



TÜVRheinland®

Precisely Right.

由华为数字能源与德国莱茵TÜV联合发布

储能系统全生命周期高精度SOC算法 白皮书



前言

随着全球能源结构向清洁化、低碳化转型，储能技术作为支撑可再生能源大规模消纳和电力系统灵活调节的关键环节，呈现快速增长态势。储能系统在电力市场交易、光储 PPA、电网构网服务等领域展现出显著应用价值。荷电状态（State of Charge, SOC）作为储能系统核心状态参数，其估算精度与一致性直接关系到系统运行效率、安全性与经济性。研究表明，SOC 估算误差每降低 1%，储能系统在不同场景下的可用容量可提升约 1~2%，充分彰显了高精度 SOC 算法的战略价值。

当前，储能商业化模式正从单一应用向多场景协同演进，涵盖能量时移、容量租赁、虚拟电厂等模式，对 SOC 的估算精度、可靠性及一致性提出了更高要求。然而，传统 SOC 算法受限于磷酸铁锂（ LiFePO_4 ）电池非线性特性、工况复杂性及老化等因素，难以满足新型电力市场在快速动态响应工况下通过高精度 SOC 控制实现收益最大化的需求。尤其在参与电力现货市场或辅助服务时，SOC 误差可能导致充放电策略失效，引发考核罚款，降低用户经济收益。

为提升行业对储能系统 SOC 高精度管理重要性与必要性的认知，华为与 TÜV 莱茵联合发布《储能系统全生命周期高精度 SOC 算法白皮书》。本白皮书系统阐述高精度 SOC 算法的价值特性，涵盖电网侧储能电力交易场景、构网型（Grid-Forming）服务场景及常规峰谷套利场景，深入分析各场景下的技术挑战与发展现状，并前瞻性地提出创新算法技术方向，供行业参考。



目 录

01

高精度 SOC 预测 / 均衡技术的重要性	01
1.1 高精度 SOC 提升主流商业场景经济收益	01
• 1.1.1 电网侧储能电力交易场景	01
• 1.1.2 电网侧储能构网型服务场景	02
• 1.1.3 风光储 PPA/ 电力交易场景	03
1.2 高精度 SOC 提升系统性能与稳定性	04
• 1.2.1 构网 / 微网储能系统稳定性	04
• 1.2.2 储能系统性能提升	05
1.3 自动 SOC 均衡降低运维成本	05
• 1.3.1 SOC 自动校准	05
• 1.3.2 多级自动均衡	05
1.4 行业现状与标准制定的必要性	06

02

高精度 SOC 算法设计的挑战	08
2.1 磷酸铁锂电池的非线性电化学特性	08
2.2 多变的储能运行工况	10
2.3 传感器采样噪声的干扰	11

03

华为储能 SOC 高精度算法的设计方案	12
3.1 架构与设计理念	12
• 3.1.1 丰富的场景工况数据基础平台	12
• 3.1.2 软硬件算法结合设计	13
• 3.1.3 多环境分层分级测试	14
3.2 创新突破	15
• 3.2.1 SOC 校准	15
• 3.2.2 SOC 均衡	17
• 3.2.2.1 一包一优化	17
• 3.2.2.2 一簇一管理	18
• 3.2.3 SOX 自动校准策略	18

04

展望与总结	19
4.1 展望下一代技术	19
• 4.1.1 膨胀力传感器	19
• 4.1.2 端 - 边 - 云协同架构	19
4.2 总结	20

01 高精度 SOC 预测 / 均衡技术的重要性

高精度 SOC 预测与均衡技术是储能系统实现安全、高效、智能化运行的核心技术，直接决定系统经济收益与长期可靠性。在电力市场化改革背景下，高精度 SOC 已成为支撑多场景商业模式的底层技术基石。

1.1 高精度 SOC 提升主流商业场景经济收益

1.1.1 电网侧储能电力交易场景

在电力市场交易中，SOC 估算误差直接影响储能调度决策、交易结果及收益潜力：SOC 高估可能导致超卖电力并触发考核罚款；SOC 低估则造成可用容量闲置、导致收入损失。为规避风险，运营商通常设置较大安全裕度，但会直接削减可用容量与交易收入。[引自 ACCURE. 《2025 Energy Storage System Health & Performance Report》]

表 1：SOC 误差风险逻辑示意

常见场景现象	交易动作影响	系统收益影响
SOC 值被高估	运营商认为还有更多能量 / 功率可卖	无法提供足够的能量，履约失败可能导致罚款甚至被市场拉黑
SOC 值被低估	运营商认为可用电量不足	可用容量闲置，收入损失
SOC 值误差长期存在	调度系统不敢激进交易，运营策略偏保守或错误	投标决策过程中，错误估计 SOC 可能导致调度过于保守影响最终收益

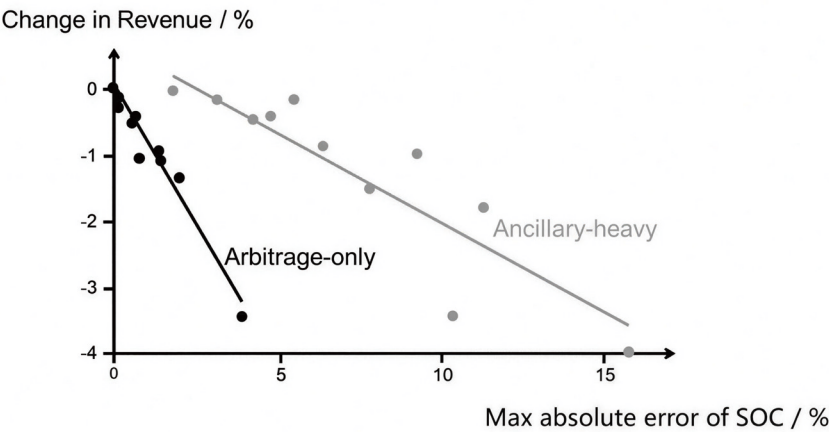


图 1：SOC 误差大小对不同运营策略收益的影响

SOC 估算精度对电池储能系统（BESS）的运行性能与经济效益具有显著影响，且影响程度因运行策略而异。在套利导向型应用中，SOC 估算误差每增加 1%，收入减少约 0.82%；在辅助服务导向型运行中，该比例为 0.20%。与此同时，SOC 估算误差每增加 1%，有效可用能量容量预计减少 1.2%，直接影响收入潜力与资本效率。[引自 Powin & Tierra Climate. The Economic Value of SOC Accuracy: Quantifying Revenue Impacts of State-of-Charge Estimation in LFP Battery Systems. Whitepaper, March 2025]

不准确的 SOC 估算可能导致电池达到其物理边界，即充满或放空，从而无法再遵循日前市场和日内市场中承诺的调度计划。受影响的电量将按照实时不平衡价格（如德国称为 reBAP）进行结算，而该价格在承诺时是未知的，也无法可靠预测或对冲。这种风险本身是不利的，且在价格波动剧烈时风险最大，尽管结果并不总是亏损。

平衡市场（如 FCR 和 aFRR）中，电池需按承诺提供备用容量。若调度优化器设置的缓冲区间过窄，SOC 估算偏差可能导致在需要释放备用电力时，电池无法响应。除承受现货市场的不平衡成本外，持续的备用容量交付失败还将面临罚款处罚，严重时甚至丧失市场准入资质。

1.1.2 电网侧储能构网型服务场景

在构网型（Grid-Forming, GFM）储能场景下，SOC/SOE 精度的重要性高于普通跟网型（Grid-Following, GFL）储能。GFM 储能需主动建立电压与频率，并在频率扰动、孤网运行、黑启动（Black Start）及弱电网支撑中持续提供快速功率响应。因此，SOC 误差不仅影响电力市场交易收益，还影响构网备用容量、可持续支撑时间与系统稳定性。假设 GFM 储能项目 SOC 精度从 $\pm 5\%$ 提升至 $\pm 2.5\%$ ：

