

引用格式: 慈俊昌. 熔融盐储热技术在光热发电领域的工程应用进展 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 85-99. CI Junchang. Progress in the engineering application of molten salt thermal storage technology in the field of solar thermal power generation [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 85-99. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-407.

熔融盐储热技术在光热发电领域的工程应用进展

慈俊昌[✉]

(中铁建发展集团有限公司, 北京 100043)

摘要: [目的] 综述熔融盐储热技术在光热发电领域的发展, 探讨其在实现我国“双碳”目标中的重要作用。[方法] 介绍了熔融盐储热技术的原理, 包括使用的熔融介质类型 (碳酸盐、氯化盐、氟化盐及硝酸盐等)、储热系统的分类 (单罐、双罐及多罐) 及光热发电系统的类型 (塔式、槽式、线性菲涅尔和碟式)。同时, 分析了全球及我国光热发电领域的发展格局, 并对光热发电项目的成本进行了评估。[结果] 熔融盐储热技术通过使用熔融盐作为吸热和储热介质, 实现了光热发电机组的 24 h 连续稳定运行和灵活调峰能力。在大型或商业化光热电站中, 双罐储热系统因其高效的储热能力和卓越的稳定性得到了广泛应用。全球光热发电领域的发展呈现多元化特征, 我国光热发电项目累计装机容量稳步攀升。成本分析显示, 随着生产规模的扩大和发电效率的提升, 采用熔盐储能技术的光热发电的度电成本预计将显著下降。[结论] 未来, 随着国家政策支持力度加大、技术的进一步成熟和成本的进一步降低, 熔盐储热技术在清洁能源领域有望发挥更加重要的作用, 为实现我国“双碳”目标提供有力支持。

关键词: 光热发电; 熔融盐储热; 储热系统; 应用现状; 发展趋势

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-407

文章编号: 2095-8676(2025)05-0085-15

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-407

中图分类号: TK11; TB34



论文二维码

Progress in the Engineering Application of Molten Salt Thermal Storage Technology in the Field of Solar Thermal Power Generation

CI Junchang[✉]

(China Railway Construction Development Group Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: [Objective] To provide an overview of the development of molten salt thermal storage technology in the field of concentrated solar power (CSP) generation and explore its significant role in achieving China's "dual carbon" goals. [Method] The principles of molten salt thermal storage technology were introduced, including the types of molten media used (carbonates, chlorides, fluorides, and nitrates, etc.), classifications of thermal storage systems (single-tank, dual-tank, and multi-tank), and types of CSP systems (tower, trough, linear Fresnel, and dish). Additionally, the development landscape of CSP globally and in China was analyzed, and an assessment of the costs associated with CSP projects was conducted. [Result] Molten salt thermal storage technology enables CSP units to operate continuously and stably for 24 hours and provides flexible peak shaving capabilities by utilizing molten salt as the heat absorption and storage medium. In large-scale or commercial CSP plants, dual-tank thermal storage systems are widely applied due to their efficient thermal storage capacity and exceptional stability. The global CSP sector exhibits diversified development characteristics, and the cumulative installed capacity of CSP projects in China has been steadily increasing. Cost analysis indicates that with the expansion of production scale and the improvement of power generation efficiency, the levelized cost of electricity (LCOE) for CSP using molten salt energy storage technology is expected to decline significantly. [Conclusion] In the future, with increased policy support from the government, further technological maturity, and reduced costs, molten salt thermal storage technology is expected to play a more

important role in the field of clean energy, providing strong support for achieving China's "dual carbon" goals.

Key words: concentrated solar power (CSP); molten salt thermal storage; heat storage system; current application status; development trends

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在我国积极践行“双碳”目标的战略大背景下，新能源领域迎来了前所未有的发展机遇^[1]。其中，以风电和光伏为代表的可再生能源呈现出蓬勃发展的态势。2种能源形式凭借其清洁无污染、资源可再生的显著特性，在推动全球能源结构转型和应对气候变化的过程中扮演着举足轻重的角色。然而，风电和光伏能源的生产高度依赖于自然条件，如风速、风向的变化以及日照强度随时间的波动。这不可避免地导致了电力输出的间歇性和不稳定性问题，进而对电力系统的持续稳定供电构成了严峻挑战。

在此背景下，聚光太阳能热发电，通常简称为光热发电（Concentrating Solar Power, CSP）作为一种创新实用的新能源方式，逐渐受到业界关注。CSP不仅绿色低碳，还是电网友好型电源，兼具调峰和储能功能，与风电、光伏发电等新能源发电形式相得益彰^[2-4]，能有效解决新能源发电的间歇性问题，为电力系统提供长周期调峰能力。在我国部分地区，CSP具备作为调峰和基础性电源的潜力，是新能源安全可靠替代传统能源的有效手段，对于加快构建新型能源体系具有重要意义。而熔融盐以其在高温下呈液态的独特性质，以及稳定、寿命长、换热难度低等显著优势^[5]，成为光热发电系统中理想的储能介质。熔融盐能够在吸收太阳能转换而来的热能后将其高效存储，在发电需求产生时，将存储的热能精准释放给工作介质，进而驱动发电设备运行^[6]，实现了太阳能的高效转换与存储，极大地提升了光热发电系统的灵活性与可靠性。近年来，随着光热发电技术和熔融盐材料技术的协同进步，熔融盐储热技术在光热发电领域的应用价值日益凸显，吸引了众多科研力量 and 企业的投入，推动其在塔式、菲涅尔式等光热发电系统中广泛应用^[7-10]。通过对熔融盐材料组成与性能的优化、储能系统结构与设计的改进以及高效热交换与管理系统的开发，不仅使光热发电系统的整体性能和经济性得以提升，

还为该技术在其他领域的拓展提供了宝贵经验。文章将系统总结熔融盐储热技术在光热发电领域中的应用，从发展概述、工程现状、与其他储能方式对比和未来发展趋势等多方面展开分析，为光热发电技术的持续发展和广泛商业化应用提供有力的理论支撑与实践参考。

1 熔融盐储热发电概述

1.1 熔融盐储热发电技术原理与应用

CSP技术通过聚光集热装置将太阳辐射能集中到热能接收器上，加热熔融盐储热介质，实现能量初次转化。加热后的储热介质通过热泵及管道送至换热系统，转化为水的内能产生蒸汽，推动汽轮机发电，完成二次转化。其主要遵循能源转换过程为“光能-热能-机械能-电能”的能量转化过程。若有多余的热能，还可以将其储存于高温蓄热罐内，以供发电系统在夜间使用，从而确保连续发电^[10]。CSP系统主要由5个部分组成，包括聚光集热系统、热能接受转化系统、储蓄热系统以及热发电系统。集热系统是光热发电系统的核心，利用聚光装置、接收器和跟踪机构等组件，吸收并转化太阳辐射为热能；聚光系统追踪太阳轨迹，将能量聚焦至吸热塔顶的吸热器，实现太阳能聚集；吸热系统加热内部介质，高效转换太阳能为热能；储换热系统储存热能，并在需要时通过熔融盐与水热交换产生高温高压蒸汽；最终，发电系统利用蒸汽驱动汽轮发电机组生成电能。

熔融盐储热技术在CSP系统中扮演着极为关键的角色，其原理与应用涉及多方面的关键技术细节。

1.1.1 熔融盐的热物性

熔融盐具有独特的热物性，这是其能在储热技术中广泛应用的基础。常见的用于储热的熔融盐有硝酸盐类混合物，如二元硝酸钠-硝酸钾（60:40）混合盐。其熔点相对较低，约为220℃，这种混合

盐在光热发电中被广泛应用。其具有良好的热稳定性和较高的热容量，能够在 290~565 ℃ 的温度范围内有效工作^[11]。比热容通常在 1.5~2.0 J/(g·℃) 范围内，意味着在温度变化时能够吸收或释放大量的热量，从而具备较高的储热能力。导热系数在 0.5~0.8 W/(m·℃)，虽然相比一些金属材料较低，但在储热系统的整体设计中，通过优化传热结构可以有效弥补这一不足。热稳定性方面，其在一定的温度范围内（如低于 550 ℃），能够保持良好的化学稳定性，减少分解与变质的风险，确保长时间稳定储热。

1.1.2 储热系统的设计参数

1) 储热容量设计

储热系统的储热容量需紧密结合 CSP 发电系统的规模与发电时长需求确定。以某一典型的 100 MW CSP 电站为例，若要实现夜间 8 h 连续发电，根据电站的发电功率、熔融盐的比热容（取值 1.8 J/(g·℃)）以及运行温度范围（假设高温罐 500 ℃，低温罐 250 ℃），通过能量平衡方程 $Q=mc\Delta T$ （ Q 为热量， m 为质量， c 为比热容， ΔT 为温度变化）计算可得，储热罐总体积为 1200~1500 m³。在实际工程中，储热容量与发电功率的比例关系一般在 3~5 h 发电功率对应的储热量之间，具体数值受当地太阳能资源波动、系统成本控制等多种因素影响。

