

应用技术

光纤光栅传感技术在桥梁施工监控中的应用

张凤梅, 雷振山, 刘德和

(唐山学院 机电工程系, 河北 唐山 063000)

摘 要: 为了满足桥梁顶推法施工监控的复杂要求, 分析了光纤光栅传感器的结构和原理; 研究了应变和温度交叉敏感以及波长解调等光纤 Bragg光栅 (FBG) 传感技术应用中的关键问题。根据对桥墩受力变形的分析, 结合实例设计了传感器参数。将虚拟仪器与 FBG 传感器相结合, 可以利用虚拟仪器技术在信号采集、分析、存储和传输等方面的优势, 实现光纤光栅解调与施工监控于一体, 保证了施工安全和桥梁质量。

关键词: 光纤 Bragg光栅; 虚拟仪器; 顶推施工; 桥墩变形监测

中图分类号: 273+.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-9787(2006)02-0078-03

Application of fiber Bragg grating sensing technique in bridge construction monitoring

ZHANG Fengmei, LEI Zhen-shan, LIU De-he

(Department of Mechanical and Electronic Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China)

Abstract In order to fulfil the complex requirement of monitoring bridge construction with incremental launching method, the structure and principle of fiber grating sensor is analyzed. Some key issue about the application of fiber Bragg grating (FBG) is also studied, for example the temperature and strain cross sensitivity, wavelength demodulation. The parameter of FBG sensors is designed by analyzing the force on bridge piers and the deformation of bridge piers. Combined virtual instrument with FBG sensor can make use of the advantages of virtual instrument in data acquisition, signal analysis, data storage and communication to realize FBG demodulation and construction monitoring in one system, the safety of construction and quality of bridge is guaranteed.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); virtual instrument; construction with incremental launching method; bridge piers deformation monitoring

0 引言

顶推法是近年来发展迅速的大型桥梁施工工艺, 过去由于缺少先进的测量手段, 国内在桥梁顶推施工时, 往往采用经纬仪或全站仪进行人工监测, 效率低、速度慢、精度差, 实际效果很不理想, 难以保证施工安全和桥梁宏观质量。工业发达国家一般都要求对顶推施工过程进行自动监控。随着交通事业的快速发展, 我国对桥梁顶推过程自动监控也越来越重视, 2004年, 交通部西部交通建设科技项目招标中就有墩梁受力变形安全控制的内容。

传统的机电类传感器在抗干扰、耐潮湿、持久稳定等方面的性能已经不能适应桥梁顶推施工监控的复杂要求和施工现场的恶劣环境。因此, 研究光纤光栅传感技术在桥梁施工监控中的应用是工程实践的紧迫要求。测试系统要求测量应变的范围为 $\pm 1\ 000 \times 10^{-6}$, 应变的分辨力为

$\pm 1 \times 10^{-6}$ 。为了快速组建智能化的施工监控系统, 将系统构建在目前逐渐成为测控领域主流技术的虚拟仪器平台上, 充分利用现代信息技术的优势, 在同一个系统中, 集成光纤光栅传感解调和顶推施工过程监控。

1 光纤光栅传感器结构原理

光纤光栅传感器是二十世纪末才发展起来的一种新型光纤传感器, 它采用波长调制, 因此, 克服了传统的光强型和干涉型光纤传感器测量精度受光纤弯曲和连接损耗影响、相位测量模糊等缺陷。光纤光栅传感器的原理如图 1 所示^[1]。利用光纤材料的光敏性, 通过紫外激光在光纤纤芯上刻写一段光栅, 当光源发出的连续宽带光 I_0 通过传输光纤射入时, 在光栅处有选择的反射回一个窄带光 I_r , 其余宽带光 I_t 继续透射过去, 在下一个具有不同中心波长的光纤光栅处进行反射, 多个光纤光栅阵列形成光纤光栅传感网络。

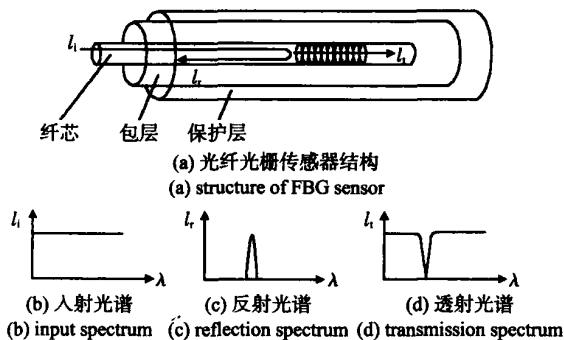


图 1 光纤 Bragg 光栅传感器原理

Fig 1 Principle of FBG sensor

各光纤光栅反射光的中心波长 λ 为

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中 n 为纤芯的有效折射率; Λ 为纤芯折射率的调制周期。目前,在结构变形和温度监测中,普遍采用周期 $\Lambda < 1\mu\text{m}$ 的短周期光纤光栅传感器,其反射波长 λ 称为 Bragg 波长,这种传感器称为 FBG 传感器。

