

调峰及低负荷运行对汽机侧设备的影响分析与优化策略

苏晓义

山西锦兴能源有限公司锦兴电厂，山西 吕梁 030000

DOI:10.61369/WCEST.2025040017

摘要：随着能源结构向清洁化转型，火电机组正从传统基荷电源逐步转变为电网调峰电源。在此背景下，火电机组参与深度调峰的频次和幅度显著增加，对汽轮机系统及相关辅助设备产生了深远影响。本文基于对不同容量等级机组调峰运行工况的调研分析，系统研究了低负荷运行对汽轮机设备的影响机理，归纳了具有共性的技术难题，并提出了针对性的优化建议和解决方案。

关键词：火电机组；深度调峰；启停调峰；低负荷运行；影响分析

Analysis and Optimization Strategies of the Impact of Peak Shaving and Low-Load Operation on Turbine Side Equipment

Su Xiaoyi

Shanxi Jinxing Energy Co., LTD. Jinxing Power Plant, Lvliaang, Shanxi 030000

Abstract : With the transformation of the energy structure towards cleanliness, thermal power units are gradually shifting from traditional base-load power sources to peak shaving power sources for the power grid. Against this backdrop, the frequency and extent to which thermal power units participate in deep peak shaving have significantly increased, exerting a profound impact on steam turbine systems and related auxiliary equipment. Based on the investigation and analysis of the peak shaving operation conditions of units of different capacity grades, this paper systematically studies the influence mechanism of low-load operation on steam turbine equipment, summarizes the common technical problems, and puts forward targeted optimization suggestions and solutions.

Keywords : thermal power unit; deep peak shaving; start and stop peak shaving; low-load operation; impact analysis

引言

随着我国能源结构持续向清洁低碳方向转型，火电机组正经历从主力电源向调节电源的战略性转变。这一转型使得火电机组面临日益严峻的调峰压力，对机组运行灵活性提出了更高标准。从运行实践来看，调峰及低负荷工况对锅炉系统影响最为显著，不仅设备问题频发，环保指标也面临严峻挑战。相较而言，针对汽轮机系统的相关研究较为欠缺。为全面掌握机组在启停调峰、深度调峰及低负荷运行中的技术难题，亟需开展系统性调研，深入分析运行问题及其影响机理，梳理各电厂的应对经验，为机组灵活性改造提供坚实的技术支撑。通过科学改造，可显著提升存量机组的调峰能力，使纯凝、抽凝机组的最小技术出力与额定容量比达到更精准的控制要求。

一、调峰及低负荷运行影响的主要汽机侧设备

通过调研得知，调峰及低负荷运行中，常见受影响的主要汽机侧设备可归结为以下三类：①加热系统疏水与水位。火电机组加热器采取疏水自流方式逐级流动，在参与调峰及低负荷运行时加热器的疏水会产生不畅和水位波动；②给水系统泄露。主要表现在对给水泵、给水泵汽轮机、最小流量阀的影响上；③全体设备老化。机组在参与深度调峰时，频繁采用温态启动、热态启动、极热态启动、负荷阶跃等各种导致设备负荷大幅度变动的工况，产生交变的热应力使汽机侧设备受到剧烈的热冲击，缩短机

组整体使用寿命。

二、调峰及低负荷运行对汽机侧设备的影响及优化策略

(一) 对加热器的影响及优化策略

1. 对高压加热器的影响及优化策略

(1) 疏水方面的影响

在火电机组运行中，加热器疏水系统通常采用逐级自流方式，即利用相邻加热器间的压力差实现疏水流动。然而，在机组

低负荷运行或快速降负荷工况下，加热器间压差减小会导致疏水不畅，进而影响高压加热器相邻两级抽汽间的压差平衡。这一问题已成为当前火电机组调峰运行中的普遍现象。具体表现为随着机组负荷降低，抽汽压差相应减小，直接影响高压加热器至除氧器的疏水效果。

(2) 疏水方面的优化策略

在机组调峰灵活性改造中，可考虑增设疏水增压泵等设备，从根本上解决低负荷工况下的疏水难题。此外还要优化运行监控，应实时监测高压加热器至除氧器汽侧压差，在保持汽侧压差相对稳定的前提下，严格控制降负荷速率。高压加热器设置水位三级保护，水位达到一级报警报警值（80%）时，应自动开启危急疏水调门，达到二级报警值（90%）时联锁开启危急疏水手动门，达到三级报警值（95%）应立即切除高压加热器。与此相对应的是，高压加热器水位过高时应严密防控汽轮机进水风险，制定汽轮机防水冲击专项预案并每周执行抽汽逆止门活动试验，每月进行防进水保护系统测试，执行中各按安全防护规程要求^[1]。

