

基于分布式光纤温度传感器的高压电力电缆温度在线监测系统

周 芸¹, 杨奖利²

(1. 西安工业大学电信学院, 陕西 西安 710032; 2. 西安西开高压电气股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 根据分布式光纤温度传感器被测信号的特殊性,在常规微弱信号检测的基础上,提出了一种专门的、针对分布式光纤温度传感器系统的微弱信号检测方案,采用软、硬件结合的方案,能够在强噪声下有效地提取微弱信号,以求得尽可能大的信号噪声比,而所需的器件与设备极为通用,相对成本较低,检测整个过程完成的时间也较短,具有较高的实用性。

关键词: 分布式光纤温度传感器; Stokes 和 Anti-Stokes 后向散射; 信号处理; 数据采集

中图分类号: TM835.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0074-03

Online Temperature Monitoring System for High Voltage Power Cable Based on Distributed Optical Fiber Temperature Sensors

ZHOU Yun¹, YANG Jiang-li²

(1. School of Electric & Communication Engineering, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032, China;

2. Xi'an Shiky High Voltage Electric Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: According to the particularity of the detected signals by distributed optical fiber temperature sensor, a weak signal detection scheme specially for distributional optical fiber temperature sensor system is presented based on the conventional weak signal detection method. By combining software and hardware, weak signal can be effectively extracted from strong noises to achieve higher signal-to-noise ratio. The components and devices in this scheme are general with lower cost, and the whole detection time is short.

Key words: distributed optical fiber temperature sensor; stokes and anti-stokes back-scattering; signal processing; data acquisition

0 引言

高压电力电缆运行温度在线监测系统是为了杜绝电缆沟内各电缆接头处由于温度过高引起火灾事故而设计的,它能将电缆沟内各电缆头处的温度及时准确传送到主控室内,当被测点温度超过给定报警值时,系统能及时予以报警,便于处理。

高压电气设备中由于微波和电磁干扰的影响,传统的测温方法难于或者根本无法得到真实的测试结果。而分布式光纤温度传感器与传统的各类温度传感器相比,其具有一系列独特的优点:使用光纤作为传输和传感信号的载体,有效克服了电力系统中存在的强电磁干扰;利用一根光纤为温度信息的传感和传导介质,可以测量沿光纤长度上的温度变化;采用先进的 OTDR 技术和 Raman 散射光对温度敏

感的特性,探测出沿着光纤不同位置的温度的变化;实现真正分布式的测量,非常适合各种长距离的温度测量、在线实时监测和火灾报警等。

该系统采用特种感温光缆作探测器,本身不带电,具有本质防爆、防雷、防腐蚀、抗电磁干扰等优点,其测量温度分辨率可以达到 0.01 °C,任何微小温度变化都会被探测到,测试距离最长可达 30 km,空间分辨率最小 0.1 m,在相同温度分辨率、测量距离和空间分辨的前提下,具有最短的测量时间,所以可实现大型电力电缆设备内部温度实时在线监测。

1 系统工作原理

系统结构框图见图 1,分为光电探测、光纤温度场信息采集和信号处理 3 大部分。

在同步控制单元的触发下,光发射机产生一大

收稿日期:2009-03-17; 修回日期:2009-05-10

作者简介:周 芸(1966),女,副教授,从事电子信息与自动控制技术方面的教学和科研工作。

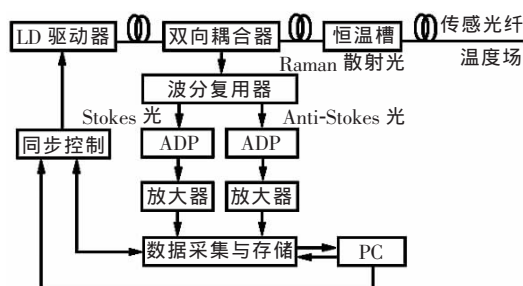


图1 系统结构框图

电流脉冲,该脉冲驱动半导体激光器产生大功率的光脉冲,并注入激光器尾纤中,从激光器尾纤输出的光脉冲经过光路耦合器后进入传感光纤。当激光在光纤中发生散射后,携带有温度信息的 Raman 后向散射光回到光路耦合器,光路耦合器不但可以将发射的光直接耦合至传感光纤,而且可以将散射回来的不同于发射波长的 Raman 散射光耦合至分光器。分光器由两个不同中心波长的光滤波器组成,它们分别滤出斯托克斯 (Stokes) 光和反斯托克斯 (Anti-Stokes) 光,两路光信号经过接收机时进行光电转换和放大,然后由数据采集单元进行高速数据采集,转换为数字量,然后经过进一步的信号处理(提高信噪比),用于温度的计算。温度处理和图形显示软件是预装在计算机内的。