根据式 (1),解调出反射光波长即可以寻址到 FBG 传感网络中每个传感器。

反射回来的窄带光的中心波长随着作用于 FBG 的温度和应变成线性变化,中心波长的变化量为

$$\Delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial\epsilon}\epsilon + \frac{\partial\lambda}{\partial t}\Delta t, \quad (2)$$

式中 ϵ 为应变变量; Δt 为温度变化量。

由式 (2) 可知, FBG 反射光中心波长同时受温度和应变的影响,交叉敏感的问题是目前 FBG 应用研究的一个热点,比较成熟的方法是采用同种温度环境下的 FBG 温度补偿传感器进行克服^[1]。这样,也满足了很多场合下温度和应变同时测量的要求。

波长编码的解调是 FBG 传感器应用中的关键问题。在各种波长解调技术中,可调谐 F-P 腔滤波法体积小、价格低、灵敏度高,是一种很有工程实用价值的方法。这种方法利用压电陶瓷驱动 F-P 腔长变化改变其透射光波长,当透射波长与 FBG 反射波长一致时,光探测器检测到最大光强,此时,压电陶瓷的驱动电压即对应传感光栅波长。

2 在虚拟仪器平台上开发光纤光栅传感网络

虚拟仪器技术是微计算机技术应用于测控领域的优秀成果,自 20 世纪 80 年代以来,随着世界范围内采用虚拟仪器开发的工程与科研成功实例大量涌现,虚拟仪器已经逐步成为测控领域的主流技术。

虚拟仪器技术可以采用基本相同的硬件结构完成测控系统的通用任务,由用户通过修改软件来定制仪器的具体功能。目前,最流行的虚拟仪器软件开发环境 LabVIEW 采用高效率的图形编程语言,提供了几乎所有经典信号处理的函数和大量高级信号分析工具; LabVIEW 程序非常容易

和各种数据采集硬件集成,极大地方便了测控系统的开发; LabVIEW 本身提供了一种叫做 Datasocket 的网络技术,可以非常方便灵活地与 Internet 和 Intranet 连接,实现测控系统信息共享; LabVIEW 可以快速的与 SQL-Server 等大型数据库链接,便于测试数据存储和管理;由于虚拟仪器在信号的分析、处理、显示、存储和传输等方面的巨大优势,极大地强化了 FBG 传感网络的功能。FBG 传感器与虚拟仪器相结合,丰富了虚拟仪器的硬件结构类型。

基于 FBG 传感网络的虚拟仪器结构如图 2 所示。数据采集卡采用 NI-4472 多通道同步卡,它不仅能保持参考光和 FBG 反射光的正确相位关系,而且,内部带有抗混滤波器和高达 24 位的分辨力,可以实现精密的测量;每通道 200 k 的采用率足够满足应变和温度的测试速度要求。数据采集卡将对应 FBG 波长的电信号进行 A/D 转换,经过 LabVIEW 软件转换为波长值。根据参考光信息解算出的 FBG 波长变化,与被测量的应变和温度信号直接有线性的对应关系。在虚拟仪器平台上得到被测量物理量的实际值以后进行信号的进一步分析处理,开发符合工程要求的应用系统。



图 2 基于 FBG 传感网络的虚拟仪器结构

Fig 2 Structure of virtual instrument based on FBG sensing network

3 桥墩变形监测系统

顶推法施工过程是沿桥轴线方向的桥台后分段预制混凝土梁段,用纵向预应力筋连成整体,用液压顶推设备沿桥墩顶面逐段顶出去,再在空出的制梁台座上继续下一梁段浇注,依次顶推到桥梁的另一端以完成桥面的施工^[2]。由于梁的自重很大,使桥墩顶端和梁之间开始发生相对运动的瞬间产生较大的摩擦力。桥墩在这个摩擦力的作用下将沿梁移动的方向产生水平位移,导致桥墩的弯曲变形。将桥墩简化为一个悬臂梁结构,如图 3 所示^[3]。

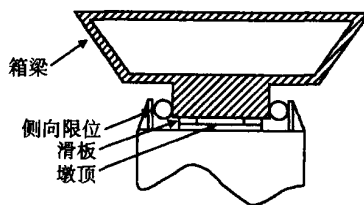


图 3 桥梁顶推结构简图

3 Diagram of bridge construction with increment launching

桥墩受力简图如图 4 所示,在距离固定端 x_e 的位置安装 FBG 传感器,测量此处应变 ϵ 。根据材料力学理论

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M}{WE} = \frac{Px_e}{WE}, \quad (3)$$

