

· 光电系统与amp;设计 ·

利用光纤光栅监控输电线覆冰

薛 能, 曹月霞, 杨彬彬, 赵勋杰

(苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要:从光纤布喇格光栅(FBG)的原理、特点入手,对光纤光栅传感器监控输电线覆冰情况的可行性进行理论分析和实验研究.分别搭建了单臂和双臂梁实验装置,通过实验研究了光纤布喇格光栅反射波长与梁负重的关系,利用最小二乘法对实验数据进行了拟合,得到了波长偏移量和梁载荷的数学关系,实验结果显示利用光纤布喇格光栅传感器监控输电线覆冰情况是可行的.

关键词:布喇格光栅;光纤传感器;输电线;覆冰预警

中图分类号: TN362; TM755

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)02-0001-04

Application of Fiber Bragg Grating to Monitor Ice on Power Transmission Line

XUE Neng, CAO Yue-xia, YANG Bin-bin, ZHAO Xun-jie

(School of Physics Science & technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Starting from the principles and characteristics of fiber Bragg grating(FBG), the possibility to monitor the ice on power transmission line by using FBG sensors was experimentally and theoretically analyzed. The one-side and two-side simple supported beams were established, the relation between reflected wavelength of FBG and the loading on beams was studied. Then the experimental data was fitted by using least squares and thus the mathematical relation between wavelength offset and the loading on beams were obtained. The result shows that it is practical to monitor the weight of ice on power transmission line by FBG sensors.

Key words: fiber Bragg grating(FBG); fiber sensor; power transmission line; ice monitoring and forecasting

覆冰本是一种自然现象,但是在输电线上覆冰则有可能造成重大的损失.我国记录最早的输电线覆冰事故发生在 1954 年.近年来,输电线覆冰事故时有发生,如 1996 年初,福建省的 35~220 kV 输电线路,因覆冰过重导致线杆倒塌,200 多处输电线断裂.再如 2005 年初华中地区的冰灾,引起湖南境内大量线杆倒塌.此类灾害离我们最近的就是 2008 年 1 月底至 2 月初的南方大范围冻雨,输电线严重覆冰,大量的电线杆由于不堪积冰重压而倒塌,给电力系统造成严重的损坏,极大地影响了工农业生产和人们生活,经济损失惨重.输电线覆冰引起的严重灾害引

起了人们对输电线覆冰预警的极大关注,人们开始探讨输电线覆冰形成机理、研究输电线覆冰预报技术和输电线覆冰去除方法^[1-3].

众所周知,光纤传感器具有电绝缘性能好、抗电磁干扰能力强、耐恶劣环境以及易实现远距离监控等特点.光纤光栅传感器除了具有普通光纤传感器的优点外,还有一些明显优于光纤传感器的地方,主要是它的传感信号是波长调制的,这使得其测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗和光纤老化损耗的影响,并能实现多点分布式大范围测量.此外,光纤光栅体积小、结构简单、成本低,已应用于桥梁、矿

收稿日期:2010-02-10

基金项目:国家大学生创新项目(57315408)

作者简介:薛能(1988-),男,江苏苏州人,就读于苏州大学物理科学与技术学院,研究方向为光信息科学与技术;导师简介:赵勋杰(1960-),女,辽宁人,博士,教授,主要从事光纤传感器和图像信息处理等方面的研究.

井、隧道、大坝、建筑物、舰船系统、海洋、航空和医学领域^[4]. 基于输电线覆冰预报的需要和光纤光栅的优势, 研究了利用光纤光栅监测输电线上覆冰质量的可行性.

