

# 基于卡尔曼粒子滤波的电池机械安全性检测方法

宋冬冬<sup>1</sup>, 田浩<sup>1</sup>, 赵景波<sup>2</sup>, 廖连莹<sup>2</sup>

(1. 中汽研汽车检验中心(常州)有限公司, 江苏 常州 214220;

2. 常州工学院, 江苏 常州 213032)

**摘要:** 电池机械安全检测性能过差会降低电动汽车耐久性、安全性和稳定性, 威胁驾驶人员及乘客的生命安全, 为了推进储能技术的实质进展, 提出基于卡尔曼粒子滤波的电池机械安全性检测方法, 该方法以二阶戴维南等效电路模型为核心, 建立能够描述单体电池工作特性的观测模型, 并采集实际工况下与电池机械安全相关的参数。利用卡尔曼滤波优化、估计参数, 获取电池状态的预测结果, 实现电池机械安全性检测。实验结果表明, 所提方法检测性能好, 实用性强, 充分保证了电池机械安全检测性能。

**关键词:** 电池机械模型; 参数辨识; 卡尔曼粒子滤波; 安全性检测

中图分类号: TP277 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0120-05

## Battery Mechanical Safety Detection Method Based on Kalman Particle Filter

SONG Dong-dong<sup>1</sup>, TIAN Hao<sup>1</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>2</sup>, LIAO Lian-ying<sup>2</sup>

(1. CATARC Automotive Test Center (Changzhou) Co., Ltd., Changzhou 214220 China;

2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032 China)

**Abstract:** Poor battery mechanical safety detection performance reduces the durability, safety and stability of electric vehicles and threaten the life safety of drivers and passengers. In order to promote the substantial progress of energy storage technology, a battery mechanical safety detection method based on Kalman particle filter is proposed. This method takes the second order Thevenin equivalent circuit model as the core to establish an observation model that can describe the working characteristics of individual batteries, and collects the parameters related to the mechanical safety of the battery under the actual working conditions. The Kalman filter is used to optimize and estimate the parameters, obtain the prediction results of the battery state, and realize the battery mechanical safety detection. The experimental results show that the proposed method has good detection performance and strong practicability, and fully guarantees the battery mechanical safety detection performance.

**Keywords:** battery mechanical model; parameter identification; kalman particle filter; safety detection

## 0 引言

随着科学技术的快速发展, 节能环保逐渐成为人类生活的最新追求。电动汽车作为以绿色安全、污染物零排放为优势的新型科技, 一经推出, 便受到人们的青睐, 成为21世纪最具影响力的科研项目之一。考虑到传统汽车长期排放一氧化碳、二氧化硫及固体颗粒物等有害物质, 会对城市空气造成不可逆污染, 电动汽车采用能源储备量大、循环寿命长、充放电功率稳定的电池<sup>[1]</sup>作为供给汽车核心动力源的主要材料。从电化学角度分析电池, 其机械活动围绕电池组持续放电展开。然而即便是科技如此发达的现代社会, 电池机械活动仍极易受到单体电

压超标、过充过放、温度升高等外界因素干扰而出现电池剩余容量减少等问题, 间接缩短电动汽车续航里程。为了实时监测电池机械环境、分析电池负载特性, 解决由电池机械故障导致的电动汽车整车性能下降问题, 国内外相关人员投入到了电池机械安全检测方法的研究之中。

周宇<sup>[2]</sup>等人通过负极材料表面析锂采集广域电化学储能器件的原位电荷, 并从新物理量等角度测量原位电荷的安全性和稳定性, 实现电池机械安全性检测。郭绍陶<sup>[3]</sup>等人通过机器视觉采集清晰度低、表面光反射不均、氧化面积大的柱形锂电池在双高斯纹理滤波背景下的卷积图形, 并利用灰度分布曲线分割图形凹坑纹理, 提取每列图形特征。通过将图形特征输入先验知识中筛选, 实现电池机械安全性检测。高明裕<sup>[4]</sup>等人通过提取故障工况下锂电池斯皮尔曼秩相关系数, 建立基于锂电池机械

