

分布式光纤测温系统温度检测与处理算法研究^①

左 婧^② 李忠虎^③ 闫俊红 王金明

(内蒙古科技大学信息工程学院 包头 014010)

摘 要 为提高分布式光纤测温系统的温度分辨率,本文研究了分布式光纤拉曼测温系统的信号处理方法。基于后向拉曼散射原理、光时域反射原理和 LabVIEW 软件平台,搭建了分布式光纤测温及信号处理系统。在分布式光纤拉曼测温信号处理方法中,目前常用的累加平均算法受累加次数的制约,无法对信噪比进行进一步提升,因此采用小波变换算法针对已建系统进行信号处理。对小波算法进行优化设计,提升了温度分辨率这一主要性能指标。实验结果验证了系统的合理性和小波算法的有效性,为该系统整体性能的进一步提升奠定了基础。

关键词 分布式光纤测温,小波变换,信号处理,温度分辨率

0 引 言

分布式光纤拉曼测温系统是一种区别于点式测温的连续型测温系统,该系统根据光纤中的后向拉曼散射原理,利用光时域反射原理进行空间定位,利用光的温度效应测取温度,将光纤作为光信号采集与传输的工具,来检测出光纤沿线环境中的温度信息。由于此测温系统的耐腐蚀性、防火防爆性以及抗磁扰性能比较好,故受到了业界的广泛关注,并已应用于多个领域。

国外针对分布式光纤测温的研究较早,相关的技术也较为先进,近年来,国内在这方面的研究工作也在不断地跟进和深入。1983 年,Dakin^[1]成功实现了采用拉曼散射原理的分布式光纤测温实验。1991 年,黄尚廉等人^[2]研制成功分布式光纤温度传感系统,该系统实现了 1 km 的测量,温度分辨率 3 ℃,空间分辨率 7 m。Suh 等人^[3]于 2007 年提出了双光源自相关方法,主激光和辅助激光的波长差是拉曼位移波长的 2 倍,并解决了因反斯托克斯光(anti-stokes)和斯托克斯光(stokes)波长差导致的温度解调曲线扭曲问题。Park

等人^[4]于 2008 年提出了脉冲编码调制光源技术。张在宣等人^[5]于 2009 年提出一种新的自校正系统,实现了色散和波长损耗差异自校正,同时也解决了光源的不稳定自校正。王宗良^[6]在 2015 年提出一种改进的温度解调算法,并通过消除瑞利噪声来提高传感系统的测温精度。在工程应用中,散射光受温度的影响,这样就可通过检测光强来解调出被测温度。本文以供热管道为对象,采用基于拉曼散射的分布式光纤测温技术及双通道温度解调原理,搭建了分布式光纤拉曼测温系统,并进行了相关的实验研究工作。针对已建测温系统,通过改变系统不同的信号处理方法,来研究相关算法对系统温度测量分辨率的影响,以实现进一步提高系统测温精度的目的。

1 系统结构及原理

分布式光纤测温系统原理框图如图 1 所示,系统主要由光纤、光路模块和信号检测处理模块 3 个部分组成。光源和波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM)组成了光路模块,其余部分为信号检测处理模块。

① 国家自然科学基金(61362023)资助项目。
② 女,1989 年生,硕士生;研究方向:传感信息提取与处理;E-mail: zuojing19890918@126.com
③ 通信作者,E-mail: lizhonghu@imust.edu.cn
(收稿日期:2018-03-26)

