

# 分布式光纤感温系统在大型原油储罐火灾检测中的应用

李志凡

惠州市大亚湾华德石化有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17168

**[摘要]** 针对大型原油储罐浮盘密封圈火灾高风险区,传统光纤光栅(FBG)感温系统在定位精度、长期稳定性及运维经济性上存在局限,难满足安全生产标准。本文提出采用基于拉曼散射与OTDR技术的分布式光纤感温系统(DTS)替代。阐述了DTS传感机理,多维度对比其与FBG技术优劣。以华德石化NT101/3#储罐改造为例,介绍系统设计等。运行表明,DTS定位精度 $\leq 1\text{m}$ 、测温精度 $< \pm 1^\circ\text{C}$ ,稳定运行超6年,可提供技术参考。

**[关键词]** 分布式光纤传感; 温度测量; 原油储罐; 火灾监测; 光纤光栅; 系统改造

**中图分类号:** TE972.1 **文献标识码:** A

## Application of Distributed Optical Fiber Temperature Sensing System in Fire Detection for Large Crude Oil Storage Tanks

Zhifan Li

Huizhou Daya Bay Huade Petrochemical Co., Ltd

**[Abstract]** For the high-risk fire area of floating roof seal rings in large crude oil storage tanks, traditional Fiber Bragg Grating (FBG) temperature sensing systems face limitations in positioning accuracy, long-term stability, and maintenance economy, making it difficult to meet safety production standards. This paper proposes the adoption of a Distributed Optical Fiber Temperature Sensing System (DTS) based on Raman scattering and OTDR technology as a replacement. The sensing mechanism of DTS is elaborated, and its advantages and disadvantages are compared with FBG technology across multiple dimensions. Taking the renovation of Huade Petrochemical's NT101/Tank 3 as an example, the system design is introduced. Operational results show that DTS achieves a positioning accuracy of  $\leq 1\text{ m}$ , a temperature measurement accuracy of  $< \pm 1^\circ\text{ C}$ , and has maintained stable operation for over six years, providing valuable technical references.

**[Key words]** Distributed Optical Fiber Sensing; Temperature Measurement; Crude Oil Storage Tanks; Fire Monitoring; Fiber Bragg Grating; System Renovation

### 引言

大型外浮顶原油储罐是国家战略储备与石化产业链关键设施,运行安全极为重要。但其结构特殊,浮盘与罐壁密封圈处易因摩擦产生静电火花,引燃油气,此类火灾占比超78%。广东沿海环境加速传统设备老化,增大防控难度。早期FBG感温系统有应用,但存在空间分辨率不足、高温生存性差、长期稳定性与维护成本高等缺陷。DTS技术以单根光纤为介质,能无盲区、高精度测温,本文将论证其在储罐火灾监测中相较于FBG的综合优势。

### 1 分布式光纤感温系统原理及与传统技术对比

#### 1.1 分布式光纤感温(DTS)原理

DTS的测温原理基于光纤中的自发拉曼散射(Raman Scattering)效应和光时域反射(Optical Time-Domain Reflectometry, OTDR)技术。当一束激光脉冲在光纤中传输时,会与光纤分子发

生相互作用,产生背向散射光。其中,频率不变的散射光为瑞利散射(Rayleigh Scattering),而频率发生变化的非弹性散射光为拉曼散射。拉曼散射光包含两种成分:斯托克斯光(Stokes light),斯托克斯光的频率降低和反斯托克斯光(Anti-Stokes light),反斯托克斯光的频率升高。

关键在于,反斯托克斯光的强度对温度极其敏感,而斯托克斯光的强度对温度则基本不敏感。二者的光强比值( $\frac{I_{AS}}{I_S}$ )与光纤所在位置的绝对温度(T)之间存在确定的函数关系,如式(1)所示:

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \left(\frac{v_{AS}}{v_S}\right)^4 \exp\left(-\frac{h\Delta v}{kT}\right) \quad (1)$$

