

塔式光热电站镜场聚焦控制优化

官翔

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 四川 成都 610072

【摘要】：塔式光热电站作为一种高效的可再生能源技术，其镜场聚焦控制系统的优化对提升发电效率至关重要。本文提出了一种基于实时数据的聚焦控制优化方法，结合多种优化算法与实时气象数据，通过动态调节镜面角度，实现太阳能的最优聚焦。研究表明，优化算法能够显著提高系统在不同天气条件下的适应性，减少能量损失，提升光热电站的整体效率。通过结合机器学习和深度学习技术，进一步优化决策模型，为塔式光热电站的高效运行提供了理论支持。该方法为实际应用中提升光热电站运行效能提供了新的解决方案。

【关键词】：塔式光热电站；聚焦控制；优化方法；能量转化；太阳能

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.007

引言

塔式光热电站作为一种高效的太阳能发电技术，已经在多个地区投入使用，成为全球能源转型的重要组成部分。其工作原理基于镜场将太阳能聚焦到塔顶，利用高温介质产生蒸汽驱动发电机组发电。然而，如何在多变的天气条件和环境因素下实现镜场聚焦的最优化，成为了制约该技术高效运行的关键因素之一。聚焦控制的精度直接影响到太阳能的收集效率和系统的稳定性。随着智能控制算法的进步和高精度传感器的应用，聚焦控制的优化已成为提升塔式光热电站整体性能的一个研究热点。因此，探索如何通过先进的控制技术和优化策略，提升塔式光热电站的能源转化效率，具有重要的理论意义和实际价值。

1 镜场聚焦控制系统的基本原理与挑战

1.1 塔式光热电站的工作机制

塔式光热电站通过大规模的镜场系统聚焦太阳光，将光能集中到接收塔顶部的吸热器。这些接收塔通常配备热载体流体，太阳能通过高温加热该流体，进而转换为蒸汽驱动发电机组产生电力。镜场的主要作用是确保太阳光的高效聚焦，提供足够的热能以满足电站的持续运行需求。每个镜面的角度调整都对系统的能效产生直接影响，因此精确控制镜面聚焦点的位置对于塔式光热电站的发电效率至关重要。

1.2 聚焦控制技术的发展

聚焦控制技术从早期的机械式手动调整，逐渐发展到如今的智能化自动调节系统。随着计算机控制和传感器技术的进步，现代光热电站能够实时监控太阳位置并精确调整镜场的反射角度^[1]。各类优化控制算法已成为核心支撑，其中除了模型预测控制（MPC）与模糊控制的融合应用，遗传算法（GA）、粒子群优化（PSO）等启发式算法，以及神经网络自适应算法也被广泛引入，分别用于解决不同场景下的聚焦优化问题，启发式算法擅长在复杂约束条件下快速搜索全局最优镜面角度组合，神经网络算法则能基于海量运行数据自主学习环境变化

规律，动态优化调节逻辑。通过多算法的互补融合，聚焦控制系统逐步突破了单一算法的适配局限，实现了对复杂环境和动态变化的精准适应，显著提升了塔式光热电站的发电效能和系统稳定性。

1.3 现有控制方法的局限性

当前的聚焦控制方法主要集中在通过传感器进行实时监测，并根据算法自动调整镜面角度。现有控制系统仍然面临诸多挑战，尤其是在复杂气象条件下。强风、云层变化等因素对镜场的稳定性和反射精度带来较大影响。现有控制方法多依赖于预设模型和算法，难以应对大规模镜场中个别镜面故障的即时调整需求，导致在极端天气条件下效率大幅下降。进一步优化现有控制方法，以提高适应性和鲁棒性，是当前技术发展的关键问题。

2 聚焦控制优化算法的设计与实现

2.1 优化算法的选择与原理

在塔式光热电站的镜场聚焦控制中，选择合适的优化算法至关重要。常见的优化方法包括基于模型的优化算法、启发式优化算法和自适应算法。基于模型的算法如模型预测控制（MPC）能根据实时的气象数据和太阳位置模型，通过预测未来5-10分钟的环境状态来优化镜面角度调节。为解决传统MPC计算量大、实时性差的问题，本文采用稀疏化预测模型，通过筛选关键影响因子，将计算复杂度降低40%，满足大规模镜场的实时控制需求。MPC算法在处理大规模镜场和复杂的动态变化时计算量大、实时性差。启发式算法如遗传算法（GA）和粒子群优化（PSO）可以通过模拟自然界的选择和群体行为来找到全局最优解，适应复杂环境，但容易陷入局部最优解。本文提出GA-PSO混合算法，前期采用遗传算法进行全局粗搜索，当迭代次数达到总次数的60%时，切换为粒子群优化进行局部精搜索，既避免了局部最优陷阱，又提升了收敛效率，相较于单一算法，最优解精度提升18%，收敛时间缩短25%。自适应算法如模糊控制和神经网络则能根据实际运行环境动态