2 测温原理及温度解调方法

拉曼分布式光纤温度传感器的测温原理^[1,2]是基于光纤中的自发拉曼散射温度效应,采用 OTDR 技术的分布式光现传感技术来实现分布式温度测量的。其机理就是依据后向拉曼散射光谱的温度效应。

雪崩二极管(APD)探测到的 Anti-Stokes 散射信号极其微弱,APD 输出的信号电压仅为几十纳伏,而光信号在耦合、滤波、转换等环节上还存在着一定的光能损失,分布式光纤温度传感器光信号和传输光电转换后的电信号处理的各个环节也都有可能引入误差和噪声,因此有用的温度信息淹没在很强的随机噪声中。必须采用微弱信号处理技术来处理这样的信号,减小噪声,消除 Stokes 和 Anti-Stokes 两种波长光信号传输和处理通道的灵敏度不同引起的温度测量误差,将探测器输出信号尽可能地去除噪声和干扰,得到准确快速的温度显示和温度数据,才能保证分布式光纤温度传感器系统的性能指标达到较高的要求。

拉曼散射光由 Anti-Stokes 光和 Stokes 光两种不同波长的光组成,前者对温度特别敏感,而后者与温度关系很小。为消除光源波动和光纤弯曲等影响,

提高测温准确度,采用 Anti-Stokes 光和 Stokes 光强度的比值来解调温度信号,这种传感器的信号处理就是将探测器输出信号尽可能地去掉噪声和干扰,得到准确快速的温度显示和温度数据。传统系统采用了设置定标区的方法,可以消除 Anti-Stokes 和 Stokes 光信号传输过程中散射系数、光滤波因子和 APD 响应度差异对测量结果的影响,从而得到温度测量的公式^[3]

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\theta} - \frac{k}{hc\mu} \ln \left[\frac{R(T)}{R(\theta)} \right] \quad (1)$$

式(1)中, h 是普朗克常数, c 是光速, μ 是波数偏移量, k 是波尔兹曼常数, θ 是定标区的温度, T 是绝对温度。式(1)是分布式光纤温度测量的重要理论基础。但式(1)中还存在两种不同波长光的衰减差异和探测器对两种波长光信号的响应差异,为此在实际测量系统中通过设置恒温定标区来消除,即采用一段恒温光纤作为参考光纤,则由式(1)可推导出式(2)。

$$T(L) = \frac{hc\mu\theta}{hc\mu - k\theta \ln \left\{ R(T) \exp \left[\int_0^L \alpha_d(T(\tau)) d\tau \right] / R(\theta) \right\}} \quad (2)$$

式(2)中, $\alpha_d(T)$ 为损耗系数差。但式(2)包含了未知的温度分布,所以这个公式是不可解的。为了解出这一方程,可以用连续求和或者叠代收敛的方法,从而得到 $T(L)$ 。

连续求和方法是当计算第 N 个点的温度时,把式(2)的积分用第 0 点到第 $N-1$ 点的 Raman 信号的损耗系数差 $\alpha_d(T)$ 的和来表示,这样易于软件编程处理,其公式为

$$T(L) = \frac{hc\mu\theta}{hc\mu - k\theta \ln \left\{ R(T) \exp \left[\sum_{p=1}^{N-1} \alpha_d(T(\tau_p)) \delta_x \right] / R(\theta) \right\}} \quad (3)$$

3 高压电力电缆温度信号的处理

信号的采集与处理单元完成对 APD 光电探测器输出信号的放大、采样和处理,并解调出温度,其组成见图 2。

3.1 高速数据采集

为了提高分布式光纤测温系统的空间分辨率,保证高的空间分辨率和高的空间定位准确度,系统采用采样速率可高达 250 Msps 的两路 A/D,同步对 Anti-Stokes 和 Stokes 信号进行多次实时采样,即两个 A/D 转换器应该同时同步并且独立工作,分别组成并行的两个信号通道系统。由于系统的 A/D 处于

