

# 新兴能源基础设施安全风险分析与防控体系

罗魁<sup>1</sup>, 郭剑波<sup>1</sup>, 高飞<sup>1</sup>, 李涛永<sup>1</sup>, 郭秀梅<sup>2</sup>, 刘铠诚<sup>1</sup>, 张博<sup>3</sup>, 孙旭东<sup>4</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

2. 有研工程技术研究院有限公司, 北京市 怀柔区 101417;

3. 厦门大学管理学院, 福建省 厦门市 361005;

4. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京市 海淀区 100083)

## Safety Risk Analysis and Prevention Control System for Emerging Energy Utilization Infrastructure

LUO Kui<sup>1</sup>, GUO Jianbo<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>, LI Taoyong<sup>1</sup>, GUO Xiumei<sup>2</sup>, LIU Kaicheng<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>3</sup>, SUN Xudong<sup>4</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd., Huairou District, Beijing 101417, China;

3. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China;

4. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Haidian District, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** Under the background of carbon peaking and carbon neutrality, with the gradual improvement of electrification of end-use consumption and hydrogen energy utilization, emerging energy utilization infrastructure on the user side is showing an explosive growth trend. While accidents occur frequently, safety concerns of emerging energy utilization infrastructure are constantly prominent, restricting the healthy development of the related industry. This paper comprehensively sorts out the main safety risk factors of emerging energy utilization infrastructures represented by energy storage stations, charging stations, hydrogen refueling stations, integrated energy systems, etc. The current gaps and challenges in the safety risks recognition, prevention, control, and regulation of various infrastructures during the full life cycle are analyzed, and the common status and overall situation of safety risks and risk mitigation are further summarized. With this contribution, systematic framework and countermeasures have been proposed from several aspects, such as technological innovation in risk prevention and control, multi-stakeholder regulation, and construction of a public safety guarantee system, providing support and reference for the safety risk prevention and control of emerging energy utilization infrastructure in China.

**KEY WORDS:** emerging energy utilization infrastructure; safety risk; accident analysis; prevention and control system

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2021-JZ-03); 国家电网有限公司总部科技项目(5400-202355235A-1-1-ZN)。

Project Supported by Chinese Academy of Engineering's Strategic Research and Consulting Program (2021-JZ-03); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202355235A-1-1-ZN).

**摘要:** “双碳”背景下, 随着终端电气化水平和氢能利用占比的逐步提高, 新兴能源基础设施呈现爆发性增长趋势, 与此同时, 安全事故频发, 安全问题不断凸显, 制约了产业的健康发展。对以储能站、充电站、加氢站、综合能源站等为代表的新兴能源基础设施的主要安全风险要素进行了全面梳理, 剖析了当前全环节、全链条安全风险认知、防控、监管方面存在的问题和挑战, 并进一步总结了新兴能源基础设施安全风险及防控的共性现状和总体形势。在此基础上, 从安全防控技术创新、多利益相关方监管、公共安全保障体系建设等维度提出了安全防控体系性框架和应对措施, 为我国新兴能源基础设施的安全防控与保障提供支撑和参考。

**关键词:** 新兴能源基础设施; 安全风险; 事故分析; 防控体系

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1831

## 0 引言

2020年9月, 中国在联合国大会上向世界宣布了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标。能源结构转型是实现双碳目标的主要途径, 在能源生产侧, 清洁能源替代化石能源, 在能源消费侧, 推动电能替代以降低社会整体碳排放。随着新型电力系统中新的终端用能及供需互动方式的不断出现, 以储能站、充电站等为代表的各类新兴能源基础设施呈现爆发式增长<sup>[1-3]</sup>。截至2022年底, 我国新型储能累计装机规模首次突破10GW, 达到13.1GW/27.1GW·h, 功率规模年增长率达128%, 能量规模年增长率达141%<sup>[4]</sup>; 充电基础设施累计数量达520万台, 同比增加近100%<sup>[5]</sup>, 车桩比持续下

降,达到 2.5:1。预计到 2025 年我国新型储能装机规模达 30GW 以上<sup>[6]</sup>,2030 年电动汽车保有量达 8000 万台,车桩比达 1:1。同时,随着燃料电池汽车保有量的不断增加,我国建成加氢站数量不断上升,截至 2023 年 4 月,全国累计建成加氢站超过 350 座,约占全球总数的 40%,居全球第一<sup>[7]</sup>,预计 2025 年可实现“万车千站”。

与此同时,国内外能源基础设施安全事故频发,储能设施着火、加氢站爆炸、新能源汽车充电过程自燃等相关安全隐患突出。2021 年 4 月 16 日北京光储充一体化项目安全事故造成 1 人遇难、2 名消防员牺牲,产生了重大的行业影响<sup>[8]</sup>;韩国、美国、澳大利亚也发生了多起储能安全事故<sup>[9]</sup>;2022 年 4 月 19 日,北京新能源汽车换电站由于电池短路起火爆炸,烧毁两部储存于集装箱内的锂电池;2019 年 6 月,挪威奥斯陆郊外的一座合营加氢站发生爆炸,事故导致两人受伤,相关汽车公司在挪威停售氢能源车。尽管这些事故发生多呈现零星、散发、多源的阶段,但引发社会和业界广泛关注和担忧,严重影响新兴能源基础设施建设与相关产业链的健康发展,新兴能源基础设施的安全问题不容忽视<sup>[10-11]</sup>。

新兴能源基础设施在用能终端呈现多种形态,落点分散,利益主体复杂,新能源汽车种类繁多,电能利用与非电利用、公用充电站与私人充电桩共存,油、气、氢、电等综合供给服务的集成特征明显<sup>[3,12-13]</sup>,同时终端用能关键技术革新日新月异,新型能源基础设施不断涌现,全生命周期、全流程、多形态基础设施的安全防控和动态监管日益复杂。例如,氢能产业从制储运到加氢站的各个环节都存在安全风险<sup>[11,14]</sup>,气氢站、液氢站、油氢合建站、油氢电气综合能源站等不同的建站方式<sup>[15]</sup>、不同技术路线的储运氢方式,衍生出的风险类型差异较大,给氢能应用基础设施安全防控和管理带来很大

难度。此外,未来终端用能及供需互动方式与社会、用户紧密联系,对社会公共安全的影响不断凸显,与电网的深度交互也将对电网的运行安全带来影响<sup>[16]</sup>。

当前能源基础设施的安全防控暴露诸多问题,相关风险防控技术和手段有待完善,安全监管、技术保障体系尚未完全建立,因此本文针对不同类型新兴能源基础设施开展安全风险及防控技术分析,建立安全防控技术保障框架与体系,降低安全风险对新兴能源基础设施健康发展的影响和制约,为我国能源转型过程的平稳、安全提供决策支持。

## 1 安全风险定义、类型与事故分析

新兴能源基础设施是指为社会生产和居民生活提供能源供应的基本物质工程设施,在用能侧包括储能、充电、加氢、综合能源等基础设施。安全风险是某一特定危险情况发生的可能性和后果的组合,在安全生产领域,能源基础设施安全风险一般是指可能发生的危险情况及后果的严重程度,事故后果越严重,安全风险越大。新兴能源基础设施安全风险包括能源基础设施自身安全性能,即本质安全风险,进一步延伸,还包括发生安全事故后对社会带来的公共安全风险,包括供能安全、环境安全、人员安全等<sup>[17]</sup>。安全风险源是指可能带来上述安全风险的潜在危险因素。

用能侧的新兴能源基础设施其主要本质安全和公共安全类型和要素如表 1 所示。从安全事故的诱因来说,基础设施建设运行过程中碰撞、过充、泄露、短路等因素均可导致安全事故的发生,进而形成高温、过热、燃烧、爆炸、失控、扩散等安全事故,其连锁反应将带来社会公共安全风险,如火灾爆炸、供能/电中断、人员安全、环境安全等。相较于本质安全,公共安全风险更易引起公众关注和重视。

