

文章编号:1004-4213(2010)01-0042-5

# 基于 InGaAs 光谱成像技术的光纤光栅 传感器在大坝渗流监测系统的应用\*

陶珺<sup>a,b</sup>, 穆磊<sup>b</sup>, 杜平<sup>b</sup>

(武汉理工大学 a. 理学院 物理系; b. 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 为了实现大坝渗流监测, 提出了一种采用光谱成像技术的光纤 Bragg 光栅传感器和多点传感系统. 基于室内实验结果, 对监测系统可靠性与监测数据准确度进行和多点传感信号分辨因子分析, 结果表明: 用于坝体温度场检测的光纤光栅传感器波长温度响应灵敏度可达  $0.0091 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ; 由光源带宽决定的测试系统可实现多个传感器的复用. 实践表明: 采用光纤光栅传感系统可进行大坝渗流自动监测, 特别是在系统防雷击、抗干扰性方面, 与传统仪器相比具有明显优势.

**关键词:** 光谱成像; 渗流监测; 光线光栅传感器; InGaAs 阵列

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0042

## 0 引言

随着科学技术的不断发展和大坝安全监测理论的进一步完善, 大坝安全监测已经逐步从人工方法向计算机自动监测方向迈进. 与人工方法相比, 自动监测具有测量准确度高、采集信息量大、受外部环境影响小等优点. 传统的大坝变形、渗流、应力应变和温度等监测系统所用传感器主要是电类传感器, 如差动电阻式、振弦式、步进电机式、电感式传感器等, 但此类传感器的防雷问题较难解决, 也很难形成真正的分布式测量. 光纤传感技术是集材料、光电子、信息、光机电一体化、物理、化学、计算机等多学科交叉与多种技术于一体而形成的一种高新技术, 随着光纤技术的飞速发展, 以光纤传感技术为基础的新一代监测仪器在国外已经逐步从研究走向实用阶段. 近年来, 我国已先后在古洞口混凝土面板堆石坝、鱼跳混凝土面板堆石坝、长江三峡工程等方面应用光纤传感检测技术进行工程安全监测分析发现, 光纤光栅传感器具有体积小、准确度高、测量范围宽等优点, 可在水下、电磁干扰、高能辐射等恶劣环境下正常工作, 与传统监测仪器相比具有明显的优越性和更好的发展前景. 本文基于 InGaAs 阵列光谱成像技术, 采用多点 Bragg 光纤光栅传感理论, 研究埋入光纤光栅传感器的大坝渗流过程的安全监测.

## 1 光纤 Bragg 光栅传感原理

光纤光栅是利用掺杂光纤的光敏性制作而成, 一般是单模掺锗光纤经  $240 \text{ nm}$  左右紫外光照射, 使外界入射的光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用, 导致纤芯折射率沿纤轴方向周期性或非周期性的永久性变化, 在纤芯内形成空间相位光栅并产生 Bragg 光栅效应. 这种光栅的基本光学特性就是以共振波长为中心的窄带光学滤波器, 中心波长  $\lambda_B$  与光纤纤芯有效折射率  $N_{\text{eff}}$  以及光纤光栅周期  $\Lambda$  相关, 它们的关系可以表示为

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

光纤纤芯有效折射率  $N_{\text{eff}}$  和光纤光栅周期  $\Lambda$  任何一个量的改变都会引起中心波长  $\lambda_B$  发生偏移, 应变与温度的变化也能够引起  $\lambda_B$  产生偏移. 当有应变作用于光纤 Bragg 光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 时, 光栅的拉伸会导致其周期  $\Lambda$  的变化, 同时光弹效应也会导致  $N_{\text{eff}}$  的变化, 由应变引起的波长偏移可表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_x \quad (2)$$

式中  $\epsilon_x$  是轴向应变;  $P_e$  是有效弹光系数.

当有温度作用于光纤 Bragg 光栅时, 由于光纤材料的热膨胀, 会产生由热导致的应变, 纤芯折射率  $N_{\text{eff}}$  会由于热光效应的存在随着温度发生变化, 此时  $\lambda_B$  的偏移可以表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为光纤的热膨胀系数;  $\zeta$  为热光系数;  $\Delta T$  为温度改变量.

