

基于 EKF 的电池参数辨识和 SOC 估计方法

郭国防 席小军 蒋东强 贾阳 文强

陕西重型汽车有限公司

摘要: 我们以 18650 型号磷酸铁锂电池作为研究对象, 选用二阶阻容等效模型, 并利用 MATLAB 联合优化计算软件进行二阶 RC 模型的离线参数辨识, 得到了阻容参数值, 并对辨识结果进行了精度验证, 最后通过放电实验测试数据, 采用扩展卡尔曼滤波算法来对多工况下电池的荷电状态 (SOC) 进行研究和估计, 验证结果表明 EKF 估计值可以达到精度要求。

关键词: 电池 SOC; 荷电状态 - 开路电压曲线; EKF

0 前言

针对目前新能源汽车中广泛使用的锂离子动力电池, SOC 是分析其在各种操作条件下的性能、确定电池性能随时间退化的重要参数。精确的 SOC 测量可以为准确地预测电池行为提供保障, 使研究人员能够确定提高电池性能和延长电池寿命的方法。因此, 研究和开发准确可靠的 SOC 估计方法对推动新能源汽车的发展和普及至关重要。

新能源汽车动力电池的 SOC 估计是确保其安全和高效运行的关键因素。目前, 常见的 SOC 估计方法包括安时 (Ampere Hour, AH) 积分法、基于电池等效模型的方法、基于电池试验数据等方法。如开路电压法、卡尔曼滤波、神经网络、粒子滤波和状态观测器等。这些算法各有优劣, 根据应用场景的不同, 研究人员选择适合的算法来提高动力电池 SOC 估计的精度和效率, 从而确保电池的安全运行和最大化使用效率。

1 研究动态

关于锂离子电池等效阻容模型参数辨识方法和电池荷电状态估计方法, 多个研究团队都取得了不同研究进展。

李心月团队针对传统的安时积分法精度低的问题, 提出了一种考虑电池容量和效率修正改进的安时积分法来估计电池的 SOC。高进团队改进了传统安时积分法, 放电初期使用开路电压法估计 SOC, 放电末期时,

使用负载电压对 SOC 估计值在线校正。

周军团队提出了一种新方法来实现 SOC 的估计, 使用带有遗忘因子的递推最小二乘方法在线获取电池模型参数, 提出基于自适应扩展卡尔曼滤波器的在线 SOC 估计方法。结合不同的工况试验数据验证了此方法的鲁棒性和准确性。针对在非线性系统的突变状态跟踪时, 传统无迹卡尔曼滤波跟踪误差较大的问题, 郭向伟团队提出了使用自适应渐消无迹卡尔曼滤波 (Adaptive Fading Unscented Kalman Filter, AFUKF) 估计 SOC。

另外还有其他团队研究了一种针对宽温度的荷电状态 - 开路电压映射改进方法, 并且建立了基于支持向量机回归 (Support Vector Regression, SVR) 的开路电压模型, 可以准确捕捉不同温度下电池的行为, 提升了 SOC 估计的稳定性、鲁棒性和初始误差修正能力。

Estiko Rijanto 等针对锂离子电池 SOC 和 SOH 的估算, 提出了一种新的具有最佳多重自适应遗忘因子的递推最小二乘 (RLS with Optimum Multiple Adaptive Forgetting Factors, MAFF-RLS) 算法, 并在城市道路循环工况下进行仿真验证, 结果表明, 电池模型参数辨识精度和电池荷电状态估计精度都得到了提升。

