

燃气轮机机组低负荷工况运行管控难点及改进方案探析

林天平

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：燃气轮机在调峰运行中频繁处于低负荷区间，燃烧稳定性下降、参数匹配偏差及设备应力波动等问题逐步显现。针对燃料空气配比、控制响应及状态监测等关键环节，构建多参数协同调控与动态预警机制，并完善设备维护流程，实现运行状态精细化管理。优化措施实施后，燃烧过程趋于稳定，排放与能耗指标得到有效改善，设备受力更加均衡，运行可靠性持续增强，低负荷工况下机组安全性与经济性的提升。

【关键词】：燃气轮机；低负荷工况；运行管控；燃烧稳定性；控制优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.092

引言

燃气轮机机组在调峰、备用及负荷快速变化过程中，低负荷运行频率不断增加。机组负荷降低后，燃料流量、空气量、燃烧温度及透平通流状态发生明显改变，原有控制参数难以始终保持最佳匹配，容易引发燃烧振荡、排烟温度偏差、氮氧化物排放波动及热效率下降。频繁升降负荷还会加剧高温部件热应力变化，使压气机、燃烧室、透平及辅机系统承受更复杂的运行条件。若监测预警、控制逻辑和操作标准缺乏协同，局部参数异常可能逐步扩大，影响机组安全运行及调峰能力。因此，有必要从低负荷运行特征入手，识别主要管控薄弱环节，建立问题识别、参数调整、状态监测、维护处置相衔接的管理路径。

1 燃气轮机机组低负荷运行特征解析

1.1 燃烧组织状态变化规律

机组负荷降低后，燃料供给量随之减少，燃烧室内火焰温度、燃烧强度及反应速率同步下降，燃料与空气之间的匹配关系更易偏离稳定区间。压气机仍需维持一定进气流量，局部区域可能出现混合气过稀、火焰边界收缩及回流区稳定能力减弱等现象，进而增大燃烧振荡、局部熄火及再点燃风险。燃烧温度分布不均还会造成燃烧室出口温度场偏差，使透平进口热负荷出现局部集中。低负荷控制需要根据燃烧模式、燃料热值、环境温度及进气条件动态调整燃料分配，配合值班燃烧器切换、空气旁通调节及燃烧脉动监测，维持火焰结构连续性和燃烧区域稳定性。

1.2 热力参数偏移表现

负荷下降会改变压气机压比、透平膨胀比、排气温度及机组热效率之间的耦合关系。燃料流量降低后，透平进口温度下降，单位燃料释放的有效功比例减少，压气机耗功占机组输出功率的比重大幅上升，形成低负荷区间热耗增加的特征。排气温度并不始终随负荷等比例下降，受导叶角度、进气流量及燃烧温度分布影响，部分工况可能出现排气温差扩大、排烟损失增加及余热利用条件波动^[1]。润滑油温、轴承金属温度、燃气压力等参数也会发生非线性偏移。运行管控应建立多参数关联

判据，避免单纯依据负荷指令判断机组状态，提高热力参数调整的精确性。

1.3 设备负荷响应特征

低负荷工况下，燃气轮机对负荷指令的响应速度受到燃料调节阀、进口导叶、压气机运行边界及辅机状态共同制约。负荷升降幅度过快时，燃料量变化与空气量调整可能出现时间差，导致转速、排气温度、燃烧压力及输出功率产生短时波动。频繁负荷变化还会使燃烧室、透平叶片、转子及缸体承受反复热胀冷缩，局部温差产生交变热应力，加快高温部件疲劳损伤。部分辅机长期处于低效率运行区间，容易出现泵阀频繁调节、润滑状态波动及控制元件磨损。负荷响应管理需要引入速率限制、趋势预测及设备健康状态约束，使功率调节指令与机组运行特性相匹配。

2 低负荷工况运行管控主要难点

2.1 燃烧稳定控制能力不足

低负荷条件下，燃料流量下降导致火焰温度降低，燃烧室内回流强度减弱，燃料与空气混合均匀性随之下降。传统控制方式多依赖固定阈值和经验参数，难以及时识别燃烧脉动、火焰漂移及局部熄火趋势。燃料分配、空气调节、燃烧模式切换之间缺乏同步协调时，容易造成温度场畸变和压力波动。控制策略对燃料热值、环境温度及设备老化状态适应不足，也会扩大运行偏差，降低低负荷区间的燃烧稳定裕度。

2.2 运行参数匹配精度偏低

低负荷运行涉及燃料量、进气量、导叶开度、排气温度及转速等多项参数联动，任一环节调整滞后都可能破坏整体平衡。现有参数设定常以额定工况模型为基础，对低负荷下的非线性变化刻画不足，导致控制指令与实际运行状态不完全一致^[2]。不同参数之间存在明显耦合关系，单变量调整容易引发连锁波动。数据采集频率、传感器精度及控制模型更新速度不足，也会影响参数修正质量，使机组难以长期保持经济、安全的运行区间。

