

文章编号: 0253-2239(2004)03-330-7

光纤光栅多点传感的理论及实验研究*

张伟刚 开桂云 董孝义 刘艳格 王 伟 刘志国

(南开大学现代光学研究所, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

摘要: 对光纤布拉格光栅多点传感进行了理论研究及实验研究。通过定义多点传感信号分辨因子, 分析了探测器对传感信号的分辨条件, 给出了多点温度与应变传感原理的数学表达式, 并探讨了由光源带宽决定的系统实际复用能力。设计并实现了具有一定特色的光纤布拉格光栅多点传感网络系统, 利用该系统对温度、位移进行了双路、多点传感实验分析与理论验证, 实验结果与多点传感理论分析相符合。

关键词: 光纤光栅; 多点传感; 信号分辨因子; 网络系统; 复用技术

中图分类号: TN247; TN253 文献标识码: A

Theoretical and Experimental Study of Fiber Grating Multi-Point Sensing

Zhang Weigang Kai Guiyun Dong Xiaoyi Liu Yan'ge Wang Wei Liu Zhiguo

(*Institute of Modern Optics, The Key Laboratory of Optoelectronic Information*

Technological Science, EMC, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 31 December 2002; revised 3 March 2003)

Abstract: The theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing made. By means of defining the signal resolution factor of multi-point sensing, the condition of signal resolution has been analyzed, the mathematical expression of the sensing principle of multi-point temperature and strain have been given and the system multiplexing capacity by dominated optical source bandwidth has been researched. The fiber grating multi-point sensing network system with some features has been designed and realized. By using this sensing network system, the multi-point sensing experimental analyses and theoretical verification of temperature and displacement sensing have been completed in the two channels of the sensing network system. The experimental results are in good agreement with the theoretical analyses of multi-point sensing.

Key words: fiber grating; multi-point sensing; signal resolution factor; network system; multiplexing technology

1 引 言

近年来, 光纤光栅单点传感技术日趋成熟, 且在工程上已有应用^[1~3]。在此基础上, 人们又在研究和开发光纤光栅多点传感技术^[4]。在诸多的光纤光栅传感器中, 以光纤布拉格光栅传感器技术最为成熟, 故对光纤布拉格光栅多点阵列传感的研究具有代表性。本文下述的光纤光栅, 除非特别说明, 均指

光纤布拉格光栅。目前, 光纤光栅写入技术的发展, 已能够在—根光纤上写入多个不同波长的光栅, 制成光纤光栅串。由于光纤光栅轻巧柔软并可以制成光栅串, 故可根据不同需求, 构建点阵、面阵和体阵等多种拓扑结构及其传感网络系统。光纤光栅阵列与波分复用(WDM)、时分复用(TDM)和空分复用(SDM)技术相结合^[5], 很适于在材料表面粘贴或内部埋植, 构建多点传感器件或准分布式传感系统^[6], 从而对材料的特性及结构实现多点或准分布式实时监测, 这在智能结构、强场探测、石油开采、水下监听、航空航天等领域中具有重大的实用价值^[7]。单点光纤光栅传感器具有诸多优点, 在实际应用中正

* 国家“八六三”高科技计划基金(2002AA313110)、南开大学人事处科研启动基金资助课题。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

收稿日期: 2002-12-31; 收到修改稿日期: 2003-03-03

发挥着重要作用,但因其感测点少及对光源的独占性,使其性价比降低,故没有充分利用其潜在的功能。利用光纤光栅的温敏和压敏特性,研究开发对温度、应变、位移、压力等诸多参量敏感的各种阵列式传感器,是一个技术意义和社会效益兼备的重要课题,也是光纤光栅技术发展的重要趋势之一^[8]。

本文首先阐述光纤光栅多点传感的概念,定义信号分辨因子,对光纤光栅多点传感理论进行研究;然后,介绍我们研制的光纤光栅多点传感网络系统,阐述该系统的主要特点;进而,利用该系统对温度、位移进行了双路、多点传感实验分析与理论验证;最后,给出本文的结论。

2 光纤光栅多点传感原理

2.1 多点传感信号分辨因子

作为一维光子器件的光纤光栅,彼此既可以串联,亦可以并联。但因其空间上的有限性,在大范围感测外场时,只能在关键点进行埋植或外贴布设,该传感方式感测外场的信息是不连续的。若探测点比较密集,则可以通过数学中的插值法(如样条插值)

