大型储油罐温度检测技术研究

韩玖会[1],冯进良[1,2],吴 震[1],陈 可[1],王 洋[1],刘凤超[1]
(1. 长春理工大学光电工程学院,吉林长春 130021;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130021)

摘要:目前的储油罐油温测量多局限于电类传感器,具有极大的安全隐患。基于安全考虑,提出了采用基于拉曼散射的全分布式光纤传感的方法,通过对油罐内传感光纤产生的背向拉曼散射光信号的测量与分析,得到油罐不同深度温度信息。针对噪声信号,提出了采用 8 000 次线性累加平均与小波模极大值配合使用的去噪方法。在系统标定时,利用 MATLAB 对光强比与温度数据进行三次多项式曲线拟合。对于 2 种光不等衰减问题,提出采用以 e 为底指数修正方法。最后对系统进行了精度分析,该系统可以实现油罐不同深度温度安全检测,在 1.2 km 范围内测温精度为 0.8 ℃。

关键词:储油罐;分布式光纤测温;温度标定;衰减补偿;精度分析
中图分类号:TP29 **文献标识码**:A **文章编号**:1002 - 1841(2017)04 - 0088 - 03

Temperature Measurement Technology Research of Large Storage Tank

HAN Jiu-hui[1], FENG Jin-liang[1,2], WU Zhen[1], CHEN Ke[1], WANG Yang[1], LIU Feng-chao[1]
(1. College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130021, China
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: The large storage tank oil temperature measurements are confined to the electrical sensors, having great potential safety hazards. Based on safety, this paper puts forward fully distributed optical fiber sensing method based on Raman scattering. By measuring and analyzing the back Raman scattered light signals, tank temperature information can be obtained. For noise signal, combination of 8000 times cumulative average and wavelet modulus maxima de-nosing method was proposed. When system calibration, MATLAB was used to fit experiment light intensity ratio and temperature data based on three times polynomial curve fitting. For both light unequal attenuation issues, a correction method based on the e exponent was proposed. Finally, the system can achieve large oil tank temperature of different depth, within 1.2 km, temperature measurement accuracy is 0.8 ℃.

Keywords: storage tank; distributed optical fiber temperature measurement; temperature calibration; attenuation compensation; accuracy analysis

0 引言

油温是一个非常重要的物理量,一方面油品温度影响油品体积进而影响油品计量和交易准确度,另一方面油温异常也会造成油罐安全问题,因此,准确测量油温尤其重要。目前,国内外大型油罐油温检测主要采用电类测量方法,主要利用电类感温传感技术实现直接或间接油温测量,具体测量方法有[1]:热电阻温度计、感温电缆、集成电路温度变送器等,但是在易燃易爆的油罐环境中,电类传感器还是存在一定安全隐患。本文利用基于拉曼散射全分布式光纤传感技术实现油罐油温测量,通过对背向拉曼散射光信号测量和分析,系统可以将整个光纤沿路分布的油品温度信息进行连续测量,既能解决电类传感器带来的安全隐患,又能实现实时在线测量油罐温度,系统具有极大的实际应用价值。

收稿日期:2016 - 05 - 23

1 全分布式光纤测温及定位原理

频率为 v_0 激光脉冲光在光纤中传输时,由于光纤的折射率随机起伏以及纤芯的微观不均衡等因素的影响,会产生光的散射现象,产生 3 种谱线[2],即与入射光频率 v_0 相同瑞利散射谱线,存在着频移为 11 GHz 左右的布里渊谱线,以及 THZ 数量级频移的拉曼散射谱线,其中,低频光 v_s 为斯托克斯(Stokes)光,高频光 v_a 为反斯托克斯(Anti-Stokes)光。

根据自发拉曼散射理论,Anti-Stokes 光强 I_a 与 Stokes 光强 I_s 之比 $R(T)$ 为

$$R(T)=\frac{I_a}{I_s}=\left(\frac{v_s}{v_a}\right)^4\exp\left(-h\Delta v/k_B T\right) \quad (1)$$

