

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.03.059

准分布式光纤传感输电线路安全监测技术

张歆,王延祥,王瑞琪,唐杰杰,范德胜,陈少达,陆飞飞

(国网江苏徐州供电公司,江苏 徐州 221005)

摘要:针对电力行业安全监测技术中常用的电学传感器易受干扰的问题,设计了一种基于抗弯拉光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器和波分复用(WDM)技术的准分布式输电线路安全监测系统。采用不受力的两端点粘封装方式对传感器进行封装,解决了温度与应变交叉敏感的问题。采用光纤布拉格光栅串并联加波分复用的方式,实现单系统320个测点的同时监测。试验结果表明,所研制的光纤布拉格光栅温度传感器灵敏度为11.2 pm/°C,可用于输电线路温度的长距离实时在线监测,满足电力系统安全运行监测的需求。

关键词:光纤传感器;光纤光栅;温度;输电线路;安全监测

中图分类号:TP212.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)03-0232-03

Security Monitoring Technology for Transmission Lines Based on Quasi-distributed Optical Fiber Sensors

ZHANG Xin, WANG Yanxiang, WANG Ruiqi, TANG Jiejie, FAN Desheng, CHEN Shaoda, LU Feifei

(State Grid Jiangsu Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, China)

Abstract: To overcome the vulnerability to interference of electrical sensors commonly used in power industry safety monitoring technology, a quasi-distributed transmission line safety monitoring system based on stretch-proof fiber Bragg grating (FBG) temperature sensor and wavelength division multiplexing (WDM) technology were designed. The sensor was encapsulated by pasting two end points without stress, which resolved the cross-sensitivity troubles between temperature and strain. By the series-parallel connection method of FBG sensors and with the WDM technology, the simultaneous monitoring of a single system over 320 measurement points was achieved. The test results show that the developed FBG temperature sensor has a sensitivity of 11.2 pm/°C and can be used for long-distance real-time on-line temperature monitoring of transmission line to meet the requirements of power system safety operation monitoring.

Keywords: optical fiber sensors; fiber grating; temperature; transmission line; safety monitoring

0 引言

人类的日常生活和工农业生产都与电力系统息息相关。电力的输送主要依靠架空输电线路或地下电缆。当输电线路中流过一定的负载电流时会产生发热现象,随着负载电流的增大输电线路的温度也愈来愈高,一旦温度过高会导致短路、火灾甚至是爆炸等严重的安全事故。通常,输电线路表面温度不超过60°C基本是安全的。为了实现电力系统的安全运营,必须对输电线路的温度进行实施精确的监测。

目前,高压输电线路安全监测主要依靠人工巡检和布设电信号传感器的方式进行。人工巡检的方式代价高、效率低而且不能实时监测,电学传感器一般采用有源电信号传感器结合无线网络传输数据。然而电学传感器易受电磁场干扰,还存在布线复杂、安装维护困难、绝缘性差等问题^[1-2]。光纤传感是一种光学传感测量技术,体积小、重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰、易组网等优点使其在电力系统安全监测中具有良好的应用前景。近年来,国内外的研究者报道了多种光纤传感技术在电力领域中的应用,包

括电缆测温、电力设备测温、线路覆冰监测、微风振动和电力系统的气体监测等^[3-7]。

虽然光纤传感器应用于电力系统安全监测有诸多优势,但光纤本质上是一种导光玻璃纤维,其机械强度较低,在实际使用时通常需要通过金属封装结构对光纤进行保护,才能使传感器适应各种工况^[8-10]。对于光纤光栅温度传感器来说,感测温度信息的栅区如果不加以保护或封装,则光栅极易受到外界应力作用从而发生断裂,如果加了保护层或封装结构就会导致热传导特性的改变,影响其响应速度和灵敏度。因此,本文设计了一种基于抗弯拉光纤光栅温度传感器阵列和波分复用(WDM)技术的准分布式输电线路安全监测系统,实现单系统320个测点的同时监测,可用于输电线路温度的长距离实时在线监测,能够满足电力系统安全运行监测的需求。

1 传感器设计

1.1 温度传感器原理

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)是通过改

第一作者简介:张歆(1975—),男,江苏邳州人,高级政工师,硕士,研究方向为电力系统通信管理。

变光纤纤芯的折射率使其产生周期性变化而形成的光栅。当宽带光源入射到 FBG 中时,满足布拉格条件的光被 FBG 反射回来,反射光的中心波长称为布拉格波长,满足下式:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} A \quad (1)$$

