

文章编号: 1672-8785(2022)05-0035-06

一种分布式光纤测温系统的设计与实现

黄红伟 张志辉 徐 瑞 李述标 方玉朝

(中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 由于受到光纤损耗影响, 长距离光纤测温精度较低。为了提高长距离光纤测温精度, 提出了一种分布式光纤测温系统设计方案。通过理论分析确定了拉曼散射光中的损耗分量。对常温下的测试数据进行拟合建模, 分离出损耗分量并对其进行补偿, 消除了损耗对测试温度的影响, 提高了长距离光纤测温的准确性。利用参考光纤环实现了光纤温度实时动态解调。将待测光纤环分别放置在 50℃、60℃、70℃、80℃ 的恒温水槽中进行了试验, 并对其数据进行了处理分析。结果表明, 系统测温精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 空间分辨率为 2 m。

关键词: 光纤; 测温; 损耗补偿

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.05.006

Design and Implementation of a Distributed Fiber Temperature Sensor System

HUANG Hong-wei, ZHANG Zhi-hui, XU Rui, LI Shu-biao, FANG Yu-chao

(Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Due to the influence of fiber loss, the temperature measurement accuracy of long distance fiber is low. In order to improve the long distance optical fiber temperature measurement accuracy, a design scheme of distributed optical fiber temperature measuring system is proposed in this paper. The loss of Raman scattering light is determined through the theoretical analysis, and the fitting model is built based on the test data of room temperature. The loss is separated, and the influence of fiber loss on temperature is eliminated by compensating the fiber loss which improves the accuracy of long distance fiber temperature. The real-time dynamic demodulation of fiber temperature is realized by the reference fiber ring. The fiber ring to be measured is placed in a constant temperature water tank at 50℃, 60℃, 70℃ and 80℃ respectively for experiment, and the experimental data are processed and analyzed. The results show that the temperature measurement accuracy of the system is $\pm 1^{\circ}\text{C}$, and the spatial resolution is 2 m.

Key words: fiber; temperature measurement; loss compensation

收稿日期: 2022-03-18

作者简介: 黄红伟(1993-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感技术研究。

E-mail: huanghongwei2011@126.com

0 引言

随着智慧城市建设步伐的加快,对长距离、大面积区域(如地铁管廊、隧道和高楼等)进行温度监控的需求日益高涨^[1]。传统的解决方案是通过铺设大量点式温度传感器来对大面积区域进行温度监控,但是存在成本高、安装繁琐的问题,不能很好地适应智慧城市建设需求。

随着工业技术的进步,传感器技术发展突飞猛进。其中,光纤传感器技术日趋成熟。相比于传统传感器技术,光纤传感器具有很多独特优势:可对长距离连续空间进行测量;铺设不需要依赖电力,可以用在易燃易爆区域^[2]。

本文设计了一套分布式光纤测温系统。通过理论分析确定了测试数据中的温度分量和损耗分量,并利用光纤损耗补偿算法解决了损耗对测试温度的影响问题。试验结果表明,系统测试精度和空间分辨率可以满足一般性的生产应用需求。

1 分布式光纤测温原理

由于光与微观粒子的相互作用,光在光纤中传输时会改变偏振态和频率而发生散射现象。光纤中常见的散射现象有瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射。其中,拉曼散射光携带光纤的温度信息,可以应用于分布式光纤测温技术。

图 1 为分布式光纤测温原理图。激光器发射出波长为 1550 nm 的脉冲信号,掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifiers, EDFA)对脉冲信号进行放大。该信号通过波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)进入

待测光纤。WDM 分离出反射回来的反斯托克斯和斯托克斯拉曼散射光,接着雪崩二极管(Avalanche Photodiode, APD)将拉曼散射光转换成电信号,最后进行数据采集。

通过解调反斯托克斯和斯托克斯散射光信号,可以得到光纤中的温度信息。利用光时域反射技术(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)可得到光纤中温度点的位置信息。从激光脉冲进入光纤入射端开始计时,到拉曼散射光返回到入射端结束,这段时间里脉冲光的路径是光纤入射端到待测点距离的两倍。最终,通过解调拉曼散射光和 OTDR 技术可以得到光纤沿线的温度分布信息。