式中:h 为普朗克常数;k_B 为玻尔兹曼常数;T 为热力

学温度。

经式(1)得出,拉曼散射光强之比仅由温度 T 决定。因此,由两者强度之比,可以得到光纤各段的温度信息。

光纤中每个散射点位置都会产生拉曼散射,散射点定位原理图如图 1 所示。

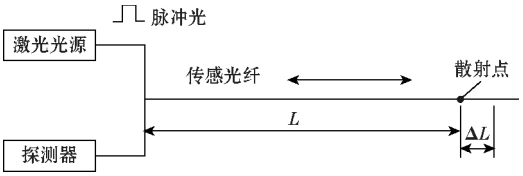


图 1　定位原理图

产生的背向拉曼散射光由探测器检测,激光脉冲从光纤发射端面到接收到 L 处产生的散射所用的时间 t,因此该位置距起始端的距离为[3]

$$L=\frac{ct}{2n} \tag{2}$$

式中:c 为光速;n 为光纤的有限折射率。

2　全分布式光纤测温系统设计

该测温系统由 3 个部分组成,分别为测温主机、信号采集和处理以及传感光纤[4]。测温主机包括:中心波长为 1.32 μm 的脉冲半导体激光器模块,1×3 光纤波分复用模块(包含双向耦合器和光纤波分复用器)、光电接收和放大模块,接收采用雪崩光电二极管(APD)。信号采集和处理部分包括:12 位 100 M 高速 A/D 数据采集卡和温度解调软件。测温光纤:62.5/125 μm 的渐变型多模光纤,外加含氟聚合物涂层防止油温损伤传感光纤。系统的功能框图如图 2 所示。

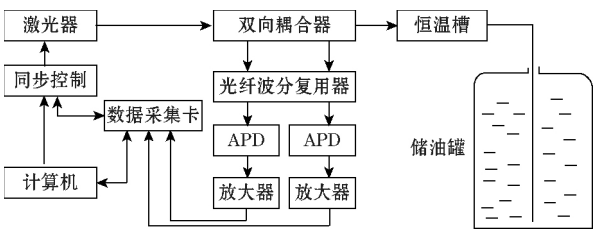


图 2　系统的功能框图

工作过程:该系统的脉冲光源,在同步控制单元控制下,会发出一定频率的激光脉冲,双向耦合器会将脉冲光耦合到处于油罐内部的传感光纤中,油罐中空间分布的温度场调制了传感光纤中背向拉曼散射光强度,且不同深度温度不同对光强调制效果也不同,背向拉曼散射 Stokes 光和 Anti-Stokes 光携带温度信息,经过 APD 光电转换,再由各自的放大器对电流信号进行放大,数据采集卡将放大后含有大量白噪声的电压信号进行 8 000 次线性累加平均处理,再配合小波变换模极大值法,处理光纤所处的环境温度突变造成信号突变点,将去噪处理后的电压信号传递给计算机,经计算机中温度解调软件对温度进行解调和数据存储,得到整段油罐内部光纤的温度信息,再通过定位原理重构出温度的空间分布信息。

3　实验及精度分析

3.1　定标实验

如果有一个已知参考点温度为 T_0,则由式(1)可得:

$$R(T_0)=\left(\frac{v_s}{v_a}\right)^4\exp(-h\Delta v/k_B T_0) \tag{3}$$

由式(1)、式(3)整理得:

$$\frac{1}{T}=\frac{1}{T_2}-\frac{k}{h\Delta v}\ln\frac{R(T)}{R(T_0)} \tag{4}$$

本系统选择参考温度为 20 ℃,定标位置设置在光纤前端 100 m,将定标光纤绕圈依次置于温度为 -20 ~ +100 ℃的恒温槽内。为有效减小误差,将在每个温度下得到多个拉曼散射光强度比值进行平均处理当作强度比的真实值,恒温槽温度用 Y 表示,拉曼散射强度比值用 X 表示,得到数据如表 1 所示。

