

基于 PSO-EKF 与充放电检测的 锂电池荷电状态估计

曾骁勇^{1*}, 李英顺^{1,2}, 杨松¹

(1. 沈阳工业大学化工过程自动化学院, 辽阳 111003; 2. 沈阳顺义科技股份有限公司, 沈阳 110000)

摘要:目的 为更好地实施锂电池在充放电过程中的荷电状态 (state of charge, SOC) 检测跟踪, 保证电池能够工作在最佳的储存能量状态。**方法** 以实验室条件下的钛酸锂电池为研究对象, 首先对电池进行充放电实验并记录放电周期内的输出电流电压数据; 其次通过分析锂电池组成与现行相关标准, 从 SOC 定义出发建立二阶等效模型并进行脉冲放电实验。最后通过模型参数辨识得到开路电压与 SOC 拟合曲线, 采用粒子群算法优化扩展卡尔曼滤波跟踪的噪声协方差矩阵建立 SOC 跟踪估测模型。**结果** 使用马里兰大学高级生命周期工程中心 (CALCE) 的电池动态测试实验数据进行检验对比, 实验误差不超过 6%。**结论** 提出的基于 PSO-EKF 与充放电检测的锂电池荷电状态估计方法能够实现锂电池荷电状态的快速跟踪与准确估计。

关键词: 电压检测; 锂电池; 荷电状态; 卡尔曼滤波

0 引言

随着新能源汽车与电力储能事业的发展, 电池荷电状态估算成为电池管理系统中的一个至关重要的环节^[1], 由于复杂的内部化学反应, SOC 估算同时也是电池状态检测的热点和难点之一。利用参数辨识与滤波跟踪是常见的荷电状态评估方法, 南金瑞等^[2]提出了等效电路法, 通过 Matlab 工具箱搭建电池戴维南等效电路仿真模型, 结合最小二乘自适应滤波算法来实现实时参数辨识与 SOC 的检测。为了更好地反映电池特性, 吴健等用 CPE 代替二阶 RC 电路中的电容元件基于分数阶理论的锂离子电池高频等效电路模型^[3]。而文献^[4-6]等使用基于数据驱动的方法建立神经网络对电池 SOC 进行拟合, 神经网络通过端到端的学习与反向传播, 以电池充放电外特性到电池荷电状态之间的映射关系作为训练数据, 对于一个已经训练完成的模型, 将测试数据的电压电流参数输入到该方法所建立的系统中, 可以对 SOC 值进行前向推理。在神经网络模型中对电池化学性质与电路特性进行拟合, 更加依赖于数据特征工程, 且需要根据电池的时变特性调整模型。

随着 SOC 的变化, 电池正负极材料的荷电状态会发

生改变, 相应的电池的电荷转移阻抗和扩散阻抗。可以采用交流阻抗法, 通过电化学阻抗谱分析仪来测量电池的内部交流阻抗, 从而得到对应的 SOC^[7,8]。从复杂化学反应性质的角度分析, 能描述电池内部的电解电离情况, 但难以做到实时跟踪。

本文通过对现有的 SOC 估算方法进行分析对比, 探讨了卡尔曼滤波跟踪需要进行参数辨识的环节, 神经网络算法对数据与模型训练的要求, 提出一种通过粒子群算法优化的 EKF 模型, 能够为锂电池荷电状态的快速准确估计提供参考。

1 锂电池组成与检测标准

锂电池主要由 5 部分构成, 分别是正极材料、负极材料、电解液、隔膜以及外壳。

根据 GB/T 38661—2020《电动汽车用电池管理系统技术条件》, SOC 的理论表达式为电池剩余电量与电池额定容量的比值^[9], 而估计 SOC 的算法是电池管理系统进行管控电池的基础。

SOC 的估计更适合模型参数辨识, 在辨识出电池内部参数的前提下进行滤波跟踪估计。标准卡尔曼滤波算法主要用于线性动态系统的建模, 实现系统状态的递归跟踪。

基金项目: 面向航空发动机运行维护的健康管理数字仿真系统研发与应用 (2022JH1/10400007)。

*** 通信作者:** 曾骁勇, 硕士, 研究方向为锂电池状态估测。E-mail: xiaoyong_zeng@smail.sut.edu.cn

对于锂离子电池的非线性系统, 需对标准卡尔曼滤波算法进行修正^[10], 本文采用改进的扩展卡尔曼滤波算法(EKF)结合充放电过程中检测的电流电压对锂电池 SOC 进行估计。

2 估计方法建模

2.1 扩展卡尔曼滤波(EKF)

由于充放电过程中电池系统是非线性的, 需要对空间模型非线性化, 其状态方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \\ y_k = g(x_k, u_k) + v_k \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_{k+1} 为 $k+1$ 时刻系统的状态量, u_k 为输入, y_k 为输出, f, g 为非线性函数, w, v 为系统噪声和观测噪声, 两者为互相独立的高斯白噪声。

