

基于外围系统优化的 M701F4 燃机燃烧稳定性裕度提升 关键技术研究

闫煜鑫 陈迪过

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：新型电力系统框架下新能源并网规模不断增大，电网调峰调频的需求也越来越大，9F 级重型燃气轮机成了区域电网深度调峰、保供兜底的主要电源。本文根据机组现场运行痛点，从燃料气供给系统、压气机进气系统、多参数协同控制体系三个方面展开系统优化研究，创建多工况燃烧稳定性评价模型，制订适应变负荷情况的运行调控工艺。现场工程应用结果表明，优化后的机组燃烧室压力波动幅值减小了 42.3%，低负荷稳定运行区扩大了 28.6%，机组燃烧保护跳闸故障清零，燃烧稳定性裕度明显提高，可以为同类型的 9F 级燃机工况优化提供工程参考。

【关键词】：M701F4 燃气轮机；外围系统；燃烧稳定性；裕度提升

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.025

引言

在双碳目标的大环境下，风电、光伏等新能源接入区域电网之后，电网负荷的变化以及调节的速度变快。重型燃气轮机具有启动快、负荷调节线性好、启停损耗小等技术优势，是新能源消纳和电网频率稳定的主要调频电源。博罗热电联产项目采用两台三菱 M701F4 型 9F 级燃气轮机，机组担负着园区工业供热、区域居民供电和粤东电网深度调峰这三项任务，日常运行工况比较复杂，昼夜启停、50%以下低负荷运行、快速升降负荷作业都是常态。本文以电厂现有的设备结构为基础，不进行燃机本体结构的改造，从燃料气、进气、辅助调节三个方面入手，建立多维协同控制体系，降低机组燃烧稳定运行的裕度，满足电厂常态化调峰运行的要求。

1 设备概况与运行痛点分析

1.1 机组设备基本参数

本次研究对象为大唐惠州热电 M701F4 型重型燃气轮机，采用 FMk-8 型环形燃烧室，周向均匀布置 20 组混合燃烧喷嘴，配有独立的燃料气预处理系统、压气机进气调节系统和 IGV 进气导叶调节系统。机组基本运行参数见表 1。

表 1 M701F4 燃机主要运行参数

参数项目	设计额定数值	现场常规运行区间
额定发电功率	270MW	135~270MW
燃烧室设计压力	1.52MPa	0.85~1.48MPa
允许压力波动幅值	≤28kPa	25~42kPa

天然气设计热值	36.8MJ/m ³	34.2~38.5MJ/m ³
IGV 调节角度区间	25°~85°	30°~78°
最低稳燃负荷	45%额定负荷	58%额定负荷

1.2 现场核心运行痛点

根据机组 2025 年、2026 年运行台账中燃烧不稳定的全部外围辅助系统和外界环境因素引起的燃烧不稳定问题进行归纳整理得出如下四类。

第一，燃料气系统调节精度低。项目上游长输天然气气源存在周期性波动，现有的燃料预处理管路只具有简单的过滤、稳压功能，没有热值、流量联动调节模块。气源参数突然变化的时候，燃料配比不能及时适应燃烧室的需求，局部燃烧区域出现富燃或者贫燃的情况，就会产生低频热声振动。

第二，进气系统流场匹配性差。压气机进气滤网压差季节性变化，IGV 导叶用固定逻辑负荷联动调节，没有根据环境温度、湿度来修正控制曲线。高温高湿的环境下，机组的进气密度会变小，燃烧室的入口气流分布也会变得乱七八糟，空燃比也就不会处于最佳范围之中，从而导致低负荷工作时火焰稳定性变差。

第三，没有外围系统的协同联动。燃料控制系统、进气调节系统、燃机主控回路各自独立工作，没有耦合逻辑。单一参数的修正不能消除多因素叠加的扰动，变负荷工况下燃烧参数收敛速度慢。