表 1　拉曼散射强度比与恒温槽温度关系

Y/℃	-20	-10	0	10	20	30
X	0.646 0	0.738 7	0.818 4	0.909 4	1.000 0	1.089 2
Y/℃	40	50	60	70	80	90	100
X	1.177 4	1.278 6	1.375 1	1.465 6	1.552	1.653 3	1.754 5

在 -20 ~ +100 ℃范围内定标光纤所处恒温槽温度与拉曼散射强度比值成线性关系[5],用 MATLAB 进行线性拟合图如图 3 所示。

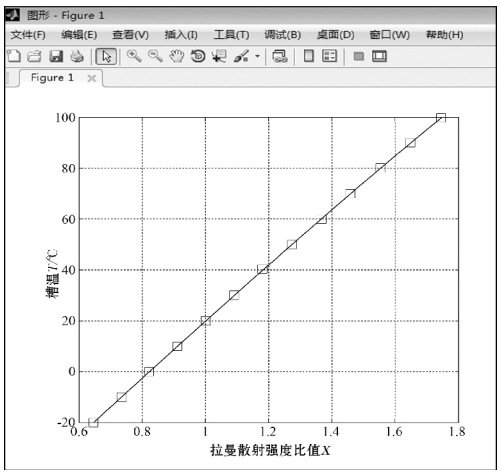


图 3　标定拟合曲线

对比利用正比例函数拟合发现,利用多项式拟合效果更好,拟合公式为

$$Y=5.027X^3-24.66X^2+144.8X-105 \tag{5}$$

温度标定曲线，$T_0=40$ ℃时偏差最大为 0.5 ℃。

Stokes 和 Anti-Stokes 2 种光波长不等，造成在光纤中衰减不同，用拉曼强度比值解调出的温度就会存在偏差，对于本系统测温距离小于 2 km 系统，提出采用以 e 为底的指数修正法，通过具体实验证明修正效果十分理想。实际测得衰减后 Anti-Stokes 和 Stokes 光强度与未衰减前光强关系为

$$R'(T)=R(T)\mathrm{e}^{(\alpha_s-\alpha_a)L}=R(T)\mathrm{e}^{\alpha L} \quad (6)$$

为了得出强度比衰减系数 α，将前端 3 m 长光纤绕成光纤圈置于 20 ℃恒温槽中，因为距离很短衰减几乎可以忽略不计，将此时测得拉曼散射比默认为真实值，再测得不同距离上长度为 3 m 光纤圈不等衰减后所得实际拉曼散射比值，求得平均的衰减系数，以减小由光纤不同位置衰减系数的不同造成的误差。由式(6)可得 $\alpha=-0.12\ \mathrm{km}^{-1}$，对式(5)修正得：

$$Y=5.027\mathrm{e}^{0.36L}X^3-24.66\mathrm{e}^{0.24L}X^2+144.8\mathrm{e}^{0.12L}X-105 \quad (7)$$

式中：α_a 和 α_s 为 2 种光波长的损减系数；L 为传播距离，初始零位位于距离前端 100 m 处。

3.2 测温实验

为了验证经过去噪处理、衰减修正和温度解调后系统的测温精度，将 1.2 km 的光纤分成 5 段，每段长度为 5 m，依次将绕成光纤圈置于温度为 30 ℃的恒温槽内，其他部分处在 25 ℃室温，记录 5 次实测值(每次的温度是测 10 次的平均值)。5 次光纤测得的温度值如表 2 所示。

表 2 分段实验数据

空间距离/m	实际温度/ ℃	实测温度/ ℃	误差/ ℃
395 ~ 400	30.0	29.8	0.2
595 ~ 600	30.0	29.6	0.4
795 ~ 800	30.0	29.5	0.5
995 ~ 1 000	30.0	29.3	0.7
1 195 ~ 1 200	30.0	29.2	0.8

通过表 2 实验数据发现，测距上限 1.2 km 时，测温误差仅为 0.8 ℃，说明经过去噪处理、衰减修正和温度解调后系统具有很好测温精度。但就整体误差变化规律来看，测温误差随着测量距离的增大而不断增大。

