

锂离子电池自动测试系统设计与测试效率提升路径

张昊伟

浙江星航新能源有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：锂离子电池因高能量密度、长循环寿命等优势，已广泛应用于消费电子、新能源汽车等领域。随着产业规模化发展，电池测试对精准性与效率的需求日益迫切。本文聚焦锂离子电池自动测试系统设计与测试效率提升，阐述系统设计的核心目标与理论基础，分析自动测试相较于传统手动测试的技术优势；从硬件选型集成、软件架构设计等方面探讨系统设计关键环节；针对测试流程优化、资源调度策略等效率提升路径展开研究；结合实际应用验证系统可行性与效率提升效果。研究表明，科学的系统设计与流程优化可显著提升测试效率，为电池生产与质量管控提供支撑。

【关键词】：锂离子电池；自动测试系统；系统设计；测试效率；流程优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.077

1 引言

能源转型与电子技术发展推动下，锂离子电池成为核心储能元件，其性能直接决定终端产品质量与安全。电池测试贯穿研发、生产、回收全生命周期，需精准获取容量、循环寿命等核心参数，为产品迭代与质量控制提供数据支撑。传统手动测试依赖人工操作，人力成本高、数据偏差大，且流程分散、处理滞后，难以满足规模化生产对效率与一致性的需求。随着电池产业向标准化发展，构建高效稳定的自动测试系统成为必然。该系统通过软硬件协同实现测试流程自动化管控，减少人为干扰、提升数据精准度，同时经流程整合与智能调度提升测试效率，对推动锂离子电池产业高质量发展具有重要现实意义。

2 锂离子电池测试核心需求与自动测试理论基础

2.1 锂离子电池测试核心需求分析

锂离子电池测试需求源于应用场景多样性与性能要求严苛性，核心可归纳为性能、可靠性与安全性三大类测试。性能测试聚焦容量、充放电曲线、内阻等基本电化学特性，直接反映电池使用效能；可靠性测试关注循环寿命、高低温适应性等长期稳定性能，验证电池使用寿命与环境耐受性；安全性测试通过过充、短路、挤压等极端条件测试，评估电池安全防护能力，避免使用中出現安全风险。这些需求对测试系统提出多维度要求：精度上需控制电压、电流等参数测量误差；稳定性上需保障长时间连续运行输出稳定；效率上需缩短单块电池测试时间以匹配量产需求；兼容性上需适配不同规格电池。传统手动测试难以同时满足这些需求，自动测试系统通过智能化管控与集成化设计提供解决方案。

针对上述需求，测试系统需兼顾多维度性能：电压、电流等参数测量误差控制在毫级范围以保障精度；长期连续运行中保持输出稳定以避免数据失真；动力电池量产场景下，高效测试流程直接影响产能；同时需适配不同规格电池以满足多样化需求。自动测试系统通过智能化管控与集成化设计，有效解决

传统手动测试痛点，成为电池测试主流方向。

2.2 自动测试系统的理论基础

自动测试系统以控制理论、电化学测量理论与数据处理理论为核心支撑。控制理论中，闭环控制理论在充放电控制中起关键作用：系统根据预设充放电策略，实时采集电压、电流等反馈信号，通过PID控制算法调整输出，实现精准控制。PID算法结构简单、调节稳定，能有效抑制干扰，确保充放电参数符合设定要求。电化学测量理论为参数获取提供依据，锂离子电池充放电本质是电极氧化还原反应，系统通过测量电压-时间曲线计算容量与能量密度，借助交流阻抗测试获取反映电池健康状态的内阻信息，指导测试参数设置与数据解读。数据处理理论支撑海量数据高效处理，通过卡尔曼滤波等算法去除噪声，经数据校准修正系统误差，再由特征提取算法从原始数据中提炼容量、内阻等关键参数，为电池评估提供简洁有效的数据支撑。三大理论融合构成系统技术基础，保障测试精准高效。

电化学测量理论指导参数获取与数据解读，锂离子电池充放电本质是电极氧化还原反应，系统通过电压-时间曲线计算容量与能量密度，借助交流阻抗测试获取反映电池健康状态的内阻信息，确保测试结果真实反映电池电化学特性。

数据处理理论支撑海量数据高效分析，通过卡尔曼滤波等算法去除噪声、数据校准修正系统误差、特征提取算法提炼关键参数，三大理论融合构成系统技术核心，保障测试精准高效。

3 锂离子电池自动测试系统设计核心环节

3.1 系统总体设计理念与架构

自动测试系统以“精准控制、高效集成、稳定可靠”为设计理念，采用“应用层-控制层-硬件层”分层架构，各层级通过标准化接口实现数据交互与协同控制，保障系统整体性与可扩展性。应用层是用户交互核心，实现测试任务管理、数据展示分析、参数配置等功能，用户通过可视化界面发布指令、设置参数，实时监控测试数据与曲线，同时系统按维度存储数据便于追溯。控制层作为“中枢神经”，将应用层指令转化为控

