

doi: 10.3788/gzxb20154410.1006006

分布式喇曼光纤测温系统中修正测量误差的方法

杨睿, 李小彦, 高翔

(北京航天易联科技发展有限公司, 北京 100176)

摘 要: 喇曼散射的分布式光纤测温系统中, 由于光纤色散效应, 反斯托克斯光与斯托克斯光传播速度不同会引起采集信号错位, 导致测量误差. 本文提出了一种利用分段三次 Hermite 插值算法修正反斯托克斯信号, 消除信号错位, 降低系统测量误差的方法. 该方法在 1 km 传感样机上进行了验证. 未修正时, 反斯托克斯信号与斯托克斯信号在光纤尾端错开 1 个点, 导致升温峰前端出现 -7.45% 的误差, 经过插值修正后, 消除了信号错位, 使系统的测量误差在 $\pm 1.5\%$ 以内.

关键词: 光纤喇曼散射; 分布式测温; 信号错位; 误差修正; 分段三次 Hermite 插值

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)10-1006006-6

Correct the Measurement Error of Distributed Raman Optical Fiber Temperature Measurement System

YANG Rui, LI Xiao-yan, GAO Xiang

(Beijing Aerospace Yilian Science & Technology Development Co., Ltd, Beijing 100176)

Abstract: In the distributed Raman optical fiber temperature measurement system, Anti-Stokes light and Stokes light have different propagation speeds due to the fiber dispersion effect, this will cause mismatch of the acquisition signals, resulting in measurement error. A method was proposed to use the piecewise cubic Hermite interpolation algorithm to correct the Anti-Stokes signal, eliminating signal mismatch and reducing the system measurement error. The method is verified on our 1 km sensing prototype. Before correction, the Anti-Stokes signals have one point more than the Stokes signals, causing -7.45% error at front of the temperature peak. After interpolation correction, the signal mismatch is eliminated, resulting in the system measurement error within $\pm 1.5\%$.

Key words: Optical fiber Raman scattering; Distributed temperature measurement; Signal dislocation; Error correction; Piecewise cubic Hermite interpolation

OCIS Codes: 060.2300; 060.2370; 280.0280; 280.6780; 290.5860

0 引言

分布式光纤温度传感器 (Distributed fiber Temperature Sensor, DTS) 是近二、三十年发展起来的、利用光纤中的自发喇曼散射效应结合光时域反射技术 (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) 实现的可用于分布式、实时测量空间温度场分布的一种新型传感技术^[1-2]. 该技术利用普通光纤作为敏感介质和传输介质, 具有电绝缘、抗电磁干扰、本质安全、耐腐蚀、体积小、重量轻、可绕曲等特点. 可实现远距离测量

和监控, 具有测量范围宽, 空间分辨率和测量准确度较高等优点, 可广泛应用于油气管线、电力电缆、航天器结构健康、冶金化工、地铁隧道、大型建筑等领域的温度监测^[3-8].

目前基于喇曼散射的分布式光纤测温系统主要采用反斯托克斯光 (Anti-Stokes) 与斯托克斯光 (Stokes) 的强度比值对温度进行解调^[9]. 由于两种散射光的波长不同, 根据光纤色散效应, 它们在光纤中的传播速度存在差异^[10], 所以, 从同一位置散射回的反斯托克斯光和斯托克斯光到达光电探测器的时间不一样, 使得

基金项目: 北京市科技计划项目 (No. Z131100005313011) 资助

第一作者: 杨睿 (1986—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为分布式光纤传感技术. Email: yangrui@caaayl.com

通讯作者: 高翔 (1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为测控技术. Email: gaoxiang@caaayl.com

收稿日期: 2015-06-03; 录用日期: 2015-09-02

http://www.photon.ac.cn

采集卡接收到的两路信号并不是来自相同的位置. 这种信号错位现象会引起测量误差, 特别是随着传感光纤的延伸, 误差也会累积变大, 最终导致测温或定位出现错误.