2) 温度参数设计

储热系统的高温蓄热罐内熔融盐温度通常维持在 350~500 ℃，这一温度范围的确定是基于大量 CSP 工程实践数据总结以及对熔融盐热物性与蒸汽发生系统匹配性研究^[12]。低温蓄热罐温度一般在 250~300 ℃，是为了保证在储换热过程中有足够的温差驱动力，同时确保熔融盐在低温下仍处于液态且性能稳定。

1.1.3 实际工程中的技术挑战和解决方案

1) 腐蚀问题

熔融盐在高温下对金属材料存在腐蚀风险。在实际工程中，常选用不锈钢 316 等耐腐蚀材料制作储罐、管道和换热器等部件；同时，采用陶瓷涂层等表面处理技术增强抗腐蚀能力；此外，还向熔融盐中添加适量的缓蚀剂，如稀土元素化合物（如铈、镧的氧化物等）或一些有机缓蚀剂。这些缓蚀剂可

以吸附在金属表面，形成一层抑制腐蚀反应发生的钝化膜。一般来说，缓蚀剂的添加量需根据具体的熔融盐体系以及运行工况进行精确调配，通常在熔融盐总质量的 0.1%~0.5%，就能起到较为明显的缓蚀效果^[13]。

2) 传热效率提升挑战

熔融盐导热系数较低影响传热效率。一方面，采用高效换热器结构，如螺旋缠绕管式换热器，其传热系数相比传统换热器可提高 20%~30%。另一方面，在熔融盐中添加纳米颗粒，如纳米氧化铝颗粒，添加量为 1%~3%（质量分数），可使导热系数提高 10%~20%，从而提升整体传热效率，促进热能的高效交换与利用；

1.2 熔融盐储热的主要介质材料

熔融盐是一种兼具蓄热与传热功能的介质，凭借其卓越的性能特征，包括高操作温度、优异的热稳定性、较高的比热容、高效的对流传热特性、低黏度、低的饱和蒸汽压以及成本效益^[14]，已成为国内外学术界研究的焦点，并引发了广泛的研究兴趣。在熔融盐储热技术领域，该技术被划分为显热蓄热与潜热蓄热（或称相变蓄热）两大类，其中显热蓄热技术因其广泛的应用范围及较高的技术成熟度^[8]，在太阳能发电等中高温蓄热应用场景中占据了主导地位。

在熔融储热技术领域，当前研究的熔融介质涵盖了碳酸盐^[15-16]、氯化盐^[17-18]、氟化盐^[19]及硝酸盐^[20-21]等多种类型，这些介质因配比差异而展现出多样化的特性。各类熔融盐的熔点范围宽广，介于 142~854 ℃ 之间，普遍遵循硝酸盐熔点最低、氯化盐次之、碳酸盐略高、氟化物最高的规律。尽管氟化盐体系具有高热稳定性（常高于 700 ℃），但其高熔点特性限制了其在热解反应中的应用潜力；硝酸盐则在温度超过 350 ℃ 时易于氧化，导致热稳定性降低；氯化盐熔点差异显著，尤其是经济型的 KCl 和 NaCl，其高熔点（大于 750 ℃）成为另一关注点^[22]。

目前，学术界已经展开了大量的研究工作，研究涉及熔融盐的种类和配比^[8, 23-24]等。此外，随着材料科学和化学工程技术的不断进步，新型熔融盐材料^[25-27]的开发也成为可能。这些新型材料不仅可能具备更高的储能密度和更优的热稳定性，还可能通

以降低腐蚀性和提高可回收性，进一步降低光热发电系统的整体成本^[22]。而在众多光热电站中，目前普遍采用的是硝酸盐的混合物作为关键材料^[8]，尤其是硝酸钠与硝酸钾的组合尤为常见。硝酸盐凭借其优异的物理特性，即较低的熔点与相对较低的腐蚀性，在熔盐储热材料领域中占据了显著地位，成为备受学术界和工业界关注的焦点。例如，中电建青海共和实施的 50 MW 光热发电项目所采用的二元熔盐 Solar Salt（由 60% 硝酸钠与 40% 硝酸钾组成），因其熔点为 220 °C 且最高工作温度可达 600 °C，已成为当前众多光热发电站首选的传热与储热介质。

1.3 熔融盐储热介质的存储方式

熔盐储罐在储热技术中至关重要，储热系统主要分为单罐^[28]、双罐^[29]及多罐 3 类，均依赖熔盐储罐为核心设备。单罐系统结构相对简单，双罐系统通过冷热熔盐分离提升效率，多罐系统则提供更大的灵活性和容量。在光热电站中，根据实际需求，可选择单罐、双罐或多罐熔盐系统。每种系统都有其独特的运作机制和适用场景，共同推动着储热技术的发展和应用。

1.3.1 单罐储热系统

单罐储热系统通过一个熔盐储罐同时完成加热和换热过程，是一种紧凑且成本效益较高的储热方案。该系统在小型或实验性光热电站以及特定应用场景下，具有占地面积小、结构相对简单、成本较低的优点，与传统的双罐熔盐蓄热系统相比，可降低 20%~37% 的投资成本^[28]。德国航天航空研究中心（DLR）正开发一种创新的单罐储热技术，该技术利用可移动的机械分隔壁，将一个储罐巧妙地分隔为两个区域，分别用于存放高温与低温熔盐。这种做法旨在降低热量的散失，并使整个控制流程更加简便高效^[29]。东莞理工学院则提出了一种熔融盐斜温层混合蓄热单罐系统，该系统设计基于斜温层蓄热理念，确保高低温熔融盐液在同一单罐内分隔，增加蓄热容量并简化结构，并初步实验验证了其有效蓄热量及斜温层稳定性^[30]。上海电气集团股份有限公司研发出一套单罐熔盐储热系统，并已将其应用于实际的示范项目中。该系统的设计极大地简化了操作流程，同时，相较于双罐熔盐储热系统，其投资成本显著降低。

单罐储热系统也存在一定的局限性，特别是斜温层问题，这会导致蓄热效率降低，影响系统的整体性能^[31]。尽管单罐储热系统拥有成本低廉和构造简单等优势，然而，其在蓄热效率方面的欠缺仍是当前面临的一个关键技术障碍。

1.3.2 双罐储热系统

双罐蓄热技术已发展至成熟阶段，成为熔融盐蓄热中最受欢迎的应用形式，如图 1 所示，其核心构成包括高温熔融盐储罐、低温熔融盐储罐、热交换装置以及熔融盐循环泵等^[32]。在光热电站的储热设计中，双罐储热系统凭借其独特的高温与低温熔盐罐分离设计，实现了冷热熔盐的高效隔离与管理。这不仅大幅增强了储热系统的效能，还有效减少了储热与放热过程中的技术挑战，成功规避了因罐内温差可能引发的各类问题。



图 1 双罐储热系统

Fig. 1 Dual-tank thermal storage system

在双罐熔盐储热系统中，低温熔盐与高温熔盐分别储存于独立的低温储热罐与高温储热罐内，确保了冷热熔盐的有效隔离与系统的稳定运行。为确保系统持续运行及停工期间熔盐保持熔融状态，特别是采用二元盐的电站，罐内熔盐温度需维持在凝固点 250 °C 以上^[33]，这对双罐系统提出了更高要求。尽管当前熔盐储罐在保温方面仍面临熔盐高温分解、储罐腐蚀等挑战，但双罐储热系统凭借高效的储热能力和卓越的稳定性，在大型或商业化光热电站中得到了广泛应用，成为当前大规模太阳能光热发电的主流储热方法。美国内华达州的 Crescent Dunes 项目和我国的中电建共和 50 MW 光热发电项目等多个光热项目均采用了双罐储热系统。然而，双罐系统也伴随着较高的储热介质需求和维护成本的问题。

1.3.3 多罐储热系统

多罐储热系统是在双罐储热系统基础上的进一

步优化与创新，通过增加储罐数量，显著提升了系统的储热量，从而增强光热电站的发电能力和储能效率。这种系统配置不仅提高了机组的可靠性和灵活性，还能够更好地应对光照不足或阴雨天气等不利条件，确保电站的稳定运行。我国哈密 50 MW 熔盐塔式光热发电项目就首创性地采用了双热罐、一冷罐的系统配置，这不仅优化了储热过程，还提升了电站的整体性能^[34]。

