

文章编号:1001-5078(2007)10-1091-04

大型装备应变检测中光纤 Bragg 光栅的应用研究

刘春桐,李洪才,赵兵,张志利

(第二炮兵工程学院兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,陕西 西安 710025)

摘要:从光纤 Bragg 光栅(FBG)衍射的射线理论入手,介绍了其传感原理;结合大型装备的应变检测,阐明了解决交叉敏感问题的原理及方法;对应变检测中光纤光栅封装技术的现状进行了概述,并指出当前封装技术存在的问题和发展方向;简要介绍了光纤光栅应变传感器的标定方法及注意事项。

关键词:光纤传感;光纤 Bragg 光栅;应变检测;交叉敏感;封装技术

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Research on Application of Fiber Bragg Grating in Large Scale Equipments' Strain Detection

LIU Chun-tong, LI Hong-cai, ZHAO Bing, ZHANG Zhi-li

(Lab. of Armament Launch Theory & Technology, National Key Discipline, The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on the ray theory of fiber grating diffraction, the sensing principle of fiber Bragg grating (FBG) was introduced. In consideration of the strain detection in practice of large scale equipments, expatiated on the principle and solution about temperature and strain cross sensitivity of FBG. Then the actuality of FBG packaging techniques in strain detection were summarized. The problems in existence and the developing direction of packaging techniques were pointed out. Finally, the way of calibration on FBG sensor and some notice was briefly introduced.

Key words: fiber sensing; fiber Bragg grating; strain detection; cross sensitivity; packaging technique

1 引言

光纤光栅检测技术是20世纪90年代初逐步发展起来的先进测试技术^[1],它所基于的敏感元件光纤 Bragg 光栅(fiber Bragg grating, FBG)是近年来发展迅速的一种新型光学无源器件,具有不受光源功率波动和各种损耗的影响、复用能力强、易于实现准分布测量等独特优点,因而被普遍认为是当前具有发展前途的传感方式。

武器发射系统及其地面相关的起重、装填等设备是精密的大型装备,由于体积、质量庞大,结构、受力复杂,往往需要在多点对其应变进行检测,以及时

发现并排除安全隐患。应变是大型装备检测最为重要的参数之一,它反映了工程结构的固有特征,对局部特性变化——尤其是对局部应力、局部结构损伤比较敏感^[2]。而传统的应变仪测量在使用中往往受到限制,不能满足大型装备高精度、远距离、分布式检测的技术要求。相比较而言,光纤光栅检测技术具有线性好、重复性好和长期稳定的优点,无疑是

基金项目:“2110”重点学科项目。

作者简介:刘春桐(1972-),男,第二炮兵工程学院副教授,博士,主要研究方向为光电瞄准技术,发射设备光电检测技术。E-mail: liuchuntong72@sina.com

收稿日期:2007-01-02

当前技术条件下应变模态分析的最理想工具,这也是未来应变检测技术发展的一个重要方向。

2 光纤 Bragg 光栅的传感原理

光纤 Bragg 光栅是由紫外光写入到光纤纤芯中形成的全息衍射光栅,耦合模理论^[3]是诠释光波在波导中传输规律的基本方法,但较为繁难。这里介绍一种直观的光纤 Bragg 光栅衍射的射线理论。考虑光纤 Bragg 光栅是一个普通的光学衍射光栅,如图1所示。一束以 θ_1 角度入射的光,在光栅上衍射效果可以用熟悉的衍射公式给出:

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

其中, n 为折射率; θ_1 是入射角; θ_2 是衍射角; 整数 m 是衍射级次; Λ 为光栅周期。

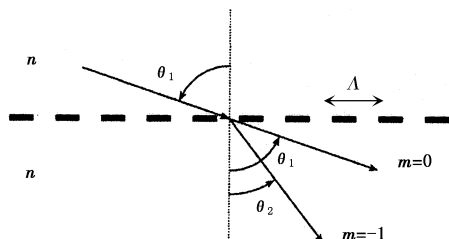


图1 光栅对光波的衍射

由于光纤 Bragg 光栅是在两个相反方向传输的模式间产生耦合,图2所示给出的是 Bragg 光栅的一个以 θ_1 入射的耦合模到相反传输方向的情况, $\theta_2 = -\theta_1$, 又因为传输常数 $\beta = (2\pi/\lambda) n_{\text{eff}}$, 其中, $n_{\text{eff}} = n \sin \theta$, 此时式(1)为:

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

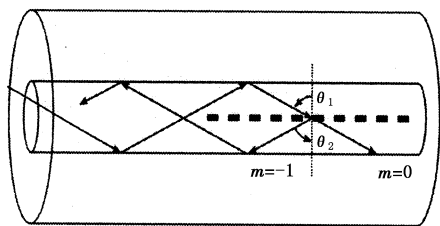


图2 光纤 Bragg 光栅衍射的射线

对于1级衍射 $m = -1$, 因为 $\beta_2 < 0$, 具有 $n_{\text{eff}1}$ 的模耦合到具有 $n_{\text{eff}2}$ 的模, 其反射的谐振波长是:

$$\lambda_B = (n_{\text{eff}1} + n_{\text{eff}2}) \Lambda \quad (3)$$

如果两个模相同, 即 $n_{\text{eff}1} = n_{\text{eff}2} = n_{\text{eff}}$, 使得 Bragg 波长反射公式:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (4)$$

式中, λ_B 即为 FBG 的中心反射波长, 它与光栅的周

期以及纤芯的有效折射率有关。研究表明^[4], 温度产生的热效应与应变产生的力效应可认为是相互独立、线性叠加的, 光栅的 Bragg 波长会在应变和温度的作用下发生变化, 其变化量由下式给出:

$$\Delta \lambda_B = K_T \Delta T + K_\epsilon \epsilon = (\alpha + \zeta) \lambda_B \Delta T + (1 - P_e) \lambda_B \epsilon \quad (5)$$

其中, K_T, K_ϵ 分别为 FBG 的温度和应变灵敏度系数; α 和 ζ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数; P_e 为光纤的有效光弹系数。由式(5)可知, 当光栅受到外场作用时, 利用波长解调装置测量反射波长的变化, 即可精确获得相应外场的动态定量信息, 这就是光纤 Bragg 光栅感测的基本原理。

3 大型装备 FBG 应变检测系统原理

在大型装备的实际应变检测中, 光纤 Bragg 光栅传感阵列按照要求粘贴在被测体表面的待检测位置; 光开关及其控制电路用于实现不同 FBG 传感阵列的接通与断开; 波分复用器用来实现对多个光栅波长信号的复用; 通过光纤光栅传感网络分析仪来解调出不同中心波长 FBG 的波长变化信息; 最后利用计算机检测终端实现对所测数据的分析处理, 即可获得被测体的应变分布。图3所示为光纤 Bragg 光栅应变检测系统的原理图。

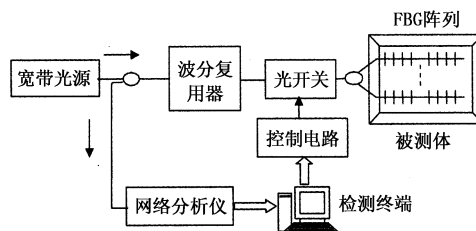


图3 光纤 Bragg 光栅应变检测系统原理图

4 应变与温度的交叉敏感

由公式(5)易知, 光纤 Bragg 光栅对应变和温度的变化都是敏感的, 从而用于传感测量时, 单个光栅本身无法分辨出应变和温度分别引起的 Bragg 波长的改变量, 进而无法实现精确的测量。对于中心波长为 1550nm 的光纤光栅, 1℃ 的温度变化将对应变引起约 10με 的测量误差。尤其在长期监测中, 这个问题十分突出, 因此, 解决交叉敏感问题对于大型装备的应变检测具有十分重要的意义。

目前解决交叉敏感问题的方法有很多种, 但总体思路可分为: 温度补偿和应变/温度双参数同时测量两种方案。前者是通过某种方法抵消温度扰动引

起的 Bragg 波长漂移,使得应变测量不受环境温度变化的影响;后者是利用两个波长信号共同对应变和温度进行编码,通过双波长矩阵来确定应变和温度的变化量。综合考虑各种因素,在大型装备应变检测中采用参考光栅是最为简单且经济可靠的方法,但必须做到以下三点:

(1) 参考光栅与应变测量光栅处于同一温度场中;

(2) 支撑材料相同;

(3) 参考光栅不受应力作用。

在同一温度场中同时布置两根 FBG,其一用于测量应变,它同时受温度和应变的影响;另一个作为参考光栅,布设在与被测物材料一致且受力的构件上,用于测量被测物温度,它只受温度影响,这样就保证了两根 FBG 产生相同的温度效应。不考虑 FBG 温度-应变的耦合效应,即假定温度与应变对光纤光栅中心波长的影响相互独立并且是严格线性的,于是由公式(5)可列出如下方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_\varepsilon & K_T \\ 0 & K_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \cdot \Delta\lambda_B \quad (6)$$

可解得应变和温度变化量分别为:

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B K_\varepsilon} \\ \Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B K_T} \end{cases} \quad (7)$$

5 应变检测中 FBG 的封装技术

封装技术是光纤光栅应用于大型装备应变检测的基础,也是其迈向工程应用的第一步。光纤 Bragg 光栅的封装技术涉及封装结构、衬底材料及封装工艺等方面,并与敏化技术密切相关,它直接影响 FBG 传感器的各项性能参数,并决定其易用性的程度。随着各国研究人员的不断研究探索以及各种新材料、新结构的提出和应用,封装技术逐步呈现出多样化的局面,正在成为一个较为全面而复杂的体系。

5.1 当前现状

为了方便准确地测得大型装备的应变分布,又不影响武器装备原有结构的稳定性,金属基片式封装是 FBG 应变传感中常采用的形式,表面粘贴式应变传感器更是由于简便易行而广泛应用。其中,基片式和管式封装是 FBG 用于大型装备应变测量中

的常用形式,具体如图 4、图 5 所示。

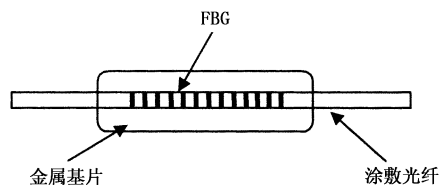


图 4 光纤 Bragg 光栅基片封装

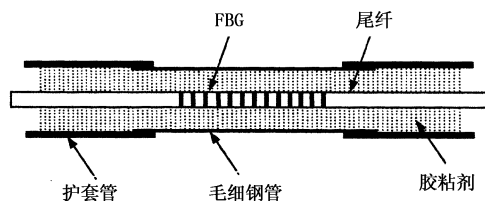


图 5 光纤 Bragg 光栅管式封装

基片式封装是将 FBG 粘敷在某种对应变敏感的金属、合金及特殊弹体表面的技术。其优点是不影响被测对象的力学性能,使用灵活方便、简单可靠,适用于金属结构表面及结构内部金属构件的应变测量。管式封装是将 FBG 嵌入于金属管内某种对应变敏感的聚合物及特殊弹性体之中的技术。其优点是便于嵌入被测体中,形成智能传感结构,以便对被测体进行长期监测,但同时也影响了被测体的力学性能及其应变场的分布。

针对不同的应用背景,各种封装形式各有所长,可根据实际需要而灵活选用。对于大型装备应变的检测而言,基片式封装是常采用的形式,基于不锈钢^[5]、铜片^[6]、钛合金^[7]等金属片式封装已有相关报道。实现基本不改变 FBG 应变传感特性的情况下,将温度灵敏度提高了近 2 到 3 倍。

5.2 存在问题及对策

值得注意的是,利用 FBG 进行应变测量,主要是利用其轴向的应变敏感性,但如果应变方向与光栅轴向不一致或存在一定夹角,则此时测量的结果就会存在较大的误差。由于武器发射装备及起重转载设备在使用过程中因受力而产生应变的方向是不断变化的,并且有些重要检测部位的表面可能会有一定曲率或弧度,这就对 FBG 的封装提出了更高的要求。现有的 FBG 应变传感器封装体积过大、柔韧度差,尚不能满足在实际装备应变检测中的需要,主要存在以下问题:

(1) FBG 只能精确测量与光栅轴向一致的线应变,不能精确测量方向不定或变化的线应变;

(2)封装体积过大,难于测量具有曲面构件的表面应变,且粘接不便,适用范围有限;

