

文章编号:1004-4213(2011)09-1297-6

基于动态多段温度标定的分布式光纤 Raman 测温系统

金钟燮, 崔海军, 宁枫, 李小琴, 朱永

(重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:温度标定是分布式光纤喇曼测温系统重要组成部分. 本文设计了一种基于半导体制冷模块的多温度参考标定装置, 采用了新颖的动态多段光纤温度标定方法, 并通过实验验证了该标定方案的可行性与准确性. 结果表明, 随着外界环境温度的变化, 传感光纤所处任一处的温度都能够精确解调, 其温度解调结果更加准确, 测量误差小于 1 °C. 系统性能更加稳定, 更能够适应复杂的环境变化.

关键词:分布式测温; 喇曼散射; 动态标定; 温度解调

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114009. 1297

0 引言

分布式光纤喇曼测温系统是近年来迅速发展起来的一种崭新的传感技术. 与传统的测温系统相比, 光纤测温系统自身具有无可比拟的优势, 光纤传感以其本质安全、不受电磁干扰、灵敏度高、质量轻、体积小、易于复用(联网)、可远距离遥测、对被测环境影响小、能埋入工程结构等特点而在传感领域备受关注并得到广泛的应用, 已经成为传感器技术发展的主流方向之一^[1-2]. 其中温度标定是系统的重要组成部分, 关系到系统的温度测量准确性与测量准确度. 传统方法一般采用一段光纤在温度标定区进行温度标定, 当光电器件发生温度漂移, 系统会存在测量误差. 本文利用一种全新的基于半导体制冷模块的多温度参考标定装置, 采用新颖的动态多段光纤温度标定方法, 不仅实现了装置的小型化和低功耗, 而且克服了恒温槽需要人为改变标定温度和人为计算拟合曲线所带来的误差.

1 分布式光纤喇曼测温系统原理

喇曼测温系统是指在同步脉冲的控制下, 半导体激光器(Laser Diode, LD)发出一定功率的光脉冲并注入传感光纤. 经过温度调制的后向喇曼散射光经过波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM), 得到瑞利光(Rayleigh)、斯托克斯光(Stokes)、反斯托克斯光(Anti-Stokes). 三种

光对温度的灵敏度不同, 它们对温度的相对灵敏度为 0. 806%、0. 104%、1. 065%^[3]. 瑞利光比斯托克斯光强 3 个数量级左右, 比反斯托克斯光强 4 个数量级左右. 现在通常采用斯托克斯光作为基准解调反斯托克斯光的方法, 这同时还可以有效地消除了光源抖动、光纤弯曲、采集时漏光、损耗系数和散射系数等因素的影响. 系统的测温原理图如图 1. 光信

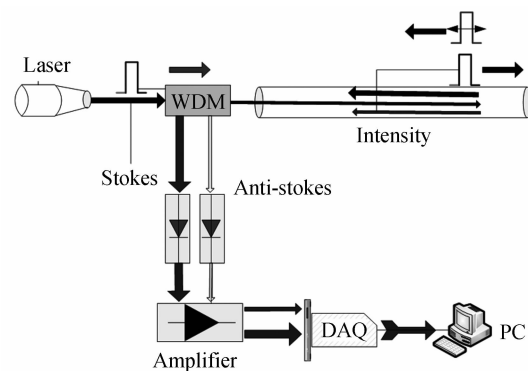


图 1 分布式光纤喇曼测温系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of distributed temperature system based on Raman scattering

号再经过雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)转换为电信号. 其中反斯托克斯光和斯托克斯光的强度之比 $R(T)$ 和温度的关系为

$$F(T) = \frac{I_{as}}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp[-hc\Delta\gamma/(kT)] \quad (1)$$

式中, λ_s 、 λ_{as} 分别为斯托克斯光与反斯托克斯光波长; 普朗克常量 $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$; 真空中光速

基金项目: 中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目(No. CDJZR10120011)资助

第一作者: 金钟燮(1970-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感与信号处理. Email: jinzhongxie@cqu.edu.cn

通讯作者: 崔海军(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为光纤与光栅传感. Email: chj13b234@163.com

收稿日期: 2011-06-14; 修回日期: 2011-08-09

$c=3 \times 10^8$ m/s; 波尔兹曼常量 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为绝对温度(K); $\Delta\gamma$ 为波数(cm^{-1})^[4]. 根据式(1), 再结合光时域反射(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)技术即可得到传感光纤所在位置的温度距离场分布.

