# 300MW 循环流化床机组汽轮机匹配运行优化及技改研究

赵云龙

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤矸石热电厂　内蒙古　鄂尔多斯　017100

**摘　要：**300MW 循环流化床机组在深度调峰与宽负荷运行场景下，汽轮机与锅炉之间的匹配品质直接决定机组整体的安全裕度与运行经济性。本文聚焦于变负荷参数动态匹配、调门控制逻辑优化、炉机协同调控及稳态瞬态工况管理四层策略，系统阐述汽轮机匹配运行优化路径。在技改层面，通流结构改造、轴系密封升级、冷端综合治理及智能调控系统部署构成性能提升的核心支撑。以此为基础，搭建工况动态监测机制与设备状态常态化适配调控机制，形成覆盖全工况的长效匹配运行保障体系。

**关键词：**循环流化床；汽轮机；匹配运行；负荷调控；优化策略

**引言：**大型循环流化床机组凭借燃料适应性广及负荷调节范围宽等优势，在电网调峰与可再生能源消纳中发挥着日益重要的作用。随着机组参与深度调峰的频次和幅度持续增加，汽轮机侧与锅炉侧在变负荷过程中的动态响应差异愈加突出，给运行参数匹配和控制系统协同带来新挑战。通流效率下降、密封性能退化以及冷端换热条件恶化等长期运行累积问题进一步加剧了炉机之间的协同难度。因此，围绕变负荷参数匹配、调门控制优化、炉机协同策略以及稳态瞬态工况管理开展系统研究，并结合通流改造、密封升级、冷端治理及智能调控等技改手段，构建具有针对性的匹配运行保障体系，对于提升 300MW 循环流化床机组的全工况运行水平具有重要意义。

## 1 300MW 循环流化床机组汽轮机匹配运行优化策略

### 1.1 变负荷运行参数动态匹配优化

300MW 循环流化床机组在变负荷工况下，汽轮机运行参数需要根据外界负荷需求进行实时调整。主蒸汽压力设定值应随负荷变化率自动修正，避免压力波动过大引发调节系统振荡。调节级温度变化速率需加以限制，防止热应力超标影响转子寿命。回热系统抽汽压力与负荷之间建立动态对应关系，确保除氧器及加热器水位稳定。凝结水再循环流量根据低负荷时段凝汽器热井水位自动调节，维持凝结水泵工作在高效区间。给水流量与燃料量协调变化，减少汽水分离器出口过热度大幅波动。运行人员只需关注负荷指令变化趋势，控制系统自动完成参数匹配，降低操作强度。

### 1.2 汽轮机调门控制逻辑优化

汽轮机调门控制逻辑直接影响机组一次调频响应速度与调节品质。阀门流量特性曲线需要根据实际试验数据进行修正，消除线性度偏差带来的负荷调节死区。顺序阀方式下各阀门开启重叠度合理设定，避免节流损失增大和阀位波动叠加。单阀方式向顺序阀方式切换过程中设置过渡逻辑，防止切换瞬间负荷突变影响电网频率[1]。调门指令与反馈信号之间加入速率限制环节，限制阀门动作过快引发主汽压力剧烈波动。液压伺服系统响应特性纳入控制逻辑补偿，消除油动机动作滞后对调节精度的影响。阀门关闭时间常数应满足电网故障工况下的快关要求，保证机组安全。

### 1.3 炉机协同运行负荷匹配优化

锅炉侧与汽机侧的负荷响应速率存在差异，需要建立协同匹配机制。锅炉主控指令依据汽机调节级压力变化趋势提前修正燃料量，弥补锅炉滞后特性带来的汽压偏差。汽机调门开度变化时同步向锅炉控制系统发送前馈信号，缩短炉侧蓄热补偿的响应时间。机组变负荷速率上限由锅炉最小稳燃负荷和汽机最低排汽温度共同约束确定。炉膛床温变化趋势作为负荷匹配状态的判断依据，床温急剧下降时优先限制汽机调门进一步开启。返料器回料温度与再热蒸汽温度的关联调节投入自动，减少炉机间的热偏差累积。负荷匹配优化策略在不同煤质条件下具备自适应性，确保炉机动态响应协调一致。

### 1.4 机组稳态、瞬态运行工况匹配调控优化

稳态运行工况下着重提升汽轮机热耗率与锅炉效率的协同水平。主再热蒸汽温度维持额定值，减少节流损失和排汽损失。瞬态工况重点关注甩负荷或快速减负荷

时汽机旁路系统的快速投入，防止锅炉超压和再热器干烧。电网频率大幅波动时一次调频与二次调频动作顺序合理设定，避免调节动作反向叠加[2]。机组启停阶段暖机速率和升负荷速率匹配汽缸膨胀与转子热弯曲的控制要求。稳态与瞬态之间的过渡过程设置平滑切换逻辑，避免控制模式突变引发系统不稳定。调节系统参数整定兼顾稳态精度与瞬态快速性，在不同负荷区间分别优化比例积分微分控制参数，满足全工况运行需求。