表 2：构网型储能 SOC 上下限裕量示意

项目	SOC 精度 $\pm 5\%$	SOC 精度 $\pm 2.5\%$
额定容量	100 MWh	100 MWh
单侧 SOC 不确定性	5 MWh	2.5 MWh
单侧安全裕度减少	—	2.5 MWh
双侧可用窗口提升	—	5 MWh

SOC 精度从 $\pm 5\%$ 提升至 $\pm 2.5\%$ 后，100 MWh 储能场站理论上可最多可多释放约 5 MWh 可调度容量。

以多释放的 5 MWh 容量计算，不同年循环次数下收益如下：

表 3：构网型储能可用容量释放收益示意

年等效循环次数	净收益 0.3 元 /kWh	净收益 0.5 元 /kWh	净收益 0.8 元 /kWh
250 次 / 年	37.5 万元 / 年	62.5 万元 / 年	100 万元 / 年
300 次 / 年	45 万元 / 年	75 万元 / 年	120 万元 / 年
330 次 / 年	49.5 万元 / 年	82.5 万元 / 年	132 万元 / 年

SOC 精度提升虽未增加电池物理容量，但可减少保守裕度，将更多容量转化为“可调度容量”。对于 100 MWh 场站，相当于多获得 5 MWh 可用储能容量。按储能系统投资成本初步估算（800~1,200 元 /kWh），5 MWh 对应的等效容量投资价值为：5,000 kWh × 800 = 400 万元。即 SOC 精度提升带来的可用容量释放，等效于减少约 400 万 ~600 万元的容量冗余投资。

1.1.3 风光储 PPA/ 电力交易场景

风光储购电协议（Power Purchase Agreement, PPA）储能系统主要用于平滑光伏发电波动、实现能量时移（如将正午多余光电存至夜间使用），将波动性光伏转化为可稳定供给的“绿电”，实现用户用电成本下降。储能每日定期充放电，平衡发电与负荷，SOC 充放电精度影响充放电时长，充放电量不足可能面临考核罚款。以 100 MWh 储能电站为例，SOC 算法优化 1%，年均套利容量可增加 360 MWh（按每天一充一放计算）。



1.2 高精度 SOC 提升系统性能与稳定性

高精度 SOC 不仅是经济收益的基础，更是保障储能系统安全稳定运行的关键技术。SOC 误差与不一致性可能导致系统效率降低、充放电容量不足，同时影响电网动态响应能力。尤其在构网型（Grid-Forming）储能及长周期储能系统中，SOC 估算精度直接决定系统可靠性与电网兼容性。

1.2.1 构网 / 微网储能系统稳定性

构网型储能稳定性依赖快速功率控制，而快速控制必须建立在准确的 SOC 边界之上。SOC 估算越精确，构网型储能越能稳定、连续、可靠地承担电网支撑任务。

高精度 SOC 能力	对 GFM 稳定性的提升
准确判断可用能量	提高频率支撑与孤网支撑可靠性
准确判断充放电裕度	保持上下调节能力，避免饱和，提升黑启动、孤网运行及备用能力
支持 SOC 高低点识别	使控制参数更稳健，防止微网系统失稳，避免支撑过程中突然限功率或跳闸
宽 SOC 范围构网	降低保守裕度，在保证稳定的同时最大化释放可用容量

在构网型（GFM）储能系统中，高精度 SOC 是安全保护的关键前置条件。GFM 储能需主动建立电压与频率，并在频率扰动、孤网运行、黑启动及弱电网支撑中持续提供快速功率响应，SOC 误差直接影响充放电控制边界保护、限功率及构网退出风险。

安全保护目标	SOC 精度不足的风险	高精度 SOC 的作用
放电控制边界保护	低 SOC 下继续放电，触发欠压保护	提前降额，保留关键支撑能力
充电控制边界保护	高 SOC 下继续充电，触发过压保护	提前降额，限制充电功率
频率支撑保护	低频时无法持续输出	准确判断可持续放电时间
高频吸收保护	无法继续吸收多余功率	准确判断可持续充电时间
黑启动保护	启动过程中能量不足	准确判断启动条件
孤网保护	离网备电量不足，错误判断支撑时间	提前动态切负荷或启动备用资源（如柴油发电机）

1.2.2 储能系统性能提升

部分电池在不同 SOC 区间可能存在不同的使用边界，达到使用边界需降额运行，否则可能导致电池超规格使用，影响性能甚至加速老化。高精度 SOC 可保障电池单体在合理规格范围内运行，减少需预留的安全裕量，整体提升系统可用容量并延长电池寿命。

此外，在串联架构储能系统中出现不一致性时，因“短板效应”，系统可能提前因短板电池单体触发充放电末端截止。在并联电池簇中，SOC 不一致引发电流不均衡，降低系统效率。多层级的 SOC 均衡可有效减少电池包（Battery Pack）间、电池簇（Battery Rack）间容量差异，最大化提升系统可用度。

1.3 自动 SOC 均衡降低运维成本

随着储能系统规模扩大与部署场景复杂化，传统人工运维模式面临严峻挑战。SOC 自动校准结合自动均衡技术可显著降低全生命周期运维成本。据行业调研数据，采用自动化 SOC 管理的储能系统可减少约 30%~50% 运维人力投入，同时提升系统年度可用率 6% 以上。

1.3.1 SOC 自动校准

长期未执行校准将导致 SOC 积分漂移，影响估算精度，进而影响储能充放电量与收益。在部分非深度充放电工况下，传统 SOC/SOH 校准通常依赖人工或半人工方式，如定期执行满充满放与容量校准测试。上述操作带来以下成本：

成本类型	具体说明
人工成本	运维人员现场操作、数据分析、测试记录
停机成本	校准期间储能系统无法正常参与电力交易或提供辅助服务
调度成本	需临时调整交易计划与可用容量申报

华为通过使能自动校准功能，自动识别运行工况，无需停机、无需人工上站、无需用户参与，在电池子阵运行过程中实现针对电池簇的 SOC、SOH 校准，保持系统长期高精度运行，减少人工运维投入。

1.3.2 多级自动均衡

自动均衡是提升储能系统可用容量、安全性与运维效率的关键手段。储能中电池包（Pack）间不一致性将直接降低可用能量容量与收益潜力；超过 10% 的 Pack 间不一致性则需采取纠正措施，以恢复容量与收益并降低加速退化风险。

储能系统每年因自放电差异产生约 5%~6% 的 SOC 差异，通常需专业工程师上站运维，通过外接充放电设备补电，涉及反复拆装电池或线缆，且充放电设备工作温度范围窄、电流小、耗时长。



图 2：传统人工 SOC 均衡痛点

华为具备“一包一优化、一簇一管理”能力，同时也支持电池单体间被动均衡。可在运行过程中消除各级 SOC 差异，无需每年定期进行人工均衡运维，包括更换电池包场景亦可通过包级优化快速恢复一致性至最优状态，最大化系统可用容量。

1.4 行业现状与标准制定的必要性

当前 SOC 特性在行业中仅有 GB/T 34131 等少数标准，该类标准针对 SOC 精度与均衡能力的测试工况相对简单，无法充分反映 SOC 在各类严苛场景下的真实性能。传统储能产品宣称的 SOC 精度能力缺乏有效验证手段，其他标准中通常仅给出范围性要求或“满足设计要求”等笼统表述。

表 4：SOC 特性能力量化分级

分级	能力	核心价值
Level 0（基础级）	基础能力（单级变换）	与电芯厂家合作实现 SOC 精度，不具备核心差异化竞争力，无法满足国内外高端储能项目需求，正逐步被淘汰
Level 1（增强级）	差异化能力（单级变换）	拓展了部分充放电场景，优化了部分场景的热管理设计，具备一定的 SOC 精度，但无法满足全场景安全需求，部分客户需承担额外风险
Level 2（进阶级）	差异化能力（双级变换）	满足全场景充放电及构网型场景需求，实现真正产品化，能够支撑客户实现全场景价值，具备较强竞争优势与较高利润率，同时帮助客户规避潜在风险