2 喇曼测温系统温度标定

2.1 温度标定

光纤喇曼测温原理是依据后向喇曼散射的温度效应, 在分布式光纤测温系统中, 使用 Stokes 和 Anti-Stokes 光强之比对温度进行解调, 需要知道传感光纤中某一段长度范围内的准确温度, 将系统测得的 Stokes 和 Anti-Stokes 光强度与该段的比值做比较, 从而可以得出被测区域的温度信息. 当系统处于 T_0 的温度时, 其后向 Anti-stokes 和 Stokes 散射光强度 $P_{as}(T)$ 、 $P_s(T_0)$ 之比为

$$F(T_0) = \frac{P_{as}(T_0)}{P_s(T_0)} = \frac{K_{as} v_{as}^4}{K_s v_s^4} \exp(-(\alpha_{as} - \alpha_s)L) \cdot \exp\left(-\frac{h\Delta v}{kT_0}\right) \quad (2)$$

当光纤从温度 T_0 变化到任一温度 T 时, 则

$$\frac{F(T)}{F(T_0)} = \frac{\exp(-h\Delta v/kT)}{\exp(-h\Delta v/kT_0)} \quad (3)$$

由式(3)解调出温度信息为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta v} \ln \frac{F(T)}{F(T_0)} \quad (4)$$

因此, 只要测得 $F(T)$ 、 $F(T_0)$ 、 T_0 的值, 便可解出温度 T . 通过在光纤上设置标定区, 可以消除 Stokes 和 Anti-Stokes 信号处理通道的散射系数、响应度和光滤波器因子等灵敏度不同对温度测量带来的误差, 同时解决温度传感测量的温度基准问题, 实现高准确度的分布式温度测量^[5-7].

2.2 温度标定区的选择

在分布式光纤喇曼测温系统中, 传感光纤前端和尾端端面都会存在端面反射, 中间温度测量区的信号比前端反射区、尾端反射区稳定, 更能反应真实的温度信息, 所以标定区应该设在这个区域的首端. 按照国际上通用的分布式温度传感器要求, 标定区设在 200 m 处, 从该点起定为测量的起始点, 温度标定区在传感光纤中位置如图 2.

为得到温度 T 与光强比的关系, 将式(4)转换为^[8]

$$T = \frac{-h\nu}{k \cdot \ln\left(\frac{F(T)}{F(T_0)} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_0}\right)\right)} \quad (5)$$

据此作出 $T \sim F(T)/F(T_0)$ 关系曲线图, 如图 3.

