

基于单电芯的无线电池管理系统设计

匡亚洲¹, 裴川东¹, 彭忆强^{1,2}, 许刚³, 黄浩瑞¹

¹西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

²西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都

³上海巨微集成电路有限公司, 上海

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年2月25日

摘要

本文设计了一种基于单电芯的无线电池管理系统(WBMS), 通过无线射频技术实现电池数据传输。与传统有线BMS相比, WBMS在结构布置、布线简化、重量和体积减小、服务和维护成本降低等方面具有显著优势。本文提出的系统采用蓝牙单电芯AFE硬件, 并增加了在线电化学阻抗谱(EIS)测量功能, 验证了无线网络的稳定性、数据采样精度及在线EIS测量的可靠性。研究结果表明, 该系统在功能上可以替代传统BMS, 并为锂离子电池状态估计及故障预警提供了更多高维度特征数据。

关键词

单电芯, 无线电池管理系统, 阻抗在线测量

Design of Wireless Battery Management System Based on Single Cell

Yazhou Kuang¹, Chuandong Pei¹, Yiqiang Peng^{1,2}, Gang Xu³, Haorui Huang¹

¹School of Automotive and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

²Sichuan Provincial Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety, Xihua University, Chengdu Sichuan

³Shanghai Juwei Integrated Circuit Co., Ltd., Shanghai

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Feb. 25th, 2025

Abstract

This paper designs a wireless battery management system (WBMS) based on a single cell, utilizing wireless radio frequency technology for battery data transmission. Compared to traditional wired BMS, WBMS offers significant advantages in terms of structural layout, simplified wiring, reduced weight and volume, and lower service and maintenance costs. The proposed system employs Bluetooth single-cell AFE hardware and incorporates online electrochemical impedance spectroscopy

文章引用: 匡亚洲, 裴川东, 彭忆强, 许刚, 黄浩瑞. 基于单电芯的无线电池管理系统设计[J]. 电力与能源进展, 2025, 13(1): 37-47. DOI: 10.12677/aepe.2025.131005

(EIS) measurement functionality. The stability of the wireless network, data sampling accuracy, and reliability of online EIS measurements were validated. The research results indicate that this system can functionally replace traditional BMS and provide more high-dimensional feature data for lithium-ion battery state estimation and fault warning.

Keywords

Single Cell, Wireless Battery Management System, Online Impedance Measurement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着国内新能源汽车的大力发展，电动汽车成为新能源汽车当中的重要支撑。电池管理系统(battery management system, BMS)是电动汽车与电池之间的重要纽带，是电动车不可或缺的部件，对于电动汽车电池管理系统，传统 BMS 行业内常用的通信方式以有线通信为主(见图 1)，包括 CAN 通信及菊花链通信，CAN 通信技术成熟稳定，但整体占用空间大，功耗高，成本高，而菊花链通信方式虽然成本低，但电磁兼容性难度大，可扩展性差[1]。无线电池管理系统(wireless battery management system，简称 WBMS)是以无线射频的方式来实现对电池数据的传递(见图 2)，与传统有线 BMS 相比，无线 BMS 在电池系统结构布置方面提供了更大的灵活性，简化了布线，减少了电池系统的重量和体积，降低了服务和维护成本，并通过最小化连接故障风险来提高可靠性[2]，因此相对于传统有线 BMS 通信，无线 BMS 通信具有较大优势。

