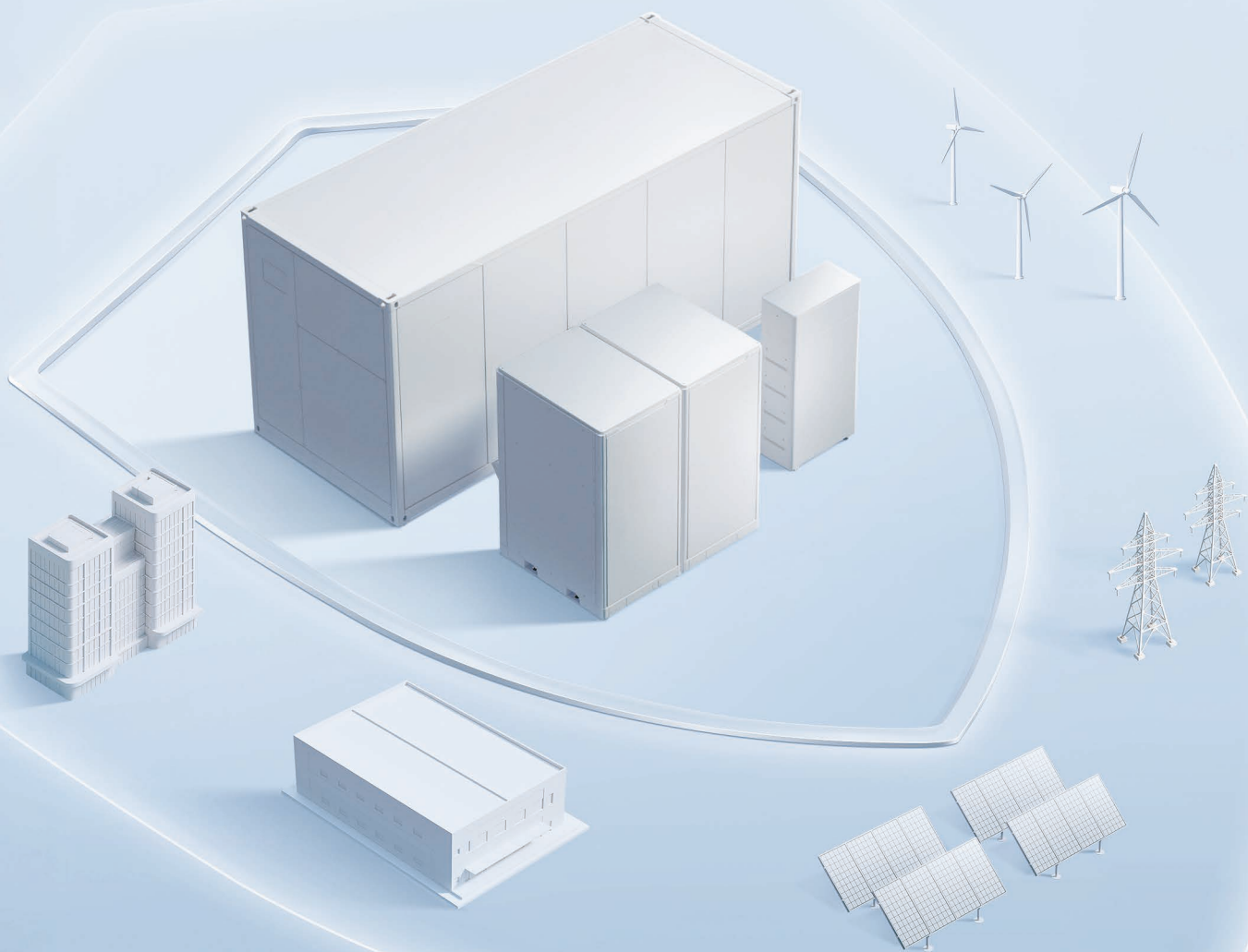


引领储能安全新范式

阳光电源储能**全维**安全白皮书



前言

FOREWORD

在全球能源变革浪潮中，储能正从技术突破迈向规模化应用，成为支撑碳中和目标的主要力量。然而，伴随产业高速扩张，安全挑战日益凸显，单一防护、短期成本导向等思维，已难以应对系统级风险，成为制约可持续发展的关键瓶颈。中国国家能源局、国际电工委员会（IEC）、美国消防协会（NFPA）等全球权威机构相继升级监管规范，标志着安全要求正迈向“系统级、全周期”的新高度。

作为独立第三方检验检测认证机构，德国莱茵 TÜV 深知，认证不仅是合规的通行证，更是质量与安全的守护者。从产品设计到退役的全生命周期中，我们以科学方法与全球视野，开展严谨的测试认证，既为产品提供权威认证，更为行业安全筑起防线。我们的角色，是推动标准落地，识别潜在风险，助力企业实现安全与创新的协同发展。

本白皮书所提出的“全维安全”理念，正是对当前行业安全升级需求的有力回应。在空间上，打破器件孤岛，实现从电芯到电网的全链保护；在时间上，贯穿全生命周期，确定从设计到退役的全程管控。我们愿与行业携手，以技术为基、以责任为先，共同推动储能迈向高质量、可持续的新阶段。

李卫春

TÜV 莱茵大中华区太阳能与商业产品服务高级副总裁



目录

CONTENTS

01	储能行业发展趋势与挑战	3
	1.1 规模跃升：储能系统大容量、高密度趋势	4
	1.2 挑战升级：规模化应用下的风险加剧	4

02	储能系统风险透视	6
	2.1 电池层：潜在热失控风险	7
	2.2 电气层：拉弧与绝缘失效	7
	2.3 系统层：缺乏故障隔离与联动控制	8
	2.4 场站层：子阵级风险蔓延	8
	2.5 电网层：稳定性与支撑能力不足	8

03	储能系统全维安全架构	10
	3.1 电池层安全架构	11
	3.2 电气层安全架构	16
	3.3 系统层安全架构	20
	3.4 场站层安全架构	23
	3.5 电网层安全架构	26
	3.6 全生命周期安全支撑体系	30

04	结语	38
-----------	-----------------	----

01

储能行业发展趋势与挑战



1.1 规模跃升：储能系统大容量、高密度趋势

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给储能发展带来新机遇。据彭博新能源财经（BNEF）预测，2035年，全球累计储能装机容量相比2024年预计增长12倍，达到7.3TWh。

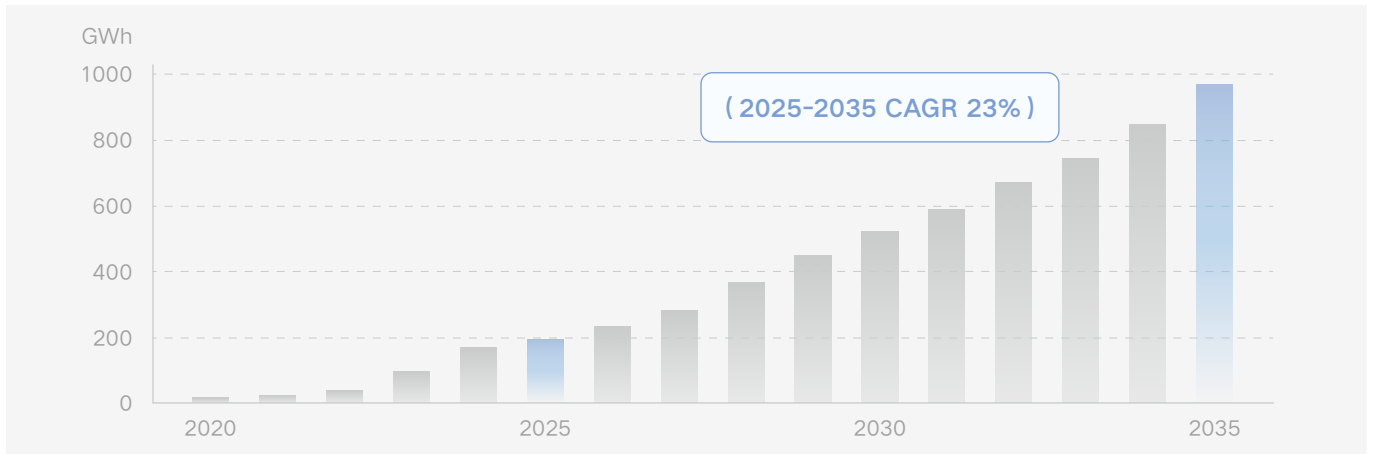


图 1：BNEF 全球储能年新增装机数据

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，主流电池单体容量280Ah左右，单柜体容量多为3MWh左右，单一电站规模多为百MWh级。2024年，电池单体容量发展至500Ah以上，单柜体容量超6MWh，单一电站规模突破GWh级。

1.2 挑战升级：规模化应用下的风险加剧

储能规模化发展的同时，系统安全也面临隐忧。据清洁能源协会（Clean Energy Association, CEA）2024数据显示，70%的储能系统安全设计缺陷来自于系统及模组，30%来自电芯。这不仅揭示了行业普遍存在的“电芯安全=储能安全”的误区，也反映出系统安全风险问题的普遍性。