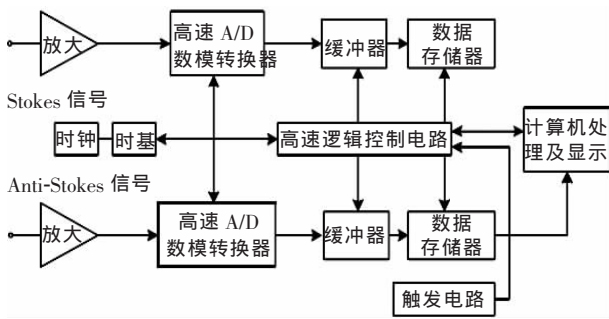


图2 分布式光纤温度传感器信号处理系统框图

高速运作状态，其外围的逻辑控制电路均采用高速器件。A/D转换器采用高速12位A/D转换器AD9230来实现。AD9230是一款12位单芯片模数转换器，内置跟踪保持电路，采样速率可高达250 Msps，满功率模拟带宽为700 MHz。

对于高速ADC器件，要想及时读取转换数据，确保不丢失（这在分布式光纤测温中是必须的），需要高速、可靠的数据传输。另外，分布式光纤测温系统中信号的数据采集具有间歇性。对一个2 km的系统，若激光器以10 kHz信号触发，则激光脉冲信号周期为100 μs。由式(1)可知：一次测量中，测完最后一个测量点所需的时间为20 μs，即ADC需且只需在脉冲周期的前20 μs采样。因此，必须设计专门的数据采集电路。

系统中，在ADC与PC之间加入高速先入先出队列芯片(FIFO)进行数据缓冲，由可编程逻辑器件(CPLD)控制A/D向FIFO的数据写入。ADC在外部时钟控制下以一定的速率采样并输出数据，CPLD根据激光脉冲的同步信号将每个测量点的采样数据依次写入FIFO。当最后一个测量点的采样数据写入FIFO后即停止写入，直到下一个激光脉冲同步信号到来，以保证数据的准确性。

3.2 数据存贮与硬件接口

该分布式光纤温度传感器系统的数据采集中，A/D转换时间在4 ns以内，因而传统的数据存贮采集方式是远跟不上数据采集速率的，为弥补这种差距，系统采用将3片INTEL公司生产的集成动态随机存储器28F640J5合为一组来存贮数据，具有共同的地址寄存器，但每一片RAM都有自己的数据缓冲触发器。在ADC工作时，被转换完成后的数据出现在锁存数据线上。这时数据触发器在外界时钟触发下，被锁存在其输出端，这时可写入其后的RAM存储器内。ADC转换器发出的数据不断地有秩序的送到并列的3组数据触发器上，然后再周而复始，只要依次选通数据触发器，转换数据得到暂存，每个数

据触发器上的数据将在以3个转换数据传输后为周期，再一次得到更新，既可保证高速数据可靠地写入中速随机存储器内。若转换数据周期为4 ns，则可以求得12 ns的暂存。

数据存储器与计算机接口问题的核心问题是如何实现高速的模数转换和计算机的接口即超高速的模数转换器与速度较慢的计算机之间的通信。系统采用DMA方式^[4]来实现采集卡到计算机的数据传送，可以最大限度地缓解计算机存贮速度对信号检测与处理速度的瓶颈效应影响。

3.3 数字信号处理

利用分布式光纤温度传感器进行温度测量，其关键在于信号处理。在分布光纤温度传感器的信号处理软件中，用软硬件结合的方法，利用高速模数转换实现数字平均信号处理^[5]软件，采用连续求和的方法，利用式(3)来处理采集和平均后的Anti-Stokes和Stokes数据，进行温度解调，从而得到光纤上各点的温度测量结果。

3.4 实验结果和分析

图3是仿真实验中一次Anti-Stokes和Stokes信号采样数据，图4是对图3中的数据经32 k次数字平均后得到的结果，图5是对图4数据进行温度解调后得到的温度曲线。

从实验结果可看出，经过数字平均处理后，能有效改善其信噪比，并恢复信号波形。经解调后的测量

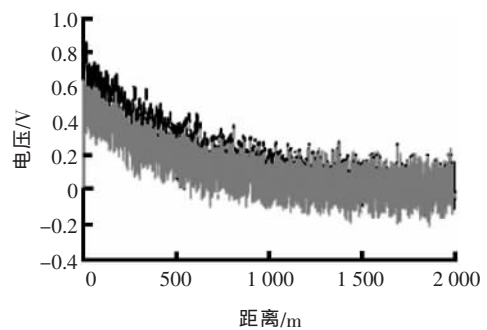


图3 Anti-Stokes和Stokes采样信号

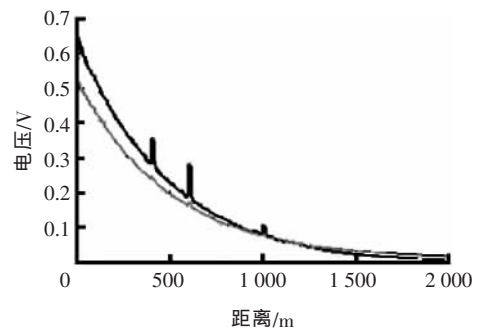


图4 处理后的采样信号

(下转第81页)

