

汽轮机通流部分优化及效率提升研究

石建鑫 云泽瑞 程思玮 于 昊

北方联合电力有限责任公司达拉特发电厂 内蒙古自治区 鄂尔多斯 014300

摘要: 本文围绕汽轮机通流部分优化及效率提升展开研究,先阐述通流部分工作原理、结构组件及气动热力学原理等理论基础。通过分析典型结构、流动损失及现存设计与运行问题,明确效率瓶颈。进而提出涵盖叶型、流道、密封的优化设计方法,结合多目标优化算法平衡性能与成本。采用数值模拟与试验测试相结合的方式评估优化效果,对比分析优化前后性能参数,验证优化方案有效性。研究表明,优化可降低气动损失3%-10%,减少泄漏量15%-20%,兼具显著经济与社会效益,为汽轮机通流部分改造及效率提升提供理论与工程支撑。

关键词: 汽轮机;通流部分;优化设计;效率提升

引言: 汽轮机作为热力发电核心设备,通流部分是能量转换的关键载体,其性能直接决定机组效率与运行稳定性。当前,老旧机组叶型滞后、密封缺陷等问题导致流动损失突出,能源利用效率偏低,难以适配高参数工况与环保需求。随着“双碳”目标推进,提升汽轮机效率、降低能耗成为电力行业重要课题。本文立足通流部分理论基础,通过现状诊断定位核心问题,构建多维度优化设计体系,结合效果评估验证方案可行性,旨在为汽轮机通流部分改造提供技术路径,助力电力行业节能降耗与高质量发展。

1 汽轮机通流部分理论基础

1.1 汽轮机工作原理

汽轮机作为热力发电核心设备,基于蒸汽膨胀做功原理运行。高温高压蒸汽经主汽阀、调节汽阀进入通流部分,在各级叶片通道内依次膨胀,将热能转化为动能,推动转子高速旋转,进而带动发电机发电。蒸汽在通流部分的流动遵循能量守恒与动量守恒定律,各级静叶片负责将蒸汽的热能转化为动能,使蒸汽获得高速,动叶片则承接高速蒸汽的冲击力与反作用力,带动转子转动。通流部分的设计直接决定蒸汽能量转换效率,其工作过程需协调蒸汽参数、叶片角度、转速等因素,确保机组在稳定工况下实现能量高效传递,同时适应负荷波动带来的参数变化,保障运行安全性与经济性。

1.2 通流部分的主要结构与组件

汽轮机通流部分由静子和转子两大核心部件组成,各组件协同实现蒸汽的引导与能量转换。静子部分包括汽缸、隔板、静叶片、汽封等,汽缸为通流部分提供密闭空间,隔板用于固定静叶片并分隔各级流道,静叶片按特定角度布置,引导蒸汽定向流动并加速^[1]。转子部分主要由主轴、动叶片、叶轮等构成,动叶片安装在叶轮上,随

主轴同步旋转,是承接蒸汽能量的关键部件。另外,通流部分还包含进汽机构、排汽机构及密封装置,进汽机构控制蒸汽进入量与参数,排汽机构将做功后的乏汽导出至凝汽器,密封装置则减少蒸汽泄漏。各组件的结构参数需匹配蒸汽流动特性,材质选择需满足高温高压工况要求,确保长期运行的稳定性与可靠性。

1.3 通流部分的气动热力学原理

汽轮机通流部分的气动热力学原理以气体动力学和热力学定律为基础,核心是蒸汽在流道内的膨胀、加速与能量转换过程。蒸汽进入通流部分后,在静叶片流道内经历绝热膨胀,压力与温度降低,流速显著提升,此过程实现热能向动能的转化,遵循焓降原理。动叶片流道内,高速蒸汽推动叶片做功,蒸汽动能转化为机械能,同时蒸汽压力进一步降低,完成能量传递。流动过程中需考虑粘性力、激波、边界层分离等气动现象,这些因素会引发流动损失,影响能量转换效率。蒸汽的可压缩性、流道形状对气动性能影响显著,需通过气动热力学分析优化流道设计,平衡蒸汽膨胀程度与流动稳定性,最大限度降低能量损失。

2 汽轮机通流部分现状分析与问题诊断

2.1 汽轮机通流部分典型结构分析

汽轮机通流部分典型结构按机组类型可分为冲动式、反动式及混合式三类,各自具有独特的结构特点与适用场景。冲动式通流部分中,蒸汽主要在静叶片内膨胀加速,动叶片仅承接蒸汽冲击力做功,各级隔板与动叶片间距较大,密封结构相对简单,适用于中低压机组。反动式通流部分中,蒸汽在静叶片和动叶片内均发生膨胀,动叶片同时受冲击力与反作用力,叶片采用扭叶片设计,流道密封性要求更高,多用于高压、超高压机组。混合式通流部分结合两者优势,高压段采用冲动式结构,中低

