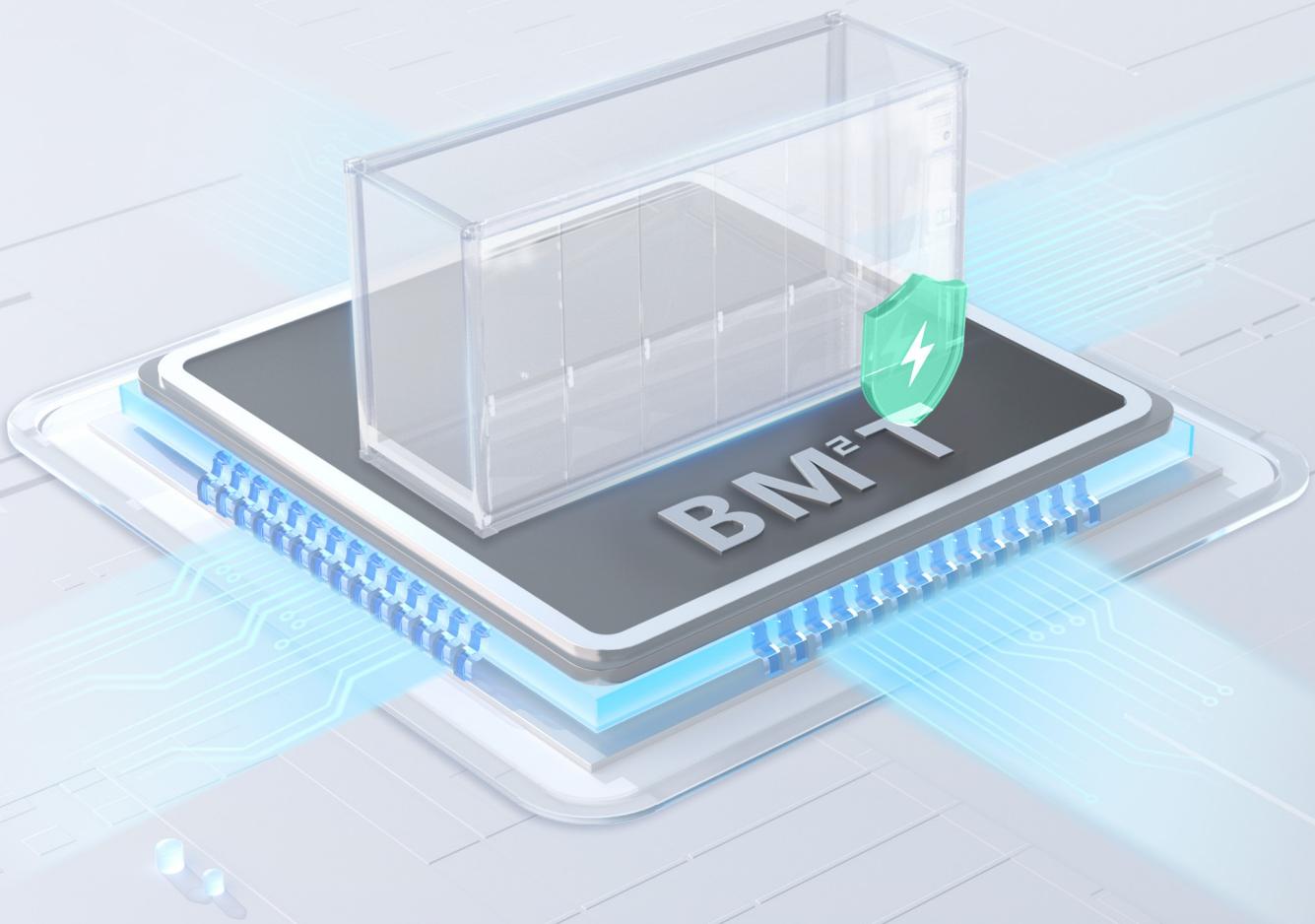


芯安锂得 储变不惊

阳光电源 BM²T 电池管理技术白皮书



前言

PREFACE

全球可再生能源渗透率持续攀升，储能行业迎来高速发展。随着交流侧电网应用场景的多样化、储能系统容量日益增大、以及响应电网的动态要求越来越苛刻，对电池管理技术提出了更高的要求，加速从面向电池的被动监测转为面向系统的主动控制，产品形态上也从独立部件快速转向系统融合，以满足系统长期安全高效运行。

作为全球领先的储能解决方案提供者，阳光电源从全球50GWh+项目实际应用出发，系统性提出基于三电融合的BM²T (Battery Monitoring and Management Tech) 电池管理技术，增强储能系统实际运行中的电池信号可感、状态可知、联动可控能力，保障储能系统“大”时代的安全性、经济性，本白皮书对技术方案及应用进行系统性阐述，供行业参考。



目录

CONTENTS

C1 储能发展对电池管理技术提出新挑战

1.1 大容量、大规模成储能发展趋势	4
1.2 管不住安全的电池管理产品被诟病	4

C2 储能电池管理技术应用乱象

2.1 电池数据不全面与单一维度数据过度投入并存	7
2.2 电池状态估算不准与盲目主动均衡并存	8
2.3 数据孤岛与数据无意义交互并存	9
2.4 故障定位不准与故障告警频发并存	10

C3 阳光电源BM²T电池管理技术方案

3.1 BM ² T技术方案简介	13
3.2 信号有效可感	14
3.3 状态精准可知	16
3.4 系统联动可控	21
3.5 技术特点与价值	24

C4 BM²T技术未来展望

4.1 电池信号可感	27
4.2 电池状态可知	28
4.3 系统联动可控	29

C5 结束语

C1

储能发展对电池管理技术提出新挑战

--



1.1

大容量、大规模储能发展趋势

从市场层面，全球能源结构转型进入加速阶段，高比例可再生能源的接入导致电力系统对储能发展需求急剧增加。据彭博新能源财经最新数据显示，自2020年以来，全球储能装机容量显著增长，2024年新增装机量达168.7GWh，预计2035年新增装机量达964.8GWh。

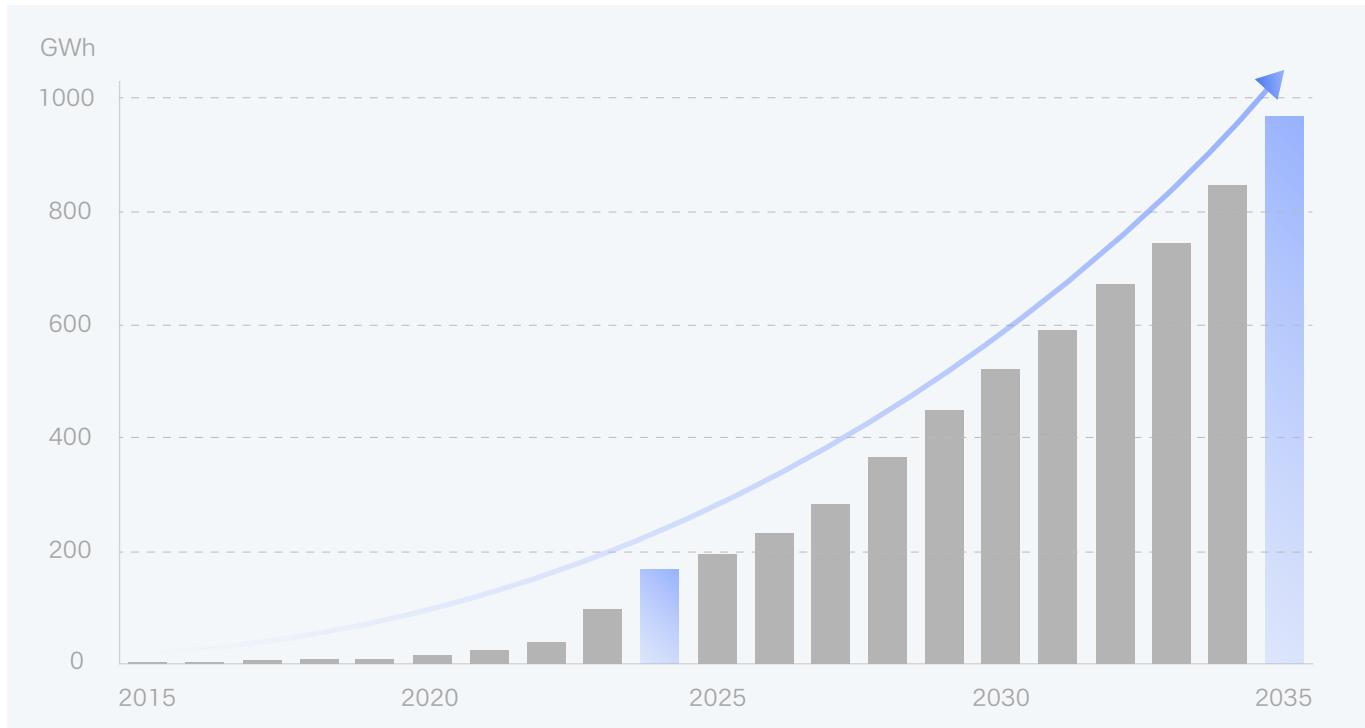


图1：BNEF-全球储能年新增装机数据

从产品层面，储能电池单体容量、单柜体容量和单一电站的规模均不断扩大。2021年，电池单体容量280Ah+，单柜体容量多小于3MWh，单一电站规模多为百MWh级。2024年，电池单体容量超600Ah+，单柜体容量超5MWh+，单一电站规模突破到GWh级。

1.2

管不住安全的电池管理产品被诟病

储能系统内电池数量及系统信息数据大幅增加，因电池管理不精准或滞后导致的系统停运和安全事故成为行业痛点。

• 非计划停运

中电联2022年-2024上半年发布的《电化学储能电站安全信息统计数据》指出，电池管理系统是电化学储能电站非计划停运的核心原因，历年平均停运时长为3.65小时、14.5小时、18.86小时。

• 安全事故

据美国电力研究院（EPRI）统计，2018年至2024年，全球共计发生81起储能火灾/爆炸事故，带来巨大资产损失。



2025年2月-美国某储能电站第四次火灾事故



2024年9月-美国某储能电站火灾事故

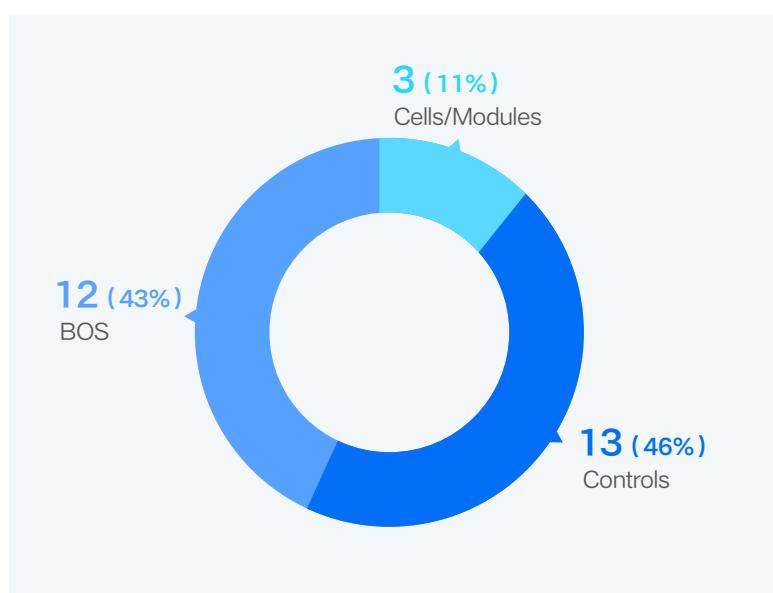


2024年5月-中国某光储能电站火灾事故



2024年4月-德国某储能电站火灾事故

图2：四起储能安全事故案例



2024年，EPRI发布的全球首份储能电站事故根本原因分析报告《电池储能系统故障事件数据库的见解》指出，涉及电池管理等控制问题是储能安全事故的主要诱因，占比高达46%。

图3：EPRI-电池储能系统故障原因统计分类

C2

储能电池管理技术应用乱象



2.1 电池数据不全面与单一维度数据过度投入并存

传统电池管理系统依赖电压(V)、电流(I)和温度(T)监测电池状态，但锂离子电池内部状态复杂且非线性，这些参数难以全面反映电池真实状态。以电池热失控为例，电池内部状态变化如SEI膜分解、电解液副反应加剧、电极材料分解等不易在线观测，而VIT参数变化又相对滞后，导致热失控预警难度大。

