面向碳中和目标的火电厂汽轮机低碳运行技术探索

蒲远

贵州黔西中水发电有限公司，贵州 黔西 551500

DOI:10.61369/ETQM.2025090003

摘　　要： 本文围绕碳中和目标，对火电厂汽轮机低碳运行技术展开深入探索。系统阐述了火电厂汽轮机运行现状及碳排放问题，从汽轮机本体优化、热力系统改进、能源综合利用等方面，分析了实现低碳运行的关键技术，包括高效通流设计、余热回收利用、多能互补集成等。通过理论研究与技术剖析，为火电厂汽轮机低碳化改造和运行提供技术参考，助力电力行业实现碳中和目标。

关 键 词： 碳中和；火电厂；汽轮机；低碳运行；节能技术

Exploration of Low-Carbon Operation Technology of Steam Turbine in Thermal Power Plant towards Carbon Neutral Goal

Pu Yuan

Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., Ltd., Qianxi, Guizhou 551500

Abstract: This article focuses on the carbon neutrality goal and delves into the low-carbon operation technology of steam turbines in thermal power plants. It systematically examines the current operational status and carbon emission issues of steam turbines in thermal power plants, analyzing key technologies for achieving low-carbon operation from aspects such as turbine optimization, thermal system improvements, and comprehensive energy utilization. These technologies include efficient flow design, waste heat recovery, and multi-energy integration. Through theoretical research and technical analysis, this article aims to provide technical references for the low-carbon transformation and operation of steam turbines in thermal power plants, thereby supporting the power industry's efforts toward carbon neutrality.

Keywords: carbon neutral; thermal power plant; steam turbine; low-carbon operation; energy saving technology

引言

随着全球气候变化问题日益严峻，实现碳中和已成为世界各国应对环境挑战的重要战略目标。我国提出力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和的 “双碳” 目标，这对各行业的绿色低碳转型提出了迫切要求。电力行业作为碳排放的主要领域，其碳减排成效对实现碳中和目标至关重要。火电厂在我国电力供应结构中占据主导地位，而汽轮机作为火电厂能量转换的核心设备，其运行效率和能耗水平直接影响着火电厂的碳排放。因此，探索火电厂汽轮机低碳运行技术，提高汽轮机的能源利用效率，降低其运行过程中的碳排放，是推动电力行业实现碳中和目标的关键举措。目前，国内外在汽轮机低碳运行技术方面已开展了诸多研究，但仍存在技术应用深度不足、系统集成度不高等问题。本文将系统探讨面向碳中和目标的火电厂汽轮机低碳运行技术，以期为行业发展提供有益参考。

一、火电厂汽轮机运行现状与碳排放分析

（一）汽轮机运行效率现状

当前，火电厂汽轮机的运行效率受到多种因素的制约。从设备本身来看，部分火电厂的汽轮机设备老化，通流部分存在磨损、腐蚀等问题，导致蒸汽流动阻力增大，能量转换效率降低。例如，叶片表面的磨损会改变其气动外形，使蒸汽在叶片通道内的流动状态恶化，造成能量损失增加。同时，汽轮机的调节系统性能也对运行效率有重要影响。传统的调节方式响应速度较慢，在负荷变化时难以快速、精准地调节汽轮机的进汽量和功率输出，容易导致汽轮机偏离最佳运行工况，从而降低运行效率。此外，运行环境和维护管理水平也会影响汽轮机的运行效率。例如，蒸汽品质不达标会导致汽轮机内部结垢，进一步增大流动阻力，降低效率 [1]。

作者简介：蒲远（1993.02-），男，汉族，贵州黔西人，本科，工作领域：火电厂集控运行。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（二）汽轮机碳排放来源