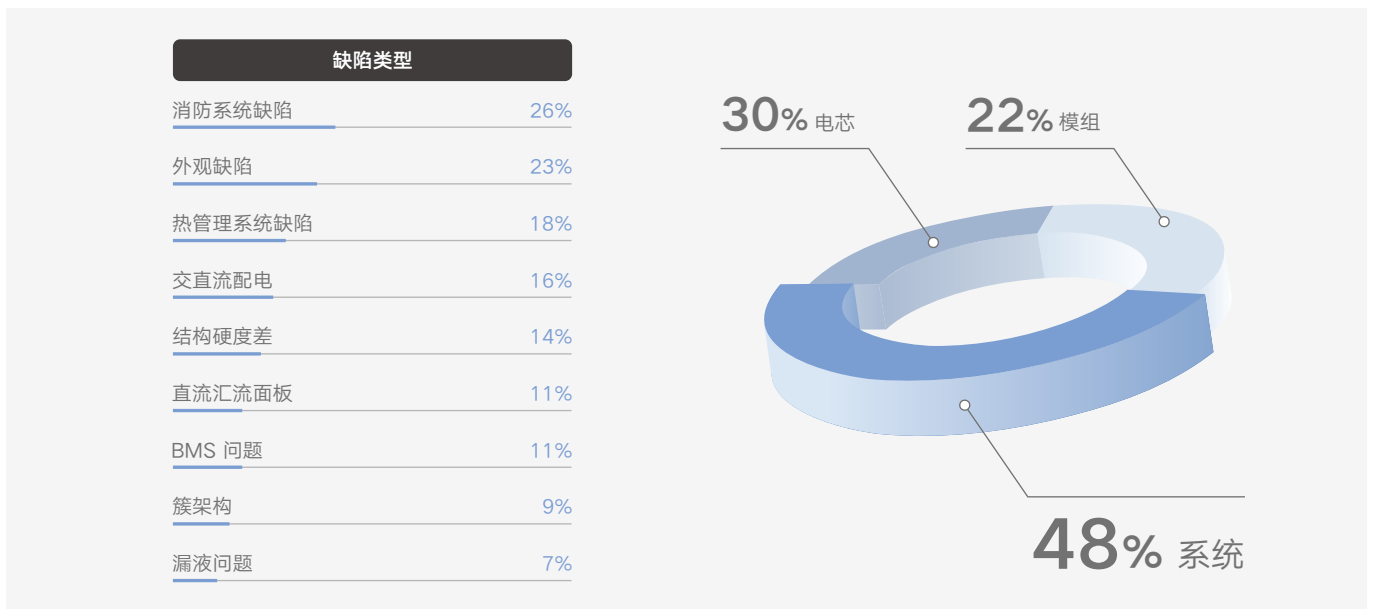


图 2：储能系统安全缺陷统计

据公开数据统计，截至 2025 年底，全球累计发生储能火灾事故已达 131 起，给生命财产安全带来严峻挑战。

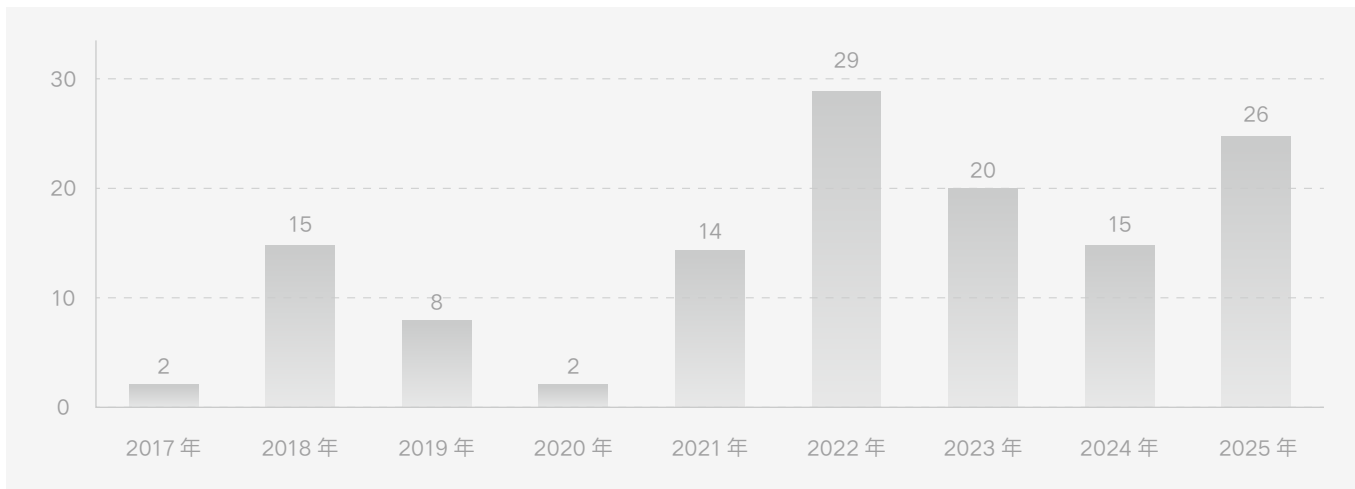


图 3：全球储能火灾事故统计

储能系统的安全隐患具有多维的分布特征，既存在于电池与电气的物理层级，也伴随着运输交付至长效运行的时间周期。

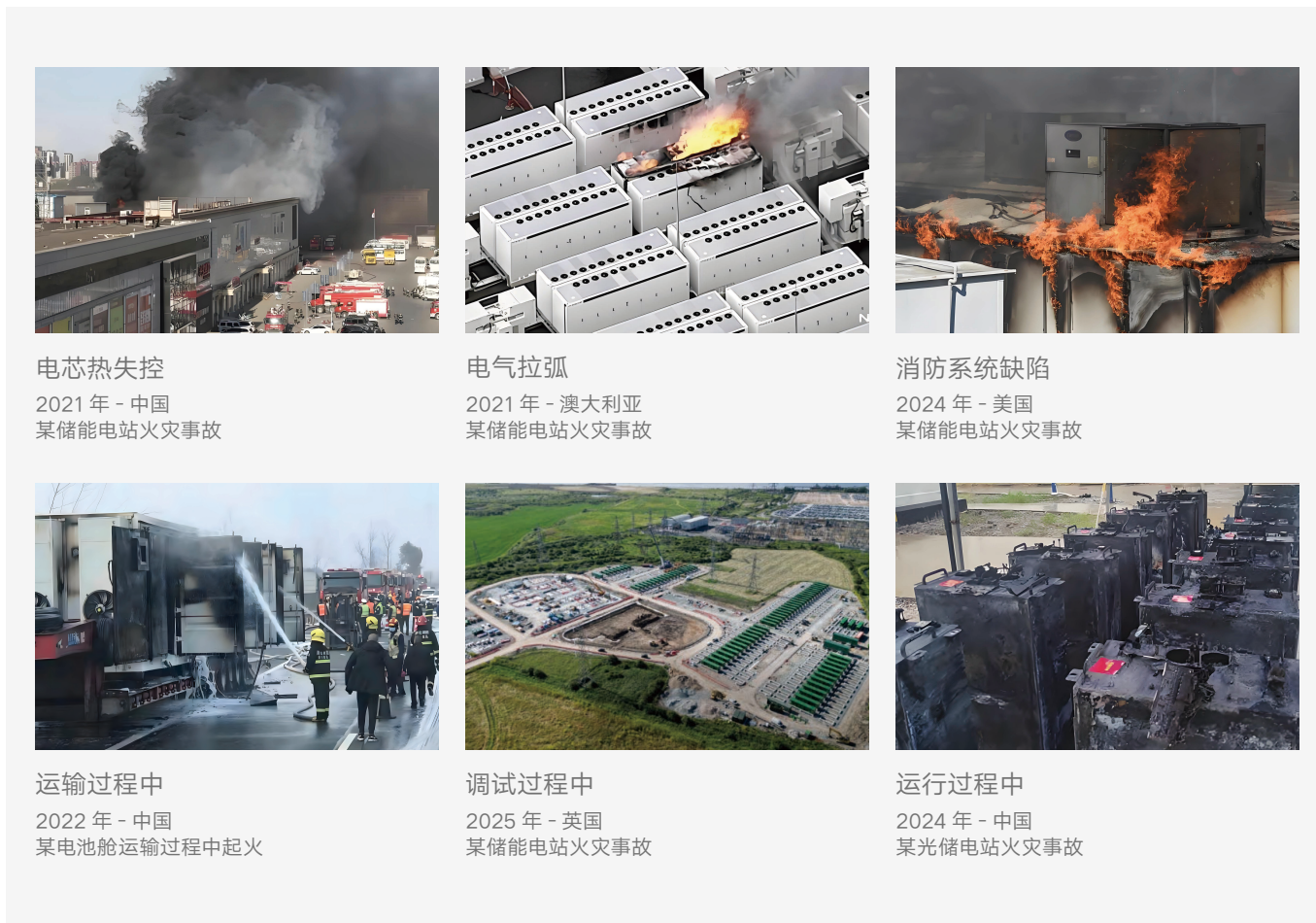
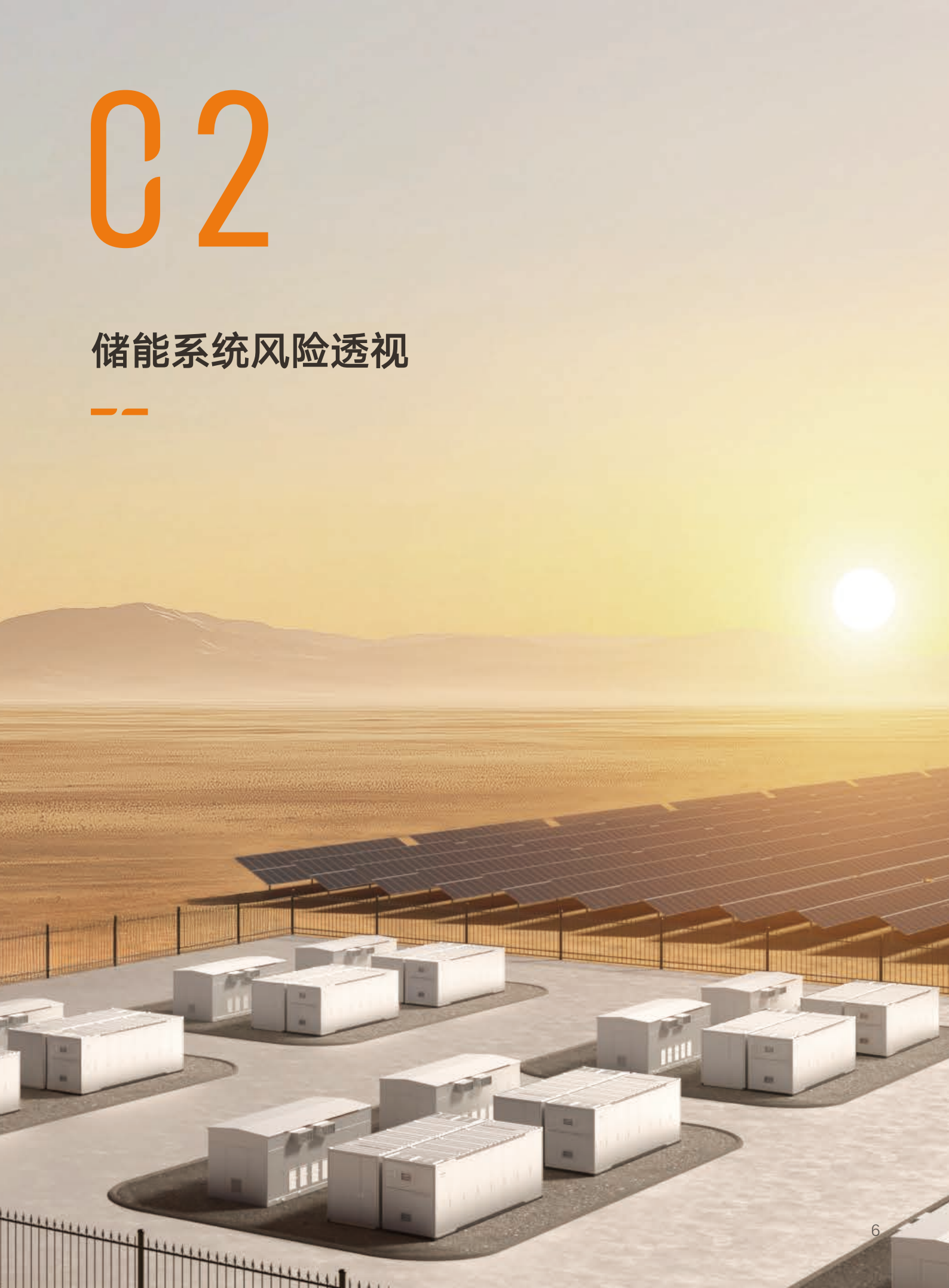


图 4：储能安全事故案例

02

储能系统风险透视



随着储能系统的规模化应用，系统复杂度的提升让安全风险日益复杂。这种风险呈现多维分布特征：在电池层，热滥用与管控失效是诱发热失控的核心原因；在电气层，短路与拉弧风险直接威胁资产人身安全；在系统层，故障隔离与联动控制缺陷让风险从“局部”扩散“全局”；在电网层，高比例新能源接入导致系统惯量降低与抗扰动能力弱化。正视并深度剖析这些风险，对保障储能安全至关重要。

2.1 电池层：潜在热失控风险

2024 年，美国电力研究院（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%。其中，电池的电滥用、机械滥用和热滥用是导致热失控的主要原因。如何把电池管好和用好，是防范电池安全风险的关键所在。



图 5：电池热失控诱因示意图

2.2 电气层：拉弧与绝缘失效

储能系统的容量越来越大，电气连接点的数量增多，加大了工程实施的复杂性与管控难度。根据事故案例分析和行业报告显示，因实施过程不规范（如虚接、裸线外露）导致的短路与拉弧故障，已成为引发储能安全事故的关键诱因，轻则导致设备损害，重则引发火灾，对人员、资产安全构成威胁。



图 6：储能起火电气原因分析

2.3 系统层：缺乏故障隔离与联动控制

行业部分项目因集成设计、设备匹配与工程实施专业化程度不足,导致出现“单体故障蔓延”与“系统级响应失效”的情况,一旦一个电池单体发生热失控,如果缺乏有效的系统级隔离与协调,故障可能从“局部”扩散为“全局”灾难。

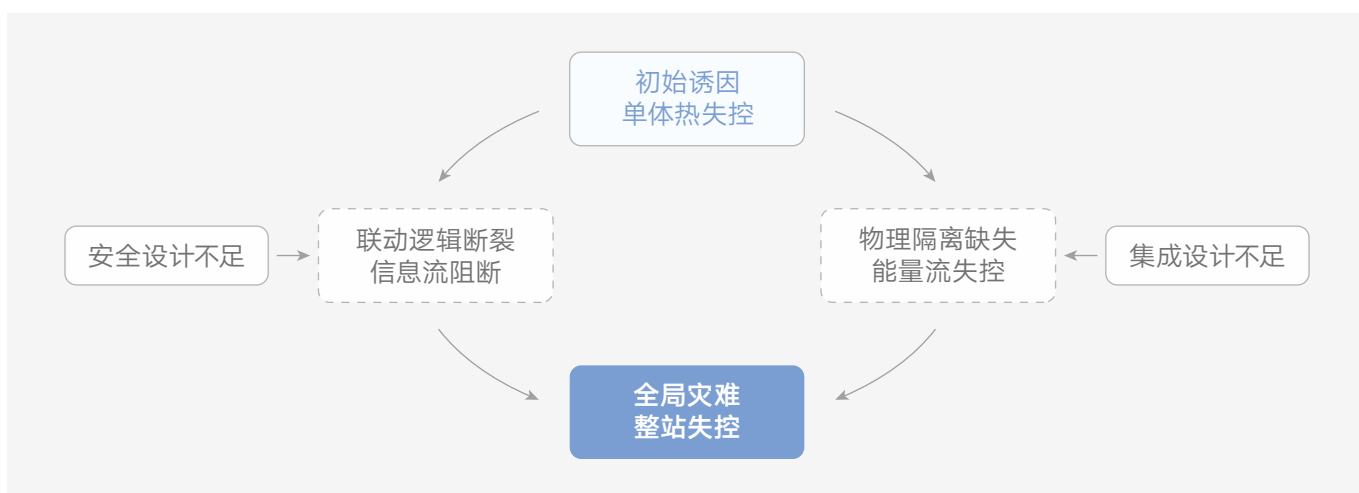


图 7：储能系统级隔离与联动缺陷

2.4 场站层：子阵级风险蔓延

随着 GWh 级大型储能电站的涌现,场站内众多子阵 (Block) 排布,当某一子阵发生极端热失控时,若缺乏科学的场站级防火设计,局部的高温热辐射及冲击波极易跨越单设备边界,引发相邻子阵的安全。这种跨子阵的连锁崩塌,将彻底击穿“局部可控”的安全底线,直接威胁客户整站资产的绝对安全。

2.5 电网层：稳定性与支撑能力不足

随着高比例新能源的接入,电力系统呈现“低惯量、低阻尼、弱电压支撑”特征,抗扰动能力显著下降。在极端天气或设备故障等冲击下,极易引发连锁脱网事故——比如 2016 年南澳大停电、2019 年英国大停电等电网安全事故发生,暴露出新能源高渗透场景下电网稳定性不足。

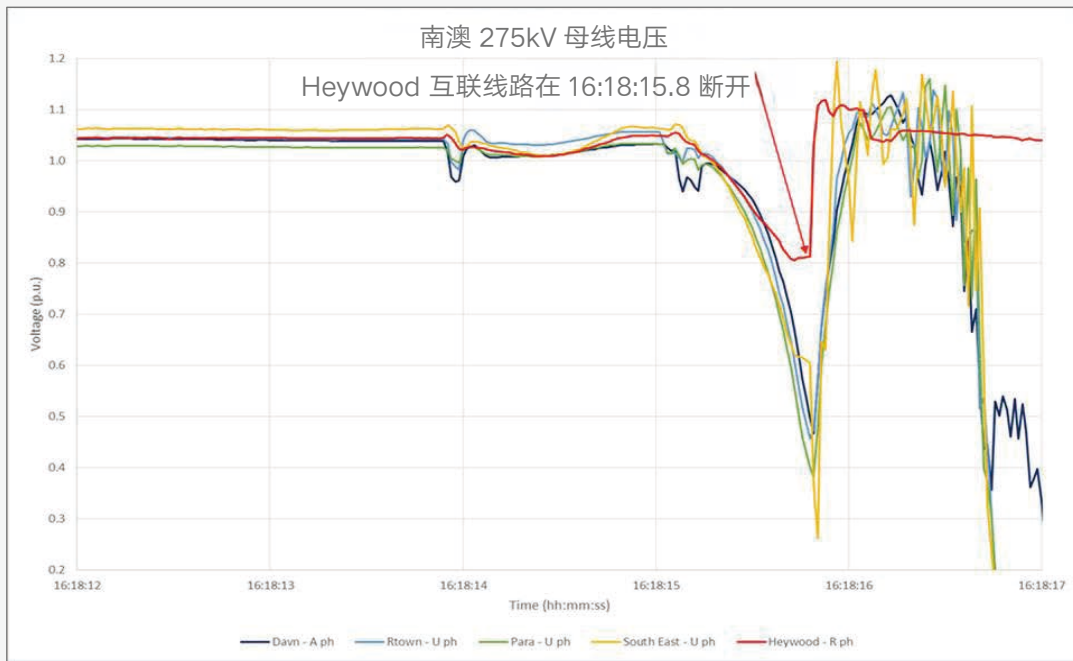


图 8：2016 年南澳大利亚州电网解列前 275kV 电压骤降过程

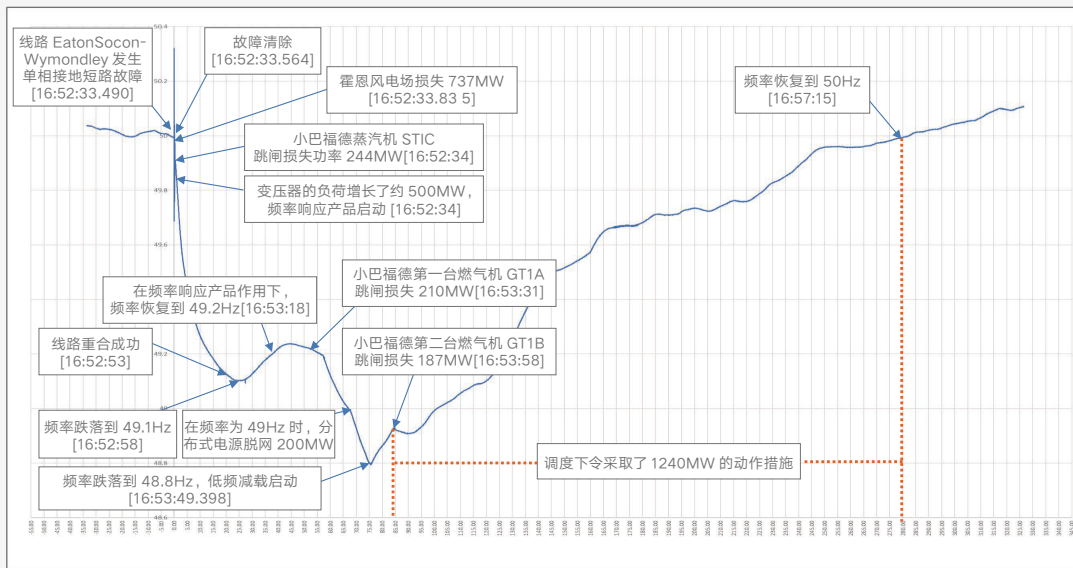


图 9：2019 年英国大停电事故中的频率跟踪记录

综上，储能安全风险本质是“多维耦合、全链穿透”的系统性挑战：空间维度上，电池侧热失控隐患、电气侧短路拉弧威胁、系统侧故障蔓延风险、电网侧惯量支撑不足构成“多重防线失守”压力；时间维度上，风险贯穿运输、安装、调试、运行至退役的全生命周期，任一环节疏漏均可能引发设备损毁甚至安全事故。这决定了储能安全绝非孤立的“单点防御”，而是需以“全要素识别、全流程管控、全层级协同”为核心的系统工程——唯有统筹电池管理、电气防护、系统集成与电网适配，构建覆盖“源-网-荷-储”的风险闭环，方能筑牢储能规模化应用的“安全底座”。

03

储能系统全维安全架构



阳光电源以“电化学、电力电子、电网”三大技术深度融合为底座，构建“**全层级 + 全周期**”的全维安全体系——以“全层级覆盖”破解空间风险，以“全周期护航”贯穿时间维度，用极致技术与严苛标准，为客户构建确定性的安全守护。

空间上，覆盖从电芯到电网的全层级守护。打破传统“器件级安全”模式，实现“电芯→电池模组→电池簇→电池舱→储能场站→电网”全层级覆盖，通过电化学（电芯安全）、电力电子（PCS/中压系统安全）、电网（构网支撑）技术协同，让每一层级风险“看得见、控得住”，彻底消除“局部失守引发全局灾难”的隐患。

时间上，从设计到退役的全周期护航。基于“**安全是设计出来的**”核心理念，将风险防控嵌入“设计研发→生产制造→运输安装→运行维护→退役回收”全生命周期，以“**零妥协**”标准贯穿每个环节（如运输防碰撞、安装防误触、运行防过充、退役防污染等），让安全从“被动应对”变为“主动预防”。

最终，以“全维安全”定义储能安全新范式：不是“单点优化”，而是“全要素识别 + 全流程管控 + 全层级协同”的系统工程；不是“分级安全”，而是“给所有客户同一最高标准”的责任承诺。阳光电源全维安全体系，为储能场站筑牢“**时空安全网**”，让每一度电的存储与释放，都始于安全、终于可靠。



