

DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 09. 007

储能技术类型及其应用发展综述

Energy storage technologies and their applications and development

薛福¹, 马晓明², 游焰军³
XUE Fu¹, MA Xiaoming², YOU Yanjun³

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071; 2. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030; 3. 湖北华电武穴新能源有限公司, 湖北 黄冈 435400)

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute Company Limited of CPECC, Wuhan 430071, China;
2. Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China;
3. Hubei Huadian Wuxue New Energy Company Limited, Huanggang 435400, China)

摘要: 储能是能源革命的关键性支撑技术。在碳中和背景下, 储能技术快速发展, 其作用和价值也日益凸显。对现有储能技术的类型和发展状况进行全面分析和总结, 着重分析了不同储能技术的特点及差异性, 并对其应用场景及经济性做了综合比较。分析认为, 电池储能的研究重点是引入新储能材料, 解决非传统电化学问题。热化学储能由于过程可逆性能耗小, 适合长期存储, 但需注重循环动态特性、建模、控制造价成本等。抽水蓄能和压缩空气储能技术成熟、储能容量高, 适合大规模储能容量开发, 但面临选址受地形限制、前期基建成本高、运维成本差异性大等问题。飞轮储能适用于频繁启动和储能释能周期短的场合, 研究关键是如何减少转化过程中能量损耗。氢能应用则受存储运输环节及能源转换效率偏低等因素制约。分析可为储能领域相关研究工作的开展和政策的制定提供一定参考。

关键词: 储能技术; 热化学储能; 压缩空气储能; 飞轮储能; 氢储能; 储能应用; 碳中和

中图分类号: TK 02 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2023)09-0048-11

Abstract: Energy storage is a key supportive technology for the energy revolution. In the context of carbon neutrality, the fast-growing energy storage technology is playing an increasingly important role in energy industry. Existing energy storage technologies and their development statuses are expounded, focusing on their characteristics and differences. And the application scenarios and economy of these technologies are comprehensively compared. The key to battery researches is introducing new energy storage materials to solve its non-traditional electrochemical problems. Thermochemical energy storage is suitable for long-term storage due to its low energy consumption in reversible reactions, but attention should be paid to its cyclic dynamic characteristics, modeling and cost control. Pumped energy storage and compressed air storage technology are mature technologies, which are of high storage capacity and suitable for large-scale energy storage projects. However, the two technologies are limited by siting constraints, high cost of infrastructure construction and difference in operation and maintenance costs. Flywheel energy storage technology is suitable for the scenarios in need of frequent start-up and short energy release time, but how to the reduce energy loss in conversion is the challenge. Applications of hydrogen energy is restricted by difficulties in storage and transportation and its low energy conversion efficiency. The study can provide reference for relevant researches and policy formulation.

Keywords: energy storage technology; thermochemical energy storage; compressed air energy storage; flywheel energy storage; hydrogen energy storage; energy storage application; carbon neutrality

0 引言

太阳能和风能等新能源的利用受出力波动性与间歇性的限制。为解决日益凸显的全球能源短缺和环境劣化问题, 近年来储能技术得到大力发展。储能, 是指通过特定的介质或者设备将能量进行存储, 并在需要时再释能做功的技术。储能可实

现能源系统负载的均衡, 并在调峰、调频、振荡调节、改善电能质量和提高供能可靠性中发挥重要作用。随着新能源的兴起, 储能技术的应用场景和形式也日趋多元化, 比如超级电容耦合光伏发电系统、风-氢耦合储能等多能互补能源系统。多能互补协同优化可保障供能稳定性和节能效率^[1]; 将储热纳入热电联产系统的源侧和系统侧, 控制电网调

度,可提升我国“三北”地区(指东北、华北、西北)风电消纳能力^[2];开发利用超导磁储能及其混合储能系统,在风力发电系统调节控制、脉冲负载、智慧交通运输、电动汽车充电站等领域日益崭露头角^[3]。

国内外学者对现有储能技术的类型和发展状况开展了一系列相关研究。Guney等^[4]系统介绍了储能系统的分类、特点、优势、环境影响和应用。Akram等^[5]则对现代电力系统中参与电网调频、满足快速响应需求的储能技术进行了综述,包括超级电容器储能技术、飞轮储能和超导磁储能等,并对储能系统响应模型、方案和控制等进行了阐述。李相俊等^[6]对新能源侧储能配置进行了研究,并归纳了国内外储能在新能源侧的应用、配置方法、预评估等方面的研究进展。此外,也有大量关于新型储能技术集成示范工程和关键技术、储能检测评价、标准制定等方面的研究^[7-8]。

然而,以往的综述往往受限于储能技术的覆盖范围,如部分综述只关注特定行业(如电力行业)的储能技术,或在论述储能技术特点时,缺少对储能技术在实际应用过程中的经济性分析。对所有储能类型进行全面审查、融合不同储能技术的特点和经济性进行对比分析,有助于更好地了解不同技术的差异及其潜在应用前景,有利于实现多重技术整合,为后期政策制定提供一定的建议。

本文对现阶段各类储能技术进行全面梳理,重点介绍不同类型储能技术的特点和影响因素,并概括其最新发展状况。基于国内外一些储能技术重点应用示范工程,对储能技术的典型应用场景及问题进行了说明。最后,对储能技术的经济性进行了研究,并对相关预测方法进行了初步探索。

1 储能技术的类型及发展现状

储能的类型很多,按照能量存储形式可大致分为电化学储能、热化学储能、热能储能、压缩空气储能、飞轮储能、抽水蓄能、磁储能、化学储能和氢储能。其他类型的储能,如生物储能,因现阶段尚处于研究阶段,大规模应用场景较少,本文不作重点讨论。

1.1 电化学储能

电能可以通过电化学反应被储存在电池和电容器中。电池是一种成熟的高能量密度、高电压的储能装置。电容器以电化学方式存储和传递能量,其中超级电容器(UC)具有多孔电极结构,单位体积的电容量大。近年来,关于电化学储能的研究侧重于新型电极材料和电解质、电池成本、能量和功率密度、循环使用寿命和安全性等方面。

