基于超临界 CO_2 循环的太阳能光热发电系统热力性能优化与参数匹配研究

王万通

河南中原能建工程有限公司，河南省鹤壁市，458030；

摘要：随着全球对可再生能源的需求日益增长，太阳能作为一种清洁、可持续的能源形式，其开发利用受到了广泛关注。基于超临界 CO_2 循环的太阳能光热发电系统作为一种高效、灵活的太阳能利用方式，近年来成为研究热点。该系统通过超临界 CO_2 作为工作介质，在吸热器中吸收太阳能并将其转化为高温高压的 CO_2 流体，进而驱动涡轮机发电。然而，系统的热力性能和参数匹配直接影响其发电效率和稳定性，因此，对系统进行热力性能优化与参数匹配研究显得尤为重要。本研究旨在探讨基于超临界 CO_2 循环的太阳能光热发电系统的热力性能优化策略，包括吸热器、热交换器和涡轮机的性能优化，以及系统参数的匹配策略，以期为系统的设计和运行提供理论指导和技术支持。

关键词：超临界 CO_2 循环；太阳能光热发电系统；热力性能；参数匹配

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.014

引言

随着全球能源结构的转型和升级，寻找高效、环保的能源利用方式已成为世界各国关注的焦点。太阳能作为地球上最丰富的可再生能源之一，具有无污染、分布广泛、永不枯竭等优点，其开发利用对于缓解能源危机、保护环境具有重要意义。基于超临界 CO_2 循环的太阳能光热发电系统作为一种创新的太阳能利用技术，结合了超临界 CO_2 的高效热传导性和太阳能光热发电系统的环境友好性，展现了巨大的应用潜力和发展前景。然而，在实际应用中，该系统的热力性能和参数匹配问题成为制约其发电效率和稳定性的关键因素。因此，深入研究该系统的热力性能优化与参数匹配策略，对于提高其发电效率、降低成本、推动太阳能光热发电技术的商业化进程具有重要意义。

1 超临界 CO_2 循环太阳能光热发电系统概述

超临界 CO_2 循环太阳能光热发电系统是一种新型光热转换技术，利用超临界状态二氧化碳作为工质实现高效热能向电能的转换。该系统通过聚光装置收集太阳能并加热超临界 CO_2 ，驱动涡轮发电机组运行。相较于传统水蒸汽循环，超临界 CO_2 工质具有更高能量密度和传热效率，系统结构更紧凑，热力性能显著提升。其运行依赖于高温高压条件下的热力学循环，是实现太阳能规模化、稳定发电的重要技术路径之一，也对自动化控制与实时数据处理提出了更高要求。

1.1 系统工作原理

系统基于布雷顿循环原理运行，超临界 CO_2 在吸热器中吸收聚光太阳能热量，达到高温高压状态后进入涡轮机膨胀做功，驱动发电机输出电能。做功后的低压工质经过回热器与压缩机预热后，再经冷却器降温并重新压缩至超临界状态，完成循环过程。这一循环充分利用超临界流体的特殊热物理性质，尤其在临界点附近工质的比热容和传热系数显著增大，减少了不可逆损失，提高了循环效率。整个能量转换过程对温度、压力及流量的控制精度要求极高，需依赖高实时性的监测与调控手段。

1.2 系统组成与结构

系统主要由聚光集热、热能转换、发电储能及控制四大模块组成。聚光集热部分包括定日镜场和吸热器，负责收集并转换太阳能为热能；热能转换部分包含涡轮机、压缩机、回热器和冷却器，共同实现超临界 CO_2 工质的循环与能量传递；发电模块由发电机和电力电子设备构成；储能系统常采用熔盐储热方式，保障能源持续供应。控制系统集成传感器、执行器和计算单元，实现对工质参数与设备状态的精确管理。系统结构呈现高度集成化与耦合性，各子系统需协同运行以保持整体性能最优。

1.3 系统热力性能评价指标

系统热力性能主要通过热效率、㶲效率及能量利用

率等指标进行评估。热效率指发电输出功率与入射太阳能总量的比值，反映能量转换的整体效能；㶲效率则从能量品质角度衡量系统性能，评估可用能的损失情况；能量利用率涉及储热系统的充放能效率与持续时间，影响电站运行的稳定性与调度能力。此外，工质运行参数如吸热器出口温度、涡轮机进口压力以及回热器的温差匹配度也是关键评价要素，共同决定了系统的经济性与可靠性。

