

中国西北环境下的塔式太阳能发电站 聚光集热性能提升研究进展

李梦杰^{1,2}, 何雅玲^{1,2}, 杜燊²

(1. 西安交通大学国家储能技术产教融合创新平台(中心), 710049, 西安;
2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 塔式光热发电是推动我国能源结构清洁转型的重要技术之一,尤其在太阳能资源富集的西北地区具备大规模应用的潜力。然而,该地区特有的频繁云遮、强风及沙尘等复杂气象条件,制约了光热电站聚光集热过程的效率与运行稳定性。聚焦西北特殊环境下塔式光热电站的聚光集热特性,系统综述了云、风、沙 3 大因素的影响机理与性能的提升策略。首先,针对云遮,分析了瞬态能流引发的热冲击与效率损失问题,总结了基于人工智能的实时瞄准策略和熔盐流量协同控制方法;其次,面对大风,阐述了风致定日镜型面与跟踪误差的成因,并探讨了风场对吸热器对流损失及启动过程的影响与抑制技术;再次,对于沙尘,分析了镜面积灰对反射率的衰减机制,归纳了定日镜积灰防控与智能清洗策略等性能提升技术;最后,展望了融合气象预测与人工智能的自适应调控、全场风载实时监测、高效抑尘与智能运维等未来重点发展方向,以期为增强塔式光热电站在我国西北地区的环境适应性提供理论参考与工程指导。

关键词: 塔式光热发电;云遮;强风;沙尘;聚光集热特性

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604007 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0084-15

Optical-Thermal Performance Enhancement of Solar Power Towers in the Northwest China Environment: A Review

LI Mengjie^{1,2}, HE Yaling^{1,2}, DU Shen²

(1. National Innovation Platform (Center) for Industry-Education Integration of Energy Storage Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Solar power tower technology is one of the key technologies driving the clean transformation of China's energy structure, with great potential for large-scale deployment in the solar-rich northwestern regions. However, the region's unique complex meteorological conditions—such as frequent cloud shading, strong wind, and dust events—constrain the efficiency and operational stability of the concentrating and heat collection processes in solar power tower plants. Focusing on the optical-thermal characteristics of solar power tower systems in the special environment of northwestern China, this review systematically examines the impact mechanisms and performance improvement strategies related to three major factors: clouds, wind, and dust. First, with regard to cloud

shading, the issues of thermal shock and efficiency loss caused by transient flux are analyzed, and real-time aiming strategies based on artificial intelligence as well as coordinated molten-salt flow control methods are summarized. Second, for strong winds, the mechanisms behind wind-induced slope and tracking errors of heliostats are clarified, and the influence of wind fields on receiver convective heat loss and start-up performance, along with suppression techniques, are discussed. Third, regarding dust events, the mechanism of reflectivity attenuation due to dust accumulation on mirror surfaces is analyzed, and performance-improvement technologies such as dust prevention and intelligent cleaning strategies for heliostats are reviewed. Finally, future key research directions are outlined, including adaptive control integrating meteorological forecasting and artificial intelligence, real-time monitoring of wind loads across entire heliostat fields, and efficient dust suppression combined with intelligent operation and maintenance. This work is intended to provide theoretical reference and engineering guidance for enhancing the environmental adaptability and operational economy of solar power tower plants in the northwestern region of China.

Keywords: solar power tower technology; cloud cover; strong wind; dust event; optical-thermal performance

可再生能源的大规模高效利用是实现碳达峰、碳中和的重要途径,也对降低我国能源对外依存度、提升能源供应安全性具有战略意义。太阳能作为资源丰富、清洁可靠的可再生能源,其发电过程无废气废物排放,可实现源头低碳化,是理想的能源替代方式之一。

太阳能发电的技术路径主要包括光伏发电和光热发电。光伏发电是基于半导体材料的光生伏特效应,将光能直接转化为电能。我国已成为全球最大的光伏组件生产国,有力推动了光伏发电成本的下降。光热发电则是通过聚光集热系统收集太阳辐射热,通过加热传热工质(如水、导热油或熔盐等工质),进而驱动发电系统^[1]。当前,光热电站普遍配置储热系统,以缓解太阳辐射间歇性和不稳定性带来的供需不匹配问题。这种储能型光热电站调峰能力强,且采用安全性高、经济性好的储热技术来存储能量,有助于提升高比例可再生能源电力系统的运行可靠性,应用前景广阔。

根据聚光器型式不同,光热电站可分为槽式、线性菲涅尔式、碟式和塔式4种系统。由于塔式光热发电(SPT)相比其他型式有望在更低成本下实现高效率、大规模的太阳能发电,是目前光热发电的主流发展方向之一^[2]。截至2024年底,我国已建成光热电站19座(塔式10座),总装机容量逾800 MW;在建34座(塔式22座),装机容量为3 300 MW^[3]。受太阳能资源、土地条件及政策支持等多因素影响,我国光热电站主要集中在西北地区。2024年规划建设37个项目,分布在甘肃(3个)、青海(7个)、新

疆(4个)、西藏(13个)、内蒙(9个)、四川(1个)等地区^[3]。

我国西北地区独特的复杂气象条件,如频繁云遮、大风及沙尘,对塔式光热电站的聚光集热过程构成了多方面的挑战,制约了其运行效率与稳定性。为应对这些挑战,本文聚焦于西北特殊环境下塔式光热电站的聚光集热特性与性能提升路径。在阐明系统技术原理的基础上,将深入剖析云遮、大风与沙尘三大环境因素对系统动态特性、运行安全及效率的影响机理,并系统总结与分析相应的性能优化策略,以期提升电站的环境适应性与运行经济性提供理论支撑与可行的工程指导。

1 技术原理

图1为塔式光热发电站典型系统示意图,该系统遵循光-热-电的能量转换路径,其核心子系统包括聚光集热、储换热及动力循环。①在聚光集热过程中,通过大量定日镜追踪太阳,将阳光反射并汇聚至吸热塔顶部的吸热器。吸热器内的传热介质通常为二元硝酸熔盐(质量分数为60%的 NaNO_3 与质量分数为40%的 KNO_3 二元共晶盐),熔盐吸收热量后温度上升至 $560\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。②在储换热过程中,熔盐同时作为传热与储热介质,工作温度范围通常介于 $290\text{ }^\circ\text{C}$ (冷态)至 $565\text{ }^\circ\text{C}$ (热态)之间。受热后的高温熔盐流入高温储热罐储存热能。储热单元实现了集热与发电过程的解耦,使电站在无日照时仍可持续发电。③在动力循环发电过程中,高温熔盐被泵入蒸汽发生器,并与水换热,产生超过 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 的高

温高压蒸汽。蒸汽驱动汽轮发电机组,将热能转化为机械能,再转为电能。放热后的低温熔盐返回低温储罐,随后重新泵入吸热器加热,形成闭环循环。

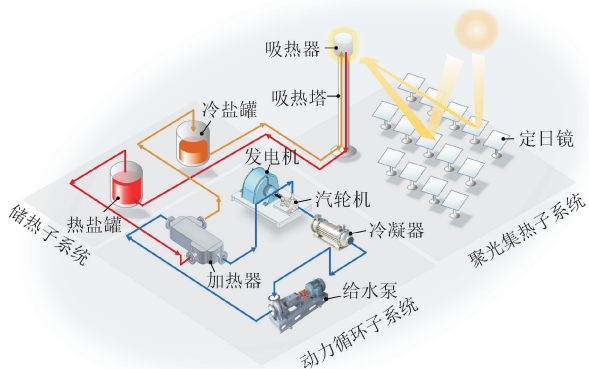


图 1 塔式光热电站典型系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical solar power tower plant

在我国西北地区,塔式光热电站在实际运行中面临复杂多变的气象条件挑战,主要体现在频繁云遮、大风及沙尘 3 个方面。

(1) 云层瞬态遮挡导致太阳辐射强度剧烈波动,能流变化迫使系统需通过调节工质流量以维持温度稳定。然而,受限于系统的热惯性,响应滞后会导致运行频繁偏离最优工况,降低光热转换效率。同时,瞬态热冲击易引发吸热器局部过热,形成超设计值的温度梯度与热应力,影响吸热器的安全与寿命。

(2) 大风环境导致定日镜镜面变形与跟踪偏转,使反射光线偏离瞄准点,定日镜聚光精度低。此外,大风增强了吸热器表面对流损失,迎风面与背风面的散热差异会使吸热器启动过程预热不均,延长了启动时间,降低运行效率。

(3) 沙尘通过沉降在定日镜表面形成积灰,降低了反射率,且漫反射与吸收作用会导致汇聚的光能显著减少。此外,沙尘气溶胶削弱了太阳辐射传输,并可能在吸热器表面沉积,进一步影响系统效率。