为了解决这一问题, 本文利用分段三次 Hermite 插值算法, 对采集到的反斯托克斯信号进行插值, 得到与斯托克斯光相同散射位置的信号幅值, 消除信号错位现象, 从而修正了测量误差.

1 理论分析

1.1 基于喇曼散射的分布式光纤测温原理

1.1.1 喇曼散射测温原理

根据量子理论, 光子与介质中的分子相互作用, 发生非弹性碰撞, 产生能量交换, 光子的运动方向和频率同时发生改变, 这一过程称为喇曼散射效应. 喇曼散射分为斯托克斯散射和反斯托克斯散射, 这两个过程分别表示为^[11]

$$v_s = v_0 - \Delta v \quad (1)$$

$$v_{as} = v_0 + \Delta v \quad (2)$$

式中, v_s 和 v_{as} 分别为斯托克斯光频率和反斯托克斯光频率, v_0 为入射光频率, Δv 为喇曼平移量, 其值与材料有关, 对于石英光纤, Δv 一般为 13.2 THz.

当入射脉冲在光纤中传输时, 在 L 处发生自发喇曼散射, 背向传输的斯托克斯光和反斯托克斯光返回入射端时的光强表示为

$$P_s(T) \propto P_0 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T) \quad (3)$$

$$P_{as}(T) \propto P_0 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] R_{as}(T) \quad (4)$$

式中, P_0 为入射脉冲光强, α_0 、 α_s 、 α_{as} 分别为入射光、斯托克斯光和反斯托克斯光在光纤中传输时的衰减系数, L 为光纤中发生自发喇曼散射的位置, R_s 、 R_{as} 分别为与光纤分子低能级和高能级上的布局数有关的系数, 与光纤局域处的温度有关, 其表达式分别为

$$R_s(T) = \frac{1}{1 - \exp(-h\Delta\nu/kT)} \quad (5)$$

$$R_{as}(T) = \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1} \quad (6)$$

式中, h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度.

当入射光强度 P_0 、光纤衰减系数 α_0 、 α_s 、 α_{as} 以及探测位置 L 一定时, 在光纤入射端探测到的背向自发喇曼散射光强度只与探测位置处的温度 T 有关. 提取式(5)和式(6)中的温度项做室温条件下的泰勒级数展开可得到

$$P_s(T) \propto 1 + 0.00096\Delta T \quad (7)$$

$$P_{as}(T) \propto 1 + 0.0080\Delta T \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 反斯托克斯光在室温下温度灵敏度达到 0.8%, 而斯托克斯光对温度基本不敏

感, 因此反斯托克斯光携带温度信息, 可通过探测反斯托克斯光强度变化得到光纤中某点的温度, 这就是喇曼散射测温的原理.

虽然在 DTS 系统中反斯托克斯光是携带温度信息的信号光, 但是在实际测量时, 一般采用斯托克斯光作为参考光, 利用反斯托克斯光与斯托克斯光强度的比值解调出温度信息, 这样可消除光源和测温光纤变动带来的影响, 增强系统的稳定性和可靠性.

1.1.2 光时域反射原理

当入射激光脉冲在光纤中传输时, 沿光纤各点产生的后向散射光会回传到光纤入射端. 假设脉冲从发出到返回的总时间为 t , 则光纤中发生散射的位置与激光入射端的距离表示为

$$L = Vt/2 \quad (9)$$

式中 V 是脉冲在光纤中传播的速度, 其表达式为

$$V = c/n \quad (10)$$

式中 c 是真空中光速, 为 3×10^8 m/s, n 是光纤的折射率, 与光波长相关^[12].

由此可知, 不同时刻的回光信号与发生散射的位置一一对应. 光时域反射技术就是通过测量光脉冲返回入射端的时间来确定其发生散射的位置, 从而实现分布式测量.