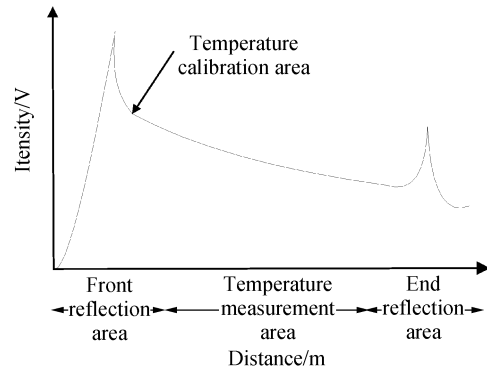


图 2 喇曼散射曲线中温度标定区

Fig. 2 The temperature calibration area of Raman scattering

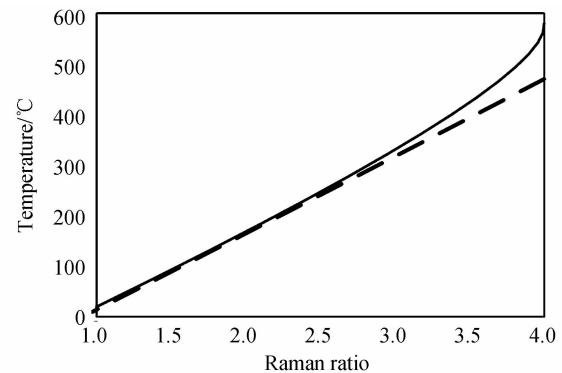


图 3 温度 T 与光强比 $F(T)/F(T_0)$ 的关系

Fig. 3 The relationship between temperature and Raman ratio

温度 T 与光强比 $F(T)/F(T_0)$ 在整个温度范围内是非线性的, 而在 $0 \sim 120$ °C 之间, 文献[9-11]中近似为线性做数据处理. 因此在系统标定过程中, 可以通过测量不同温度 T 下 $F(T)/F(T_0)$ 的值, 拟合出一条实际系统的温度标定曲线, 表达式为

$$T = m \cdot \frac{F(T)}{F(T_0)} + a \quad (6)$$

式中, m 为比例系数; a 为常量; $F(T)$ 、 $F(T_0)$ 分别为待测温度与标定温度下反斯托克斯和斯托克斯分量的强度比值^[9-11].

3 两种温度标定方案的对比分析

3.1 传统的静态单段光纤温度标定方案

根据系统温度分辨率为 1 °C, 空间分辨率为 1 m 的要求, 本文采用的 LD 参量为: 峰值功率 7.52 W, 脉冲宽度 10 ns, 重复频率为 7 kHz; 光电探测器 (Avalanche Photo Diode, APD) 带宽为 100 M, 数据采集卡采样率为 100 M/S.

系统所用 LD 的最佳中心波长与所选用传感光纤、系统测温距离、光电探测器密切相关. 选择长波长可以提高系统温度灵敏度和测量准确度, 光电探测器对接收长波长响应度较高; 同时光脉冲进入传感光纤, 由于光纤的喇曼增益谱比较宽, 产生的后向

喇曼增益谱线宽也非常宽,常用光波段的喇曼散射光谱线宽数据,如表 1.

表 1 后向喇曼散射光线宽数据表(单位:nm)

Table 1 Data of linewidth with Raman backscatter(units:nm)

| | | | | | | | | | |
|-----------------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| λ | 840 | 810 | 872 | 1 320 | 1 248 | 1 401 | 1 550 | 1 450 | 1 663 |
| $\Delta\lambda$ | 1.0 | 7.4 | 8.6 | 1.0 | 17.1 | 21.6 | 1.0 | 23.2 | 30.4 |

当入射光脉冲线宽都为 1 nm 的情况下,随着中心波长不断增加,在光纤中产生的后向喇曼散射光线宽也随之增大.在中心波长为 1 550 nm 处,后向反斯托克斯喇曼散射光(1 450 nm)线宽增加到 23.2 nm,斯托克斯光(1 663 nm)线宽增加到 30.4 nm.系统要求的测温距离为 10 km,为保证喇曼散射光强度,选取中心波长为 1 550 nm,偏移量 <1 nm^[12].

温度的计算公式又回到简单的式(6),然后就是确定比例系数 m 和 a 的值,将一段至少能够得到数十个采样点的光纤(本实验中为 20 m)置于精密恒温槽内,依次在不同的温度下进行测量得到图 4.

