

燃气轮机燃烧室火焰监测与故障诊断分析

贾力权

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘要】：燃气轮机燃烧室火焰状态直接影响机组稳定运行，现有监测手段存在信号干扰、故障识别滞后等问题。文中整合多种火焰监测技术，构建对应的故障诊断流程，依托精准数值采集与信号处理方式完成异常判别，有效提升燃烧室火焰状态把控能力，保障机组热力工况平稳运行。

【关键词】：燃气轮机；燃烧室；火焰监测；故障诊断；燃烧状态

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.077

引言

燃气轮机作为主流动力发电设备，燃烧室燃烧工况直接决定机组运行效能。燃烧异常极易引发机组运行隐患，现有监测诊断方式难以适配复杂高温高压工况。为此开展火焰监测与故障诊断相关技术研究，在完善工况监测体系，提升燃烧异常识别与调控实操水平。

1 燃气轮机燃烧室火焰监测技术分析

1.1 传统辐射型火焰监测技术（紫外线/红外线/可见光检测）

传统辐射型火焰监测技术基于火焰光辐射信号识别状态，核心是用光电转换装置捕捉特定波段辐射能量并转为电信号^[1]。紫外线检测用 190-280 nm 光电管采集燃气燃烧紫外特征辐射，设 200-500 Hz 信号滤波带宽，过滤干扰，识别点火阶段微弱火焰信号；红外线检测聚焦 CO₂、H₂O 燃烧产物 4.3 μm、2.7 μm 特征红外波段，用窄带滤光片分离火焰辐射与背景，配合增益调节电路将火焰辐射强度转为 0-10 V 模拟电压信号，持续监测稳定燃烧阶段火焰存在性；可见光检测用 CCD 传感器采集 400-700 nm 波段火焰亮度信号，用灰度阈值分割算法提取火焰区域，计算火焰中心坐标与轮廓面积，量化表征火焰形态。

1.2 光纤传感器火焰监测技术

光纤传感器火焰监测技术以耐高温石英光纤为信号传输载体，将探头布置于燃气轮机燃烧室的燃烧区与掺混区，采集高温高压环境下的火焰信号。探头用氧化铝陶瓷保护套管，可耐受 1600℃ 壁面温度，通过端面镀膜降低高温辐射对光纤端面的烧蚀；信号传输用 850nm 多模光纤，传输距离达 500m，不受强电磁干扰，避免信号失真。系统在燃烧室不同周向布置 6-12 个光纤探头，采集不同区域火焰辐射信号，后端用光电倍增管将光信号转为电信号，经 A/D 模块以 1kHz 采样频率数字化处理，通过对比信号幅值与相位差识别异常状态。

1.3 红外热像与光谱分析监测技术

红外热像与光谱分析监测技术通过非接触式成像与光谱解析，多维度表征火焰温度场与燃烧状态。红外热像仪用制冷型焦平面阵列探测器，工作波段 3-5 μm，空间分辨率不低于 320×240，帧率 25 fps，实时采集燃烧室出口截面温度分布图像，经温度反演算法算火焰中心温度与梯度，量化分析燃烧均匀性；光谱分析用微型光纤光谱仪，采集波长 200-1100 nm，分辨率优于 0.5 nm，解析火焰发射光谱特征，识别 OH、CH 等自由基特征谱线强度，判断燃烧反应进程与火焰稳定性。系统将红外热像与光谱数据时空配准，构建火焰温度-光谱特征关联模型，设定温度偏差阈值（±50℃）与特征谱线强度阈值，实现燃烧不稳定早期预警。

1.4 激光诊断类火焰监测技术

激光诊断类火焰监测技术以可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）为核心，实现燃烧室火焰的非接触式多参数监测^[2]。系统采用中心波长匹配 CO₂（2.0 μm）、H₂O（1.39 μm）吸收线的半导体激光器，通过频率调制技术产生窄线宽激光束，激光束穿过燃烧室火焰区域后，由光电探测器接收透射光信号，通过分析激光吸收光谱的线强度与线型，计算火焰区域的温度与组分浓度。系统的激光调制频率设置为 10 kHz，扫描速率可达 100 Hz，可实现毫秒级的动态过程捕捉，通过多点位激光束布置，构建燃烧室二维温度场分布；结合直接吸收光谱与波长调制光谱技术，将组分浓度的测量精度提升至 10 ppm 以下，温度测量误差控制在 ±20℃ 以内。

2 燃气轮机燃烧室火焰相关故障诊断技术

（1）熄火故障诊断技术：熄火故障诊断依托多源火焰信号同步采集架构判定状态。系统持续采集 190nm 至 280nm 紫外辐射信号与 4.3 μm 红外特征辐射信号，设定信号基准电压区间为 1.5V 至 6.0V，实时比对采集电压与基准区间差值^[3]。同时接入燃烧室出口气流温度采集模块，测温元件采集区间为

800K至1800K,采样频率500Hz。当火焰辐射电压连续12ms低于基准下限、气流温度连续20ms下降超80K时,启动熄火判定流程。内置信号甄别算法剔除瞬时信号波动,联动燃料管路压力采集组件捕捉0.3MPa至2.5MPa区间压力波动数据,精准锁定熄火状态,输出电平触发信号对接机组燃料切断执行模块,快速切断燃料通路,启动炉膛惰性介质吹扫流程,完成故障工况流程闭环判定与动作执行。

