

光热发电技术在可再生能源领域的发展趋势与挑战

卢乃兵

中广核太阳能德令哈有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16843

[摘要] 本文针对光热发电技术在可再生能源领域的发展趋势与挑战进行了深入探讨。首先,概述了光热发电技术的基础原理和现有技术现状。接下来,分析了光热发电在我国和国外的实际应用情况,结合具体案例,阐述了其在全球范围内的应用现状及发展潜力。文章进一步比较了光热发电技术的技术优势,如高效能、长寿命等,同时也详细探讨了其在成本、技术成熟度和政策支持等方面面临的挑战。最后,本文对光热发电技术的发展前景进行了总结,并提出了相关建议,以期为未来研究和实际应用提供参考。

[关键词] 光热发电; 可再生能源; 技术优势; 应用现状; 挑战

中图分类号: TM62 **文献标识码:** A

Development Trend and Challenges of Solar Thermal Power Generation Technology in the Field of Renewable Energy

Naibing Lu

CGN Solar Delingha Co., Ltd.

[Abstract] This article conducts an in-depth discussion on the development trends and challenges of solar thermal power generation technology in the field of renewable energy. First, it provides an overview of the fundamental principles of solar thermal power generation technology and the current state of existing technologies. Next, it analyzes the practical applications of solar thermal power generation both in China and abroad, illustrating the global application status and development potential with specific case studies. The article further compares the technological advantages of solar thermal power generation, such as high efficiency and long lifespan, while also examining the challenges it faces in terms of cost, technological maturity, and policy support. Finally, this paper summarizes the future prospects of solar thermal power generation technology and offers relevant suggestions, aiming to provide a reference for future research and practical applications.

[Key words] Solar Thermal Power Generation; Renewable Energy; Technical Advantages; Current Application Status; Challenges

引言

光热发电技术作为将太阳辐射能高效转化为电能的关键路径,在全球能源结构转型与可再生能源加速发展的背景下持续实现技术突破与规模化应用。根据国际可再生能源署(IRENA)的最新统计数据,截至2025年,全球光热发电累计装机容量已突破8,500兆瓦,较2022年显著增长。美国、西班牙和中国继续保持市场主导地位,其中中国在第二批大型光热发电基地建设的推动下实现装机容量快速提升,沙特等中东国家也在积极推进光热项目以支撑其能源转型战略。

光热发电技术主要包括集中太阳能发电(CSP)和光伏-光热协同系统(PV-Thermal Hybrid Systems)。CSP系统通过镜场聚

集太阳光至接收器,将光能转化为热能,并借助热力循环(如蒸汽涡轮)发电,同时可通过储热系统实现连续稳定供电;而光伏-光热协同系统则同时实现光伏发电和光热利用,提升整体能源效率,但其光热部分通常更侧重于热利用而非发电,因此在严格意义上较少被归类为“光热发电”。

CSP技术在发展中面临多项挑战,主要包括初始投资高、土地需求大及运营维护复杂等问题。以CSP系统为例,其资本成本普遍在4500至7000美元每千瓦,系统效率一般在15%-25%之间,而不同类型的CSP技术,如槽式、塔式和线性菲涅尔式各有其优劣。槽式系统具有较高的有效能量储存能力,方便在夜间或阴天条件下继续供电,其储热介质如熔盐可实现高达370度的工作温

度。而塔式系统由于可实现更高的光线聚焦度,理论效率可达31%,在长时间储能方面表现优异。

此外,技术创新也在不断推动光热发电的进步。近年来,新的材料和组件如高温耐热的选择性涂层和改良型太阳能集热器被广泛研发,以提升光热转换效率和耐用性。开发智能控制系统,能够优化光追踪和热能管理,预计可提高系统整体能量利用率,对比传统方法可提升10%-15%。另一方面,光热发电的生态效益也日益显现。通过减少化石燃料的依赖,降低二氧化碳排放,在一些干旱地区,CSP还能够提供更多的水资源,通过热蒸馏技术实现海水淡化。

然而,尽管光热发电的前景广阔,其市场竞争力仍需增强。面对不断下降的光伏发电成本,光热发电亟需借助技术进步和政策支持,优化其成本结构,才能在未来的能量市场中占据一席之地。

光热发电技术的发展需要战略性规划,必须综合考虑资源、技术、经济效益及环境影响等多重因素。通过政策引导、科研投入与市场机制的整体协作,光热发电在全球能源转型中必将发挥更加重要的作用。