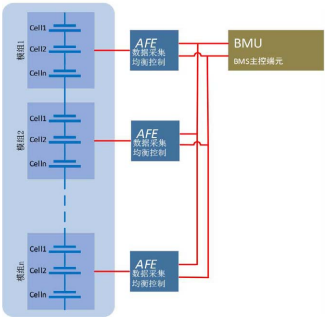


Figure 1. Traditional battery management system topologies
图 1. 传统电池管理系统拓扑

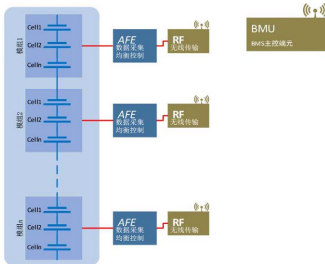


Figure 2. Wireless battery management system topologies
图 2. 无线电池管理系统拓扑

关于无线电池管理系统, 根据通信方式的不同, 可以分为以下几类: 基于低功耗蓝牙(BLE)的 WBMS、基于 Zigbee 的 WBMS、基于 Wi-Fi 的 WBMS 和基于物联网(IoT)的 WBMS 以及基于云端的 WBMS。科研人员对无线 BMS 的现状进行了分析, 在通信架构方面, 由于成本较低和性能可满足要求等原因, Zigbee 和低功耗蓝牙占据主导地位[3][4]。王琪等[5]使用 ZigBee 无线通信技术对电池系统进行数据采集和传输, 同时增加了故障报警功能, 但是该技术的数据传输范围较短且传输速率较低。Shell C 等[6]基于 BLE4.0 协议在电池单元管理和中央控制器之间传输数据, 使通信通道之间添加了一个内存缓冲区, 来保持数据的完整性, 使其没有干扰和故障, 但是该方法在非常有限的节点上进行了测试, 其实际效果并不清楚。Rincon 等[7][8]利用 BLE 物理层上 IEEE 标准 802.15.4 的增强型时隙信道跳频介质访问控制模式, 提出了一种高可靠性和低功耗的网络架构, 测试结果为每个节点的平均电流消耗低于 1 mA, 但是该模式并没有在实际场景验证是否可靠。Ahamed 等[9]采用 BLE5.0 架构的 WBMS, 来提高电池的效率和安全性, 利用自适应跳频算法来最小化干扰, 激活周期范围为 0.6~1.2 ms, 该技术的数据速率较低, 应用场景大多为间歇性传输数据的设备。

以上研究都是基于现有成熟的多串 AFE 芯片外接无线射频芯片来实现的 WBMS, 去掉了电芯监测单元(Cell Monitor Unit, CMU)之间的通讯连接线束, 降低了线路损坏带来的失效风险; 但由于沿用的是多串 AFE 采集方案, CMU 电路中还是存在高压电路, 这并未降低 CMU 的电路复杂度, CMU 与无线射频部分依然需要进行高低压隔离, 带来了制造成本的增加, 以及有限的蓝牙节点数量和数据传输效率限制, 因此本文提出基于蓝牙单电芯 AFE 的 WBMS 硬件系统以及适用于电池管理系统的无线网络通讯协议栈, 为了充分发挥出单电芯 AFE 的优势, 获取更多的电池信息, 在此基础上增加了在线电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)的测量, 其具体架构如图 3 所示。

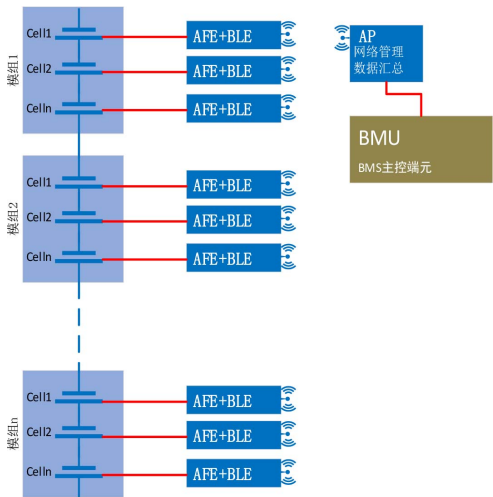


Figure 3. Single-cell wireless battery management system topologies
图 3. 单电芯无线电池管理系统拓扑

2. 无线电池管理系统组网软件设计

无线网络系统中将设备角色分为 TP (Transmit Point: 传输节点)、AP (Access Point: 接入节点), 其中 TP 节点在网络主要功能为数据上传、AP 节点主要功能为获取各节点无线数据、无线组网、控制指令下发。设计指标如表 1:

Table 1. Wireless network system design indicators
表 1. 无线网络系统设计指标

项目	指标	条件
网络节点数量	300	可实现 N 个 TP 节点对 1 个 AP 节点无线网络
入网时间	$\leq 1\text{ s}$	AP 离线后再次发起入网同步
网络恢复	$\leq 100\text{ ms}$	TP 网络离线后再次入网

无线数据交互中 TP 上传电压、温度、阻抗实部和虚部、SOC、均衡状态数据；AP 广播电流、均衡开闭指令数据，并收集到无线电芯数据通过 CAN 总线发送给其他设备。网络拓扑如图 4：