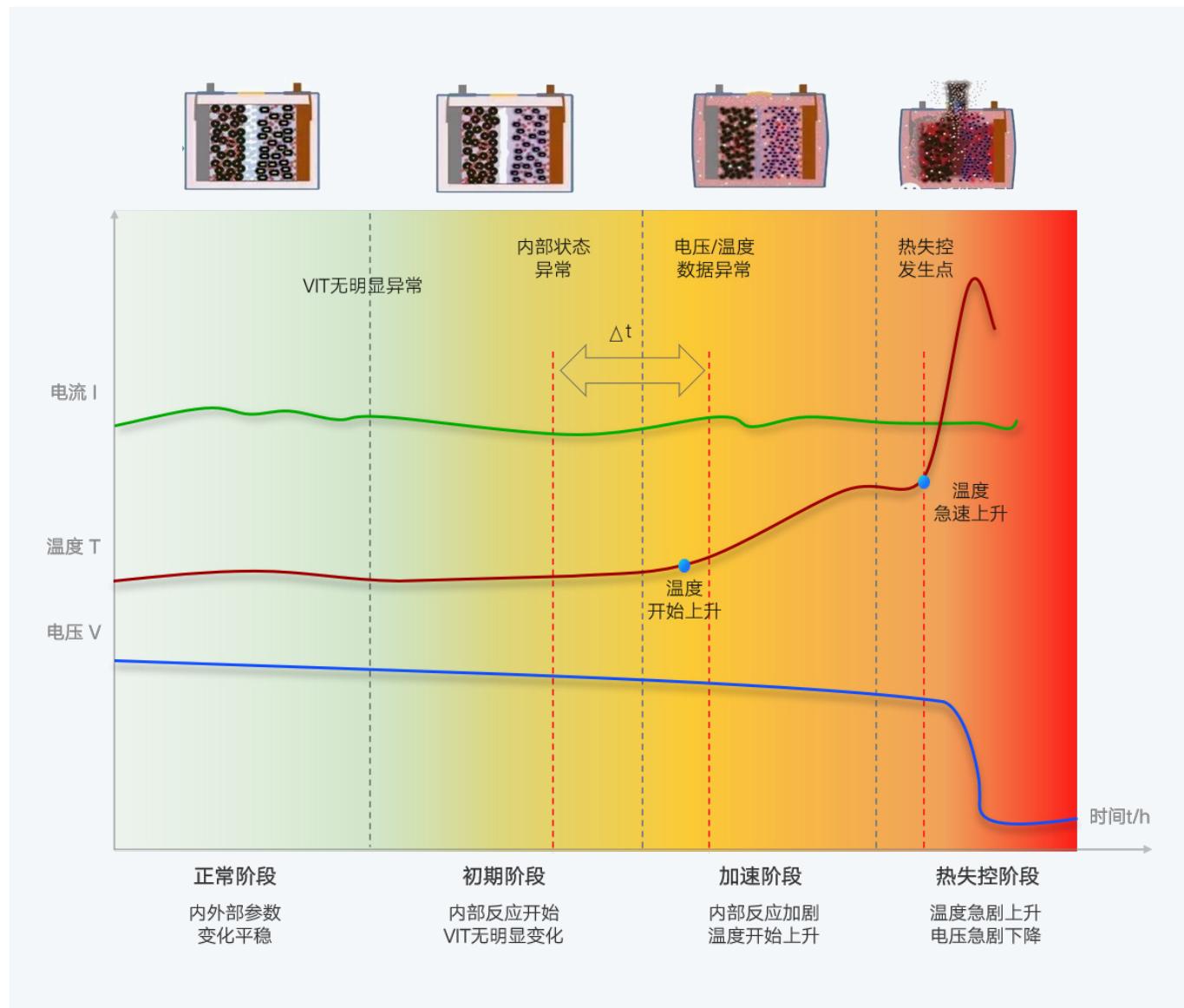


图4：基于VIT的电池单体热失控预警时间滞后明显

为此，业内出现增设单一维度传感器数量的做法，例如电池模块中每一颗电池单体配置一个温度传感器。但从电池模块温度监测的大量实验显示，在正常充放电循环、热失控等异常发生前后，相邻电池单体之间的连接极片温度变化幅度与时间基本一致。通常电池单体过温保护阈值在50~60°C范围内，远低于电池热失控温度，满足工程应用中热管理响应时间要求。因此过度的温感数量投入并不能对电池安全保护有实质性提升，反而器件数量增加、线束增多，会加剧系统的故障率，包括线束对电池构成短路风险增加。

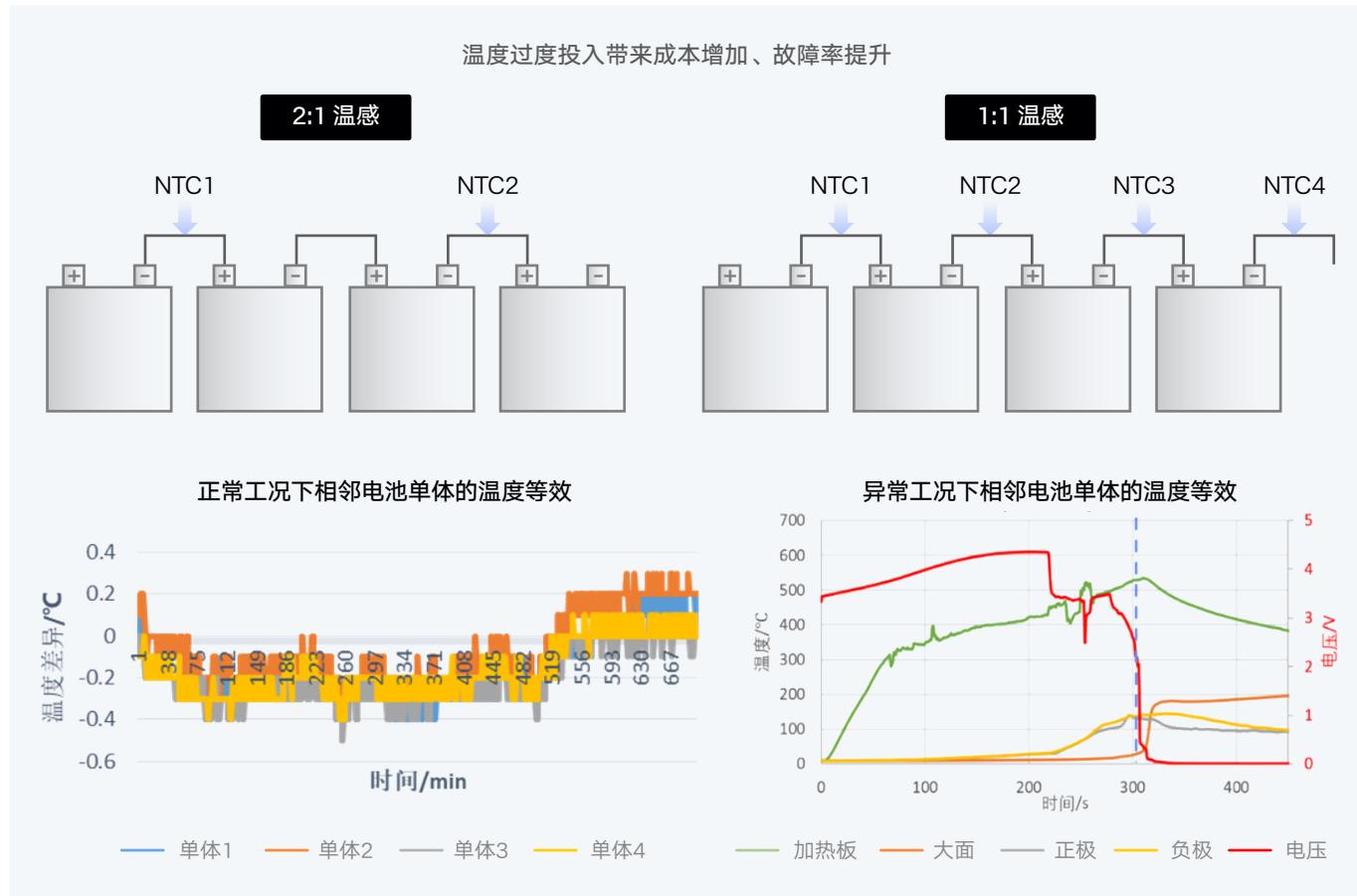


图5：不同温感布局的电池单体温度采集示例及其监测效果比对

2.2 电池状态估算不准与盲目主动均衡并存

磷酸铁锂电池的SOC和SOH估算行业普遍难题，主要源于其材料特性、环境因素、工况复杂及算法局限性等多种因素，误差普遍在5%-8%以上，尤其是储能系统长期运行在非满充满放的工况下，SOC、SOH长期得不到校正，累计误差被进一步放大。

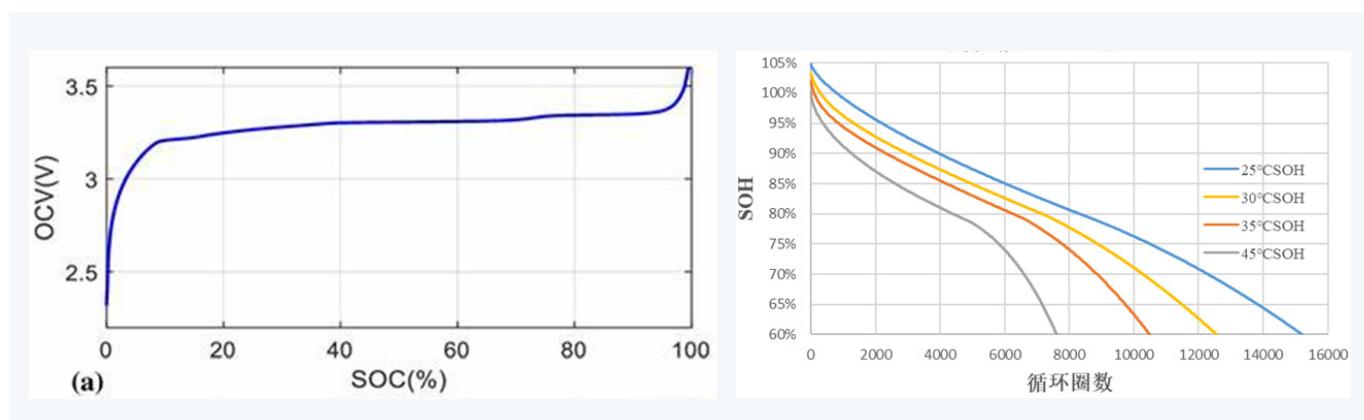


图6：磷酸铁平台期、温度因素影响加大SOC、SOH估算难度

电池模块的一致性决定了系统整体输出，为避免“木桶效应”（即电池模块性能受最差电池单体限制），通常采用均衡控制来缩小电池单体之间的差异。但在电池状态估算不准的前提下，盲目追求电池一致性，过度加大对电池单体均衡能力，即电池单体级采用大电流主动均衡技术，短期内可以强制缩小电池单体间的差异，但长期看，忽略电池单体是否病态的过度均衡将导致其内阻增大、容量进一步衰减，可能将一致性问题扩大为安全性问题。

随着电池单体智能制造程度不断提升、液冷热管理技术普遍应用、簇级直接并联减少等系统设计优化，出现电池模块木桶效应几率大幅降低，因此一旦系统中出现严重木桶效应，存在病态电池单体的可能性更大，而不仅仅是容量偏差的一致性问题，盲目加大对病态电池单体的主动均衡能力来填补其不足，或对电池模块中其它正常电池单体实施被动能量消耗，强制“削高就低”实现系统均衡，无疑都是舍本逐末。

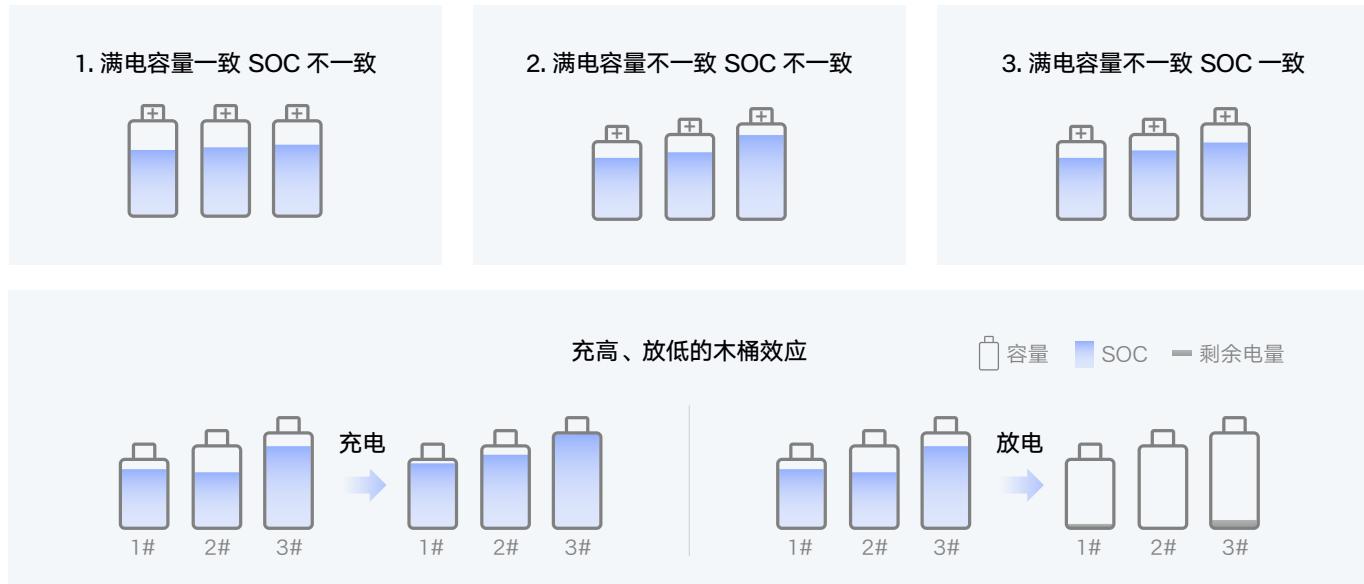


图7：引起电池“木桶效应”的常见类型

2.3 数据孤岛与数据无意义交互并存

储能系统包含EMS、PCS、BMS、MVS等多个子系统，各子系统之间需要数据互通、紧密配合，实现储能系统的高效运行。当储能系统设备中存在多厂商配套、多接口不统一、协议难匹配时，易造成数据孤岛现象，造成数据不能在系统中充分发挥其价值。