1 光热发电技术概述

1.1 基础原理

光热发电(CSP)是利用集中太阳光能转化为热能,进而驱动发电设备的一种可再生能源技术。其基本原理包括太阳辐射的收集、热能存储、热能转换与电力输出四个主要步骤。

在太阳辐射的收集阶段,CSP系统一般采用四种主要技术:槽式系统、塔式系统、线性菲涅尔式和碟式系统。其中,槽式系统通过长直的抛物线形反射镜将太阳光聚焦到集热管上加热管中的热载体,塔式系统采用一组平面镜将太阳光聚焦到顶部的吸热器,加热传热介质;线性菲涅尔式使用一系列近似平面的镜片阵列模拟抛物槽式的聚光效果,将阳光聚焦到线性接收器上。碟式系统采用圆形的反射镜集中太阳光到一个小型的发电机上。这些系统的集热效率通常在70%-90%之间,取决于系统的设计、材料及环境条件。

热能的存储部分通常使用熔盐储热系统,其热容量高、储热效率高,常见配比是60%钠硝酸盐和40%钾硝酸盐,熔盐能在290°C至565°C的温度范围内有效工作,能实现8小时或更长时间的热能储存,显著提高系统的调度能力。

在热能转换阶段,CSP系统通过热交换器将蓄热的热载体加热,转换为高温高压蒸汽。高温蒸汽驱动蒸汽涡轮发动机,发电机则将机械能转化为电能。该过程的热效率通常在30%-45%之间,受蒸汽温度和压力的影响,最佳工作条件下效率可达到42%。

CSP的电力输出一般依赖于选定的发电设备,常用的发电设备为蒸汽涡轮系统。同时,为提高发电的稳定性和灵活性,许多CSP项目引入了与天然气电站的联合运行机制。此类系统可实现基荷电源与调峰电源的灵活切换,适应电力需求波动。

CSP领域的进一步发展面临多种挑战。首先,建造成本偏高,一般单位功率成本为3,000-7,000美元/kW;其次,受太阳能资源

分布和气候变化影响,发电的间歇性和不稳定性问题亟待解决;最后,针对设备老化和能效下降问题,优化管理维护及技术创新仍是关键。此外,环保政策、财政补贴等外部因素也会对CSP项目的经济性产生影响。

综合来看,光热发电技术的核心原理涉及多种高效的热能获取与转化方法,尽管在实施过程中面临着资金、技术及政策等方面的多重挑战,依然展示出强大的可再生能源潜力。

1.2 技术现状

光热发电技术(CSP)近年来在全球范围内持续取得显著进展,多种技术路线在效率提升、成本控制与系统集成方面实现了重要突破。目前主流的光热发电技术主要包括槽式、塔式、碟式和线性菲涅尔式四种路径。

槽式系统通过长条形抛物面镜将阳光聚焦于集热管,常用导热油或熔盐作为传热介质,工作温度可达400°C以上,系统效率维持在15%-20%。

塔式技术借助定日镜场将太阳辐射集中到中央接收器,普遍采用熔盐储热,工作温度可达565°C以上,储热效率超过90%,典型项目如美国的Ivanpah和摩洛哥的Noor Energy。

线性菲涅尔式系统使用一系列近似平面的镜片阵列模拟抛物槽式的聚光效果,将阳光聚焦到线性接收器上。该技术可采用水/蒸汽或熔盐作为传热介质,工作温度通常在250-550°C之间。相比槽式系统,LFR具有结构简单、成本较低、土地利用率高等优势,尤其适合中低温发电应用,代表性项目如敦煌大成光伏电站、印度的Godawari太阳能项目和澳大利亚的Novatec Solar电站。

碟式系统则借助抛物碟镜将光能集中至斯特林发动机进行热电转换,最高效率可达30%,适用于分布式或离网场景。

截至2025年,全球光热发电累计装机容量已突破9.5GW,主要装机国家包括中国、美国、西班牙、南非和阿联酋等。美国Grewell光热电站仍为全球最大运行中的CSP项目之一,装机达392MW,年发电量约280GWh;西班牙Andasol项目持续稳定运行,年发电能力保持在540GWh。中国在青海、甘肃等地推进多个百兆瓦级光热基地建设,部分项目已投入商运,带动亚太地区装机快速增长。

