

电动汽车用动力电池 SOH 估计的研究

孙宇轩

(工业和信息化部装备工业发展中心, 北京 100846)

摘要:在现有研究成果的基础上,提出一整套动力电池 SOH 估计测量系统,以得到更准确的 SOH 参考量,并通过厂家数据验证。

关键词:电动汽车; 动力电池; SOH 估计; 测量系统

中图分类号:U469.72; U463.63

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)01-0010-05

Research on SOH Estimation of Electric Vehicle Power Battery

SUN Yuxuan

(Ministry of Industry and Information Technology Equipment Industry Development Center, Beijing 100846, China)

Abstract:Based on existing research results, this paper proposes a set of measurement systems for power battery SOH estimation to obtain a more accurate SOH reference, which passes the enterprise's data verification.

Key words:electric vehicle; power battery; SOH estimation; measurement system

电动汽车与传统燃油汽车最大的区别在于动力电池,动力电池的健康状态(SOH)是车主极为关注的问题。众所周知,动力电池经过长期运行后性能将不断衰减,有效地评估电池 SOH 不仅是计算 SOC 等关键参数的重要依据,同时对评判动力电池系统何时需更换、是否可降级使用,降级后的利用价值评估等方面都有重要作用。但大部分动力锂电池的衰减过程是非线性的,且其内部电化学特性参数不易被测量,因此对 SOH 进行准确评估有着不小的难度^[1-2]。为更准确地估计 SOH,本文针对保有量较大的插电式混合动力汽车(PHEV)和纯电动汽车(EV)的动力电池 SOH 的估计方法进行研究。

1 动力电池 SOH 的描述参数

电池会随着反复使用逐渐老化,其 SOH 会逐渐变差。电池老化的宏观表现主要是安培小时容量的衰减或电池内阻的增大。EV 的动力电池均是能量型,因而其老化适合用安培小时容量的变化(减小)来表征,用其来估计的 SOH 参数本文定义为 SOH_A ;

而对于 PHEV 来说,其动力电池均是功率型,电池内阻的变化(增大)能代表电池性能的下降,用其来估计的 SOH 参数本文定义为 SOH_B 。因此,目前大多研究是通过估计 SOH_A 或 SOH_B 来分别判断 EV 或 PHEV 动力电池当前的 SOH 状态。

但 SOH_A 和 SOH_B 估计只是使用动力电池在某个时刻的静态参数来估计 SOH 健康状态,未考虑使用工况和老化路径等动态参数来估计动力电池 SOH 的影响,导致 SOH 的估计存在偏差^[3-4]。而动力电池的开路电压与其容量密切相关,同一 SOC 下,其值越低或下降得越快,说明动力电池的容量越小或 SOH 越差。故有关研究^[3-4]便引入表征开路电压变化(下降)的特征参数来补充评价电池 SOH 容量的变化(变差),通过测量不同时期相同荷电状态下不同开路电压的特征参数值来估计的 SOH 容量参数,本文定义为 SOH_C 。

目前,国内外研究人员对动力电池 SOH 的估计一般从两个不同的角度考虑:第一种是从电化学分析的角度出发,分析电池内部反应机理模型以及电池老

收稿日期:2022-09-13。

第一作者:孙宇轩(1982—),男,工程师;主要从事汽车行业公告一致性监督管理工作。E-mail:937790278@qq.com。

化模型,从而预测电池寿命。这种方法需要详细准确的模型参数,而电池内部涉及的电化学反应和耦合效应极其复杂,且老化现象跟动力电池的结构设计和使用寿命材料有关,不同动力电池的老化机理不同,参数也不同。因此,这种基于电化学机理的 SOH 估计局限性较大^[5-7],普适性较差。第二种是通过分析锂电池外部性能的物理特性,即通过检测电池的电流、电压、内部温度等来综合估计电池 SOH^[8-10]。由于电池的外部特性较易检测到,因此,动力电池 SOH 估计通常都基于第二个角度进行。目前大部分 SOH 估计的方法都集中在动力电池管理系统对 SOH 的预测^[11]和大数据平台对 SOH 的预测^[12],但这些方法都是建立在模型参数已知的基础上。

也有研究将上述两角度进行结合,结合的优点是可以通过检测电流、电压等数据不断地修正模型参数,只要模型参数准确,通过第一种方法估计 SOH 的准确性就能得到保证;但结合后也有一些缺点:BMS 检测的电流和电压等数据可能被叠加了某些干扰和异常突变,采用这些数据进行模型的修正,会导致 SOH 的估计极其不准确,这就对参数的修正算法要求较高,不同的电池修正算法差别较大^[13]。故将第一种角度和第二种角度结合的方式也不适合于大部分电池系统。

