

分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度

甘维兵, 王立新, 张 翠

(武汉理工大学光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 简要介绍了分布式光纤光栅测温技术的基本原理和特点, 探讨该技术在电缆温度在线监测中的应用前景。对光纤光栅温度传感器的封装进行了优化设计, 并将其安装在 220 kV 高压电缆上进行为期一年的现场试验, 考察了系统的测温精度、响应时间及运行可靠性等指标, 试验结果表明该技术测温误差小、响应时间短、运行可靠且能实现长距离测量, 可有效应用于电缆温度在线监测, 为电缆载流量的确定提供有效的参考依据, 避免电缆火灾事故。最后在工频击穿试验中验证了该技术为电缆绝缘在线监测提供了一种新的思路和方法, 值得推广。

关键词: 光纤光栅; 分布式; 电缆温度; 在线监测; 载流量

中图分类号: TP212 文献标识码: A

Distributed optical fiber grating technology applied in cable temperature measurement

GAN Wei-bing, WANG Li-xin, ZHANG Cui

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to discuss the future of applying Distributed Optical Fiber Grating Technology in HV cable insulation online monitoring, firstly the paper illuminates the principle and characteristic of this technology. We have optimized the sensor design, and tests have been carried out on a 220 kV HV cable for a year. During the temperature testing, measurement accuracy, response performance and stability of the apparatus are tested. The result proves that measurement error range varies within 0.5 °C, response time is within 6 s and it can measure the temperature in long distance and large area. This technology can be very effective in online monitoring cable temperature, and it can provide direct data for calculating cable current rating and keep the cable away from fire. This paper discusses the probability to apply this technology in cable insulation online monitoring. The test result shows it can provide a new way to realize cable insulation online monitoring.

Key words: optical fiber grating; distributing; cable temperature; online monitoring; carrying capacity

1 引 言

随着我国工业技术的发展, 钢铁、电力等企业规模逐渐增大, 不断出现的工业火灾事故, 尤其是电缆火灾事故也越来越多, 使得企业的消防安全形势不容乐观。为了确保电缆的安全运行, 需要对所安装的电缆及周围环境进行实时温度监测。

现有的电缆温度监测系统主要有电信号和光信

号传感器两大类。电类传感器包括传统的热电偶和热电阻等, 具有测温精度高、反应快的特点, 但存在布线复杂、易损坏、维护工作量大等缺点; 而光信号

基金项目: 湖北省光电子专项省部级 (No. 20091g0009) 资助。

作者简介: 甘维兵 (1978 -), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为光纤传感及应用。E-mail: gwb_1@tom.com

收稿日期: 2011-01-09

传感器主要有拉曼光纤和光纤光栅两种类型,拉曼散射技术可以对电缆沿线的温度分布进行测量,在长距离电缆温度在线监测方面具有一定的优势,但它对光源的要求特别高,光电监测设备造价随着电缆距离的增加而大幅度上升^[1]。

光纤光栅温度传感器的功能类似于点状的电信号温度传感器,不锈钢外壳封装,热反应时间短,在同一条检测回路中可以串接多个探头,从而实现多个目标温度分布式快速测量。本文采用该技术将经过特殊封装后的光纤光栅温度传感器敷设在若干条 220 kV 电力电缆表面实现温度在线监测。

2 分布式光纤光栅传感简介

光纤布拉格光栅是利用光纤芯层材料的光敏特性,通过紫外激光曝光的方法,使一段本来沿光纤轴线均匀分布的光纤纤芯折射率发生周期性永久改变

(其周期在几百纳米数量级)形成的一种光栅结构的光学器件,简称光纤光栅。

当宽带光通过光纤光栅时,光纤光栅会对此入射光进行选择性的反射,反射一个中心波长与芯层折射率调制相位相匹配的窄带光(带宽通常约为 0.1~0.5 nm),此中心波长称之为布拉格波长 λ ,在外界参量(如应力、温度等)发生变化情况下,光栅栅距(d)发生变化,布拉格波长 λ 随之发生变化,其变化满足如下关系式:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda$$

