

退役新能源汽车动力电池梯次利用于12V蓄电池的关键技术研究

王月雷 王康龙 刘秋平 陈 华 舒卫涛
海南科技职业大学 海南海口 570000

摘 要: 本文聚焦退役新能源汽车动力电池梯次利用于12V蓄电池的关键技术,系统分析了退役电池特性筛选、系统适配、安全性与经济性。研究提出多维度剩余价值评估体系,结合电化学性能、结构完整性及使用历史量化评分;开发多参数协同分选与模块化成组策略,构建三级梯次利用分类标准。针对12V场景需求,优化电池模组结构与BMS均衡控制算法,集成热失控三级防护与寿命延缓技术。全生命周期成本模型显示,梯次电池单位容量成本较新电池降低35%–40%,碳足迹减少60%以上,兼具经济与环保效益,为退役电池规模化再利用提供理论支撑。

关键词: 退役动力电池;梯次利用;12V蓄电池;电池管理系统(BMS);剩余寿命评估

引言

随着新能源汽车保有量激增,退役动力电池规模逐年扩大,如何实现其高效梯次利用成为行业焦点。12V蓄电池作为乘用车启动电源、应急照明等场景的核心部件,对成本、安全性及环境适应性要求严苛。退役电池虽容量衰减,但剩余性能仍可满足低功率场景需求,通过精准筛选、系统优化与智能管理,可显著降低全生命周期成本,减少资源浪费与环境污染。本文围绕退役电池特性分析、梯次系统设计、安全防护及经济性评估展开研究,旨在突破技术瓶颈,推动退役动力电池在12V领域的规模化应用,助力碳中和目标实现。

一、退役新能源汽车动力电池特性分析与筛选标准

(一) 退役电池剩余价值评估

退役电池剩余价值评估需综合多维度特性开展系统检测,核心围绕电化学性能、结构完整性及使用历史三大维度。通过充放电循环测试获取容量保持率、充放电效率等关键参数,容量保持率在70%–80%区间是评估核心阈值,直接决定梯次利用可行性。交流阻抗测试可精准判断电极界面阻抗变化,反映电芯内部老化程度;同时需核查电池循环次数、充放电倍率历史及存储环境记录,排除经历过严重过充过放或高温存储的电芯^[1]。外观检测与无损探伤结合,排查壳体变形、极柱腐蚀等结构缺陷,避免因结构问题引发后续安全隐患。评估过程需建立量化指标体系,将电化学参数、结构状态与使用历史数据加权分析,形成科学的剩余价值评分,为后续梯次利用决策提供精准依据。

(二) 电芯分选与成组策略

电芯分选需构建多参数协同分选体系,先通过自动化检测设备批量采集电芯容量、内阻、开路电压、自放电率等核心参数,采用K-means聚类算法对参数进行分类,确保同批次分选后电芯参数偏差控制在5%以内。针对磷酸铁锂与三元锂不同体系电芯,需制定差异化分选标准,三元锂侧重电压一致性控制,磷酸铁锂强化容量与内阻匹配度。成组策略采用“先串后并”或“先并后串”的模块化设计,根据目标应用场景功率需求确定串并联数量。成组前需对电芯进行活化处理,恢复部分电化学性能;成组过程中采用弹性缓冲结构减小振动冲击对电芯连接的影响,激光焊接工艺提升极耳连接的稳定性与导电性。同时建立分选–成组追溯体系,记录每个模组电芯的原始参数,为后续维护与寿命评估提供数据支撑。

(三) 梯次利用电池分类标准

梯次利用电池分类标准基于应用场景需求与电池性能指标构建三级分类体系。一级分类针对储能系统应用,要求电池容量保持率 $\geq 75\%$,循环寿命剩余 ≥ 2000 次,自放电率 $\leq 2\%/月$,且通过100次充放电循环稳定性测试,适用于光伏、风电配套储能及电网调峰场景。二级分类面向动力型应用,如低速电动车、电动叉车等,容量保持率需在70%–75%之间,循环寿命剩余 ≥ 1500 次,充放电倍率支持1C–2C,同时满足振动、冲击等机械性能要求,确保动力输出稳定性。三级分类针对静态小功率应用,包括应急电源、路灯储能等,容量保持率 $\geq 65\%$,循环寿命剩余 ≥ 1000 次,重点考核静态存储稳