2 分布式光纤测温系统的温度解调方法

在拉曼散射中,光子与光纤中的微观粒子发生碰撞,导致光子能量发生变化,产生反斯托克斯散射光。它的功率可以表示为^[3]

$$P_{as} = P_0 K_{as} \lambda_{as}^{-4} \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1} \times \exp[-(a_0(L) + a_{as}(L))] \quad (1)$$

斯托克斯光功率可以表示为

$$P_s = P_0 K_s \lambda_s^{-4} \frac{1}{1 - \exp(-h\Delta\nu/kT)} \times \exp[-(a_0(L) + a_s(L))] \quad (2)$$

式中, P_0 为入射光功率; P_{as} 为反斯托克斯光功率; P_s 为斯托克斯光功率; K_{as} 和 K_s 分别为反斯托克斯和斯托克斯散射系数; λ_{as} 和 λ_s 分别为反斯托克斯和斯托克斯波长; h 为普朗克常量; k 为玻尔兹曼常量; $\Delta\nu$ 为拉曼偏移; T 为环境温度; $a_0(L)$ 、 $a_{as}(L)$ 和 $a_s(L)$ 分别为入射光、反斯托克斯散射光和斯托克斯散射光在光纤中的损耗分量; L 为光纤长度。

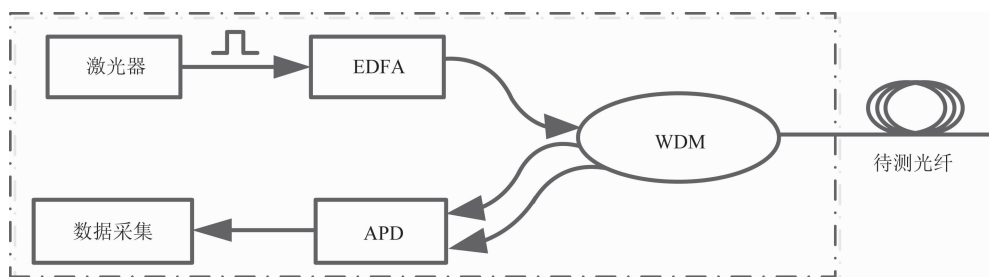


图 1 分布式光纤测温原理图

利用拉曼散射光解调温度有两种常用方法: 一种是仅利用反斯托克斯信号^[4]; 另外一种是利用反斯托克斯信号与斯托克斯信号的比值进行解调^[5]。由于受到光源波动、其他反射光等影响, 第一种方法的温度误差较大。而第二种方法利用双路信号提取温度信息, 可以避免系统内部噪声的干扰, 准确性高且实用性强, 是目前常用的温度解调方法。

将反斯托克斯信号和斯托克斯信号进行比值运算, 得到

$$R(T, L) = \frac{K_{as}}{K_s} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp(-h\Delta v/kT) \times \exp[-(a_{as}(L) - a_s(L))] \quad (3)$$

当 L_0 处参考光纤温度为 T_0 时,

$$R(T_0, L_0) = \frac{K_{as}}{K_s} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp(-h\Delta v/kT_0) \times \exp[-(a_{as}(L_0) - a_s(L_0))] \quad (4)$$

对式(3)和式(4)求比值, 可得

$$\frac{R(T, L)}{R(T_0, L_0)} = \frac{\exp(-h\Delta v/kT) \exp[-(a_{as}(L) - a_s(L))]}{\exp(-h\Delta v/kT_0) \exp[-(a_{as}(L_0) - a_s(L_0))]} \quad (5)$$

经化简可得

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta v} \left\{ \ln \frac{R(T)}{R(T_0)} - [a_{as}(L_0) - a_{as}(L) + a_s(L) - a_s(L_0)] \right\} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出, 温度与距离相关。假设光纤放在恒温箱中, 光纤上的每一点温度应该相同, 与距离无关。这个问题是由于式(3)中 $R(T, L)$ 不仅包含了温度信息, 还携带了损耗信息。光纤损耗与距离有关, 距离越长损耗越大。但是计算温度时无需损耗信息, 因此要对损耗进行补偿, 避免对温度计算造成影响。

设定

$$R_T = \frac{K_{as}}{K_s} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp(-h\Delta v/kT) \quad (7)$$