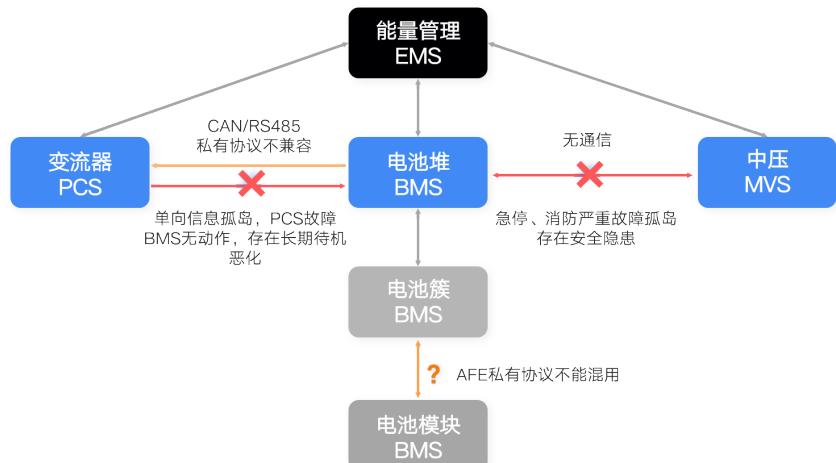


图8：易造成数据孤岛的储能系统通信拓扑示例

与此同时，也存在EMS、PCS、TMS、FSS各单元获取了电池实时状态数据，却并未作为控制依据的现象。例如传统的液冷热管理系统获取到电池单体的温度数据，但仍采用粗放的固化模式控制出水口温度，并未将电池单体温度作为控制目标。再如PCS获取到电池簇的SOC数据，但只执行EMS功率调度指令，对于电池簇是否需要均衡未做控制。诸如此类电池管理数据的“引”而不用，带来无意义交互，增加产品设计复杂性与成本投入。

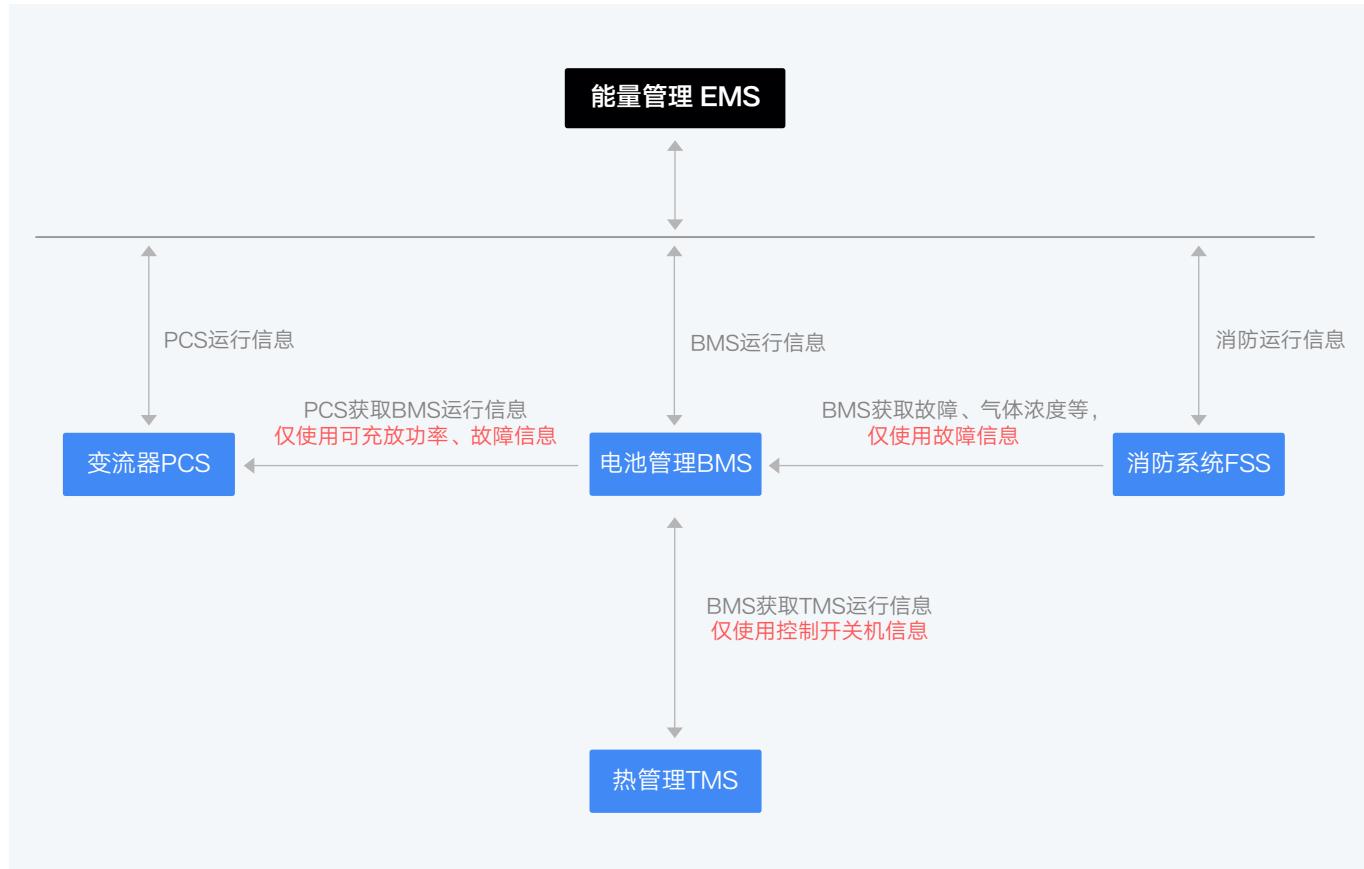


图9：储能系统数据无意义交互示例

2.4 故障定位不准与故障告警频发并存

电池状态的故障判断依据单一、阈值设置不科学，以及多个判据之间相互耦合，是导致故障定位不准的主要原因。如电池单体压差大是储能系统中常见故障类型，但难以区分是采样回路异常还是电池本体异常。

为提升故障定位精准性，传统做法是增加细分故障类型，如设置电压采集线脱落故障。当发生电压采集线异常时，储能系统可能同时报出压差大故障、采集线脱落故障甚至过欠压故障。因此单纯采集电压值并不能准确定位故障的根因。

与此同时，多个判据之间相互耦合，也会造成一个问题引发多个关联故障并发。当系统中某个电池单体引发过压报警时，还会触发电池模块级甚至是电池簇层级的电压一致性报警，表现出故障告警频发的现象。

告警阈值设置一刀切也会带来故障告警频发的现象，例如电池老化引起电池单体温差、压差扩大，而固定保护阈值无法适应这种变化，将正常波动误判为异常，引发告警频发。



图10：电池单体压差故障对应多种原因示例

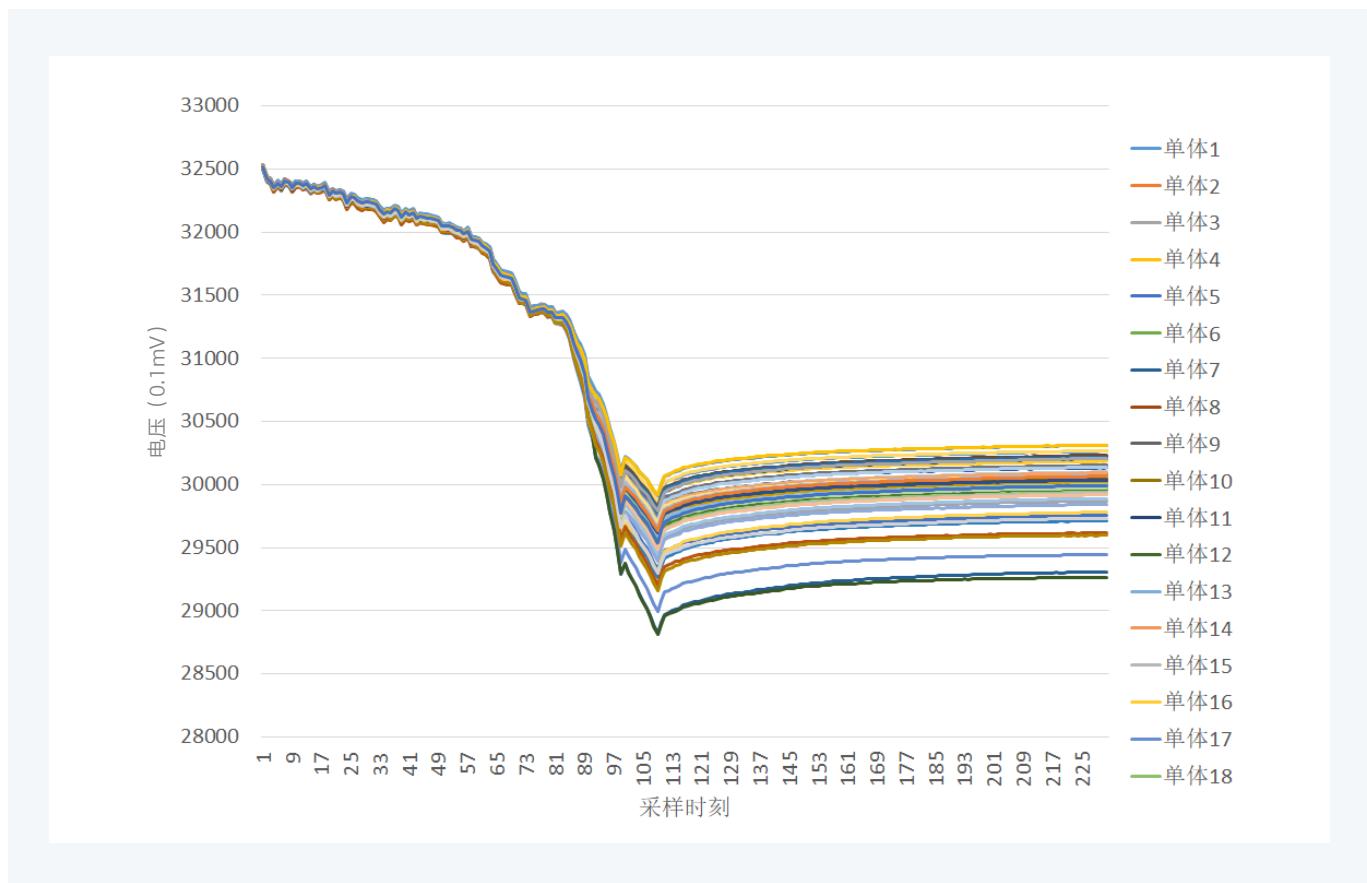


图11：电池单体电压在放电末端的典型分叉现象（随电池老化加剧）

C3

阳光电源BM²T电池管理技术方案



3.1 BM²T技术方案简介

BM²T是一种综合性的电池管理技术，其核心目标是通过实时监测（Monitoring）与动态管理（Management）的双重机制，对电池系统进行信号采集-状态评估-主动调控的全流程闭环管理，最终实现储能系统安全、高效、长寿命。

• 监测（Monitoring）

通过传感器网络与数据采集系统，实现多维度监测数据输入，如对电池电压V、电流I、温度T、压力P等核心参数进行实时追踪，并以算法驱动提升电池SOH、SOC和SOS等状态的精准估算。

• 管理（Management）

基于监测数据，通过主动控制策略对电池系统进行动态调整，包括采用主动/被动均衡技术消除电池单体间差异，管好电池一致性。优化系统内联动保护策略，平衡性能与寿命，实现故障部件快速切出，管好电池安全性。

储能电池管理的目标应以电网能量调度需求为导向，推动储能系统的安全性和经济性全面提升。阳光电源基于“三电融合”理念，深入研究从电网到系统、从系统到电池的垂直化管理，包括围绕电池的电特性、热特性和力特性等多维度管理，构建电池全生命周期模型，强化电池信号可感、状态可知、联动可控三层架构创新，打造智能化电池管理系统。



图12：BM²T智能化电池管理技术架构

3.2 信号有效可感

1 高精度传感

VIT采集的精准性是电池管理系统的常规指标。如1500VDC储能系统中，簇级端口电压检测关系到开关合闸前的压差控制、绝缘电阻识别能力；电池单体级电压检测关系到均衡控制及过欠压保护；电流采集精度直接决定SOC估算精度，影响系统木桶效应的判断。

阳光电源储能电池管理采用直流一体化采样技术，实现电压、电流和绝缘电阻的极简化、高精度检测。通过采样调理电路引入温度补偿、共模干扰抑制等技术，实现全温度范围、全生命周期、全频段干扰下的高精度检测。标准工况下，电流采集精度优于0.2%RD，高压采样精度优于0.4%RD，支撑电池状态估算高精度。