鉴于 SOC 已成为构网型储能的关键竞争力指标，而其测量方法缺乏统一标准，华为与国际权威第三方认证机构 TÜV 莱茵合作，对构网型储能 SOC 特性开展第三方认证。认证内容划分为精度、校准、均衡、构网四大板块，以支撑达成“精度可靠、误差可控、整站多级均衡、稳定构网”的要求。

表 5：SOC 能力等级划分——具体指标

分级	Lv1（人工校准辅助）	Lv2（受条件约束自动校准）	Lv3（高精度自动校准）
总体特点	SOC 仅作为参考；仅满足行业标准；支持深度充放电工况	SOC 可用于调度；客户需留足裕量；支持深度充放电工况；部分支持浅充浅放工况	SOC 所见即所得；支持深度充放电工况与浅充浅放工况
SOC 精度（误差）	5%	3%	2.5%
SOC 校准区间	0-15% 及 95-100% SOC 具备高精度校准收敛能力；15%~95% SOC 仅具备低精度校准收敛能力	0-15% 及 95-100% SOC 具备高精度校准收敛能力；15%~95% SOC 具备中等精度校准收敛能力	0-15% 及 95-100% SOC 具备高精度校准收敛能力；15%~95% SOC 具备高精度校准收敛能力
误差收敛后 SOC 可用容量最差值	≥90%	≥92%	≥95%
构网 SOC 上限（并网 VSG）	≥90% SOC	≥95% SOC	≥98% SOC
构网 SOC 下限（并网 VSG）	≤10% SOC	≤5% SOC	≤2% SOC
构网 SOC 上限（离网 VSG）	≥90% SOC	≥95% SOC	≥98% SOC
构网 SOC 下限（离网 VSG）	≤10% SOC	≤7% SOC	≤5% SOC
系统 SOC 均衡能力	支持电芯级均衡	支持电芯级均衡、一簇一管理	支持电芯级均衡、一包一优化、一簇一管理



02 高精度 SOC 算法设计的挑战

传统 SOC 算法的主要挑战源于磷酸铁锂 (LiFePO_4) 电池的非线性电化学特性、多变运行工况及传感器采样噪声。

2.1 磷酸铁锂电池的非线性电化学特性

磷酸铁锂 (LiFePO_4) 电池具有高安全性、长循环寿命、环境友好性及较低材料成本等优势，已成为电化学储能领域的主流技术路线。然而， LiFePO_4 电池独特的电化学特性为荷电状态 (State of Charge, SOC) 估计带来本质性挑战。

首先， LiFePO_4 电池的电压与 SOC 呈高度非线性映射关系。与三元锂离子电池相比，其开路电压 (Open Circuit Voltage, OCV) -SOC 曲线在 20%~80% 区间呈显著平坦特性，电压变化仅 20~30 mV。该电压平台区 (Voltage Plateau) 致使微小电压测量误差即可引发显著 SOC 估计偏差。