表 1 新兴能源基础设施安全风险  
Table 1 Safety risks for emerging energy utilization infrastructures

风险类型	储能站	充电站	加氢站	综合能源站
本质安全	主要风险 储能电池热失控风险	电动汽车动力电池热失控、 充电设施失效及电击风险	储氢容器氢泄露、 氢脆性	多能耦合安全、 多能源介质传递风险
事故诱因/激因	设备故障、电池问题	过充、老化、电池短路、故障	设备故障	N-1 连锁故障
公共安全	事故影响	火灾爆炸、供能/电中断、人员安全、环境安全、经济损失		

### 1.1 储能基础设施

储能分为机械储能、电磁储能、电化学储能等多种类型,技术类型不同,安全风险不同,如表 2 所示。目前以锂离子电池为代表的电化学储能是新

型储能中的主流储能类型<sup>[18]</sup>,锂离子电池储能电站中电池的数量多、能量高、布置密集、热失控诱发因素多,是电池储能电站中最大的安全风险源。锂离子电池发生热失控连锁反应后,会引起高温、燃

**表 2 不同储能类别的安全特性**  
**Table 2 Safety characteristics of different energy storage categories**

类别	技术类型	安全风险
机械储能	压缩空气储能	高压气体风险
	飞轮储能	旋转机械风险
电化学储能	锂离子电池	热失控风险
	钠离子电池	热失控风险
	全钒液流电池	电解液泄露风险
	钠硫电池	高温、燃爆风险
电磁储能	铅炭电池	析氢、燃爆风险
	超导储能	低温、漏磁风险
	超级电容	热失控风险

烧、爆炸<sup>[19]</sup>，并且反应产物具有潜在污染性，将引发不同层面的社会公共安全问题<sup>[20]</sup>。

据不完全统计，截至 2023 年 10 月，全球共发生 67 起储能电站起火事故，韩国最多，占比达到 45%<sup>[21]</sup>，绝大多数是三元锂离子电池系统，且系统规模多数在 1~10MW·h 以内，主要是充电后搁置阶段起火。2019 年 4 月 19 日，美国亚利桑那州 McMicken 变电站 2MW 锂离子电池储能火灾，急救人员打开集装箱前门后，爆炸导致 4 名消防员受伤。

此外，事故扩大还将进一步对重要基础设施造成影响。2022 年 10 月 15 日，韩国重要数据中心因电池起火断电，导致韩国两大互联网巨头 Naver 和 Kakao 中断网络服务，韩国金融交通运输等几乎所有部门受到严重影响<sup>[22]</sup>。

### 1.2 充电基础设施

充电设施是为电动汽车提供充电服务的场所，一般分为私人充电桩和公共充电站 2 种形式，其安全风险源涉及充电站/桩与电动汽车 2 方面，包括充电设施劣化失效及电击风险和电动汽车静置状态、充电状态风险<sup>[17,23]</sup>，如图 1 所示。

充电设施电击风险主要是指充电设备漏电、短路、带电拔枪电弧等带来的人身伤害事故；充电设施劣化失效是指充电站内线路、充电设备老化带来的缆排熔融、设备冒烟、电缆沟槽着火等安全风险。

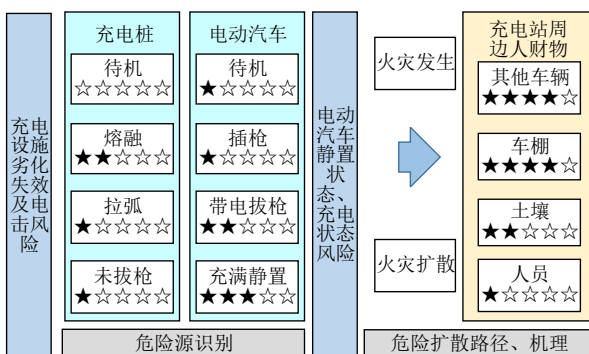


图 1 充电基础设施安全风险源

Fig. 1 Charging infrastructure safety risk sources

充电站内电动汽车动力电池是最大危险源，磷酸铁锂电池寿命 5~8 年、循环寿命 2000~3000 次，三元锂电池老化衰退速度明显，寿命更短，电池频繁过充、老化将增加起火、爆炸等风险，进而导致火灾等社会公共安全问题，存在难探测、发展快、易蔓延特点。2015 年 4 月 26 日，深圳湾口岸充电站电动大巴车过充导致动力电池冒烟、起火，火势迅速蔓延，大巴最终被烧毁。据不完全统计，电动汽车充电过程中着火事故占电动汽车着火事故比例约 25%，其动力电池热失控是着火事故的主要原因。其中，三元锂电池事故占比最高，达到 84.28%，磷酸铁锂电池占比为 8.18%，事故多发于高荷电状态(state of charge, SOC)状态<sup>[24]</sup>。

充电设施大规模无序接入配电网会对电网的运行安全产生影响，带来调峰能力不足及电能质量问题<sup>[25]</sup>。此外，劣质充电设施运行噪音、电磁辐射将干扰周边人员，着火事故救援产生废烟废气废水等也带来一系列环保问题。

### 1.3 加氢基础设施

加氢站从用途属性分类，建成站以纯氢站为主，其次为油氢合建站。储氢容器是加氢站内核心设备，也是主要安全风险源，当前国内主要应用的是高压气态储氢容器，液氢储罐和有机液储罐还没有实际应用案例。

氢气具有密度小、扩散系数大、点火温度低、爆炸极限宽(体积分数 4%~74%)和燃烧火焰速度快等特点，如表 3 所示，在我国长期以来被作为危化品管理，其具有泄漏性、挥发性、可燃性、爆炸性、氢脆性等属性<sup>[26]</sup>，易引起氢泄漏、氢燃烧、储氢罐爆炸、火灾等事故，加氢站内存储的大量高压氢气若发生泄露，极易形成大规模可燃气体云，一经点燃便会引发剧烈的爆炸事故，将造成人身伤害及供能中断。

**表 3 不同可燃气体特性**  
**Table 3 Different combustible gas characteristics**

特性	爆炸极限/ %	燃烧点能量/ MJ	扩散系数/ (m <sup>2</sup> /s)	能量密度/ (MJ/kg)
氢气	4.1~75	0.02	6.11×10 <sup>-5</sup>	143
汽油蒸汽	1.4~7.6	0.2	0.55×10 <sup>-5</sup>	44
天然气	5.3~15	0.29	1.61×10 <sup>-5</sup>	42

据不完全统计，2000—2020 年间，全球车用氢能产业链共发生 90 起涉氢事故，其中涉及制氢生产环节 12 起，供氢母站环节 6 起，运输环节 24 起，加氢站及合建站环节 48 起，是发生事故最多的风险环节，其中有 19%发展为火灾或爆炸事故<sup>[27]</sup>。2019 年 6 月，挪威加氢站爆炸起火，2 人受伤，原



因是高压储氢罐端头部分一个特殊结构安装失误，导致氢气发生泄露；2019年6月，美国加州圣塔克拉拉的一家化工厂，因储氢罐泄露导致爆炸，虽无人员伤亡，但导致当地氢燃料电池汽车氢供应中断；2021年12月，安宁市草铺街道云南石化生产区渣油加氢装置处发生起火，事故造成4人受伤。

## 1.4 综合能源基础设施

综合能源站集成了用户侧能源生产、转化、传输、存储、使用设备，横跨多个领域和专业，多能源类型、多利益主体并存，传递介质呈多时间尺度，耦合关系复杂。例如，交通领域的油气合建站、油氢合建站等，一般称为“多站合一”或“多站融合”；建筑领域的冷、热、气、电、氢多种供能方式，无论在何种领域，其更多是指基础设施的组合形式。