2 热力性能优化策略

热力性能优化是提升超临界 CO_2 光热系统效能的核心环节，旨在通过改进关键设备运行状态与系统配置，实现能量转换效率的最大化。优化需综合考虑实际运行约束与动态环境条件，结合实时数据采集与处理技术，制定适应不同工况的调节策略。有效的优化能够降低系统能耗，提高发电稳定性，并延长关键设备寿命，对降低光热发电成本具有重要意义。

2.1 吸热器性能优化

吸热器性能的优化是一个综合性的工程，其核心目标是提升光热转换效率以及降低热损失。为了实现这一目标，研究人员和工程师们采取了多种策略。首先，他们专注于改善聚光光斑的分布，确保光能能够更加均匀地照射到吸热体上，从而提高整体的吸收效率。同时，他们还致力于开发新型的吸热体表面涂层材料，这些材料能够增强对太阳辐射的吸收能力，并且有效抑制红外线的再辐射，从而减少能量的损失。在传热方面，工程师们采用了分段加热或者流体通道的设计，这样的设计可以改善传热过程的均匀性，避免因为局部过热而导致的热应力破坏。此外，他们还通过调节工质的流量和温度曲线，使得吸热过程尽可能地接近理想的热力学循环，从而提高整体的效率。

2.2 热交换器性能优化

热交换器性能的优化是一个综合性的工程，其核心目标是提升热交换器的传热效能，同时尽量减少流体在流动过程中所遇到的压降损失。为了实现这一目标，工程师们通常会从多个角度出发，采取一系列的技术措施。首先，他们会采用更为高效的换热管设计，以及更为紧凑的布局方式，这样可以在有限的空间内增大换热面积，同时提高流体的湍流程度，从而强化换热过程。其次，他们会优化工质的流速和温度差配置，以减少由于不可逆传热所导致的能量损失。此外，定期的污垢清理和状态监测也是保持热交换器长期运行中传热稳定性的重要手段。在热交换器的一个特殊应用——回热器中，精确控制冷热流体的匹配温度尤其重要。通过这种方式，可以显著提高整个循环的能量利用效率，这也是系统级优化的重要一环。总的来说，热交换器性能的优化是一个系统工程，需要从多个角度综合考虑，采取多种技术手段，才能达到提升传热效能、降低压降损失的目的。

2.3 涡轮机性能优化

涡轮机性能优化旨在全面提升膨胀做功效率和确保运行可靠性，这两大目标是其核心追求。具体而言，通过精细化改进涡轮叶片的型线设计和喷嘴结构，能够显著减少气流在流动过程中的能量损失，从而有效增强涡轮机对能量的提取能力。此外，合理调节涡轮机的转速，使其与进口参数达到最佳匹配状态，不仅可以避免喘振现象的发生，还能防止因超速而引发的安全隐患。为了进一步提升运行可靠性，引入了先进的状态监测与故障预测技术，实时精准地评估涡轮叶片的磨损程度和振动状况，基于这些数据，优化涡轮机的启停策略和负荷分配方案。涡轮机的高效稳定运行直接关系到整个系统的输出能力，因此，必须与上下游设备进行紧密的协同调控，确保各环节协调一致，最终实现全局范围内的最优化运行。

3 参数匹配策略

参数匹配策略是保障超临界 CO_2 循环系统稳定、高效运行的关键手段，其核心在于协调各子系统之间的运行参数，使整个系统处于最佳协同状态。由于系统内温度、压力、流量等参数高度耦合，任何单一参数的失调均可能导致效率下降甚至设备损坏。通过建立多变量控制模型并利用实时数据处理技术，可实现参数的动态匹配与优化，显著提升系统适应性与整体性能。

3.1 吸热温度与压力的匹配

吸热温度与压力的匹配情况，对于超临界二氧化碳（CO_2 ）工质的热力学状态和整个循环系统的效率具有直接的、决定性的影响。在实际操作中，必须根据太阳辐照强度的变化以及工质流量的动态情况，灵活地调整吸热器出口的温度和压力设置，确保其始终处于临近超临界区域的高效工作点。如果吸热温度过高，可能会引发材料耐受性问题，导致设备损坏或性能下降；而如果压力不足，则会显著降低工质的密度和传热能力，进而影响系统的整体热效率。为了实现最佳的热转化效益，可以通过引入模型预测控制技术和实时优化算法，对吸热温度和压力进行协同调节，确保两者在动态变化中始终保持最佳匹配状态，从而最大化系统的热转化效率和运行稳定性。