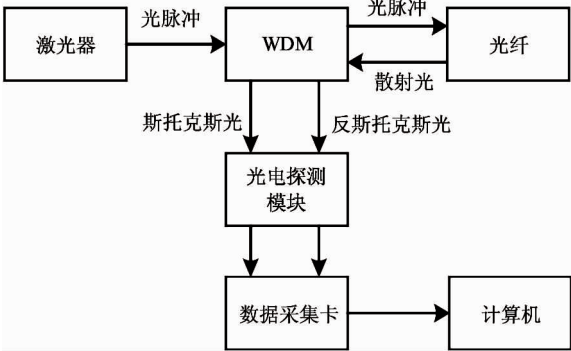


图 1 测温系统原理框图

激光器发出大功率波长合适且频率可调的窄脉冲,波分复用器将光脉冲耦合到光纤中,光脉冲在光纤中与光纤相互作用发生拉曼散射,散射回来斯托克斯光(stokes)和反斯托克斯光(anti-stokes),这 2 束光被波分复用器分离。计算机控制脉冲发生器发出具有合适重复频率的脉冲信号,此脉冲信号可以调制脉冲激光器,使脉冲激光器产生一系列需要的光脉冲。激光器同时可以向板卡提供同步采集脉冲信号,进入数据采集状态。在系统运行的过程中,光纤既传输光信号,又测量光纤沿线的温度。2 路光信号分离之后,光电探测模块将分离的光信号进行光电转换,将光信号转换成电信号并进行放大,此输出信号被数据采集卡以恒定的采样率采集后,送入计算机进行数据分析处理、解调温度信息和空间定位信息,并在上位机界面进行显示。

2 温度检测与处理算法研究

2.1 信号处理理论分析

在分布式光纤拉曼温度传感系统运行过程中,产生出的 2 种后向散射光信号都异常微弱,尤其是反斯托克斯光,随之反射回来的光信号还包含有噪声信号,微弱的温度信号被噪声信号完全湮没^[6,7]。在传统的微弱信号检测方法中,除了滤波、放大和调制解调等方法外,还可采用取样平均、数字平均、相关检测和自适应噪声抵消等方法,这些方法都可以去除噪声、采集有用信号,进而提高信噪比,达到期望的效果。

在分布式拉曼光纤温度传感系统中,自发拉曼散射信号具有以下特点:(1)信噪比低,噪声强;(2)噪声中的主要成分是白噪声;(3)自发拉曼散射信号强度随着距离的增加发生指数式衰减。根据自发拉曼散射信号的上述特点,有必要选择合适的去噪算法来提高系统的信噪比,以提高计算效率。近年来,越来越多的去噪算法被应用在分布式拉曼光纤温度传感系统中,如累加平均去噪算法、小波变换去噪算法和经验模态分解去噪算法等,都取得了较好的抑制白噪声的效果。信号处理的质量提升效果以去噪后信号与去噪前信号的信噪比(signal noise ratio, SNR)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)等参数来体现^[8]。累加平均、小波变换和经验模态分解 3 种去噪算法的去噪效果对比见表 1。

表 1 3 种方法的去噪效果比较

	原始信号	累加平均	小波变换	经验模态分解
SNR(dB)	17.49	40.13	45.72	46.04
RMSE(℃)	2.81	0.61	0.58	0.58

根据对比结果发现,累加平均算法简便且用时较长;小波变换算法已经发展相对成熟,实用性强,但小波基选择不易;而经验模态分解算法虽去噪简单,但操作时易失真。综合实用性和去噪效果,本文选用了累加平均算法和小波变换算法。

2.2 小波算法设计

在利用小波变换去噪的过程中,先对采集到的含有噪声的信号选择合适的小波进行离散小波变换,以此来获得各尺度上的小波系数,得到的小波系数需要设定适合的阈值准则并进行处理。经过处理的小波系数再根据得到的小波系数进行小波函数逆变换,这就是最后一步小波重构。

去噪过程中的第一步就是对包含噪声的信号进行离散小波变换。在这个分解的过程中,小波基的种类有很多,不同的原始信号需要选择不同的小波基,不同小波基针对不同种类去噪的需求。小波基的选择将会对分解后小波系数的分布产生很大影响,而小波系数的分布又将决定去噪的效果的好坏,小波基选取不当甚至可能导致信号失真。4 种小波

函数的主要性质见表 2。通过对比,本文选取的小波基为 db2 小波。

表 2 几种小波函数的主要性质

小波函数	Haar	Daubechies	Symlets	Morlet
紧支撑性	有	有	有	无
支撑长度	1	$2N-1$	$2N-1$	有限
正交性	有	有	有	无
双正交性	有	有	有	无
对称性	对称	近似	近似	对称
消失矩阵数	1	N	N	无

