

火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用研究

全宏宇, 李铁军, 贾艳辉

华润电力(仙桃)有限公司, 湖北 仙桃 433000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050016

摘 要 : 本文从通流系统改造、余热回收、辅机优化等技术应用,到成本控制、方案适配、安全规范等应用原则,再到监测体系建立、分阶段改造、参数优化、效果评估等应用策略入手,对火力发电厂汽轮机组节能降耗技术进行论述。旨在证明该研究能够有效提升汽轮机组的运行能效,为火力发电厂汽轮机组的高效低碳运行提供了全面的技术与策略支撑。

关 键 词 : 火力发电厂; 汽轮机组; 节能降耗; 通流系统; 余热回收

Application Research on Energy Saving and Consumption Reduction Technology of Steam Turbine Unit in Thermal Power Plant

Tong Hongyu, Li Tiejun, Jia Yanhui

China Resources Power (Xiantao) Co., Ltd., Xiantao, Hubei 433000

Abstract : This paper examines energy-saving and consumption-reduction technologies for steam turbine units in thermal power plants, covering technical applications such as flow system retrofitting, waste heat recovery, and auxiliary equipment optimization, along with application principles including cost control, solution adaptation, and safety compliance. The study further explores implementation strategies including monitoring system establishment, phased renovation, parameter optimization, and effectiveness evaluation. It demonstrates that these measures can significantly enhance operational efficiency of steam turbine units, providing comprehensive technical support for achieving high-efficiency and low-carbon operation in thermal power plants.

Keywords : thermal power plant; steam turbine unit; energy conservation; flow system; waste heat recovery

随着全球对能源节约与环境保护的重视不断提升,火力发电作为能源供应的重要组成部分,其汽轮机组的节能降耗水平直接影响着电厂的经济效益与环境效益。当前,许多火力发电厂的汽轮机组在运行过程中,由于技术应用不够完善、缺乏科学的应用原则与策略指导,导致能耗较高,未能充分发挥节能潜力。如何通过合理应用节能降耗技术,遵循科学的应用原则,实施有效的应用策略,以实现汽轮机组的高效运行,成为行业内亟待探索的重要课题。基于此,开展火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用研究,具有重要的现实意义与应用价值。

一、火力发电厂汽轮机组节能降耗技术

(一) 汽轮机通流系统升级改造技术

从精细化诊断开始,借助高精度传感器组测定通流部分各级压力温度分布,结合 CFD 流场仿真计算叶片气动效率衰减系数,当该系数超过8%时即判定为需重点改造区域。结构优化阶段采用第三代弯扭联合成型叶片,通过数值模拟将叶片进口角优化至18°出口角调整为22°,使气流分离损失降低35%;隔板汽封更换为蜂窝式结构,通过激光干涉仪控制安装间隙在0.12mm以内,较传统梳齿式减少汽封漏汽量40%。转子改造中实施高速动平衡处理,使残余不平衡量控制在50g·mm以内,轴承座采用预应力加固工艺提升刚度5%^[1]。改造后开展热态性能试验,通过汽轮

机热耗率测试验证通流效率提升幅度,满负荷试运行期间连续监测叶片振动幅值,确保其不超过0.15mm,汽封泄漏量稳定在设计值的90%以下,最终实现机组热耗率降低4.5%以上。

(二) 乏汽余热深度回收技术

进行余热参数精准测定,使用精度等级0.2级的热流计连续72h监测凝汽器出口乏汽参数,当乏汽温度稳定在45℃且流量波动小于5%时,建立回收系统数学模型。核心设备安装时,在凝汽器喉部布置钛合金材质的表面式换热器,换热管采用Φ19×1.2mm规格,通过液压胀接工艺使管板与换热管的接触压力达到120MPa;循环水系统增设CO₂跨临界热泵装置,工质流量控制在80m³/h,压缩机功率匹配150kW,可将余热温度提升至85℃^[2]。系统集成时开发基于模糊控制的联动模块,当乏汽压

力低于4.5kPa时自动打开30%开度的旁通阀，热泵运行频率随余热负荷变化在30～50Hz区间动态调节。投运后每月进行能效测试，确保余热回收率稳定在65%以上，年回收热量折合标煤量不低于800吨，同时通过在线清洗装置使换热器传热系数维持在初始值的90%以上。