综上所述,西北环境条件通过复杂的气象与聚光集热物理过程的耦合作用,影响了塔式光热电站的聚光稳定性、集热效率及长期可靠性。下面将分别从云遮、大风与沙尘 3 个方面,对塔式光热电站的聚光集热特性及性能提升途径进行分析与总结。

2 云遮对 SPT 聚光集热性能的影响

云遮本质上是太阳辐照在时空上的高频、非均匀变化。当云团快速掠过定日镜场上空时,太阳能法向直接辐照度(DNI)会呈现陡升和陡降的变化特

征。这种瞬变云遮所引发的高通量、非稳态能流冲击,不仅限制了系统的光热转换效率,还直接影响吸热器的安全性和寿命。

一方面,DNI 的高频波动会显著降低光热转换效率。在聚光太阳能(CSP)电站运行中,为维持吸热器出口工质温度的稳定,需频繁调节工质流量以响应辐照变化。然而,由于传热系统存在热惯性,流量调节往往滞后于辐照的瞬时变化,会导致系统难以持续运行于最优工况。这种频繁的偏离设计状态会显著降低全天平均效率。另一方面,吸热管表面受到非均匀、瞬态的热冲击,会影响其安全性。例如,若云层移开后未及时调整镜场瞄准策略,能量的瞬间集中会导致吸热器局部温度急剧上升,产生远超设计值的过热区,降低管材机械性能,增加烧穿和变形的风险。此外,径向和轴向的剧烈温度梯度会引发较大的循环热应力,此类交变应力易在焊缝、弯管等结构不连续处形成应力集中,从而缩短吸热器的使用寿命^[4]。

为了有效缓解云遮现象对于聚光集热系统的冲击与损害,在聚光过程层面,需要快速调整定日镜场的瞄准策略从而在源头上主动平抑均化吸热器表面的热流瞬变;在集热过程层面,则需要深入揭示吸热器及传热工质在动态能流边界条件下的光-热-力耦合响应特性,并制定高效的吸热器运行调控策略。

2.1 云遮对聚光过程的影响

在实际运行中,定日镜场需要准确、灵活的响应策略来应对云层的遮挡。为此,镜场控制系统必须进行快速准确的聚光分析,以便在高效预测吸热器表面热流分布的基础上,快速优化瞄准策略。

目前,传统的聚光系统光学分析方法难以实现瞄准策略的快速调控,例如 Flesch 等^[5]提出了一种耦合吸热器热力学模型、光学仿真模型与蚁群优化算法的瞄准策略,获得了超过 2% 的吸热器效率改进,但其优化过程需要大约 15 min。为了降低光学分析方法和瞄准策略优化方法的计算时间成本,现有研究主要集中于 2 条技术路线:一是通过基于物理模型的优化算法与先进控制方法对瞄准策略进行实时调控;二是通过人工智能技术实现瞄准策略的快速优化与吸热器热流密度的实时预测。

基于物理模型的优化算法与控制方法是实时调控瞄准策略的有效手段,例如, Ashley 等^[6]提出了一种瞄准策略优化方法,将不确定的云遮工况定义为一组带概率的离散情景,将最小化溢出损失作为优化目标,用于生成潜在云遮工况下的最优瞄准方案。García 等^[7]研究了模型预测控制策略在云遮条

件下的动态性能,并基于 DNI 扰动提出了一种新型瞄准策略,研究表明:基础控制器在云遮后复照时会因过度补偿而产生危险的热流超限,而新型策略通过在云遮期间临时下调吸热器允许的热流密度设定值,并启用 PI 控制器作为辅助调整,可有效降低由 DNI 波动引起的热流密度峰值。Soo 等^[8]基于动态矩阵控制方法,提出了一种以吸热器安全为目标的闭环瞄准策略。该策略以热应力与材料腐蚀约束下的管壁温度作为反馈信号与被控变量,通过调整镜组的离散度和中心瞄准点来响应云遮,缓解云后复照时的温度超限。Oberkirsch 等^[9-11]开发了一套闭环瞄准点优化系统,该系统基于 GPU 加速蚁群优化算法寻找最优瞄准策略,其优化时间缩短至 1 分钟以内。在此基础上,利用实测热流密度与目标的偏差,动态生成权重并嵌入优化算法的目标函数,从而引导瞄准点再分配以补偿模型误差与外部云层扰动造成的偏差。该技术在德国 Jülich 太阳能光热电站成功通过实验验证,并将直接测量的热流图作为反馈,实现了高精度的温度控制。Wang 等^[12]提出了一种用于实现定日镜瞄准策略实时调整的改进粒子群优化算法,该方法利用前一时刻的最优策略作为初始解,并根据定日镜是否被遮挡及其相邻定日镜状态进行动态调整,提升了算法的收敛速度与鲁棒性,研究表明:该方法在云遮工况下可将优化时间缩短至 12 s,吸热器截断效率提升约 16%。

随着人工智能在处理复杂高维问题中所展现出的优势,众多学者开始借助机器学习技术来实现吸热器表面能流分布的快速预测与定日镜瞄准策略的准确调控。例如,Kuhl 等^[13]开发了一种生成式人工智能框架,利用生成对抗网络变体 StyleGAN 架构,以太阳位置向量和单面定日镜属性向量为输入,预测太阳位置变化下该定日镜在吸热器表面产生的能流分布,研究表明:吸热器能流密度预测准确率可达到 90%。Wu 等^[14]开发了一种基于机器学习的理想定日镜场最优瞄准策略的实时生成方法,通过训练神经网络获得云遮图像到最优瞄准策略的映射关系。Zeng 等^[15]采用强化学习框架,通过离线训练指针网络,获得电站工况与最优瞄准策略的高维映射关系。Carballo 等^[16]采用了先进的 Soft Actor-Critic 算法实现了连续空间的瞄准点实时优化。与选择离散预设点的方法不同,该模型直接输出瞄准点坐标的增量,结果表明:该方法比传统固定多点策略提升了超过 8.8% 的年吸热功率。

由此可见,应对云层遮挡的定日镜瞄准策略调

控研究,呈现出从优化算法与闭环控制策略,再到人工智能技术应用的发展路径。然而,现有的研究多聚焦于云遮发生后的响应策略,普遍忽视了对云层工况的提前精准预测。未来研究应当将高精度的云况预测、人工智能的自适应决策与基于实时反馈的闭环控制方法相结合,并在光热电站实际聚光过程中进行更多验证,推动瞄准策略调控技术的落地应用。

2.2 云遮对集热过程的影响

为了有效缓解云层遮挡引起的 DNI 瞬态波动对集热系统的冲击,需要首先探明吸热器在非均匀、非定常能流变化下的动态响应特性,并在此基础上,及时采取灵活、准确的调控措施。因此,目前关于云遮工况下的集热系统研究主要聚焦于吸热器的动态特性分析与控制策略设计 2 个层面。

在集热系统动态特性分析层面,相比于恒定壁温或均匀通量加热的实验方法^[17-20],采用集总参数法、有限体积法等数值方法可以更快速的分析吸热器在复杂能流边界下的光-热-力动态响应特征。Zhang 等^[21]针对 100 MW 级外露圆柱式吸热器构建了一维简化模型,通过分析发现,DNI 波动下末端管屏的温度变化幅度显著高于前端管屏。Xu 等^[22]基于集总参数法构建了一种考虑不同初始条件与边界条件的外露圆柱式吸热器三维瞬态模型,研究表明:在云层遮蔽后复照的工况下,DNI 可在 3 s 内由 $910 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 骤升至 $1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,若未实施相应的调控措施,吸热器工质出口温度将快速逼近 630°C ,这将增加吸热器出口熔盐的超温风险。Laporte-Azcué 等^[23]提出了一种准稳态一维导热分析方法,用于分析设计工况和云层遮挡期间的吸热管动态响应特性,研究表明:在云遮及消散的瞬态工况下,吸热管壁热流密度从 $40 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 升至 $1.2 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,从而增加了吸热器局部过热、熔盐分解的风险。作者团队建立了计及全子系统动态特性的塔式 CSP 系统光-热-储-功一体化实时动态模型,探究了环境条件、运行参数、负荷需求阶跃变化条件下系统输出功率的动态响应特性^[24]。研究表明:在系统正常运行阶段,风速、环境温度的突变对系统输出的影响较小,而 DNI 和吸热器熔盐流量的突变对系统输出的影响较为显著,当 DNI 和吸热器熔盐流量变化幅度大于 30% 时,系统恢复稳定状态的时间将超过 280 s 且循环输出功率显著下降。为了进一步验证吸热器光-热耦合动态模型的准确性,作者团队搭建了如图 2 所示的高温熔盐吸热器动态特性测试实验台,该实验台能够实现

