

燃气轮机燃烧模式切换过程稳定性控制研究

谷 涛

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘 要】：解决 GE PG6111FA 燃气轮机 DLN2.6 燃烧系统模式切换失稳问题，保障机组安全高效运行，本文结合江苏国信仪征热电机组实际运行经验，系统研究燃烧模式切换特性与稳定边界，分析失稳诱因及失效机制，提出针对性控制策略。DLN2.6 燃烧系统依托喷嘴分级投退实现多模式切换，切换过程与转速、负荷强耦合，燃料参数异常、燃烧脉动超限及控制逻辑刚性是主要失稳诱因。构建多维度在线监视体系、管控切换节点、动态优化燃烧分配参数，可有效提升模式切换稳定性，规避失稳风险，为同类型燃气轮机燃烧模式切换安全管控提供理论支撑与工程参考。

【关键词】：燃气轮机；DLN 燃烧系统；模式切换；燃烧稳定性；控制策略

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.055

引言

燃气轮机是高效清洁的动力装备，电力生产领域应用广泛，燃烧系统稳定运行直接决定机组安全性与经济性。GE PG6111FA 燃气轮机配置的 DLN2.6 燃烧系统，借助多组喷嘴分级投退完成燃烧模式切换，能有效降低氮氧化物排放，切换过程却易受燃料参数、燃烧脉动、控制逻辑等因素影响，出现模式反复切换、火焰熄灭甚至机组跳闸等失稳现象，严重影响机组可靠运行。本文聚焦该型燃气轮机燃烧模式切换特性，明确稳定边界，剖析失稳机制，提出科学可行的控制策略，解决实际运行中的失稳难题，对提升燃气轮机运行稳定性、降低故障发生率有重要工程实践意义。

1 燃气轮机燃烧模式切换特性与稳定边界

1.1 DLN 燃烧系统模式切换机理

GE PG6111FA 燃气轮机配置的 DLN2.6 燃烧系统，依托喷嘴分区组合实现多模式有序切换，核心机理是通过 PM1、PM2、PM3 三组预混喷嘴与外圈 Q 喷嘴的分级投退，完成从点火到基本负荷的全工况预混燃烧组织，全程维持低氮排放与燃烧效率的协同匹配^[1]。系统以 Mark VIe 为控制核心，通过燃料阀位调节、转速与负荷阈值判定，实现不同喷嘴组合的精准投切，点火初始阶段启用 Mode_3 模式投入 PM1 与 PM2 喷嘴，随转速提升依次切换至 Mode_2、Mode_1 模式，并网升负荷后再度回归 Mode_3，逐步投入 PM3 与 Q 喷嘴完成向全预混模式的过渡，喷嘴组合的动态调整直接决定燃烧场分布与空燃比匹配特性，是模式切换稳定运行的核心基础。

1.2 典型工况切换节点与参数特征

6FA 燃气轮机燃烧模式切换与转速、负荷强耦合，呈现清晰工况阈值特征，点火至 TNH 达 18% 额定转速维持 Mode_3，转速升至 95% 切换为仅 PM2 工作的 Mode_2，全速空载阶段

以 PM1 单独运行的 Mode_1 稳定工况，并网负荷达 9MW 左右回归 Mode_3，负荷升至 17MW 触发 Mode_6B 切换，22MW 过渡至 Mode_6A，25MW 后投入 Q 喷嘴进入 Mode_6AQ 并启用自动燃烧调整功能。实际运行中切换负荷受环境温度、燃料特性影响存在小幅偏移，可通过 CA_CRT 燃烧参考指数判定，Mode_3 转 Mode_6B 对应 CA_CRT>80.72，Mode_6B 转 Mode_6AQ 对应 CA_CRT>86.4，该指数能规避负荷波动干扰，为切换节点判定提供量化依据。

1.3 燃烧稳定性关键判定边界

燃烧稳定性边界由燃料参数、燃烧脉动、排气分散度多维阈值共同界定，天然气温度需维持在 26—63℃ 区间，超出该范围会触发韦伯指数超限，直接破坏预混燃烧匹配条件；燃烧脉动以 PK1、PK2 为核心判定指标，中高频段脉动超限易引发燃烧室硬件损伤与燃烧振荡，是快速减负荷保护的核心触发条件；排气分散度作为燃烧均匀性直接表征，模式切换时若出现火焰筒熄火、局部热负荷失衡，会快速突破分散度阈值触发主保护跳闸，三者共同构成燃烧模式切换的稳定运行边界，任一参数超限均会引发燃烧失稳。

2 燃烧模式切换失稳诱因与失效机制

2.1 燃料参数异常诱发失稳

燃料参数偏离设计区间是模式切换失稳的首要诱因，冬季低温工况下天然气温度低于 26℃ 阈值，会直接触发燃料系统韦伯指数超限保护，江苏国信仪征热电 6FA 机组冬季启动中，因天然气温度不满足 Mode_6B 投入条件，触发 L70L_FGWI 减负荷信号，导致燃烧模式在 Mode_3 与 Mode_6B 间反复切换^[2]。燃料压力、华白指数同步波动会加剧喷嘴燃料分配失衡，预混模式下空燃比偏离最优区间，火焰稳定性急剧下降，进而引发局部熄火、燃烧场畸变，为后续跳闸埋下隐患，该类失稳

