

# 考虑非对称重叠光谱的 FBG 传感网络带宽资源多目标优化配置

江灏<sup>1,2</sup>, 林朝晖<sup>1,2</sup>, 陈静<sup>1,2\*</sup>, 缪希仁<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

<sup>2</sup>福州大学电力系统与装置产业研究院, 福建 福州 350108

**摘要** 提出适用于非对称重叠光谱的布拉格光纤光栅(FBG)传感网络多目标带宽资源优化模型,借助多目标优化算法 NSGA-II 获得带宽资源的帕累托最优配置,从中选取合适的解来确定各 FBG 节点的布拉格波长分配。实验证明,该方法能够节约 40% 以上的光源带宽,提高了传感网络多路复用能力,同时将相邻 FBG 的光谱重叠程度降为最低,保障了高水平测量精度。本文提出的带宽资源多目标优化配置方法可为工程实施中的多种配置需求提供参考。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅传感网络; 非对称光谱; 波分复用; 多目标优化

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1006002

## Multi-Objective Optimal Configuration of Bandwidth Resources in FBG Sensor Network for Asymmetric Overlapping Spectra

Jiang Hao<sup>1,2</sup>, Lin Chaohui<sup>1,2</sup>, Chen Jing<sup>1,2\*</sup>, Miao Xiren<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

<sup>2</sup> Research Institute of Power System & Power Equipment, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

**Abstract** In this paper, we proposed a multi-objective optimization model of bandwidth resources in the fiber Bragg grating (FBG) sensor network which is applicable to asymmetric overlapping spectra. Then, the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was used to obtain the Pareto front of bandwidth resources, from which appropriate solutions were selected to determine the Bragg wavelength allocation at each FBG node. Experiments show that this method can save at least 40% of the bandwidth of the light source. While improving the multiplexing ability of the sensor network, it minimizes the overlapping of adjacent FBG spectra, maintaining high measurement accuracy. This method provides a reference for the allocation requirements in practical engineering applications.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating sensor network; asymmetric spectra; wavelength division multiplexing; multi-objective optimization

**OCIS codes** 060.3735; 280.4788; 060.4230; 150.1135

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感技术作为近年来发展迅速的光器件技术,具有质量小、耐腐蚀、抗电磁干扰、易于远程遥测和实现分布式测量等优点,在现

代工程结构健康监测领域受到了越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。FBG 传感网络检测的原理是通过多路复用技术构造分布式 FBG 传感器阵列,同时对多个测量点进行应变、振动等诸多物理参量的探测。随着现代工程结构朝向大型化、复杂化的发展,FBG 传感

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2020-11-27; 录用日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61703106, 61703105)

\* E-mail: chenjing@fzu.edu.cn

网络中传感器的数量也越来越多,这对 FBG 传感网络的复用能力提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。

波分复用作为 FBG 传感网络最常使用的多路复用技术,为每个 FBG 传感器分配了唯一的中心波长及工作区域<sup>[4]</sup>。为了避免因传感信道的串扰影响检测的正确性,传统的布拉格波长检测算法要求相邻光谱的波长变化范围不能出现重叠现象,因此,面对有限的光源带宽,FBG 传感器的数量受到限制,无法实现大规模的 FBG 传感网络。为了解决该问题,有学者提出了借助进化算法来解调具有重叠工作区域的反射光谱的中心波长检测方法。区别于传统的波长检测算法,该方法通过允许每个 FBG 传感器的工作区域存在重叠来减少其所占用的带宽,从而增加了传感网络中 FBG 传感器的数量,提高了 FBG 传感网络的复用能力。在采用遗传(GA)算法<sup>[5]</sup>求解波长检测函数优化模型,实现对具有重叠光谱的 FBG 传感网络的波长解调后,越来越多的进化算法及改进版本被提出,如模拟退火(SA)算法<sup>[6]</sup>、粒子群(PSO)算法<sup>[7-8]</sup>、差分进化(DE)算法<sup>[9-10]</sup>,只为进一步提高对重叠光谱的解调精度,减少中心波长的检测误差。但无论何种算法,随着光谱重叠程度的增加,测量精度都会逐渐下降,算法运算时间也会增加。因此,在设计工作区域可重叠的 FBG 传感网络时需要网络的规模和光谱的重叠程度进行权衡,根据实际需求为 FBG 寻找合适的中心波长。此外,考虑到 FBG 的反射光谱容易受到元件封装、安装及环境应变、温度等因素的影响<sup>[11-12]</sup>,实际应用中的 FBG 反射光谱经常出现形变或跳动,

所以,一般情况下 FBG 光谱都不是标准的对称谱<sup>[13]</sup>。非对称 FBG 反射谱的峰值与布拉格波长位置存在较大的偏移,故会影响测量精度。为了对传感网络中各 FBG 的中心波长进行合理的优化配置,设计适用于带宽重叠复用的 FBG 传感网络,需要考虑到 FBG 反射谱非对称的影响。

本文针对非对称重叠光谱的 FBG 传感网络建立了一个多目标带宽资源优化配置模型,其中一个目标是 minimized 光源带宽的占用量,以提升 FBG 传感网络的复用能力,另一个目标是 minimized 相邻光谱间的重叠程度,以保障布拉格波长的测量精度。考虑到实际应用中 FBG 反射谱的非对称性,设计了一个加权因子来反映非对称光谱对重叠程度的影响。由于上述两个目标是相互矛盾的,故需要借助多目标优化算法 NSGA-II 求出一组非支配解集,称帕累托(Pareto)解集,解集中的各个非支配解均为一种配置方案,工程人员可根据实际工程需求选取合适的 FBG 传感网络初始布拉格波长分配方案。

## 2 基本原理

### 2.1 原理与假设

典型的 FBG 传感网络的原理如图 1 所示,宽带光源通过  $1 \times N$  的光分离器将光照射到  $N$  个并联的 FBG 传感器中,每个 FBG 元件都会产生反射光谱,这  $N$  个反射光谱经过衰减器后进入 3 dB 光耦合器,然后由光谱分析仪(OSA)进行检测,并将采集到的光谱数据传递给个人计算机(PC)进行数据处理。