在选取了合适的小波基之后,经过几层分解,下一步需要选取一个理想的小波系数阈值。阈值的选取在变换的过程中起到了决定性的作用,将影响最后得到去噪效果的好坏。选取阈值后,将所有大于阈值的小波系数保留,这一部分保留的数值还可用阈值对其进行缩减后再取值,剩余所有小于阈值的小波系数全部置为 0。目前阈值的处理方法有软阈值和硬阈值 2 种,两者的区别在于对保留的小波系数的处理方法不同。这里选用的是软阈值。软阈值化处理就是用软阈值函数处理小波系数,绝对值小于阈值的小波系数值全部置为 0,对绝对值大于阈值的小波系数值并不完全保留,而是用阈值函数来做收缩处理,缩减重置了小波系数,使小波系数连续^[9]。

由于小波变换方法的复杂性,为了使信号尽可能地保留真实的有效信息,同时保证有限的系统运算处理时间,本文先对原始信号进行 800 次累加后,再按上述分析对信号进行 db2 小波的三层变换。

3 光纤测温系统实验研究

3.1 累加平均法

通过对分布式光纤拉曼测温系统的噪声来源进行分析可知,系统的噪声主要为各元器件产生的随机噪声,其幅值和相位都是随机分布的,故可以将这些随机噪声看作白噪声。由于白噪声具有零均值的统计特性,所以可以通过多次累计平均的方法来有效降低白噪声。本系统光源采用的是脉冲光源,采

集到的信号为周期信号,可以通过累加平均的方法进行去噪处理。

假设待测信号为

$$s(t) = m(t) + n(t)$$
 (1)

式中, $m(t)$ 为需要提取的微弱信号, $n(t)$ 为强干扰噪声信号。该信号的信噪比为

$$SNR = m(t)/n(t)$$
 (2)

将连续采集到的 M 个周期性信号叠加在一起。对于信号 $m(t)$ 而言,经 M 次叠加后变为 $M \times m(t)$;而对于噪声信号 $n(t)$,叠加后的有效值变为 $\sqrt{M} \times n(t)$ 。所以,经过 M 次叠加后,信号的信噪比变为

$$SNR' = Mm(t)/\sqrt{M}n(t) = \sqrt{M}SNR$$
 (3)

从上式可以看出,在不同时间的信号进行 M 次累加平均后,信噪比提高了 $\sqrt{M}$ 倍。但它不能是无穷多次的累加平均,因为信噪比增加了开方次数,当累加平均数 M 增大到一定程度时,信噪比改善效果不明显;随着 M 的增大,系统需要处理的数据将大大增加,这将导致系统响应时间的增加,而响应时间是系统的重要指标之一。所以选择合适的累加平均次数,既可以使系统信噪比有明显的提高,同时也不会使系统的响应时间过长。

3.2 小波变换法

小波变换法是以傅里叶变换为基础的方法。先将信号分解成不同的频率分量,再结合信号的时域对信号进行分解。对收集到的后向散射信号进行小波变换后,确定变换域的阈值,既可以对信号中的白噪声进行抑制,又可以保留幅值较大的分解系数。含有噪声的一维信号模型可表示为

$$s(n) = f(n) + w(n) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$
 (4)

式中, $w(n)$ 为噪声信号, $f(n)$ 为待测信号,噪声信号 $w(n)$ 叠加在待测信号 $f(n)$ 上。

根据信号特性,如果待测信号是低频信号,并且每一个器件产生的噪声是随机噪声,分布在整个频域,可以按照以下步骤进行小波去噪^[6]。首先对小波进行分解,得到 3 级分解框图如图 2 所示。经过分解后,高频噪声信号被分解到 CD1、CD2、CD3 中,低频噪声和待测信号包含在 CA1、CA2、CA3 中,这样可将阈值电平以下的小波系数置 0。然后再将信