有外文献提出采用等效电路模型和递推最小二乘算法的参数辨识, 并通过各种电流条件下的试验进行了验证, 结果表明提高了电池模型参数和端电压估计精度。

陈阳舟针对无迹卡尔曼滤波 UKF 算法估计锂电池荷电状态因精度低、稳定性差以及产生的 Sigma 点过

多导致计算难度大等不足,提出一种基于自适应球形不敏变换方式电池荷电状态估计算法,使得算法的计算复杂度大大降低。

本文以 18650 型号磷酸铁锂电池作为研究对象,选用二阶 RC 等效模型,并利用 MATLAB 联合综合优化计算软件平台 (First Optimization, 1stOpt) 软件进行二阶 RC 模型的离线阻容参数辨识,得到了不同 SOC 区段对应的阻容参数值,并对辨识结果进行了精度验证,最后通过放电实验测试数据,采用扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, EKF) 算法来对不同工况下电池的 SOC 进行研究和估计。

2 动力电池建模

2.1 动力电池模型

如图 1 所示,二阶 RC 模型由内阻、电压源和两个 RC 环节串联而成, U_1 和 U_2 分别代表电阻电容 R_1C_1 并联环和电阻电容 R_2C_2 并联环上的电压。 I 代表流经电池的电流, U_t 为电池输出端电压。

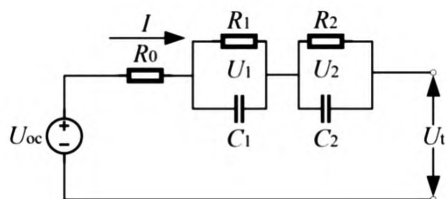


图 1 二阶 RC 等效电路模型

二阶 RC 模型的准确性和精度相较于内阻模型、戴维南 (Thevenin) 等效电路模型以及 PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) 模型精度更高,复杂程度适中,而且目前应用也更广泛。三阶 RC 模型精度略有提高,但是更为复杂,应用不方便。综上所述,经过综合对比,本文选择二阶 RC 等效模型为研究对象。

2.2 二阶 RC 建模

经过一系列分析,本文通过 MATLAB 软件的仿真工具 (Simulink) 对二阶 RC 等效电路模型进行建模作为本章 SOC 估计的电路模型。

2.3 SOC - OCV 曲线

在估计电池 SOC 时, SOC - OCV (State of Charge-Open Circuit Voltage, OCV - SOC) 曲线的获取是一个非常关键的步骤,其不仅在电池二阶 RC 模型中会使用到,由当前 SOC 值通过查表得到 OCV,然后通过基尔霍夫定律求出端电压值。而且 SOC-OCV 曲线还会应用在扩展卡尔曼滤波估计 SOC 的过程,因为输出矩阵 C

的第一个元素需要用到 SOC 对 OCV 的偏导数。本节以 HPPC 工况下的实验数据举例。

通过所用的磷酸铁锂 18650 型号电池在 HPPC (Hybrid Pulse Power Characteristic, 混合功率脉冲特性) 工况下的放电数据可以很方便地得到 SOC-OCV 曲线。试验过程中,先将电池充满电,即到达 100 % 的 SOC,然后每 10 % 的 SOC 使用负脉冲电流 -20 A 进行放电,并静止足够长时间,再用相同的步骤放电,以此反复,直至电量释放完毕。

首先,将所得到的 HPPC 工况下的放电数据中端电压数据整理出来,并由此可得到该电池的放电电压曲线。由于此试验过程设定的为每次放电放出 10 % 的 SOC,因此在对应的 SOC 区段,对静置过后的电压进行采集而作为开路电压,通过在 MATLAB 中的曲线拟合器工具进行拟合调试,最后得到电池的 SOC - OCV 曲线如图 2 所示。