式中, λ_B 为光栅的布拉格波长; n_{eff} 为光栅的有效折射率; Λ 为光栅条纹周期。光栅栅距 Λ 可通过改变两相干紫外光束的相对角度而得以调整,通过这种方法,就可以制作出不同反射波长的 Bragg 光栅,只有满足 Bragg 条件的光波才能被光纤 Bragg 光栅反射^[2-3]。其传感原理图如图 1 所示。

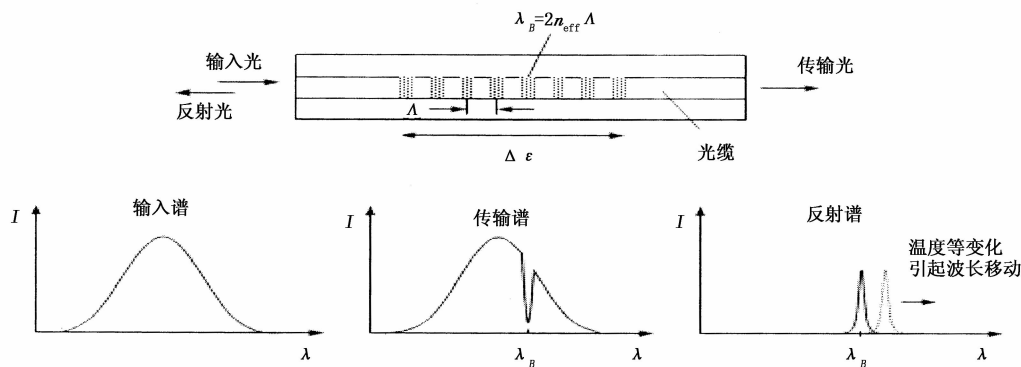


图1 光纤布拉格光栅传感示意图

因此,通过精确地测量光栅反射光的布拉格波长 λ 的变化量,就可以获得光纤光栅处所测物理量。

光纤布拉格光栅传感器的一个主要优点就是:采用对波长信号的数字式测量方法,不随光强度、光纤连接和耦合损耗、光源功率因素的影响,能方便地使用波分复用技术在一根光纤中串接多个布拉格光栅进行分布式测量。

3 光纤光栅传感器的优化设计

裸光纤光栅温度传感器的灵敏度只有 0.010 nm/°C,传感器受到温度作用时,光纤光栅的反射波长变化较小,不能直接将其用于实际工程中,这就需要将光纤 Bragg 光栅进行增敏封装设计。

本系统的光纤光栅传感器采用热膨胀系数较大的薄片铝板作为基底材料,铝的热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。首先对光纤 Bragg 光栅进行预张和固化,

接着把光纤 Bragg 光栅套入石英管中,两端用环氧树脂封装,然后把石英管放在薄片铝板的凹槽中,石英管底部用耐高温胶封装固定于凹槽中。传感器的形状为薄条状,尺寸为 10 mm × 40 mm,这种结构设计有利于在电力电缆接头进行固定安装,并且可以线性提高光纤光栅的伸缩量,其基本结构如图 2 所示。这种封装的传感器具有较好的线性度,其热灵敏度为裸光纤光栅的 3.5 倍,测量精度大大提高,特别适合在电力领域的应用^[4-6]。