对 f, g 采用一阶泰勒展开得, 则非线性系统状态空间方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} x_{k+1} \approx A_k x_k + [f(\hat{x}_k, u_k) - A_k x_k] + w_k \\ y_k \approx C_k x_k + [g(\hat{x}_k, u_k) - C_k \hat{x}_k] + v_k \end{cases} \quad (2)$$

式中, A_k, C_k 分别是 f, g 的偏导, 因此在非线性离散系统中 EKF 算法递推过程如下: ①滤波状态初始化, 以上一次电池荷电状态或自定义的荷电状态作为卡尔曼滤波的系统初始状态 SOC(0); ②状态时间更新, 根据电池的二阶模型更新下一个步长的状态; ③误差协方差预测时间更新, 根据开路电压与荷电状态关系并结合状态转移矩阵进行迭代; ④卡尔曼增益更新; ⑤状态测量更新; ⑥误差协方差与滤波跟踪结果更新。

2.2 锂电池建模及参数辨识

二阶 RC 等效电路模型开路电压 U_{oc} 、两个电阻电容 (R_C)回路和欧姆内阻 R_0 组成, 能够体现电池在工作时的极化效应和瞬态效应, 能够保证模型对应真实电池电化学性质不失真, 且模型数学表示不会过于复杂, 在仿真与实测中有较高价值。

对 CALCE 实验室在动态应力测试(DST)工况下电池 SOC 参数辨识结果如下, 其中横坐标为电池当前 SOC, SOC 值接近 1 则认为充满, 纵坐标是当前 SOC 状态下对应的电池端电压。

从图 1 可见, 在 DST 工况下, SOC 与 OCV 变化的线性度较好, 二者关系能够使用最小二乘进行拟合。在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建电池的仿真模型, 本文主要用脉冲电流信号模块产生仿真实际的电流信号验证。用 Matlab 工具箱拟合不同 SOC 下的对应的 RC 参数以及电池端电压与 RC 网络电压之间的关系。

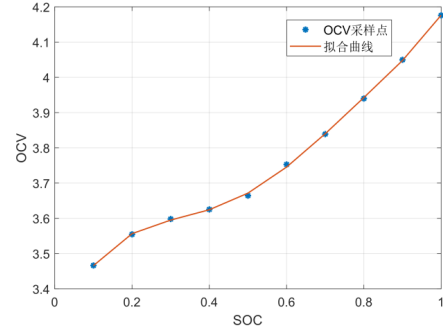


图 1 SOC—OCV 拟合曲线

对电池模型进行脉冲激励响应实验, 以一个充电放电周期的检测值为基础, 进行特定荷电状态下, 通过放电、静置、再放电的循环的步骤测试仿真电路对脉冲电流的响应。在脉冲放电过程中, 电池模型响应误差保持轻微波动; 脉冲放电结束时, 电池的动态响应特性导致此时电池模型的电压响应误差产生激励响应; 静置过程中, 电池模型外部输入保持不变, 误差跟踪使得模型的仿真值逐渐趋近实际的电压值, 误差最终趋近于 0, 从而实现完全跟踪。

通过对二阶 RC 模型的分析, 选用 SOC 和极化电阻两端的电压作为系统的状态向量, 得到模型的离散状态空间模型。状态方程如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} \text{SOC}_k \\ U_{1,k} \\ U_{2,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SOC}_{k-1} \\ U_{1,k-1} \\ U_{2,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\eta \frac{\Delta t}{C} \\ R_1 (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}}) \\ R_2 (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}}) \end{bmatrix} I_{k-1} + w_{k-1} \quad (3)$$

其中实验采样周期、电池容量、电池的库仑效率均为已知值; 而通过二阶模型可计算对应电容上的电压值, 推导出观测方程为:

$$U_k = \begin{bmatrix} \frac{dU_{oc}(\text{SOC})}{d(\text{SOC})} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SOC}_k \\ U_{1,k} \\ U_{2,k} \end{bmatrix} - R_0 I_k + v_k \quad (4)$$

进行卡尔曼滤波算法迭代即可完成 SOC 估计。

3 基于 PSO-EKF 的 SOC 估计实验

3.1 粒子群优化方法

作为一种善于解决最优化问题的元启发式算法, 粒子群中个体的属性通过位置和速度来表征, 通过初始化粒子群的位置, 以及更新进行的方向和速度进行搜索。假设搜索空间维数是 D 维, 群体中粒子的个数为 N , 则第 i 个粒子的位置和速度如式(5)~(6)所示。

$$X_i = (x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{iD}), i=1,2,\dots,N \quad (5)$$

$$V_i = (v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{id}), i=1,2,\dots,N \quad (6)$$

粒子群优化的过程就是寻找个体极值和全局极值的过程, 通过迭代公式来更新粒子的速度和位置, 其中 w 是惯性因子, c_1 和 c_2 是加速常数, r_1 和 r_2 是 0 和 1 之间的随机数。

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 r_1 (P_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (P_{gd} - x_{id}) \quad (7)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (8)$$