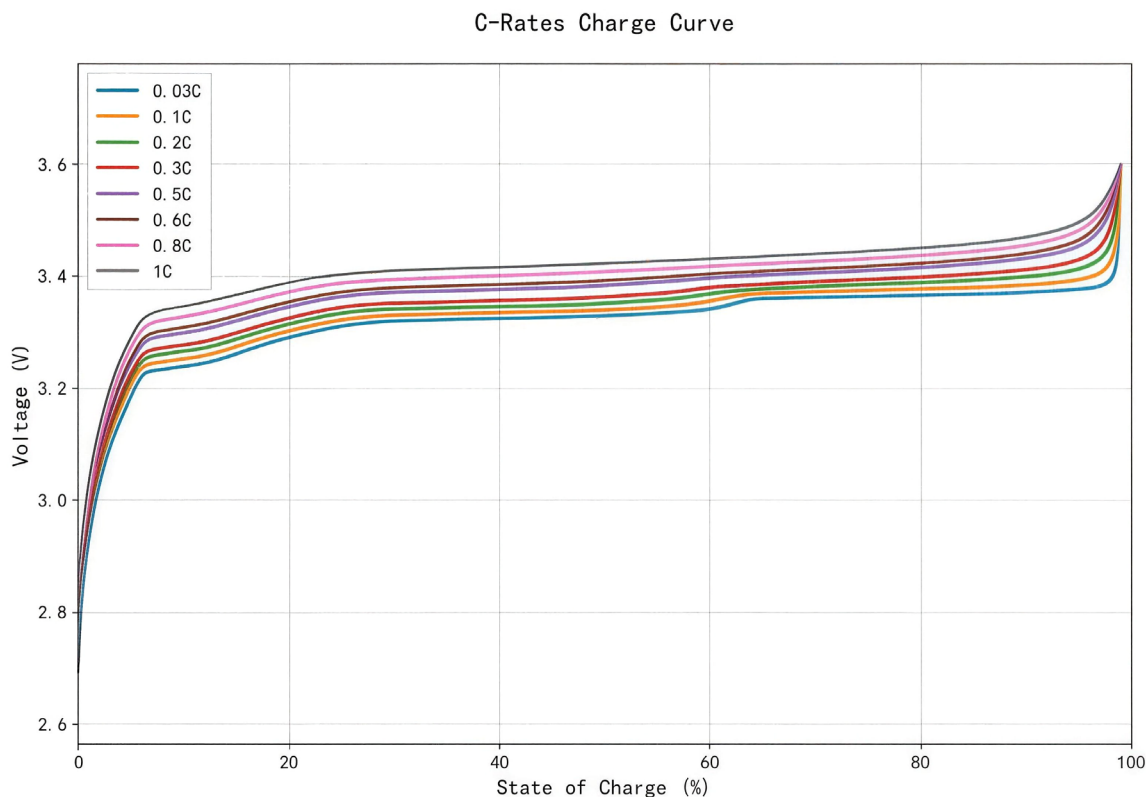


图 3：不同倍率充电电压 -SOC 曲线

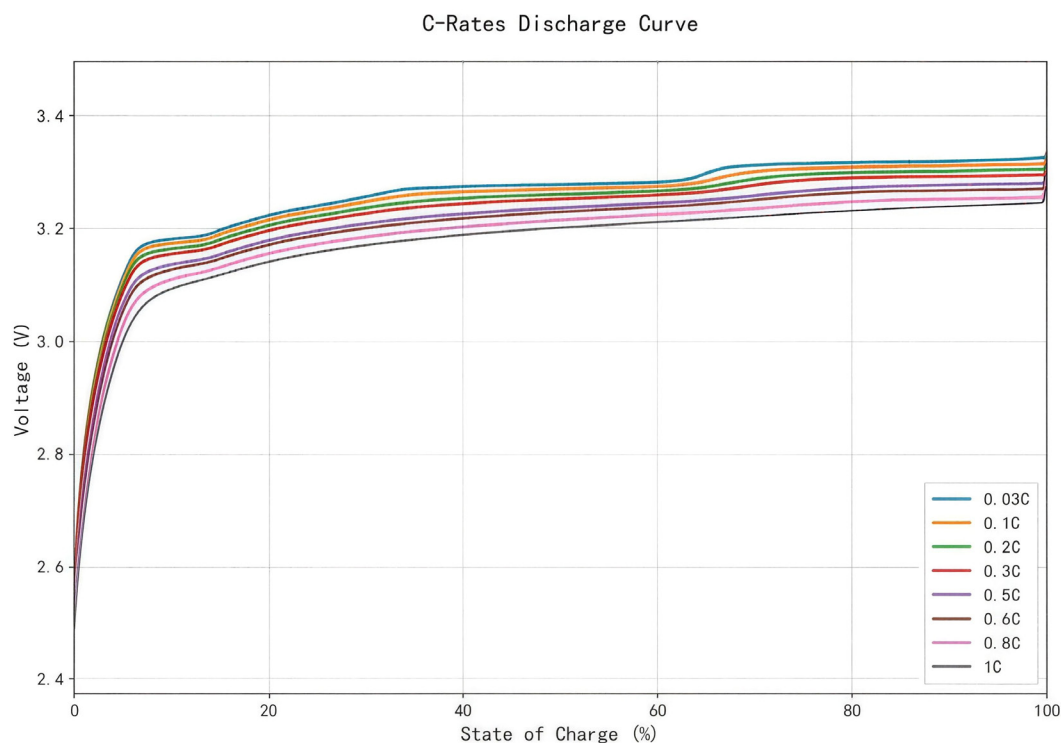


图 4：不同倍率放电电压 -SOC 曲线

其次， LiFePO_4 电池的 OCV 特性呈现显著路径依赖性，即迟滞效应（Hysteresis Effect）。充放电过程的 OCV 曲线存在差异，且迟滞幅度随温度、充放电倍率（C-Rate）及循环老化程度动态变化。这种非线性时变特性导致基于等效电路模型的 SOC 估计方法难以满足精度要求。

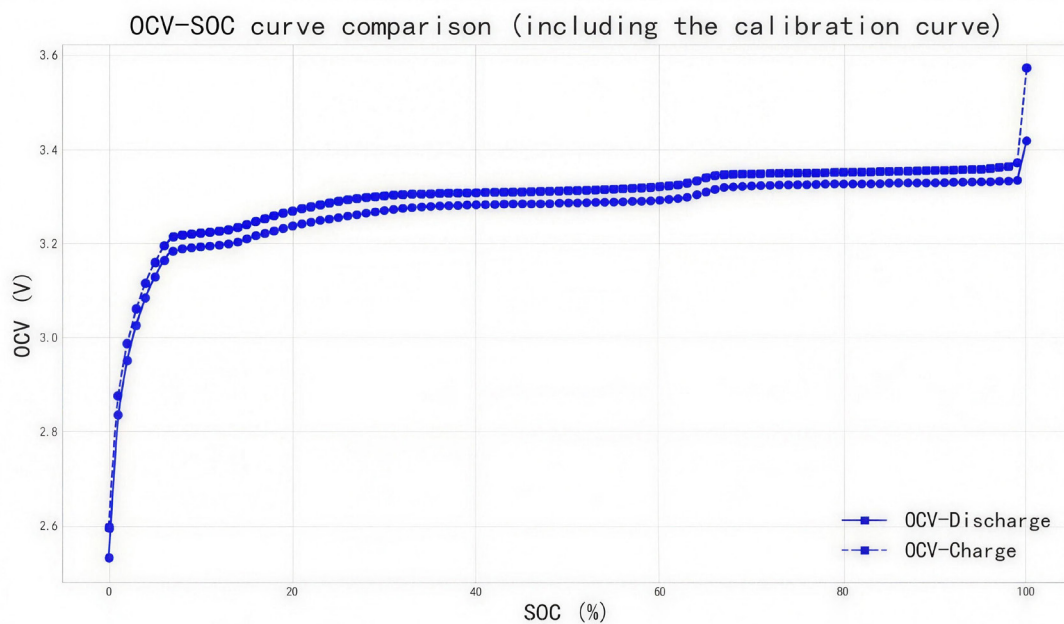


图 5：OCV-SOC 曲线对比

此外， LiFePO_4 电池的极化特性呈现显著非线性。在不同 SOC 区间与温度条件下，欧姆极化、电化学反应极化与浓差极化遵循差异化变化规律，进一步增加 SOC 估计复杂度。因此，构建能够精确描述 LiFePO_4 电池非线性特性的电化学反应模型，并设计鲁棒性强的 SOC 估计算法，是储能电池管理系统（Battery Management System, BMS）领域的关键科学问题。

2.2 多变的储能运行工况

储能系统运行工况较电动汽车更为复杂多样，涵盖电力调频、削峰填谷、新能源消纳及电力市场交易等应用场景。多变运行环境使电池工作状态呈现显著动态时变特性，大幅增加 SOC 估计难度。

部分场景存在充放电倍率剧烈波动。调频场景下，储能系统需在秒级时间尺度进行高频次、小幅度充放电切换，电池极化电压尚未稳定，端电压无法反映真实 OCV，致使基于电压修正的 SOC 算法失效。微网及构网型（Grid-Forming, GFM）场景下，系统长期运行于低倍率或非深度充放电工况：长期低倍率运行加剧安时积分法（Coulomb Counting）的累积误差；长期非满充放电运行则降低电压对 SOC 的区分度，使运行中校准难以实现。

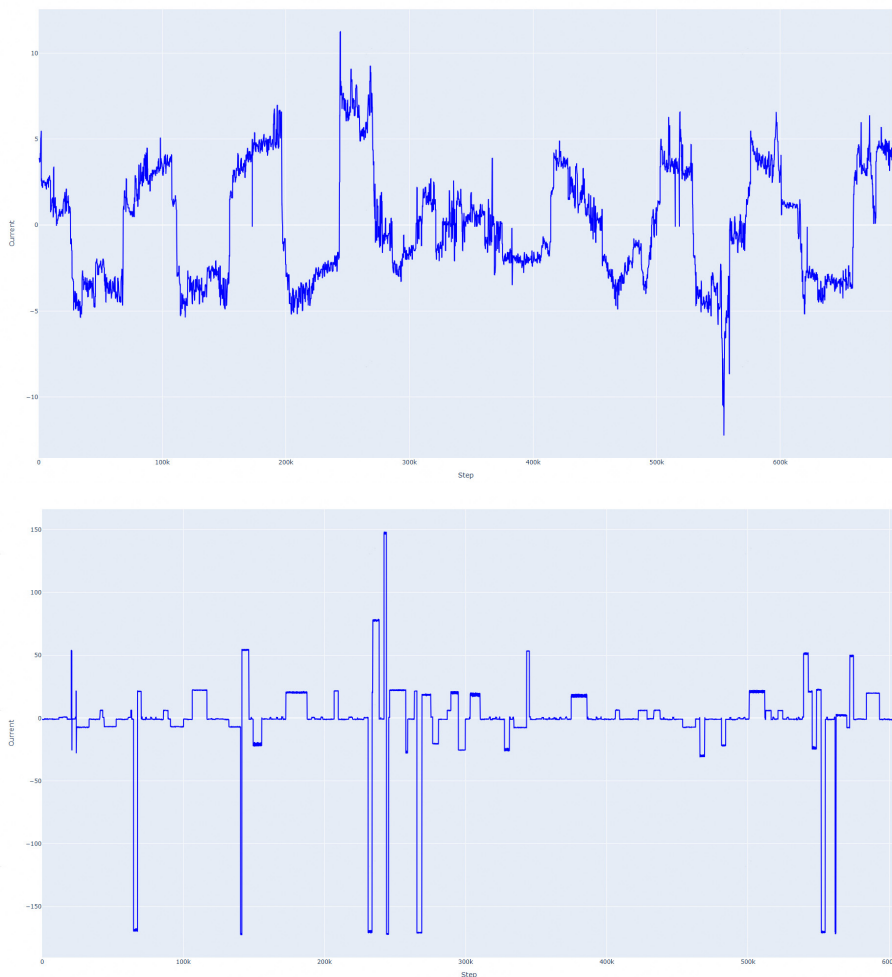


图 6：不同场景储能电流波形

2.3 传感器采样噪声的干扰

电流采样误差引发的累积偏差：安时积分法（Coulomb Counting）为 SOC 估计的基础方法，其精度直接依赖于电流传感器精度。霍尔传感器（Hall Sensor）或分流器（Shunt Resistor）存在零点漂移与增益误差，且受温度影响显著。储能系统长期运行中，即便仅 0.5% 的电流测量偏差，未经高精度校准亦可导致 SOC 累积误差超过 10%。在小电流静置或微充放电工况下，信号幅值接近传感器噪声基底，信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）降低，真实电流与噪声难以区分。