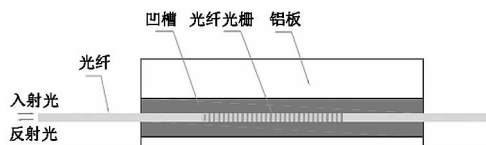


图2 光纤光栅温度传感器结构图

3.1 传感器水域试验

将经过拉伸后的光纤光栅温度传感器放在标准

的水域仪中进行试验,从低温到高温对光纤光栅温度传感器进行循环测试,每次待水域温度完全恒定后,用标准的水银温度计进行比对,观察其温度误差。试验数据如表 1 所示。

表 1 拉伸式光纤光栅温度传感器水域试验数据表

| 时间 | 传感器波长/pm | 传感器温度/℃ | 水银温度计/℃ | 温度误差/℃ |
|----------|----------|---------|---------|--------|
| 13:02:32 | 1319088 | 31.2 | 31 | 0.2 |
| 13:22:32 | 1319295 | 39 | 39 | 0 |
| 13:52:32 | 1319589 | 50.1 | 50.5 | -0.4 |
| 14:19:32 | 1319822 | 59.8 | 60 | -0.2 |
| 14:42:32 | 1320040 | 68 | 68.5 | -0.5 |
| 15:03:32 | 1320248 | 78.5 | 78 | 0.5 |
| 15:30:32 | 1320448 | 84.7 | 85 | -0.3 |
| 16:06:32 | 1320796 | 99.7 | 99.5 | 0.2 |

3.2 线性分析

将表 1 中光纤光栅传感器不同时刻的波长及对应温度关系绘制成曲线如图 3 所示。

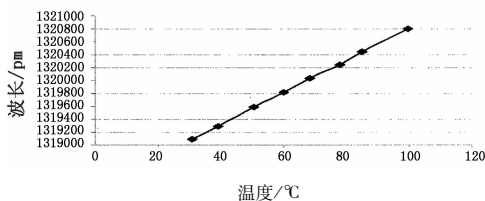


图 3 拉伸式光纤光栅温度传感器线性曲线

由图 3 可以看出,经过增敏封装后的光纤光栅温度传感器从低温到高温,依然能够保持良好的线性度。

3.3 误差分析

将表 1 中任意一时刻的光纤光栅传感器的温度视值与对应水银温度计刻度值绘制成曲线如图 4

所示。

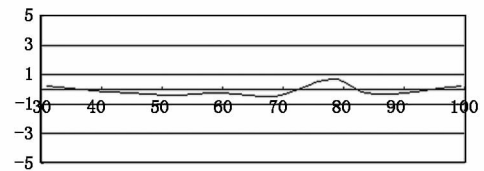


图 4 拉伸式光纤光栅温度传感器温度误差曲线

由图 3、图 4 可知:拉伸式光纤光栅温度传感器在保持良好线性度的同时,其测温精度大大提高,基本上可以保持在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

4 工程应用及结果

4.1 项目概况及布局

在某高压研究院超高压电缆实验室户外场有若干段 200 m 左右的 220 kV 被测电力电缆,经模拟电缆区、户外场、电缆隧道、模拟工井及地理等区域。将经过优化后的光纤光栅温度传感器沿电缆方向紧贴护套表面敷设,采用特殊加工的绝缘胶木条做表面保护,绝缘胶木条内涂导热硅脂,再用绝缘胶带将绝缘胶木条和探头捆扎在电缆上,所有被测电缆及接头均要求安装光纤光栅温度传感器,并与热电偶进行测温对比试验。

4.2 传感器一致性测试

由图 3 可知,传感器在实验室内的线性度较好,但在实际工程应用中,不同的包绕方式和用作保护用的胶木条、胶带以及导热硅脂都有可能对传感器性能发生变化,因而在安装完毕后有必要对其一致性作相应的测试。

将被测高压电缆进行循环加热试验,并记录连续运行若干个周期的数据,随即抽取任意 4 个光纤光栅温度传感器的测试数据来对传感器的一致性进行分析,其曲线分析结果如图 5 所示,4 个传感器分别对应电缆不同部位 02 ~ 06 号温度曲线。