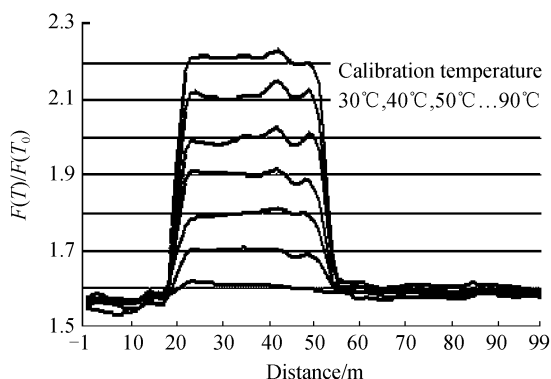


图 4 传统温度标定得到的光强比值与距离曲线
Fig. 4 The relationship between light intensity ratio and distance curves using tradition temperature calibration method

温度标定对系统的测温准确度影响较大,不同温度内产生的喇曼比值可以采用恒温槽内得到的数据进行算术平均,保证误差尽可能小.然后将所测得的比值与温度联系,进行相应的线性拟合,得到拟合曲线,得到相应的 m 和 a ,如图 5.由图 5 喇曼光强

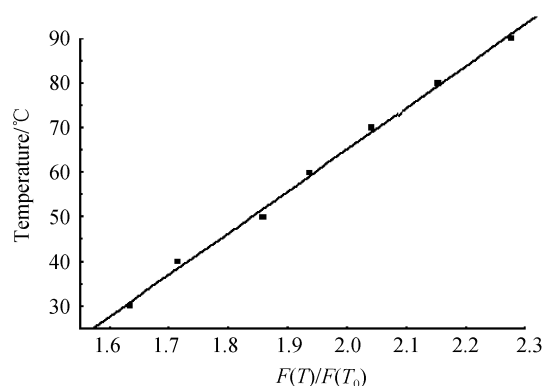


图 5 喇曼光强比值与温度进行线性拟合
Fig. 5 The linear fitting of Raman light intensity ratio with temperature

比值与温度进行线性拟合得到直线斜率 $m = 94.405$,截距 $a = -123.74$,将 m 、 a 带入标定得到的光强比值与距离曲线,就可以得到相应的温度-距离曲线^[13],如图 6.

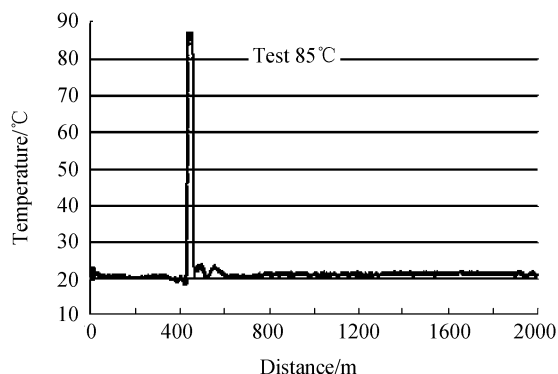


图 6 传统静态单段光纤温度标定得到 T-L 曲线
Fig. 6 T-L distribution curve using tradition static single segment fiber

图中测试光纤放入恒温槽温度为 85.00 °C,环境温度为 23.45 °C(使用铂电阻温度传感器测得),通过标定得到的恒温槽实际测试温度为 86.25 °C,环境温度 21.14 °C,通过大量实验得出该标定方案误差在 $\pm 2^\circ\text{C}$.假如环境温度发生较大变化,温度测量误差会相应变大^[14].

3.2 动态多段光纤温度标定方案

传统静态单段光纤温度标定方案,只在标定区采用一段光纤放入恒温水槽对整条待测光纤进行温度标定.在实验过程中,参与温度标定的多个温度值与其喇曼光强比值($F(T)/F(T_0)$)的平均值也进行过多项式拟合,但测试效果并没有得到显著提高,但多项式拟合增加了系统计算负担和影响了系统的测量时间.通过大量的实验观察,喇曼光纤测温系统喇曼光强比值与标定温度进行线性拟合时,在 $0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内线性度不够理想,低温段($0^\circ\text{C} \leq T < 40^\circ\text{C}$)与高温段($40^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$)的斜率 m 和截距 a 有所差异,即并不是完全线性,如图 7.同时由

