

动力电池阻抗信息在线快速激励测试方法

吴金龙¹ 尹泽蛟¹ 丁文龙¹ 池小波²

1. 山东大学; 2. 山西大学

摘要: 针对动力电池传统电化学阻抗谱 (EIS) 测量时间长、静置条件要求高、难以在车载工况下实时应用的问题, 提出一种面向 BMS 的阻抗信息在线快速激励测试思路。该方法以短时、能量受限、频带可控的小幅电流激励为核心, 通过同步采样与趋势扣除抑制工况漂移影响, 采用交叉谱比值实现阻抗快速估计, 并引入相干性与有效频点门控机制筛除噪声与开关纹波干扰, 最终将宽频阻抗压缩为高频内阻与中频极化等关键特征或低阶等效参数, 实现秒级更新与稳定输出。方法可在不显著改变 SOC 与驾驶可感知性的前提下, 为功率能力动态修正、热损耗估计与模型参数自适应提供可校核的在线阻抗观测量。

关键词: 动力电池; 在线阻抗; 快速激励; 交叉谱估计; 相干性门控

动力电池在整车运行中持续经历脉动电流与温度波动, 电压响应不仅包含开路电压变化, 还叠加欧姆压降与极化电压等动态分量。阻抗信息能够把“导体与连接导致的高频欧姆内阻”和“界面反应、扩散过程导致的中低频极化”区分开来, 因此在功率能力估计、模型参数在线校正、老化与一致性诊断中具有更高的敏感性。但传统电化学阻抗谱 (EIS) 通常依赖静置、小信号长时间扫频, 测量时间从数十秒到数分钟不等, 且对仪器与环境要求高, 难以在车辆在线场景直接应用。在线测试面临四类核心矛盾: 工况电流非零导致工作点漂移, 开关纹波与电磁干扰降低信噪比, BMS 采样与算力受限难以执行复杂频域处理, 同时激励注入必须满足安全与可感知性约束。

“在线快速激励测试方法”的关键思路是用短时、能量受限、频带可控的电流激励 $\Delta i(t)$ 在不明显改变 SOC 与驾驶体验的条件下获取可辨识的电压响应 $\Delta v(t)$, 并通过快速谱估计或目标频点计算得到阻抗特征, 再将其压缩为少量可用于控制与诊断的指标, 如 R_0 (高频内阻) 与中频极化强度等。本文给出一套面向 BMS 落地的快速激励链路, 从激励设计、同步采样与抗干扰、阻抗估计到特征门控更新, 形成可实现、可校核、可迭代的在线方案。

1 方法

1.1 在线阻抗估计模型与约束

在线快速激励测试的理论基础是将动力电池在某一瞬时工作点附近视为小信号系统。车辆运行时电池电流往往不为零, 端电压同时包含开路电压随 SOC 变化的缓慢漂移、欧姆压降以及由界面反应与扩散引起

的极化电压。为在不显著扰动工况的前提下提取阻抗信息, 可在原有电流 I_0 之上叠加小幅激励 $\Delta i(t)$, 并在短测量窗口内获得电压响应 $\Delta v(t)$ 。在窗口足够短且工作点变化相对缓慢的假设下, $\Delta v(t)$ 与 $\Delta i(t)$ 可近似满足线性关系, 频域中可表示为 $\Delta V(j\omega) = Z(j\omega) \Delta I(j\omega)$ 。该近似使得在线阻抗估计能够从“扫频测全谱”转向“在有限频带内快速估计关键频点或等效参数”, 更符合 BMS 实时应用的需求。

在线场景的约束决定了方法必须具备“安全、能量受限、可实时、可校核”的特征。安全约束体现为激励幅值与电压响应必须受限, 避免触发过流、过压或导致明显温升; 能量约束要求激励在时间上近似零均值, 通过对称注入或正负配对控制净电荷注入, 防止 SOC 偏移并降低对车辆功率需求的影响; 时间约束要求测量在数百毫秒到数秒内完成, 以适配车辆稳定工况窗口与控制周期; 资源约束则来源于 BMS 采样率、存储与算力限制, 要求算法复杂度可控, 能够在 MCU 上实现快速计算。与此同时, 在线测量还必须面对开关纹波、母线耦合与电磁干扰等噪声源, 以及驾驶工况引起的缓变趋势, 它们会降低信噪比并在低频段造成显著偏差。因此, 在线阻抗估计不能简单采用“电压电流直接比值”, 而需要在信号处理层面先剥离趋势、抑制窄带干扰, 再引入抗噪能力更强的谱估计框架。