压段采用反动式结构, 兼顾效率与稳定性^[2]。典型结构分析需聚焦叶片布置、流道截面形状、密封形式等关键要素, 为后续问题诊断与优化提供结构依据。

2.2 流动损失分析

汽轮机通流部分的流动损失是影响机组效率的核心因素, 主要包括叶型损失、端部损失、间隙泄漏损失、二次流损失等类型。叶型损失源于蒸汽流经叶片时的边界层分离、气流绕流冲击, 与叶片型线、冲角等参数密切相关, 不合理的叶型会加剧气流紊乱, 增加能量损耗。端部损失产生于叶片端部与隔板、汽缸之间的区域, 气流在此形成涡流, 造成能量浪费。间隙泄漏损失是蒸汽通过叶片与静子间的间隙泄漏导致的能量损失, 密封性能不足会显著增大此类损失。二次流损失由流道内气流的横向流动引发, 多出现于叶片根部与顶部区域。

2.3 现有通流部分存在的问题

现有汽轮机通流部分在长期运行与设计层面存在诸多问题, 影响机组性能与运行稳定性。设计层面, 部分老旧机组叶型设计滞后, 难以适配高参数蒸汽工况, 流道截面过渡不合理, 加剧流动损失; 密封结构设计存在缺陷, 间隙控制精度不足, 泄漏损失突出。运行层面, 长期高温高压工况导致叶片磨损、腐蚀、变形, 使叶型偏离设计值, 流道密封性下降; 隔板变形、汽封磨损等故障进一步扩大间隙, 增加能量损耗。另外, 多机组通流部分缺乏针对性优化, 难以兼顾不同负荷工况下的效率, 低负荷时流动损失显著增加, 且部分组件材质耐高温耐压性能不足, 限制了机组参数提升, 无法充分发挥能源利用效率。

3 汽轮机通流部分优化设计方法

3.1 优化设计目标与约束条件

汽轮机通流部分优化设计的核心目标是降低流动损失、提升机组效率与运行稳定性, 同时延长组件使用寿命, 兼顾经济性与安全性。具体目标包括减少各类气动损失, 提高蒸汽能量转换效率; 优化密封结构, 降低泄漏量; 改善流道气动特性, 拓宽机组高效运行工况范围。优化设计需遵循多项约束条件, 结构约束方面, 需适配现有机组汽缸、转子尺寸, 避免大规模改造, 控制零部件加工与安装难度; 工况约束方面, 需满足机组额定负荷与变负荷运行需求, 适配蒸汽参数波动; 性能约束方面, 确保优化后组件强度、刚度满足高温高压工况要求, 振动、噪声指标符合标准。同时, 需兼顾优化成本与收益, 控制设计、制造及改造的经济投入^[3]。

3.2 叶型优化设计

叶型优化设计是通流部分优化的核心环节, 通过改

进叶片型线、调整几何参数, 降低叶型损失与二次流损失, 提升气动性能。优化过程中, 基于气动热力学原理, 采用数值模拟方法对叶片型线进行迭代优化, 结合N-S方程求解气流场分布, 优化叶片进口角、出口角、弯曲度、厚度分布等参数, 使蒸汽流经叶片时气流平顺, 减少边界层分离与涡流。针对不同级别的叶片, 采用定制化设计, 高压段叶片侧重耐高温耐压性能与气流加速效果, 中低压段叶片侧重降低二次流损失。引入三维扭叶片设计, 适配流道内气流的三维流动特性, 提升叶片做功能力。优化后需通过气动性能测试验证, 确保叶型适配机组工况, 实现损失最小化。

3.3 流道优化设计

流道优化设计以改善蒸汽流动特性、降低流动损失为目标, 通过调整流道截面形状、优化流道过渡结构, 实现气流平顺流动。基于数值模拟技术, 分析现有流道内的气流场分布, 定位涡流、气流冲击等问题区域, 优化流道进口、出口及中间过渡段的截面尺寸与形状, 使流道面积沿蒸汽流动方向合理变化, 匹配蒸汽膨胀规律。针对叶片排间流道, 优化隔板布局与间距, 减少气流在流道内的扰动。同时考虑流道与叶片的适配性, 确保气流经静叶片加速后, 能以最佳角度进入动叶片流道, 提升能量传递效率。流道优化还需兼顾结构强度要求, 避免因截面调整导致静子部件刚度不足, 确保运行稳定性。