1.1.1 常规电池

在各类电池中,锂离子电池具有高比能量和高能量密度。锂电池的性能主要受固体电解质界面的影响,传统锂电池的能量密度往往很快达到物理化学极限。李泓等^[9]以锂离子电池为例,利用热力学、动力学、尺寸效应、非对称体系等简述了电化学储能器件中的非传统电化学问题。Nitta等^[10]对各种锂电池正负极材料进行了优劣势分析,并对改善锂离子电池性能提出了相关策略。

在可用能量密度方面,锂-空气电池较常规锂离子电池更为突出。但高性能锂-空气电池的商业化尚存在诸多技术挑战:比如阴极结构设计、电解液成分优化、充放电过程中的化学反应等^[11-12]。

由于钠的资源丰富性、低温特性以及与锂离子相似的化学特点,钠离子电池可能成为未来集成可再生能源的智能低成本电池,但其结构特征和掺杂钠离子的阴极材料制备方面有待进一步研究。韩诚等^[13]归纳了钠离子电池负极材料的储存机理和改性方法,并重点介绍了几种钠离子电池负极关键材料的研究进展,包括碳基材料、钛基材料、有机材料等。Ru等^[14]则提出,铝离子电池是最合适替代锂离子电池的候选者,但在商业化应用之前,其能量密度、电池容量和循环稳定性方面仍需改进。

1.1.2 电容器

电容器具有较高的存储效率(>95%),使用寿命长,但寿命难以监测,在使用过程中易自放电,工作电压受限于电解液发生化学反应的电位。前沿研究主要侧重于纳米结构材料的选择、研发等,以提高电容器的能量和功率密度。Lu等^[15]详细阐述了纳米级材料对电化学电容器的影响,包括改善电极材料、设备耦合度等。朱元元^[16]着重进行了电化学电容器负极材料的设计和储能机理研究,通过构建多孔结构和引入表面含氧官能团,以 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{rGO}$ 为负极复合材料, MnO_2 为正极组装成非对称电化学电容器,有效改善了电化学电容器的性能。

1.1.3 液流电池

相比能量密度较低、能量输出时间短的固体电池,液流电池独具优势,但其使用受限于外部存储容量,且电池的造价和使用成本比较高。如何开发具有更大比表面积和比体积的单片电极、增加电解液对电极的润湿性、研制新型隔膜材料以及创建开放的孔隙结构以增加传质将会是今后液流电池设计研究的重点。谢聪鑫等^[17]重点介绍了已产业化的全钒液流电池及其关键技术,并分析了新型液流电池(包括水系和非水系电池)的技术特点及挑战。

2022年3月,中国科学院大连化学物理研究所

李先锋课题组在碱性液流电池的离子传导膜研制上取得重要进展,研制出磺化聚醚醚酮(SPEEK)阳离子交换膜,材料成本不到国外同类产品的 $1/10^{[18]}$ 。该项研究有望大幅提高新一代液流电池性能,加速推进液流电池储能技术的规模化应用。

1.2 热化学储能

热化学储能系统可根据需要利用可逆的化学反应来储存或释放热能。由于其储能过程的能量损失小,因此热化学储能具有良好的长期储能应用潜力。

汪德良等^[19]综述了热化学储能的基本原理和特点,详细介绍了几种有前景的热化学储能系统及其研究现状,指出未来热化学储能的重点研究方向包括合适的储能系统、添加剂、储能和释能过程优化等。Bermúdez 等^[20]提出了一种基于碳材料微波诱导 CO_2 气化的储能新技术,利用微波加热机制对各种碳材料进行能量消耗和回收方面的测试和评估,该项技术在实验室规模的能效达到了 45%。杨天峰等^[21]对基于金属氧化物的高温热化学储能技术进行了综述,构建了 100 MW 太阳能超临界 CO_2 布雷顿循环与金属氧化物储能耦合系统,并建立了稳态模型。模拟结果表明,在典型晴朗春分日,该系统循环热效率可达 51.2%,并可实现 24 h 不间断运行。

长远来看,热化学储能系统的大规模商业化仍面临着诸多技术挑战,未来研究重点主要集中在以下几点:选择最优材料或材料组合以降低储存能量的热量损失;提高储能体系循环寿命和综合性能;研究循环动态特性及建模;控制造价成本等。

1.3 热能存储(TES)

TES 是指在存储介质中存储热能或冷能。TES 系统通常由一种存储介质和设备组成,用设备向介质中注入和提取热量。TES 有 3 种储能模式:显热、潜热和热化学。

地面蓄热是最普遍的显热储能方式,它通常涉及在夏季使用循环介质(水或空气)从建筑物中提取热量,地面换热器将循环介质输送到更深的地下进行储存供冬季使用。受介质单位体积蓄热能力较低的影响,显热储能的效率偏低。该技术的发展主要受投资成本、政策、储热材料、地下空间以及规模化程度等因素的影响。Vijjapu 等^[22]重点介绍了显热存储技术和不同显热存储材料的特性,并指出随着材料科学和技术的进步,显热储能的能力和效率将得到显著提高。

潜热储能主要涉及相变材料。由于其相变过程的等温性质以及单位储能容量质量低、结构紧凑

等特点,潜热储能广受关注。目前,潜热储能的研究主要集中于开发和引进新的储存介质,并采取一定策略来提高现有储存介质的热力学性质^[23],比如,为提高相变材料的导热性,可以结合不同形式的高导电性嵌件。同时,高温蓄热也正处于稳步研究阶段,包括在相变材料中嵌入金属泡沫、利用数学建模来预测高温下复合材料的特性等。

1.4 压缩空气储能(CAES)

