

基于多传感器融合的“多站融合”储能站 低功耗无线电池高精度监测

李炜¹, 魏军², 闫润珍², 苏蕊², 顾冰凌^{1†}

(1. 国网思极飞天(兰州)云数科技有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 国网甘肃省电力公司互联网事业部, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:以提升储能站无线电池的监测精度为研究目标,提出了基于多传感器融合的“多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测方法。基于多传感器采集储能站低功耗无线电池监测信号,并利用卡尔曼滤波改进小波阈值算法,对去噪后的传感器输出信号展开状态估计。结合自适应加权算法融合多传感器监测结果,通过粒子滤波算法实现储能站低功耗无线电池高精度监测。实验结果显示,该方法的放电剩余电量监测误差和充电容量监测误差均较低,监测响应时间低于 0.5 ms,可以实现高精度监测。

关键词:多传感器融合;无线电池;高精度监测

中图分类号:TN-393

文献标识码:A

“Multi Site Fusion” Energy Storage Station Low Power Wireless Battery High Precision Monitoring Based on Multi Sensor Fusion

LI Wei¹, WEI Jun², YAN Runzhen², SU Rui², GU Bingling^{1†}

(1. State Grid Siji Feitian (Lanzhou) Cloud Data Technology Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company Internet Division, Lanzhou, Gansu 730300, China)

Abstract: In order to improve the monitoring accuracy of wireless batteries in energy storage stations, a high-precision monitoring method of low-power wireless batteries in energy storage stations based on multi-sensor fusion is proposed. Based on the multi-sensor acquisition of low-power wireless battery monitoring signals of energy storage station, and using Kalman filter to improve wavelet threshold algorithm, the state estimation of denoised sensor output signals is carried out. Combined with the adaptive weighting algorithm, the multi-sensor monitoring results are fused, and the particle filter algorithm is used to realize the high-precision monitoring of low-power wireless batteries in energy storage stations. The experimental results show that the monitoring error of the residual discharge capacity and the monitoring error of the charging capacity are low, and the monitoring response time is less than 0.5 ms, which can realize high-precision monitoring.

Key words: multi-sensor fusion; wireless battery; high precision monitoring

“多站融合”储能站是指将多个储能站进行整合、协同运行的系统,可以实现不同储能站之间的数据共享、资源互补,提高整体能源效率和系统的稳定性^[1]。“多站融合”储能站通常采用大容量、高能量密度的无线电池作为能量储存设备,一旦发生

过充、过放等问题会提升火灾和爆炸的风险,降低储能站的安全运行。程清伟等^[2]对锂离子动力电池荷电状态进行监测仿真,通过构建 2 阶 RC 等效电路模型,采集电池充放电过程中的电压、电流等数据,利用卡尔曼滤波算法离散噪声后建立状态转

移矩阵,完成锂离子动力电池荷电状态监测。但是,该方法在数据采集过程中存在计算开销较高的问题。张媛等^[3]提出基于电池簇放电电量的电池堆不一致性在线监测方法,拟合储能电站电池容量与电量之间的关系,选择基准簇获取变化速率,对其进行归一化处理后将其作为时序信号,输入到 BP 神经网络,完成电池状态监测。但是,该方法去噪效果较差。Khairunnisa 等^[4]提出微型发电机系统蓄电池充放电监测方法,设计并部署传感器网络采集数据,利用深度学习算法建立蓄电池监测模型,通过数据训练和学习,实现对充电和放电过程中的电池容量、温度等状态监测。但是,该方法监测响应时间有待验证。Yildirim 等^[5]提出基于模块化的电池储能优化算法,将电池储能系统分解为充电模块、放电模块和储能容量模块,并建立模块之间的协调关系。利用遗传算法对各模块的参数进行优化调整,完成高精度电池储能监测。但是,该方法监测误差较高。

为了解决当前研究方法存在的问题,提高无线电池运行监测效果,提出了基于多传感器融合的“多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测。通过多传感器采集,获取更全面、准确的储能站低功耗无线电池的监测数据,提高监测的全面性和可靠性。利用卡尔曼滤波改进小波阈值算法,实现对传感器输出信号的优化处理,减少噪声干扰,提高状态估计的精度和稳定性。通过自适应加权算法有效整合多传感器监测结果,根据各传感器数据质量和重要性进行自动调整权重,提高监测结果的一致性。引入粒子滤波算法,实现对储能站低功耗无线电池监测过程的精确跟踪和状态估计。