2.3 设备状态监测覆盖不全

低负荷工况下,设备异常往往表现为微小温差、振动趋势变化、阀门迟滞及润滑状态波动,传统定点监测难以完整捕捉早期征兆。部分关键部位仍依赖周期检查,缺少连续数据支撑,容易形成监测盲区。燃烧室、透平叶片、轴承及辅机之间的数据尚未充分关联,单一测点报警无法准确反映系统性风险。状态评价模型对长期低负荷特征识别不足,设备劣化趋势、热疲劳累积及控制元件性能下降难以及时纳入运行决策。

3 低负荷异常风险形成机理

3.1 燃料空气配比失衡诱因

机组进入低负荷区间后,燃料需求量快速下降,而压气机进气量受转速、进口导叶开度及防喘振边界约束,难以同步按比例减少,易形成混合气过稀状态。燃料调节阀小开度下的流量分辨率降低,阀门迟滞、死区及执行偏差会放大实际供油波动。燃料热值、温度和压力变化若未及时纳入修正,理论空燃比与真实燃烧需求之间将产生偏离。各级燃烧器切换过程中,分配逻辑衔接不严还会造成局部供油不均,使火焰面收缩、回流区稳定性下降,进而诱发燃烧脉动、排气温差扩大及污染物生成波动。

3.2 控制逻辑响应滞后原因

低负荷调节涉及负荷指令、燃料流量、空气量、进口导叶、排气温度及转速等多变量耦合,控制链条越长,信号传递和执行延迟越明显。传统逻辑多采用固定增益、分段阈值及单回路反馈,对低负荷工况下强非线性和时变特征适应不足。测点滤波时间过长会削弱异常识别速度,滤波时间过短又可能引入噪声干扰,造成控制指令频繁修正^[3]。执行机构磨损、阀位反馈偏差及通信周期不一致也会扩大响应时差,使燃料调整先于空气修正或负荷变化快于温度控制,最终形成超调、振荡及保护动作风险。

3.3 部件热应力累积机制

低负荷运行会改变燃烧室出口温度场、透平级间温差及转子轴向热膨胀状态,局部冷热不均使高温部件承受附加热应力。频繁升降负荷造成金属温度反复变化,叶片、轮盘、燃烧筒及过渡段内部形成周期性拉压应力,微观裂纹容易沿应力集中区域持续扩展。冷却空气分配受压比和流量变化影响,低负荷下部分部位冷却裕度下降,材料表面氧化、涂层剥落及热疲劳损伤相互叠加。启停次数、负荷变化速率和持续低负荷时长若未纳入寿命消耗评估,传统检修周期难以准确反映部件真实劣化程度。

4 低负荷运行管控改进方案

4.1 优化燃烧控制参数配置

低负荷区间燃烧控制需以多变量耦合调节为核心,对燃料

流量、空气量、燃烧分级比例及燃烧模式切换条件进行系统性重构。基于机组不同负荷段的燃烧特性曲线,细化分段控制参数,建立低负荷专用控制逻辑,使燃料喷射量与进气量保持动态匹配。引入燃料热值、压力、温度等实时修正系数,对燃料供给进行在线补偿,降低物性波动带来的偏差。针对燃烧室内流场变化特征,优化燃烧器分区供油策略,合理调整主燃区与预混区比例,提升火焰稳定范围。结合燃烧振动信号、排气温分布及压力脉动特征,构建多源信号融合调节机制,实现燃烧稳定性与排放控制的协同优化。控制系统层面需提升响应精度,通过自适应控制算法调整增益参数,使不同负荷段均能保持平稳调节特性。强化导叶开度与燃料流量联动控制,避免空气量调整滞后导致混合气失衡。对低负荷运行频繁区域设置独立优化区间,通过数据驱动持续修正控制边界,提高控制模型对长期运行数据的适应能力。结合精细化管理理念,推动控制策略由经验型向数据驱动型转变,使燃烧过程始终处于稳定、安全与高效的动态平衡状态。

4.2 完善动态监测预警机制

低负荷运行条件下异常信号幅度较小且变化隐蔽,需构建高灵敏度、多维度的动态监测体系。围绕燃烧室、透平、压气机及关键辅机布设多点监测网络,实现温度、压力、振动、流量及排放指标的全流程采集。通过提高采样频率与数据分辨率,增强对瞬态波动的捕捉能力。建立多参数关联分析模型,将排气温差、燃烧压力波动及振动趋势进行综合评估,避免单一指标判断带来的误判风险。引入状态识别算法,对低负荷典型运行模式进行分类建模,实现异常趋势的提前识别。构建分级预警机制,根据参数偏离程度设定不同预警阈值,将早期偏差与严重异常进行区分处理^[4]。推动监测数据与控制系统深度融合,实现预警信息直接参与控制决策,提高响应及时性。完善数据质量管理体系,对传感器精度、数据漂移及信号完整性进行动态校核,保证监测结果可靠。结合数字化转型理念,建立历史运行数据库,通过大数据分析提取低负荷运行规律,为参数优化与风险识别提供支撑。形成实时监测、趋势分析、预警触发及处置反馈闭环,使异常状态能够在萌芽阶段得到识别与控制。