通过检测该比值,即可精确解调出温度值,如式(2)所示,从而排除了光源功率波动、光纤损耗等因素的干扰:

$$T = \frac{h\Delta v}{k} / \ln\left[\left(\frac{v_{AS}}{v_S}\right)^4 \frac{I_S}{I_{AS}}\right] \quad (2)$$

其中  $v_{AS}$  和  $v_S$  分别为反斯托克斯光和斯托克斯光的频率,  $h$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $\Delta v$  为拉曼频移。

定位则利用OTDR原理实现。通过记录从激光脉冲发射到接收到特定位置背向散射光的时间差  $t$ , 可以计算出该散射点距离测量起点的距离  $L$ , 如式(3)所示:

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (3)$$

其中,  $c$  为真空中光速,  $n$  为光纤的有效折射率。结合拉曼散射测温 and OTDR 定位技术, DTS 主机即可重构出整条传感光缆上每一点的温度分布曲线。

### 1.2 FBG与DTS技术性能对比

为清晰展示DTS的技术优势, 现将其与FBG感温系统进行多维度对比, 具体如表1所示:

对比维度	光纤光栅感温系统 (FBG)	分布式光纤感温系统 (DTS)	优势分析
测量方式	准分布式点式测量	全分布式连续测量	DTS 无测量盲区, 可捕捉任意局部热点。
空间分辨率	受光栅刻写间距限制 (通常 $\geq 1m$ )	取样间隔可达 1m 或更小	DTS 空间分辨率更高, 定位更精准。
温度敏感性	依赖光栅中心波长漂移, 易受应力/应变交叉干扰	依赖拉曼散射光强比, 免疫于应力/应变干扰	DTS 测量结果更稳定可靠, 误报率极低。
长期稳定性	光栅存在老化、强度衰减和中心波长漂移风险	传感光纤为无源石英玻璃, 性能退化缓慢	DTS 长期运行免校准, 稳定性优异。
传感光缆	特殊刻写的光栅光纤, 成本高, 定制周期长	标准通信多模/单模光纤, 成本低, 供应链成熟	DTS 原材料成本与采购便利性优势显著。
后期维护	光缆损坏需更换整段光栅阵列, 成本高昂且复杂	光缆损坏可现场熔接修复, 操作简单, 成本极低	DTS 运维简便, 全生命周期成本优势明显。
适用场景	对振动和温度剧变环境适应性较差	可灵活设计余长, 适应宽温域及复杂动态环境	DTS 环境适应性更强。

综上所述, DTS 在测量连续性、结果可靠性、长期稳定性及运维经济性方面均显著优于 FBG, 是大型储罐火灾监测等严苛工业场景的理想技术选择。

## 2 工程应用案例: 华德 NT101/3# 储罐改造项目

### 2.1 项目概况与系统架构设计

本项目针对华德公司南边灶油库 NT101/3# 储罐原有 FBG 系统进行升级, 该储罐为 50000m<sup>3</sup> 外浮顶原油储罐, 直径 46m, 高度 19m, 密封圈周长 144.5m, 原 FBG 系统因频繁误报及监测盲区问题亟待改造。项目选用上海某企业 FireLaser III 型 DTS 主机, 该主

机采用模块化设计, 集成 2 个独立测量通道, 最大测量距离 2km, 测温范围 -40℃~800℃, 完全满足项目需求并为后续 3 个储罐扩容预留接口。系统整体由 DTS 主机、工控机、显示器、感温光缆及终端盒组成, 架构如图 1 所示。