在技术成本方面,CSP单位投资成本持续下降。根据国际可再生能源机构(IRENA)2025年报告,全球光热发电项目的平均初始投资成本已降至约4800美元/千瓦,较2022年进一步下降约11%。效率提升得益于高性能聚光材料、智能化跟踪控制策略以及更高运行温度的设计,同时储热系统的灵活性与经济性也显著增强,助力光热发电在能源结构调整和电网稳定性中扮演更关键角色。

在光热发电的应用场景中,融入了储能和辅助系统的设计可大大提升其灵活性和调节能力。现有技术中,熔盐储能解决方案已广泛应用,能够有效应对电力需求的波动。在大型项目中,熔盐系统可实现8小时以上的持续发电,提升了发电的可靠性。

尽管光热发电技术进展迅速,仍存在多项挑战,包括与光伏发电的竞争,加之对土地利用和水资源的要求高。CSP技术普遍需要在日照条件优越的地区进行布局,从而限制了其在某些区域的大规模部署。同时,尽管当前技术已可实现有效的储能,但在长时间的能量释放和突发电力需求的适应性方面仍需进一步改善。

环境方面,光热发电的水资源消耗问题日益受到关注,蒸发冷却系统可能导致大量水资源的浪费,研究者们正在探讨干Cooling技术和非接触散热材料等新方法,以寻求减轻对水资源的依赖。此外,CSP技术的碳足迹相较于化石能源依然占据优势,逐步促进可再生能源体系的实现。

整体来看,光热发电技术正经历快速演进和应用多样化的过程,以更具竞争力的姿态迎接市场挑战。在可再生能源构架的落实中,光热发电的地位将愈加重要,如何解决现存问题将决定其未来的市场前景。

2 光热发电技术应用现状及发展潜力

2.1 在我国的应用

我国光热发电应用集中于高光照地区,形成西北戈壁高原为核心、西南协同发展格局。截至2025年9月,累计装机突破1.2吉瓦(占全球18%,较2020年翻倍),技术路线呈“塔式主导、多技术协同”,塔式占比40%、槽式降至35%、线性菲涅尔式达25%。

后期规划代表性项目凸显规模化与高参数化:青海格尔木、德令哈350MW塔式项目配14小时熔盐储热,年供电约10亿度;新疆哈密1500兆瓦“光热储”一体化项目国产化率超99%,为全球单期最大;甘肃敦煌100MW线性菲涅尔项目、西藏安多100MW塔式项目、三峡能源青豫直流二期100兆瓦工程等稳步推进,传统槽式电站经升级持续发挥基荷作用。

政策形成多层次体系:国家层面《能源法》将其纳入法律保障,配额按1.5倍折算,增值税即征即退50%延至2030年,“十四五”规划年均新增300万千瓦,支持青海打造“中国光热之都”;地方层面甘肃、青海等出台差异化目标与电价政策。市场化机制突破,光热纳入绿证交易体系,与CCER双轨衔接,碳交易价格突破80元/吨。

技术研发多维度突破:吸热材料领域 Ti_2AlSnC MAX相纳米纤维膜宽光谱吸收率超90%,解决盐结晶难题;储热技术上第四代混合盐储热温度超600°C,热损率降22%,系统成本较2020年降35%。当前面临初始投资高(约8000元/千瓦)、储热效率待提升等挑战,正通过技术创新、电网协同等推动成本下降与商业化应用,双碳背景下迎来增长机遇。

2.2 在国外的应用

光热发电技术国外应用已进入“技术深化+场景融合”新阶段,美国、西班牙、德国、南非等国引领发展。截至2025年9月,四国累计装机突破5800兆瓦(较2020年增45%),塔式技术占比52%,储热时长普遍超10小时,多能互补成主流方向。

美国在项目升级与技术验证上双重突破:阿尔莫哈达电站完成储热改造,储热时长延至9小时,年发电量120万兆瓦时,新

增绿氢产能并接入电网灵活调度;150MW超临界 CO_2 塔式项目将于2025年底内华达州投运,发电效率提升25%,度电成本降至0.06美元。

西班牙巩固欧洲领导者地位,累计装机3500兆瓦(占欧洲78%)。安达卢西亚150MW塔式电站采用700°C超临界 CO_2 循环,配16小时储热,年利用小时数超5000小时;启动3个光热制氢项目,含与摩洛哥合作的200MW跨境电站(2026年投产,年减排80万吨 CO_2)。2025年更新补贴机制,对储热超12小时项目给予0.08欧元/千瓦时补贴。