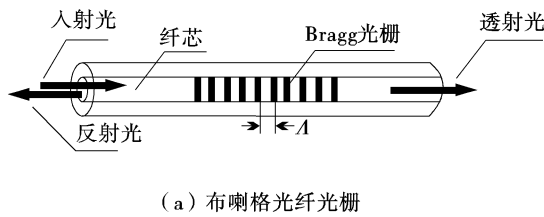
1 光纤光栅测重原理

1.1 光纤布喇格光栅原理

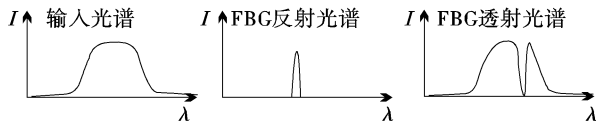
光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 是利用光纤材料的光敏性, 在光纤纤芯内形成空间相位光栅, 其作用实际上是一个窄带滤波器. 当光入射到布喇格光纤光栅中时, 只有特定波长的光能够反射回来, 如图 1 所示. 其反射的中心波长 (布喇格波长) 为

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (1)$$

式中, n_e 是光纤芯区的有效折射率; Λ 为光栅周期, 式(1)称为布喇格条件.



(a) 布喇格光纤光栅



(b) 透射光谱和反射光谱

图 1 FBG 及其透射光谱和反射光谱

由布喇格条件可以看出, 光纤光栅的反射波长 λ_B 与光纤芯有效折射率 n_e 和光栅周期 Λ 有关, 能够引起 n_e 和 Λ 变化的物理量均能够引起反射波长 λ_B 的变化. 因此, 可以通过检测布喇格光栅中心反射波长 λ_B 的偏移来检测外界物理量的变化. 光纤光栅反射波长的变化与外界温度和应力变化的关系为^[5]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

式中, α 为光纤的热膨胀系数; ξ 为光纤材料的热光系数; ΔT 为温度变化量; P_e 为光纤材料的弹光系数; ϵ 为轴向应变.

1.2 布喇格波长与应变的关系

当保持光纤光栅所处环境的温度场恒定时, 应力变化引起的布喇格波长变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon \quad (3)$$

$$P_e = (n_e^2/2)[(1 - \mu)P_{12} - \mu P_{11}] \quad (4)$$

式中, P_e 称弹光系数; μ 为泊松比; P_{11} , P_{12} 是弹光系数. 对于典型的石英光纤, $n_e = 1.46$, $\mu = 0.16$, $P_{11} = 0.12$, $P_{12} = 0.27$, 则 $P_e = 0.22$. 所以, 式(3)可以写为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon = 0.78\epsilon \quad (5)$$

式(5)是应变测量的一般公式.

1.3 测重原理

分析图 2 所示的悬臂梁测重装置的工作原理. 悬臂梁为一端固定, 另一端自由的刚性较强的梁.

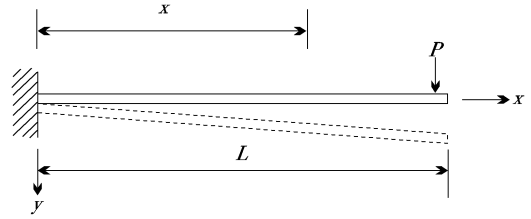


图 2 悬臂梁受力弯曲示意图

当梁负重时产生弯曲, 引起布喇格波长改变. 先从理论上分析布喇格波长与载荷 P 的关系. 设梁的长度为 L , 厚度为 h . 当荷载 P 作用在梁上时, 梁将会产生应变, 悬臂梁上沿 x 轴方向上 x 处的应变 ϵ_x 可表示为^[5]

$$\epsilon_x = \frac{h/2}{R} \quad (6)$$

其中, R 为考察点处的曲率半径. R 与材料的杨氏模量 E 、该点弯矩 M 以及所在截面的关于 y 轴的惯性矩 I_y 的关系为

$$R = \frac{EI_y}{M} \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(3), 得到应变引起的布喇格反射波长的变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\frac{Mh}{2EI_y} \quad (8)$$

假设梁自由端的挠度不大, 且不计梁的自身质量, 弯矩 M 为

$$M = P(L - x) \quad (9)$$

矩形截面梁 I_y 为

$$I_y = \frac{b(x)h^3}{12} \quad (10)$$

其中

$$b(x) = \frac{6(1-P_e)}{h^2 CE}(L-x) \quad (11)$$

式中, $C = \frac{6L(1-P_e)}{h^2 Eb_0}$ 为常数.

由式(8)~式(11)得到载荷引起的布喇格反射波长的变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = CP \quad (12)$$

由式(12)可以看出,波长偏移量与载荷 P 成线性关系.