3.2 涡轮机转速与热交换器传热效率的匹配

涡轮机的转速与热交换器的传热效率之间的匹配是确保能量传递过程的连贯性和效率的关键因素。涡轮机的转速需要根据进口工质的状态和发电负荷的需求进行调整，同时还需要与回热器以及冷却器的传热效能进行协调。如果涡轮机的转速过高或过低，都有可能打破热力系统的平衡，导致系统的波动和效率的损失。为了解决这个问题，可以采用基于数据的自适应调控策略，这种策略可以动态地调整涡轮机的转速和热交换器的操作参数，从而确保整个系统始终在高性能的区间内运行。通过这种方式，可以最大程度地提高能源利用效率，减少能源浪费，实现能源的高效利用。

3.3 能量储存系统与涡轮机的匹配

能量储存系统与涡轮机的匹配，其核心目标是为了解决能源供需之间的时间差异问题，确保电力供应的持续性和稳定性。在这个过程中，储热系统的放热速率和温度需要与涡轮机的进口要求进行精确匹配，以避免因参数不匹配而导致的功率输出波动或者设备损伤。为了实现这一目标，我们可以通过预测光照条件与负荷需求，优化储热释放策略与涡轮负荷分配，从而在多变的环境下实现能源的平滑供应与系统的高效调度。具体而言，当太阳辐射强度较高且电力需求较大时，储热系统应以较高速率释放热能，以满足涡轮机高负荷运行的需求；反之，在太阳辐射较弱或电力需求低谷时段，储热系统应适当降低放热速率，避免涡轮机在低负荷下运行效率低下或过热损坏。此外，还需考虑储热介质的热物理特性与涡轮机进口工质参数的兼容性，确保能量传递过程中的热损失最小化。通过精确匹配能量储存系统与涡轮机的运行参数，不仅可以提升整个太阳能光热发电系统的灵活性与可靠性，还能进一步推动其在可再生能源领域的应用与发展。

3.4 系统控制与故障诊断策略的协同优化

系统控制与故障诊断策略的协同优化对于确保超临界 CO_2 循环太阳能光热发电系统的长期稳定运行至关重要。系统控制策略需具备高度自动化与智能化，能够实时监测并分析系统运行状态，根据预设算法自动调节关键参数，以应对外部环境变化与内部设备老化带来的挑战。通过集成先进的传感器网络、大数据分析平台与人工智能算法，系统能够实现对吸热温度、压力、涡轮机转速、热交换器效率等多维度参数的精准控制，确保整个热力循环处于最优状态。同时，故障诊断策略的制定与实施对于预防突发故障、减少停机时间具有重大意义。通过综合运用振动监测、热成像分析、流体动力学模拟等手段，系统能够提前识别潜在故障点，如涡轮机叶片磨损、热交换器结垢、管道泄漏等，并采取相应预防措施。此外，建立故障预警与应急响应机制，确保在故障发生时能够迅速定位问题根源，启动备用设备或调整运行模式，最大限度地减少故障对系统整体性能的影响。

4 结语

综上所述，超临界 CO_2 循环太阳能光热发电系统作为一种创新的能源转换技术，展现出了巨大的应用潜力和发展前景。通过对系统热力性能的优化与参数匹配策略的研究，不仅可以提高系统的发电效率和稳定性，还能降低成本，推动太阳能光热发电技术的商业化进程。未来，随着技术的不断进步和创新，相信该系统将在全球能源领域发挥更加重要的作用，为缓解能源危机、保护环境做出更大的贡献。同时，我们也需要持续关注该技术的发展动态，加强国际合作与交流，共同推动全球能源转型和可持续发展。

参考文献

[1]张祖贤.太阳能热互补联合循环系统集成机理与全工况特性.2023.华北电力大学(北京),PhDdissertation.

[2]汪梦军,etal."新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述."中国电机工程学报 43.05(2023):1672-1694.doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221466.

[3]冯帅帅.考虑新能源发电调控的电力系统频率稳定控制.2022.武汉大学,MAthesis.

[4]张楠.太阳能热互补联合循环发电系统动态性能及运行策略研究.2021.华北电力大学(北京),PhDdissertation.

[5]睢士贤.光热集成燃气蒸汽联合循环发电系统的运行优化研究.2020.东北电力大学,MAthesis.

[6]张成.太阳能梯级集热发电系统优化设计及其建模研究.2018.华中科技大学,PhDdissertation.