锂电池健康状态估算方法研究

徐　猛[1]，闫炯炯[2]，李　骥[2]，陶训峰[2]

（1. 北京和瑞储能科技有限公司，北京 100144；
2. 国家电力投资集团有限公司安徽分公司，安徽 合肥 230000）

摘要：面对世界能源危机的挑战，我国在近几年大力发展新能源电动汽车，随着使用时间的增长、动力电池充放电次数的增多，动力电池的可用容量减少，性能老化，将不能满足电动汽车的动力需求，产生了许多老化的电动汽车动力电池。这些退役电池如果不经过适当处理直接丢弃，将导致资源浪费、环境污染，甚至还有安全隐患。如果随意匹配后直接再利用，将降低电池的性能，进一步损伤电池。所以需要研究如何对退役电池进行二次利用。为了使利用达到比较好的效果，必须根据电池特征对其进行筛选，介绍了目前比较热门的退役动力电池的健康状态估算方法，分析了各个方法的优劣。

关键词：锂电池利用；电池状态评估；特征提取；一致性分选；分组利用

Research on health state estimation method of lithium batteries

XU Meng[1], YAN Jiongjiong[2], LI Yi[2], TAO Xunfeng[2]

(1. Beijing HE Energy Storage Technology Co.,Ltd., Beijing 100144, China;
2. Anhui Branch of State Electric Power Investment Group Limited Corporation, Hefei 230000, China)

Abstract: Facing the challenge of the world energy crisis, China has vigorously developed new energy electric vehicles in recent years. With the growth of service time and the increase of charging and discharging times of power batteries, the available capacity of power batteries decreases and the performance is aging, which will not meet the power demand of electric vehicles, resulting in many aging power batteries of electric vehicles. If these retired batteries are directly discarded without proper treatment, it will lead to waste of resources, environmental pollution and even potential safety hazards. If the battery is directly reused after random matching, the performance of the battery will be reduced and the battery will be further damaged. Therefore, it is necessary to study how to reuse retired batteries. In order to achieve better results, it must be screened according to the characteristics of batteries. The popular feature extraction methods of retired power batteriesia introduced, and the advantages and disadvantages of each method is analyzed.

Key words: cascade utilization of battery; battery status assessment；feature extraction; consistency sorting; group utilization

0　引言

我国近几年通过政策加大力度推广电动汽车，根据我国的“十四五”规划，我国电动汽车及配套充电桩数量将超过2 000万[1-2]。随着电动

国家电投集团科学技术研究院有限公司电源侧创新课题研究项目（电源侧创新课题研究）

汽车动力电池充放电循环次数的增多，电池性能将逐年老化，容量减小。动力电池的容量在80%以上可以用来驱动汽车；在80%～40%时容量较低，可以用来建设储能电站等；当电池容量不足40%时，应当拆卸分解电池，回收其材料，再做利用[3]。目前对退役电池的处理方法有三种：不利用、随意匹配后利用和筛选后梯次利用。如果直接搁置和废弃退役电池，由于其内部的重金属大多是有害的，将会对人体造成伤害并引起环境污染[4-5]；退役电池内部老化，正负极隔膜容易发生错位，如果正负极之间短路，那么就有可能引起电池自燃[6]。如果对退役电池随意匹配后利用，由于退役电池的容量差别很大，将导致利用效率低下，且本身还存在安全隐患。例如，任取两节容量不同的电池匹配利用，它们充满电所需时间一定不同，先充满的电池就会被过充，容易发热、起火[7]，甚至有可能引起电池爆炸等安全性问题[8]。所以必须根据退役电池的特征对退役动力电池进行筛选，选出容量匹配的电池组后再进行利用。很多学者提出了不同的健康状态估算方法。

1 电池剩余容量及其健康状态

1.1 电池剩余容量和健康状态的定义

电池剩余容量是使用一段时间后的电池的一个特征。它描述的是退役电池在充满电后又完全放电所放出的电荷总数，可以用安时积分法得到。

电池健康状态能反映电池目前的性能状况。可以用当前电池充满电后可放出的全部电量与电池标准容量的比值得到。

1.2 电池剩余容量（SOC）和健康状态（SOH）的计算公式

电池剩余容量是通过安时积分法得到的，其计算公式为

$$\mathrm{SOC}=\int_{t_1}^{t_2} i(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中，SOC为电池储存的电量，$i(t)$为电池放出的随时间变化的电流；t_1和t_2为电池放电的开始和终止时间。