1.4 熔融盐储热发电的主要技术路线

CSP 技术根据太阳能集热方式的不同，将发电系统细分为塔式、槽式、线性菲涅尔式和蝶式 4 种类型^[35]。其中聚光比是影响发电效率的关键因素，聚光比越大，集热温度越高，系统发电效率的提升空间也就越大。在这 4 种类型中，蝶式的聚光比最大，塔式次之，槽式和线性菲涅尔则相对较低^[10]。其中塔式和线性菲涅尔式系统主要采用熔融盐作为传热介质，分别采用点聚焦和线聚焦。

截至 2023 年底，国家太阳能光热联盟对国内外太阳能热发电技术路线的统计结果显示，我国并网光热电站中，熔盐塔式（塔式）占比最高，约为 64.9%，导热油槽式（槽式）占比约 26.3%，熔盐线性菲涅尔式（线性菲涅尔式）占比约 8.8%。在兆瓦级规模以上光热发电累计装机容量中，塔式、槽式和线性菲涅尔式的占比分别为 63.1%、25.5%、11.4%^[34]。各类太阳能热发电系统的运行原理因传热流体和聚光方式的不同而各有特色。特别是以熔盐为传热介质的塔式技术，因其高效且稳定的特点，已成为当前太阳能热发电领域的主流技术。本节将重点分析采用熔融盐储热的塔式和线性菲涅尔式发电系统。

1.4.1 塔式光热发电

塔式光热发电是一种高效的集热式太阳能发电技术。其构想最初由苏联的科学家们提出，并于 1950 年设计并成功建造了全球首座功率达到 50 kW 的塔式太阳能热发电实验装置^[36]，这为太阳能热发电技术奠定了基础。该技术利用大型反射镜-定日镜，通过精确的光学设计和跟踪机构，将大面积的阳光反射并集中至高塔顶部的接收器，实现超过 1000 倍的聚光倍率，从而将太阳光能高效转化为热能。这些热能随后传递给工质，经过蓄热环节，

最终驱动汽轮机带动发电机发电^[37]。塔式太阳能光热电站作为集中式光热发电系统的代表，主要由聚光子系统、集热子系统、蓄热子系统以及发电子系统等多个部分组成。聚光子系统由众多定日镜组成，每台定日镜都配备有先进的跟踪机构，以确保太阳光能够精确反射至接收器。集热子系统则负责将接收器上吸收的热能传递给工质，进而转化为可用于发电的热能。蓄热子系统则用于储存热能，以实现昼夜连续发电^[3]。最后，发电子系统利用汽轮机将热能转化为电能，并通过发电机输出电力。塔式光热发电被视为太阳能光热发电技术未来进步的一个主要趋势，具有广阔的发展潜力。迄今为止，世界各地已有多国及地区成功建造并正在运行多个塔式光热电站^[3,38]。

以中电工程新疆哈密 50 MW 熔盐塔式光热发电站为例，如图 2 所示，该电站于 2019 年 12 月 29 日成功并网发电，成为我国首批 20 个光热示范项目之一，同时也是新疆维吾尔自治区唯一投运的光热发电项目。该电站共安装了 14500 个定日镜，每个定日镜的面积达到 48 m²，通过精确的跟踪和反射机制，将太阳光高效地集中至接收器上。同时，该电站还配备了先进的熔盐储热系统，实现了昼夜连续发电的目标。



图 2 塔式光热发电

Fig. 2 Tower type solar thermal power generation

1.4.2 线性菲涅尔式光热发电

线性菲涅尔太阳能热发电系统，是太阳能光热发电领域的一种先进技术，其命名源自法国物理学家奥古斯汀·菲涅尔^[39]。该系统主要由菲涅尔集热器、高低温熔盐储罐、蒸汽发生器及汽轮发电机组等关键部件构成。如图 3 所示，菲涅尔集热场采用独特的双聚光设计，即由一次聚光器和二次聚光器协同工作，通过精密的自动跟踪机制，将太阳直射辐射高效汇聚至真空吸热管表面。在此过程中，太阳光

首先被紧凑布置的多列反射镜构成的类弧面结构所捕获，并经由一次聚光器反射至上方的二次聚光器，最终实现太阳辐射的双重聚焦。聚焦后的高强度光热能量加热了吸热管内的熔盐工质，这些高温熔盐随后被存储于高温熔盐储罐中，以备后续发电使用。

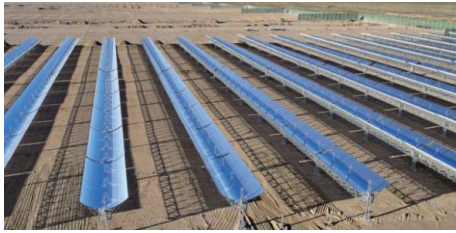


图 3 线性菲涅尔式光热发电

Fig. 3 Linear Fresnel solar thermal power generation

尽管熔盐线性菲涅尔技术在国际上已有初步应用，如西班牙的实验性电站，但均未实现大规模商业化运营。然而，中国在这一技术领域取得突破。2024 年 9 月，由中国核工业集团有限公司玉门新奥新能源有限公司投资，中国能建中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司 EPC 总承包的全球装机规模最大的熔盐线性菲涅尔光热储能项目-中核集团新华发电玉门“光热+”示范项目成功并网发电。该项目总装机容量达到 100 MW，是国内首个“光热储能+光伏+风电”多能互补项目的全容量投产实例，总装机规模高达 700 MW，年均可提供上网电量约 1.735 TWh。该项目通过光热电站、光伏电站和风电场的联合运行，有效解决了可再生能源发电对单一资源的过度依赖问题，显著提升了间歇性可再生能源的供电能力和综合效益。这一创新性的能源配置方案，为减少新能源弃电问题提供了新的解决路径。

2 光热发电工程现状

2.1 国外工程现状

自 20 世纪 80 年代美国率先在太阳二号（Solar Two）项目中引入熔盐作为储热与传热介质以来^[8]，该技术已成为光热发电领域的一大创新亮点，并在全球范围内得到了广泛应用与验证。从全球范围来看，熔融盐储热发电技术的应用已呈现出多元化的趋势。截至 2023 年底，全球光热发电累计装机容量中，槽式技术占比高达 75.5%，显示出其在该领域的主导地位；塔式技术占比约为 20.9%，在特定应用场景中发挥着重要作用^[34]；而线性菲涅尔式技术则占比 3.6%，虽然份额相对较小，但其独特的聚光与储热机制也为光热发电领域带来了新的可能。

如表 1 所示，全球光热发电领域的发展格局呈现出显著的多元化特征，欧美、中东及非洲等地区成为其主要发展阵地。追溯历史，塔式太阳能热发电技术的理论框架最早由苏联科学家提出，并于 1950 年成功设计实施了全球首座 50 kW 规模的实验性塔式太阳能热发电装置^[36]。随后，法国在 1976 年实现了技术上的重要跨越，不仅建成并运行了 64 kW 的同类装置，还同步完成了全球首座 100 kW 功率的塔式太阳能热发电系统^[40]。1982 年，美国成功建设了“Solar One”塔式太阳能电站^[41]。1996 年，基于“Solar One”的经验，建成了“Solar Two”塔式电站，并创新性地将传热介质由水改为硝酸盐。该电站配备了当时最先进的储热系统，并成功运行至 1999 年。其间，“Solar Two”首次应用熔盐技术并实现稳定运行，有力推动了太阳能塔式光热电站的商业化进程。进入 21 世纪，Ivanpah 电站于 2014 年正式投入商业运行，作为目前全球最大的塔式太阳能电站，其总装机容量高达 392 MW，

表 1 国外典型光热电站案例

Tab. 1 Typical cases of solar thermal power plants abroad

| 项目名称 | 总装机容量/MW | 技术路线 | 储能时长/h | 总投资 | 并网（投运）时间 |
|-----------------------|----------|-------|--------|-----------|----------|
| 美国Ivanpah光热电站 | 392 | 塔式水蒸气 | — | 22亿美元 | 2014年 |
| 美国Crescent Dunes光热电站 | 110 | 塔式熔融盐 | 10 | 10亿美元 | 2015年 |
| 西班牙Gemasolar光热电站 | 19.9 | 塔式熔融盐 | 15 | 2.6亿美元 | 2011年 |
| 南非Khi Solar One光热电站 | 50 | 塔式水蒸气 | 2 | 101.74亿兰特 | 2016年 |
| 南非红石100 MW塔式光热电站 | 100 | 塔式熔融盐 | 12 | 60亿人民币 | 2024年 |
| 摩洛哥努奥三期光热电站 | 150 | 塔式熔融盐 | 7.5 | 20亿美元 | 2018年 |
| 智利Cerro Dominador光热电站 | 110 | 塔式熔融盐 | 17.5 | 18亿美元 | 2021年 |