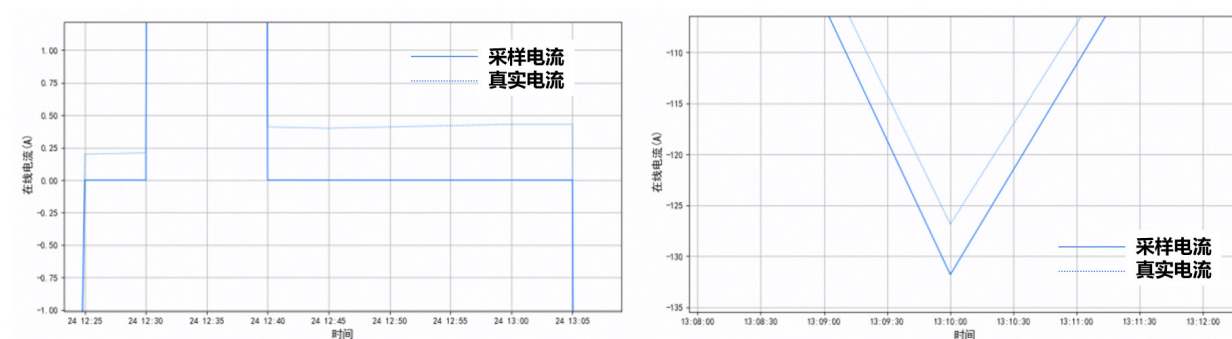


图 7：电流采样误差示意

电压采样量化误差与噪声：LiFePO₄ 电池在电压平台区 OCV 变化极小（SOC 变化 65%，电压仅变化 70 mV）。若 BMS 电压采样精度不足，10 mV 偏差可引入最高 25% SOC 误差，6 mV 偏差可引入最高 15% SOC 误差。加之充放电 OCV 曲线存在滞回现象，端电压易受极化效应影响，LiFePO₄ 电池 OCV 对电流扰动呈高敏感性。

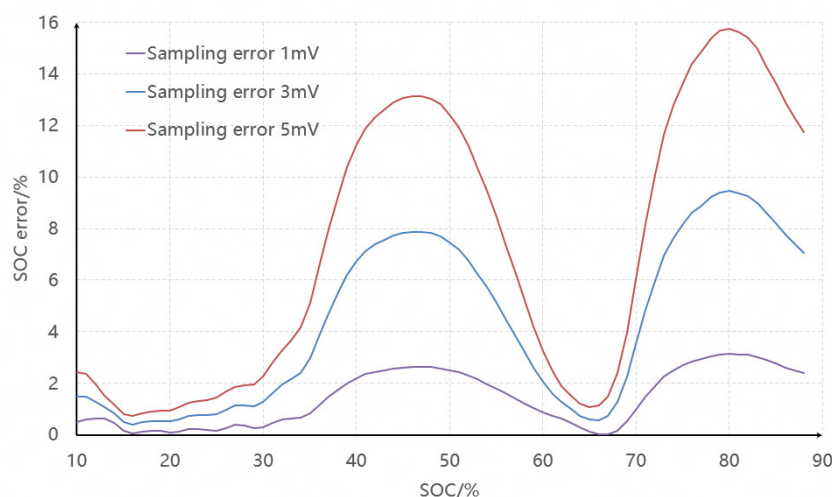


图 8：LFP 电池电压平台区特性

此外，采样数据需具备鲁棒性处理能力。现场工况中不可避免存在传感器瞬时故障、通信丢包及电磁脉冲干扰等问题，采样算法需具备异常值检测与剔除功能。若算法对噪声过于敏感，易受异常值干扰；若滤波强度过高，则导致采样响应滞后，无法跟踪真实功率变化。

03 华为储能 SOC 高精度算法的设计方案

3.1 架构与设计理念

针对前述磷酸铁锂（ LiFePO_4 ）电池非线性特性、多变运行工况及传感器噪声干扰等核心挑战，传统单一维度的 SOC 估算方法已难以满足高精度储能系统的需求。华为基于数字电力技术理念，面向储能铁锂电池特性开展系统性测试研究，构建了高精度 SOC 算法框架；针对多变运行工况，建立了体系化的储能工况库及对应的数字孪生（Digital Twin）平台；针对传感器采样噪声，自主研制了高精度电压、电流采样硬件芯片及主被动均衡硬件。提出以数据基础平台为支撑、软硬件协同、多环境分层分级测试的 SOC 高精度解决方案，涵盖硬件采样、边缘计算、大数据仿真训练及严格验证的系统工程。



3.1.1 丰富的场景工况数据基础平台

SOX 寻优与智能化实验室：数据是训练和研发高精度算法的基础资源。华为构建了面向储能电池管理系统（Battery Management System, BMS）及 SOX 算法的专属实验室，覆盖从电芯、电池包（Battery Pack）至系统环境的完整测试链路，持续开展多类型标定、工况及特性测试，积累了丰富的实际应用场景工况数据；结合数字化能力构建行业领先的电池大数据平台，为 SOC 算法研发与演进提供坚实支撑。

运行全场景数据覆盖：依托专属实验室测试，构建了涵盖电芯标定、特性测试及场景运行的完整工况数据库。已积累覆盖电力交易、微网构网、削峰填谷、备电等多类应用场景的实测数据，包含电池在不同健康状态（State of Health, SOH）阶段、不同倍率下的真实响应特性，用于算法上线前的充分仿真验证。华为配置先进 AI 数据增强系统，能够将工况分层分级分类，配合高精度电化学模型生成特定工况下的数据，保障场景覆盖度达到 100%。

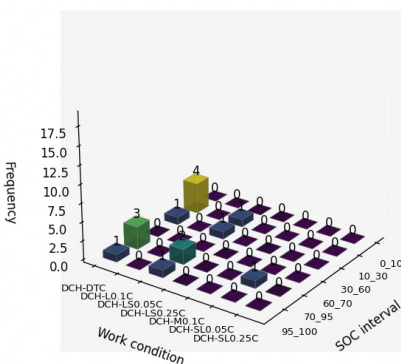


图 9：全场景工况库（示意）

生产大数据全覆盖：华为已构建覆盖电芯制造、模组装配、系统集成全链条的生产大数据体系，实现从原材料入厂、工艺参数监控、关键工序质量检测到最终产品出厂的全过程数据采集与闭环管理。系统实时采集数十万级生产节点的动态数据，涵盖温度、电压、电流、内阻等关键工艺参数，形成高维度、高精度的生产过程画像。基于该生产大数据平台，华为实现了电池产品全生命周期追溯能力，即“出生即有档案”。

3.1.2 软硬件算法结合设计

传统 SOC 算法框架主要包含高精度安时积分，配合充放电末端电压校准修正及静置开路电压（Open Circuit Voltage, OCV）修正。电压、电流及温度采样精度对高精度 SOX 算法具有关键影响。

高精度电压采样 BMIC: 电压采样采用自研高精度电池管理集成电路（Battery Management IC, BMIC）芯片，配合低漂移基准源，实现 $\pm 1\text{ mV}$ 级电压采样精度，有效应对 LiFePO_4 平台区电压变化不敏感的问题。同时配套高精度采样滤波算法，具备异常值剔除能力，提升 SOC 算法的鲁棒性与稳定性，实现高频采样与均衡功能的协同，保障系统运行安全。