CAES 系统可将多余的能量用于压缩空气,并将其储存在地下洞穴或废弃矿井中。根据能源需求,这些压缩空气可以被释放到涡轮机中做功发电;另一种选择是利用可用能源将液化空气储存在低温、低压的绝热储气罐中。后者过程能量损失相比于前者更低,更适合长期存储,效率更高。CAES 系统虽具有技术成熟、易操作、安全环保、储能容量较高等优点,但大规模开发较依赖特殊的地理环境。

CAES 系统当前效率为 42%~55%,解决效率波动和提高系统效率将是今后研究的重点。为提高系统效率、减少液化废弃物和液化过程外部能源的需求量,可以联合其他热循环(比如布雷顿循环、低温有机朗肯循环)将液化空气蒸发阶段的废冷、液化前压缩空气产生的废热存储利用起来。She 等^[24]提出了一种布雷顿循环装置,循环利用空气液化产生的热量,并将热量释放到液化天然气储存系统的蒸发器中,将 2 个系统耦合起来后装置整体效率提高至 70% 左右。绝热压缩空气储能系技术与蓄热装置的综合利用也备受瞩目。在我国已建成并投产了首座绝热压缩空气储能电站——常州金坛盐穴项目,其采用了非补燃式压缩空气储能技术,系统储能效率约为 60%。

1.5 飞轮储能

飞轮储能也称为动能储存,是一种机械储能形式,能提供较高的功率和能量密度,其储能形式环保性好、空间占比小、技术成熟。动能通过电机/发电机传入/传出飞轮,具体过程取决于充电/放电模式,储存的机械能按需释放为电能。飞轮储能主要适用于实现机器的平稳运行,在电力调峰、不间断电源、近地球轨道监测、脉冲功率传输等领域应用广泛。

与常规储能电池和超级电容器相比,飞轮储能系统的缺点主要围绕着放电时间、成本、噪音、机械应力和疲劳应力、使用安全等方面。由于飞轮储能的存储量与飞轮质量成正比,与速度的平方成正比,因此需要在飞轮储能应用中最大限度地提升转速和功率密度。为提高飞轮储能功率密度,

Toodeji^[25]提出了一种新的组合系统设计,将超级电容器置于飞轮旋转盘内,通过交换脉冲功率存储大量能量。

飞轮储能关键支持技术是转子材料的选择和结构优化设计。使用复合材料可以实现更高的转速和功率密度。比如使用T700/AG80的碳纤维增强树脂基复合转子材料,可优化飞轮转子的结构参数,根据数学模型计算,飞轮的储能密度提升了约22.8%^[26]。李万杰等^[27]则提出,在高温超导飞轮储能系统中采用超导磁悬浮轴承可以更好发挥其性能优势。

1.6 抽水蓄能(PHES)

PHES是一种以水力势能形式储存电能资源的驱动设施,利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库,在电力负荷高峰期再放水至下水库,带动涡轮机进行发电,完成储能与释能转换的过程。PHES系统的能源效率在70%~80%,容量大小通常为1 000~1 500 MW。PHES系统的主要优点是资产寿命长,达50~100年,运行和维护成本低。抽水蓄能的缺点是由于机组规模大,前期开发建设投入成本高;选址受地形限制,同时伴随着环境和生态影响等。地下PHES系统被认为是一种技术上可行的选择,可以通过地下水库(例如废弃矿井)来解决常规抽水蓄能电站建设成本高、地形受限等缺点。但目前,地下抽水蓄能仍面临着前期地质勘测和施工难度大等问题,尚未正式规模化应用。

为提高传统PHES的运行灵活性和效率、增加机组运行小时数,Deane等^[28]开发变速PHES技术,采用旁通泵/涡轮机布置。在小容量情况下,设计泵送系统容量调控范围为60%~100%,发电容量调控范围为20%~100%。PHES变速运行可提升区域电网新能源消纳水平,减少火电调峰^[29]。为了提高多能联合系统接入电网运行的安全性,促进间歇式能源有效消纳,刘芳等^[30]采用置信区间建立了考虑风电不确定性及抽水蓄能电站水头变化影响的联合优化机组模型。为了缓解PHES系统对环境影响,新的开发和设计路线也正在研究中,包括在PHES中使用废水,耦合更多的风电、光伏等间歇性可再生能源^[31]。

随着国家政策、规划等的大力引导和支持,抽水蓄能迎来发展契机。如何解决地下抽水蓄能电站的前期工程建设、优化电站电气系统配置、设计开发超高水头超大容量电站及其装配技术、实现与可再生能源耦合调度等将是今后PHES研究的重点。

1.7 超导磁储能(SMES)

SMES是采用超导线圈将电磁能直接储存起

来,需要时再将电磁能返回电网或其他负载的一种电力设施。SMES目前主要应用于均衡电网负载、调相、调频、改善电网电能质量、自动发电控制和不间断电源、保障电力系统安全等方面。

由于超导线圈在超导状态下电阻几乎为零,SMES在能量存储和利用过程中热损耗极低,电流和功率密度高,具有储能容量高、响应速度快(1~100 ms)、无噪声污染等优点。目前仍存在超导材料费用较高、低温制冷系统配置不足、退化和失效机制不够透彻、绝缘设计缺乏可靠性、缺少失超保护等问题,相关技术正在研究中;夏亚君等^[32]介绍了超导磁储能装置的应用现状,从装置及系统2个层面分析了SMES应用的关键技术问题,包括动态特性、绝缘特性、控制特性,安全可靠等方面,并针对不同层面的问题提出了具体的研究思路;郭文勇等^[33]重点探讨了SMES中的2个基本核心部件——超导储能线圈和功率调节系统的研发现状,并指出未来应聚焦高温超导材料的研发将极大降低SMES成本,提高其性能和寿命。