由美国 BrightSource、Google 及 NRG 公司联合打造^[42]。2007 年，西班牙设计建造了装机容量为 11 MW 的 PS10 塔式光热电站，该电站是欧洲首座商业化塔式电站。2013 年，PS20 太阳能塔式电站在 PS10 电站的基础上建造完成。近年来，拉丁美洲也迎来了光热发电领域的突破性进展，2021 年，智利北部阿塔卡马沙漠的 Cerro Dominador 塔式光热发电站成功并网，成为该地区首个光热发电项目，总投资额高达 10 亿美元。

近年来，中东、北非、南非等新兴市场国家的光热发电发展迅速，新增装机容量首次超过美国和西班牙。例如，摩洛哥的 Noor 太阳能发电站，总装机容量 580 MW，是世界上最大的集中式太阳能电站之一。迪拜 950 MW 太阳能光热光伏混合项目（NOOR ENERGY1），该项目不仅融合了 250 MW 的光伏发电容量与 700 MW 的光热发电容量，还涵盖了 1 座 100 MW 塔式电站与 3 座 200 MW 槽式电站。此外，以色列和印度等国也在积极开发光热发电项目。

2.2 国内工程现状

熔融盐储热发电技术作为太阳能热发电领域的重要组成部分，近年来在国内得到了快速发展，但相较于国际先进水平，其仍处于起步阶段，建设及应用规模相对较小。截至 2023 年底，我国并网运行的光热电站主要仍为国家能源局首批太阳能热发电示范项目，这一现状凸显了我国在熔融盐储热发电领域仍处于探索与示范阶段。

如图 4 所示，截至 2023 年底，我国兆瓦级规模以上光热发电机组累计装机容量达 588 MW，其中并网容量为 570 MW，涉及 11 座电站，主要以熔融盐为储热介质，最大装机 100 MW，最小 10 MW。尽管已有一定规模，但与传统能源和光伏发电相比，熔融盐储热发电规模仍较小，难以满足大规模商业化需求。然而，截至 2024 年 10 月 6 日，我国太阳能光热发电并网规模已增至 688 MW，且在建项目达 31 个，总装机容量约 2.9 GW，显示出光热发电领域的快速发展势头。这表明我国光热发电产业正在加速扩张，未来有望实现更大规模的应用与发展。

值得注意的是，自 2018—2023 年，中国光热发电项目累计装机容量稳步攀升，这主要归因于首批示范项目的成功并网发电，而非大量新增项目的

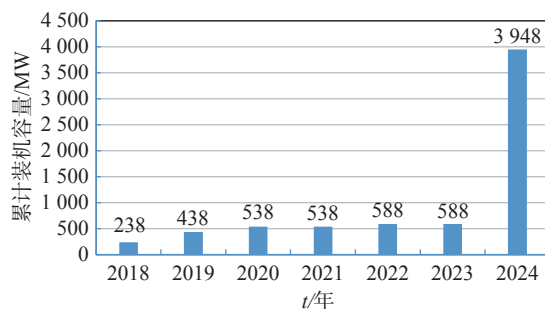


图 4 近年来光热发电累计装机容量及预测

Fig. 4 Accumulated installed capacity and forecast of solar thermal power generation in recent years

快速推进。2023 年，我国光热发电机组未出现新增并网现象，揭示了熔融盐储热发电领域存在的技术障碍、高昂成本及市场需求疲软等挑战。然而，据相关机构预测，至 2024 年底，中国光热发电累计装机容量有望增至 3.948 GW，预示着 2022—2024 年间，光热发电年均复合增速或高达 159%^[43]。此外，预计到 2030 年，中国的光热发电装机容量有望实现显著增长，达到约 10 GW 的里程碑^[44]。而根据国际能源署（IEA）的权威预测，这一增长趋势将持续加速，到 2030 年，中国光热发电市场的装机容量或将攀升至 29 GW；至 2040 年，该数字将翻倍至 88 GW；而在 2050 年，中国光热发电的总装机容量有望达到 118 GW。

据国家太阳能光热产业联盟的统计数据，截至 2023 年底，我国各省市自治区范围内正在建设及规划建设（已纳入政府项目清单）的光热发电项目共计约 43 个，总装机容量高达 4.8 GW^[34]。这些项目的投资主体涵盖了众多企业，包括国家能源集团、国家电力投资集团、中国能源建设集团、中国三峡集团、中国电力建设集团以及中国广核集团等。截至 2024 年底，我国在运光热发电项目如表 2 所示。

从在运光热发电项目的情况来看，我国光电项目装机容量普遍较小，最大规模仅为 100 MW。这一现状限制了熔融盐储热发电技术在电网中的调度能力和储能效率，也影响了其在大规模应用中的经济性和可靠性。此外，由于熔融盐储热发电技术涉及高温熔融盐材料的储存、运输和循环利用等多个环节，其技术复杂性和安全风险也相对较高，需要进一步加强技术研发和安全管理。

从分布区域来看，我国在运光热发电项目主要

表 2 截至 2024 年底我国在运光热发电项目 (熔融盐储热介质)

Tab. 2 China's solar thermal power generation projects in operation (molten salt heat storage medium) by the end of 2024

| 项目名称 | 技术路线 | 储能时长/h | 总投资/亿元 | 并网(投运)时间 | 所在地区 |
|----------------------|-----------|--------|--------|-------------|----------|
| 中控德令哈 50 MW 光热发电项目 | 塔式熔融盐 | 7 | 11.3 | 2018 年 12 月 | 青海省 |
| 中电建共和 50 MW 光热发电项目 | 塔式熔融盐 | 6 | 12.22 | 2019 年 9 月 | |
| 鲁能海西州 50 MW 光热发电项目 | 塔式熔融盐 | 12 | — | 2019 年 9 月 | |
| 首航节能敦煌 100 MW 光热发电项目 | 塔式熔融盐 | 11 | 30 | 2018 年 12 月 | 甘肃省 |
| 大成敦煌 50 MW 光热发电项目 | 线性菲涅尔式熔融盐 | 15 | 16.88 | 2019 年 12 月 | |
| 玉门鑫能 50 MW 光热发电项目 | 塔式熔融盐 | 9 | 17.8 | 2021 年 12 月 | |
| 甘肃玉门 100 MW 光热电站 | 线性菲涅尔式熔融盐 | 8 | 49 | 2024 年 9 月 | |
| 中电工程哈密 50 MW 光热发电项目 | 塔式熔融盐 | 13 | 15.8 | 2019 年 12 月 | 新疆维吾尔自治区 |

分布在青海、甘肃、新疆等光热资源优异的地区。这些地区拥有丰富的太阳能资源，布局了大量集中式光伏电站，但由于电网结构、水资源等条件的限制，急需配备储能项目以提高电力系统的稳定性和可靠性。在此背景下，熔融盐储热发电项目因其高效、稳定、环保等特点，成为这些地区最适合的储能方式之一。然而，由于技术、成本和市场等方面的限制，目前熔融盐储热发电项目在这些地区的推广和应用仍面临诸多困难。

2.3 典型熔融盐光热发电电站

2.3.1 美国新月沙丘光热电站

美国新月沙丘光热电站 (Crescent Dunes CSP project) 是全球首个实现百兆瓦级规模、采用熔盐作为传热和储热介质的塔式光热电站，其装机容量高达 110 MW，见图 5。该电站位于美国内华达州托诺帕附近，距离拉斯维加斯西北部约 225 km，总占地面积达到 1 600 acre，是当时全球最大的塔式熔盐电站。新月沙丘光热电站的建设得到了美国能源部的大力支持，获得了 7.37 亿美元的贷款担保，总投资额约为 10 亿美元。电站于 2015 年正式投入商业化运行，并与内华达州 NV Energy 能源公司签订了为



图 5 美国新月沙丘光热电站
Fig. 5 Crescent Dunes CSP project

期 25 年的购售电协议，价格定为 0.135 美元/kWh。

然而，尽管作为开拓性的能源技术项目备受瞩目，新月沙丘光热电站也经历了不少波折，甚至一度停运。目前，该电站采取了一种特殊的运行模式，即在白天收集太阳能热量并将其储存在熔盐储罐中，然后在晚上利用这些热量发电上网。这种运行模式不仅确保了电站的稳定运行，也充分利用了熔盐储热技术的优势，实现了热能的高效利用和存储。

2.3.2 青海中控德令哈 10 MW 光热电站

青海中控德令哈 10 MW 塔式光热电站位于青海省海西州德令哈市，是我国首座商业化运营且具备规模化储能系统的光热电站，同时也是全球第三座投运的具备规模化储能系统的塔式光热电站，见图 6。该电站装机规模为 10 MW，采用塔式熔盐技术路线，镜场由 21 500 台 2 m² 和 1 000 台 20 m² 的定日镜组成，采光面积达 63 000 m²。

