

# 深度调峰时火电机组安全运行的相关问题分析

刘欢 马利斌

新疆华电高昌热电有限公司，新疆吐鲁番市，838000；

**摘要：**由于特高压交流电、直流电的大规模使用及风电、光伏这些清洁能源大规模接入电网，电网结构已经发生了巨大改变，再加上我国目前用电结构变化，电网中峰谷差越来越大，火电机组所面临的调峰任务越来越严峻，新的电网结构对调度的方式提出了挑战，尤其是电网在低负荷运行期间，为消纳新能源以及特高压输电量，对于火电机组的调峰能力有了新的要求。在此背景下，在深度调峰过程中，保证火电机组的安全运行已经成了目前亟待解决的问题。

**关键词：**深度调峰；火电机组；安全运行

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.10.026

随着经济发展，常规50%调峰已经无法满足调峰需要，对火电机组调峰能力进行深度挖掘是非常有必要的，但在深度调峰时，火电机组较容易出现安全运行方面的问题。

## 1 火电机组深度调峰技术介绍

### 1.1 技术定义与目标

深度调峰指火电机组在电网调度指令下将负荷率降至30%额定负荷以下甚至更低（如20%~25%）的运行方式，旨在平衡新能源发电波动性，保障电力系统稳定性。其核心目标包括：提升机组负荷响应速度（如升负荷速率达2%~4%Pe/min）；确保低负荷下燃烧、水动力、环保设备等系统安全运行；降低碳排放强度，适应新型电力系统灵活性需求。

### 1.2 核心技术路径

①燃烧优化技术。复合燃烧技术：通过循环流化床(CFB)与煤粉(PC)复合燃烧系统，实现“快速燃烧、温和传热”，在30%~100%负荷范围内平均升负荷速率达3.71%Pe/min。煤粉浓度与细度控制：优化一次风速偏差和煤粉细度(如将无烟煤粉粒径从90μm降至60μm)，降低着火温度并提升低负荷稳燃能力。

②水动力安全保障技术。直流炉动态控制：采用给水再循环优化和动态保护阈值设置，避免低负荷下受热面过热或水循环恶化。汽包炉水位三冲量控制：升级水位调节系统，防止虚假水位导致压力异常。

③环保设备适配性技术。宽温脱硝催化剂：解决SCR系统在低负荷下烟温不足(<300°C)导致的脱硝效率下降问题。除尘与脱硫优化：调整静电除尘器振打周期和脱硫塔喷淋密度，维持低烟气流速下的环保参数达标。