（三）辅机系统变频调节优化改造

开展为期30天的负荷特性测试，每小时记录一次辅机运行参数，绘制出流量在30%～100%区间的能耗曲线，当变负荷工况下能耗波动超过15%时确定改造范围。设备选型采用10kV级高压变频器，额定容量按辅机电机功率的1.2倍配置，矢量控制模式下转速控制精度达到 $\pm 0.5\text{rpm}$ ，谐波畸变率控制在5%以内。改造实施时先对电机进行绝缘电阻测试，确保其值大于500M Ω ，轴系找正偏差控制在0.05mm/m以内；电气连接采用铜排硬连接方式，通过PLC编程实现4～20mA信号的无缝对接，开发负荷反馈调节算法使辅机功率随主机负荷变化的响应时间控制在2s以内^[3]。调试阶段进行50%、75%、100%三个负荷点的性能测试，优化PID参数使转速超调量小于5%，稳态误差控制在1%以内；安装0.5级精度的电能表实时监测能耗，确保改造后辅机平均节电率达到30%以上。投运后建立月度维护制度，通过红外测温仪监测变频器模块温度不超过60℃，电容量衰减量控制在初始值的10%以内。

二、火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用原则

（一）基于能效提升目标开展成本控制

建立全生命周期成本核算体系，将技术改造的前期投入、中期运维与后期能效收益纳入统一评估框架。核心在于通过增量成本效益分析确定合理的投入边界，即当单位能效提升所需的改造费用低于行业平均节能收益阈值时，方可推进实施。优先选择具有模块化设计的技术方案，通过分步投入降低初期资金压力，将通流系统改造拆分为静叶栅优化、汽封升级等独立单元，根据能效提升的边际效益动态调整实施节奏^[4]。成本控制并非单纯压缩投入，而是通过精准测算不同技术的节能贡献率，确保每一分投入都能产生可量化的能效回报，避免为追求低成本而选择节能效果有限的改造方案，最终实现短期投入与长期收益的动态平衡。

（二）改造方案适配机组运行特性

在技术选型前完成机组运行数据的系统性梳理，包括负荷波动范围、年运行小时数、蒸汽参数稳定性等关键指标，以此作为方案设计的基础依据。对于承担基荷的机组，应侧重提升满负荷工况下的运行效率，可优先选择通流系统深度改造等长效节能技术；对于调峰机组，则需兼顾变负荷工况下的能效稳定性，重点考虑变频调节、余热回收系统的快速响应能力^[5]。方案设计中需预留一定的调节余量，通过可变量化参数适应机组未来可能的运行模式变化，在辅机变频改造中采用宽频调速范围设计，使设备能在20%～100%负荷区间保持高效运行，避免因机组调峰需求变化导致技术方案提前失效。

（三）技术应用方案符合安全规范标准要求

所有节能改造措施必须以不降低机组原有安全冗余为前提，

严格遵循电力行业相关的设计标准与运行规程。在改造实施前，需开展专项安全评估，重点核查技术方案对机组关键参数的影响，通流系统改造后叶片的强度储备系数不得低于1.5，乏汽余热回收系统的压力试验值需达到设计压力的1.25倍。对于涉及热力系统、电气回路的改造，必须满足设备绝缘等级、热膨胀补偿等安全指标，高压变频器的绝缘水平需符合GB/T14549规定的3kV及以上电压等级要求^[6]。改造完成后，需通过第三方安全验收，验证各项安全保护装置的联动可靠性，确保技术应用不会引入新的安全风险点，实现节能效益与运行安全的协同保障。

三、火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用策略

（一）建立健全机组能耗实时监测体系

从监测维度的拓展着手，除常规的温度、压力、流量参数外，增加汽轮机缸体振动频率、润滑油温、轴封蒸汽用量等细节指标的监测，选用具有抗电磁干扰能力的智能传感器，布设时避开管道弯头和阀门阻力件区域，确保采集数据的代表性。数据处理层面引入边缘计算技术，在传感器就近节点完成初步数据清洗与特征提取，再通过加密传输协议发送至中央平台，减少数据冗余和传输延迟^[7]。平台分析模块需嵌入能耗诊断算法，能自动识别异常能耗模式，如蒸汽参数骤变时的能耗波动原因，并生成包含调节建议的分析报告。数据校验除常规校准外，每季度开展一次跨系统比对，将监测数据与机组DCS系统、SIS系统数据进行一致性校验，及时修正偏差，构建多层次的能耗数据校验网络。