2. 对低压加热器的影响

(1) 水位方面的影响

低压加热器水位波动问题的根源在于疏水系统运行不畅，主要是由于机组在不同负荷工况下，相邻两级抽汽之间的压力差变化所导致的。这种压力波动会直接影响各级低压加热器的水位稳定性。现场运行实践表明，造成疏水不畅的具体原因包括：一是疏水管道系统设计不合理，表现为管道布置过长、弯头数量过多（特别是直角弯头），导致流动阻力显著增加；二是疏水阀门存在内漏缺陷，容易在管道内形成气阻现象，进而引起相邻加热器壳体压力异常升高，最终表现为水位控制困难。这些因素共同作用，形成了复杂的疏水系统运行障碍。

(2) 水位方面的优化策略

针对低压加热器水位调节问题，各发电企业根据机组特性和设备配置采取了差异化的解决方案。在工程实践中，主要优化措施可分为两类：一是通过改进疏水系统设计，如重新规划管路走向、选用大口径疏水阀门等方式降低管道流动阻力；二是加强系统密封性检查，重点针对热工测点接口、阀门法兰等关键部位开展泄漏检测，确保系统气密性，从而维持加热器间必要的压差条件。这些技术措施的实施效果与机组运行参数、设备选型等因素密切相关，需要结合具体工况进行针对性优化^[2]。

(二) 对给水系统的影响及优化策略

1. 对最小流量阀的影响及优化策略

(1) 阀门内漏方面的影响

在火电机组深度调峰及启停调峰运行过程中，为确保给水泵安全运行，必须维持最小流量以防止汽蚀现象发生，但此举也导致了给水泵最小流量阀需要频繁动作，进而引发两个关键问题：一是高速流体对阀芯组件造成持续性冲刷磨损；二是反复启闭导致阀门密封性能下降，最终形成难以避免的内漏缺陷，这种迫于工况需求所产生的阀门损耗问题也体现了现役机组灵活性运行与设备可靠性之间的矛盾。

(2) 阀门内漏方面的优化策略

在电厂热力系统中，给水泵最小流量阀作为连接除氧器与给

水泵出口的关键设备，其运行工况的显著特征一是承受全厂管道系统中最大的前后压差，二是在超越临界机组额定工况下存在显著的压差问题。针对这一技术难题，工程实践表明，通过在最小流量阀上游加装关断球阀的技术改造方案，可有效缓解主阀门的压差负荷，显著降低高速流体对阀芯的冲刷作用。现场运行数据证实，该改造措施在减轻阀门磨损方面取得了显著成效^[3]。

2. 给水泵密封的影响及优化策略

(1) 轴端漏水方面的影响

在电厂运行中，采用水密封结构的给水泵密封水源通常取自凝结水母管，当机组处于低负荷工况时，凝结水系统压力显著降低，无法提供足够的密封水压来平衡给水泵内部的高压介质，这种压力失衡直接导致密封系统效能下降，致使泵轴端部出现持续性泄漏现象。

(2) 轴端漏水方面的优化策略

针对给水泵在低负荷工况下的密封水压不足问题，部分电厂采取了通过优化运行方式，适当提高凝结水泵出力以提升凝结水母管整体压力的技术改造方案，也有电厂则采用增设凝结水升压泵的工程措施，在不改变原有凝结水泵运行参数的前提下，专门提升密封水管路段的压力水平。根据观察发现，这两种技术路线均在一定程度上改善了轴端密封性能的效果，在解决低负荷工况下给水泵密封水压不足问题上起到较为明显的优化作用。

3. 对小机排汽温度的影响及优化策略

(1) 排汽温度偏高方面的影响

对于采用小汽轮机驱动给水泵的机组，在低负荷运行工况下普遍面临排汽温度偏高的问题。专项试验表明，在维持机组负荷和给水流量恒定的情况下，通过逐步关小最小流量阀来降低给水泵入口流量，试验结果显示随着进汽量的减少，小汽轮机排汽温度呈现明显上升趋势。根据运行规范，小汽轮机排汽温度报警值通常设定为80℃，但在深度调峰的低负荷工况下，由于进汽量不足导致末级动叶处于鼓风工况运行，排汽温度往往会逼近这一限值，从而制约了机组的调峰能力。

(2) 排汽温度偏高方面的优化策略

针对电厂小汽轮机运行中出现的排汽温度异常升高问题，目前各电厂现役机组主要采用两种控制措施，对在安全运行范围控制排汽温度均能起到一定效果：一是快速启动排汽口喷水减温系统进行主动降温，二是通过调节最小流量阀开度来增加汽轮机进汽量，从而消除鼓风效应引起的排汽温度升高现象。

(三) 调峰及低负荷运行对机组启动的影响及优化策略

1. 对无旁路机组启动的影响及优化策略

(1) 启停方面的影响

当前部分在役机组存在锅炉系统设计局限性，仅在锅炉侧配置了5%BMCR容量的过热器小旁路系统。这种配置在机组启动阶段由于蒸汽流量不足，导致汽温、汽压调节困难，再热器系统被迫承受干烧工况，且过热器系统内积存的水汽难以及时排出，在高负荷工况下容易形成水塞现象，不仅严重影响传热效率，还可能引发爆管事故。受此限制，此类机组在启动过程中必须严格控制燃烧率，导致启动时间显著延长，极难实现“停机不停炉”的

