

•激光技术•

分布式光纤测温预警系统在储油罐上的应用

徐延亮, 魏念波, 刘 占

(91876部队, 河北 秦皇岛 066203)

摘要: 针对储油罐内温度分布信息掌握不足的隐患, 介绍了一种以光频域反射(OFDR)为基本原理设计而成的分布式光纤测温预警系统, 该系统主要由测温光缆、光纤测温主机和火灾报警主机组成, 并设计了基于储油罐的光纤测温预警系统方案, 描述了系统实施的主要工作。分布式光纤测温预警系统稳定可靠, 性能指标高, 可提供详细的空间温度分布信息, 对储油罐火灾的预防以及灭火具有很大的帮助。

关键词: 分布式光纤测温预警系统; 拉曼散射; 油罐

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-05-0017-05

Application of Distributed Optical Fiber Temperature Measurement Early-warning System in Tanks

XU Yan-liang, WEI Nian-bo, LIU Zhan

(91876 Navy Unit, Qinhuangdao 066203, China)

Abstract: According to the deficiency of temperature distribution in tanks, a distributed optical fiber temperature measurement and early-warning system based on optical frequency domain reflectometer (OFDR) principle is introduced. The system is consisted of temperature measurement optical fiber, optical fiber temperature measurement main equipment and fire alarm main equipment. The scheme of optical fiber temperature measurement and early-warning based on tanks is designed, and main works for system implementation is described. The system has a good reliability and performance index, which can provide detailed space temperature distribution information and helps a lot in fire prevention and extinguishing.

Key words: distributed optical fiber temperature measurement and early-warning system; Raman scattering; tanks

油料保障是飞机飞行保障的头等大事, 但油料易燃易爆, 并具有一定的挥发性。目前, 大量的油料一般储存在封闭的油罐中。多年来, 由于各种原因, 油罐内油气分布温度信息难以掌握一直是储油区的安全隐患, 油气温度过高导致储罐火灾一直是令储油部门头疼的问题。近年来, 尽管采取了不少安全技术措施, 但世界上因油气温度过高而引起的油罐起火爆炸事故仍然不断, 特别是在油库改造、施工、作业等过程中, 各种火源、电线等具有极大的

危险性。传统的安全监测一般是采用人工巡检的方式, 不但浪费人力, 还不能及时发现和处置突发事件。通过研究火灾发展过程及规律可知, 造成火灾失控的根本原因, 就是不能实时掌握油罐内油气温度, 起火后往往又不能有针对性的进行高效灭火。若是对多个油罐内油气的分布温度同时进行实时监测, 则不光能预知油气温度变化信息以便有效预防火灾^[1], 还能在起火后将最需要灭火的部位提供给消防部门, 有效提高火灾预警和处置能力。

收稿日期: 2016-09-27

基金项目: 装备预研共用技术基金资助(9140A33050114JB39477)

作者简介: 徐延亮(1982-), 男, 河北故城人, 硕士, 工程师, 主要研究光纤通信及光纤测温。

分布式光纤测温预警系统正是基于这一需求而研发出来的。它结构简单、实用可靠,并具有安全管理自动化水平。它采用光纤作为感温介质和传输介质,以光纤内传输激光强度的变化来测量光纤在油罐内各区域的温度。光纤精度高、质量轻、体积小,便于大规模敷设,和线型感温电缆相比,光纤防爆、防雷击、抗电磁干扰,具有较低的维护成本和较高的可靠性。分布式光纤测温系统能够实现油罐区无电、实时在线监测,提高了油罐区的安全性。