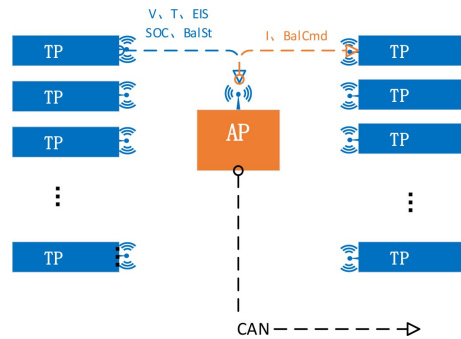


Figure 4. Network topology
图 4. 网络拓扑

3. 无线电池管理系统硬件设计以及 EIS 测量算法实现

3.1. 采样模块硬件设计

对于单电芯无线采集模块设计的硬件功能有：供电功能、电压采集功能、温度采样功能、均衡功、在线阻抗测量功能、无线传输功能。当前均衡原理主要分为两类：被动均衡和主动均衡[10] [11]。因为被动均衡原理较容易实现且体积小，因此本文选择采用被动均衡。设计指标如表 2：

Table 2. Single-cell wireless acquisition module design
表 2. 单电芯无线采集模块设计

项目	范围	指标	条件
单体电压采集	1.8~5 V	$\leq 3\text{ mv}$	@25℃
温度采集	-30℃~120℃	$\leq 1^\circ\text{C}$ $\leq 2^\circ\text{C}$	@25℃~60℃ @其他温度区间
供电	1.8~5 V	/	/
EIS 测量精度	0.1 Hz~10 kHz	$\leq 3\%$	与电化学工作站相比
被动均衡		均衡电流不小于 100 mA	@25℃，3.3 V

主芯片采用巨微集成电路的 MS1636 MCU，来实现 ADC 采样、均衡控制、EIS 激励电流控制、蓝牙数据收发。数据采集模块实物如图 5 所示，本文重点介绍 EIS 电路设计部分以及 EIS 测量算法的实现。



Figure 5. Data acquisition module
图 5. 数据采集模块

3.2. 在线 EIS 电路设计

电池内部的化学物理过程包括电子在固相中的传导过程，离子在固液相中的传导和扩散过程、在固液相界面上的传荷过程以及在固液相界面等效膜的充放电过程，这些过程发生的难易和快慢是不同的，主导着电池在不同的频率范围的阻抗特性，因此电化学阻抗谱也包含着丰富的信息[12]。文献[13]研究电池在不同循环次数下的阻抗变化规律，并利用 ECM 对 EIS 进行拟合，研究了各等效参数随健康状态的变化规律。文献[14][15]研究了电池内部温度与阻抗数据的关系，结果表明，使用阻抗谱的幅值与相角信息能有效估算电池内部的真实温度。文献[16]-[19]从电池安全角度研究了阻抗数据与内短路、析锂、安全预警关系，通过特征参数的提取，数据的相关性分析，阻抗数据可以用来表征锂电池安全的状态。

以上研究表明, 阻抗在线测量对锂离子电池内部状态的在线监测具有重要意义, 但是都是基于离线的实验室测量的 EIS 数据, 虽然测量精度较高, 但是由于高昂的成本、庞大的体积、复杂的处理过程以及使用前需进行开路电压测试等缺点, 限制了其并不能集成在 BMS 中[20]。

杨[21]等人采用全相位快速傅里叶变换算法将时域数据转换到频域,实现了 0.01 Hz~10 kHz 频率范围内交流阻抗的在线测量。硬件方案中采用了比较昂贵的 4 阶巴特沃斯低通滤波器,应用于储能电池或者动力电池系统在制造成本上带来了挑战。

本文提出了一种更具性价比的 EIS 测量电路方案, 在线 EIS 电路由 2 部分构成: 正弦激励电路、电压采样放大电路(见图 6)。正弦电流激励电路由 MS1636 芯片内部产生的正弦信号经过数字 Sigma-delta 调制器, 正弦波电压信号通过 COS8052MR 两级运算放大器转换为交流电流信号, 加载在电芯上。