平滑各感测点的测量值,获得外场连续分布的息。

图 1 是光纤光栅线型阵列传感反射谱的示意图。设光源的光谱范围(或可调范围)为 $\Delta\lambda_L = \lambda_b - \lambda_a$ (λ_a 和 λ_b 分别为起始波长和终止波长),对给定的光源, $\Delta\lambda_L$ 为定值且较宽,如 LED 谱宽可达几十纳米。线型阵列中的第 i 个光纤光栅的自由中心波长为 λ_i ,带宽为 W_{bi} ,受外场(应变、温度等)作用的波长漂移量为 $\Delta\lambda_i$ 。对第 i 个光纤光栅(FBG),根据文献^[9]中的(29)式整理得到

$$W_{bi} = 2s\lambda_i \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n}\right)^2 + \left(\frac{1}{sN}\right)^2} \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (1)$$

n 是纤芯的折射率, N 为该光纤光栅的总周期数, s 是折射率变化条纹的可见度。对于弱光栅,有 $\frac{\Delta n}{2n} \ll \frac{1}{sN}$, 则 $W_{bi} = \frac{2\lambda_i}{N}$; 对于强光栅,有 $\frac{\Delta n}{2n} \gg \frac{1}{sN}$, 则 $W_{bi} = \frac{s\lambda_i \Delta n}{n}$ 。于是,该光纤光栅所占用的总光谱区间为

$$\Delta\lambda_{i,s} = 2W_{bi} + \Delta\lambda_i \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (2)$$

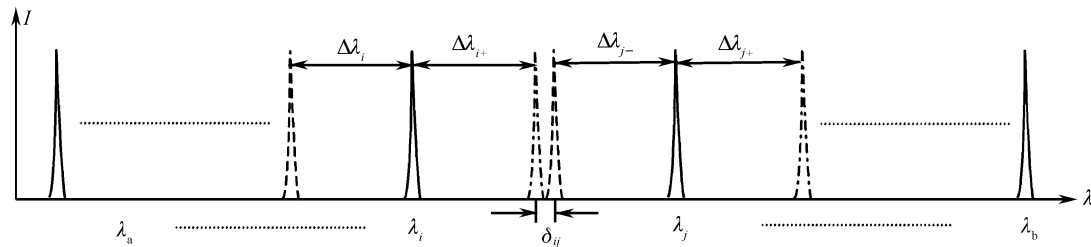


Fig. 1 Reflection spectra of fiber grating sensing with line-type array

对于线阵中相邻的第 i 与第 j 两个光纤光栅,设其受外场作用时波长的“红移量”分别为 $\Delta\lambda_{i+}$ 和 $\Delta\lambda_{j+}$,”蓝移量”分别为 $\Delta\lambda_{i-}$ 和 $\Delta\lambda_{j-}$,则两个传感光栅传感信号互不串扰必须满足的条件为

$$\lambda_i + \Delta\lambda_{i+} < \lambda_j - \Delta\lambda_{j-} \quad (1 \leq i < j), \quad (3)$$

式中 $\lambda_a < \lambda_1 < \dots < \lambda_i < \lambda_j < \dots < \lambda_b$ 。

为使两个传感光栅传感信号能够分辨,本文定义多点传感的信号分辨因子 δ_{ij} 为

$$\delta_{ij} = (\lambda_j - \lambda_i) - (\Delta\lambda_{i+} + \Delta\lambda_{j-}) = \Delta\lambda_{ji} - \Delta\lambda_{i+,j-}, \quad (1 \leq i < j) \quad (4)$$

式中 λ_{ji} 为相邻两个光纤光栅的波长差, $\lambda_{i+,j-}$ 为相邻两个光纤光栅波长的相对漂移量。(4) 式表明,只有当 $\delta_{ij} > 0$ 时,探测器才能够分辨出两个传感信号, δ_{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、传感光栅的带宽及传感系统的探测器分辨率决定^[10]。例如:为使两个传感光纤光栅反射峰可分辨, δ_{12} 最小须取 $(W_{b1} + W_{b2})/2$ 。

根据多点传感系统对信号分辨率的要求,各个传感光栅的光谱区间须彼此互不重叠。于是,由光源带宽决定的预期复用能力为

$$M_i = \Delta\lambda_L / (\Delta\lambda_{i,s}) \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (5)$$

考虑到各传感光栅所占用的总光谱区间的差异,令 $\Delta\lambda_{i,\max} = \max\{\Delta\lambda_{i,s}\} (i = 1, 2, \dots)$,我们得到系统实际能够达到的复用能力的一般表达式为

$$M = \min\{M_i\} \quad (i = 1, 2, \dots). \quad (6)$$

2.2 多点温度与应变传感原理

由上述研究可知,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 $\delta_{ij} > 0$ 条件的一类广义传感方式。对于多点传感系