综合能源站风险源在单设备/子系统安全性之外，更多关注多种能源类型、多时间尺度、多风险源的耦合安全和供应安全<sup>[28]</sup>，以及所带来的社会公共安全风险，包括人身消防安全、多能源耦合供能可靠性，其本质安全和公共安全风险随用能形态、应用场景变化而不同。

随着各能源子系统间的耦合程度不断增加，单一能源子系统内部扰动所引起的冲击经由多种类型耦合元件扩散和传递，会直接威胁到整个多能互补综合能源系统的安全运行。例如不同能源系统的故障可能通过能源系统之间的耦合而传播，进而导致更加严重的后果。2017年中国台湾地区发生的“8·15”大停电事故就是因为天然气供应中断导致6台燃气机组脱网，进而导致电力系统大停电，最终影响了该地区85%的人口<sup>[29]</sup>。

## 2 安全风险问题分析及形势

### 2.1 储能基础设施

国内外储能电站火灾事故暴露出目前在储能电站的安全管理、安全保障方面普遍存在不足，用户侧储能不仅存在这些问题，某些方面更为严重(如人员操作及管理问题、规划设计选址问题)其发生安全事故将引起更大的社会影响。

1) 储能主要部件和设备的安全和质量把关不严，储能全链条安全检测检验尚未形成闭环。储能电池存在质量问题或选型不当会导致内阻、电压、温度等状态异常，在滥用条件下极易发生热失控，除储能电池以外，电池管理系统、储能变流器以及其他电气设备等出现故障、失效等情况，也会诱发安全问题。目前安全测试项目主要针对电池电芯级别、模块级别，而电池簇、电池系统级别的安全测

试及评价项目尚不健全，储能安全检测检验体系不完整导致储能工程投运前难以检查出系统安全隐患<sup>[30]</sup>。

2) 储能系统整体安全解决方案不成熟。储能电站安全问题涉及到设备本体、系统设计、电站设计、消防等多个维度，任何一个维度出现问题都可能会影响储能电站的整体安全<sup>[31]</sup>。然而，目前在储能电站安全设计、消防技术等方面还面临很多问题尚未解决，储能电池预警系统、防护隔离措施的可靠性还有待提高，比如，预警不及时、存在误报现象，储能系统热失控蔓延抑制隔离效果差等，已建储能电站配置的储能自动灭火系统有效性缺乏验证。总体来看，适用于储能的安全解决方案和立体防控体系尚不成熟，需要根据工程应用效果快速迭代、优化完善，保障储能电站安全<sup>[32]</sup>。

3) 人员操作不规范及安全生产标准化水平低。储能系统属于高电压、高能量的带电系统，操作或者现场处置不当，容易出现安全问题；储能系统全寿命周期运行过程中健康状态逐渐降低，故障隐患逐渐增多，电站管理及运维人员对于储能系统安全性认识有待提高；某些已建储能电站安全管理制度不健全，现场安全管理不规范，未开展定期安全风险评价及并网性能评价，个别储能电站安全隐患长期存在，需要加强电站安全生产标准化工作。

4) 用户侧储能安全问题更为复杂。由于需求分散且每个用户侧储能项目功率、容量以及运行方式需要依据当地电价政策和需求单位用电习惯等定制，常规大型储能系统的设计方案、运维保障措施难以复制。用户侧储能多是用户后期提出的需求，在早期用地规划中并未将储能考虑在内，因此大多数工业企业可能会面临项目占地面积紧张的局面，而从安全角度考虑，相关规范标准都对储能的选址、安全距离有明确规定，这对保障用户储能的安全提出了更高要求。

### 2.2 充电基础设施

针对充电站内两类风险主体，本文从本质安全、系统安全、并网安全、公共安全等方面分析安全防控面临的技术、监管问题和趋势。

1) 规划设计等全生命周期安全防控考虑不足。充电站设计建造初期对电动汽车火灾问题认知不足，在消防给水、排烟、救援通道、防火间隔等方面考虑不足，特别是封闭空间，如地下车库充电设施安全隐患大于地面，发生事故后消防救援难度大。充电站电动汽车着火后事故范围极易扩大，导致的财产损失、社会舆情将影响充电行业发展。

2) 立体安全防控体系尚未建立。受电动汽车自身电池管理系统(battery management system, BMS)保护机制、充电桩保护机制、电动汽车售后维保体系层层防护,安全风险源的数量逐步减少,但实践中受制于认知、能力、机制等因素影响,仍然无法杜绝小概率安全事故发生。电动汽车着火概率约为万分之几量级<sup>[33-34]</sup>,安全风险识别及预警是降低安全事故发生的重要一环。针对过充、老化、过热等问题,充电站及电动车的风险识别与预警技术不足,导致安全风险难以在事故前发现并处理。同时,防事故防扩散及消防措施不足,导致着火事故风险扩大化<sup>[35]</sup>。

3) 大功率充电增大安全风险。充电设施快速发展,受市场偏好影响,呈现高电压、大功率充电趋势,火灾、人身安全和电网运行安全风险增大。如单车充电电流越来越大,接近甚至超过 250A,易造成“虚接”缆排熔融、设备冒烟、电缆沟槽着火等;高电压下,带电拔枪-拉弧-击穿动力电池组风险增加,更容易产生安全事故。

4) 规模化发展后,加剧峰谷差及负荷电力电子化,增加谐波源。大规模电动汽车无序充电将对最大负荷及负荷峰谷差率产生影响,据测算,电动汽车无序充电将导致 2030 年国网公司经营区域峰值负荷增加 1.53 亿 kW<sup>[16]</sup>,相当于当年区域峰值负荷的 11%左右。在局部配电网中,当私家车电动化比例超过 50%,充电同时率超过 20%时,多数配电变压器将面临超载风险<sup>[36]</sup>。此外,根据实测显示车网互动模式在放电工况下整站电压谐波畸变率约 3%,电流谐波畸变率约 12%。未来伴随电动汽车保有量的持续增加,充电站对电网的影响是一个值得持续关注的问题。

5) 责任主体多,监管能力不足。充电桩的建设和运营受到能源、城建、消防、物业等多个政府与社会职能部门的管理,但各类监管政策实施主体部门不同,多部门管理造成牵头协调机制复杂,应明确、简化监管实施过程。此外,个别运营商、制造商过度追求低成本,降低充电站建设标准、不规范建设,开发的充电运营系统功能简陋等,增加了充电安全风险。

### 2.3 加氢基础设施

氢能安全问题已渗透到氢气的制、储、运和加氢用氢等各个环节,其中,加氢站的安全性问题格外凸显,主要包括站用部件和设备安全质量不过关、安全防控措施不足、人员现场操作和管理制度不规范等问题。基于全球氢事故报告数据库整理发

现,设备故障、人为失误、设计缺陷、维护不足四大原因合计占比过半<sup>[37-38]</sup>。进一步梳理,加氢基础设施安全风险防控主要有以下问题。

1) 主要部件和设备安全质量不过关,国产化水平有待提升。加氢站防护墙的长度、强度以及卸气软管的承压性能、防脱落甩动功能是影响卸气环节安全的关键因素;压缩机膜片、储存容器及其附件的不安全状态及压缩机部件的兼容性问题会引起压缩环节、储存环节氢气泄漏;软管密封、拉断阀问题会导致加注环节产生安全隐患;同时安全管理不到位会增大事故发生的可能性。我国在关键部件及装备技术水平上与国外还有差距,安全性有待提升,目前,我国加氢站加注压力为 35MPa,而国外多数为 70MPa 高压加氢,相关核心技术和零部件制造技术有待突破<sup>[39]</sup>。

2) 加氢站故障诊断与安全监控技术不完善,安全防护措施不足。①监测系统有待完善,难以及时检测氢气的泄漏并进行定位,隔离气源,设置快速发现泄漏的监测系统是保障加氢站安全的重要措施。②加氢站建筑结构规划设计不够合理,机械与自然通风设置不足,导致氢气易聚集,形成气云<sup>[40]</sup>。