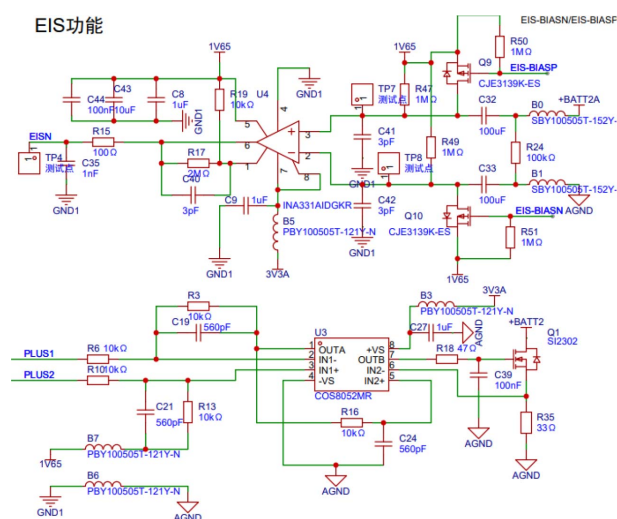


Figure 6. Schematic diagram of EIS function
图 6. EIS 功能原理图

3.3. 在线 EIS 测量算法

3.3.1. 阻抗在线测量工作原理

向采样电池回路中注入信号为 i 的激励电流作为扰动信号, 假设激励电流信号表达式 i 为:

$$i = I \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中, I 为激励电流信号的幅值; ω 为激励电流信号角频率; φ_i 为激励电流信号初始相位。

测量到的激励信号 u , 表达式如下:

$$u = U \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2)$$

式中, U 为电池两端的响应电压幅值; φ_u 为电池两端的响应电压相位。

相应地, 电池的阻抗 z 和阻抗相角 φ 可以分别根据式(3)和(4)计算得到:

$$z = \frac{U \sin(\omega t + \varphi_u)}{I \sin(\omega t + \varphi_i)} \quad (3)$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (4)$$

同时, 阻抗也可以用式(5)所示的带有实部和虚部的复数形式来表达, 实部 Z' 和虚部 Z'' 分别计算如下:

$$z = Z' + jZ'' \quad (5)$$

$$Z' = |z| \cos \varphi \quad (6)$$

$$Z'' = |z| \sin \varphi \quad (7)$$

3.3.2. 阻抗在线测量算法

目前阻抗在线测量装置的设计大多基于离散傅里叶变换(discrete fourier transformation, DFT)或快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对信号进行处理, 例如 S. JUSSI 等人[22]通过 PRBS 用作放电电池的电流参考, 将 DFT 应用于测量以获得阻抗的频率响应, 实现了锂离子电池阻抗在线测量。此外, C. LYU 等人[23]提出了一种 EIS 在线测量方法, 通过上位机生成多正弦激励信号数据并对电池响应电压信号执行 FFT, 基于简单的硬件实现了 0.01 Hz~10 kHz 频率范围内的 EIS 快速测量。但是 DFT 计算周期长, 不适合在线的应用, 而 FFT 是对 DFT 的改进算法, 虽然使得信号处理周期大大缩短, 但是存在频谱泄露的影响, 可能会导致阻抗计算结果有误。

为解决频谱泄露的问题, 本文提出基于平滑周期图平均法(Welch 法)与 FFT 联合的频谱估计方案, 实现了 0.1 Hz~10 kHz 的阻抗谱数据获取。计算原理如为: 假设进行功率谱求解的数据为 x , 其总数据点数为 L , 将其分为 M 个相互重叠的数据段, 其中每两段之间的重叠部分数据个数均相等。分段后每段数据 $x_{[m]}(n)$ 与原始数据 $x(n)$ 之间的关系为:

$$x_{[m]}(n) = x(n + m(m+1)R), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

式中 R 为每段数据中的非重叠点的个数。

根据上述定义, 可得到重叠程度和分段宽度与分段数量之间的关系, 如式(9)所示。

$$M = \left\lceil \frac{L - N}{R} \right\rceil + 1 \quad (9)$$

式中 N 为加窗后的数据每段数据的点的个数。

将电流电压数据按上述(8)与(9)所示的关系式分别进行分段处理。为改善分段造成的频谱泄露效应,

对每一分段的数据均进行加窗处理。加窗后的表达式如下所示：

$$X_{[m]}^w(n) = F \left\{ w(n) x_{[m]}(n) \right\} = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) x_{[m]}(n) e^{-j2\pi n/N} \quad (10)$$