在 SOC 估计中使用端电压预测值与测量参考值之间的误差累积作为适应度函数。

3.2 SOC 估计实验与分析

采用 1C 放电倍率、恒流放电工况进行验证, 图 2 为恒流放电 SOC 估计结果与参考值对比曲线, 其中实线段是 SOC 标准参考值, 虚线段是未采用粒子群算法优化的卡尔曼滤波跟踪的 SOC 值, 而颜色更深的点横虚线段是针对噪声协方差进行优化后的 SOC 估计值。

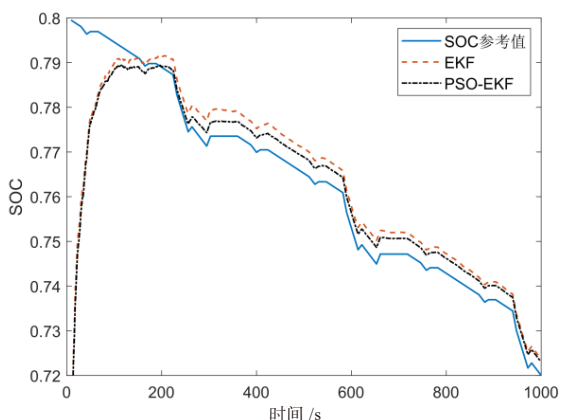


图 2 SOC 估计结果

从图中可以看出, 在以 SOC=0.8 作为参考值起点, 在 0 s 时预测起点与参考值差距较大, 卡尔曼滤波跟踪算法在接下来的时间内能够快速逼近参考值并持续跟踪。且由于动态工况是间歇式放电, 在 SOC 随时间变化时会有突变点, 从图中也可以看出跟踪算法在 SOC 非线性变化时的拟合效果也较好。在 SOC 跟踪估计过程中, 还需要对端电压进行计算, 为了对端电压和 SOC 的估计误差进行定量的对比。其中平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 表示预测值与实际值之间的偏差程度见表 1)。

表 1 估计误差

项目	EKF		PSO-EKF	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
端电压	0.0585	0.0241	0.0536	0.0227
SOC	0.0024	0.0064	0.0017	0.006

在循环测试工况下, 相较于 EKF 算法, 使用粒子群算法进行 EKF 参数优化后的 SOC 估计误差更低, 其中 EKF 估计误差都在 0.25% 以内, 对端电压的估计误差最大不超过 6%。且从 0.8 SOC 估计起点开始对比来看, PSO-EKF 算法能更快收敛到 SOC 的真实值。

4 总 结

本文的重点工作是分析 SOC 相关标准与理论表达式, 通过对目前常用的 SOC 估计方法包括滤波跟踪算法、神经网络算法和交流阻抗法等进行优缺点分析, 综合动力电池实际 SOC 估计的具体要求, 针对卡尔曼滤波算法处理非线性系统目前存在精度不高的问题以及卡尔曼滤波过程中噪声协方差矩阵由自定义初始化容易陷入局部最优的问题, 提出基于粒子群优化的扩展卡尔曼滤波算法。在 Matlab 中使用拟合工具对电路模型中的参数进行辨识, 使用 DST 测试工况数据分别进行了估算对比实验, 实验结果显示, 本文估计模型的荷电状态估算误差不超过 0.25%, 通过实验测试与滤波跟踪算法实现了对锂离子电池 SOC 的滤波跟踪, 并验证了本文方法的准确性。

参考文献

- [1] 葛娟娟. 基于 Simulink 的电动汽车电池管理系统建模与集成仿真研究 [J]. 汽车电器, 2024, (7): 24-28.
- [2] 南金瑞, 孙路. 基于粒子群算法估计实际工况下锂电池 SOH [J]. 北京理工大学学报, 2021, (1): 59-64.
- [3] 吴健, 尹泽, 李豪, 等. 基于分数阶理论的锂离子电池高频等效电路模型 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(18): 3902-3910.
- [4] 刘军伟. 轻型电动货车分布式电池管理系统设计与实现 [D]. 北京: 中国科学技术大学, 2021.
- [5] 侯书增, 伍志明, 罗程远, 等. 基于 EKF-LSTM 算法融合的锂离子电池 SOC 估计 [J]. 电力电子技术, 2024, 58(8): 61-65.
- [6] 钱伟, 王亚丰, 王晨, 等. 基于 BP 神经网络与 H_∞ 滤波的锂电池 SoH-SoC 联合估计研究 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 307-319.
- [7] 李超凡, 杨林. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池荷电状态估计 [J]. 电源技术, 2024, 48(12): 2404-2409.
- [8] 钟彦雄. 电动汽车锂离子电池荷电状态估算方法研究 [J]. 时代汽车, 2023, (5): 109-111.
- [9] 沈驰. 我国新能源汽车发展与动力电池综合测试技术 [J]. 内燃机与配件, 2020, (17): 206-207.
- [10] 廖友萍, 李睿, 吕航, 等. 基于 EKF 的钛酸锂电池 SOC 估计 [J]. 电源技术, 2023, 47(5): 639-643.