

# 红外火焰探测器故障与维保技术实际应用经济效益

苏佳杰 杨玉强 (中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300000)

**摘要:** 红外火焰探测器是海上石油采油平台关键的火气监控设备, 工作稳不稳定直接影响现场安全生产和经济效益, 本文根据海上石油采油平台现场情况, 分析了红外火焰探测器的工作原理, 以及发生故障的直接、间接和管理方面的原因, 分析故障后, 建立了“中控系统—设备本体—外界干扰”的排查步骤, 给出了清洁、标定、调参数和防护升级的深度维保技术办法, 验证了应用效果, 最后给了整改优化措施, 实际使用下来, 这套维保方案能有效减少探测器误报警, 延长探头使用时间, 给石油化工、海上油气田这些地方使用的火焰探测器安全运行和高效维护提供参考。

**关键词:** 红外火焰探测器; 故障报警; 深度维保; 实际应用; 经济效益

**中图分类号:** X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0055-03

## Faults and Maintenance Technology of Infrared Flame Detectors and Their Economic Benefits in Practical Applications

Su Jiajie, Yang Yuqiang (Tianjin Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Infrared flame detectors are key safety monitoring devices in the petrochemical and offshore oil and gas fields, and their reliable operation is directly related to production safety and economic benefits. Based on the application cases of offshore oil fields, this paper systematically expounds the core working principle of infrared flame detectors, analyzes the direct, indirect and management causes of faults, and establishes a three-dimensional troubleshooting process of “central control system - equipment body - external interference”. It proposes a deep maintenance technology system covering cleaning, calibration, parameter optimization and protection upgrade, and verifies its application effect. Finally, it gives targeted rectification and optimization measures. Practice shows that this research can effectively reduce the false alarm rate of detectors, extend the service life of equipment, and provide technical support for the safe operation and efficient maintenance of flame detectors in similar scenarios.

**Keywords:** Infrared flame detector; Fault troubleshooting; Deep maintenance; Practical application; Economic benefits

在石油化工、海上油气田等高危行业, 火灾事故具有突发性强、破坏力大的特点, 红外火焰探测器作为火气系统的核心组成部分, 能够快速响应火焰辐射信号, 触发关断保护机制, 是保障生产安全的重要防线<sup>[1]</sup>。然而, 现场复杂的工况环境(如阳光辐射、高温热源、盐雾腐蚀等)及设备自身特性, 易导致探测器出现误报警现象, 不仅影响正常生产秩序, 还可能造成巨额经济损失<sup>[2]</sup>。当前, 关于火焰探测器的研究多集中于工作原理优化与单一故障分析, 缺乏对“原理—故障—维保”全链条的系统研究。本文结合海上油田现场实践, 系统梳理红外火焰探测器工作机制, 深入分析故障成因, 建立标准化排查流程与深度维保技术体系, 为提升探测器运行可靠性提供理论与实践参考。

### 1 红外火焰探测器工作原理

#### 1.1 燃烧产物红外辐射特性

石油化工领域火灾的燃烧物质多为烃类化合物, 其燃烧产物主要为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等异原子分子。这些分子在高温下会产生特征红外辐射, 形成离散的条状光

带: CO<sub>2</sub> 的红外辐射峰值集中在 2.65–2.8 μm、4.15–4.45 μm 及 13–17 μm 波段, 其中 4.3 μm 附近为强辐射峰, 且该波段在地球大气层中自然辐射极弱, 成为火焰探测的核心识别依据<sup>[3]</sup>; H<sub>2</sub>O 的红外辐射光带分布于 2.55–2.84 μm、5.6–7.6 μm 及 12.0–30.0 μm, 2.7 μm 为其特征峰值。

