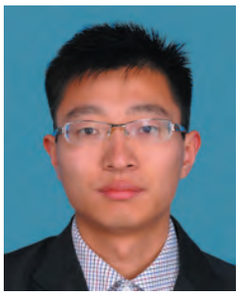
分布式光纤测温系统的研究与进展

分布式光纤测温系统凭借其优良的系统性能和先进的技术水平成为温度监测领域的首选。从测温原理的角度出发，深入研究一般温度解调方法，提出智能解调方法以改进其存在问题和局限性。采用累加平均技术处理微弱和低信噪比的信号，提高了系统的测量准确度，取得了较好的解调效果。

李志鹏/北京城建设计发展集团股份有限公司



李志鹏/助理工程师

关键词/Keywords
分布式光纤测温系统·
智能解调·
局限性·
累加平均·
测量准确度·

分布式光纤测温技术采用光纤作为传感元件，适用于特高压和有强电磁干扰的场所。光纤作为传感器件的同时又是传输媒介，能屏蔽强电磁场的干扰，稳定可靠。随着分布式光纤测温技术的快速发展，相应测量系统的应用范围越来越广，涉及电力电缆的温度监测、中高压开关柜触头监测、大型电力变压器绕组温度场监测、油气输送管道泄漏检测、供热系统的管道监测以及矿井和地铁轨道监测等领域。

测温原理

光时域反射原理和散射原理是分布式光纤测温技术的核心理论。光时域反射原理用来实现光信号定位，光散射原理用来解调温度信息。具体原理图如图1所示。

图1中，脉冲激光器发射的光脉冲经由波分复用器射入传感光纤，光子向前传输的同时与光纤生产时各种应变力致使光纤内部形成的一些分布不均的颗粒之间相互作用，发生散射现象。部分后向散射光向后传输，并被光电探测器接收、放大。在这一过程中，后向散射光在光纤中走过的路程与时间的定量关系为

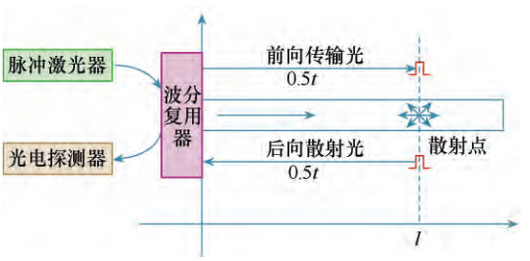


图1　光时域反射原理图

$$\begin{cases} 2l = vt \\ v = \dfrac{c}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式中，l 为散射点到光波入射端的长度；v 为光纤中的激光传播速度；n 为光纤折射率；c 为光在真空中的传播速度[1]。

一般来讲，采用百兆采集卡可以达到1 m的定位准确度，但在实际工程应用中略有偏差。对此，在国标GB/T 21197—2007《线型光纤感温火灾探测器》中明确给出了具有报警定位功能的分布式光纤测温系统的定位试验要求。取出任意一段光纤作为测试光纤环，反复地进行温升报警试验，记录每次的报警位置，根据这些试验数据计算报警定位的标准偏差。标准偏差的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}[x_i - M(x)]^2} \quad (2)$$
$$M(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

式中，x_i 为光纤报警点坐标；n 为试验重复次数[2]。

后向散射光光强－波长分布示意图如图2所示，光纤测温正是基于不同波段散射光对温度的响应度不同，利用它们的光强比与温度的定量关系，结合测温系统内部的基准温度和解调算法，实现温度的测量功能。

中国知网　https://www.cnki.net

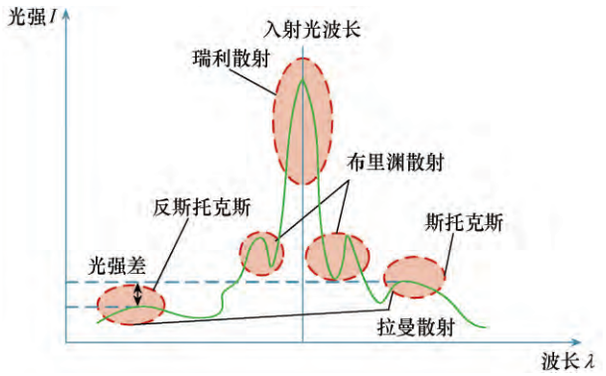


图2 后向散射光光强－波长分布示意图

分布式光纤测温系统的核心原理主要包括光的散射原理和光时域反射原理。整个测温系统涵盖了光学部分和数字部分，主要包括泵浦脉冲激光源、触发模块、数据处理单元波分复用器(WDM)以及接收、放大光信号的APD模块和兼顾传感、通信用的测温光纤。系统的结构图如图3所示。