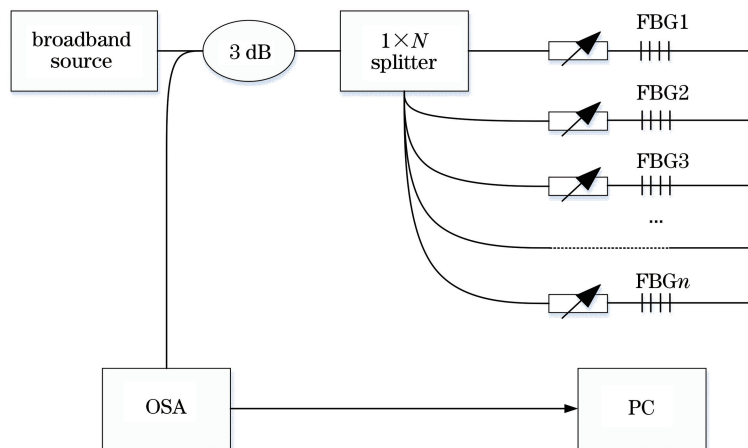


图 1 FBG 传感网络结构

Fig. 1 Structure of FBG sensor network

每个 FBG 的反射光谱都由自身的性能状态所决定,当 FBG 受到外界因素作用时,反射光谱就会

发生相应的变化,通过了解反射光谱的变化情况,就能掌握相应 FBG 所发生的状态变化信息,实现传感

功能。对 FBG 反射光谱的描述通常有 4 个基本指标:峰值反射率  $R_{\max}$ 、布拉格波长  $\lambda_B$ 、半峰值带宽  $w_{1/2}$ 、边模抑制比  $R_{\text{SMS}}$ 。峰值反射率  $R_{\max}$  是指光谱最大的反射率,传感网络中的衰减器使得每个 FBG 的峰值反射率不同,因此每个 FBG 具有不同的谱形。布拉格波长  $\lambda_B$  是对应于峰值反射率处的波长。当 FBG 受到应变作用时,布拉格波长会发生相应的偏移,每个 FBG 的工作范围就是指初始布拉格波长的偏移范围。初始布拉格波长,又称中心波长,其大小在 FBG 制备时根据需要进行刻写。半峰值带宽  $w_{1/2}$  是光谱反射率下降至一半处的宽度,其计算式为  $w_{1/2} = w_R/2 + w_L/2$ ,其中  $w_L/2$  和  $w_R/2$  分别表示反射谱的左半宽和右半宽。理论上,反射谱是对称的, $w_L/2$  应与  $w_R/2$  相等,如图 2(a)所示。但由

于 FBG 元件十分纤细、脆弱,若将其直接应用于结构中,容易受损,存活率低,因此,通常需要将其封装至特定设计的弹性结构体内,制备成光纤光栅传感器,安装在被测对象上,而在这个封装、埋设的过程中,FBG 元件会难以避免地受到一个非横向应力作用,从而导致 FBG 反射光谱出现非对称变形<sup>[14]</sup>。此外,因为 FBG 元件多了封装和埋设这两个环节,被测对象的应变状态不再是直接地传递给 FBG 元件,而是要经过封装和埋设这两个环节后才传递到 FBG 传感元件上,该应变传递环节同样使 FBG 反射谱的谱形发生了形变<sup>[15]</sup>。所以,实际应用中的 FBG 传感网络,其反射光谱的谱形一般都是非对称的,如图 2(b)所示,此时  $w_R/2 > w_L/2$ ,若采用峰值法对此光谱进行解调,所得到的布拉格波长大小要大于实际值。

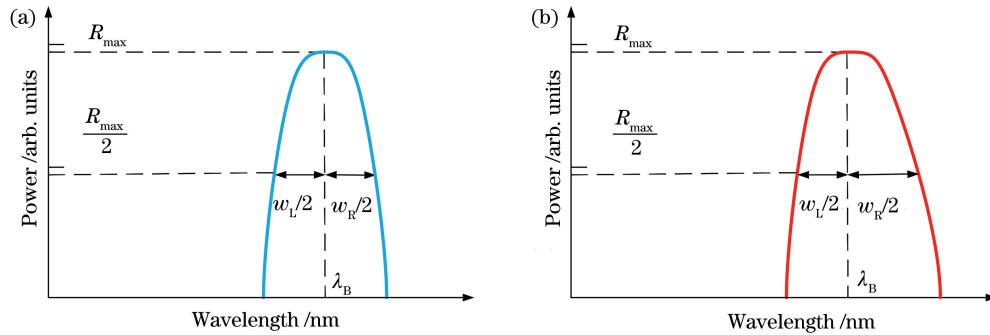


图 2 FBG 反射光谱的谱型。(a)对称;(b)非对称

Fig. 2 Spectral shape of FBG reflection spectrum. (a) Symmetric; (b) asymmetric

传统波分复用的 FBG 传感网络受光谱解调技术的制约,要求相邻 FBG 的工作范围不能重叠,故在给出宽带光源的范围后,每个 FBG 的初始布拉格波长被基本确定。但是,当允许相邻 FBG 的工作范围存在重叠后,FBG 的初始布拉格波长设置将不再受到约束,且随着 FBG 工作区域重叠程度的增加,每个 FBG 所占的宽带资源量减少,网络中可容纳的 FBG 数目增加,这使得布拉格波长的测量误差增大。因此,如何合理地配置每个 FBG 的初始布拉格波长,使得光谱重叠程度与宽带光源的占用量都尽可能低,就是本文 FBG 传感网络带宽优化设计的目的所在。