④智能控制技术。iFOC智能控制：结合自适应动态加速技术、增益调度算法，实现主蒸汽压力/温度的快

速响应，支持机组稳定运行至20%额定负荷以下。大数据监测平台：通过实时状态监测与寿命预测，降低频繁调峰对汽轮机转子、管道等部件的机械损伤风险。

## 2 火电机组深度调峰安全运行问题分析

### 2.1 锅炉燃烧稳定性问题

①低负荷燃烧波动。深度调峰时（负荷率<30%），煤粉浓度分布不均易导致燃烧失稳，部分机组因燃烧器调节范围不足引发火焰偏斜、炉膛结焦甚至灭火风险。

②排烟温度异常。低负荷下炉膛热流密度下降，尾部烟道排烟温度可能低于露点，加剧受热面低温腐蚀，同时局部受热面因蒸汽流量减少存在管壁超温隐患。

### 2.2 水动力系统风险

①直流炉水循环恶化。超临界直流炉在30%负荷以下易出现水动力失稳，省煤器入口流量接近保护阈值，可能引发受热面过热；汽包炉则因虚假水位导致水位调节系统误动作。

②辅助设备故障。低负荷运行时，给水泵再循环阀频繁启闭加剧磨损，凝结水泵流量低于临界值可能触发保护停机，威胁机组连续性运行。

### 2.3 环保设备适配性挑战

①脱硝装置效率下降。SCR系统在烟温<300°C时脱硝效率骤降（常规活性窗口为300~400°C），氮氧化物排放超标风险显著增加。

②除尘与脱硫性能劣化。低烟气流速导致静电除尘器极板积灰加剧，湿法脱硫塔内液气比失衡，可能造成粉尘和SO<sub>2</sub>排放超标。

### 2.4 调峰负荷波动影响

①机械疲劳损伤。负荷快速变化（如15分钟内升降50MW）使汽轮机转子、锅炉管道承受交变应力，加速

金属蠕变和疲劳裂纹扩展。

②控制系统响应滞后。传统 PID 算法在非线性工况下调节能力不足，主蒸汽压力、温度等关键参数波动可能超出安全阈值。火电机组深度调峰下限可安全拓展至 20%~25% 额定负荷，同时保障调峰经济性（单台 350MW 机组年增收超千万元）和环保合规性。

### 3 火电机组深度调峰技术难点及解决方案

#### 3.1 燃烧稳定性技术难点

低负荷稳燃能力不足。难点：负荷率低于 30% 时，煤粉浓度分布不均易导致火焰偏斜、炉膛结焦甚至灭火，部分机组需依赖投油稳燃，增加运行成本。解决方案：采用复合燃烧技术（如循环流化床与煤粉炉结合），将最低稳燃负荷降至 20%~25% 额定负荷；优化煤粉细度控制（无烟煤粒径  $\leq 60 \mu\text{m}$ ），并加装燃烧器稳燃齿，提升低负荷燃烧稳定性。

#### 3.2 水动力系统安全挑战

直流炉水循环恶化。难点：超临界直流炉在 30% 负荷以下易出现水动力失稳，省煤器入口流量接近保护阈值，导致受热面过热风险。解决方案：动态调整给水流量保护阈值，优化再循环系统设计，避免水循环恶化；升级汽包炉三冲量水位控制系统，消除虚假水位引发的调节误差。

#### 3.3 环保设备适配性问题

脱硝系统效率下降。难点：低负荷下 SCR 入口烟温  $< 300^\circ\text{C}$ ，催化剂活性降低，脱硝效率下降超 30%，氮氧化物排放超标风险增加。解决方案：采用宽温催化剂（活性窗口扩展至 250~400°C）；增设烟气旁路换热系统，提升 SCR 入口烟温至 300°C 以上。

#### 3.4 负荷频繁波动影响

设备机械疲劳损伤。难点：负荷快速波动（如 15 分钟内升降 50MW）导致汽轮机转子、锅炉管道承受交变应力，加速金属疲劳和蠕变损伤。解决方案：基于大数据的寿命预测技术，建立关键部件疲劳损伤模型，制定预防性检修计划；推广 iFOC 智能控制算法，提升主蒸汽压力/温度调节精度，减少参数超限风险。

#### 3.5 经济性与调峰效率矛盾

①调峰收益与能耗矛盾。难点：深度调峰时供电煤耗增加 5%~10%，部分机组调峰收益难以覆盖燃料成本。解决方案：开发热电联产深度调峰技术，优化抽汽供热与发电负荷匹配，提升综合能源利用率；推广快速爬坡控制技术，将负荷响应速率提升至 4%Pe/min，缩短低效运行时间。

②发展趋势。多能耦合调峰：推动“火电+储能”联合调峰模式，通过储热装置平衡负荷波动，降低机组运行压力；全负荷脱硝技术：研发耐低温催化剂（活性窗口  $< 250^\circ\text{C}$ ），实现全工况环保达标；数字孪生技术：构建机组动态仿真模型，优化调峰控制策略并预测设备寿命。