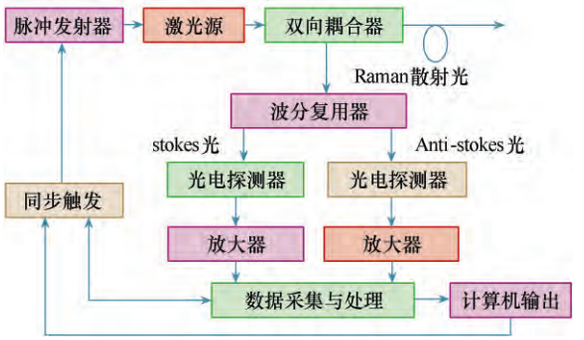


图3 测温系统的结构图

工作原理如下：首先在同步脉冲的触发下，脉冲激光器通过WDM向传感光纤中射入激光脉冲，激光脉冲在向前传输的同时，与光纤生产时各种应变力致使光纤内部形成的一些分布不均的颗粒之间相互作用，产生散射现象。部分散射光向后传输，经由波分复用器，被APD模块接受和放大，转换成电压信号，通过信号与温度的对应关系，结合系统内部的解调算法和处理函数，就能得到光纤沿线的温度曲线。

解调方法的研究进展

1. 一般解调方法

目前使用的测温系统几乎都是基于拉曼散射原理设计的，即把斯托克斯光作为参考信号，反斯托克斯光作为解调信号。光波信号经由雪崩光电二极管APD转换成电压信号，其中反斯托克斯光和斯托克斯光的强度之比与温度的定量关系为

$$F(T) = \frac{I_{as}}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp\left[-hc\Delta\gamma/(kT)\right] \quad (3)$$

式中，λ_s为斯托克斯光波长；λ_{as}为反斯托克斯光波长；h为普朗克常量；c为光在真空中的传播速度；k为玻尔兹曼常量；$\Delta\gamma$为波数；T为绝对温度[3]。

由式(3)可以看出，光强比值和温度值并不是线性关系。但是研究发现，在温度相对较低时光强比值和温度值近似线性关系，经过多次试验测试，得到如图4所示温度与光强比值关系的近似曲线。

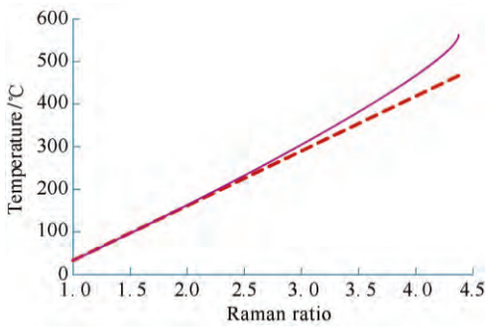


图4 温度与光强比值的关系曲线

目前使用中的测温系统仅仅应用在0～120 ℃的环境中，完全可以作为线性处理，从而得到温度和光强比值的线性方程，达到温度测量的目的。光纤传输中的损耗和能量衰减造成了实际温度曲线的解调失真，而且这种解调失真随着距离的加长而明显。对于这样的情况，研究者一般采用的修正公式为

$$T = m\frac{F(T_0)}{F(T)}e^{kx} + a \quad (4)$$

式中，k为信号损耗修正系数；x为光纤的距离长度[4]。

上述修正公式对应的是单路测温系统，即从光纤的一端射入激光，同时在入射端进行信号检测，直接用两种光的强度比求解温度。这种解调方式，对于2 km以内的短程测温系统，效果不错；但是随着测量距离的加长，曲线的尾部会出现倾斜和抖动，而且这种倾斜和抖动是随机的，倾斜程度与测试光纤的距离有很大关系。