号进行小波重构,这样便可滤除信号中高频噪声。

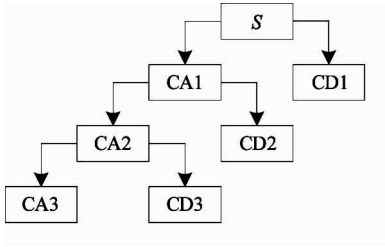


图 2 小波变换三级分解框图

正因为系统测温过程中后向的散射光信号过于微弱且又包含了大量噪声,系统的信噪比才会降低。比对各种处理方法之后发现,在众多提高信噪比的方法中,首选的是累加平均法。首先,累加平均算法是一种比较基础的方法,该方法最突出的优点就是简单可行,只需通过增加累加次数,信号信噪比就可得到大幅提升,但当累加次数达到一定数值时,信噪比的提升速度会明显放缓,这就是该方法的一大缺点,此时如果想通过继续增加累加次数来达到去噪的目的,哪怕是少量的增加累加次数,也会增加数倍的测量时间。为了克服这个问题,采用小波变换算法来进一步提高系统信噪比。

小波变换算法已被大家熟知,这种方法以傅里叶变换为基础,由于小波变换能够对光信号的任意区间进行分析,所以这个方法可以有效地去除噪声。在对信号实施变换后,通过对变换域中实施比较简单的阈值判定,信号中幅值较大的分解系数得到了保留,并可对白噪声进行最大限度的抑制。

采集回来的信号分为低频部分和高频部分,低频部分的信号比较平稳,属于有用信号,高频部分的信号被当作是噪声信号。信号去噪可分为以下 3 步^[9,10]。

(1)信号小波分解。先选定合适的小波基及分解层数,再用相应的层数对信号进行分解。

(2)高频系数的阈值量化。每层都有高频部分,对这些高频部分分解系数,确定最为恰当的阈值,然后处理这些系数。

(3)信号的小波重构。将有效处理完的顶层小波分解系数与阈值化后的高频系数采用逆运算进行信号重构。

确定信号处理算法之后,开始对系统进行调试,

第一步设置激光器,脉冲宽度设为 10 ns,重复频率设为 10 kHz,峰值功率设为 32 W。采集卡的采样率设为 30 M/s,配置物理通道,幅值范围设为 $\pm 5\text{V}$,触发源设为外部触发 0,触发行为设为边沿触发。输入采样频率,采样点数设为 300。开启激光器使其产生触发信号,该信号由采集卡的触发端口发出。用软件测量 APD 模块输出的 anti-stokes 和 stokes 光转换成的电信号,anti-stokes 信号和 stokes 信号测量结果分别如图 3 和图 4 所示,去噪后的 anti-stokes 和 stokes 信号分别如图 5 和图 6 所示。