灵活运行模式。

(2) 启停方面的优化策略

为应对火电机组频繁启停调峰的新常态，各电厂积极探索不同的技术路线，部分电厂在参与调峰时采用“发电机解列、汽轮机空转”的特殊运行模式，另有部分电厂则投入成本对汽机侧实施两级旁路系统改造，旨在提升机组在新型电力系统中的运行灵活性^[4]。

2. 对轴封供汽温度的影响及优化策略

(1) 供汽温度不达标方面的影响

传统机组的轴封供汽温度设计标准相对较低，而大容量机组对轴封供汽温度的要求则随着市场需求而日益提高，这一矛盾在如调峰启停时尤为突出。例如，当汽轮机转子处于高温状态（通常达300–400°C）时，若轴封供汽温度（通常仅150–200°C）与缸体温度存在较大温差，低温蒸汽的突然注入会导致轴封部位急剧冷却，产生局部变形。这种热应力不均不仅会引起动静部件碰磨，更会直接导致轴系振动异常（通常表现为振动值突增20–30 μm），严重影响机组安全运行。

(2) 供汽温度不达标方面的优化策略

针对部分现役机组轴封供汽温度控制问题，目前在解决方案上也存在几种不同的技术路线，其中采用较多的技术路线是在辅助蒸汽至轴封母管的管路上增设电加热装置，通过主动加热的方式确保轴封供汽温度满足运行要求。大多数新建电厂还是选择了在设计阶段开始优化供汽管路的方案，通过加装减温减压装置和温度监测系统，在机组极热态或热态启动时直接利用主蒸汽作为轴封汽源，从源头上解决轴封供汽温度偏低的问题。

三、减少调峰及低负荷运行对汽机侧设备影响的辅助手段

(一) 承担采暖供热和工业供汽

在热电联产机组运行中，供热方式主要分为两类：采暖供热通常采用中低压连通管抽汽方式，而工业供汽则可采用冷再热蒸

汽、热再热蒸汽或旋转隔板抽汽等多种技术方案。机组最低运行负荷需同时满足采暖供热和工业供汽的参数要求，其中采暖供热作为重要的民生保障项目具有优先权。部分电厂通过优化运行方式（包括适当降低再热蒸汽温度、调节低压缸进汽阀门开度等）来确保采暖抽汽量达标并控制中排温度在允许范围内，这种运行策略既保障了民生供暖需求，又提升了机组的经济运行水平^[5]。

(二) 降低机组供热季出力

在电力系统灵活性改造实践中，部分电厂通过实施低压缸零出力技术改造，显著提升了机组调峰性能。该技术通过在供热季将低压缸进汽量降至最低，大幅提高了机组供热能力和低负荷运行稳定性，不仅使供电煤耗降低10–15g/kWh，还有效缓解了冬季“热电耦合”矛盾。这种改造模式充分体现了传统火电由基础保障电源向灵活调节电源的战略转型，为构建新型电力系统提供了重要技术支撑。目前该技术已在北方多个供热电厂成功应用，取得了显著的节能减排效果。

(三) 采用大机组集中供热

在能源结构优化升级过程中，采用大型热电联产机组替代分散式小锅炉供热系统，不仅显著提升了能源利用效率，还能有效降低区域综合煤耗指标，产生显著的节能减排效益。这种集中供热模式通过规模效应实现了能源梯级利用，为城市绿色发展提供了重要支撑。

四、结语

火电机组在参与电网调峰及低负荷运行时面临的汽机侧运行问题，其本质源于过度追求额定工况下的经济性指标，而相对忽视了机组在变负荷工况下的运行适应性。针对这一现状，除了加强对新建机组或实施通流改造的机组的调峰能力和负荷响应速率以及快速启停性能等低负荷运行指标进行优化设计外，在现役机组的系统性灵活性方面应重点加强汽机侧设备的针对性改造，以适应新型电力系统对火电机组调节性能的更高要求。

参考文献

- [1] 沈利, 徐书德, 关键, 等. 超临界大容量火电机组深度调峰对燃煤锅炉的影响 [J]. 发电设备, 2016, 30 (1) : 21–23.
- [2] 卓明昌. 发电厂高加正常疏水不畅的原因分析及处理 [J]. 广西电力, 2007, 30 (4) : 45–46.
- [3] 谢明付. 630MW 机组低压加热器疏水不畅原因分析及处理 [J]. 节能, 2021, 40 (7) : 74–75.
- [4] 高奎, 杜亚鸿, 赵晖, 等. 深度调峰机组给水泵再循环控制优化调整 [J]. 热力发电, 2020, 49 (11) : 101–106.
- [5] 刘振国, 苏益斌. 亚临界电站锅炉5%小旁路的启动方式及运行特点 [J]. 电站系统工程, 2010, 26 (6) : 54.