



基于内阻动态变化的电池 SOH 诊断教学系统

李 聪, 刘小标, 王亚玲, 李 辉*

(河南农业大学理学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 电池管理技术实践教学普遍存在三个问题: 理论知识抽象晦涩; 真实电池老化过程难以精准复现; 学生实操机会匮乏。开发一套基于内阻动态变化的电池健康状态 (SOH) 物理诊断教学系统, 核心模块是可编程的老化模拟单元, 能复现电池从全新到报废各阶段的内阻状态, 同时集成多参数采集、算法分析与可视化功能, 从而搭建一个完整的教学实验平台。该系统具备参数可调、操作简单等优点, 对内阻与电池 SOH 关联规律探究以及不同工况下 SOH 衰减特性分析等实验项目, 都能提供良好的支持。课堂教学实践证明, 该系统内阻测量精度控制在 $\pm 1\%$ 以内, SOH 估算误差控制在 $\pm 3\%$ 。

关键词: 电池健康状态 (SOH); 内阻测量; 教学实验系统; 数据可视化; 工程实践

中图分类号: TM912.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1579(2026)02-0560-04

Battery SOH diagnosis teaching system based on dynamic internal resistance variation

LI Cong, LIU Xiaobiao, WANG Yaling, LI Hui*

(College of Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Battery management technology practical teaching generally faces three problems: abstract and obscure theoretical knowledge; difficulty in accurately reproducing real battery aging processes; scarcity of hands-on opportunities for students. A physical diagnostic teaching system for battery state of health (SOH) based on dynamic internal resistance changes has been developed. Its core module is a programmable aging simulation unit capable of reproducing internal resistance states at various stages from brand-new to end-of-life; meanwhile, it integrates multi-parameter acquisition, algorithm analysis and visualization functions, thereby constructing a complete teaching experimental platform. This system features adjustable parameters and simple operation, providing excellent support for experimental projects such as exploring the correlation between internal resistance and battery SOH, as well as analyzing SOH degradation characteristics under different operating conditions. Classroom teaching practice has demonstrated that the system controls internal resistance measurement accuracy within $\pm 1\%$ and SOH estimation error within $\pm 3\%$.

Key words: battery state of health (SOH); internal resistance measurement; teaching experimental system; data visualization; engineering practice

健康状态 (SOH) 直观地显示了电池当前性能与出厂初始状态的差异, 直接关系到电池的使用寿命和安全运行^[1]。SOH 的定义是: 在规定条件下, 电池实际性能与额定标称性能的比值。一般在分析

SOH 时, 会重点关注容量衰减、内阻增长速率这两个核心参数^[2]。当前, SOH 评估在实际教学与工程应用中仍存在方法复杂、设备昂贵、原理抽象等难题, 难以有效融入实践教学体系。

作者简介:

李 聪 (1978—), 女, 河南人, 河南农业大学理学院教授, 硕士, 研究方向: 信息采集与处理、电子信息材料及电子信息;

李 辉 (1977—), 男, 河南人, 河南农业大学理学院教授, 硕士, 研究方向: 电子信息材料、农业物联网的应用, 通信作者。

基金项目: 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2024SJGLX0272), 河南农业大学教育教学改革研究与实践重点项目 (025XJGLX011, 2024XJGLX132)

内阻法因测试高效(单次<10 s)、对电池损伤小且与 SOH 强相关,被选为教学系统的核心分析方法(见表 1)^[3]。结合电压、电流、温度等参数进行综合标定,兼顾实验可行性与教学效果^[4-5]。电池老化源于内部物化反应,如固体电解质相界面(SEI)膜增厚(占内阻 30%~50%)^[6]、活性材料剥落及电解液降解等,这些进程均会导致内阻升高^[7]。析出物生长减少电极表面积,溶剂分解降低导电性,则会进一步加剧内阻增长^[8]。深入理解这些机理,对构建合理的老化实验环节具有重要指导意义。