德国聚焦场景化创新,累计装机约250MW:Görlitz电站低辐照下转换效率高,探索光热-光伏混合模式;柏林智能社区项目实现光热与建筑光伏一体化,年发电1.2万兆瓦时,建筑能耗降40%;“光热+地热”系统试点实现72小时连续供能。政策上将其纳入工业脱碳补贴,工业园区项目享30%投资补贴。

非洲方面,摩洛哥Noor Ouarzazate电站(580MW)为全球大型光热项目标杆,储热支持12小时不间断供电;南非Redstone项目(100MW,12小时储热)2025年二季度商运,采用“光热+矿业脱碳”模式,年减排35万吨 CO_2 。南非通过REIPPPP计划新增2个合计300MW项目,推动产业规模化。

全球技术创新聚焦超临界 CO_2 循环(理论热效率超50%);在经济性提升上探索光热与农业、水利结合模式;融资采用PPP模式吸引私营资本;国际技术合作与知识共享日益增多,推动光热发电向更广领域应用。

3 光热发电技术的优势、挑战及其发展趋势

3.1 技术优势

为了系统地分析光热发电技术的优势和挑战,我们从几个关键方面展开探讨。光热发电技术在可再生能源领域具有显著优势,其核心在于集热器的高效率。基于集热器效率公式 $\eta = \frac{Q_u}{A_c G_t}$ (其中 η 为集热器效率, Q_u 为有用热量, A_c 为集热面积, G_t 为总太阳辐射量),我们可以定量分析影响集热器性能的各个因素。

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_t}$$

集热器效率公式

首先,对于集热器的设计和材料选择,光热发电系统普遍采用高反射率和低辐射率的材料,如银镀膜、氧化钛等,来最大化太阳能的收集和转化效率。集热器材料的选择直接影响光热发电系统的整体效率,先进的材料可以显著提高集热效率,减少热损失。

另一方面,为了进一步提高系统效率,光热发电技术还利用了高效热能存储系统。常见的热能存储介质包括熔盐、固体颗粒等,这些介质具有高比热容和稳定的化学性质,确保能量在高温条件下能稳定存储和释放。例如,熔盐储热系统能够在数小时内达到热平衡,并在温度波动范围内保持高效能量转换。

光热发电系统的模块化设计和灵活配置也是其一大优势。这种设计允许系统根据地理条件、气候特征与需求灵活调整,优化能量收集和利用率。模块化设计还简化了设备的维护和升级,使得技术应用更加经济高效。

然而,尽管光热发电技术具有诸多优势,其挑战也不容忽视。技术安装成本是一个关键挑战。虽然从长远来看,光热发电具有成本效益,但前期投资昂贵,限制了其大规模推广。此外,技术对天气条件依赖程度较高,云层覆盖、灰尘污染等都会显著影响系统的运行效率和稳定性。

未来,光热发电技术的发展需要继续优化材料性能,降低制造和维护成本,并改进蓄热技术以应对波动性能源供应带来的挑战。据统计,随着技术进步和规模效应逐渐显现,可再生能源发电技术的成本正在显著下降。未来几十年内,光热发电的经济竞争力将逐步增强,可再生能源发电技术的成本变化趋势将进一步凸显其优势。

综上所述,在综合考虑光热发电技术的优势与挑战后,可以发现其在未来能源结构中的重要地位与巨大发展潜力。通过不断的技术创新和应用优化,光热发电将为实现可持续能源发展目标做出重要贡献。

3. 面临的挑战

光热发电技术作为可再生能源发展的重要组成部分,在提升能源效率和减少碳排放方面具有显著优势。然而,光热发电技术在实际应用中仍面临诸多挑战。首先,光热发电系统的初始投资成本相对较高,尤其是在大规模电站建设时,高额的设备与材料成本成为了主要障碍。其次,目前光热发电技术的转换效率亟需提高,热能在转化为电能的过程中存在能量损失,直接影响了整体系统的经济效益和市场竞争能力。此外,由于自然资源分布不均和气候条件的限制,光热发电的稳定性和持续性受到一定程度的影响,从而限制了其在更多地区的普及应用。

为了克服这些挑战,研究者们正在探索多种解决方案。其中,通过材料科技的进步,如开发高效的吸热材料和储热系统,能够有效降低热能损失,显著提升转换效率。一些前沿的研究表明,新型纳米材料在提高吸收率和耐高温性能方面展示出巨大潜力。在技术方面,模块化设计和标准化施工被广泛应用,以降低建设成本并缩短施工周期。同时,人工智能和大数据分析被引入到光热发电的控制系统中,通过智能优化算法来提高运行效率和系统稳定性。