式中: A 为光栅周期; n_{eff} 为光栅的有效折射率。环境温度和应变都会导致 FBG 有效折射率和光栅周期的变化,从而引起中心波长的漂移,即 FBG 对温度变化和应变同时敏感。布拉格波长的变化可以表示为

$$\Delta \lambda_B = \frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon} \varepsilon + \frac{\partial \lambda_B}{\partial T} \Delta T \quad (2)$$

式中: T 为温度; ε 为应变。

当 FBG 仅受温度影响时,热光效应和热膨胀效应会分别使有效折射率和光栅周期发生改变,变化关系可以表示为

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dT} \right) dT \quad (3)$$

式中: $\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$ 为热光系数 ξ ; $\frac{dA}{dT}$ 为膨胀系数 α 。令 FBG 灵敏系数 $K_T = \xi + \alpha$, 则式(3)可表示为

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = K_T dT \quad (4)$$

式(4)即 FBG 中心波长变化与温度变化之间的关系,这也是 FBG 用于温度传感的基本原理。FBG 对温度的传感特性系数是一个与材料相关的常数,使得 FBG 对温度信息有较好的线性响应。当环境温度发生变化时,只需根据光栅中心波长的变化量即可得到环境温度信息。需要注意的是,FBG 用作温度传感器时需保证 FBG 不受应力应变的影响。

1.2 传感器阵列及解调系统设计

在基于多光纤光栅串联方案的准分布式光纤传感系统中,需要在单根光纤上串联多个 FBG 传感器。光纤传感系统一般采用的复用技术包括波分复用、时分复用、空分复用等。由于光纤光栅传感系统以传感器反射中心波长的漂移量为接收信号,所以主要采用波分复用技术。波分复用是根据光源光谱带宽,对不同的光纤布拉格光栅传感器进行光谱编码。发送端将多个波长的光耦合到传感光纤中,传感光纤上布设具有不同中心波长的 FBG,接收端将不同波长的光信号分离解调。通过检测和分析各个传感器中心波长的漂移情况,可知不同传感器测量区域的温度变化情况。

根据 FBG 的温度传感特性,中心波长为 1550 nm 的石英光纤光栅的温度灵敏度约为 11.2 pm/°C,其有效测温范围通常在 -40°C ~ 200°C。而对于电网输电线路而言,当线缆外皮温度不超过 60°C 基本是安全的,超过 70°C 则可认为有危险。因此,对于挂载于输电线路上的光纤温度传感器而言,多 FBG 串联的布设方式只需使相邻的两个 FBG 中心波长相差 5 nm,即可确保温度变化导致的中心波长漂移不会互相影响。这样,在一个通道上就可串联 10 个 FBG 传感器,使用 32 通道解调系统,可实现 320 个测点的准分布式温度监测系统,如图 1 所示。

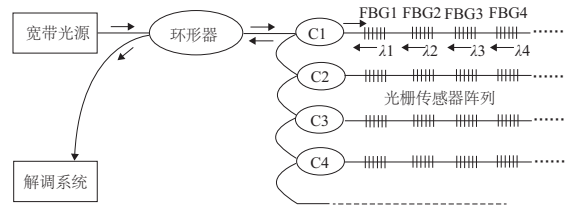


图 1 FBG 传感器阵列示意图

由于普通 FBG 传感器较为脆弱,在安装施工时极易因操作不当或其他意外因素导致传感器断裂失效,而在电网的长期挂网使用过程中,也易因线缆震动或摆动导致受应力过大被拉断。因此,抗弯拉性能对于光纤光栅传感器的工程施工影响很大,对传感器安装后的长期正常使用也具有较大影响。本文使用的光纤光栅为抗弯拉光纤光栅,可以有效地改善普通 FBG 传感器的机械强度。

光纤光栅传感器阵列通过光开关接入解调系统,解调模块采用全息体相位光栅探测阵列技术。如图 2 所示,输入光信号经过准直透镜后被全息体相位光栅分光,再经聚焦透镜聚焦到光电探测器上,探测器输出的电信号经处理电路处理后输出至上位机。整个解调系统采用阵列式探测,无机械活动部件,抗震动性能好,体积小,测量精度高。