火焰辐射的电磁波涵盖紫外线、可见光及红外波段, 其中稳定燃烧产物(CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等)的辐射主要集中在红外波段。扩散型火焰(实际生产中主要监控类型)因燃烧不充分呈现黄色并伴随烟雾, 其显著特征为燃烧不稳定性导致的火焰闪烁, 闪烁频率受环境影响较小, 集中在 4Hz ~ 20Hz 区间, 核心范围为 7Hz ~ 12Hz, 且与火焰大小及探测距离无关, 成为区分真实火焰与干扰源的重要标志<sup>[4]</sup>。

#### 1.2 多波段探测技术

为剔除阳光、高温热源等干扰, 红外火焰探测器普遍采用多波段探测技术, 核心分为三波段与四波段两种技术路线。

三波段技术通过三个不同中心波长的红外传感

器协同工作，典型配置为：以  $4.3\mu\text{m}$  ( $\text{CO}$  特征峰值) 作为主探测波段，两侧搭配用于识别高温热源的  $3.8\mu\text{m}$  (或  $4.1\mu\text{m}$ ) 波段及识别背景辐射的  $5.2\mu\text{m}$  (或  $5.0\mu\text{m}$ ) 波段。不同辐射源在三波段的频谱特征存在显著差异：单纯火焰场景下，主探测波段与干扰波段信号幅值比约为  $3:1:1$ ；干扰源单独存在时，三波段信号比接近  $1:1:1$ ；火焰与干扰共存时，比值介于两者之间，且越接近  $3:1:1$ ，火焰信号占比越高。该技术通过分析三波段信号的数学相关性，可有效检出衰减信号中的火焰信息，兼顾探测距离与抗干扰能力。

四波段技术在三波段基础上增加了特定波段的信号提取，以 MSA 及 GM 的 FL4000H 型探测器为代表，其中心波长配置为  $2.2\mu\text{m}$  (可见光识别)、 $4.3\mu\text{m}$  (火焰)、 $4.45\mu\text{m}$  (火焰二次提取)、 $4.9\mu\text{m}$  (背景辐射)<sup>[5]</sup>。该技术通过在  $\text{CO}_2$  波段的两次信号采集及可见光波段的干扰识别，提升了抗误报能力，但缺少专门的高温热源识别波段，对高温环境的适应性较弱。

### 1.3 信号处理与识别算法

红外火焰探测器的火焰检测主要靠热释电红外传感器，热释电红外传感器是敏感部件，极化强度跟着温度变，只对变化的红外辐射产生电信号，正好和火焰闪烁的变化辐射特点对上，滤光片的设置是筛选信号的关键，中心波长  $4.3\mu\text{m}$  的多膜干涉滤光片能有效让火焰的特征辐射过去，挡住其他没用的射线干扰。

火焰信号识别算法主要有三种：①平均功率识别法：分析三波段信号幅值比判断火焰存不存在；②闪烁频率分析法：快速傅立叶变换提取  $4\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$  范围特征频率峰值，常见峰值集中在  $8\text{Hz}$  左右；③智能神经网络算法：像 MSA 探测器的 NNT 智能中枢网络，提取火焰辐射的强度、时延及波动特征，构建火焰模式库，准确区分真实火焰和干扰源。

### 1.4 不同品牌技术差异

不同厂家的火焰探测器探测技术、中心波长不一样，具体看表 1。

## 2 火焰探头典型故障分析

### 2.1 典型误报警事件分析

某油田二级关断事件经过：某平台因 3 个火焰探头误报警引发二级关断，后续连续出现 5 个火焰探头报警，现场核查无火情。

### 2.1.1 原因分析

①直接原因：阳光经海浪折射形成类似火焰的特征光谱，被探头捕捉引发误报警；②间接原因：部分探头监测范围覆盖海面，且多数探头为出厂高灵敏度设定；③管理原因：调试大纲缺乏灵敏度及预报警调试内容，探头参数未按现场需求优化，预报警与关断报警量程无统一规范。