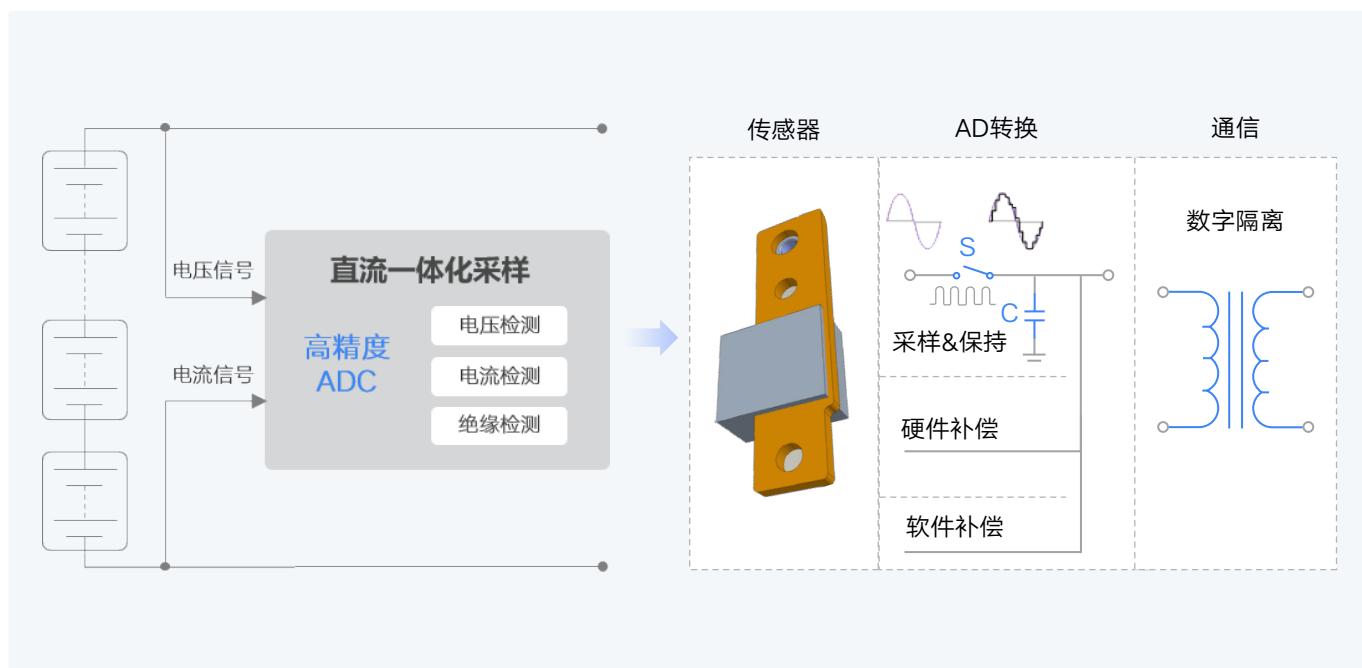


图13：直流一体化采样示意图

2 多维度传感

针对传统VIT传感技术对电池状态表征不全面和热失控预警滞后等缺陷，阳光电源基于TB级电池全生命周期数据库，深入分析电池在正常老化阶段和热失控阶段各信号参数的变化规律，重点研究电池的电压、温度、阻抗、力学、气、光、声等信号在电池安全状态演变过程中的变化，阶段性提炼出电池膨胀力等多维度传感技术的工程化应用。实时监测电池单体膨胀力的数值和变化趋势，利用电池单体的“双峰呼吸效应”，以及随电池循环老化，其膨胀力规律性显著增强的特性，开发SOC/SOH估算算法，实现对电池SOC和SOH状态的精准估算。并利用膨胀力在热失控孕育期突破正常充放电的包络线这一特性，开发算法极早期预警电池热失控，为储能系统的安全稳定运行提供更有力保障。

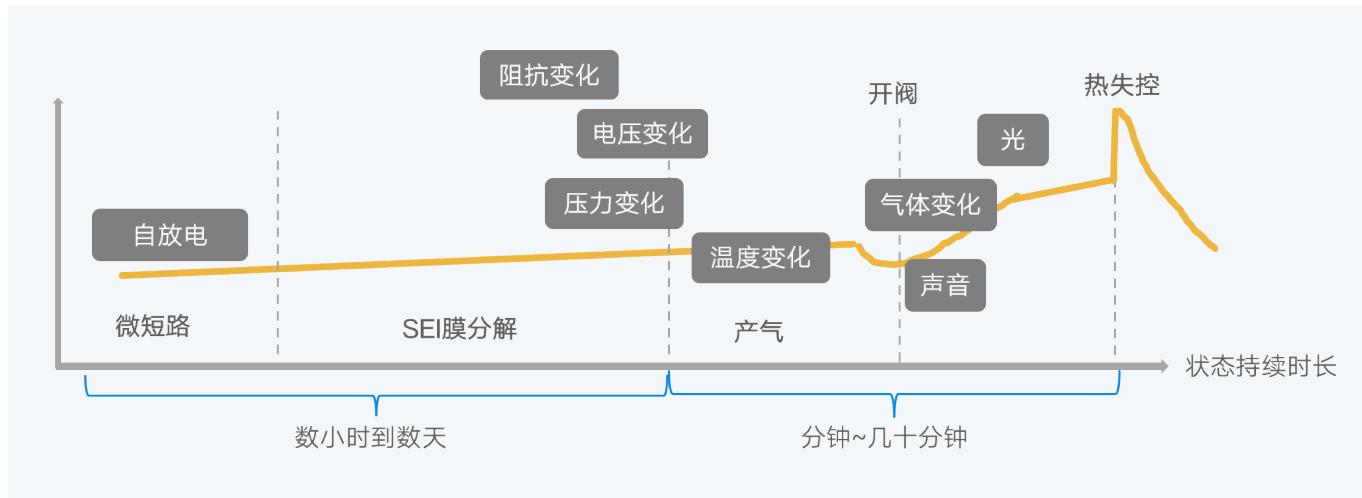


图14：电池安全状态过程中多物理参量产生和演变示意

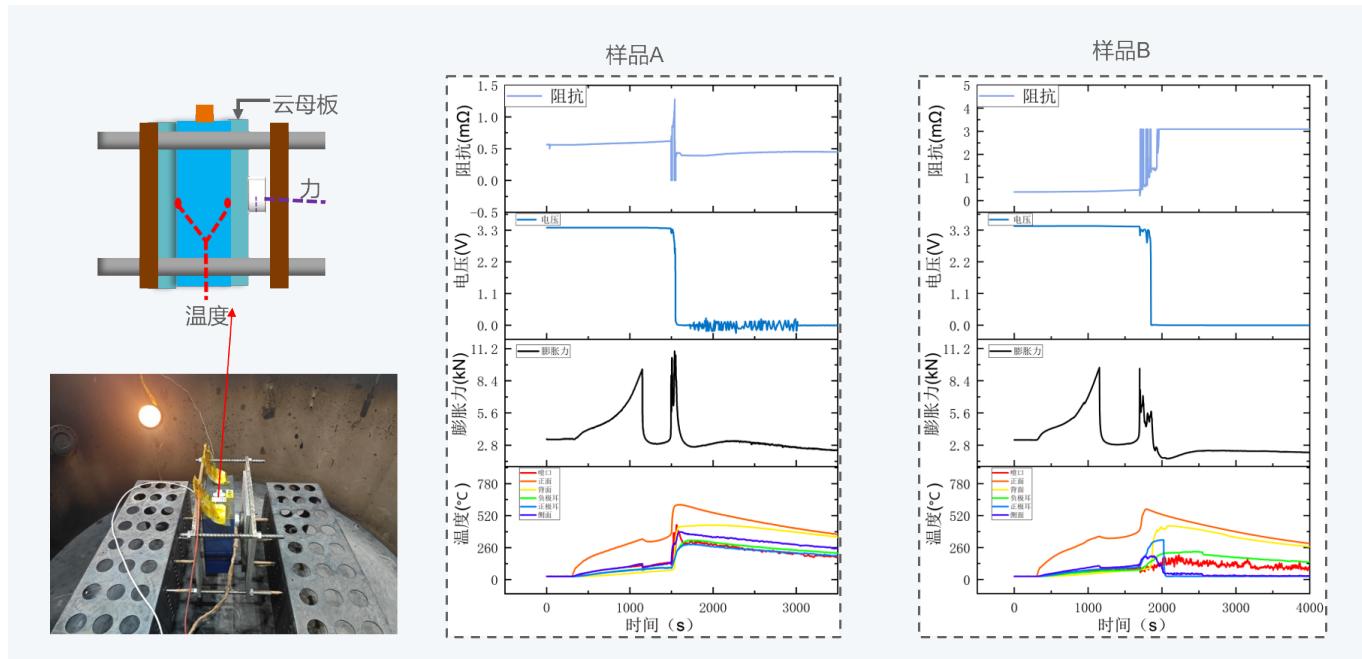


图15：314Ah电池单体热失控多特征提取

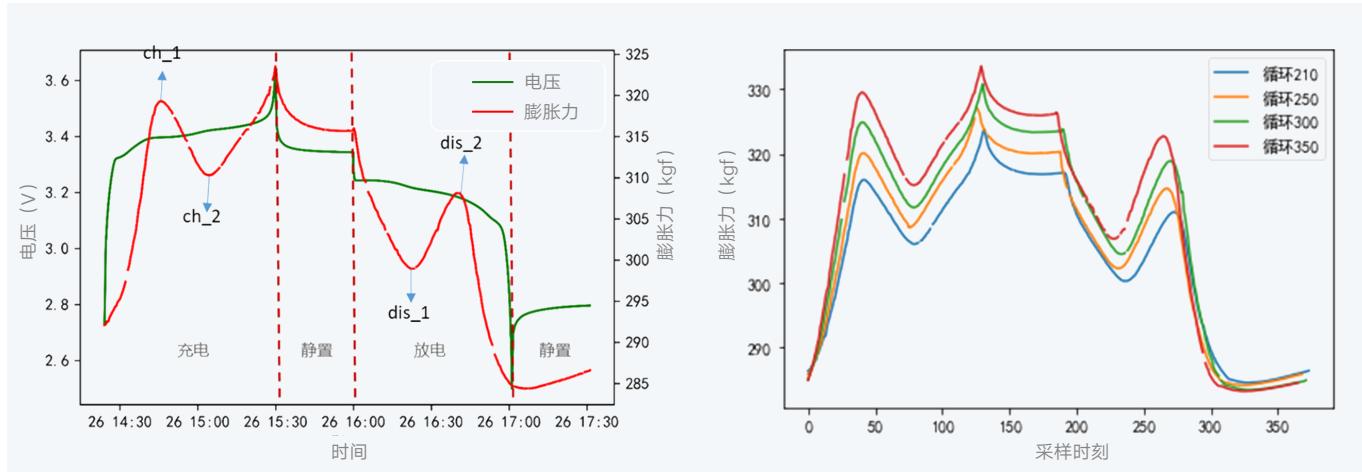


图16：电池充放电双峰呼吸效应图

图17：电池膨胀力随老化逐渐增大

3 低时延传感

信号可感有效性在时延维度主要体现在传感器的响应时间、采样回路的调理与AD转换时间、以及数字量的通信时间等方面，其中通信时间在储能系统中较为突出。锂电池储能系统由多个电池簇组成，电池簇间常见通信形式多为CAN、RS485、以太网等，通信速率差异较大，数据经多层转换后传输延时大，影响VIT数据采集的一致性，对SOC的估算也产生影响。随着储能应用场景拓展，如构网型储能的应用，电网对储能系统的响应速度要求越来越高，同时大规模、多支路的并联系统，也对设备间时延一致性提出更高要求。

为应对以上技术挑战，阳光电源采用高速实时工业总线技术，统一储能系统内部通信方式，取代传统的分层式架构，通信速率由兆bps级提升至百兆bps级，多簇SOC刷新周期一致性更高，控制指令响应延迟缩短至原来的十分之一，多台PCS出力控制一致性更精准，同时达成us级控制同步大幅提升规模化构网支撑的响应能力、故障保护软停机能力。

