储能测试与评价

内蒙古电化学储能安全管控体系研究与实践

太玉鑫[1]，岳鹏飞[2]，王文国[1]，乌达巴拉[1]，李雨佳[1]
（[1]内蒙古电力集团蒙电经济技术研究院有限责任公司；[2]内蒙古电力（集团）有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010010）

摘 要：在我国能源结构转型与新型电力系统建设进程不断推进的背景下，电化学储能产业已逐步发展成为支撑我国新型电力系统高效构建与稳定运行的关键基础设施之一。然而，伴随着电化学储能产业的快速迭代升级和装机规模的持续扩大，全球范围内电化学储能安全事故频发。内蒙古作为我国重要的新能源基地，2025年电化学储能新增投运装机位列全国首位，已成为保障该区域电网稳定运行、推动新能源资源高效消纳与合理利用的重要支撑力量。但内蒙古受地域极端环境的影响，电化学储能安全风险逐渐显现。基于此，构建一套与内蒙古地区地域特点、环境条件及发展需求相适应的电化学储能电站安全管控体系迫在眉睫。本研究对近年来国内外储能电站安全风险评估体系的相关指标进行系统归纳，首次形成具有内蒙古特色的电化学储能安全风险辨识清单，采用层次分析法建立适配内蒙古地区的“技术-管理”双维度、“目标层-准则层-指标层”三级量化评价模型，进而首次构建充分适配内蒙古极端环境的电化学储能全生命周期安全管控体系。进一步通过区域典型储能电站实践，论证本研究成果的可落地性和有效性。成果可推广至我国西北、东北等高海拔、极端低温、风沙频发及生态敏感的新能源富集地区，为当地电化学储能安全管控提供重要参考。

关键词：电化学储能；安全风险辨识；层次分析法；全生命周期；安全管控体系；极端环境
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0302
中图分类号：TM 911 文献标志码：A 文章编号：2095-4239（2026）08-3313-11

Research and practice on safety management and control system of electrochemical energy storage in Inner Mongolia

TAI Yuxin[1], YUE Pengfei[2], WANG Wenguo[1], WU Da Ba La[1], LI Yujia[1]
([1]Mengdian Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd.; [2]Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Against the backdrop of China's energy structure transformation and the construction of new power systems, electrochemical energy storage has gradually become one of the key infrastructures supporting the efficient construction and stable operation of these systems. However, with the rapid development of the electrochemical energy storage industry and the continuous expansion of installed capacity, safety accidents related to electrochemical energy storage have occurred frequently worldwide. As an important new energy base in China, Inner Mongolia is projected to rank first in the country in terms of newly installed electrochemical energy storage capacity in 2025, which has made it a critical support

收稿日期：2026-04-09；修改稿日期：2026-05-07。
第一作者及通信联系人：太玉鑫（1991—），女，硕士，研究方向为储能经济技术与安全风险研究、能源战略研究，E-mail：yanchenzhun@163.com。
引用本文：太玉鑫, 岳鹏飞, 王文国, 等. 内蒙古电化学储能安全管控体系研究与实践[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3313-3323.
Citation：TAI Yuxin, YUE Pengfei, WANG Wenguo, et al. Research and practice on safety management and control system of electrochemical energy storage in Inner Mongolia[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3313-3323.

for ensuring the stable operation of the regional power grid and promoting the efficient accommodation and rational utilization of new energy resources. Nevertheless, affected by the extreme local environments, the safety risks of electrochemical energy storage in Inner Mongolia have become increasingly prominent. Therefore, it is urgent to establish a safety management and control system for electrochemical energy storage stations that matches the regional characteristics, environmental conditions, and development needs of Inner Mongolia. In this work, we systematically summarized relevant indicators of safety risk assessment systems for energy storage stations at home and abroad in recent years, and developed for the first time an electrochemical energy storage safety risk identification list with Inner Mongolia characteristics. Using the analytic hierarchy process, we established a quantitative evaluation model with a "technology-management" two-dimensional framework and a three-level structure of "goal layer, criterion layer, and indicator layer" for the Inner Mongolia region. Furthermore, we constructed for the first time a full-life-cycle safety management and control system for electrochemical energy storage that is highly adaptable to the extreme environments in Inner Mongolia. The practicality and effectiveness of the proposed system were verified through applications in typical energy storage stations in the region. The results can be extended to new energy rich areas in northwest and northeast China with high altitude, extremely low temperature, frequent sandstorms, and ecologically sensitive environments, providing an important reference for the local safety management and control of electrochemical energy storage.

Keywords: electrochemical energy storage; safety risk identification; analytic hierarchy process (AHP); full life cycle; safety management and control system; extreme environment

在能源经济绿色低碳转型和大规模可再生能源消纳背景下，电化学储能作为一种可灵活部署的能源调节工具，已成为支撑新型电力系统建设的关键基础设施。据中国电力企业联合会发布，2025年，电化学储能呈稳步增长态势，全国电力安全生产委员会24家企业成员单位新增投运电站525座、总装机47.16 GW/134.85 GWh、同比增长27%，占全国电源新增装机的8.63%，相当于新能源新增装机的10.40%[1]。但从全球来看，近年来电化学储能电站安全事故频发。2016—2025年，全球已发生102起典型电化学储能电站火灾事故[2]。2025年，我国电化学储能电站出现1922次非计划停运，平均单次停运时长为234.62 h，较2024年分别增长143次、205小时[1-3]。如何解决其安全问题是电化学储能产业大规模、跨越式发展的重要挑战。

内蒙古是我国重要的新能源基地，电化学储能装机已成为电网稳定和新能源消纳重要支撑，2025年电化学储能累计投运总装机达18.65 GW，新增投运总装机达10.36 GW，在全国各省份均排名第一。但内蒙古电化学储能电站多建设在沙漠、戈壁、荒漠等偏远地区，这些地方强风沙、高温极寒等极端气候频发，水源有限甚至匮乏，面临电池缺陷加速暴露、火灾防控与应急处置等困难和严峻挑战，电化学储能安全风险日益凸显。

