

超临界汽轮机热力循环系统的优化与节能分析

阳静

黔西电厂, 贵州 毕节 551501

摘要: 本文深入探讨了超临界汽轮机热力循环系统的优化与节能分析。文章概述了超临界汽轮机热力循环系统的工作原理与构成特点, 随后分析了当前系统存在的主要问题。在此基础上, 提出了三点优化策略, 包括改进热力循环结构、提高汽轮机本体效率以及优化热力系统辅助设备。这些策略旨在提升系统热效率, 减少能源消耗, 实现绿色可持续发展。通过理论与实践相结合, 为超临界汽轮机热力循环系统的优化提供了有力支持。

关键词: 超临界汽轮机; 热力循环系统; 热效率

Optimization and Energy Saving Analysis of the Thermal Cycle System of Supercritical Steam Turbine

Yang Jing

Qianxi power plant, Bijie, Guizhou 551501

Abstract: This paper deeply discusses the optimization and energy saving analysis of the thermal cycle system of supercritical steam turbine. This paper summarizes the working principle and constituent characteristics of the thermal cycle system of supercritical steam turbine, and then analyzes the main problems of the current system. On this basis, three optimization strategies are proposed, including improving the thermal cycle structure, improving the efficiency of steam turbine and optimizing the auxiliary equipment of thermal system. These strategies aim to improve the thermal efficiency of the system, reduce energy consumption, and achieve green and sustainable development. Through the combination of theory and practice, it provides strong support for the optimization of the supercritical steam turbine thermal cycle system.

Keywords: supercritical steam turbine; thermal cycle system; thermal efficiency

随着全球能源需求的不断增长, 提高能源利用效率已成为当前工业发展的重要方向。超临界汽轮机作为高效发电设备, 其热力循环系统的性能优化与节能分析具有重要意义。本文旨在通过深入研究, 为超临界汽轮机热力循环系统的优化提供理论参考和实践指导。

一、超临界汽轮机热力循环系统工作原理

(一) 超临界状态利用

超临界汽轮机热力循环系统的工作原理首先体现在对超临界状态的巧妙利用上。在物理学中, 超临界状态指的是物质在高于其临界温度和临界压力下的状态, 此时物质不再有明显的气液分界面, 而是形成一种介于气体和液体之间的特殊状态——超临界流体。超临界汽轮机正是利用了这种超临界流体的独特性质, 通过高温高压条件下的超临界工质(通常是水蒸汽)来驱动汽轮机进行发电。在这种状态下, 超临界工质具有较高的密度和较低的粘性, 使得其在汽轮机中的流动更加顺畅, 能量转换效率更高。同时, 超临界工质在汽轮机中的膨胀过程也更加充分, 能够释放出更多的热能, 转化为机械能, 进而驱动发电机发电。因此, 超临界汽轮机热力循环系统能够实现高效能量转换, 提高发电效

率, 降低能源消耗, 是当前电力工业中一种重要的发电方式^[1]。

(二) 再热循环

在超临界汽轮机热力循环系统中, 再热循环是一个至关重要的环节。通过引入再热过程, 系统能够显著提高蒸汽的温度, 进而提升整个热力循环的热效率。具体来说, 蒸汽在高压缸做功后, 会被抽出并送入再热器中进行再次加热, 随后再送回中、低压缸继续做功。这一过程的实现, 依赖于精密的再热器设计和高效的热能传递机制。再热器中的加热过程通常利用锅炉中剩余的高温烟气来完成, 使得蒸汽温度得以大幅度提升^[2]。通过再热, 蒸汽在进入中、低压缸时能够保持较高的过热度, 有效避免了因蒸汽湿度过高而引起的汽轮机叶片侵蚀和效率下降等问题。此外, 再热循环还能够在一定程度上提高汽轮机的稳定性和安全性。由于蒸汽温度的提升, 汽轮机内部的热应力得到了有效降低, 从而延长了设备的使用寿命。同时, 再热循环也有助于优化