同时设定上、下限截止电压U_1和U_2，则电池电压$u(t)$有$u(t_1)=U_1$，$u(t_2)=U_2$。这样就可以测出电池的剩余容量。

常用的求电池健康状态的方法是通过电池的容量衰减来计算的。将退役电池的剩余容量和出厂初始容量进行比较，其计算式为

$$\mathrm{SHO}=\frac{Q_{\mathrm{old}}}{Q_{\mathrm{new}}}\times 100\% \tag{2}$$

式中，Q_{old}为退役电池能够释放的电量；Q_{new}为电池的额定容量。

2 电池健康状态的估算方法

2.1 容量测量法

对于退役电池来说，荷电状态（SOC）描述的是电池当前电量与电池剩余容量的比值。通过电池的开路电压（OCV）可以知道电池的SOC。从而通过式（3）求得电池的剩余容量为[9]

$$C_R=\frac{\int_{t_1}^{t_2} i(t)\mathrm{d}t}{\mathrm{SOC}_{t2}-\mathrm{SOC}_{t1}} \tag{3}$$

式中，C_R为电池老化后的可用容量；分子是在t_1～t_2期间内电池放出的总电量；分母是在t_1和t_2时刻电池的SOC，结合式（2）可计算出电池的健康状态。但是这样的方法有缺陷，即随着电池的老化，开路电压对应的SOC会改变。所以这样的方法不够精确[10]。

2.2 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法可以在信号领域使用，提高信号的权重，降低噪声的权重，实现对信号的优化。用在SOH估计时，同样可以选择合适的估计值和观测值的权重，从而得到一个最佳的修正值。

卡尔曼算法分两步：第一步是根据上一时刻的状态来预测当前时刻的状态；第二步是结合当前时刻的测量值对估计值进行更新。

后来提出的拓展卡尔曼滤波算法对SOH进行了更精确的估计。文献[11]提出了等效电路离散化模型，提高了估计准确度，使误差小于4%。

$$\begin{pmatrix} H_{\mathrm{SOC}}(k+1) \\ U_{\mathrm{p1}}(k+1) \\ U_{\mathrm{p2}}(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{\mathrm{SOC}}(k) \\ U_{\mathrm{p1}}(k) \\ U_{\mathrm{p2}}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{c} \\ U_{\mathrm{p1}}(k+1) \\ U_{\mathrm{p2}}(k+1) \end{pmatrix} i(k) + \omega(k) \tag{4}$$

$$U(k) = U_{\mathrm{SOC}}(k) - i(k)R_0 - U_{\mathrm{p1}}(k) - U_{\mathrm{p2}}(k) - \nu(k) \tag{5}$$

式中，$i(k)$为控制变量；$\nu(k)$为观测噪声；$\omega(k)$为系统噪声；U_{p1}（k）和$U_{p2}(k)$为电阻端电压；$U(k)$为电池端电压；$U_{\mathrm{SOC}}(k)$为SOC电压；$H_{\mathrm{SOC}}(k)$为SOC工况参数；η为电池库伦效率；Δt为系统的采样时间；τ_1和τ_2为时间常数；R_0为欧姆内阻。