4.3 强化设备维护处置流程

低负荷运行对设备提出差异化维护需求,需构建以状态评估为基础的全过程维护管理体系。针对燃烧室、透平叶片、轴承及关键控制元件,建立低负荷工况专属运行档案,记录温度循环次数、负荷变化频率及运行时长等关键指标,用于评估热疲劳与性能衰减情况。优化检修策略,将传统定期维护模式与状态检修相结合,根据设备运行数据动态调整检修周期。对燃料系统、空气调节机构及执行器进行重点维护,减少阀门卡滞、控制偏差及响应迟缓问题。强化润滑系统管理,确保低负荷条件下油温、油压及油质处于稳定区间,降低摩擦损耗及异常磨

损风险。建立关键部件性能退化识别模型,对振动特征、温度变化及效率指标进行综合分析,实现早期故障诊断。完善检修过程标准化流程,提升作业精度与一致性,减少人为因素带来的偏差。结合精益管理理念,对备件管理、检修周期及资源配置进行优化,提高维护效率。推动维护信息与运行数据共享,使设备状态评估与运行决策形成协同机制,从而保障低负荷工况下设备长期稳定运行。

5 改进方案实施效果评价

5.1 燃烧稳定水平提升表现

优化控制参数与燃烧组织后,燃烧室内部火焰结构趋于均匀,回流区稳定范围明显扩大,燃料与空气混合均匀性得到持续改善。燃烧压力波动幅值降低,低频与高频脉动均得到有效抑制,燃烧振荡发生概率显著下降。排气温度分布更加均衡,温差控制在较小区间内,透平入口温度场稳定性增强。燃烧模式切换过程更加平滑,负荷变化过程中火焰保持连续性,避免局部熄火及再点燃现象。控制系统对燃料流量与空气量的联动调节更加精准,混合气始终维持在稳定燃烧区间。运行数据表现出波动周期延长、波动幅度减小的特征,燃烧过程由间歇性不稳定状态转向持续稳定运行状态。

5.2 排放能耗指标改善情况

燃烧过程稳定性提升后,燃料利用效率明显提高,单位发电能耗下降趋势更加稳定。燃料与空气配比优化使燃烧反应更

加充分,未完全燃烧产物显著减少,排放结构趋于合理。氮氧化物生成受到温度场均衡与燃烧分级控制的共同影响,排放波动范围收窄,排放浓度保持在较低水平区间。排气温度分布均匀后,余热回收条件更加稳定,整体热效率得到提升^[9]。压气机与透平的匹配关系得到优化,内部功耗占比下降,有效输出功率占比提高。运行参数长期维持在优化区间,能耗指标表现出持续性改善特征,低负荷运行经济性得到系统性增强。

5.3 设备运行可靠程度提高

运行控制与维护流程协同优化后,关键部件工作状态趋于平稳,热应力分布更加均匀,结构受力条件得到改善。负荷变化过程中的温度梯度减小,材料疲劳累积速度下降,部件使用周期延长。振动水平保持在较低区间,轴承及转子系统运行稳定性增强,异常振动触发频率明显减少。控制执行机构响应更加准确,阀门调节与导叶动作稳定性提高,减少因控制偏差引发的运行波动。监测系统对早期异常的识别能力增强,潜在故障能够在初期阶段得到处理,避免扩大为系统性风险。设备运行连续性提升,非计划停机概率下降,整体运行状态由被动应对转向主动管控。

6 结语

低负荷运行管控体系经系统优化后,燃烧过程稳定性增强,参数匹配精度提高,异常识别与处置更加及时,设备受力状态趋于均衡。多维协同调控与状态管理融合推进,机组在复杂工况下运行质量持续提升,安全性与经济性保持稳定。

参考文献:

- [1] 陆远立.燃气轮机联合循环汽轮机超速保护系统的升级改造[J].燃气轮机技术,2025,38(4):69-72.
- [2] 朱中义,刘阳,武文杰,等.SGT-800 燃气轮机压气机喘振原因分析[J].燃气轮机技术,2025,38(4):34-40.
- [3] 赵培尧.低负荷工况下锅炉短管焊接失效检测研究[J].金属加工(热加工),2025,(10):159-164.
- [4] 郭健.分轴与单转子燃气轮机部分负荷工况性能比较[J].热力透平,2023,52(1):65-68.
- [5] 张高强,付忠广,张天清,等.燃气轮机部分负荷工况下联合太阳能系统循环的变组合工况性能分析[J].太阳能学报,2021,42(8):273-280.