

# 家用储能电池包绝缘电阻在线监测技术研究

裴 祺<sup>1</sup> 刘新军<sup>2</sup>

1.广东美的厨房电器制造有限公司 广东 佛山 528311

2.小熊电器股份有限公司 广东 佛山 5238311

**【摘要】**：家用储能设备逐步从单一备电单元转向并网、离网和光储协同的复合直流系统后，电池包绝缘状态不再只是出厂检验指标，而成为运行安全和远程运维中的持续监测对象。文章围绕家用储能电池包绝缘电阻在线监测技术，分析绝缘衰减的形成场景、在线采样硬件和解算软件的关键设计要点，并提出误差修正、分级告警和可靠性加固措施，以提升装置在家庭使用环境中的可用性与预警有效性。

**【关键词】**：家用储能；电池包；绝缘电阻；在线监测；BMS

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.023

## 引言

家用储能电池包通常处于高湿、温差频繁变化和启停切换较多的环境中，壳体密封、线束老化、冷凝积水和接插件污染都可能让绝缘水平缓慢下降。若监测仍停留在离线摇表或维护期抽检阶段，异常往往只能在故障扩大后被发现。面向家用场景构建在线绝缘电阻监测装置，关键不在单次测值能否显示，而在采样支路、抗干扰解算和分级处置逻辑能否长期稳定协同。

## 1 家用储能电池包绝缘监测的需求基础与风险约束

### 1.1 多源直流回路叠加下的家用绝缘风险

家用储能系统中的绝缘风险并非只来自电池单体，而是由电池包、高压母线、PCS接口、继电器回路和辅助供电支路共同叠加形成。设备在并网充放电、离网逆变和待机维持等模式之间切换时，不同支路的寄生电容、电压分布和泄放路径会随之改变，使绝缘异常既可能表现为持续性下降，也可能表现为特定工况下的瞬时波动。液冷储能系统设计研究表明，系统集成度越高，线束布置、壳体密封和接口防护对安全裕度的影响越直接<sup>[1]</sup>。家用绝缘监测不能把对象理解为静态电池包，而应把电池包及其外接直流链路视为一个整体监测单元。

### 1.2 绝缘衰减的渐进特征与误判诱因

绝缘衰减在家用场景中大多呈渐进发展而非突变失效。冷凝水在箱体底部或线束穿舱处积聚、表面粉尘吸湿后形成导电膜、接插件端面轻微腐蚀以及绝缘层长期热老化，都会让绝缘电阻沿着较长周期缓慢下滑。若监测装置只依据单个时刻的瞬时值进行判断，就容易把温升、负载切换或启动浪涌引起的短时波动误判为故障，也可能把真正的长期劣化淹没在噪声中。电池储能系统绝缘电阻检测方法误差分析表明，测量路径、工况切换和杂散参数都会对结果产生明显扰动。家用在线监测因此必须兼顾趋势识别与瞬态抑制，避免简单阈值法造成误报和漏报并存。

### 1.3 在线监测对 BMS 协同和运维响应的要求

绝缘监测装置一旦用于家用储能，输出对象就不再只是检修人员，还包括 BMS、上位网关和远程运维平台。监测结果若不能与充放电允许逻辑、预充控制和故障停机策略联动，告警信息就会停留在显示层，无法转化为有效处置。电池储能系统绝缘检测方法概述指出，在线检测不仅需要给出绝缘水平，还要兼顾测量时机、装置注入方式和系统级协同<sup>[2]</sup>。监测装置在设计阶段就要明确采样何时启动、达到何种风险等级时触发限制功率或断开接触器，以及如何把异常记录留存在远程日志中，保证后续维护具有可追溯基础。

## 2 在线监测系统总体架构与硬件模块设计

### 2.1 电池包至直流母线的分层采样接入架构

面向家用储能的在线绝缘监测，硬件架构宜采用电池包、汇流母线和外部负载支路分层接入的方式，而不应仅在总正、总负与外壳之间布置单一测量支路。分层采样的价值在于，当绝缘异常出现时，装置能够初步区分问题更接近电池包内部、汇流连接区还是外部接口区，从而降低故障范围。若全部节点都依赖一个总测点，装置虽然简化，但在实际维修中只能得到“整体偏低”的结论，难以支持针对性处理。储能电站设备感知方案分析认为，多层次感知布点有助于提高运维诊断效率。家用产品虽然受成本约束，仍应在关键节点保留最基本的分区感知能力。

### 2.2 绝缘采样支路、隔离调理与抗共模设计

绝缘采样硬件的难点在于既要让测量支路对高压直流回路形成足够灵敏的检测条件，又不能给正常运行带来额外安全风险。常见做法是在高阻网络基础上配置受控注入和隔离调理单元，使采样支路在极低能量条件下感知泄漏路径变化，并将采样结果送入低压控制侧。由于家用储能中逆变器开关动作频繁，共模噪声和高频耦合分量容易混入测量通道，若前端滤波、屏蔽和隔离布局处理不当，就会出现测值抖动和告警飘移。基于超高频信号的直流系统绝缘接地故障在线监测研究说明，不