中国知网 https://www.cnki.net

2. 智能解调方法

在一般解调方法中，为消除测量距离加长产生的解调误差，引入了温度补偿系数。但是，在理论上讲这个校正系数是一个固定常数[5]。拉曼散射的光子能量受温度调制是满足 Boltzmann 分布的，它与温度高低满足相应的线性关系：即不论光纤的距离长短，任意位置处对温度的响应度都是等价的。

对于测量距离带来的光纤传输损耗和信号衰减还可以通过回路解调方式来修正，能够达到很好的效果。但是这一解调方法存在以下几个问题：①同样的测量距离，所用光纤长度会增加 1 倍。②延长响应时间，降低及时性。③不适用于远距离测量系统。

因此，去掉式（4）中的温度补偿系数，运用最小二乘法来实现温度值的解调[6]。同时，通过在测温系统内部预制一个高准确度的感温器件，只需简单的加热装置就可以实现 m、a 的自校准功能，实现智能解调。

为便于化简，令 $F = \frac{F(T)}{F(T_0)}$，去掉式（4）中的温度补偿系数转换为

$$T = Fm + a \tag{5}$$

由最小二乘法化简得

$$\begin{aligned} \sum_i^n T_i &= m\sum_i^n F_i + na \\ \sum_i^n T_i F_i &= m\sum_i^n F_i^2 + a\sum_i^n F_i \end{aligned} \tag{6}$$

还有一种方式，就是将解调公式用多项式拟合，用龙格－库塔处理常微分方程的方法深化解调算法，该方法目前尚处在理论研究阶段。

噪声信号的处理

基于拉曼散射原理设计的分布式光纤测温系统是目前的主流设计，该类系统一个最大的缺点就是待解调的信号光（反斯托克斯光和斯托克斯光）非常弱，比入射光低两个数量级。还有一点就是信号光与入射光的波长差别不大，从而造成了信噪比很低，解调十分困难。对信号处理的最佳效果就是在最大限度提高信号光的同时去除噪声信号的干扰。一般对信号光的采样都选用对光强极其敏感的雪崩光电二极管 APD，处理单元一般选用 32 位的高速处理芯片 DSP，其核心任务就是噪声消除和信号放大。

测温系统中的噪声信号可以应用统计学原理来降噪。对于信号的处理大多采用累加求取算术平均值的手段。一种方法是软件累加求取算术平均值，即数字累加平均法；另一种方法是硬件累加求取算数平均值，这种方法通常采用双通道的 FIFO 单元、CPLD 的累加单元和逻辑控制单元，使得硬件累加最大可达 32 768 次。图 5 为采用百兆数据采集卡、32 768 次累加平均得到的温度解调曲线。

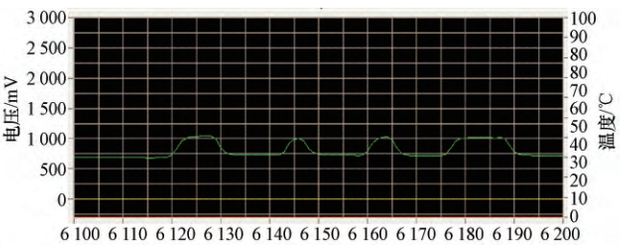


图 5　32 768 次平均温度解调曲线

测温系统的发展趋势

1）在满足温度测量要求的前提下，研究其他参变量的测量手段。

2）对于电力电缆的监测，针对外敷设方式，设计表层温度换算缆芯温度的模型，进而实时获取电缆的载流量信息，使其在允许的温度条件下发挥最大的电力输送能力，保障电力系统运行处于最佳状态。

3）提高系统的定位准确度，这并不是靠单纯地提高采集卡的采样速率就能完成，毫米级定位功能的实现必须有一个全新的处理手段。

4）在保障高分辨率和高准确度的前提下，最大可能地提高测量距离。

结束语

从分布式光纤测温技术的原理出发，对信号定位原理和信号解调原理进行了详细论述和研究。对解调方法做了细致研究，剖析一般解调方法并论述其存在的问题和局限性，从而提出智能解调方法。从信号自身微弱和低信噪比的特点出发，