高精度电流采样簇控制盒：设计多组高精度基准电源，对基准电源与实际电流采样通道进行校准，通过运算消除采样电路的增益系数与偏置电压，确保高、低温条件下采样精度基本不受电路温漂影响。采样电路输入级采用仪表放大器架构，具备极高的共模抑制比，有效消除共模信号干扰；选用低零漂运算放大器，防止二次放大电路饱和。软件层面配套采样偏置补偿算法，实现电流采样偏置的长期记录与动态补偿。

温度采样 NTC: 温度采样采用负温度系数热敏电阻（Negative Temperature Coefficient, NTC）传感器，通过与 SOC 算法深度协同，可识别并预测充放电过程中的电池温升，实时参与电化学模型状态估计、极化补偿及 OCV-SOC 映射更新，显著提升复杂工况（如极端温差、剧烈充放电切换）下 SOC 估算精度与动态响应能力。

3.1.3 多环境分层分级测试

BMS 数字孪生仿真平台: 构建了 BMS 数字孪生仿真平台，通过调用全场景工况数据库，实现算法的批量快速验证，提升算法迭代效率与质量。平台支持注入误差及各类异常工况，能够显性化评估算法能力，实现版本迭代后性能指标提升的可视化。

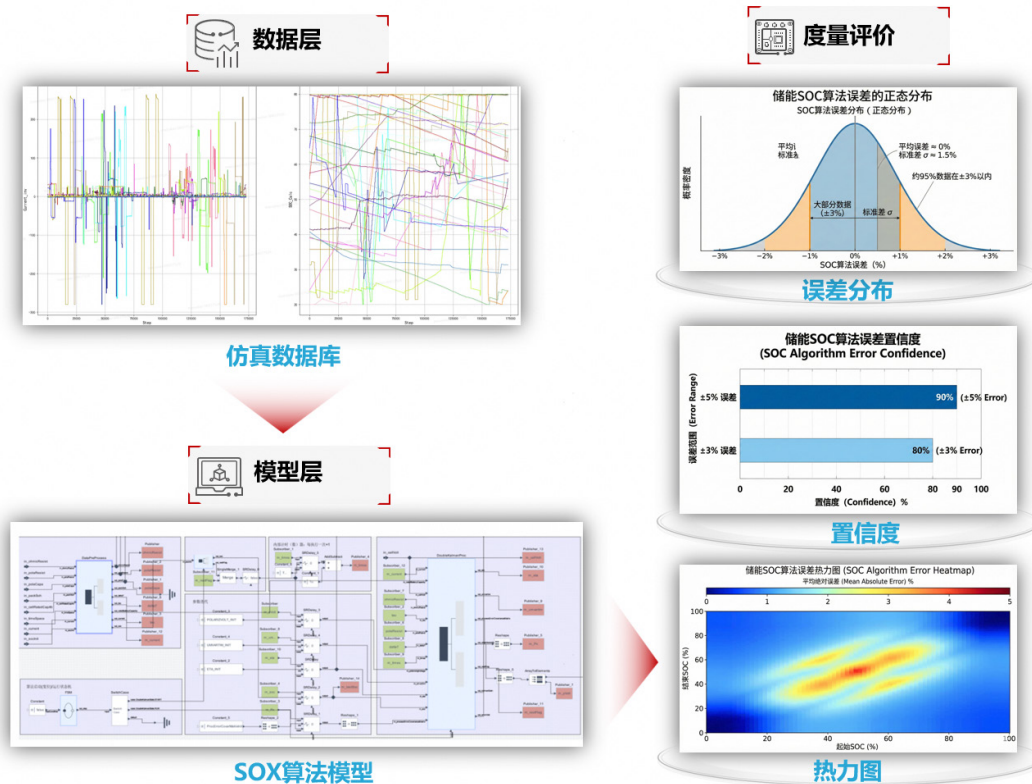


图 10: BMS 数字孪生仿真平台

半实物仿真环境: 华为拥有光储解决方案 GW 级半实物仿真平台，能够在半实物环境中覆盖多类应用场景的测试验证。基于海量场景数据构建的测试用例集，在半实物及实物环境中均开展 SOX、均衡等关键 BMS 算法特性测试验证，保障算法精度与稳定性。

多场景系统算法测试: 华为具备体系化的系统及解决方案验收测试流程与用例，所有测试基于统一的测试管理平台，实现测试用例的版本化管理、执行过程的全程可追溯、结果数据的自动采集与结构化存储。在真实环境中开展 SOX、均衡等关键算法特性测试验证，保障算法精度与稳定性。

3.2 创新突破

TÜV Rheinland 对华为 LUNA2000/LUTERRA2000 系列储能系统进行了基于 2 PF6 3165/12.25 的第三方测试评估。测试覆盖 SOC 精度、SOC 自动校准、容量可用性、频率调节场景、构网型（Grid-Forming, GFM）能力、黑启动（Black Start）能力以及主动 / 被动 / 簇间均衡能力。

测试结果显示：在削峰填谷（深度充放电）场景下，进行了无拉偏和拉偏 15% 的测试，系统最大 SOC 误差收敛后均 $\leq 2.5\%$ 。在多个频率调节（长期浅充浅放工况）场景中，系统经 15% 误差注入后可实现自动校准收敛。此外，系统在 98% SOC 与 2% SOC 边界条件下完成 GFM 构网能力测试，并在 5% SOC 与 98% SOC 条件下完成 70% R/C/L 负载黑启动测试，黑启动时间均小于 10 min。均衡测试结果显示，电池包（PACK）间 10% SOC 差异经两次深度充放电循环后收敛至 1%，电池簇间最大 30% SOC 偏差最终收敛至 1%。



图 11：TÜV Rheinland SOC 特性 LV3 等级证书

上述结果表明：高精度 SOC、自动校准与自动均衡能力可提升储能系统的可用容量、调度可信度、构网稳定性及运维效率，为电网侧储能参与电力市场交易、频率调节、微电网构网及黑启动等高价值应用提供关键技术支撑。

3.2.1 SOC 校准

相比传统 SOC 算法框架，华为构建了独特的 SOX 算法框架，形成以置信度评估模型为核心，多种校准方式协同配合，覆盖多类典型场景的算法策略。

置信度评估模型：华为在传统 SOC 算法框架基础上，基于硬件层同步采样误差识别及充放电电压特征识别，引入置信度评估模型。该模型依据当前工况（电流幅值、温度、静置时长）动态计算状态估计精度及多校准源的可信权重，作为算法的核心骨架，识别适宜的校准触发时机。

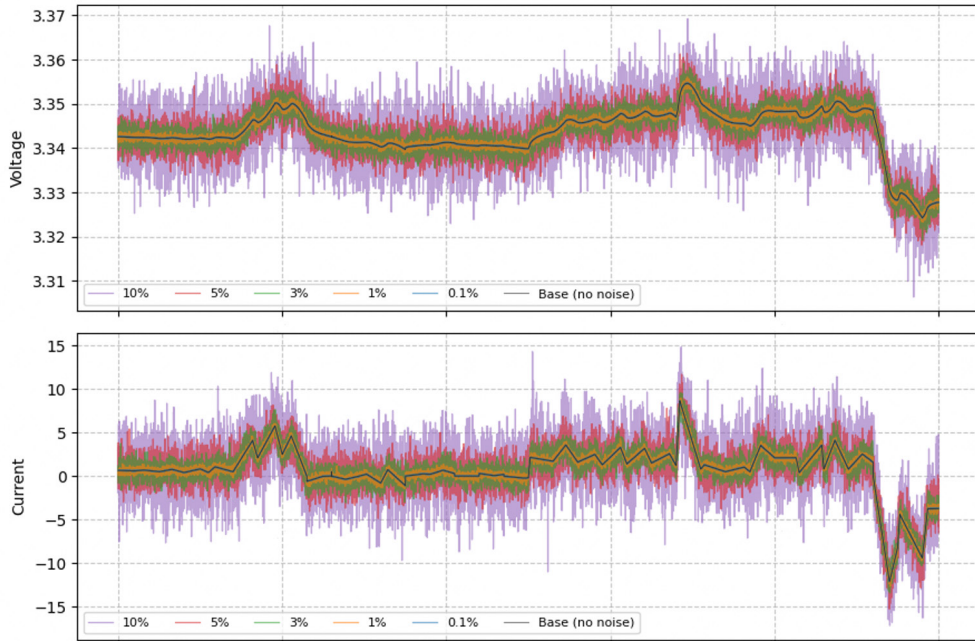


图 12：硬件层采样误差识别

动态极化补偿技术：针对长期平台区循环工况，算法内置多组电池充放电特性曲线，能够实时分离欧姆压降、电化学反应及浓差极化电压分量，在电流恒定变化窗口内捕捉并还原真实 OCV，从而在 LiFePO_4 平坦区实现校准与范围定位。