当前，国家已搭建储能全生命周期政策框架，提出切实落实电化学储能安全管理责任、强化全链条安全管理[4]，构建了多层级应急管理体系，覆盖从风险预防、制定预案到实战响应的全链条[5]。内蒙古地区电化学储能现有政策有待细化、标准体系存在短板，现有安全体系适配性不足，亟须构建适配地域特征的全生命周期储能安全管控体系。

1 电化学储能电站安全风险辨识研究综述

对近年来国内外储能电站安全风险评估指标进行系统归纳，在技术风险指标维度，早期研究多以

电池单体及核心部件为核心，聚焦电压、温度、电池荷电状态、电池健康状态等基础特性参数的安全评价。于璐等[6]利用可重构储能系统中电池单体、模组的电压、温度等实时监测数据，建立电池及模组的安全评估模型。李建林等[7]将电池指标划分为可测量状态量与不可测量状态量，其中可测量状态量涵盖电流、电压、温度三大类，不可测量状态量则包含电池荷电状态与电池健康状态。赵北涛等[8]依据电池荷电状态、健康状态、温度等本体参数建立储能电站评估体系。周庆雨等[2]对国内18座电化学储能电站调研发现，消防系统普遍由工程总承包单位主导设计，以国家标准为主要依据，但消防投入占比偏低。

伴随储能电站规模化发展，单一技术指标难以全面覆盖安全风险，学界开始重点关注管理环节的风险防控：Davion[9]研究认为储能电站安全风险评价需综合考量电池本身、管理系统故障、安全监管失效、外部刺激等影响因素，给出相应应对措施；汝会通等[10]提出需从电池本体、工作环境、系统管理等多维度剖析潜在安全风险。康荣学等[11]在关注电池本体的同时，从电池外部刺激源、标准体系完善、人员安全技术培训等方面提出建议。这些研究为我国储能电站早期安全风险评价奠定基础。肖勇等[12]构建的风险评价体系包括电池基本情况和使用工况、运行环境、安全监控保护系统、外部刺激、人为因素6个一级指标和30个二级指标；朱董军[13]以电站安全风险评估为顶层目标，选取电池组实时状态、保护系统、工作环境、人员配置及安全管理5个一级指标（下设22个二级指标）开展综合安全评估，葛会方等[14]则以此评估体系为基础，建立矿用式储能电站安全运行评价模型。刘纪坤等[15]搭建了由锂电池特性、消防设施、安全管理、人员因素4个一级指标、12个二级指标、32个三级指标组成的锂电池储能电站火灾风险评价指标体系。宁雪峰等[16]从电池运行工况、可靠性指标、运行环境、安全监控管理系统4个方面，筛选了20个评估指标对储能电站安全开展综合评估。陈西江等[17]基于等级全息模型建立电化学储能电站运行风险评价指标体系，包括电池因素、环境因素、管理因素、人员因素4个一级指标，以及壳体破损、荷电状态等20个二级指标。沈进冉等[18]从电池基本情况、电池使用情况、电池运行情况、储能电站可靠性、外部刺激、运行环境、安全监保系统及人为因素8个方面对电站进行安全风险评估。这些研究为我国电化学储能电站安全风险辨识和评价指标体系的构建和优化奠定了重要基础，但目前考虑极端环境下的实际指标因素相对较少，对极端低温、强风沙和草原生态敏感脆弱的电化学储能电站适配性不足。

一方面，参考过往研究中对电池系统、电气设备、消防设施等核心环节的风险分析，构建覆盖电化学储能单元、电气设备、电池室和电池舱、消防及应急照明设施等7项技术风险指标集合；另一方面，结合内蒙古地区电站运维实际需求，构建包括设备全生命周期管理、消防管理、特种作业管理等14项管理风险指标集合。在上述21项指标集合中，增设与内蒙古自然环境、战略定位、电网特性高度适配的3项特色指标集合，合理纳入“技术-管理”框架下，为系统、科学、结合区域特色开展内蒙古电化学储能电站安全风险辨识奠定基础。

2　内蒙古电化学储能电站安全风险辨识

为实现对内蒙古电化学储能电站安全风险的全面识别，本研究综合采用文献综述法、实地调研、现场勘查等方法，结合区域特色与电站运行现状，深入分析并提出内蒙古电化学储能电站的安全风险具有显著的“技术-环境-管理”三重交互特征。具体体现为：内蒙古特有的地域极端自然环境，如严寒低温、强沙尘天气等恶劣气候条件，会进一步增加电化学储能设备本身存在的技术缺陷的暴露概率，导致设备运行稳定性下降；同时，电化学储能电站日常运营过程中管理环节出现的各类疏漏与不足，会加速安全风险的传导扩散进程，加剧事故的严重程度与影响范围。研究形成的内蒙古电化学储能安全风险辨识清单见表1。

3　内蒙古电化学储能电站安全风险评价体系构建

Conzen等[19]采用蝴蝶结分析法评价储能电站的火灾和爆炸风险。Rosewater[20]通过系统理论过程分析方法综合评价储能电站风险。宁雪峰等[16]通过基于指数标度的层次分析法提升了权重系数的可靠性，进一步改进了一致性指标。本研究基于形成

表1 内蒙古电化学储能安全风险辨识清单

Table 1 Safety risk identification list for electrochemical energy storage in Inner Mongolia