Welth 方法与 FFT 联合的频谱估计算法步骤如下：

- 1) 选取电压、电流数据段；
- 2) 对数据段选取三种 Welth 窗大小，对数据进行分段处理；
- 3) 对每一 Welth 法分段的数据进行加窗滤波操作，获得三段频谱数据；分别对加窗后的小段电压与电流数据进行傅里叶变换操作得到 $U_{[m]}^w$ 与 $I_{[m]}^w$ 。

4) 分别选取三段阻抗谱数据中的最优频率范围组合；

5) 对获得的频谱平滑滤波得到阻抗谱数据。

执行该算法有效解决了当前阻抗在线测量装置使用传统 FFT 算法所存在的问题，通过搭建对比测试台架验证了 EIS 测量电路和算法的快速性和有效性。

3.4. 数据管理模块硬件设计

数据管理模块主要功能有：实现网络同步、收集采集模块的无线数据、通过 CAN 总线与外部通讯，使用 2 颗巨微 MS1682 芯片来实现以上功能。硬件原理比较简单，限于篇幅限制在此仅展示实物(图 7)。



Figure 7. Data management module
图 7. 数据管理模块

4. 测试验证平台

本文设计并搭建了测试验证平台，第一测试平台用于测量无线通讯稳定性；第二测试平台用于验证电压、温度、采样的精度。第三验证平台以电化学工作站静态 EIS 测量为基准，采用数据采集模块对同一待测锂离子电池为主要对象进行静态阻抗测量，并对阻抗测量结果进行对比分析，如图 8 所示。

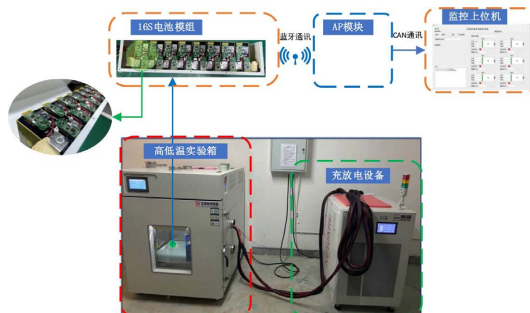


Figure 8. Test and verification platform
图 8. 测试验证平台

无线通讯验证, 搭建 10 个 TP 和 1AP 的组成的无线网络, 将设备分别置于无线屏蔽环境箱和网络干扰环境箱, 测试 TP 发送数据丢包率。测试时间 1 小时, 理论 TP 应发送 28,800 次数据。测试结果如表 3:

Table 3. Wireless communication verification
表 3. 无线通讯验证

TP 序号	无干扰环境丢包率(千分之一)	有干扰环境丢包率(千分之一)
TP1	0	0.347
TP2	0	0.382
TP3	0	0.069
TP4	0	0.278
TP5	0.069	0.694
TP6	0	0.451
TP7	0	0.104
TP8	0.174	0.243
TP9	0	0.278
TP10	0	0.174

在无干扰情况下 TP5 和 TP8 存在数据丢失, 通过分析逻辑仪器记录的数据发现其蓝牙发送时隙与 AP 接收时间窗口错开了 0.2 ms 导致 AP 模块数据接收失败, 这一误差来源是由于 TP 模块时钟精度偏差导致。有干扰环境下进行了分析发现环境中存在的多种电磁辐射干扰, 对其中影响最大的是短距离无线通信协议 WiFi, WiFi 与蓝牙这两种无线通信协议共享 2.4 GHz 频段。为了解决这一问题, 后续可以在网络协议中增加数据重传机制。

采样精度验证, 将测样品 1 和 2 放入高低温试验箱中, 将参考电压设置为 3400 mv, 测试不同温度下的电压采样精度、温度采样精度, 测试结果如表 4:

Table 4. Sampling accuracy verification
表 4. 采样精度验证

温度(℃)	TP1 温度采样值(℃)	TP2 温度采样值(℃)	TP1 电压采样值(mv)	TP2 电压采样值(mv)
-40	-38.5	-38.5	3407	3406
-20	-20.5	-19	3407	3407
-10	-10	-9.5	3405	3406
0	2	1.5	3401	3407
15	13.5	14	3403	3403
25	25.5	25	3403	3402
45	45.5	46	3403	3401
55	59.5	59.5	3402	3403