1.8 氢储能

氢储能具有能量密度高、容量增减适应性强、放电时间长、与环境兼容性较好等突出优点,氢能显示出与电能互补的特性,在新型电力系统中应用价值明显。随着“氢经济”的兴起,许传博等^[34]描述了氢储能的优势,探讨了氢储能在新型电力系统“源网荷”中的应用价值及规模分析。氢储能的劣势在于能源转化效率整体偏低、投资成本高,存储、运输等环节的技术尚未成熟。

不少学者开展了大量相关研究。在制氢技术方面,谢欣烁等^[35]将传统制氢技术同新型制氢技术的生命周期评价进行了比较,阐述了各类制氢技术的基本原理和应用现状,并归纳了其制氢成本。文献指出风电制氢技术的环保性最佳,而核能热化学制氢在未来具有大规模应用的潜力。在氢能存储环节,Lamb等^[36]探索了从氨气流中提纯氢气的技术,并提出氨气的节能分解、氢气的分离和提纯是将氨气制氢储氢技术的2个关键环节。霍现旭等^[37]则分析了现有成熟氢能储能系统的不足与限制,并结合国内外氢储能示范工程,指出今后氢储能的研究重点应集中在电解槽技术、储氢材料研发和燃料电池技术及性能综合评估等方面。Preuster等^[38]指出氢的成本是阻碍其在电力市场中使用的主要障碍,建议在高压和高质量条件下小规模使用氢能,如移动加氢站或小型工业用氢,可能是氢产业发展的突破口。该文献同时指出,第三世界国家可通过氢与有机液体结合运输的方法发展氢经济。

2 储能技术的应用

储能技术的应用场景广泛,如电力调峰、可再生能源利用、净零能耗建筑能源系统、智慧交通等。储能技术的应用形式也日趋多元化,比如多种储能技术耦合互补、与传统石化能源的多源耦合、便携移动式储能充电站等。选取储能技术几个典型的应用场景,并简要阐述了部分储能技术在开发过程中需要注意的问题。

表 1 列举了国内外一些已投产运行或在建的储能系统典型示范工程。可以看出,当前储能技术的应用和发展规模程度不尽相同。预计随着全球储

能技术和市场蓬勃发展,未来储能技术将逐步由产业化初期向商业化、规模化发展,同时在新型电力系统中也将主动承担更多的功能。

2.1 能源公用事业应用

随着储能形式的多样化,储能系统在公用事业中的使用颇受关注。通过将可再生能源系统与储能技术相结合,可提高可再生能源的推广率,使得电网控制和维护更加灵活。

传统形式的抽水蓄能技术已发展成熟,成为大规模储能的主要技术;电化学储能是在电能需求量较低时的方法,电池储能主要集中在运输系统、小型便携式电源或间歇性备用电源系统上,未来可集

表 1 国内外目前在运或在建的储能系统示例

Table 1 Examples of current energy storage systems in operation or under construction in the world

储能类型	项目所在地/名称	规模	持续放电时间	功能	系统特点	时间
电化学储能	锂电池	美国 加利福尼亚州 德哈查比市	8 MW	4 h	调峰填谷,改善电能质量	2012 年
	超级电容	西班牙 加那利群岛	4 MW	5 s	调频	2013 年
	钠离子电池	山西 太原	1 MW·h	—	促进新能源与储能融合发展	全球首套 1 MW·h 钠离子电池光储充智能微网系统 2021 年
	液流电池	辽宁 大连	200 MW;一期工程: 100 MW/400 MW·h	4 h	调峰,促进新能源消纳	我国首个 100 MW 级大型电化学储能国家示范项目,迄今为止全球功率最大、容量最大 2022 年投产
热能储能	西班牙 塞维利亚	20 MW	1 h	可再生能源消纳	属于聚光式高温太阳能发电厂,每年可提供 48 GW·h 的储能	2009 年
压缩空气储能	德国 Huntorf 电站	290 MW	2 h	紧急备用电源、系统调峰、黑启动	世界首座大型空气压缩储能系统	1978 年
	河北 张家口	100 MW	4 h	调峰、调频调相、旋转备用、黑启动等	国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目,国产核心装备自主化率 100%,是目前世界单机规模最大、效率最高的新型压缩空气储能电站	2022 年
	北京 306 医院	250 kW	15 s	紧急备用电源	采用磁悬浮轴承技术,与医院备用的柴油发电机相互配合	2008 年
飞轮储能	美国 宾夕法尼亚州	20 MW	15 min	调频、促进可再生能源消纳	电站由 200 个额定功率为 0.1 MW 的飞轮组成,飞轮最高转速达 15 500 r/min,能实现超过 10 万次的完全充电/放电循环	2014 年
	宁夏 灵武	22 MW	—	调频,促进新能源消纳	国内第 2 个全容量飞轮储能-火电联合调频工程,采用全磁悬浮技术,是全球单体储电量最大、单体功率最大的项目	2021 年开工
抽水蓄能	美国 巴斯县	3 003 MW	10.3 h	提升电能质量	项目由 2 个高度相差 385 m 的大型水库、一座发电厂和贯穿连接的隧道组成	2012 年
	福建 周宁	4×300 MW	—	调峰填谷、事故备用,改善区域核电机组运行条件	国内碾压混凝土第一高坝,具备“一键调度”模式	2022 年
超导磁储能	日本 Hosoo 电站	10 MW	—	提高系统稳定性和供电品质		2006 年
	甘肃 白银	1 MJ/500 kV·A	—	维持系统稳定性		2011 年
氢储能	加拿大 多伦多	2 MW	—	储氢,发电	用电低谷制氢,在用电高峰时再转换接入电网	2014 年
	安徽 六安	1 MW	—	削峰填谷	国内首座兆瓦级大功率氢能综合利用站制氢系统	2021 年

中应用于公用事业领域,如提供变电站峰值配电容量延迟、调峰以及增强其可靠性。He等^[39]介绍了在公用事业中规模化便携式储能系统的潜力,并使用时空决策模型研究了其应用的经济性。该文献表明,在一些地区应用移动储能的方式可以将储能设备生命周期内的收入提高70%,并能有效促进当地可再生能源融合。