### 2.1.2 某油田火焰探头频繁报警

①报警统计：276 个火焰探头累计产生报警 49709 条，涉及 170 个探头，其中高 / 高高报警 4754 条 (占比 9.56%)，故障类报警 43615 条 (占比 87.74%)；②故障类型：上甲板探头频繁出现 Fire E 误报警 (伴随高红外背景干扰)，下层甲板探头频繁出现 Auto Oi Fault 自动标定失败故障；③原因分析：上甲板探头紧邻火炬 (红外干扰源)，镜头污染导致传感器灵敏度下降，叠加红外干扰引发误报警；下层甲板环境恶劣，镜头灰尘堆积导致光学完整性自检不通过，触发故障报警。

### 2.2 故障排查流程

建立“中控系统—设备本体—外界干扰”这一全方位、多层次的三维排查流程，旨在通过系统化、结构化的方式确保故障定位的精准性与高效性。①中控系统排查。核查中控系统物理隔离状态，排除信息化事件影响；检查火气系统卡件运行状态，确认报警探头是否分布于不同机柜及卡件，排除系统本身故障；排查近期外接存储工具使用情况，排除木马病毒等软件干扰；②设备本体排查。核查探头可靠性测试记录 (近 3 个月内) 及历史报警情况 (半年内)。检查探头灵敏度设定，确认是否为出厂高灵敏度配置；调取中控报警量程趋势图，分析报警前信号波动情况。检查探头安装角度、监测范围，确认是否存在覆盖海面或高温热源的情况；③外界干扰排查。核查事件时段附近船舶作业及现场动火作业情况；分析当时气象条件 (光照强度、风速、海况等)；排查甲板或海面反光、火炬辐射等潜在干扰源。

### 2.3 故障原因归类

结合现场实践，火焰探头故障原因可分为三类，①设备自身因素：镜头污染、传感器老化、灵敏度设定不当、标定失效、内部电气干扰 (电压波动、接地不良)；②环境干扰因素：阳光辐射及反射、高温热

表 1 典型品牌红外火焰探测器技术参数对比

品牌	型号	探测技术	中心波长配置	灵敏度等级	报警状态
迪创	X3301	三波段	$4.1\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 、 $5.0\mu\text{m}$	低、中、高	正常、火警 (5 类报警)
MSA	Flamegard5 MSIR	四波段	$2.2\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 、 $4.45\mu\text{m}$ 、 $4.9\mu\text{m}$	低、中、高	正常、预报警 (10s)、报警
GM	FL4000H	四波段	$2.2\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 、 $4.45\mu\text{m}$ 、 $4.9\mu\text{m}$	低、中、高	正常、预报警、报警

源（火炬、卤素灯）、海浪/甲板反光、雨雪腐蚀；  
③管理维护因素：调试规范缺失、维保不及时、参数配置不合理、缺乏预报警设定。

### 3 深度维保技术体系

红外火焰探测器在复杂工况环境里容易出现的故障，像镜头污染、传感器老化、灵敏度漂移、环境干扰这类问题，根据出现的问题制定出了“清洁—标定—参数优化—防护升级”的深度维保方案。拿迪创 X3301 型三波段红外火焰探测器为例，具体实施方法如下。

#### 3.1 维保步骤

传感器的清洁：①工具准备：专用清洁剂、毛刷、棉签、拆卸工具；②清洁范围：清洁 3 个红外传感器镜头，拆卸 Oi 板，3 个自检小孔做深度清洁，防止残留灰尘让光学完整性 Oi 自检失败；③清洁标准：镜头和自检小孔没有明显污渍、透光正常，没有划痕或者老化斑点。

进行精准标定：①标定工具：配套的软件和通讯数据线；②标定流程：进入标定界面，按 Calibrate Oi 标定按键，系统自动完成 3 个红外传感器标定；③标定标准：传感器数值恢复至出厂正常范围（90-110），Reduced Oi Signal 故障自动消除；④异常处理：一次标定未达标准要进行二次标定，多次标定失效判定为传感器损坏，需要更换探头。