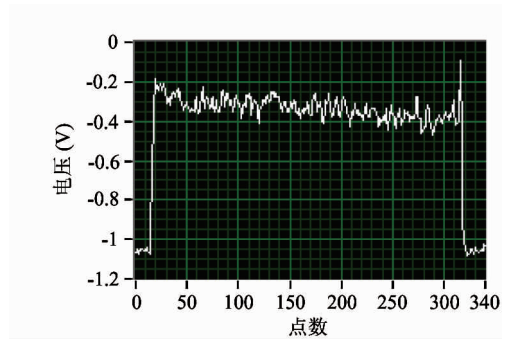


图 3 anti-stokes 原始信号

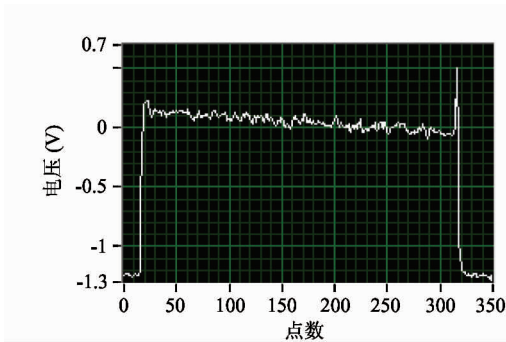


图 4 stokes 原始信号

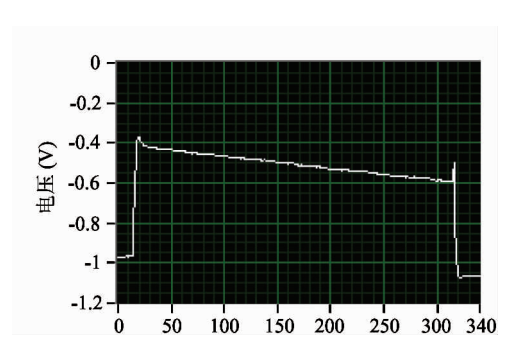


图 5 anti-stokes 去噪后曲线

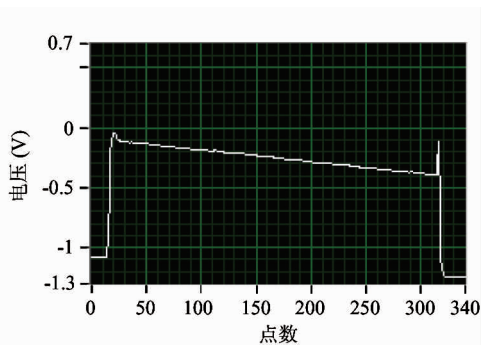


图6 stokes 去噪后曲线

从图3和图4中可以看出, anti-stokes 信号和 stokes 信号的衰减趋势符合光在光纤中呈现出的指数衰减现象, 噪声干扰较大, 光纤末端有一个凸起, 这是因为尾端产生了镜面反射, 反射光强较大, 在实际系统测试过程中要加以去除。

图5和图6显示, 采用平均累加结合小波变换的算法, 去噪效果明显, 而且处理时间较短, 使得拉曼信号中含有的温度信息能够得到很好保留。对比去噪后的信号与去噪前的信号可知, 去噪后的信号的噪声水平得到充分抑制, 有效信号得以保留。

4 温度分辨率测试分析

4.1 温度分辨率

分辨率是测量系统(仪器)能够检测读取并如实指示被测特性最小测量单位的能力。衡量分布式光纤温度传感系统的性能指标当中, 温度分辨率是其中的一项关键性指标。它反映的是系统最小能分辨的温度范围。温度分辨率可以理解为噪声所对应的光电流变化在系统中所对应的温度变化量, 这里噪声可认为是总噪声电流的均方根值。这项指标与系统的信噪比直接相关, 也可以理解为信噪比为1时所对应的温度变化量, 它用来描述传感器系统实现准确测量的程度, 而通过数据处理能显示出温度最小的变化^[12]。

系统的温度分辨率可以用下式表示:

$$\Delta T = \frac{kT^2}{hc\Delta f} \cdot \frac{1}{SNR_{as}} \quad (5)$$

式中, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 是玻尔兹曼常数; 温度 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ 是普朗克常量; $c = 2$

$\times 10^8 \text{ m/s}$ 是光在光纤中的传播速度; $hc\Delta f$ 是能级能量差, $\Delta f = 4.4 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$; SNR_{as} 是 anti-stokes 的信噪比。

由式(5)可知, 温度分辨率随着信噪比的提高而提高, 如果想要提高系统的温度分辨率, 首先一定要提高测量系统的信噪比。系统的信噪比提高了, 感知温度信号微小变化的能力才可以提升。在实际系统中, 这一规律更为明显, 信号的强弱变化和噪声的强弱变化都影响信噪比的大小, 而温度分辨率是由系统灵敏度和信噪比共同决定的。

这里将设计实验并对系统分辨率进行测量与计算。

4.2 实验数据处理与分析

在光纤 290 m 处, 取 40 m 长光纤环。放入 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 热水中。

结合温度标准值, 根据下式计算标准偏差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

式中, σ 为标准偏差, X_n 为每次测量的温度值, $\bar{X}$ 为样本均值, n 为测量次数。

当系统采用平均累加的信号处理方法时, 记录测量数据如下: $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $37.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $37.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $42.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $42 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $42.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $42.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $42.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

将以上记录的数据带入式(6)中, 得到的分辨率为

$$\delta = \frac{6\sigma}{10} = 1.42 \quad (7)$$

计算结果表明, 分辨率 δ 为 1.42, 该值低于 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 即当测温区域范围内有 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内的温度变化时, 系统能够分辨。