1 光纤测温技术原理

激光在光纤中传输时会产生瑞利(Rayleigh)散射、布里渊(Brillouin)散射和拉曼(Raman)散射等多种类型的散射。其中拉曼散射对温度最为敏感,它是由光纤构成分子的热振动和激光光子在相互作用时产生的。具体地说,若一部分光能转换为热振动,那么将发出一个比光源波长更长的光,此光为斯托克斯(Stokes)拉曼散射光;如果一部分热振动转换为光能,则将发出一个比光源波长更短的光,称为反斯托克斯(anti-stokes)拉曼散射光。Stokes拉曼散射光的光功率受温度影响很小,可忽略不计,而 Anti-Stokes 拉曼散射光的光功率对温度比较敏感,二者光功率之比是一个与温度相关的函数,其关系式如下^[7]

$$\frac{P_{AS}(L)}{P_S(L)} = \exp(-h\Delta\nu/kT) \frac{\Gamma_{AS}}{\Gamma_S} \exp[(\alpha_S - \alpha_{AS})L] \quad (1)$$

其中, $P_{AS}(L)$ 、 $P_S(L)$ 分别是 Anti-Stokes 拉曼散射光和 Stokes 拉曼散射光的光功率; Γ_{AS} 、 Γ_S 分别为 Anti-Stokes 拉曼散射光和 Stokes 拉曼散射光在光纤中单位长度上的后向散射系数; α_{AS} 、 α_S 分别为 Anti-Stokes 拉曼散射光和 Stokes 拉曼散射光在光纤中单位长度上的损耗系数; L 为后向散射点到探测端的光纤长度。 $\Delta\nu$ 为拉曼声子频率; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度。可见, L 处的 Anti-Stokes 拉曼散射光和 Stokes 拉曼散射光的光功率比只与外界环境的温度有关。

式(1)中光功率比是到达探测器前的光功率比,由于探测器光谱响应率的不同,需要选取一段光纤 L 作为定标光纤(此光纤放置在温度为 T_0 恒温箱内,一般取光纤的前 200 m 区域)。

$$\frac{P_{AS}(L)}{P_S(L)} = \exp(-h\Delta\nu/kT_0) \frac{\Gamma_{AS}}{\Gamma_S} \exp[(\alpha_S - \alpha_{AS})L] \quad (2)$$

式(1)与式(2)相比知

$$\frac{P_{AS}(L)/P_S(L)}{P_{AS}(L)/P_S(L)} = \frac{\exp(-h\Delta\nu/kT)}{\exp(-h\Delta\nu/kT_0)} \exp[(\alpha_S - \alpha_{AS})(L-L)] \quad (3)$$

式(3)光功率之比等于探测器探测到的光功率之比。

对强度之比取对数,则 L 处的温度

$$T = \frac{h\Delta\nu T_0}{h\Delta\nu - kT_0 \left[\ln \frac{P_{AS}(L)/P_S(L)}{P_{AS}(L)/P_S(L)} - (\alpha_S - \alpha_{AS})(L-L) \right]} \quad (4)$$

其中, $h, \Delta\nu, k, T_0, \alpha_S, \alpha_{AS}, P_{AS}(L), P_S(L), P_{AS}(L), P_S(L), L$ 均已知。

激光在光纤中以一定的速度传播,通过入射光和接收到的后向散射光之间的时间差 Δt , 以及光纤内光的传播速度,可知光纤内各点距离光纤入口的距离 L 如下^[6]