可得

$$R(T, L) = R_T \cdot \exp[-(a_{as}(L) - a_s(L))] \quad (8)$$

式中, $R(T, L)$ 为携带损耗信息的比值曲线; R_T 为消除损耗影响的比值曲线; $a_{as}(L)$ 和 $a_s(L)$ 分别为反斯托克斯信号和斯托克斯信号在光纤中的损耗分量。对式(8)两边同时取对数可得

$$F(L) = \ln[R(T, L)] = \ln(R_T) - [a_{as}(L) - a_s(L)] \quad (9)$$

设定

$$f(L) = a_{as}(L) - a_s(L) \quad (10)$$

可得

$$R_T = \exp[F(L) + f(L)] \quad (11)$$

式中, R_T 与光纤长度 L 无关, 对于 $F(L)$ 是常数项。所以可通过以下步骤求得损耗补偿: (1) 对携带损耗信息的比值曲线取对数; (2) 对取对数后的数据进行拟合, 得到拟合函数 $F(L)$; (3) 去掉拟合函数的常数项并取反, 得到 $f(L)$; (4) 根据式(11)求得损耗补偿后的比值数据。

损耗补偿后, 式(6)可变化为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta v} \left[\ln \frac{R(T)}{R(T_0)} \right] \quad (12)$$

3 分布式光纤测温系统

如图 2 所示, 分布式光纤测温系统由脉冲激光光源模块、光路模块和采集模块三部分组成。

脉冲激光光源模块通过脉冲调制电路触发激光器产生脉冲信号。温度功率控制电路通过调节泵浦激光器来让输出功率保持稳定, 并使经过掺铒光纤放大后的光信号在不同温度下保持稳定。利用光学隔离模块隔离后向反射光, 减少对激光器的干扰。

脉冲激光光源模块输出的光信号经窄带光学滤波器过滤得到波长为 1550 nm 的脉冲光, 然后它通过 WDM 传输至参考光纤和待测光纤。参考光纤处有温度传感器, 参考光纤温度用于解调待测光纤温度。反斯托克斯和斯托克斯散射光经过 WDM 传输至采集模块。

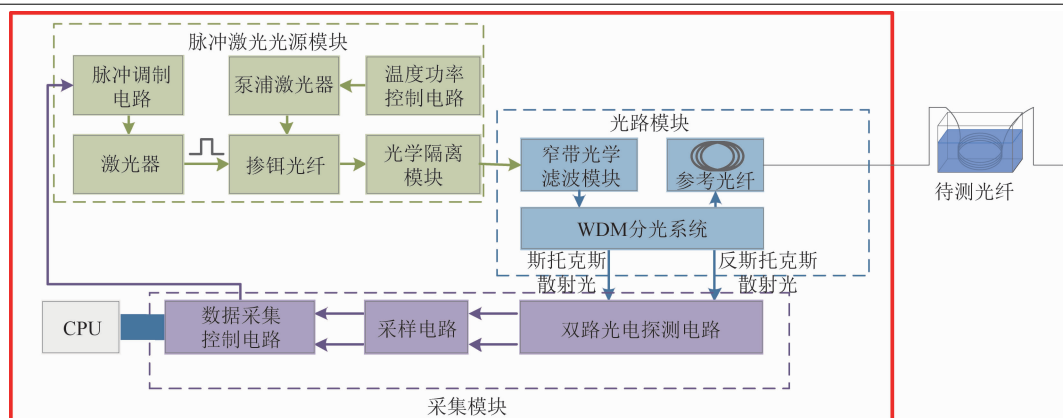


图2 分布式光纤测温系统的原理框图

采集模块通过光电探测电路把反斯托克斯和斯托克斯散射光转为电信号。利用采样电路对电信号进行采集，并对采集数据进行累加平均处理。完成累加后，数据被传输到中央处理器(Central Processing Unit, CPU)进行最终的温度解调。