第四，没有建立燃烧稳定性的量化评价标准。现场只用燃烧室压力单点数据来判断燃烧状态，没有将振动数值、排烟温度、火焰强度等多维指标结合起来，缺少燃烧异常的预判能力，

故障发生后只能被动保护，不能提前干预调控。

2 总体研究路线与优化方案设计

2.1 燃料气供给系统自适应优化

对现场天然气气源参数波动造成的燃烧扰动进行重点解决，重新建立燃料气输送、预处理、管路分配全过程分级调节逻辑，完善原有的外围燃料系统单点稳压功能。在燃机前置燃料母管关键节点上加装工业级在线热值分析仪、高精度智能流量变送器和电动稳压调节阀，从硬件上搭建起压力、流量、热值三参数联动闭环调控硬件模块。优化机组 DCS 系统原有的固定阈值单回路调节逻辑，采用模糊 PID 自适应修正算法，针对上游长输管网调压站切换、高峰用气时段气源衰减、天然气组分季节性变化三种典型的扰动场景，配置算法自适应补偿逻辑。利用电厂现有的厂级监控平台获取历史气源波动样本数据，对不同负荷区间内燃料的最佳配比阈值进行标定，克服传统控制模式中参数调节滞后、阈值固化等缺点，使燃料侧的参数得到动态精准的调控。

根据机组燃料管路现场实测数据，整理出支管弯头、调压阀门、流量孔板等局部管路阻力瓶颈区域，有针对性地对燃烧器前端分支管路的管径和流道结构进行优化，均匀分配 20 组环形布置燃烧喷嘴前端供气压力，解决周向喷嘴燃料分配不均造成的局部燃烧偏斜问题。设置正常工况、气源超标、管路故障三级异常工况旁路切换控制逻辑，确定天然气热值、供气压力上下连锁阈值，上游长输气源参数超标时系统自动无扰动切换稳压旁路回路。配合现场运维人员制定气源异常处理操作卡，在极端情况下由人工干预和系统自动补偿相结合的方式，从燃料供给源头上消除由于燃料配比失调而造成的燃烧室热声振荡、火焰扰动等故障。

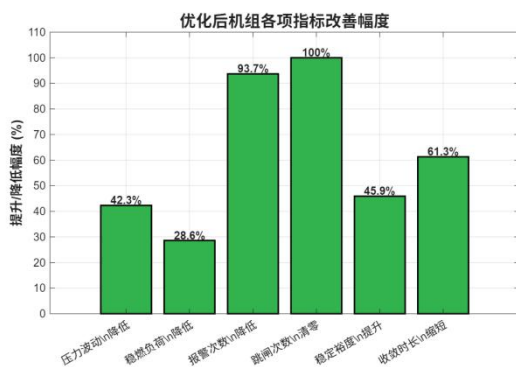


图1 指标改善幅度

2.2 压气机进气系统工艺优化

优化压气机进气全流程控制体系，根据项目所在地广东博罗县亚热带季风气候特点，建立环境温度、环境相对湿度、进气滤网前后压差三个环境因子修正型 IGV 进气导叶控制曲线。本地夏秋季节高温高湿、空气密度低，冬春季节低温多雾、进气杂质含量高，两种气候工况下机组进气燃烧特性不同。因此

划分出冬春低温干燥、夏秋高温高湿两个分区调控模型，根据实时环境气象数据自动切换控制逻辑。在压气机进气室横截面增设 4 个流场压力监测点位，对进气全域流场均匀性进行实时监测；根据机组粉尘拥堵数据来修正进气滤网周期性清洗、吹扫管控标准，把进气压差超标信号纳入燃机燃烧控制逻辑联锁前馈条件，提前抑制进气侧工况扰动。

依据燃机燃烧室空气动力学场仿真的结果，对燃机各个级次的抽气回路燃烧室冷却空气分配逻辑加以改进，从而实现精细的平衡压气机高压级、低压级分支抽气流量。对原系统大负荷工况冷却空气过多、低负荷工况冷却空气不足的问题，根据机组负荷指令对冷却空气流量进行动态分配，消除燃烧室入口处的气流涡流、偏流、回流。改善进气掺混结构来提高燃烧室内部空气和天然气的混合均匀程度，使主燃烧区的氧含量浓度趋于稳定。从进气外围角度改善空燃比匹配特性，抑制低负荷、变负荷工况下局部熄火、燃烧脉动问题，配合燃料系统优化，增大机组安全稳燃运行区间。