1.2 喇曼散射测量误差分析

在利用喇曼后向散射光定位测温点时, 人们通常假设反斯托克斯光和斯托克斯光的传播速度相同, 能同时到达光电探测器, 并被采集卡接收到. 实际上, 由于两种散射光的波长不同, 它们在光纤中的传播速度也是有差异的. 对于入射波长为 1 550 nm 的激光脉冲, 其喇曼散射中的反斯托克斯光波长 1 450 nm, 在石英光纤中的折射率为 1.445^[12], 根据式(10), 可求出其在光纤中的传播速度为 $V_{as} = 2.0758 \times 10^8$ m/s. 而从同一位置散射的斯托克斯光波长为 1 663 nm, 折射率 1.442 6, 在光纤中的传播速度为 $V_s = 2.0796 \times 10^8$ m/s. 可见, 斯托克斯光的传播速度比反斯托克斯光要快, 前者将先到达探测器.

假设喇曼散射发生位置离脉冲入射端距离为 L , 如图 1, 当斯托克斯光到达入射端时, 反斯托克斯光传

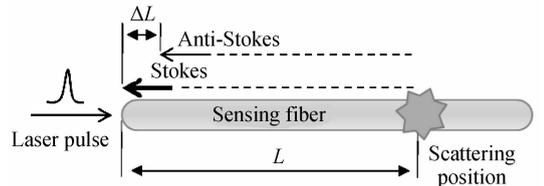


图 1 光纤中 Stokes 光与 Anti-Stokes 光的传播过程
Fig. 1 Stokes light and Anti-Stokes light propagation in optical fiber

播的长度为 $L/V_s \times V_{as}$, 离入射端距离

$$\Delta L = L - L/V_s \times V_{as} = 0.0018L \quad (11)$$

根据式(11),当 $L=1\text{ km}$ 时, $\Delta L=1.8\text{ m}$,也就是说当散射点距发射端 1 km ,斯托克斯光到达探测器时,反斯托克斯光离探测器还有 1.8 m .此时采集卡接收的两路信号并不是从同一位置返回的,如果对这些两路信号进行比值求温度就会出现误差.随着探测距离的延长,这种信号错位的现象会累积变得更加严重,使最终的测量结果出现较大误差.

1.3 信号插值算法

分布式光纤测温系统中,采集卡对两路光信号是同步接收的,由于光纤中喇曼散射的斯托克斯光传播速度大于反斯托克斯光,使得采集到的两路光信号并不是从相同位置返回的.对于同一时刻采集到的两路信号,斯托克斯光的返回位置要远于反斯托克斯光的.假设从光纤上返回第一个信号时,两者距离相差 Δl ,则第二个信号时两者相差 $2\Delta l$,以此类推,直到光纤尾端返回序号为 N_s 的最后一个斯托克斯光信号,此时两者相差 $N_s\Delta l$.也就是说距光纤尾端 $N_s\Delta l$ 范围内的反斯托克斯光信号还未返回.采集卡会继续接收喇曼散射信号,不过后续的信号只有反斯托克斯光这一路有返回值,所以最终采集到的反斯托克斯光信号长度大于斯托克斯光,假设其长度为 N_{as} .

计算温度时,如果仅考虑前 N_s 组信号,则会出现测量误差,特别是进行长距离测温时,这种误差的累积很可观,最终用于计算的两路信号的实际位置可能相差好几米甚至十几米.如果定位准确度要求较高,这种误差是不能容忍的.

要减小甚至消除这种信号错位产生的误差,可以对 N_{as} 个反斯托克斯光信号进行插值,得到 N_s 个与斯托克斯光对应的值,这些值能正好落在斯托克斯光的散射位置.也就是说,插值后的两路信号散射位置相同,信号错位现象可以被消除.

反斯托克斯信号插值流程如图 2.

其中, HermiteInterp 函数是自定义的,实现分段三次 Hermite 插值算法,该算法采用分段细化的方法减小误差,且节点处导数连续使插值曲线光滑,其平滑度介于线性插值和三次样条插值之间,可以较好地逼近温度引起的信号变化.