统,考虑由 N 个光纤布拉格光栅制成的光栅串在材料表面粘贴或内部埋植,则有

$$\sum_{i=1}^N \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{i0}} = \sum_{i=1}^N (1 - p_e) \Delta\epsilon_i + \sum_{i=1}^N [\alpha + \zeta + (1 - p_e)(\alpha_{is} - \alpha)] \Delta T_i, \quad (7)$$

$$\delta_{ij} = \Delta\lambda_{ji} - \Delta\lambda_{i+,j-} > 0 \quad (1 \leq i < j \leq N), \quad (8)$$

式中 p_e 是光纤的有效光弹系数, ζ, α 分别是纤芯的热光系数和热胀系数。对于光纤光栅串中的第 i 个光栅, λ_{i0} 是其自由中心波长, $\Delta\lambda_i$ 是其反射(或透射)波长的漂移量, α_{is} 是与其紧密接触的衬底材料的热胀系数, $\Delta\epsilon_i$ 是其受外场作用产生的应变, $\Delta T_i = T_i - T_0$ 是其温度的变化, T_0 为温度初始值。

3 光纤光栅多点传感网络系统的研制

随着光纤光栅复用技术的不断发展及光网络系统的不断成熟,一些光纤光栅多点传感系统不断被

提出并得到实际应用^[11]。其中,波分复用是目前研发相对成熟的一种复用技术,该技术对多点传感网络系统的研制意义重大,而如何对光纤光栅波长编码信号进行有效地解调,是实现光纤光栅传感应用的关键技术之一。图 2 是我们设计、研制的波分复用与空分复用混合型光纤光栅多点传感网络系统结构示意图。

该系统由硬件和软件两部分构成。硬件主要有:宽带光源或可调谐光纤激光器、光纤光栅传感串、光栅波长调谐机构、马达驱动电路、信号放大电路、数据采集(模数转换卡)、光开关、光开关驱动电路、计算机等;软件主要功能有:参量设定(模数转换卡、串口、初始标定、光开关等设定)、扫描控制、数据采集与存储、数据计算与拟合、分布规律绘制、软件抑制噪声,协调系统各部分的运作等^[12]。其中,系统用宽带光源、可调谐光纤激光器、波长调谐机构及软件等均是自行研制、开发的。

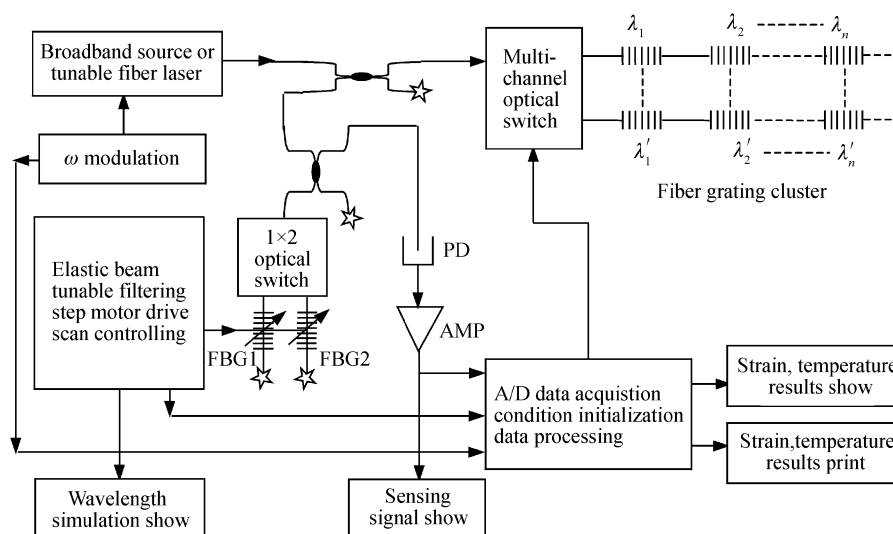


Fig. 2 Schematic diagram of fiber grating multi-point sensing parallel network system

该系统的主要特点有:

1) 采用反射式滤波解调信号:亦属于类 δ 反射式解调方法^[10]。与透射式滤波^[13]相比,反射式滤波检测的是传感光栅的反射谱峰值,比较容易实现光电转换电路的设计,因此具有信噪比高、寻址能力强、信号提取便利等优点。

2) 双光纤光栅扫描调谐机构:将两个光纤布拉格光栅(FBG1和FBG2)平行粘贴于同一弹性梁表面中线的两侧,由步进电机微调谐,使波长调谐范围增加了两倍,提高了系统寻址范围。若优化调谐机构,光纤布拉格光栅可扩充至数个,实现多光纤布拉格光栅自动调谐,进一步扩大波长调谐范围。