从测试数据可知温度采样在低温环境下采样误差最大为 1.5℃，在温度区间 25℃~60℃ 误差满足指标要求；低温环境下电压采样最大误差为 7 mv，在常温下误差不大于 3 mv。

EIS 测量精度验证，测试电芯为 LF-22K 型 22Ah 的磷酸铁锂电池，内阻 < 0.5 mΩ。阻抗仪使用灸云科技单通道 ZY1001 型 EIS 测试设备。测量频率范围 0.1 HZ~10 KHZ，根据指数关系分布 51 个频点。测试结果如下：

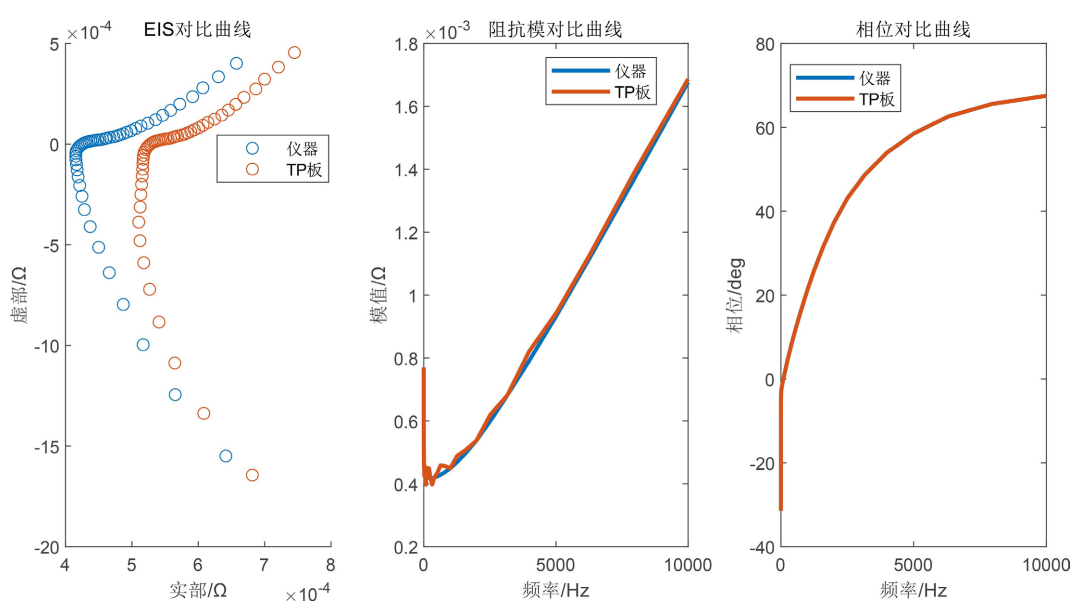


Figure 9. EIS measurement accuracy verification
图 9. EIS 测量精度验证

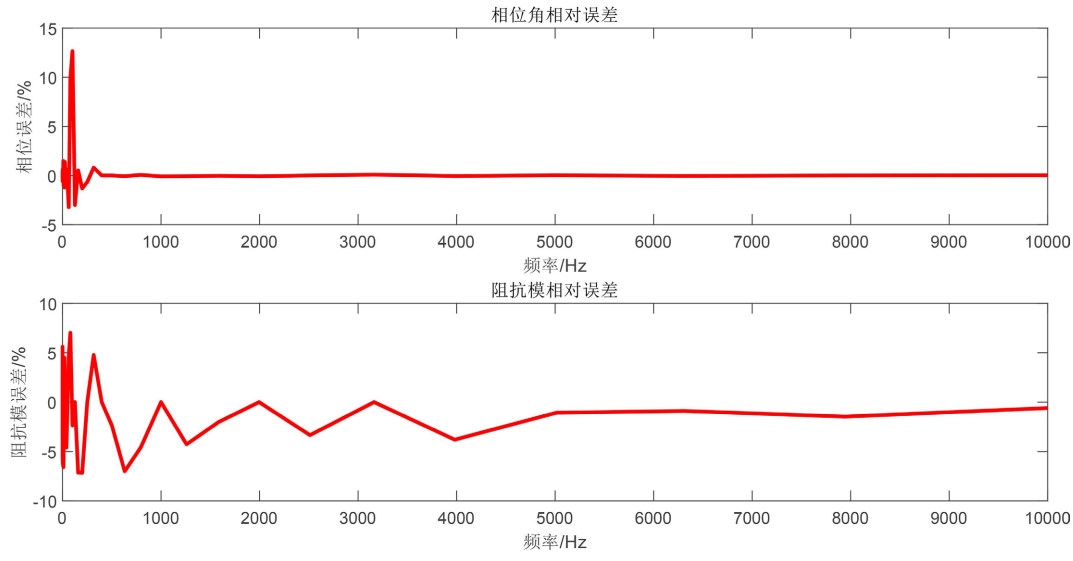


Figure 10. TP module online EIS measurement data
图 10. TP 模块在线 EIS 测量数据

由图 9 和图 10 实验结果可知，电化学阻抗仪器和 TP 模块测量的 EIS 曲线表现出基本相同的趋势，但在阻抗模值和相位方面存在差异，差异主要集中在低频段，相位差最大 12.5%，阻抗模值最大误差 6.1%。

其主要原因为 TP 板通过性印制电路排线(Flexible Printed Circuit, FPC)与电芯连接, 在 FPC 上耦合和容性负载在低频段带来测量上的影响。后期可以通过标定 FPC 阻抗参数, 在 EIS 计算中减小耦合阻抗的影响。由于低频阻抗在线测量时间较长, 不适合在线的电池算法的应用, 在实际应用过程中, 通常根据 EIS 或动态阻抗在不同实验条件下的变化趋势进而实现电池状态估计或故障诊断。因此可以认为 TP 模块在线 EIS 测量数据具有一定的可靠性。

5. 结论

本文基于 BLE 微控制器设计了基于单电芯的无线电池管理系统并具备对每个电芯进行数据监控、EIS 测量; 基于该系统测试了无线网络的稳定性、温度下数据采集精度、验证的在线 EIS 测量的可靠性。得出的主要结论如下:

1) 无线 BMS 系统的优势: 基于单电线的无线 BMS 系统, 其结构简单, 去掉了复杂的连接线束; 配置简单在, 自适应无线组网; 维护简单, 通过无线方式查看每颗电芯数据, 模块失效后直接替换 TP 模块, 快速问题处理与维护, 在功能上可以替代传统 BMS。

2) 在线 EIS 测量功能的优势: TP 模块的在线 EIS 测量功能, 能够满足阻抗在线快速测量的要求, 通过 Welth 与 FFT 的方法的组合有效抑制传统 FFT 算法所存在频谱泄露的问题, 提高了 EIS 数据的可靠性。EIS 测量电路方便集成在 BMS 系统中, 为 BMS 系统引入更多更高纬度的特征数据, 有利于提高电池算法的精度。

参考文献

- [1] 马江睿, 王琪, 高田, 等. 电池管理系统中无线数据传输技术的研究[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(3): 84-87.
- [2] Pannerselvam, S., Narayanan, V. and Gireesh Kumar, T. (2023) Energy Efficient Machine Learning Based SMART-A-BLE Implemented Wireless Battery Management System for Both Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicles. *Procedia Computer Science*, **218**, 235-248. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.006>
- [3] Bansal, P. and PR, N. (2019) Wireless Battery Management System for Electric Vehicles. 2019 *IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, Bengaluru, 17-19 December 2019, 1-5. <https://doi.org/10.1109/itec-india48457.2019.itecindia2019-83>