表 1 不同分析方法间的性能差异

Table 1 Performance differences among different analytical methods

分析方法	测量精度/ %	测试 时间	成本	电池 损耗	适用性
容量法	±2	长(2~4 h)	低	中	差
内阻法	±1	短(<10 s)	中	低	优
阻抗谱法	±0.5	中(10~30 s)	高	低	中
开路电压法	±5	中(1~2 h)	低	低	一般

为满足本科教学需求,本文作者设计了一套集成化 SOH 实验平台,覆盖老化模拟、参数采集与诊断分析全流程,以期能提高教学质量。

1 系统总体设计

平台可精准仿真 18650 型锂离子电池 0~1 000 次循环老化(内阻 1~100 mΩ,精度±1%),实时采集电压(0~5 V)、电流(0~5 A)、温度(-10~85 ℃)等参数,支持 SOH 估算(误差<±3%)与数据可视化,操作简便、安全可靠,适配 30 人规模实验室。系统划分为核心功能(老化仿真、多量程测量、健康度评估、数据显示)与辅助功能(参数设置、数据管理、安全保护、自主学习),协同支撑高效教学。采用硬件层-软件层-应用层三层架构(见图 1),模块独立,扩展性强,技术指标严格,可以保障系统稳定运行与教学效果落地。

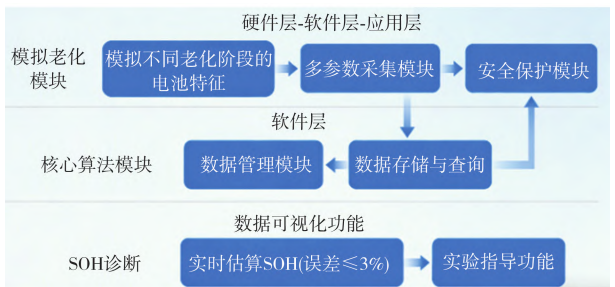


图 1 系统三层架构图

Fig. 1 Three-layer architecture diagram of the system

系统由多个高效协同的关键模块组成:可编程电池老化模拟单元快速复现不同老化状态,解决真实电池老化周期长、难课堂演示的问题;多参数采集单元集成高精度传感器与专业电路,精准获取电压、电流、温度等信号,为诊断提供可靠数据基础^[9];主控与通信单元协调硬件运行并实现与上位机实时通信;安全保护单元实时监测关键参数,出现异常时可即时触发保护机制;核心算法模块执行数据处理与 SOH 诊断,输出准确评估结果,保障教学实验高效、安全、闭环运行。

2 硬件子系统设计与实现

硬件电路原理图如图 2 所示。对电池进行模拟的部分,将电子负载和数字电位器结合在一起应用在电路当中,不仅可以实现对电池充电和放电特性的仿真,还能够 在 1~100 mΩ 调节数字电位器的阻值,并且能利用运放使输出更加稳定。经过标准电阻箱标定,内阻模拟误差在±0.8%内,满足本科学习的精度要求。