（下转第 63 页）

中国知网　https://www.cnki.net

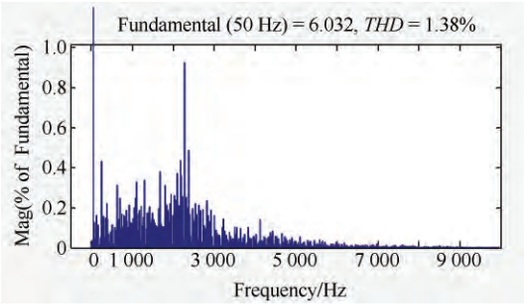


图 12　输出电流谐波

结束语

本文提出了一种基于 LC 型滤波的并网逆变器电流跟踪型控制策略，可比传统的单 L 型滤波器更加有效地抑制逆变器侧入网电流中所含的大量高次谐波。同时，与 LCL 型滤波器相比，LC 型滤波器简单实用，成本低，避免了可能造成谐振峰的情况，提高了系统的稳定性。

该系统的控制策略采用了逆变器入网电流的反馈控制方法，为系统减少了霍尔传感器的使用，从而降低了系统成本。从 Matlab 仿真的结果表明，该控制策略能够有效使电流快速跟踪上电网电压，使系统具有优良的动静态响应性能。最后进行了 FFT 分析，得出的电流谐波畸变率 *THD* = 1.38%，完全符合国家标准，验证了该控制策略的可行性和正确性。此外，该策略同样适用于需对入网电流进行采样的不间断电源、有源滤波器等系统。

参考文献

[1] Blaabjerg F，Teodorescu R，Liserre M，et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. Industrial Electronics，IEEE Transactions on，2006，53 (5)：1398-1409.

[2] 李永东. 脉宽调制 (PWM) 技术——回顾、现状与展望 [C]. 中国第四届交流电机调速传动学术论文集，1995：1067-1081.

[3] 王学华，阮新波，刘尚伟，等. 抑制电网电流谐波影响的并网逆变器控制策略 [J]. 中国电机工程学报，2011，31 (6)：7-14.

[4] 许津铭，谢少军，肖华锋，等. LCL 滤波器有源阻尼控制机制研究 [J]. 中国电机工程学报，2012，32 (9)：27-33.

[5] 王要强，吴凤江，孙力，等. 带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报，2011，31 (12)：34-39.

(收稿日期：2014-03-28) EA

(上接第 59 页)

采用高速数据采集卡和累加平均技术，提高了系统的测量准确度，取得了较好的解调效果。

分布式光纤测温技术的应用范围越来越广，涉及电力系统、石油化工、交通运输和城市建设等领域，对其性能要求也在不断提高。随着信息时代和智能时代的到来，安全稳定的电力供应成为信息传递和设备集成最根本的保障。同时，分布式光纤测温技术将实现网络互联，推动智能电网的发展。

参考文献

[1] 韩永温，郝文杰，张林行. 基于拉曼散射原理的分布式光纤测温系统研究 [J]. 半导体光电，2013，34 (2)：342-345.

[2] 全国消防标准化委员会第六分技术会. GB/T 21197—2007 线型光纤感温火灾探测器 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[3] 常程，李铮，周荫清. 基于系统工程方法论的分布式光纤后向 Raman 散射测温系统设计 [J]. 光子学报，2001，30 (1)：50-53.

[4] 吴延华，李志鹏，于宏艳. 分布式光纤测温系统中解调方法的优化 [J]. 化工自动化及仪表，2013，40 (2)：216-218.

[5] 张在宣，王剑锋，余向东，等. Raman 散射型分布式光纤温度测量方法的研究 [J]. 光电子·激光，2001，12 (6)：596-600.

[6] 李志鹏，郭伟，陈雷. 分布式光纤测温系统在轨道交通中的应用 [J]. 城市轨道交通研究，2014，17 (5)：149-153.

(收稿日期：2014-06-24) EA

中国知网 https://www.cnki.net