- [4] Samanta, A. and Williamson, S.S. (2021) A Survey of Wireless Battery Management System: Topology, Emerging Trends, and Challenges. *Electronics*, **10**, Article 2193. <https://doi.org/10.3390/electronics10182193>
- [5] 王琪, 马江睿, 王晨. 基于 ZigBee 的电池管理系统研究与设计[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(3): 11-14, 19.
- [6] Shell, C., Henderson, J., Verra, H. and Dyer, J. (2015) Implementation of a Wireless Battery Management System (WBMS). 2015 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Pisa, 11-14 May 2015, 1954-1959. <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2015.7151581>
- [7] Rincon Vija, F.A., Cregut, S., Papadopoulos, G.Z. and Montavont, N. (2021) Enabling Robust Wireless Communication for BMS on Electric Vehicles. 2021 *IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Edmonton, 4-7 October 2021, 423-426. <https://doi.org/10.1109/lcn52139.2021.9524937>
- [8] Rincon Vija, F.A., Cregut, S., Papadopoulos, G.Z. and Montavont, N. (2021) From Wired to Wireless BMS in Electric Vehicles. 2021 *17th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*, Exeter, 13-15 December 2021, 255-262. <https://doi.org/10.1109/msn53354.2021.00049>
- [9] Ahamed.M, M.I., Mateen, S., Savadi, A., Haroon, P S, A.L. and Naushad, S. (2023) Wireless Charging and BMS for Optimizing Electric Vehicle Charging and Battery Management. 2023 *International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*, Ballar, 29-30 April 2023, 1-7. <https://doi.org/10.1109/icdcece57866.2023.10150496>
- [10] 李振. 电动汽车车用锂离子电池组均衡系统研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [11] 来鑫, 姜淳, 郑岳久. 一种锂离子动力电池组的复合均衡方法[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(10): 1-5.
- [12] Srinivasan, R., Demirev, P.A. and Carkhuff, B.G. (2018) Rapid Monitoring of Impedance Phase Shifts in Lithium-Ion Batteries for Hazard Prevention. *Journal of Power Sources*, **405**, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.014>

