

汽轮机通流部分改造对电厂运行效率提升的影响分析

董赫伦

阜新发电有限责任公司, 辽宁 阜新 123000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040011

摘 要： 汽轮机通流部分改造是电厂效率提升的关键技术路径。本文深入分析了通流部分改造对电厂运行效率的多维影响。研究表明，精细化设计的通流部分能优化热力循环系统性能，提高热能向机械能转换效率；改善叶片流道结构和密封系统可增强设备变负荷运行灵活性，适应电网调峰需求。文章剖析了电厂在通流部分改造中面临的技术适配性难题、长期可靠性风险及运行维护动态调控困境，提出构建机组特性数据库、强化新材料性能验证及开发智能流场监测系统 etc 系统解决策略。实践证明，科学系统的改造方案显著提升电厂运行效率，降低燃料消耗，创造可观经济效益与环境效益，对推动电力行业绿色低碳转型具有重要意义。

关 键 词： 汽轮机；通流改造；电厂运行效率

Analysis of the Impact of Steam Turbine Flow Section Renovation on Power Plant Operating Efficiency Improvement

Dong Helun

Fuxin Power Generation Co., Ltd., Fuxin, Liaoning 123000

Abstract： The transformation of the flow passage of the steam turbine is a key technical path for improving the efficiency of power plants. This article provides an in-depth analysis of the multidimensional impact of the flow section renovation on the operational efficiency of power plants. Research has shown that finely designed flow paths can optimize the performance of thermal cycle systems and improve the efficiency of converting thermal energy into mechanical energy; Improving the blade flow channel structure and sealing system can enhance the flexibility of equipment operation under variable loads and adapt to the peak shaving needs of the power grid. The article analyzes the technical adaptability challenges, long-term reliability risks, and dynamic operation and maintenance control difficulties faced by power plants in the transformation of the flow section. It proposes system solutions such as building a unit characteristic database, strengthening the performance verification of new materials, and developing an intelligent flow field monitoring system. Practice has proven that the scientific and systematic transformation plan significantly improves the operational efficiency of power plants, reduces fuel consumption, creates considerable economic and environmental benefits, and is of great significance for promoting the green and low-carbon transformation of the power industry.

Keywords： steam turbine; flow transformation; power plant operational efficiency

引言

能源转化效率始终是电力行业永恒的追求。随着全球能源格局转型与环保要求日趋严格，提升现有电厂运行效率已成为电力企业技术创新的重点方向。汽轮机作为火电、核电等传统电厂的核心设备，其性能水平直接关系到电厂整体经济性与环保性。汽轮机通流部分改造作为一种投入适中且效果显著的技术路线，逐渐受到行业广泛关注。现阶段，国内外电力企业积极探索汽轮机通流部分改造技术，涵盖叶片几何优化、流道结构重构、密封系统升级等多个方面。实践证明，精心设计的通流部分改造方案能使机组热效率提升1-5个百分点，这对大型火电机组而言意味着每年可观的燃料节约与碳排放减少。然而，改造工程涉及复杂的热力学原理、材料科学与控制理论，技术难度与风险不容忽视。

一、汽轮机通流部分改造对电厂运行效率提升的意义

（一）提升热力循环效率

汽轮机通流部分改造对热力循环效率提升具有深远意义。热

力循环作为热能与机械能转换的核心环节，其效率水平直接决定电厂整体经济性能。汽轮机通流部分改造实质上是对能量转换过程中关键工质流动路径的优化重构，主要体现在叶片气动外形精细化设计、流道几何结构重塑、间隙控制精度提高等方面。这些

