

# 图像火检技术在火电机组复杂工况下的应用研究

孙军歌 朱智慧 刘唯 贾勳 杜锦

河南黄河能源创新中心有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16908

**[摘要]** 在新型电力市场环境下,火电机组需长期深度调峰低负荷运行,且配煤掺烧常态化,锅炉燃烧工况愈发复杂。传统火检因原理单一难以满足精准监测,频繁引发误判停机。本文分析复杂工况对火焰检测的要求及传统火检局限,阐述图像火检原理、核心技术与优势,结合工程案例验证其价值,为火电机组安全高效应对复杂工况提供技术支持。

**[关键词]** 复杂工况; 锅炉燃烧; 图像火检; 传统火检; 火电机组

**中图分类号:** TK223 **文献标识码:** A

## Research on application of image fire detection technology in complex working conditions of thermal power units

Junge Sun Zhihui Zhu Wei Liu Feng Jia Jin Du

Henan Yellow River Energy Innovation Center Co., LTD

**[Abstract]** Under the new power market environment, thermal power units need to operate at deep peak-shaving and low-load conditions for a long time, and blended coal combustion has become normalized, making boiler combustion conditions increasingly complex. Traditional flame detection, limited by its single principle, cannot meet the demand for accurate monitoring, frequently causing misjudgments and shutdowns. This paper analyzes the requirements for flame detection under complex operating conditions and the limitations of traditional flame detection, expounds the principle, core technologies and advantages of image-based flame detection, verifies its value with engineering cases, and provides technical support for thermal power units to safely and efficiently cope with complex operating conditions.

**[Key words]** complex working conditions; boiler combustion; image-based flame detection; traditional flame detection; thermal power units

### 引言

随着“双碳”目标推进,我国新能源装机持续攀升,但新能源出力的随机性、波动性给电力系统稳定带来挑战。为保障电力平衡,提升新能源消纳能力,火电机组需承担深度调峰任务,长期低负荷区间运行;同时煤电企业为优化燃料成本、适配环保要求,大力推行配煤掺烧。双重背景下,锅炉燃烧系统面临严峻挑战。

火焰检测(以下简称“火检”)是监控锅炉燃烧稳定性的核心技术,其可靠性直接影响机组安全。当前国内煤粉锅炉火检以传统技术(可见光、红外光检测)为主,在深调低负荷、配煤掺烧工况下频繁误判,成为制约机组调峰能力与锅炉稳定燃烧的瓶颈。

图像火检技术通过可视化成像与智能分析,突破传统火检局限,在低负荷、配煤掺烧等复杂燃烧场景中优势显著。本文结合工程实践,系统研究其原理、特点及应用效果,为机组高效稳定运行提供参考。

### 1 锅炉火检作用及核心要求

锅炉火检是保障锅炉安全稳定运行的关键,可实时监控燃烧状态,精准判断有无火焰,灭火时立即触发保护动作;同时通过火检监测火焰特性,为调整风量、煤粉配比提供依据,提高燃烧效率、降低污染物排放,确保锅炉在经济环保工况下运行。

锅炉火检的核心要求体现在五个维度:一是精准性,需精准识别火焰形态与动态特征,而非仅单一判断有火/无火;二是实时性,响应延迟控制在500ms内,避免错过燃烧恶化初期干预时机;三是抗干扰性,抵御炉膛结焦反光、粉尘等干扰,降低误报率;四是宽负荷适应性,实现全负荷区间稳定检测;五是状态评估与联动性,在判断火焰有无、反映燃烧稳定性的基础上,输出量化参数,联动DCS系统优化风煤配比。

### 2 复杂工况下锅炉燃烧特点及传统火检局限性

#### 2.1 复杂工况下锅炉燃烧特点

当前,随着机组深度调峰及配煤掺烧常态化,锅炉燃烧工况日益复杂<sup>[1]</sup>。

机组深度调峰低负荷运行时,锅炉燃烧与火焰状态变化显著:炉膛热负荷、温度骤降,燃料着火延迟燃料着火延迟且不稳定,烟气流速低致火焰充满度下降、局部低温死区出现;火焰温度、亮度降30%-50%,形态收缩不均,稳定性差,着火点后移,呈“分散化、脉动化、局部熄复燃”特征。

配煤掺烧时,煤种差异影响大:挥发分、热值不同易致局部熄火或爆燃,灰分、硫分波动加剧炉膛温变与结渣积灰风险;火焰温度、亮度波动大,形态散乱、边界模糊,稳定性差且脉动加剧。

上述复杂工况,给燃烧监控带来极大挑战。

2.2传统火检局限性

目前国内煤粉锅炉火检以传统技术为主,这类技术自20世纪80年代起在火电机组中广泛应用,主要包括紫外线、红外线、离子式、可见光四类,分别通过感知火焰紫外线、CO<sub>2</sub>特征红外辐射、高温电离电流及可见光判断着火状态。其局限性源于技术原理与功能设计的固有缺陷,具体表现为三方面:

一是原理单一导致判断片面。仅依赖单一物理信号识别“有无火焰”,无法感知火焰形态、旺弱、偏斜等关键细节,如同“盲人烤火”仅能感知热度却难辨火情,难以应对低负荷、煤质波动等复杂燃烧场景。低负荷时火焰信号减弱,易受炉膛高温物体辐射等干扰,误报漏报率显著升高。

二是功能局限仅能基础防护。本质更像“火焰报警器”,仅承担熄火后切断燃料、触发停炉保护等基础安全角色,无法为运行调节提供燃烧状态信息支撑。

三是现场运行问题突出。防“偷看”能力弱,易受相邻火焰干扰引发误判;检测视角仅约5度,火焰漂移时易误判无火;且探头易积灰、光纤易烧毁,卡件故障频发,维护工作量大。其中离子式火检还存在电极易腐蚀、低负荷时寿命缩至正常1/3的问题。