一级风险维度	二级风险维度	核心风险点
一、技术风险	电化学储能单元	1.电池：物理、化学、电气性能及特有系统多维度风险；2.BMS：硬件接触不良、功能失效、环境适应性弱、长期高负荷运行稳定性差
	电气设备	1.继电保护装置：功能失效、通信中断、连接缺陷；2.预制舱：结构、防护、电气、运维四维度隐患；3.储能变流器：结构、接线、散热、绝缘、通信等全场景风险；4.升压变压器/高低压柜：本体、性能、环境、辅助系统多问题；5.电缆：布置/防火缺陷、检测缺失、燃烧性能不达标
	电池室/电池舱	结构安全不足、温湿度/通风调控失效、电气安全缺陷、防火隔离措施缺失
	消防及应急照明设施	消防系统适配/维护不足、应急照明可靠性差、消防联动/响应滞后
	识别与预警	监测系统覆盖不足、数据采集传输不可靠、预警逻辑/阈值设置不合理
	基础设施	土建结构地基/主体/防护隐患；暖通系统温湿度控制、通风、联动适配性差
	电网特性与技术前沿	1.构网型储能技术应用：构网型控制功能失效或参数失配、多技术混合储能（如“磷酸铁锂+液流”）在构网模式下的协同控制逻辑缺陷等；2.新能源高比例消纳下的储能调度：弃电与调用效率矛盾、调度策略不合理、电力市场化交易下储能运营因功率预测、基线负荷计算等模型精度不足无法满足复杂的调度合规性要求
二、管理风险	设备管理	1.电化学储能单元：选型、安装、BMS效能、故障传导管控不足；2.储能变流器：接地、保护定值、环境/参数适配性管控缺失；3.升压变压器/高低压柜：运行状态、辅助系统、电缆管理不规范；4.继电保护装置：配置、参数、硬件匹配、标识存在漏洞；5.预制舱：防护等级、舱内环境、防火分区、防小动物措施不足
	消防管理	1.火灾救援：预案、装备、操作、外部联动适配性差；2.消防安全责任制：责任划分、考核、协同、追溯机制不完善；3.消防教育培训：内容、覆盖、考核、实战演练不到位
	预警系统管理	1.监控系统：通信、电源、权限、标识、环境适配存在缺陷；2.火灾自动报警：探测器、信号联动、电源、环境耐受能力不足
	建筑物及其内部环境管理	1.土建结构：抗震、设备布置、材料阻燃性不达标；2.暖通：设备选型、环境调控能力不足
	运行维护与退役管理	1.储能单元维护：频次、检测、环境适配、部件更换管控缺失；2.退役管理：检测评估、处置流程、环保合规、资源循环不规范；3.日常维护与记录：巡检、记录、问题闭环、数据追溯存在漏洞
	特种作业管理	1.高处/起重作业：人员资质、装备、操作、环境管控不足；2.带电作业：绝缘防护、工具、放电、化学防护、防误动措施缺失；3.动火作业：环境、消防准备、气体监测、现场清理管控不到位；4.有限空间作业：有害气体积聚、设施不规范、个体防护失效
	应急管理	1.应急预案：系统性、演练实战性、外部联动、针对性不足；2.处置能力：应急流程、设备保障、复盘机制存在缺陷；3.应急处置措施：适配性差、执行不规范、跨主体协同断层，未匹配内蒙古地域特性
	制度与体系管理	1.责任机制：权责、跨主体协同、全流程管控不明确；2.标准与规范：适用性、场景覆盖、技术兼容、流程合规性不足；3.安全投入：资金使用、应急物资保障不到位
	人员管理	1.人员资质与能力：资质、经验、技能、专项能力不达标；2.培训与考核：内容实效性、机制严谨性、技能巩固性不足；3.健康与防护：健康监测、防护用品、专项危害防控缺失
	流程管理	1.准入与验收：设备质量、参与方资质、关键部件检验管控不足；2.操作与运维：制度、人员管控、巡检有效性存在缺陷；3.变更与升级：事前评估、系统兼容、功能验证不到位
	外部协同与环境管理	1.外部协同：技术支持、社区联动、施工协调、风险告知不足；2.环境适配：站址选择、环境防护、极端天气应对措施缺失
	文档与记录管理	1.技术文档：完整性、时效性、追溯性不足，全生命周期档案缺失；2.记录管理：日常运维记录不清晰、关键操作可追溯性差
	自然环境与能源结构管理	1.沙戈荒地区储能环境适应性：面临风沙侵蚀、极端温差及缺水条件的系统性管理风险；风沙侵入电池舱密封失效导致设备绝缘下降与散热效率劣化；极端温差加速电池舱保温层密封件老化；缺水条件下常规消防供水方案失效，未针对性地建立应急供水保障机制，严重削弱火灾初期扑救能力；2.草原生态保护与储能设施协调性：未严格在规划阶段执行生态红线审查，可能导致储能设施挤占草原生态廊道或破坏植被恢复区，引发长期不可逆的生态损害；缺乏与林草、环保部门的生态治理协同机制，使得项目在建设、运营及退役阶段的环境影响无法被动态评估与有效修复
	产业模式与战略定位管理	1.沙戈荒大基地储能配套协同：多能互补协调不足，储能的充放电策略未与风电、光伏的超短期预测及火电调峰深度协同优化，导致系统整体调节效能与安全裕度下降，出现限电风险或调频资源不足；2.源网荷储一体化与零碳园区建设：储能系统与零碳园区内分布式电源、柔性负荷的协同控制策略设计不当，导致园区内部电网电压越限、供电可靠性下降；在绿电直供模式下，储能参与调度响应时无法满足物理溯源与电量校核的合规要求，引发市场结算争议与政策补贴资格风险