电流开通和零电流关断)工作方式。在某实验条件下,逆变器输出电压电流及其触发信号波形见图9(用Tek公司的TDS3012录制成excel文件,再在MATLAB下画出波形)。

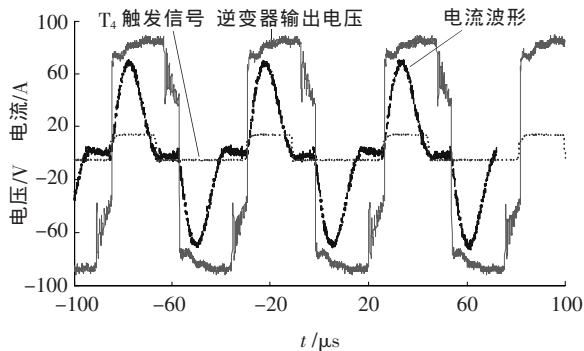


图9 逆变器输出电压电流及其触发信号波形

4 结语

结合的高压直流电源的系统方案,从功率电路和控制电路两方面分析了电磁干扰的主要成因。在控制电路中,从电网、控制电路及其各个模块之间的电磁干扰的传播途径入手,分别采取了EMI滤波器、线性辅助电源、光电隔离、单点接地、总体浮地、屏蔽电缆、屏蔽罩体等措施来抑制电磁干扰。另外高压采样回路采用压敏电阻+屏蔽线+瞬态抑制二极管+跟随器+稳压二极管的复合保护方案。功率电

路则通过合理配线与器件选型,阻尼电磁干扰的传播途径,缓冲电路与控制方式等方面来抑制电磁干扰。通过电源产品的运行,证实了给出的电磁干扰设计方案实用有效。

参考文献:

- [1] GRASS N, HARTMANN W, KLÖCHNER M. Application of Different Types of High-voltage Supplies on Industrial Electrostatic Precipitators [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2004, 40(6): 1 513-1 520.
- [2] 周好斌, 钟桂香, 王毅. 静电除尘器用智能高压直流电源的研制[J]. 高压电技术, 2005, 31(5): 61-63.
- [3] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. 开关电源变换器传导干扰分析及建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 49-54.
- [4] 郑军奇. EMC(电磁兼容)设计与测试案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 米切尔·麦迪圭安. 电磁干扰排查及故障解决的电磁兼容技术[M]. 刘萍, 魏东兴, 臧瑞华, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] JAI P AGRAWAL. 电力电子系统——理论与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [7] 郑琼林, 郝荣泰. 机车用 50 kV·A IGBT 逆变器的电磁兼容性设计[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 34-36.
- [8] 刑岩, 蔡宣三. 高频功率开关变换技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 李洪春, 苗立江, 王玉峰. 一种高电磁兼容性高压开关电源[J]. 高压电技术, 2006, 32(3): 60-61.

(上接第 76 页)

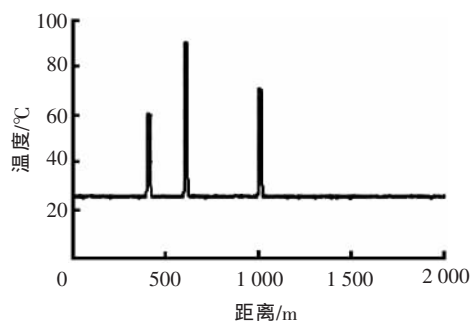


图5 解调后的温度信号

温度与实际预设温度有明显的线性关系,而且具有较好的空间位置一致性。

4 结语

依据分布式光纤温度传感器系统被测信号的特殊性,系统在常规的微弱信号检测的基础上,采用软硬件结合的方案,能够在强噪声下有效地提取微弱

信号,以求得尽可能大的信号噪声比,而所需的器件与设备极为通用,相对成本较低,检测整个过程完成的时间也较短,具有较高的实用值。不足之处是由于该系统对分布式光纤温度信号的处理方法主要采用软件的累加平均除噪法,其降低了系统的响应速度。为了提高性能,改进型可使用新的信号处理方式,即引入相关函数与小波分析对信号进行处理,则可大大提高系统分辨率,缩短系统响应时间。

参考文献:

- [1] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] 张岩红. 分布式光纤温度传感器信号处理系统的研究与设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [4] 刘星. 计算机接口技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 简小林, 蒋耀林. 现代数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.