3) 调谐精度与扫描周期可选:系统用步进电机的步进数在80~500 step范围内可调。系统中单光纤光栅波长调谐范围为 ± 4 nm,双光纤光栅波长总调谐量不小于16 nm,波长调谐精度可达0.016 nm/step,比实验室用光谱仪(OSA)的分辨力高一个数量级。扫描周期可根据监测需求由计算机灵活控制。若选择更精密的步进电机,则可以增加步进数,波长调谐精度可望进一步提高。

4) 双向准无啁啾线性调谐:弹性梁选择等腰三角形悬臂梁,由材料力学分析及应变片实验测量可知,该梁表面各处的应变一致,可视为等强度梁。该梁由计算机控制的步进电机带动,在侧向位

移与梁长之比很小的条件下,使光纤光栅产生轴向拉伸与压缩,实现光纤光栅波长的双向准无啁啾线性调谐。

5) 波分复用/空分复用混合阵列型:在传感阵列拓扑结构中,各支路内采用波分复用技术,支路之间采用空分复用技术。采用光开关切换各传感支路时,又相当于“分段”时分复用。因各支路互不串扰,其对应的光纤光栅波长可一致,即 $\lambda_i = \lambda'_i (i = 1, 2, \dots)$,这使相同波长的光纤光栅可大量用于同一个传感网络系统之中。

此外,系统提供了电控与手控两种波长实时监测模式。系统在对采集的实验数据进行处理时,有高斯拟合与多项式拟合两种模式。其中,对反射率较低的弱光纤布拉格光栅,其反射谱采用高斯拟合;而对反射率较高的强光纤布拉格光栅,则采用多项式拟合。这样,通过软件处理,可提高系统测量精度,亦可抑制部分噪声。

根据图 2 所示的传感结构,我们研制了相应的

多点传感系统样机。该样机以光纤光栅的压敏和温敏特性为基础,其待测传感信号灵敏度高,无电磁干扰和“污染”,信号可复用传输,不但能够有效地提高工作效率,而且还可实现同步解调、处理和显示。这种光、机、电、算、信一体化、智能化、小型化的实时传感网络,能有效地与计算机、通信系统融合连接,因此,它符合当今传感技术的发展趋势^[14,15]。

4 光纤光栅多点传感实验分析

根据光纤光栅多点传感原理,考虑到光纤光栅对应变和温度的交叉敏感性,我们采用线型阵列,选择弹性梁作为衬底材料,将光纤光栅串分别沿梁的轴向粘贴于表面,采用双路光开关控制,对温度与位移进行了双路多点传感实验研究。

4.1 多点传感实验装置

图 3 是双路 10 点光纤光栅温度与位移传感结构示意图。

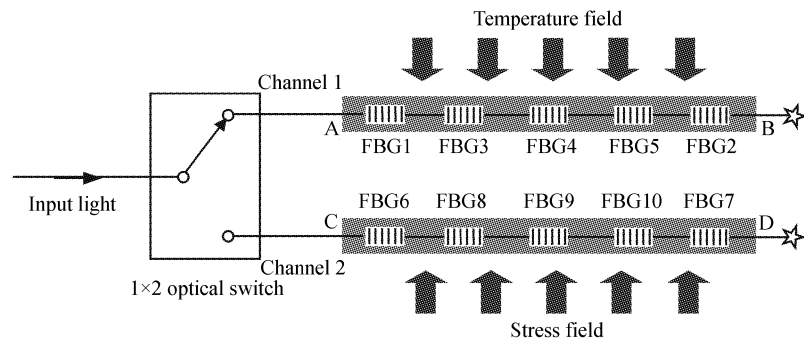


Fig. 3 Experimental structure schematics of FBG two channels sensing of temperature and displacement

实验用传感光栅是用高掺锗光敏光纤以相位掩膜法自行研制的,各个光栅的长度介于 6~10 mm 之间。衬底材料的质材为矩形铝板,其长 $L=90$ cm,高 $h=0.6$ cm,宽 $b=3.0$ cm。10 个光纤光栅分两组以线型阵列构成 2 个光纤光栅串,分为两路用强力胶粘贴在尺寸一样的两块铝板 AB 与 CD 的上表面,并用 1×2 光开关构成传感复用阵列。光纤光栅粘贴前充分考虑到传感分辨因子 $\delta_{ij} > 0$ 及各个传感光栅应变的大小,以 FBG1 \rightarrow FBG3 \rightarrow FBG4 \rightarrow FBG5 \rightarrow FBG2 及 FBG6 \rightarrow FBG8 \rightarrow FBG9 \rightarrow FBG10 \rightarrow FBG7 的顺序成线型粘贴在两个铝板表面上,如图 3 所示。各光栅串中的光纤光栅距离 A、C 端分别为 1 cm、16 cm、31 cm、46 cm 和 61 cm。其中