3) 氢系统安全风险量化分析能力不足,工程化平台建设不健全。加氢站的量化风险分析(quantitative risk analysis, QRA)是指识别潜在危险及风险源,对潜在危险发生的概率及可能造成的后果进行分析,可为加氢站的规划设计提供科学依据,但氢泄漏/扩散/火灾/爆炸的行为机理和基础模型仍需要实验验证和完善,工艺系统零部件的失效概率也需要实践积累<sup>[27]</sup>。此外,氢能基础设施安全综合评价平台缺乏,难以为加氢站的全生命周期安全管理提供技术支持。

4) 监督和管理制度不规范。①技术标准不明确:加氢站与油电气合建站相关技术规范虽已在逐步修订中,但合建站规模、站内设施的安全间距等还没有明确细则。②人员操作问题:氢气无色无味易燃易爆的性质导致加氢站成为高危场所,调试运行现场极易出现氢气泄漏的可能,如果操作失误或者现场处置不当,容易出现安全问题。③管理归属有争议:对于氢气按照危化品管理,还是按照能源来管理,目前争议颇大。如果按危化品管理,建站审批流程复杂,准入条件较严格;如果按照能源管理,建站的审批程序相对简单,但在安全方面需增加更多要求,部分发达国家一般把氢能作为一种特定能源来管理<sup>[41]</sup>。



## 2.4 综合能源基础设施

当前综合能源站规模较小，设备种类相对单一，造成重大影响事故较少，随着能源站规模的不断扩大，形态结构快速发展(如交通领域加氢站、油氢综合站等)，设备种类增多、能源类型增加、有经验技术人员短缺，其安全问题将会越发突出，将对安全防控技术、标准制定、运行监督管理等带来挑战。

1) 单一能源系统的安全建设与运行在技术及管理方面已较为成熟，因此综合能源站的安全风险防控主要集中在多种能源系统耦合后的整体安全性方面，如电-热、电-气等子系统的连锁故障，以及 $N-1$ 故障下能否保证供电安全<sup>[42-43]</sup>，涉及规划、调度及运行3个层面，是典型的复杂系统多目标、多时段、多变量、多约束、高维数、混合整型、非线性组合优化问题。

2) 综合能源系统级技术标准缺失。目前单设备或系统的安全标准已较为完善，能够满足单一领域技术需求，但在多种能源耦合系统集成及整体安全方面技术标准严重欠缺，学术界、工程界在相关概念、边界及应用方式方面尚未统一明确。综合能源站不仅需要考虑单一能源系统或设备，更需要考虑不同系统之间的相互影响，尽早建立相关的安全标准、规范，形成实用化标准体系。

3) 相关合作及监管机制不明确。因行业壁垒，多能源类型接入下多单位多能源站合作机制不明晰，规划、运行安全防控缺乏统一性、整体性，各种区域能源供应系统(电力、天然气、热力等)彼此缺乏协调，长期存在设备利用率低、安全性低、灵活性差等问题；同时行业快速发展，鱼龙混杂，监管能力缺失，可能导致行业安全问题更加突出。

## 2.5 安全风险形势研判

基于现有新兴能源基础设施安全风险要素、事故、风险防控问题的分析梳理，总结和研判新兴能源基础设施安全风险和防控形势如下。

1) 现有安全事故成因复杂。全流程新兴能源基础设施涉及的风险点复杂多样，事故致因多元。安全风险涉及规划设计、生产制造、安装调试、检验检测、并网接入、运行维护、退役回收等各个环节，任何一个环节的疏忽都可能酿成安全事故。高温、过热、燃烧、爆炸、失控、扩散等事故成因复杂，并受设备质量、人员操作、防护措施不足等不同内外因激发。储能电池等新业态、新技术、新产品带来的特种灾害事故成因更为复杂，安全防控处置面临挑战。

2) 全环节安全风险认知仍不充分。我国新兴能源基础设施加速发展的同时，可能的安全风险尚未完全暴露，且其外延与内涵不断丰富，风险类型与事故种类认识不足。储能、氢能、充电站、油气氢综合能源等不同基础设施故障演化机理仍不明确，事故成因与诱因仍不清晰；除了常规安全、人身安全、设备安全风险以外，还存在系统运行安全、环境安全、网络与信息安全风险<sup>[44]</sup>，需要以系统观认识能源转型下的安全风险演化。由于对未来可预见的安全风险和未预见的潜在安全风险缺乏清晰认知，新兴能源基础设施的发展形态和发展路径尚需进一步探索。新材料、新产品、新业态带来的安全风险须加强研判，安全监管将不断面临新的挑战与更高的要求。

3) 多维度安全防控技术体系不完备。我国新兴能源基础设施安全风险防控技术发展尚不成熟，失效模型、风险评估、影响分析、控制手段不完善，大数据在故障诊断和预测中发挥作用不足，在设备级、电站级以及系统级缺乏有效的风险评估与安全风险防控手段，存在诸多技术难点、痛点甚至盲点。例如，在应急消防技术方面，储能火灾后使用机器人打开储能集装箱门，可以避免人员伤亡等次生灾害。涵盖事故前风险预测、事故中安全防护、事故后应急管理的多层次安全风险防控技术体系尚未形成，也未建立涵盖各层级的安全监管平台。

4) 安全监管制度建设滞后。安全风险无法消除，只能降低，而监管制度是实现全链条、全环节、全生命周期风险化解的重要手段，是将安全风险维持在较低水平的筛子。当前，基础设施安全监管体系建设不足，政策标准缺失广泛存在，同时随着新兴能源基础设施类型的多元化，利益主体多样，监管复杂性增强。例如，加氢站、充/换电站在审批流程上存在差异，主管部门和管理尺度不统一，监管和责任主体多，存在没有任何手续的违规建站。一些政府部门出台了相关监管应对措施，多以临时性应急为目的，缺乏战略性、系统性监管手段，难以有效发挥监管制度在风险预防、保障安全方面的重要作用。

## 3 安全风险防控体系

新兴能源基础设施安全风险防控面临技术、能力、监管等诸多问题，本节首先总结了国外安全风险防控经验与启示，随后以新兴能源基础设施安全为主线，以提升新兴能源基础设施利用的本质安全和公共安全风险防控能力、完善基础设施安全监管与应急保障体系为目标，建立新兴能源基础设施安

全风险防控框架，如图 2 所示。并进一步分析提出相应的体系应对措施和防控目标，优化新兴能源基

础设施产业发展环境，保障我国新兴能源基础设施的安全健康发展。

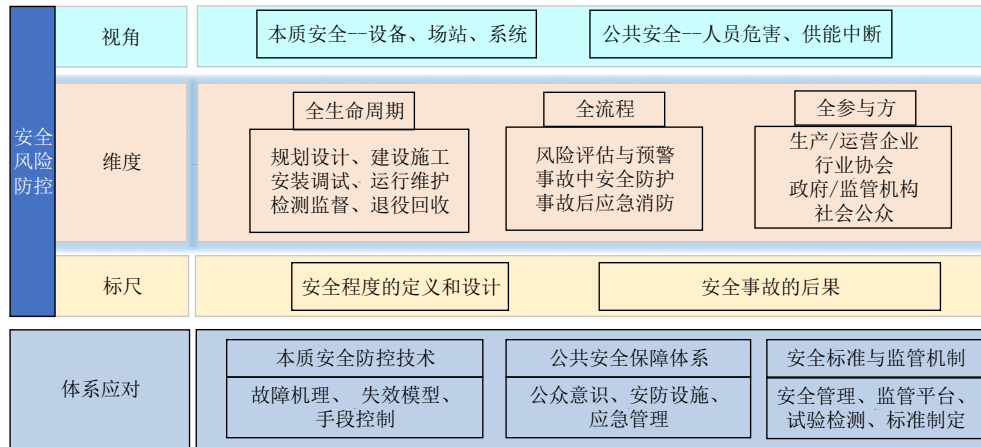


图 2 新兴能源基础设施安全风险防控框架与体系

Fig. 2 Framework of safety risks control for emerging energy utilization infrastructures

