

文章编号: 1001-3806(2016)05-0746-04

基于环绕式光纤的热风管温度解调技术

方 挺, 欧阳强强, 张敬棋, 刘剑琴, 胡兴柳, 王 彦

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 马鞍山 243032)

摘要: 为了克服分布式光纤及其温度传感技术应用于高炉热风管中所存在的距离漂移率高、光纤互换性差等缺陷, 采用了双端单路解调法, 对光纤始末两端所测得的 Stokes 和 anti-Stokes 光强度比做算术平均处理, 来抵消光纤衰减项 Z_c 。双端单路解调法的距离漂移率 $K=0.011$, 更换光纤产生的最大 Raman 比偏差为 0.015。结果表明, 该解调法的距离漂移率低, 当要求更换其它光纤时, 光纤衰减系数不需要重新标定, 完全能够实现沿光纤路径温度场信息的有效测量。

关键词: 光纤光学; 分布式光纤; 双端单路解调; 高炉热风管; 温度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.027

Temperature demodulation of hot air tube based on wrap-around optical fiber

FANG Ting, OUYANG Qiangqiang, ZHANG Jingqi, LIU Jianqin, HU Xingliu, WANG Yan

(College of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: In order to overcome the following defects of high distance drift rate and poor optical fiber interchangeability when the distributed optical fiber and temperature sensing technology were used in blast furnace hot air tube, two terminal and single channel demodulation method (TTSCDM) was proposed. The decay term Z_c was offset after arithmetic average operation for Stokes and anti-Stokes light intensity ratio from both directions. The distance drift rate K of TTSCDM was 0.011 and the maximum Raman ratio deviation of replacing fiber was 0.015. Experimental results show that this demodulation method has low distance drift rate. When optical fiber needs to be replaced, the decay coefficient does not need to recalibrate and the effective measurement of temperature field along the optical path can be implemented.

Key words: fiber optics; distributed optical fiber; two terminal and single channel demodulation; blast furnace hot air tube; temperature

引 言

热风管是热风炉向高炉输送热风的管道设备, 热风管受管内高温、高速的气流冲刷其耐火砌体的影响, 易导致管道烧红和漏风, 甚至发生热风管烧穿等事故^[1-4]。类似问题普遍存在于国内各炼铁厂, 通过热风管表面温度的长期在线监测来指导热风管例行作业(冷却、换管、喷涂加厚), 即可避免上述问题的发生。

目前热风管表面温度主要通过红外热成像仪来获取, 但红外热成像仪成本高、无法长期在线测量, 且其成像效果易受测量距离、大气状况等因数的干扰。而具有耐高温、耐腐蚀、不存在电磁干扰等特点的分布式光纤可对热风管表面温度进行接触式测量, 减小了外

界因数的影响^[5-6]。热风管现场环境恶劣, 热风管表面温度的测量难题可通过分布式光纤解决。

在光纤传输中的光由沿原方向传播的光和偏离原方向传播的光组成, 后者被称为散射光, 其中 Raman 散射光对温度变化最为敏感, 所以可从 Raman 光中解调沿光纤分布的温度场^[7-8]。目前分布式光纤温度解调技术主要有: 单路解调法、带修正项的单路解调法、回路解调法。但以上几种技术分别存在以下缺陷: (1) 单路解调距离漂移率大, 测量稳定性差; (2) 带修正项的单路解调光纤互换性差; (3) 回路解调需要消耗双倍光纤, 数据脉动大、成本高。

针对现有解调法存在的缺陷, 作者提出双端单路解调法(two terminal and single channel demodulation method, TTSCDM), 即测试回路只需要用一路光缆把光纤的始端和末端引至光纤入射端, 通过正反两次测量取平均来减小衰减。施工时将光纤围绕热风管(约为 $\varnothing 3\text{m}$)紧密缠绕数圈(约 200 匝~400 匝)。环绕式光纤的首尾两端由于距离较近, 与光纤传感器的接口连接方便, 基于环绕式光纤的热风管温度检测特点正好符合

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309001; 61201109)