2 测重实验研究

2.1 实验装置

实验装置由 1 550 nm 宽带光源、悬臂梁、光纤光栅、扫描滤波器、光功率计、隔离器、 2×2 耦合器、跳线、法兰盘等组成,图 3 为实验装置原理图.图 4 为实验使用的单边悬臂梁结构图.悬臂梁的厚度 $h = 6$ mm,长度 $L = 230$ mm,宽度 $b_0 = 30$ mm.为了避免温度变化对布喇格波长的影响,在实验中分别在梁的上表面和下表面粘贴相同的光纤光栅 FBG1 和 FBG2,且光栅的方向相同.宽带光源发出的宽带光经扫描滤波器(波长分辨率 0.2 nm)和耦合器传输到粘贴在梁上的光纤光栅 FBG,FBG 产生的反射光再通过耦合器最后由光功率计测量光强,根据波长-光强度曲线获得峰值反射波长,即光纤光栅的中心反射波长.再根据中心反射波长与负重之间的映射关系测得载荷质量.

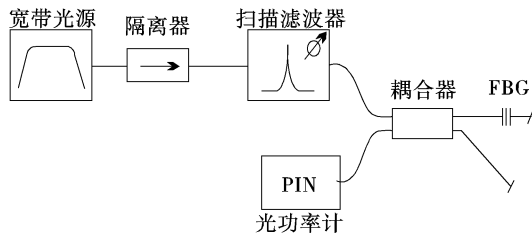


图 3 实验装置原理图

2.2 实验结果及处理

为了得到反射光波长与梁载荷的关系,依次给

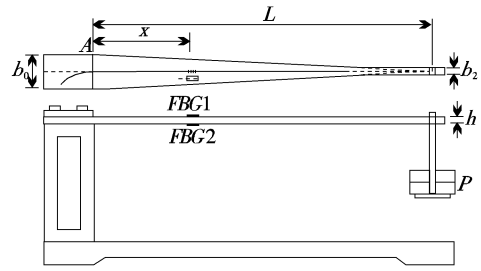


图 4 悬臂梁结构图

梁负重,并逐次增加负重质量,在每一个载荷质量下,测出光栅的峰值反射波长,以重物的质量作为横坐标,反射光的峰值波长作为纵坐标绘制曲线,如图 5 所示.

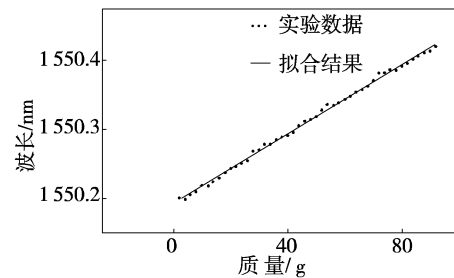


图 5 悬臂梁实验数据和拟合结果

在完成上述实验测试后,对图 5 的实验数据采用最小二乘法进行拟合,得到了拟合曲线方程为

$$\lambda_b = aP + b \quad (13)$$

其中, P 为载荷的质量; $a = 0.002 51$; $b = 1 550.192 43$.曲线拟合结果如图 5 所示.通过实验研究发现,实际情况下,波长偏移量和梁负重之间的关系确实符合先前的理论推导结果,见式(12).

3 光纤光栅监测输电线覆冰的应用

在前面对悬梁臂的情况进行了理论上的分析和实验研究,初步验证了利用光纤光栅监测梁的负重情况的可能性,为了进一步探讨光纤光栅监测输电线覆冰的可行性,对双支点简支梁模型进行实验研究与分析.实验使用的装置与前面基本相同,仍然采用了如图 3 所示实验原理框图,只是将图 4 的悬臂梁换为图 6 所示的简支梁,这里使用的梁与输电线接近,加载荷后弯曲比较大,更接近输电线负重的实际情况.将光纤光栅粘在图 6 中所示的位置上.当给梁加载荷后,梁发生形变,导致光纤光栅中心反射波长发生偏移.这里使用的梁与前面使用的悬臂梁(刚性很强,不易弯曲)差异比较大,更接近实际情况,如

果实验能够验证波长偏移量与载荷质量之间仍然存在一定的函数关系,将对建立光纤光栅输电线覆冰监测系统提供更大的技术支持.