同频段信号特征对故障辨识灵敏度有显著影响<sup>[3]</sup>。家用装置应重点控制采样回路的隔离完整性和共模抑制，而不是单纯放大采样幅值。

### 2.3 主控单元、通信链路与本站告警模块配置

主控单元承担采样调度、数据计算、阈值比较和联动输出等核心任务，设计上宜与BMS或家庭能源网关保留清晰边界。对家用储能而言，绝缘监测结果既要在本地通过指示灯、蜂鸣器或小型屏显快速告知用户，也要经串口、CAN或其他低速可靠链路上传至上位控制器，用于形成统一故障事件。若告警只在本地生效，用户可能在非设备旁环境下错过早期预警；若只上传平台而缺少就地提示，又会增加现场排查滞后。家用系统通常空间有限，主控、供电和通信模块需要在同一腔体内实现高低压隔离，因此板级分区、走线回流和接地拓扑必须在结构设计初期一并考虑，避免后期为了加装通信功能破坏测量稳定性。

## 3 绝缘电阻在线监测算法与软件流程

### 3.1 注入检测与等效绝缘电阻解算逻辑

软件流程的第一任务是将采样支路得到的电压、电流或等效响应量转换为可解释的绝缘电阻结果。对家用装置而言，解算逻辑应尽量采用结构清晰、计算量适中的方法，使单片控制器或嵌入式主控能够在有限算力下完成周期测量。绝缘误差分析研究指出，测量结果本质上是对系统等效绝缘状态的反映，而非某一个单点元件真实阻值的直接读数。算法设计不宜只追求显示值精细，而应优先保证同一装置在不同运行模式下的可比性。对用户而言，能稳定识别“持续恶化”通常比追求个体精度更有工程价值。同时，解算过程还应把采样时序与接触器状态绑定，避免在继电器切换瞬间读取半稳态数据，影响后续趋势判断。对存在休眠唤醒机制的家用系统，还应区分上电初始化阶段和稳定运行阶段的计算窗口，避免启动瞬间的电压再分配被误当成真实绝缘下降。

### 3.2 温湿扰动与寄生电容耦合下的误差修正

在线监测一旦长期运行，误差修正就成为决定可用性的关键环节。家用储能设备常被安装在阳台、车库或设备间，环境温度湿度变化明显，电池包表面与结构件之间还存在不可忽略的寄生电容。设备在充电、放电和待机条件下，电流纹波与高频开关噪声分布不同，会导致采样值在相同绝缘水平下出现偏移。若软件不对测量窗口、平均周期和环境关联项进行修正，系统就会在梅雨季、低温回暖或负载突变时频繁误报。一种直流系统接地故障信号融合检测方法提出，通过多信号融合和特征校核能够提升故障辨识稳健性<sup>[4]</sup>。家用监测算法可借鉴这一思路，将多次采样结果、环境状态和工况标记联合判断，而不是让单一瞬时值直接触发停机。

### 3.3 分级告警、趋势判别与故障定位策略

绝缘监测的输出不应只有“正常”与“异常”两类结果，更合理的做法是建立关注、预警和保护三级乃至更多层级。对轻度下降但仍可运行的状态，系统可优先记录趋势并提示用户检查安装环境；对持续恶化且伴随波动加剧的状态，可限制功率或要求尽快检修；对明显异常并可能触发触电或设备损坏风险的状态，则应联动切断高压回路。分级策略的意义在于避免装置对短时波动反应过度，同时也避免真正的劣化在“尚未越线”阶段被忽略。若前端架构保留了分层采样，软件还可结合支路差异做初步定位，将异常倾向区分为箱体侧、母线侧或外部接口侧，为现场维修节省大量排查时间。

## 4 装置工程实现中的可靠性提升措施

### 4.1 开机自检与校准复核机制

家用监测装置通常长期无人值守或仅受到低频关注，如果其自身采样链路出现失准而未被及时发现，绝缘监测的意义将大幅降低甚至丧失。因此，装置在上电启动时，应首先完成零点校验、参考支路比对以及采样通道连通性确认，确保前端高阻网络、隔离器件和模数转换链路处于正常有效状态后，方可进入正式监测阶段。在日常运行中，可充分利用设备待机窗口执行轻量化自检，检测测量值波动是否超出装置自身允许的误差范围。对于采用远程运维的家用系统，应将校准与复核结果同步记录在维护日志中，使平台能够区分“被监测对象异常”与“监测装置自身异常”，有效防止因装置自身故障而导致的误判或错误处置，从而提升监测可靠性和维护决策的准确性。