由于卡尔曼滤波算法始终是利用观测数据和预测数据进行健康状态估计的，所以当预测数据不准确时，会对准确度有一定影响。

2.3 容量增量（IC）曲线

容量增量曲线法是研究退役动力电池的重要方法，某容量为25 A·h的锂离子电池的充电电压曲线如图1所示。

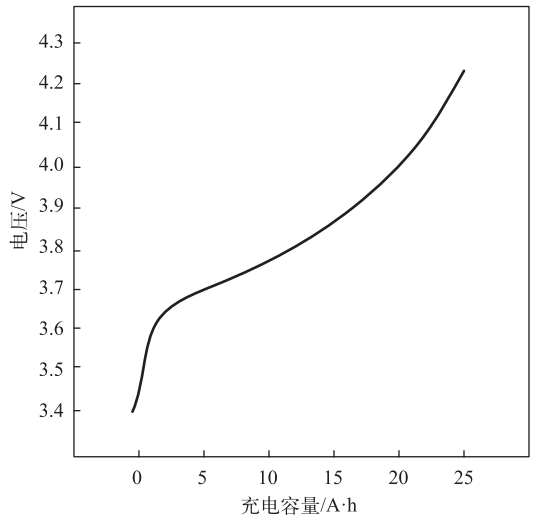


图 1 锂离子电池电压曲线

Fig. 1 Voltage curve of lithium ion battery

由图1可知，在充电开始和结束时，电压上升斜率较大；而在中间部分，电压上升斜率较小，且在这期间充电较多。令充电容量对电池端电压求导（dQ/dV）作为纵轴，电压作为横轴，从而显示电池充电过程中的IC峰。然而，IC曲线在绘制过程中，不可避免会存在噪声，严重影响曲线峰值的采集。要进行滤波和降噪处理，以便更好地恢复曲线特性，推导电池的相关性能[12]。滤波后的IC曲线如图2所示。

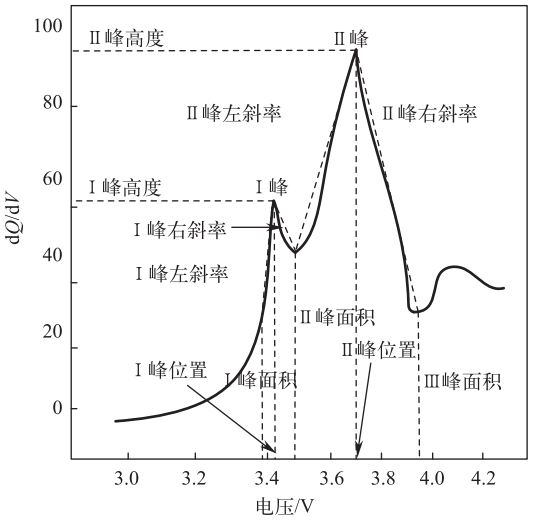


图 2 锂离子电池 IC 曲线

Fig. 2 IC curve of lithium ion battery

由于IC峰的强度和位置与电池容量的衰减密切相关[13]，文献[14]通过研究Ⅲ峰峰值、Ⅲ峰电压和Ⅲ峰面积与容量的关系，得出结论：用Ⅲ峰面积预测的蓄电池容量误差最小[14]；且最大容量估计误差在2%以内。文献[15]根据主成分回归法得到了Ⅰ峰高度、Ⅱ峰高度、Ⅱ峰面积、Ⅱ峰位置、Ⅱ峰左斜率和Ⅱ峰右斜率与容量的关系，误差控制在2%以内。

但是由于不同IC峰区域的特征参数对SOH估算存在较大差异，所以IC曲线法的估计准确度仍需进一步提高。

2.4 神经网络法

神经网络法是模拟神经细胞之间传递信息方式建立起来的一种仿生学处理信息的方法，具有高效性和非线性的特点。它的优点在于无须了解电池内部的结构和工作原理，只需采集足够的电池老化数据就可以预测电池的状态，但是预测准

确度取决于数据的质量，较常用的是BP神经网络算法。

BP神经网络算法包括输入层、隐含层和输出层三层结构，将电池的电压电流等基本信息输入后，结合适当的权重值，可以快速输出符合条件的结果。

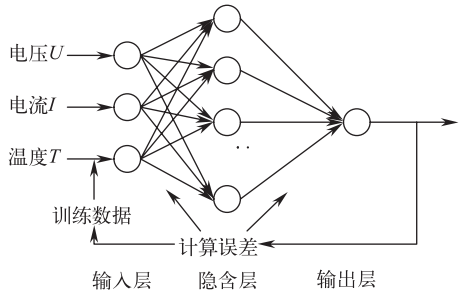


图 3　三层 BP 神经网络

Fig.3 Three layer BP neural network

学者们为提高神经网络算法的训练效率和模型准确度，对其进行了一系列的研究改进工作。文献[16]对隐含层和输出层的传递函数进行了非线性和线性优化。文献[17]对初始化权值进行优化防止陷入局部最优解，并结合免疫遗传算法的记忆性，提高了模型准确度和训练效率。文献[18]将元胞自动机可以在网络内部相互学习的特点和神经网络结合，提高了模型准确度和训练效率。综上所述，目前对神经网络算法的研究主要通过优化自身结构、传递函数或结合外部算法特点对神经网络进行改进，从而提高其准确度和训练效率。