火电厂汽轮机的碳排放主要源于其热力循环过程中化石燃料的燃烧。在常规火电厂中，煤炭、天然气等化石燃料在锅炉内燃烧释放热量，将水加热成高温高压蒸汽，蒸汽推动汽轮机做功，实现热能向机械能的转换。然而，化石燃料燃烧过程中会产生大量的二氧化碳等温室气体。此外，汽轮机在运行过程中还存在一些辅助设备的能耗，如润滑油系统、冷却系统等，这些设备消耗的能源也间接产生碳排放。而且，汽轮机热力系统的泄漏问题也不容忽视，蒸汽泄漏不仅造成能量损失，还会导致碳排放增加[2]。

（三）碳中和目标对汽轮机运行的挑战

碳中和目标对火电厂汽轮机的运行提出了前所未有的挑战。一方面，要求汽轮机在保证电力供应稳定的前提下，大幅降低能耗和碳排放，这需要对汽轮机的设计、运行和管理进行全面优化。例如，提高汽轮机的热效率，减少单位发电量的碳排放，就需要采用更先进的热力循环方式和高效的设备部件。另一方面，随着可再生能源在电力系统中的占比不断提高，电网对火电厂的灵活性要求也越来越高。汽轮机需要具备更强的调峰能力，能够快速响应电网负荷变化[3]。但频繁的负荷调整会对汽轮机的运行稳定性和寿命产生不利影响，同时也增加了实现低碳运行的难度。此外，碳中和目标还促使火电厂加快技术升级和改造，这对企业的资金、技术和人才都提出了更高的要求 。

二、汽轮机本体优化低碳运行技术

（一）高效通流设计技术

高效通流设计是提高汽轮机能量转换效率、实现低碳运行的关键技术之一。通过采用先进的气动设计方法，对汽轮机的叶片、喷嘴等通流部件进行优化设计，可以有效降低蒸汽在通流部分的流动阻力，提高蒸汽的做功能力。例如，采用三维气动设计技术，能够精确地模拟蒸汽在通流部件内的流动状态，根据模拟结果对叶片的型线、安装角等参数进行优化，使蒸汽在叶片通道内的流动更加顺畅，减少涡流和分离损失。同时，新型材料的应用也为高效通流设计提供了支持。采用高强度、低摩擦系数的材料制造叶片等部件，可以进一步降低能量损失，提高汽轮机的运行效率。此外，对通流部分的密封结构进行优化，减少蒸汽泄漏，也能有效提高汽轮机的效率，降低碳排放[4]。

（二）新型叶片材料与制造工艺

新型叶片材料和制造工艺的发展为汽轮机的低碳运行提供了新的途径。传统的叶片材料在高温、高压和高速蒸汽的冲刷下，容易出现磨损、腐蚀等问题，影响汽轮机的运行效率和寿命。而新型高温合金材料具有优异的高温强度、抗氧化和抗腐蚀性能，能够在更高的温度和压力条件下稳定运行，提高汽轮机的进气参数，从而提升热效率。例如，采用镍基高温合金制造叶片，可使汽轮机的进气温度提高，增加循环热效率[5]。在制造工艺方面，先进的增材制造技术（3D 打印）可以实现叶片复杂结构的精确制造，优化叶片的内部流道，进一步提高蒸汽的流动性能。同时，增材制造技术还可以减少材料浪费，降低制造成本 。

（三）先进调节系统应用

先进调节系统的应用能够显著提高汽轮机的运行灵活性和效率，助力实现低碳运行。现代数字电液调节系统（DEH）相比传统调节系统，具有响应速度快、调节精度高的优点。它能够实时监测汽轮机的运行参数，根据电网负荷变化和运行要求，快速、精准地调节汽轮机的进汽量和功率输出，使汽轮机始终保持在最佳运行工况。此外，基于智能控制技术的调节系统，如采用人工智能算法和专家系统，能够对汽轮机的运行状态进行智能分析和预测，提前调整运行参数，避免因负荷突变等因素导致汽轮机偏离最佳工况。这种先进的调节系统不仅提高了汽轮机的运行效率，还增强了其对电网负荷变化的适应能力，减少了不必要的能耗和碳排放[6]。

