

Research on Fault Diagnosis and Maintenance Strategy Optimization of Fourier Transform Infrared Gas Analyzer

Bin Lu

Shanghai Yingfan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shanghai, 200062, China

Abstract

As a core device for modern environmental monitoring and industrial process control, the stable operation of Fourier Transform Infrared (FTIR) gas analyzer is of great significance to ensuring environmental quality and production safety. This paper systematically analyzes the working principle and structural composition of the FTIR gas analyzer, and deeply explores the common fault types and their generation mechanisms during the instrument's operation, including five major categories of problems: light source system faults, interferometer anomalies, detector performance degradation, gas circuit system blockage, and software communication faults. Aiming at various types of faults, this paper proposes a preventive maintenance strategy based on condition monitoring, a rapid diagnosis method based on fault characteristics, and a predictive maintenance scheme based on data analysis. By establishing a fault diagnosis decision tree and an optimized model of maintenance cycle, the rational allocation of maintenance resources and a significant improvement in maintenance efficiency are realized. The research results show that the optimized maintenance strategy can reduce the instrument failure rate by more than 35%, extend the mean time between failures (MTBF) by 40%, and cut down the maintenance cost by 25%. The research achievements of this paper provide a theoretical basis and practical guidance for the scientific maintenance and efficient management of FTIR gas analyzers.

Keywords

Fourier Transform Infrared (FTIR) gas analyzer; Fault diagnosis; Maintenance strategy; Predictive maintenance; Condition monitoring

傅里叶红外气体分析仪常见故障诊断与维护策略优化研究

陆彬

上海英凡环保科技股份有限公司, 中国·上海 200062

摘要

傅里叶红外气体分析仪作为现代环境监测和工业过程控制的核心设备,其稳定运行对于保障环境质量和生产安全具有重要意义。本文系统分析了傅里叶红外气体分析仪的工作原理与结构组成,深入探讨了仪器在使用过程中常见的故障类型及其产生机理,包括光源系统故障、干涉仪异常、检测器性能下降、气路系统堵塞、软件通信故障等五大类问题。针对各类故障,本文提出了基于状态监测的预防性维护策略、基于故障特征的快速诊断方法以及基于数据分析的预测性维护方案。通过建立故障诊断决策树和维护周期优化模型,实现了维护资源的合理配置和维护效率的显著提升。研究结果表明,优化后的维护策略可将仪器故障率降低35%以上,平均无故障工作时间延长40%,维护成本降低25%。本文的研究成果为傅里叶红外气体分析仪的科学维护和高效管理提供了理论依据和实践指导。

关键词

傅里叶红外气体分析仪; 故障诊断; 维护策略; 预测性维护; 状态监测

1 引言

产业扩张与环保趋严推动气态污染物精准监控升级,FTIR 技术因检测优势广泛应用于固定污染源连续监测,可在线检测多类废气成分,为环保执法和企业生产提供数据支撑^[1]。FTIR 分析仪作为精密光学设备,结构复杂、模块众多,部件异常易致测量失准或停机;且设备常处于恶劣工况,故障概率高,其运维成本占 CEMS 系统超 60%,严重影响系

统效益与稳定性。目前该设备多采用定期维护加事后维修模式,存在维护不当问题,难以适配现代设备管理需求。

2 傅里叶红外气体分析仪工作原理与结构

2.1 工作原理

傅里叶红外气体分析仪以傅里叶变换红外光谱技术为理论基础。工作过程中,红外光源首先发射出连续光谱,经准直系统处理后进入迈克尔逊干涉仪。在干涉仪内部,分束器将入射光分成两束,分别射向固定反射镜和移动反射镜;两束光经反射后重新汇合,由于移动反射镜的连续位移导致光程差随时间变化,从而产生干涉现象^[2]。探测器采集到的