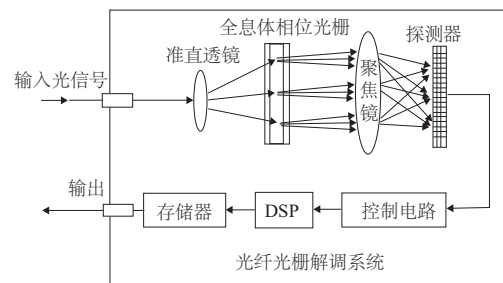


图 2 解调系统示意图

2 实验结果与分析

经过前期的理论分析,传感器阵列的每一个通道都分别选用了中心波长为 1 525 nm、1 530 nm、1 535 nm、1 540 nm、1 545 nm、1 550 nm、1 555 nm、1 560 nm、1 565 nm、1 570 nm 的抗弯拉 FBG,共 32 通道 320 个 FBG 传感器。每个通道上的 10 个传感器串联,并通过光纤跳线连接至解调系统各个通道上。

传感器的安装过程如下:1)用砂纸打磨的方式将线缆表面顽固污渍部分去除,再用酒精试剂将线缆表面油污和灰尘等去除干净;2)使用夹具或胶带将 FBG 固定在粘贴区,使其保持自然伸直状态,避免 FBG 受到应力影响;3)用毛刷将丙烯酸酯胶黏剂均匀涂抹在 FBG 栅区两端外侧的单模光纤上,覆盖光纤后用胶带固定,保持 24 h 的固化时间。这种两端点粘的方式可以有效避免传感器受到应力应变的干扰。

首先在实验室内对一段长约 10 km 的线缆进行测试,实验环境的相对湿度为 35%,室温为 30°C。使用恒温加热台对部分传感器布设区域进行局部加热,并且使用多通道热电偶作为温度标准计。由于传感器数量太多,本文选择通道 1 中的 FBG1-FBG10 作为展示对象,其初始状态分别为 1 525.073 nm、1 530.189 nm、1 534.979 nm、1 540.133 nm、

1 544.995 nm、1 550.045 nm、1 555.102 nm、1 559.904 nm、1 565.000 nm、1 569.932 nm。将恒温加热台的温度分别设定为 30℃、40℃、50℃、60℃、70℃、80℃、90℃、100℃,每次设定温度后等待 10 min 使加热台温度达到恒定,然后记录数据,得到传感器在 30℃~100℃ 范围内间隔 10℃ 的响应结果。传感器中心波长随温度的变化情况如图 3 所示。为了便于观察,图 4 展示了 FBG3 和 FBG4 的中心波长随温度的变化。可见,随着环境温度的升高,传感器的中心波长呈线性增大。

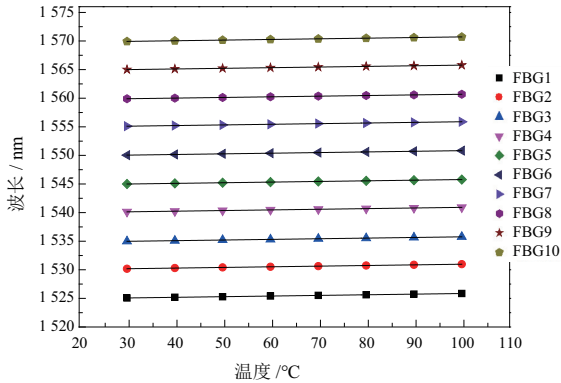
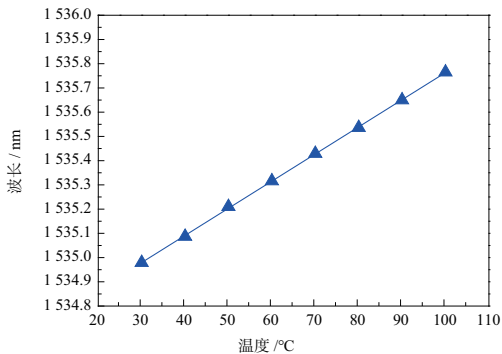
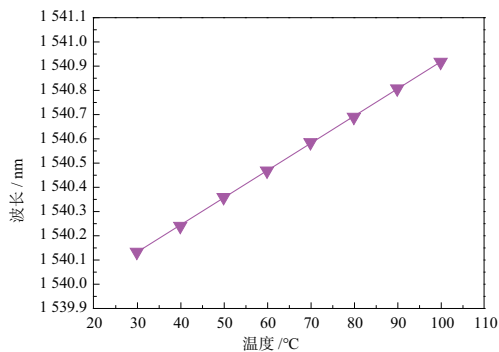