\* 国家自然科学基金(60537050)资助

Tel: 13871521847

Email: taojun0411@163.com

收稿日期: 2009-02-10

修回日期: 2009-04-23

## 2 多点光纤 Bragg 光栅传感器原理和结构

### 2.1 系统光纤 Bragg 光栅的复用能力

对于一维串联起来的光子器件的光纤光栅<sup>[2]</sup>, 设光源的可调光谱范围为  $\Delta\lambda_d = \lambda_H - \lambda_L$  ( $\lambda_L$  和  $\lambda_H$  分别为可调光谱的起始波长和终止波长). 对于线阵中相邻的第  $i$  个与第  $j$  个光纤光栅, 设其受外界因素作用时波长的上限偏移量分别为  $\Delta\lambda_{i+}$  和  $\Delta\lambda_{j+}$ , 下限偏移量分别为  $\Delta\lambda_{i-}$  和  $\Delta\lambda_{j-}$ , 则这两个相邻传感光栅的传感信号互不串扰必须满足的条件为

$$\lambda_i + \Delta\lambda_{i+} < \lambda_j - \Delta\lambda_{j+} \quad (1 \leq i < j) \quad (4)$$

式中  $\lambda_L < \lambda_1 < \dots < \lambda_i < \lambda_j < \dots < \lambda_H$ .

为使两个传感光栅传感信号能够分辨, 设多点传感的信号分辨因子  $\sigma_{ij}$  为

$$\sigma_{ij} = (\lambda_j - \lambda_i) - (\Delta\lambda_{i+} + \Delta\lambda_{j-}) = \Delta\lambda_{ji} - \Delta\lambda_{i+,j-} \quad (1 \leq i < j) \quad (5)$$

式中  $\Delta\lambda_{ji}$  为相邻两个光纤光栅的波长差,  $\Delta\lambda_{i+,j-}$  为相邻两个光纤光栅波长的相对漂移量. 式(5)表明, 只有当  $\sigma_{ij} > 0$  时, 探测器才能够分辨出两个传感信号,  $\sigma_{ij}$  主要由相邻光纤光栅的波长差、相邻光纤光栅波长的相对漂移量、传感光栅的反射谱带宽及传感系统的探测器分辨能力决定.

为了满足多点传感系统达到信号分辨的要求, 由光源带宽决定的理想预期复用能力为

$$M = \Delta\lambda_d / \Delta\lambda_{ji} \quad (6)$$

### 2.2 多点温度传感原理

光纤光栅多点传感是以光纤光栅单点传感为基础, 同时亦必须满足分辨因子  $\sigma_{ij} > 0$  条件的一类广义传感方式. 考虑由  $N$  个光纤 Bragg 光栅串成的光栅阵列在材料表面粘贴或内部埋植, 则有

$$\sum_{i=1}^N \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{i0}} = \sum_{i=1}^N (\alpha + \xi) \Delta T_i \quad (7)$$

$\lambda_{i0}$  为光纤光栅串中的第  $i$  个光栅的自由中心波长,  $\Delta\lambda_i$  为第  $i$  个光栅的反射(或透射)波长的漂移量,  $\Delta T_i$  是为第  $i$  个光栅的受外场作用产生的温度变化.

### 2.3 多点 FBG 传感器结构

光在频域中不同波长的测量问题可以转换成空间中线阵 InGaAs 不同位置光强测量的问题, 其中光分布位置的不同对应波长分布不同<sup>[3]</sup>. 系统结构如图 1.