假设要逼近的信号曲线为 $f(x)$, Hermite 函数(简称为 $H(x)$)满足条件

1)对于每一个节点 $x_i (i=0, 1, 2, \dots, n-1)$,有 $H(x_i) = f(x_i)$ 和 $H'(x_i) = f'(x_i)$,即节点处的函数值及一阶导数值连续;

2)在每一个分段区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 内是三次多项式.

在自定义 HermiteInterp 函数中, X_{as} 、 V_{as} 分别与 x_i 、 $f(x_i)$ 对应, X_s 则为插值点,即斯托克斯散射位置,插值后便得到修正后的幅值 V_i ,其长度与斯托克斯信号一致,消除了信号错位.

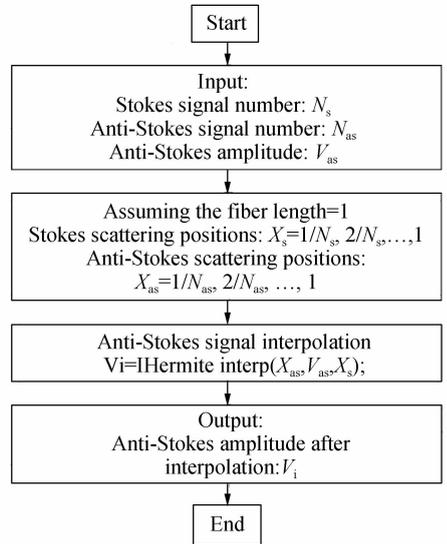


图 2 反斯托克斯信号插值算法流程图
Fig. 2 Flow chart of Anti-Stokes signal interpolation algorithm

2 实验研究

2.1 分布式光纤测温实验系统

分布式光纤测温系统主要分为三个部分(见图 3):光路、电路和信号处理.其中光路部分包括:光源、光波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、标定光纤、测温光纤、雪崩光电二极管(Avalanche PhotoDiode, APD)探测器;电路部分包括:多级放大电路、数据采集卡(Data Acquisition Card, DAQ)、铂阻测温电路;信号处理部分包括:上位机、控制软件、定位测温算法等^[13].

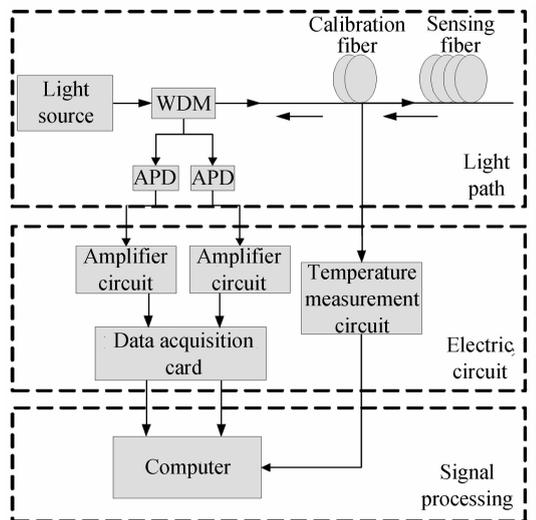


图 3 分布式光纤测温系统原理
Fig. 3 Schematic diagram of the distributed optical fiber temperature measurement system

由光源发出的脉冲光经过波分复用器进入传感光纤中,在传感光纤各点位置上产生自发喇曼散射(携带温度信息),其中后向传输的自发喇曼散射光(斯托克

斯光和反斯托克斯光)再次经过波分复用器耦合进APD光电转换模块,经过光电转换为电信号,再经过多级、低增益、低噪声放大电路放大后被采集累加卡采集并进行预处理,最后携带温度信息的信号由采集卡送入工控机。同时,铂阻测温电路测量得到的标定光纤的温度信息也送入工控机。两组温度信息通过测温软件运行算法程序,对待测温度信息进行解调并绘制在显示屏上。

分布式光纤测温实验系统中,各关键器件的性能参量如表1所示。

表1 分布式光纤测温系统关键器件性能参量

Table 1 The key devices and their performance parameters of the distributed optical fiber temperature measurement system