的安全风险辨识清单结果，结合内蒙古地区地域特征及储能电站全生命周期运营特性，采用层次分析法，构建内蒙古特色电化学储能安全风险评价指标体系。

3.1　评价体系概述

本研究在风险辨识清单的基础上，进一步构建科学系统的风险评价体系，该体系采用“技术-管理”双维度与“目标层（goal，G）-准则层（weight，W）-指标层（dimension，D）”三级层次结构。其中，技术维度风险涵盖了电化学储能单元、电气设备、电池室和电池舱、消防及应急照明设施、识别与预警系统、基础设施等7项核心技术风险类别；管理维度风险系统包含了设备管理、消防管理、预警系统管理、建筑物及其内部环境管理、运行维护与退役管理、特种作业管理、应急管理等14项重点管理风险类别。该风险评价指标体系在设计过程中，既充分吸纳了电化学储能行业内通用的核心风险点，确保框架的通用性与行业适配性，又紧密结合内蒙古特有的地域特征。重点针对该区域极端气候频发、新能源资源富集、工业负荷与新能源负荷交织叠加等区域发展特点，专门增设了与其极端环境、战略定位、电网特性高度适配的特色准则层指标。首先以自然环境与能源结构作为特色准则层的核心切入点，并针对其指标层提出沙戈荒地区储能环境适应性评价指标、草原生态保护与储能设施协调性评价指标；其二，针对内蒙古作为国家重要能源基地的战略定位，提出产业模式与战略定位准则层指标，并针对其指标层提出沙戈荒大基地储能配套协同评价指标、源网荷储一体化与零碳园区建设评价指标；其三，充分考虑内蒙古电网作为典型高比例新能源接入型电网具备的特性，提出构网型储能技术应用评价指标、储能调度管理评价指标。上述特色准则层指标有效弥补通用体系在地域针对性上的不足，最终实现了风险评价工作的全面性与地域针对性的有机统一。这为电网企业在我国西北、东北等极端环境、新能源富集区域开展电化学储能安全管理相关工作，提供了可借鉴、可推广的实践参考与技术支撑。

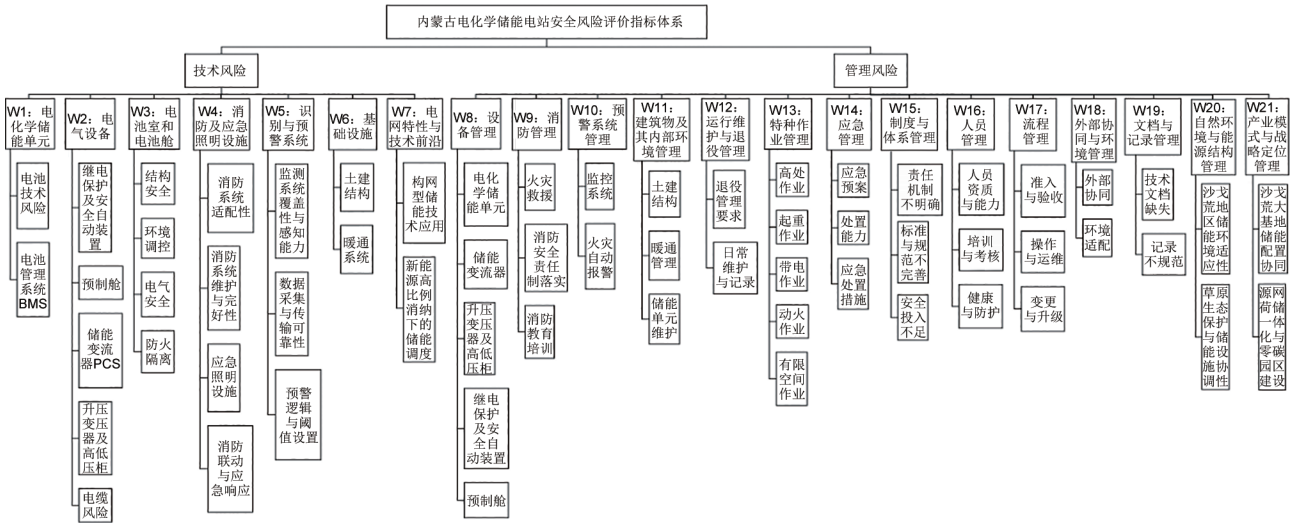

图1　内蒙古电化学储能电站安全风险评价指标体系

Fig. 1　Safety risk evaluation index system for electrochemical energy storage stations in Inner Mongolia

3.2　评价体系构建

本研究采用层次分析法确定21个准则层指标权重，通过单元风险先测度、再赋权的思路降低计算复杂度。采用式(1)计算各单元风险得分：

$$\phi = \left[1 - \frac{3(N_{A1} + 2N_{A2}) + N_{B1} + 2N_{B2}}{2(3N_A + N_B)}\right] \times 100 \qquad (1)$$

式中，ϕ为风险分值；N_{A1}为单元检查表中，依照评价内容，A类项检查结果为部分合格的项数；N_{A2}为单元检查表中，依照评价内容，A类项检查结果为不合格的项数；N_{B1}为单元检查表中，依照评价内容，B类项检查结果为部分合格的项数；N_{B2}为单元检查表中，依照评价内容，B类项检查结果为不合格的项数；N_A为单元检查表中，依照评价内容，评价指标为A类项的总数；N_B为单元检查表中，依照评价内容，评价指标为B类项的总数。

综合考量单元检查表中A、B类评价项的合格、

部分合格、不合格项数，实现单元风险的量化测度。

3.3 专家论证与判断矩阵构建

3.3.1 专家遴选

为确保本研究相关成果、风险评价体系的科学性和实操性，邀请15位行业专家，其行业工作年限均不低于10年，其中具有高级工程师职称者达12名，研究领域覆盖电化学储能电站设计、储能设备研发制造、电站运维管理、消防防控技术、安全监管执法等与电化学储能安全管控密切相关的领域，进一步确保了所收集专家意见的专业性、严谨性与全面性。

3.3.2 标度方法

层次分析法的核心在于利用1~9标度法构造两两比较的矩阵。为精准量化内蒙古电化学储能电站不同安全风险的相对重要性，确保风险评估结果的科学性，本研究采用9标度法，对各类风险因素、评估指标之间的相对重要程度给出数量标度，保障整个风险评价流程的严谨性与系统性。判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 定义为：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，i, j, k=1, 2, n，代表指标个数；a_{ij}为指标i与指标j重要性比较结果，其数值选择根据九级标度法得出。该式还具有如下特征：$a_{ij}=a_{ik}/a_{jk}$, $a_{ii}=1$；$a_{ji}=1/a_{ij}$。其中，重要性标度及定义方法见表2。

表2 标度及其定义

Table 2 Scale and definition

标度	定义
1	两个元素对某个属性具有同样重要性
3	两个元素比较，一元素比另一元素稍微重要
5	两个元素比较，一元素比另一元素明显重要
7	两个元素比较，一元素比另一元素重要得多
9	两个元素比较，一元素比另一元素极端重要
2,4,6,8	表示需要在上述两个标准之间折中时的标度
$1/a_{ij}$	两个元素的反比较