2.2 可再生能源应用

可再生能源的使用正在迅速增长,但这些资源的多样性为其大规模集成时的运营和使用带来了部分技术和经济性挑战。如何将可再生能源同储能系统/分布式储能系统相结合,解决其间歇性波动问题,很多学者对其做了大量研究工作。

Beaudin等^[40]认为,可扩展、模块化、耐用和低维护的储能技术可能是分布式可再生能源获取的理想选择,单一形式的储能方式未必能满足全部应用特性,可以联合其他储能形式。Koochi-Kamali等^[41]回顾了电能存储技术在包含可再生能源的电力系统中的各种应用,包括提高可再生能源渗透率、负载均衡、频率调节、提供运营储备和改善微智能电网。

在压缩空气储能应用方面,将风能、太阳能和潮汐能等可再生能源与电网进行整合,可增加CAES的灵活性。韩越等^[42]则从多能源耦合的角度分析了压缩空气储能与其他火力发电机组及可再生能源的耦合形式和技术特点,为压缩空气储能技术的应用形式提供了综合全面的参考与指导。田崇翼^[43]重点开展了压缩空气储能与风电系统能量优化与控制策略研究,建立了相关热力学模型,并搭建了基于涡旋机的压缩空气储能试验平台。

2.3 物流运输应用

随着现代物流运输技术快速发展,面向先进储能系统也逐步显现。车载储能系统混动汽车需追求高功率密度,以满足快速充放电、加速、高循环效率、易于控制和系统再生制动能力强等需求。地面电动车辆中使用的主要储能装置是电池,电化学电容器具有比电池更高的功率密度,可用于电动和燃料电池汽车。Cao等^[44]提出了一种新的电池/超级电容混合储能系统,用于电动汽车,该设计充分利用了超级电容器的功率能力,而不需要匹配功率转换器来满足实时峰值功率需求,能明显改善蓄电池负载状况和车辆驾驶性能。为了提高储能能量密度,使用飞轮和电池的混合动力系统很具吸引力,其中飞轮具有高功率密度,可以很好地应对波动的功耗,而电池则具有高能量密度,可以作为推进的主

要动力源。此外,对于大型车辆,比如火车,则可以通过在供电变电站、铁路轨道沿线或列车上安装储能装置,以获取车辆制动能量。有学者研究指出,铁路运输中关于再生制动,应用储能技术主要面临2方面的挑战:一是针对特定的应用选择正确的储能系统;二是如何优化使用问题,这其中包括安装位置、系统尺寸、最优的充电放电控制等,以获取最多的能量^[45]。

关于使用氢气作为车辆燃料,前沿是开发以液相储存氢气的物理和化学方法。采用合成或加工现有材料的新方法制备有改进性能的新材料是非常可取的。高佳佳等^[46]重探究了4类新型储氢材料特性和应用场景,并对其研究进展、存在的问题以及发展趋势进行介绍。

3 储能技术性能比较

不同储能的技术特征差异较大,单一的储能技术难以具备快速充放、大容量存储、持续一致性好、可靠性高、成本低等全部条件。表2和表3^[47-48]分别列出了不同储能技术的优缺点和技术特征。可以看出,在电化学储能中,锂离子电池相比其他形式电池功率和能量密度高,但循环使用寿命不及超级电容;抽水蓄能具有高储能容量特性,持续使用周期长,适合大规模耗能场景应用,但存在环境和投入成本问题;超导磁储能因超导效应其循环效率比较突出,但能量密度相比却不占绝对优势;氢储能则呈现能量密度最高特点,但其循环效率偏低。针对特定的储能技术的应用场景和需求,应综合权衡选择合适的开发路径和类型,同时可以采取多种储能技术并行开发利用。

4 储能技术经济性分析

储能系统的成本通常取决于应用场景。不同技术的发展水平和规模不同,比较各种储能技术的经济性往往具有一定的不确定性。

国内外许多学者从不同出发点阐述储能技术经济性的研究方法。刘畅等^[49]综述了国内外储能经济性的研究进展和方法,初步建立了储能在不同应用模式(包括传统发电领域、可再生新能源领域、辅助服务领域等)下的收益模型。该文献以区域电力系统为研究对象,比较了有无储能系统下系统生产运行成本和社会效益的不同,这种计算方式可分析储能经济性的趋势。Carnegie等^[50]确定了储能设备的应用场景,并比较了这些应用中存储设备的成本。此外,特定使用场景下储能系统的成本因位

表 2 不同储能技术的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of various energy storage technologies

储能类型	优点	缺点	应用情况
锂电池	高功率和能量密度、反应迅速	生命周期取决于放电水平、成本高	最成熟的电化学储能系统
铅酸电池	低成本、技术成熟	能量和功率密度低、生命周期短、维护成本高、材料有毒性	
镍镉电池	技术成熟	高成本、低能量和功率密度、材料有毒性	
钒电池	高储能容量	结构复杂、能量和功率密度低	
超级电容	高能量密度	电池组件特性的相互依赖、安全问题、环境影响	适用于放电持续时间长的公用事业
压缩空气储能	技术成熟、高储能容量	效率波动、安全隐患、地理位置受限	成本因场地而异,前期基建成本高,运维成本多变
飞轮储能	储能容量高,环保、空间占比小、技术成熟	噪音污染、安全问题、单位储能成本高	常用于不间断电源
抽水蓄能	技术成熟、高储能容量、使用寿命周期长	地理位置受限、成本高、功率密度低、有潜在环境影响	成本因场地而异,前期基建成本高,运维成本多变
超导磁储能	响应速度快,储能容量高,可靠性高	成本高、冷却问题、失超、有大磁场要求	需配置低温制冷系统
氢储能	能量密度高,放电时间长,环境兼容性较好	能源转化效率整体偏低,投资成本高	制氢、存储、运输环节受限