700 °C 高温氯化盐吸热器稳态及动态光-热耦合特性的测试^[25]。Gentile 等^[26]引入了具有 10 min 时间分辨率的真实天气数据,通过计算吸热管壁温度分布发现,在云层通过后的温度峰值期间,吸热器产生了显著的蠕变损伤,并且 DNI 峰值高的阴天的损伤

累积大于晴朗日的损伤累积。这种由 DNI 剧变所导致的高通量、瞬态热冲击,会使吸热管壁产生剧烈的温度梯度波动,并诱发循环热应力,最终加速吸热管材的疲劳累积与微裂纹扩展,威胁集热系统的结构安全与运行寿命。

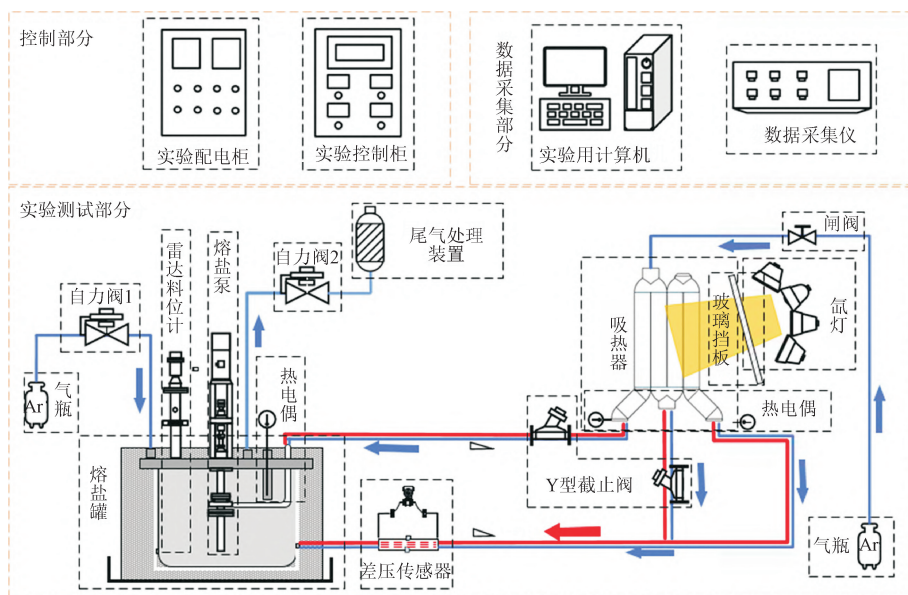


图 2 高温氯化盐循环实验平台^[25]

Fig. 2 High-temperature chloride salt loop experimental platform^[25]

为了有效缓解云层遮蔽对于集热系统的冲击,除 2.1 节中提到的定日镜场瞄准策略调节以外,另一种有效方案是通过调节熔盐泵的功率来控制冷盐的输入流量,以平抑熔盐温度的瞬时波动。Hefni 等^[27]发现降低吸热器的入口流量可以减缓云层覆盖期间吸热器内部熔盐的温度下降速率,有效降低熔盐凝固冻堵风险。Li 等^[28]通过在比例-积分-微分控制器中添加了前馈控制来调节吸热器的入口流量,前馈控制中的简化模型可以在 DNI 变化后快速计算所需的入口质量流量。Saade 等^[29]使用线性模型预测控制来控制吸热器的熔盐出口温度,与传统的控制策略相比,其对太阳辐射变化的响应能力有所提高,抑制了 DNI 干扰引起的波动。Cui 等^[30]提出了一种多目标控制策略,通过调节熔盐的入口流量,同时控制熔盐的出口温度、热应力和管材腐蚀水平,通过模拟短时云层遮蔽场景发现:相比于传统的开环控制策略,所提出的策略使得熔盐出口温度的控制时间快约 160 s,管壁温度最大下降了 40.8 °C,并在扰动过程中可以始终将内外壁温度维持在 630 °C 以内。作者团队提出了一种基于神经网络的前馈反馈控制策略^[31],如图 3 所示,该策略通

过调节吸热器的质量流量可以有效应对 DNI 的波动。基于神经网络的前馈控制器可以快速响应太阳辐照变化,而反馈控制器可以使吸热器达到预设温度。对于 $\pm 15\%$ 的 DNI 阶跃变化,所提出的控制策略可以将温度偏差限制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内;对于真实的剧烈且连续的 DNI 变化,温度变化则被限制在 5 °C 以内,从而有效缓解云遮时的剧烈温度波动。

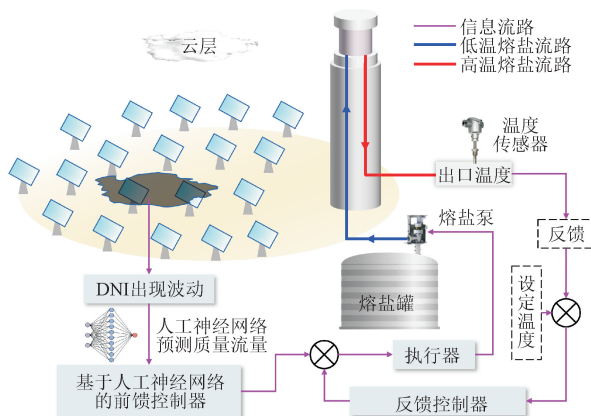


图 3 基于神经网络的前馈-反馈策略在 SPT 中的应用^[31]

Fig. 3 Application of a neural network-based feedforward-feedback control strategy in SPT^[31]

目前,吸热器的控制策略设计主要集中在优化控制器,以及通过实施前馈、反馈控制策略来调节熔盐出口温度。然而,这些设计却忽视了接收器入口流量、温度、壁温等运行参数之间相互耦合的动态依存关系。此外,为了确保吸热器长期安全的运行,需要进一步全面考虑热应力超限、蠕变损伤累积等吸热器机械特性,以及高温熔盐对管道的腐蚀影响,进而提出更高效、稳定的新型综合调控策略。

3 大风对 SPT 聚光集热性能的影响

在大风环境中,定日镜的聚光性能将会受到不可忽略的影响^[32]。一方面,镜面承受的风压力会使其变形,表面将变得不平整,各个位置处的法向量均发生变化,进而导致反射光线的方向发生偏移。尽管这一偏移的角度十分微小,通常以毫弧度计,但由于定日镜与吸热器之间的距离较远,偏差将被放大,最终导致光线偏离瞄准点,这一过程即为风致型面误差。另一方面,定日镜表面承受的不均匀风压力会对其背部的支撑和驱动机构施加力矩,从而造成定日镜的偏转。定日镜偏离原有的跟踪姿态,反射光线的方向也随之改变,这一过程即为风致型跟踪误差。风致型面误差和跟踪误差均会导致定日镜聚光精度和效率的降低。

此外,大风也会对吸热器的运行产生显著影响。在有风环境下,风速的增大会加剧吸热器表面的对流热损失,进而降低其运行效率。然而,这种影响随运行阶段的不同而有所差异。在吸热器额定工况正常运行时,对流散热量在总能耗中占比较小,因此由风引起的效率损失较为有限。但在启动过程中,对流散热是吸热器能量损失的主要因素,大风的负面影响显

著增强。具体而言,大风速下迎风面与背风面的散热差异显著,易引起吸热器的升温不均,增加熔盐凝固风险,影响系统运行安全^[33-34]。与此同时,极端大风可能导致吸热器无法预热到指定温度进而启动失败。

3.1 大风对聚光过程的影响

为准确表征大风对定日镜聚光性能的影响,需要获得定日镜承受的风载荷特性,风洞实验是目前广泛采用的一种研究方法^[35]。Bakhshipour 等^[36-37]通过风洞实验研究了矩形定日镜纵横比和离地间隙比对静态风载系数的影响,获得了升阻力系数、铰链力矩和倾覆力矩与几何参数的关系,并进一步分析了在动态风载荷条件下,定日镜在不同姿态和不同湍流条件下对脉动风的频率响应情况。Marano 等^[38]通过大型风洞实验探究了镜片间隙与风载的关系,研究结果表明:间隙的存在通常会增大定日镜承受的力和力矩,且镜面长宽比的增加也会加剧这种影响。虽然风洞模化实验能够便捷地研究定日镜的风载特性,但仍无法完全还原真实定日镜所承受的载荷。原因在于,定日镜模型相对于风洞中模拟的大气边界层过大,导致风洞中在定日镜高度的湍流特性(湍流强度和积分尺度)与实际全尺度条件不一致。风洞中的含能涡尺度与实际情况不同,从而引入不确定性。对此,Blume 等^[39]开发了一种用于全尺寸定日镜的压力测量系统,通过实地测量获得了其在不同攻角下的风压分布、气动力系数和气动导纳函数,可用于定日镜的响应特性分析,相关实验结果如图4所示。上述几种实验方法分析了定日镜结构、姿态等因素对风载荷的影响,可以获得定日镜对不同载荷的响应特性,为风载荷下聚光过程的研究提供重要参考。