假设  $\lambda_{Bi}$  表示 FBG 传感网络中第  $i$  个 FBG 的初始布拉格波长,用  $[-\Delta_i, \Delta_i]$  表示该 FBG 的布拉格波长的偏移范围,那么第  $i$  个 FBG 的工作区域就可以表示为  $[\lambda_{Bi} - \Delta_i, \lambda_{Bi} + \Delta_i]$ 。同样可知第  $j$  个 FBG 的工作区域为  $[\lambda_{Bj} - \Delta_j, \lambda_{Bj} + \Delta_j]$ 。如果  $FBG_i$  和  $FBG_j$  满足

$$\begin{aligned} \lambda_{Bi} - \Delta_i &\leq \lambda_{Bj} - \Delta_j \leq \lambda_{Bi} + \Delta_i \text{ or} \\ \lambda_{Bj} - \Delta_j &\leq \lambda_{Bi} - \Delta_i \leq \lambda_{Bj} + \Delta_j, \end{aligned} \quad (1)$$

那么这两个 FBG 的工作区域就存在一个重叠区域  $L_{i,j}$ ,该重叠区域可表示为

$$L_{i,j} = [R_{\text{lower}}^{ij}, R_{\text{upper}}^{ij}], \quad (2)$$

其中:  $R_{\text{lower}}^{ij} = \max(\lambda_{Bi} - \Delta_i, \lambda_{Bj} - \Delta_j)$ ,  $R_{\text{upper}}^{ij} = \min(\lambda_{Bi} + \Delta_i, \lambda_{Bj} + \Delta_j)$ 。

当两个 FBG 的重叠区域确定后,可进一步计算每个 FBG 的布拉格波长进入该重叠区域的概率  $p$ 。若被测对象为结构应变,根据已知的布拉格波长偏移量  $\Delta\lambda_B$  与应变  $\epsilon$  呈线性关系,布拉格波长在重叠区域内的变化规律应该与应变  $\epsilon$  的变化相同,那么只需知道应变  $\epsilon$  在重叠区域内的变化规律就可算得概率  $p$ 。但是此方式难以确定结构出现应变的位置及大小,为此可以假设应变在该重叠区域内服从某种概率分布,再根据采集到的实际应变数据得到此概率分布的参数,由布拉格波长的偏移量  $\Delta\lambda_B$  同样服从该分布来计算概率  $p$ 。

根据已知的应变的先验统计信息,可以分别得到  $FBG_i$  和  $FBG_j$  传感器的布拉格波长的概率密度函数  $\varphi_i(\lambda)$  和  $\varphi_j(\lambda)$ ,则  $FBG_i$  和  $FBG_j$  的布拉格波

长偏移至重叠区域的概率  $p_i$  和  $p_j$  可以表示为

$$p_i = \int_{R_{lower}^{ij}}^{R_{upper}^{ij}} \varphi_i(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

$$p_j = \int_{R_{lower}^{ij}}^{R_{upper}^{ij}} \varphi_j(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

$$p_{i,j} = \begin{cases} \int_{R_{lower}^{ij}}^{R_{upper}^{ij}} \varphi_i(\lambda) \times \varphi_j(\lambda) d\lambda, & \lambda_{Bi} - \Delta_i < \lambda_{Bj} - \Delta_j < \lambda_{Bi} + \Delta_i \text{ or } \lambda_{Bj} - \Delta_j < \lambda_{Bi} - \Delta_i < \lambda_{Bj} + \Delta_j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (5)$$

由于在实际应用中,FBG 的反射谱多为非对称谱,因此,还需要特别考虑非对称反射谱对重叠区域  $L_{ij}$  和重叠概率  $p_{i,j}$  的影响。因为重叠区域是由每个 FBG 的中心波长和工作范围决定的,而中心波长和工作范围是由制作工艺与被测对象决定的,故重叠区域不受谱形对称性的影响。下面分析非对称谱形对重叠概率  $p_{i,j}$  的影响。假设 3-FBGs 传感网络初始布拉格波长分布如图 3 所示,FBG<sub>*i-1*</sub> 和 FBG<sub>*i*</sub> 的重叠区域为  $[\lambda_{Bi} - \Delta_i, \lambda_{Bi-1} + \Delta_{i-1}]$ ,对 FBG<sub>*i-1*</sub> 来说,反射光谱的左半宽比右半宽更大,而重叠区域位于其中心波长的右侧,此时 FBG<sub>*i-1*</sub> 进入该重叠区域的概率会比光谱对称时的概率要低。同样地,FBG<sub>*i*</sub> 的反射光谱也是左半宽大于右半宽,但是该重叠区域在其中心波长的左侧,故 FBG<sub>*i*</sub> 进入该重叠区域的概率比光谱对称时的概率要高。由此可知,当 FBG 的反射光谱出现不对称时,其进入重叠区域的概率变化规律为:当 FBG 反射光谱出现不对称的方向与重叠区域偏移 FBG 中心波长位置的方向相同时,FBG 进入该重叠区域的概率增加,反之则减少。以 FBG<sub>*i*</sub> 为例,其反射光谱的左半宽比右半宽更大,光谱的不对称方向向左,由于重叠区域  $[\lambda_{Bi} - \Delta_i, \lambda_{Bi-1} + \Delta_{i-1}]$  位于其中心波长的左侧,故 FBG<sub>*i*</sub> 进入该区域的概率增加,而重叠区域  $[\lambda_{Bi+1} - \Delta_{i+1}, \lambda_{Bi} + \Delta_i]$  位于其中心波长的右侧,故 FBG<sub>*i*</sub> 进入该区域的概率减少。

因为每个 FBG 光谱出现不对称时要么向左偏,要么向右偏,故当两个 FBG 的光谱出现不对称时,它们的重叠概率就只有 3 种变化情况:第 1 种情况为 FBG<sub>*i-1*</sub> 反射光谱的左半宽比右半宽大,且 FBG<sub>*i*</sub> 反射光谱的右半宽比左半宽大,此时两个 FBG 进入重叠区域的概率都降低,重叠概率  $p_{i-1,i}$  降低;第 2 种情况是 FBG<sub>*i-1*</sub> 反射光谱的右半宽比左半

由于 FBG 传感网络采用了波分复用技术,本文 FBG 传感网络拓扑结构虽以并联形式为例,但同样适用于串联结构的传感网络。在传感网络中各 FBG 的工作状态就是相互独立的,所以两个 FBG(FBG<sub>*i*</sub> 和 FBG<sub>*j*</sub>) 的反射光谱重叠概率  $p_{i,j}$  可定义为