（二）制定分阶段技术改造实施计划

构建节能潜力矩阵，将各项技术按节能幅度、改造难度、投资回报周期三个维度进行量化评分，根据矩阵分布确定阶段重点。启动前要完成基础数据储备，包括近三年的机组运行曲线、故障记录、维护成本等，为改造方案设计提供原始依据。实施中需建立动态协调机制，每周召开跨部门协调会，同步推进设备采购、施工进度与停机计划，对改造中出现的系统兼容性问题，组织技术团队48h内提出解决方案。验收环节引入第三方评估机构，采用盲测方式验证改造效果，验收标准不仅包含能效指标，还需考核改造后机组的调峰响应速度、设备噪音等衍生指标。各阶段之间设置缓冲评估期，根据前一阶段的实际节能数据调整下一阶段的技术参数，避免计划与实际脱节。

（三）优化蒸汽参数匹配运行工况

开展全负荷段的热力试验，绘制不同负荷下的蒸汽参数-能耗特性曲面，确定各负荷区间的参数优化区间，而非简单划分阈值。自动调节系统要引入预测控制算法，根据未来2h的负荷预测曲线提前调整蒸汽参数，若预测负荷从70%升至90%时，应提前15min逐步提升主蒸汽压力，减少参数突变带来的能耗损失^[8]。蒸汽管道维护要采用红外热成像检测技术，每半年进行一次全面扫描，精准定位保温薄弱点，对阀门、法兰等易漏部位采用可拆卸式保温结构，便于定期检查和维修。抽汽系统优化需建立多级联动调节逻辑，当某段抽汽量变化超过10%时，调整相邻抽汽段的参数，维持汽轮机内部的能量平衡，避免局部能量损失加剧。

（四）定期评估节能效果

构建多维度评估指标体系，除常规的汽耗率、热耗率外，增加单位能耗的污染物排放量、设备可用率等衍生指标，全面反映节能技术的综合效益。常规评估需采用对比分析法，不仅对比实际值与计划值，还要与改造前同期数据、同类型机组先进水平进行横向对比，找出差距所在。全面评估前要进行数据预处理，剔除极端天气、电网限负荷等外部因素对能耗数据的干扰，确保评估结果的客观性^[9]。评估报告需包含技术寿命预测内容，根据设备磨损速率、性能衰减曲线，预测当前节能技术的有效周期和后续维护重点。评估结果要与奖惩机制挂钩，将节能指标完成情况纳入各部门绩效考核，形成“评估－改进－激励”的闭环管理。

四、结束语

上述研究表明，通过综合应用汽轮机组节能降耗技术、严格遵循应用原则并实施科学的应用策略，能够显著提升机组的节能效果。通流系统升级改造、乏汽余热深度回收、辅机系统变频调节优化等技术的合理应用，可从设备层面直接降低能耗。基于能效提升的成本控制、适配机组特性的改造方案、符合安全规范的技术应用等原则，为技术应用提供了科学指引。健全的能耗监测体系、分阶段的改造计划、优化的蒸汽参数匹配以及定期的节能效果评估等策略，保障了节能工作的有序推进与持续有效。这些方面相互配合，形成了一套完整的节能降耗体系，有效解决了汽轮机组运行中的能耗问题，为其高效运行奠定了坚实基础。

参考文献

[1] 杨岩. 基于火力发电厂汽轮机组节能降耗技术研究 [J]. 机械工业标准化与质量, 2024(10): 44-46, 50.
[2] 郭慧佳. 浅析火力发电厂汽轮机组节能降耗措施 [J]. 中国设备工程, 2023(11): 89-91.
[3] 陈进, 王士学. 1000MW 火力发电厂汽轮机组节能降耗的策略分析 [J]. 电力设备管理, 2022(4): 189-191.
[4] 仇成孝. 火电厂汽轮机组节能降耗及经济运行研究 [J]. 数码设计 (上), 2021, 10(4): 93-94.
[5] 黄建. 火力发电厂汽轮机组节能降耗对策研究分析 [J]. 装饰装修天地, 2022(7): 115-117.
[6] 邹超. 试析火电厂汽轮机组节能影响因素及其降耗对策 [J]. 电力设备管理, 2021(5): 101-102, 165.
[7] 付海元. 火力发电厂汽轮机组的节能降耗方法论述 [J]. 电脑校园, 2024(12): 145-147.
[8] 赵敏. 浅谈火力发电厂汽轮机的高效节能与安全管理 [J]. 商品与质量, 2021(10): 68, 70.
[9] 贾卓, 吴家禹. 试析火力发电厂汽轮机运行存在的节能问题和应对策略 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021(4): 1985.