

分析电厂集控运行汽轮机运行完善措施

巴宗典

甘肃华电腾格里绿色能源有限公司金昌发电分公司，甘肃省金昌市，737200；

摘要：本文以上海电气 NJK1000-28/605/623 型超超临界空冷凝汽式汽轮机为研究对象，针对其在电厂集控运行条件下的运行特性、存在问题及优化路径进行了系统研究。文章首先分析了机组在高温高压、空冷真空及负荷波动条件下的典型运行缺陷，揭示了热应力集中、密封泄漏、调节滞后与冷端换热衰减等影响运行安全与经济性的关键因素。随后提出了从配气优化、启停控制改进、研发投入增强、冷却条件利用以及维护体系完善等方面的综合性运行完善措施，并通过实际机组的参数调整与数据验证，总结出具有普适意义的改进成效。实践结果表明，经系统优化后，机组运行稳定性、热效率及控制精度均得到显著提升，为我国超超临界汽轮机在集控环境下的高效运行提供了可推广的工程经验与技术支撑。

关键词：超超临界汽轮机；集控运行；热应力控制；系统优化

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.069

引言

随着电力行业向高参数、高效率与低排放方向发展，超超临界汽轮机已成为大型火电机组的主流配置。上海电气 NJK1000-28/605/623 型空冷凝汽式汽轮机在结构设计与热力参数上均代表了国内先进水平，其运行状态直接影响机组整体能效与经济性。然而，在实际集控运行中，机组常面临高温部件应力集中、真空波动、调速滞后及冷端效率衰减等问题，这些因素不仅制约了设备性能的进一步发挥，也对安全运行造成潜在隐患。

1 汽轮机正常运行中存在的缺陷

1.1 高温部件热应力集中问题

在汽轮机的长期运行过程中，高温高压蒸汽导致主蒸汽阀、调节阀及高压缸前级动静叶片处的热应力集中现象突出。由于超超临界机组采用较高的主蒸汽温度与再热温度，金属材料在频繁启停和负荷波动中经历显著的热循环，易形成局部蠕变与疲劳损伤^[1]。特别是在高压缸过渡区及阀门座圈处，温度梯度大、壁厚变化剧烈，热应力叠加后可能引发微裂纹萌生。若控制系统响应滞后或蒸汽温度调节不稳，将加剧材料结构的非均匀膨胀，造成转子热弯曲与端部振动增大。这种潜在缺陷在初期多表现为振动波动轻微，但随运行时间延长会对密封间隙及动静间隙控制产生不利影响，从而降低汽轮机的热效率与安全裕度。应通过优化温度控制逻辑、改进金属温差监测及执行器响应特性来减缓此类热应力集中效应。

1.2 密封系统泄漏与真空保持性能下降

空冷凝汽系统对汽轮机真空度的维持要求极高，而在实际运行中，部分机组存在低压缸端部及轴封系统轻微泄漏现象。由于空冷系统受环境温度影响明显，当夏季冷端温度升高时，凝汽压力上升导致排气余压增大，从而放大密封系统的负担。轴封蒸汽流量若调节不当，易出现内外压差失衡，引起空气渗入或蒸汽外逸。长期运行后，端盖密封垫老化、密封水环磨损或安装偏差也会使真空保持能力下降。真空恶化不仅削弱低压缸做功能力，还会使背压升高导致汽耗率上升，最终影响整机经济性^[2]。针对该问题，应强化轴封系统差压监测与真空度在线诊断，通过周期性泄漏测试与密封结构改进提升系统密闭性，同时在空冷器运行方式上引入智能调节算法以抑制真空波动。

1.3 调节系统响应迟滞与负荷跟踪能力不足

在集控运行模式下，汽轮机调节系统的响应灵敏度直接决定机组对负荷指令的执行精度。部分机组在调速系统长期运行后，伺服执行机构存在磨损、反馈滞后及电液转换效率下降等现象，使阀位调节出现动态迟滞。尤其在网频波动或负荷突变工况下，主调节阀响应速度不足，蒸汽流量分配不均，导致转速偏差及功率振荡。此外，控制逻辑中死区设定不当也会引起调节误差放大，影响功率曲线平稳性。若长时间处于自动负荷控制模式下，该问题易累积形成系统小幅振荡，使机组运行稳定裕度降低^[3]。