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62273061); 中汽研常州检验中心科研项目(CATC. 06-01-01)

收稿日期: 2023-11-22

活动的无量纲化滑动窗口。将多维度电池组运行特征输入无量纲化滑动窗口,实现电池机械安全性检测,但上述三种方法均存在检测性能差的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于卡尔曼粒子滤波的电池机械安全性检测方法。

## 1 电池机械模型和参数辨识

### 1.1 电池机械模型

对常应用于电动汽车的电池而言,能够全程展现其机械活动和动态特性的方式是建立符合时间尺度的单体模型。二阶戴维南等效电路模型是以戴维南定理为基础的电路模型,该模型的核心思路围绕等效电压源定律展开,即通过在电池周围布置独立电压源、独立电流源及串联电阻,模拟单口网络中负载开路从无到有的复杂直流电路。采用二阶戴维南等效电路的概念建立电池机械模型,获取能够描述单体电池工作特性的观测模型。戴维南定理的表达式如下:

$$H = \frac{2rI_{ij}^2}{\alpha y} \quad (1)$$

式中: $r$ 为电池的开路电压; $I_{ij}^2$ 为单体电池SOC值; $\alpha$ 为单体电池放电时的电流积分; $y$ 为单体电池充电时的电压积分。

等效电压源定律的表达式如下:

$$M = \frac{f_{ik}}{\sqrt{(1-\delta)q}} \quad (2)$$

式中: $\delta$ 为平均端电压; $q$ 为总电流; $f_{ik}$ 为电化学极化电阻。

电池机械模型结构如图1所示。

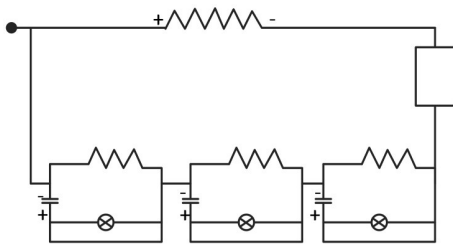


图1 电池机械模型结构

### 1.2 电池参数辨识

在实际工况下,电池的各项参数并不是固定不变的,而是在采集设备、系统噪声阵和观测噪声、极化电压<sup>[5]</sup>、极化电流、温度等外界因素的干扰下,为适应电路状态向量而随机变化的。在未发生离散化偏差的正常电路结构中,电池机械模型由于不存在单体差异,主要以权重归一的线性矩阵阐述电池状态矢量。这种理想化线性矩阵对辨识电池实时参数并不具备实际意义,原因在于现实生活中电池机械模型反馈的电池状态矢量总是存在待补偿、待纠正的单体差异。因此,分析实际工况下模型单体差异,辨识引发该差异的电池参数,是检测电池机械安全

的第一步。线性矩阵的表达式如下:

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^4 (\hat{g} - h_i) \quad (3)$$

式中: $n$ 为噪声协方差; $\hat{g}$ 为模型初始状态向量; $h_i$ 为浓差极化电阻。

电池SOC值和端电压能够决定电池机械模型单体差异。以电池机械模型为基础,根据基尔霍夫定律<sup>[6]</sup>,辨识差异化显著的电池参数,即电池SOC值和端电压。模型平均SOC值和平均端电压的计算公式如下:

$$\begin{cases} E = t^{-1} - k(\Delta s_a + 1) \\ Y = e_j / \sum_{k=0} d_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t^{-1}$ 为放电倍率; $k$ 为充电倍率; $\Delta s$ 为 $a$ 时刻的SOC均值; $e_j$ 为电容衰减速率; $d_k$ 为欧姆内阻。

模型迟滞SOC值和迟滞端电压的计算公式如下:

$$\begin{cases} J = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\omega^2}{c(x+1)} \\ V = b_i \ln(1 - \varepsilon^2 \sin \psi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $c^1$ 为放电效率; $x$ 为充电效率; $\omega^2$ 为满电空载电压; $b_i$ 为表征温度; $\varepsilon^2$ 为瞬时电荷标称容量; $\psi$ 为电流漂移噪声。