4 试验

试验将两盘长度为 2.5 km 的光纤组成待测光纤。可以将某段待测光纤放置在恒温水槽中，并调节水槽温度来验证系统的温度精度和空间分辨率。实验现场如图 3 所示。



图3 实验现场

4.1 损耗补偿

将 5 km 长的待测光纤放在室温环境下，测得的实验数据如图 4 所示。

从实验数据中可以看出，反斯托克斯与斯托克斯散射光的比值曲线随着距离的增大而下降，其原因在于比值曲线含有损耗信息，需要进行损耗补偿。

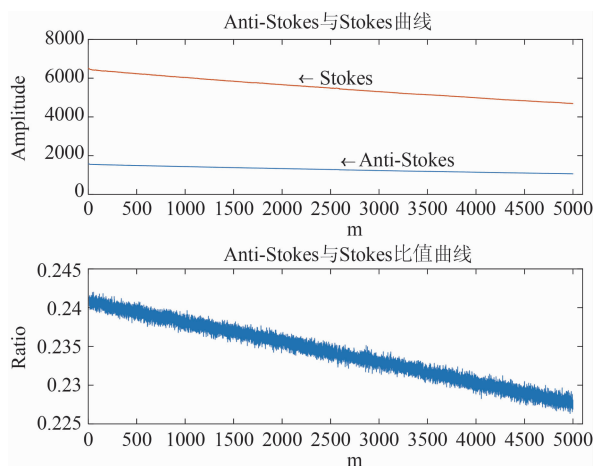


图4 室温下的测试数据曲线

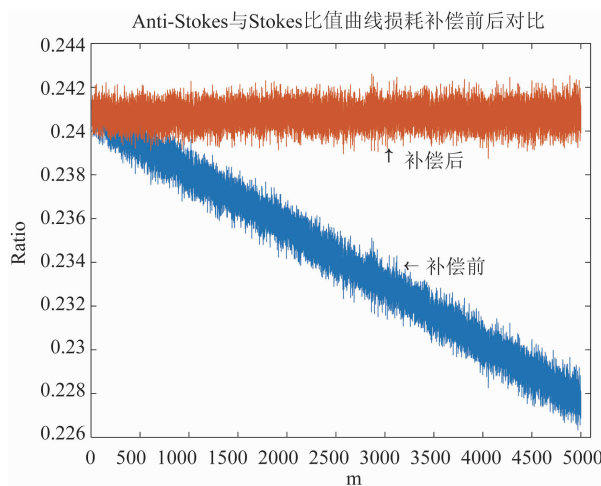


图5 比值曲线补偿前后对比图

对取对数后的比值曲线进行多项式拟合，得到拟合函数：

$$F(L) = -5.4306 \times 10^{-10} L^2 - 2.229 \times 10^{-5} L - 1.4236 \quad (13)$$