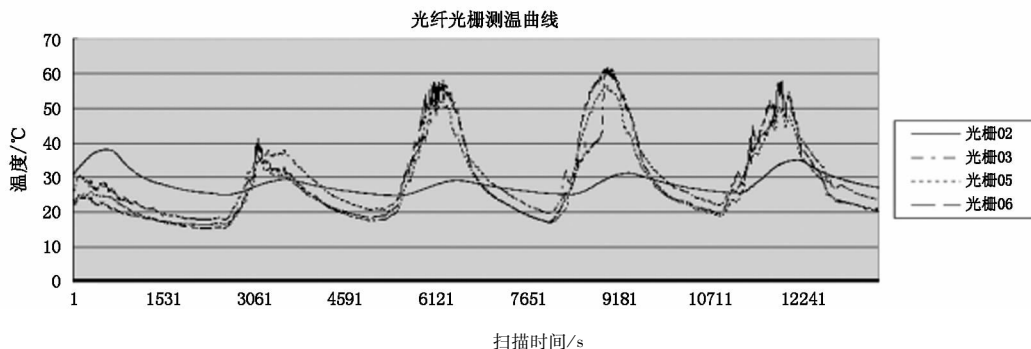


图 5 电缆不同部位的光纤光栅测温曲线

由图 5 可知,无论是在环境温度 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,还是在试验高温区 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,七只光纤光栅传感器的一致性

均较好,这表明安装后的温度传感器线性度依然较好。

4.3 传感器精度测试

由于该试验厂内的高压电缆需要循环加热实验,对温度的一致性和精度要求较高,考虑到传统的电信号传感器具有测温精度高、反应快的特点,

在电缆外护套敷设光纤光栅传感器的地方同时安装高精度的热电偶进行测温对比试验。图6为处于电缆同一位置上的光纤光栅与热电偶测温对比曲线。

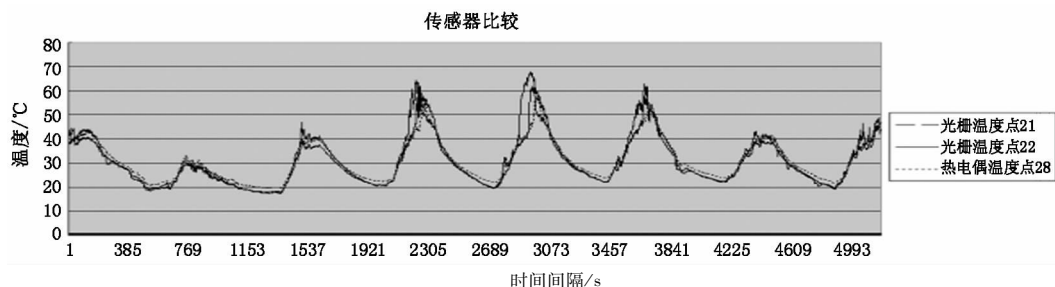


图6 光纤光栅与热电偶测温对比曲线

从以上曲线分析可知:无论是在低温、环境温度还是相对高温区,敷设在电缆护套表面的光纤光栅测温探头在保持良好一致性的同时,和热电偶的温度测试曲线比较吻合,最大温差保持在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。由此可见,光纤光栅测温技术在电力电缆领域的应用是可取的,其测温精度也较高,值得推广。

4.4 长期稳定性测试

该试验场户外高压电缆于2009年12月28日成功地安装了分布式光纤光栅在线测温系统,至今已经运行整整一年的时间。通过对一年来的监测数据进行分析和整理,除了少数传感器因人为损坏以外,其他绝大部分传感器的测温一致性均较好,其测温精度也能够满足电力系统的要求。

5 电缆绝缘测试

电缆绝缘故障后,常伴随一些特殊现象,如在击穿部位及其附近温度会异常升高。此时如能提前检测到此现象,即可避免事故的发生。

在一条约20 m的10 kV XLPE单芯电缆护套表面敷设8个光纤光栅温度传感器,确定好几个重点的位置,在电缆两头装配好相应的电缆终端,然后对其施加工频电压,并以1 kV/min的速度逐渐升压。当电压升至102 kV时,4,5,6号传感器出现3个波峰,继续升高电压,波峰越来越明显,幅值越来越高,大约30 min后,电缆击穿。此时3个传感器的温度幅值分别为 $27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中5号传感器的幅值最高(如图7所示)。停电后检查发现击穿位置正好就在5号传感器附近,这与5号幅值最高正好吻合。

