energy storage battery based on ampere-hour integration method, an accurate estimation method for SOC of mine-used energy storage battery based on improved ampere-hour integration method was put forward. In the method, temperature correction coefficient, aging degree correction coefficient and charging-discharging ratio correction coefficient are introduced to correct battery capacity, so as to realize accurate estimation of battery SOC. Battery terminal voltage is used to replace open circuit voltage when battery SOC is from 0 to 15% or from 90% to 100%, then the estimation results obtained by the improved ampere-hour integration method are corrected real-timely. The experimental results show that the method can improve estimation precision of SOC of mine-used energy storage battery, and the estimation error is within ±3%.

Key words:mine-used energy storage battery; battery management system; state of charge; state of charge estimation; ampere-hour integration method; battery charging-discharging

0 引言

煤矿井下需配备自救器、救生舱、避难硐室等必要的应急救援设备^[1-3]。发生煤矿事故后,通过大容量储能电池为救生舱、避难硐室等进行紧急供电。

高效的电池管理系统是储能电池可靠运行的保障,其主要功能包括防过充、防过放、短路保护、过温保护、荷电状态(State of Charge, SOC)估计和均衡控制等^[4-5]。

SOC为电池当前剩余容量与电池实际可用容

收稿日期:2018-06-16;修回日期:2018-12-05;责任编辑:李明。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFF0210600)。

作者简介:张建文(1968—),男,宁夏贺兰人,教授,博士,研究方向为高电压、电气设备状态监测与故障诊断、设备性能检测及质量评价技术, E-mail:2736190026@qq.com。通信作者:齐明辉(1992—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为矿用电池管理系统, E-mail:1083369077@qq.com。

引用格式:张建文,齐明辉,王政,等. 矿用储能电池荷电状态精确估计方法[J]. 工矿自动化,2019,45(1):65-69.

ZHANG Jianwen, QI Minghui, WANG Zheng, et al. An accurate estimation method for state of charge of mine-used energy storage battery[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 65-69.

量的比值^[6],其精确估计是电池管理系统主要功能得以实现的前提。目前 SOC 估计方法主要有开路电压(Open Circuit Voltage,OCV)法、卡尔曼滤波估计算法、人工神经网络、安时积分法、滑模观测法等^[7]。文献[7-8]采用卡尔曼滤波估计算法在线估计电池 SOC,具有较高的精确度,但该方法对电池模型的精确度要求较高;文献[9]采用神经网络估计电池 SOC,在训练数据较少时估计精度较低;文献[10]采用安时积分法估计电池 SOC,该方法原理简单、易于实现、对硬件要求低、可靠性较高,得到广泛应用,但其难以确定电池的初始 SOC,且在估计过程中易产生累计误差,估计精度会随时间推移而逐渐下降。

针对基于安时积分法的电池 SOC 估计方法存在的问题,本文提出采用电池容量的温度校正系数、老化程度校正系数、充放电倍率校正系数对安时积分法进行改进,进而得到一种矿用储能电池 SOC 精确估计方法。实验结果表明,该方法能够提高矿用储能电池 SOC 估计精度,且可以在充放电关键时期消除累计误差对估计精度的影响。

1 矿用储能电池的运行状态

矿用大容量储能电池主要应用于避难硐室、救生舱等,其长期工作于浮充电的储备待用状态,浮充电时间长且电流小。根据《煤矿安全规程》要求,应急救援设备的备用电源正常工作时输出功率要恒定,而且要可靠运行 96 h 以上。因此储能电池通常采用小电流恒流放电方式,放电电流小且放电时间长。矿用储能电池充放电电流曲线如图 1 所示。

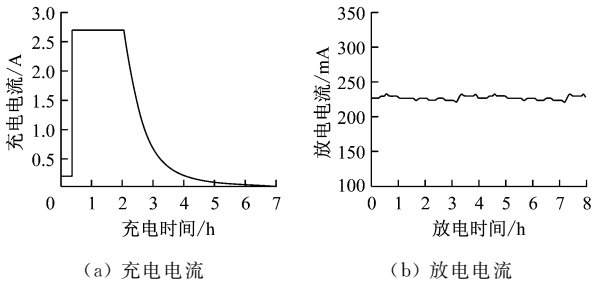


图 1 矿用储能电池充放电电流曲线
Fig. 1 Charging-discharging current curves of mine-used energy storage battery