定性与低成本维护性。所有分类均需通过安全性能检测，包括针刺、挤压、热冲击测试，且明确标识电池型号、原始车企、退役时间及性能参数，保障分类使用的规范性与可追溯性。

二、梯次电池系统设计与适配技术

(一) 12V 蓄电池应用场景需求分析

12V 蓄电池应用场景覆盖乘用车启动电源、小型应急照明、家用安防设备及低速电动车辅助电源等领域，不同场景对梯次电池系统提出差异化需求。乘用车启动场景要求瞬间放电电流 $\geq 300\text{A}$ ，启动响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ ，低温环境（ -20℃ ）下容量保持率 $\geq 60\%$ ，确保低温启动可靠性；同时需具备浮充充电适应性，匹配原车充电系统^[2]。小型应急照明场景侧重持续放电稳定性，要求100mA放电电流下持续工作 $\geq 12\text{h}$ ，自放电率 $\leq 1\%/月$ ，支持涓流充电模式，适配太阳能充电模块。家用安防设备需求聚焦长待机性能，待机电流 $\leq 5\text{mA}$ ，单次充电后待机时长 ≥ 3 个月，具备过充过放保护功能。低速电动车辅助电源需满足频繁充放电需求，循环寿命 ≥ 1000 次，充放电倍率支持0.5C-1C，且适应颠簸振动的使用环境，电池系统防护等级达到IP65，保障不同场景下的适配性与可靠性。

(二) 电池模组结构优化

电池模组结构优化以轻量化、高集成度及强安全性为核心目标，采用模块化设计理念提升适配性。壳体材料选用高强度铝合金挤压型材，通过拓扑优化设计减少材料用量，相比传统钢结构壳体重量降低30%，同时壳体表面采用阳极氧化处理提升耐腐蚀性能。电芯固定采用蜂窝状阵列布局，配合硅橡胶缓冲垫填充间隙，缓冲垫压缩率控制在15%-20%，可有效吸收振动冲击能量，避免电芯间刚性碰撞。极群连接采用铜铝复合母排，通过超声波焊接工艺实现母排与极柱的连接，降低接触电阻至 $5\text{m}\Omega$ 以下，减少充放电过程中的热量产生。模组顶部集成集成式采样线支架，将电压、温度采样线有序排布，避免线路缠绕引发的短路风险。同时设计快速插拔接口，实现模组与系统的快速装配与更换，模组防护等级提升至IP67，适应潮湿、多尘等复杂环境，提升整体结构的可靠性与实用性。

(三) 电池管理系统（BMS）开发

梯次电池BMS开发需针对退役电池性能不均特性，强化均衡控制与状态估算功能。硬件设计采用主从架构，主控制器负责数据处理与指令下发，从控制器实现单节

电芯电压、温度的精准采集，采样精度达到 $\pm 5\text{mV}$ ，温度采样误差 $\leq \pm 1\text{℃}$ ，每路从控制器可管理12-16节电芯，支持多从机扩展。软件算法方面，基于扩展卡尔曼滤波算法估算电池荷电状态（SOC），结合安时积分法修正，使SOC估算误差控制在3%以内；针对电芯一致性差异，开发主动均衡电路，均衡电流可达1A，通过电容转移能量实现单节电芯电压均衡，均衡后电芯电压偏差 $\leq 10\text{mV}$ 。安全控制模块集成过充、过放、过流、过温等多重保护功能，当检测到异常参数时，10ms内触发保护机制切断回路。同时开发数据通信接口，支持CAN/LIN总线协议，实现与上位机的数据交互，实时上传电池状态信息，为后续维护提供数据支持。

三、安全性与可靠性关键技术

(一) 热失控与安全防护

热失控防护采用“监测-预警-抑制”三级防护体系，从源头遏制热失控发生与蔓延。温度监测采用分布式光纤测温技术，光纤沿电芯间隙布置，测温点间距 $\leq 5\text{cm}$ ，可实现电芯表面及内部温度的实时监测，温度分辨率达到 0.1℃ ，当检测到温度异常升高（ $\geq 5\text{℃}/\text{min}$ ）时，系统立即触发一级预警^[3]。预警后启动主动冷却系统，采用液冷与风冷结合的复合冷却方式，液冷管道贴合模组壳体，冷却液流量可根据温度动态调节，风冷系统启动后30s内将模组内部风速提升至 2m/s ，快速降低温度。若发生热失控初期反应，模组内置的气溶胶灭火装置立即启动，1s内释放灭火气溶胶，填充模组内部空间抑制燃烧反应；同时模组之间设置防火隔舱，采用陶瓷纤维防火板，防火等级达到A级，可有效阻挡热失控蔓延。

(二) 寿命衰减机制与延缓策略

梯次电池寿命衰减主要源于电极材料老化、电解液分解及界面阻抗增长等机制。正极材料结构坍塌导致活性物质流失，负极SEI膜持续增厚降低锂离子扩散速率，电解液中锂盐分解产生气体导致内部压力升高，这些因素共同加速电池性能衰减。延缓策略从使用与维护两方面入手，充电策略采用多阶段恒流恒压充电模式，根据电池SOC状态动态调整充电电流，SOC低于60%时采用1C大电流充电，SOC高于80%时切换为0.3C小电流充电，避免过充导致的电极损伤。使用过程中控制工作温度范围在 $15\text{℃}-35\text{℃}$ ，通过温控系统实时调节，低温环境下启动预热功能，高温时强化冷却，减少温度波动对电池寿命的影响。定期开展电池活化维护，采用脉冲充电技术消除电极表面的锂枝晶，每300次循环进行一次深度