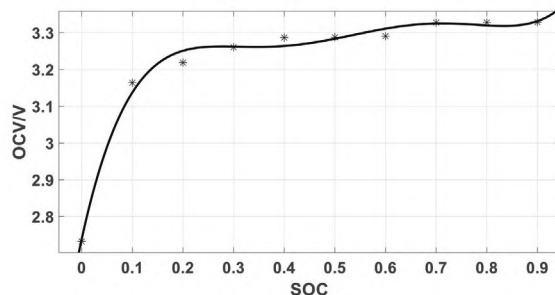


图 2 电池的 SOC - OCV 曲线

3 参数辨识

通过上述试验,我们已经得到了脉冲放电的端电压数据。此部分选取电池放电时 SOC 由 0.9 到 0.8 过程的局部放电数据得到端电压局部图,如图 3 所示。

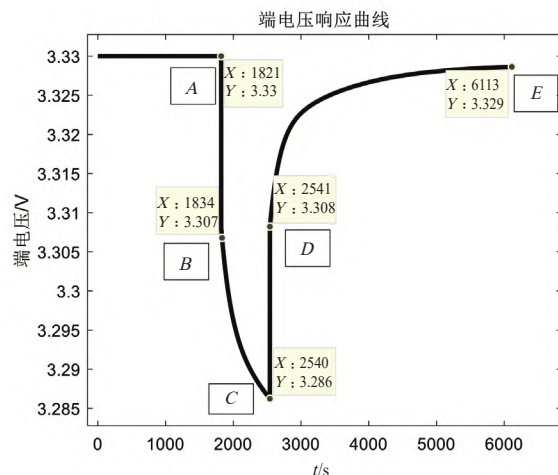


图 3 脉冲放电端电压局部放大曲线

可以看到,由A点到B点和C点到D点,电压都发生了明显的突变。其中,AB段电压发生了断崖式下跌,究其原因,是由于在二阶RC模型中,电容在电路中具有隔直通交的作用,这意味着它可以允许交流信号通过而阻止直流信号通过,所以当电路中存在电容 C_1 和 C_2 时,它们的端电压不会突然发生变化。因此,在此处观察到端电压的突变,这很可能是由电路中的内阻 R_0 引起的电压降造成的,内阻 R_0 会在电路中产生电压降,导致端电压出现变化。

3.1 阻容参数辨识分析

如图3所示,放电结束后,开始静置,即从C点开始为静置状态,而电压从C点到D点的过程中,端电压突升,这也是内阻 R_0 的作用结果。

所以,利用这两区段的电压变化规律,我们可以AB两点的电压差和CD两点的电压差相加后除以电流(欧姆定律),再除以2,所得的平均值便可认为是内阻 R_0 的值,公式如下:

$$R_0 = \frac{(U_A - U_B) + (U_D - U_C)}{2I} \quad (1)$$

式中, R_0 为电池等效内阻,单位 Ω 。

还可得知,BC段电压呈指数下降,体现了电池内部的极化特性。D点到E点的过程中,开始电压变化速度较快代表时间常数较小的 R_1C_1 环节,然后电压变化速度较慢代表时间常数较大的 R_2C_2 环节。CD段、DE段都表现了电池的回弹电压特性,这些现象都是由电池的特征决定的。

二阶RC模型的微分方程的解为:

$$\begin{cases} U_1(t) = U_1(0)e^{-t/\tau_1} + IR_1(1 - e^{-t/\tau_1}) \\ U_2(t) = U_2(0)e^{-t/\tau_2} + IR_2(1 - e^{-t/\tau_2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, U_1 、 U_2 为对应的RC环的端电压,单位V; τ_1 、 τ_2 为对应RC环的时间常数,单位s。

电池在脉冲放电结束后的静置时间内(即图3中从C到E的时间)的RC回路的电压响应为零输入电压响应,其端电压响应表达式为:

$$U_t = U_{oc} - U_1(0)e^{-t/R_1C_1} - U_2(0)e^{-t/R_2C_2} \quad (3)$$

式中, $U_1(0)$ 和 $U_2(0)$ 分别为二阶RC等效电路模型中 R_1C_1 和 R_2C_2 网络在静置过程中的初始电压,单位V。通过Matlab中拟合工具箱来对电阻和电容参数进行辨识,自定义的拟合函数可以表示为:

$$y = a - b \times \exp(-ct) - d \times \exp(-ft) \quad (4)$$

则可得:

$$\begin{cases} U_{oc} = a \\ U_1(0) = b \\ U_2(0) = d \\ \frac{1}{R_1C_1} = c \\ \frac{1}{R_2C_2} = f \end{cases} \quad (5)$$