2 基于安时积分法的电池 SOC 估计及其改进

2.1 电池 SOC 估计基本原理

安时积分法用于电池 SOC 估计时可表述为

$$S_t = S_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i dt \tag{1}$$

式中: S_t 为电池在 t 时刻的 SOC; S_0 为电池初始

SOC; C 为电池额定容量; i 为电池电流,充电时为负,放电时为正。

由于矿用储能电池运行环境的特殊性,采用安时积分法估计电池 SOC 时容易出现累计误差,导致电池过充过放,影响电池安全运行,缩短电池使用寿命,严重时会引起爆炸^[11]。在电池充放电过程中,需要不断对电池 SOC 估计进行实时校正,以保证电池安全运行。

电池 SOC 估计精度受电池初始 SOC、温度、老化程度、充放电倍率的影响,所以在 SOC 估计过程中引入温度校正系数 η_T 、老化程度校正系数 η_L 、充放电倍率校正系数 η_C 。改进的电池 SOC 估计表达式为

$$S'_t = S_0 - \frac{1}{\eta_L \eta_T \eta_C C} \int_0^t i dt \tag{2}$$

校正系数定义为电池实际容量/额定容量,对于相同规格的电池具有普适性。实际容量受温度、老化程度和充放电倍率的影响, η_T 、 η_L 、 η_C 分别为温度、老化程度和充放电倍率的函数,通过电池的温度、老化程度、充放电倍率实验曲线获得。

2.2 电池 SOC 估计改进方法

选用同一批次生产的标准 18650 锂离子电池(标称电压为 3.2 V,最大充电截止电压为 3.6 V,放电截止电压为 2 V,额定容量为 2 700 mA·h),分别进行电池初始 SOC 测定实验、不同温度下的放电实验、浮充电老化实验和不同放电倍率下的放电实验。根据实验结果得到电池初始 SOC 和 3 种校正系数。

2.2.1 电池初始 SOC 的确定及 SOC 实时校正

安时积分法难以确定电池 SOC,所以进行电池初始 SOC 估计时,首先需要通过 OCV 法确定电池初始 SOC。电池 SOC 与 OCV 存在一一对应关系,如图 2 所示。根据 OCV 可通过查表方式确定电池初始 SOC。

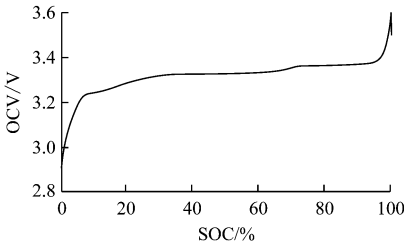


图 2 电池 SOC 与 OCV 关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between battery SOC and OCV

通过 OCV 确定电池初始 SOC 时,需要电池静置足够长时间,以消除电池内部电池极化电压对 OCV 测量准确性的影响,因此在电池工作过程中,不宜采用 OCV 在线判断电池 SOC^[12]。本文选取端

电压等效代替 OCV,对电池 SOC 进行实时在线校正,根本原因在于储能电池的充放电电流非常小(浮充电时可保持在 30 mA 以内),因电池内阻对 OCV 产生的影响基本可以忽略不计。

为了进一步提高电池 SOC 估计精度、减小误差,只在充放电关键阶段(充放电末期)对电池 SOC 进行实时校正。由图 2 可知,电池 SOC 在 0~15% 和 90%~100% 时,SOC 与 OCV 关系曲线的斜率较大,OCV 与 SOC 的线性关系容易辨识。而矿用储能电池 SOC 长时间处于 90% 以上,因此在这一阶段对电池 SOC 进行校正更具有针对性。校正后的 SOC 为

$$S_T = \alpha S'_t + (1 - \alpha) S_m \tag{3}$$

式中: α 为修正因子,通过枚举法确定其取值范围为 0.8~1; S_m 为通过端电压查表所得的电池 SOC。

式(3)适用于 $S'_t \leq 15\%$ 或 $S'_t \geq 90\%$ 时的情况,此时可用端电压代替 OCV 进行校正,能够有效提高 SOC 估计精度。在 $15\% < S'_t < 90\%$ 时按照式(2)估计电池 SOC。