2 现有 SOH 参数的估计方法

2.1 SOH_A 的估计方法

$$SOH_A = (C_{in} - C_{lo}) / C_{in} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_{in} 为电池出厂时的额定容量; C_{lo} 为电池老化损失的容量。

现有的 SOH_A 估计测量系统是通过 BMS 采集 EV 较大 SOC 区间不同时刻 t 的充放电电流 i_t 来计算电池当前容量^[3],因而将式(1)改写为式(2)。

$$SOH_A = AH \times \sum_{t=0}^t i_t \Delta t / C_{in} \times 100\% \quad (2)$$

式中: AH 为某个区间容量转换至全容量的系数; t 为充放电时间; Δt 为电流监测间隔。

根据美国 IEEE 相关规定,当锂电池的容量小于其出厂额定容量的 80% 时,便要对其进行更换。

2.2 SOH_B 的估计方法

$$SOH_B = [1 - (R_{now} - R_{in}) / R_{in}] \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_{in} 为电池出厂时的内阻; R_{now} 为电池当前的内阻。

现有的 SOH 估计系统通过 BMS 采集 PHEV 充放电过程中某一时刻 t 的电流 i_t , 及该 t 时刻电池输入端电压与开路电压之差 Δu_t , 并考虑电池模型系数 BH ^[5], 来计算电池当前时刻 t 的内阻 R_{now} :

$$R_{now} = BH \times \Delta u_t / i_t \quad (4)$$

随着电池的老化,内阻 R_{now} 逐渐增大。根据美国 IEEE 相关规定,当 R_{now} 达到 R_{in} 的 2 倍时,电池使用寿命结束。

2.3 SOH_C 的估计方法

根据已有参考文献^[13],动力电池开路电压 (OCV) 与其荷电状态 (s) 的关系式为

$$OCV = a - b[-\ln(s)]^{2.1} + cs + de^{30(s-1)} \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为关系曲线的特征参数,其中 a (常数) 表征 OCV 的总体值大小; c 表征该关系式线性部分^[13]的开路电压随荷电状态的变化率; b 表征荷电状态较低 (SOC < 20%) 时非线性部分的变化率; d 表征荷电状态较高 (SOC > 90%) 时非线性部分的变化率。

随着电池老化, a 、 b 、 c 、 d 跟着变化,即在不同时期同一荷电状态对应的开路电压不一样。特征参数的具体确定方法是将其型号的实验电池进行老化试验,测得不同荷电状态的开路电压,然后采用最小二乘法拟合得到不同时刻的 a 、 b 、 c 、 d 。

为便于计算,业内常采用特征参数 a 或 c 来估计电池的容量 (本文指 SOH_C), 现有的 SOH_C 估计系统通过 BMS 采集荷电状态与开路电压,通过式(5)得到不同时刻同一 SOC 下的特征参数 a 或 c 的值,然后采用下列方法估计不同时刻的 SOH_C : 首先预设电池容量 (SOH_C) 与特征参数 a 或 c 的多项式系数 (一般设为三次多项式), 然后将某型号的实验电池分为两组, 一组是模型训练组, 一组是模型验证组。将模型训练组的电池进行老化试验,用于特征参数 a 、 c 的提取^[14], 将测得的不同时间点下降的容量作为 SOH_C 的真值,再利用预设的多项式和相应的特征参数 a 或 c , 得到不同时刻的拟合 SOH_C , 并将该拟合值与其前述

真值进行误差的最小二乘法拟合,得到 SOH_C 与 a 或 c 的多项式中的各项系数和常数。最后将模型验证配用于拟合精度的验证。因此,不同类型的电池 SOH_C 与特征参数 a 、 c 的关系函数也不同。

以某种磷酸铁锂电池为例,得到 SOH_C 与特征参数 a 、 c 的关系如下:

$$SOH_C = 11\ 398.9a^3 - 129\ 607.7a^2 + 490\ 850.2a - 619\ 105.4 \quad (6)$$

$$SOH_C = -5\ 423.8c^3 + 5\ 190.9c^2 - 1\ 364.9c + 155.8 \quad (7)$$

从式(6)和式(7)可以看出,式(6)的系数绝对值都比式(7)的大,即特征参数 a 发生很小的抖动便会给 SOH 的估计结果带来很大的偏差^[13],因而使用式(7)来估计 SOH_C 更为合理。所以,现有大部分 SOH 容量(即本文定义的 SOH_C)的估计算法将特征参数 c 作为 SOH_C 的表征因子,式(7)作为此类电池 SOH_C 的估计公式。