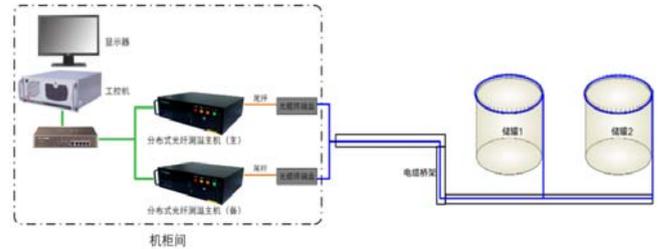


图1 分布式光纤系统方案图

DTS 主机负责光信号发射、接收与解调, 采样频率 1Hz; 工控机运行专用监控软件, 支持温度曲线实时显示、数据存储 (保存 1 年) 及多级报警; 感温光缆紧贴密封圈敷设, 兼具传感与信号传输功能, 通过电缆桥架与机柜间设备连接, 形成完整监测闭环。

### 2.2 感温光缆部署方案与实施要点

光缆部署是保障监测效果的核心环节, 采用多重优化设计, 具体布置如图 2 所示。一是冗余配置, 为储罐布设 2 条独立感温光缆 (一主一备) 并行工作, 光缆型号均为 G652D 多模光纤, 芯数 48 芯, 其中 2 芯用于测温, 其余备用, 任何一条光缆断纤均不影响系统运行, 大幅提升可靠性。

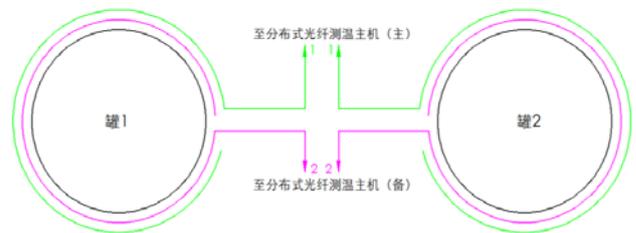


图2 光纤布置示意图

二是路径规划, 沿外浮顶罐二次密封圈外侧周向部署, 光缆距密封圈表面距离  $\leq 5cm$ , 确保全面覆盖火情高发区域, 同时避开浮盘升降机械结构, 避免物理损伤。三是固定方式, 采用特制不锈钢机械卡具, 以 1 米间距将光缆紧固于密封圈附件的角钢支架上, 卡具与光缆间加装橡胶垫, 既保证良好热接触 (热响应时间  $\leq 3s$ ), 又避免浮盘移动导致光缆磨损。四是余量设计, 在储罐与机柜间预留 10m 光缆, 首尾端各预留 5m, 既便于熔接维护, 又能在温度曲线上形成明确标识段, 辅助精确定位。施工中严格控制光缆敷设张力  $\leq 800N$ , 避免过度拉伸损伤纤芯<sup>[1]</sup>。

### 2.3 系统现场校准方法

零点校准时, 选取 10m 长感温光缆置于恒温水槽, 设定温度 25℃ (环境基准温), 使用经计量认证的 PT100 探头 (精度  $\pm 0.1^\circ C$ ) 测量实际温度, 通过 DTS 主机软件调整温度偏移量参数, 使光缆测得的温度值与参考探头读数一致, 校准前光缆测量值为 23.2℃, 校准后误差降至 0℃。

斜率校准在零点校准基础上, 将恒温水槽温度升至 60℃, 重

复上述操作, 标定系统温度测量线性度, 校准前60℃时测量误差为1.8℃, 校准后降至0.2℃。两点校准确保系统在-40℃~800℃全量程范围内精度达标。校准过程中同步记录环境参数(温度28℃、湿度65%), 避免温湿度变化影响结果。校准合格后出具《现场校准报告》, 作为系统投运的必备条件, 校准记录保存至油库安全管理系统。

光缆部署是保障监测效果的核心环节, 采用多重优化设计: 一是冗余配置, 为储罐布设2条独立光缆(一主一备)并行工作, 单条光缆断纤不影响系统运行, 大幅提升可靠性; 二是路径规划, 沿外浮顶罐二次密封圈外侧周向部署, 确保全面覆盖火情高发区域; 三是固定方式, 用特制不锈钢卡具以1米间距紧固光缆, 保证与被测对象良好热接触, 同时避免浮盘移动或振动导致松动; 四是余量设计, 在储罐间及光缆首尾预留足够长度, 既便于熔接维护, 又能在温度曲线上形成标识段, 辅助精确定位, 施工中严格控制光缆敷设张力, 避免过度拉伸损伤纤芯<sup>[2]</sup>。