$$L = c \frac{\Delta t}{2n} \quad (5)$$

式(5)中, c 为真空中光速; n 为光纤折射率。

这样,由式(4)、式(5)就可以得到整根光纤沿线各点上的温度,从而实现了分布式测量温度^[2-3]。

测温过程如图 1 所示。

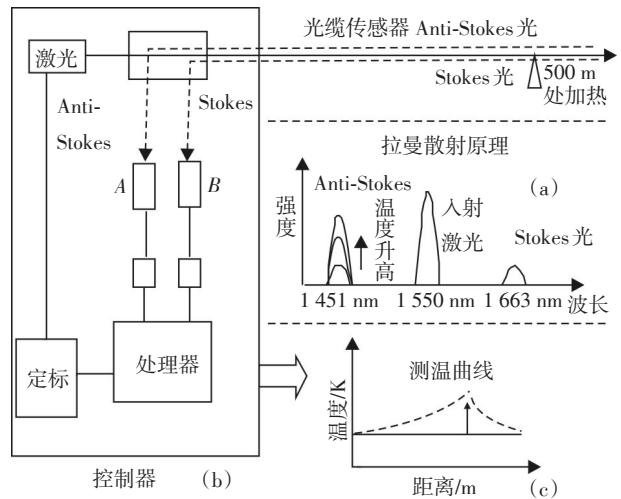


图 1 拉曼散射原理及光纤测温示意图

图1中(a)是拉曼散射原理示意图,入射激光波长为1 550 nm,光纤分子的拉曼声子频率 $\Delta\nu$ 为 1.32×10^{13} Hz,则Anti-Stokes拉曼散射光和Stokes拉曼散射光的波长分别为1 451 nm和1 663 nm,其中1 451 nm的拉曼散射光的光功率随着温度的升高逐渐增大。入射激光经光纤散射后(如图1中(b),Anti-Stokes拉曼散射光和Stokes拉曼散射光经窄带光谱滤波后分别进入探测器A和探测器B,记录传输时间 Δt 。探测器给出的电信号经处理器处理后,结合光纤定标信息,从而求得距离处的温度。采用高品质的脉冲激光光源和高速的信号采集与处理技术,便可得到激光沿传输方向的距离温度曲线。若图1中500 m处光纤温度升高,系统给出的测温曲线在500 m附近会有一个极大值,这样就可及时找到500 m处进行隐患排除,如图1中(c)所示。

2 性能指标及系统选型

光纤测温预警系统主要由光纤测温系统和火灾报警主机组成,其中光纤测温系统由测温光缆、分布式光纤测温主机组成。测温光缆感受并传送温度信号,测温主机对温度信号实时分析和监测,并将报警信号上传火灾报警主机。

2.1 性能指标

衡量光纤测温系统性能的指标主要有三个,即空间分辨率、温度精度和定位精度^[9]。空间分辨率是指分布式光纤测温系统对沿光纤长度分布的温度进行测量所能分辨的最小空间单元,即最小长度;温度精度是指测量温度与实际温度的误差;定位精度在定位功能中,以长度值标示感温光纤位置时,位置测量数据与实际值的偏差。

2.2 测温光缆

感温光缆应具备良好的抗啮咬、抗振和防静电特性以及温度传导性能。用于储油罐温度监测的感温光缆,可以定做为内含金属铠装材料,外部为绝缘材料的形式。系统用光纤衰减不应大于3.5 dB/km@850 nm。整个系统的衰减不得超过控制单元的标度(2 000 m光纤上的最大衰减不超过10 dB),其他参数要求如表1所示。

表1 测温光缆参数要求

序号	项目	标准参数值
1	测温光纤模式	50/125 μm 多模光纤
2	测温光纤芯数	不少于2芯
3	外部直径/mm	不大于5
4	外护套材料	低烟无卤,阻燃型热塑材料
5	抗张强度/N	工作时不小于300,敷设时不小于1 000
6	抗压强度	工作时不小于300 N/10 cm,敷设时不小于1 000 N/10 cm
7	线性碾压力	300 N/10 cm引起-0.3 mm的变形
8	允许曲率半径	工作时为光纤外径的20倍,敷设时为光纤外径的10倍
9	温度范围	长期:-30 $^{\circ}\text{C}$ ~95 $^{\circ}\text{C}$,短期:-50 $^{\circ}\text{C}$ ~140 $^{\circ}\text{C}$
10	使用年限	30年

2.3 分布式光纤测温主机

光纤测温主机采用OFDR技术,通过窄带检测频域信号,并在频域上进行温度计算。相比OTDR(optical time domain reflectometer)分布式光纤温度传感器,OFDR分布式光纤温度传感器温度稳定性好,测试时间短,可以降低噪声,从而获得更高的信噪比^[4]。