作者简介：董赫伦（1985.08-），男，汉族，辽宁阜新新人，学历：硕士研究生；职称：工程师；从事的研究方向：热能工程。

技术措施从根本上改变了蒸汽在通流部分中的膨胀特性，减少了多级叶片间的能量损失，显著降低了流动损失与漩涡损失。现代三维叶片气动设计理念引入后，叶片反动度分布更为合理，各级焓降分配更加均衡，汽轮机内部效率明显攀升。热力循环效率提升反映在朗肯循环有效利用可用能增加，背压合理降低，排汽品质提高等层面。从热力学第二定律角度分析，改造后系统熵增率降低，有效功率输出增大，燃料单耗下降，实现了能源资源利用率的根本性提高。电力企业因此获得长期稳定的经济收益，同时减轻环境负荷，满足节能减排要求。汽轮机通流部分改造代表电力工程技术精湛集成，在保证供电可靠性基础上实现效率与经济性的完美统一。

（二）增强变负荷运行灵活性

增强变负荷运行灵活性对于现代电力系统具有深远意义。汽轮机通流部分的改造优化能显著提升设备在负荷波动环境下的适应性与响应速度。当电网负荷呈现波动趋势时，改造后的汽轮机可迅速调整运行参数，实现负荷快速跟踪，减少调峰过程中的能量损耗。通流部分结构的精细化设计能够降低部分负荷工况下的气流紊乱程度，使蒸汽流动更为平稳，叶片受力更加均匀。改善后的流道形态有助于减小二次流损失，在低负荷区域保持较高的内效率。轴向间隙与径向泄漏的控制技术在负荷变化过程中表现出更佳的密封性能，减轻了能量散失。叶片材料与结构的优化强化了设备耐疲劳性能，延长了频繁调峰调频环境下的使用寿命。现代控制系统与改造通流部分的协同作用使汽轮机在更广泛的负荷范围内都能维持较高的运行效率。电厂因此获得更强的负荷调节能力，能够更好地适应电网调度指令，满足电网稳定性要求。汽轮机改造后的低负荷极限下降，为电厂带来了更大的运行裕度，增强了电力企业应对负荷谷值的能力^[1]。

二、电厂运行效率提升中对汽轮机通流部分改造的挑战

（一）技术适配性难题

技术适配性难题在汽轮机通流部分改造过程中表现为多维度的工程挑战。汽轮机通流系统作为能量转换的核心环节，其结构参数与运行特性存在严格的匹配关系，任何改造措施均需考虑原有系统的设计边界条件。现有汽轮机在长期运行过程中形成的独特磨损状态与性能衰减曲线，使得标准化改造方案难以直接应用，改造团队往往需面对每台设备的独特“个性”进行定制化设计。叶片型面优化与流道几何结构调整涉及复杂的热力学平衡与强度计算，改造后的流场特性变化可能引发级间参数不匹配、动静件间隙异常等工况。材料科学层面的限制同样不容忽视，新型高温合金与原有金属材料在热膨胀系数、抗氧化性能等方面存在差异，焊接界面的冶金相容性成为技术瓶颈。控制系统响应特性的重新标定也极具挑战，改造后的流量特性变化需与调节系统形成协调匹配，否则可能导致控制死区或过度响应。最为关键的是，这些技术适配性难题彼此交织影响，构成非线性的系统工程问题，单一环节的优化可能引发连锁反应，对系统整体性能产生

不可预见的波动。

（二）长期可靠性风险

汽轮机通流部分改造后的长期可靠性风险表现为多维度的系统性挑战。改造所引入的新材料与原有结构之间的冶金相容性随时间推移可能出现应力集中区，导致疲劳裂纹扩展速率超出设计预期。改造部件在长期热循环工况下，热态膨胀与冷态收缩的反复作用使得接口处易产生微小变形，逐渐积累成为影响整体运行稳定性的隐患。高温蒸汽长年累月的冲刷与腐蚀作用对改造部件的材料耐久性提出更高要求，异种材料界面处极易发生电化学腐蚀。改造引入的新型流道结构可能改变原有气动特性，长期运行中的气体流动状态偏离设计值，引发非稳态流动现象，加剧部件磨损。叶片改型带来的振动特性变化在长期运行中或与机组固有频率发生共振，形成疲劳损伤累积。汽轮机负荷变化时，改造部件的热应力分布与原设计存在差异，在反复启停过程中容易形成结构应力集中区，降低部件使用寿命。企业面临的挑战在于预测与评估这些长期可靠性风险，建立完备的监测与评估体系^[2]。