### 4 火电机组深度调峰过程稳定性保障方案

#### 4.1 燃烧系统稳定性控制

①煤粉细度与浓度优化。通过控制无烟煤粒径至  $\leq 60 \mu\text{m}$ ，并优化一次风速偏差，提升低负荷下煤粉着火性能，减少火焰偏斜风险。加装燃烧器稳燃齿或湍流增强装置，改善低负荷燃烧器区域热流分布，将稳燃负荷下限拓展至 20%~25% 额定负荷。

②复合燃烧技术应用。采用循环流化床（CFB）与煤粉炉复合燃烧模式，通过循环灰热惯性补偿负荷波动，降低燃烧器灭火概率。

#### 4.2 水动力与热力系统安全保障

①直流炉动态调节。优化给水再循环系统，动态调整保护阈值（如省煤器入口流量下限），避免低负荷下水动力失稳导致的受热面过热。升级汽包炉三冲量水位控制系统，通过压力补偿算法消除虚假水位对蒸汽参数的影响。

②主蒸汽参数精准控制。应用 iFOC 智能控制技术，结合增益调度算法和过热器焓增特性，实现主蒸汽压力/温度波动范围  $\leq \pm 0.5\text{MPa}/\pm 5^\circ\text{C}$ 。

#### 4.3 智能控制与响应优化

①动态加速自适应技术。基于状态变量预估算法，提升机组负荷响应速率至 4%Pe/min，缩短低负荷运行时间，降低燃烧恶化风险。抑制反向 AGC 指令下的参数超调，通过连续反向调节抑制技术减少汽轮机阀门频繁动作。

②协调控制系统升级。校核 AGC 指令与 DCS 反馈误差（如采用数字信号传输替代 4~20mA 模拟信号），减少负荷指令执行偏差。

#### 4.4 环保设备协同适配

①脱硝系统稳定性强化。采用宽温催化剂（活性窗口 250~400°C）并优化烟道旁路换热，确保 SCR 入口烟温  $\geq 300^\circ\text{C}$  时的脱硝效率  $\geq 80\%$ 。调整喷氨格栅分布，适应低烟气流速下的 NOx 浓度分布不均问题。

②除尘与脱硫系统优化。静电除尘器振打周期从 30 分钟/次缩短至 15 分钟/次，防止极板积灰导致效率下降。

### 5 火电机组深度调峰设备损耗控制方案

## 5.1 燃烧系统优化

①煤粉细度与燃烧稳定性控制。将无烟煤粒径控制在 $\leq 60 \mu\text{m}$ , 优化一次风粉混合均匀度, 减少低负荷下燃烧波动导致的炉膛结焦和受热面高温腐蚀风险; 加装燃烧器稳燃齿或旋流增强装置, 将最低稳燃负荷从30%额定负荷降至20%~25%, 降低频繁投油稳燃造成的燃烧器烧损。

②制粉系统改进。采用动态煤质校正技术, 实时调整磨煤机出力与风煤比, 避免煤质波动引发的制粉系统过载或堵煤现象。

## 5.2 水动力系统保护

①直流炉水循环安全保障。优化给水再循环系统, 通过动态调整省煤器入口流量保护阈值(如由原30%流量提升至25%), 防止低负荷下受热面过热导致管道蠕变; 应用iFOC智能控制技术, 实现主蒸汽压力波动范围 $\leq \pm 0.5 \text{ MPa}$ , 减少汽轮机阀门频繁调节造成的机械磨损。

②汽包炉水位精准控制。升级三冲量水位控制系统, 采用压力补偿算法消除虚假水位干扰, 将水位偏差控制在 $\pm 30 \text{ mm}$ 以内, 降低水位波动对汽包焊缝的疲劳损伤。

## 5.3 智能控制技术应用

### ①动态加速自适应控制

基于状态变量预估算法, 提升机组负荷响应速率至4%Pe/min, 缩短低效运行时间, 减少低负荷下设备损耗; 采用增益调度技术优化汽温控制, 将主蒸汽温度波动范围从 $\pm 10^\circ\text{C}$ 压缩至 $\pm 5^\circ\text{C}$ , 降低受热面热应力。