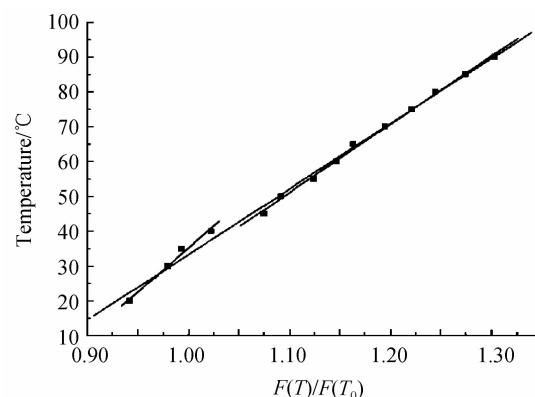


图 7 低温区与高温区的线性拟合对比
Fig. 7 The contrast of linear fitting between low temperature and high

于传统标定方案未能将标定区环境温度值考虑进去. 当环境温度变化时, 会导致光 APD、LD 等光电器件发生温度漂移现象, 从而使传感光纤所测得温度误差变大, 环境温度的变化越大, 测量误差也越大; 用恒温水槽进行温度标定的局限性在于, 长时间用恒温水槽来浸泡光纤会导致光纤散射损耗逐渐变大; 同时标定花费时间比较长, 需要人为改变恒温槽温度, 然后人为计算拟合系数 m 、 a ; 并且恒温槽体积较大、功耗较高, 不适合用于工业现场.

在实际应用中撤掉温度标定装置, 随着外界环境温度的变化, 测量误差更加严重. 考虑到现场应用中单段光纤用恒温水槽进行标定的某些局限性, 本文提出一种全新的多段光纤动态标定方案, 在本实验系统标定区采用四段光纤(为保证标定温度的准确性, 每段光纤至少能够得到数十个采样点), 每段光纤都缠绕于由半导体制冷器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 温控的铜块上, 如图 8, 然后用导热硅胶进行固定, 以保证温度标定光纤的受温均匀性.

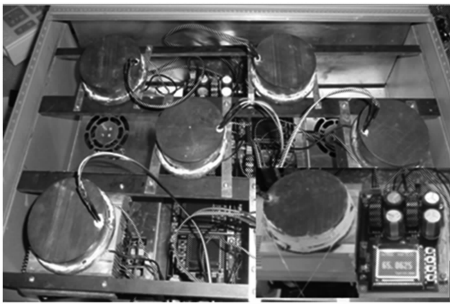


图 8 用 TEC 控制的温度标定铜块
Fig. 8 The copper pieces of temperature control calibration with TEC

由于喇曼光纤测温系统中喇曼光强比值与标定温度进行线性拟合时, 低温段与高温段线性拟合系数的差异性, 随着标定区环境温度变化, LD、APD 等光电器件的温度漂移会导致传感光纤温度测量存在误差, 特别是低温区误差更大. 在本文中采用将环境温度与标定区中四段光纤所处的不同温度, 进行分段线性拟合的方案. 根据系统要求测量指标测温范围 ($0 \sim 100$) $^{\circ}\text{C}$ 、温度准确度 1°C 、温度分辨率 1°C 、空间分辨率 1 m 、主机工作湿度要求: $0 \sim 95\%$ (不冷凝)、测量时间: $< 30\text{ s}$. 系统选择的标定温度能够平均分布在整个测量温度范围的低温与高温区域; 同时考虑温控模块的复杂程度与制作成本, 系统选用: 20.00°C 、 40.00°C 、 60.00°C 、 80.00°C 、环境温度作为标定温度. 将标定区中 20.00°C 、环境温度 25.00°C (当环境温度发生变化, 此值会相应改变)、 40.00°C 与每一段温度标定光纤得到的喇曼光强比值 $F(T)/F(T_0)$ 的平均值进行低温段的线性拟合得到低温区的线性拟合系数 m_1 、 a_1 ; 将标定区中的

40.00°C 、 60.00°C 、 80.00°C 与每一段温度标定光纤得到的喇曼光强比值 $F(T)/F(T_0)$ 的平均值进行高温段的线性拟合得到高温区的线性拟合系数 m_2 、 a_2 . 然后结合温度标定光纤的位置可以得出喇曼光强比值与传感光纤的距离关系曲线, 如图 9.