光路 1:

FBG1~FBG5 在室温 20°C 时的自由中心波长分别为 $\lambda_{10} = 1541.07$ nm, $\lambda_{20} = 1545.15$ nm, $\lambda_{30} = 1546.83$ nm, $\lambda_{40} = 1551.96$ nm, $\lambda_{50} = 1557.55$ nm; 相应的峰值反射率分别约为 24 dB、14.6 dB、22.5 dB、22.1 dB 和 20.2 dB,带宽分别为 0.32 nm、0.27 nm、0.43 nm、0.45 nm 和 0.35 nm。此路用于多点温度传感,实验中矩形铝板不受外力作用,即 (7) 式中的 $\Delta\epsilon_i = 0 (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

光路 2:

FBG6~FBG10 在室温 20°C 时自由中心波长分别为 $\lambda'_{10} = 1541.12$ nm, $\lambda'_{20} = 1545.04$ nm, $\lambda'_{30} = 1546.36$ nm, $\lambda'_{40} = 1551.53$ nm, $\lambda'_{50} = 1556.87$ nm; 相应的峰值反射率分别约为 22.3 dB、13.2 dB、20.6 dB、19.6 dB 和 17.5 dB,带宽分别为 0.21 nm、0.45 nm、0.47 nm、0.36 nm 和 0.37 nm。此路用于多点

位移传感,实验时铝板作为简支梁使用,且保持温度 20 °C 恒定,即(7)式中的 $\Delta T_i = 0 (i=1,2,\dots,N)$ 。

根据(7)式,当 $\Delta T_i = 0$ 或 $\Delta \epsilon_i = 0$ 时,可得到各光纤光栅的温度 T 和位移 ω 灵敏度关系式如下:

$$S_i(T_i) = \frac{\gamma}{k_i(T_i)\lambda_{i0}}, \quad (9)$$

$$S_i(\omega_i) = \frac{\gamma}{k_i(\omega_i)\lambda_{i0}}, \quad (10)$$

式中 i 是序列号 ($i = 1, 2, \dots, N$), $k_i(T_i)$ 、 $k_i(\omega_i)$ 分别是温度、位移传感系数, ω_i 是梁的侧向位移, γ 是系统波长调谐精度(与调谐步长有关)。显然,传感系数 $k_i(T_i)$ 、 $k_i(\omega_i)$ 越大,则灵敏度 $S_i(T_i)$ 、 $S_i(\omega_i)$ 越高。本实验中的 $k_i(T_i)$ 、 $k_i(\omega_i)$ 具体形式分别为

$$k(T_i) = [\alpha + \zeta + (1 - p_e)(\alpha_{is} - \alpha)],$$

$$k(\omega_i) = \frac{3h(1 - p_e)}{L^2 - x^2 - (L - l)^2},$$

$$(0 \leq x < l)$$

或

$$k(\omega_i) = \frac{3h(1 - p_e)[(L - l)x - L(x - l)]}{x(L - l)[L^2 - (L - l)^2 - x^2] + L(x - l)^3},$$

$$(l \leq x < L)$$

式中 l 为集中载荷作用点到梁的固定端 C 之距离, L 、 h 分别为矩形梁的长度、厚度, x 为矩形梁上任意点距固定端 C 之距离。由相关参量

$$p_e = 0.22, \quad \zeta = 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

$$\alpha = 6.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \quad \alpha_{is} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

$$T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \gamma = 0.016 \text{ nm/step},$$

$$L = 90 \text{ cm}, \quad h = 6 \text{ mm},$$

$k_i(T_i)$ 的计算值为 $19.94 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 而 $k_i(\omega)$ 则与 l 、 x 有关,是一变化值。根据 $\gamma = 0.016 \text{ nm/step}$, 计算得到系统温度传感灵敏度值为 $S(T_i) = \gamma/[k(T_i)\lambda_i] \approx 0.5 \text{ } ^\circ\text{C/step}$, 温度精度约为 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