3.3.3 构建判断矩阵

根据前述研究两两比较结果构成判断矩阵。考虑到评价指标过多，易导致专家疲劳、判断准确性下降及逻辑矛盾风险增加，因此将技术和管理拆分进行比较判断，分别构建技术风险和管理风险的目标层（G）-准则层（W）判断矩阵，见表3和表4。

表3 *G-W*技术风险判断矩阵

Table 3 *G-W* technical risk judgment matrix

G	*W*1	*W*2	*W*3	*W*4	*W*5	*W*6	*W*7
*W*1	1	2	3	1	5	2	3
*W*2	1/2	1	2	1/2	4	1	2
*W*3	1/3	1/2	1	1/3	3	1/2	1
*W*4	1	2	3	1	4	2	3
*W*5	1/5	1/4	1/3	1/4	1	1/4	1/3
*W*6	1/2	1	2	1/2	4	1	2
*W*7	1/3	1/2	1	1/3	3	1/2	1

表4 *G-W*管理风险判断矩阵

Table 4 *G-W* management risk judgment matrix

G	*W*8	*W*9	*W*10	*W*11	*W*12	*W*13	*W*14	*W*15	*W*16	*W*17	*W*18	*W*19	*W*20	*W*21
*W*8	1	1/3	1	1/2	1	2	1	2	1/3	2	2	4	1	1
*W*9	3	1	3	2	3	4	3	4	1	4	4	6	1/2	1/2
*W*10	1	1/3	1	1/2	1	2	1	2	1/3	2	2	4	1	1
*W*11	2	1/2	2	1	2	3	2	3	1/2	3	3	5	1/2	1/2
*W*12	1	1/3	1	1/2	1	2	1	2	1/3	2	2	4	1/3	1/3
*W*13	1/2	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1	1/4	1	1	3	1/3	1/3
*W*14	1	1/3	1	1/2	1	2	1	2	1/3	2	2	4	1/2	1/4
*W*15	1/2	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1	1/4	1	1	2	1	1
*W*16	3	1	3	2	3	4	3	4	1	2	2	3	1/2	1/4
*W*17	1/2	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1	1/2	1	1	3	1/3	1/5
*W*18	1/2	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1	1/2	1	1	2	1/2	1/6
*W*19	1/4	1/6	1/4	1/5	1/4	1/3	1/4	1/2	1/3	1/3	1/2	1	1/2	1/3
*W*20	1	2	1	2	3	3	2	1	2	3	2	2	1	1
*W*21	1	2	1	2	3	3	4	1	4	5	6	3	1	1

3.3.4　一致性检验

（1）计算最大特征值（λ_{max}）

首先对技术风险判断矩阵进行归一化处理，计算每行元素的和并再次归一化得到特征向量（即各指标的初步权重）。随后通过式(3)计算最大特征值：

$$\lambda_{max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{AW})_i}{\boldsymbol{W}_i} \tag{3}$$

式中，λ_{max}为最大特征值，$\boldsymbol{A}$为判断矩阵，$\boldsymbol{W}$为特征向量，$(\boldsymbol{AW})_i$为矩阵$\boldsymbol{A}$与向量$\boldsymbol{W}$乘积的第i个元素。

以技术风险矩阵目标层-准则层判断矩阵为例，最终计算得λ_{max}=7.10（n=7，即准则层指标总数），该值越接近矩阵阶数n，表明专家判断的一致性越好。

（2）计算一致性指标（CI）

一致性指标（CI）用于量化判断矩阵偏离完全一致性的程度，算法为：

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{4}$$

式中，n为判断矩阵的阶数（即参与比较的指标数量）。当判断矩阵完全一致时，λ_{max}=n，此时CI=0，表明专家判断无逻辑矛盾；CI值越大，说明判断矩阵的一致性越差，主观判断的偏差越显著。针对目标层-准则层判断矩阵，将λ_{max}=7.10、n=7代入公式，计算得CI=0.017，该值较小，初步表明专家判断的一致性较好。

（3）计算一致性比率（CR）并验证

判断矩阵的阶数n会影响一致性指标的绝对数值，即阶数n越大，随机判断导致的偏差概率越高；因此引入平均随机一致性指标（RI）进行修正。RI值是通过大量随机生成的判断矩阵计算得出的统计平均值，其大小与矩阵阶数n对应。一致性比率（CR）的计算公式为：

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{5}$$

式中，若CR<0.10，表明判断矩阵的一致性偏差在可接受范围内，专家判断的逻辑严谨性满足要求，可基于该矩阵计算指标权重；若CR≥0.10，则说明专家判断存在显著矛盾，需重新组织专家调整判断矩阵，直至CR<0.10。本研究中目标层-准则层判断矩阵的CI=0.017，代入对应阶数的RI值，计算得CR=0.012<0.10，符合一致性要求，可进一步用于后续权重计算。

同理，对准则层-指标层的所有判断矩阵均执行上述一致性检验流程，确保各层级指标权重分配的逻辑一致性，为后续风险评估结果的可靠性奠定基础。

采用上述方法可得到管理风险判断矩阵的λ_{max}=14.79（n=14，即准则层指标总数），CI=0.0609，该值较小，初步表明专家判断的一致性较好。进一步，代入对应阶数（14阶）的RI值，计算得CR=0.0385<0.10，符合一致性要求，可进一步用于后续权重计算。

3.3.5　权重计算与结果

对通过一致性检验的判断矩阵进行归一化处理，结合既定比例要求，确定各准则层权重，具体分配见表5。

通过上述计算，研究明确了各准则层权重优先级。技术端以电化学储能单元、电气设备为核心防控对象，管理端聚焦消防管理、人员管理等关键环节，这为内蒙古电化学储能风险的分级管控提供量化依据。

3.4　安全风险分级

3.4.1　单元风险分级

按照各单元风险得分，对单元风险定级，分为单元重大风险（分值<60）、单元较大风险（60≤分值＜80）、单元一般风险（80≤分值＜90）、单元低风险（分值≥90）。