Key devices	Performance parameters
Light source	Center wavelength:1550 nm, Pulse width:10 ns,Peak power:20 W
WDM	Operating wavelength: 1550 nm/1450 nm/1663 nm
APD	Response range: 1400 nm ~ 1700 nm, ATC
Amplifier circuit	Bandwidth: 100 MHz
DAQ card	Channels:2, Sampling rate: 100 M/s, bit width: 12 bits
Sensing fiber	Common multimode fiber, 900 μm casing encapsulation

2.2 喇曼信号采集与测温结果

利用上述实验系统对喇曼散射信号进行采集与分析。实验中使用的测温光纤长度为1 km,置于室温环境下。将测温光纤尾端995 m~999 m的一段光纤绕制成直径20 cm的光纤环,放入40℃恒温槽内,尾端剩余的1 m光纤置于空气中,然后进行分布测温。

图4为采集卡接收到的斯托克斯信号和反斯托克斯信号。两路信号都分为两段,前面较高部分是标定光纤的散射信号,后面平缓下降的部分是测温光纤的散

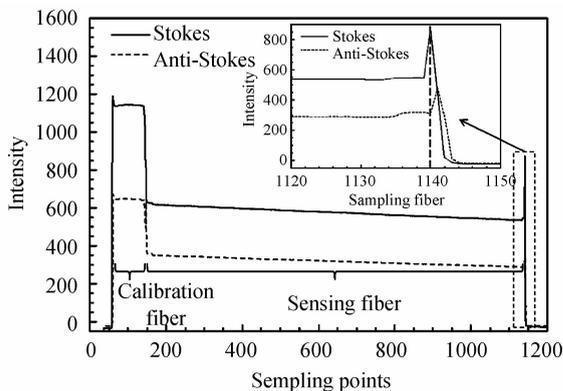


图4 喇曼散射信号

Fig. 4 Raman scattering signals

射信号。由于标定光纤与测温光纤是用法兰盘对接的,所以两者连接处出现了较大的损耗。对于短距离(2 km以内)的温度传感,该损耗影响不大。

从图中还可以看到测温光纤的尾端有明显的反射峰,这是由于石英光纤与空气折射率不同而产生的菲涅尔反射。将反射峰放大后发现斯托克斯信号与反斯托克斯信号的反射峰发生了错位,两者相差一个采样点。这种信号错位现象是由于光纤色散引起的,如果继续增加测温光纤长度,信号错位将更加严重。

此外,光纤尾端挨着反射峰的位置还能看到信号有一小段凸起,这是由于测温光纤尾端置于恒温槽后喇曼散射信号增强产生的,并且反斯托克斯信号增强的幅度明显大于斯托克斯信号,通过两者的比值可以解调出该处的温度变化。

图5为分布式测温结果,可以看出实验环境温度大约为25.5℃。温度分布曲线尾端出现了明显的升温峰,对该峰进行放大发现,其起始部分有凹陷,最低点温度值为23.6℃,与实际温度比较,误差达到了-7.45%,而结束部分有凸起,峰值温度为40.8℃,误差为2%。测温结果并不理想,特别是凹陷处的温度与实际情况相差过大。这种测量误差来源于斯托克斯信号与反斯托克斯信号的错位。由于温度解调是通过同一位置两种散射信号的比值计算的,如果两路信号来自不同的散射位置,解调结果必定出现差错。只有消除了两路信号的错位才能获得准确的温度及定位结果。