综上, SOH_A 、 SOH_B 和 SOH_C 现有的估计方法,都是通过车载电池管理系统(BMS)监测来实现,都是基于第二个角度来估计,其算法都预设 BMS 中。但实际的电池参数不一致,电池的老化路径也不同,这种预设的 SOH 参数估计算法涉及模型参数,会存在不准确的情况,且很难更新^[14]。为克服以上缺点,本文建立一套适合于大多数电池系统的 SOH 估计测量系统。

3 对现有 SOH 估计系统的改进

在目前新能源汽车普遍具备的 BMS 系统和新能源汽车远程监控平台基础上,本文对动力电池的 SOH 估计检测系统进行了改进,以克服现有估计系统的缺点,但并未改变式(2)、式(3)和式(7)的原理。

3.1 SOH_A 估计系统的改进

1) 现有系统的缺点。第一,其转换系数 AH 在电池生产后就固化在 BMS 中,无法随电池的使用情况进行调整,导致现有 SOH_A 估计系统随时间推移越来越不准确;第二,在 $SOC = 50\%$ 至 60% 以外的非线性区间,较多的影响因素与健康状态相关,这些因素不

易准确估计,导致 SOH_A 估计系统不准确。

2) 系统的改进及实现。为克服上述缺点,第一,采用远程平台根据车型参数、电池试验数据和历史使用数据,查询此车型的充电损耗 C_{ot} 和转换系数 AH ,随电池的使用情况在远程平台上不断调整 AH ,解决了转换系数 AH 在 BMS 中被固化的问题;第二,根据 GB/T 27930—2015《电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议》^[15],在原有的 BMS 中增加特定软件检测 $SOC = 50\% \sim 60\%$ 线性区间的充电电流,将每一秒的电流和 1 s 监测间隔相乘之后再求和,得到 $SOC = 50\% \sim 60\%$ 线性区间的充电容量 C_{ch} ,避免了非线性区域的影响。BMS 持续监听 SOC 值上升至 60% ,然后 T-Box 根据 GB/T 32960.3—2016《电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第3部分:通信协议及数据格式》^[16]将 C_{ch} 发送至远程平台,按改进后的式(8)计算 SOH_A 。

$$SOH_A = (C_{ch} - C_{ot}) \times AH / C_{in} \times 100\% \quad (8)$$

3.2 SOH_B 估计系统的改进

1) 现有系统的缺点。现有 SOH_B 估计系统同样固化在 BMS 中, BH 无法随电池的使用情况进行调整,导致现有 SOH_B 估计系统随时间推移越来越不准确。

2) 系统的改进及实现。为避免 BH 的影响,在原有的 BMS 系统中增加内阻测试回路,回路包括储能电容、电流传感器、电压传感器。外部充电桩给整车充电时,也给储能电容充少量的电,当外部充电结束后,内阻测试器的储能电容短时间给电池放电以测试内阻,测试时间很短,放电容量不大,对电池的影响不大,储能电容的体积和造价也不高。测试电池内阻采用的是直流法,本文采用 2 s 的测试时间,测试回路给电池施加一个较小的恒定直流电流 I_1 ,测得两端电压为 U_1 ;在同样的 2 s 内给电池施加一个较大的恒定直流电流 I_2 ,测得两端电压为 U_2 ,计算出充电回路总电阻 $R_z = (U_2 - U_1) / (I_2 - I_1)$ 。充电回路总电阻 R_z 只需要在某一 SOC 值时进行检测,本文采用的是 $SOC = 50\% \sim 60\%$ 范围内的某一值。

BMS 系统将测量时的 I_1 、 I_2 、 U_1 、 U_2 和 SOC 传输至远程平台。远程平台根据车型参数、电池试验数据和历史使用数据,在车型参数中查询到充电回路中的

线路电阻 R_j , 则电池内阻 $R_{\text{now}} = R_{\text{test}} - R_j$, 将 R_{now} 代入式(3)中。同时在远程平台的车型参数中查询到此型号电池出厂时内阻为 R_{in} , 改进后的计算式如下:

$$SOH_B = [1 - (R_z - R_j - R_{\text{in}}) / R_{\text{in}}] \times 100\% \quad (9)$$

3.3 SOH_C 估计系统的改进

现有的 SOH_C 估计系统采用 SOC 为 20%~90%, 有部分 SOC 区间为非线性, 且模型参数固化在 BMS 系统中, 无法随电池的使用情况进行调整, 导致现有 SOH_C 估计系统不准确。