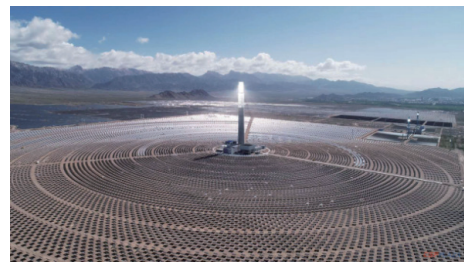


图 6 青海中控德令哈 10 MW 光热电站
Fig. 6 Qinghai Delingha 10 MW CSP power plant

电站于 2013 年 7 月并网发电，2014 年获得国家发展改革委批复的 1.2 元/kWh 的上网电价。2016 年，熔盐吸热、储热、换热系统正式投运，使电站成为我国首座成功投运的规模化储能光热电站。该项目采用直接熔盐传热储热技术，储能时长达 2 h，

熔盐吸热器出口熔盐温度最高可达 568 ℃，各项技术指标均达到设计值，设备运行稳定。电站利用大规模定日镜场收集的太阳能加热存储熔盐，再根据电网调度指令利用熔盐与水热交换产生的高温高压蒸汽驱动汽轮发电机组发电，实现了连续、稳定、可调度的电力输出。

2.3.3 甘肃玉门 100 MW 光热电站

中核集团新华发电玉门“光热+”示范项目（100 MW）于 2024 年 9 月 20 日成功并网发电，这是全球装机规模最大的熔盐线性菲涅尔光热储能项目，标志着国内首个“光热储能+光伏+风电”综合能源系统实现全容量投产。如图 7 所示，该项目位于甘肃省玉门市，总装机容量 700 MW，年发电量约 1.735 TWh，系国家首批“沙戈荒”大型风光基地配套项目及甘肃省首批“光热+”一体化示范项目之一，亦为中核集团首个同类示范项目。



图 7 甘肃玉门 100 MW 光热电站
Fig. 7 100 MW CSP power station in Yumen,
Gansu Province

该项目采用熔盐线性菲涅尔技术，通过动态跟踪的一次反射镜与二次反射镜系统，高效聚集太阳辐射至真空集热管，加热吸热流体，驱动热力循环发电。该方案有效融合了光热、光伏与风电，解决了单一资源依赖问题，显著提升了间歇性可再生能源的发电效率与综合效益，为减少新能源弃电提供了创新路径。该项目的成功实施，对于构建以新能源为主体的新型电力系统具有重要的技术示范与实践意义，展现了熔盐线性菲涅尔光热储能技术在可再生能源领域的应用潜力。

2.4 成本分析

太阳能光热电站的成本构成相当复杂，涵盖了从建设到运营的多方面因素，塔式光热电站即为典型。其成本主要包括电站建造成本、日常运营维护成本、与年发电量直接相关的成本、财务成本以及税金等。在这些成本中，电站的建造成本起到了决

定性的作用，包括集热系统、吸热系统、储热换热系统、热力发电系统及配套公辅设施等各项开支。尤其是设备购置成本占据了建造成本的很大比例，特别是聚光集热系统、储热换热系统和发电系统等高技术含量设备的采购，这些设备不仅技术门槛高，而且需要大面积的土地资源用于安装布置，这进一步增加了初始投资费用。聚光系统、吸热系统、储换热系统（包括储热系统和蒸汽发生系统）的投资占整个电站投资的近 70%，这表明这些系统在决定电站成本中的主导地位。此外，电站规模对单位千瓦投资成本也有显著影响。当光热电站装机规模由 100 MW 增加至 200 MW 时，单位千瓦投资成本下降明显，这是由于规模效应带来的成本摊薄效应。然而，当装机规模进一步由 200 MW 上升到 300 MW 时，单位千瓦投资成本下降不再明显，这主要是由于采用了双塔一机配置，增加了吸热系统部分的单位投资以及增设了两塔之间的并盐管道等额外投资。

在运营维护成本方面，塔式光热电站的运行成本包括人员成本、补燃系统燃料成本、镜面清理用水成本及冷凝器冷却成本等。这些成本随着电站规模的增加而逐渐降低，尤其是太阳能辐照条件好的大型电站，其运维成本甚至可以降低一半。然而，尽管运维成本随着规模增加而降低，但初始投资成本仍然占据主导地位，导致光热电站的度电成本相对较高。

熔融盐作为光热发电系统中的关键储热介质，其性能直接影响系统的效率和成本。高温熔融盐对管道与储热罐内部存在一定的腐蚀，因此对材料要求比较高，这增加了熔融盐系统的成本。同时，熔融盐的购置成本占据了建造成本的很大比例，尤其是聚光集热系统、储热换热系统和发电系统等高技术含量设备的采购。在光热电站的总成本中，熔融盐储能系统占据了相当一部分比例。例如，100 MW 规模熔盐塔式光热电站的单位千瓦投资成本约为 1.72 万元/kW，而整个电站的单位千瓦投资成本在 2.5 万元~3.5 万元之间。根据《中国可再生能源工程造价管理报告 2023 年度》的预测，2030 年熔盐储能单位功率投资约为 240 元/kW，储能单位容量投资约为 200 元/kWh。

根据可胜技术在青海省德令哈市的项目数据，模拟采用双塔一机配置、装机容量 300 MW 的塔式

光热电站度电成本约为 0.6981 元/kWh。与 100 MW 规模电站相比, 300 MW 规模电站的度电成本下降了 17.7%^[34]。这主要得益于单机规模的扩大带来的汽轮机额定效率提高和厂用电率下降, 从而显著提升了电站的上网电量和经济效益。然而, 与国际可再生能源署 (IRENA) 2023 年发布的报告相比, 如表 3 所示, 光热发电路线的总装机成本和度电成本仍然高达 6589 美元/kW 和 0.117 美元/kWh^[45], 远高于同期的光伏、风电和水电的相关成本。这主要是由于光热电站的初始投资成本过高, 尤其是大面积的聚光系统和吸热储热系统成本占比过大, 导致整个电站的成本居高不下。

表 3 不同发电方式成本比较

Tab. 3 Cost comparison of different power generation methods

| 发电方式 | 总装机成本/ (美元·kW ⁻¹) | 平准化度电成本/ (美元·kWh ⁻¹) |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 聚光太阳能 (CSP) | 6589 | 0.117 |
| 太阳能光伏 | 758 | 0.044 |
| 陆上风电 | 1160 | 0.033 |
| 海上风电 | 3461 | 0.075 |
| 水电 | 2806 | 0.057 |

尽管光热发电项目在成本上相较于光伏发电等新能源形式仍偏高, 但与早期项目相比, 其单位造价已显著降低。国际可再生能源署的报告指出, 自 2010 年以来, 光热发电系统的发电成本已下降约 70%^[45]。

《中国可再生能源工程造价管理报告 2023 年度》显示, 2023 年光热项目的单位千瓦总投资平均约为 1.85 万元/kW, 波动范围在 1.35 万元/kW~2.3 万元/kW 之间。在相同条件下, 熔盐塔式光热

发电项目的造价更具优势, 100 MW 规模的熔盐塔式、导热油槽式及熔盐线性菲涅尔式的单位 kW 总投资分别约为 1.72 万元/kW、2.1 万元/kW 及 2.3 万元/kW。值得注意的是, 装机规模的扩大有助于降低项目总体单位造价。当装机规模从 100 MW 增至 200 MW 时, 单位造价明显下降; 然而, 当规模增至 300 MW 时, 由于需采用“双塔一机”配置, 增加了吸热系统和并盐管道等投资, 造价水平与 200 MW 项目基本持平^[46]。

相关研究表明, 光热发电领域正处于规模化扩展与技术迅猛发展的阶段。随着生产规模扩大带来的成本降低以及发电效率的不断提升, 采用熔盐储能技术的光热发电的度电成本预计将呈现进一步下降趋势。至 2026 年, 塔式光热电站的度电成本有望进一步优化至 0.5287~0.5312 元/kWh (含运维优化成本)^[34]。2040—2050 年, 光热发电的度电成本预计将实现显著削减, 降至 0.35~0.45 元/kWh 区间内^[47]。

3 熔融盐储热与其他储能方式对比

熔融盐储热技术是光热发电领域的主流储热技术, 能够实现光热发电的高效、稳定运行。随着全球光热发电市场的快速发展, 熔融盐储热技术的市场需求将持续增长。熔融盐储热作为热储能的一种, 相较于机械储能、化学储能、电化学储能和电储能, 其独特之处在于利用熔融盐的高热稳定性和高比热容特性, 能够在中高温范围内实现高效、大规模的热能储存与释放, 尤其适用于光热发电、工业余热回收等领域, 具有成本低、寿命长、环境友好等优势。从表 4 可以看出, 相较于其他储能技术, 如抽