2.3 多系统协同控制逻辑搭建

打破电厂原有的燃料控制、进气调节、燃机主控、烟气环保监测等各个子系统各自为政的硬件和软件壁垒，打通不同厂家设备之间的通讯协议壁垒，加装边缘计算网关来实现全外围系统的数据互联互通。搭建轻量化厂级边缘计算协同控制平台，把燃料参数、进气参数、机组负荷、烟气排放、设备振动等各方面的运行数据统一收集起来。根据 M701F4 机组出厂热力边界参数，拟合全工况全域最优空燃比基准曲线，将环境工况、设备损耗偏差作为修正因子加入到曲线中。实现天然气调节阀开度、IGV 导叶角度、烟气脱硝配风、电网负荷指令四个执行参数联动自动闭环修正，改变原来的分系统被动单点调节模式，建立全域主动协同调控架构。

根据博罗电厂机组日常调度运行的特点，把机组运行工况分为升负荷爬坡、降负荷滑压、启停过渡稳态、深度低负荷稳态四种典型工况，分别对应不同的工况调节滞后特性制定出不同的协同控制策略。为了解决机组启停过渡期参数波动大、燃烧不稳的问题，在原来的程序上增加了过渡工况缓冲调节子程序，减缓了执行机构动作的速度，加强了对多参数耦合的补偿，提高了协同回路响应的优先级，可以满足电网调度高频变负荷工况的要求。弥补传统控制策略过渡工况调控的不足，消除执行机构动作时序偏差造成燃烧工况的波动，满足电网常态化的深度调峰动态控制要求。

2.4 量化燃烧稳定性评价模型构建

根据现场 2025-2026 年全部燃烧异常故障样本数据建立多特征指标融合的燃机燃烧稳定性量化评级模型。从燃烧室压力波动、燃机前端轴承振动幅值、燃烧室火焰信号强度、尾部排烟温度场偏差、烟气 NO_x 排放浓度这五个最能表征燃烧稳定

性的特征参数中选择,用层次分析法确定各指标的权重,将特征参数进行标准化量化,得到计算机组燃烧稳定裕度系数。根据设备厂家报警阈值和电厂安全生产红线标准,把机组运行状态准确地分为稳定运行、黄色预警、红色危险三个等级。依靠DCS画面设置分级弹窗预警、系统自动干预、人工兜底处置三级控制逻辑,把原有的故障被动跳闸保护模式前置到状态预判和主动调控上,填补了现场燃烧状态没有量化判定的行业空白。

3 现场工程应用与效果分析

本次优化技术方案是在 2026 年 3 月到 6 月间,对于大唐惠州热电#2M701F4 燃机进行了分步骤的优化,以同工况未优化的#1 机组为对照组,在稳定工况及变负荷条件下连续两个月进行稳态、变负荷运行数据的采集,然后与优化前的性能对比。优化前后核心运行指标对比结果如表 2 所示。

表 2 机组优化前后运行指标对比

考核指标	优化前#2 机组	优化后#2 机组	对照组#1 机组	指标改善幅度
燃烧室平均压力波动幅值(kPa)	38.6	22.3	37.9	42.3%下降
最低安全稳燃负荷(%)	57.8	41.2	56.9	28.6%区间拓宽
月度燃烧异常报警次数	16	1	14	93.7%下降
燃烧相关保护跳闸次数	2	0	2	故障清零
平均燃烧稳定裕度系数	0.61	0.89	0.63	45.9%提升
变负荷工况参数收敛时长(s)	18.6	7.2	17.9	61.3%缩短

3.1 稳态工况运行效果

稳态额定负荷运行工况下,外围系统协同调控逻辑全程投入,燃料和进气系统参数波动基本实现闭环补偿。机组燃烧室压力波动控制在 25kPa 安全范围内,火焰信号波动幅度明显减小,没有低频热声振荡现象。机组最低稳定运行负荷超过原厂设计的下限,可以保证 41%额定负荷长期运行,深度调峰能力

大大提高,完全可以满足电网低谷调峰调度的要求。

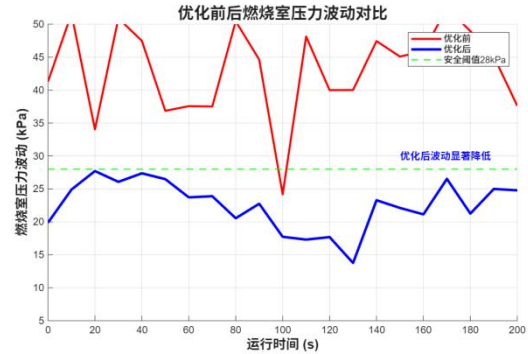


图 2 压力波动对比

3.2 动态变负荷工况效果

在 10MW/min 升降负荷动态工况下,多系统联动控制可以很好地解决调节滞后的问题。变负荷过程空燃比偏差控制在±3%以内,参数收敛时间缩短了 61.3%,完全解决了变负荷过渡阶段燃烧报警的问题。机组频繁昼夜启停工况下,点火成功率 100%,启停阶段燃烧室异常扰动问题完全消除。