触发快、扰动强，直接突破模式切换的燃料稳定边界。

2.2 燃烧脉动超限导致振荡

燃烧脉动超限是模式切换中燃烧振荡与硬件损伤的核心诱因，DLN2.6 燃烧系统的 CDM 监测系统将脉动分为低、中、高频段，PK1 与 PK2 压力值直接关联燃烧室结构安全，模式切换过程中喷嘴投退引发燃料瞬态重分配，易激发中高频燃烧脉动共振。PM1、PM3 燃料分配失衡或 AGC 指令导致负荷快速波动时，燃烧脉动持续攀升，超出保护阈值后触发快速减负荷，减负荷过程中脉动未得到有效抑制，会进一步引发火焰筒振荡、局部过热，甚至造成喷嘴烧损，形成“脉动超限—减负荷—燃烧扰动—脉动加剧”的恶性循环，最终突破燃烧稳定边界（见图1）。

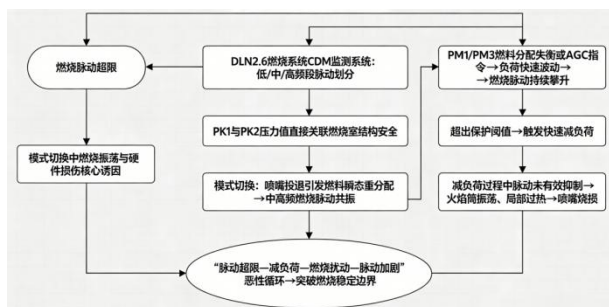


图1 燃烧脉动超限导致振荡

2.3 控制逻辑与保护动作触发扰动

原有控制逻辑对模式切换约束过于刚性，易引发非必要保护动作加剧扰动，Mode_3 转 Mode_6B 仅以天然气温度为唯一允许条件，未结合燃烧实时状态综合判定，冬季低温下即便燃烧工况稳定，仍会因温度不满足闭锁预混模式切换。快速减负荷逻辑中，L70L_FGWI 信号触发后直接联动 L70L 与 L83JD10，实现无滞后快速减负荷，模式回切过程中燃料分配与喷嘴状态瞬态变化，引发燃烧剧烈波动，仪征热电机组在模式反复切换中出现火检丢失、火焰筒熄火，最终触发排气分散度高保护跳闸，控制逻辑与保护动作的耦合扰动是失稳失效的关键传导机制。

3 燃烧模式切换过程稳定性控制策略

（1）多维度运行参数在线监视：构建以燃料特性、燃烧脉动、燃烧状态为核心的三维在线监视体系，重点监测天然气温度、压力、韦伯指数，冬季投运天然气加热系统确保温度维

持在 26—63℃ 安全区间，从源头规避燃料参数超限触发保护。强化 CDM 系统低频、中频、高频段脉动实时监视，重点跟踪 PK1、PK2 压力变化趋势，区分持续性超限与间歇性波动，结合燃烧画面监测 CDM 探头状态、MBC 系统运行及报警信息，模式切换或负荷突变时及时复位闭锁报警，必要时退出自动燃烧调整，通过多参数联动监视实现异常早预警、早处置。

（2）燃烧模式切换节点精准管控：优化模式切换节点管控策略，避免负荷停留在切换阈值附近，升减负荷时至少偏离切换点 5MW，消除临界工况扰动风险^[3]。以 CA_CRT 燃烧参考指数为核心判定依据，替代传统负荷经验值，锁定 Mode_3 转 Mode_6B、Mode_6B 转 Mode_6AQ 的切换时机，提前规划负荷变化速率，模式切换阶段控制负荷升降斜率，避免阶跃式指令引发燃烧瞬态失衡。结合 6FA 机组实际运行特性，建立转速—负荷—燃烧参考指数三位一体的切换节点库，适配不同环境温度、燃料品质下的切换需求，提升模式切换的可控性与稳定性。

（3）燃烧分配参数动态优化：针对模式切换中燃料分配失衡问题，实施多参数动态优化调整，Mode_6B 转 Mode_6A 过程中出现 PM1 燃料不足、火焰强度减弱，适度提升 transferbias PM1_M6BA_BA 偏置值，增加 PM1 通道燃料分配，强化火焰稳定性。夏季高负荷温控模式下，降低 KTSB_PM1B、KTSB_PM3B 等 TSB 参数，放宽燃料瞬态分配偏置模型触发边界，抑制 AGC 指令引发的燃烧脉动升高，同时合理调整 NOx 偏置，在排放达标前提下适度提升 NOx 偏置值，降低燃烧脉动水平，通过 PM 偏置、TSB 参数、NOx 偏置的协同优化，实现全切换过程燃料分配与燃烧场的动态匹配。

4 结语

本文围绕 GE PG6111FA 燃气轮机 DLN2.6 燃烧系统模式切换展开研究，明确其切换机理、典型工况节点及稳定边界，分析燃料参数异常、燃烧脉动超限、控制逻辑刚性三大失稳诱因及传导机制，提出多维度在线监视、切换节点管控、燃烧分配参数动态优化的控制策略。实践表明，该策略可有效解决模式切换过程中的失稳问题，提升切换可控性与稳定性。后续结合机组长期运行数据，进一步优化控制参数阈值，完善切换逻辑，为同类型燃气轮机燃烧系统优化升级提供更全面技术支撑，推动燃气轮机实现更安全、高效、低排放运行。

参考文献：

- [1] 王维,黄劲松,姜涛.9E 燃气轮机燃烧系统故障分析及处理[J].燃气轮机技术,2025,38(02):55-58+72.
- [2] 吴利平,茆亚平,陆子龙.某燃气轮机燃烧模式切换中快速减负荷分析[J].热力透平,2025,54(02):154-158.
- [3] 蚁建荣,何宗泽,程芳林,等.H 级燃气轮机的发展现状及技术特点分析[J].热能动力工程,2022,37(10):1-15.