表 4 熔融盐储热与其他储能方式性能对比

Tab. 4 Comparison of the performance of molten salt heat storage and other energy storage methods

| 分类 | 储能类型 | 寿命 | 转换效率 | 装机规模 | 建设周期 | 初始投资成本 |
|-------|--------|------------------------|----------------------------|-----------|---------|-----------------------|
| 热储能 | 熔融盐储能 | 25~30 a | 70%~75% (热) 25%~30% (电) | 几十兆瓦~几百兆瓦 | 2 a | 约500万元/MWh |
| 机械储能 | 抽水蓄能 | 坝体100 a 电机设备40~60 a | 70%~78% | 几十兆瓦~几百兆瓦 | 6~8 a | 600万元/MWh |
| | 压缩空气储能 | 40~50 a | 50%~70% | 几十兆瓦~几百兆瓦 | 12~18 m | 500万元/MWh~600万元/MWh |
| 电化学储能 | 锂电池 | 3~5 a (循环超5000次) | 85%~98% | 几十兆瓦~几百兆瓦 | — | 120万元/MWh~170万元/MWh |
| | 全钒液流电池 | 10~15 a (循环超10000次) | 75%~85% | 几兆瓦 | — | 1100万元/MWh~1300万元/MWh |
| 化学储能 | 氢储能 | 5 a (10000 h) | 30% | 几兆瓦 | 2 a | 约1300万元/MWh |

水蓄能、电化学储能、压缩空气储能和氢储能等，熔融盐储热在很多方面也表现出一定的优势。尽管其初始投资规模较大，且应用受限于特定的热能发电场景，无法直接储存电能，需要完成“电能-热能-电能”的转换，效率相对较低，但其在热能储存领域的独特优势仍不容忽视。与电化学储能相比，熔融盐储热的成本更低；同时，熔融盐储热还支持从几十兆瓦到更大规模的装机需求，灵活性和适应性强。此外，熔融盐储热系统还具有较高的安全性，这对于储能系统的长期稳定运行至关重要。

4 熔融盐储热技术在光热发电领域的发展趋势

熔盐储热技术，作为清洁能源领域的一项重要创新解决方案，正日益受到政策扶持和技术进步的双重推动。这项技术的核心在于利用熔盐的高储能密度和优异的热稳定性，实现能量的高效储存与释放。随着全球对节能减排和可再生能源利用的关注度不断提升，熔盐储热技术因其独特的优势而备受瞩目。政策方面，各国政府纷纷出台相关政策，加大对熔盐储热等清洁能源技术的研发和应用支持力度，推动其商业化进程。与此同时，技术进步也为熔盐储热技术的发展提供了有力支撑。材料科学、热力学、控制技术等领域不断突破，使得熔盐储热系统的效率、稳定性和经济性得到了显著提升。未来，随着国家政策支持力度加大、技术的进一步成熟和成本的进一步降低，熔盐储热技术有望在清洁能源领域发挥更加重要的作用。

4.1 政策支持力度加大

2023年，中国政府密集出台了一系列政策，全力推动光热发电行业的规模化发展。2023年国家能源局发布《关于推动光热发电规模化发展有关事项的通知》，明确力争在“十四五”期间每年新增光热发电开工规模达到3GW左右。并要求结合沙漠、戈壁、荒漠地区新能源基地建设，尽快落地一批光热发电项目。光热发电规模暂按内蒙古800MW，甘肃700MW，青海1GW，宁夏100MW，新疆200MW配置。而2024年国务院发布的意见中也强调了光热发电的重要性。这预示着未来几年内，随着大型风光基地的开发建设，光热发电将迎来新的发展高潮。

甘肃省、青海省和内蒙古自治区等地也积极响应国家号召，分别发布了相关政策，推动光热发电的发展。甘肃省人民政府在《甘肃省碳达峰实施方案》中提出探索光热发电新模式，并谋划实施“光热+风光电”一体化项目；青海省能源局等五部门则联合发布通知，明确了光热一体化项目的竞争性配置条件，包括光热配比、镜储配置、调峰调频能力等多个方面，原则上新能源与光热的最高配比为6:1；内蒙古自治区人民政府办公厅则提出，到2030年，内蒙古光热发电装机将达到1GW。

未来三年，随着光热发电项目的逐步推进，各地将结合实际情况，进一步明确光热发电项目开发建设的新要求，以确保政策的有效落地和执行，从而推动我国光热发电行业的规模化发展。

4.2 行业规模化及科技发展促进成本下降

目前，光热发电已展现出显著的规模效应，即随着发电规模的扩大，单位成本呈现递减趋势。这种规模效应不仅促进了上下游供应链的完善与稳定，还通过批量化采购主要设备及原材料，有效降低了供应成本。同时，规模化后的市场竞争机制进一步推动了行业成本优化，激励供应商探索低成本、高品质的材料替代方案，并加速了关键设备及材料的国产化进程，显著提升了国产设备的先进性、可靠性，进而实现了光热发电的降本增效。此外，随着开发商及各参与方经验的积累，风险管理和试错成本得到有效控制，设计与建设周期显著缩短。熔盐储热技术已在太阳能光热发电、火电机组灵活性改造、供暖及余热回收等领域得到广泛应用，并取得了一系列代表性示范成果，但在关键技术领域仍有待进一步突破。

随着科研人员对熔盐储能技术的持续深入研究，未来熔盐材料成本有望大幅降低，储热密度将显著提升。同时，熔盐储热系统的关键设备将形成标准化的制造流程，系统集成也将建立规范化的评价体系，确保各应用场景下的技术配套一致性。新型储热材料和系统设计的不断优化，将进一步增强系统性能，拓宽其适应的气候与地理范围，推动熔盐储热技术实现大规模商业化应用，成为新型电力系统中不可或缺的成熟储能技术之一。

4.3 熔盐储热市场将迎来快速增长新时代

熔盐储热技术，凭借其独有的优势与广阔的应

用前景,正逐步成为推动能源转型与可持续发展的重要驱动力。当前,已投运的熔盐储热项目主要聚焦于光热发电领域,但随着技术的不断革新与成本的持续下降,其应用范围有望进一步扩大。在光热发电领域,企业正积极推动“光伏+光热”或“风光热储”一体化项目建设,同时,熔盐储热技术在火电灵活性改造、供热、余热利用等领域也展现出巨大潜力,多个示范项目已成功投运,商业模式日趋成熟。

光热电站项目的增多,不仅提升了行业议价能力,还吸引了更多产业链参与者,显著降低了设备投资成本。线性菲涅尔式光热电站因其施工难度低、集热场工程量小,设备投资占总投资的 75% 左右。集热系统设备国产化率高,模块化、批量化生产降低了成本。随着市场规模的扩大,大宗材料采购价格及条件也进一步优化。此外,首批示范项目的成功建设,不仅促进了关键设备厂家的增多与市场活跃度的提升,还为我国光热行业培养了一批技术研发、系统设计、建设施工及调试运行的专业人才。

通过扩大单机规模、行业规模化发展、持续技术创新与系统优化,以及政策与电力市场的支持,光热发电成本将持续下降。预计至 2025 年,单机规模 300 MW 以上的熔盐线性菲涅尔式光热电站度电成本将降至 0.6 元/kWh 以内,项目经济性显著提升^[34]。

5 结论

熔融盐储热技术基于特定的热传递与存储原理,通过合适的介质、存储方式及技术路线,能有效存储热能并在光热发电系统中实现能量的稳定供应与转化。其普遍性体现在已在全球多个大型光热电站如美国新月沙丘光热电站、中国青海中控德令哈光热电站及甘肃玉门光热电站等成功应用且商业化运营,表明在光热发电领域该技术可广泛适用于不同地理环境与工程条件下的能源存储与转化需求。

目前我国在熔融盐储热发电领域尚处于起步阶段,虽技术不断进步、成本逐渐降低,但仍面临一些如在极端气候条件下熔融盐性能稳定性的进一步提升、与当地电网适配性优化等尚待深入研究解决的问题,且对于一些特殊工况下的长期运行效果还缺乏足够数据支撑。与以往研究相比,相同点在于

都认可熔融盐储热技术对光热发电的重要性与基础应用原理。不同点在于本文结合了更新的国内外工程现状及典型案例,如对近年新建的一些光热电站案例进行深入剖析,更精准地展示了其在能源转化效率提升、连续稳定发电及能源转型推动方面的优势,且对未来发展前景与战略意义的阐述结合了当下技术进步与成本变化趋势等新因素。理论上丰富了光热发电储能技术体系,为能源存储与转化理论提供更多实践依据。实用上可提高光热电站能源转化效率,实现连续稳定发电,助力全球能源转型,尽管我国处于起步阶段但已展现出未来大规模应用与商业化推广潜力,对缓解能源供需矛盾、提升清洁能源占比有着极为重要的意义与价值。