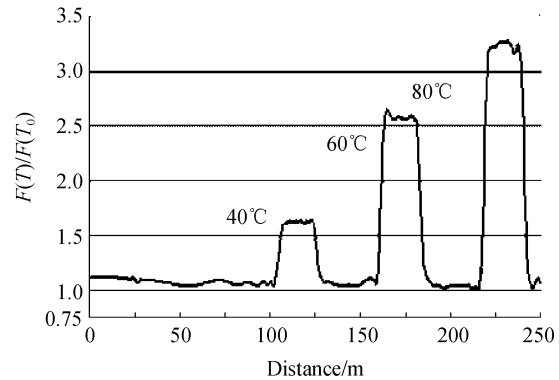


图 9 动态多段温度标定得到光强比值与距离曲线
Fig. 9 The relationship between light intensity ratio and distance curves using multi-section temperature calibration method

将动态多段温度标定得到的 m_1 、 a_1 ; m_2 、 a_2 带入图 9. 若喇曼光强比值小于折点处 (40.00°C) 处光强比值则带入公式 $T = m_1 \cdot \frac{F(T)}{F(T_0)} + a_1$; 若喇曼光强比值大于等于折点处 (40.00°C) 处光强比值则带入公式 $T = m_2 \cdot \frac{F(T)}{F(T_0)} + a_2$, 即可得到相应的温度距离曲线, 如图 10. 图中传感光纤前端放入 30.00°C ,

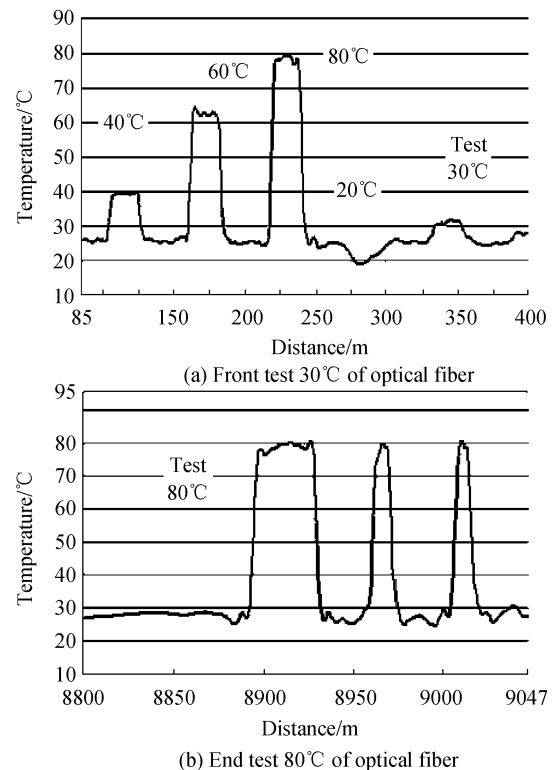


图 10 动态多段光纤温度标定得到前端尾端 T-L 曲线
Fig. 10 Temperature distribution front and end after dynamic multi-section temperature calibration

后端放入 80.00 °C 恒温槽中进行测试,测试光纤所处的环境温度为 25.46 °C,通过多段光纤进行动态温度标定得到前端恒温槽中实际测试温度为 30.46 °C,尾端恒温槽实测温度为 79.57 °C,环境实测温度为 25.32 °C.通过大量实验,测试系统通过多段动态温度标定后得到的温度测量值,如表 2.