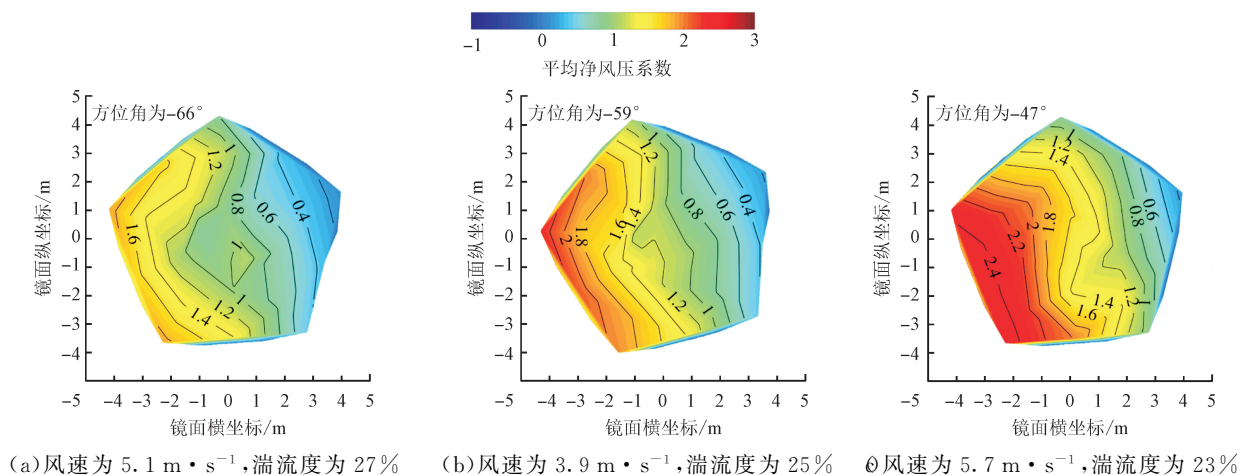
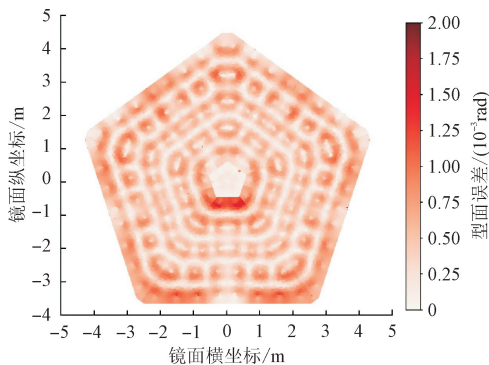


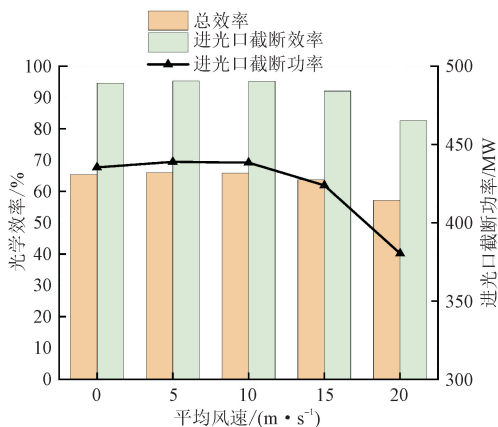
图4 五边形定日镜实地测量风压系数的分布^[39]

Fig. 4 Distribution of the measured wind pressure coefficient on a pentagonal heliostat^[39]

定日镜在风载荷下会产生变形,引起型面误差,导致反射光线偏离理想位置。在实验方法揭示风载荷基本规律的基础之上,采用数值方法可以研究风载荷对聚光过程的影响。Ji 等^[40]通过瞬态有限元模型计算定日镜在湍流风作用下的振动特性,获得小镜面位移的时程数据,并基于此采用光线追踪法计算各镜面的瞬时聚光效率。研究表明:对于 $13.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的平均风速,定日镜在不同角度下的光学损失率最高达到 37.2%。邢国华等^[41]采用流场-结构-光学耦合瞬态计算方法分析了脉动风载下的定日镜聚光效率的变化规律。其中,镜面的风载荷是通过计算流体动力学(CFD)方法获得。上述研究在聚光计算部分采用了较少的光线数,能够快速获得定日镜效率。若要进一步获得吸热器上的辐射通量分布,则需采用蒙特卡洛光线追迹法(MCRT)^[42]进行更精细的光学模拟。Liu 等^[43]利用有限元求解了镜面在风载荷下的变形,随后用 MCRT 计算了聚光光斑分布。研究表明:在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极端风速下,定日镜型面误差增大到 $2.97 \times 10^{-3} \text{ rad}$,光斑面积扩大了 3 倍以上。Yang 等^[44]提出了一种新型伞形定日镜,通过有限元方法计算其在风载下的变形,并采用 TracePro 光线追迹软件分析聚光效率,以评估其抗风性能。作者团队建立了定日镜风致型面误差的分析方法,在流-固耦合模拟的基础上,根据镜面节点坐标构建微面元来计算型面误差^[45]。基于所提出的方法建立了人工神经网络模型,以实现定日镜在不同风载工况下型面误差的快速预测,结果如图 5(a)所示。进一步,结合预测模型与 MCRT 方法对光热电站镜场光学效率进行分析,结果如图 5(b)所示。研究表明: $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极限风速可使镜场光学效率降低 8 个百分点。该定日镜风致型面误差的快速预测方法已应用于东方电气集团东方锅炉股份有限公司定日镜的生产设计过程中。



(a) 风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 正面迎风工况的型面误差



(b) 不同风速下全镜场光学效率与截断效率

图 5 型面误差分析与预测模型的应用结果^[45]

Fig. 5 Application results of the surface error analysis and prediction model^[45]

除了引起型面误差外,风载荷还会对定日镜施加力矩,使其发生偏转,即跟踪误差。Blume 等^[46]建立了跟踪误差与风载荷之间关系的简化分析模型,推导得到了定日镜力矩系数与三维脉动风速的关系,并建立了定日镜动态响应与力矩系数的关系。上述关系均在频域内表示,分别以气动导纳和机械导纳作为输入与输出之间的桥梁,导纳函数可以通过实验测得。通过分析该模型,输入风谱可以快速计算定日镜的响应谱,并变换得到时域响应。

上述研究从不同方面表征了定日镜聚光特性受风载荷的影响。然而,对于大规模定日镜场,由于定日镜之间相互干扰,存在遮蔽和通道等不同的流场影响机制,每一面定日镜承受的风载荷都是复杂的。为了给风载与聚光分析模型提供准确的输入,需要确定镜场内的风载分布情况。对此,Marano 等^[47]通过风洞实验研究了 64 个径向交错排列的定日镜模型在不同位置、时间和风向下的升阻力系数的变化规律,证明了镜场中心的定日镜由于受到遮蔽而承受相对较小的风载荷。此外,Kim 等^[48]采用大涡模拟的方法对 450 面定日镜组成的镜场进行仿真分析,研究表明,峰值风荷载出现在镜场迎风锋面和左右两翼。Xiao 等^[49]采用稳态 CFD 方法研究了迪拜 MBR 太阳能公园 4 期 100 MW 塔式电站的镜场风蚀和沙尘堆积特性。然而,由于镜场规模庞大,难以精细化建模,该研究仅对 1 列定日镜进行显式建模,其余部分用粗糙表面进行隐式建模。尽管未直接计算获得风载分布规律,但其研究方法为全镜场风场计算提供了新的思路。

由此可见,大风环境影响定日镜聚光是一个复杂过程,包括了镜场内复杂的三维流动、每一面定日镜结构参数对其响应特性的影响、型面误差与跟踪误差对聚光的不同作用机制等等。目前,国内外学者已针对上述方面开展了研究,通过实验或仿真的手段获得定日镜的风载,并通过光学模拟的方法来计算风载荷下的聚光效率。然而,当前对镜场内风载分布的研究仍然有限。未来的研究应着重阐明风在镜场内的分布规律,为后续环节的分析提供精确的条件。

