

·光电系统·

## 基于光纤光栅温度传感器的导线负载检测系统

罗舒阳<sup>1</sup>, 林蓝波<sup>2</sup>, 姜明顺<sup>1</sup>, 隋青美<sup>1</sup>

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 山东省产品质量监督检验研究院, 济南 250102)

**摘要:**在电流回路中,当通过导线的电流过高时,会导致线路高温,严重时可能引起火灾。因此实时监测电流线路的温度,对预防线路过载以及火灾的发生具有重要的意义。在理论分析光纤光栅温度传感机理的基础上,设计了用于导线负载检测的传感系统。在0~5 A范围内,实验研究了光纤光栅温度传感器中心波长变化与导线负载之间的关系,验证了导线负载检测的可行性,为导线负载的实时监测,以及断路、短路故障的判断提供了一种新的方法。

**关键词:**光纤光栅; 导线负载; 温度检测; 响应时间

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-02-0014-03

## Wire Load Detection System Based on Optical Fiber Grating Temperature Sensor

LUO Shu-yang<sup>1</sup>, LIN Lan-bo<sup>2</sup>, JIANG Ming-shun<sup>1</sup>, SUI Qing-mei<sup>1</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Institute of Product Quality Inspection, Jinan, 250102, China)

**Abstract:** In the current circuit, when the electric energy transmits in wire, the wire will generate heat because of the high current through it, the high temperature will even result in a fire. Therefore, monitoring the current of the wire has important significance for the prevention of the overload and the fire of the wire. Based on the related theories of optical fiber grating temperature measurement, a sensing system for wire load detection is designed. The relationship between the changing of the center wavelength of the fiber grating temperature sensor and the wire load in 0~5 A is researched in experiments. Experimental results show that wire load detection is feasible and provides a new method for real-time monitoring of wire load and the judgment of open and short circuit fault.

**Key words:** optical fiber grating; wire load; temperature detection; response time

电气线路一般包括三部分:金属导体、绝缘层和保护层。其中绝缘层和保护层主要由高分子有机材料构成,具有热不稳定性,在持续高温的作用下容易老化受损。因此电气线路有规定的安全载流量,以限制通过导线的电流值。当高于安全载流量的电流通过导线时,会使线路温度高于其正常工作温度,加快绝缘材料的老化速度,产生电流过载的现象<sup>[1-3]</sup>。严重的电流过载可引起高温,引发火灾。因此实时监测电流回路导线的温度,可以及时发现温度异常,实时监测导线负载,预防严重电流过载现象的发生,从而避免安全事故的发生。传统

的温度监测手段如热电偶测温和红外测温技术比较成熟,但抗电磁干扰和绝缘能力较差。而光纤光栅传感器具有本质绝缘、抗电磁干扰、耐腐蚀、性能稳定等优点,可以实时有效的监测电流回路的导线温度<sup>[4-7]</sup>。

基于光纤光栅温度传感器技术,提出一种导线负载的实时监测系统,将光纤光栅与电气线路固定在一起,导线在通电过程中积累热量并通过热传导将热量传递给光纤光栅,通过实时测量光纤的波长,可以判断电气线路的负载状况<sup>[8]</sup>。最后在实验室条件下,分别对系统施加1~5 A的电流进行模拟

实验,对实际应用中的导线负载检测系统提供了理论和实验支持。

## 1 光纤光栅测温原理

光纤光栅是光纤由紫外线激光光束照射而在被照射区域形成的一段折射率周期变化的区域。光纤 Bragg 光栅的本质是在纤芯的内部形成一个窄带滤波器,对外界温度的感知是通过波长调制实现的<sup>[9-12]</sup>。光沿着光纤的纤芯传播时,在 Bragg 光栅发生散射,若满足相位匹配条件,即可得到反射光返回入口,其他不满足的光将投射出光纤<sup>[13-14]</sup>。反射回来的光会累加形成一个反射峰,其最高点所对应的波长即为 Bragg 光栅的中心波长。光纤 Bragg 光栅的相位匹配条件为<sup>[11]</sup>

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

式中,  $\lambda_B$  为 Bragg 光栅的中心波长;  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率;  $\Lambda$  为光纤光栅周期。