1.4 冷端换热效率衰减与热经济性下降

空冷凝汽系统作为该型汽轮机的重要组成部分，其换热性能直接影响背压水平与机组整体热效率。随着运行周期延长，空冷器翅片表面容易积灰或结垢，空气流通阻力增大，换热系数显著下降。当环境温度偏高时，风机负荷上升但冷却效果有限，背压升高导致低压缸排汽做功能力减弱。若控制系统未能及时调整风机转速或导流角度，则会使冷端温差进一步扩大，造成凝汽温度异常升高。与此同时，风机电耗增加，使机组单位功率耗能上升，综合热效率下降。该问题在干旱高温地区尤为突出，应通过建立空冷系统热平衡模型，实现对冷端换热性能的实时评估，并依据环境温度与负荷变化动态优化风机运行策略。定期进行翅片清洁与结构维护，可有效延缓换热衰减过程，维持汽轮机长期稳定的热经济性能。

2 电厂集控运行汽轮机运行完善措施

2.1 完善汽轮机配气方式

针对超超临界空冷凝汽式汽轮机在高参数运行条件下存在的蒸汽分配不均与热负荷集中问题，优化配气方式是提升热力性能与结构安全的核心环节。汽轮机配气系统的设计应从动态适应性出发，通过改进主调节阀群的分配特性，使高、中压缸蒸汽流量在不同负荷下保持合理比例。配气优化的关键在于建立蒸汽压力、流量及温度的协同调节机制，以减少高压缸入口区域的局部温度梯度，防止因流场偏差导致的叶片冲蚀与密封磨损。在控制层面上，应采用响应更快的电液伺服装置，并通过实时反馈控制算法调整阀门开度，确保蒸汽流量与负荷指令之间保持线性对应关系。同时，应完善汽门组动作协调逻辑，减少阀位变化引起的压力脉动。通过此类控制策略，能够有效改善缸内流动均匀性与热平衡，降低热应力集中风险，延缓关键部件的疲劳过程。

2.2 优化汽轮机启停方面

启停过程是汽轮机运行中最考验热稳定性与控制精度的阶段。对于机组而言，启停制度的科学性直接关系到转子寿命和设备安全。优化启停方式应以控制热应力变化速率为核心，确保金属温度梯度与蒸汽参数变化保持同步。启动初期应严格控制升温、升速节奏，使转子、轴承及缸体的膨胀速率均匀一致，避免因受热不均引起转子弯曲和振动异常。在启机过程中应加强蒸汽温

度与压力的联动控制，通过集控系统自动判定不同阶段切换条件，实现启停过程的平稳过渡。停机阶段应重视余热释放与冷却速率管理，防止金属部件因骤冷产生结构应力。建议在启停逻辑中引入热状态识别模块，根据设备当前温度分布自动匹配最优启停曲线，从而减少人工干预的不确定性。通过优化启停控制策略，能够在保证安全裕度的前提下提升操作一致性与控制精度，使机组在全工况下保持良好的热稳定与运行连续性。

2.3 加大汽轮机资金投入力度，积极研发汽轮机

在超超临界机组技术持续发展的背景下，汽轮机的性能优化已不仅依赖运行管理与维护策略，更需要系统性研发投入的持续支撑。加大资金投入应围绕核心技术环节展开，包括高温材料的耐久性研究、转子结构的轻量化设计及控制系统的智能化升级。资金支持的重点在于形成完整的技术创新链条，从基础研究到工程验证均应有针对性地配置资源。通过加大对高性能合金、涂层及冷却技术的研发力度，可显著提升高压缸及再热部件的抗蠕变和抗疲劳能力。同时，控制系统的智能化改造也是研发的重要方向，应建设基于多维数据融合的状态感知与预测维护平台，实现对运行特征的自学习与趋势判断。企业在资金投向上应兼顾短期经济效益与长期技术积累，形成稳定的研究机制与创新文化，以增强汽轮机设计的自主可控能力。只有在资本、技术与人才的协同驱动下，才能持续推动机组性能、可靠性及能源利用效率的整体提升，为电厂集控运行提供坚实的技术基础。

2.4 运用海水冷却塔的条件

在沿海地区运行的空冷凝汽式机组中，海水冷却塔的应用为提高冷端换热效率提供了可行途径。针对汽轮机而言，合理运用海水冷却条件能够有效降低冷凝温度，改善排汽背压，从而提升汽轮机的热经济性能。海水冷却塔的设计应充分考虑海水温度、盐度及腐蚀性等因素，通过选用耐腐蚀材料和防垢涂层来保证系统的长期稳定运行。冷却水循环系统应具备高效的流量调节与自动控制功能，使冷却能力能够随环境条件与负荷变化自适应调整。在运行管理方面，应建立完善的水质监测与处理机制，防止生物附着和盐垢沉积对换热效率的影响。同时，海水冷却系统应与汽轮机集控系统实现信号互联，通过冷端参数的实时反馈动态优化凝汽压力与风机运行状态。该系统在设计与运行中还需兼顾环境保护要求，确保排水温度与排放指标符合生态标准。