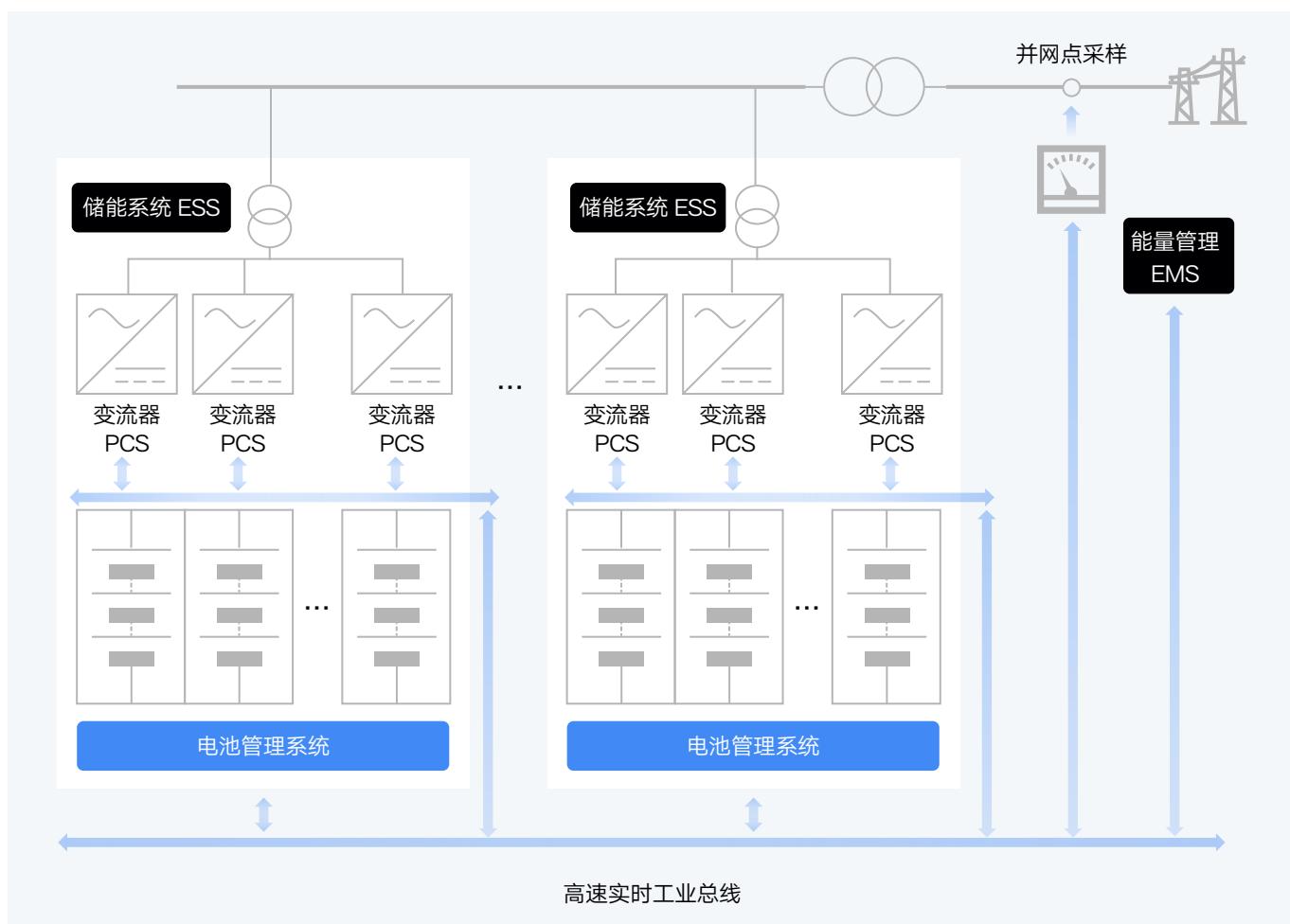


图18：低时延高速实时工业总线在储能系统中的应用示例

3.3 状态精准可知

储能电池的状态估算涉及SOH、BOL、SOL、EOL、RUL、SOC、SOP、

SOE、SOS多个关键参数。这些参数相互关联、共同构成电池状态的全方位评估体系，为电池的高效、安全运行提供支持。

表1：电池核心状态估算定义

参数	定义	主要影响因素
SOH State of Health	电池当前容量或性能相对于全新状态的衰减程度	循环次数、使用环境、充放电策略
BOL Beginning of Life	电池从制造完成并首次投入使用时的状态	制造工艺、环境条件、初始参数一致性
EOL End of Life	电池性能衰减到不再满足特定应用需求的临界点	老化程度、使用环境、化学副反应
SOL State of Life	电池的寿命状态，表示寿命消耗情况	SOH、循环次数、使用时间
RUL Remaining Useful Life	电池在失效前还能使用的时间或循环次数	SOH、使用条件、衰减速率
SOC State of Charge	电池当前剩余电量与最大可用电量的百分比	充放电电流、温度、老化程度
SOP State of Power	电池在当前状态下能够提供的最大充放电功率	SOC、温度、SOH
SOE State of Energy	电池当前存储的能量与最大可用能量的百分比	SOC、SOH
SOS State of Safety	电池的安全状态，评估是否存在过充、过放、过热等风险	SOC、温度、SOH、电流、电压

1 智能SOH估算

在储能电池的SOH估算领域，行业内普遍采用容量校正、内阻估计、电化学模型以及数据驱动等方法，存在电化学特性多变、测量难度高、计算复杂度高等问题，制约了SOH估算精度提升。其中，最常用的容量校正法本质上是以电池单体的充放电可用容量来间接衡量电池单体的健康状态，这种方法仅能反映电池单体的容量衰减程度，而无法提供具体的、直观的健康度信息。这类似于通过一个人的食物摄入量来衡量其整体健康状况，存在局限性。一些研究中引入SOL与RUL对应，表征电池单体可用容量的状态。

• 技术方案

阳光电源依托全球多场景储能系统运行数据与实验室测试数据，覆盖极端气候、高负荷循环等复杂工况，成功研发出具有强泛化能力的高精度SOH估算模型。该方案通过多维传感矩阵实时采集电压、温度、电流、膨胀力及阻抗等关键运行参数，并建立秒级同步监测机制。基于电池老化动力学机理与呼吸效应特征，构建包含膨胀力峰值、阻抗弛豫度等多维专家特征体系，通过设计深度学习矩阵网络架构，并应用迁移学习训练技术，实现SOH的高精度估算。并创新性融合SOL与RUL双维度评估体系，建立容量衰减轨迹与热失控风险因子的耦合模型，使健康状态评估具备多参数动态补偿能力。

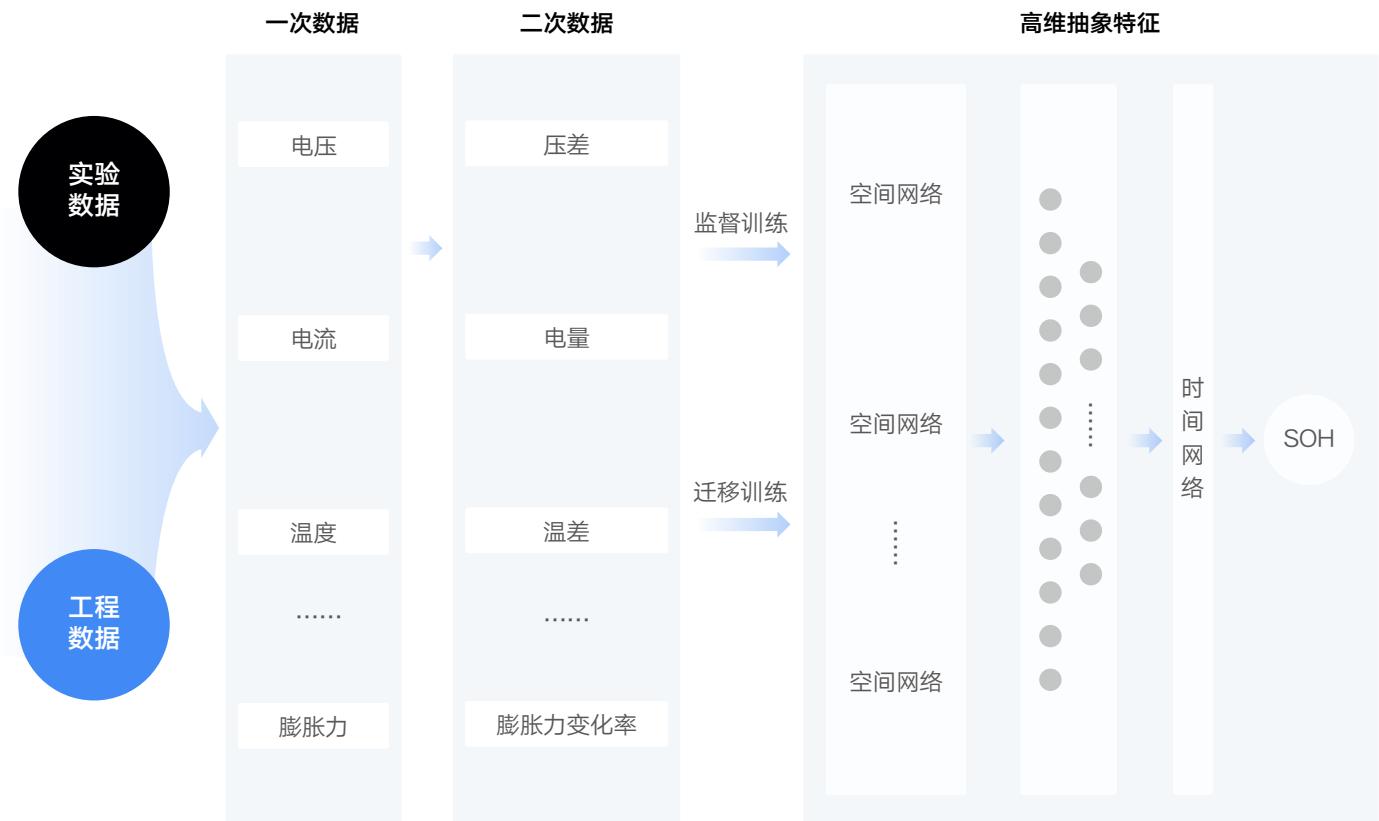


图19：基于多维数据的SOH估算策略

实际测试结果表明，该技术可实现电池单体级SOH估算误差 $< 2\%$ ，电池簇SOH估算误差 $< 3\%$ 。以100MWh储能电站为例，SOH估算精度每提升1%，电站可信出力电量增加1MWh，显著提升了储能系统的经济性与可靠性。

2 智能SOC估算

在储能电池的SOC估算领域，目前行业主流解决方案通常采用安时积分、开路电压法、卡尔曼滤波并结合在线校准策略，以保证SOC的精度，但在电压平台期缺乏有效的校准手段。如电池长期在非校准区间内充放电，安时积分的累积误差会逐渐增大，导致SOC估算精度下降，进而引发SOC跳变、出力波动等一系列连锁反应，无法满足电网调度要求，进而影响储能电站的稳定运行与经济收益。

• 技术方案

阳光电源提出基于多维度感知融合智能算法的SOC平台期估算策略。例如通过引入电池膨胀力数据采集，利用电池的呼吸效应，在充放电过程中提取膨胀力曲线的极值点与SOC特征数据，并结合充放电过程的IC（增量容量分析）曲线，挖掘其峰谷值点与平台期SOC的映射关系，构建电池特征与平台期SOC的关联模型，实现SOC全范围有效校准，平台期内SOC估算误差达到3%以内。以100MWh储能电站为例，SOC估算精度每提升1%，全年可多充放电量达365MWh（按一天一充一放计算），大幅提升了储能电站的经济效益与运行效率。

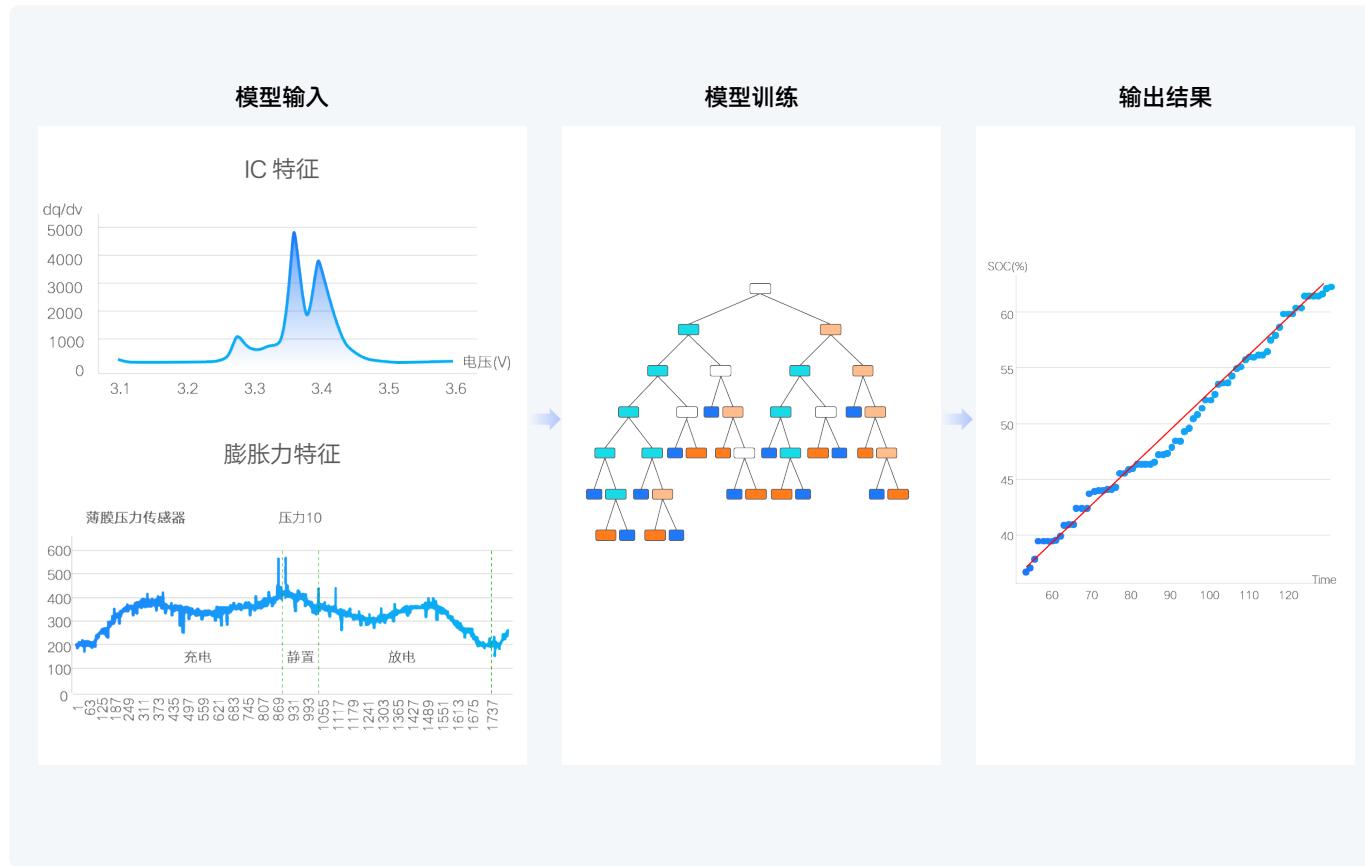


图20：基于多特征输入的智能化SOC估算策略

3 智能SOS估算

在储能运行过程中，环境温度、充放电倍率、电池老化程度等因素相互交织，依靠任一单一维度参数都难以实现精准故障预警、保护，其中最大的挑战之一是预警阈值设置。仅依赖阈值判断容易误触发保护机制，干扰电池正常使用。此外，电池内部反应复杂，现有方法难以捕捉微短路等潜在隐患。