4.2 光纤光栅多点温度传感实验与分析

考虑到温度场分布的不同将导致光栅串上传感光栅波长产生不同的漂移量,因此在实测中,我们将点式热源、冷源分别置于铝板表面 6 个不同位置使其产生 6 种不同的温度场分布。其中,热源温度与位置分别为: $T_1 = 145 \text{ } ^\circ\text{C}$, $z_1 = 7.5 \text{ cm}$; $T_2 = 165 \text{ } ^\circ\text{C}$, $z_2 = 22.5 \text{ cm}$; $T_6 = 253 \text{ } ^\circ\text{C}$, $z_6 = 80 \text{ cm}$; 冷源温度与位置分别为: $T_3 = 7 \text{ } ^\circ\text{C}$, $z_3 = 40 \text{ cm}$; $T_4 = 6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $z_4 = 55 \text{ cm}$; $T_5 = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$, $z_5 = 70 \text{ cm}$ 。图 4(a)、图 4(b)给出了点式热源分别单独置于距离 A 端 22.5 cm、80 cm 的 5 个光纤光栅反射谱的对比图,实验用光谱仪分辨率为 0.1 nm , 扫描平均次数为 10。在 3 个热源和 3 个冷源分别作用下,AB 梁上的 5 个光纤光栅的波长产生不同的漂移量,经计算得到相应感测点的温度分布 $f(T)$ 如图 5、图 6 中的实心点所示。

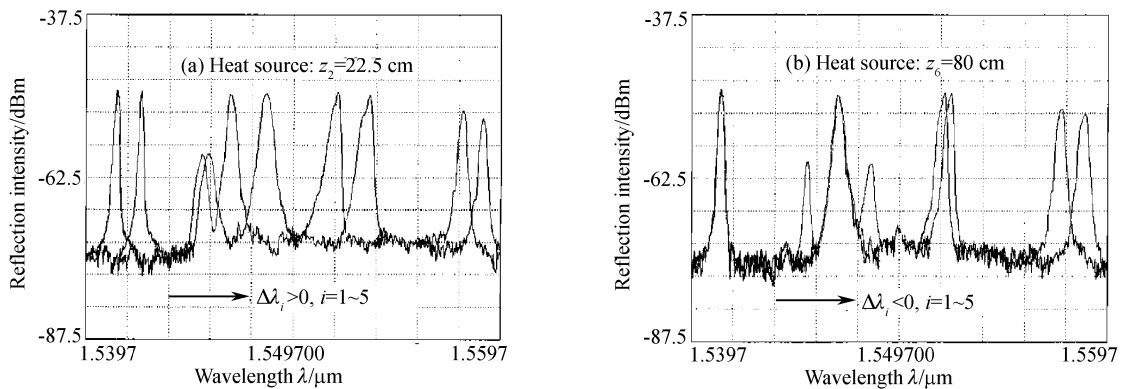


Fig. 4 Contrast of five sensing gratings reflection spectra of the heat sources at the different positions

为了检验系统测量的有效性,在系统各个传感光栅感测温度的同时,又用型号为 68-A 的半导体点温计对铝板(衬底材料)的温度分布进行了测量,该点温计的可测范围为 $0 \sim 300 \text{ } ^\circ\text{C}$, 温度分辨率为 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。该点温计测量铝板温度场分布的实验曲线如图 5、图 6 中的空心点所示。

由图 5、图 6 可见,阵列中的传感光栅波长漂移量,与其离热源(或冷源)的距离有关,靠近热源(或冷源)处的温度场变化率较大,远离位置处的变化率

则较小。经对比分析可知,各传感光纤光栅所在处温度的值满足关系式 $T_i = T_0 + \Delta\lambda_i/[k_i(T_i)\lambda_{i0}]$, 其温度计算值(实心点)与点温计测量的值(空心点)在误差范围内(约为 $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$)是一致的,温度测量分辨率约为 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。其中,图 5 因纵坐标间隔较大,故数据点的误差被淹没未标出;图 6 为对比清晰起见,仅标出了实心点的误差。

此外,在热源(或冷源)附近,若不能布设密集的传感光栅,则对温度分布的测量将产生较大的误差,

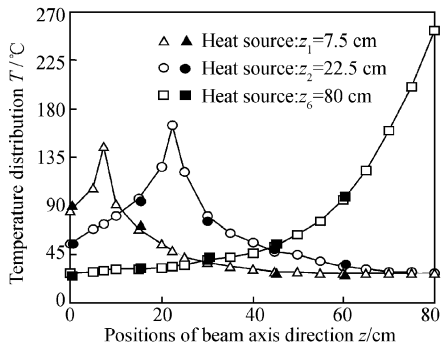


Fig. 5 Contrast curve of temperature distribution of point thermometer measurement (hollow points) and FBGs measurement (solid points) when heat sources are placed in different positions