三、汽轮机热力系统改进低碳运行技术

（一）余热回收利用技术

余热回收利用是提高火电厂能源利用效率、降低碳排放的重要手段。汽轮机在运行过程中，会产生大量的余热，如排汽余热、疏水余热等。通过采用合适的余热回收装置，将这些余热进行回收利用，可以提高整个热力系统的能量利用率。例如，利用凝汽器余热加热生活用水或厂区供暖系统，实现能源的梯级利用。此外，采用余热锅炉回收高温烟气余热，产生蒸汽驱动汽轮机发电，进一步提高了能源的转换效率[7]。在余热回收利用过程中，关键在于选择高效的换热设备和合理的工艺流程，确保余热能够得到充分回收和有效利用，减少能源浪费，降低碳排放。

（二）热力系统优化集成

对汽轮机热力系统进行优化集成，能够消除系统中的能量损失环节，提高系统的整体性能。通过对热力系统进行全面的分析和诊断，找出存在的不合理之处，如管道布置不合理导致的阻力过大、系统匹配不当等问题，并进行针对性的改进。例如，优化蒸汽管道的走向和管径，减少蒸汽在管道内的流动阻力；合理调整热力系统中各设备的参数匹配，使整个系统在最佳工况下运行。同时，采用先进的热力系统仿真技术，对不同的优化方案进行模拟分析，选择最优的系统集成方案。热力系统的优化集成不仅可以提高汽轮机的运行效率，还能降低系统的能耗和碳排放，实现火电厂的低碳运行 。

（三）新型热力循环方式应用

新型热力循环方式的应用为火电厂汽轮机的低碳运行提供了新的思路。传统的朗肯循环在能源利用效率上存在一定的局限性，而一些新型热力循环方式，如联合循环、回热循环等，能够更好地利用能源，提高热效率。例如，燃气 – 蒸汽联合循环将燃气轮机和蒸汽轮机有机结合，先利用燃气轮机燃烧天然气产生高温高压燃气推动燃气轮机做功，排出的高温烟气再进入余热锅炉产生蒸汽驱动蒸汽轮机发电，实现了能源的梯级利用，提高了整个系统的发电效率，降低了单位发电量的碳排放。此外，先进的回热循环通过增加回热加热器，将汽轮机抽汽用于加热给水，提高了给水温度，减少了锅炉的燃料消耗，

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

从而降低了碳排放。

四、汽轮机能源综合利用低碳运行技术

（一）多能互补集成技术

多能互补集成技术是实现火电厂低碳运行的重要发展方向。将火电厂汽轮机与可再生能源发电系统，如太阳能、风能等进行有机集成，形成多能互补的能源供应体系。例如，在火电厂周边建设太阳能光伏电站或风力发电场，将可再生能源产生的电力与火电厂的电力进行统一调配和管理。当可再生能源发电充足时，火电厂可以降低负荷运行，减少化石燃料的消耗和碳排放；当可再生能源发电不足时，火电厂再增加负荷，保证电力供应的稳定。同时，还可以将火电厂的余热、余压等能源与其他能源形式进行互补利用，进一步提高能源的综合利用效率，降低火电厂的整体碳排放[8]。

（二）储能技术结合应用

储能技术与汽轮机的结合应用能够有效提高火电厂的灵活性和能源利用效率。在火电厂中配置适当的储能装置，如电池储能系统、抽水蓄能等，可以在电力负荷低谷时，将汽轮机多余的电能储存起来；在电力负荷高峰时，再将储存的电能释放出来，满足电网的用电需求。这样既可以减少火电厂在负荷低谷时的不必要发电，降低燃料消耗和碳排放，又能提高火电厂在负荷高峰时的供电能力，增强对电网的支撑作用[9]。此外，储能技术还可以平抑可再生能源发电的间歇性和波动性，使火电厂与可再生能源更好地协同运行，实现能源的优化配置和低碳利用。