宽大,且 FBG<sub>*i*</sub> 反射光谱的左半宽比右半宽大,此时两个 FBG 进入重叠区域的概率都增加,重叠概率  $p_{i-1,i}$  增加;第 3 种情况是两个 FBG 的光谱不对称方向相同,即反射谱都是左半宽比右半宽大或右半宽比左半宽大,此时其中一个 FBG 进入重叠区域的概率增加,另一个则减少,故重叠概率  $p_{i-1,i}$  的增减取决于半宽差较大的 FBG 所引起的概率变化。

综上,考虑到 FBG 非对称光谱对重叠概率  $p_{i,j}$  的影响,在原本的重叠概率表达式中增加了一个加权因子  $\beta_{i,j}$ ,其表达式为

$$\beta_{i,j} = 1 + \int_{a_j}^{a_i} \gamma(\alpha) d\alpha, \quad (6)$$

式中: $\alpha_i$  和  $\alpha_j$  分别为 FBG<sub>*i*</sub> 和 FBG<sub>*j*</sub> 的不对称参数,其大小为 FBG 反射光谱的右半宽减去左半宽; $\gamma(\alpha)$  为不对称参数的概率密度函数。当反射光谱的左半宽与右半宽相等时,光谱对称,其值为 0;当左半宽大于右半宽时,光谱不对称方向左,其值为负;左半宽小于右半宽时,光谱不对称方向右,其值为正。本文假设传感网络中所有 FBG 的谱形带宽都相同,不对称参数表征的只是光谱的不对称程度,并不受谱形带宽大小的影响。FBG 因埋设而产生的反射谱不对称参数通常难以直接确定其值,假设其服从某种概率分布,根据实际的先验统计信息可获取其概率分布参数。本文选取高斯分布作为不对称参数的概率密度函数,均值为  $\mu$ ,标准差为  $\sigma$ 。(6)式积分项中的积分下限设为 FBG<sub>*j*</sub> 的不对称参数,积分上限设为 FBG<sub>*i*</sub> 的不对称参数的前提是  $\lambda_{Bi} < \lambda_{Bj}$ ,其目的是保证加权因子的值能与上述 3 种情况相符合。当  $\alpha_i < 0, \alpha_j > 0$  时,此时积分部分为负,  $0 < \beta < 1$ ,重叠概率  $p_{i,j}$  降低,对应上述的第 1 种情况;当  $\alpha_i > 0, \alpha_j < 0$  时,此时积分部分为正,  $1 < \beta < 2$ ,重叠概率  $p_{i,j}$  增加,对应上述第 2 种情况;当

$\alpha_i > 0, a_j > 0$  时,若  $\alpha_i > a_j$ ,即两个 FBG 的反射谱都是右半宽大于左半宽,且中心波长较小的 FBG 的半宽值差更大,根据概率增减取决于半宽值变化较大的 FBG,可知重叠概率  $p_{i,j}$  的变化和中心波长较小的 FBG 进入重叠区域的概率变化趋势相同,都是增加的,此时积分部分为正,同理可以证

实在其他情况下,加权因子的值同样符合重叠概率  $p_{i,j}$  的变化。

根据上面得到的重叠区域  $L_{i,j}$ 、重叠概率  $p_{i,j}$  及加权因子  $\beta_{i,j}$ ,可以将这三者的乘积定义为 FBG<sub>*i*</sub> 和 FBG<sub>*j*</sub> 的光谱重叠程度  $D_{i,j}$ ,其表达式为

$$D_{i,j} = L_{i,j} \times p_{i,j} \times \beta_{i,j} \quad (7)$$

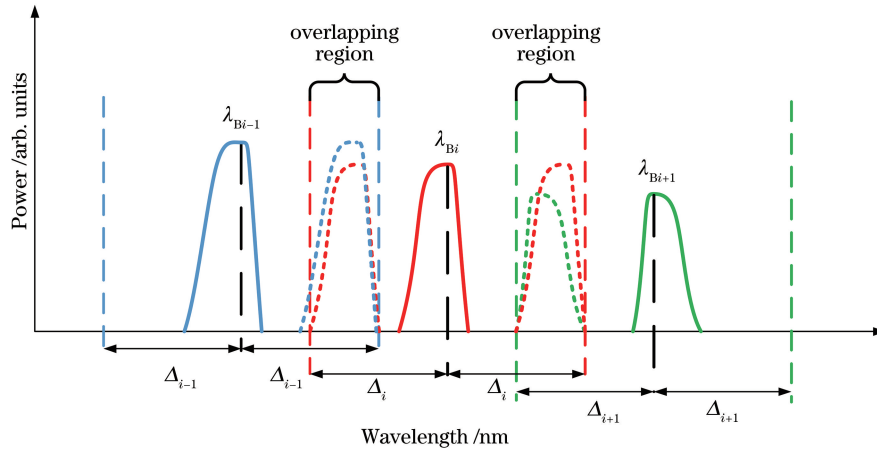


图 3 非对称 3-FBGs 传感网络中心波长分布图

Fig. 3 Distribution of the central wavelength of the asymmetric 3-FBGs sensor network

### 2.2 多目标模型

FBG 传感网络的带宽资源优化设计实质上是在寻找合适的 FBG 中心波长,让两个相互矛盾的目标——光源带宽和光谱重叠程度,都能取得最小值,为此需要先建立目标函数来反映 FBG 中心波长  $\lambda_B$  与光源带宽占用量  $\lambda_s$ 、反射光谱重叠程度  $D_{WDM}$  的关系,其中整个传感网络的光源带宽占用量和反射光谱重叠程度的表达式为

$$\lambda_s = \max_{i=0,1,\dots,n} (\lambda_{B_i} + \Delta_i) - \min_{i=0,1,\dots,n} (\lambda_{B_i} - \Delta_i), \quad (8)$$

$$D_{WDM} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{i,j} \quad (9)$$

虽然计算整个传感网络的重叠程度可以直接反映光谱重叠情况,但是随着网络中传感器数量的增加,计算量会呈指数级增加,因此可以将重叠程度定量为平均重叠程度  $\bar{D}$ ,这样可通过减少求解空间来提高算法的收敛速度,定义如下:

$$\bar{D} = \text{Average}(D_{i,j}) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{i,j} \quad (10)$$