1 基于多传感器的储能站低功耗无线电池监测信号采集

“多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测的基础是信号采集。因此首先设计基于传感器的储能站低功耗无线电池监测装置。监测装置包括电压电流采集、采样录波、多传感器智能监测、通信等五个功能单元,由电压调节模块、监控模块、通信模块等硬件组成,可在不影响电池正常运行的前提下,实现对无线电池的高精度监测。电压调节模块可完成电压控制功能,使无线电池承受住储能站经常性负荷和跳闸线圈冲击负荷,从而实现无线电池性能在线监测。按照直流电源运行规程要求,储能站直流电压波动不得超过 10%^[6-7]。多传感器

监控模块主要通过多传感器融合完成无线电池组电压、电流、内阻等状态参数的采集,实现无线电池全参数智能状态感知;采样录波模块,采用多片 24 位高精度 Sigma-Delta 模数转换器并行采样技术,保证高精度数据采集和信号完全隔离,可实现同时对无线电池运行状态参数进行实时采样和缓存。通信模块主要用于无线电池组剩余容量监测装置和传感器监控模块的数据传输和信息交互,从而实现无线电池运行状态的远程在线监控。

基于上述设计的监测装置,设置储能站集电线的局部放电发生时时刻用 t_0 描述,假如储能站无线电池组的局放脉冲到达无线电池组传感器 a 的时刻用 t_a 描述,则得出储能站无线电池监测数据的采集结果:

$$Y = \frac{v \cdot \sum_{a=1}^n (t_a + t_0)}{2} \quad (1)$$

式中, v 为无线电池放电信号在储能站线路中传播速度。

通过多传感器融合采集储能站集电线局部放电信号,并对储能站集电线局放信号到达传感器时间差进行比较,完成储能站集电线局放源定位。

2 基于改进小波算法的无线电池监测信号去噪

上节采集的数据中存在大量噪声,所以需要使

用小波阈值去噪算法对数据实施去噪处理,获取完整的电池运行数据。

设定带有噪声电池监测数据表述形式为:

$$Y(i) = s(i) + \alpha(i) \quad (2)$$

式中,信号长度表述成 i 形式,真实电池监测信号描述成 $s(i)$ 形式,噪声信号表述成 $\alpha(i)$ 形式。

基于上述信号表述形式,对含有噪声的电池监测信号实施小波变换,信号在 χ 尺度下的第 j 个小波系数为 $W_{\chi,j}$,小波邻域阈值表述成 θ 形式,以此获取监测信号的噪声标准差估计值:

$$\epsilon = \frac{\delta |W_{\chi,j}|}{\theta Y(i)} \quad (3)$$

式中,噪声系数描述成 δ 形式。

上述计算结果忽略了噪声信号近似系数子带上的高频系数阈值,因此选择采用卡尔曼滤波算法对小波阈值去噪后传感器输出信号展开状态估计^[8-9]。

分析 $(l-1)$ 时刻传感系统中各传感器的运行状态 Y_{l-1} , 建立信号传输矩阵 C 、 D , 分别表示传输过程噪声与该状态下的测量噪声, 结合 Y_{l-1} 对当前 l 时刻的传感器信号噪声状态展开预判:

$$Y_l = CY_{l-1} + D\epsilon \tag{4}$$

式中, Y_l 为 l 时刻的传感器信号噪声状态。如果当前传感信号噪声状态不变, 则 $Y_l = 0$ 。

以 $(l-1)$ 时刻传感器协方差矩阵 R_{l-1} 为依据, 设过程协方差矩阵为 S , 结合式(4)对当前时刻传感器信号内的含噪协方差矩阵展开更新:

$$R_{l-1} = Y_l C^2 + S \tag{5}$$

设 F 为 C 、 D 噪声矩阵的协方差, I 为总体测量矩阵, 根据卡尔曼滤波原理设 L_g 为卡尔曼增益, 对当前传感器信号噪声状态展开估计^[10-11]:

$$Y'_l = Y_l I + L_g (F - R_{l-1}) \tag{6}$$

利用噪声状态估计值 Y'_l , 对信号协方差矩阵展开更新, 更新后获得去噪后的监测信号:

$$R = (Y'_l - L_g I) - R_{l-1} \tag{7}$$

通过以上运算向下一时刻的反复迭代, 即可实现去噪后传感器信号的更新及输出, 完成储能站集电线局部放电信号去噪, 并提取有价值的储能站无线电池监测信号。

3 “多站融合”储能站无线电池高精度监测多传感器信号融合

“多站融合”储能站无线电池监测主要依靠多传感器与监控中心形成的联动, 由于“多站融合”环境中存在多个传感器同时运行的情况, 上节去噪后的大容量数据通常具备多维特点, 因此利用自适应加权算法对多传感器监测信号进行融合处理^[12-13]。