汽轮机的做功过程，使其更加适应高参数、大功率的发电需求。

（三）汽水分离与再热

汽水分离与再热环节是超临界汽轮机热力循环系统中不可或缺的一部分，它直接关系到汽轮机工作介质的纯净度和热能利用效率。在汽水分离器中，高温高压的湿蒸汽经过特殊设计的分离结构，能够有效地将水分从蒸汽中分离出来，确保进入汽轮机的是干燥且纯净的蒸汽。这一过程对于防止汽轮机内部积水和提高热效率至关重要。分离出的蒸汽随后进入再热器进行加热。再热器通常位于锅炉的尾部烟道或专门的再热烟道中，利用锅炉烟气中的余热对蒸汽进行二次加热，使其温度提升至更高的水平。这一过程不仅提高了蒸汽的热能含量，还使得蒸汽在进入汽轮机后续做功阶段时能够保持较高的过热度和干度，从而减少了因蒸汽湿度过高而引起的能量损失和汽轮机部件的侵蚀。汽水分离与再热的紧密配合，不仅提高了超临界汽轮机热力循环系统的整体热效率，还确保了汽轮机运行的安全性和稳定性。

二、超临界汽轮机热力循环系统的构成与特点

（一）系统构成

超临界汽轮机热力循环系统是一个复杂而高效的能量转换系统，主要由锅炉、汽轮机、凝汽器和再热器等关键设备构成，这些设备协同工作，共同完成了从热能到机械能，再到电能的转换过程。锅炉是热力循环系统的起点，它负责将燃料中的化学能转化为高温高压的蒸汽热能^[6]。蒸汽随后进入汽轮机，推动汽轮机叶片旋转，从而将热能转换为机械能。汽轮机通常由高压缸、中压缸和低压缸等多个部分组成，以适应不同压力和温度的蒸汽做功需求。凝汽器则位于汽轮机的末端，负责将汽轮机排出的乏汽冷凝成水，以便重新送回锅炉进行加热，形成闭式热力循环。这一过程中释放出的热量被冷却水带走，排放到环境中。再热器则位于锅炉和汽轮机之间，用于对从高压缸排出的蒸汽进行二次加热，以提高蒸汽的过热度和做功能力，从而进一步提升系统的热效率。这些关键设备的紧密配合和高效运行，共同构成了超临界汽轮机热力循环系统的核心^[11]。

（二）高效性

超临界汽轮机热力循环系统以其卓越的高效性而著称，这一特点主要体现在其能够充分利用燃料能量，最大限度地减少能源浪费。相较于传统的亚临界汽轮机热力循环系统，超临界系统在提高蒸汽温度和压力方面有着显著的优势。在超临界状态下，水的物理性质发生显著变化，使得蒸汽在汽轮机中的膨胀过程更加充分，能量转换效率更高。此外，超临界汽轮机热力循环系统还通过采用先进的再热技术和汽水分离技术，进一步提高了系统的热效率。再热技术通过加热从高压缸排出的蒸汽，使其在进入中、低压缸时能够保持较高的温度和压力，从而增加了蒸汽在汽轮机中的做功能力。汽水分离技术则确保了进入汽轮机的蒸汽是干燥且纯净的，避免了因水分存在而引起的能量损失和汽轮机部件的侵蚀。正是这些先进技术的应用，使得超临界汽轮机热力循环系统能够实现高热效率，为电力工业的发展提供了强有力的

支持。

（三）稳定性

超临界汽轮机热力循环系统在设计上充分考虑了稳定性这一关键因素，确保系统能够在各种复杂多变的工况下稳定运行，从而保障发电质量和安全性。这一特点的实现，得益于系统内部各组件的精密配合和高效协同^[6]。在系统运行过程中，锅炉、汽轮机、凝汽器和再热器等关键设备均经过严格的质量控制和性能测试，以确保其能够在高温高压等极端环境下长期稳定运行。同时，系统还配备了先进的控制系统和监测设备，能够实时监测系统的运行状态和参数变化，及时发现并处理潜在的安全隐患。此外，超临界汽轮机热力循环系统还采用了多种冗余设计和故障保护措施，以应对可能出现的突发情况。这些措施包括备用蒸汽源、紧急停机装置等，能够在系统故障或异常情况发生时迅速响应，确保系统的安全性和可靠性^[6]。