(3)应变灵敏度不高,实际应用中需要昂贵的高精度波长解调装置来提高检测的精度,成本较高。

针对以上存在的问题,开发能够测量方向不断变化的新型 FBG 应变传感器,实现 FBG 的微型化封装、提高 FBG 传感器的应变灵敏度,都是当前 FBG 应用于大型装备应变检测中封装技术所面临的关键问题。如图 6 所示,为我们自行制作的基于铝合金箔片封装的 FBG 传感器,所用箔片厚度仅为 0.1mm,经实验测试,其应变灵敏度为 $1.407\text{pm}/\mu\epsilon$,温度灵敏度达到 $29\text{pm}/^\circ\text{C}$,分别是裸光栅的 1.2 倍和 3.02 倍,采用解调精度为 1pm 的波长解调仪可以探测识别 $0.7\mu\epsilon$ 的应变和 0.03°C 的温度变化。该封装结构简单实用,轻便柔韧,易于与被测构件结合,同样适合被测表面具有一定曲率的被测体。

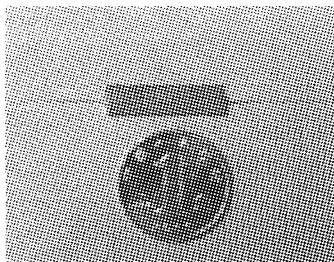


图6 铝合金封装 FBG 实物图

6 光纤 Bragg 光栅传感器的标定

光纤 Bragg 光栅传感器的应变灵敏度系数是一个极其重要的技术指标^[8],其误差的大小直接影响应变测量结果。经过封装后,由于施加预张力以及胶粘剂固化收缩的影响,光纤光栅的特性参数将发生改变。因而在装备应变检测使用前,必须对其进行必要的校准和检定。

等强度梁常用于标定测试设备和作为测力传感器,应用等强度梁对 FBG 传感器进行应变标定是一种简单易行的标定方法,其原理如图 7 所示。将 FBG 和高精度的应变片粘贴在梁表面的轴线方向,则理论上 FBG 与应变片所产生的应变相同。但由于 FBG 封装后衬底具有一定的厚度,等强度梁发生弯曲变形时,FBG 产生的应变要比梁表面大,从而在标定时,要引入应变修正系数,将由应变片得到的应变乘以应变修正系数,就得到标定 FBG 的真实应变。

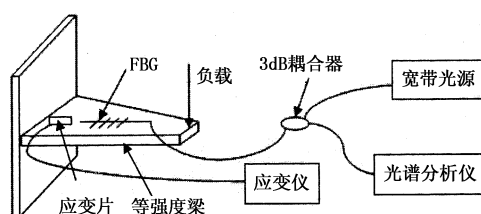


图7 FBG 等强度梁标定原理图

7 总结

光纤光栅传感技术有效克服当前电学类传感检测系统在长期稳定性、耐久性和分布范围方面存在的不足,可满足现代大型装备的高精度、远距离、分布式检测的技术要求,具有传统技术无可比拟的优势,为实现对大型武器装备的长期健康监测和安全评估提供了一种良好的技术手段。本文结合大型装备应变检测的实际,介绍了 FBG 应用技术的原理方法,指出了 FBG 应变检测中的封装技术存在的关键问题,并简要介绍了 FBG 应变传感器的标定方法,总结了一些规律性的经验,对光纤 Bragg 光栅在应变检测中的应用实践有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 刘胜春,姜德生,郝义昶. 光纤测力传感器的研究及应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006,30(2):209-211.
- [2] 信思金,梁磊,左军. 光纤光栅传感技术在重大工程结构诊断与监测中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2005,26(3):52-55.
- [3] 饶云江,王义平,朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006:111-117.
- [4] 梁磊. 光纤光栅智能材料与结构理论和应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2005:69-71,101-103.
- [5] 赵雪峰,田石柱,周智,等. 钢片封装光纤光栅监测混凝土应变实验研究[J]. 光电子·激光,2003,14(2):171-174.
- [6] 于秀娟,余有龙,张敏,等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光子学报,2006,35(9):1325-1328.
- [7] 于秀娟,余有龙,张敏,等. 钛合金片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光电子·激光,2006,17(5):564-567.
- [8] 孙丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2006:56-64.