3.4.2　总体风险分级

将单元风险得分进行加权操作，得出储能电站总体风险分值。按照电站总体风险值，从高到低依次分为重大风险（分值<60）、较大风险（60≤分值＜80）、一般风险（80≤分值＜90）、低风险（分值≥90）四个等级，见表6。

总结来看，采用层次分析法对各关键要素进行科学赋权，并在此过程中结合多维度、多层次的一致性检验机制进行反复校验与修正，最终科学得出电站风险打分综合结论，为内蒙古电化学储能安全风险综合评价提供了可靠的权重依据，也为同类地区电化学储能电站安全风险评价的权重确定提供了可借鉴的思路。下一步，研究将结合内蒙古在运储能电站对本评价体系进行实践，确认该体系可转化为可落地的操作指南，实现从理论体系到实践应用的有效衔接。

表 5 内蒙古电化学储能电站安全风险指标权重分配

Table 5 Safety risk indicator weight distribution for electrochemical energy storage stations in Inner Mongolia

评价维度	准则层	权重	权重依据
技术风险（50%）	*W*1：电化学储能单元	13%	按既定比例分配，电池作为核心风险源，在蒙西极端环境下劣化加速，是技术风险防控的核心环节
	*W*2：电气设备	7%	按既定比例分配，电气设备承担能量转换与传输功能，蒙西高电压等级场景下故障易引发电网波动，风险占比突出
	*W*3：电池室和电池舱	4%	按既定比例分配，作为电池集群的物理载体，其结构与环境风险影响范围相对集中，但蒙西风沙可能加剧密封失效问题
	*W*4：消防及应急照明设施	12%	按既定比例分配，锂电池火灾扑救难度大，蒙西偏远地区外部救援滞后，消防与应急系统对事故损失控制至关重要
	*W*5：识别与预警系统	2%	按既定比例分配，主动防控体系技术成熟度较高，但仍需针对蒙西极端环境强化适配性，权重相对较低
	*W*6：基础设施	7%	按既定比例分配，蒙西冻土、风沙等地质气象条件对基础设施稳定性影响显著，直接支撑设备运行安全
	*W*7：电网特性与技术前沿	4%	按既定比例分配，体现构网型技术、调度交易对电网安全的特殊要求
管理风险（50%）	*W*8：设备管理	3%	按既定比例分配，设备全生命周期管理涵盖选型、安装、运维等关键环节，对极端环境下电站安全运行起到基础保障作用
	*W*9：消防管理	7%	按既定比例分配，结合锂电池火灾高危害性及蒙西地域救援特点，消防管理的制度落实、培训演练等环节权重占比最高
	*W*10：预警系统管理	3%	按既定比例分配，预警系统的运行维护直接影响风险“早发现、早处置”效率，需匹配地域环境强化管理
	*W*11：建筑物及其内部环境管理	4%	按既定比例分配，建筑物与内部环境的日常管理关联设备运行基础条件，蒙西地域特征对其管理要求更高，权重占比较高
	*W*12：运行维护与退役管理	3%	按既定比例分配，极端环境下的运维流程规范与退役环节合规性管控，对风险防控与环保要求均至关重要
	*W*13：特种作业管理	2%	按既定比例分配，高处作业风险集中但发生概率较低，重点通过严格规范操作流程实现风险管控
	*W*14：应急管理	3%	按既定比例分配，极端天气与偏远位置增加应急处置难度，应急预案、处置能力等环节需针对性强化
	*W*15：制度与体系管理	2%	按既定比例分配，制度体系是管理工作的基础框架，需适配蒙西地域特征完善，但权重相对于核心管理环节较低
	*W*16：人员管理	6%	按既定比例分配，蒙西储能电站专业人才稀缺，人员资质、技能与健康防护直接影响操作安全性，权重占比突出
	*W*17：流程管理	2%	按既定比例分配，准入验收、操作运维等流程的地域适配性优化可降低操作风险，但整体风险影响范围相对有限
	*W*18：外部协同与环境管理	2%	按既定比例分配，外部技术支持、社区联动等风险影响范围较窄，通过建立地域专属联动机制即可有效管控
	*W*19：文档与记录管理	1%	按既定比例分配，技术文档与运维记录是管理闭环的基础支撑，但对整体安全风险的直接影响相对较小
	*W*20：自然环境与能源结构	5%	按既定比例分配，综合反映沙戈荒恶劣气候与草原生态保护带来的管理风险
	*W*21：产业模式与战略定位	7%	按既定比例分配，体现大基地多能互补及零碳园区协同对管理的新要求

4 内蒙古典型电化学储能电站安全风险评价实践

以内蒙古具有典型代表性的包头百灵储能电站作为实施案例，运用本研究提出的“技术-管理”双维度三级量化评价体系开展安全风险评价，基于评价模型的打分结果，梳理该电站安全管控的优势与待改进方向，为同类电化学储能电站安全运营提供参考。

包头百灵储能电站是内蒙古首批示范项目中首个并网送电的电网侧独立新型储能电站，是内蒙古电化学储能领域的标杆项目。电站于 2024 年 8 月开工，10 月并网，12 月进入商业化运营，一期建

表6　内蒙古电化学储能电站安全风险分级表

Table 6　Safety risk classification of electrochemical energy storage power stations in Inner Mongolia

风险等级	分级标准
低	不存在直接判定项，且评价单元得分≥90
一般	不存在直接判定项，且80≤评价单元得分<90
较大	不存在直接判定项，且60≤评价单元得分<80
重大	存在直接判定项，或评价单元得分<60

设200 MW/800 MWh电网侧储能电站，采用“磷酸铁锂+全钒液流”混合储能技术，兼顾稳定性与安全性。其中，195 MW/780 MWh磷酸铁锂系统由234个储能电池预制舱和57个一体机舱组成，选用280 Ah电芯；5 MW/20 MWh全钒液流系统由16个储液预制舱、8个功率舱和2个一体机组成，电解液为水性溶液[21]。