针对负责储能站无线电池监测的任意两个传感器 r 、 s , 设其输出信号分别为 R_r 、 R_s , 传感器 r 输出信号中的误差信号为 W_r , 传感器 s 输出信号中的误差信号为 W_s , 则传感器输出信号与误差信号的关系满足条件为:

$$\begin{cases} R_r = W_r + R \\ R_s = W_s + R \end{cases} \tag{8}$$

由于储能站电池监测传感器皆为相对独立状态, 因此传感器的输出信号之间不存在相互影响关系, 由此推导出传感器 r 的自相关函数 T_r , 以及传感器 r 与传感器 s 间的相关函数 T_{rs} :

$$\begin{cases} T_r = E(R_r \cdot R_r) \\ T_{rs} = E(T_{rs} \cdot \epsilon_r^2) \end{cases} \tag{9}$$

式中, $E(\cdot)$ 表示传感器误差信号的均值函数, ϵ_r^2 为信号融合误差方差。

为融合结果更加精准, 需参考传感器 r 的观测权值:

$$\omega_r = \frac{\epsilon_r^2 (T_{rs} + T_{rr})}{\sum_{m=1}^n [\epsilon_r^2(m)]^{-1}} \tag{10}$$

式中, $\epsilon_r^2(m)$ 为 m 传感器输出信号的方差。

设定 $\hat{c}_0$ 为多个传感器初始状态向量, S_0 表示协方差矩阵的初始值, 对 $\hat{c}_0$ 和 S_0 展开计算如下:

$$\begin{cases} \hat{c}_0 = \omega_r (c_0) \\ S_0 = \omega_r (c_0 - \hat{c}_0) l \end{cases} \tag{11}$$

式中, c_0 为多个传感器初始状态向量。

基于融合尺度 ϵ , 对多传感器融合状态先验变量展开估计:

$$C_l = H(S_0, I_{l-1}) + \epsilon \hat{c}_0 \tag{12}$$

式中, H 和 I 分别表示传感器融合状态参数和融合偏置变量。

分析传感器融合模块中融合状态参数的分布情况, 其在正态分布中的最佳值一般取 2。通过 DS 证据理论实现多传感器监测结果的融合, 设 B 个互斥独立事件为一个集合 $\varphi = \{x_1, x_2, \dots, x_b, \dots, x_B\}$ 。将 φ 中所有子集表示为幂集 2^φ , 即不同传感器采集信息的基本分配概率, 则 n 个传感器融合后的输出值为 $\hat{Y}$, 计算过程如下:

$$\hat{Y} = \sum_{r=1}^n \frac{C_l}{2^\varphi \sum_{m=1}^n (\epsilon_m^2)^{-1}} \tag{13}$$

4 “多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测实现

粒子滤波算法其基本原理是在获取电池大规模任意离散采样点的基础上, 对电池监测参数随机变量概率密度函数进行近似拟合, 以此得到电池实际监测参数结果^[14-15]。

在 k 次循环周期下, 储能站低功耗无线电池全生命周期状态 x_k 可通过观测值 z_k 实现不断调整确定。依据最小均方误差原则, 无线电池全生命周期状态的最佳估计结果是 $p(x_k | z_k)$ 的条件期望 $E(x_k | z_k)$:

$$E(x_k | z_k) = x_k p(x_k | z_k) \hat{Y} \tag{14}$$

式中, $p(x_k | z_k)$ 用于表示后验概率密度分布函数。

在不断对新量测数据 z_k 进行修正与递归监测

过程中即可实现无线电池全生命周期状态最佳估计结果的确定。设电池的时变参数状态向量为 x_τ , 非线性输入向量为 v_τ , 将非线性离散函数 $f(x_\tau, v_\tau)$ 进行泰勒一阶展开, 得到无线电池监测参数输出结果为:

$$f(x_\tau, v_\tau) = \varphi_\tau x_\tau + \varphi'_\tau v_\tau + w_\tau E(x_k | z_k) \quad (15)$$