2.2.2 温度校正系数的确定

温度通过改变电池内部的化学反应进程来影响电池的实际容量。温度过低时,电解液的黏滞度增加,带电粒子运动阻力随之增大,使得化学反应不够充分,电池实际容量相应下降;温度升高时,电池内部的活化能增大,化学反应更加充分,电池实际容量增加。但是长时间工作在高温状态下会缩短电池的使用寿命,给电池带来不可逆的损伤^[13]。

电池的工作温度会影响电池实际容量,由温度与温度校正系数关系曲线(图 3)可知,不同温度下电池实际容量差异性较大。因此,在电池 SOC 估计过程中,温度对估计精度的影响不可忽略。实际应用中可直接测量电池本体温度,通过图 3 可查表确定该温度下的温度校正系数。

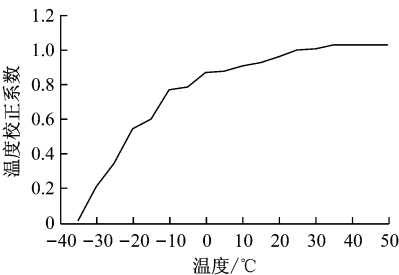


图 3 温度与温度校正系数关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between temperature and temperature correction coefficient

以 25℃ 为基准来校正电池实际工作温度对电池实际容量的影响:

$$C_K = \eta_T C_b \tag{4}$$

式中: C_b 为 25℃ 下电池的额定容量; C_K 为校正后电池在温度 K 时的实际容量。

2.2.3 老化程度校正系数的确定

电池实际可放出的最大电量是表征电池老化程度的重要指标^[13]。随着电池老化程度的加剧,电池实际容量逐渐衰减。电池的老化主要由循环充放电或长时间存储引起^[14-15]。而矿用储能电池长时间工作在浮充电状态下,其老化是由浮充电引起的,不属于上述 2 种老化,且老化速度介于循环充放电和长时间存储引起的老化速度之间。矿用储能电池浮充电时间与老化程度校正系数关系曲线如图 4 所示。根据图 4 可查表确定电池的老化程度校正系数。

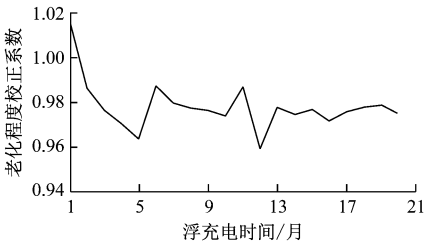


图 4 电池浮充电时间与老化程度校正系数关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between battery floating charging time and aging degree correction coefficient

2.2.4 充放电倍率校正系数的确定

定义标准温度下,电池以 0.2 C 充放电倍率进行放电时的库伦效率 $\eta = \eta_T \eta_L \eta_C = 1$, η 与放电电流呈负相关关系。放电电流越大,则电池的库伦效率越低,电池实际放电量越小^[14]。矿用储能电池的充放电倍率小于 0.2 C, η 大于 1,实际容量大于额定容量。因此在充电过程中需要实时对充放电倍率进行校正,以保证电池容量能够得到充分利用,同时防止电池过充^[15]。电池充放电倍率与充放电倍率校正系数关系曲线如图 5 所示。根据图 5 可查表确定电池的充放电倍率校正系数。

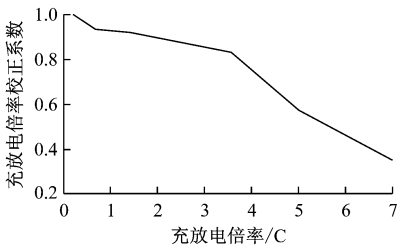


图 5 充放电倍率与充放电倍率校正系数关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between charging-discharging ratio and charging-discharging ratio correction coefficient