4.1　基于评价模型的打分结果

4.1.1　计算依据与前提说明

依据前述评价方法，采用式(1)计算各单元风险得分，再按各自权重占比计算技术风险得分和管理风险得分，最终得出电站总体风险得分。

4.1.2　风险得分计算

（1）技术风险类单元

依据技术风险单元1~7权重占比依次为：13%、7%、4%、12%、2%、7%、4%，结合表7电站技术风险类单元计算结果，得出：

技术风险得分=98.2×13%+100×7%+97.0×4%+100×12%+100×2%+100×7%+100×4%=48.65（总分50）

表7　技术风险类单元计算结果

Table 7　Calculation results of technical risk units

单元编号	单元名称	N_A（A类总数）	N_B（B类总数）	N_{A1}	N_{A2}	N_{B1}	N_{B2}	单元风险得分	单元风险等级
1	电化学储能单元	12	5	1	0	0	0	约98.2	低风险
2	电气设备	10	7	0	0	0	0	100.0	低风险
3	电池室及电池舱	6	3	0	0	1	0	约97.0	低风险
4	消防及应急照明设施	12	12	0	0	0	0	100.0	低风险
5	识别及预警	6	4	0	0	0	0	100.0	低风险
6	基础设施	8	5	0	0	0	0	100.0	低风险
7	电网特性与技术前沿	4	1	0	0	0	0	100.0	低风险

（2）管理风险类单元

依据管理风险单元8~21权重占比分别为3%、7%、3%、4%、3%、2%、3%、2%、6%、2%、2%、1%、5%、7%，结合表8电站管理风险类单元计算结果，得出：

管理风险得分=100×3%+95.7×7%+100×3%+100×4%+93.6×3%+100×2%+100×3%+100×2%+98.2×6%+100×2%+100×2%+100×1%+100×5%+100×7%=49.40（总分50）

（3）电站总体风险得分

总体风险得分=技术风险得分+管理风险得分=48.65+49.40=98.05（总分100）

4.2　风险等级判定与针对性建议

根据研究提出的风险分级逻辑，在电站无直接判定的风险项时，总体得分≥90判定为低风险；计算结果显示，包头百灵电站总体得分为98.05分，判定为低风险。其中技术风险与管理风险得分均表现良好，反映出电站在设备选型、系统监控、运维规范及应急管理等方面的综合优势。同时，根据打分情况提出电站可优化的方面如下。

一是电池预制舱消防水系统细节有待完善。建议补充消防水源可靠性验证报告，确保极端情况下消防供水不中断。二是退役电池回收管理需提前规划。建议提前编制专项退役电池回收管理办法、操作规范，搭建标准化、全流程化的回收管控体系；明确各类相关资料的保存期限；提前筛选、对接退役电池回收的优质企业，签订长期合作协议。三是极端天气应对措施可进一步细化。建议补充极端低温下电池预热、电解液防冻措施，以及沙尘暴天气下电池舱通风过滤系统的防护方案，确保恶劣环境下设备稳定运行。

5　结论与建议

针对内蒙古地域特征、极端环境和战略定位，系统开展具有内蒙古特色的电化学储能风险辨识，构建“技术-管理”双维度、覆盖“目标层-准则

表8 管理风险类单元计算结果

Table 8 Calculation results of management risk units

单元编号	单元名称	N_A（A类总数）	N_B（B类总数）	N_{A1}	N_{A2}	N_{B1}	N_{B2}	单元风险得分	单元风险等级
8	设备管理	9	5	0	0	0	0	100.0	低风险
9	消防管理	6	8	1	0	0	0	约95.7	低风险
10	预警系统管理	5	5	0	0	0	0	100.0	低风险
11	建筑物及其内部环境管理	3	1	0	0	0	0	100.0	低风险
12	运行维护与退役管理	8	4	1	0	2	0	约93.6	低风险
13	特种作业管理	8	6	0	0	0	0	100.0	低风险
14	应急管理	6	6	0	0	0	0	100.0	低风险
15	制度与体系管理	3	3	0	0	0	0	100.0	低风险
16	人员管理	5	8	0	0	1	0	约98.2	低风险
17	流程管理	1	2	0	0	0	0	100.0	低风险
18	外部协同与环境管理	2	5	0	0	0	0	100.0	低风险
19	文档与记录管理	2	3	0	0	0	0	100.0	低风险
20	自然环境与能源结构管理	3	2	0	0	0	0	100.0	低风险
21	产业模式与战略定位管理	3	0	0	0	0	0	100.0	低风险

层-指标层”的全生命周期评价体系，并通过在大型电站的应用实践，进一步印证评价体系的重要实操价值和系统化指导意义，为科学评估以内蒙古为代表的极端环境地区电化学储能安全水平、隐患整改与分级管控提供了量化工具与方法。研究认为，电化学储能电站须持续研究分析新形势下国内外储能电站事故调查报告，定期检查安全工作记录等材料，在运用指标体系过程中，根据储能技术迭代升级、政策演进等内外部变化因素，及时更新评价指标。

结合研究结论，提出内蒙古电化学储能安全风险管控建议如下：一是强化政策标准落地与地域适配。结合新能源富集、极端气候多发、工业转型推进的地域特征，制定符合本地特征的风险评价导则，明确电池舱耐低温、防沙密封、电缆防腐蚀等专项技术要求，细化“风光储一体化”项目的安全准入条件，避免在生态敏感区域布局储能电站。建立电池全生命周期的碳足迹追溯与退役处置规范，完善储能电池退役回收的全过程业务内容[11]，避免因退役电池处置不当引发的安全风险和环境污染。二是筑牢技术风险防控的本质安全防线。针对内蒙古严寒、强风沙等极端环境，对在运电站实施设备专项改造：为电池舱增设沙尘过滤与保温系统，优化冷却系统防堵塞结构；在沙漠周边电站配套建设防风沙设施，切实提升设备在极端环境下的运行稳定性。推进智能监测与预警系统升级。三是完善管理体系与责任落实。明确电站业主的安全第一责任，以及运维单位、设备厂家的连带责任，通过签订安全责任状等形式，压实各环节安全责任。推进安全生产标准化建设，构建全员参与、闭环管控的安全管理长效机制，打造特色安全文化标识，推动安全文化与电化学储能电站运营深度融合。四是强化应急能力建设与外部协同。持续修订完善电化学储能电站应急处置预案，全面覆盖电池热失控、电解液泄漏、极端天气及缺水条件等引发事故的典型场景。电站定期联合地区有关部门开展联合应急演练。严格落实电站投运后的安全后评价要求，及时发现并整改安全隐患。

参 考 文 献

[1] 中国电力企业联合会. 2025年度电化学储能电站行业统计数据[R]. 北京, 2025.