电池机械模型单体差异的表达式如下:

$$X = |\tau(j)| / 2l_x \quad (6)$$

式中: $\tau$ 为模型单体差异更新时间; $j$ 为状态转移值; $l_x$ 为模型 $x$ 时刻的后验概率。

存在单体差异的电池机械模型主要以当前状态值作为下一刻先验值的非线性矩阵阐述电池状态矢量。利用蓄电池在线监测装置采集电池SOC值、端电压等检测价值高的电池参数作为后续滤波处理的训练样本。

## 2 电池机械安全性检测

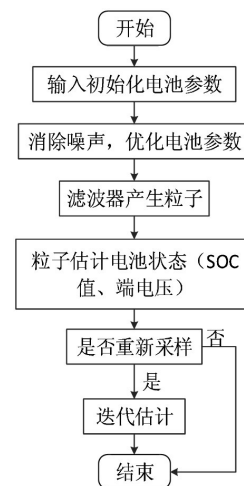


图2 卡尔曼粒子滤波的操作流程

卡尔曼粒子滤波(Kalman Filtering)是利用线性系

统状态方程检测训练样本噪声强度和状态量的数据处理技术,该技术由滤波去噪和状态估计<sup>[7]</sup>两部分组成,不仅能还原初始样本获取真实数据,还能估计待检测电池在实际工况下实时生成的参数,预测电池运行状态。卡尔曼粒子滤波于1961年被卡尔曼教授提出后,先后应用于可视化环境监测<sup>[8]</sup>、雷达导航、指导控制等多个领域,成为最受关注的数据处理技术之一。卡尔曼粒子滤波的操作流程如图2所示。

将从电池机械模型中采集的已辨识参数作为初始化电池参数与卡尔曼粒子滤波结合。滤波为提高粒子估计精度,对分布在滤波器中的初始化电池参数提出约束条件,限制状态变量中随机噪声的表达。滤波观测到的参数离散度计算公式如下:

$$B = \frac{w}{\sum_{j=0}^2 v_j^2 \eta^2} \quad (7)$$

式中: $w$ 为滤波观测周期; $v_j^2$ 为电池放电时间; $\eta^2$ 为初始概率分布中心。

初始化电池参数的约束条件如下:

$$V = \gamma \times \left\| i_{ij}^2 \right\| \quad (8)$$

式中: $\gamma$ 为噪声退化量度; $i_{ij}^2$ 为端电压与电池SOC值的映射关系。

随机噪声的表达式如下:

$$F = \sqrt{\frac{1}{z} \sum (n_i - n_j)^2} \quad (9)$$

式中: $z$ 为噪声幅值; $n_i$ 为外部噪声表现出的伏安特性; $n_j$ 表示均值为零的高斯白噪声。

成功优化初始电池参数后,滤波器产出具状态向量估计能力的粒子,开始估计描述电池机械状态的参数,预测电池状态。粒子估计电荷状态的公式如下:

$$Z = f_n \ln(1 - \lambda t_s) \quad (10)$$

式中: $f_n$ 为粒子数阈值; $\lambda$ 为理想荷电状态; $t_s$ 为时间复杂度。

粒子估计端电压的公式如下:

$$U = g_o(\beta) + \delta \quad (11)$$

式中: $g_o$ 为电池释放的总电量; $\beta$ 为理想端电压; $\delta$ 为电源正负极之间的电动势。

经过卡尔曼粒子滤波的循环迭代,与电池状态息息相关的参数被粒子反复估计<sup>[9]</sup>。根据卡尔曼粒子滤波预测的电池状态,实现电池机械安全性检测。

### 3 实验与结果

为了验证基于卡尔曼粒子滤波的电池机械安全性检测方法的整体有效性,需要对其进行测试。随机选择两款电池作为验证算法检测性能的试验对象,试验对象如

图3所示。

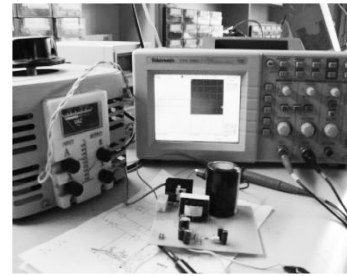


图3 试验对象

试验对象的技术参数如表1所示。

表1 试验对象的技术参数

技术参数	数值	
	试验对象一	试验对象二
额定电压/V	5	4.3
放电终止电压/V	3.58	4.1
充电终止电压/V	4.7	3.8
放电温度/°C	0~55	-10~70
充电温度/°C	0~50	0~60
使用寿命/次	250~360	440~600
能量密度·容量/(Wh/kg)	180~240	200~250
热稳定性/°C	600~700	630~780
动力电池正极材料体系	NCM	LMO+NCA
电池配备能量/kWh	80~170	110~200

#### (1) 电池SOC值检测

电池SOC值(State Of Charge)又称荷电状态,是反映电池剩余容量的评估指标。从宏观视角来看,电池SOC值不仅能估算电动汽车剩余里程,还能作为“低电”警报提醒使用者剩余电量。在日常生活中,电池极易受到环境温度、自放电功率等干扰因素的影响,出现长时间充电后,电量消耗骤升,电池放电过快等问题,使电池无法以用电设备实际需求放电,直接导致电池SOC值下降明显。电池SOC值未按用电设备需求稳步降低会使操作者对剩余电量估算错误,进而导致安全事故的发生。因此,电池SOC值在评估电池机械安全性检测能力方面具有实际应用价值<sup>[10]</sup>。

将试验对象充满电,然后置于高温环境,诱导电池持续放电。电池放电电流波形如图4所示。

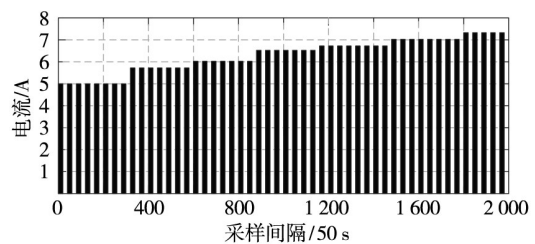
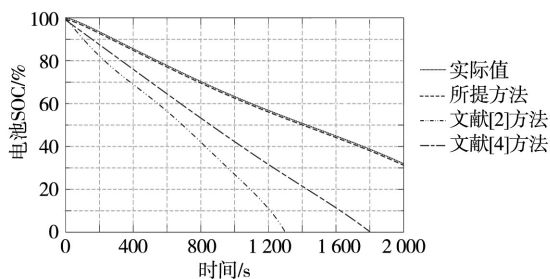


图4 电池放电电流波形

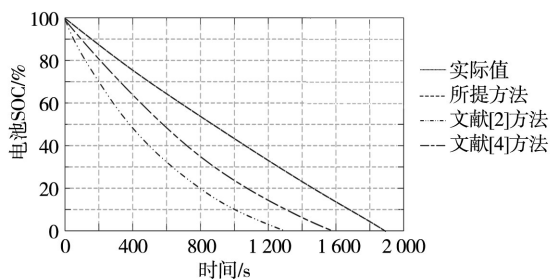
如图4可见,两款电池的总放电时间为2000s,采样

间隔为50 s。随着放电时间的延长,两款电池在高温环境下的放电电流不断升高,电池逐渐进入高温故障状态<sup>[11]</sup>。

分别采用所提方法:锂离子电池负极析锂检测方法和基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测方法,作为对比方法试验对象,并视不同方法检测到的电池SOC值变化情况为预测值,电池SOC值实际变化情况为实际值。通过对比不同方法的预测值和实际值,判断不同方法的检测性能。不同方法的对比结果如图5所示。