首先, 本文为适用于绝大多数电池而留有余量, 采用的线性区域 SOC 是 50%~60%。另外一方面, 与 SOH_A 和 SOH_B 的估计系统类似引入远程平台, BMS 将荷电状态和开路电压发送至远程平台, 远程平台拟合得到特征参数 c , 再用与前面相同的方法得到 SOH_C :

$$SOH_C = \alpha c^3 + \beta c^2 + \gamma c + \tau \quad (10)$$

式中: α 、 β 、 γ 和 τ 依赖于电池正负极材料的化学特性。可在输入远程平台时, 根据电池试验数据和历史数据随时进行调整。

3.4 改进效果验证

3.4.1 SOH_A 估计系统改进效果验证

对容量 $C_{\text{in}} = 100 \text{ Ah}$ 的 EV 动力电池进行测试, 某一时刻, BMS 监测软件采集此时 SOC 为 49%, 待 SOC 至 50%, 电流传感器采集每一秒的充电电流, 360 s 后 SOC 上升至 60% 采集停止, BMS 通过采集 0~360 s 的充电电流, 每一秒的电流与 1 s 时间间隔相乘再求和之后得到 SOC=50%~60% 线性区间的充电容量 $C_{\text{ch}} = 10 \text{ Ah}$ 。然后将 $C_{\text{ch}} = 10 \text{ Ah}$ 传输至远程平台, 并在远程平台的数据表中查询^[14] 得到 $C_{\text{ot}} = 0.3 \text{ Ah}$, $AH = 9.6$ 。远程平台按式(8)计算: $SOH_A = (10 - 0.3) \times 9.6 / 100 \times 100\% = 93.12\%$ 。

而原有 SOH_A 估计系统的 BMS 采用式(2)对健康状态进行估计, BMS 采集电池从 SOC=20% 上升至 90% 的充电电流 (0~2 150 s), 具体可分为如下 3 个阶段: 从 SOC=20% 上升至 50% 的充电电流 (0~632 s), 从 SOC=50% 上升至 60% 的充电电流 (632~992 s), 从 SOC=60% 上升至 90% 的充电电流 (992~2 150 s)。原有系统的充电容量如式(11)。

$$\sum_{t=0}^{t=2150} i_t \Delta t = \sum_{t=0}^{t=632} i_t \Delta t + \sum_{t=632}^{t=992} i_t \Delta t + \sum_{t=992}^{t=2150} i_t \Delta t = 32.24 + 10 + 29.43 = 71.67 (\text{Ah}) \quad (11)$$

查询到 SOC=20%~90% 相应的 AH 为 1.29。

$$SOH_A = 1.29 \times 71.63 / 100 \times 100\% = 92.45\%。$$

3.4.2 SOH_B 估计系统改进效果验证

在 SOC=55% 时, 对 PHEV 的动力电池进行测试, 内阻测试仪在 2 s 内施加较小充电电流 $I_1 = 80 \text{ A}$, 检测到电压 $U_1 = 367.1 \text{ V}$; 内阻测试仪在 2 s 内施加较大充电电流 $I_2 = 160 \text{ A}$, 检测到电压 $U_2 = 372.4 \text{ V}$ 。即 $R_z = 66.25 \text{ m}\Omega$ 。在数据表中^[10] 查询到 $R_j = 3.2 \text{ m}\Omega$, $R_{\text{in}} = 59.76 \text{ m}\Omega$ 。

$$\text{则 } SOH_B = [1 - (R_z - R_j - R_{\text{in}}) / R_{\text{in}}] \times 100\% = 94.5\%。$$

而原有 SOH_B 估计系统的 BMS 采用式(3)和式(4)对健康状态进行估计, 采集到充电电流 91.2 A, 电池输入端电压 369.2 V, 开路电压 361.3 V, 查询到相应的 BH 为 0.72。 $R_{\text{now}} = BH \times \Delta u_t / i_t = 0.72 \times (369.2 - 361.3) / 91.2 \times 1000 = 62.37 (\text{m}\Omega)$ 。

$$\text{则 } SOH_B = [1 - (62.5 - 59.76) / 59.76] \times 100\% = 95.63\%。$$

3.4.3 SOH_C 估计系统改进效果验证

对于 EV 的动力电池进行测试, SOC 由 50% 充电至 60%, BMS 监测软件检测到各点 SOC 及对应的开路电压。将各点 SOC 和开路电压传送到车载终端 T-Box, 再传送给远程监控平台, 远程平台中的算法软件拟合得到 $c = 0.0579$ 。再进一步拟合得到 $\alpha = -5423.8$, $\beta = 5190.9$, $\gamma = -1364.9$, $\tau = 155.8$ 。

$$\text{则 } SOH_C = (-5423.8c^3 + 5190.9c^2 - 1364.9c + 155.8) \times 100\% = 93.20\%。$$