• 技术方案

阳光电源基于电池电化学机理和多物理场耦合建模，构建覆盖析锂、内短路及热失控的全域安全状态（SOS）评估体系，形成“机理研究-特征提取-智能诊断-主动防护”的闭环管理。

① 热失控预警及仿真验证

通过外短路/过充/过热等极端工况测试，解析热失控进程中机-电-热多维度信号的耦合演化规律，建立跨尺度多物理场动态模型，精准模拟热失控前后电池的受力、温度及电压变化，实现从局部析锂到热蔓延的全链条仿真。通过对这些参数的实时监测与分析，弥补单一维度非黑即白的不足，及时捕捉热失控早期迹象，进而采取有效预警措施，并为SOS估算提供科学依据。

多维传感耦合特征分析

多物理场热失控机理建模

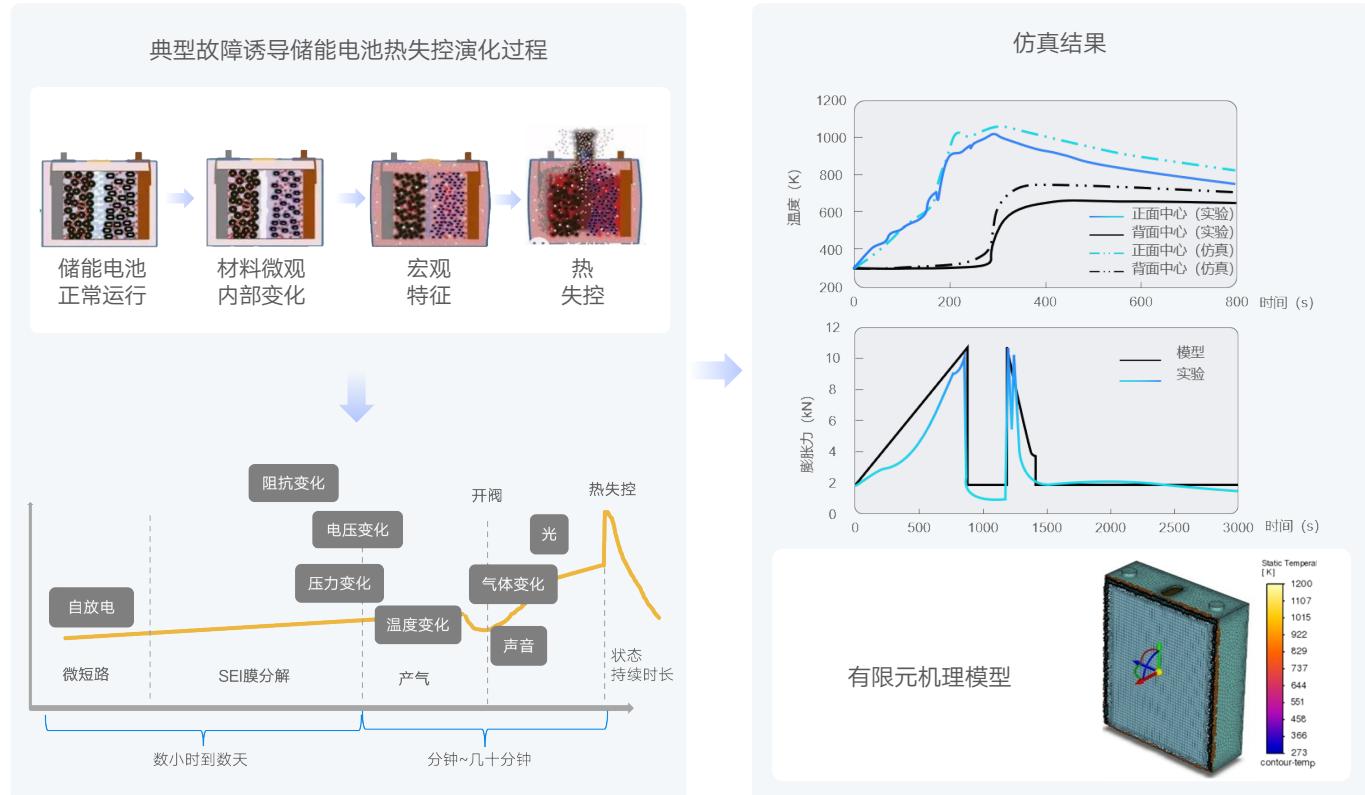


图21：热失控预警机理建模

② 析锂诊断

通过电池运行及静置状态下中的电压-容量 (V-Q) 曲线特性，建立电池析锂特征动力学模型，重点提取充电末期及静置弛豫阶段的电压异常波动信号，如平台压降滞后、弛豫电压回升速率异常等。通过高精度数据采集系统捕捉析锂诱发的微电压畸变，结合小波变换与时间序列分析算法，分离噪声并量化析锂相关电压偏移特征。可有效识别沉积锂而导致的系统欠压、压差故障，实现高精度析锂诊断。

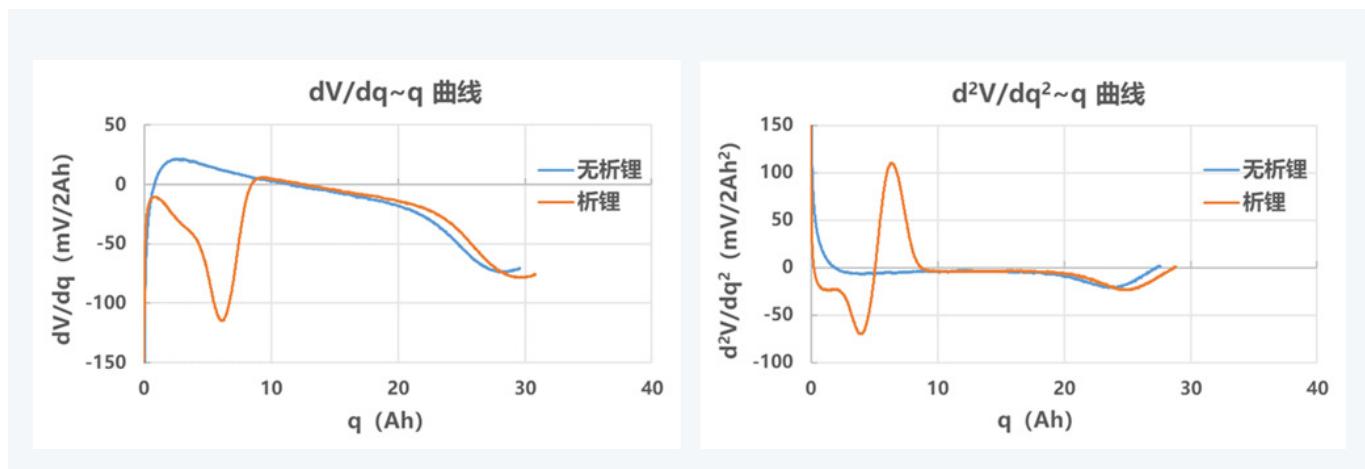


图22：电压-容量二阶微分识别析锂技术原理

③ 内短路早期识别

通过动态一致性分析算法，构建电压-温度联合离群度指标。计算电池模块内单体电压标准差与滑动窗口均值偏移量的加权熵，捕捉电压突降或缓慢偏移；通过三维热场重构技术，定位局部温升速率超限区域；结合电池IC曲线特征和离群点检测算法，识别因内短路导致的主峰面积衰减或峰位偏移，显著提升隐患早期识别能力。



图23：内短路诊断结果图

为实现SOS研究的全面落地，阳光电源搭建了电池运行状态大数据平台，深度整合运行数据，利用机器学习算法分析海量数据，精准识别极早期异常状态，实现精准热失控预警（准确率 $\geq 99\%$ @提前5min，准确率 $\geq 95\%$ @提前10min），保障储能电站的安全可靠运行。

3.4 系统联动可控

储能系统中提升电池信号可感、状态可知的目的是实现系统联动控制，通过智能化的控制管理，使复杂系统成为一个有机整体。

1 多级安全联动控制

储能控制系统由多个层级组成，一旦各层级控制逻辑自行决策，设备间配合缺少统一协调，易出现带载切断或切断不及时等现象，通过多层级的冗余保护，可实现故障及时保护的同时，系统软停机，避免由单一故障断层响应造成系统局部因电、热应力过大冲击而失效的问题，给储能系统带来损失。

• 技术方案

阳光电源储能系统电池管理技术将主动电气安全防护分为簇级、电池堆级，中压级、模块级，通过多级联动保护，实现电池出现安全故障时，确保电气回路可靠分断。对于可能引起电站起火的拉弧故障，阳光电源首创ArcDefender™直流拉弧检测技术可毫秒级、100%准确识别电弧，并同PCS的PWM信号管理快速联动，实现0.2S内断开电气回路，实现有效灭弧。

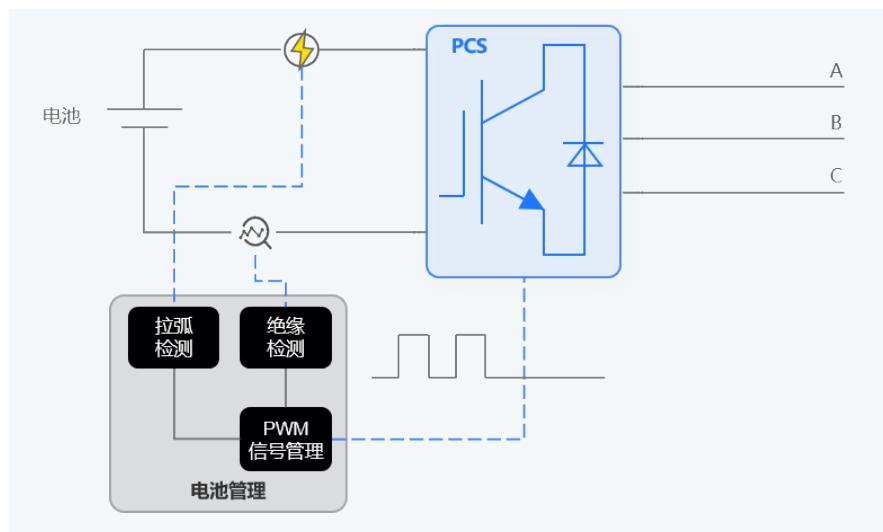


图24：ArcDefender™弧识别技术配套快速灭弧联动方案

2 多级均衡联动控制

储能电池在充放电过程中，因温度差异、老化速度不均以及系统结构设计等因素，导致电池单体间SOC不一致。传统储能系统上下级设备间联动控制不足，仅电池单体级均衡技术难以实现站点级别的全局均衡与协调。

• 技术方案

阳光电源对异常电池单体的失效机理进行分析，通过提取出关键失效特征，开发自放电率差异算法，储能系统实现异常电池单体的实时检测，对异常电池单体提前识别，从而避免因电池单体自放电异常而导致均衡一直盲目进行。在均衡控制前对电池单体健康状态进行评估，隔离或限制使用病态电池单体，并采用柔性均衡技术，避免对病态电池单体产生负作用。

此外，通过整站级电池单体数据通道，实现了从电池单体到整站的多级协同管理：电池簇级实时采集电池单体数据并执行被动均衡，电池模块级进行主动均衡；柜级系统基于多电池簇数据差异实施跨簇均衡，并将数据上传至Block级实现柜体间均衡，由EMS整合所有层级数据，统筹全场级均衡策略。