图 10：储能系统全维安全架构图

3.1 电池层安全架构

随着储能场站规模越来越大，电池柜和电芯单体均向着大容量、高能量密度的方向演进。然而，在大电站的应用场景下，如何设计更安全的电芯路线是第一步，在此基础上，如何通过系统集成管好电芯，才是保障长期运行安全的关键。

1 设计好电芯

• 叠片电芯，更安全的选择

电芯容量超 500Ah 后，电芯宽度随之增加，拐角处应力加大，多次循环后，内应力无法释放可能导致断裂，引发脱粉、锂枝晶生长甚至内短路，继而引发热失控。针对 600Ah 以上大电芯路线选择，阳光电源联合电芯合作伙伴，基于系统定义 684Ah 短刀叠片电芯，采用平面堆叠极片，无拐角设计，使极片胀缩时受力均匀，避免卷绕工艺中弯曲部位的微裂纹与活性材料脱落，保障大容量电芯充放电结构稳定，降低安全风险。

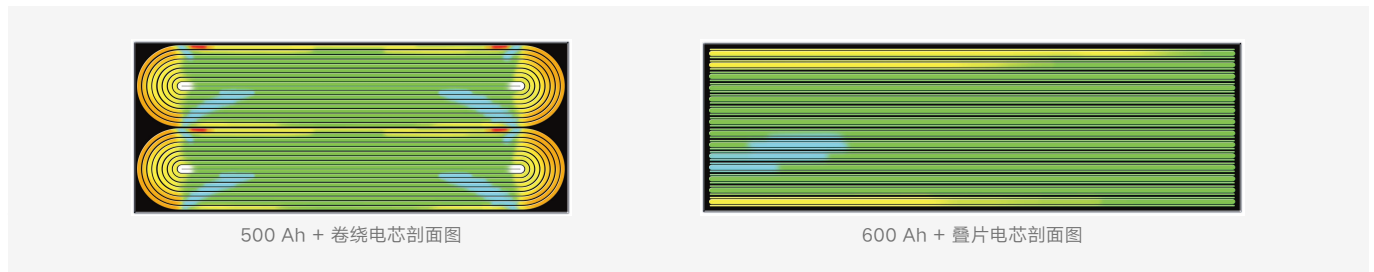


图 11：内部结构及应力分布示意图（颜色越深，应力越大）

• 热电分离，更安全的设计

常规的电池设计中，在电芯层级，防爆阀与极耳通常位于同一侧；在 Pack 内，电芯同向排布，防爆阀靠近相邻电芯的极耳。当单颗电芯热失控，通过防爆阀喷发出的气 - 液 - 固混合物蔓延至相邻正常电芯，可能诱发电池包内的热蔓延。



图 12：电芯层级 - 传统电芯 防爆阀与极耳位于同一侧（左）；Pack 层级 - 单芯热失控，高温气体快速影响相邻电芯

针对上述问题，阳光电源创新设计，将电芯极柱与防爆阀异侧布置；在 Pack 内，两列电芯对称布局，实现热失控泄压区与正负极柱在空间上的远离，若出现单体电芯热失控，高温气体不会直接向邻近电芯极柱蔓延，避免诱发电池包内的热蔓延，从设计上保证模组安全。

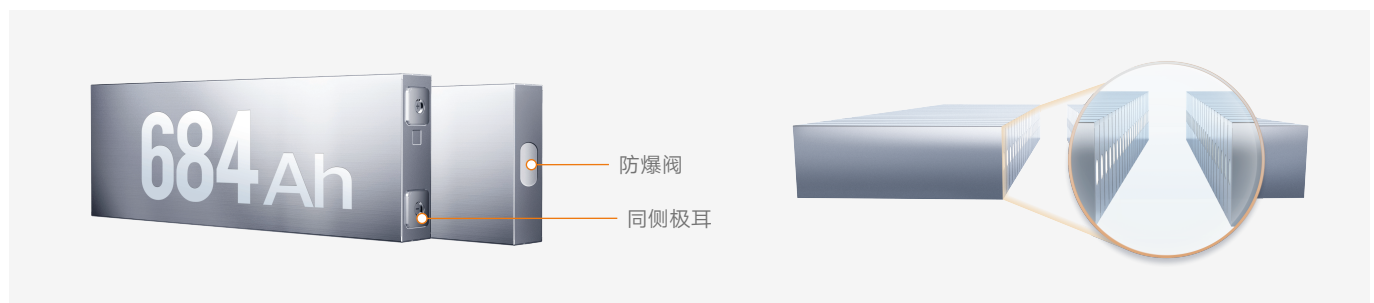


图 13：电芯层级 - 电芯热电分离设计（左）；Pack 层级 - 电芯背靠背布局

2 管好电芯

在储能系统中，“设计好电芯”是基础，但随着全生命周期的运行，受充放不均、工况滥用、环境温差等因素影响，即便初始一致性很好的电芯，也可以发生病变和热失控。因此，“管好电芯”才是全生命周期安全的关键。目前行业的主要挑战，主要集中在电池状态估不准，系统联动能力差两大方面。

磷酸铁锂电池的SOC和SOH估算是行业普遍难题，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%，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，会导致电池持续过充，从而热失控，这是电池状态估不准带来的潜在风险。

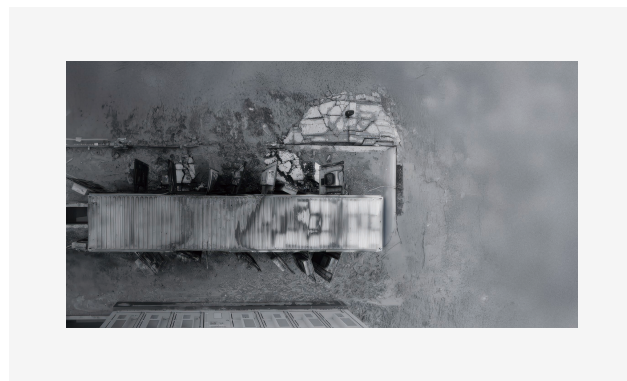


图 14：2023 年某 20MWh 储能电站因 SOC 估算误差达 66% 持续过充引发热失控火灾

储能系统包含 BMS、PCS、EMS 等多个子系统。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，以及 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，这些都造成了电池管理数据不能在系统中充分发挥其价值。另外，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，单一故障断层响应可能造成系统局部因电、热应力过大冲击而失效的问题，给储能系统带来损失。这是系统联动差导致的数据孤岛与控制断层。

阳光电源针对“估不准”和“联动差”的行业难题，基于全栈自研的系统优势，通过 BM²T 电池管理技术 (Battery Monitoring & Management) 为储能系统打造信号可感、状态可知、联动可控三层电池管理架构，致力于实现储能系统安全、高效与长寿命的目标。

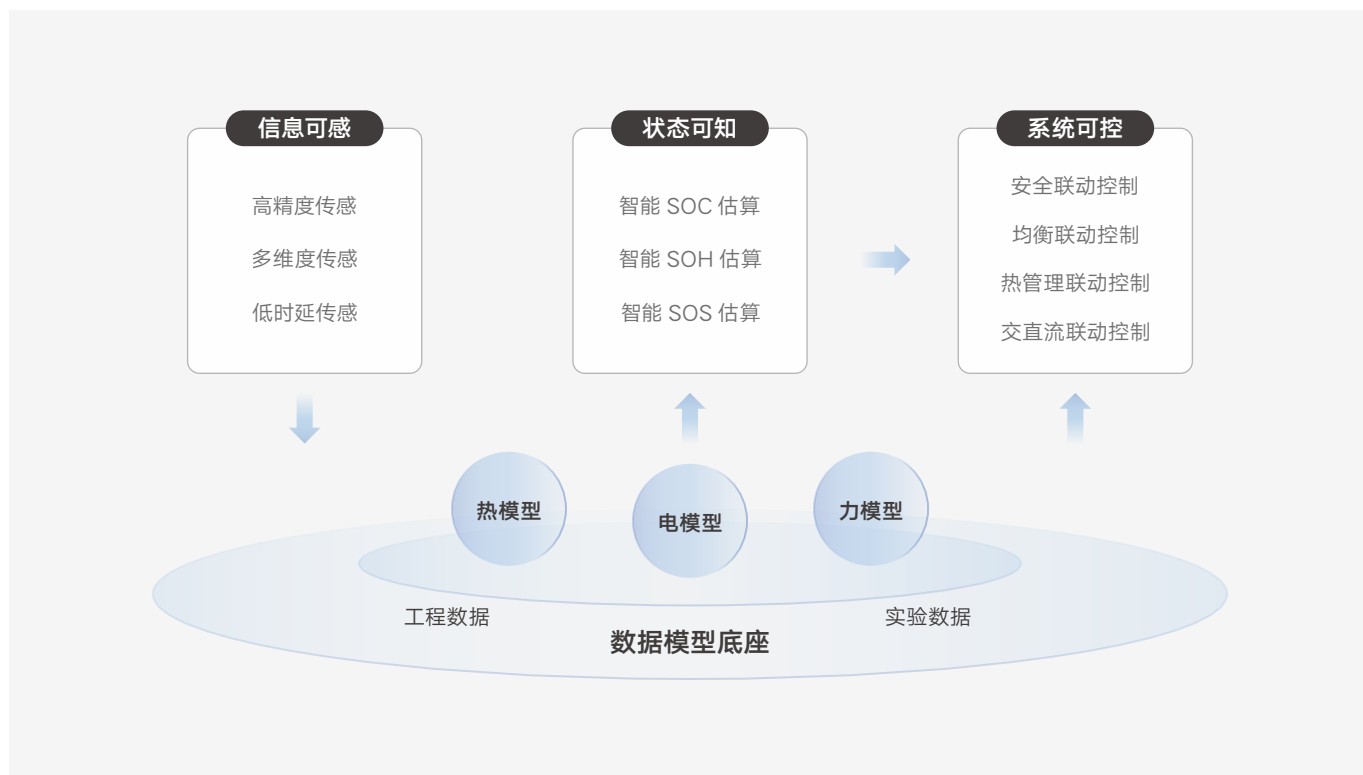


图 15：BM²T 智能化电池管理技术架构

信息有效可感：超越 VIT 的多维度感知

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、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，实现电池单体级 SOH 估算误差 < 2%，电池簇 SOH 估算误差 < 3%，SOC 估算误差 ≤ 3%。

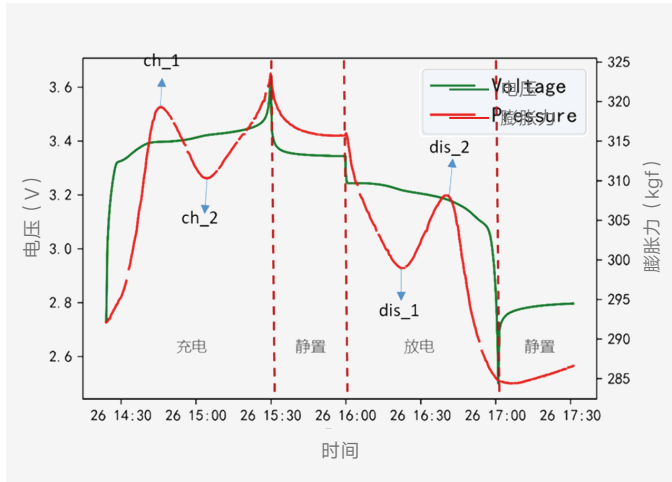


图 16：电池充放电双峰呼吸效应图

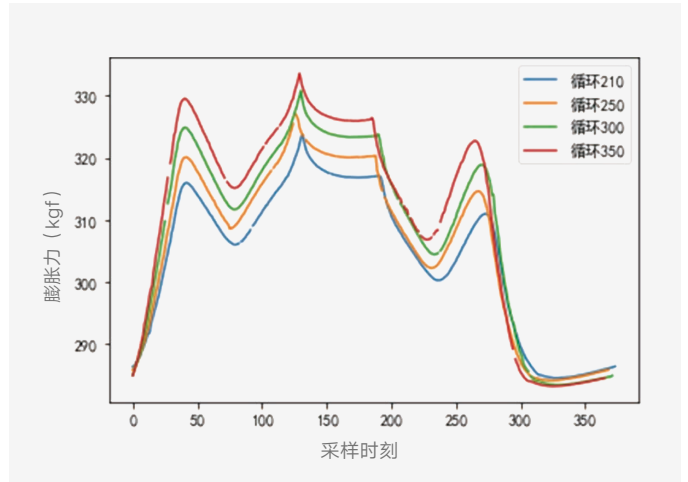


图 17：电池膨胀力随老化逐渐增大

状态精准可知

在复杂的运行环境中，依靠单一参数难以精准评估电池状态。阳光电源基于电化学机理与多物理场耦合建模，构建覆盖从析锂到热失控的全域安全状态（SOS）评估体系，是实现状态精准可行的核心。

① 析锂预警准确率 ≥ 95%

通过分析电池运行及静置时的电压 - 容量曲线特性，建立电池析锂特征动力学模型，重点捕捉充电末期及静置弛豫阶段的电压异常波动信号。利用高精度数据采集与信号处理算法，可有效识别早期析锂，诊断准确率超过 95%，从而预防因锂枝晶生长引发的内部短路风险。

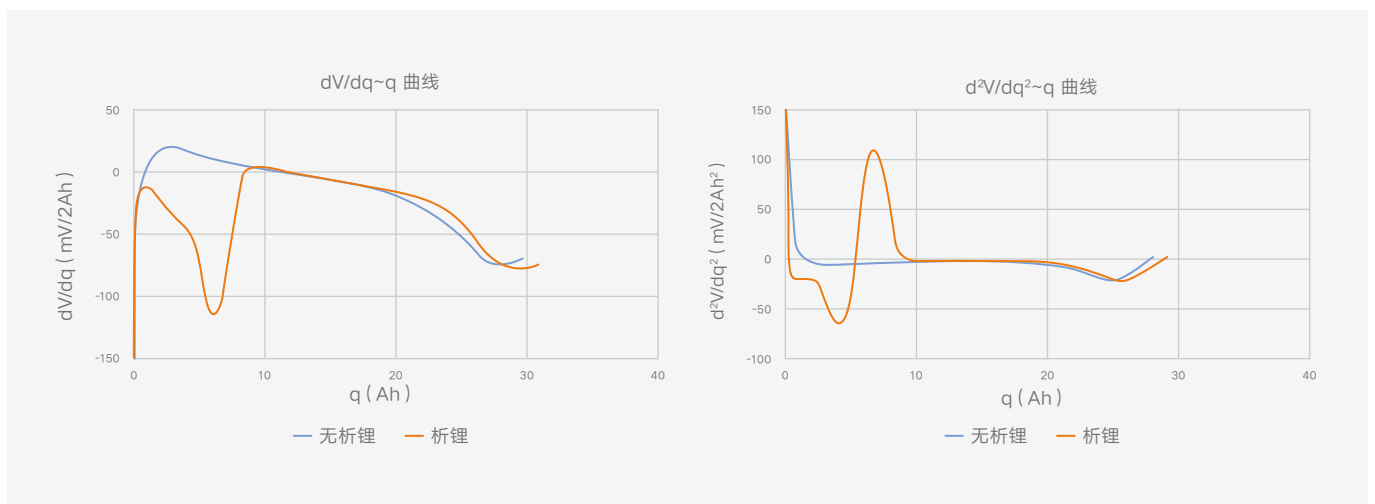


图 18：电压 - 容量二阶微分识别析锂技术原理

② 热失控预警准确率≥99%

通过解析极端工况下机 - 电 - 热 - 力多维度信号的耦合演化规律，建立动态模型。对多参数进行融合分析，可以弥补单一维度判断的不足，及时捕捉热失控早期迹象。该技术可实现提前5分钟预警，准确率≥99%；提前10分钟预警，准确率≥95%，大幅减少误告警和非计划停机。