充放电校准，恢复部分容量。同时建立寿命预测模型，基于充放电数据与阻抗变化趋势，提前预警寿命衰减节点，指导维护与更换。

（三）环境适应性改进

环境适应性改进针对高低温、湿度、振动等复杂环境因素，构建全场景防护体系。高低温适应性方面，采用复合保温层包裹模组，保温层由聚氨酯泡沫与真空绝热板组成，导热系数 $\leq 0.02\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，低温环境（ -40°C ）下可使模组内部温度维持在 5°C 以上；高温环境（ 60°C ）时，启动液冷循环系统与隔热遮阳罩，将电池温度控制在 40°C 以内。湿度适应性通过密封设计提升防护等级，模组接口采用橡胶密封圈与螺纹压紧结构，壳体接缝处涂抹防水胶，整体防护等级达到IP68，可在1m水深环境下正常工作24h。振动冲击适应性优化结构连接，电芯与壳体采用弹性固定方式，模组与系统框架通过减震弹簧连接，经过正弦振动测试（5–2000Hz）与冲击测试（100g加速度）后，电池性能参数无明显变化。针对高海拔低气压环境，优化电池壳体强度设计，采用耐压壳体结构，在海拔5000m环境下可正常工作，确保不同环境下的稳定运行。

四、经济性与环境效益分析

（一）全生命周期成本模型

全生命周期成本模型涵盖退役电池回收至最终处置的全流程，采用动态成本核算各环节成本。回收环节，运输费按 $0.8\text{元}/\text{km}\cdot\text{吨}$ 算，拆解费约80元/组，集中回收与自动化拆解可降15%成本。检测分选成本主要是设备折旧与人工成本，流水线检测后单位检测成本降至30元/电芯。系统设计与制造成本占比高，模块化设计与规模化生产能使单位成本降20%。使用维护成本含充电、检测及维修费，梯次电池年均维护成本是新电池的60%。最终处置成本有无害化处理费与材料回收收益，正极材料回收收益可覆盖70%处置成本^[4]。模型引入资金时间价值系数，按5%年利率核算现值，结果显示梯次利用电池全生命周期单位容量成本比新电池低35%–40%，经济优势显著。

（二）碳足迹与环保效益评估

碳足迹评估用生命周期评价法，核算电池退役

回收至梯次利用报废全流程碳排放。回收环节优化运输路线、用清洁能源拆解设备，单位回收碳排放降至 5kgCO_2 当量/kWh。检测分选与系统制造环节，用节能设备与轻量化材料，碳排放较传统工艺降25%，单位制造碳排放约 12kgCO_2 当量/kWh。使用环节，梯次电池用于储能，配合可再生能源消纳，每kWh年均减少碳排放约800kg。报废处置环节，正极材料与外壳回收再利用，比原生材料生产减碳60%。环保效益上，梯次利用延长电池寿命，减少新电池生产需求，每梯次利用1GWh电池可减少多种资源开采使用，降低重金属污染风险，还能减少废旧电池填埋量，每1GWh可减少约5000立方米填埋空间。

结束语

退役新能源汽车动力电池梯次利用于12V蓄电池，通过特性筛选、系统适配与安全强化技术的综合应用，实现了资源高效循环与成本优化。研究构建的量化评估体系、模块化设计方法及智能BMS算法，有效提升了梯次电池的可靠性与经济性。全生命周期成本与碳足迹分析表明，该技术路径可降低35%以上成本，减少60%碳排放，兼具环境效益与商业价值。未来需进一步完善标准体系，推动产业链协同，加速退役电池在多场景的规模化应用，为绿色低碳转型提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 陈运启, 陈则良, 张永禄, 等. 新能源汽车退役动力电池拆解与梯次利用分析[J]. 再生资源与循环经济, 2025, 18(7): 33–36.
- [2] 张丽滢. 新能源汽车动力电池包梯次利用过程中的安全检测与维修标准[J]. 汽车维修技师, 2025(18): 126–127.
- [3] 周佳, 施海龙. 考虑碳交易政策和梯次利用的新能源汽车动力电池回收利用模式的比较研究[J]. 物流科技, 2025, 48(2): 8–14, 64.
- [4] 韦方艳. 新能源汽车动力电池回收和梯次利用策略研究[J]. 汽车与驾驶维修, 2024(7): 9–11.