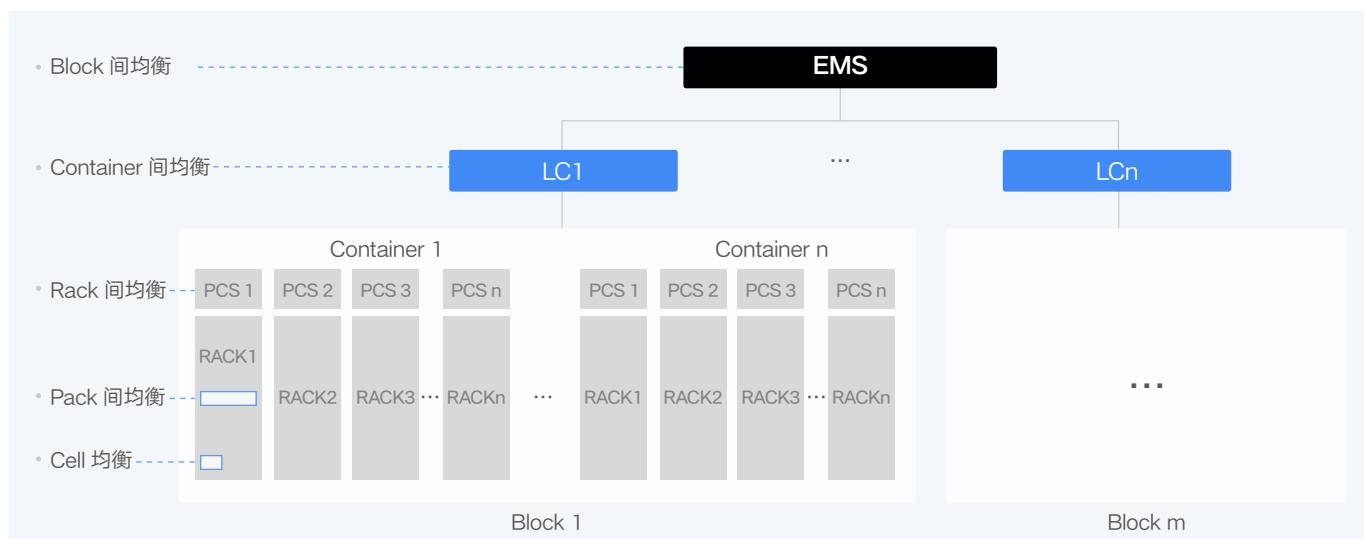


图25：五级联动均衡系统架构

该技术结合电池单体级智能算法与上下级功率动态分配机制，提升储能系统整体效能、延长电池寿命并优化能量利用率。通过五级联动均衡充分释放每颗电池单体潜力，实现储能电站充放电量提升5%（某100MWh项目为例），同时实现电池SOC的自动标定，节省人工上站标定带来的停机损失、标定人力费用。

3 仿生模型与热管理联动控制

传统储能热管理的主流控制策略主要依赖人工经验和固定模式，制冷机组的控制系统仅根据冷却液温度与设定目标的差值进行调节，未能充分利用器件响应特性、储能历史充放电数据、天气信息及环境温度等相关数据。这种局限性导致在复杂储能场景下，控制策略响应滞后，进而造成过度投入制冷带来不必要的能耗损失。

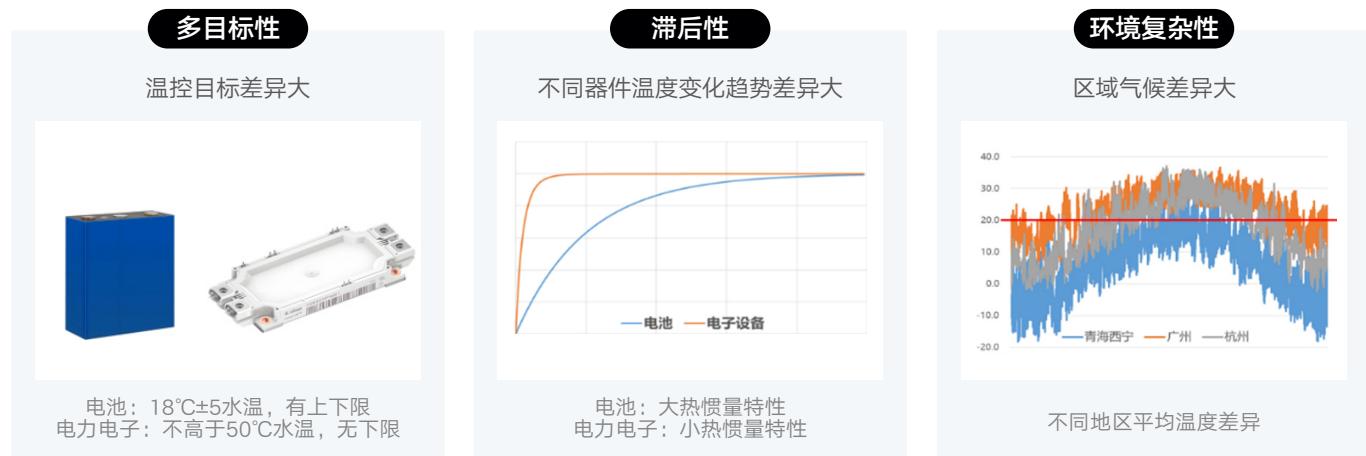


图26：储能系统热管理三大难题

• 技术方案

阳光电源将电池信息状态、热管理系统与充放电策略等数据整合利用，以AI仿生热平衡控制策略，学习模仿人类经验行为，在不同环境、工况下实现自主决策降低系统辅助能耗。依据历史充放电曲线，通过模型预测控制算法（MPC）对未来一天内的充放电行为进行预测，并结合电池温度与环境温度变化趋势，设计动态智能化热管理控制策略，保证电池温度变化处于合理的动态范围，又有效减少制冷量的消耗。



图27：智能温控算法逻辑图

相对常规智能控制算法，基于模型预测控制的AI仿生热平衡算法在不同工况节省辅助供电损耗如下所示：

表2 智能温控算法在不同工况节省的辅助供电损耗

环境	工况	降损
25°C	一充一放	20.8%
5°C	一充一放	30.4%
-20°C	一充一放	2.6%

4 直流控制与交流并网联动

随着可再生能源渗透率持续提升，电网对储能越来越高的调度需求直接映射到直流侧的电池。如电网高穿要求全SOC段保交流侧有功的能力、以及交流侧谐波电流与直流侧纹波电流的协同抑制等，将进一步加速交直流侧深度联动，而通过粗放的超配或降额使用等手段满足电网在构建新型电力系统方面的全新需求，无疑将导致初始投资增加。

• 技术方案

阳光电源在电池管理系统中采用主动感知、主动储备、主动协调的交直一体化管理技术。以电网高穿要求全SOC范围保有功的能力为例：传统全功率簇级动态调压两级架构，成本高、效率低；部分功率簇级动态调压成本低、效率高，兼具多簇并联下的簇均衡功能，可解决簇间环流问题。

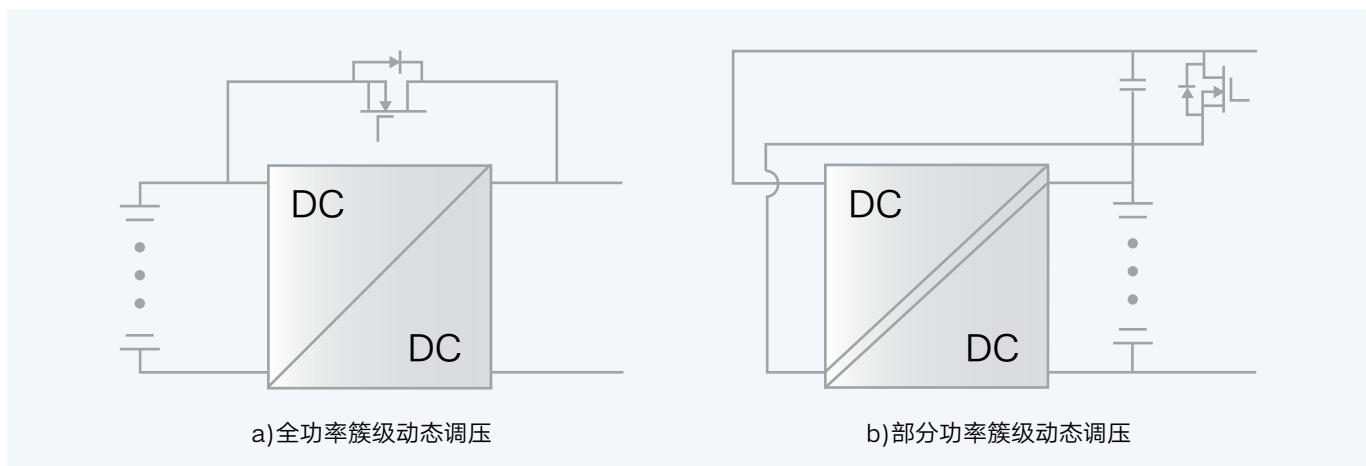


图28：满足电网故障穿越的簇级动态调压方案对比

3.5 技术特点与价值

阳光电源BM²T电池管理技术通过对电池信号有效可感、状态精准可知、信息联动可控，助力储能系统安全、高效运行，实现全生命周期价值最大化。



安全



经济

可提前预警热失控 从源头避免安全事故

- 提前 5min 预警热失控，准确率≥99%
- 提前 10min 预警热失控，准确率≥95%

实现多级联动保护 避免单一故障导致系统安全风险

- 电气回路 100% 断开
- 毫秒级、100% 准确识别拉弧、0.2S 关断回路灭弧

具备高精度的SOH和SOC估算，提升系统放电量（以1GWh电站、一天一次充放循环为例）

- 电池单体 SOH 估算误差≤2%，电池簇 SOH 估算误差≤3%
- SOC 估算误差≤3%
- 相较误差 5%，电站每年多放电 7.3GWh

实现多级联动均衡，提升系统放电量

- 从电池单体到 Block 的五级联动均衡，储能电站充放电量提升 5%
- 电池 SOC 的自动标定，无人工上站标定带来的停机损失、标定人力等费用

在不同环境温度和使用工况下降低辅助损耗

- 在一充一放下，至多降低 30.4% 的辅助损耗

高效、精准满足电网调度需求

- 高穿下全 SOC 段保有功，无簇间环流
- us 级出力同步

图29：BM²T电池管理技术特征与价值一览

电流精度检测报告	SOH估算检测报告	SOC估算检测报告	智能均衡检测报告	智能热管理检测报告

图30：BM²T电池管理技术-鉴衡测试报告

C4

BM²T技术未来展望

--



当前电池管理技术正从电池状态监测为主走向主动控制管理，包括多层级均衡管理、热管理及安全保护等，面对未来更高比例的可再生能源并网需求、电力系统对灵活性/稳定性的更高要求，以及新型电池技术的涌现，电池管理技术将朝着更高精度、更强智能化和更广兼容性的方向发展。从硬件层面，通过电池的电力电子化，电池管理的产品形态将趋于隐形化，与变流控制融为一体，主动管理能力大幅提升；从软件层面，通过深度融合AI、大数据和物联网技术，电池管理技术将从侧重于管安全提升至管健康，从快速联动控制提升至预测性控制。

4.1 电池信号可感

• 针对电池单体

以高安全、高能量密度为亮点的全固态电池已成为全球持续研发的焦点，需要克服的材料活性与电池高性能之间巨大挑战。在电池单体未实现本征安全之前，多维度传感的目标是让电化学反应被看见，重点构建热失控特征“指纹库”。如壳体外置传感，易于工程化实现，但增加了通讯及成组复杂性，如膨胀力、防爆阀检测等，壳体内置传感相对更直接、可观测性更高，如光纤、专用芯片等，但与电池单体材料兼容性、长期耐久性等还有待深入研究。

• 针对电池模块

从工程化应用角度，AI技术率先应用于电池模块更具性价比，如模块混用、智能诊断等，让模块除具备简单的信号采集功能外，也具备模块级大脑，使储能系统实现模块级即插即用、实现紧急故障快速动作。此外，智能模块将支持电子护照技术，记录电池单体和模块的全生命周期数据（如生产信息、历史运行状态、维护记录等），为运维决策提供数据支撑。通过标准化通信协议和接口，智能模块能够实现快速集成与混用，适配不同规模和类型的储能系统，降低运维复杂度与成本。

总的来说，电池传感技术将朝着高精度、高集成、智能化和低功耗方向发展，为储能系统提供更安全、高效和可靠的管理能力。未来，智能电池模块将成为储能系统智能化升级的核心载体，推动储能电站运维向数字化、自动化和智能化方向演进，全面提升储能系统的经济性和可靠性。