-
- [13] Stroe, D.I., Swierczynski, M., Stan, A.I., Knap, V., Teodorescu, R. and Andreassen, S.J. (2014) Diagnosis of Lithium-Ion Batteries State-Of-Health Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy Technique. 2014 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, 14-18 September 2014, 4576-4582. <https://doi.org/10.1109/ecce.2014.6954027>
- [14] Osaka, T., Mukoyama, D. and Nara, H. (2015) Review—Development of Diagnostic Process for Commercially Available Batteries, Especially Lithium Ion Battery, by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Journal of the Electrochemical Society*, **162**, A2529-A2537. <https://doi.org/10.1149/2.0141514jes>
- [15] 沈珍华, 戴锋, 焦凤, 等. 基于多频电化学阻抗谱的锂离子电池内部温度估计新方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-10. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232237>, 2024-07-20.
- [16] Nara, H., Yokoshima, T. and Osaka, T. (2020) Technology of Electrochemical Impedance Spectroscopy for an Energy-Sustainable Society. *Current Opinion in Electrochemistry*, **20**, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.02.026>
- [17] Galeotti, M., Cinà, L., Giammanco, C., Cordiner, S. and Di Carlo, A. (2015) Performance Analysis and SOH (State of Health) Evaluation of Lithium Polymer Batteries through Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Energy*, **89**, 678-686. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.148>
- [18] Eddahech, A., Briat, O., Bertrand, N., Deléage, J. and Vinassa, J. (2012) Behavior and State-Of-Health Monitoring of Li-Ion Batteries Using Impedance Spectroscopy and Recurrent Neural Networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **42**, 487-494. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.050>
- [19] 田爱娜, 潘壮壮, 姜久春, 等. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池分级安全预警方法[J]. 电源技术, 2024, 48(5): 874-880.
- [20] Mc Carthy, K., Gullapalli, H. and Kennedy, T. (2022) Online State of Health Estimation of Li-Ion Polymer Batteries Using Real Time Impedance Measurements. *Applied Energy*, **307**, Article ID: 118210. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118210>
- [21] 杨浩, 张闯, 刘素贞, 等. 锂离子电池阻抗在线测量装置设计[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(1): 61-71.
- [22] Sihvo, J., Messo, T., Roinila, T. and Luhtala, R. (2018) Online Internal Impedance Measurements of Li-Ion Battery Using PRBS Broadband Excitation and Fourier Techniques: Methods and Injection Design. 2018 *International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, Niigata, 20-24 May 2018, 2470-2475. <https://doi.org/10.23919/ipec.2018.8507565>
- [23] Lyu, C., Liu, H., Luo, W., Zhang, T. and Zhao, W. (2018) A Fast Time Domain Measuring Technique of Electrochemical Impedance Spectroscopy Based on FFT. 2018 *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, Chongqing, 26-28 October 2018, 450-455. <https://doi.org/10.1109/phm-chongqing.2018.00083>