作者简介: 方 挺(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为图像处理与模式识别。

E-mail: flyting_69@163.com

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-07-01

TTSCDM 的特征。

1 数学模型

Stokes 光和 anti-Stokes 光构成了 Raman 散射光^[8],通过对这两种光进行比值处理来解调温度信号,从而减小在光纤弯曲或接头处的测量误差。现有的几种解调技术及 TTSCDM 技术的光路如图 1 所示。图 1a~图 1c 分别为单路、回路、TTSCDM 的光路图。其中单路解调采用单根光缆,从光纤的一端输入光脉冲,利用光脉冲在光纤传播过程中的散射信号来测量沿光纤分布的温度场;带修正项的单路解调法是在单路解调法的基础上加入修正因子;回路解调采用末端合并的两根光缆,光从光缆始端的两个接头进入,并进行两次散射信号的测量,将后半段曲线与前半段曲线作算术平均处理^[9]。

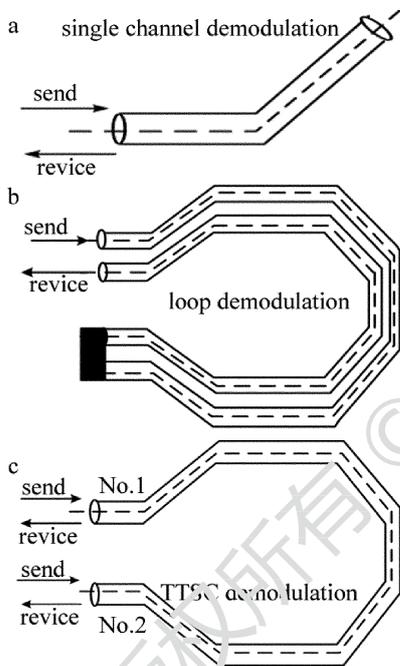


Fig. 1 Light path of different demodulation methods

测量点温度 T 与 Raman 强度比 r 的关系可简化为:

$$T = mr + a \tag{1}$$

式中, m 和 a 为实验拟合系数。

光纤温度传感器采用光时域反射(optical time domain reflection, OTDR)法^[10-15],其原理图见图 2。以光脉冲从光纤射入时为起始时刻,若在 t 时刻发射端接收到散射回波信号,则表示该信号距发射端的距离为

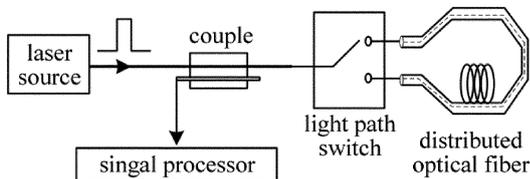


Fig. 2 Principle diagram of the distributed optical fiber sensor

$L = vt/2$,其中 v 为光速。设光探测脉冲的宽度为 ΔT ,光纤上各探测点与起始点的距离可表示为:

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T = 0.5[v\Delta T \ 2v\Delta T \ \dots \ nv\Delta T]^T \tag{2}$$

由(1)式可得光纤上各探测点的温度场为:

$$\Gamma = [mr(v\Delta T) \ mr(2v\Delta T) \ \dots \ mr(nv\Delta T)]^T + aI \tag{3}$$

式中, $nv\Delta T$ 为回波信号时间差, $r(nv\Delta T)$ 为 $nv\Delta T$ 时间差时的 anti-Stokes 光和 Stokes 光强度比, I 为单位列向量,(3)式是在理想状态下通过单路解调法得到的温度场向量,未考虑 Raman 光沿光纤传输过程中存在的衰减。如果将分布式光纤放置于恒定温度环境下,实际得到的沿光纤路径的 Raman 比数据如图 3 所示,但 Raman 比与距离基本成线性关系。

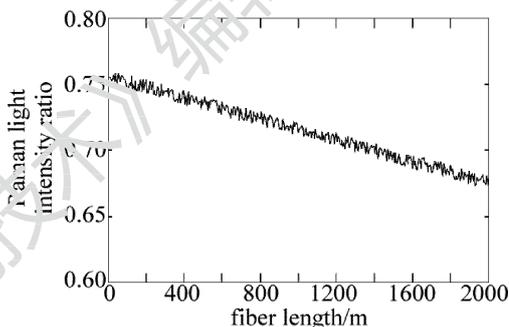


Fig. 3 Decay curve of single demodulation

因此,可在(3)式的基础上引入距离修正向量:

$$Z_c = [\varepsilon x_1 \ \varepsilon x_2 \ \dots \ \varepsilon x_n]^T, (3) \text{式可写成:}$$

$$\Gamma_c = m \cdot r(X) + a \cdot I + Z_c \tag{4}$$

(4)式就是带修正项的单路解调法得到的温度向量, $r(X) = [r(v\Delta T) \ r(2v\Delta T) \ \dots \ r(nv\Delta T)]$ 为光纤路径各探测点 Raman 强度比向量, ε 为光纤长度修正系数,该系数可通过实验获得,不同的光纤,修正系数不一样,用户更换光纤后必须重新定标 Z_c 。