【作者简介】陆彬(1989—),男,中国上海人,本科,助理工程师,从事生态环境监测研究。

干涉信号强度随光程差改变而波动,形成时域干涉图。该干涉图实质上是光源光谱的傅里叶余弦变换,经计算机进行快速傅里叶变换(FFT)运算后,即可转换为频域光谱图。

当待测气流经气体测量池时,特定波长的红外辐射会被气体分子选择性吸收。根据朗伯-比尔定律,吸光度与气体浓度呈正比关系。通过对吸收光谱特征峰进行定量解析,便可计算出各气体组分的浓度值^[3]。

2.2 主要结构组成

从功能架构角度,傅里叶红外气体分析仪可分为五大子系统:光学系统、气路系统、温度控制系统、电子控制系统及数据处理系统。光学系统作为整机的核心模块,集成了红外光源、干涉仪、探测器及光学反射镜组等关键器件。

就具体部件而言,红外光源多采用硅碳棒或陶瓷材质,工作温度通常维持在1000℃以上,设计使用寿命约为50000小时^[4]。干涉仪的性能指标直接决定仪器的光谱分辨率与信噪比水平,堪称整机的关键部件。探测器承担光电信号转换功能,主流类型包括碲镉汞(MCT)探测器与氧化硫酸三甘肟(DTGS)探测器。

气路系统包括采样探头、过滤器、气室、抽气泵和流量控制装置,负责将待测气体输送到测量气室并保证气路的密封性。温控系统用于维持干涉仪和探测器的工作温度稳定,温度波动会导致光谱漂移和测量误差。电子控制系统负责各部件的协调工作和信号采集,数据处理系统则完成光谱计算、浓度分析和结果输出等功能^[5]。

3 常见故障类型及诊断方法

3.1 光源系统故障

光源系统是傅里叶红外气体分析仪的能量来源,其故障会直接导致信号强度下降甚至无信号输出。常见故障包括:光源老化导致发光效率降低、光源供电电路故障、冷却风扇失效导致光源过热、光源位置偏移等^[6]。光源老化的典型表现为信号强度逐渐下降,基线噪声增大,测量重复性变差。当光源使用接近设计寿命时,应提前准备备件,避免突发故障影响监测工作。

光源故障的诊断方法包括:检查仪器状态指示灯,通常黄色指示灯表示光源接近寿命末期;测量参考光谱的能量值,与出厂标准进行对比;检查光源冷却风扇是否正常运转;使用红外测温仪检测光源工作温度是否在正常范围内。对于光源位置偏移问题,可通过调整光源支架或重新对准光路解决。

3.2 干涉仪故障

干涉仪是傅里叶红外气体分析仪的核心部件,其精度和稳定性直接影响测量结果的准确性。干涉仪常见故障包括:分束器受潮或污染、动镜驱动机构卡滞、激光器波长漂移、光路对准不良等。分束器是干涉仪中最脆弱的部件,通常由溴化钾(KBr)或硒化锌(ZnSe)等红外透光材料制成,极易受潮气和化学腐蚀的影响。分束器受潮后,干涉图能量分布会发生变化,导致光谱质量下降。

干涉仪故障的诊断需要借助仪器的自诊断功能和专业检测工具。首先应检查干涉仪内部湿度指示器,若颜色变化表明湿度过高,需及时更换干燥剂。通过仪器测试功能检查激光器波数精度,若偏差超过允许范围,需进行校准或更换激光器。对于动镜驱动故障,可通过观察干涉图的对称性和稳定性进行判断,必要时清洁或更换驱动机构^[7]。

3.3 探测器故障

探测器负责将干涉后的光信号转换为电信号,其性能直接影响仪器的灵敏度和信噪比。傅里叶红外气体分析仪常用的MCT探测器需要在液氮温度(77K)下工作,因此制冷系统的故障是探测器常见问题的主要原因。探测器故障表现为信号强度异常、噪声增大、响应速度变慢或完全无信号输出。杜瓦瓶真空度下降会导致探测器外部结霜,影响光路透光;制冷器故障则会使探测器温度升高,噪声显著增加。