进一步深入研究本课题的建议:(1)深入开展极端气候条件下熔融盐性能优化研究;(2)加强与电网系统协同研究以提升适配性;(3)建立长期运行监测数据库以便更精准评估技术可靠性;(4)探索与其他新能源技术融合应用模式以拓展其在能源综合利用领域的潜力。

参考文献:

- [1] 余晓钟,陈建,龚莹玉,等.“双碳”目标下清洁能源园区构建必要性与政策建议[J].*油气与新能源*,2023,35(1):26-31. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.01.004.
YU X Z, CHEN J, DOU Y Y, et al. Necessity and policy suggestion of constructing the clean energy park guided by "dual carbon" target [J]. *Petroleum and new energy*, 2023, 35(1): 26-31. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.01.004.
- [2] 黄政渊.槽式、线性菲涅尔式光热技术热利用应用场景分析[J].*上海节能*,2024(8):1335-1345. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2024.08.014.
HUANG Z Y. Analysis of thermal utilization application scenarios of trough and linear Fresnel photo-thermal technologies [J]. *Shanghai energy saving*, 2024(8): 1335-1345. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2024.08.014.
- [3] 赵令金.塔式光热发电技术的发展研究[J].*光源与照明*,2024(9):134-136.
ZHAO L J. Research on the development of tower CSP technology [J]. *Lamps and lighting*, 2024(9): 134-136.
- [4] 赵东元,胡楠,傅靖,等.提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J].*电力系统保护与控制*,2020,48(24):1-8. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200168.
ZHAO D Y, HU N, FU J, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China [J]. *Power system protection and control*, 2020,

- 48(24): 1-8. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.200168](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.200168).
- [5] 张钟平, 刘亨, 谢玉荣, 等. 熔盐储热技术的应用现状与研究进展 [J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(9): 40-47. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006).
ZHANG Z P, LIU H, XIE Y R, et al. Application and research progress of molten salt heat storage technology [J]. *Integrated intelligent energy*, 2023, 45(9): 40-47. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.006).
- [6] 雷咸道, 帅争峰, 张卓群, 等. 塔式太阳能光热发电系统原理论述 [J]. *水电与新能源*, 2023, 37(12): 10-13. DOI: [10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2023.12.003](https://doi.org/10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2023.12.003).
LEI X D, SHUAI Z F, ZHANG Z Q, et al. Introduction of the tower-type solar thermal power generation system [J]. *Hydropower and new energy*, 2023, 37(12): 10-13. DOI: [10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2023.12.003](https://doi.org/10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2023.12.003).
- [7] 董晓明, 吴玉庭, 张灿灿, 等. 槽式太阳能聚光集热器热力学分析及聚光集热系统动态特性仿真 [J]. *北京工业大学学报*, 2024, 50(8): 1007-1026. DOI: [10.11936/bjtxb2022110006](https://doi.org/10.11936/bjtxb2022110006).
DONG X M, WU Y T, ZHANG C C, et al. Thermodynamic analysis of trough solar collector and simulation of dynamic characteristics of solar trough concentration system [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2024, 50(8): 1007-1026. DOI: [10.11936/bjtxb2022110006](https://doi.org/10.11936/bjtxb2022110006).
- [8] 段胜男, 马能亮, 陈香玉, 等. 基于光热的熔盐储热技术现状及发展趋势 [J]. *新疆石油天然气*, 2024, 20(2): 87-94. DOI: [10.12388/j.issn.1673-2677.2024.02.011](https://doi.org/10.12388/j.issn.1673-2677.2024.02.011).
DUAN S N, MA N L, CHEN X Y, et al. Status and development trend of molten salt thermal storage technology based on photothermal technology [J]. *Xinjiang oil & gas*, 2024, 20(2): 87-94. DOI: [10.12388/j.issn.1673-2677.2024.02.011](https://doi.org/10.12388/j.issn.1673-2677.2024.02.011).
- [9] 周玥, 周子健, 曹田田, 等. 基于光热发电的热化学储热体系研究现状与展望 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(12): 4818-4832. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.022](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.022).
ZHOU Y, ZHOU Z J, CAO T T, et al. Research progress and prospects in thermochemical energy storage systems based on solar thermal power generation [J]. *Journal of Central South University (science and technology edition)*, 2022, 53(12): 4818-4832. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.022](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.022).
- [10] 胡国武, 陈维铅. 太阳能光热发电技术及其发展现状研究 [J]. *甘肃科技纵横*, 2023, 52(11): 20-25. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6375.2023.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6375.2023.11.005).
HU G W, CHEN W Q. Research on concentrating solar power and its development status [J]. *Scientific & technical information of Gansu*, 2023, 52(11): 20-25. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6375.2023.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6375.2023.11.005).
- [11] 孙延威. 单罐熔盐储热系统数值模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2024.007144](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2024.007144).
- SUN Y W. Numerical simulation study of single-tank molten salt thermal storage system [D]. Changchun: Jilin University, 2024. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2024.007144](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2024.007144).
- [12] 梁甜, 糜又晚, 李清元, 等. 多场耦合作用下某槽式光热电站熔盐储罐基础温度分布与沉降变形 [J]. *建筑技术开发*, 2022, 49(5): 120-126. DOI: [10.3969/j.issn.1001-523X.2022.05.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-523X.2022.05.035).
LIANG T, MI Y W, LI Q Y, et al. Temperature distribution and settlement deformation of molten salt storage tank foundation of a trough type optical thermal power station under multi field coupling [J]. *Building technique development*, 2022, 49(5): 120-126. DOI: [10.3969/j.issn.1001-523X.2022.05.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-523X.2022.05.035).
- [13] 仇秋玲, 张艳梅, 饶万. 光热发电用熔盐及储盐材料腐蚀行为研究进展 [J]. *材料保护*, 2024, 57(3): 157-165. DOI: [10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0068](https://doi.org/10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0068).
QIU Q L, ZHANG Y M, RAO W. Research progress on corrosion behavior of molten salt and molten salt storage materials for solar photothermal power generation [J]. *Materials protection*, 2024, 57(3): 157-165. DOI: [10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0068](https://doi.org/10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0068).
- [14] 杨晓西, 丁静. 中高温蓄热技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
YANG X X, DING J. Medium and high temperature heat storage technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [15] 杨薛明, 陶嘉伟, 孟凡星, 等. $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$ 及其混合熔融盐储热材料热物性分子动力学研究 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(5): 48-58. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0019](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0019).
YANG X M, TAO J W, MENG F X, et al. Molecular dynamics study on thermophysical properties of $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$ and their mixed molten salt for heat storage [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(5): 48-58. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0019](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0019).
- [16] 孟凡星. 碳酸盐熔盐储热材料热物性模拟研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2021. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000612](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000612).
MENG F X. Simulation of the thermophysical properties of carbonate molten salts for thermal energy storage [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000612](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000612).
- [17] 罗婧. 光热电站中 316L 不锈钢在碳酸熔盐中的腐蚀及 FeAl 防护涂层研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000435](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000435).
LUO J. Studies on molten carbonate salt corrosion of SS316L and FeAl coating in concentrated solar power plants [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000435](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000435).
- [18] 崔吉祥. 氯化熔盐蓄热材料热物性模拟研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2021. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000311](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000311).
CUI J X. Simulation of the thermophysical properties of molten