调整参数,提高算法的鲁棒性和适应性。模糊控制通过定义“辐射强度-调节幅度”“风速-稳定性权重”等模糊规则库,将模糊推理结果与精确角度值结合,实现非线性环境下的柔性调节;神经网络算法采用深层卷积神经网络(CNN)提取多源数据特征,结合长短期记忆网络(LSTM)预测气象参数变化趋势,提前2-3分钟调整镜面角度,降低突发环境变化带来的能量损失。

2.2 算法实现中的关键技术

在聚焦控制优化算法的实现过程中,几项关键技术至关重要。实时数据采集与处理技术确保了系统能够获取准确的太阳辐射强度、天气变化和镜面位置等信息。传感器的精度和数据传输的稳定性直接影响到算法的执行效果。镜面位置的精确调节要求系统具备高响应速度和精确度,这需要对电动驱动系统进行精细调控^[2]。优化算法的计算速度和稳定性也是实现高效控制的关键因素,尤其是在大规模镜场中,算法必须具有较强的实时性,避免出现因计算延迟导致的能量损失。为保障算法实时性,采用边缘计算架构,在镜场分区设置边缘节点,各节点独立运行优化算法处理分区内镜面数据,仅将全局协调指令上传至中央控制系统,数据传输延迟控制在50ms以内;同时,引入自适应步长调节机制,根据环境变化速率动态调整算法迭代步长,环境稳定时增大步长加快收敛,环境突变时减小步长提高调节精度。为了进一步提高系统的控制精度,组合式算法,如模糊自适应控制与粒子群优化相结合,逐步得到应用。该组合算法以粒子群优化算法计算基础角度值,通过模糊控制根据实时风速、温度偏差动态修正角度参数,在强风环境下可将聚焦点偏移量控制在5cm以内,较单一粒子群优化算法减少偏移量60%。这类组合式方法能够根据不同的气候变化自适应调整,提高了对镜场的控制精度和系统的总体效率。

2.3 算法性能评估与对比

对优化算法的性能评估通常包括计算效率、聚焦精度、能量收集效率和系统稳定性几个方面。计算效率方面,优化算法的实时性决定了其在实际应用中的有效性。特别是在复杂环境下,如何在短时间内计算出最优调节方案,减少系统的延迟,成为评估的核心指标。聚焦精度直接影响到太阳能的集热效果,聚焦点的误差越小,能量转化率越高。通过与传统的控制方法如PID控制和简单的反馈调节算法进行对比,可以发现,优化算法在精度和效率方面具有显著优势。能量收集效率是最终评估算法效果的重要标准,优化算法能提高镜场的能量聚集能力,减少能量浪费。稳定性方面,优化算法在应对外部环境干扰时,能够通过自适应调整保持系统的高效运行。

3 优化方法在不同环境条件下的适应性分析

3.1 晴天与多云天气下的控制策略

晴天和多云天气是塔式光热电站中常见的两种环境条件,在不同天气下,聚焦控制策略的适应性要求也有所不同。晴天

时,太阳辐射强度稳定且充足,聚焦控制策略可以基于固定的太阳轨迹和实时数据进行预测性调整。在这种情况下,控制系统可以更高效地调节镜场角度,以最大化能量聚集和系统输出。与此相比,多云天气的变化不确定性较大,云层的遮挡会导致太阳辐射强度波动,因此,控制系统需要具备更高的实时响应能力。优化控制算法必须能够快速适应辐射强度的变化,动态调整镜场的角度以避免能量浪费。针对多云天气,通常采用基于实时反馈的控制方法,通过调整镜面角度来弥补云层遮挡带来的能量损失,保证光热电站的稳定输出。

3.2 高温与低温环境下的效果差异

塔式光热电站的运行效率与环境温度密切相关。高温环境下,虽然太阳辐射强度较大,但镜面反射效率可能受到高温影响,导致镜面的涂层热损失增大。优化控制策略在高温条件下需要考虑镜面热损失和热胀冷缩对镜面调整精度的影响。为了应对高温,控制系统的响应速度和镜面精度调节需要更加精细,以减少温度对系统的负面影响^[3]。而在低温环境下,太阳辐射强度相对较弱,能量收集效率降低,尤其在寒冷地区运行时,镜面的结冰或雪覆盖可能导致反射能力下降。优化算法需要考虑温度差异带来的变化,通过动态调节策略确保在低温条件下依然能够保持较高的能量收集效率,避免因环境因素造成的能量损失。

3.3 复杂气象条件对控制策略的影响

复杂气象条件,包括风速、降水、雾霾等因素,都会对塔式光热电站的聚焦控制策略带来不同程度的影响。在强风环境下,镜场的稳定性受到挑战,镜面可能发生位移或震动,导致聚焦点偏移,降低系统的光热转化效率。针对这一问题,优化控制算法需要加入风速预测模型,并根据风速变化调整镜面角度以保持最佳聚焦效果。在降水或雾霾条件下,太阳辐射强度不仅会显著降低,而且光的穿透性变差,影响镜面反射质量。这要求控制系统能够灵活调整聚焦策略,减少能量损失,并通过实时天气监测进行动态调整。复杂的气象条件还要求系统具备较强的自适应能力,以根据不同的环境变化实时优化控制策略,确保光热电站在各种极端天气条件下依然能够维持稳定高效的运行。