表 2 标准温度与测试温度对比
Table 2 Contrast of Standard temperature and test temperature

| Standard/ (°C) | Actual/(°C) | Average/ (°C) | Error/ (°C) | Average error/(°C) | | |
|-------------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|------|------|
| 30 | 30.8 | 31.1 | 30.9 | 31.0 | 30.9 | 0.9 |
| 35 | 34.1 | 34.0 | 33.7 | 34.3 | 34.0 | -1.0 |
| 40 | 39.3 | 39.9 | 38.6 | 40.1 | 39.5 | -0.5 |
| 45 | 44.6 | 44.0 | 44.5 | 44.3 | 44.4 | -0.6 |
| 50 | 48.2 | 48.8 | 49.0 | 49.2 | 48.9 | -1.1 |
| 55 | 55.5 | 54.0 | 54.8 | 54.2 | 54.6 | -0.4 |
| 60 | 58.6 | 58.6 | 60.6 | 60.3 | 59.5 | -0.5 |
| 65 | 65.6 | 65.4 | 66.0 | 65.6 | 65.7 | 0.7 |
| 70 | 70.3 | 68.5 | 69.4 | 69.5 | 69.4 | -0.6 |
| 80 | 79.4 | 78.9 | 79.3 | 79.4 | 79.2 | -0.8 |
| 85 | 85.1 | 84.6 | 83.4 | 83.9 | 84.3 | -0.7 |
| 90 | 89.2 | 90.1 | 90.3 | 89.5 | 89.7 | 0.3 |

表 2 显示出采用动态多段温度标定,系统的温度误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$.由于环境温度参与温度标定,所以当环境温度变化时,标定系数动态改变,可以抑制由于环境温度变化导致激光器、光电探测器等光电器件温度漂移而引起的温度测量误差.图 9 中得到的温度距离曲线能够可以随时动态反映外界环境温度的改变,这同样提高了系统的测温准确度和实际应用能力;系统经过连续 5 天的连续监测,以及一个月的间断性测量,温度误差都在系统要求范围之内.由于使用了 TEC 当做温度标定装置,克服了恒温槽需要人为改变标定温度和人为计算拟合曲线所带来的误差.

4 结论

温度标定是分布式光纤喇曼测温系统的重要部分,直接关系到系统温度测量的准确性和测量准确度.本文以喇曼测温的基本原理为依据,通过考虑如何提高温度测量准确性和工业现场实用性的角度,对温度标定的方案通过大量的实验进行了对比与分析,得到了喇曼系统温度标定的一种改进方法,即在标定区通过多段光纤进行动态温度标定,抑制了 LD/APD 等器件的温度漂移,提高了系统的稳定性和温度测量准确度.实际系统的应用表明,上述温度标定的方案是可行的,在工业应用中是行之有效的.文中采用的温度标定方法及其装置,对实际应用有

一定的参考价值.