A点到C点的RC回路上的电压变化是零状态响应,端电压表达式为:

$$\begin{cases} U_1(t) = IR_1 \times (1 - e^{-t/R_1C_1}) \\ U_2(t) = IR_2 \times (1 - e^{-t/R_2C_2}) \end{cases} \quad (6)$$

零状态阶段结束正好对应零输入阶段的开始,此时 $U_1(t) = U_1(0)$, $U_2(t) = U_2(0)$ 。由于放电时间已知,并参考已有文献对电池的辨识结果可知, R_0 、 R_1 、 R_2 的阻值为毫欧级, C_1 、 C_2 的电容值在 $10^3 \sim 10^5$ F的范围内,可得出 $e^{-t/RC} \approx 0$,则有:

$$\begin{cases} U_1(0) = IR_1 \\ U_2(0) = IR_2 \end{cases} \quad (7)$$

则可以推导出电容、电阻表达式如下:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{b}{I} \\ R_2 = \frac{d}{I} \\ C_1 = \frac{1}{R_1c} \\ C_2 = \frac{1}{R_2f} \end{cases} \quad (8)$$

3.2 1stOpt软件联合MATLAB的离线参数辨识

1stOpt软件是一种用于优化问题求解的工具,该软件的主要功能是通过数学建模和优化算法,帮助用户找到最优解或者近似最优解,以解决复杂的决策问题。如果只用MATLAB软件来对电阻和电容参数进行辨识分析,拟合工具箱的结果会发生报错,原因是我们在拟合前没有提供一个合理的初值,提供初值的好处是可以加快拟合过程的收敛速度,使得拟合结果更快地趋近于最优解,而1stOpt软件由于其强大的寻求最优解的功能,可以为我们提供正确的初值,快速得到参数辨识结果。通过MATLAB和1stOpt软件的联合仿真,得到了所有SOC范围内的参数辨识结果,如表所示。

表 所有 SOC 范围内的参数辨识结果

	R_0/Ω	R_1/Ω	R_2/Ω	C_1/F	C_2/F
SOC=0.9	0.00120	0.00041315	0.00035475	173380	3293800
SOC=0.8	0.00140	0.00043675	0.00041425	148871	2397220
SOC=0.7	0.00130	0.00080751	0.00072150	175882	1460790
SOC=0.6	0.00138	0.00044465	0.00049285	2936360	189450
SOC=0.5	0.01700	0.00046235	0.00044735	3214242	260352
SOC=0.4	0.00150	0.00057250	0.00061450	1965925	175058
SOC=0.3	0.00160	0.00050450	0.00050900	2219410	179747
SOC=0.2	0.00190	0.00057150	0.00054850	2278950	178042
SOC=0.1	0.00230	0.00097310	0.00103800	105420	1020540

3.3 参数辨识结果的验证

得到各个阻容参数的辨识结果后, 本文对辨识结果进行了验证。通过 Simulink 来搭建验证模型。利用此模型可以很方便快捷地验证辨识结果的精度, 以 SOC=0.8 时的辨识结果为例, 本文将 SOC 为 0.8 时的数据和参数辨识结果分别代入到对应的模块中, 由此可以得到精度验证图和辨识误差, 如图 4 和图 5 所示。