基于上述对光源带宽占有量和传感网络平均光谱重叠程度的定义,建立 FBG 传感网络的多目标优化模型,其中两个目标函数分别为最小化光源带宽占用量  $\lambda_s$  和最小化平均光谱重叠程度  $\bar{D}$ ,通过权衡这两个目标来设计 FBG 传感网络,在确保增加传感器数量的同时避免引入过多的测量误差。该多目标

优化问题的具体表达式如下:

$$\begin{aligned} \min: & \lambda_s \text{ and } \bar{D} \\ \text{s. t. : } & \min_{i=0,1,\dots,n} (\lambda_{B_i} - \Delta_i) \geq \lambda_{\min}, \quad (11) \\ & \max_{i=0,1,\dots,n} (\lambda_{B_i} + \Delta_i) \leq \lambda_{\max} \end{aligned}$$

式中  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  分别表示传感网络占用的光源带宽的上下限。下文将采用多目标优化算法 NSGA-II 对该多目标优化问题进行求解。

### 2.3 NSGA-II 算法

因为存在多个相互矛盾的目标函数,多目标优化问题无法同单目标优化问题一样可以寻找到唯一的最优解,所以它们的寻优结果通常是一组解集,该解集中的解都是经过权衡后的最优方案,且在解空间中没有其他更优的解,该解集称为非支配解集或 Pareto 最优解集。虽然获取 Pareto 解集的方法有很多,但是从 Erickson 等<sup>[16]</sup>提出小生境 Pareto 遗传算法 NPGA 后,基于 Pareto 最优的多目标进化算法逐渐成为求解 Pareto 解集的主流方法。本文采用其中具有代表性的带精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA-II)<sup>[17]</sup>,对 FBG 传感网络带宽资源优化配置模型进行求解。NSGA-II 算法的流程图如图 4 所示,其核心包括:1)引入精英策略,将父代和子代合并成一个新的种群,由这个新种群来产生新一代,保证父代中的优良个体不会丢失;2)提出快速非支配排序方法,根据个体

间的非支配关系对种群分层,确保非支配序低的层种群能进入下一代,使搜索能够朝 Pareto 最优解集方向进行;3)提出拥挤度比较算子,对具有相同非支配序的个体进行优胜劣汰,保持种群的多样性以避免陷入局部最优。针对非对称光谱重叠的 FBG 传感网络带宽资源配置所设立的多目标优化问题,NSGA-II 算法用于求解其 Pareto 解集的具体步骤如下:

Step1:根据传感网络所占用的光源带宽和各 FBG 的工作范围确定中心波长的取值范围,搜索空间的大小由决策变量(中心波长)的取值范围决定,维数则由 FBG 传感网络的规模决定。在搜索空间中先随机生成规模为  $N$  的初代种群,用  $P_0$  表示,再对该种群进行选择、交叉、变异产生第一代子代种群,用  $Q_0$  表示,初始化迭代次数  $t=0$ ,设置最大迭代次数  $T_{\max}$ 。

Step2:依据精英策略的思想,先将父代  $P_t$  与子代  $Q_t$  合并组成新的种群  $R_t$ ,种群规模为  $2N$ ,然后根据(8)式和(10)式计算种群中每个个体的目标函数值,依此对  $R_t$  进行快速非支配排序,产生一系列非支配解集  $Z_i$ 。

Step3:因为解集  $Z_1$  中包含的个体是  $R_t$  中最优的,故先将  $Z_1$  中的个体放入新的父代种群  $P_{t+1}$  中,若此时  $P_{t+1}$  的种群规模小于  $N$ ,则继续向  $P_{t+1}$  中填充下一级非支配集,直到种群大小超过  $N$ ,并记下该非支配集的序号,假设为  $Z_k$ 。

Step4:对  $Z_k$  内的个体进行拥挤度排序,取其中排序靠前的个体加入新的父代种群  $P_{t+1}$ ,使其个体数量达到  $N$ ,最后再进行选择、交叉、变异产生新的子代种群  $Q_{t+1}$ 。

Step5:判断是否达到终止条件,即迭代次数  $t$  是否等于  $T_{\max}$ ,若否,则重复步骤 2~4,并将迭代次数加 1,若是,则迭代结束。最终得到满足帕累托最优的所有可行解,每个候选解代表一种可行的解决方案,以供工程人员参考。

### 3 优化结果与分析

对非对称光谱 FBG 传感网络采用 NSGA-II 算法获取 Pareto 优化曲线,分析该曲线的特点,说明如何根据 Pareto 曲线寻找所需要的波长分配方案,并采用同一算法获取同等规模的对称光谱 FBG 传感网络的 Pareto 曲线。通过对比两条曲线来说明当光谱出现不对称时曲线的区别,然后分别改变非