2.3 电池 SOC 精确估计方法

对基于安时积分法的电池 SOC 估计进行改进后,得到矿用储能电池 SOC 精确估计方法,其流程如图 6 所示。

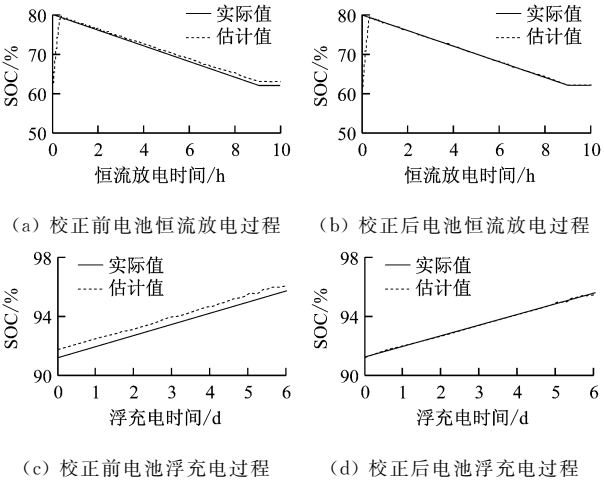
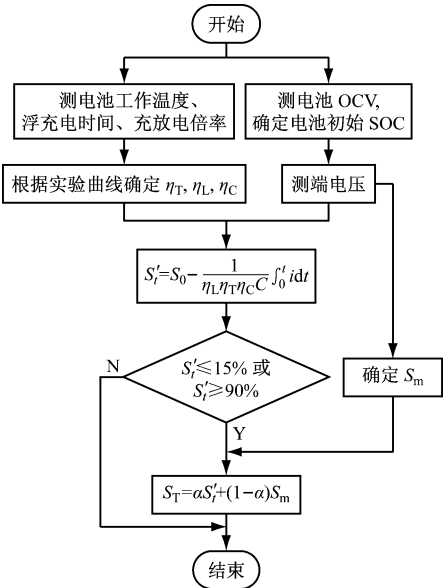


图 7 电池 SOC 曲线
Fig. 7 Battery SOC curve

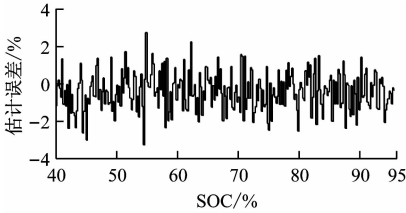


图 8 电池恒流放电时 SOC 估计误差曲线
Fig. 8 Estimation error curve of battery SOC during constant current discharging

图 6 矿用储能电池 SOC 精确估计流程
Fig. 6 Accurate SOC estimation flow of mine-used energy storage battery

3 实验及结果分析

采用如图 1 所示的充放电电流对 18650 锂离子电池进行充放电实验,测量电池 SOC 与 OCV,结果见表 1、表 2。

表 1 充电过程中电池 SOC 与 OCV 部分测量值
Table 1 Partial measurement value of battery SOC and OCV during charging process

SOC/%	0	20	40	60	80	100
OCV/V	2.82	3.24	3.29	3.32	3.33	3.33

表 2 放电过程中电池 SOC 与 OCV 部分测量值
Table 2 Partial measurement value of battery SOC and OCV during discharging process

SOC/%	100	80	60	40	20	0
OCV/V	3.42	3.33	3.29	3.28	3.22	2.01

从表 1 和表 2 可看出,电池充放电过程中,相同 SOC 对应的 OCV 具有一定的差异性。因此,进行 SOC 估计时需要根据电池工作状态的不同分别确定初始 SOC。实验测得的电池 SOC 曲线如图 7 所示,SOC 估计误差曲线如图 8 所示。可看出矿用储能电池 SOC 精确估计方法可较好地跟踪电池实际 SOC 变化,估计误差较小,基本控制在±3%以内,满足《矿用隔爆(兼本安)型锂离子蓄电池电源安全技术要求》相关规定,且不会随充放电时间的推移而累计误差。