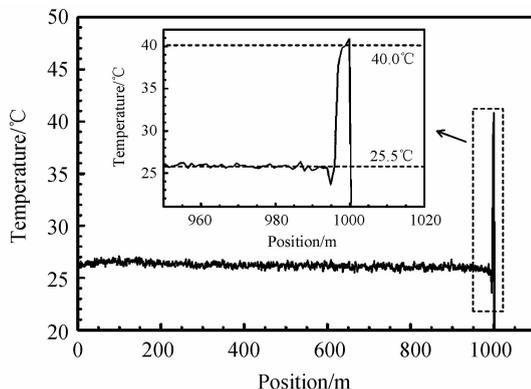


图5 温度测量结果

Fig. 5 Temperature measurement result

2.3 反斯托克斯信号的插值修正

要消除光纤色散引起的信号错位现象,可以对反斯托克斯信号进行插值,使其插值点对应的散射位置与斯托克斯信号的散射位置一致,从而消除错位误差。

根据分析,插值算法采用分段三次 Hermite 插值。图6为反斯托克斯信号插值后的结果,可以看到插值后反斯托克斯信号与斯托克斯信号尾端的反射峰位置一致,信号的形状也没有发生畸变。

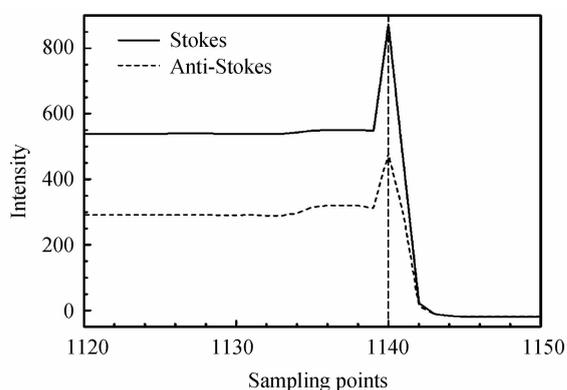


图6 插值后的反斯托克斯信号与斯托克斯信号

Fig. 6 Anti-Stokes and Stokes signals after interpolation

对插值后的信号进行解调,得到如图7所示的温度测量结果.可以看到,升温峰前端较大的凹陷没有了,后端的凸起也消失了,峰的顶部比较平坦,得到了较理想的测温曲线.多次测量表明系统的测温误差在 $\pm 1.5\%$ 以内,满足实际需要.

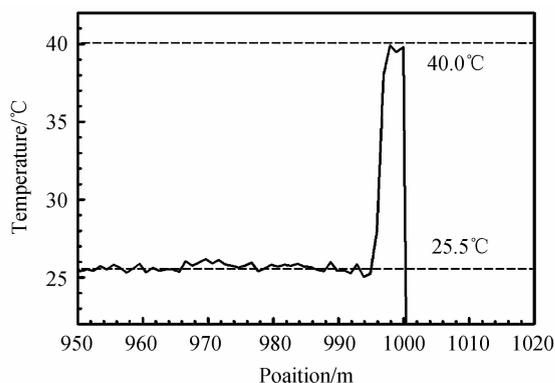


图7 插值后的测温结果

Fig. 7 Temperature measurement result after interpolation

由于实验样机只有1 km的测温光纤,本文仅对1 km的分布式喇曼测温系统进行了验证.随着测量距离的增大,光纤色散产生的信号错位越发严重,误差也会越大,则更能体现这种插值修正算法的优越性.另外,由于该算法是对整条测温光纤中的喇曼散射信号进行修正,即使出现多个位置的温度变化也同样能够消除信号错位,实现温度修正.

3 结论

分布式喇曼光纤测温系统中,由于光纤色散效应,斯托克斯光与反斯托克斯光的传播速度不同.从同一位置返回的两种散射光并不能同时到达光电探测器,采集卡接收到的两路信号在空间上出现了错位,直接利用这两组信号得出的温度是不准确的.本文采用分段三次 Hermite 插值算法对反斯托克斯信号进行修正,消除信号错位,提高了测量精确度.该算法实现简单,在1 km实验样机上进行了验证,修正前,斯托克斯信号与反斯托克斯信号错开了一个信号点,导致升温

峰前后端分别出现凹陷和凸起,引入了 -7.45% 和 2% 的测量误差,经过插值修正后,消除了信号错位,使系统的测量误差降低到 $\pm 1.5\%$ 以内.对于长距离的分布式测温系统,该算法具有重要价值.