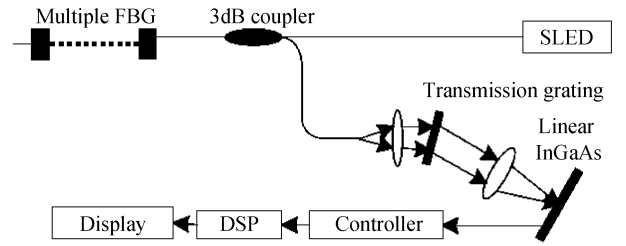


图 1 基于线阵 InGaAs 光纤光栅传感系统结构

Fig. 1 Fiber grating sensors demodulation system using linear InGaAs

如图 1, 宽带光源超强度发光二极管发出的光经 3 dB 耦合器进入传感光栅. 每个光纤光栅阵列由多个光纤光栅传感器依次连接串联成线性阵列. 传感光栅反射光谱的中心波长通过单模光纤输出, 经准直透镜扩束后, 变成平行光入射到衍射光栅上, 调整合适的入射角, 经过衍射光栅的反射分光, 不同波长的光束经同一色散光栅衍射后在空间传播时具有不同的衍射角, 因此将单束复色光分解为多束单色光, 并在出射透镜焦平面上按波长顺序形成一系列的光谱, 在出射透镜焦平面上放置线阵 InGaAs 用于光谱的接收. 当受外界因素的影响, 传感光栅反射光谱的中心波长发生改变, 通过分光系统, 在出射透镜焦平面上的光谱也相应产生谱线漂移, 线阵 InGaAs 探测到的不同波长谱线所对应的接收光强也随之发生变化, 同时线阵 InGaAs 可以将一维视场中不同位置的光强变化转化成对应的电平信号. 将这些电平信号排列起来就可以得到线阵 InGaAs 的线性视场的光强分布. 因此, 可以用线阵 InGaAs 同时测各波长的相对光强, 同时运用了波分复用和空分复用技术, 可实现多通道光纤光栅传感阵列的解调, 信号处理模块通过串口、并口或者 USB 口连接计算机, 检测 InGaAs 采集到的谱线波长的漂移算出光纤光栅的反射波长的变化, 从而检测出由于坝体温度场变化导致传感光栅反射光谱中心波长的微小移位, 实现对大坝渗流的自动监测.

实验中按照该原理搭建实验平台验证系统的稳定性. 该系统主要包含中心波长为 1 302 nm 输出功率为 95 mW 的光源、单模光纤(SMF)、一组中心波长在 1 310 nm 附近的光纤 FBG 光栅、3 dB 光纤耦合器、恒温仪、FBG 信号分析模块、数据采集软件等. 将传感光栅置于恒温器内, 将温度调整为 30 °C, 待稳定后记录相应的波长为 1 298. 871 nm, 然后依次升高温度, 记录相应波长, 测量数据见表 1. 系统监测得到的温度与波长关系曲线如图 2.

表 1 温度传感测试实验数据  
Table 1 Data of temperature sensor test

Temperature/°C	Wavelength/nm	Temperature/°C	Wavelength/nm	Temperature/°C	Wavelength/nm
30.5	1 298.873	40.5	1 298.975	50.5	1 299.070
31	1 298.878	41	1 298.981	51	1 299.074
31.5	1 298.884	41.5	1 298.985	51.5	1 299.080
32	1 298.898	42	1 298.992	52	1 299.081
32.5	1 298.903	42.5	1 298.998	52.5	1 299.089
33	1 298.908	43	1 299.006	53	1 299.090
33.5	1 298.912	43.5	1 299.006	53.5	1 299.092
34	1 298.918	44	1 299.010	54	1 299.100
34.5	1 298.920	44.5	1 299.015	54.5	1 299.102
35	1 298.920	45	1 299.026	55	1 299.107
35.5	1 298.927	45.5	1 299.021	55.5	1 299.112
36	1 298.932	46	1 299.032	56	1 299.114
36.5	1298.940	46.5	1 299.038	56.5	1 299.119
37	1 298.943	47	1 299.043	57	1 299.123
37.5	1 298.947	47.5	1 299.041	57.5	1 299.125
38	1 298.959	48	1 299.045	58	1 299.127
38.5	1 298.956	48.5	1 299.051	58.5	1 299.135
39	1 298.959	49	1 299.054	59	1 299.137
39.5	1 298.966	49.5	1 299.059	59.5	1 299.140
40	1 298.968	50	1 299.064	60	1 299.144

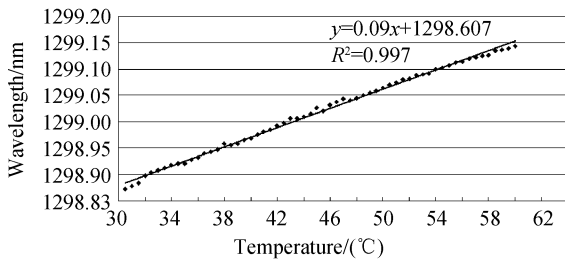


图 2 系统测得的温度-波长关系

Fig. 2 Diagram of temperature-wavelength relationship

图 2 测试结果表明系统具有良好的线性关系, 只有个别测量点出现波动. 从图中可以看出, FBG 中心波长的相对漂移量与温度是呈线性的, 其线性度可以达到 0.997, 说明该系统在温度变化时具有良好的温度响应性; FBG 中心波长与温度变化的拟合方程为  $Y=1\,298.607+0.009\,1 * X$ , 其波长温度响应灵敏度为  $0.009\,1\text{ nm}/\text{°C}$ . 由于系统在数据采集和传送过程中与电信号无关, 因此不受电磁波及电流的干扰, 该系统具有准确度高, 稳定性好, 环境适应性强的特点.