政策支持也在一定程度上推动了光热发电技术的发展。政府出台了包括财政补贴、税收减免和价格支持等多项措施,旨在降低企业和消费者的使用门槛,鼓励更多资源投入到光热发电的研发和应用中。最新统计数据显示,截至2024年,可再生能源技术将实现显著增长(见下图1)。尽管如此,这一技术仍需不断克服技术瓶颈和市场障碍,以实现其在能源结构中的重要地位。

光热发电技术在未来的发展路径必须依赖于多方协同努力,包括技术创新、政策支持和市场推广等方面的综合作用。这不

仅涉及对现有系统的优化和改进,更需要构建完善的产业链条和技术支持体系,从而在全球能源转型过程中发挥更大的作用。通过持续的研发投入和市场推广,光热发电技术有望在未来能源版图中占据重要一席,并为实现低碳环保的目标贡献力量。



图1 2018年至2025年可再生能源累计装机容量及增速

4 结论与展望

光热发电(CSP)处于可再生能源关键转型期。据IRENA 2025年8月报告,2024年全球可再生能源总装机4443GW,光热发电虽增速放缓但技术迭代深化,截至2025年9月累计装机约22.8GW,2022-2025年复合年增长率5.2%,发展受光伏竞争与核心技术突破、储热升级及高辐照地区规模化应用共同影响。

技术创新推动能效提升:槽式电站热效率超47%,光热转换效率较2022年提升4个百分点;塔式系统实用温度破650°C,超临界CO₂循环商业化应用使发电效率较传统蒸汽循环提升20%-25%。储热时长成核心指标,主流塔式项目储热12-16小时,部分标杆项目达18小时,电网调峰能力显著增强。

成本下降驱动产业发展:全球加权平均度电成本(LCOE)较2010年降77%,2024年达0.092美元/kWh,中、南非等高辐照地区部分大型项目破0.08美元/kWh。“光热+绿氢”“光热+工业供热”等多能互补模式兴起,推动其向综合能源服务转型。

储热呈“熔盐主导、多技术协同”格局:主流塔式项目储热12-16小时,部分达18小时;塔式9小时储热系统投资约2亿人民币,显著低于槽式(约5亿)。2025年塔式LCOE降至9美分/千瓦时,槽式11美分,较2015年降超40%。

项目向高参数集成化发展:西班牙Gemasolar电站2025年可用率超98%,年等效发电小时数2600小时;安达卢西亚150MW超临界CO₂塔式项目突破效率瓶颈。同时面临投资高、光伏竞争、政策依赖等挑战,相变材料(热导率提20%)、纳米流体(热导率提50%)等技术创新显前景。

未来趋向智能化数字化,借助大数据、AI及物联网优化运维,预计2030年全球市场份额有望升至25%。需重视环境影响,国际合作与技术交流将为其发展提供广阔空间,有望在全球能源转型中占核心地位。

[参考文献]

[1]黎建锋,牛安勇.太阳能光热发电技术应用环节存在的问题及改进[J].低碳世界,2021(3):62-63,143.

[2]胡叶广,张成,周超英,等.太阳能光热发电的集热技术现状及前景分析[J].科学技术与工程,2021,21(9):3421-3427.

[3]李红亮.太阳能发电技术及其发展趋势和展望[J].商品与质量,2021(5):216.

[4]于影.太阳能发电技术及其发展趋势和展望[J].百科论坛电子杂志,2019(6):508.

[5]任峰.光热发电技术经济现状及光热电站建设探讨[J].中国市场,2021(12):23-25.

[6]黄敏楷.太阳能光伏发电技术及其应用研究[J].魅力中

国,2016(52):350.

[7]姜浩浩,金光,郭少朋.浅谈太阳能光伏发电技术现状[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2021,21(10):83-87.

[8]王明菊,王辉.太阳能光伏发电技术现状与发展探讨[J].能源与节能,2021(7):37-38,49.

[9]解民,郑江伟.太阳能光热发电的技术特点与应用研究[J].电力系统装备,2020(5):54-55.

[10]孔令刚,陈鑫龙,张志勇,等.线性菲涅尔式光热发电技术现状及发展趋势[J].兰州交通大学学报,2020,39(6):51-57.

作者简介:

卢乃兵(1975--),男,汉族,甘肃天水人,自动化工程师,主要研究方向为太阳能热发电技术与应用、自动化控制等领域。