### 3.1 国内外经验与启示

新兴能源基础设施呈现规模增长快、靠近用户侧、分散式分布等特征，其带来的本质安全和公共安全风险问题不容忽视。安全水平是定义出来的，安全能力是设计出来的，安全结果是在规划设计的能力基础上监管出来的，因此新兴能源基础设施安全风险防控是一项系统工程，需要设备、系统本质安全和公共安全关系的统筹考虑，全环节、全链条、全寿命周期的安全风险防控能力的设计，各利益相关方的安全风险管理和监管能力的提升，更需要顶层设计、政策体制、市场机制、技术攻关、标准制定的协同协作<sup>[12,45]</sup>。

1) 不断完善安全防控标准体系。在标准方面，国外的基础设施安全防控标准起步较早，相关标准影响力大，我国发展较快，顶层设计考虑比较全面。在储能、充电基础设施方面，国外关注设备级安全防护标准，如本体安全、设计建设、调试运维标准等，针对标准覆盖不全面的问题，美国、韩国持续更新制定消防规范和标准，以降低事故灾害规模<sup>[46-47]</sup>；在车用氢能方面，美国、日本标准体系更趋成熟、完善，重视安全防护与应急救援方面标准建设<sup>[48]</sup>。同时国外根据基础设施的发展趋势，不断完善相关标准，如面向大功率与超快充电的安全管理趋势，欧美建立了 350 kW 功率充电的标准体系，支持解决大功率充电带来的充电安全、温升控制等关键问题<sup>[49]</sup>。

2) 建立全链条多层次的安全防控体系。借鉴国外经验，加强风险预测预警、安全防护，应急管理(消防)技术研究，强化大数据技术在故障诊断和预警中的重要作用，针对不同类型基础设施建立事故前、中、后立体防控和保障体系。储能电站的安

全风险与储能本体安全密切相关，目前电池本体热失控提前预警是储能系统安全防护的重要手段，受到业内重点关注，但电池系统级、电站级的安全措施还不成熟。韩国、美国、澳大利亚储能电站的事故调查报告显示主要事故原因包括保护系统缺陷、安全设计无法预防/阻止故障、灭火技术无法扑灭电池明火等<sup>[9,11]</sup>，需要增强系统级、电站级的安全措施，同时提高应急消防技术，可以避免发生次生灾害的人员伤亡。

3) 注重政策法规的引导与监管。2017 年 8 月至 2019 年 5 月，韩国 1000 座左右的储能电站共发生 23 起火灾，每座电站年发生火灾的概率达 1.5%<sup>[50]</sup>，主要原因是当时韩国在政策激励之下，储能项目建设爆发式增长，随之在系统集成、施工运维等方面产生重大安全隐患。在电动汽车方面，国内外也在政策法规上从鼓励电动汽车发展到注重安全防护要求，防止企业盲目追求电池能量密度，选择合理的电池技术路线，如特斯拉储能基于安全风险的考虑从三元锂电池逐渐转向磷酸铁锂电池。同时电动汽车电池安全技术不达标，价格优势形成劣币驱除良币现象导致安全风险的扩大，带来的后果将由社会买单，有效的监管尤为重要。

### 3.2 储能基础设施

1) 开展储能安全防控关键技术攻关，推动安全防控技术体系化、工程化应用。针对系列安全风险防控工程科技问题，开展电池储能系统安全应用技术、电池储能安全性综合测试评价技术、储能电站安全风险评价及应急处置技术等关键技术攻关，提升储能设备质量与安全管理水平、储能火灾防控能力及应急处置能力，如图 3 所示。开展储能安全

防护技术的工程有效性验证，支持经过有效验证的安全解决方案/产品的推广应用，促进先进储能预警、防护、消防技术在工程应用中迭代升级。

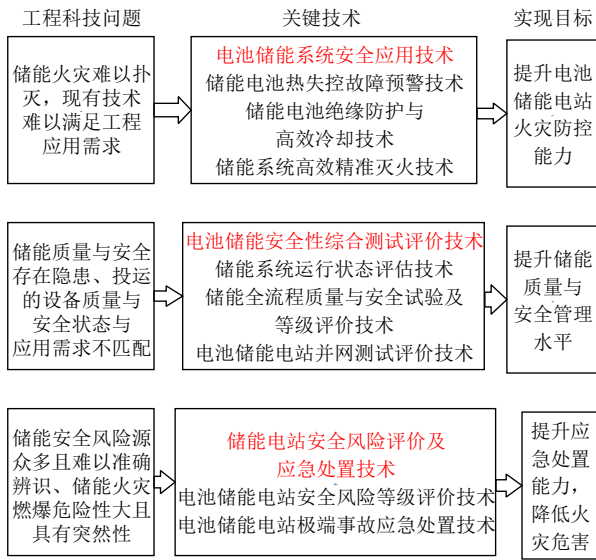


图3 储能安全防控关键技术攻关

Fig. 3 Key technologies for energy storage safety prevention and control

2) 核心部件、系统并网及安全防护等评价检测能力的构建及提升。建立储能系统整机安全测试验证和并网检测方案，建设大容量全尺寸电池储能系统安全性及火灾实验平台，构建全流程闭环储能系统安全评价体系，整合检测评价资源，优化储能上下游检测服务，提升储能系统整机安全检测试验能力，满足储能安全检测需求。

3) 建立多层次多维度安全防控体系。为有效防止储能系统故障演变为火灾，应开展适用于储能应用场景的预警、防护、消防等多维度安全防控技术研究，建立多维度储能系统整体安全防控方案(如

图4所示)，解决散热与隔热问题，抑制多层次热失控蔓延。随着新型电力系统建设对储能调峰调频的需求增加，储能系统将向大容量、高倍率的特性发展，储能系统放热速率加快，热失控风险增大，储能温控和消防技术需要持续提升。

4) 建立全流程储能安全管理体系，加强安全管理。坚持“防蔓延、防扩散、防火烧连营”的基本原则，不以成本为理由降低安全配置要求；加强储能电站备案审核(产品型式试验报告审核、消防审核、并网接入方案审核)，电网企业加强储能站并网检测，不符合安全要求的不予并网；加强对储能系统的调试、运行安全管理；开展安全监督制度建设，明确管理职责和责任主体，针对不同类型的储能事故隐患，制定故障应急预案和消防处置措施，保障人员生命安全和财产安全。

5) 健全储能安全标准，加强安全标准宣贯，提高公众风险意识。健全包括各种储能技术、涵盖不同类型储能设备全寿命链条的标准体系，推动制定储能电站安全强制性国标；加快修订储能电站设计规范，提升储能安全设计要求；加强储能标准的贯彻和应用，将相关标准要求落实到储能技术监督的各个环节；组织储能安全问题研讨与技术交流、讲座，提升公众对储能安全风险防控意识。

力争“十四五”末，新型储能预警、防护、消防技术的有效性得到验证，储能电站安全生产责任制全面落实，建立健全储能全产业链技术标准体系，建成新型储能全流程检测和认证体系；推动建立储能设备制造、建设安装、运行监测的安全管理体系，确保储能电站火灾事故不扩大、不蔓延，不造成人员伤亡。