- chloride salts for thermal energy storage [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000311](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000311).
- [19] 伍艳萍. 耐磨合金在高温氟化物熔盐中的腐蚀行为研究 [D]. 上海: 中国科学院大学 (中国科学院上海应用物理研究所), 2022.
- WU Y P. Study on corrosion behavior of wear resistant alloy in high temperature fluoride molten salt [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [20] 邹露璐, 吴玉庭, 马重芳. 低熔点四元混合硝酸盐的开发与实验研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 27-32. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2020.05.005](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2020.05.005).
- ZOU L L, WU Y T, MA C F. Experimental study of low melting point mixed nitrates [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(5): 27-32. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2020.05.005](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2020.05.005).
- [21] 王军涛, 徐芳, 韩海军. 三元体系 $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-Ca(NO}_3)_2$ 相图预测及其热力学研究 [J]. *太阳能学报*, 2016, 37(5): 1262-1269. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2016.05.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2016.05.026).
- WANG J T, XU F, HAN H J. Phase diagram prediction and thermodynamic properties of the ternary system $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-Ca(NO}_3)_2$ [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(5): 1262-1269. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2016.05.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2016.05.026).
- [22] 胡伟, 胡德浩, 宋捷, 等. 固体燃料熔融盐热转化研究进展 [J]. *电力科技与环保*, 2024, 40(4): 434-443. DOI: [10.19944/j.eptep.1674-8069.2024.04.012](https://doi.org/10.19944/j.eptep.1674-8069.2024.04.012).
- HU W, HU D H, SONG J, et al. The review on the solid fuel conversion by molten salt [J]. *Electric power environmental protection*, 2024, 40(4): 434-443. DOI: [10.19944/j.eptep.1674-8069.2024.04.012](https://doi.org/10.19944/j.eptep.1674-8069.2024.04.012).
- [23] 宋明. 多元氯化物熔盐体系的构建及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- SONG M. Construction and performance study of multi-chloride molten salts system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [24] 钟志强, 杨旺, 何建军. 三元氯化物熔盐制备及其传蓄热性能研究 [J]. *广东化工*, 2019, 46(3): 49-50, 21. DOI: [10.3969/j.issn.1007-1865.2019.03.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-1865.2019.03.021).
- ZHONG Z Q, YANG W, HE J J. Research on preparation and properties of ternary chloride molten salt [J]. *Guangdong chemical industry*, 2019, 46(3): 49-50, 21. DOI: [10.3969/j.issn.1007-1865.2019.03.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-1865.2019.03.021).
- [25] MUHAMMAD W N A W, MOHAMAD N A, TUKIMON M F. Characterization and heat transfer performance of quaternary nitrate based molten salts [J]. *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences*, 2022, 97(1): 35-46. DOI: [10.37934/arfm.97.1.3546](https://doi.org/10.37934/arfm.97.1.3546).
- [26] LI N, WANG Y, LIU Q, et al. Evaluation of thermal-physical properties of novel multicomponent molten nitrate salts for heat transfer and storage [J]. *Energies*, 2022, 15(18): 6591. DOI: [10.3390/en15186591](https://doi.org/10.3390/en15186591).
- [27] ALNAIMAT F, RASHID Y. Thermal energy storage in solar power plants: a review of the materials, associated limitations, and proposed solutions [J]. *Energies*, 2019, 12(21): 4164. DOI: [10.3390/en12214164](https://doi.org/10.3390/en12214164).
- [28] 张汇婷. 分布式小容量熔融盐储热装置模拟分析与实验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2021.002252](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2021.002252).
- ZHANG H T. Simulation analysis and experimental research of distributed small-capacity molten salt heat storage device [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2021.002252](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2021.002252).
- [29] 吴鸣, 梁国强. 储热技术在太阳能工程领域的应用研究 [J]. *节能与环保*, 2016 (11): 60-62. DOI: [10.3969/j.issn.1009-539X.2016.11.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-539X.2016.11.017).
- WU M, LIANG G Q. Research on the application of thermal storage technology in the field of solar energy engineering [J]. *Energy conservation and environmental protection*, 2016 (11): 60-62. DOI: [10.3969/j.issn.1009-539X.2016.11.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-539X.2016.11.017).
- [30] 左远志, 李熙亚. 熔融盐斜温层混合蓄热单罐系统及其实验研究 [J]. *化工进展*, 2007, 26(7): 1018-1022. DOI: [10.3321/j.issn:1000-6613.2007.07.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6613.2007.07.020).
- ZUO Y Z, LI X Y. Scheme and experiments of a molten-salt hybrid thermozone thermal storage system [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2007, 26(7): 1018-1022. DOI: [10.3321/j.issn:1000-6613.2007.07.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6613.2007.07.020).
- [31] 王小惠. 单罐斜温层储热特性数值模拟研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000225](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000225).
- WANG X H. Simulation research on the thermal energy storage performance of thermozone single tank [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000225](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000225).
- [32] 吴玉庭, 任楠, 马重芳. 熔融盐显热蓄热技术的研究与应用进展 [J]. *储能科学与技术*, 2013, 2(6): 586-592. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004).
- WU Y T, REN N, MA C F. Research and application of molten salts for sensible heat storage [J]. *Energy storage science and technology*, 2013, 2(6): 586-592. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004).
- [33] 汪琦, 俞红啸, 张慧芬. 熔盐和导热油蓄热储能技术在光热发电中的应用研究 [J]. *工业炉*, 2016, 38(3): 34-38, 48. DOI: [10.3969/j.issn.1001-6988.2016.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-6988.2016.03.009).
- WANG Q, YU H X, ZHANG H F. Application research of

- molten salt and heat conduction oil regenerative energy storage technology in solar-thermal power generation [J]. *Industrial furnace*, 2016, 38(3): 34-38, 48. DOI: [10.3969/j.issn.1001-6988.2016.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-6988.2016.03.009).
- [34] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟, 中国可再生能源学会太阳能热发电专业委员会. 中国太阳能热发电行业蓝皮书 2023 [R]. 北京: 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟, 中国可再生能源学会太阳能热发电专业委员会, 2024.
- China Solar Thermal Alliance, Solar Thermal Power Generation Committee of China Renewable Energy Society. Blue book 2023 of China's solar thermal power industry [R]. Beijing: China Solar Thermal Alliance, Solar Thermal Power Generation Committee of China Renewable Energy Society, 2024.
- [35] 白章, 郑博, 胡文鑫, 等. 太阳能模拟器聚光仿真及能流分布特性调控分析 [J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(12): 86-92. DOI: [10.16791/j.cnki.sjg.2022.12.014](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2022.12.014).
- BAI Z, ZHENG B, HU W X, et al. Optical simulation of solar simulator and regulate on analysis of energy flow distribution characteristics [J]. *Experimental technology and management*, 2022, 39(12): 86-92. DOI: [10.16791/j.cnki.sjg.2022.12.014](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2022.12.014).
- [36] SUKHATME S P. Solar thermal power generation [J]. *Proceedings of the Indian academy of sciences (chemical sciences)*, 1997, 109(6): 521-531. DOI: [10.1007/BF02869211](https://doi.org/10.1007/BF02869211).
- [37] 吴凯. 塔式熔盐光热发电技术原理及重点问题研究 [C]//中国电力技术市场协会. 2022 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集. 杭州: 中国电力技术市场协会, 2022: 1827-1830. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2022.044418](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.044418).
- WU K. Research on the technical principle and key problems of tower molten salt solar thermal power generation [C]//China Electricity Technology Market Association. 2022 power industry technical supervision work exchange meeting and professional technology forum. Hangzhou: China Electricity Technology Market Association, 2022: 1827-1830. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2022.044418](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.044418).
- [38] 李心, 许聚羚, 纪培栋, 等. 塔式光热电站集热场设计综述及经济性研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 51-59. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.008](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.008).
- LI X, XU C L, JI P D, et al. Review and economic research on solar field design of solar tower plants [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 51-59. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.008](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.008).
- [39] 王锐东, 马军, 王成龙, 等. 线性菲涅尔式聚光集热系统研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20210452. DOI: [10.3788/IRLA20210452](https://doi.org/10.3788/IRLA20210452).
- WANG R D, MA J, WANG C L, et al. Progress of linear Fresnel concentrator heat collection system [J]. *Infrared and laser engineering*, 2021, 50(11): 20210452. DOI: [10.3788/IRLA20210452](https://doi.org/10.3788/IRLA20210452).
- [40] MCVEIGH J C. Sun power: an introduction to the applications of solar energy [M]. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [41] MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology [J]. *Solar energy*, 2004, 76(1/3): 19-31. DOI: [10.1016/S0038-092X\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00102-6).
- [42] 张凡. 太阳能塔式光热电站定日镜光学面形测量研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
- ZHANG F. Research on optical surface shape measurement of heliostat in solar tower thermal power station [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023.
- [43] 刘兴文. 电力设备及新能源行业之光热发电专题报告 [R]. 东莞: 东莞证券, 2023.
- LIU X W. Special report on solar thermal power generation in the power equipment and new energy industry [R]. Dongguan: Dongguan Securities, 2023.
- [44] 电力圆桌项目课题组. 构建新型电力系统路径研究 [R]. 北京: 中国能源研究会, 2023.
- Power Sector Roundtable. Pathways for the construction of a new power system [R]. Beijing: China Energy Research Society, 2023.
- [45] International Renewable Energy Agency. Renewable energy generation costs in 2022 [R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023.
- [46] 水电水利规划设计总院. 中国可再生能源工程造价管理报告 2023 年度 [R]. 北京: 水电水利规划设计总院, 2024.
- China Renewable Energy Engineering Institute. China renewable energy engineering cost management report 2023 [R]. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2024.
- [47] 清华大学碳中和研究院. 中国碳中和目标下的风光技术展望 [R]. 北京: 清华大学碳中和研究院, 2024.
- Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University. Technology outlook on wind and solar power toward China's carbon neutrality goal [R]. Beijing: Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, 2024.

作者简介:



慈俊昌

慈俊昌 (通信作者)

1991, 男, 工程师, 主要从事新兴产业研究 (e-mail) 791649289@qq.com。

(编辑 叶筠英)