式中, φ_τ 、 φ'_τ 分别为状态转移矩阵和前馈矩阵, w_τ 为过程向量权重。

由此完成基于多传感器融合的“多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测。

5 实验与分析

5.1 实验环境设置

通过上述论述,从理论方面实现了基于多传感器融合的“多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测方法的设计,为了进一步验证该方法的实际应用可行性及有效性,针对某储能站无线电池组进行监测。实验在下述实验环境中运行:采用 JDK6.0 工具,以 MyEclipse8.0 为基础,以 J2EE 为编程语言实现对监测方法的程序计算。实验环境服务器采用 CentOS7.0 操作系统,数据库采用 McCort SQL Server DBMS。运行计算机采用 Windows 10 操作系统。电池监测装置程序由 Keil 5 软件编写。在不影响储能站无线电池组实际运行的环境当中,选用该储能站处于备用状态的一组 52 节 48V 500 Ah 型号无线电池组作为此次实验的研究对象,转化效率为 0.99。

无线电池在充放电过程中,电离子通过正负电极材料向外传递,使其带着电荷跨越电极界面,产生电流。在对电池充电时,正极材料中的电离子会移动到负极,使充电容量变得更高。该电池组的初始参数如表 1 所示。

将表 1 数据作为参考数据,进行监测实验,并将文献[4]提出方法和文献[5]提出方法作为对比方法,与本文所提方法在相同条件下进行实验。

5.2 实验结果分析

首先,对电池组当前放电剩余电量监测误差进行实验测试,以上述 3 种方法的监测精度作为指标依据,并根据测试结果验证 3 种监测方法的实际监测效果,结果如图 1 所示。

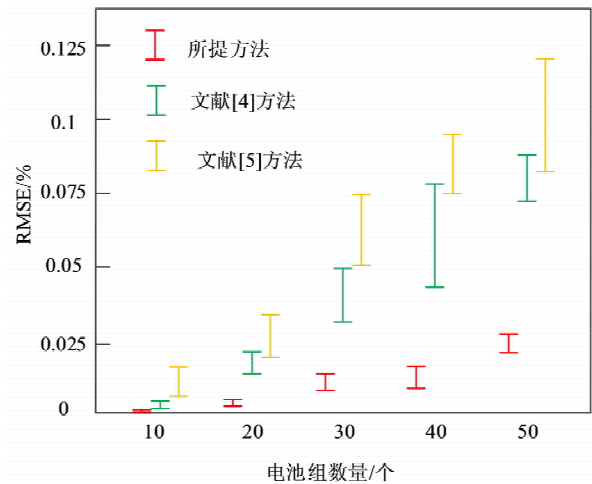


图 1 不同监测方法的放电剩余电量监测误差结果

分析图 1 可知,在使用上述 3 种方法开展电池剩余电量监测时,监测误差会随着电池组数量的增加而逐渐上升。其中,所提方法的电池剩余电量监测误差是 3 种方法中最低的,一直低于 0.03。

接下来,将电池使用 100 个周期后的实际充电剩余容量作为标准,验证三种方法对于无线电池组的充电容量监测结果,结果如图 2 所示。

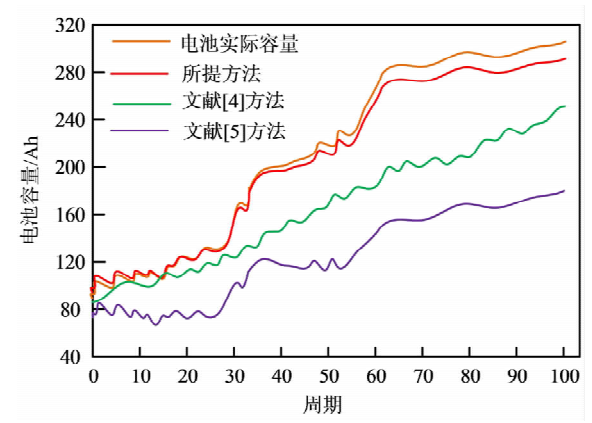


图 2 不同监测方法的充电容量监测结果

由图 2 可以看出,与其他两种监测方法相比,电池的真实充电容量与本文方法监测出的电池容量较为相似,监测误差低于 0.05 Ah,说明应用本文方法可以更准确地监测出“多站融合”储能站低功耗无线电池的容量,实现了高精度监测。