### 4.2 电磁兼容、潮湿冷凝与接插件老化防控

可靠性提升不能仅依赖软件优化，结构设计与环境适应性同样至关重要。家用储能柜内部通常同时存在风扇、继电器、逆变器和通信模块，这些部件产生的电磁干扰可能通过供电线路和地线耦合进入监测电路。如果板卡布局不合理、屏蔽层接法错误或模拟地分区处理不到位，采样结果可能出现周期性漂移。此外，潮湿冷凝、接插件老化不仅是被监测对象的风险源，也会成为监测装置本身的干扰源。因此，在设计中需同步考虑连接器选型、防水导流和线束固定，使绝缘监测功能与环境防护协同。唯有将环境防护和测量稳定性纳入同一设计闭环，装置才能在家庭复杂工况下长期维持可靠、可信的输出，确保监测数据的准确性与系统安全性<sup>[5]</sup>。

### 4.3 数据留痕、远程运维与应用边界

在线绝缘监测最终要服务维护决策，因此数据留痕至少应覆盖采样时间、运行模式、测值趋势、告警等级和处置动作。只有在同一事件链中保留这些信息，运维人员才能判断异常是偶发工况扰动，还是某一结构位置正在持续恶化。家用产品又受成本与算力限制，不可能无限增加测点和复杂算法，因此在方案定义时就要明确应用边界：装置更适合做系统级预警和趋

势监测，而不是替代专业离线绝缘诊断。只要边界清晰，在线装置与维护期精查形成协同关系，家用储能的绝缘管理就能从事后发现转向过程预防。

## 5 在线监测装置的验证方案与评价指标

### 5.1 工况覆盖与模拟泄漏场景构建

家用储能绝缘监测装置在定型前，应建立覆盖待机、充电、放电、离网切换和低温启动等典型工况的验证方案。验证并不一定依赖复杂现场平台，也可通过等效阻值接入、受控潮湿环境模拟和线束局部污染模拟等方式，观察装置在不同工况下的测值变化与告警响应。这样做的目的，不是追求单一工况下的理想数值，而是确认装置在多模式切换时是否仍保持一致的判断逻辑。若只在静态空载状态下验证，很多由逆变开关噪声、接触器动作和温升耦合引起的问题都不会暴露，装置投入家庭场景后便容易出现实测与台架结论不一致的情况。

### 5.2 测量稳定性、响应时效与定位有效性评价

在线绝缘监测装置的评价不应只看某一次读数是否接近期望值，还应同时关注稳定性、响应时效和定位有效性。稳定性侧重观察在绝缘状态未变化条件下测值波动是否可控，响应时效侧重确认异常出现后多长时间进入关注、预警或保护状态，定位有效性则考察分层采样设计是否真正缩小了排障范围。对家用产品而言，这三项指标往往比实验室精密度更接近

真实使用价值。若装置读数很精细，但告警迟缓或定位含糊，运维效果仍然有限。验证阶段应把动态行为纳入核心评价，而不是只留下一组静态测量结果<sup>[6]</sup>。

### 5.3 家庭部署中的维护策略与升级建议

装置进入家庭部署后，还需要配套明确的维护策略。包括用户在何种提示下应暂停使用、售后在何种情况下需要执行离线复测、平台在多次轻度告警后是否自动生成巡检建议等，都应在交付方案中定义清楚。与此同时，监测参数与告警阈值最好支持分版本管理，使后续在不同电池容量、不同壳体结构和不同安装环境间可以按机型调整，而不必重新开发整套硬件。对批量部署产品，还可结合运维平台统计不同季节、不同安装位置的告警特征，反向优化默认参数和提示语，减少用户对轻度异常的误解。这样一来，在线监测装置不仅是一块功能板，更成为可持续迭代的安全子系统，有助于家用储能产品在批量应用后持续提升绝缘管理水平。

## 6 结语

家用储能电池包绝缘电阻在线监测技术的价值，在于把绝缘风险识别从维护抽检前移到运行全过程。只有将分层采样架构、抗干扰硬件、稳健解算算法和分级处置逻辑同步落地，并结合自检、留痕和远程运维形成闭环，在线监测装置才能真正发挥对家庭储能系统安全运行的支撑作用。

## 参考文献：

- [1] 张杰,吴成辉,潘明俊,等.电池储能系统绝缘电阻检测方法误差分析[J].储能科学与技术,2024,13(04):1167-1175.
- [2] 黄国华,赖柱汕,李娴.电池储能系统绝缘检测方法概述[J].电子产品可靠性与环境试验,2021,39(S1):113-117.
- [3] 安旺成,吴金莲,令宁,等.基于超高频信号的直流系统绝缘接地故障在线监测[J].微型电脑应用,2025,41(11):79-83.
- [4] 朱龙忠,张家休,卢立志,等.一种直流系统接地故障信号融合检测方法[J].电力安全技术,2026,28(01):37-41.
- [5] 曾春保,李春生,李长成.液冷储能系统关键技术设计及应用[J].中国高新科技,2025,(06):63-65.
- [6] 晏贵平.储能电站设备感知方案分析[J].新型工业化,2022,12(02):236-238+242.