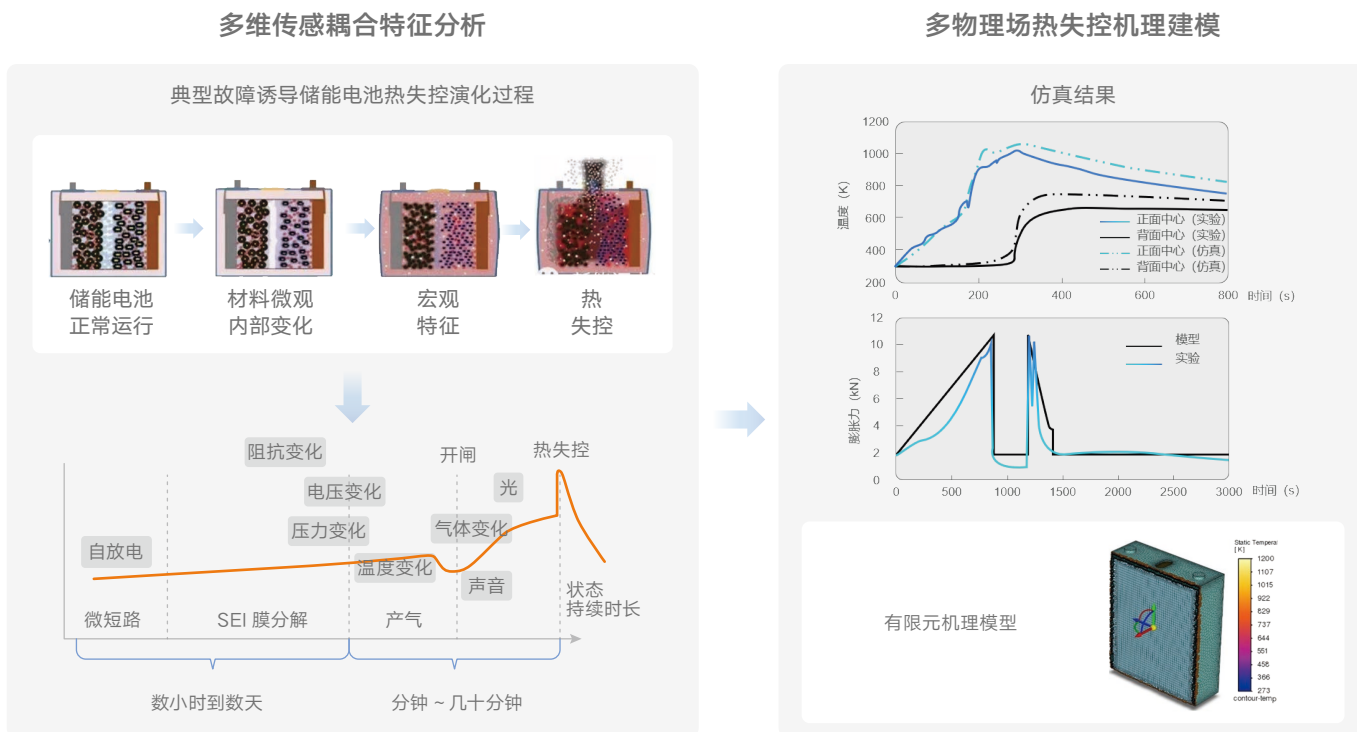


图 19：热失控预警机理建模

• 系统联动可控

提升感知与诊断能力的最终目的，是实现系统层级的智能化联动控制，使储能系统成为一个有机整体。

① 多级安全联动控制

通过簇级、电池堆级、中压级、模块级的多层级冗余保护设计，可实现故障及时保护的同时，系统软停机，电气回路能被可靠、及时地分断。

② 多级均衡联动控制

为了解决电池单体间 SOC 不一致性问题，传统电池单体级均衡能力有限。新型管理系统通过构建从电芯到整站级的数据通道，实现了多级协同均衡管理：在电池簇内执行被动均衡，在模块级进行主动均衡；在子阵级和场站级，基于全局数据实施跨簇、跨子阵的功率动态分配与均衡策略，从而系统性提升整体能效、延长电池寿命并保障场站安全。

更多电池管理技术详见《阳光电源 BM²T 电池管理技术白皮书》：



3.2 电气层安全架构

结合 2017-2023 年储能火灾事故统计（如图 20 所示），电气故障被确认为引发系统热失控的诱因之一，集中表现为短路和拉弧两大类。具体而言：液体侵入、凝露或绝缘退化易导致短路，引发大电流冲击与局部过热；连接件失效引发的持续拉弧，产生高温热源、引发火灾。鉴于短路与拉弧是故障演化至起火的主要路径，本白皮书将围绕这两大诱因，提出系统的电气安全控制策略。

储能事故	原因
2017/3/7 中国山西某 AGC 调频项目发生火灾	因连接点间拉弧引发
2018/6/15 韩国全罗北道群某 19MWh 储能项目发生火灾	因漏水导致绝缘老化引发
2018/8/3 中国江苏某用户侧储能项目发生火灾	因反接致电池簇过充引发
2018/12/22 韩国某 2.662MWh 储能项目发生火灾	因电池漏液引发
2021/7/30 澳大利亚某 450MWh 储能项目发生火灾	因漏液、短路引发
2022/9/20 美国加州某 730MWh 储能项目发生火灾	因漏雨、短路引发
2023/4/26 瑞典哥德堡某未投运储能集装箱发生爆炸	因漏液、短路引发
2023/6/26 美国纽约某 36MWh 储能项目发生火灾	因漏雨、短路引发
2023/12/28 中国台湾某电厂测试新增储能系统时发生火灾	因电池柜外部短路引发
.....	

图 20：电气故障引发的火灾事故统计

1 短路风险防控

液冷储能系统具有液冷管路密集、接头繁多复杂的结构特点，同时长期暴露在户外复杂多变的环境中运行，受温差大、湿度高、雨雪极端天气等气候影响，容易出现冷却液泄露、渗水或凝露风险，给日常维护、安全管理带来多重困难与挑战，由此也成为历来储能短路火灾事故的重要诱因之一。

• 内部泄漏风险管控

在储能系统全生命周期运行和维护中，因操作不当、密封性能下降等导致漏液，可能引发液体进入电气区造成端子短路或拉弧，严重时甚至会诱发热失控与火灾隐患。

为降低上述风险，储能系统可以在液冷端子与内部结构上采用多重防护，通过“**不漏液—液路隔离—漏液告警**”的闭环设计，从而降低系统短路风险，提升整体运行的安全性与可控性。

① 液冷端子自密封，插拔不漏液

储能系统通过**液冷端子自密封结构专利设计**，在运维人员进行插拔补液操作时，可实现液路自密封，有效避免冷却液泄露，从而降低因操作不当引发的漏液风险。凭借该设计，系统在数十万项目应用中，保持零泄漏记录，充分验证了可靠性。

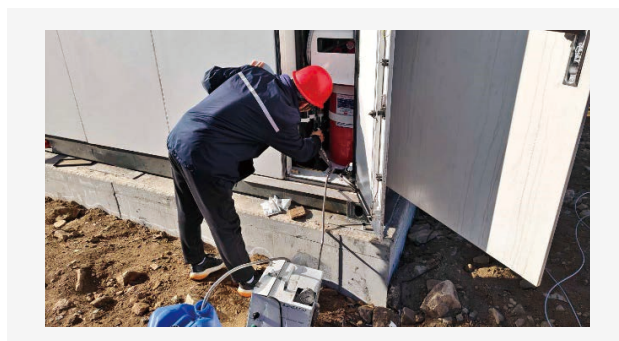


图 21：运维人员正在补液维护

② 液电分离专利设计，漏液不短路

为进一步降低操作不当引发的漏液与电气风险，储能系统通过液电分离专利设计，重塑液冷 Pack 与 PCS 的内部结构，实现液路与电路完全隔离，降低冷却液接触带电部件的风险，从而在有限空间内同时实现高效散热与电气安全。

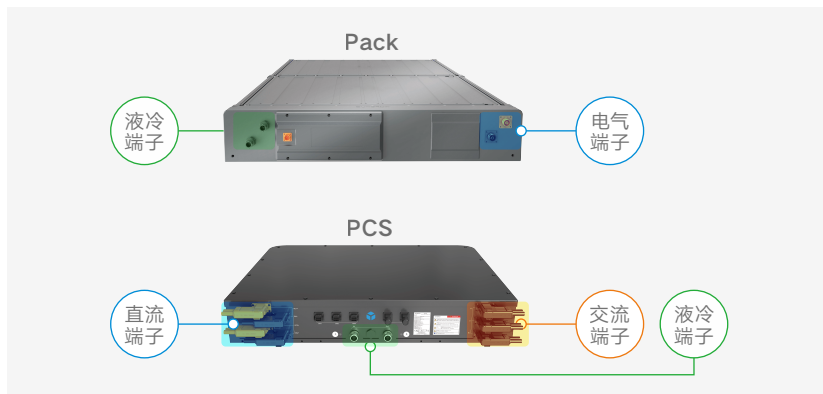


图 22：PowerTitan 3.0 Pack/PCS 液电分离设计

漏液发生后，为实现液体的定向引流与电气风险隔离，储能系统不仅在电气连接上采用了 IP65 航空插头，确保 Pack 电气区域的高防护等级，同时还在储能柜底部设置导流槽、集液腔与排液口，构建专用排液通道，确保一旦发生漏液，液体能够迅速、安全地流出，避免流入电气区域，防止电气短路风险，增强系统漏液应急处理能力。

③ 多维风险感知，漏液早知道

为进一步降低液冷储能系统运行中的不确定性，实现漏液早发现、早处理，阳光电源在储能电池、PCS 全系统中采用漏液监测技术。该技术通过“液位、流量、压力”三维协同感知，秒级捕捉冷却回路异常，立即触发主动告警 / 单机停机机制，避免故障扩散，让系统在液冷环境中具有更高的稳定性与可靠性。

外部侵蚀风险防御

在储能系统全生命周期中，面临复杂多变的环境气候挑战，若密封不足或设计不当，外部雨水渗漏、高温气体及凝露等容易侵入电气区，可能引发端子短路，进而诱发热失控与火灾。2025 年 12 月美国某储能电站火灾事故即为典型案例：官方调查确认，该事故系系统制造缺陷导致水份渗入，最终诱发短路火灾。



图 23：美国某储能电站因渗水短路起火
(图片来源于主流媒体新闻报道)

针对雨水渗入、凝露问题和湿气积聚等导致储能系统绝缘失效，引发内部短路、热失控，并最终造成火灾、爆炸的风险。阳光电源对储能系统进行了“**防进水、防凝露、防湿气**”的三防设计：

通过整机 IP55 密封设计、端子与连接点的 IP67 高等级防护等设计，有效防止外部雨水进入，避免因受潮湿引发电气短路和热失控风险；储能柜体采用高性能隔热保温材料，抵御外部环境变化对舱内的影响，有效防止舱内凝露；通过“1 舱 2 机(除湿机)”分区除湿设计，快速降低储能系统舱内湿度，即使在开柜运维完成，关门后可以快速清除残留水汽，确保系统长期稳定运行。



图 24：中国山东潍坊 28MW/56MWh 近海储能项目，运行可靠高效

2 拉弧风险防控

拉弧现象存在于交流和直流电源系统中，常发生在电气设备连接处与开关位置，主要由连接点接触不良、绝缘材料老化损坏或电路突然断开等因素引起。

相较于交流电弧在电流过零点时可自然熄灭的特性，直流电弧由于没有过零点，不间断的电流一直为电弧的产生提供能量，电弧将持续存在，难以熄灭，这更易引发电池、线缆等易燃物发生火灾。此外，随着储能系统容量的扩大和连接点数量的增多，直流侧潜在的故障点和能量水平的提升，直流拉弧故障一旦发生，潜在危害和事故严重性将大幅增加。

• 全面防弧

① 器件级源头预防

基于工程实践的保守估算，外部直流线缆长度每增加 10 米，潜在的连接点或安装缺陷点将增加 3~5 个，这将导致外部拉弧故障的概率增大。此外，长期暴露在外的直流线缆面临更严峻的环境侵蚀与异物损伤风险，一旦发生故障，极易引发火灾或造成设备损坏。

面对传统储能难以规避的直流线缆暴露痛点，阳光电源创新推出的 **AC 存储架构**，在追求极致能效与精度的同时，也前瞻性的解决了直流线缆拉弧安全风险：通过 PCS 嵌入电池柜内，实现“**直流不出柜**”，缩短了直流线缆长短并大幅减少了线缆的外部暴露面积，有效规避外部环境导致的绝缘拉弧风险。针对柜内拉弧隐患，阳光电源储能系统加强绝缘性能、提升连接点稳定性和采用汇流区铜排相隔离设计等，降低直流拉弧发生和扩散概率。

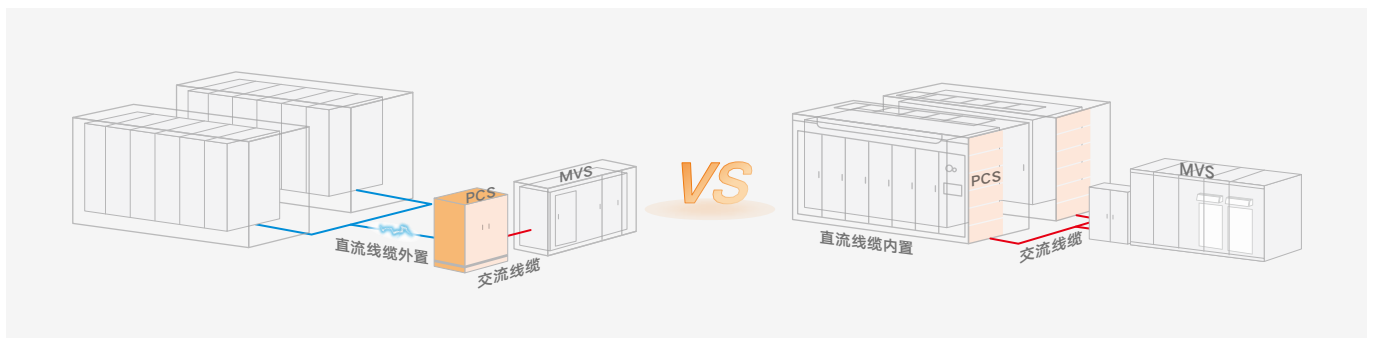


图 25：直流线缆外置 VS 直流不出柜

同时为把安全留在现场、留给客户，阳光电源储能系统直流侧的安装与接线工作在工厂依照严苛出厂标准预制完成，配合“直流不出柜”标准短线缆设计，不仅消除了现场人为装配误差，更大幅减少直流连接点数量，保障连接点的长期可靠性，为客户带来更高系统安全性和运维可靠性。

② 全链路隐患隔离

针对运输和安装过程中可能出现的高压短路风险以及系统运行期间的过流隐患，阳光电源构建了**全链路分级过流保护体系**。该体系覆盖 Pack、Rack、PCS 交直流侧、MVS，其中**簇内熔断**作为行业首创的关键环节，能够在电池簇内部快速切断故障电路，确保故障能量快速有效地隔离在起点，遏制短路电流引起的连锁反应，大幅降低短路拉弧引发的起火风险。这一首创设计进一步强化了系统的本质安全。