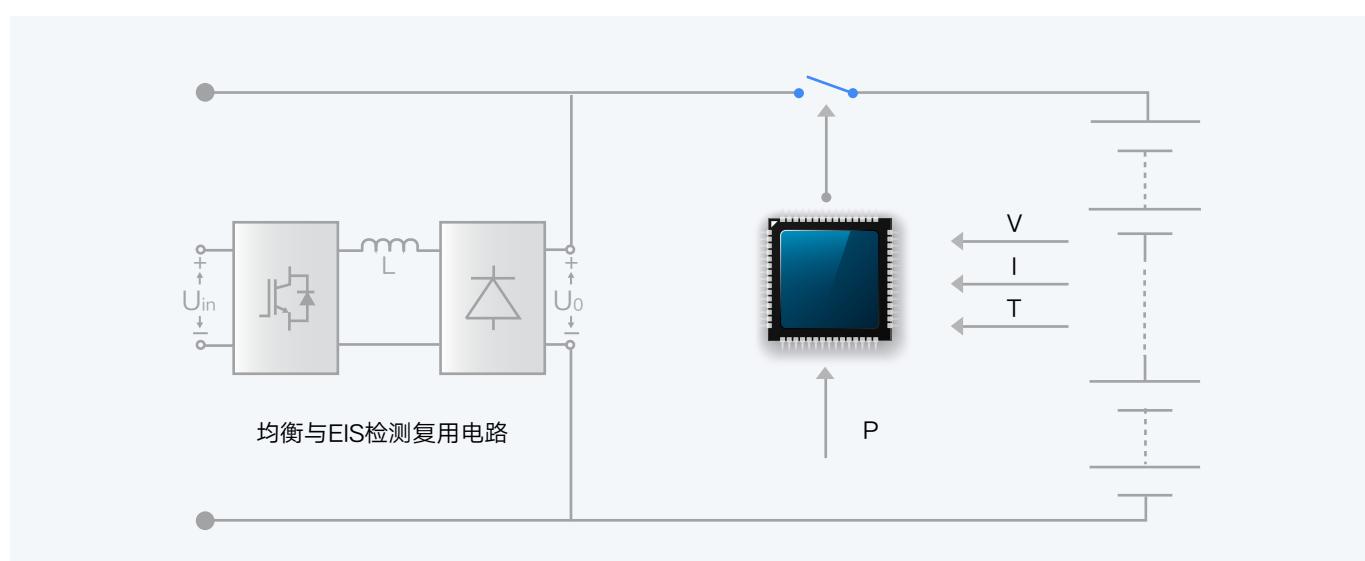


图31：智能电池模块多维度可感示例

4.2 电池状态可知

结合电压、电流、温度、阻抗谱、压力、形变等多维度传感数据，多源数据融合技术将加快构建更高精度的电池状态估算体系。电化学模型、等效电路模型与机器学习算法的深度融合，将显著提升SOC、SOH和SOP的估算精度，为储能系统的安全运行和高效管理提供可靠支撑。

机理模型应用基础上，AI技术的深度集成也将成为电池状态估算的核心驱动力。基于深度学习、强化学习和迁移学习的智能化算法，能够根据电池的运行环境、老化程度和工况变化，动态调整状态估算参数，提升算法的鲁棒性和适应性。此外，AI算法还将支持电池故障的早期预警与诊断，为预测性维护提供数据基础，从而降低运维成本并延长电池寿命。

1 电化学阻抗谱检测技术

电化学阻抗谱（EIS）检测技术在储能电池管理系统上的应用前景广阔。例如，结合机器学习等算法，利用EIS检测技术提取的特征参数，如纯欧姆电阻、电荷转移电阻、双电层电容等，更准确地评估电池的SOC、SOH和RUL等，为电池的安全管理、均衡控制、寿命预测等功能提供更精准的数据支持。通过对阻抗谱特征的分析，提前捕捉电池的早期故障信号，实现微短路、析锂等安全故障的早期预警和准确诊断，提高储能系统的安全性、经济性。

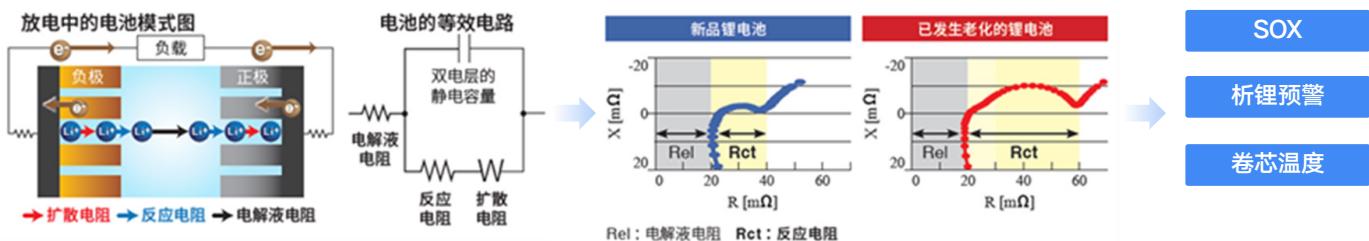


图32：EIS阻抗谱检测技术的应用

未来，随着微型化、低成本的硬件和高效算法的进一步发展，EIS检测技术有望推动电池管理系统向智能化方向演进，实现对电池全面感知的健康度管理。

2 自监督模型技术

储能电池运行数据庞大，但数据标注成本高，缺少标签的电池运行数据常常被认为是“低质量数据”，无法得到充分利用。在智能化时代，储能电站积累的海量电池运行数据将成为提升系统安全性和经济性的核心资产。在大数据基础上，随着数据-机理融合技术的突破，自监督学习有望成为储能电池全生命周期管理的核心技术底座。自监督学习将从未标注数据中提取通用特征，再迁移到下游任务，结合电池智能感知发挥诸多核心价值：

- ①通过时序掩码预测技术预测被遮蔽的电压/电流片段或重构充放电曲线、对比学习如SimCLR、MoCo算法区分正常与异常充放电曲线等任务，直接利用无标签数据学习电池动态特征。
- ②基于Transformer的预训练模型通过长序列注意力机制，自动捕捉不同工况下的容量衰减模式，将预训练模型提取的时序特征与物理退化模型融合，实现全工况、全生命周期的容量衰减预测。
- ③储能电站常混用不同厂商、批次电池，传统模型需针对每种电池重新训练，自监督迁移学习通过领域自适应技

术，将已标注的A型号电池知识迁移至无标注的B型号电池，增强模型的泛化性能。

④储能电站电池管理系统需低延迟、低功耗算法，通过知识蒸馏将预训练的大模型（如Transformer）压缩为轻量级LSTM，在嵌入式芯片中实时运行。

4.3 系统联动可控

1 电池管理电力电子化

在新型电力系统加速构建的背景下，储能系统正经历从"机械堆叠"向"智能融合"的跨越式发展。电池管理技术的电力电子化革新正成为破解电池系统"木桶效应"、提升整体效能的关键路径。

- **系统架构深度一体化**

基于"电池管理-功率变换"一体化控制器的新型架构，将重构传统储能系统的层级结构。直流侧方案通过集成电池管理与DC/DC变换功能，交流侧方案实现电池管理与DC/AC逆变协同，这种"二合一"的设计理念不仅简化了系统拓扑，通过硬件资源复用显著降低系统成本。

- **系统响应速度实时化**

通过重构通讯架构与优化控制逻辑，储能系统对电网调度指令的响应速度将突破传统电池管理系统架构的延时瓶颈。电力电子化的电池管理系统可直接参与电网频率调节、无功支撑等高级应用，使储能单元真正成为具备主动支撑能力的"电网友好型"电源。

- **系统主动自愈能力进化**

新一代系统将突破静态均衡技术局限，通过智能电力电子装置动态调节电池工作状态。针对电池老化产生的不可逆损伤，系统可自动生成适配的脉冲修复策略，面对复杂工况时，能依据实时参数自动优化充放电策略，有效延长电池服役周期。

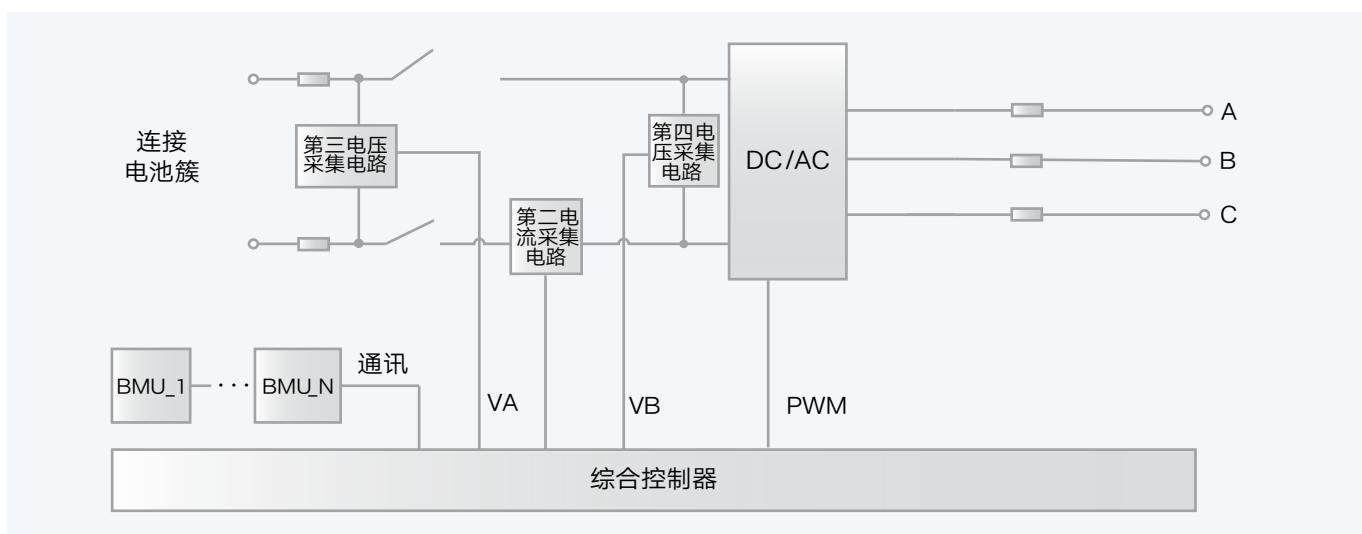


图33：电池管理与DC/AC共控制器平台实现交直流一体化管理

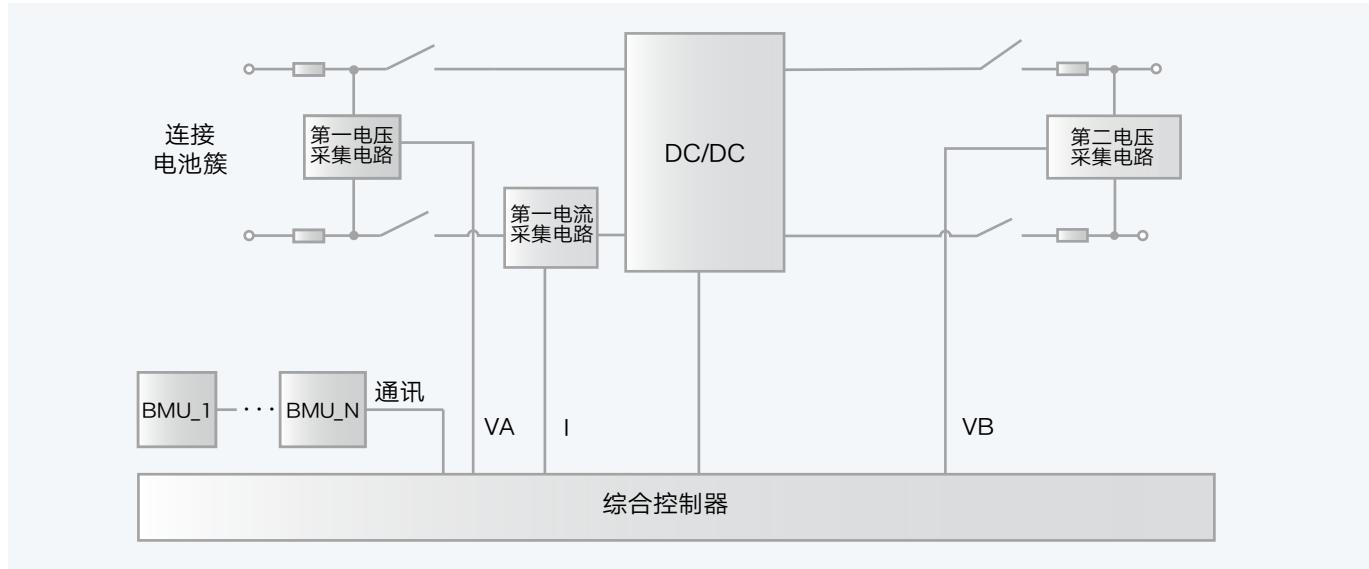


图34：电池管理与DC/DC共控制器平台实现更高效的直流耦合

2 电池管理数智虚拟化

未来是数字化时代，数字孪生技术将促进电池管理系统虚实联动，提升系统预测性可控能力，提前发现和解决潜在的安全隐患，提高储能系统的运行效率和使用寿命。除此之外，云边协同的AI应用，包括边缘计算集成技术通过在电池管理、变流等关键部件中嵌入AI芯片，构建从电池单体到电池模块，再到整个电池系统高精度的虚拟模型，能够实时模拟和监测电池状态。数字孪生模型将持续自我优化，具备更强的智能诊断和预测能力，提前预判潜在故障，实现本地实时决策与联动控制一体化的能力，提高锂电池储能系统的响应速度和效率，安全管理更加精细化，从全生命周期的角度出发，确保系统的安全稳定运行。

随着智能化应用推广，电池全生命周期碳足迹追踪、电池护照等相关的数据安全、网络安全也将面临新的挑战，持续探索新型加密技术、建立相应信息安全标准也将日益凸显。



图35：储能系统数字孪生平台搭建及其应用

C5

总结和展望

继发布SCT干细胞电网技术白皮书，阳光电源基于“三电融合”理念再次发布BM²T电池管理技术白皮书，引领储能系统透明化健康发展。展望未来，电池管理技术的创新将与储能产业的蓬勃发展相辅相成，阳光电源将积极与产业界、学术界的协同合作，立足底层技术创新，共同推动全球能源体系向清洁化、智能化和可持续化迈进。



让人人享用清洁电力
Clean power for all

阳光电源股份有限公司
中国合肥市高新区习友路1699号

邮编：230088
总机：0551- 6532 7878, 7877
网址：www.sungrowpower.com

销售热线：
400 119 7799
邮箱：sales@sungrowpower.com



阳光 光储充抖音号



阳光 光储充小程序



阳光 光储充官方微信