3.3 精度分析

该系统的测温精度主要受以下 3 个方面的影响。

3.3.1 定标实验中存在误差

本系统采用恒温槽温度不均匀误差为 $\Delta T_1=0.007$ ℃，恒温槽稳定性误差 $\Delta T_2=0.005$ ℃。恒温槽引起误差合成公式为

$$\sqrt{(\Delta T_1)^2+(\Delta T_2)^2}=0.008\ 6\ ℃ \quad (8)$$

定标温度误差影响测温精度[8]，由式(1)可得：

$$\Delta T=\frac{(h\Delta v)^2}{\{h\Delta v-T_0k_B\ln[R(T)/R(T_0)]\}}\Delta T_0 \quad (9)$$

式中：ΔT 为测温精度；ΔT_0 为系统定标精度。

由公式可得，系统测温精度与定标温度和定标精度有关。定标温度固定时，定标精度越高，测温精度越高。除此之外，温度标定曲线中定标多项式拟合也影响测温精度，$T=40$ ℃时偏差最大为 0.5 ℃。

3.3.2 信号处理对测温精度的影响

采集到的信号主要是 APD 产生的大量白噪声，提高系统测温精度实质上就是提高系统信噪比，取前端 10 m 光纤置于设定温度为 50 ℃恒温箱内，对比 2 种去噪方法的去噪效果[7-9]，如表 3 所示。

表 3 2 种去噪方法的去噪效果表

去噪方法	实测温度/ ℃	响应时间/s
15 000 次累加平均	50.7	18
8 000 次累加、小波模极大值	50.3	10

表 3 中，仅通过多次累加平均去噪的方法，随着累加次数增多，去噪效果提高不明显，并且增加系统响应时间。累加次数在 8 000 次时去噪效果明显，在此基础上配合小波模极大值去噪方法既能处理光纤所处的环境温度突变造成信号突变点，又能将累加次数缩小一半，缩短系统响应时间仅为 10 s，提高去噪整体效果，测温误差仅为 0.3 ℃，具有很好的测温精度。

3.3.3 测温主机内电子器件对测温精度影响

A/D 芯片尽量选择非线性小的，才能减小 Stoke 和 Anti-Stokes 2 路信号接收不同步[10]。本文对不同采样位数的 A/D 芯片进行实验，得到不同位数与系统测温精度的关系如图 4 所示。

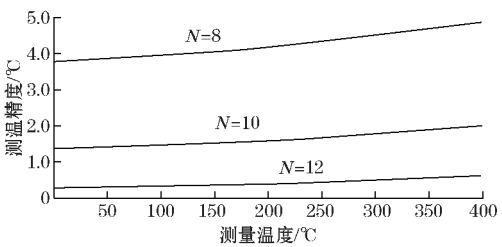


图 4 采样位数与测温精度

通过对比不同位数 A/D 芯片对测温精度影响，本系统选用的是采样位数 $N=12$ 的 A/D 芯片，测温上限为 +100 ℃时测温精度最高，约为 0.3 ℃。

(下转第 94 页)

表 1 10 d 生成的数据容量对比

数据类型	容量
IBA 实时数据	218.88 GB
7 台轧机解析数据	7.7 MB

对比表 1 的数据容量可以发现,10 d 的 IBA 实时数据超过 200 GB 容量,而 7 台轧机 20 个通道的数据,10 d 一共只有 7.7 MB,数据所占空间远小于 IBA 实时数据。假设以容量为 500 GB 的硬盘为例,若存储 IBA 实时数据,只能存储不到 20 d 的数据;而存储解析后的轧机状态数据,则基本可存储所有时间跨度的数据。且对于分析轧机某项特定功能,除与之相关的若干通道数据需要之外,其他通道数据均为无效数据,可以不作保留。

4 结束语

基于 LabVIEW 的 IBA 实时数据导出系统通过调用 ibaFiles.dll 动态链接库,开发了界面友好,操作简单的数据导出系统,能实时监测一级服务器的 IBA 实时数据更新状态并进行解析和导出,为轧机的各项指标深度分析提供了大量可靠的数据。

经过实验证明,本系统的转换效率高,系统稳定性强,大幅度压缩了数据存储空间,实现了有效数据的长期保存和分析。

参考文献:

[1] 陈先霖,刘本仁. 宽带钢热连轧机板形控制系统的开发[J]. 钢铁,2000,35(7):28-33.