### 3 系统运行效果与结论

#### 3.1 火灾响应功能验证

系统施工结束后, 联合业主、设备供应商及仪表工程师开展火灾响应模拟测试, 采用可控水浴热源在感温光缆不同位置进行局部加热, 模拟火灾初期的局部升温过程。测试数据显示, 系统对温度异常的响应时间均控制在3秒以内, 远低于行业标准的10秒; 报警位置与实际加热点的误差小于1米, 温度测量误差稳定在±1℃以内, 完全满足设计规范与安全生产对火灾监测的高精度要求。测试过程中, 主备光缆切换功能正常, 人为模拟主光缆断纤后, 备用光缆在2秒内完成监测接管, 未出现监测中断情况, 验证了系统冗余设计的有效性, 确保极端情况下仍能持续发挥监测作用。

#### 3.2 长期运行效果分析

该DTS系统自2019年6月25日正式投运至今, 已连续稳定运行超过6年, 期间经历了夏季高温(最高环境温度42℃)、台风暴雨(最大风力12级)及日常运行振动等多重严苛考验。运行记录显示, 系统未发生一起因设备故障或环境干扰导致的误报警事件, 也未进行过任何硬件维修或更换, 设备完好率保持100%。与

改造前的FBG系统相比, 优越性十分显著: 可靠性方面, 彻底解决了FBG因应力振动敏感导致的高误报问题, 减少了无效应急处置成本; 精确性上, 连续监测模式弥补了点式测量盲区, 成功捕捉3次密封圈局部异常升温, 为隐患排查争取了时间; 经济性上, 免除了FBG系统高昂的备件更换与维修费用, 据统计每年可降低运维成本约15万元。

#### 3.3 研究结论与推广价值

本文针对大型原油储罐火灾监测中FBG技术的局限性, 提出并实施基于DTS系统的升级改造方案, 通过理论分析与工程实践得出以下结论: 一是分布式光纤感温技术凭借全分布式连续测量、应力应变免疫、长期稳定及低运维成本等优势, 可有效克服FBG技术在空间分辨率、稳定性与经济性上的固有缺陷; 二是通过合理的系统架构设计、冗余光缆部署及现场精确标定, DTS系统能够为储罐密封圈等关键区域提供 $\pm 1^\circ\text{C}$ 测温精度与 $\leq 1\text{m}$ 定位精度的实时监测服务; 三是超6年的无故障运行实践, 充分验证了DTS系统在石化严苛环境中的高可靠性<sup>[3]</sup>。本研究的设计思路、实施方法与性能验证过程, 可为石化及其他相关行业关键设施的安全监测系统升级提供重要借鉴, 具有显著的推广价值。

### 4 结束语

综上所述, 分布式光纤感温系统(DTS)凭借其全分布式连续测量、高精度定位、强环境适应性及低运维成本等显著优势, 有效解决了传统FBG感温系统在大型原油储罐火灾监测中的局限。通过华德石化NT101/3#储罐的长期稳定运行实践, 充分验证了DTS技术的可靠性与经济性, 为石化行业关键设施的安全监测提供了新思路, 值得广泛推广与应用。

#### [参考文献]

- [1] 杨钊, 史晓红. 大型原油储罐罐体变形的修复[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(2): 150-153.
- [2] 路明博. 大型原油储罐检修中的安全管控[J]. 新疆有色金属, 2024, 47(3): 86-87.
- [3] 吕昕, 贾祥志. 分布式光纤温度传感专利技术综述[J]. 河南科技, 2019(27): 42-45.