分布式光纤测温主机通过测温通道与测温光缆相连,根据实际需要可选择不同通道数的测温主机,测温通道数最多可达到16个。测温主机具有可编程输入输出接口以及各种通讯接口。空间分辨率可到1 m,温度分辨率可低至0.1 $^{\circ}\text{C}$,测试距离可达2 000 m(可扩展)。

2.4 火灾报警主机

火灾报警主机通过连接光纤测温主机上的继电器实现报警,如图2所示。

不同的光缆对应相应的通道,通道对应相应的继电器,继电器又对应相应的输入模块。因而,火灾报警主机可提供光缆温度异常部位的位置信息。光线测温主机当测得某段光纤温度超过60 $^{\circ}\text{C}$ 时,通过相应继电器驱动火灾报警主机实现自动报警。

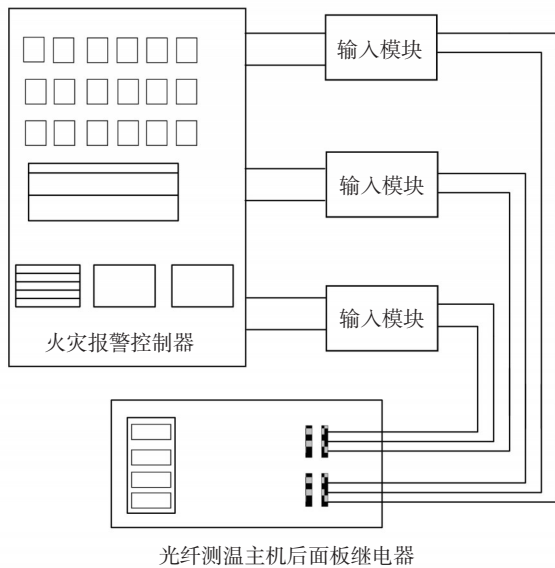


图2 火灾报警主机结构示意图

3 光纤测温预警系统方案与实施

3.1 光纤测温预警系统方案

某单位有4个拱顶油罐和3个浮顶油罐。4个拱顶油罐高12 m,直径25 m,介质为汽/柴油,油罐到主控室约500 m。3个浮顶油罐,高22/25 m,直径60/80/96 m,介质为原油,油罐到主控室约800 m。

可选用2台光纤测温主机。1号主机监测4个拱顶油罐,2号主机监测3个浮顶油罐。各通道监测的具体情况如表2所示。

表2 光纤测温主机通道与监测对象对应关系

设备	监测通道	量程/m	监测对象	监测长度/m	通道总长度/m
1号主机	通道一	2 000	拱顶油罐 1号	300	700
	通道二	2 000	拱顶油罐 2号	300	700
	通道三	2 000	拱顶油罐 3号	300	700
	通道四	2 000	拱顶油罐 4号	300	700
2号主机	通道一	2 000	浮顶油罐 1号	300	1 200
	通道二	2 000	浮顶油罐 2号	300	1 250
	通道三	2 000	浮顶油罐 3号	300	1 350
	通道四	2 000	预留		

3.2 光纤测温预警系统实施

系统实施的主要工作是光缆的敷设、熔接以及

光缆接头盒固定。

3.2.1 光缆敷设

测温光缆安装在待测油罐顶上原有火灾探测口内,沿油罐内呈圆周分布。固定时,使用固定压板将光缆固定在油罐浮船周边,固定压板隔1 m左右使用1个,或使用U型永久磁铁将测温光缆吸附到所要安装的位置。拱顶罐内探测器固定在灌顶部的围栏下沿的扁铁上。测温光缆本身既作为感温探测光缆,同时也作为信号传输光缆,将其从地下敷设到控制室。光缆应每隔100 m设置光缆余量段。在测温光缆始端,设置光缆余量段来实现始端显示定位,在测温光缆尾端,设置光缆余量段来实现终端显示定位,并应在尾端进行防水处理。