[2] 陈连生,连家创. 热带钢轧机轧辊磨损研究[J]. 钢铁,2001,36(1):66-67.

[3] 李立新,黄英钢,张葵,等. 轧辊磨损过程中的形貌图像特征及分形[J]. 钢铁,2015(4):95-100.

[4] 范文,孙冬梅,袁倩. 基于 LabVIEW 的磁轴承振动监测及故障诊断系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2016(4):60-62.

[5] 喻洋洋,周凤星,严保康. 基于 LabVIEW 的滚动轴承故障诊断系统[J]. 仪表技术与传感器,2016(3):74-76.

[6] BISHOP R H. Learning with LabVIEW 7 Express[M]. [s.l.]:Pearson Education,2005.

[7] 杨乐平,李海涛. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[8] 杨乐平,李海涛,杨磊. LabVIEW 程序设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

作者简介:严保康(1987—),讲师,博士,研究领域为设备故障检测与故障诊断。E-mail:ybk870610@126.com

周凤星(1952—),教授,研究领域为设备故障检测与故障诊断。E-mail:1198419035@qq.com

(上接第 90 页)

敏感器件易受温度影响,从而影响测温精度。APD 的增益对温度变化极为敏感,需设计温度补偿电路来补偿 APD 温度漂移。激光器的输出功率和中心波长,高速数据采集卡、放大器等易受温度影响的部件置于设计好的恒温箱。

4 结束语

本文设计了基于拉曼散射的全分布式光纤测温系统,实现对大型油罐油温连续在线测量,通过对油罐内传感光纤产生的背向拉曼散射光信号进行去噪处理、衰减修正和温度解调后,分段测温实验证明了系统测温精度达到 0.8 ℃。通过测得空间分布的油温信息来评估储油罐整体油温,从而实现了油品体积准确计量,也进一步提高了储油罐温度检测的安全性。

参考文献:

[1] 李建树,汪运芬,张宏印,等. 油罐温度测量[J]. 自动化与仪器仪表,1996(6):34-36.

[2] 张颖,张娟,郭玉静,等. 分布式光纤温度传感器的研究现状及趋势[J]. 仪表技术与传感器,2007(8):1-3.

[3] 徐锲,徐海燕,宋耀华,等. 基于光纤分布式传感器的时频定位技术[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2161-2169.

[4] 翟延忠,赵玉明,许舒荣,等. 分布式光纤测温系统[J]. 仪表技术与传感器,2007(9):36-38.

[5] 张在宣. 分布式光纤拉曼光子温度传感器的研究进展[J]. 中国激光,2010,37(11):2750-2756.

[6] 孙阳. 分布式光纤温度传感器的稳定性与提高温度分辨率的研究[D]. 长春:长春理工大学,2011.

[7] 潘泉. 小波滤波方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[8] 简燕红. 拉曼型光纤温度传感系统信号处理的研究与实现[D]. 保定:华北电力大学,2010.

[9] 王宗良. 分布式光纤拉曼温度传感系统信号处理及性能提升[D]. 济南:山东大学,2015.

[10] 史晓锋,李铮,蔡志权. 分布式光纤测温系统及其测温精度分析[J]. 测控技术,2002,21(1):9-12.

作者简介:韩玖会(1991—),硕士研究生,主要研究方向为仪器总体设计。E-mail:287848898@qq.com

通讯作者:冯进良(1964—),教授,博士,主要研究方向为仪器总体设计及仿真。E-mail:feng_20071101@163.com