表 3 不同储能技术特征^[47-48]Table 3 Technical characteristics of various energy storage technologies^[47-48]

储能类型	功率密度/(kW·m ⁻³)	能量密度/(kW·h·m ⁻³)	能量密度/(W·h·kg ⁻¹)	循环效率/%	循环次数(寿命)
锂电池	1 500~10 000	200~500	75~200	90~97	1 000~10 000
铅酸电池	10~400	50~80	30~50	70~80	500~1 000
钠硫电池	140~180	150~250	150~240	<90	2 500~4 500
超级电容	>100 000	10~30	0.05~15	60~97	>50 000
压缩空气储能	0.04~10.00	0.4~20.0	3~60	60~90	10 000~30 000
飞轮储能	1 000~2 000	20~80	10~30	90~95	>20 000
抽水蓄能	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5	70~85	10 000~60 000
超导磁储能	300~4 000	0.2~14.0	0.3~75.0	80~99	10 000~100 000
氢储能	>500	500~3 000	800~10 000	20~50	>1 000

置、施工方法和规模而显著不同,成本效益取决于能源(如天然气)价格。Marean^[51]研究了基于各种地质构造 CAES 系统的投资成本;盐穴(溶浸开采)投资成本为 1 美元/(kW·h),硬质岩石矿山(使用现有矿山)的投资成本为 30 美元/(kW·h)。

修晓青等^[52]构建了基于等效能折算的储能全寿命周期成本模型与平准化电力成本模型,指出受投资成本影响,现阶段抽水蓄能具备成本竞争力;若离子电池储能的投资成本降低 30%,它将具备显著竞争优势。

Elshurafa^[53]则回顾了储能技术在发电系统中的应用价值,从定性和定量方面审查了平准化储能成本模型、生产成本模型和基于市场的模型在评估储能价值方面的优点,同时指出在储能电力价值链中需要监管和市场改革更多的创新,以此真正发挥储能潜力。

表 4 列出了不同储能技术的经济性评估数据。预计随着技术革新和应用规模化水平提高,未来部

分储能技术的经济成本会有所降低,如应用于公用事业的锂离子电池、氢储能(氢燃料电池)等^[54]。

尽管许多文章通过探讨储能技术成本确定特定技术在未来的竞争力^[55-56],然而,由于缺乏相关技术革新、知识溢出以及预测商品价格变动趋势的能力,此类分析往往具有一定程度的不确定性。Schmidt 等^[57]根据各种储能技术的历史价格和累计装机容量得出经验曲线,对各种技术未来的价格做了预测和探讨。

关于储能技术经济性分析需要权衡各种要素,不同的评价体系和模型分析各有侧重点,结果也有一定差别。在今后决策制定中,预测各种储能技术的应用潜力和发展规模方面,需要结合不同模型或开发优化更具代表性的模型来进行更深入分析。同时,储能经济性和市场价值也需要更多的考虑市场监管和市场改革等大环境影响,以获得更大竞争力。

表 4 不同储能技术经济性评估^[48,54-55]

Table 4 Estimated costs of various energy storage technologies^[48,54-55]

储能类型	功率成本/(美元·kW ⁻¹)	容量成本/[美元·(kW·h) ⁻¹]	一次循环成本/[美元·(kW·h) ⁻¹]
锂离子电池	1 200~4 000	100~2 500	15~100
铅酸电池	300~600	200~400	20~100
钠硫电池	1 000~3 000	300~500	8~20
镍镉电池	500~1 500	800~1 500	20~100
超级电容储能	100~300	300~2 000	2~20
压缩空气储能	400~800	2~50	2~4
飞轮储能	300~1 000	3 000~6 000	3~25
抽水蓄能	600~2 000	5~100	0.1~1.4
超导磁储能	200~300	1 000~10 000	—
氢燃料电池	500~10 000	—	—

5 结论

储能技术对于新型电力系统调频、提升电能质量、促进可再生新能源消纳、备用电源等发挥着重要作用。不同的储能技术特征差别较大,单一的储能技术或系统难以全部满足实际储能应用场景需求。随着技术革新和市场机制的稳步创新,储能技术将会在未来参与构建新型电力系统、推进能源革命、实现碳中和目标等方面发挥更大作用。

本文通过梳理总结近年来国内外一系列关于储能技术的研究成果,对现有储能技术的类型和发展状况进行了综述,着重分析了不同储能技术的差异及应用领域,并对其研究重点和经济性进行了阐述。

(1)电化学和电池储能技术重点是引入新的储能材料。本文深入剖析其储能机理,并分析了其对储能需求的适用性。

(2)热化学储能技术实现大规模商业化运行需掌握循环动态特性及建模,以提升使用寿命、降低成本。

(3)抽水蓄能和压缩空气蓄能技术是成熟、可靠的技术,常用于具有大规模电力存储,然而仍需研究如何提高其循环效率,解决开发前期的基建相关问题。

(4)飞轮储能则适用于频繁启停、放电时间短的场合,采用新型材料并对转子结构设计进行优化将是其未来研究方向。

(5)超导磁储能技术具有响应速度快、能量功率密度高等特点,目前需要突破超导材料研发、退化和失效机制等技术瓶颈。

(6)氢储能在新型电力系统应用价值和潜力明显,但技术在大规模实施应用之前仍需克服储运、跨领域协同、经济成本、市场认知度等方面的障碍。

随着更多可再生能源系统与储能系统相结合,新型混合储能技术并行发展,预计未来氢和电作为能源载体的使用将得到大力改善。

参考文献:

[1]蒋文坤,韩颖慧,薛智文,等.多能互补能源系统中储能原理及其应用[J].综合智慧能源,2022,44(1):63-71.
JIANG Wenkun, HAN Yinghui, XUE Zhiwen, et al. Energy storage technologies and their applications in multi-energy complementary power system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1):63-71.

[2]陈磊,徐飞,王晓,等.储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (17):4283-4290.