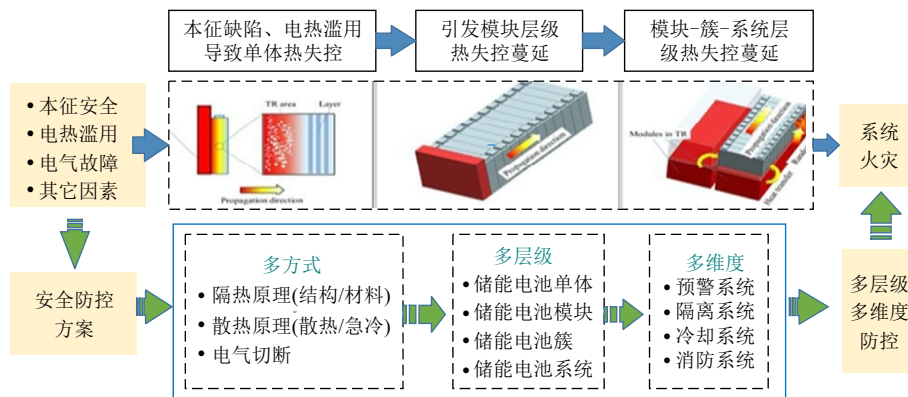


图4 储能系统多维度防护方案

Fig. 4 Multidimensional protection scheme for energy storage system

### 3.3 充电基础设施

1) 加强安全防控与管理技术攻关。针对充电基础设施状态评价、风险预警、防护技术缺失等问

题，开展充电过程电动汽车安全状态在线评价技术、充电站电动汽车动力电池热失控及防护技术、大功率本质安全型充电技术、大规模充电站接入电



网安全风险分析技术、区域级电动汽车充电安全监管体系研究,提升安全防控技术水平。特别是加强高电压、大功率充电安全防控技术研究。

2) 建立安全防控保障体系。优化和完善事故预警、安防设施、应急管理、运维检测、科普教育、保险制度等方面防控体系建设,提升安全防控保障水平。落实故障保护技术要求,强化桩端充电安全预警保护功能、防触电防电击能力<sup>[51]</sup>;建立充电站安全生产事故应急预案,实行充电桩强制检验,引导建设充电站安全预警平台和事故处理机制。通过业务培训提升从业服务人员的事故处置能力;建立火灾事故调查处理、溯源机制;建立电动汽车安全风险分级制度,实现安全风险可预知可控制,如根据社会面公布的电动汽车充电着车型信息,划分高充电风险车型,通过降低充电功率、提高充电价格、禁止充电等不同措施降低充电基础设施运行安全风险;面向多群体开展充电桩设计、运营安全防护知识普及,提升公众认知水平;建立与行业监管信息、技术发展路径、风险特征相衔接的新能源汽车、充电设施保险制度。

3) 提升全流程安全监管水平。①以系统安全观强化充电站规划安全布局,运行维护、监管体系建设,加强在封闭空间的充电安全管理,尽快出台相关政策,如迁出地下三层非车载直流充电机,畅通救援通道,预防灾后救援水体污染;②在并网接入层面,需要电网规划与充电设施规划有效衔接,充电桩入网检测的严格执行,用户有序充电的合理引导,在此过程中,相关市场机制、政策法规需要有效协同;③加快建立国家、省、市三级监管平台体系,建立公平、公正、透明的充电站运营商评价体系,完善数据服务、安全监管、运行分析等功能,推进跨平台安全预警信息交换共享。

4) 强化不同利益主体的安全责任。企业层面要严格法律法规和标准,开展充电站建设、运维,履行社会责任和安全保护义务;行业层面,行业组织发挥行业自律、技术支撑与行业协调作用,鼓励行业研究建立充电运营企业产品质量安全保障和评价体系,引导行业良性竞争、健康发展;政府充分发挥督导和市场监管作用,正确引导企业良性竞争,保障行业健康发展。

通过系列措施,建立充电站灾前、灾中、灾后立体防控技术体系及安全监管体系,实现风险“可防、可控”,保障充电设施安全运行。

### 3.4 加氢基础设施

1) 高安全、高稳定性加氢站关键部件及装备

国产化技术。目前加氢站建设仍处于知识产权受制于人的阶段,专业队伍存在很大缺口,需要强化加氢站自主创新体系,聚焦制约加氢站发展的关键技术并开展攻关,如氢压缩机、加氢机关键技术,研发加氢站工艺设备,实现加氢站关键设备自主生产,提高加氢站安全性能,重点突破液氢制取储存技术、75MPa以上高压储氢技术,提高气氢容器安全储氢压力,实现液氢储运关键装备国产化。

2) 建设加氢站风险评估及安全防控技术体系。加强氢行为数值模拟、氢系统风险量化等技术研究,明确氢泄漏/扩散/火灾/爆炸行为机理,提出加氢站的风险化评估方法,构建加氢站氢系统综合评价体系及工程化平台,为加氢站的安全规划设计、运行维护提供方法手段。加强风险预警、故障诊断、安全防护、事故处置能力,优化加氢站监控系统,确保加氢站内工艺流程有序进行,规范加氢站站操作流程,提升氢气安全检测能力,确保储氢用氢安全。例如,电气元件应为防爆器件,采取可靠的防静电措施;设置排风排气装置,及时排除泄漏的氢气;加注模块应具备安全联锁功能和过压保护功能等。具体防控体系如图5所示。

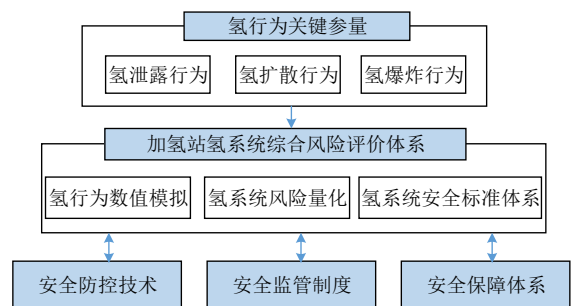


图5 加氢站安全防控技术体系  
Fig. 5 Safety prevention and control technology system for hydrogen refueling station

3) 完善全流程安全监督管理机制。高要求的标准规范、严质量的检测认证以及全流程的监测监管是加氢站安全运营的重要保障,需要加强加氢站安全管理顶层设计,强化加氢站运行安全风险意识,制定切实可行的安全风险防范规章制度。具体而言,包括:学习借鉴国外加氢站相关标准,制定和完善适合我国具体国情的加氢站审批、建设、运营、安全管理的法规标准体系;设立统一运营管理及安全监管平台,实时监控加氢站技术与运营数据,实现对加氢站运行状态的动态监管;构建安全可控的监管保障体系,护航加氢站健康发展,统筹保障各环节安全联动,持续保障制氢、运氢、储氢、加氢、用氢等全生命周期过程中的安全要求。

通过加氢站基础设施安全风险评估及预防措

施技术的突破,提升安全风险预测、防护技术水平,建立加氢站安全监控与评价体系及加氢站氢系统安全标准、法规体系。

### 3.5 综合能源基础设施

1) 针对综合能源站存在的设备本质安全、供能安全、人身安全等安全风险,从综合能源站设备本体、系统设计和运行操作3个视角出发,以技术、标准和管理3个维度建立综合能源站安全防控路径体系,如表4所示,推动综合能源站信息采集、态势感知、运行调控、故障诊断及预警等全业务流程标准化,并以信息技术为支撑,实现综合能源站安全风险的预警、评估与防控的数智化,降低设备子系统安全风险、系统耦合安全风险及人员操作安全风险。

表4 综合能源站安全防控体系

Table 4 Integrated energy station safety prevention and control system

安全防控体系	技术	标准	管理
设备本质安全	高可靠性设备制造	设备制造检测标准	设备接收与安装规程 设备定期巡检 ……
	高精度设备建模	数据信息采集标准	
	设备态势感知	标准	
	多数据源融合	设备状态评价标准	
	设备智能检修维护	标准	
……	……	……	……
系统设计安全	协同规划配置	设备规划配置标准	设计方案 论证流程 信息化 系统建设 ……
	系统安全裕量评估	消防安全标准	
	综合能源仿真	施工建设标准	
	……	……	
运行操作安全	多能流状态估计	运行操作标准	运行操作规程 事故应急 处理预案 ……
	故障诊断与预警	能量管理标准	
	综合能源协同控制	二次设备测试标准	
	……	……	