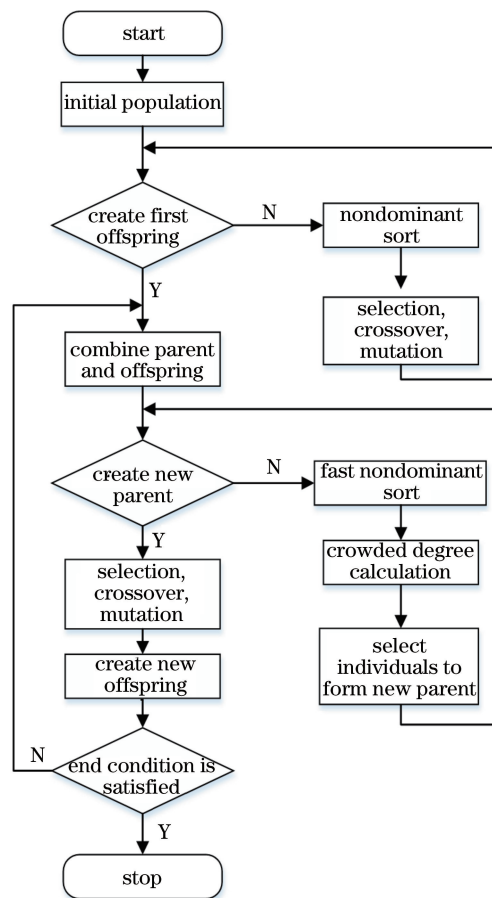


图 4 NSGA-II 程序流程图

Fig. 4 NSGA-II program flow chart

对称参数概率密度函数中的均值和标准差,进一步观察不同不对称参数概率分布对 Pareto 曲线的影响。最后为验证波长分配方案选取方法的合理性,改变传感网络中 FBG 的数量,给出不同规模的传感网络的波长分配方案,并讨论了光源带宽的节约程度。

在实验中,采用 10 组变化范围从  $-1500 \sim 1500 \mu\epsilon$  的应变作为被测对象,相应的每个 FBG 的布拉格波长移动范围是  $-1.5 \sim 1.5 \text{ nm}$ 。根据应力的先验信息,选择高斯分布函数作为应力变化的概率密度函数,函数的均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$  应根据“ $3\sigma$  原则”选取,表 1 给出 10 种应力的概率分布参数。除了被测对象的概率分布,不对称参数的概率分布同样选择高斯函数作为其概率密度函数。仅考虑 FBG 封装及埋设这两个环节所造成的光谱不对称,将不对称参数的变化范围设在  $-0.5 \sim 0.5 \text{ nm}$ 。NSGA-II 算法的参数选择:种群大小设为 100,迭代次数为 1000,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。

表 1 10 组应力的参数

Table 1 Parameters of 10 groups of stresses

Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\mu / \mu\epsilon$	100	500	-100	-700	-650	-450	-550	250	320	-300
$\sigma / \mu\epsilon$	300	250	270	280	220	260	320	250	360	280

### 3.1 非对称光谱的 FBG 传感网络设计

首先对光谱不对称时的 FBG 传感网络进行实验设计。实验选取 8 个 FBG 组成传感网络,对应的待测应力为表 1 中的前 8 组,每个 FBG 都服从同一个不对称参数的概率分布。为使 FBG 光谱的不对称方向向左和向右的概率相同,将不对称参数的概率密度函数的均值  $\mu$  设为 0,再根据“ $3\sigma$  原则”和变化范围,将标准差  $\sigma$  设为 0.15,即本次实验的不对称参数服从均值  $\mu$  为 0、标准差  $\sigma$  为 0.15 的高斯分布。光源带宽的上限  $\lambda_{\min}$  取 1590 nm,下限  $\lambda_{\max}$  取 1550 nm,利用 NSGA-II 算法得到的 Pareto 曲线如图 5 所示。

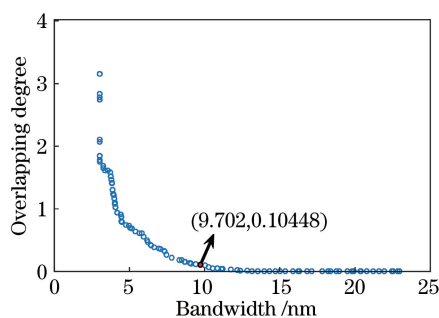


图 5 非对称光谱的 8-FBGs 传感网络 Pareto 曲线

Fig. 5 Pareto curves of 8-FBGs sensor networks with asymmetric spectra

曲线上每个解都是经过权衡后的最优解决方案,共 100 种。其中曲线左右两端点的解决方案是比较极端的两种方案:左端点处的解决方案是将传感网络中所有 FBG 的中心波长设成相同值,使得光源带宽的占用量仅为单个 FBG 的工作区域,带宽占用量达到最小值,但这将导致任意两个 FBG 的工作区域完全重叠,光谱重叠程度最高;右端点处的解决方案是将所有 FBG 的工作区域完全分离,使得相邻 FBG 的光谱不会发生重叠,光谱重叠程度为零,但光源带宽占有量也因此达到了最大值,这种解决方案同传统的 FBG 中心波长分配方案相同,只考虑光谱重叠程度的最小化,而未考虑光源带宽的占用量。除了曲线的左端点和右端点,其余的点给出的传感网络初始布拉格波长分配方案都是在 FBG 工作区域存在部分重叠的基础上建立的。由曲线可以看出,随着光源带宽占用量的增加,光谱重叠程度逐渐

减少,且整体的变化趋势与凹曲线相同,因此曲线上应存在一个拐点,在这拐点之后,光源带宽占用量的增加量将逐渐大于光谱重叠程度的减少量,也就是说在该拐点右侧的区域内,即使光谱重叠程度只减少一点点,光源带宽占用量也会增加很多,这恰好符合本文设计传感网络的目的,通过允许较小的光谱重叠来节约较大的光源带宽占用量。因此,可根据实际工程需要在拐点附近的区域选取合适的点作为解决方案。

### 3.2 非对称光谱 FBG 与对称光谱 FBG 的优化设计对比

进一步对光谱对称的 8-FBGs 传感网络用同样的算法寻优,将得到的对称光谱的 Pareto 曲线与上文非对称光谱的曲线进行对比,来说明非对称光谱对 Pareto 曲线造成的影响。实验结果如图 6 所示,在曲线左极值点处,反射谱对称的光谱重叠程度是一个固定值,大小为 3,而反射谱不对称的光谱重叠程度不是一个固定值,存在大于 3 的解,也存在小于 3 的解,这就说明非对称的反射谱会影响光谱重叠程度的大小,需要结合概率分布通过优化算法获得最优配置。在曲线右极值点处,非对称反射谱的光源带宽的占用量与反射谱对称时的值相同,证实了反射谱的不对称不影响带宽资源占用量。从整体上来看,反射谱对称的曲线处于反射谱不对称的曲线之上,这是因为充分考虑了光谱的非对称性对重叠程度的影响。在曲线右侧,光谱重叠程度的值已接近零,光谱非对称的影响程度很小,故此时不对称光