[2] 周庆雨, 张国维, 杨立斌, 等. 电化学储能电站火灾事故多维度特征分析与消防安全现状研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(11): 4254-4263.
ZHOU Q Y, ZHANG G W, YANG L B, et al. Multidimensional analysis of fire accidents in electrochemical energy storage stations and current status of fire safety[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(11): 4254-4263.

[3] 中国电力企业联合会. 2024年度电化学储能电站行业统计数据[R]. 北京, 2025.

[4] 国家能源局综合司, 工业和信息化部办公厅, 应急管理部办公厅, 市场监管总局办公厅, 国家消防救援局办公室. 关于加强电化学储能安全管理有关工作的通知: 国能综通安全〔2025〕65号[Z]. 2025-04-11.

[5] 权朝明, 李凯明, 张生娟, 等. 电化学储能行业标准体系建设现状及发展建议[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(11): 4384-4398.

QUAN C M, LI K M, ZHANG S J, et al. Current status and development suggestions for the construction of industry standards for electrochemical energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(11): 4384-4398.

[6] 于璐, 张辉, 田培根, 等. 一种梯次利用电池可重构储能系统多级在线安全评估及风险预警定位方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 461-467. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0309.
YU L, ZHANG H, TIAN P G, et al. Multi-level on-line safety assessment of reconfigurable energy storage system using secondary batteries risk warning postitioning method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 461-467. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0309.

[7] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站信息架构与安防体系综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 179-191. DOI: 10.7500/AEPS20210223003.
LI J L, WU Y W, WANG N, et al. Review of information architecture and security system of gigawatt electrochemical energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 179-191. DOI: 10.7500/AEPS20210223003.

[8] 赵北涛, 郭洪昌. 国内外电化学储能电站安全分析及展望[J]. 农村电气化, 2022(1): 69-71.
ZHAO B T, GUO H C. Analysis and prospect for safety of electromechanical energy storage power stations[J]. Rural Electrification, 2022(1): 69-71.

[9] DAVION H. Battery safety for power engineers: considerations for safer energy storage installations[J]. Power Engineering, 2016, 120(6): 24-29.

[10] 汝会通, 王广玲. 锂离子电池储能电站的早期预警风险分析[J]. 电子技术, 2021, 50(9): 208-209.
RU H T, WANG G L. Study on early warning and risk of lithium ion battery energy storage power station[J]. Electronic Technology, 2021, 50(9): 208-209.

[11] 康荣学, 左哲. 双碳目标下电化学储能电站安全可持续发展战略研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(S1): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2021.z1.009.
KANG R X, ZUO Z. Study on safety and sustainable development strategy of electrochemical energy storage power station under dual carbon target[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(S1): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2021.z1.009.

[12] 肖勇, 徐俊. 基于组合赋权与TOPSIS的储能电站电池安全运行风险评价[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2574-2584. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0127.
XIAO Y, XU J. Risk assessment of battery safe operation in energy storage power station based on combination weighting and TOPSIS[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2574-2584. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0127.

[13] 朱董军. 锂电池储能电站运行期安全风险管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
ZHU D J. Research on safety risk management of lithium-ion battery energy storage station during operation period[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[14] 葛会方, 陈英, 王韶辉, 等. 煤矿储能电站电池安全运行评价及障碍因素研究[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(9): 48-54. DOI:10.3969/j.issn.1001-425X.2023.09.011.
GE H F, CHEN Y, WANG S H, et al. Study on safety operation evaluation and obstacle factors of battery in coal mine energy storage power station[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(9): 48-54. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-425X. 2023.09.011.

[15] 刘纪坤, 袁雪颖, 梁栋, 等. G1-CRITIC组合赋权云模型下的储能电站火灾风险评价[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(3): 447-455.
LIU J K, YUAN X Y, LIANG D, et al. Fire risk evaluation of energy storage power station based on G1-CRITIC combination weighting cloud model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(3): 447-455.

[16] 宁雪峰, 张慧珍, 许加柱. 基于改进AHP-TOPSIS的储能电站安全综合评估[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 251-259.
NING X F, ZHANG H Z, XU J Z. Comprehensive safety evaluation of energy storagepower station based on improved ahp-topsis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(5): 251-259.

[17] 陈西江, 毛晓萱, 胡少华. 电化学储能电站运行风险评价模型与应用研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(4): 1257-1266.
CHEN X J, MAO X X, HU S H. Research on operation risk assessment model and application of electrochemical energy storage power station[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(4): 1257-1266.

[18] 沈进冉, 官亦标, 张彦军, 等. 电化学储能电站安全风险评估综述[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 1-13. DOI:10.19666/j.rlfd.202412255.
SHEN J R, GUAN Y B, ZHANG Y J, et al. A review on the safety risk assessment of electrochemical energy storage power stations [J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 1-13. DOI:10.19666/j.rlfd.202412255.

[19] CONZEN J, LAKSHMIPATHY S, KAPAHI A, et al. Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 81: 104932. DOI:10.1016/j.jlp.2022.104932.

[20] ROSEWATER D. Grid-scale energy storage hazard analysis and design objectives for system safety[C]//Proposed for Presentation at the Energy Storage Systems Safety and Reliability Forum Held April 20-21, 2021. US DOE, 2021. DOI:10.2172/1864636.

[21] 包头市工业和信息化局. 内蒙古首个并网送电!包头百灵储能电站破解新能源消纳难题[EB/OL]. (2025-09-28) [2026-05-07]. http://gxj.baotou. gov. cn/ywdt/ywdt_gzdt/gzdt_kjdz/202509/t20250928_594118.html.