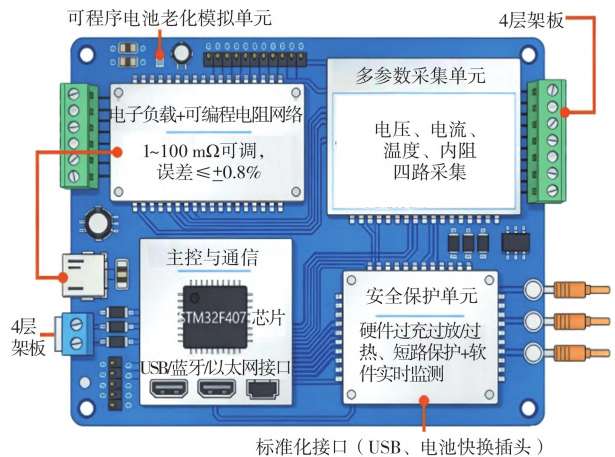


图 2 硬件系统架构

Fig. 2 Architecture of hardware system

3 软件子系统设计与实现

软件系统采用模块化分层设计,由下位机(C 语言开发,负责设备驱动、通信与数据采集)和上位机(Qt 平台,实现人机交互数据显示、设置与存储)组成,层次清晰,便于教学演示与维护。核心算法包括滑动平均滤波(降噪)、交流阻抗法内阻计算(实时性强)、温度补偿及 SOH 估算,均紧扣课堂理论,利于学生理解与实践结合^[10]。数据管理基于 SQLite 本地存储,支持导出 Excel/CSV 格式,并提供多组实验数据对比与曲线绘制功能,直观呈现不同条件下

的参数差异,强化实验认知。

软件子系统的核心伪代码如下:

//模块化设计:采集-算法-交互三层架构

//--- 模块 1:下位机数据采集 ---

STRUCT CollectParameters:

Voltage:Float//采集电压 (V)

Current:Float//采集电流 (A)

Temperature:Float//采集温度 (°C)

RawImpedance:Float//原始内阻 (mΩ)

IsCollecting:Bool//采集使能标志

FUNCTION InitPeripherals():

INIT 电压采集模块(低失调放大器)

INIT 温度传感器(单总线数字型,精度±0.5 °C)

INIT 1 kHz 交流阻抗激励模块

INIT 多模式通信接口(USB/蓝牙/以太网)

FUNCTION CollectData (params: CollectParameters):

params. Voltage=校准后电压值

params. Current=校准后电流值

params. Temperature=温度传感器读数

params. RawImpedance=交流阻抗法采集内阻

params. RawImpedance = MovingAverageFilter

(params. RawImpedance,5)

UPLOAD params 至上位机

//--- 模块 2:核心算法 ---

FUNCTION MovingAverageFilter(newData:Float, windowSize:Int) -> Float:

MAINTAIN 长度为 windowSize 的缓存数组

UPDATE 缓存数组(移除旧数据,加入 newData)

RETURN 数组均值

FUNCTION TemperatureCompensation (impedance:Float,temp:Float) -> Float:

compensatedImpedance = impedance-(temp-25) * 0.02

RETURN compensatedImpedance

FUNCTION CalculateSOH (compensatedImpedance:Float) -> Float:

soh = -0.4 * compensatedImpedance + 112

soh = CLAMP(soh,0,100)

RETURN soh

//--- 模块 3:上位机交互与数据管理 ---

CLASS BatteryTestTeachingSystem:

CONSTRUCTOR():

INIT 五大界面区域(参数设置/实时显示/实验控制/报警/教学资源)

INIT SQLite 数据库与 Excel/CSV 导出模块

FUNCTION ReceiveAndProcessData(voltage,current,temp,impedance):

compensatedImpedance = TemperatureCompensation(impedance,temp)

soh = CalculateSOH(compensatedImpedance)

UPDATE 实时显示界面

SAVE 数据至数据库(含时间戳)

CHECK 阈值,超限则报警

FUNCTION ExportExperimentalData (format:String):

EXPORT 数据库数据至 format 格式(Excel/CSV)

4 教学实验设计与系统验证

为验证教学系统的有效性,从功能与性能两方面开展实验。功能性验证聚焦老化模拟、数据采集、SOH 诊断及安全保护;性能方面通过标准电阻箱、万用表对标内阻模拟精度与数据更新速率,确保系统可靠。在此基础上,设计 8 学时综合实验课程(2 学时讲解、4 学时分组实操、2 学时分析答辩)。

实验一探究电池内阻与老化的联系。学生完成硬件连接与软件初始化(采样率 50 Hz,启用温度补偿),在 0~1 000 次老化循环的多个节点稳定后采集 5 min 数据,并用标准电阻箱校准各阶段的等效内阻。结果表明:系统内阻估计偏差 $<\pm 0.7\%$,SOH 估计偏差 $<+1\%$,验证了内阻与 SOH 随容量减呈线性关系,达成教学目标。