(a) 不同方法下试验对象一的对比结果



(b) 不同方法下试验对象二的对比结果

图5 不同方法的对比结果

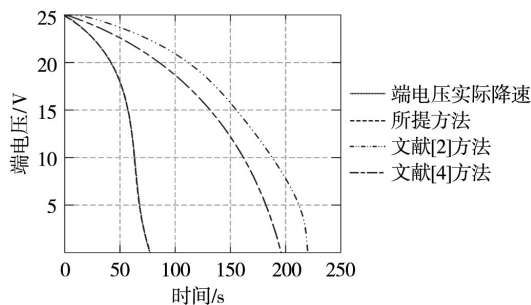
如图5可见,采用所提方法检测电池机械安全,其在高温故障环境下检测到的电池SOC值与实际值吻合,说明所提方法电池机械安全检测性能好<sup>[12]</sup>。因为所提方法在辨识与电池机械模型单体差异相关的参数后,优先利用滤波消除参数噪声,获取更为优质的电池参数,这样获得的检测结果可信度更高。采用锂离子电池负极析锂检测方法和基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测方法完成该参数的检测,二者在高温故障环境下检测到的电池SOC值与实际值呈现整体偏离的趋势,说明这两种对比方法下电池机械安全检测性能差。经上述对比,可知所提方法对电池机械安全的检测性能明显优于传统方法。

#### (2) 端电压检测

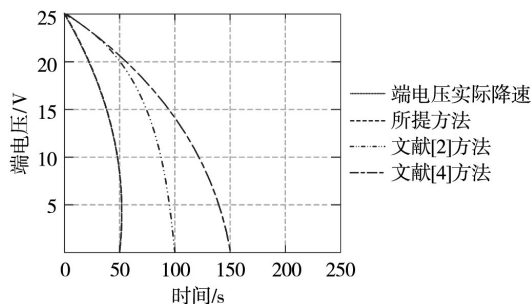
端电压是指电源正负极之间的电压。当外界因素影响电池状态,导致电池机械活动发生故障时,电荷混乱移动诱导电场力失衡会迫使电源正负极之间的端电压加速下降。

为了进一步验证所提方法的实用性,将试验对象置

于能够产生异常电化学反应的电解液中,模拟电池机械故障。分别采用所提方法:锂离子电池负极析锂检测方法和基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测方法检测试验对象,并记录不同方法的端电压下降速率。视不同方法检测到的端电压下降速率为预测值,实测端电压下降速率为实际值。通过对比不同方法的预测值和实际值,判断不同方法的检测性能。不同方法的对比结果如图6所示。



(a) 试验对象一



(b) 试验对象二

图6 不同方法的对比结果

如图6可见,所提方法检测到的端电压下降速率与实际值在各时间点的重合率较高,说明所提方法的检测性能好。两种对比方法检测到的端电压下降速率与实际值在各时间点的重合率较低,说明锂离子电池负极析锂检测方法和基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测方法检测性能差。经上述对比,进一步验证了所提方法的实用性。

## 4 结束语

近年来,以电池为能源驱动的电动汽车成为发展前景良好的新兴科技。在频繁的充、放电过程中,电池作为辅助能量源,检测其运行状态是否安全是电动汽车电池管理系统急需解决的一项难题。为了及时修复电池机械故障,相关人员对电池机械安全检查方法展开了研究。如何在保证电池机械安全检测性能的同时,缩短电池机械安全检测时间,是下一步研究工作的重点。

## 参考文献：

- [1] 陈南,李兵兵.电动汽车动力电池包结构设计分析研究进展[J].机械制造与自动化,2022,51(1):1-6,10.
- [2] 周宇,邓哲,黄震宇,等.锂离子电池负极析锂检测方法的研究进展[J].硅酸盐学报,2022,50(1):84-100.
- [3] 郭绍陶,苑玮琦.基于双高斯纹理滤波模板和极值点韦伯对比度的圆柱锂电池凹坑缺陷检测[J].电子学报,2022,50(3):637-642.
- [4] 高明裕,蔡林辉,孙长城,等.一种基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测算法[J].电子与信息学报,2022,44(11):3734-3747.
- [5] 李志鹏,梁威.兰姆波锂电池极化电压优化实验[J].应用声学,2021,40(6):871-877.
- [6] 张皓斐,张皓博.基于卡尔曼滤波的乐音基频小波自相关检测法[J].电子设计工程,2022,30(7):77-81.
- [7] 王顺江,孙乔,侯验秋,等.基于状态估计及综合可疑度的参数辨识和修正方法[J].中国电力,2020,53(2):36-42.
- [8] 张骞,裴荣,徐昕,等.基于压缩感知的可视化环境监测系统研究[J].机械制造与自动化,2022,51(2):172-176.
- [9] 谭星浩,刘有耀,张雪兰.改进无迹粒子滤波的电动汽车锂电池SOC估算[J].传感器与微系统,2022,41(4):134-137.