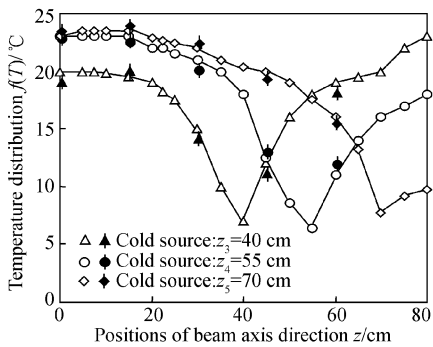


Fig. 6 Contrast curve of temperature distribution of point thermometer measurement (hollow points) and FBGs measurement (solid points) when cold sources are placed in different positions

如图 5 所示,当热源置于 $z_1=7.5\text{ cm}$ 和 $z_2=22.5\text{ cm}$ 时,该点附近因无光栅感测导致温度分布曲线在该处产生断点。这种情况在工程实际应用中,可通过传感光栅的密集布设加以避免。

4.3 光纤光栅多点位移传感实验与分析

将光路 2 中的铝板作为简支梁进行位移传感实验,梁的两个支点间距离为 90 cm。根据材料力学理论,集中载荷作用于梁的不同位置使其向下弯曲,梁表面产生的不同应变使梁的横向位移分布不同,从而导致各个光纤光栅波长漂移有所差异。图 7 与图 8 分别给出了典型的集中载荷作用于距简支梁 C 端 30 cm 与 60 cm 处,该点侧向位移(挠度) $\omega=1.5\text{ cm}$ 时,位置不同的 5 个传感光栅反射谱的对比图。实验用光谱仪分辨力为 0.1 nm,扫描平均次数为 10。实验中用精度为 0.01 mm 的百分表测量挠度,其可测范围为 0~50 mm。图 9 与图 10 分别是集中载荷作用于距简支梁 C 端 30 cm 与 60 cm 处,位置不同的 5 个传感光栅波长漂移量与其侧向位移的实验对比关系曲线。

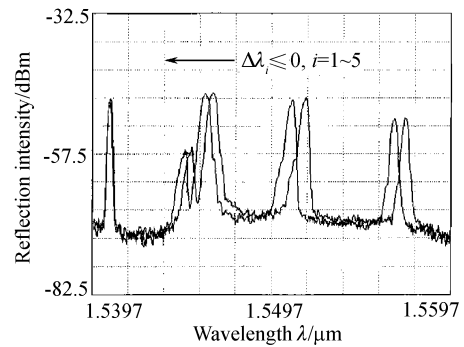


Fig. 7 Contrast of reflective spectra of five sensing FBGs in different positions when the focus load acts on the left end 30 cm of simple beam with the deflection $\omega=1.5\text{ cm}$

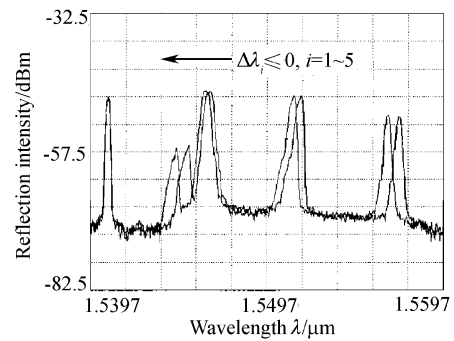


Fig. 8 Contrast of reflective spectra of five sensing FBGs in different positions when the focus load acts on the left end 60 cm of simple beam with the deflection $\omega=1.5\text{ cm}$

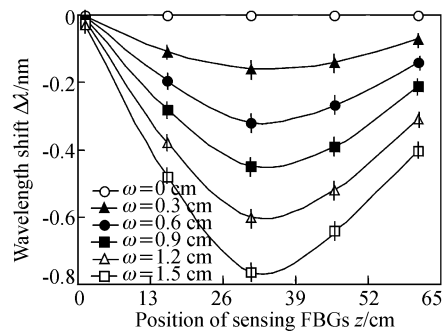


Fig. 9 Contrast curve of wavelength shifts experiments of five sensing FBGs in different positions the focus load with different deflection acts on the left end 30 cm of simple beam

多次实验表明,当集中载荷作用于梁上不同点时,各传感光纤布拉格光栅的波长漂移量虽有所不同,但均与该处梁的横向位移成正比,且满足关系式

$$\omega_i = \Delta\lambda_i / [k_i(\omega)\lambda_{i0}]$$

由图 9 可知,当梁的侧向位移 $\omega_i=1.5\text{ cm}$ 时, $\Delta\lambda_i \approx 0.8\text{ nm}$, 则