[3]戴少涛,王邦柱,马韬.超导磁储能系统发展现状与展望[J].电力建设,2016,37(8):18-23.
DAI Shaotao, WANG Bangzhu, MA Tao. Superconducting magnetic energy storage system: Status and prospect [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8):18-23.

[4]GUNEY M S, TEPE Y. Classification and assessment of energy storage systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75:1187-1197.

[5]AKRAM U, NADARAJAH M, SHAH R, et al. A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120:109626.

[6]李相俊,马会萌,姜倩.新能源侧储能配置技术研究综述[J].中国电力,2022,55(1):13-25.
LI Xiangjun, MA Huimeng, JIANG Qian. Review of energy storage configuration technology research on renewable energy side [J]. Electric Power ,2022,55(1):13-25.

- [7]陈海生,李泓,马文涛,等. 2021 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(3):1052-1076.
CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11 (3) : 1052-1076.
- [8]李相俊,官亦标,胡娟,等. 我国储能示范工程领域十年(2012—2022)回顾[J]. 储能科学与技术,2022,11(9):2702-2712.
LI Xiangjun, GUAN Yibiao, HU Juan, et al. Review of energy storage application in China from 2012 to 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11 (9) : 2702-2712.
- [9]李泓,吕迎春. 电化学储能基本问题综述[J]. 电化学,2015,21(5):412-424.
LI Hong, LYU Yingchun. A review on electrochemical energy storage [J]. Journal of Electrochemistry, 2015, 21 (5):412-424.
- [10]NITTA N, WU F X, LEE J T. Li-ion battery materials: Present and future [J]. Materials Today, 2015, 18 (5) : 252-264.
- [11]TAN P, JIANG H R, ZHU X B, et al. Advances and challenges in lithium-air batteries [J]. Applied Energy 2017, 204:780-806.
- [12]ZHANG L L, WANG Z L, XU D, et al. The development and challenges of rechargeable non-aqueous lithium-air batteries [J]. International Journal of Smart and Nano Materials,2013,4(1):27-46.
- [13]韩诚,武少杰,吴朝阳,等. 钠离子电池负极材料的储钠机制及性能研究进展[J/OL]. 过程工程学报: 1-15 (2022-06-20) [2022-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20220617.1525.006.html>.
HAN Cheng, WU Shaojie, WU Chaoyang, et al. Research progress on sodium storage mechanism and performance of anode materials for sodium ion batteries[J/OL].The Chinese Journal of Process Engineering: 1-15 (2022-06-20) [2022-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20220617.1525.006.html>.
- [14]RU Y, ZHENG S, XUE H, et al. Different positive electrode materials in organic and aqueous systems for aluminum ion batteries [J]. Journal of Materials Chemistry, 2019, A7:14391.
- [15]LU P, XUE D F, YANG H, et al. Supercapacitor and nanoscale research towards electrochemical energy storage [J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2013, 4(1):2-26.
- [16]朱元元. 电化学电容器负极材料的设计和储能机理研究[D].广州:华南理工大学,2019.
ZHU Yuanyuan. Material design and energy storage mechanism investigation to the negative electrodes for electrochemical capacitors [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [17]谢聪鑫,郑琼,李先锋,等. 液流电池技术的最新进展[J]. 储能科学与技术,2017,6(5):1050-1057.
XIE Congxin, ZHENG Qiong, LI Xianfeng, et al. Current advances in the flow battery technology [J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5):1050-1057.
- [18]YUAN Z Z, LIANG L X, DAI Q, et al. Low-cost hydrocarbon membrane enables commercial-scale flow batteries for long-duration energy storage[J]. Joule, 2022, 6(4): 884-905.
- [19]汪德良,张纯,杨玉,等. 基于太阳能光热发电的热化学储能体系研究进展[J]. 热力发电,2019,48(7):1-9.
WANG Deliang, ZHANG Chun, YANG Yu, et al. Research progress of thermochemical energy storage system based on solar thermal power generation [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(7):1-9.
- [20]BERMÚDEZ J M, RUISÁNCHEZ E, ARENILLAS A, et al. New concept for energy storage: Microwave-induced carbon gasification with CO₂ [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78:559-564.
- [21]杨天锋,向铎,袁鹏,等. 高温储能金属氧化物研究综述及其与超临界二氧化碳循环耦合研究[J]. 热力发电,2022,51(2):1-11.
YANG Tianfeng, XIANG Duo, YUAN Peng, et al. A review on studies on metal oxides for high-temperature energy storage and its coupling with supercritical carbon dioxide power cycle [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 1-11.
- [22]VIJJAPU R, TIWARI S. Thermodynamics of sensible thermal energy storage systems [J]. Encyclopedia of Energy Storage, 2022, 1:171-185.
- [23]LIN Y X, JIA Y T, ALVA G, et al. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(3):2730-2742.
- [24]SHE X, PENG X, ZHANG T, et al. Preliminary study of liquid air energy storage integrated with LNG cold recovery [J]. Energy Procedia, 2019, 158:4903-4908.
- [25]TOODEJI H. A developed flywheel energy storage with built-in rotating supercapacitors [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2019, 27: 213-229.
- [26]刘畅,蔡晓江,安庆龙,等. 复合材料飞轮转子储能优化的结构设计[J]. 机械设计与制造,2022(10):278-280,284.
LIU Chang, CAI Xiaojiang, AN Qinglong, et al. Structural design of composite flywheel rotors energy storage optimization [J]. Machinery Design &