### ②环保设备协同控制

宽温脱硝催化剂(活性窗口250~400°C)配合烟气旁路换热系统, 减少SCR系统频繁启停造成的催化剂磨损; 静电除尘器振打周期由30分钟/次缩短至15分钟/次, 防止极板积灰导致二次扬尘损耗。

## 5.4 运维管理策略

①预防性检修机制。基于设备疲劳损伤模型, 对汽轮机转子、高压管道等关键部件实施定向检修, 延长使用寿命30%以上; 建立机组启停次数与间隔时间标准(如8小时内启停 $\leq 1$ 次), 减少交变应力累积。

②热电协同优化。采用抽汽供热与储热装置联动技术, 将供电煤耗增幅控制在3%以内, 降低深度调峰经济性损耗。

## 6 火电机组深度调峰安全风险及应对措施

### 6.1 燃烧系统安全风险

低负荷燃烧失稳。风险点: 负荷率低于30%时, 煤

粉浓度不均易导致火焰偏斜、炉膛结焦甚至灭火, 部分机组需依赖投油稳燃, 增加爆燃风险。应对措施: 优化煤粉细度( $\leq 60 \mu\text{m}$ )和一次风速偏差, 提升低负荷燃烧稳定性; 加装燃烧器稳燃齿或旋流增强装置, 将最低稳燃负荷降至20%~25%。

## 6.2 水动力系统风险

直流炉水循环恶化。风险点: 超临界直流炉在低负荷下易出现水动力失稳, 省煤器入口流量接近保护阈值, 导致受热面过热和管道蠕变。应对措施: 动态调整给水再循环系统保护阈值(如流量下限降至25%), 优化水冷壁温度分布; 采用iFOC智能控制技术稳定主蒸汽压力(波动 $\leq \pm 0.5 \text{ MPa}$ )。

## 6.3 环保设备适配性风险

脱硝系统效率骤降。风险点: 低负荷下SCR入口烟温 $< 300^\circ\text{C}$ , 催化剂活性降低导致脱硝效率下降超30%, 氨逃逸风险增加。应对措施: 采用宽温催化剂(活性窗口250~400°C)并增设烟气旁路换热系统; 优化喷氨格栅分布, 适应低烟气流速下的NOx浓度不均问题。

## 6.4 设备机械疲劳损伤

①汽轮机转子交变应力。风险点: 负荷频繁波动(如15分钟内升降50MW)导致转子承受交变应力, 加速金属疲劳和蠕变损伤。应对措施: 基于数字孪生技术建立转子寿命预测模型, 制定预防性检修计划; 限制负荷波动速率( $\leq 4\%$ Pe/min), 减少机械冲击。

②典型事故案例与改进方向。某350MW机组: 2024年深度调峰至18%负荷时因水冷壁温度超限( $> 580^\circ\text{C}$ )紧急停机, 后通过动态流量阈值调整和燃烧优化解决; 某1000MW机组: 2023年因频繁调峰导致汽轮机高压缸转子裂纹, 经寿命预测模型提前预警后更换, 避免非停事故。

③政策与标准要求。国能发安全: 明确要求火电机组深度调峰期间需满足干湿态转换点以上运行, 严禁超设计工况长期低负荷运行; 调峰能力认证: 需通过72小时连续深度调峰试验验证, 确保主参数波动范围符合DL/T 5437-2024标准。

总之, 我国目前经济发展极为快速, 人们的用电需求和电网供电结构都发生了较大改变, 为保障人们的用电需求, 开展深度调峰工作是十分必要的, 而保证火电机组的安全运行是开展深度调峰工作的首要前提。

## 参考文献

- [1] 王旭. 火电机组智慧运行管理关键技术研究. 2023.
- [2] 赵浩宇. 关于深度调峰时火电机组安全运行的相关问题分析. 2022.