实验二考察放电倍率对 SOH 诊断的影响。使用 500 次循环老化的 18650 型电池,先关闭温度补偿,依次以 0.5~2.0 C 放电,每档稳定 10 min 后采集 5 min 数据;再开启温度补偿重复实验,并与功率分析仪实测内阻对比。结果凸显单工况测量的局限性,强化学生对温度补偿必要性及误差来源的理解。

对 30 名新能源专业三年级学生实施前测-后测与问卷调查,结果显示:使用系统后,学生在 SOH 原理理解、数据解读及故障分析准确率显著提升,85% 以上认为系统能有效深化核心知识掌握,验证了在提升学习成效与教学互动性方面的价值。

5 结语

本文作者设计的系统,能让学生直观掌握 SOH

诊断的内在机理,创新之处主要有:

该系统支持可编程老化模拟,无需繁琐的实体电池老化流程,大幅提升实验效率,这直接反映在学生能更快速地获取多组实验数据,用于支撑课堂所学理论,使得理论知识在短时间内得到实践验证,强化了学习效果。系统设计充分适配本科教学场景的场地、设备及学生基础,让不同基础水平的学生都能轻松上手操作,降低了实验门槛,提升了整体教学参与度。同时,系统可开展多参数对比实验,引导学生主动探究,助力培养创新思维与能力。该系统弥合了理论教学与工程实践之间的鸿沟,为新工科背景下电池类课程的实验教学提供了可推广的模式。

参考文献:

- [1] 华周发,李静. 电动汽车动力电池 SOC 估算方法综述[J]. 电源技术,2013,37(9):1686-1689.
HUA Z F, LI J. Summary of methods for state of charge estimation of EV power batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(9): 1686-1689.
- [2] YIN S J, LIU Y J, WANG Y, *et al.* Impedance characterization for electrode-level aging diagnosis of lithium-ion battery: a critical review[J]. Appl Energy, 2026, 412: 127736.
- [3] SHEN H W, LI Z Y, XU H, *et al.* A lithium-ion battery SOC estimation method integrating singular spectrum analysis and an improved transformer architecture[J]. Ionics, 2026, 32(2): 1713-1735.
- [4] BREHLER T, DIEZ C, MAISEL S, *et al.* Comprehensive modeling of lithium-ion batteries at the system level to minimize experimental lifetime testing effort[J]. J Energy Storage, 2026, 153: 120843.
- [5] MENG H X, QU P K, WANG C, *et al.* Experimental study on failure behaviors of cylindrical lithium-ion batteries under high-velocity impact loading[J]. Eng Fail Anal, 2026, 186: 110514.
- [6] 蒋杭廷,张倩倩,张松通,等. 化学电源内阻测量及状态监测策略分析研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3400-3422.
JIANG H T, ZHANG Q Q, ZHANG S T, *et al.* Internal resistance measurement and condition monitoring strategy for chemical power systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3400-3422.
- [7] LI X, WANG T. Application of interdisciplinary teaching model in battery management system optimization education[J]. Reg Edu Res Rev, 2024, 6(7): 83.
- [8] ISLAM S, NAMKOONG G. High-fidelity SOH prediction in lithium-ion batteries using hybrid ML networks[J]. J Electrochem Soc, 2025, 172(8): 080506.
- [9] XI L, WANG D, ZHOU D J, *et al.* Teaching reform and practice of power battery safety disassembly experiment driven by virtual reality fusion[J]. J Educ Educ Policy Stud, 2025, 3(4): 37-42.
- [10] 黄瑞,李晓竟,陈俊玄,等. 锂离子电池热失控实验教学平台开发及应用[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(12): 29-33.
HUANG R, LI X J, CHEN J X, *et al.* Development and application of lithium-ion battery thermal runaway experimental teaching platform[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(12): 29-33.

收稿日期:2025-10-28