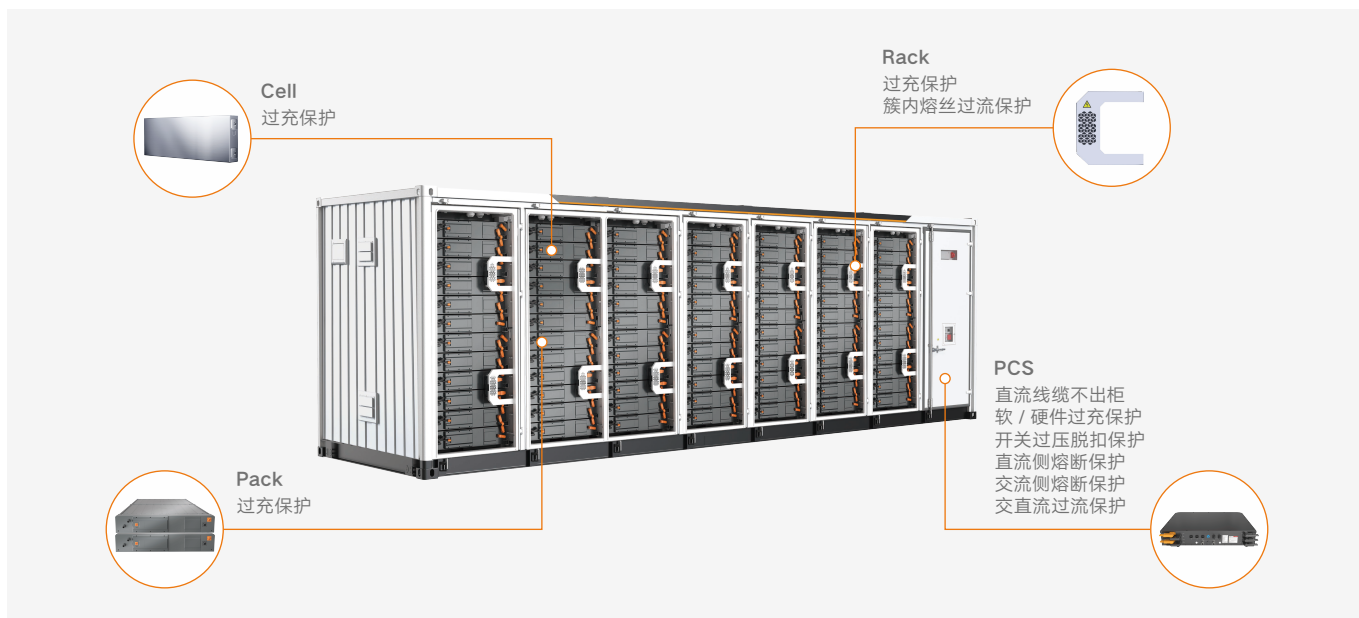


图 26：全链路分级过流保护体系

③ 24h 绝缘风险预警

储能电站运营周期普遍长达 15~20 年。在长期运行中，电气设备和线缆持续遭受热、机械和环境应力，导致绝缘材料的退化和老化，这种隐性的绝缘退化一旦达到临界点，易引发严重的拉弧故障。

为应对交直流侧绝缘退化等隐性风险，还需要电气绝缘监测来形成防弧安全闭环。储能系统可配备 24h 交直流绝缘监测功能，可在启机前完成直流侧阻抗检测，在运行中持续监测交流侧绝缘，实时上传并分析相关数据，主动预警绝缘异常，避免演化为拉弧风险，从而显著提升系统的整体安全性与可靠性。

主动灭弧

在储能全生命周期的复杂场景中，由于环境复杂多变，虫鼠咬、异物入侵或突发撞击等极端突发情况难以预控，系统还必须具备主动的控弧能力。

ArcDefender 直流拉弧关断技术正是为了应对上述极端风险而生。该技术通过 TMR 传感、数据监测和动态弧识别算法等核心功能，实现了精准识弧、极速灭弧，保障储能系统在高电压、大电流复杂运行环境中安全稳定，降低极端情况下的安全风险。



图 27：ArcDefender 储能直流拉弧技术方案

多场景

跟网、构网不同场景下,100% 高精度检测。

宽电流

覆盖 mA 级至 500A 级宽电流范围电弧。

快抑制

0.1s 内完成识别与灭弧,瞬间抑制风险扩散。

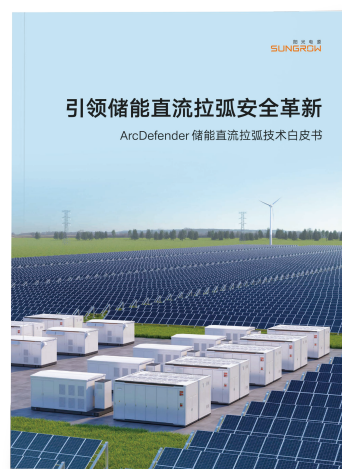


图 28: 鉴衡 Level4 等级认证

图 29: TÜV 技术先进性认证

综上,阳光电源通过架构创新、风险监测与主动保护等协同,针对短路、拉弧风险实现早期可感、过程可控、事发可断,显著降低电气故障概率和范围,进一步提升储能系统安全性。

了解更多拉弧安全技术详情,请参阅《ArcDefender 储能直流拉弧技术白皮书》:



3.3 系统层安全架构

在储能系统迈向大规模的进程中,安全风险呈现系统级特征,传统“各自为战”的安全配置已难以应对。阳光电源以系统级安全为标准,守护场站安全。

1 系统级功能安全验证

行业率先通过 IEC 61508 权威认证

随着储能技术向高集成度、大容量方向演进,系统的复杂性日益提升,这对系统级安全提出了更严苛的挑战。单纯依赖设备可靠性已不足以应对潜在风险,必须通过系统级的功能安全设计,确保在单一组件失效或系统异常时,仍能有效阻断风险扩散,防止热失控等次生灾害发生。基于这一严谨的安全设计理念,阳光电源储能系统依据国际通用标准进行了全方位评估,行业内率先通过 IEC 61508 验证并获得行业最高 SIL 2 等级报告。

获此认证不仅代表了元器件的可靠性,更验证了系统在软件架构、故障诊断、冗余设计及抗干扰能力上的领先水准,意味着系统在面临潜在危险故障时,拥有更确定的失效保护能力,将风险概率降至最低。



图 30: IEC 61508 验证报告

8 大系统安全防护体系

基于 IEC 61508 标准，阳光电源构建了覆盖电压、电流、温度三大核心要素的“8 大系统安全防护体系”，对电芯及系统状态进行毫秒级实时监控。确保在通讯失效或单一指令失灵的极端工况下，仍能通过物理手段强制切断回路，让系统处于安全状态，不发生过充、过放、过流、过温，继而不会发生热失控。

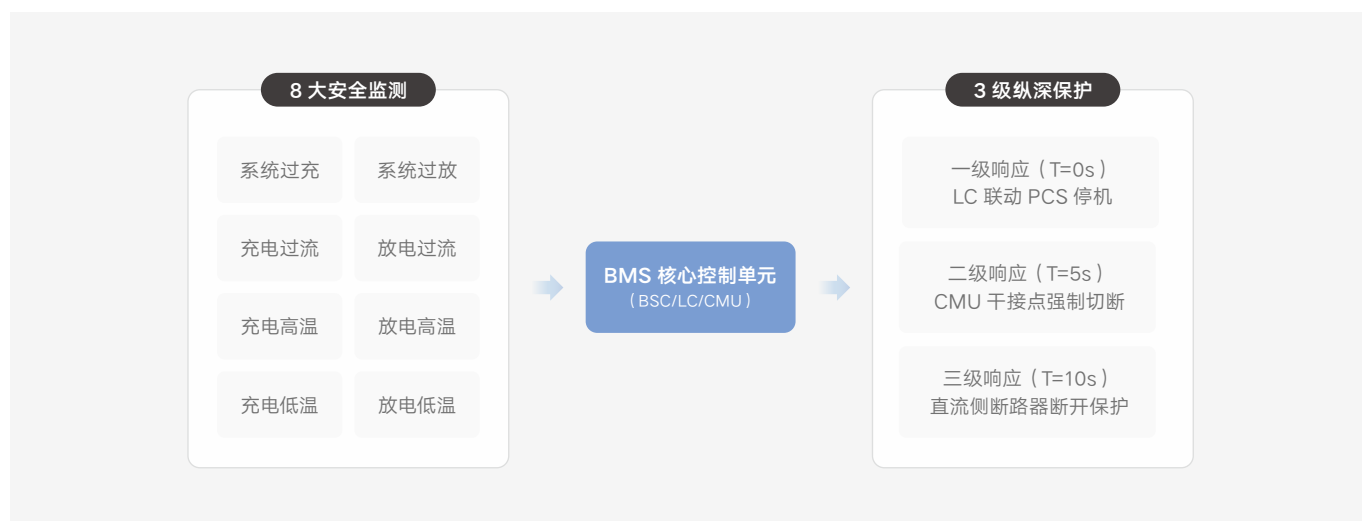


图 31：8 大系统安全防护体系

2 联控消防系统

电池火灾属于化学能与电能叠加释放的复杂火灾，灭火难度远超传统电气火灾。当前多数储能系统的消防仍陷入“重消轻防”的被动响应机制，未能实现智能联动与早期预控。

阳光电源坚定主张：“**极致的安全是前置设计和制造出来的**，而不是事后扑灭出来的。”为此，我们颠覆传统被动消防逻辑，创新提出“**以防代消**”理念，**将安全防线前移**。我们强调，产品的安全从最开始的设计研发就应该确定安全边界，其次在产品生产制造过程中侧重质量安全，很多储能系统火灾的发生是因为先天存在设计缺陷和制造缺陷，最后消防的重心还应转向火灾发生前的软件智能预警与极早期异常探知，真正做到“防患于未然”，而传统的水、气灭火机制，仅作为应对极端情况的最后兜底手段。

基于此理念，阳光电源研发了联控消防系统，**严格遵循UL9540A、NFPA855/69/68/13等严苛国际标准**，打造“**极端热失控不起火**”的安全防线。该系统创新采用“**隔一探一控一排一泄一消**”六重防护架构，实现从“主动预防”到“严密兜底”的立体化管控，全方位守护消防安全：

- ① **隔**：电池舱与综合舱独立设计，电池舱壁采用高性能阻燃材料，有效延缓相邻腔体间的热传导，舱壁耐火超过 2 小时。

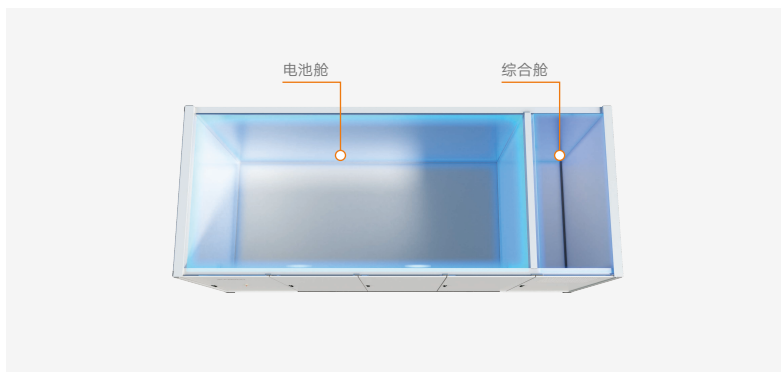


图 32：电池舱与综合舱独立设计

② **探**：集成烟雾、温度、气体探测系统，多种探测信号通过控制系统进行分级报警，避免单一传感器误报或漏报，当任一关键参数超过设定阈值，如烟雾颗粒、温度值或速率、气体浓度值和速率，或多参数同时呈现异常趋势时，系统快速识别并发出报警，实现早期异常识别与报警。

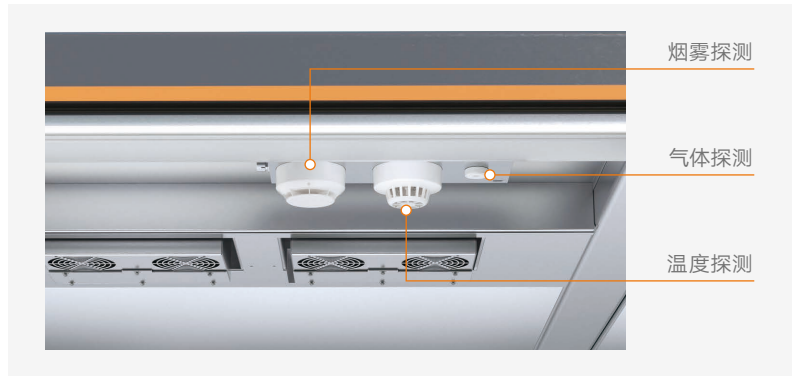


图 33：三重探测系统

③ **控**：依托 BMS 与 AI 大模型，实现电芯级状态的毫秒级实时监控与极早预警。在探知到早期微观异常后，系统主动触发防御策略，毫秒级切断故障回路，彻底隔离电气危险源。通过提前斩断电热耦合链条，从源头阻断热失控的级联蔓延，将隐患化解于起火之前。



图 34：热失控预警

④ **排**：储能柜采用多点布置的排风口设计，并对箱体内部风道进行结构优化。通过箱体左侧进风、顶部出风，形成气体流道，建立明确、可控的气体释放路径，持续排出可燃气体，使箱体内可燃气体浓度低于爆炸下限。

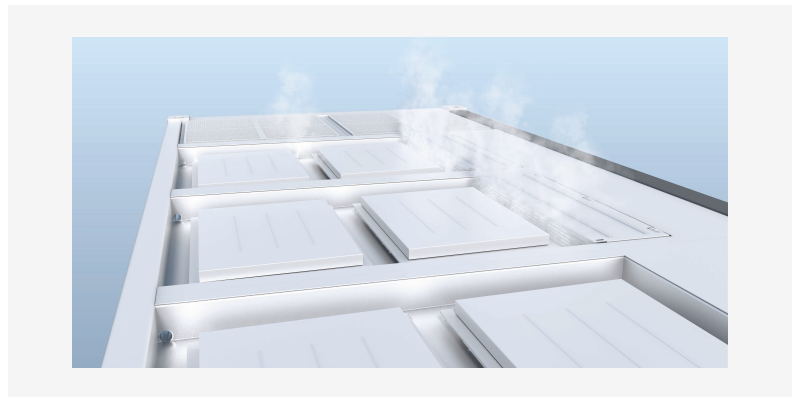


图 35：排气系统

⑤ **泄**：系统采用顶部定向泄爆设计，通过自感应泄爆装置实现主动、可控的压力释放。当电芯热失控产生大量可燃气体，并在点燃条件满足时发生爆燃，引起舱内压力快速上升，泄爆装置在预设压力阈值内自动开启，形成定向泄压通道，将可燃气体和冲击能量向上释放，避免压力在舱体内累积，从而防止箱体结构破裂。



图 36：泄压泄爆系统

⑥ **消**：采用气体（气溶胶 / 气体钢瓶）+ 水消防复合灭火策略，集成自动灭火装置，在火源形成初期快速响应，实现精准灭火。

气体灭火（气溶胶 / 气体钢瓶）

在探测系统识别到热失控或早期燃烧特征后，气体灭火装置启动后，迅速释放灭火介质，通过抑制自由基反应、破坏燃烧链式反应的方式，优先遏制火源扩散。该阶段重点作用于初起火情和局部失控区域，为后续水基灭火争取关键时间窗口。

水立体消防

系统顶置喷头，形成对电池舱内部的喷淋覆盖。当火势持续发展或温度达到更高阈值时，水消防系统自动联动启动，通过持续降温和吸热的方式，显著降低舱内温度，防止火势复燃和热量向相邻舱体传递。喷头布局经过优化设计，确保对关键热源区域的均匀覆盖，避免灭火盲区。

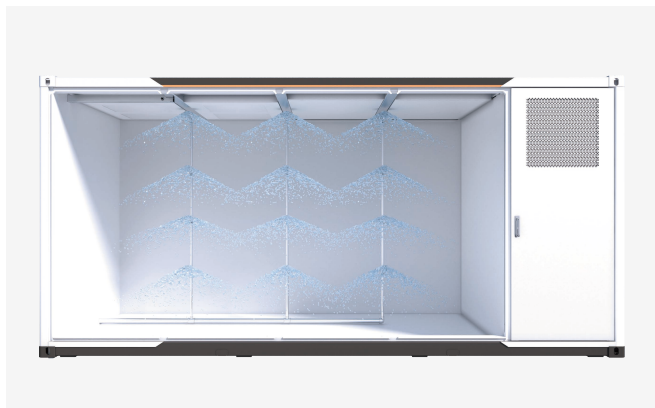


图 37：水消防

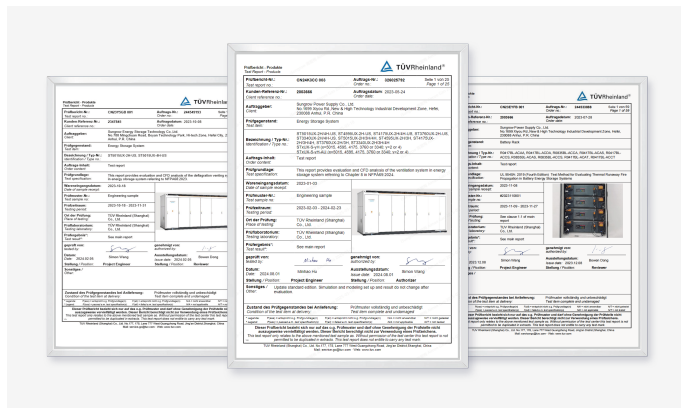


图 38：NFPA68/NFPA69/UL9540A

3.4 场站层安全架构

客户真正使用的不是单柜、不是系统，而是**整站级储能资产**。单柜或系统级安全仅能解决“局部失守”，却无法阻止故障在“设备孤岛”间蔓延（如某簇电池热失控扩散至全场站），唯有将安全视野升维至**整站维度**，才能真正匹配客户对“资产安全、运行可靠”的核心需求。