为了克服这个缺点,引入双端单路解调法具体操作为:控制分布式光纤传感器中的光路选择开关,使入射光从分布式光纤的始端进入,末端射出(正方向),再从分布式光纤的末端进入,始端射出(反方向),在正反两个方向上得到的温度向量中 Z_c 的符号正好相反,作算术平均处理后, Z_c 被抵消得:

$$\Gamma_s = m \cdot r(X) + a \cdot I \tag{5}$$

2 实验测试

为了方便对 4 种解调法的性能进行测试,引入一个新的参量——距离漂移率 K ,其概念为:分布式光纤放置于恒定温度环境下,传感器输出的 Raman 比数据随光纤距离的变化率。计算公式可简化为 $K = 1000 \times r/L$,其中, L 为光纤长度(可取 1000m), r 为传感器在

L 长度内的 Raman 强度比。

2.1 实验器材

实验器材清单如表 1 所示,其中 FET8606L 为线性光纤感温探测器,可应用于火灾报警、线缆温度检测、热风管温度测量等领域,FET8606L 内置光路开关,具备 8 个光纤接口,方便对 4 种解调法进行实验测试。

Table 1 List of experiment equipment

equipment	quantity	model	relevant parameter
constant temperature trough	1	Fluke7008	stability: $\pm 0.0007^{\circ}\text{C}$
distributed optical fiber A	2	GYTA-4B1	length: 1 km
distributed optical fiber B	2	GYBA-4B1	length: 1 km
optical fiber sensor	1	FET8606L	spatial resolution: 2m

2.2 实验过程及数据记录

将 A、B 两种材质的光纤放入恒温槽内,调节恒温槽至 45°C ,参考图 2 将光纤接入光纤传感器,待恒温槽温度恒定后,采用 4 种解调法,每隔 90m 光纤长度,将 Raman 强度比 r 数据记录于表 2 中,并在直角坐标系下绘制 $r-L$ 曲线。

Table 2 Measuring data of different demodulation methods

length/m	single channel	single channel with correction term		cycle	TTSCDM	
	fiber A	fiber A	fiber B		fiber A	fiber A
60	0.748	0.710	0.727	0.817	0.751	0.765
150	0.727	0.710	0.702	0.834	0.753	0.760
240	0.705	0.704	0.677	0.827	0.752	0.759
330	0.686	0.697	0.645	0.824	0.749	0.757
420	0.668	0.686	0.625	0.809	0.750	0.756
510	0.640	0.674	0.599	0.801	0.748	0.759
600	0.626	0.667	0.573	0.800	0.744	0.755
690	0.600	0.656	0.545	0.800	0.743	0.759
780	0.584	0.653	0.527	0.808	0.744	0.753
770	0.563	0.641	0.502	0.825	0.741	0.752
960	0.549	0.640	0.478	0.809	0.742	0.757

2.3 实验分析

(1) 正常情况下, $r-L$ 曲线呈水平状。由图 4 可知:单路解调法得到的曲线出现了倾斜($K \approx 0.22$),是因为 Raman 信号在沿光纤传输的过程中存在衰减,采用带修正项的单路解调法倾斜程度降低很多, $K \approx 0.094$ 。从图 5a 可知,更换为 B 光纤后,倾斜程度回升, $K \approx 0.241$,这是因为不同型号的光纤,其材质及结构的不同,衰减系数也不一样。所以单路解调法和带修正项的单路解调法,距离漂移率高,光纤互换性差。

(2) 采用回路解调效果非常良好($K < 0.012$),更换新的光纤也不需要再对衰减系数重新标定。但需要消耗 2 倍的光纤,长度过长会使光纤尾端波形发生畸变,所测得 Raman 比值数据脉动大。