2) 综合能源站主要安全风险包括各子系统风险,多风险源、多能源系统、多时间尺度的聚合风险,多种能源介质传递风险,其主要防控路径应聚焦于综合能源站的故障诊断及状态评价,有效预判安全风险,降低安全事故发生的可能性,需要挖掘能源大数据价值作用,建立行业内共享的综合能源站安全分析知识图谱数据库,开展连锁和组合故障诊断等安全运行相关技术攻关,支撑综合能源站安全运行。

3) 针对综合能源站快速发展中的问题,需要及时研判未来综合能源站的发展形态、演化趋势,提前规划布局,动态快速调整安全风险防控技术标准、政策机制,保障系统规划设计、运行维护安全。如交通领域,随着交通能源站由传统的油气主导转向油气氢的融合,需要关注能源站风险源的演化,

针对性提出多层次防控措施。

通过系列措施,推动综合能源站设备制造、安全设计及运维流程的标准化及信息化,充分发挥大数据在风险评估与预警中的作用,提升多种能源系统、多风险源耦合后的本质安全和整体安全性,建立有效的安全防控框架应对综合能源站形态快速发展的形势。

## 4 结语

新兴能源基础实施安全事故多发的态势暴露巨大的安全隐患,引起全社会关注,安全风险防控对于保障产业健康发展、能源安全转型至关重要。当前新兴能源基础设施安全风险防控面临认知、技术、能力、监管等问题,需要全环节、全生命周期的技术标准、能力建设、政策机制体系性应对,构建新兴能源基础设施立体防控技术和公共安全保障体系,主要认识和展望如下。

1) 安全风险无法消除,只能防范和化解,合理定义安全风险内涵和安全水平,可以提升安全风险认知能力、聚焦安全风险防控目标。应统筹考虑本质安全和公共安全之间的关系,以保障公共安全为导向,加强本质安全防控技术创新能力,针对本质安全风险成因和诱因,开展新兴能源基础设施故障机理、失效模型、影响评价研究,并建设与之相适应的事故前、中、后立体安全防控技术和保障体系,实现安全事故不扩大、不蔓延,同时减少次生灾害。

2) 安全的能力需要标准来规划设计,安全的保障和结果需要有效的监管。应加强新兴能源基础设施安全防控标准体系制定,因时而变,因势而变,加快相关标准的调整和布局,规范和引导产业安全发展;加强各利益相关方的安全风险管理和监管能力,强化政府的主导作用和监管职能,提升行业企业的管理能力和自律水平,增强公众安全风险防控意识和社会监督能力;创新商业模式,以市场为导向,推动企业与用户合理选择,更大范围内降低安全风险。

3) 未来新兴能源基础设施的利益主体更加多元,与用户联系更加紧密,技术向高电压、大容量、高倍率等趋势发展,安全风险防控将更加复杂;同时,大规模新兴能源基础设施的快速发展及不同行业的交叉融合,安全风险要素将外延至社会系统、能源/电力系统安全,需以系统观和大安全观认识和应对安全风险演化,并进一步深入研究和探讨。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000->

3673/current.shtml).

## 参考文献

- [1] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. 中国电力企业管理, 2021(25): 8-11.  
GUO Jianbo. Challenges for new-type power systems and related mechanisms considerations[J]. China Power Enterprise Management, 2021(25): 8-11(in Chinese).
- [2] 石文辉, 屈姬贤, 罗魁, 等. 高比例新能源并网与运行发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 52-63.  
SHI Wenhui, QU Jixian, LUO Kui, et al. Grid-integration and operation of high-proportioned new energy[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 52-63(in Chinese).
- [3] 张运洲, 代红才, 吴潇雨, 等. 中国综合能源服务发展趋势与关键问题[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 1-10.  
ZHANG Yunzhou, DAI Hongcai, WU Xiaoyu, et al. Development trends and key issues of China's integrated energy services[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 1-10(in Chinese).
- [4] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2023[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2023.
- [5] 新华社. 2022 年我国充电桩数量同比增长近 100%[EB/OL]. (2023-02-13)[2023-09-27]. [http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/13/content\\_5741383.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/13/content_5741383.htm).
- [6] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于加快推动 新型储能发展的指导意见[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2021.
- [7] 央视网. 我国“氢能走廊”初见雏形 国内加氢站数量已超 350 座[EB/OL]. (2023-05-01) [2023-09-27]. [https://auto.cnr.cn/2015xc/20230501/t20230501\\_526237408.shtml](https://auto.cnr.cn/2015xc/20230501/t20230501_526237408.shtml).
- [8] 北京市应急管理局. 丰台区“4·16”较大火灾事故调查报告[EB/OL]. (2021-11-22) [2023-09-27]. [http://yjglj.beijing.gov.cn/art/2021/11/22/art\\_4520\\_466.html](http://yjglj.beijing.gov.cn/art/2021/11/22/art_4520_466.html).
- [9] 曹文昊, 雷博, 史尤杰, 等. 韩国锂离子电池储能电站安全事故的分析及思考[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1539-1547.  
CAO Wenjiong, LEI Bo, SHI Youjie, et al. Ponderation over the recent safety accidents of lithium-ion battery energy storage stations in South Korea[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1539-1547(in Chinese).
- [10] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3125.  
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125(in Chinese).
- [11] 唐亮, 尹小波, 吴候福, 等. 电化学储能产业发展对安全标准的需求[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2645-2652.  
TANG Liang, YIN Xiaobo, WU Houfu, et al. Demand for safety standards in the development of the electrochemical energy storage industry[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2645-2652(in Chinese).
- [12] RELE M, PATIL D. Enhancing safety and security in renewable energy systems within smart cities[C]//Proceedings of the 2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. Oshawa: IEEE, 2023: 105-114.
- [13] 郇捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 1-15.  
GAO Jie, SONG Jie, WANG Jianxiao, et al. Form and key technologies of integrated electricity-hydrogen system supporting energy security in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 1-15(in Chinese).
- [14] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 498-514.  
LIU Cuiwei, PEI Yebin, HAN Hui, et al. Research status and development trend of hydrogen energy industry chain and the storage and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(5): 498-514(in Chinese).
- [15] 陈旭东. 油氢合建站环境风险特点与防控策略探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(22): 80-81.  
CHEN Xudong. Discussion on environmental risk characteristics and prevention and control strategies of oil-hydrogen co-construction stations[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(22): 80-81(in Chinese).
- [16] 自然资源保护协会, 国网能源研究院. 电动汽车发展对配电网影响及效益分析[R]. 北京: 自然资源保护协会, 国网能源研究院, 2018.
- [17] WANG Bo, DEGHANIAN P, WANG Shiyuan, et al. Electrical safety considerations in large-scale electric vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6603-6612.
- [18] 郑琼, 江丽霞, 徐玉杰, 等. 碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 529-540.  
ZHENG Qiong, JIANG Lixia, XU Yujie, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 529-540(in Chinese).
- [19] 夏继豪. 纯电动汽车的火灾特性及热释放速率探讨[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1028-1032.  
XIA Jihao. Discussion on fire characteristics and heat release rate of blade electric vehicles[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 1028-1032(in Chinese).
- [20] 李建林, 谭宇良, 周喜超, 等. 国内外电化学储能产业消防安全标准对比分析[J]. 现代电力, 2020, 37(3): 277-284.  
LI Jianlin, TAN Yuliang, ZHOU Xichao, et al. Comparative analysis on fire safety standards for electromechanical energy storage sectors home and abroad[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3): 277-284(in Chinese).
- [21] EPRI. BESS failure event database[EB/OL]. (2023-11-07) [2023-09-27]. [https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS\\_Failure\\_Event\\_Database](https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database).
- [22] 北极星储能网. 前所未有灾难性事件! 韩国数据中心锂电池着火致互联网大瘫痪! [EB/OL]. (2022-10-25)[2023-09-27]. <https://www.smelz.cn/article/zixun/detail-47226.html>.
- [23] 于东民, 杨超, 蒋林迦, 等. 电动汽车充电安全防护研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2145-2163.  
YU Dongmin, YANG Chao, JIANG Linru, et al. Review on safety protection of electric vehicle charging[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2145-2163(in Chinese).
- [24] 新能源汽车国家大数据联盟. 新能源汽车国家监管平台大数据安全监管成果报告[R]. 北京: 新能源汽车国家大数据联盟, 2019.
- [25] KHALID M R, ALAM M S, SARWAR A, et al. A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid[J]. eTransportation, 2019, 1: 100006.
- [26] 郑津洋, 刘自亮, 花争立, 等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 106-115.  
ZHENG Jinyang, LIU Ziliang, HUA Zhengli, et al. Research status-in-situ and key challenges in hydrogen safety[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 106-115(in Chinese).
- [27] 丁莉丽. 车用氢能产业链安全事故分析及防范探讨[J]. 安全、健