3.2 大风对吸热过程的影响

为准确表征风场对吸热器光热转化性能的影响,需要准确获得风速与风向对吸热对流热损失的作用。桑迪亚国家实验室采用实验与理论模拟相结合的方法,分析了风场对多管外露式吸热器对流热损失的影响,并提出了可计算不同风速条件下吸热器整体对流损失的换热关联式^[50]。丁路等^[51]采用数值分析法研究了吸热器在不同风向下表面风速的分布特性,其结果如图6所示。该研究揭示了其最大风速集中于与风向角约 56° 的吸热器两侧区域。根据管屏表面风速大小随环境风速与风向变化的趋势,拟合了不同方位管屏风速计算关联式。研究结果表明:吸热器表面不同管屏的风速差可达5~6倍,因此若采用统一风速计算吸热器热损失将会造成较大误差,由此说明了在吸热器运行过程中考虑风向的影响的必要性。

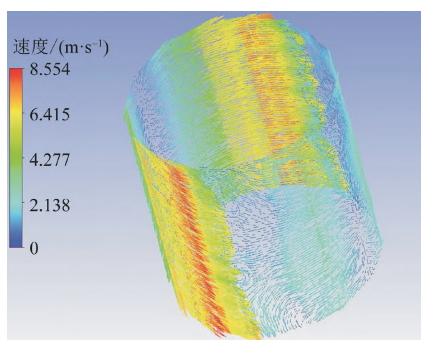


图6 10 m 标高、环境风速为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的吸热器各方位附近截面上的速度矢量^[51]

Fig. 6 Velocity vectors near the receiver surfaces at an ambient wind speed of $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ measured at a 10 m height^[51]

考虑到风场对吸热器的显著影响,现有研究主要针对腔体式吸热器探索了一系列降低流热损失的方法。常见策略是通过为腔体加装壁罩或空气幕等方式阻断或调节外部气流。例如:Wan 等^[52]通过数

值分析法研究了多孔遮罩在多变风向下时腔体吸热器对流热损失的影响,并提出了一种基于多孔介质壁罩的新型结构。该研究发现:在最优多孔遮罩结构参数设置下,对流热损失降低率可达约53%。Cheilytko 等^[53]通过数值模拟,研究了 VoCoRec 型腔体吸热器中受控回流空气涡旋对降低对流损失的作用,提出了调整出口气流角度以增强涡旋结构的方法。研究结果表明:适当角度的涡旋可提升4%的空气回馈率,同时改善温度均匀性并减少局部过热。参考腔体式吸热器的空气幕研究,Wang 等^[54]基于计算流体动力学探索了空气幕对外露式吸热器的影响,研究了不同风速、喷嘴角度、距离和射流速度在减少外露式吸热器热损失方面的作用。研究结果表明:在来流风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,通过优化喷嘴配置可实现对流热损失降低9.60%,吸热器效率提升约0.49%。Mondal 等^[55]采用瞬态 CFD 方法研究了改变空气射流的速率、厚度、角度和位置时吸热器对流热损失的影响,发现在最优情况下可减少18%的热损失。考虑到空气喷嘴的能源成本相对高速条件下的对流热损失较小,该空气幕方法可以为后续外露式吸热器的设计提供新思路。

风场对吸热器预热阶段的性能影响尤为显著,例如,Zuo 等^[56-57]通过实验与数值模拟探究了风速、风向对吸热器预热过程中传热特性与热应力的影响。研究结果表明:在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速条件下,最大热应力较无风工况降低了20.5%,且环境温度每升高 10°C 可使得最大应力降低6 MPa。Vant-hull^[58]通过改进 Solar Two 电站的预热算法,提出了基于温度参数反馈的经验控制模型并明确指出,由于高风速工况下不同管屏对流热损失差异较大,该模型只适用于低风速工况。由此可见,为了提高吸热器启动过程的性能,有必要考虑吸热器预热过程中风速与风向的影响。为此,作者团队通过数值模拟,研究了不同风速与风向下吸热器表面对流换热系数的分布,并建立了考虑风向的强制对流换热关联式。采用该关联式,分析了风速、风向和熔盐流量对吸热器启动传热特性的影响,其结果如图7所示。研究结果表明:在我国新疆哈密塔式50 MW 光热电站的年最大风速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,预热过程中的对流热损失可达辐射损失的9倍,由于总散热量大,吸热器无法预热到指定温度,从而导致启动失败。在此基础上,团队进一步探究了风速和风向对吸热器光-热-力耦合特性的影响,通过与东方电气集团东方锅炉股份有限公司联合开展的技术攻关,

提出了一种结合散热量理论计算与热应力机器学习的协同预热控制方法,可在高风速下实现均匀、安全且快速的预热,为优化吸热器启动策略提供了理论依据与方法支持。

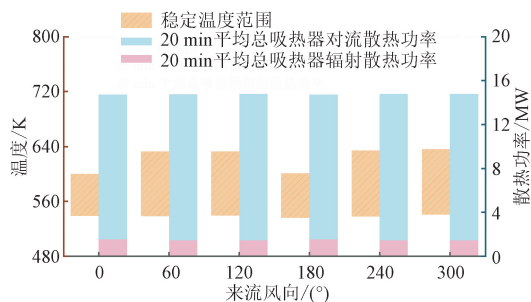


图7 10 m标高、 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下的不同风向对预热结果的影响

Fig. 7 Influence of wind direction on the preheating results at a wind speed of $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ measured at a 10 m height

4 风沙对SPT聚光集热性能的影响

西北地区太阳能资源丰富,是理想的塔式光热电站建设运行区域。然而,这些地区也存在风沙频发等恶劣环境问题,这不仅会降低镜场光学效率也会影响吸热器的传热性能,对电站整体安全高效的运行有着重要影响。

沙尘对电站聚光集热过程的影响主要在于以下3个方面:①沙尘颗粒沉降于定日镜表面,造成积灰,降低定日镜的有效反射率;②悬浮的沙尘颗粒容易形成气溶胶,削弱太阳辐射;③沙尘颗粒沉降于吸热器表面,影响吸热器传热,容易产生局部过热。下面将分别对上述过程的原理及其对电站聚光集热性能的影响进行详细介绍。

4.1 大风对聚光集热过程的影响

(1)定日镜表面积灰。定日镜表面的积灰过程复杂,包括沙尘产生、输运、沉降、初始黏附、黏附力变化(冷凝和化学反应)等阶段,其具体过程如下。

首先,由自然和人为原因产生的沙尘颗粒经风力输运,扩散至镜场区域。随后,沙尘颗粒在重力、惯性效应、电场力等作用下,亦或随雨水迁移,沉降于表面^[59]。沉降后,除重力和静电力外,沙尘颗粒还受双电层效应、表面能及毛细作用力的束缚,形成初始黏附。最后,沙尘在镜面的黏附力将随时间和周围环境因素发生变化。在干燥环境中,细小的沙尘为物理堆积状态,颗粒间无黏性成分,黏附力小,

易清除;在雨水、露水等环境中,湿度显著增加,水分既可能从颗粒或镜面中溶出化学物质,又可能从空气中吸附某些成分,进而与表面及颗粒发生化学与物理键合反应,导致黏附力增强,灰尘难以清除。以沙尘和水的胶结为例,光热电站表面的灰尘中存在可溶性盐和难溶性盐,湿度较高时,可溶性盐溶解形成盐溶液,经过风干后,可溶性盐析出并胶结,从而将难溶性盐固定在表面,过程如图8所示^[60]。

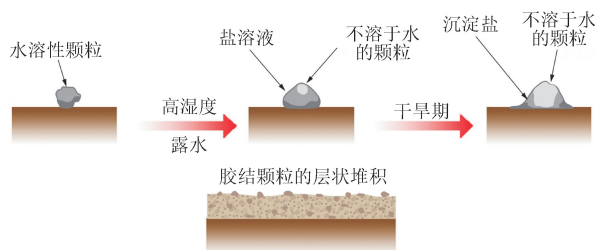


图8 沙尘和水的胶结过程^[60]

Fig. 8 Sand dust-water binding process^[60]

定日镜表面的积灰对光线具有吸收和漫反射作用,造成了有效反射率的降低。图9给出了沙尘对光线的吸收和漫反射示意图,能量为 E 的光线入射到定日镜表面,沉积的沙尘增加了镜面粗糙度,不仅吸收了能量为 E_1 的光线,而且使能量为 E_2 的光线发生漫反射,难以汇聚至吸热器,最终引起电站发电效率降低^[61-62]。师志鹏等^[63-64]通过实验,研究了灰尘对定日镜反射率的影响,结果显示:积灰密度是影响反射率的重要因素,平均 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的积灰可使反射率降低约12.5%。

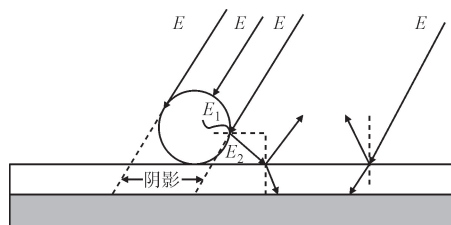


图9 定日镜上的沙尘对光线的吸收和反射过程示意图^[61]