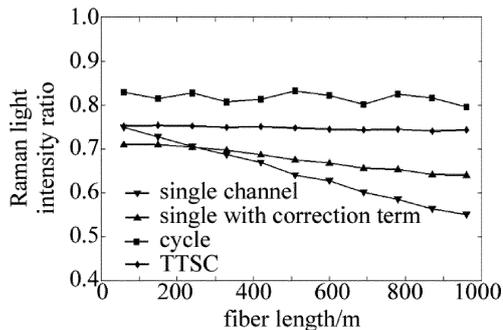


Fig. 4 $r-L$ curve of different demodulation methods

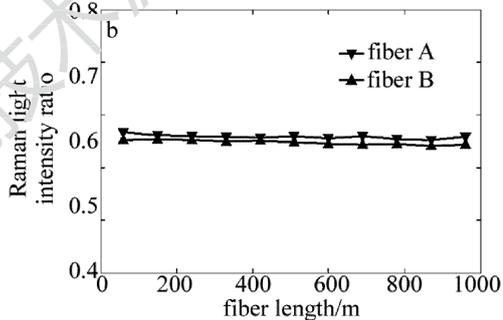
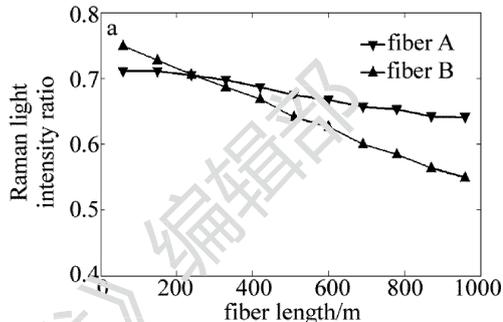


Fig. 5 Fiber interchangeability experiments of different demodulation methods

a— $r-L$ curve in single channel with correction term demodulation
b— $r-L$ curve in TTSC demodulation

(3) 分析图 5b 可知,双端单路解调法得到的曲线基本上呈水平状态, $K \approx 0.011$,与回路解调法相比,曲线脉动小,更换同材质光纤后,前后所测得的 $r-L$ 曲线基本重合,最大偏差为 0.015。

3 小结

双端单路解调法具有测量准确、光纤互换性好、且只需单路光纤等优点,是对现有 3 种光纤温度解调法优点的综合。在高炉热风管现场,热风管光与光纤紧密环绕在一起,其测量值最接近热风管的真实温度,且采用环绕式光纤的 TTSC 解调法正好适用于热风管温度检测。

参考文献

[1] CHEN C, CHENG S, GUO X. Hazard control of NO_x in hot stove [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21 (3):306-311.
[2] ZHANG F M, QIAN S C, YIN R Y. Blast furnace enlargement and

- optimization of manufacture process structure of steel plant[J]. *Iron and Steel*, 2012, 47(7): 1-9 (in Chinese) .
- [3] ZHANG J S, WANG Y Q, CHEN H W, *et al.* Accident disposal of the bottom burning of hot blast stove for tong steel 7# blast furnace [J]. *Ironmaking*, 2012, 31(6): 56-58 (in Chinese) .
- [4] ZHANG F, MAO Q, MEI C, *et al.* Dome combustion hot blast stove for huge blast furnace[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2012, 19(9): 1-7.
- [5] LU Y, QIN Z, LU P, *et al.* Distributed strain and temperature measurement by Brillouin beat spectrum[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(11): 1050-1053.
- [6] ZHOU Z X. Design and optimization of distributed optical fiber temperature sensor[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009: 11-27 (in Chinese) .
- [7] SU H, HU J, YANG M. Dam seepage monitoring based on distributed optical fiber temperature system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 15(1): 9-13.
- [8] ZHAO Y. Optical fiber sensing principle and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 168-174 (in Chinese) .
- [9] ZOU J. Study on key technology of distributed optical fiber temperature sensor system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005: 59-65 (in Chinese) .
- [10] AMARAL G C, HERRERA L E Y, VITORETI D, *et al.* WDM-PON monitoring with tunable photon counting OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(13): 1279-1282.
- [11] BRAVO M, FERNANDEZ-VALLEJO M, LOPEZ-AMO M. Hybrid OTDR-fiber laser system for remote sensor multiplexing[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7653: 174-178.
- [12] KIM Y, SUNG J, HONG S R, *et al.* Analyzing OTDR measurement data using the Kalman filter[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(5): 947-951.
- [13] HUI X, ZHOU J, XU C, *et al.* A real-time detection and self-control phase-sensitive OTDR distributed sensor system [C]//IEEE 2013 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). New York, USA: IEEE, 2013: 1-3.
- [14] SILVA S, PASSOS D J, MARQUES M B, *et al.* Fiber cavity ring-down for strain sensing using an OTDR[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 57(6): 1442-1444.
- [15] URBAN P J, VALL-LUQUERA G, MEDEIROS E, *et al.* Fiber plant manager: an OTDR and OTM-based PON monitoring system [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(2): S9-S15.