去除常数项，得到

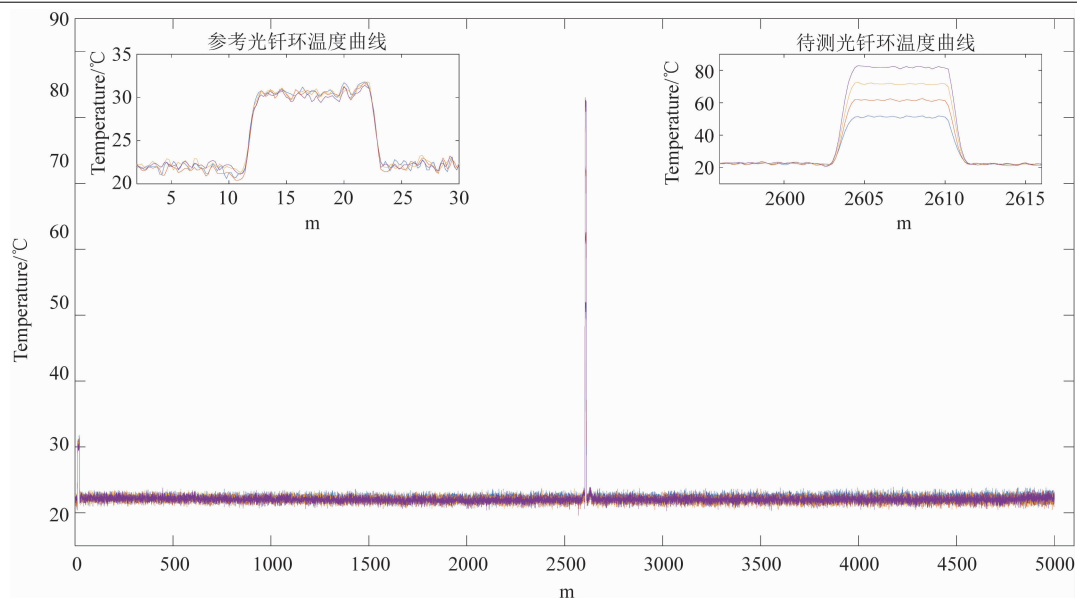


图 6 50℃、60℃、70℃和 80℃环境下的温度解调曲线

表 1 待测光纤环波包温度数据

恒温水槽温度	待测光纤环波包温度最小值	待测光纤环波包温度最大值	温度偏差
50℃	49.8℃	50.7℃	-0.2~0.7℃
60℃	59℃	60.5℃	-1~0.5℃
70℃	69.1℃	70.8℃	-0.9~0.8℃
80℃	79.4℃	81℃	-0.6~1℃

$$f(L)=5.4306 \times 10^{-10} L^2 + 2.229 \times 10^{-5} L \quad (14)$$

利用式(11)得到损耗补偿后的比值曲线,如图 5 所示。由于试验中将光纤放在室温环境下,反斯托克斯与斯托克斯散射光的比值曲线应该大致相同,不受光纤距离的影响。从图 5 中可以看出,损耗补偿前由于受到光纤损耗的影响,比值随着距离的增大而下降;损耗补偿后比值基本上不受距离影响,达到了补偿效果。

4.2 试验分析

把参考环放在 30℃ 的恒温环境下,并把待测光纤环的 2602~2612 m 段置于恒温水槽中。分别将恒温水槽温度调节为 50℃、60℃、70℃和 80℃,待温度稳定后进行测试。利用室温环境下得到的 $f(L)$ 进行温度补偿,经过式(12)解调得到的温度曲线如图 6 所示。

表 1 列出了所提取的待测光纤环波包温度数据。可以看出,系统测温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。提取的待测光纤环波包上升沿数据如图 7 所示。结果表明,波包上升沿是 2602.4~2604.4 m,

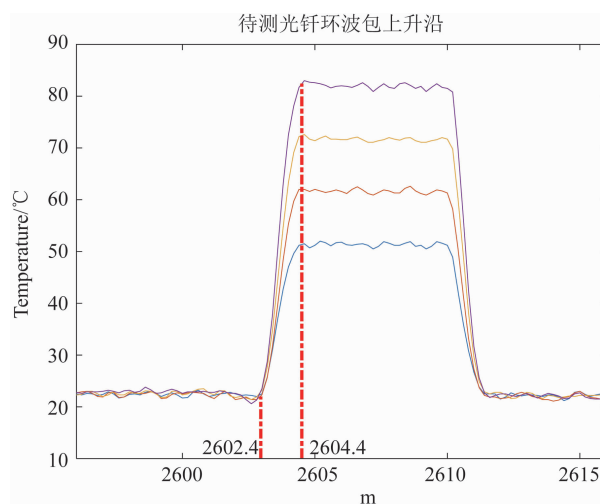


图 7 待测光纤环波包上升沿

因此系统的空间分辨率为 2 m,可以满足一般性的生产应用需求。

5 结束语

本文介绍了分布式光纤测温原理,并提出了一种分布式光纤测温系统设计方案。利用反斯托克斯和斯托克斯散射光双路信号解调温

度, 然后通过补偿光纤损耗消除了其对测试温度的影响, 从而提高了长距离光纤测温的准确性。试验结果表明, 系统指标能够满足一般性的生产应用需求, 在消防安全领域有较大应用意义。但是对于高精度测温需求来说, 系统测温精度和空间分辨率还有一定的进步空间, 需要进一步改进。

参考文献

- [1] 覃平俊. 城市规划与电力规划的关系及规划方法 [J]. *中国高新科技*, 2018, **32**(20): 11-13.
- [2] 付兴虎, 谢海洋, 杨传庆, 等. 基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性 [J]. *物理学报*, 2016, **65**(2): 024211.
- [3] 黄松. 拉曼分布式光纤温度传感器及其空间分辨率研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [4] Hwang D, Yoon D J, Kwon I B, et al. Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 9747-9754.
- [5] Cangialosi C, Ouerdane Y, Girard S, et al. Development of a temperature distributed monitoring system based on Raman scattering in harsh environment [J]. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2014, **61**(6): 3315-3322.