三、超临界汽轮机热力循环系统存在的问题

（一）汽轮机本体效率不足

超临界汽轮机热力循环系统在实际运行过程中，常面临一个严峻挑战，即汽轮机本体效率不足。这一问题的直观表现是缸效率等关键性能指标的实际运行值显著低于设计预期。缸效率作为评估汽轮机做功能力的重要标尺，其数值的高低直接反映了蒸汽在汽轮机缸内膨胀过程中能量转换的充分程度。当缸效率偏低时，意味着蒸汽蕴含的热能未能得到充分的机械能转化，这不仅削弱了系统的热效率，还可能导致能源的浪费^[7]。深入探究汽轮机本体效率不足的原因，我们发现这是一个由多重因素交织而成的复杂问题。汽轮机内部结构设计的不合理性、叶片在长期运行中因磨损或积垢而性能下降、以及密封性能的退化等，都是造成这一问题的关键因素。这些因素不仅直接影响了汽轮机的做功效率，还可能加速设备的磨损和老化进程，进一步缩短了设备的使用寿命。因此，提高汽轮机本体效率，已成为优化超临界汽轮机热力循环系统性能、提升能源利用效率的重要课题。

（二）热力系统辅助设备不完善

超临界汽轮机热力循环系统的经济性和运行效率，不仅深受汽轮机本体性能的影响，热力系统辅助设备的完善程度同样起着举足轻重的作用。在实际运行中，冷端系统及设备、回热系统及设备等关键辅助设备的不完善性，成为了制约系统性能提升的瓶颈。冷端系统作为热力循环中的重要一环，承担着将汽轮机排汽冷凝成水并排出系统热量的重任。然而，当凝汽器传热效率不足或冷却塔散热能力受限时，系统的排汽压力会随之升高，这不仅会增加汽轮机的背压，降低其做功效率，还会提高系统的热耗率，从而影响整体的经济性。回热系统则通过抽取汽轮机做功后的部分蒸汽来加热给水，以回收利用部分热能，提高系统的热效率。然而，若回热设备存在泄漏或传热性能退化等问题，将导致给水加热不足，降低系统的热经济性^[8]。

（三）汽水品质问题

汽水品质是衡量超临界汽轮机热力循环系统性能的一个重要

标尺。汽水品质的好坏，直接关系到汽轮机通流部分的清洁度和运行效率。当汽水品质差，即蒸汽和给水中的杂质含量过高时，汽轮机的通流部分，如叶片、缸体等，就会遭受严重的结垢问题^[9]。这些垢层的存在，不仅极大地增加了汽轮机的流动阻力，使得蒸汽在流通过程中的能量损失显著增加，降低了流通效率，而且还会严重破坏汽轮机的热力平衡状态。热力平衡的失衡，会进一步导致汽轮机的相对内效率大幅度下降，使得整个热力循环系统的性能大打折扣。汽水品质问题若得不到有效解决，将严重制约超临界汽轮机热力循环系统的高效、稳定运行，甚至可能引发一系列的安全隐患。

四、超临界汽轮机热力循环系统的优化策略

（一）改进热力循环结构

针对超临界汽轮机热力循环系统，优化其热力循环结构是提升系统性能的关键策略之一。具体而言，可以通过改进再热循环和汽水分离过程，来显著提高蒸汽品质和系统热效率。在再热循环方面，可以优化再热器的设计和布置，提高再热蒸汽的温度和压力，使其更加适应汽轮机后续做功阶段的需求。同时，通过调整再热器的加热方式和加热时间，可以进一步减少蒸汽在再热过程中的能量损失，提高系统的热效率。在汽水分离过程方面，可以引入先进的汽水分离技术和设备，如高效汽水分离器、多级汽水分离系统等，以提高蒸汽的纯净度和干度。纯净度和干度更高的蒸汽能够减少汽轮机内部的积水和侵蚀现象，从而提高汽轮机的运行稳定性和使用寿命。综上所述，通过改进热力循环结构，优化再热循环和汽水分离过程，可以显著提升超临界汽轮机热力循环系统的蒸汽品质和系统热效率，为电力工业的发展提供更加高效、可靠的能源转换方式。

