

汽轮机凝汽器真空度偏低原因诊断与改进方法

姜嘉航

华能蒙东公司海拉尔热电厂，内蒙古自治区呼伦贝尔市，021000；

摘要：汽轮机凝汽器真空度偏低多因传热效率下降、空气侧泄漏增加、循环冷却条件波动，导致排汽能级上升，削弱整套机组经济性，这一核心问题的解决，需先厘清外界环境、设备状态与运行参数共同构成的影响机理，诊断泄漏路径、换热面污垢分布、喷淋与循环水流量变化等关键点。提升真空稳定性，可通过强化换热表面清洁、优化冷却水流结构、改善气侧密封性能、完善运行监测手段，快速识别并持续改善偏低真空，构建故障特征导向的诊断链条，结合现场参数动态调整规律，形成切实可行的改进路径，让凝汽器在各类工况下维持高效稳定的真空状态。

关键词：凝汽器真空度；汽轮机；传热效率；空气侧漏；运行优化

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.021

引言

凝汽器是汽轮机排汽能级控制的核心部件，真空水平对机组效率起关键影响，真空中度偏低时，排汽焓值上升，导致能量利用率下降，还可能引发机组负荷波动，影响真空的因素涵盖冷却水温度、流量等外部条件，以及换热管束清洁度、设备密封状况、运行调节方式。这些因素在一定范围内出现偏差，真空水平就会呈现持续或瞬态下降，放大系统能耗，需建立从问题表现到成因识别再到改进措施的完整方案，让凝汽器真空控制在多变工况下保持稳定，为提升汽轮机整体性能提供稳定支撑。

1 凝汽器真空中度偏低的表现及机理特征

1.1 真空下降的典型运行迹象

凝汽器真空中度偏低时运行参数会出现明显变化，排汽压力升高是核心信号，机组负荷调节难度增加，排汽温度同步上升，真空中度呈持续波动，关联冷却水温度、循环水量及空气不凝物含量的细微变动，真空中度偏低时，汽侧膨胀条件受限，汽轮机末级排汽动能难以转化为可用能量，排汽饱和程度提高^[1]。部分机组末级叶片附近湿蒸汽含量增加，凝结水温度上升，通流部分出现轻微振动，真空中度变化幅度超出允许区间，会引发凝汽器内局部温差不均，换热区域利用率下降。

1.2 影响排汽能级的关键因素

排汽能级受多种物理量综合影响，冷却水温度是核心参数，高水温缩小换热温差，排汽难以快速凝结，饱和压力上移，循环水流量不足时，管束外侧流动速度降低，局部传热系数下降，冷凝能力减弱，换热管内外表

面污垢层厚度变化影响显著，污垢增加形成额外导热阻力，排汽需在更高能级下完成凝结。空气及不凝物会改变排汽流动状态，在管束表面形成附着层，减少有效换热面积，降低蒸汽分压力，喷淋系统、抽真空设备及循环水泵的运行状态对排汽能级产生连锁影响，任一环节异常都可能改变凝结界面温度 - 压力关系，影响真空中度。

1.3 偏低真空中度形成的内部驱动链条

凝汽器真空中度偏低多由多种因素内部形成连续作用链条，换热面积聚污垢后，导热阻力增加，蒸汽在高于设计值的饱和温度下完成相变，排汽压力同步上升，空气侧泄漏加剧这一趋势，不凝物在管束表面聚集，缩小蒸汽有效传热区域，抽气系统负荷升高，冷却水系统流量分布不均时，部分区域冷却能力不足，凝汽器内温度场形成明显差异，局部真空中度快速破坏。温度、压力分布异常扩大后，末级排汽通道产生额外流动阻力，排汽动能难以有效释放，多重变化叠加，相同工况下机组真空中度稳定性下降，凝结过程逐渐脱离高效换热状态，形成从污垢、漏气到能级提升的完整驱动链条，最终导致真空中度持续偏低。

2 凝汽器真空中度偏低的主导成因识别

2.1 换热受阻导致的传热能力下降

换热受阻多源于管束表面形成各类附着层，包括水垢、泥沙沉积和生物膜，这类沉积物不断增厚，增加导热路径热阻，管外蒸汽凝结过程放缓，有效换热面积持续缩减，蒸汽无法快速完成相变，仅能在更高饱和温度与压力下维持凝结，真空中度出现下降，除污垢影响外，

管内流动状态变化也会造成传热受阻，流速偏低区域形成温度边界层，内侧传热系数降低^[2]。部分管束堵塞或冷却水分配不均，会使凝汽器内部换热区间形成冷热不均的区域差异，压力场与温度场偏差逐步扩大，排汽侧凝结界面向高能级偏移，整体传热能力偏离设计工况，最终表现为真空度下降。