图 3 传感器中心波长随温度的变化



(a) FBG3 的响应



(b) FBG4 的响应

图 4 FBG3 与 FBG4 的中心波长随温度变化图

分别用 x 和 y 表示温度和波长值,对采集到的数据进行 $y=ax+b$ 形式的线性拟合,可得拟合直线的参数如表 1 所示。其中,FBG1 的响应特性拟合直线为 $y=0.01112x+1524.74175$,拟合直线斜率的物理意义就是温度每变化 1℃ 波长飘移 0.01112 nm,也就是说 FBG1 的温度灵敏度

为 0.01112 nm/℃,即 11.12 pm/℃。FBG1-FBG10 的斜率平均值约为 0.0112,即平均温度灵敏度为 11.2 pm/℃。

表 1 传感器响应特性拟合直线的参数

传感器	斜率 a	常数 b
FBG1	0.01112	1 524.741 75
FBG2	0.01128	1 529.846 83
FBG3	0.01120	1 534.643 50
FBG4	0.01123	1 539.794 94
FBG5	0.01120	1 544.659 00
FBG6	0.01121	1 549.710 14
FBG7	0.01113	1 554.771 30
FBG8	0.01119	1 559.569 76
FBG9	0.01120	1 564.662 15
FBG10	0.01127	1 569.592 81

为验证这种基于光纤光栅阵列输电线路温度监测系统的有效性,将测试电缆架设安装于室外测试现场。在解调系统的上位机软件界面设置各传感器编号 FBG1-FBG320,根据上述测试结果分别设置各传感器的一次项系数和常数项以及初始中心波长值,并设置为数据记录间隔为 1 h,系统自动记录并输出温度数据。测试当日气温为 22℃~31℃。自早 8:00 起至晚 22:00 测得的电缆表面温度数据如图 5 所示,温度最高值为 37.8℃。由于传感器数量过多,本文选择前 4 个通道的传感器 FBG1-FBG40,测得的温度数据绘制成如图 6 所示的三维变化曲线,从图中可以清晰地看出电缆表面在不同时刻的温度情况。

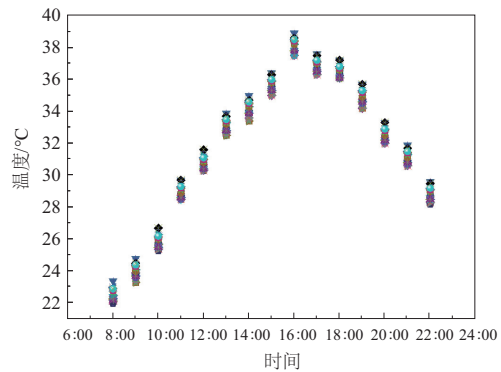


图 5 传感器阵列测得的电缆表面温度数据

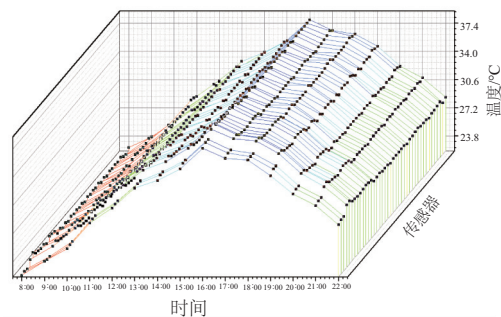


图 6 前 4 通道传感器 FBG1-FBG40 的实测数据

(下转第 239 页)

胶设计,重新验证横向振动实验,对比衰减率,以此获取更准确优化的拧紧工艺和螺栓设计,为后续工艺协同发动机设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] 汤春球,张继伟,莫易敏,等. 扭矩转角法工艺与检测方法[J]. 机械设计与研究,2018,34(6):103-108.
- [2] 聂晓东,胡军,李旋旋,等. 拧紧工艺对螺栓预紧力影响的实验研究[J]. 中国工程机械学报,2019,17(1):75-78.
- [3] 孙贵青,赵哲,杨法立,等. 某发动机盘轴扭矩-转角连接法应用试验[J]. 航空制造技术,2019,62(9):76-79,93.
- [4] 解慧,王峰会,张凯,等. 振动状态下螺栓松动行为及原因分

析[J]. 现代机械,2017(3):44-47.