为了验证本文方法的低功耗监测性能,需要针对不同电池设置八个小组,测试三种监测方法的监测响应时间,预期响应时间要求为 0.5 ms,具体测试结果如图 3 所示。

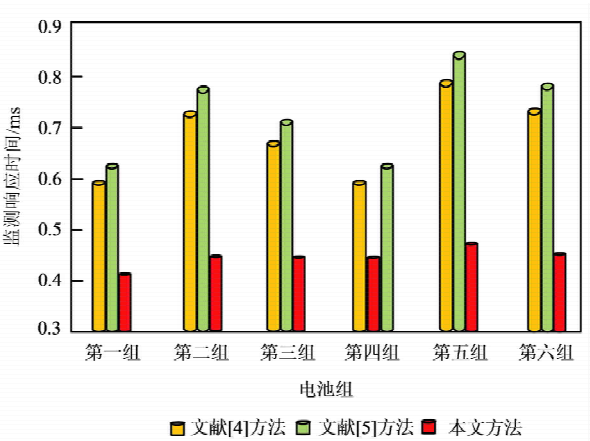


图 3 三种方法的监测效率比较

由图 3 数据可知,本文方法监测效率较高,响应时间低于 0.5 ms,符合响应要求,而其他方法的监测效率不满足监测要求。说明运用本文方法能够获得较好的估算效率,可实现高效低功耗监测。

6 结 论

为了提升储能站无线电池的监测精度,研究基于多传感器融合的“多站融合”储能站低功耗无线电池高精度监测方法。基于多传感器采集储能站低功耗无线电池监测信号,并进行去噪;基于自适应加权算法和卡尔曼滤波完成监测多传感器信号融合,利用粒子滤波算法实现无线电池状态参数的高精度监测。实验结果证明该方法有效提升了监测精度和监测效率。

参考文献

[1] 封钰,俞永杰,史雪晨,等. 多站融合模式下基于共享储能的多主体交易机制设计[J]. 电力需求侧管理,2023, 25(4): 21—27.

[2] 程清伟,姜立标. 锂离子动力电池荷电状态监测仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8):64—67,77.

[3] 张媛,夏向阳,岳家辉,等. 基于电池簇放电电量的电池堆不一致性在线监测方法[J]. 中国电力, 2023, 56(7):207—215 +227.

[4] KHAIRUNNISA N, HARTOYO, NURSUSANTO U. Development of monitoring device for battery charge/discharge control as electrical energy storage in mini-generating systems[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 221(1):012017.

[5] YILDIRIM B, ELGENDY M A, SMITH A N, et al. Efficiency optimized power-sharing algorithm for modular battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 42(11):11299—11309.

[6] 王桥,魏孟,叶敏,等. 基于 GWO-LSTM 与 LSSVM 的锂离子电池荷电状态与容量联合估计[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(3):571—579.

[7] 肖迁,焦志鹏,穆云飞,等. 基于 LightGBM 的无线行驶工况下电池剩余使用寿命监测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24):5176—5185.

[8] 刘金凤,陈浩玮,HERBERT H C I. 基于 VMD 和 DAIPSO-GPR 解决容量再生现象的锂离子电池寿命监测研究[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(3):1111—1120.

[9] 刘芳,马杰,苏卫星,等. 基于自适应回归扩展卡尔曼滤波的无线动力电池全生命周期的荷电状态估算方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4):698—707.

[10] 焦自权,范兴明,张鑫,等. 基于改进粒子滤波算法的锂离子电池状态跟踪与剩余使用寿命监测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18):3979—3993.

[11] 黄凯,丁恒,郭永芳,等. 基于数据预处理和长短期记忆神经网络的锂离子电池寿命监测[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15):3753—3766.

[12] 刘芳,李卓,苏卫星,等. 阶次自适应 AR 等效电路模型的锂电池 SOC 滑模观测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(10):1376—1385.

[13] 杨洁,万安平,王景霖,等. 基于多传感器融合卷积神经网络的航空发动机轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13):4933—4942.

[14] 黄正睿,潘森鑫,陈崇成,等. 集成 LoRa 与 BDS 的应急环境监测数据获取与传输技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4):530—537.

[15] 王瑞,宋树祥,夏海英. 融合阻抗模型与扩展卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估算[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(3):1—10.