（三）运行维护的动态调控困境

运行维护的动态调控困境在汽轮机通流部分改造后日益凸显。汽轮机通流部件改造完成后，系统运行特性发生显著变化，原有的维护调控策略难以适应新的工况环境。动态调控面临参数多元耦合、系统响应非线性、工况变化复杂等理论难题。改造后的流道几何形状优化导致流体力学特性改变，引起振动频谱分布偏移，传统的振动监测阈值设定方法失效。热力系统平衡点迁移使得温度场分布规律发生变化，热应力监测难以准确捕捉潜在风险。调节系统的响应特性与原设计存在偏差，PID参数优化陷入局部最优解无法突破的困境。施工人员需掌握更高深的理论知识与实践经验，而培训体系建设滞后于技术更新速度。企业在维护策略上需平衡短期稳定性与长期可靠性，但缺乏科学的决策支持模型。预测性维护理论与实际应用间存在鸿沟，状态监测数据积累与分析方法尚不完善。动态调控标准难以界定，模糊控制逻辑与确定性控制需求之间的矛盾制约着调控精度的提升，改造后系统运行最优区间随时间演变，增加了维护决策的不确定性^[3]。

三、电厂运行效率提升中对汽轮机通流部分改造的策略

（一）构建机组特性数据库

构建机组特性数据库是汽轮机通流部分改造的核心基础工作。此类数据库应包含汽轮机各工况下的运行参数、通流部分几何特性、效率曲线、负荷变化特性等全面信息，形成机组“数字孪生”基础。机组特性数据库建设需采用高精度传感器布点采集实时数据，结合历史运行记录与维修档案，通过热力计算模型进行数据标准化处理。该数据库价值在于提供汽轮机通流部分当前效率状态的精确画像，揭示高低压缸、各级叶片、喷嘴室等关键部件的能量转换效率损失点。数据库还应纳入同型号机组对标数据，建立偏差识别机制，为精准定位改造区域与制定改造方案提供科学依据。数据驱动改造决策模式能显著降低改造风险，提

高投资回报率，实现从经验判断向数据支撑的方法论转变^[4]。

例如，企业可以在300MW 亚临界汽轮机改造项目中，建立包含5年运行数据的特性库。该数据库记录了机组在75%、85%、100% 等典型负荷下的主蒸汽参数、各级抽汽压力、各段焓降、振动频谱等关键指标。数据分析显示该机组中压缸第四级至第六级叶片区域效率损失达4.2%，远高于设计值。进一步对比叶片实测几何尺寸与原始设计图纸，发现叶顶间隙增大、叶片表面粗糙度变化是效率下降主因。电厂据此制定针对性改造方案，采用改进型三维扭曲叶片替换原有叶片，并优化叶顶密封结构。改造完成后，数据库新增的运行参数显示中压缸效率提升3.8个百分点，全负荷下机组煤耗降低5.2克/千瓦时，年节约标煤约8500吨。该案例证明，精确的机组特性数据库是实现精准改造、量化评估改造效果的关键支撑，为电厂技术改造决策提供了坚实基础。

（二）强化新材料性能验证

强化新材料性能验证是汽轮机通流部分改造的关键环节，对确保改造效果与运行安全具有决定性意义。新型耐高温合金、先进涂层材料以及复合材料在应用于汽轮机叶片、隔板与汽封等关键部件前，必须经受严格全面的性能评估。材料性能验证宜建立在实验室测试与实际工况模拟相结合的基础上，重点关注材料的力学特性、抗氧化能力、耐腐蚀性、热疲劳特性及长期蠕变性能。现代材料性能验证体系应结合数字孪生技术，构建材料性能数据库，实现材料性能参数的实时监测与动态评估。科学的验证流程包括材料基础性能测试、小样本试验、模拟工况测试与实际工况验证等递进阶段，确保新材料在极端工况下仍能保持稳定的性能指标，为汽轮机通流部分改造提供可靠的材料基础。