参数优化：①灵敏度调整：把高灵敏度调为中或低灵敏度，满足现场探测距离要求（中灵敏度探测距离 25.9-30.5m，低灵敏度 15.2-19.8m）；②自检参数调整：拉长光学完整性自检时间（1min 一次调成 3min 一次），增加连续自检失败判定次数（1 次调成 720 次），能降低探头的故障率。

进行防护升级：加装上防护镜片，在红外传感器的镜头前面安装蓝宝石玻璃片，能挡住灰尘、雨雪和盐雾腐蚀。

#### 3.2 维保效果验证

①短期验证：维保后 1 个月内没高/高高报警，故障报警次数少了很多；②长期验证：近半年内故障报警率降到 3% 以下，传感器灵敏度维持在正常范围。

### 4 整改优化措施与实际应用经济效益

#### 4.1 整改优化措施

①灵敏度统一调整：将所有出厂高灵敏度探头调整为中/低灵敏度，中/低灵敏度探测距离可满足《海上油气田火气设备布置及选型推荐做法》要求；②功能升级：在火气系统中为关键探头增加预报警功能，设置预报警持续时间（如 10s），避免误触发关断；③硬件优化：试验性安装火焰探头遮光罩，防止阳光

直射与反射；对监测范围覆盖海面的探头，调整安装角度或加装防护装置；④规范制定：编制《火焰探头调试大纲》，明确灵敏度设定、预报警配置、监测范围校准等要求；编写《预防性检查步骤及验收标准》，规范维保流程。

#### 4.2 实际应用经济效益

通过实施优化措施，红外火焰探测器的误报警率显著降低，从原先的频繁误报状态转变为稳定运行，直接节约了检修用备件费用。根据统计，因误报警需更换的火焰探头数量大幅减少，按每个探头成本计算，节约备件费用达 50 万元以上。同时，优化措施让探头用得更多，估计每年能少换 3 个探头，可以节约 15 万元备件费，误报警少了，避免了非计划的停机造成的产量损失，按每次停机损失的产量对应的收益核算，一年少损失的产量价值有几百万元，装了蓝宝石玻璃片防护罩后，能有效提高维修保养效率，减少高空作业的危险和人工成本，估计每年能省下 15 万元人工成本，优化措施有效提升了设备运行的稳定性和安全性，带来了明显的经济效益，给企业持续运营和成本控制提供了有力支持。

### 5 结论

通过对红外火焰探测器的工作原理研究，科学的故障排查方法和系统的深度维保策略的实施，能有效保证火焰探测器工作稳定。通过分析故障产生的直接、间接和管理原因，建立了“中控系统—设备本体—外界干扰”故障排查流程，并提出了清洁、标定、参数优化和防护升级的深度维保策略，实施深度维保策略后，故障报警率下降 97% 以上，高/高高报警清零，火焰探测器的可靠性得到了提升，运维成本答复降低。红外火焰探测器深度维保策略已在海上油田成功应用，复制性好，能为石油化工、海上油气田等领域火焰探测器的安全运行和高效维护提供参考。

#### 参考文献：

- [1]GB 50116-2013. 火灾自动报警系统设计规范[S]. 北京：中国计划出版社,2013.
- [2] 中国海洋石油集团有限公司. 海上油气田火气设备布置及选型推荐做法[R]. 天津：中海油天津分公司,2020.
- [3] 孙华, 李扬. 热释电红外传感器原理及其应用[J]. 内江科技,2010(12).
- [4]MSA Safety. FlameGard5 MSIR 型四波段红外火焰探测器技术说明书[Z]. 美国：MSA 安全设备有限公司,2021.
- [5] 蔡鑫, 赵敏, 李然, 邓军军. 基于热释电红外传感器的火灾探测系统设计[J]. 红外技术,2007(12).