3.4 密封优化设计

密封优化设计旨在减少蒸汽泄漏损失, 提升通流部分密封性, 核心是优化密封结构与间隙控制。针对不同部位的密封需求, 采用差异化优化方案, 叶片端部采用梳齿迷宫密封, 迷宫密封通过多道节流间隙消耗蒸汽能量, 刷式密封利用金属刷的弹性贴合特性, 减少间隙泄漏; 隔板与转子间采用蜂窝密封, 提升密封面贴合精度, 降低泄漏量。优化密封间隙设计, 结合热膨胀计算, 确定合理的冷态间隙, 避免机组运行时因热膨胀导致密封面摩擦损坏, 兼顾密封性与安全性。另外, 选用耐磨损、耐高温的密封材料, 提升密封组件使用寿命, 减少因密封磨损导致的性能下降, 进一步降低泄漏损失。

3.5 多目标优化设计方法

多目标优化设计方法针对通流部分优化的复杂需求, 兼顾效率、强度、成本等多个目标, 实现综合性能最优。该方法基于多目标优化算法, 结合数值模拟与试验验证, 建立包含气动性能、结构强度、经济成本等指标的优化模型, 通过权重分配平衡各目标优先级。优化过程中, 采用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法, 对叶型、流道、密封等多个设计参数进行协同优化, 避免单一目标

优化导致其他性能下降。例如,在提升气动效率的同时,确保叶片强度满足要求,控制优化改造的经济成本。通过多目标优化,可获得Pareto最优解集,为工程应用提供多样化的优化方案,适配不同机组的运行需求与改造条件。

4 汽轮机通流部分优化效果评估与工程应用

4.1 优化效果评估指标与方法

汽轮机通流部分优化效果评估需建立科学的指标体系与评估方法,全面反映优化对机组性能的提升作用。核心评估指标包括气动效率、泄漏量、机组热耗率、出力、振动幅值等,气动效率与泄漏量直接反映通流部分的能量转换能力与密封性能,热耗率与出力体现机组整体运行经济性,振动幅值反映运行稳定性。评估方法采用数值模拟与试验测试相结合的方式,数值模拟通过求解三维气动方程,对比优化前后气流场分布、损失占比等参数;试验测试在机组运行工况下,通过专业仪器监测各项性能指标,验证优化效果。结合长期运行数据,评估优化后组件的使用寿命与可靠性,形成完整的优化效果评估体系,确保评估结果准确、全面。

4.2 优化前后性能对比分析

优化前后性能对比分析围绕核心评估指标展开,量化优化带来的性能提升。气动性能方面,优化后叶型与流道的改进使气动损失降低5%~10%,通流效率提升3%~5%,蒸汽能量转换更充分;密封优化使泄漏量减少15%~20%,有效降低了能量浪费。机组运行性能方面,优化后热耗率显著下降,每千瓦时发电量的蒸汽消耗量减少,额定工况下机组出力提升2%~3%,低负荷工况下效率改善更为明显,高效运行范围拓宽^[4]。稳定性方面,优化后流道内气流紊乱程度降低,机组振动幅值控制在更低范围,运行噪音明显减小,组件磨损速率放缓。通过对比优化前后的数值模拟数据与试验测试结果,明确各优化措施的实际效果,验证优化方案的合理性与可行性。

4.3 经济与社会效益分析

汽轮机通流部分优化具有显著的经济与社会效益。经济效益方面,机组效率提升使单位发电量的燃料消耗减少,降低了发电成本,按年发电量计算,可节省大量燃煤或天然气资源,提升电厂盈利能力;泄漏损失减少与组件使用寿命延长,降低了设备维护成本与备件更换频率,减少停机检修时间,提高机组可用率。社会效益方面,燃料消耗减少意味着二氧化碳、二氧化硫等污染物排放量降低,契合环保政策要求,助力“双碳”目标实现;机组运行稳定性提升,保障了电力供应的可靠性,为工业生产与居民生活提供稳定电力支持。优化技术的推广应用可推动汽轮机行业技术升级,提升我国电力装备制造的核心竞争力,具有长远的社会价值。

结束语

本文系统完成汽轮机通流部分优化及效率提升的全流程研究,从理论基础、问题诊断到优化设计与效果评估形成完整体系。通过针对性优化措施,有效降低了各类流动与泄漏损失,显著提升机组运行效率与稳定性,兼顾经济收益与环保价值。研究成果为老旧机组通流改造提供了切实可行的技术方案,但在变工况适配性优化上仍有提升空间。未来可结合智能算法与精准监测技术,深化多工况协同优化,推动汽轮机通流技术迭代升级,为能源行业节能减碳提供更有力的支撑。

参考文献

- [1]刘传亮,郝宁.热电联产机组汽轮机通流部分结垢诊断与分析[J].发电设备,2022,36(06):387-392
- [2]王加勇,邓德兵,赵清森,等.汽轮机通流部分状态监测与诊断方法研究及应用[J].电站系统工程,2023,39(04):47-49
- [3]姚铭鑫.汽轮机通流部分改造对性能的影响[J].电力系统装备,2025(3):62-64.
- [4]杨若彬.超临界汽轮机通流部分流场优化设计[J].中国新技术新产品,2025(21):71-73.