阳光电源通过“**站级视角统筹单柜能力**”，让每一台设备、每一个子系统都成为“安全拼图”的一部分。阳光电源场站级安全架构，为客户交付的不是“单柜合格”，而是“**整站可靠**”——让储能资产从“可用”到“敢用”，真正成为客户放心的“能源堡垒”。

1 大规模燃烧测试

传统储能安全验证多停留在PACK、簇等设备层级，忽略了场站级的热蔓延风险。为保障客户全生命周期的资产安全与投资收益，阳光电源以“**场站级思维**”重构验证体系：突破单柜测试局限，模拟真实场站规模的极端燃烧场景，力求在极限工况下做到系统间的“各不干扰”——**确保单一子阵热失控不向外蔓延**，避免“火烧连营”，从而保障整站安全。

基于此，阳光电源成为行业首个开展大规模实体燃烧测试的企业。在挪威船级社DNV的见证下，完成两次全球最大规模燃烧测试，推动并**引领国际储能安全标准的建立与完善**，为全行业树立了“场站级安全”的新标杆。

• 实验条件

构建 20MWh 真实电站场景，配置四台 PowerTitan 2.0 储能系统，其中，A 箱与 B 箱以 15cm 背靠背方式布局，无防火墙；系统处于 100% SOC 满电状态；环境风速为 3.3m/s。模拟最真实热失控场景，实验中主动关闭所有消防系统，并破坏性加热与点火 A 箱中的 52 颗电芯，引发电芯热失控，以评估系统安全防护能力。



图 39：实验布局图



图 40：PowerTitan 大规模燃烧测试现场

• 实验结果

- **结构完整、定向泄压：**泄爆板自感应开启，精准泄压泄爆，箱体结构牢固完整，无变形，无飞溅物；
- **无热失控蔓延：**实验进行 14 小时，火势达到顶峰，A 箱温度最高达 1385°C，相邻 B 箱电芯温度最高达 42°C，B/C/ D 箱未发生热蔓延，无热失控风险；
- **燃尽未熔穿、无复燃：**经过 26 小时不间断燃烧，A 箱无复燃，箱体无烧穿，B/C/D 箱保持完好。



图 41：实验结束后
B 箱可用度为 99%，C 箱可用度为 100%，D 箱可用度为 100%

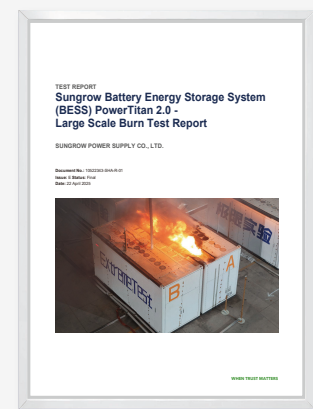


图 42：PowerTitan 大规模燃烧测试报告

2 网络联动安全方案

随着储能系统数字化程度的加深及与电网交互的日益频繁，网络安全已成为系统运行中不可忽视的一环。为此，阳光电源创新构建“VDT 三级隔离防护”和“全栈联动防御体系”，全方位保障储能系统的“信息流”安全。

• VDT 三级隔离防护

遵循全链路“**可视 -Visible、可防 -Defensible、可溯 -Traceable**”的 VDT 安全设计原则，搭建了三级隔离防护体系，通过“通信链路加密层 - 协议交互防护层 - 云端传输保障层”的层层递进，实现储能数据在全生命周期中的保密性、完整性及可用性，严格防范数据泄露、恶意篡改及未授权访问风险，符合国际网络安全标准（如 IEC62443-4-2）。



图 43：VDT 三级隔离防护

• 全栈联动防御

面对复杂多变的 APT（高级持续性威胁）攻击，传统的单点防御已难以招架。阳光电源创新引入“端 - 网 - 云”联动机制，打通 PCS、LC（本地控制器）、EMS 及边界防火墙的安全策略通道。如果我们的 firmware 固件包被篡改，系统能够识别并进行完整性校验并告警，防止恶意程序运行。

应用层：智能监测用户与设备行为，自动识别异常，保障核心资产全天候安全。

平台层：隔离开发、测试与生产环境，阻断风险扩散，降低攻击可能性。

通信层：加密传输与强身份验证，保护 EMS、PCS 等设备间的数据传输防窃取、防篡改、防伪造。

设备层：严控访问权限与账户安全，实施强密码与防暴力破解策略，为 PCS、LC 等关键设备筑牢防线。

阳光电源以“VDT 三级防护隔离 + 全栈联动防御”双体系，筑牢能源网络安全防线，抵御网络威胁，护航电站稳定运行。

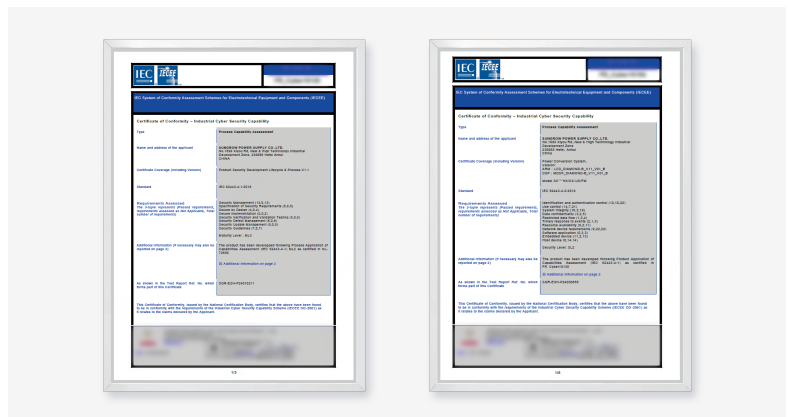


图 44：IEC 62443-4-1/IEC 62443-4-2

3.5 电网层安全架构

随着全球能源结构向低碳化转型，可再生能源在电力系统中的渗透率快速上升。随着以电力电子接口为主的新能源大规模接入，系统惯量和天然阻尼水平下降，电网运行特性发生变化，频率、电压、功角及宽频稳定性面临新的挑战。

然而，电网安全并非仅取决于 PCS 的调节能力，更依赖于交直流侧的深度协同。“干细胞构网技术”面向新型电力系统需求，在不同网况、不同场景下，确保直流侧电池安全高效的充放电，为交流侧提供稳定的能量支撑。通过系统级协同，全方位实现频率、电压、功角稳定及宽频振荡抑制，为电网的安全稳定运行提供坚实保障。

1 频率稳定

新型电力系统的系统惯量不断降低，有功功率支撑能力弱，造成频率波动加大、频率偏差超限等问题，甚至引发大面积停电，影响电网安全稳定运行和用户供电可靠性。

阳光电源采用**柔性频率控制技术**，通过实时监测频率变化率来感知电网扰动强度，实现在扰动强时自动增加虚拟惯量、扰动弱时自动减小虚拟惯量的动态调节机制，可在电网强度 SCR1~100 内快速响应有功功率，支撑频率稳定。2023 年 12 月 23 日，由于英国和法国之间的一个高压传输线路突然跳闸，英国电网在瞬间损失了 1GW 的电力，系统频率从 50Hz 骤降至 49.3Hz。位于英国门迪的阳光电源储能电站 1 秒内快速响应，助力电网频率 5 分钟内恢复。

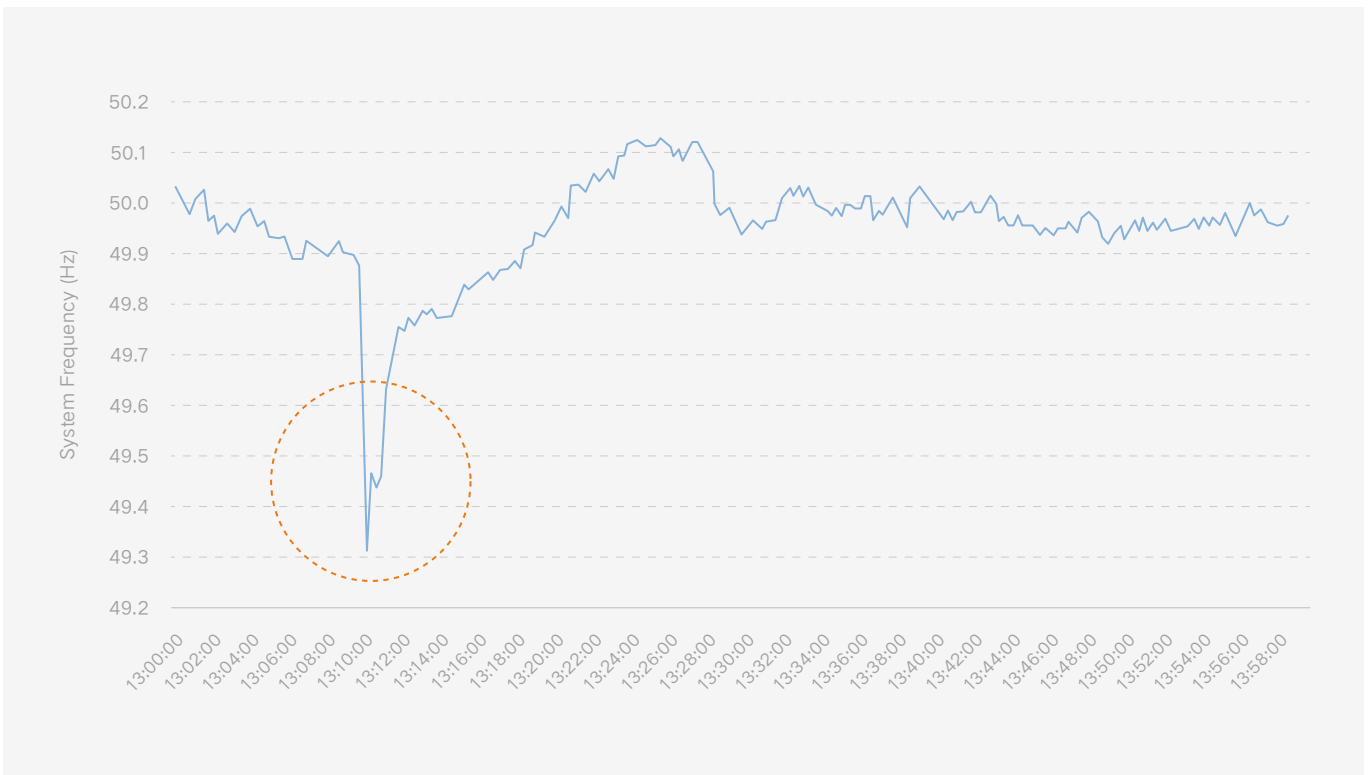


图 45：2023 年 12 月 23 日英国电网频率跌落事件

2 电压稳定

电力电子化电力系统面临新的电压稳定挑战：柔性直流输电换相失败或风光出力骤降，若无足够无功补偿，可能引发电压失稳；同时，新能源发电装置无功支撑能力不足，难以像传统同步发电机那样有效调节电压。2016年9月28日，台风和暴雨等极端天气袭击南澳大利亚州，输电线路故障引发电压跌落，风电机组因连续低电压穿越能力不足大规模脱网，最终演变成50小时后恢复供电的全州大停电。

宽 SCR 瞬时跳变适应技术，可实现短路比 SCR1~100 强弱网平滑切换，PCS 迅速调节功率输出，补偿电网强度变化带来的功率不平衡，且有效抑制电压波动。此外，电压源增强型连续高低电压穿越技术，可实现多次极端连续故障穿越不脱网；在电压跌落时快速注入无功支撑电压恢复，在电压抬升时及时吸收过剩无功抑制过电压，无功响应时间在 20 毫秒内，助力接入点 (point of connection, POC) 电压恢复。

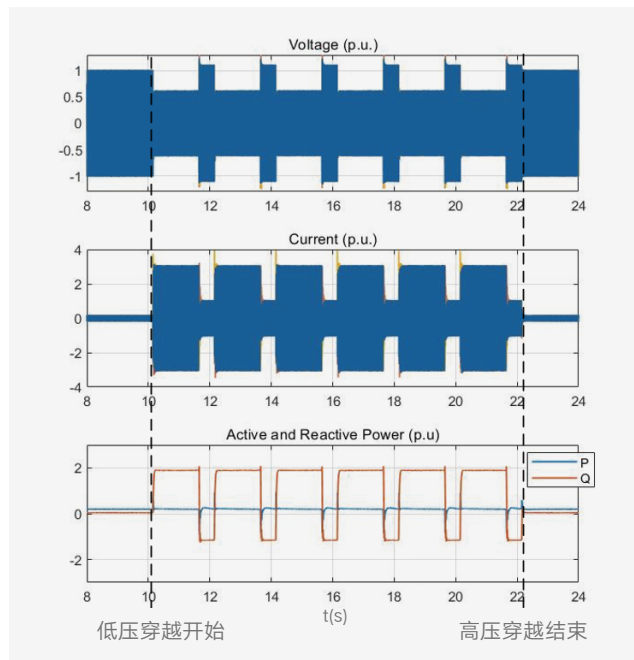


图 46：连续六次电网电压跌落 - 抬升故障穿越波形图

在西藏乃东才朋项目 35kV 人工短路测试中，阳光电源 192 台嵌入式 PCS 大规模并联，在满充 / 放状态下，一次性完成瞬时 3 倍短路电流输出、故障后毫秒级恢复电压测试，多机均保持稳定一致性、均流性与协同控制。

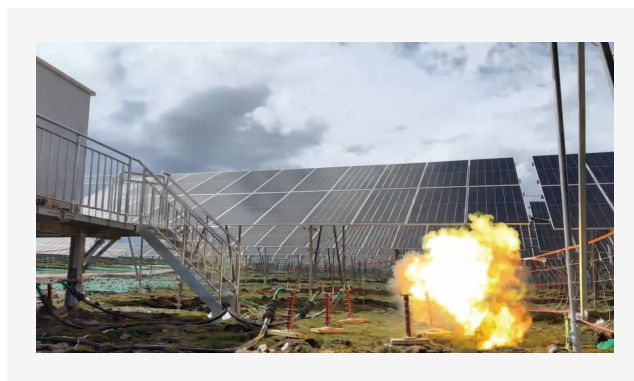


图 47：西藏乃东才朋项目 35kV 人工短路测试现场

3 功角稳定

传统电力系统中，同步发电机通过机电耦合保持同步运行，维持功角稳定。高比例新能源接入后，电力电子设备大量取代同步发电机，导致系统惯量降低，同步能力减弱。当系统受到扰动，如负荷突变，电网故障，缺乏惯量的新能源机组无法提供足够的同步功率支撑，导致发电机之间功角差扩大，引发失步甚至系统解列。

2021 年 1 月 8 日，克罗地亚 Ernestinovo 400kV 变电站因母联断路器过载跳闸，引发多条线路在 20 秒内连续脱网，导致欧洲大陆电网被分割成西北和东南两部分。系统瞬时出现约 5.8GW 功率不平衡，频率剧烈波动，发电机失去同步，产生功角失稳，造成大量负荷被切除、电源脱网。

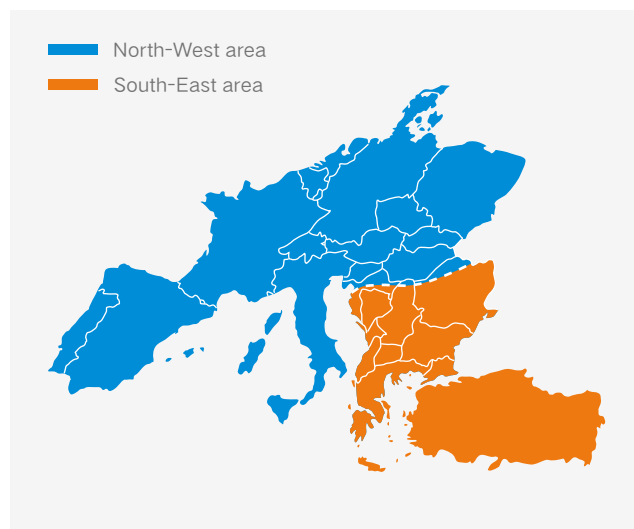


图 48：2021 年 1 月 8 日欧洲电网解列事件

阳光电源提出的**自适应相角跳变穿越技术**，全面支撑 $\pm 90^\circ$ 对称 / 不对称相角跳变。在宽范围相角跳变时，通过提前感知电网相位信息，快速调节 PCS 内部电势频率，加速虚拟转子摆动，实现功角稳定。在小范围相角跳变时，该功能自动减弱，使 PCS 充分发挥频率支撑能力。在电网出现不对称相角跳变时，PCS 会生成负序电压支撑故障相电压，实现从被动适应不平衡电网到主动支撑电网电压的转变。