例如，企业可以在某大型火电厂600MW 汽轮机低压缸末级叶片改造项目中采用钛合金材料替代传统钢材，该材料强度高且质量轻，理论上能有效提升末级叶片的效率。验证团队设计了多层次性能验证方案：材料实验室进行基础力学性能测试，确定材料在高温高湿环境下的强度极限与疲劳特性；随后制作小尺寸试验叶片，置于模拟汽轮机工况的试验台进行上千小时的运行验证，记录振动频率、表面应力分布及形变数据；最终在燃气轮机试验机组上安装实尺寸叶片进行实际工况验证。验证过程发现该钛合金在湿蒸汽环境下的抗冲蚀性能优于设计预期，但在特定频率下存在共振风险。基于这些发现，设计团队调整了叶片结构参数与安装角度，并在材料表面增加特殊防护涂层，最终使改造后的汽

轮机热效率提升2.3个百分点，远超常规改造方案的效果，为电厂节省可观的燃料成本，并延长了设备检修周期。

（三）开发智能流场监测系统

智能流场监测系统构建于流体力学与热力学理论基础之上，为汽轮机通流部分改造提供精准诊断工具。该系统整合先进传感器与智能算法，形成对汽轮机内部流动状态的全面感知能力。流场监测的核心价值在于揭示常规检测难以发现的异常现象，如叶轮间隙流失控、流动分离以及涡流干扰等。多维度传感网络采集压力波动、温度梯度与振动特征，描绘出完整的流场动态图景。数据处理环节中，系统对海量信息进行筛选与模式识别，发掘效率损失的潜在因素。精细化的流场模型使工程师能够辨识需要优先改造的区域，制定有的放矢的改造方案，在确保安全稳定运行的同时，显著提升能量转换效率，减少燃料消耗，降低环境影响。

例如，企业可以在汽轮机高中低压各级叶片关键位置安装直径仅2毫米的微型压阻式传感器，构建包含200个以上测点的流场监测网络。温度监测方面，选用响应时间小于0.5秒的热电偶，确保捕捉到瞬态温度变化。振动监测采用压电式加速度传感器，覆盖1-10000Hz 频段，全面捕获机械振动特征。企业可建立基于工业以太网的高速数据传输通道，实现5毫秒内的数据刷新率。开发专属流场分析平台时，企业可整合流体计算模型与实测数据，创建数字孪生模型，直观展现流场异常区域。设置梯度预警机制，当流场参数偏离正常值5% 时发出初级警告，偏离10% 时启动应急响应。电厂技术人员可根据系统生成的流场优化建议，调整进汽参数与负荷分配。在改造实施环节，企业可依据流场分析确定叶片磨损热点，对特定区域进行定向强化或更换，避免全面改造带来的资源浪费。维护策略上，智能系统能够预测部件剩余寿命，使检修计划从周期性转向状态导向，提升设备利用率。

四、结束语

汽轮机通流部分改造作为提升电厂运行效率的重要技术路径，具有显著的经济效益与环境效益。本文系统阐述了汽轮机通流部分改造对热力循环效率提升与变负荷运行灵活性增强的双重作用，深入剖析了改造过程中的技术适配难题、可靠性风险与维护调控困境，提出了基于数据驱动、材料验证与智能监测的系统解决方案。

参考文献

- [1] 陈豪，谢尉扬. 660MW 机组复合式低加疏水温度异常分析 [J]. 电站系统工程, 2025, 41(01): 44-46+84.
- [2] 杨茂林，孙利娟，周帅，等. 基于通流改造的汽轮机启动特性研究 [J]. 河南电力, 2024, (S2): 6-9+21.
- [3] 雷浩，许敏磊，何天骄. 亚临界机组通流改造后末级低压加热器疏水不畅原因分析 [C]// 浙江省电力学会2023年度优秀论文集. 浙江浙能嘉华发电有限公司; , 2024: 366-372
- [4] 李伍亮，刘世云，刘跃东. 某百万通流改造机组通流面积优化及经济性比较 [J]. 汽轮机技术, 2024, 66(02): 97-98.