### 3 光纤 Bragg 光栅大坝渗流监测系统

#### 3.1 工程中渗流监测原理

坝体中渗流场与温度场相互作用、相互影响的结果会使双场耦合到达某一动平衡状态, 形成温度场影响下的渗流场及渗流场影响下的温度场. 其中渗流场对温度场的影响更为明显, 随着渗流系数的

增大, 渗流场对温度场的影响会更加明显. 当渗透系数小于  $10^{-9}\text{ m/s}$  时, 渗流对于温度几乎没有影响, 温度不由渗流水控制, 而是由热传导控制; 当渗透系数大于  $10^{-6}\text{ m/s}$  时, 温度基本由渗流水控制, 此时渗流对于温度的影响非常大, 热对流引起的温度的变化远远超过了热传导; 当渗透系数大于  $10^{-5}\text{ m/s}$  时, 温度完全由渗流水控制, 即此时的温度值几乎就是水体的温度. 由此可见, 周边缝的渗流会引起温度的变化, 通过对传感器附近小范围的土壤进行加热, 使其与水的温度形成一定的温差, 这样, 当发生渗流时就可以利用光纤光栅传感器测量温度的方法判断是否发生渗流<sup>[4]</sup>.

#### 3.2 工程中渗流监测数据分析

湖北清江水布垭枢纽工程中坝体周围共埋入 32 根光缆, 每根光缆上安装传感探头 20 个, 每个探头灵敏度为  $22\text{ pm}/\text{°C}$ , 整个工程分三期完成, 探头遍布坝体的周边缝和主要安全区域, 见图 3.

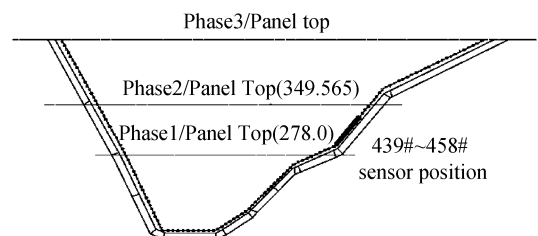


图 3 坝体渗流监测点布置

Fig. 3 Diagram of seepage monitoring points in dam

将实验室所搭建的监测系统在湖北清江水布垭

枢纽工程渗流监测过程中进行实际工程测试. 监测时首先记录未加热时各个光栅的反射波长, 然后对光缆加热 1 h 左右, 待温度稳定后再次记录相应波长, 通过计算两次波长的差值, 可以得到温度变化,

进而判断对应点渗流情况. 表 2 为对某 # 光缆上 20 个传感探头监测得到的数据, 图 3 中右侧粗实线位置为该组探头在大坝中的具体位置.

表 2 渗流监测数据

Table 2 Data of seepage monitoring

No.	Wavelength of pre heating/pm	Wavelength of post heating/pm	Wavelength difference/pm	No.	Wavelength of pre heating/pm	Wavelength of post heating/pm	Wavelength difference/pm
1	1 305 081	1 305 144	63	11	1 315 543	1 315 769	226
2	1 305 086	1 305 122	36	12	1 316 400	1 316 611	211
3	1 306 966	1 307 195	229	13	1 319 308	1 319 493	185
4	1 307 368	1 307 491	123	14	1 320 430	1 320 512	82
5	1 308 669	1 308 839	170	15	1 320 923	1 321 160	237
6	1 308 986	1 309 241	255	16	1 322 089	1 322 352	263
7	1 310 430	1 310 594	164	17	1 322 550	1 322 766	216
8	1 312 332	1 312 460	128	18	1 323 880	1 324 173	293
9	1 312 314	1 312 391	77	19	1 288 303	1 288 343	40
10	1 314 414	1 314 509	95	20	1 284 476	1 284 697	221

由于工程安装各个探头的灵敏度为 22 pm/°C, 所以加热前后波长变化对应的温度变化关系式为

$$\Delta T = \Delta \lambda / 22 \quad (8)$$

得到的各个探头对应点的温差见图 4.