不同的锂离子电池健康状态估算方法各有特点，针对上述不同估算方法进行了对比，见下表。

表　电池健康状态估计方法对比

Tab. Comparison of battery health state estimation methods

健康状态估计方法	优点	缺点
容量测量法	方法原理简单，从较易得到的开路电压就可以知道 SOC 信息	随着电池的老化，开路电压和 SOC 的关系不再准确，估计准确度下降
卡尔曼滤波法	将观测数据和预测数据相结合，减小估计误差	受预测数据的影响，准确度一般
容量增量曲线法	用于估计的变量参数较多且直观，误差较小	不同 IC 峰区域的特征参数对 SOH 估计存在较大差异
神经网络法	不考虑模型本身结构，只通过历史数据来估算电池 SOH，较简单	当历史数据准确度不足时，神经网络法误差较大

3　结束语

车载动力电池的梯次利用，既延长了电池的生命周期，又有效解决了老化电池所带来的安全问题和随意丢弃电池所带来的环境污染问题。本文总结了目前较为热门的退役电池健康状态估算方法，未来可以根据先进算法结合目前方法进行改进，从而更好地利用退役电池。

参考文献

[1] 夏小禾．“十四五”末超2000万辆电动汽车充电需求将得到满足[N]．机电商报，2022-02-28(A01)．

[2] 李建林，姜冶蓉，李雅欣，等．中国典型储能政策分析[J]．油气与新能源，2022，34(1)：42-47．

[3] 刘怡，穆苗苗，张友琅，等．退役动力电池在光伏储能中应用[J]．电源技术，2019，43(1)：126-128，132．

[4] 伍德佑，刘志强，饶帅，等．废旧磷酸铁锂电池正极材料回收利用技术的研究进展[J]．有色金属(冶炼部分)，2020(10)：70-78．

[5] 刘超，邱显扬，刘勇，等．废锂离子电池物理分选技术研究现状及展望[J]．稀有金属，2021，45(4)：1-9．

[6] 王景辉．锂电池自燃原因及处置对策[J]．现代工业经济和信息化，2020，10(2)：106-107．

[7] 杨泓奕，陈家辉，汤志明．基于K均值法与遗传算法的退役动力电池筛选[J]．电源技术，2019，43(12)：2001-2004．

[8] 周萍，高寒，郑岳久，等．一种基于附加电池的锂电池组主动均衡方法[J]．电子科技，2019，

32(6)：37-42.
[9] 齐腾飞．基于多因素分析的锂离子电池寿命研究[D]．长春：吉林大学，2017.
[10] 杨若岑，冬雷，廖晓钟，等．电池剩余容量估算方法综述[J]．电气技术，2019，20(10)：1-5，57.
[11] 颜湘武，邓浩然，郭琪，等．基于自适应无迹卡尔曼滤波的动力电池健康状态检测及梯次利用研究[J]．电工技术学报，2019，34(18)：3937-3948.
[12] ZHANG Qi，WU Jian，WANG Zhanguo，et al．Research on filtering method of increment capacity analysis curve of ternary lithium ion battery[C]．IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2019：646-655.
[13] YI Li，MOHAMED ABDEL-MONEM，RAHUL GOPALAKRISHNAN，et al．A quick on-line state of health estimation method for Li-ion battery with incremental capacity curves processed by Gaussian filter[J]．Journal of Power Sources，2018，373(1)：40-53.
[14] 张绍虹，郑英，朱骞，等．磷酸铁锂蓄电池IC曲线在健康状态估计算法中的应用[C]．2020中国汽车工程学会年会论文集，2020：5.
[15] 郭琦沛，张彩萍，高洋，等．基于容量增量曲线的三元锂离子电池健康状态估计方法[J]．全球能源互联网，2018，1(2)：180-187.
[16] 黄妙华，严永刚，朱立明．改进BP神经网络的磷酸铁锂电池SOC估算[J]．武汉理工大学学报(信息与管理工程版)，2014，36(6)：790-793.
[17] 杨云龙．基于改进型神经网络动力电池SOC估计研[D]．成都：电子科技大学，2019.
[18] 徐峰．基于改进神经网络模型的锂电池SOC预测方法研究[D]．重庆：重庆邮电大学，2018.

作者简介

徐猛（1990—），硕士，工程师，研究方向为分布式电源发电，1072013412@qq.com；

闫炯炯（1987—），本科，高级工程师，研究方向为分布式电源发电；

陶训峰（1991—），本科，助理工程师，研究方向为微电网规划；

李骥（1989—），本科，工程师，研究方向为微电网规划；

（收稿日期：2022-05-18）