1.2 快速激励设计与注入策略

快速激励的目标是在最短时间内注入尽可能“信息密度高”的测试信号, 同时把扰动控制在不可感知范围内。工程上常用的激励包括短时多正弦、伪随机序列与线性调频三类。多正弦通过选择若干离散频点

基金项目: 国家自然科学基金 62203275《动力电池交流阻抗快速检测与安全充电协调控制研究》; 国家自然科学基金地区联合项目《面向热电联产的新能源电力系统安全监测与优化控制》项目号: U24A20261。

并优化相位降低峰均比,便于在较小峰值电流下获得较高相干性,适合在匀速或充电等平稳状态下周期性刷新阻抗特征;伪随机序列生成简单、频谱较宽,适合在更短窗口内快速更新高频内阻指标,但低频分辨率受窗口长度限制;线性调频在短时间内覆盖连续频带,可获得更完整的谱形,但对时频映射与滤波设计更敏感。综合可实现性与鲁棒性,在线策略通常采用“触发条件+双限幅+门控更新”的闭环:先在SOC、温度、电流裕度满足条件且车辆状态相对稳定时触发测试;注入过程中对 $\Delta i(t)$ 幅值与 $\Delta v(t)$ 峰值实施双限幅,必要时中止;测试结束后依据相干性与有效频点数量进行门控,只有在数据可信时才更新阻抗特征或等效参数,从而保证在线输出的稳定性与可追溯性。

2 结果

2.1 测试效率与可辨识性表现

在典型动力电芯的多SOC、多温度工作点下,短时激励可在1s~2s窗口内稳定获得中高频阻抗特征。多正弦在离散频点上更容易保持较高相干性,适合做周期性阻抗刷新;PRBS在实现复杂度与时间开销上优势明显,适合高频内阻指标的频繁更新;chirp在频带覆盖连续性上更好,但若时频映射与滤波参数选择不当,部分频段相干性下降,表现为相位抖动或拟合残差增大。总体上,在线快速方法能够在不显著改变SOC的前提下获取“足够用于控制”的阻抗信息,满足实时性目标。

2.2 温度与SOC对特征指标的响应

结果表明,高频R0类指标对温度更敏感,温度升高时R0下降明显;中频极化指标在低温或低SOC更易增强,表现为相位滞后增大与等效极化时间常数变长。这类规律使阻抗特征可用于两类在线修正:一是对功率能力进行动态修正,在低温或极化增强时更早触发限功率;二是为热模型提供更贴近真实的损耗估计,使 I^2R 损耗与极化损耗的分配更合理,从而提升热管理策略的准确性。

2.3 抗扰性与在线稳定性

在叠加工况缓变趋势与开关纹波的情况下,直接用电压电流比值易产生显著偏差,而采用“趋势扣除+交叉谱+相干门控”后,错误频点能够被识别并剔除,使R0与极化指标的波动显著降低。若有效频点不足,系统自动拒绝更新并保持上一周期参数,避免错误数据污染BMS模型。该机制使在线阻抗估计从“单次精确”转向“连续可靠”,更符合车辆长期运行的工程要求。

3 讨论

3.1 方法优势、适用边界与工程意义

本文提出的在线快速激励测试方法本质上是“信

息效率优先”的阻抗获取策略,通过短时能量受限激励与交叉谱估计,将传统EIS的高精度、长时间测量转化为在线可执行的“快速、够用、可校核”方案。其工程意义体现在三点:第一,阻抗特征可作为BMS自适应模型的关键观测量,提升SOC估计在温度变化与老化条件下的准确性;第二,R0与极化参数的在线更新可用于功率能力与安全边界的动态修正,使限功率策略更贴合真实电池状态;第三,通过相干函数与有效频点判据,方法具备自诊断能力,可在干扰强或工况不稳时自动拒绝输出,避免“错误阻抗”污染控制器参数。