现有的 SOH_C 估计系统采用 SOC 为 20%~90%, BMS 监测软件检测到各点 SOC 及对应的开路电压传送给远程平台, 远程平台中的算法软件拟合得到 $c = 0.06$ 。再进一步拟合得到 $\alpha = -5414.5$, $\beta = 5143.8$, $\gamma = -1371.2$, $\tau = 159.7$ 。

$$\text{则 } SOH_C = (-5414.5c^3 + 5143.8c^2 - 1371.2c + 159.7) \times 100\% = 94.78\%。$$

对 PHEV 的动力电池进行测试, 用同样的方法计算得到 $SOH_C = 94.57\%$ 。同理, 现有 SOH_C 估计系统

计算得到 $SOH_c = 93.18\%$ 。

将相应动力电池送至试验室进行标准的试验,得到标准 SOH。

将上述现有方法值和改进后的方法值,与标准 SOH 值进行对比,三种结果的对比见表 1。

表 1 SOH 结果对比

项目	EV	PHEV
标准 SOH	$SOH_A: 93.36\%$	$SOH_B: 94.54\%$
现有方法	$SOH_A: 92.45\%$	$SOH_B: 95.63\%$
	$SOH_c: 94.78\%$	$SOH_c: 93.18\%$
改进后方法	$SOH_A: 93.12\%$	$SOH_B: 94.5\%$
	$SOH_c: 93.20\%$	$SOH_c: 94.57\%$

从上述结果可知,本文改进后的 SOH 估计系统相比原有方法更加准确。

4 结束语

本文基于 SOH 定义和研究现状,提出了一整套动力电池 SOH 状态估计测量系统,适用于多种类型的电池并具备较高的准确性,可用于车辆的年检、维护保养和维修领域。

参考文献:

- [1] LIU Xiwen, LI Jia, YAO Zhuohong, et al. Research on battery SOH estimation algorithm of energy storage frequency modulation system[J]. Energy Reports, 2022, 8(2): 217-223.
- [2] WU Tiezhou, LIU Sizhe, WANG Zhikun, et al. SOC and SOH Joint Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Improved Particle Filter Algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022(17): 307-317.
- [3] 沈佳妮, 贺益君, 马紫峰. 基于模型的锂离子电池 SOC 及 SOH 估计方法研究进展[J]. 化工学报, 2018, 69(1): 309-316.
- [4] 张金龙, 佟微, 孙叶宁, 等. 锂电池健康状态估算方法综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 128-134.

- [5] 丁晓, 薛金花, 陈振宇, 等. 磷酸铁锂电池性能衰退与容量预测模型研究[J]. 电源技术, 2019, 43(6): 1013-1016.
- [6] BARRÉ A, DEGUILHEM B, GROLLEAU S, et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2013(241): 680-689.
- [7] NING Yan, LI Xiangjun, ZHAO Haichuan, et al. Stratified Sorting Method of Battery Module Considering SOH in Eche-lon Utilization[J]. IEEE Transactions on Applied Supercon-ductivity, 2021, 31(8): 99.
- [8] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 1-16.
- [9] 刘建, 李占锋, 屈薇薇. 不同应力作用下钴酸锂电池老化特性分析[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(12): 38-42.
- [10] CAI Lei, MENG Jinhao, STROE D, et al. Multiobjective Op-timization of Data-Driven Model for Lithium-Ion Battery SOH Estimation With Short-Term Feature[J]. IEEE Trans-actions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11855-11864.
- [11] 罗伟林, 张立强, 吕超, 等. 锂离子电池寿命预测国外研究现状综述[J]. 电源学报, 2013(1): 140-144.
- [12] 肖伟, 钟卫东, 舒小农, 等. 基于大数据的电池健康状态 (SoH) 的估算及应用[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(1): 101-105.
- [13] 刘轶鑫, 张嶝, 李雪, 等. 基于 SOC-OCV 曲线特征的 SOH 估计方法研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(10): 1158-1163.
- [14] OJI Tsuyoshi, ZHOU Yanglin, CI Song, et al. Data-Driven Methods for Battery SOH Estimation: Survey and a Critical Analysis[J]. IEEE ACCESS, 2021(9): 126903-126916.
- [15] 中国电力企业联合会. 电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议: GB/T 27930—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-52.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第 3 部分: 通信协议及数据格式: GB/T 32960.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-36.