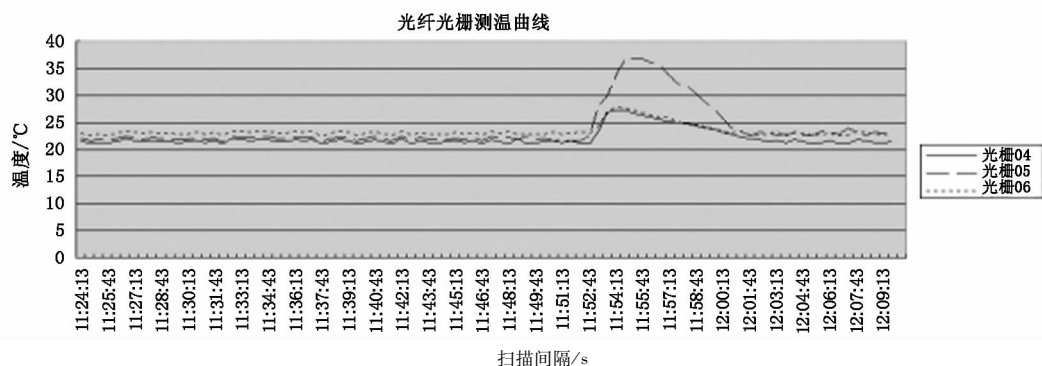


图7 电缆绝缘测试曲线

试验表明分布式光纤光栅测温技术为电缆绝缘在线监测提供了一种新的思路和方法。

6 结语

分布式光纤光栅温度传感作为一种新型的温度监测技术,具有比较明显的特点:容易实现长距离大范围多点测量,安装简单,测温精度高,运行可靠;通过监测电缆护套表面的温度,为电力部门控制电缆载流量提供可靠依据;为电缆绝缘在线监测提供了

新的技术手段。

总之,该技术在电缆网络系统中所出现的温度奇异点的识别、系统实时负载能力的计算、电网短期超负荷能力的计算、电缆的载流量最优化配置以及实现负荷的经济调配等方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Li Jun. Application of optical fiber grating temperature

- sensing system to on-line monitoring for power cables[J]. East China Electric Power, 2005, 33(12): 61 - 63. (in Chinese)
- 李军. 光纤光栅测温系统在电力电缆温度在线监测中的应用[J]. 华北电力, 2005, 33(12): 61 - 63.
- [2] Liu Yang, Wang Xiaobing, Sun Bin, et al. Study on fabrication methods of fiber grating[J]. Lasr & Infrared, 2007, 37(4): 348 - 354. (in Chinese)
- 刘洋, 王小兵, 孙斌, 等. 光纤光栅制作技术研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(4): 348 - 354.
- [3] Yan Shi, Ding Ao, Ren Liang. Study on the optical characteristic of FBG temperature sensor[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(2): 250 - 253. (in Chinese)
- 阎石, 丁傲, 任亮. 光纤 Bragg 光栅温度传感器光学特性研究 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(2): 250 - 253.
- [4] Zhan Yage, Cai Haiwen, Geng Jianxin, et al. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 952 - 955. (in Chinese)
- 詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究 [J]. 光子学报, 2004, 33(8): 952 - 955.
- [5] Zhang Yanjun, Wang Haibao, Chen Zegui, et al. Study on FBG sensor steel capillary packaging technique and sensing properties [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 53 - 55. (in Chinese)
- 张燕君, 王海宝, 陈泽贵, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 53 - 55.
- [6] Yu Xiujuan, Yu Yonglong, Zhang Min. Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9): 1325 - 1327. (in Chinese)
- 于秀娟, 余有龙, 张敏. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究 [J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1325 - 1327.