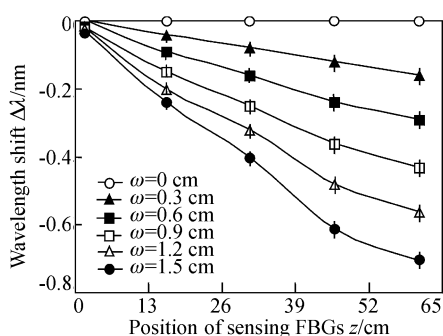


Fig. 10 Contrast curve of wavelength shifts experiments of five sensing FBGs in different positions the focus load with different deflection acts on the left end 60 cm of simple beam

$$k_i(\omega_i)\lambda_{i0} \approx 0.053 \text{ nm/mm.}$$

于是,由(10)式得到实验位移灵敏度约为

$$S(\omega_i) = \gamma / [k(\omega_i)\lambda_i] \approx 0.3 \text{ mm/step,}$$

即位移测量分辨力约为 0.3 mm。对于图 9、图 10 中各个光纤光栅位置的侧向位移,其测量值与理论值之比不小于 92%,测量误差约为 ± 0.1 mm。

若将图 2 所示的多点传感网络系统进一步优化(如提高扫描速度、增大调谐范围等),该系统还可以进一步提高传感检测性能。并且,与干涉型(如光纤法布里-珀罗腔)调谐机构相比,本系统具有成本较低、易于实现、调谐精度可调等优点,在准分布、多功能、多参量实时测量与监控的工程化应用中,具有较强的竞争力。

结论 光纤光栅多点传感网络系统具有突出的优点:传感基元为光纤光栅串,根据不同需求可构建为点阵、面阵和体阵等多种拓扑结构,采用波分复用、空分复用及时分复用技术,可实现对温度、应变、位移、压力等诸多参量进行多点准分布式实时感测与监控。本文通过定义传感信号分辨因子,对光纤光栅多点传感理论进行了研究,给出了多点传感系统实际复用能力的一般计算方法,设计并实现了具有一定特色的光纤光栅多点传感网络系统。该系统采用反射滤波方式解调信号,其信噪比高、寻址能力强、信号提取便利;调谐机构设计成双光纤光栅扫描,使波长调谐范围增加了两倍,提高了系统寻址范围;因采用步进电机微调谐,其精度可根据测量要求灵活控制;选择等腰三角形悬臂梁,实现了光纤光栅波长双向准无啁啾线性传感。我们利用该系统对温度、位移进行了双路、多点传感实验,实验结果与多点传感理论分析是相符的。

参 考 文 献

- Zhang W G, Liu Y G, Kai G Y *et al.*. A novel independent tuning technology of center wavelength and bandwidth of fiber Bragg grating. *Opt. Commun.*, 2003, **216**(4~6):343~350
- Zhang W G, Xu Z W, Kai G Y *et al.*. Sensing measurement of two parameters for torsion and temperature using single fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9):1070~1075 (in Chinese)
- Zhang Weigang, Dong Xinyong, Zhao Chunliu *et al.*. Study of deflection and stress sensing using grating chirp effect in bilateral cantilever beam. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11):1309~1312 (in Chinese)
- Chan P K C, Jin W, Lau K T *et al.*. Multi-point strain measurement of composite-bonded concrete materials with a RF-band FMCW multiplexed FBG sensor array. *Sensors and Actuators*, 2000, **87**(1):19~25
- Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(4):355~375
- Shinji Yamashita, Kazuo Hotate. Distributed pressure sensor with a mode-locked fiber-ring laser. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9):590~592
- Zhang W G, Dong X Y, Zhao Q D *et al.*. FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperatures based on bilateral cantilever beam. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1340~1342
- Dong X Y, Qin Z X, Ding L *et al.*. All-fiber photonic device and system for advanced optical communications. *Proc. SPIE*, 2000, **4225**:151~159
- Erdogan T. Fiber grating spectra. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- Zhang W G. *Study on Design and Technology in Fiber Grating-Type Sensing Series Devices* (纤栅式传感系列器件的设计及技术研究) [Dr. dissertation]. Tianjin: Nankai University, 2002. 121~123 (in Chinese)
- Rao Y J, Jackson D A. Recent progress in multiplexing techniques for in-fiber Bragg gratings sensors. *Proc. SPIE*, 1996, **2895**:514~518
- Wang W. *Study on Tunable Filtering Technique and Application of Fiber Grating* (光纤光栅调谐滤波技术及其应用研究) [MS dissertation]. Tianjin: Nankai University, 2001. 46~61 (in Chinese)
- Liu Y Q, Liu Z G, Guo Z Y *et al.*. Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1):88~92 (in Chinese)
- Zhang W G, Kai G Y, Dong X Y *et al.*. Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8):1154~1156
- Zhang W G, Wang Y, Zhang D S *et al.*. Studies of real time sensing and measurement for two dimensional dynamics quantities using fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11):1323~1327 (in Chinese)