- [5] 刘文光,林炜彦,贺红林. 预紧力对紧螺栓连接板位移载荷响应的影响[J]. 润滑与密封,2018,43(3):75-80,108.
- [6] 惠焯,黄玉美,李艳. 切向载荷下螺栓结合部静特性分析及试验[J]. 中国机械工程,2015,26(7):892-898.
- [7] 王传华,王文莉,林清源,等. 基于精确建模的横向振动工况下螺栓松动机理研究[J]. 宇航总体技术,2018,2(4):43-51,64.

收稿日期:2020-05-29

(上接第 215 页)

点几乎沿空间最短直线运动,其控制效率已经远大于机器人自带控制系统。可以认定,该革新控制系统对六轴机器人的自主控制有积极意义,且在未来高精度遥控操作、星际远程作业的全自主程控作业等应用场景,该控制算法有技术推广的必要性。

参考文献:

- [1] 李伯基. 基于八轴六联动控制复合机器人的技术集成及应用研究[J]. 机电工程技术,2020,49(8):181-183.
- [2] 陈阳,刘振国,金武飞,等. 六轴工业机器人自动回初始位的控制算法研究[J]. 制造业自动化,2020,42(6):57-60.
- [3] 郭跃飞. 基于视觉识别的机器人自动抓取设备研究[J]. 建材技术与应用,2020(1):36-37.

- [4] 郭如峰,梅雪川,叶敏,等. 超声波焊接机器人在汽车外饰件中的设计与应用[J]. 现代制造技术与装备,2019(12):15-18.
- [5] 张翔,韩建海,李向攀,等. 轴孔装配作业机器人力控制系统设计[J]. 机械设计与制造,2019(12):63-66,70.
- [6] 严均,周焯辉. 六轴工业机器人控制系统的设计与实现[J]. 科技资讯,2019,17(33):78-79,82.
- [7] 郭宏岩. 六轴机器人在汽车头枕生产中的应用及展望[D]. 沈阳:沈阳市科学技术协会,2019.
- [8] 尹春丽,刘波,李颖,等. 一种基于六轴惯导的配电网带电作业机器人遥操作控制系统[J]. 自动化博览,2019(6):54-56.
- [9] 吴旦夫. 六轴机器人与变位机协调控制的方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.

收稿日期:2020-12-09

(上接第 234 页)

3 结语

本文研制了基于光纤光栅阵列的输电线路温度监测系统,单系统可实现 320 个测点的同时监测。研制的光纤光栅温度传感器灵敏度为 11.2 pm/°C。试验结果表明,该技术可用于输电线路温度的长距离实时在线监测,其性能能够满足电力系统安全运行监测的需求。

参考文献:

- [1] 陈连凯,来文青,沈扬,等. 可扩展式高压输电线路光纤点式传感网络技术研究[J]. 水电能源科学,2013,31(11):216-219.
- [2] 徐云水,沈龙,梁仕斌,等. 基于光纤传感的输电导线温度监测[J]. 云南电力技术,2018,46(4):79-82.
- [3] LU P, BYERLY K, BURIC M, et al. Distributed fiber-optic sensor for real-time monitoring of energized transformer cores[C]// SPIE Defense + Security, Proc SPIE 10194, Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IX,

Anaheim, California, USA: 2017, 1019: 101941S.

- [4] LIANG Y, LIU Lidong, HUANG Li, et al. Research on noise reduction method of long distance optical fiber sensor for transmission line on-line monitoring [C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [5] 高明,赵振刚,李英娜,等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜监测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(12):51-59.
- [6] 祝视,曾小辉,魏培,等. 分布式光纤传感技术在电力系统中的应用分析[J]. 湖南电力,2019,39(6):1-4.
- [7] 徐涛. 基于分布式光纤振动传感的高压电缆防外破监测预警系统应用[J]. 东北电力技术,2020,41(6):30-33.
- [8] 薛渊泽,王学锋,唐才杰,等. 高温再生光纤光栅温度传感器封装技术[J]. 传感器与微系统,2019,38(5):49-51.
- [9] 任越,张钰民,钟国舜,等. 管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外,2020,50(5):598-601.
- [10] 张佳斌,贺庆,张青超. 光纤光栅传感器阵列在空间温度场测量中的应用[J]. 激光与红外,2020,50(6):724-728.

收稿日期:2020-12-28