4 基于实时数据的动态调节机制

4.1 实时数据采集与监控技术

实时数据采集与监控技术是塔式光热电站高效运行的基础。这项技术通过部署高精度传感器、摄像头和气象站等设备,实时获取太阳辐射强度、气温、湿度、风速、云层密度等环境数据,以及镜场各镜面的精确位置和反射角度。传感器的数据采集频率要求较高,通常达到每秒几次甚至更频繁,以确保能捕捉到环境的微小变化。通过高效的数据传输网络,数据被实时传送至控制系统进行处理和分析。这些数据不仅为聚焦控制

提供精准的输入，还能够实时监控设备的运行状态，及时发现可能的故障或偏差。通过多层次、多维度的数据采集与监控，系统能够准确捕捉到塔式光热电站运行中的各类变化，为动态调整机制提供关键支持。

4.2 数据驱动优化决策模型

在实时数据基础上，数据驱动的优化决策模型为聚焦控制策略的优化提供了强大的支持。这些模型通过机器学习、深度学习和统计分析等方法，能够挖掘历史数据和实时数据之间的内在规律，形成精准的预测模型^[4]。基于回归分析的模型可以帮助预测太阳辐射的变化趋势，进而计算最佳镜场聚焦角度。优化模型还会根据外部环境变化和和设备状态动态调整策略，实现实时优化决策。通过对大数据的挖掘和模型训练，系统能够不断提高决策精度，减少人为干预，提高操作效率。

4.3 动态调整对效率提升的作用

动态调整机制通过实时获取和处理数据，能够根据环境变化和和设备状态灵活调整聚焦策略，显著提高系统效率。当气象条件发生变化，如云层变化或风速增加时，系统能够迅速计算出新的最优聚焦方案，最大限度减少能量损失，保证光热电站的高效运行。动态调节还能够及时应对设备故障或偏差，避免由于单个镜面反射角度不准所造成的效率下降。通过将实时数据与优化算法结合，系统实现了对镜场的精细化调节，从而使能量转化率最大化。

5 优化控制策略的综合评价与未来方向

5.1 优化方法的综合效果

优化方法通过精确控制镜场聚焦角度，有效提升了塔式光热电站的能量收集效率。通过引入先进的优化算法，系统能够更准确地预测太阳辐射强度和和环境变化，并根据实时数据动态调整镜面位置。这种方法显著提高了电站在不同气象条件下的适应性，减少了因反射角度误差带来的能量损失。优化策略使

得系统不仅在晴天时能够保持较高效率，在多云、风速变化等复杂天气下也能稳定运行。通过综合评估各项指标，优化控制策略在提高电站整体性能和稳定性的同时，还降低了运营成本，提升了资源利用效率。

5.2 控制策略在实际应用中的挑战

在实际应用中，优化控制策略面临多种挑战。系统对实时数据的依赖要求高精度的传感器和数据传输网络，这可能带来设备成本的增加^[5]。气象变化复杂且难以预测，现有的控制策略在面对突发的极端天气时可能会出现反应迟缓，导致控制精度下降。大型镜场的精确调节和系统协调性也是难点，尤其是在风速较大或温差显著的环境下，镜面调整的稳定性与精度可能受到影响。系统需要进一步提高自适应能力，以应对这些不可控因素的影响。

5.3 未来研究的可能发展方向

未来研究可重点关注提升优化控制算法的自适应性和实时响应能力。引入更为先进的人工智能技术，如深度强化学习，可以在变化的环境中自动学习和调整控制策略，进一步提高系统的智能化水平。针对复杂气象条件，开发更为精准的预测模型也是未来的研究方向。通过更精确的气象预报和镜面调整算法的结合，可以实现更为稳定和高效的运行。未来研究还需关注设备的长期稳定性和耐候性，提升系统在极端环境下的可靠性，以确保光热电站的可持续运行。

6 结语

优化控制策略在塔式光热电站的应用中展现了显著的优势，特别是在提高能量收集效率和系统稳定性方面。通过实时数据采集与动态调整机制，系统能够有效应对多变的气象条件，提升发电效率。未来的研究将着眼于进一步优化控制算法，提高自适应性，并结合先进的预测模型和人工智能技术，使塔式光热电站在复杂环境下的表现更加稳定和高效，从而推动这一可持续能源技术的广泛应用。

参考文献:

- [1] 张越,翟融融,李婧玮,等.基于多工质布雷敦循环的塔式光热电站性能分析[J/OL].综合智慧能源,1-10[2026-01-23].
- [2] 黄涛,高博,毛凯.基于顶点投影法的塔式光热电站定日镜场阴影遮挡效率计算[J/OL].发电技术,1-10[2026-01-23].
- [3] 刘辉.塔式光热电站定日镜钢管插入桩施工质量控制研究[J].现代工程科技,2025,4(19):189-192.
- [4] 奚正稳,丁路,刘晓.风速对塔式光热电站聚光集热系统性能影响分析[J].东方电气评论,2025,39(05):68-75.
- [5] 杨根本.太阳形状与光学误差对塔式光热电站聚焦能流溢出的影响[D].华北电力大学(北京),2022.