## 2 汽轮机匹配性能专项技改方案研究

### 2.1 汽轮机通流结构适配性技改

汽轮机通流结构改造的核心在于优化各级叶片型线及动叶与静叶之间的匹配关系，降低蒸汽流动过程中的节流损失和涡流损失。高压缸部分重点调整前几级隔板静叶安装角度，改善蒸汽进入动叶栅的攻角特性，中低压缸则侧重末级长叶片的流线型优化，减少排汽余速损失。通流间隙的精细化控制同样关键，需依据实际运行数据重新设定各级轴向间隙和径向间隙的装配标准，避免因间隙过大造成级间漏汽量增加。当前行业内已有成熟的改造实践可供参考，清水川能源公司先后完成了两台 300MW 机组的汽轮机通流改造，机组性能实现跨越式提升，该项目成功入选中电联 2025 年煤电机组“三改联动”技术改造典型案例名单。四川白马循环流化床示范电站 2 号机组通流改造总投资 8300 万元，改造后每年可节约标煤 2.62 万吨。这类改造能够有效解决早期机组因设计制造水平限制导致的热耗偏高问题，实现供电煤耗的显著下降。

### 2.2 汽轮机轴系及密封系统匹配技改

轴系及密封系统的匹配性改造直接影响机组运行安全性与经济性。轴系方面需重点解决转子对中精度退化、轴承负荷分配不均以及临界转速附近振动幅值超标等问题，通过调整轴承标高和瓦块间隙恢复轴系原有动力特性。密封系统的改造策略应区分高压、中压、低压缸的不同工况需求分别实施，高压缸可引入自调整与刷式复合汽封结构，中压缸适合采用蜂窝密封以增强阻尼效果，低压缸则应用组合式蜂窝汽封并结合径向间隙精细化控制[3]。良村热电 2025 年 1 号机组汽封改造将中压缸隔板汽封和轴端汽封由原蜂窝汽封改造为随动悬浮齿汽封共计 33 圈，低压缸隔板汽封改为刷式汽封。轴封系统的升级改造能够有效减少级间及轴端漏汽损失，改善润滑油中进水问题，提升缸体效率和真空严密性。

### 2.3 机组换热辅助系统匹配技改优化

换热辅助系统的技改优化应围绕凝汽器换热效率提升和冷端损失降低两条主线展开。凝汽器管束材质升级与管型优化可显著改善换热系数，配套新型滤网安装能够减少循环水中的杂质沉积，保持管束表面清洁度。强化换热装置的加装可增加有效换热面积，配合新型循环水药剂与智能加药系统实现水质精准控制。冷却塔填料更换和配水系统改造同样不可忽视，直接关系到循环水的降温效果。河北承钢 60MW 汽轮机组冷端综合治理项目通过凝汽器换管和强化换热装置部署，投运后机组真空平均提升超过 12kPa，年增发电量达 3670 万 kWh，年经济效益超过 2100 万元。冷端系统运行状态不佳会严重影响机组经济性，特别是凝汽器漏空气和管束结垢等问题会直接推高机组能耗。系统化的冷端治理能够实现背压降低和煤耗下降的双重收益。

### 2.4 智能调控系统适配性技改升级

智能调控系统的适配性升级是提升汽轮机全工况运行品质的关键手段。升级内容涵盖分散控制系统的硬件平台更新、伺服阀冗余切换逻辑优化以及保护定值的重新整定，确保控制系统响应速度与调节精度满足深度调峰需求。宽负荷多模式智能监测及诊断技术的引入能够实时评估通流部分和轴承系统的运行状态，提前预警异常工况。协调控制系统的数据分析能力和趋势预测能力通过逻辑优化得到增强，采用人工智能算法对非线性工况进行自适应控制。分宜电厂 1、2 号机组通过增加外挂式控制系统并优化协调控制逻辑，成功实现了 30% 额定负荷的深度调峰功能。大唐潮州 3 号机组采用高效灵活性通流设计配合宽负荷智能监测技术，显著提升了机组低负荷区间的调峰速率和调峰深度。智能调控系统的升级使机组在频繁变负荷工况下依然保持稳定的调节品质和安全裕度[4]。