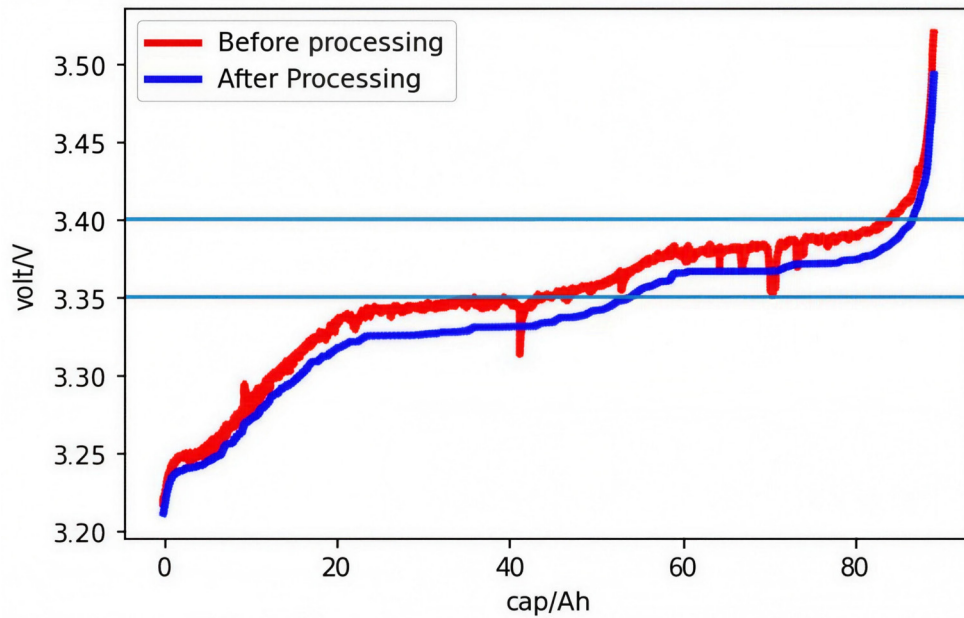


图 13：动态极化补偿技术

AI+ 机理模型融合估算技术：针对调频微循环工况下 LiFePO_4 电池的非线性动态特性，华为采用机理模型与 AI 模型融合建模方法，通过 AI 增强机理模型难以直接描述的物理特性，提升传统电池模型算法的泛化性与稳定性。同时设计后处理

模块，依据不同算法的优势工况进行智能仲裁，并增加滤波后处理环节，即使在电流频繁波动、电压未稳定的条件下，亦可实现 SOC 范围修正，增强算法稳定性。

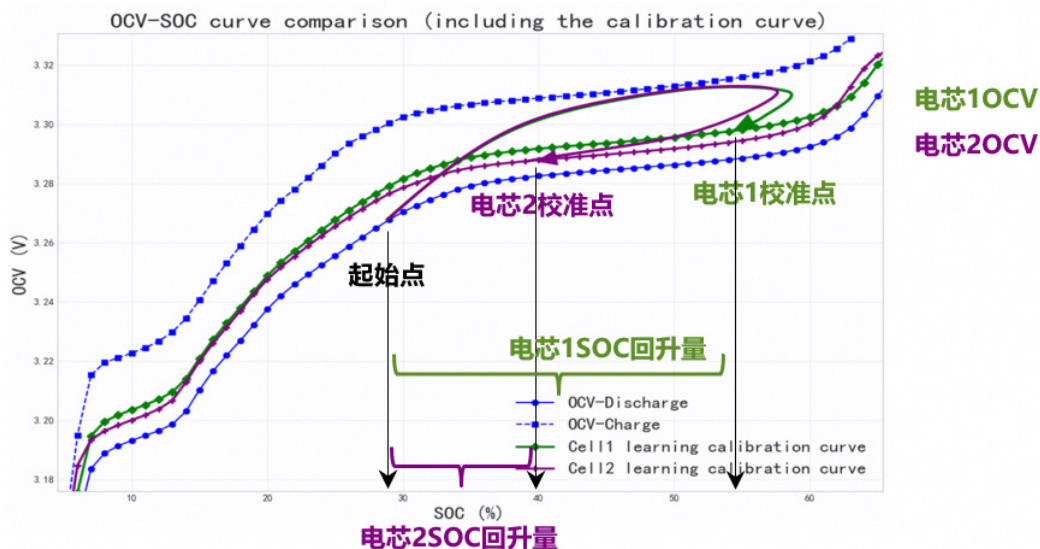


图 14：AI 增强描述电池滞回特性

3.2.2 SOC 均衡

3.2.2.1 一包一优化

在储能系统中，受电池制造工艺差异、使用环境不同及长期运行老化等因素影响，电池组内各电池单体或电池包之间的 SOC 不可避免地出现不一致性。该不一致性将导致系统充放电容量降低、系统效率下降。因此，有效的 SOC 均衡策略对提升储能系统整体性能至关重要。

“一包一优化”（Pack-Level Optimization）是基于电池包独立管理的 SOC 均衡策略，将储能系统中每个电池包视为独立控制单元，分别进行最优化充放电管理。每个电池包配置独立的 DC/DC 变换器，运行过程中高 SOC 电池包向低 SOC 电池包转移能量，实现整体 SOC 均衡，最大化放电深度（Depth of Discharge, DOD），避免因个别电池包限制而影响整体系统容量。



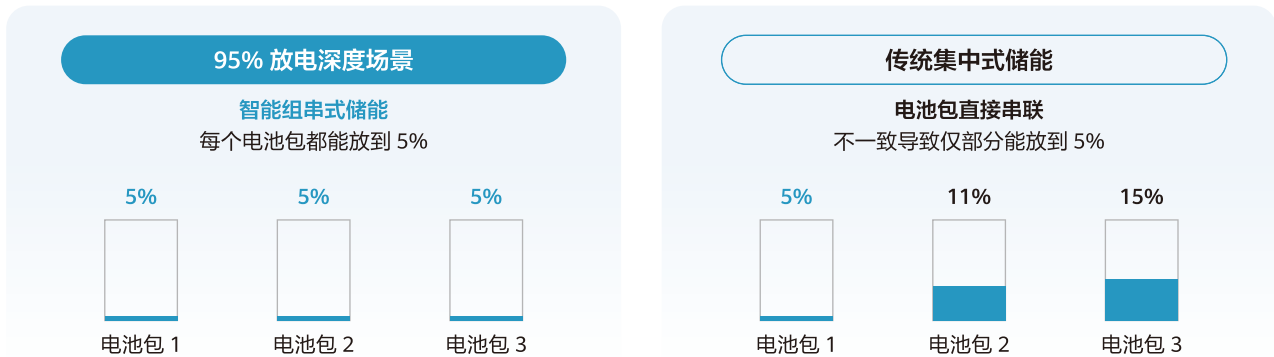


图 15：一包一优化架构示意

3.2.2.2 一簇一管理

“一簇一管理”（Rack-Level Management）是基于电池簇的精细化能量管理策略。该策略将每个电池簇（Battery Rack，通常由多个电池包串联组成）作为独立控制单元，通过智能算法实现各电池簇 SOC 的自主调控，确保每簇电池均在最优 SOC 区间内运行。