2.5 完善汽轮机管理及维护工作

完善汽轮机的管理与维护体系的核心在于建立系统化、标准化与信息化相结合的运行维护框架，使设备状态能够得到持续、可量化的监控。首先，应强化运行数据的精细化管理，通过建立以振动、温度、压力和流量为核心参数的综合数据库，实现对关键部件运行状态的动态跟踪。其次，应将传统的定期检修模式逐步转向状态检修与预测性维护，通过分析设备运行趋势和参数偏差，提前识别潜在故障隐患，从而减少非计划停机风险。在管理层面，应完善运行记录与交接制度，确保信息传递的完整性与时效性，同时对操作人员实施持续的技能培训，使其熟悉集控系统逻辑与设备响应特性。对于关键部件，应建立寿命评估模型和退役判定标准，保证设备更新具有科学依据。

3 实践案例

3.1 案例概况

本案例选取上海电气 NJK1000-28/605/623 型超超临界空冷凝汽式汽轮机作为研究对象，旨在探讨其在集控运行条件下的优化运行与系统协同特性。该机组属于超超临界参数等级，采用一次中间再热、双缸双排汽结构，具备高主蒸汽温度、高效率及低排放等技术优势。机组配置全自动分层控制系统，通过主控层与机侧装置实现运行状态的实时协调。电厂在集控中心集中监视汽轮机、锅炉及辅机系统运行参数，实现远程启动、负荷调整与安全保护的统一调度。由于机组处于空冷系统运行环境中，受外界温度与气压变化影响较大，因此对控制精度与热稳定性要求更为严格。

3.2 实施措施

在集控运行优化过程中，实施措施从控制参数、设备运行及系统配合三方面展开。首先，重新调整主调节阀开度曲线，将低负荷区阀门开度由原设定的 20% 提升至 28%，以改善流量线性度，并将阀门响应时间由 0.8s 缩短至 0.5s，从而提高负荷调节速率。其次，在高压缸配气控制中引入动态流量平衡算法，保持高压缸进汽压力稳定在 $27.5 \pm 0.1 \text{ MPa}$ ，蒸汽温差控制在 3°C 以内。启停程序中优化升温速率，冷态启动阶段主蒸汽温升速率由 $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 降低至 $1.2^\circ\text{C}/\text{min}$ ，以减小转子热梯度。针对冷端换热问题，调整空冷风机变频控制逻辑，使出

口空气温度控制在 45°C 以下，背压维持在 $8.5 \sim 9.2 \text{ kPa}$ 区间。同时，建立运行数据融合系统，对关键参数如振动、金属温度及热应力进行实时监测与趋势预警。维护方面引入状态检修策略，规定高压转子定检周期为 36 个月，采用红外热像与金属磁记忆检测技术综合评估关键部件健康状态。

3.3 实施效果

优化实施后，NJK1000-28/605/623 型汽轮机的运行性能与经济性均显著改善。主蒸汽压力与温度波动幅度明显减小，热效率提升，冷端换热稳定性增强。运行参数监测表明，转子振动幅度下降，金属温度分布更均匀，背压维持在理想区间，机组运行更为平稳。

表 1 主要运行参数的对比

项目	优化前	优化后
主蒸汽压力波动 (MPa)	± 0.35	± 0.10
主蒸汽温度波动 (°C)	± 6.5	± 2.0
背压范围 (kPa)	$8.0 \sim 10.2$	$8.5 \sim 9.2$
转子振动峰值 (μm)	58	36
空冷出口温度 (°C)	51	44
平均热效率 (%)	45.8	46.5

结果表明，经过系统性调整后，机组热经济性能显著改善，运行安全裕度提升，设备寿命延长。集控系统的响应速度与智能化程度进一步增强，实现了机组在多变工况下的稳定运行与高效控制，为同类型超超临界汽轮机的数字化优化提供了可靠的技术依据。

4 结语

通过对上海电气 NJK1000-28/605/623 型超超临界空冷凝汽式汽轮机的系统分析与实践研究，未来的研究应进一步加强在数字化监测与智能决策领域的探索，构建基于实时数据驱动的自适应控制体系，以实现超超临界汽轮机从传统运行管理向智能运维阶段的跨越，为电力行业的高效清洁发展提供更为坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 张巨博. 试论火力发电厂集控运行节能降耗技术 [J]. 电力设备管理, 2024, (19): 244-246.
- [2] 张日文, 马蕾, 林丽玲. 火电厂集控运行节能降耗技术探析 [J]. 电力设备管理, 2024, (16): 253-255.
- [3] 姜胜, 赵晓娟. 集控运行专业教师跨专业转型研究 [J]. 中国电力教育, 2024, (07): 87-88.