Fig. 9 Schematic diagram of light absorption and reflection by dust on a heliostat surface^[61]

准确量化灰尘沉积与定日镜光学性能之间的关联,是评估其影响和制定防控策略的关键科学问题。为此,众多学者通过实验与建模的方法开展了深入探索。宋海翔等^[61]通过实验,建立了定日镜积尘量与反射率的定量关系:当积尘量小于 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,

定日镜积尘量每增大 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其镜面反射率下降约 18.43%; 而当积尘量大于 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 后, 定日镜的镜面反射率几乎不再变化。Picotti 等^[65] 开发了一种物理积灰模型, 可预测大气中的灰尘在定日镜表面的沉积状况及由此导致的反射率损失, 且模型的预测趋势与试验数据吻合良好。Heimsath 等^[66] 在预测积灰导致的反射率损失时, 考虑了光线入射角的影响, 建立了与入射角相关的反射率损失模型, 研究结果表明: 积灰定日镜的反射率随入射角的增大而显著下降, 入射角大于 30° 时衰减速度加快。这些研究结论为定日镜积灰的防控及光学性能的优化提供了重要的理论支撑与数据参考。

(2) 悬浮颗粒造成的大气衰减损失。在塔式光热电站运行过程中, 定日镜反射的光线在传播过程中将因大气的散射和吸收而发生能量衰减, 该部分能量损失被定义为大气衰减损失。在风沙频发的西北地区, 若电站选址于水源附近, 大气中的悬浮沙尘颗粒容易形成气溶胶, 会通过米氏散射与选择性吸收作用进一步削弱太阳辐射, 加剧大气衰减损失, 从而导致到达吸热器表面的有效辐射能密度降低, 直接削弱集热效率。

(3) 吸热器表面积灰。除了定日镜表面以外, 吸热器表面同样存在颗粒因沉降作用而形成的薄层沙尘覆盖层。该覆盖层将对吸热器外部的对流换热产生不利影响。尤为关键的是, 干沙的导热系数较低, 当吸热器表面出现不均匀积灰现象时, 积灰点处的换热差, 容易引发吸热器的局部过热, 在长期运行下易造成材料热应力损伤甚至结构性破坏^[67]。然而, 由于吸热器工作在持续高温(通常超过 500°C)和高空的环境中, 这为清洗操作带来了极大的技术难题和安全风险。目前, 缺乏能够在如此苛刻条件下安全、有效运行的专用清洗设备或成熟技术方案的相关报道。

4.2 定日镜积灰预防与清洗

在上述 3 种风沙造成的影响中, 定日镜的积灰是降低系统发电效率最为关键的因素, 对于建设在我国西北地区的光热电站, 定日镜的积灰预防与清洗是电站运行维护的重要组成部分。已有研究表明: 在没有自然清洁和人工维护的情况下, 在文献所处的环境条件下, 自然积灰 30 天的定日镜的反射率损失可达 25.88%^[63]。

在定日镜场周围安装防尘屏障是减少镜面积灰的有效途径。该方法的核心是通过物理屏障, 减少灰尘降落在定日镜表面, 从而降低反射率损失。研究者通过野外试验评估了多孔屏障的防尘效果, 其

结果表明: 对于粒径大于等于 $25 \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒, 其防尘率可达 47%^[68]。此外, 定日镜阵列主动收纳也是预防镜面积灰的有效手段。为防止夜间或沙尘暴天气下积尘, 对于跟踪式聚光太阳能阵列等可移动阵列, 可进行翻转或收纳处理。然而, 阵列收纳通常需要一定时间, 若沙尘暴突发或来临速度极快, 其防尘效果可能会大打折扣。

除了通过主动预防措施减少镜面积尘, 还可依托后期清洗技术恢复反射性能, 以保障定日镜运行效率。定日镜清洗技术主要包括具体清洗方式与镜场清洗策略两方面。

在清洗方式方面, 现有清洗方式主要包括片上机器人清洗、人工高压清洗及移动式清洗车。片上机器人多采用毛刷或喷淋清洗, 具有反射率恢复好、耗水量低的优点, 但其适用规模有限, 且对镜面形态适应性差, 仅适用于连续式镜面。人工配合高压水枪或气体清洗可针对局部顽固污渍进行清理, 但人力与设备成本高、效率低, 且高压水洗耗水量大, 与西北地区水资源条件矛盾。移动式清洗车是目前规模化镜场的主流选择, 清洗效率高、耗水较少, 但其作业受外部条件限制, 需合理规划路线以适应转弯半径, 且地面粗糙度可能影响行驶稳定性^[69]。以上清洗方式均存在耗水量大或易导致镜面磨损的问题, 难以兼顾西北地区水资源短缺现状和镜面保护要求。Sarasua 等^[70] 通过控制振幅(小于 $11 \mu\text{m}$)在薄水层(5 mm)中诱发空化效应, 实现了细颗粒的高效去除, 并克服了传统超声波清洗需完全浸没的局限。实验结果表明: 该技术可使相对反射率最高达 99.3%, 而耗水量仅为高压水枪清洗的 1/600。

在镜场清洗策略方面, 目前普遍采用的定期清洗方式存在智能化程度低、清洗供需不匹配的问题。为降低运维成本并提升发电效率, 需制定智能、经济且高效的清洗策略^[71]。在空间优先级规划上, 研究者通过积灰预测模型校准、反射率分区及数字孪生技术, 实现了对积灰分布不均匀性的精准响应和清洗资源的优化配置^[72-75]。此外, 研究者还综合考虑清洗频率、季节、天气及地理位置等因素, 以技术经济性最优为目的制定了清洗策略, 可有效提升高沙尘地区电站的发电量^[76-78], 适用于建设在我国西北地区的光热电站。

总的来看, 无论是具体的清洗方式还是镜场的清洗策略, 电站运维技术的智能化程度正在不断提高, 在未来有望实现按需清洗, 最大限度减少用水量和维护时间。

5 结论与展望

塔式光热发电技术在我国西北地区具有显著的资源与政策优势,然而,其实际运行效能受当地复杂气象环境的制约。本文系统回顾了云遮、大风与沙尘3类典型环境影响下聚光集热系统的动态响应特性与性能提升策略,得到如下结论与展望。

当前研究已从静态工况分析逐步拓展至非稳态、多物理场耦合的动态过程模拟与调控。在云遮应对方面,基于人工智能的瞄准策略及熔盐流量协同调控,有望缓解DNI波动引发的热冲击与效率损失。面对大风环境,风洞实验与流-固-光耦合数值方法初步揭示了定日镜风致型面与跟踪误差的形成机制,并对吸热器预热阶段的风向影响开展了探索。针对沙尘问题,积灰-反射率定量模型在不断完善,低耗水清洗技术与智能运维策略已开始逐步应用。

然而,现有研究仍存在明显不足:云遮响应多为事后调控,缺乏高精度、短时距的云况预测;大风研究多集中于单镜或局部镜场,全镜场风载时空分布规律不清,实时抗风调控手段缺失;沙尘影响研究中,定日镜的高效抑尘与低成本清洗技术仍有待突破。

为推动塔式光热电站在我国西北特殊环境下的高效、稳定运行,建议未来可在以下方向进行重点布局。

(1)集成气象大数据与人工智能算法,发展塔式光热电站聚光集热系统自适应调控系统,实现云、风、沙尘等环境扰动的超前感知与聚光-集热系统的提前调控。具体可结合卫星遥感、地面气象雷达和镜场监测设备,构建多源气象数据融合的短时预测模型,并利用深度学习算法实现分钟级云层运动和风速风向的精准预测,为控制系统提供提前决策依据。

(2)发展定日镜整场风矢量实时监测方法与风载荷快速分析模型,实时获取镜场三维风场结构;结合计算流体动力学与机器学习方法,建立风载荷对聚光过程影响的快速预测模型,实现大风条件下全镜场聚光效率的秒级评估,为抗风运行策略提供支撑。

(3)研发低耗水、低损伤的智能清洗与抑尘技术,突破西北地区水资源约束。重点开发仿生疏尘涂层、静电抑尘等新型技术,显著降低单位面积清洗耗水量;构建基于数字孪生的镜场积灰预测与按需清洗系统,实现清洗路线、频率和资源的动态优化,提升运维经济性与环境适应性。

(4)加强实际电站环境下的技术集成验证,促进科研成果向工程应用的转化。建议在典型西北地区电站建立技术验证平台,开展云-风-沙多因素耦合

环境下聚光集热系统的长期性能测试;制定适用于特殊环境的光热电站设计、运行与维护标准,促进新技术的规模化应用。

致谢:

感谢东方电气集团东方锅炉股份有限公司的技术合作;感谢西安交通大学国家储能技术产教融合创新平台(中心)兰剑教授的帮助;感谢蒋睿博士、孙彦东博士、刘问远博士、范晓龙硕士、徐海跃硕士、张显强硕士在本文撰写过程中的调研协助。

参考文献:

- [1] 何雅玲,邱羽,陶于兵,等. 太阳能光热发电原理、技术及数值分析[M]. 北京:科学出版社,2023.
- [2] HE Yaling, QIU Yu, WANG Kun, et al. Perspective of concentrating solar power [J]. *Energy*, 2020, 198: 117373.
- [3] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟. 中国太阳能热发电行业蓝皮书2024[R]. 北京:国家太阳能光热产业技术创新战略联盟,2025.
- [4] GOMEZ-VIDAL J C, TIRAWAT R. Corrosion of alloys in a chloride molten salt (NaCl-LiCl) for solar thermal technologies [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 157: 234-244.
- [5] FLESCH R, FRANTZ C, MALDONADO QUINTO D, et al. Towards an optimal aiming for molten salt power towers [J]. *Solar Energy*, 2017, 155: 1273-1281.
- [6] ASHLEY T, CARRIZOSA E, FERNÁNDEZ-CARA E. Optimisation of aiming strategies in solar power tower plants [J]. *Energy*, 2017, 137: 285-291.
- [7] GARCÍA J, SOO TOO Y C, PADILLA R V, et al. Dynamic performance of an aiming control methodology for solar central receivers due to cloud disturbances [J]. *Renewable Energy*, 2018, 121: 355-367.
- [8] SOO TOO Y C, GARCÍA J, PADILLA R V, et al. A transient optical-thermal model with dynamic matrix controller for solar central receivers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154: 686-698.
- [9] OBERKIRSCH L, MALDONADO QUINTO D, SCHWARZBÖZL P, et al. GPU-based aim point optimization for solar tower power plants [J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1089-1098.
- [10] OBERKIRSCH L, ZANGER D A V, MALDONADO QUINTO D, et al. Static optimal control; real-time optimization within closed-loop aim point control for solar power towers [J]. *Solar Energy*, 2023, 255: 327-338.
- [11] OBERKIRSCH L, ZANGER D, HOFFSCHMIDT B.

- Validation of a closed-loop aim point management system at the Jülich solar tower [J]. *Solar Energy*, 2023, 264: 111951.
- [12] WANG Yi'an, WU Zhe, NI Dong. Real-time optimization of heliostat field aiming strategy via an improved swarm intelligence algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(1): 416.
- [13] KUHL M, PARGMANN M, CHERTI M, et al. Flux density distribution forecasting in concentrated solar tower plants: a data-driven approach [J]. *Solar Energy*, 2024, 282: 112894.
- [14] WU Sipei, NI Dong. A method for real-time optimal heliostat aiming strategy generation via deep learning [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 127(Part B): 107279.
- [15] ZENG Zhichen, NI Dong, XIAO Gang. Real-time heliostat field aiming strategy optimization based on reinforcement learning [J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118224.
- [16] CARBALLO J A, BONILLA J, CRUZ N C, et al. Reinforcement learning for heliostat aiming: improving the performance of solar tower plants [J]. *Applied Energy*, 2025, 377(Part B): 124574.
- [17] FERNÁNDEZ-TORRIJOS M, SOBRINO C, MARUGÁN-CRUZ C, et al. Experimental and numerical study of the heat transfer process during the startup of molten salt tower receivers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 178: 115528.
- [18] FERNÁNDEZ-TORRIJOS M, SOBRINO C, ALMENDROS-IBÁÑEZ J A, et al. Inverse heat problem of determining unknown surface heat flux in a molten salt loop [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 503-516.
- [19] ZHOU Hao, ZHANG Ao, ZOU Yuhang, et al. Experimental study on preheating and salt circulation performance of a single receiver tube based on induction heating [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2024, 16(3): 033702.
- [20] SHEN Xiangyang, LU Jianfeng, DING Jing, et al. Transient heat transfer performance of molten salt tubular receiver [J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 541-546.
- [21] ZHANG Qiang, JIANG Kaijun, KONG Yanqiang, et al. Study on outlet temperature control of external receiver for solar power tower [J]. *Energies*, 2021, 14(2): 340.
- [22] XU Li, STEIN W, KIM J S, et al. Three-dimensional transient numerical model for the thermal performance of the solar receiver [J]. *Renewable Energy*, 2018, 120: 550-566.
- [23] LAPORTE-AZCUÉ M, ACOSTA-IBORRA A, OTANICAR T P, et al. Real-time estimation of the transient thermomechanical behaviour of solar central receivers [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 41: 101834.
- [24] JIANG Rui, LI Mingjia, WANG Wenqi, et al. A novel numerical methodology of solar power tower system for dynamic characteristics analysis and performance prediction [J]. *Energy*, 2024, 292: 130469.
- [25] 杨思远, 张轩志, 程泽东, 等. 千瓦级氯化盐吸热器样机稳态热性能实验研究 [J]. *热科学与技术*, 2025, 24(4): 425-435.
- YANG Siyuan, ZHANG Xuazhi, CHENG Zedong, et al. Experimental study on steady-state thermal performance of a kilowatt-scale chloride salt receiver prototype [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2025, 24(4): 425-435.
- [26] GENTILE G, PICOTTI G, BINOTTI M, et al. Dynamic thermal analysis and creep-fatigue lifetime assessment of solar tower external receivers [J]. *Solar Energy*, 2022, 247: 408-431.
- [27] HEFNI B E, BOURDIL C. Dynamic detailed model of a molten salt tower receiver, with thermosyspro library: impacts of several failures or operational transients on the receiver dynamic behavior [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1850(1): 030014.
- [28] LI Lu, LI Yinshi, YU Huajie, et al. A feedforward-feedback hybrid control strategy towards ordered utilization of concentrating solar energy [J]. *Renewable Energy*, 2020, 154: 305-315.
- [29] SAADE E, CLOUGH D E, WEIMER A W. Model predictive control of a solar-thermal reactor [J]. *Solar Energy*, 2014, 102: 31-44.
- [30] CUI Mianshan, ZHANG Qiang, JIANG Kaijun, et al. A multi-objective control strategy for molten salt external receiver in solar tower power plant [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 275: 126818.
- [31] WANG Wenqi, LI Mingjia, GUO Jiaqi, et al. A feedforward-feedback control strategy based on artificial neural network for solar receivers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 224: 120069.
- [32] LI Weilin, YANG Fa, NIU Huawei, et al. Wind loads on heliostat tracker: a LES study on the role of geometrical details and the characteristics of near-ground turbulence [J]. *Solar Energy*, 2024, 284: 113041.
- [33] PRICE H, MEHOS M, KEARNEY D, et al. Chapter