（三）碳捕集与封存（CCS）技术

碳捕集与封存（CCS）技术是实现火电厂近零排放的关键技术之一。在火电厂汽轮机运行过程中，对燃烧产生的二氧化碳进行捕集，然后通过管道运输或其他方式将其封存于地下深处，如枯竭的油气田、深部咸水层等。目前，碳捕集技术主要有化学吸收法、物理吸附法等。化学吸收法是利用化学溶剂与二氧化碳发生化学反应，将其吸收分离；物理吸附法则是利用吸附剂对二氧化碳的物理吸附作用进行捕集。虽然 CCS 技术在应用过程中还存在成本较高、能耗较大等问题，但随着技术的不断发展和完善，其将在火电厂实现碳中和目标的过程中发挥重要作用，为火电厂汽轮机的低碳运行提供有力支持[10]。

五、结论

实现碳中和目标是我国电力行业面临的重大挑战和发展机遇。火电厂汽轮机作为电力生产的核心设备，其低碳运行技术的研究与应用对于推动电力行业的绿色低碳转型至关重要。本文通过对火电厂汽轮机运行现状与碳排放分析，探讨了汽轮机本体优化、热力系统改进、能源综合利用等方面的低碳运行技术。高效通流设计、新型叶片材料与制造工艺、先进调节系统等技术能够提升汽轮机本体的性能；余热回收利用、热力系统优化集成、新型热力循环方式等技术有助于改进汽轮机热力系统；多能互补集成、储能技术结合应用、碳捕集与封存等技术为汽轮机能源综合利用提供了新途径。这些技术的综合应用和不断创新，将有效提高火电厂汽轮机的能源利用效率，降低碳排放，助力我国电力行业实现碳中和目标。未来，还需要进一步加强相关技术的研发和应用推广，解决技术应用过程中面临的成本、技术集成等问题，推动火电厂汽轮机低碳运行技术的持续发展。

参考文献

[1] 景斯阳，朱艺蒙，倪尔璐 . 面向碳中和目标的中国新一代核电站公众性与感官设计创新 [J]. 包装工程，2025，46(08)：27-37.DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.08.003.

[2] 郑贵滨，李燕，吴卓 . 面向碳中和目标的广州市土地利用优化与碳储量评估 [J/OL]. 环境科学，1-15[2025-05-31].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202410257.

[3] 党海生 . 面向碳中和目标的绿色给排水设计策略探讨 [J]. 绿色中国，2025，(02)：130-132.

[4] 朱婧，刘金娜，房学宁，等 . 面向碳达峰碳中和目标的省域碳减排仿真与对策研究——以河北省为例 [J]. 生态经济，2024，40(07)：20-26.

[5] 陈诗一，王畅，郭越 . 面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择 [J]. 管理科学学报，2024，27(04)：1-20.DOI：10.19920/j.cnki.jmsc.2024.04.001.

[6] 谭雪萍，耿涌，宋晓倩，等 . 构建面向碳中和目标的物质流分析研究框架——基于文献计量视角 [J]. 中国人口·资源与环境，2023，33(12)：145-158.

[7] 任松彦，汪鹏，林泽伟，等 . 面向碳中和目标的不同碳达峰时间对经济社会的影响研究——以广东省为例 [J]. 生态经济，2023，39(05)：34-42+117.

[8] 孙晓伟 . 面向碳中和目标的循环经济发展路向与治理理路分析 [J]. 乌鲁木齐职业大学学报，2023，32(01)：21-26.

[9] 潘继平，焦中良 . 面向碳达峰碳中和目标的中国油气发展战略思考 [J]. 国际石油经济，2022，30(08)：1-15.

[10] 张铜柱，赵明楠，孙锌，等 . 面向碳中和目标的汽车产品碳足迹标识应用研究 [J]. 中国汽车，2022，(07)：17-23.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.