式中 ϵ 为桥墩上距离基础 x_e 处的应变; σ 为桥墩上距离基础 x_e 处的应力, Pa; E 为混凝土的弹性模量, Pa; M 为桥

墩承受的弯矩, $N \cdot m$; F 为墩顶受到的摩擦力, N ; W 为桥墩的抗弯截面模量, m^3 。

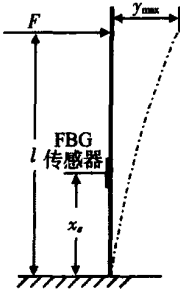


图 4 桥墩受力简图

Fig 4 Diagram of force on piers

由式 (3), 可以得到墩顶受到的摩擦力

$$F = \frac{\epsilon EW}{x_d} \tag{4}$$

将式 (4) 代入悬臂梁的挠曲线方程

$$y = - \frac{Fx^2}{6EI} (3l - x) = - \frac{\epsilon W x^2}{6x_d I} (3l - x) \tag{5}$$

式中 y 为桥墩任意一点的挠度, m ; x 为求挠度的截面与固定端的距离, m ; I 为桥墩的截面惯性矩, m^4 ; l 为桥墩的高度, m 。

根据式 (5) 可以描绘出桥墩的变形曲线, 并且, 可以得到墩顶的水平位移

$$y_{\max} = \frac{\epsilon W l^3}{3x_d I} \tag{6}$$

依式 (6), 根据测量到的应变值、应变传感器的安装位置和桥墩的几何尺寸, 就可以实时监测墩顶的水平位移。

应变测量范围是 FBG 传感器设计的一个重要问题。一座高速公路高架桥的桥墩设计最大偏转角为 $\pm 30^\circ$, 由此并根据桥墩几何尺寸和式 (6) 计算得到被监测的参数范围如表 1。

表 1 桥墩监测范围参数

Tab 1 Range parameter of piers monitoring

桥墩序号	桥墩高度 (m)	最大位移 (mm)	应变测点高度 (m)	最大应变 ($\times 10^{-6}$)
1	3.150	± 18	0.5	± 63.0
2	21.146	± 123	1.5	± 58.5
3	49.900	± 290	2.0	± 14.0
4	58.170	± 338	2.0	± 10.0
5	50.750	± 295	2.0	± 14.0
6	32.514	± 189	1.0	± 16.5
7	16.176	± 94	1.0	± 67.0
8	3.103	± 18	0.5	± 903.0

对于锗硅光纤应变传感器, 应变值 ϵ 和中心波长漂移 $\Delta\lambda$ 、中心波长 λ 的关系为

$$\Delta\lambda/\lambda = 0.78\epsilon \tag{7}$$

即应变值为 10^{-6} 时产生的中心波长漂移为 1.2 pm 。

目前, FBG 传感器普遍采用 $1520 \sim 1570\text{ nm}$ 的波长范围, 如果一路光纤布设 10 个传感器, 它们的中心频率间隔为 5 nm , 测量应变范围约为 $\pm 2000 \times 10^{-6}$, 在此量程范围内反射光谱不会重叠。

为了检验系统性能, 将各 FBG 传感器安装于弹性变形构件上进行测试, 得到表 2 的实验数据。

表 2 FBG 传感器测试数据

Tab 2 Test data of FBG sensors

测量点 序号	应变测量值 ($\times 10^{-6}$)	
	传感器组 1	传感器组 2
1	298	-1
2	836	-54
3	297	-153
4	527	-676
5	546	-763
6	310	-895
7	959	-934
8	585	-611
9	656	-349
10	410	-96

桥墩位移监测系统以工业控制计算机为核心, 在计算机 PC 总线插槽安装两块数据采集卡, 一块采集 FBG 传感器信号, 另一块采集顶推油压信号, 输出报警信号和顶推控制信号。采用码分多址 (code division multiple access, CDMA) 无线网卡通过移动公网接入 Internet 实现远程监控。桥墩位移监控系统软件由数据采集与处理、桥墩挠曲线绘制、数据传输与记录、报告打印、控制信号输出和错误事件处理等模块组成。

4 结 论

根据桥梁施工监控系统的实际需求, 对光纤光栅传感网络进行测试, 传感器的量程和分辨力均满足设计要求; 可以进行 45 km 以上的远距离测量, 在复杂恶劣的环境下, 具有极好的稳定性和可靠性。在虚拟仪器平台上构建 FBG 传感网络, 具有良好的扩展性和可移植性, 根据不同的施工环境、工艺要求和桥梁结构, 只需要大约相当于修改程序流程图的工作量, 就可以快速组建新的监控系统。通过研究高架桥顶推施工监测的实例, FBG 传感技术与虚拟仪器相结合将对保证桥梁施工安全和提高桥梁质量发挥重要作用。

参考文献:

[1] 姜德生, 左 军, 信思金, 等. 光纤 Bragg 光栅传感器在水布垭工程锚杆上的应用 [J]. 传感器技术, 2005, 24(1): 72 - 74.
[2] 汤俊生. PC 梁顶推施工技术的回顾与展望 [J]. 桥梁建设, 1996, (1): 11 - 14.
[3] 石博强, 赵德永, 李 畅, 等. LabVIEW 6.1 编程技术实用教程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. 81 - 283.

作者简介:

张凤梅 (1968 -), 女, 河北唐山人, 讲师, 主要从事技术测量教学与研究工作。