同时也应明确其适用边界:快速激励依赖小信号线性化假设,当电池处于强非线性区域(极低SOC、接近截止电压、温度极低导致极化剧烈)时,阻抗随电流幅值变化明显,小幅激励的线性响应可能不足以代表实际大电流行为;若工况波动频率与激励频带重叠且幅值较大,即便趋势去除也可能降低相干函数,导致有效频点不足;此外,电芯一致性与并联支路电流分配会让“包级测得的阻抗”成为多单体的混合响应,需结合拓扑与均衡状态解释参数含义。

3.2 关键参数选取建议与可落地实现要点

在实际部署中,建议优先保证三个关键点。其一是频带选择:上限受采样与滤波限制,通常不宜超过 $f_s/5$;下限受窗口长度限制,若窗口1s则对1Hz以下分辨能力有限,因此可把低频扩散特征改为“准低频指标”(例如2Hz~5Hz)或在充电/驻车时用更长窗口做低频补测。其二是激励幅值:应依据电流裕度与车辆可感知性动态调整,宁可牺牲部分低频信息也要保证安全与稳定输出,并通过多次小幅测量做时间平均来补偿信噪比。其三是可信度判据:相干函数阈值与有效频点数量阈值必须作为“阻抗更新的门控”,避免在噪声或工况扰动下输出不可靠参数。

实现层面,多正弦适合在可控频点上建立稳定标定与诊断逻辑,PRBS适合做高频内阻快速刷新,chirp适合在算力充足或需要更连续谱形时使用。对MCU而言,建议使用预计算正弦表或LFSR生成PRBS,FFT采用固定点库并对窗函数与谱平均做简化,必要时仅保留若干目标频点的Goertzel算法以进一步降低计算量。

3.3 局限性与后续研究方向

尽管快速激励能在工程上提供高性价比的阻抗信息,但仍存在值得深入研究的方向。第一,在线阻抗与SOH映射关系受温度、SOC与历史工况共同影响,单次测得的R0或R1并不能直接等价于老化程度,后续需建立“多变量补偿+统计学习/机理耦合”的健康评

估模型,并明确不同老化机理(锂沉积、SEI增厚、集流体腐蚀)对阻抗特征的差异贡献。第二,包级测量的阻抗混合效应需要与电池系统拓扑、均衡状态、接触电阻变化联合建模,探索如何从包级阻抗中分离异常支路或定位弱单体。第三,在高动态驾驶条件下,如何将阻抗估计从“稳定窗口触发”扩展到“持续在线跟踪”,可考虑递推频域估计、卡尔曼滤波型参数跟踪与自适应激励调度,使阻抗信息成为随时可用的状态量。

4 结语

总体而言,动力电池阻抗信息在线快速激励测试方法的价值不在于完全替代实验室EIS,而在于为BMS提供一种可实时、可校核、可迭代的阻抗特征获取手段,使健康评估、功率预测与安全控制从“离线标定驱动”逐步走向“在线数据驱动与机理约束融合”。在动力电池高安全、高可靠与全生命周期管理需求持续提升的背景下,该类方法具有明确的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 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(01):61-71.
- [2] 于思琦,牟宪民,陈希有,等.基于多点阻抗的锂离子电池健康状态在线快速诊断方法[J].电工电能新技术,2025,44(02):116-128.
- [3] 张闯,杨浩,刘素贞,等.基于阻抗在线测量的锂离子电池过放电诱发内短路识别研究[J].电工技术学报,2024,39(06):1656-1670.
- [4] 吴建鑫,杨丽君,肖滢琳,等.基于电流激励的储能电池电化学阻抗谱快速检测方法[J].电工技术学报,2023,38(21):5889-5899.
- [5] 雷晶晶,李泽皓,陈斌斌,等.基于电化学阻抗谱的电芯内部温度估计研究[J].储能科学与技术,2024,13(08):2823-2834.
- [6] 庄全超,孙世刚.锂离子电池的电化学阻抗谱分析——从基础研究到工业应用[C]//中国电子学会元件分会.2017储能材料与能量转换技术专题会议摘要集.中国矿业大学;厦门大学;,2017:45.
- [7] 韦海燕,钟腾云,潘海鸿,等.基于改进HPPC锂离子电池内阻测试方法研究[J].电源技术,2019,43(08):1309-1311+1339.
- [8] 庄全超,杨梓,张蕾,等.锂离子电池的电化学阻抗谱分析研究进展[J].化学进展,2020,32(06):761-791.