(2) 燃烧不稳定/热声振荡故障诊断技术: 燃烧不稳定与热声振荡故障诊断以燃烧室动态压力时域波形与火焰辐射频谱数据为核心判定依据,压力传感元件布置至燃烧室侧壁测点,量程设定0bar至35bar,采样频率设定2kHz,持续采集腔内压力脉动波形数据。对采集波形开展频谱分解处理,提取10Hz至500Hz频段内脉动幅值特征数值,同步调取火焰监测系统输出的0Hz至1000Hz辐射波动频谱数据,完成两类频谱数据时序对齐处理。依托时域关联算法建立压力波动与火焰辐射波动的对应关系,识别固定频段内持续性周期波动特征,设定脉动幅值临界数值完成异常状态识别,通过数据分层解析区分低频振荡与高频脉动两类异常形态,依托时序数据推演振荡发展速率,输出连续化状态判定数据,为燃烧工况参数微调提供精准数值依据,实现故障早期态势捕捉。见图1。

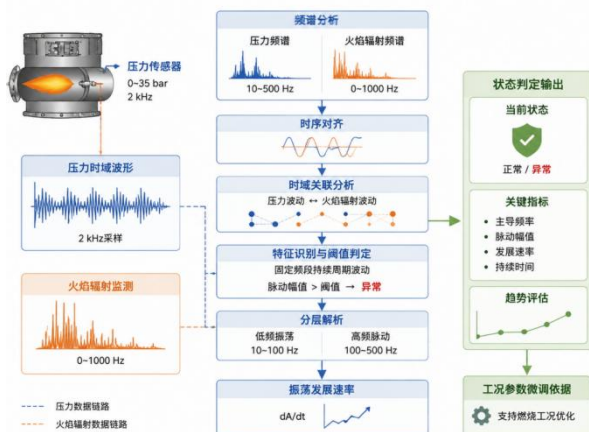


图1 燃烧不稳定与热声振荡故障诊断流程图

(3) 火焰偏斜与燃烧不均故障诊断技术: 火焰偏斜与燃烧不均故障诊断依靠多点同步监测数据完成空间状态研判,燃烧室周向均匀布设8组光纤信号采集测点,单组测点光信号传输损耗控制在0.2dB/km以内,统一以1kHz频率完成辐射

信号采集。整合3 μ m至5 μ m红外热像采集设备输出的二维温度场像素数据,像素点位温度采集精度维持在25K,提取燃烧区域中心坐标数值与全域温度梯度数值,划定燃烧区域标准空间坐标范围与温度梯度标准区间。对比各组周向测点输出的光信号幅值差值,结合温度场梯度分布差值,量化判定火焰偏移距离与局部燃烧强弱差异,通过空间坐标差值运算锁定异常燃烧区域具体方位,生成全域燃烧状态分布量化数据,完成燃烧空间分布异常的精准定位与量化判别,输出结构化状态数据支撑工况优化调整。

(4) 故障预防与控制措施: 故障预防与控制依托全工况参数闭环调控体系前置干预,依据火焰监测系统的稳态数据,搭建燃烧室燃料喷射量与进气配风量联动调节架构。按10ppm组分浓度测量精度输出的燃烧产物数值,调整燃料喷射孔径流通流量参数,同时依据800K至1800K区间温度场分布数据,修正进气通道导流构件开合行程数值。每15s完成一轮全维度监测数据汇总运算,依托动态参数匹配算法微调燃烧工况参数,定期校准监测探头在1600℃高温工况下的性能,统一校准信号输出基准电压与温度采集基准数值。

3 燃气轮机燃烧室火焰监测与故障诊断技术发展趋势分析

多类监测传感采集模块实现硬件集成融合,将850nm传输波段光纤测点与2.0 μ m波段激光检测组件一体化布设,统一设定1kHz同步采样频率,整合腔内35bar压力与1600℃区间温度采集数据。依托深层数据运算架构联动解析多维度监测数据,优化信号处理模块将数据处理时延压缩至60ms以内,搭建时序数据推演模型预判燃烧异常态势。持续优化传感探头耐高温镀膜工艺,降低0.2dB/km信号传输损耗,依托海量运行实测数据动态修正判定阈值,逐步实现燃烧室火焰状态全天候精细化测控,推动监测诊断体系向高精度自动化测控方向迭代升级。

4 结语

各类火焰监测技术可适配燃烧室不同运行工况,配套故障诊断流程能够精准识别多种燃烧异常状态。通过优化传感布设方式与数据处理流程,可进一步缩减信号响应时长,完善工况调控逻辑。相关技术可有效稳定燃烧环境,为燃气轮机安全高效长效运行提供坚实技术支撑。

参考文献:

- [1] 钟颖颐,陈方,孟宇,等.基于卷积神经网络的燃气轮机进气堵塞噪声诊断[J].燃气轮机技术,2025,38(04):6-13.
- [2] 张帆,马博文.燃气轮机-超临界CO₂联合循环布局优化与动态特性研究[J].动力工程学报,2025,45(12):2068-2078.
- [3] 王彩山,沈逸文,张山子.加强筋对重型燃气轮机燃烧室模态特性影响分析[J].热力透平,2025,54(04):246-252+321.