## 3 机组长效匹配运行保障体系构建

### 3.1 机组工况动态监测机制搭建

搭建机组工况动态监测机制，是保障 2 台 300MW 循环流化床机组长效匹配运行的基础前提。该机制依托分布式控制系统数据采集平台与先进传感网络，实现对锅炉燃烧温度场、汽轮机进汽参数、回热系统运行状态等关键工况指标的实时跟踪与连续记录。在监测体系设计上，需重点覆盖机组启动、带负荷、变负荷及深度调峰等全工况场景，确保各运行阶段的数据采集完整性与时效性。针对循环流化床机组燃烧系统强耦合、非线性、大惯性的运行特征，引入深度学习算法与机理模型相融合的监测框架，对床温变化趋势进行高精度预测与实时监控。2025 年，有研究团队在 300MW 循环流化床机组上应用 Informer 预测模型，床温预测均方根误差控制在 3.385 摄氏度，平均绝对

百分比误差仅为 0.268%，验证了数据驱动方法在动态监测中的有效性。在气体组分监测方面，某 300MW 循环流化床锅炉通过增设分区在线监测系统，实现了炉膛内各区域气体组分的精确感知，为后续差异化调控提供了可靠的数据支撑。动态监测机制的持续完善，为炉机匹配运行提供了精准的工况认知基础。

3.2 设备状态常态化适配调控机制

设备状态常态化适配调控机制，是实现炉机匹配运行保障体系闭环管理的重要支撑。该机制以设备健康状态评估为基础，通过智能巡检、大数据分析与故障预测等手段，持续跟踪锅炉受热面、汽轮机通流部件及辅机系统等关键设备的状态演变趋势。在调控策略层面，依托先进过程控制系统与分布式控制系统的无缝整合，形成从数据采集、模型预测到闭环管控的完整链条，实现运行参数的预判式微调与自主优化。2025 年，有研究以某循环流化床热电机组燃烧系统为对象，构建了机理-数据融合的数字孪生模型并建立高精度实时仿真系统；模型通过遗传算法离线搭建典型工况优化案例库，采用案例推理算法对实时工况进行查找匹配，并在平台实现实时给出优化运行建议[5]。应用结果表明系统能效提升 1.03%，平均煤汽比提升 3%，炉膛压力、床温等关键运行参数均保持在安全阈值内。同年，某 660MW 超超临界循环流化床机组建成智能电站平台，通过强化设备全生命周期管理、引入智能巡检与大数据分析等手段持续优化生产运行。基于数据驱动与模式挖掘的调控方法，可通过运行场景匹配给出床料、风配比及给煤方式的实时调整策略。

3.3 设备状态常态化适配调控机制

设备状态常态化适配调控机制，是实现炉机匹配运行保障体系闭环管理的重要支撑。该机制以设备健康状态评估为基础，通过智能巡检、大数据分析与故障预测等手段，持续跟踪锅炉受热面、汽轮机通流部件及辅机系统等关键设备的状态演变趋势。在调控策略层面，依托先进过程控制系统与分布式控制系统的无缝整合，形成从数据采集、模型预测到闭环管控的完整链条，实现运行参数的预判式微调与自主优化。2025 年，某循环流化床锅炉 APC 优化控制系统改造项目投运，依托给煤排渣、一二次风优化、炉膛负压自动调节等 7 大核心子系统，实现了全流程智能调控，有效弥补了人工操作反应慢、精度低的短板。同年，有研究团队通过多参数联调技术，协同调控床压、床温及一氧化碳等关键指标，保障了复杂工况下燃烧系统的稳定运行。基于数据驱动与模式挖掘的调控方法，可通过运行场景匹配给出床料、风配比及给煤方式的实时调整策略。

**结束语：**围绕 300MW 循环流化床机组汽轮机匹配运行优化问题，从变负荷参数动态匹配、调门控制逻辑优化、炉机协同负荷匹配及稳态瞬态工况调控四个维度构建了系统的运行优化策略，并结合通流结构改造、密封系统升级、冷端综合治理及智能调控部署四项技改方案，形成了覆盖运行调控与设备改进的系统性优化路径。在此基础上，通过工况动态监测机制与设备状态常态化适配调控机制的协同运作，搭建起长效匹配运行保障体系。

**参考文献**

[1] 李海全, 陆军.300MW 等级循环流化床锅炉的吹灰器选型及技改方案分析 [J]. 电力学报,2026,41(1):43-49.

[2] 邓素华, 张李洋, 安跃昆, 等.300MW 等级循环流化床机组污染物排放特性及优化探讨 [J]. 电力设备管理,2025,(24):280-282.

[3] 赵丹丹, 潘渤海, 康童童. 高温超超临界机组汽轮机余热回收系统的能效优化 [J]. 现代工业经济和信息化,2026,16(2):134-136.

[4] 曹星辉, 任志杰, 游霄, 等. 基于气体组分分区监测的循环流化床锅炉 SNCR 脱硝系统优化改造与应用 [J]. 洁净煤技术,2025,31(S2):506-512.

[5] 梁红兵, 严天元, 曲明. 超临界机组汽轮机汽轴封节能技术研究 [J]. 中国机械,2025,(25):86.