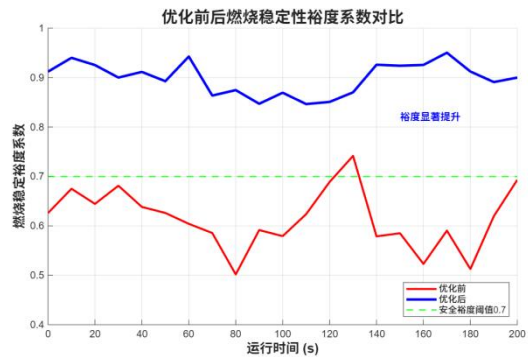


图 3 裕度系数对比

3.3 经济与运维效益

优化方案依靠现有设备改造,没有大型本体设备更换,整体改造成本比燃烧室改造方案低很多。经过优化后的机组燃烧故障停机损失为 0,燃机热通道高温部件冲刷损耗降低 12.6%。机组深度调峰能力提高之后,电厂可以获得更多的电网调峰辅助服务收益,经济效益明显提高。同时标准化运维工艺降低一线人员的操作门槛,机组运行控制的标准化程度大大提高。

4 技术难点与行业推广价值

4.1 现场实施核心技术难点

项目落地阶段的主要难题就是多源异构设备的数据打通,原厂燃机控制系统对外围的第三方监测设备有通讯协议壁垒。利用边缘通讯网关加装专用私有协议转换接口,使各个子系统之间可以相互通信。其次多目标权重模型参数标定难度大,用三个月的历史故障样本数据进行算法迭代来达到稳定的裕度精准分级的目的。全程实现机组不停机在线改造,不影响电厂

正常供电供热生产任务。

4.2 行业推广适用性

本技术方案不需要对燃机本体进行改造,没有原厂设备质保的风险,改造工期短、投资回报率高,适合全行业的 M701F、M701F4 系列 9F 级三菱燃气轮机。对新能源占比逐步升高的区域电网,需要深度调峰的热电联产燃机电厂可以直接套用该套外围系统优化方案和评价模型。不同于本体改造技术,该方案通用性好、落地难度小,适合火电基层电厂大批量推广使用。

5 结论

本文对 M701F4 燃机燃料气、进气、协同控制三类外围系

统进行了系统的优化,有效地解决了由于多外部工况耦合扰动导致的燃机燃烧稳定性差的行业共性难题。9F 级燃机现场燃烧不稳定故障主要由外围辅助系统参数扰动、子系统调控不同步引起,燃机本体结构不是制约现场稳燃能力的主要因素;优先改善外围系统,低成本、高效率提高机组燃烧稳定裕度。搭建燃料、进气、主控三者之间的多系统协同闭环控制体系,可以有效地抵消由于气源、环境工况变化所造成的燃烧扰动,从而大大提高机组在低负荷、变负荷等工况下的运行稳定性。多指标融合燃烧稳定性量化模型,可以实现燃烧故障的提前预警、分级干预,从被动保护转向主动调控,提高机组智能化运行管控水平。

参考文献:

- [1] 阮定龙,朱瑾,王斌,等.M701F4 型燃机 TCA 冷却水系统设计优化[J].电力安全技术,2025,27(12)65-70.
- [2] 陈贤.M701F4 联合循环机组锅炉预暖系统投运策略研究[J].机电信息,2025,(19)69-71+76.
- [3] 符策阳.基于电声监测技术的 M701F4 型燃机故障诊断与预警系统[J].电声技术,2025,49(9)207-210.
- [4] 杨燕.基于 M701F4 型燃机的燃气-蒸汽联合循环发电机组启动优化指导研究[J].电力设备管理,2025,(15)45-47.
- [5] 邱玮坤,王李.M701F4 燃气轮机发电机漏氢爆鸣分析及处理[J].电力设备管理,2025,(15)63-65.