参考文献

- [1] ZHANG Zai-xuan, JIN Shang-zhong, WANG Jian-feng, *et al.* Distributed optical fiber Raman photon sensor research review [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(11): 2749-2761. 张在宣, 金尚忠, 王剑锋, 等. 分布式光纤喇曼光子温度传感器的研究进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2749-2761.
- [2] ZHANG Zai-xuan, WANG Jian-feng, LI Yi, *et al.* Recent progress in distributed optical fiber Raman photon sensors at China Jiliang University[J]. *Photonic Sensors*, 2012, **2**(2): 127-147.
- [3] SUN Guo-shan, HOU Si-zu, CHEN Chao. Raman optical fiber temperature measurement principle and application in power system[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2010, **26**(3): 26-29. 孙国善, 侯思祖, 陈超. 喇曼光纤测温原理及在电力系统中的应用[J]. *电力科学工程*, 2010, **26**(3): 26-29.
- [4] WU Yong-hong, SU Huai-zhi, XU Hong-zhong, *et al.* Study on mmultiplexing capability of huge concrete dam crack distributed fiber optic monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 722-725. 吴永红, 苏怀智, 徐洪钟, 等. 混凝土大坝裂缝光纤分布式监测能力的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 722-725.
- [5] SU Huai-zhi, LI Jin-you, HU Jiang, *et al.* Analysis and back-analysis for temperature field of concrete arch dam during construction period based on temperature data measured by DTS[J]. *Sensors Journal*, 2013, **13**(5): 1403-1412.
- [6] TANG Yu-quan, SUN Miao, LI Jun, *et al.* Temperature calibration of distributed optical fiber temperature sensor based on Raman scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0506006. 汤玉泉, 孙苗, 李俊, 等. 基于喇曼散射的分布式光纤温度传感器的温度修正[J]. *光子学报*, 2015, **44**(5): 0506006.
- [7] LIU Jian-qing, YIN Fei-fei, LI Jian-qiang, *et al.* Resolution improved Raman distributed temperature sensors based on error compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0128002. 刘建青, 尹飞飞, 李建强, 等. 基于误差补偿的分布式喇曼温度传感器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 0128002.
- [8] YU Xiang-dong, JING Shang-zhong, ZHANG Zai-xuan, *et al.* A distributed optical fiber Raman temperature sensor with cyclic simplex coding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0706005. 余向东, 金尚忠, 张在宣, 等. 采用单工循环编码解码的分布式光纤喇曼温度传感器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0706005.
- [9] NING Feng, ZHU Yong, CUI Hai-jun, *et al.* A Linear correcting algorithm for improving space resolution of distributed optical fiber Raman temperature measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 408-413. 宁枫, 朱永, 崔海军, 等. 一种提高分布式光纤测温系统空间分辨率的线性修正算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 408-413.
- [10] WANG Wei-jie, CHANG Jun, LV Guang-ping, *et al.* Wavelength dispersion analysis on fiber-optic Raman distributed temperature sensor system[J]. *Photonic Sensors*, 2013, **3**(3): 256-261.
- [11] ZHANG Wan-cheng, OUYANG Ming-san, WANG Dong-fa,

et al. System design of distributed fiber-optic temperature sensor and the key technologies [J]. *Electronics Process Technology*, 2008, **29**(4): 231-234.

张万成, 欧阳名三, 王东法, 等. 分布式光纤温度传感器的系统设计及关键技术[J]. 电子工艺技术, 2008, **29**(4): 231-234.

[12] RefractiveIndex. INFO [DB/OL]. [2015-05-10]. <http://>

[refractiveindex.info/? shelf = glass&book = fused _ silica&page=Malitson](http://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=fused_silica&page=Malitson).

[13] ZHU Hai-peng, JIN Zhong-xie. Distributed Raman temperature measurement system based on multi-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0106002.

朱海鹏, 金钟燮. 基于多模光纤的分布式喇曼测温系统[J]. 光子学报, 2015, **44**(1): 0106002.