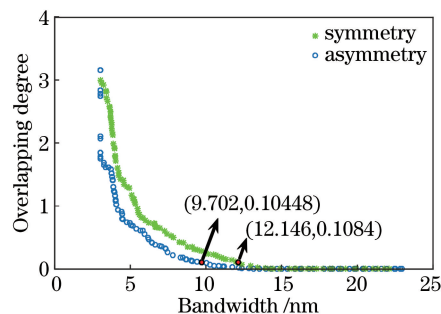


图 6 不对称光谱与对称光谱的 8-FBGs 传感网络的 Pareto 曲线

Fig. 6 Pareto curves of 8-FBGs sensor networks with asymmetric and symmetric spectra

谱与对称光谱的曲线相同,都近似为水平直线。

### 3.3 不同非对称概率分布对设计结果的影响

该部分主要观察不同的非对称参数对 Pareto 曲线的影响。针对概率密度函数中的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$ ,设计了两组实验,每组实验的传感网络规模和待测应力与 3.1 中的设置相同。第一组实验默认

不对称参数的概率分布函数的均值  $\mu$  为 0,标准差  $\sigma$  分别设为 0.05,0.10,0.15,0.20,用于观察标准差  $\sigma$  对曲线的影响。第二组实验默认概率分布函数的标准差  $\sigma$  为 0.15,均值  $\mu$  分别设为  $-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2$ ,用于观察均值  $\mu$  对曲线的影响。实验结果如图 7 所示。

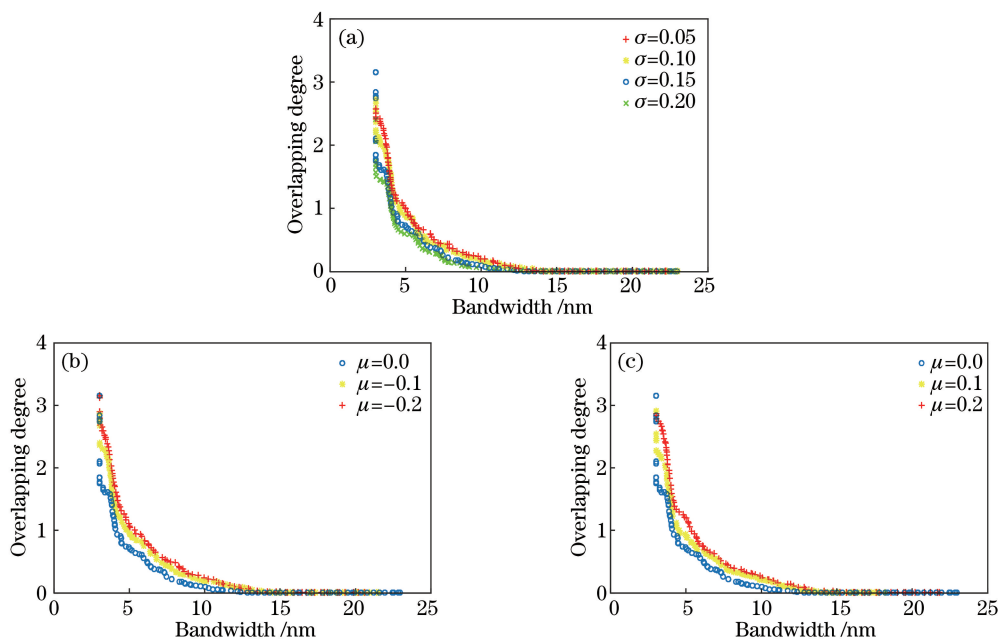


图 7 不同非对称参数概率分布的 Pareto 曲线。(a)标准差不同;(b)均值不同( $<0$ );(c)均值不同( $>0$ )

Fig. 7 Pareto curves of probability distribution of different asymmetric parameters. (a) Different standard deviations; (b) different mean values ( $<0$ ); (c) different mean values ( $>0$ )

由图 7(a)可以发现,标准差  $\sigma$  越大,Pareto 曲线越靠近  $x$  轴,标准差为 0.05 的曲线离  $x$  轴最远。从概率学的角度来看,服从标准差为 0.05 的一组 FBG 的不对称参数是 4 组中分布最为集中的,即该组中每个 FBG 的不对称程度相近,所以该组的传感网络的光谱重叠程度受光谱不对称的影响最小。结合先前对称光谱和不对称光谱的 Pareto 曲线对比实验,可见不对称光谱的 Pareto 曲线低于光谱对称的 Pareto 曲线,由此可以推出当不对称参数的概率密度函数的标准差越低,所得到的不对称光谱 Pareto 曲线越靠近对称光谱的曲线。

由图 7(b)、(c)可以发现,概率密度函数的均值绝对值越大,Pareto 曲线越远离  $x$  轴,均值为  $-0.2$  或  $0.2$  的曲线离  $x$  轴最远。根据先前原理的说明,可知当两个 FBG 的不对称参数同正或同负时,这两个 FBG 对光谱重叠程度造成的影响会相互抵消,故相比于两个 FBG 的不对称参数一正

一负,不对称参数同正或同负对光谱重叠程度造成的影响较小。当均值的绝对值越大时,传感网络中每个 FBG 的不对称参数同方向的概率就越大,由此可以推出当不对称参数的概率密度函数的均值绝对值越大时,所得到的不对称光谱 Pareto 曲线就会越靠近对称光谱的曲线。

### 3.4 不同数量 FBG 传感网络实验结果对比

选取不同规模的 FBG 传感网络进行实验设计,将表 1 中的 10 种应变分别进行 4 组优化设计实验,每组实验中传感网络的 FBG 数量都不同,分别为 4-FBGs 传感网络(待测应变为表 1 中的 1~4 组)、6-FBGs 传感网络(待测应变为表 1 中的 1~6 组)、8-FBGs 传感网络(待测应变为表 1 中 1~8 组)、10-FBGs 传感网络(待测应变为表 1 中的 1~10 组)。该部分每个 FBG 的不对称参数都服从均值  $\mu$  为 0、标准差  $\sigma$  为 0.15 的高斯分布,光源带宽的上限  $\lambda_{\min}$  取 1590 nm,下限  $\lambda_{\max}$  取 1550 nm,最终得到的各组 Pareto 最优曲线如图 8 所示。