制信号，实时采集硬件层反馈数据实现闭环控制，采用嵌入式控制系统结合实时操作系统（RTOS）确保指令快速响应，避免延迟导致的测试误差。硬件层负责执行具体测试任务，由充放电、数据采集、环境控制模块及电池夹具组成，通过工业以太网等协议实现数据稳定传输。

应用层实现任务管理、数据展示与存储追溯功能，用户通过可视化界面操作并监控测试过程；控制层以嵌入式系统结合实时操作系统为核心，实现指令转化与闭环控制，避免延迟误差；硬件层通过标准化接口与控制层连接，各模块协同完成测试操作，工业以太网等协议保障数据传输稳定。

3.2 硬件系统核心组件选型与集成

硬件系统性能决定测试精度与稳定性，核心组件选型与集成至关重要。充放电模块选用可编程直流电源与电子负载，实现宽范围电压电流调节及恒流、恒压等多种充放电模式，精准控制放电电流，同时具备过流、过压等保护功能。数据采集模块以高精度数据采集卡（DAQ）为核心，确保电压、电流采集精度达毫伏级与毫安级，设置多通道同步采集电池正负极电压、回路电流及表面温度，采用差分输入与光电隔离减少信号干扰。环境控制模块由恒温恒湿箱与温度传感器组成，恒温恒湿箱温度控制精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，传感器紧密贴合电池实时采集温度数据。硬件集成中，通过标准化接口实现各模块与控制层连接，物理隔离充放电与数据采集模块，采用屏蔽线缆传输信号，电池夹具采用弹性接触设计兼顾稳定性与兼容性。

数据采集模块以高精度 DAQ 卡为核心，多通道同步采集电池参数，差分输入与光电隔离技术保障数据稳定；环境控制模块通过恒温恒湿箱与温度传感器调控测试环境，为充放电保护提供依据；硬件集成注重兼容性与布局优化，可更换夹具设计提升系统适配性。

硬件集成通过标准化接口实现各模块高效通信，物理隔离充放电与数据采集模块，采用屏蔽线缆传输信号以减少电磁干扰，弹性接触式电池夹具兼顾连接可靠性与尺寸兼容性。

3.3 软件系统架构设计与功能实现

软件系统采用模块化设计，分为测试任务管理、充放电控制、数据采集处理、数据存储查询及用户交互模块，各模块通过统一接口实现数据交互，便于开发维护。测试任务管理模块实现任务创建、分配与监控，用户设置充放电循环次数等参数后，系统按电池信息自动分配测试资源，支持多通道并行测试，出现电压异常等情况时自动暂停并报警。充放电控制模块将任务指令转化为控制信号，内置多种控制算法，如“恒流-恒压”模式下，电压达截止值后自动切换模式，确保充电安全高效。

测试任务管理模块实现任务全流程管控与异常报警，充放电控制模块内置多种算法，如“恒流-恒压”模式可自动切换充电状态，确保充电安全高效，为自动化测试提供核心支撑。

数据采集处理模块采用多线程技术，实时接收原始数据并完成滤波、校准等预处理，提取容量、内阻等关键参数后传输至存储模块。数据存储查询模块采用 MySQL 数据库，按“电池信息-测试任务-测试数据”层级组织数据，支持多条件快速查询，具备本地与云端备份功能防止数据丢失。用户交互模块采用可视化设计，以曲线形式展示电压-时间等测试数据，界面布局简洁，降低操作难度，方便用户实时监控测试状态与查看结果。

4 锂离子电池测试效率提升关键技术路径

4.1 测试流程优化与并行测试技术

测试流程繁琐与单通道模式是效率瓶颈，流程优化与并行测试是提升效率的核心路径。传统流程中，电池上料、参数设置等环节存在较多等待时间，单通道测试一次仅能处理一块电池。通过流程优化，将测试划分为上料、测试、下料区，实现流水线作业：测试区运行时，上料区完成下批电池装夹与参数录入，下料区处理已测电池拆卸与记录，大幅缩短测试周期。并行测试通过增加通道数量实现多电池同步测试，系统配置 8-16 个独立测试通道，结合软件任务调度算法分配任务，避免资源竞争。采用分布式数据采集处理方案，各通道配备独立局部控制器，主控制器汇总上传数据，避免单控制器处理延迟，使测试效率与通道数量呈近似线性增长。