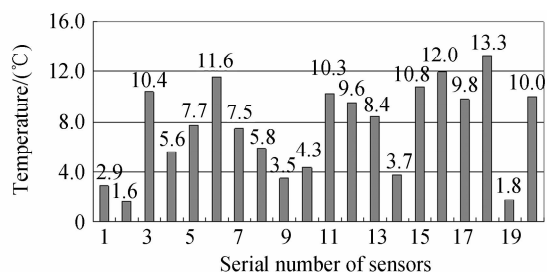


图 4 加热前后各个探头对应点温度变化

Fig. 4 Temperature change of pre and post heating in sensors

从图 4 中可以看出, 20 个传感探头对应各个监测点温度变化规律一致, 在最下温差 1.6 °C 和最大温差 13.3 °C 之间波动, 第 1、2、9、10、14 和 19 传感探头测得温度升高变化量较小, 表明这些监测点对应的地下湿度相对于其它监测点较大, 判断存在异常情况. 对照图 3 传感探头在坝体的分布, 可以看出大坝对应位置的渗流情况, 从而作进一步的监测, 确保蓄水安全, 为大坝的安全提供依据.

## 4 结论

设计了一种用于渗流监测的光纤光栅传感器, 可以根据坝体内温度场的变化导致波长的变化判断坝体渗流状态. 结果表明, 用于温度测试的光纤光栅传感器可实现多点监测, 具有良好的温度响应灵敏度. 工程实践表明, 光纤光栅监测系统准确性、可靠性等均符合要求, 特别是在系统稳定性、测量准确度

和防雷击、抗干扰性方面, 与传统仪器相比具有明显的优势, 易实现监测工作的实时性和连续性为大坝安全监测提供了又一有效途径.

## 参考文献

- [1] CAI De-shuo. Application of fiber sensing technology in dam engineering [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2002, 109-141.  
蔡德所. 光纤传感技术在大坝工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002, 109-141.
- [2] ZHANG Wei-gang, KAI Gui-yun, DONG Xiao-yi, et al. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 331-336.  
张伟刚, 开桂云, 董孝义, 等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 331-336.
- [3] ALVES J, SANTOS J L, CARVALHO A, et al. Fiber Bragg sensor interrogation system based on a CCD spectrometer[C]. *Sensors 2003, Proceedings of IEEE Vol 2*, 22-24 Oct. 2003 Page(s): 909-913.
- [4] DONG Xin-fa, DU Fang-xun, DONG Xiao-yi, et al. Research on temperature compensation for fiber grating array sensors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(7): 824-827.  
董兴法, 杜方迅, 董孝义, 等. 光纤光栅传感器阵列化与温度补偿研究[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(7): 824-827.
- [5] ZHANG Zi-jia, WANG Chang-ming. Investigation of the Transfer Matrix of the Fiber Gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1073-1077.  
张自嘉, 王昌明. 光纤光栅传输矩阵研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1073-1077.
- [6] ALVES J, SANTOS J L, CARVALHO A, et al. Fiber Bragg sensor interrogation system based on a CCD spectrometer[J]. *IEEE*, 2003, (2): 909-913.
- [7] FU Wei-jie, CHU Hua-ping, ZHOU Bo-bing. Application and prospect of fiber-optic sensor in dam safety monitoring[J]. *Large Dam and Safety*, 2003, (6): 48-51.  
符伟杰, 储华平, 周柏兵. 光纤传感器在大坝安全监测中的应用及前景[J]. *大坝与安全*, 2003, (6): 48-51.

## Application of Optical Fiber Sensors Using Linear Ingaas Spectral Imaging Technique to Seepage Monitoring of Dam

TAO Jun<sup>a,b</sup>, MU Lei<sup>b</sup>, DU Ping<sup>b</sup>

(a. *Physics School of Science*; b. *Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

**Abstract:** In order to achieve automatic monitor the seepage of dam, a monitoring structure with fiber Bragg grating sensors using spectral imaging technique and the multi-point sensing network system is proposed. The fiber grating sensor system structure with linear InGaAs array and diffraction grating is designed. With the analysis results from laboratory of precision and reliability in seepage monitoring, the 0.009 1 nm/°C wavelength-temperature response sensitivity of the Fiber Bragg Grating sensors used for temperature field monitoring of dam is presented. By analyzing the signal resolution factor of the multi-point sensor, the multiple sensors multiplexing of the testing system determined by dominated optical source bandwidth are researched. By using multiple fiber Bragg grating temperature sensors embedded into dam, the multi-point measurement of temperature differences is achieved to realize seepage monitoring of dam. Engineering practice shows that the system of seepage monitoring of dam has good performance in resistance to thunderbolts and disturbances as compared with conventional instruments.

**Key words:** Spectral imaging; Seepage monitoring; FBG; Linear InGaAs array



**TAO Jun** was born in 1979. She received her Ph. D. degree from the Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology. Her current research interests focus on fiber optic sensor design and signal processing.