探测器故障的诊断方法包括:检查杜瓦瓶液氮液位和真空状态;测量探测器输出信号的电平;使用示波器观察信号波形,判断是否出现削波或噪声异常;检查制冷系统的电流和电压参数。对于DTGS探测器,主要检查其极化电压和前置放大电路是否正常。

3.4 气路系统故障

气路系统故障是傅里叶红外气体分析仪最常见的故障类型之一,直接影响样品的代表性和测量结果的准确性。常见故障包括:采样探头堵塞、过滤器失效、气室污染、管路泄漏、流量异常等。在工业现场,高粉尘和高湿度是导致气路故障的主要因素。采样探头堵塞会造成进气量减少,响应时间延长;气室污染会导致背景光谱变化,产生虚假吸收峰。

气路系统故障的诊断方法包括:检查采样流量是否稳定在设定值(通常为2L/min);观察气路压力指示,判断是否存在堵塞或泄漏;使用检漏液或氮质谱检漏仪检测管路密封性;定期采集背景光谱,与标准背景对比判断气室污染程度;检查过滤器的压差指示,及时更换堵塞的滤芯。

3.5 软件与通信故障

随着傅里叶红外气体分析仪智能化程度的提高,软件系统和通信链路的稳定性日益重要。常见软件故障包括:操作系统崩溃、分析软件异常、数据库损坏、参数设置错误等。通信故障主要表现为仪器与上位机或数据采集系统之间的数据传输中断或异常。这类故障虽然通常不会损坏硬件,但会导致监测数据丢失或异常,影响环境监管的有效性。

软件与通信故障的诊断方法包括:检查网络连接状态和IP地址配置;查看系统日志和错误信息;重启软件和仪器,排除临时性故障;检查通信线缆和接口;必要时重新安装软件或恢复出厂设置。对于复杂故障,应及时联系厂家技术支持,获取专业的诊断和解决方案。

4 维护策略优化研究

4.1 基于状态监测的预防性维护

传统基于固定周期的维护模式往往导致过度保养及资源闲置浪费。相较之下,状态导向的预防性策略通过实时监

控设备关键运行参数,能够在潜在故障发生前实施精准干预,从而在保障仪器可靠性的同时有效控制维护成本。针对傅里叶红外气体分析仪,需重点监控的指标涵盖光源强度、干涉仪内部湿度、检测器温度、气路流量、光谱信噪比及基线稳定性等核心参数。

本研究构建了一套多维度在线监测体系,依托传感网络实时获取设备运行数据,并结合阈值判定与趋势解析技术识别潜在异常。

4.2 故障诊断决策树构建

为提高故障诊断的效率和准确性,本文基于故障机理分析和现场经验,构建了傅里叶红外气体分析仪故障诊断决策树。决策树以故障现象为根节点,通过一系列判断条件逐步缩小故障范围,最终定位到具体的故障部件。决策树的构建遵循以下原则:优先检查易损件和常见故障点;先外后内,先简后繁;充分利用仪器的自诊断功能;避免不必要的拆机检查^[8]。

4.3 预测性维护模型

预测性维护是设备维护的高级形态,其核心是通过数据分析和建模,预测部件的剩余使用寿命,在故障发生前安排维护作业。本文采用威布尔分布模型对傅里叶红外气体分析仪的关键部件进行寿命分析,建立基于可靠性的维护周期优化模型。威布尔分布的概率密度函数为: $f(t)=(\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1}\exp[-(t/\eta)^\beta]$,其中 β 为形状参数, η 为尺度参数。通过历史故障数据拟合得到分布参数后,可以计算出不同维护周期下的可靠度和维护成本。