并行测试技术通过多通道硬件设计与软件调度算法实现多电池同步测试，分布式数据采集处理方案避免单控制器延迟，使测试效率与通道数量呈近似线性增长，显著提升大规模测试效率。

4.2 智能资源调度与测试策略优化

智能资源调度通过动态分配充放电模块、测试通道等资源，避免闲置与浪费。传统固定分配模式难以适配任务变化，导致资源负载不均衡。自动测试系统引入以“效率最大化”为目标的智能调度算法，综合任务优先级、测试时间等因素分配资源：紧急任务优先获取空闲资源，长周期循环测试分配至低负载通道，避免影响短期任务。测试策略优化在保障精度的前提下简化流程，批量生产的消费电子电池采用“抽样全面测试+其余关键参数测试”模式；动力电池根据实际工况调整充放电参数，模拟真实使用场景，减少不必要的极端测试。自适应测试技术可依据电池实时数据调整参数，如容量内阻达标后自动缩短循环测试次数，进一步提升效率。

测试策略优化结合电池类型与应用场景差异化设计：消费电子电池采用“抽样全面测试+批量关键参数测试”模式，动力电池依据实际工况调整充放电参数，自适应测试技术可根据实时数据动态调整测试参数，在保障精度的同时缩短测试周期。

4.3 干扰抑制与系统稳定性提升技术

干扰与系统不稳定会导致数据失真、测试重测，间接降低效率，干扰抑制与稳定性提升是重要保障。测试干扰主要包括电磁、信号传输与环境干扰：电磁干扰源于充放电模块的高频辐射，通过屏蔽封装模块与在采集线路增加滤波器抑制；信号传输干扰由线缆损耗等导致，采用高质量屏蔽线缆与差分传输方式抵消共模干扰；环境干扰通过恒温恒湿箱与减震装置控制温湿度、减少振动影响。系统稳定性从软硬件提升：硬件选用优质元器件、优化电路设计；软件引入故障诊断与容错技术，轻微故障时自动切换备用模块或调整参数，确保测试持续进行，避免中断导致的效率损失。

信号传输干扰通过屏蔽线缆与差分传输技术抑制，环境干扰借助恒温恒湿箱与减震装置控制；系统稳定性从软硬件双提升：硬件选用优质元器件优化电路，软件引入故障诊断与容错技术，确保测试持续进行，避免中断导致的效率损失。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文围绕锂离子电池自动测试系统设计与效率提升展开研究，得出以下结论：其一，系统构建需以控制、电化学测量、数据处理理论为基础，采用“三层架构”实现各层级协同，保障整体性与可扩展性。其二，硬件设计需注重充放电模块控制

精度与数据采集模块采集精度，通过标准化接口与合理布局减少干扰；软件采用模块化设计，集成任务管理、充放电控制等功能，支撑自动化流程。其三，测试效率可通过多路径提升：流程优化与并行测试缩短周期，智能调度提升资源利用率，测试策略优化简化流程，干扰抑制与稳定性保障减少重测。其四，实际应用中，系统测试效率提升 87%，数据偏差率降至 0.5%，降低人力成本与故障率，验证了设计可行性与实用性。

综合来看，多路径效率提升技术与系统稳定性保障措施协同作用，使自动测试系统在实际应用中展现出显著优势，验证了系统设计的科学性与实用性，为锂离子电池测试领域提供了高效解决方案。

5.2 研究展望

尽管系统在效率与精度上成效显著，但随电池技术发展仍有优化空间。未来可从四方面推进：一是引入 AI 算法，通过机器学习建立电池性能预测模型，实现寿命与故障预警，同时依据电池性能差异自动调整测试策略；二是拓展测试范围与兼容性，研发新型电池测试模块，通过模块化设计适配固态电池等新型电池；三是构建云端测试数据平台，实现多设备数据共享与远程监控，借助大数据分析为研发与工艺优化提供支撑；四是提升系统能源效率，优化充放电算法与硬件电路，减少能源损耗，实现绿色节能运行，契合能源转型趋势。

参考文献：

- [1] 刘永臣,巨永锋,张嘉洋,等.电池管理系统全自动测试软件设计[J].化工自动化及仪表,2021,48(3):268-271,305.
- [2] 姜志鹏,阎浩,陈正宇,等.基于 LabVIEW 的锂离子电池自动测试系统[J].电源技术,2015,39(12):2598-2601.
- [3] 陈丁鸿.多类型数据驱动的锂离子电池寿命预测方法研究[D].北京:北京交通大学,2024.
- [4] 杨忠义.车用锂离子动力电池荷电状态与健康状态联合估计方法研究[D].广西科技大学,2024.