对式(1)取微分得

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2)$$

由上式可知,当光栅有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和光栅周期  $\Lambda$  改变时,布拉格光栅的中心波长  $\lambda_B$  也会相应发生改变<sup>[15]</sup>。

当外界温度发生改变时,由于光纤光栅材料的热膨胀效应和热光效应的影响,光纤布拉格光栅的光栅周期  $\Lambda$  与光栅的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  也会发生变化,从而引起布拉格光栅中心波长  $\lambda_B$  的变化。式(2)对温度量求导可得

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2 \times \left( n_{\text{eff}} \times \frac{d\Lambda}{dT} + \Lambda \times \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \right) \quad (3)$$

式中,  $\frac{d\Lambda}{dT}$  是由于热膨胀效应导致的布拉格光栅周期的变化;  $\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$  是由热光效应引起的光栅有效折射率的变化。理想情况下,光纤光栅的热光系数和热膨胀系数均为常数<sup>[16]</sup>,这可以保证光纤光栅温度传感良好的线性关系。因此当外界温度变化时,通过测量布拉格光栅的中心波长的位移情况  $\Delta\lambda_B$ ,即可获得检测点的温度变化情况。此即为光纤布拉格光栅测温的基本原理。

## 2 导线负载监测方案设计

如图1所示,导线负载监测实验系统主要包括

光纤布拉格光栅、光纤光栅解调仪(带光源)、上位机、导线以及为电流回路提供电流的恒流源。光纤光栅传感器通过环氧胶与导线粘在一起,光纤光栅解调仪发出光信号,并接收经过光纤布拉格光栅反射回来的光信号,将光信号进行调制解调辨识光纤光栅的中心波长后传入上位机,由上位机进行数据的显示与存储处理。

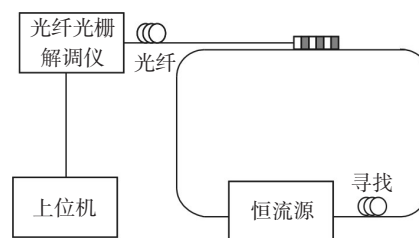


图1 基于光纤光栅温度传感器的导线负载监测系统

## 3 实验测试及结果分析

实验在室温环境下进行,环境温度为 18 ℃。传感器用环氧胶与电流导线固定,用 SM125 光纤光栅解调仪对光信号进行解调调制。在实验中截取 50 cm 长的导线并串联大功率电阻,连接恒流源,采用恒流模式在大气环境下对导线分别施加 1~5 A 的电流,并通过光纤光栅温度传感器对导线温度进行实时测量,利用上位机分别记录初始状态以及施加各相应电流时波长的变化情况以及稳定时波长的数值。为了检测光纤光栅的响应速度以及测试光纤光栅传感器对导线断路的检测情况,还记录了断开恒流源供电时光纤光栅波长的变化数据,直至波长恢复至室温时的稳定状态。

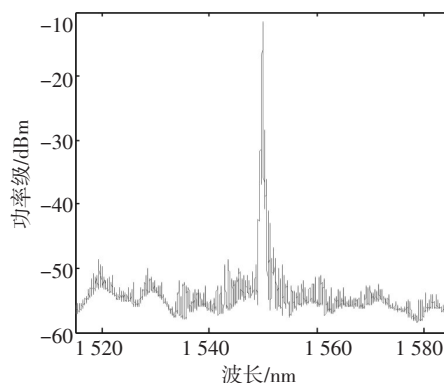


图2 3A 电流稳定状态时光纤光栅的全光谱数据

图2为恒流源向回路施加 3 A 电流时,光纤光栅

温度传感器的反射光谱图。可以看出,光纤光栅传感器具有良好的信噪比,大于 20 dB,中心波长为 1 549.934 3 nm,3 dB 带宽为 0.25 nm。长时间观察,其稳定性小于 0.005 nm,对应温度变化约为 0.5 ℃,因此光纤光栅传感器具有良好的稳定性。