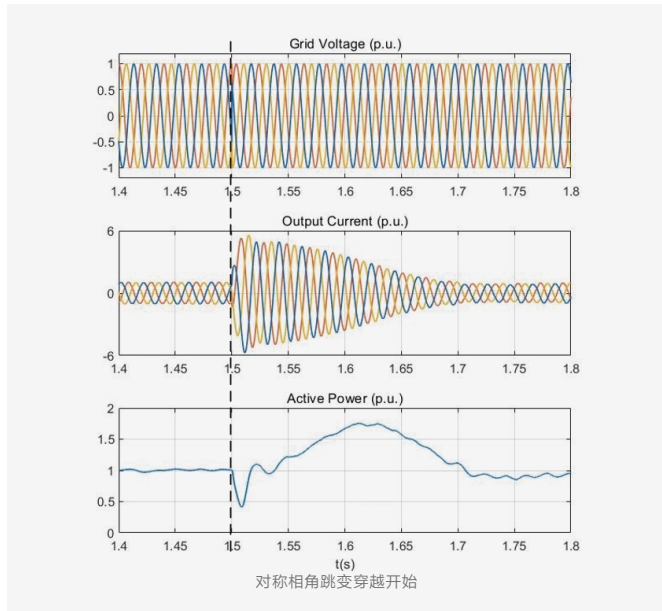


图 49：对称相角跳变穿越波形图
(90° ，未采取优化技术)

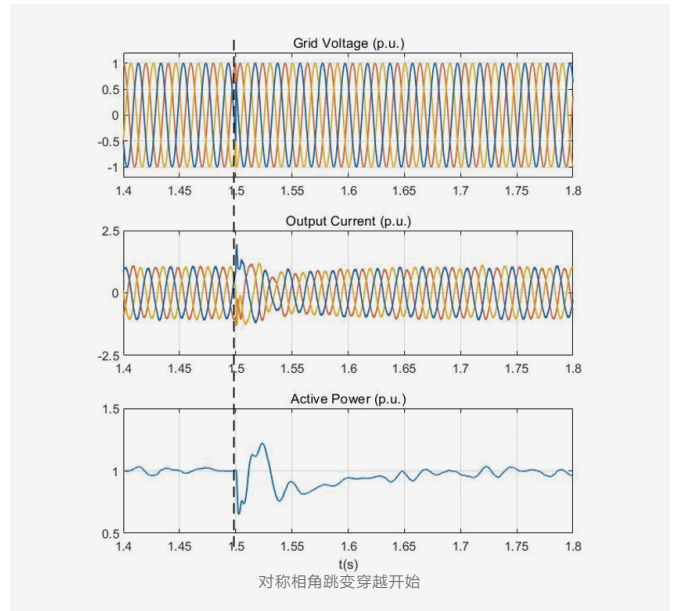


图 50：对称相角跳变穿越波形图
(90° ，采取优化技术)

4 宽频震荡

新能源发电通过电力电子设备接入电网，弱网下电力电子与电网阻抗、控制环之间的耦合共振，容易被放大，形成从低频到高频的多频段振荡。宽频振荡会损害新能源发电设备、影响电能质量，甚至引起电网电压或电流越限，触发电力系统保护装置，可能导致新能源发电机组或传统发电机组脱网。

2015 年 7 月 1 日，中国西北地区风电场发生次同步振荡，导致 300 多公里外火电机组的转轴扭振保护动作，引起火电机组停运，是典型的由于次同步振荡分量在多级电网中传播而引起的电网功率振荡事件。

阳光电源采用**功率振荡阻尼技术和多频段振荡抑制技术**，基于实时监测电压和功率的各频段信息，并针对不同频段启用相应的抑制措施，实现了 0.1Hz~2.4kHz 频段的谐振抑制，提升电网鲁棒性。

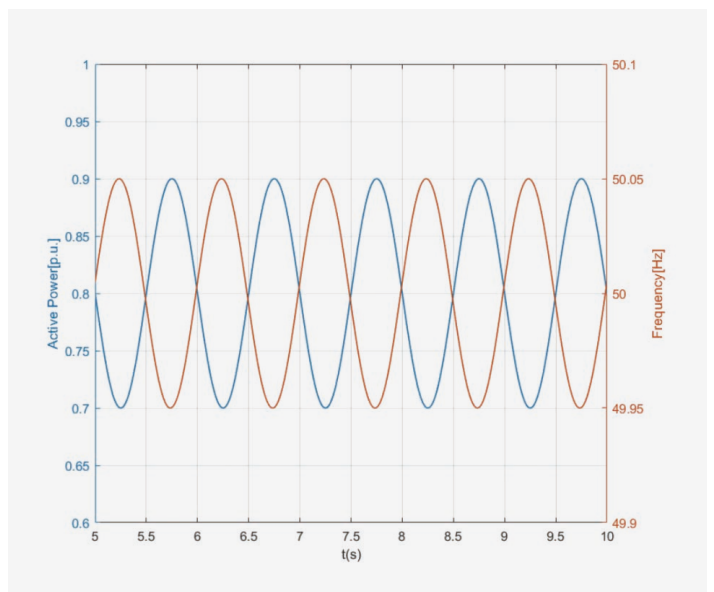


图 51：1Hz 振荡抑制效果图

全球各区域在电网结构、负荷特性、新能源渗透率及应用场景等方面差异显著，单一储能变流器或光伏逆变器的设备控制具有局限性。应对复杂多变的电力系统，需要覆盖全网况、全场景的风光储全链系统级构网能力。

基于“干细胞构网技术”底座，阳光电源通过多维度算法协同，应对复杂及极端网况，提升构网的可靠性；风光储全景构网，支持交直流耦合方式的灵活选择，满足不同电网形态与应用需求。

此外，构网能力不应局限于 PCS，而是整个储能系统的综合表现。阳光电源依托交直流全栈自研与全链协同设计，避免多设备拼装带来的系统不匹配与“排异反应”：一方面，独家电池 SOC 管理技术可精准支撑交流侧构网所需的能量与功率响应；另一方面，首创直流拉弧技术与热管理联动控制，实现热失控的预警与安全构网。



图 52：干细胞构网技术 2.0 架构图

了解更多构网技术详情，请参阅《干细胞构网技术 2.0 白皮书》：



3.6 全生命周期安全支撑体系

如前所述,储能安全的风险不仅在空间上多维分布,更在时间上贯穿全生命周期。因此,全周期安全不是“附加项”,而是保障储能资产长期可靠运行的“生命线”——唯有将风险防控嵌入每个时间节点,才能实现“全维度 = 全层级 + 全周期”中“时间维度”的无缝守护,让安全从“阶段性目标”变为“持续性状态”。

储能系统全周期安全,绝非“各阶段安全简单叠加”,而是以“安全源于设计,验证先于制造”为核心理念,构建“仿真预演 - 研发筑基 - 验证闭环 - 精益智造 - 智能运维 - 一体化服务 - 绿色退役”七大环节无缝衔接的全链路防线,让储能资产从“概念孵化”到“退役回收”的每一刻,都处于“可控、可视、可防”的极致安全状态——这是“全维度 = 全层级 + 全周期”中“时间维度”的终极落地。

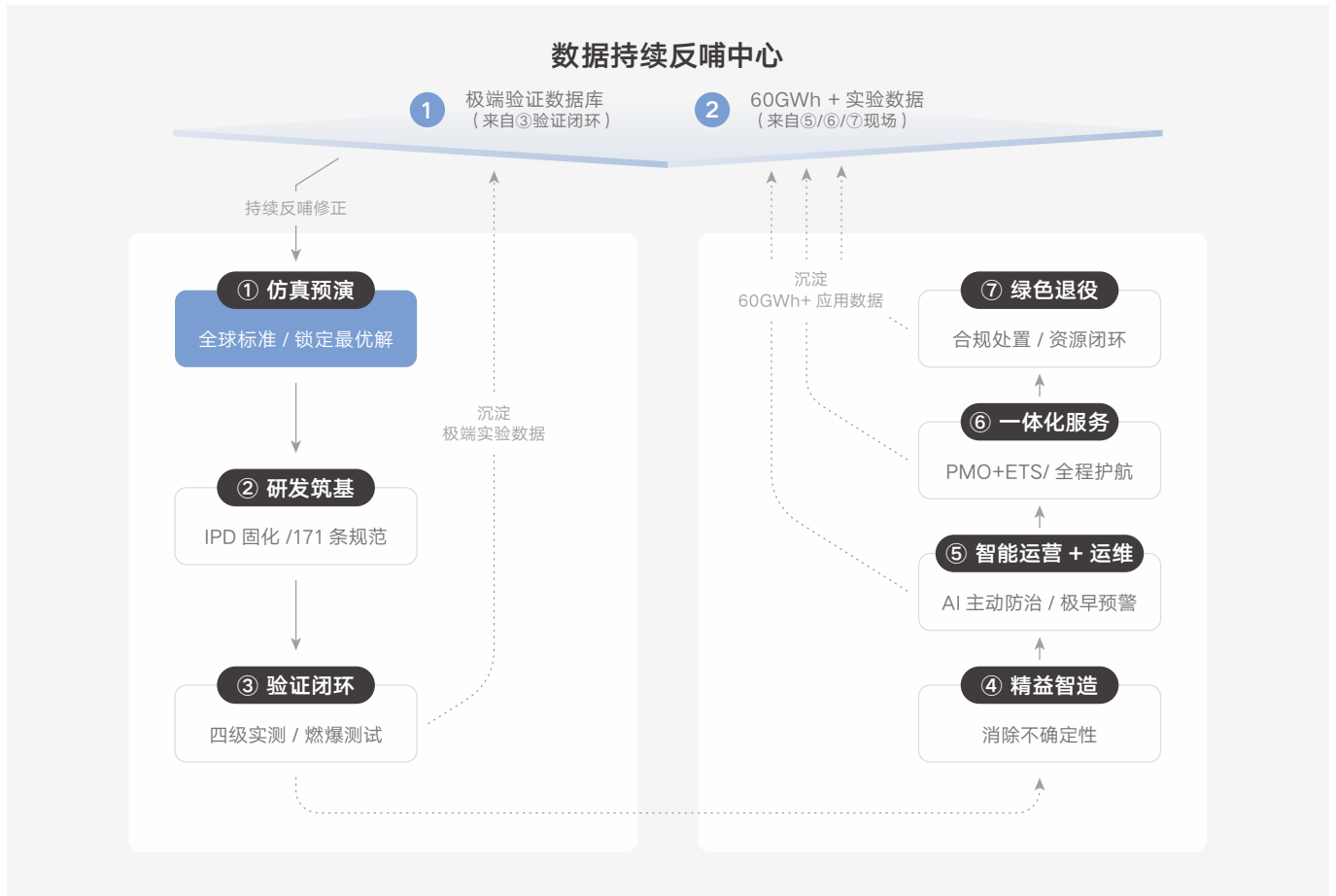


图 53：全生命周期安全支撑体系

1 仿真预演：用“数字孪生”预判全工况风险

储能系统安全不是事后管理出来的,而是通过仿真在源头设计出来的。依托顶级仿真实验室、高性能算力硬件、专业仿真团队及两大核心数据库,在设计图纸落地前,先在虚拟世界完成全链路的安全推演。

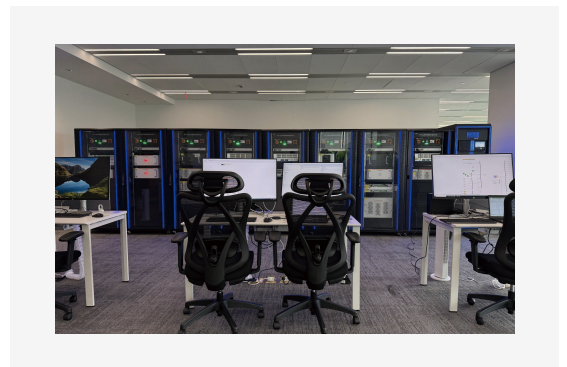


图 54：半实物仿真实验室

- **顶级仿真资源配置**：凭借先进的硬件设施和专业的团队支持，全球最大规模的仿真平台，具备结构、力学、电气、热场、并网及半实物等全链仿真能力，在虚拟环境中高保真还原极端工况与故障，实现设计方案的验证与优化。
- **全球电网标准覆盖**：以电网为例，实时追踪并获取全球电网标准，建立行业最庞大的电网码数据库，确保产品设计满足全球各主要区域严苛的准入要求，包括 IEEE2800、IEEE1547、UL1741、PRC-028/029 等。
- **两大核心数据库反哺**：基于 **60GWh+ 全球项目实地应用数据**与**极端破坏性实验数据**的双向反哺，持续修正仿真模型精度，确保虚拟推演无限接近真实物理边界。

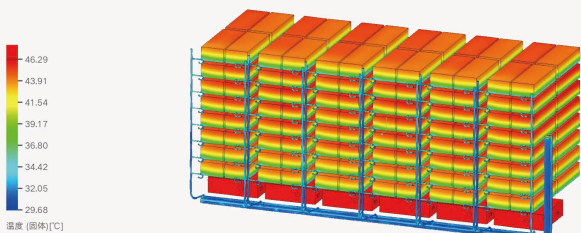


图 55：电池系统热仿真

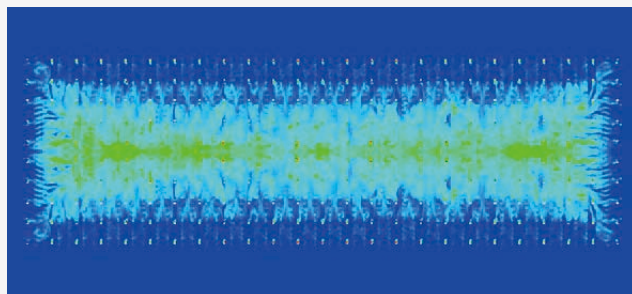


图 56：GWh 级场站热仿真

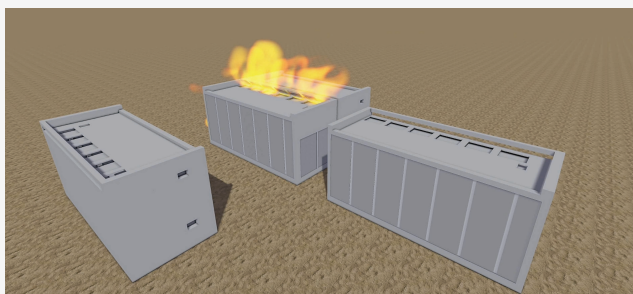


图 57：储能系统泄爆仿真

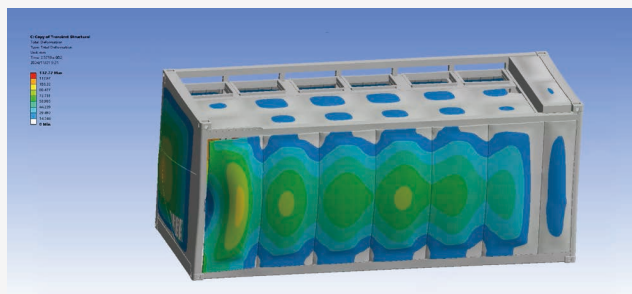


图 58：门板变形瞬态仿真

- **极限工况预演**：在仿真系统中预设短路、热失控、极端高低温、电网扰动等数千种极端工况。无需实物试错，在软件层面即可对技术方案进行反复模拟与测试。
- **最优方案锁定**：通过“仿真 - 优化 - 再仿真”的迭代闭环，在研发初期即剔除潜在风险方案，筛选出系统安全的“最优解”，指导后续的工程开发，实现“所想即所得，所得即安全”。

2 研发筑基 —— 三电融合 +IPD，夯实安全基因

在仿真确立最优方案后，可通过严谨的 IPD（集成产品开发）流程，将安全标准转化为工程语言，深度融合 CMMI 与 APQP 标准，构建研发质量体系。

- **全链条风险拦截**：行业率先实现核心产品 **100% 引入 FMEA 风险管理**，建立起从 DFMEA（设计失效分析）到 PFMEA（过程失效分析）的完整防御链。
- **前置化消除隐患**：通过“**1V1 项目制**”的全程跟进与关注度矩阵模型，在概念阶段即完成对潜在风险的精准识别与拦截，将质量隐患消除在图纸之上，确保产品基因的先天强健。