2.2 空气侵入引起的气侧负荷增加

空气与不凝物进入凝汽器后，在管束外表面形成附着层，蒸汽与金属表面无法直接接触，局部传热速率下降，不凝物在低速区域容易堆积，使蒸汽分压力降低，凝结温度偏离应有范围，引发排汽压力上升，空气积聚同时增加抽气系统处理负荷，使其在一定范围内无法清除多余不凝物，气侧分压短时间内形成累积。密封点老化、法兰连接间隙增大、循环水系统负压波动，都会为空气侵入提供路径，气侧负荷进一步加重，空气浓度达到某一临界水平时，凝结界面位置后移，蒸汽有效换热通道缩短，真空下降呈现稳定趋势。

2.3 循环冷却条件波动带来的真空不稳定

循环冷却条件波动表现为水温、流量及水质的变化，这些变化直接影响凝汽器冷却能力，水温升高使换热温差缩小，蒸汽凝结速率减慢；流量不足降低管束外湍动程度，局部冷却不充分，循环水系统出现泵效降低、滤网阻力增加或分配通道淤积，水量在凝汽器内部分布不均，部分区域处于弱冷却状态。冷却能力波动改变凝结界面稳定性，造成凝汽器内部温度分布失衡，真空度出现短时波动，水质变化也会对换热产生影响，微生物繁殖或悬浮物增加加速污垢形成，传热系数下降，这些因素共同作用下，真空水平难以保持稳定，形成周期或持续的偏低趋势。

3 面向真空恢复的针对性改进措施

3.1 提升换热面的有效清洁度

换热面清洁度提升可通过多种手段达成，在线清洗与停机化学清洗的组合能在不同工况下保持管束表面洁净，在线清洗装置借助循环磨球或微刷结构持续处理管内壁，减缓污垢形成速度，维持管内传热系数稳定，化学清洗适用于沉积较厚或成分复杂的污垢，控制酸碱度与反应时间即可去除导热阻力沉积层^[3]。加强循环水过滤能力、优化水质处理方案、减少生物附着物滋生，可从源头降低污垢负荷，换热面清洁度改善能提升蒸汽凝结速率，稳定凝结界面，使排汽压力回落正常范围，为真空恢复提供基础保障。

3.2 强化密封系统的可靠性

密封系统可靠性提升依赖结构完善与运行维护双重保障，凝汽器空气侧泄漏多集中在接缝、法兰、胶垫及检修门部位，改进密封材料、提升装配精度、加强连接部位预紧力控制，可减少空气侵入通道，运行阶段采用负压测试、示踪气体检测等手段发现微量漏点，借助快速密封剂或结构修复技术及时处理。抽气设备性能与密封可靠性紧密相关，完善抽气器蒸汽供应、保持喷射器或真空泵稳定运行，可及时排出不凝物，结构密封与空气抽排能力双向提升，减轻气侧负荷，使蒸汽在凝结区域保持较高纯度，助力排汽压力下降与真空恢复。

3.3 优化冷却水系统运行组织

冷却水系统运行组织优化可围绕改善流量分配、提升水力条件、稳定冷却水温度展开，循环水量需随负荷变化动态调整，使管束外侧流动速度维持在高效换热区间，水压不足时，提升泵效、减少管道阻力或清理淤积区域可改善水力状况，让冷却水在凝汽器内分布更均匀，水温控制至关重要，高温季节增加补水量、改善冷却塔运行或采用喷雾降温，可降低入水温度。强化滤网清洁、旁滤系统运行及水质控制，减少悬浮物与微生物进入凝汽器，从源头提升冷却效率，这些措施改善凝结界面温差条件，促使排汽压力逐步下降，为真空度恢复提供稳定冷却支撑。

4 真空运行质量的持续提升策略

4.1 建立真空状态的动态监测链

真空运行质量稳定依赖关键参数连续监测，构建动态监测链可早期捕捉真空状态细微变化，监测链包含压力、温度、流量、气侧负荷及抽气设备工况等多维信号，多点布置的传感器采集数据，形成凝汽器内部状态的时序映射，实时比对监测数据，可识别偏离正常曲线的趋势，准确定位异常区域，排汽压力与冷却水温差的联动变化可判断换热面衰减情况，不凝物含量变化能分析密封状态潜在风险^[4]。监测系统与智能分析模块协同运作，可依据历史工况建立预测模型，在真空下降实际恶化前发现早期征兆，为后续运行调整提供依据，完整监测链能推动真空控制从被动响应转向主动调控，维持运行品质可控。

4.2 完善运行参数的协同调节方法

真空度稳定需多个运行参数形成协调关系，涵盖冷却水量、抽气设备负荷、循环水温度、汽侧排汽量，任一参数偏移，需其他参数及时补偿以维持系统平衡，高温季节冷却水温度升高，可增加循环水流量、提升喷淋效率或调整抽气设备运行等级，维持凝结界面所需温差