为了验证导线电流负载与光纤光栅中心波长以及导线温度之间的关系,将光纤光栅温度传感器粘贴于导线后,调整恒流源,分别施加 0 A、1 A、2 A、3 A、4 A、5 A 的电流,并在实验中使用高精度温度计在光纤光栅导线的同一位置处检测温度变化情况,记录实验结果,得到光纤光栅中心波长与负载电流变化之间的关系曲线和电流负载与导线温度的对应关系曲线,分别如图 3、图 4 所示。由图 3 可以看出,随着温度的升高,光纤光栅的中心波长向长波方向产生比较明显的移动。由图 4 可以看出,依据温度检测原理的光纤光栅传感器的中心波长变化与导线负载之间具有良好的对应关系,验证了系统实时测量导线负载电流的准确性与可靠性。

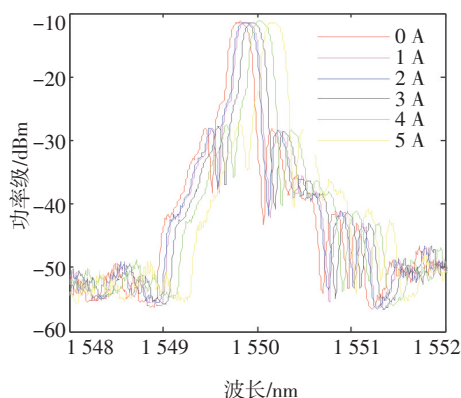


图3 导线通不同电流值时对应光纤光栅中心波长

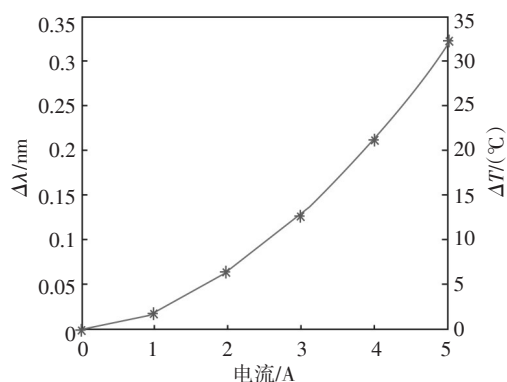


图4 中心波长与电流负载和导线温度的对应关系

此外,为了验证光纤光栅温度传感器对负载电流的响应速度特性,实验中首先设定负载电流为 0 A,待光纤光栅中心波长稳定后升至 3 A,并保持一段时间,待温度再次稳定后,关闭恒流源,使负载电流再回到 0 A,测得整个实验过程中光纤光栅中心波长的变化情况如图 5 所示。可以看出,光纤光栅温度传感器的上升响应时间(A点)为 56 s,下降响应时间(B点)为 63 s。光纤光栅温度传感器对于由导线电流变化引起的温度变化具有良好的响应速度。

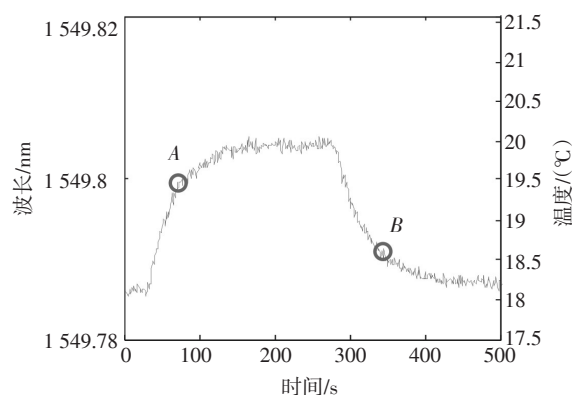


图5 光纤光栅温度传感器响应时间

## 4 结论

导线负载监测对于用电安全具有重要的意义。基于光纤光栅测温的基本原理,通过测量通电导线的温度,实时地监测了通电回路导线的负载状况,提出了一种基于光纤光栅温度传感器的导线负载监测系统。经实验测试,该系统响应迅速准确,可靠性高,可以为工业上实时监测大型电气回路导线负载提供一种新的方法。

## 参考文献

- [1] 陈雁, 张伟. 航天用安装铜导线熔断特性研究[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4):407-410.
- [2] 张学楷. 线路过载电气火灾危险性的分析、预防要求及原因认定[J]. 消防技术与产品信息, 2008, 11: 57-60.
- [3] 莫荣晓, 邓剑波. 电网线路过载原因分析及控制措施[J]. 电源技术应用, 2013, (10):277.
- [4] 贾书丽, 姚国珍. 光纤光栅传感器在电力电缆测温系统中的应用[J]. 广东电力, 2011, 24(6):61-64.