3.2.2 光缆熔接与光缆接头盒固定

不但不同光缆盘之间持续需要进行光缆的熔接,在光缆断点处和较大损耗点处也需要进行光缆的熔接。熔接时,剥开测温光缆长度约50 cm,并将剥开部分固定至接头盒内。先清洗测温光缆,再穿热缩管,并对多对光缆完成光纤配对。光缆熔接后,先固定盘内光缆再将光缆接头盒密封,并牢靠固定于高位。测温光缆在接头盒的进出口处要有较大的弯曲半径。铠装测温光缆应接地,接地电阻不大于 $4\ \Omega$ 。

3.2.3 测温结果

图3是光纤测温主机一号机通道三的距离温度曲线。

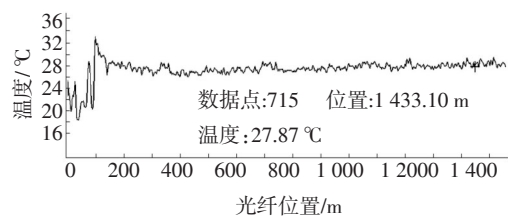


图3 光纤测温主机一号机通道三的距离温度曲线

可以看出,光纤前端的温度抖动较大,随着距离的增加,曲线逐渐趋于一条直线。这是因为,光纤的温度除取决于油罐内油温外,还与太阳光照,与热源的距离以及室内外温度等有关。把光标定

在温度曲线上某点,可知此距离处的温度。图中1 433.10 m处的温度为27.87℃。

4 结 论

分布式光纤测温预警系统能够利用光纤测量其沿线的分布温度并实现告警,系统可扩展性强,单位成本随着测量距离的增加而降低。测温现场不带电、不引雷、无电源、无热源,测温主机离现场距离较远并可实现实时、高精度、远程集中自动化管理,从而最大程度上避免了火灾爆炸等恶性事故发生。分布式光纤测温预警系统对油罐内油气的温度进行实时连续的监测,当光纤温度超过60℃时能够实现自动告警。测温曲线与油温高低、太阳光照、室内室外、与热源距离等有关,温度分辨率高。通过分析运行温度,可寻找出油罐温度变化的气候、季节性规律,从而制定有针对性的巡察方案,这对预防火灾有较大的帮助作用。

参考文献

- [1] 陈思维,杜杨.油罐中油气爆炸规律研究[J].安全与环境学报,2007(3):102-104.
- [2] 孙静,赵子玉.电力电缆温度实时在线监测[J].电线电缆,2011(1):40-42.
- [3] 李秀琦,侯思祖.分布式光纤测温系统在电力系统中的应用[J].电力科学与工程,2008(8):37-40.
- [4] 耿文倩,耿军平.光时域背向拉曼散射分布式光纤传感器与光频域背向拉曼散射分布式光纤传感器对比研究[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2002(5):49-53.
- [5] 张丽萍,张斌.分布式光纤温度传感器与其性能参数检测方法的研究[J].工业计量,2013(5):37-39.
- [6] 张在宣.光纤分子背向散射的温度效应及其在分布光纤温度传感网络上应用研究的进展[J].原子与分子物理学报,2000(3):559-565.
- [7] 叶宗顺,华涛.基于拉曼散射理论的分布式光纤测温系统[J].西北水电(增刊),2011:139-142.

《光电技术应用》期刊收录情况介绍

《光电技术应用》期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

已与万方数据库签订合同,可以同步查询论文内容,更新及时。

因主办单位搬迁,从即日起期刊编辑部通信地址变更为天津市空港经济区纬五道9号,邮编为300308。电话:022-59067938。投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。原投稿邮箱nloe@vip.163.com继续使用至2016年12月31日。竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。