- 全维度正向设计指引**：建立系统级安全设计体系，确立了 171 条系统安全设计规范与 255 项 Checklist 点检清单，并将此标准深度嵌入 IPD 开发流程。从研发源头实施“**安全正向设计**”，通过标准化的设计输入与严格的节点评审，将安全可靠固化为可执行、可量化的工程标准，系统性规避研发盲区与潜在风险。



图 59：研发风控流程图

3 验证闭环 —— 以“极限实测”击穿安全盲区

物理验证是检验设计质量的关键一步，阳光电源依托**行业领先的实验室验证壁垒**，拥有 **CNAS、UL、TÜV** 等全球权威机构认可的目击实验室资质。具备从微观材料分析到宏观系统燃爆的全谱系检测能力，能够模拟全球各地的极端气候环境（如极寒、湿热、盐雾）及复杂工况，覆盖从电芯 -Pack-Rack- 系统的全层级测试，兼具电气性能、环境可靠性和电磁兼容等，为安全验证提供了坚实的“物理底座”。

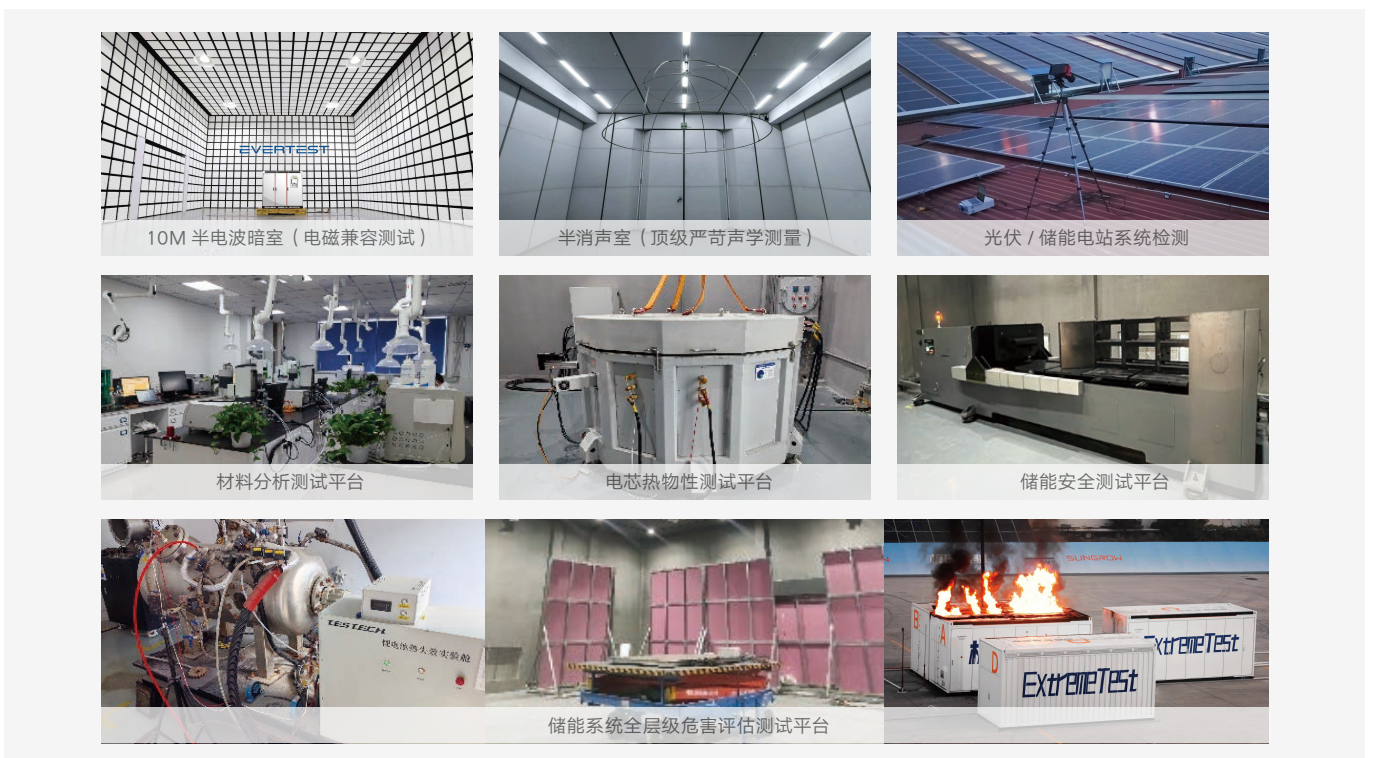


图 60：储能系统全层级测试平台

基于强大的实验室能力，阳光电源坚持“以最严酷环境验证最高安全标准”。从一颗电芯的滥用到整个系统的燃烧，主动设置破坏性测试，层层加码，确保储能系统即使在最极端运行条件下，依然能够可靠运行。

层级	关键测试项举例
电芯	UL9540A、热失控（加热 / 过充）、火烧喷射、循环寿命等
电池包	热失控扩散、挤压 / 跌落、短路、机械冲击、盐雾 / 凝露等
PCS	短路保护测试、热 / 电应力测试、高低温循环、老化测试等
系统	燃爆测试、液冷可靠性、车载运输振动、故障注入测试等



图 61：极限验证测试图

4 精益智造 —— 以“零缺陷”标准把控生产环节

面对大规模交付挑战，阳光电源通过深度融合数字技术与自动化产线，消除人为与制程中的不确定性，确保产品高标准交付。

① 严控源头与供应链安全

建立严格的供应链准入与管理机制，对电芯等核心原材料实施**100% 来料检测**，从源头掐断不良品流入，确保每一颗螺丝、每一个电芯都符合安全标准。

② 数字化柔性智造

依托**数字化覆盖率超 80%**、关键工序自动化率 90% 的智能工厂，融合 ERP、MOM、IIOT 等多系统，实现生产过程的全透明可追溯。

- **全球交付能力**：现有 465GW & 75GWh 产能 + 在建 35GWh 模块化产线，产线兼容率 90%，保障全球敏捷交付。
- **极致质量管控**：功能测试一体化覆盖率 100%，全自动检测项超 500 个，流通合格率达 99.4%，确保每一台交付的设备都具备一致的高可靠性。



图 62：自动化智能工厂

5 智能运营 + 运维——从“被动处理”升级“主动防治”

针对大规模储能电站运维盲区多、巡检慢、定位难等问题，可以创新运用智能化算法，搭载 AI 大模型，让电站运维从被动处理升级到主动防治。

· 设备级智能：内嵌“自诊断”大脑，防患于未然

通过在设备本体植入智能算法，赋予设备“自感知、自诊断”能力，将运维防线前移。

① 极早预警，防微杜渐

依托成熟的自学习、自进化算法，系统可主动识别涵盖电压、温度、容量、绝缘电阻及 SOC 在内的 5 大常见故障类型，**30+ 常见故障风险**，实现早预警早干预，避免非计划停机。

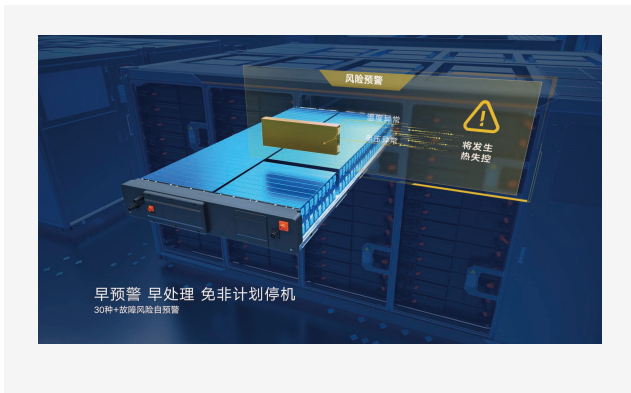


图 63：故障极早预警

② 根因锁定，专家级诊断

针对已发故障，智能体可自动回溯分析，故障根因定位**准确率≥99%**。无需专家上站，系统迅速给出确诊报告，让运维更高效。



图 64：故障根因定位

· 场站级智能：搭载 PowerDoctor，全站“主动体检”

系统搭载 PowerDoctor 智能运维平台，可以对场站进行主动体检，针对潜在问题提供运维建议。

③ 全站体检，生成健康报告

覆盖全站**5大健康维度**，只需 10 分钟即可完成整站全项深度扫描，自动生成详细体检报告，让电站健康趋势一目了然。



图 65：PowerDoctor 全站体检

④ AI 智能助手，策略主动推送

不止于发现问题，更提供解决策略。AI 智能助手通过智能分析，主动推送**最优运维指导建议**，辅助运维人员快速决策，确保问题实现闭环管理。



图 66：AI 智能助手

6 一体化服务 —— 从“交付设备”到“守护资产”

针对储能电站“运维难、响应慢”的痛点，需要打破传统服务边界，提供贯穿全流程的 **PMO + ETS 一体化服务体系**。



图 67：长周期的运维护航

① PMO 项目制管理（交付期）

专业的 PMO 团队从合同签订起介入，覆盖生产、运输、安装、调试至并网全过程。通过项目制管理实现问题快速闭环，同时利用一体化认证优势，在全球多区域免除部分现场认证测试，大幅缩短交付周期并降低现场作业风险。

② ETS 全生命周期运维（运营期）

- **快速响应**：依托全球服务网络与 7×24 小时联络中心，建立三级技术专家资源池，随时调度支援，快速阻断风险蔓延。
- **主动防御**：摒弃“被动维修”，由资深电气与热管理专家提供“定期健康诊断 + 安全加固建议”，提前识别隐患。
- **透明可控**：打造全流程数字化的运维管理体系，让安全可感知、风险可控制、问题可追溯。

7 绿色退役 - 让“终点”成为“新起点”

储能系统生命周期的终点，并非安全责任的终止，而是构筑生态安全的最后一道防线。面对日益严苛的环保法规（如欧盟《新电池法》），联合全球专业的第三方机构，可以构建合规的回收与处置网络，坚决杜绝非正规处理带来的安全隐患。

- **安全去功能化**：采用专业工艺对退役电池进行深度放电与钝化处理，彻底消除残余能量，防止废弃过程中的自燃风险。
- **原材料定向提炼**：通过物理破碎与湿法冶金等先进技术，将废旧电池彻底分解，提取其中的镍、钴、锂等核心金属元素，使其作为纯净的“原材料”回归上游供应链。这不仅实现了资源的有效节约，更从根本上避免了废旧电池流入非正规渠道带来的质量与安全风险。

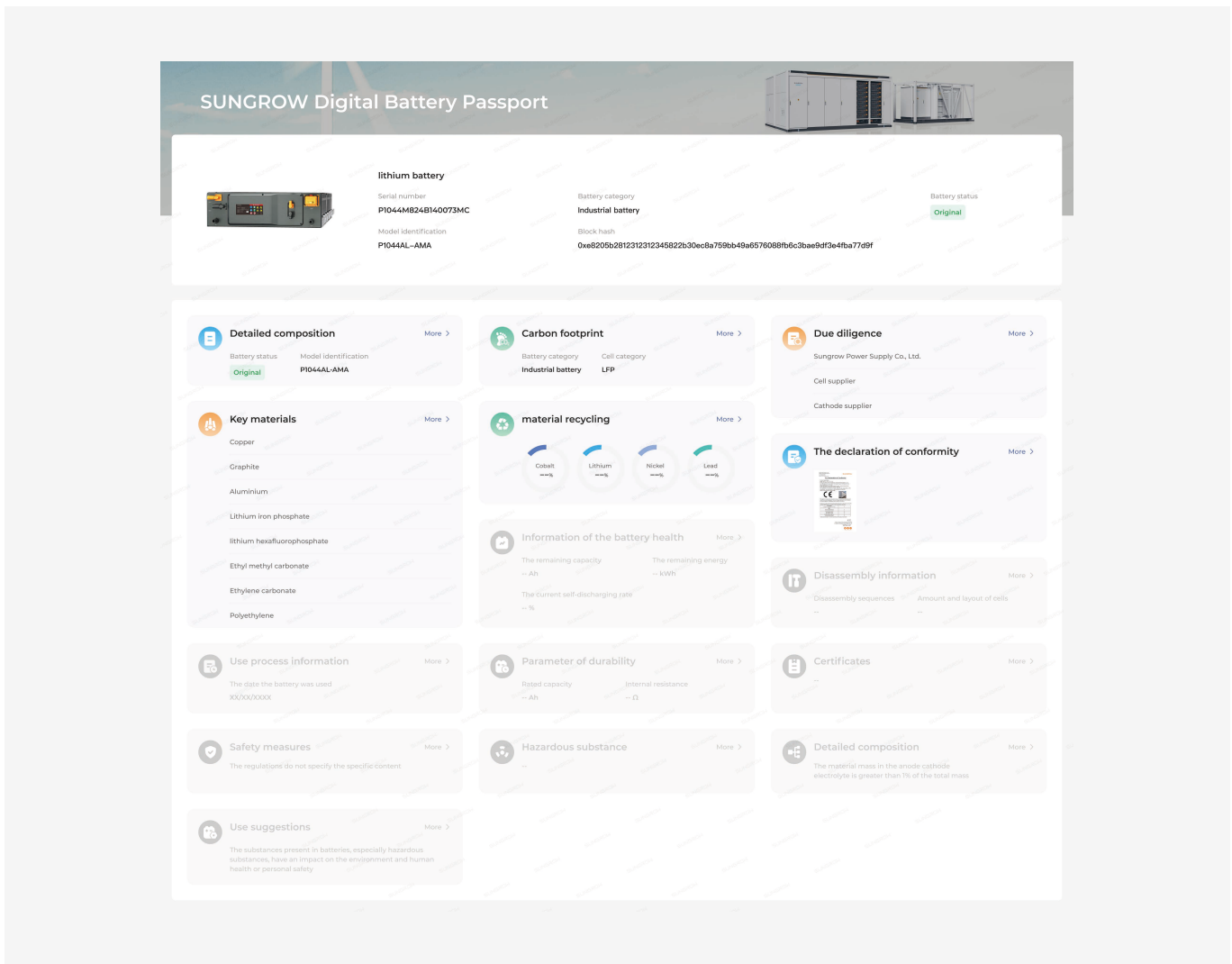


图 68：电池护照

绿色退役，不仅帮助客户规避了退役后因环境污染引发的法律风险与巨额罚款，更助力客户达成 ESG 目标，确保储能资产在全生命周期的最后一环依然安全、合规、清洁。

全周期安全的终极价值：让储能资产“从研发到退役”都可靠

阳光电源全周期安全支撑体系，通过“仿真预判风险→研发植入基因→验证击穿盲区→智造把控质量→运维主动免疫→服务全程守护→退役绿色循环”的闭环，实现了“**时间维度无断点、风险管控无死角**”。对客户而言，这意味着资产从运输到退役都安全，以全周期**可靠运行保障投资收益**，这正是“全维安全”中“全周期护航”的核心要义——不仅让储能“能用”，更让储能“敢用、耐用、安全用”。

涵盖多元工况的“全场景安全”

储能系统的安全，绝不仅仅停留在物理空间的隔离与环境的适应上，更深刻地体现在对复杂多变运行工况的从容应对。为此，阳光电源打破局限于“空间维度”的传统定义，创新提出并践行“全场景安全”理念，覆盖**从电储到工商业的多元市场规模**，适配**从源网荷储微网到离网孤岛的复杂电网拓扑**，并从容应对**高频次调频等严苛需求**。真正做到“**应用无死角，覆盖全工况，匹配全场景**”，确保存储资产在任何场景下均能实现确定性的安全守护。

04

结语

能安全的未来，是从“被动堵漏”到“主动免疫”的范式革命——告别单点防护的“头痛医头”，拥抱“全维度 = 全层级 + 全周期”的系统安全观。随着电化学、电力电子、电网三大技术在未来更深度的耦合，储能系统将进化为具备“全层级自感知、全周期自诊断、全场景自进化”能力的“安全体”，安全风险将真正实现“可预测、可度量、可控制”。阳光电源始终以“全维安全体系”为锚，将“全层级覆盖”与“全周期护航”刻入基因，才能让储能从“可用”走向“敢用”，从“单一资产”升级为“能源革命的可靠基石”。



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 光储充官方微信