条件，抽气系统调节关键，负荷需与不凝物产生速率匹配，过低会导致气侧分压攀升，过高则可能增加能耗、引发负压波动。运行参数协同调节基于实时监测结果，借助工况映射模型确定最佳操作区间，再根据机组负荷变化动态修正，使排汽压力始终稳定，各参数形成的平衡机制可减轻单项波动影响，提升真空控制韧性。

4.3 构建以故障特征为核心的诊断模式

真空下降常伴随多种故障特征，构建特征识别为核心的诊断模式，可在复杂运行环境中快速区分不同类型异常，诊断模式需建立故障与参数变化的映射关系，漏气故障多表现为不凝物浓度上升加快，换热受阻则体现为冷却水温差缓慢增大且伴随凝结水温度抬升，归类这些特征，可形成指向性判据体系，引入数据处理算法，可借助趋势分析、特征提取及模式识别技术，在大量工况数据中识别隐藏故障路径，缩短定位时间。诊断模式构建需考虑不同工况组合的表现差异，建立多场景特征库可提升诊断结果适用性，以故障特征为核心的模式能提高识别精度，为真空运行稳定提供可靠技术支撑。

5 凝汽器真空控制的稳定化路径构建

5.1 多工况下的真空维持机制

真空维持机制需适应机组不同负荷、季节及冷却条件的运行变化，让凝结过程在广泛工况区间保持稳定，真空维持依托换热效率、空气抽排能力与冷却水供给状态的动态平衡，负荷升高导致排汽量增加时，调整冷却水量与抽气系统处理能力，可确保凝结界面不被推向高能级^[5]。低温季节水温降低易使真空过度升高，引发部分区域汽蚀风险，需通过节流调节或改变水力分配方式维持系统稳定，高温季节需强化冷却塔运行、提升循环水流速，避免真空因冷却能力不足下降，不同工况的维持机制通过参数联动、结构适应与策略优化实现，保障真空控制在多变条件下的可靠性。

5.2 关键设备性能的长期保障方式

真空控制稳定性依托凝汽器本体、循环水泵、抽气装置、冷却塔及相关管网等关键设备的长期性能，设备性能保障以周期化维护为基础，通过检修计划与状态评估体系，让关键部件保持设计工况的运行能力，凝汽器管束需定期检测磨损、腐蚀与污垢沉积情况，必要时采取补焊、管堵或化学处理恢复换热能力，抽气系统的喷嘴、真空泵叶轮及密封元件需保持几何精度，确保不凝物排出速率满足真空维持需求。循环水泵性能通过监测扬程、轴功率与流量变化判断效率是否下降，冷却塔气

水比偏移时，可调整配水装置或填料状况恢复冷却效率，多环节长期保障能让系统各组件在长期运行中维持稳定性。

5.3 真空控制体系的整体协同框架

真空控制体系需实现监测、调节、诊断与执行多环节协同，使各子系统运行中形成信息互通与反馈闭环，协同框架包含参数采集层、分析决策层和执行调节层三部分，参数采集层实时采集压力、温度、流量、不凝物浓度及设备运行状态等数据，为后续判断提供基础，分析决策层依据工况模型及运行规律处理采集数据，识别异常趋势并给出调节指令，让抽气系统、冷却水系统及运行方式响应真实需求。执行调节层将调节策略作用于现场，通过流量分配、喷淋调整、换热区清洁周期优化等方式实现真空稳定，框架内部反馈机制可将调节效果实时返回分析层，使控制过程持续修正偏差，保障真空水平在复杂条件下高效稳定。

6 结语

凝汽器真空调度的形成机制、影响因素及控制路径，梳理后呈现传热、密封、冷却与运行策略构成的综合链条，真空稳定性取决于换热面洁净度维持、空气侧负荷管控及冷却水系统优化，依赖监测、诊断与调节的协同作用，提升方向在于构建智能化真空管理模式，依托数据驱动预测方法、设备性能长期评估机制及多工况适应策略，让凝汽器在复杂动态的运行环境中保持高效稳定，为机组整体性能提升持续提供支持。

参考文献

- [1] 宁涛. 超临界机组汽轮机中压主汽门螺栓断裂原因分析[J]. 金属加工(热加工), 2025, (12): 150-155.
- [2] 侯晓萌, 刘天晋, 邢紫辉, 等. 联合循环电站大型汽轮机非对称式混凝土基础振动性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(22): 216-223.
- [3] 华山, 范常浩, 陈煦. 基于迁移学习和集成学习的凝汽器真空调度预测方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2025, (09): 63-67.
- [4] 邓方升. 汽轮机凝汽器真空调度低的原因分析与处理措施[J]. 矿业工程, 2025, 23(04): 102-104.
- [5] 焦小波, 曹海波, 刘磊. 凝汽器真空调度提升对汽轮机效率的优化效果分析[C]//中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. 2025 人工智能与工程管理学术交流会论文集. 陕西延长中煤榆林能源化工股份有限公司; , 2025: 324-325.