簇管理基于各簇 SOC 状态动态调整充放电功率，能够克服传统串联架构的“木桶效应”，提升系统可用容量，避免部分电池簇长期处于极端 SOC 状态。

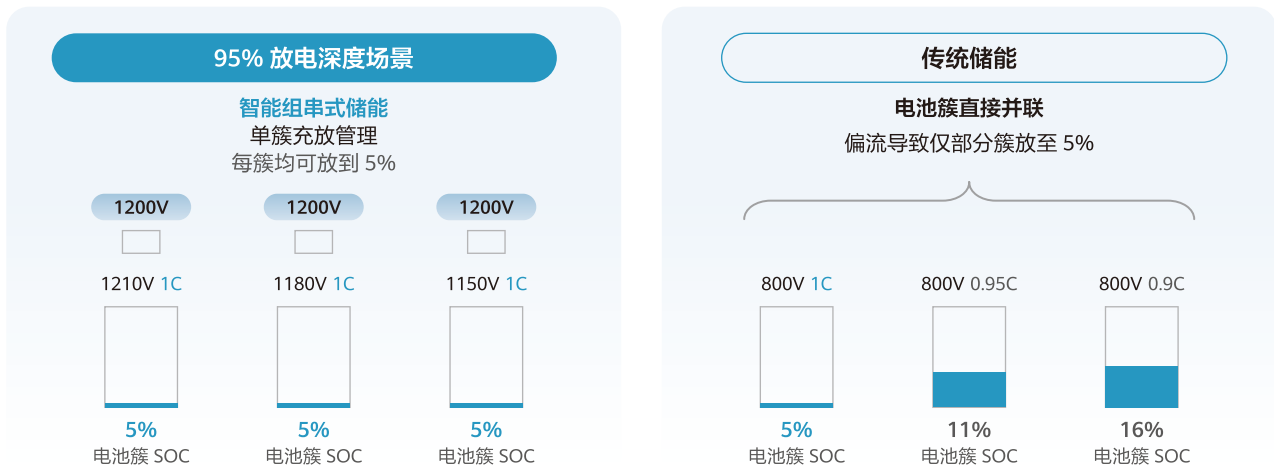


图 16：一簇一管理架构示意

3.2.3 SOX 自动校准策略

随着储能系统运行时间累积，电池状态参数（包括 SOC、SOH 等 SOX 指标）的估算误差逐渐增大。长期未执行校准将导致安时积分漂移，影响 SOC 精度，进而影响储能充放电量及收益。传统固定周期的人工校准方式需额外运维人力投入，且可能影响系统可用性，产生额外的停机成本。

华为通过使能自动校准功能，自动识别运行工况，无需停机、无需人工上站、无需用户参与，在子阵运行过程中实现针对电池簇的 SOC 与 SOH 校准，保持系统长期高精度运行，减少人工运维投入及容量测试校准作业。

04 展望与总结

4.1 展望下一代技术

4.1.1 膨胀力传感器

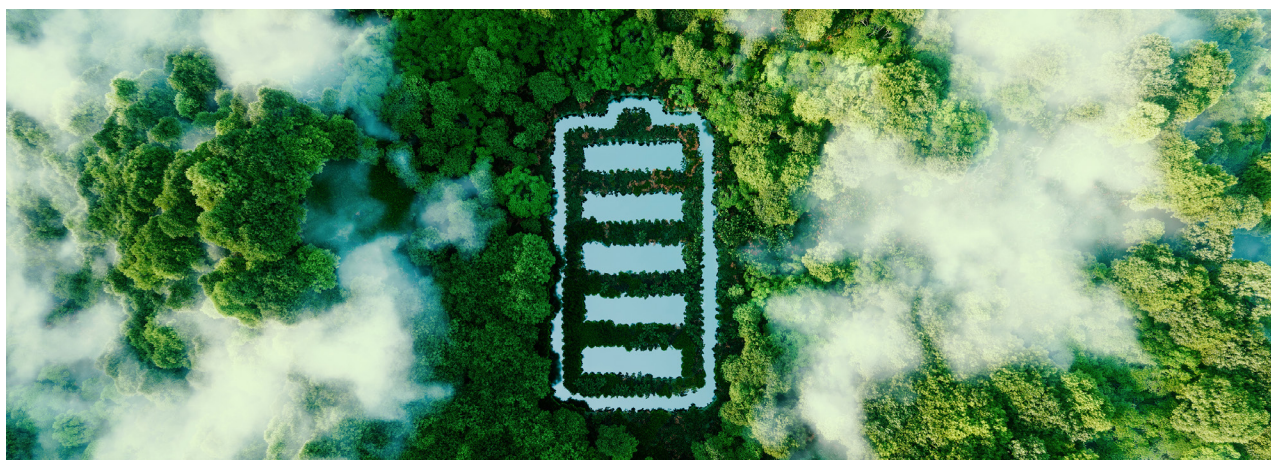
磷酸铁锂电池在平台区电压变化微小，传统 SOC 标定困难。研究表明，电池在不同 SOC 区间因材料相变产生的膨胀力呈现特征性变化，其拐点与充放电容量存在强对应关系，且该特征参数受工作温度、充放电倍率及运行工况影响较小。融合膨胀力传感器（Expansion Force Sensor）信息可实现多物理场协同标定，显著提升平台区 SOC 估算精度，进而提升储能系统全生命周期可放电量及经济收益。



图 17：膨胀力与电压对比曲线

4.1.2 端 - 边 - 云协同架构

端 - 边 - 云协同架构（Edge-Cloud Collaborative Architecture）通过分层计算实现电池状态参数的高精度实时估计：终端设备执行秒级实时 SOC 估算，边缘节点承担多电池组协同分析与 SOH 校准，云端平台负责大数据分析 with 长期趋势预测。该架构有效扩展了算法覆盖范围，显著提升了复杂工况下的状态估计精度与计算效率。



4.2 总结

随着全球能源结构向清洁低碳转型加速，储能系统作为新型电力系统的核心调节资源，其 SOC 精准管理能力在提升系统安全性、可靠性和经济性方面发挥关键作用。构网型储能的持续部署是实现碳达峰、碳中和目标的重要路径，SOC 高精度估算与校准技术则是保障储能系统安全高效运行、释放电站全生命周期价值的技术基石。

当前，SOC 精准管理面临多重挑战：复杂运行工况要求更高的状态估计精度，电池老化与温度漂移需要更智能的在线校准机制，构网型场景下的频率支撑与功率预测对 SOC 实时可靠性提出更高要求。面向上述挑战，华为将持续深化 SOC 精准管理技术创新，从核心算法优化、多物理场融合校准、全生命周期数据闭环及构网型 SOC 调度策略等维度，持续提升 SOC 估算精度，优化可用容量预测，保障极端工况下的状态可靠性，实现从电芯到电站的状态可视、可量化、可调度。

未来，储能 SOC 精准管理将向智能化、高可靠、本质安全方向持续演进。华为愿与行业伙伴协同创新，推动 SOC 管理性能边界不断拓展，为构建更安全、更高效的储能系统提供核心技术支撑，助力绿色能源赋能各行业领域，共同推进能源产业可持续发展。



华为技术有限公司

深圳龙岗区坂田华为基地

电话：+86 755 28780808

邮编：518129

www.huawei.com

商标声明

 **HUAWEI**，**HUAWEI**， 是华为技术有限公司商标或者注册商标，在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其它商标，产品名称，服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

版权所有 © 华为技术有限公司 2026。保留一切权利。

未经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。