- [10] 胡铁斌,许建远,陈樱露,等.智能配网终端就地闭环的分布式测试系统[J].自动化技术与应用,2023,42(2):41-44.
- [11] 许金星.智能百叶窗蓄电池充放电控制系统的设计[J].自动化技术与应用,2020,39(2):128-131.
- [12] 胡浪,乔俊叁,何涛.扩展卡尔曼滤波算法的锂电池SOC估算[J].金属功能材料,2022,29(2):57-61.

作者简介:宋冬冬(1994-),男,本科,助理工程师,研究方向:新能源动力电池。

(上接第79页)

## 3 结束语

本文结合HPLP技术和小波图像压缩算法提出一种基于HPLC的无人值守变电站物联网远程监控系统。经过大量实验测试证明,采用所设计系统可以有效提高无人值守变电站物联网远程监控视频质量,满足无人值守变电站物联网远程监控需求,全面提升无人值守变电站物联网远程监控视频图像的压缩比以及峰值信噪比,同时可以精准监控无人值守变电站的电压和电流,实时掌握变电站运行情况,同时还可以获取更加精准的监测结果。后续还将对所提系统展开进一步优化,使其可以得到更加广泛应用。

## 参考文献：

- [1] Lama J, Yau A, Chen G, et al. Textile Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Biomonitoring[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(35):19149-19178.
- [2] PARMINDER KAUR, VIKAS PANDEY, BALWINDER RAJ. Comparative Study of Efficient Design, Control and Monitoring of Solar Power Using Internet of Things[J]. Sensor Letters: A Journal Dedicated to all Aspects of Sensors in Science, Engineering, and Medicine, 2020, 18(5):419-426.
- [3] 郭东明.基于CAN总线的无人值守变电所过程层设备运行状态智能监控方法[J].能源与环保,2021,43(10):288-293.
- [4] 赵安,马彬彬.基于Modbus现场总线的电动机运行监控网络研究[J].机械制造与自动化,2021,50(3):200-202.
- [5] 韩建萍.煤矿井下无人值守变电所远程智能监控系统升级改造[J].煤炭工程,2022,54(10):90-94.
- [6] 符大利.基于数字孪生驱动的综采工作面远程监控系统[J].

煤炭技术,2022,41(4):175-178.

- [7] 王小虎,郭广鑫,董佳涵,等.变电站应用实景复制技术建模和网络安全监控[J].中国电力,2021,54(11):221-228.
- [8] 尹根,徐曦.基于IEC61850的变电站电池远程监控系统设计[J].现代电子技术,2022,45(12):121-124.
- [9] 陈家璘,周正,冯伟东,等.基于无线网络的电力监控系统的设计[J].自动化技术与应用,2020,39(4):168-171.
- [10] 尉镜,李震宇,王海鹏,等.基于物联网的配网户外箱柜预警远程智能监控系统[J].电子器件,2021,44(5):1198-1203.
- [11] 刘云鹏,汪熙,刘新蕾,等.一种全息体视图虚实场景融合显示的图像编码方法[J].中国激光,2022,49(4):147-156.
- [12] 章盼梅,朱万浩,孔令棚,等.基于物联网的侦察机器人远程监控系统[J].自动化技术与应用,2023,42(3):85-89.

作者简介:豆朋(1983-),男,硕士,高级工程师,研究方向:电网运行分析。