- 20: concentrating solar power best practices [M]// LOVEGROVE K, STEIN W. Concentrating Solar Power Technology. 2nd ed. Sawston Cambridge: Woodhead Publishing, 2021: 725-757.
- [34] LI Yawei, ZHOU Hao, ZUO Yuhang, et al. Experimental and numerical study on the preheating process of a lab-scale solar molten salt receiver [J]. *Renewable Energy*, 2022, 182: 602-614.
- [35] PFAHL A. Approach to determine wind loads on small heliostats [J]. *Solar Energy*, 2025, 295: 113551.
- [36] BAKHSHIPOUR S, EMES M J, JAFARI A, et al. Heliostat wind loads: effects of the aspect ratio and ground clearance ratio [J]. *Solar Energy*, 2024, 269: 112332.
- [37] BAKHSHIPOUR S, EMES M J, ARJOMANDI M. Experimental study of dynamic wind loads on heliostats [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2025, 261: 106092.
- [38] MARANO M, EMES M J, JAFARI A, et al. Effect of facet gap on heliostat wind loading [J]. *Solar Energy*, 2024, 271: 112428.
- [39] BLUME K, RÖGER M, PITZ-PAAL R. Full-scale investigation of heliostat aerodynamics through wind and pressure measurements at a pentagonal heliostat [J]. *Solar Energy*, 2023, 251: 337-349.
- [40] JI Baifeng, QIU Penghui, XU Fan, et al. Concentrating efficiency loss of heliostat with multiple sub-mirrors under wind loads [J]. *Energy*, 2023, 281: 128281.
- [41] 邢国华, 张雯, 武艳如, 等. 大型矩形定日镜风致振动聚光效率影响研究 [J]. *太阳能学报*, 2025, 46(10): 360-368.
- XING Guohua, ZHANG Wen, WU Yanru, et al. Study on influence of wind-induced vibration on concentrating efficiency of large rectangular heliostat [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2025, 46(10): 360-368.
- [42] HE Yaling, XIAO Jie, CHENG Zedong, et al. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(3): 976-985.
- [43] LIU Zengqiang, ZHAO Yuhong, FENG Jieqing. Heliostat surface deformation and encoding under gravity and wind loads for optical performance analysis [J]. *Renewable Energy*, 2025, 250: 123179.
- [44] YANG Moucun, ZHANG Yiluo, WANG Qinggang, et al. A coupled structural-optical analysis of a novel umbrella heliostat [J]. *Solar Energy*, 2022, 231: 880-888.
- [45] FAN Xiaolong, LI Mengjie, WANG Zhaoting, et al. Wind-induced slope error analysis and rapid prediction for heliostats in solar power tower system [J]. *Solar Energy*, 2026, 304: 114186.
- [46] BLUME K, RÖGER M, PITZ-PAAL R. Simplified analytical model to describe wind loads and wind-induced tracking deviations of heliostats [J]. *Solar Energy*, 2023, 256: 96-109.
- [47] MARANO M, EMES M, JAFARI A, et al. Variation of heliostat wind loads in a radial field array model [C]//SolarPACES Conference Proceedings. [S. l.: s. n.], 2024: 1-8.
- [48] KIM H G, KANG Y H, JEON W H. Wind load analysis of the heliostat field in northern Daegu for concentrating solar power [J]. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 2020, 40(6): 35-41.
- [49] XIAO Jianhua, YE Dongting, XIE Xiaosong, et al. Numerical simulation of the airflow at the world's largest concentrated solar power plant in a desert region [J]. *Solar Energy*, 2022, 232: 421-432.
- [50] SIEBERS D L, KRAABEL J S. Estimating convective energy losses from solar central receivers [EB/OL]. [2025-09-12]. https://pubdocserve.sandia.gov/sand_doc/1984/848717.pdf.
- [51] 丁路, 肖欣悦, 奚正稳, 等. 塔式太阳能吸热器不同方位高空风速模拟计算及影响分析 [J]. *发电技术*, 2021, 42(6): 707-714.
- DING Lu, XIAO Xinyue, XI Zhengwen, et al. Simulation calculation and influence analysis of high altitude wind speed in different directions of tower solar energy receiver [J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(6): 707-714.
- [52] WAN Zhenjie, WEI Jinjia, SU Jikang, et al. Convective heat loss under windy conditions and effects of porous shroud for large scale cavity receiver [J]. *Solar Energy*, 2025, 286: 113202.
- [53] CHEILYTKO A, SCHWARZBÖZL P. Reducing convective losses in a solar cavity receiver VoCoRec by creating a controlled vortex of returned air [J]. *Renewable Energy*, 2024, 230: 120898.
- [54] WANG Qiliang, YAO Yao, HU Mingke, et al. An air curtain surrounding the solar tower receiver for effective reduction of convective heat loss [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 103007.
- [55] MONDAL R, TORRES J F, HUGHES G, et al. Optimal configuration of oblique air curtains for heat loss suppression from vertical solar-thermal receiver surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236(Part D): 121747.
- [56] ZUO Yuhang, LI Yawei, ZHOU Hao. Numerical study

- on preheating process of molten salt tower receiver in windy conditions [J]. *Energy*, 2022, 251: 123893.
- [57] ZUO Yuhang, ZHOU Hao. Numerical and experimental study on thermal performance and thermal stress of molten salt receiver during preheating [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 121986.
- [58] VANT-HULL L L. The role of “allowable flux density” in the design and operation of molten-salt solar central receivers [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, 124(2): 165-169.
- [59] YADAV N K, PALA D, CHANDRA L. On the understanding and analyses of dust deposition on heliostat [J]. *Energy Procedia*, 2014, 57: 3004-3013.
- [60] SARVER T, AL-QARAGHULI A, KAZMERSKI L L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature, and mitigation approaches [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 698-733.
- [61] 宋海翔. 积尘对定日镜反射率的影响及测量方法研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2021: 23-24.
- [62] 刘爽. 定日镜积尘度检测及标准板的研制 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2022: 2-5.
- [63] 师志鹏, 龚俊, 王伟志, 等. 积灰对塔式太阳能定日镜反射率的影响研究 [J]. *热力发电*, 2019, 48(6): 134-137.
- SHI Zhipeng, GONG Jun, WANG Weizhi, et al. Effect of dust accumulation on reflectivity of tower solar heliostat [J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(6): 134-137.
- [64] 师志鹏. 积灰对定日镜反射率的影响研究与镜面除尘装置设计 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 20-21.
- [65] PICOTTI G, BORGHESANI P, MANZOLINI G, et al. Development and experimental validation of a physical model for the soiling of mirrors for CSP industry applications [J]. *Solar Energy*, 2018, 173: 1287-1305.
- [66] HEIMSATH A, SUTARDHIO C, SCHÖTTL P, et al. Soiling of solar mirrors-impact of incidence angles on CSP plant performance [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2303(1): 210003.
- [67] SINGH G, SAINI D, YADAV N, et al. Dust deposition mechanism and cleaning strategy for open volumetric air receiver based solar tower sub-systems [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 2081-2089.
- [68] BOURDON D, WOLFERTSTETTER F, FERNÁNDEZ-GARCÍA A, et al. Saving water on concentrated solar power plants: the holistic approach of the WASCOP project [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2303(1): 210002.
- [69] 沈志华. 塔式光热电站定日镜清洗技术研究 [J]. *电气技术*, 2021, 22(6): 119-123.
- SHEN Zhihua. Research on heliostat-washing technology in solar thermal power tower plant [J]. *Electrical Engineering*, 2021, 22(6): 119-123.
- [70] SARASUA J A, SANDÁ A, VILLASANTE C, et al. Non-immersion ultrasonic cleaning for heliostats [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 2033(1): 040035.
- [71] PICOTTI G, MORETTI L, CHOLETTE M E, et al. Optimization of cleaning strategies for heliostat fields in solar tower plants [J]. *Solar Energy*, 2020, 204: 501-514.
- [72] ANDERSON C B, PICOTTI G, CHOLETTE M E, et al. Heliostat-field soiling predictions and cleaning resource optimization for solar tower plants [J]. *Applied Energy*, 2023, 352: 121963.
- [73] TRUONG-BA H, CHOLETTE M E, PICOTTI G, et al. Sectorial reflectance-based cleaning policy of heliostats for solar tower power plants [J]. *Renewable Energy*, 2020, 166: 176-189.
- [74] TRUONG-BA H, CHOLETTE M E, PICOTTI G, et al. Bi-objective optimization of sectorial cleaning policy for the solar fields of concentrating solar tower plants [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2445(1): 080009.
- [75] MILIDONIS K, ELIADES A, GRIGORIEV V, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs) in the planning, operation and maintenance of concentrating solar thermal systems: a review [J]. *Solar Energy*, 2023, 254: 182-194.
- [76] 蒋志浩, 杜宇航, 刘向民. 塔式光热电站定日镜场清洗策略优化研究 [J]. *动力工程学报*, 2020, 40(11): 924-928.
- JIANG Zhihao, DU Yuhang, LIU Xiangmin. Optimization of cleaning strategies for heliostat fields in tower solar thermal power plants [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2020, 40(11): 924-928.
- [77] PICOTTI G, BINOTTI M, CHOLETTE M E, et al. Modelling the soiling of heliostats: assessment of the optical efficiency and impact of cleaning operations [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2126(1): 030043.
- [78] ASHLEY T, CARRIZOSA E, FERNÁNDEZ-CARA E. Heliostat field cleaning scheduling for solar power tower plants: a heuristic approach [J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 653-660.

(编辑 刘懿莹)

团队介绍:

能源高效利用、储能与新能源研究团队长期专注于能源科学与工程、工程热物理、新能源开发与利用及储能方面的基础研究及重大工程技术创新研究,研究成果在能源、航天和化工等领域得到广泛应用。团队负责人何雅玲教授,中国科学院院士,工程热物理学家,曾获何梁何利基金科学与技术进步奖,国家自然科学基金二等奖 2 项,国家技术发明奖二等奖 1 项,国家科学技术进步奖一等奖(创新团队奖)1 项,省部级科技成果一等奖 3 项,国家级教学成果奖一等奖 3 项、二等奖 2 项等。任教育部高等学校能源动力类专业教学指导委员会主任,国务院学位委员会学科(动力工程及工程热物理)召集人,中国制冷学会理事长,中国动力工程学会副理事长等。



团队负责人:何雅玲院士