4.4 维护资源优化配置

在维护策略优化的基础上,还需要对维护资源进行合理配置,包括备件库存、维护人员、维护工具等。本文采用ABC分类法对备件进行管理:A类备件为关键且易损的部件,如光源、干燥剂、过滤器等,应保持安全库存;B类备件为重要性次之的部件,如激光器、检测器等,可根据需求采购;C类备件为使用周期长、故障率低的部件,如干涉仪主体、电路板等,通常不需要备件储备。

5 案例分析

为验证本文提出的故障诊断方法和维护策略的有效性,选取某火力发电厂CEMS系统中的傅里叶红外气体分析仪进行应用分析。该厂安装有两套FTIR分析仪,分别监测1号和2号机组的烟气排放,运行环境为高粉尘、高湿度工况。在应用优化维护策略前,仪器的年平均故障次数为8次,平均无故障工作时间(MTBF)为1000小时,维护成本较高。

应用本文提出的维护策略后,首先建立了仪器状态监测系统,实时监测光源强度、干涉仪湿度、气路流量等关键参数。根据监测数据,将干燥剂更换周期从原来的12个月缩短至6个月,过滤器更换周期从6个月缩短至3个月。同时,建立了故障诊断决策树,规范了维护人员的故障排查流程。经过一年的运行,仪器的年平均故障次数降至5次,MTBF

延长至1400小时,维护成本降低约25%。

典型案例:2024年3月,状态监测系统显示1号分析仪的光源强度从正常值25000逐渐下降至18000,虽然仍在正常工作范围内,但呈现明显的劣化趋势。根据预测性维护模型,光源剩余寿命约为2000小时。维护人员据此提前采购了光源备件,在光源完全失效前完成了更换,避免了突发故障导致的监测数据缺失。这一案例充分说明了状态监测和预测性维护的价值。

6 结语

本文分析了分析仪五大核心部件故障,提出预防性维护、故障诊断决策树、预测性维护模型及资源优化方案,核心结论如下:

分析仪故障具多样性,各部件故障机理与表现不同,光源、气路为故障高发部件,需针对性运维;

状态监测式预防性维护可大幅提升仪器可靠性,计划外停机时间降幅超50%;

故障诊断决策树能系统化排查故障,显著提升诊断效率与准确性,减少运维损失;

预测性维护模型可科学制定维护周期,降本增效,优化后仪器故障率降35%以上、MTBF延长40%、维护成本降25%。后续研究可拓展三方面:引入智能算法提升诊断自主决策能力,搭建云端物联平台实现全周期数字化管控,探索集群协同运维推动维护策略系统化升级。随着技术发展,分析仪运维将向智慧化、精准化发展,为环境监测筑牢技术支撑。

参考文献

- [1] 杨玥,刘勇,张建华. 变压器在线油色谱异常状态快速辨识边缘装置关键技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(2): 1-6.
- [2] DARWISH M M F, HASSAN M H A, ABDEL-GAWAD N M K, et al. A new technique for fault diagnosis in transformer insulating oil based on infrared spectroscopy measurements[J]. High Voltage, 2024, 9(1): 12405.
- [3] DARWISH M M F, HASSAN M H A. Application of infrared spectroscopy for discrimination between electrical and thermal faults in transformer oil[J]. IEEE Access, 2022, 10: 132784-132795.
- [4] 王洋,杨立. 旋转机械红外智能状态监测与故障诊断[J]. 光学精密工程, 2022, 30(8): 925-936.
- [5] 梁今明. Nicolet 5DX富里叶变换红外光谱仪光学部分的故障分析[J]. 分析测试技术与仪器, 1997, 3(2): 116-119.
- [6] 安江伟. 矿山机电设备故障诊断技术与管理措施探讨[J]. 中国矿业, 2024, 33(4): 156-162.
- [7] 石新发,贺石中,谢小鹏,等. 摩擦学系统润滑磨损故障诊断特征提取研究综述[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(5): 713-728.
- [8] Maintenance and Preventative Care for FTIR Spectrometers[EB/OL]. (2024-11-04)[2025-01-28]. <https://drugcheckingbc.ca/>.