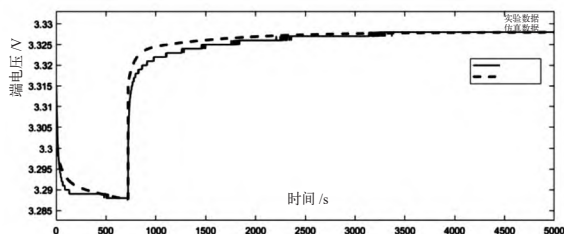


图 4 SOC=0.8 时参数辨识结果验证

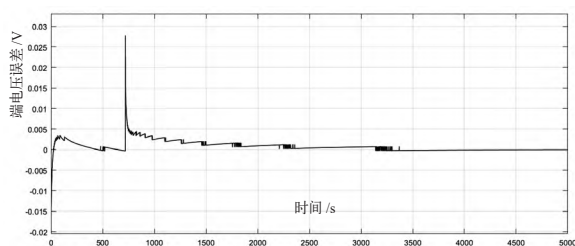


图 5 SOC=0.8 时参数辨识误差

由图 4 和图 5 可知, 参数辨识结果接近实际模型, 误差满足要求。接着对 SOC 分别为 0.8、0.7……等分别进行验证, 结果均满足精度要求和误差要求。

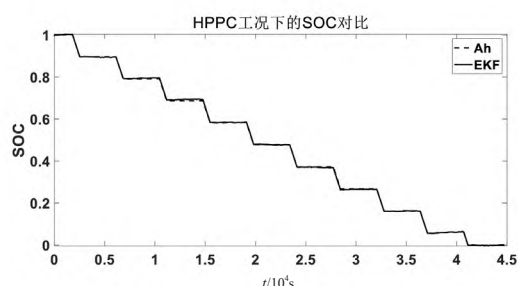
4 SOC 估计算法的验证

由于新能源汽车会运行在许多不同的路况下, 所以仿真验证 EKF 对 SOC 估计的精度时, 也要考虑不同工况下的试验数据, 这样才能够确保电池管理系统在任何实际情况下都能够排除干扰, 准确地估计出动力

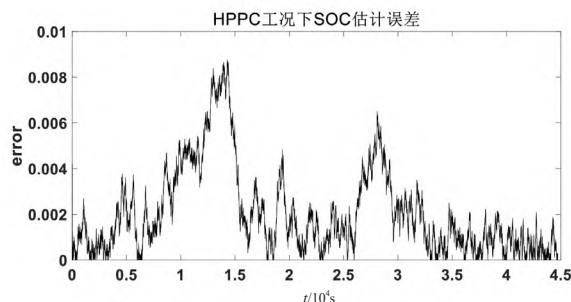
电池的剩余容量, 从而为驾驶者缓解里程焦虑, 因此本次验证选取了常见的 HPPC 工况和动态压力测试工况 (Dynamic Stress Test, DST) 进行放电工况仿真验证。

4.1 HPPC 工况

将 HPPC 工况下的放电试验数据代入代码进行仿真, HPPC 工况下的 EKF 法的 SOC 估计值与安时法计算值如图 6a 所示, EKF 的 SOC 估计值的误差如图 6b 所示。由图 6b 的误差曲线可知, 该工况下 SOC 的估计误差在 0.01 以内, 所以在 HPPC 工况下本文的二阶模型和 EKF 结合可以较为准确地估计电池的 SOC。