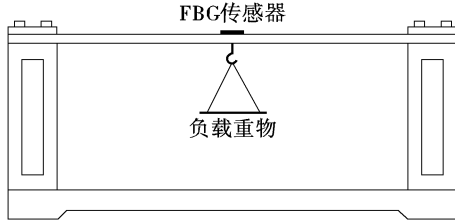


图6 实验采用的简支梁结构图

实验方法与前面相同,给简支梁负重,并逐次增加质量,在每一个质量下,测量光栅的中心反射光波,以重物的质量作为横坐标,中心波长作为纵坐标绘制实验数据,如图7所示.

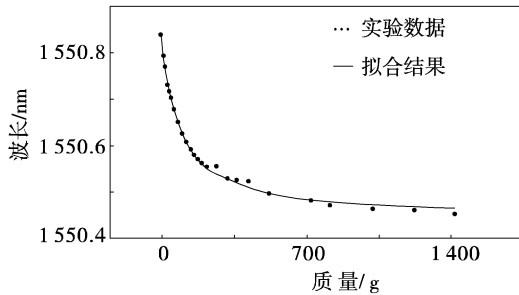


图7 简支梁实验数据和拟合结果

同样采用最小二乘法进行曲线拟合,得到了下面的拟合曲线方程

$$\lambda_b = c + \frac{b}{P+a} \quad (14)$$

其中, P 为悬挂重物的质量; $a = 82.74153$; $b = 33.29861$, $c = 1550.44283$. 曲线拟合结果如图7所示.

从上面的实验结果再次看到,简支梁负重与光纤光栅反射波长同样存在着定量的映射关系,根据这个映射关系,可以通过测量反射光波的波长获得梁上载荷的质量.

4 结 论

根据研究结果,证明利用光纤光栅传感器监控输电线上的覆冰情况从技术上是可行的.此外,由于光纤光栅具有体积小、结构简单、成本低、可以远距离传输、容易实现多点分布式大范围测量等特点,为研制实用的监控系统提供了有利的支持.实际的监控系统可以按图8所示情况进行配置.在输电线适当位置埋入FBG光纤光栅,按照图8所示方式连接

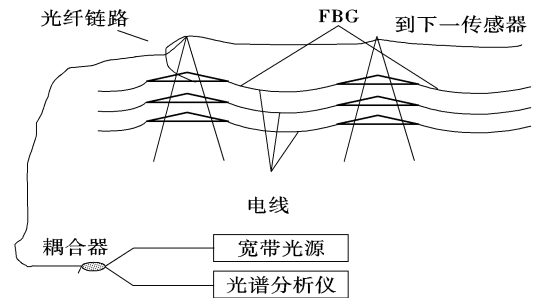


图8 光纤光栅在线覆冰监控系统示意图

至宽带光源与光谱仪上,即可实现远距离在线实时监控输电线的负重情况,可以根据极限载荷质量(可能造成线断或线杆倒塌)设定相应的反射波长偏移警戒阈值,当覆冰质量增加到一定程度时,反射波长偏移到报警波长,此时发出预警信号,以便工作人员采取必要的措施.而温度对反射波长的影响可以通过采用双FBG的结构进行解决.

参考文献

- [1] 张玉环,李德超,王英健. 输电线路覆冰的危害及防护[J]. 电气时代,2008(6):100-102.
- [2] 蔡钢. 电线覆冰小气候特征的分析[J]. 云南电力技术,2009(3):57-58.
- [3] 罗隆福,赵志宇. 高压架空输电线路除冰方法综述[J]. 大众用电,2009(2):10-11.
- [4] 李亮,夏爱军,逯锋兵. 光纤光栅传感技术的优势与应用[J]. 光通信技术,2007(7):62-64.
- [5] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007:51,72.

版 权 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,并加入中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构(包括纸板、光盘版、网络版)及光学期刊网与本刊网站报道时,不再征求作者意见.稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份.