近年的实际生产中,随着机组调峰低负荷运行,以及配煤掺烧带来的复杂燃烧工况,传统火检暴露出明显不足,造成的异常事件时有发生,如表1所示。

表1 传统火检误判导致的异常事件

事件时间	电厂及机组信息	事件描述
2020年~2021年	河南地区某电厂	1. 机组低负荷运行工况下,火焰不准,限制机组深调下限,增加调峰考核; 2. 机组启动初期,火检不准,延长机组启动时间,增加成本。 3. 配煤掺烧工况下,火检不准,燃烧调整困难。运行、检修人员工作量增大。
2005年 2月2日	山西榆社电厂#3炉	B磨断煤检测不到火检掉闸,首出为“失去所有燃料”,锅炉MFT动作。
2017年1月22日	沁北电厂#2机组(600MW)	低负荷370MW工况,2B、2D磨煤机火检消失,触发保护动作跳闸,导致MFT动作停炉。

综上所述,传统火检已难以满足复杂工况下机组安全稳定运行需求,亟需更先进的火检技术来解决现存问题。在此背景下,图像火检技术应运而生,能够较好地契合当前的需求。

3 图像火检技术优势及应用

3.1图像火检技术原理

图像火检通过“采集-处理-分析-联动”实现火焰监测:采用CCD耐高温高清摄像机在燃烧器喷口附近实时采集炉膛内火焰图像,捕捉形态、亮度等细节;经去噪、边缘检测等算法预处理,消除粉尘、反光干扰;通过深度学习模型提取火焰特征参数,判断火焰存在性、稳定性及偏斜度;最后整合结果送入DCS的FSSS系统,实现燃烧诊断、预警、保护及调节支持。其工作流程如图1所示<sup>[2-3]</sup>。

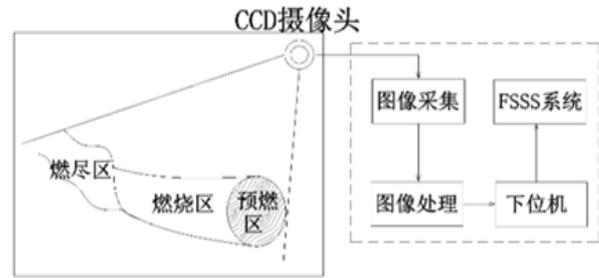


图1 图像火检示意图

3.2图像火检核心技术

相比传统火检,图像火检的核心优势体现在四个方面:

一是可视化,实时呈现火焰形态、位置及动态变化,输出中心坐标、面积占比等量化参数,解决传统火检“看不见、看不清”的局限。

二是大视角覆盖,火检探头与火焰燃烧平面呈现60度以上夹角,全面覆盖火焰所有特征区,避免传统火检5度狭小视角导致的火焰飘逸误判问题。

三是强抗干扰能力,通过图像滤波算法消除粉尘、反光干扰,误报率控制在1%以下。

四是智能分析功能,采用模式识别与图像处理算法,设定亮区、着火区、黑龙区三个特征区域,实现火焰状态精准判断。

此外,图像火检还具备宽负荷适应性,10%额定容量下仍能稳定检测;可实时量化分析燃烧状态,为DCS系统提供调节数据;并具有历史追溯功能,设备稳定性高等优势。

综上,传统火检是“单一信号报警器”,而图像火检是兼顾精准监测与优化调控的“可视化智能分析系统”,更适配深度调峰、配煤掺烧等复杂工况。

3.3图像火检技术工程应用效果

近年来,图像火检技术已在多台不同容量火电机组得到应用,在深度调峰及配煤掺烧等复杂工况下表现出明显优势,具体应用效果见表2<sup>[4]</sup>。

表2 图像火检应用效果

电厂及机组信息	项目内容	成果、效益
河南地区某电厂	2021年,进行锅炉火检改造。	实现智能分析并准确报警;优化风煤配比,提升燃烧稳定性;设备稳定性提高,日常维护量减少。
国家能源集团湖北汉川电厂2号机组	2024年,完成数字化图像火检升级改造。	升级改造后,火检信号信息量提升超100万倍,火焰检测视角范围扩大约18倍;燃烧监控全面提升。
江西黄金埠发电公司1号机组	2025年,公司研发的图像火焰检测技术在该公司某机组应用。	精准识别火焰异常状态,减少误报漏报,提升锅炉FSSS系统运行安全性。通过中国电机工程学会组织的科学技术成果鉴定。

#### 4 结论与展望

在火电机组深度调峰及配煤掺烧需求下,图像火检凭可视

化成像、多特征识别与智能联动,解决传统火检局限,适配复杂工况,是保障机组安全高效调峰的关键。未来需优化算法以适配<10%额定容量的极端低负荷,探索结合数字孪生,构建“燃烧预测-火检预警-控制优化”系统,助力机组向“灵活、安全、低碳”转型。

#### [参考文献]

[1]郝祖龙,陈磊,常太华.典型工况火焰强度信号的复杂性分析[J].电力科学与工程,2006(4):4.

[2]郝祖龙.电站锅炉燃烧状态识别与诊断研究[D].北京:华北电力大学(北京),2010.

[3]华彦平.基于彩色数学形态学和模糊神经网络的锅炉燃烧诊断研究[D].南京:东南大学,2008.

[4]曹永杰.基于CFD和机器学习的煤粉燃烧过程重建[D].北京:华北电力大学(北京),2023.

#### [作者简介]

孙军歌(1974--),女,汉族,河南郑州人,本科,高级工程师,从事工程咨询工作,主要研究方向:火力发电、新能源发电等。