（二）提高汽轮机本体效率

提高汽轮机本体效率是优化超临界汽轮机热力循环系统的另一项重要策略。这主要通过技术改进和性能优化来实现，特别是针对缸效率等关键性能指标的提升。在技术改进方面，可以研发

和应用新型汽轮机材料，如高强度、耐高温、耐磨损的合金材料，以提高汽轮机缸体和叶片的强度和耐久性，减少能量损失。同时，优化汽轮机内部流道设计，减少流动阻力和涡流损失，也是提高缸效率的有效途径。在性能优化方面，可以通过调整汽轮机运行参数，如蒸汽流量、压力和温度等，使其更加适应实际工况需求，提高汽轮机的做功能力和效率。此外，定期对汽轮机进行维护和检修，保持其良好的运行状态，也是确保汽轮机本体效率稳定提升的重要保障。综上所述，通过技术改进和性能优化，可以显著提高超临界汽轮机热力循环系统的缸效率等关键性能指标，从而提升整个系统的热效率和经济性^[10]。

（三）优化热力系统辅助设备

优化热力系统辅助设备是提升超临界汽轮机热力循环系统稳定性和经济性的重要手段。这主要包括对冷端系统、回热系统等关键辅助设备的完善和优化。在冷端系统方面，可以升级凝汽器设备，采用更高效的传热材料和结构，提高凝汽器的传热效率和冷凝效果。同时，优化冷却塔的设计和运行，增强其对环境条件的适应性，确保凝汽器出口水温始终保持在较低水平，从而降低汽轮机排汽压力，提高系统热效率。在回热系统方面，可以改进回热加热器的设计和布置，提高加热器的传热性能和效率。通过优化回热系统的流程和控制策略，减少给水加热过程中的能量损失，提高系统整体的经济性。综上所述，通过完善和优化冷端系统、回热系统等热力系统辅助设备，可以显著提升超临界汽轮机热力循环系统的稳定性和经济性，为电力工业的发展提供更加可靠、高效的能源转换方案。

五、结论

本文通过对超临界汽轮机热力循环系统的优化与节能分析，提出了针对性的优化策略。这些策略旨在提升系统热效率，减少能源消耗，为超临界汽轮机热力循环系统的优化提供了有力支持。未来，随着技术的不断进步和创新，超临界汽轮机热力循环系统的性能将得到进一步提升，为能源领域的可持续发展做出贡献。

参考文献

- [1] 沈春, 邵显北. 超超临界机组汽轮机热力性能优化设计探讨 [J]. 发电设备, 2022, 36(05): 350-354.
- [2] 周林君. 大唐当涂 660MW 超临界汽轮机节能提效改造方案应用与性能分析 [D]. 东南大学, 2022.
- [3] 王婧, 杨金福, 段立强, 等. 高参数超超临界燃煤机组汽轮机热力系统优化设计 [J]. 发电技术, 2021, 42(04): 480-488.
- [4] 段金鹏, 李兴华, 徐殿吉. 350MW 超临界汽轮机通流改造热力设计 [J]. 汽轮机技术, 2020, 62(04): 251-254.
- [5] 税杨浩. 超高温超超临界汽轮机热力系统的参数优化 [D]. 中国石油大学(北京), 2020.
- [6] 苏杭, 赵霄, 张博, 等. 涡扇发动机再压缩 CCA 系统热力循环耦合分析 [J]. 大连理工大学学报, 2024, 64(05): 495-506.
- [7] 纪现凯, 翟鹏霄, 樊雅青. 电厂汽轮机运行问题与对策分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(08): 166-167.
- [8] 高宇飞, 曹雁青. 石化企业自备电厂热力循环系统仿真建模与优化研究 [J]. 中外能源, 2022, 27(04): 92-96.
- [9] 任强, 燕淑丰. 联合循环发电系统能耗热力学分析 [J]. 节能, 2021, 40(09): 9-12.
- [10] 唐建华, 王海桥, 孙定中. 基于热力循环理论的矿井中央泵房通风系统优化研究 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(09): 147-152.