- 康和环境, 2021, 21(9): 20-23.
- DING Lili. Analysis and prevention of safety accidents in vehicle hydrogen energy industry chain[J]. Safety Health & Environment, 2021, 21(9): 20-23(in Chinese).
- [28] 陆杨, 李华强, 刘洋, 等. 考虑供能设备故障风险的电-气-热综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 34-44.
- LU Yang, LI Huaqiang, LIU Yang, et al. Optimal operation of electricity-gas-heat integrated energy system considering the risk of energy supply equipment failure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 34-44(in Chinese).
- [29] 严超, 别朝红, 王灿, 等. 面向新一代能源系统的风险评估研究现状及展望[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 12-22.
- YAN Chao, BIE Zhaohong, WANG Chan, et al. Risk assessment studies for new generation energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 12-22(in Chinese).
- [30] 官亦标, 沈进冉, 刘家亮, 等. 以安全高质量应用为导向的储能锂离子电池综合性能评价标准[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2946-2953.
- GUAN Yibiao, SHEN Jinran, LIU Jialiang, et al. Comprehensive performance evaluation standards for energy storage lithium-ion batteries guided by safe and high-quality applications[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2946-2953(in Chinese).
- [31] TUV SUD. Ensuring the safety of energy storage systems[EB/OL]. (2021-06-30)[2023-09-27]. <https://www.tuvsud.com/en-us/-/media/regions/us/pdf-files/whitepaper-report-e-books/whitepaper---ess---ensuring-the-safety-of-energy-storage-systems.pdf>.
- [32] 杨秀, 黄小庆, 于慎仟, 等. 电化学储能电站主动安全研究[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8): 78-87.
- YANG Xiu, HUANG Xiaoping, YU Shenqian, et al. Research on active safety of electrochemical energy storage station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 78-87(in Chinese).
- [33] 国家应急管理部. 2022 年一季度新能源汽车火灾数据[EB/OL]. (2023-06-14) [2023-09-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1735601561086081759&wfr=spider&for=pc>.
- [34] CarsDover. How many electric cars catch fire every year[EB/OL]. (2023-06-26) [2023-09-27]. <https://www.carsdover.com/electric-car-fire-statistics>.
- [35] SUN Peiyi, BISSCHOP R, NIU Huichang, et al. A review of battery fires in electric vehicles[J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1361-1410.
- [36] 世界资源研究所. 中国新能源汽车规模化 推广对电网的影响分析[R]. 北京: 世界资源研究所, 2020.
- [37] H2tools.org Lessons Learned Database. Hydrogen incident examples[R/OL]. (2020-03) [2023-09-27]. [https://h2tools.org/sites/default/files/Hydrogen\\_Incident\\_Examples.pdf](https://h2tools.org/sites/default/files/Hydrogen_Incident_Examples.pdf).
- [38] YANG Fuyuan, WANG Tianze, Deng Xintao, et al. Review on hydrogen safety issues: incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(61): 31467-31488.
- [39] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 76-83.
- LING Wen, LIU Wei, LIU Yulei, et al. Development strategy of hydrogen infrastructure industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 76-83(in Chinese).
- [40] 曹湘洪, 魏志强. 氢能利用安全技术研究与标准体系建设思考[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 144-151.
- CAO Xianghong, WEI Zhiqiang. Technologies for the safe use of hydrogen and construction of the safety standards system[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 144-151(in Chinese).
- [41] 胡明月, 刘萍, 董娅楠, 等. 长三角地区加氢站发展现状、障碍分析及对策建议[J]. 南方能源建设, 2023, 10(3): 1-10.
- HU Mingyue, LIU Ping, DONG Ya'nan, et al. Current situation, analysis of obstacles and suggestions for countermeasures for the development of hydrogen refueling stations in the Yangtze River delta[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(3): 1-10(in Chinese).
- [42] 荣以平, 刘玉娇, 李国亮, 等. 基于综合能源系统 N-1 静态安全评估的燃气轮机接入规划策略[J]. 山东电力技术, 2023, 50(6): 27-33.
- RONG Yiping, LIU Yujiao, LI Guoliang, et al. Gas turbine access planning strategy based on N-1 static safety assessment for integrated energy system[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(6): 27-33(in Chinese).
- [43] TIAN Xingtao, LIN Xiaojie, ZHONG Wei, et al. Security assessment of electricity-gas-heat integrated energy systems based on the vulnerability index[J]. Energy, 2022, 249: 123673.
- [44] 李建华. 能源关键基础设施网络安全威胁与防御技术综述[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(9): 2065-2081.
- LI Jianhua. Overview of cyber security threats and defense technologies for energy critical infrastructure[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(9): 2065-2081(in Chinese).
- [45] CROW D R, LIGGETT D P, SCOTT M A. Changing the electrical safety culture[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 808-814.
- [46] ACHARIGE S S G, HAQUE E, ARIF M T, et al. Review of electric vehicle charging technologies, standards, architectures, and converter configurations[J]. IEEE Access, 2023, 11: 41218-41255.
- [47] 北极星储能网. 韩国提高储能系统安全标准 以应对储能系统失火[EB/OL]. (2022-05-11) [2023-09-27]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220511/1224182.shtml>.
- [48] 肖丹, 许广健, 王薛超. 中国车用氢能标准体系现状及建设思考[J]. 汽车与配件, 2023(2): 20-23.
- XIAO Dan, XU Guangjian, WANG Xuechao. Current status and construction considerations of China's automotive hydrogen energy standard system[J]. Automobile & Parts, 2023(2): 20-23(in Chinese).
- [49] IEA. Global EV outlook 2023[R]. Paris: IEA, 2023.
- [50] 北京青年报. 迎击万亿储能产业发展痛点[EB/OL]. (2021-05-26) [2023-09-27]. <https://app.bjtitle.com/8816/newshow.php?newsid=5912678>.
- [51] 张元星, 李斌, 颜湘武, 等. 基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 143-154.
- ZHANG Yuanxing, LI Bin, YAN Xiangwu, et al. Monitoring and early warning method of EV charging failure based on a battery model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 143-154(in Chinese).



罗魁

在线出版日期: 2023-12-01。

收稿日期: 2023-10-13。

作者简介:

罗魁(1989), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要从事新能源并网及新型电力系统分析与控制研究工作, E-mail: luokui@epri.sgcc.com.cn;

郭剑波(1960), 男, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事电力系统规划、运行分析和电网可靠性等研究工作。

(责任编辑 马晓华)