a) EKF 法估计值与安时法计算值曲线



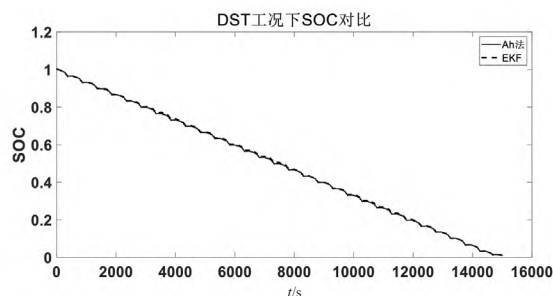
b) EKF 法估计误差

图 6 20A 脉冲放电工况 SOC 估计验证

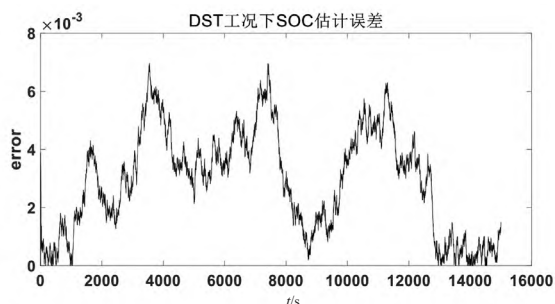
4.2 DST 工况

将 DST 工况下的放电试验数据代入代码进行仿真, DST 工况下的 EKF 法的 SOC 估计值与安时法计算值如图 7a 所示, EKF 的 SOC 估计值的误差如图 7b 所示。由误差曲线可知, 该工况下 SOC 的估计误差在 0.008 以内, 所以在 DST 工况下本文的二阶模型和 EKF 结合可较为准确地估计电池的 SOC 值。

然后在 MATLAB 中分别对不同工况下的放电试验数据进行分析, 使用扩展卡尔曼滤波法进行估计, 得到 SOC 的估计值并对比验证, 通过不同工况下的验证结果可以看出 EKF 估计 SOC 可以达到精度要求。EKF 法在 SOC 变化区间, 估计误差相对较小, 在 SOC 保持区间, 估计误差相对较大, 这是因为在此区间, SOC 呈现较强的非线性。



a) EKF 法估计值与安时法计算值曲线



b) EKF 法估计误差

图7 DST 工况下 SOC 估计验证

5 结语

本文对 18650 型号的磷酸铁锂电池进行数据处理、建立等效模型,并通过 1stOpt 软件联合 MATLAB 软件进行二阶 RC 模型的电阻和电容参数的离线辨识,并在 Simulink 里面通过搭建验证模型对辨识结果进行精度验证,验证结果证实了辨识结果的精度满足要求。最后在 MATLAB 中分别根据 HPPC 工况、DST 工况下的实验数据对 SOC 进行估计,并与我们通过安时积分法得到的 SOC (即实际 SOC) 进行比对和精度验证,发现误差均不高于 1%。

参考文献

- [1] 王品. 中国新能源汽车发展现状及对策建议[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(08): 187-191.
- [2] 孙腾, 冯丹, 胡利明. 国内外新能源汽车发展的差距及提升路径探讨[J]. 对外经贸实务, 2018(06): 29-32.
- [3] 张进华. 节能与新能源汽车发展战略的国际比较[J]. 环境保护, 2010(18): 16-17.
- [4] 李心月, 储江伟, 刘艳春, 等. 考虑电池运行状态的改进安时积分法[J]. 电池, 2023, 53(05): 509-513.
- [5] 高进, 胡红顶, 姚胜华. 基于改进安时积分法的锂离子电池组 SOC 估算[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2022, 36(04): 56-60.
- [6] 周军, 陈雨墨, 王岩. 基于自适应拓展卡尔曼滤波的锂电池荷电状态估计[J]. 电气应用, 2023, 42(12): 1-8.
- [7] 郭向伟, 李璐颖, 王晨, 等. 自适应渐消无迹卡尔曼滤波锂电池 SoC 估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 167-175.
- [8] 王新栋, 董政, 王书华, 等. 基于改进开路电压模型和自适应平方根无迹卡尔曼滤波的锂离子电池宽温度多工况 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2021, 1-15.
- [9] RIJANTO E, ROZAQI L, NUGROHO A, et al. RLS with optimum multiple adaptive forgetting factors for SoC and SoH estimation of Li-Ion battery[C]//2017 5th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA). IEEE, 2017: 73-77.
- [10] SONG Y, PARK M, SEO M, et al. Improved SOC estimation of lithium-ion batteries with novel SOC-OCV curve estimation method using equivalent circuit model[C]//2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). IEEE, 2019: 1-6.
- [11] 陈阳舟, 伊磊. 基于 ASIT-UKF 算法的锂电池荷电状态估计[J]. 北京工业大学学报, 2024(06): 1-10.