4 结语

考虑到矿用储能电池的特殊运行环境,提出对

基于安时积分法的电池 SOC 估计进行改进,进而提出一种矿用储能电池 SOC 精确估计方法:在电池 SOC 估计过程中,引入温度校正系数、老化程度校正系数和充放电倍率校正系数,通过校正电池容量来实现 SOC 精确估计;在估计的关键阶段(电池 SOC 在 0~15%,90%~100%),用端电压代替 OCV,对改进安时积分法所得结果进行实时校正。对矿用储能电池进行充放电实验,结果表明该方法可提高电池 SOC 估计精度,估计误差基本控制在±3%以内。

参考文献(References):

[1] 孙继平. 煤矿井下紧急避险与应急救援技术[J]. 工矿自动化, 2014, 40(1): 1-4.
SUN Jiping. Technologies of emergency refuge and rescue used in underground coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(1): 1-4.

[2] 孙继平. 煤矿井下避难硐室与救生舱关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 713-717.
SUN Jiping. The key technologies of the refuge chamber and rescue capsule in the underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 713-717.

[3] 孙继平. 煤矿井下紧急避险系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 69-71.

SUN Jiping. Research on emergency refuge system in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2011,39(1):69-71.

[4] 欧阳佳佳. 储能电池管理系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.

[5] 童广浙. 磷酸铁锂储能电池管理系统设计[D]. 南宁:广西大学,2013.

[6] 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.

[7] HE Hongwen, XIONG Rui, PENG Jiankun. Real-time estimation of battery state-of-charge with unscented Kalman filter and RTOS μ COS-II platfrom [J]. Applied Energy,2016,162:1410-1418.

[8] 张金龙,佟微,漆汉宏,等. 平方根采样点卡尔曼滤波在磷酸铁锂电池组荷电状态估算中的应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6246-6253.
ZHANG Jinlong, TONG Wei, QI Hanhong, et al. Application of square root sigma point Kalman filter to SOC estimation of LiFePO₄ battery pack [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(22):6246-6253.

[9] 尹安东,张万兴,赵韩,等. 基于神经网络的磷酸铁锂电池 SOC 预测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2011, 25(5):433-437.
YIN Andong, ZHANG Wanxing, ZHAO Han, et al. Research on estimation for SOC of LiFePO₄ Li-ion battery based on neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2011, 25 (5):433-437.

[10] 于海芳,逯仁贵,朱春波,等. 基于安时法的镍氢电池 SOC 估计误差校正[J]. 电工技术学报,2012,27(6): 12-18.
YU Haifang, LU Rengui, ZHU Chunbo, et al. State of charge estimation calibration for Ni-MH battery based on ampere-hour method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(6):12-18.

[11] 林成涛,陈全世,王军平,等. 用改进的安时计量法估计电动汽车动力电池 SOC[J]. 清华大学学报(自然科学版),2006,46(2):247-251.
LIN Chengtao, CHEN Quanshi, WANG Junping, et al. Improved AH counting method for state of charge estimation of electric vehicle batteries [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2006,46(2):247-251.

[12] 李哲,卢兰光,欧阳明高. 提高安时积分法估算电池 SOC 精度的方法比较[J]. 清华大学学报(自然科学版),2010,50(8):1293-1296.
LI Zhe, LU Languang, OUYANG Minggao. Comparison of methods for improving SOC estimation accuracy through an ampere-hour integration approach[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2010,50(8):1293-1296.

[13] 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.
BAO Hui, YU Yang. State of charge estimation calibration based on ampere-hour method [J]. Computer Simulation,2013,30(11):148-151.

[14] 马俊,龚国庆,陈勇,等. 不同工况对锂离子电池 SOC 预估精度的影响[J]. 电源技术,2016,40(12): 2335-2338.
MA Jun, GONG Guoqing, CHEN Yong, et al. Influence of different driving cycle on precision of SOC estimation [J]. Chinese Journal of Power Sources,2016,40(12):2335-2338.

[15] HE Yao, LIU Xingtao, ZHANG Chenbin. A new model for state of charge (SOC) estimation for high-power Li-ion batteries[J]. Applied Energy,2013,101: 808-810.