采用累加平均法与小波变换法相结合时, 记录测量数据如下: $38.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $41.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $41.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $41.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $41.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $41.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

将以上记录的数据带入式(6)中, 得到的分辨率为

$$\delta = \frac{6\sigma}{10} = 1.02 \quad (8)$$

计算结果表明, 分辨率 δ 为 1.02, 该值低于 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 即当测温区域范围内有 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内的温度变化

时,系统能够分辨。

根据以上计算结果可以看出,无论累加平均算法还是小波变换法,将它们运用到分布式光纤拉曼测温系统中都可达到明显的去噪效果,2 种方法均可行。但对比实验结果,累加平均法与小波变换法相结合的算法对白噪声的抑制效果更为明显,利用该方法搭建的系统,系统温度分辨率可以达到更高,相对于单纯利用累加平均的算法,累加平均法与小波变换法结合的方法提高了该系统的性能指标。

5 结 论

本文设计并搭建了分布式光纤传感测温及信号处理系统,在进行实验的基础上,对小波去噪算法进行了分析,通过对比平均累加算法及进一步结合累加平均法的小波变换法这 2 种信号处理方法的实验数据得到实验结果,计算出不同的温度分辨率。实验结果表明,采用小波去噪法与累加平均法结合后的信号处理方法去噪效果明显,方法可行,该算法成功将本系统的温度分辨率提高了 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过方法的选取和改进,系统信号处理能力得到了提高,系统的温度分辨率也有了明显提升。该系统总体上满足了设计要求,为进一步提高系统性能和稳定性奠定了基础。

参考文献

- [1] Dakin J P, Pratt D J. Distributed optical fiber sensor[J]. *Proceedings of Spie*, 1993, 1797: 76-108
- [2] 黄尚廉, 梁大巍, 刘龚. 分布式光纤温度传感器系统的研究[J]. *仪器仪表学报*, 1991(4): 359-364
- [3] Suh K, Lee C. Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed temperature sensor [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1845-1847
- [4] Park J, Bolognini G, Lee D, et al. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1879-1881
- [5] 张在宣, 金尚忠, 王剑锋, 等. 分布式拉曼光子温度传感器研究进展[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2749-2761
- [6] 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
- [7] Kulchin Y N, Zakasovskaya E V. Optimizing algebraic and neural methods for information processing in distributed fiber-optical measuring systems[J]. *Optical Memory and Neural Network*, 2010, 19(3): 237-247
- [8] Chen S L, Hu X Y, Peng S L, et al. Denoising of hyperspectral imagery by cubic smoothing spline in the wavelet domain[J]. *High Technology Letters*, 2014, 20(1): 54-62
- [9] 喻丹, 刘亚, 杨士强. 基于小波的图象数据管理系统[J]. *高技术通讯*, 1999, 9(5): 3-8
- [10] Wang W, Chang J, Lv G, et al. Wavelength dispersion analysis on fiber-optic Raman distributed temperature sensor system[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(3): 256-261
- [11] Alnashash H A, Paul J S. Wavelet entropy method for EEG analysis: application to global brain injury [J]. *IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*, 2003, 3(22): 348-351
- [12] 史晓峰, 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

Algorithm research of signal processing in distributed optical fiber temperature measurement system

Zuo Jing, Li Zhonghu, Yan Junhong, Wang Jinming

(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract

This study focuses on the signal processing method of distributed fiber Raman temperature measurement system to improve temperature resolution. Based on the backward Raman scattering signal, optical time domain reflection technology and LabVIEW, a distributed fiber-optic sensor temperature measurement and signal processing system is designed. In the distributed fiber Raman temperature measurement system, the cumulative average algorithm is limited by the times of accumulations, and signal noise ratio (SNR) cannot be further improved. Therefore, the established system uses the wavelet transform algorithm to process the signal. This paper picks up a specific wavelet denoising algorithm, to prove the improvement of temperature resolution. The experiment results have verified that the design is reasonable and the wavelet algorithm is effective. This algorithm lays the foundation for further stability improvement of the temperature measurement system.

Key words: optical fiber distributed temperature measurement, wavelet denoising, signal processing, temperature resolution