- Manufacture, 2022(10):278–280, 284.
- [27] 李万杰, 张国民, 艾立旺, 等. 高温超导飞轮储能系统研究现状[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(10):19–31.
- LI Wanjie, ZHANG Guomin, AI Liwang, et al. Development status of high-temperature superconducting flywheel energy storage system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(10):19–31.
- [28] DEANE J P, GALLACHÓIR B PÓ, MCKEOGH E J. Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(4):1293–1302.
- [29] 李晓鹏, 李岩, 刘舒然, 等. 基于可变速抽水蓄能技术提升区域电网新能源消纳水平的研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(10):52–58, 112.
- LI Xiaopeng, LI Yan, LIU Shuran, et al. Research on promotion of renewable energy integration into regional power grid by variable speed pumped storage technology [J]. Smart Power, 2021, 49(10):52–58, 112.
- [30] 刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4):766–775.
- LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4):766–775.
- [31] YANG C J, JACKSON R B. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1):839–844.
- [32] 夏亚君, 宋萌, 张立晖, 等. 含超导磁储能装置的电力系统关键技术研究[J]. 低温与超导, 2017, 45(11):47–51.
- XIA Yajun, SONG Meng, ZHANG Lihui, et al. Discussion on the key technologies of power systems integrated with superconducting devices [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2017, 45(11):47–51.
- [33] 郭文勇, 张京业, 张志丰, 等. 超导储能系统的研究现状及应用前景[J]. 科技导报, 2016, 34(23):68–80.
- GUO Wenyong, ZHANG Jingye, ZHANG Zhifeng, et al. Current research status and application prospect of SMES [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(23):68–80.
- [34] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3):89–99.
- XU Chuanbo, LIU Jianguo. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: Application value, challenges, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3):89–99.
- [35] 谢欣烁, 杨卫娟, 施伟, 等. 制氢技术的生命周期评价研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(6):2147–2158.
- XIE Xinchuo, YANG Weijuan, SHI Wei, et al. Life cycle assessment of technologies for hydrogen production—A review [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(6):2147–2158.
- [36] LAMB K, DOLAN M D, KENNEDY D F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(7):3580–3593.
- [37] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 氢储能系统关键技术及应用综述[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(2):197–203.
- HUO Xianxu, WANG Jing, JIANG Ling, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2):197–203.
- [38] PREUSTER P, ALEKSEEV A, WASSERSCHIED P. Hydrogen storage technologies for future energy systems [J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2017, 8:445–471.
- [39] HE G, MICHALEK J, KAR S, et al. Utility-scale portable energy storage systems [J]. Joule, 2021, 5(2):379–392.
- [40] BEAUDIN M, ZAREIPOUR H, SCHELLENBERGLABE A, et al. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review [J]. Energy for Sustainable Development, 2010, 14:302–314.
- [41] KOOHI-KAMALI S, TYAGI V V, RAHIM N A, et al. Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25:135–165.
- [42] 韩越, 李睿, 孙世超, 等. 压缩空气储能+的多能耦合技术研究进展[J]. 能源研究与利用, 2022(3):25–29.
- HAN Yue, LI Rui, SUN Shichao, et al. Research progress of compressed air energy storage + multi energy coupling technology [J]. Energy Research & Utilization, 2022(3):25–29.
- [43] 田崇翼. 压缩空气储能-风电系统的能量优化与控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- TIAN Chongyi. Research on energy optimization and control strategy for compressed air energy storage-wind power system [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [44] CAO J, EMADI A. A new battery/ultra capacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1):122–132.
- [45] GHAVIHA N, CAMPILLO J, BOHLIN M, et al. Review of application of energy storage devices in railway transportation [J]. Energy Procedia, 2017, 105:4561–4568.
- [46] 高佳佳, 米媛媛, 周洋, 等. 新型储氢材料研究进展[J].

- 化工进展, 2021, 40(6): 2962–2971.
- GAO Jiajia, MI Yuanyuan, ZHOU Yang, et al. Recent developments in new hydrogen storage materials [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(6): 2962–2971.
- [47] SABIHUDDIN S, KIPRAKIS A E, MUELLER M. A numerical and graphical review of energy storage technologies [J]. Energies, 2015, 8: 172–216.
- [48] CHEN H S, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291–312.
- [49] 刘畅, 徐玉杰, 张静, 等. 储能经济性研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1084–1093.
- LIU Chang, XU Yujie, ZHANG Jing, et al. Research progress in economic study of energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5): 1084–1093.
- [50] CARNEGIE R, GOTHAM D, NDERITU D, et al. Utility scale energy storage systems: Benefits, applications, and technologies [R]. State Utility Forecasting Group, 2013.
- [51] MAREAN J B. Compressed air energy storage engineering and technical study [R]. Albany: New York State Energy Research and Development Authority, 2009.
- [52] 修晓青, 李相俊, 王佳蕊, 等. 基于等效能折算的储能电站广义成本研究[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 192–202.
- XIU Xiaqing, LI Xiangjun, WANG Jiarui, et al. Generalized cost study of energy storage power station based on equivalent efficiency conversion [J]. Electric Power, 2022, 55(4): 192–202.
- [53] ELSHURAF A M. The value of storage in electricity generation: A qualitative and quantitative review [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101872.
- [54] MEISHNER F, SAUER D U. Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids [J]. eTransportation, 2019, 1: 100001.
- [55] 吴皓文, 王军, 龚迎莉, 等. 储能技术发展现状及应用前景分析[J]. 电力学报, 2021, 36(5): 434–443.
- WU Haowen, WANG Jun, GONG Yingli, et al. Development status and application prospect analysis of energy storage technology [J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5): 434–443.
- [56] 彭占磊, 杨之乐, 杨文强, 等. 电化学储能参与电力系统规划运行方法综述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 37–44.
- PENG Zhanlei, YANG Zhile, YANG Wenqiang, et al. Review on planning and operation methods for power system with participation of electrochemical energy storage systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 37–44.
- [57] SCHMIDT O, HAWKES A, GAMBHIR A, et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates [J]. Nature Energy, 2017, 2: 17110.
- (本文责编: 陆华)

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-10-26
上网日期: 2023-09-25; 附录网址: www.ienergy.cn

作者简介:

薛福(1987), 男, 工程师, 硕士, 从事新能源设计开发与利用等方面的研究, xf6386@csepi.com。