(下转第32页)

说,良好的表面钝化是必不可少的。

### 参考文献

- [1] Zhao J H, Wang A, Altermatt P P, et al. High efficiency PERT cells on high quality N-Type CZ silicon substrates [C]//12<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conf., 2001:19-22.
- [2] Zhao J H, Wang A, Altermatt P P, et al. High efficiency PERT cells on N-Type silicon substrates[C]// 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 2002:218-22.
- [3] Zhao J H, Schmidt J, Wang A, et al. Performance instability in N-Type PERT silicon solar cells[C]// 3<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003: 923-926.
- [4] Macdonald D, Geerligs L, Azzizi A. Iron detection in crystalline silicon by carrier lifetime measurements for arbitrary injection and doping[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(2):1021-1028.
- [5] 宋登元,熊景峰.高效率N型硅太阳能电池技术现状及发展趋势[J]. 半导体光电, 2013, 34(3): 351-354.
- [6] 杨灼坚,沈辉. N型晶体硅太阳能电池最新研究进展的分析与评估[J]. 材料导报, 2010, 24(8):126-130.
- [7] Cousins P J, Smith D D, Luan H C, et al. Gen III: improved performance at lower cost [C]//35<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 2010:823-826.
- [8] Kinoshita T, Fujishima D, Yano A, et al. The approaches for high efficiency HIT solar cell with very thin (< 100 nm) silicon wafer over 23% [C]// 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2011:871-874.
- [9] 闫丽,高华. PC1D方法对铝背场钝化技术的分析[J]. 光电技术应用, 2011, 26(4): 49-52.
- [10] Book F, Weidenmann T, Gloger S, et al. Analysis of processing steps for industrial large area n-type solar cells with screen printed aluminum-alloyed rear emitter and selective FSF [R]. 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2011:1160.
- [11] 陈伟,贾锐,张希清,等. 晶体硅太阳能电池表面钝化技术[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(2):118-127.
- [12] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 39) [J]. Progress in Photovoltaics, 2009, 20(1):12-20.
- [13] Mishima T, Taguchi M, Sakata H, et al. Development status of high-efficiency HIT solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(1):18-21.
- [5] 王虎,李永倩,李欢,等. 光纤温度传感器在电力电缆监测中的应用[J]. 电力系统通信, 2012, 33(3):56-60.
- [6] 祁耀斌,吴敢锋,王月明. 电力电缆光纤光栅实时在线测温传感器优化设计[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(11):3415-3420.
- [7] 张燕君,苏玉玲,韦波,等. 基于光电缆的分布式温度传感网络的实验研究[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 49-54.
- [8] 张燕君,娄俊波,康瑞雪,等. 新型分布式布喇格光纤光栅传感系统的研究[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 88-94.
- [9] Yong-chang F, Tao C, Wen-bin Z, et al. Experimental study on temperature measurement of underground cable by fiber Bragg grating[J]. Power System Technology, 2010, 34(5):212-215.
- [10] Reddy P. A novel method for high temperature measurements using fiber Bragg grating sensor[J]. Optica Applicata, 2010, 40(3):685-692.
- [11] 张燕君,康瑞雪,娄俊波,等. 一种分布式光纤光栅电缆温度传感器[J]. 激光与红外, 2010, 40:405-409.
- [12] 张剑驰,谢光斌. 电力系统测温中光纤光栅的应用研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2013, 35(3):106-110.
- [13] 谭江平,郭金学,秦琴. 光纤温度监测系统的技术分析及其在发电厂中的应用[J]. 企业技术开发:学术版, 2010, 29:6-8.
- [14] 刘继权. 光纤光栅在开关柜温度监测中的应用研究[J]. 电工技术, 2013(4):45-46.
- [15] 甘维兵,王立新,张翠. 分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度[J]. 激光与红外, 2011, 41:577-581.
- [16] B D. Simultaneous strain and temperature measurement using a compact photonic crystal fiber inter-modal interferometer and a fiber Bragg grating[J]. Appl Opt, 2010, 49(32):6232-6235.

(上接第16页)