参考文献

- [1] SU Guo-bin, LI Zheng. The dynamic range evaluation of optical receiver in distributed fiber temperature sensor based on Raman back scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 475-479.
苏国彬,李铮. 分布式光纤喇曼测温系统光接收机的动态范围及测温数据的修正[J]. *光子学报*, 2002, **31**(4): 475-479.
- [2] GENG Jun-ping, XU Jia-dong, LI Yan, *et al.* Theoretical analysis of the fully distributed fiber optical sensor on Raman optical-fiber frequency-domain reflectometry (ROFDR) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1262-1265.
耿军平,许家栋,李琰,等. 基于光频域喇曼散射的全分布式光纤温度传感器模型研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1262-1265.
- [3] ZHANG Zai-xuan, SHEN Wei-min, GUO Ning, *et al.* A demodulated method of distributed optical fiber raman photons sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(5): 467-471.
张在宣,沈为民,郭宁,等. 分布光纤喇曼光子传感器系统的一种解调方法[J]. *光子学报*, 1998, **27**(5): 467-471.
- [4] CHANG Cheng, LI Zheng, ZHOU Ying-qing. Design of distributed optical fiber temperature sensor system using raman back-scattering based on system engineering methodology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(1): 50-53.
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.
- [5] CHANG Cheng, LI Zheng, ZHOU Yin-qing. Temperature calibration in a distributed temperature sensor system based on Raman back-scattering[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, **27**(5): 522-524.
常程,李铮,周荫清. 基于喇曼散射测温系统温度标定问题的研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2001, **27**(5): 522-524.
- [6] LIU Jian-sheng, LI Zheng. Physical essentials and design considerations of temperature calibration for distributed optic fiber raman temperature sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1168-1171.
刘建胜,李铮. 光纤喇曼测温系统的温度标定及设计考虑[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1168-1171.
- [7] ZHANG Li-xun, LIAO Yun, DAI Zhi-yong, *et al.* Demarcated method of distributed fiber raman temperature sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(6): 772-774.
张利勋,廖云,代志勇,等. 分布式光纤喇曼温度传感器的区域标定法[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(6): 772-774.
- [8] ZHANG Li-xun, OU Zhou-hua, LIU Yong-zhi, *et al.* A circulated demodulated method of distributed fiber raman temperature sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1176-1178.
张利勋,欧中华,刘永智,等. 分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1176-1178.
- [9] WEI Kang-lin, WEN Zhi-yu, ZOU Jian, *et al.* Based on OTDR prospective distributed optical fiber temperature alarm system[J]. *Piezoelectricity & Acoustooptics*, 2010, **32**(4): 329-332.
魏康林,温志渝,邹建,等. 基于 OTDR 的准分布式光纤无温度报警系统[J]. *压电与声光*, 2010, **32**(4): 329-332.
- [10] LIU Hong-lin, ZHANG Zai-xuan, YU Xiang-dong, *et al.* Research on spatial resolution of the 30 km distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **26**(11): 1195-1198.
刘洪林,张在宣,余向东,等. 30 km 分布式光纤温度传感器

- 空间分辨率研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(11): 1195-1198.
- [11] WANG Jian-feng, ZHANG Zai-xuan, XU Hai-feng, *et al.* Gain characteristic study of amplified backward spontaneous raman scattering in the G652 fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(7): 895-898.
王剑锋, 张在宣, 徐海峰, 等. G652 光纤中背向自发喇曼散射的增益特性[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(7): 895-898.
- [12] XU Shu-rong, LI Chang-zhong, ZHAI Yan-zhong, *et al.* The effect of the center wavelength on distributed optical fiber temperature measuring system based on raman backscatter[J]. *Acta Metrological Sinica*, 2007, **28**(3A): 61-64.
许舒荣, 李长忠, 翟延忠, 等. 中心波长对基于喇曼散射分布式光纤测温系统影响分析[J]. 计量学报, 2007, **28**(3A): 61-64.
- [13] YU Ming-fei, CHEN Xiao-jun. Study of temperature resolution of distributed raman optical fiber temperature sensor. [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(4): 475-477.
于明飞, 陈孝君. 分布式光纤温度传感器温度分辨率的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(4): 475-477.
- [14] SHI Xiao-feng, LI Zheng, CAI Zhi-quan. Optical fiber distributed temperature measurement system and precision analysis[J]. *Measurement and Control Technology*, 2002, **21**(1): 9-12.
史晓峰, 李铮, 蔡志权. 分布式光纤测温系统及其测温准确度分析[J]. 测控技术, 2007, **28**(4): 475-477.

Distributed Optical Fiber Raman Temperature Measurement System Based on the Dynamic Multi-section Temperature Calibration

JIN Zhong-xie, CUI Hai-jun, NING Feng, LI Xiao-qin, ZHU Yong

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System, Chongqing University, Chongqing 400030 China)

Abstract: A new temperature calibration equipment is designed based on the thermoelectric cooler module, and a novel temperature calibration method using dynamic multi-section optical fiber is applied and its feasibility and accuracy are verified by experiments. With the changing of external temperature, the temperature at any point along the optical fiber can be sensed and demodulated accurately. This temperature demodulation method is accurater, more stable and suitable for the applications under the complex practical environment. The error of the multistage temperature calibration is less than 1 °C.

Key words: Distributed temperature measurement; Raman scattering; Dynamic calibration; Temperature demodulation