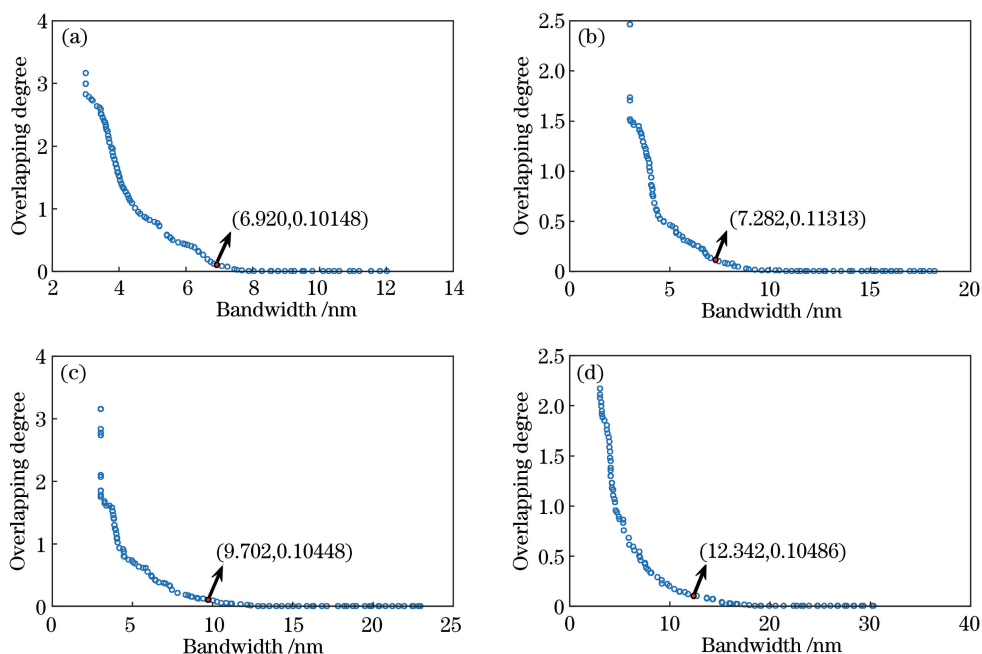


图 8 用 NSGA-II 算法得到的 Pareto 曲线。(a) 4-FBGs; (b) 6-FBGs; (c) 8-FBGs; (d) 10-FBGs

Fig. 8 Pareto curves obtained by NSGA-II algorithm. (a) 4-FBGs; (b) 6-FBGs; (c) 8-FBGs; (d) 10-FBGs

由图 8 可以看到,无论是 4-FBGs 传感网络还是 10-FBGs 传感网络,Pareto 曲线都为明显的凹曲线,符合先前给出的 FBG 传感网络波长分配方案的选择方法。表 2 列出了各组实验依据上述选择方法所选取的中心波长分配方案,结合图 8 可以看到,当传感网络的平均光谱重叠程度增加 0.1 左右时,传感网络的带宽减少了近一半。采用带宽节约率

(BSR,  $R_{BS}$ ) 计算所选择的分配方案的光源带宽节约程度,表达式为

$$R_{BS} = \frac{N \times 2\Delta - \lambda_s}{N \times 2\Delta} \times 100\%, \quad (12)$$

式中  $N \times 2\Delta$  是 FBG 传感网络中各节点的工作区域完全独立时所占用的最小光源带宽资源。从表 2 可以看到每组所选解决方案的 BSR 都超过了 40%。

表 2 各组实验选取的解决方案

Table 2 Solutions selected for each group of experiments

Network scale	4-FBGs	6-FBGs	8-FBGs	10-FBGs
Center wavelength of FBG1 /nm	1566.1	1563.5	1557.9	1561.8
Center wavelength of FBG2 /nm	1567.3	1564.8	1557.5	1563.1
Center wavelength of FBG3 /nm	1564.5	1561.8	1562.7	1566.8
Center wavelength of FBG4 /nm	1563.4	1560.5	1561.5	1560.4
Center wavelength of FBG5 /nm	—	1535.2	1560.0	1565.3
Center wavelength of FBG6 /nm	—	1562.0	1559.9	1565.2
Center wavelength of FBG7 /nm	—	—	1556.2	1568.2
Center wavelength of FBG8 /nm	—	—	1556.0	1569.7
Center wavelength of FBG9 /nm	—	—	—	1561.2
Center wavelength of FBG10 /nm	—	—	—	1560.3
Bandwidth /nm	6.9	7.3	9.7	12.3
Overlapping degree	0.11	0.11	0.10	0.10
BSR /%	45.5	59.6	59.6	58.8

为进一步探讨不同规模 FBG 传感网络的优化设计性能,随机选择表 1 中 10 种应变对 10-FBGs、15-FBGs、20-FBGs、25-FBGs、30-FBGs、35-FBGs、40-FBGs、45-FBGs 以及 50-FBGs 做仿真优化设计

实验,依据前文所述的波长分配方案选择方法在 Pareto 曲线上选取最优的中心波长分配方案,得到不同数量 FBG 传感网络设计结果的带宽节约程度以及光谱重叠程度。如图 9 所示,随着 FBG 数量的

增加,带宽节约程度略微增加,相对的光谱重叠程度也有所增加。但必须说明的是,Pareto 曲线上的点都是一种权衡的优化方案。在同样水平的光谱重叠程度情况下,带宽节约程度是相近的。若牺牲一些光谱重叠程度,则可节约较多的带宽。因此,本文提出的多目标优化的 FBG 波长分配方案,可以在不影响测量误差的情况下节约相当多的带宽资源,从而增强 FBG 传感网络的复用能力。

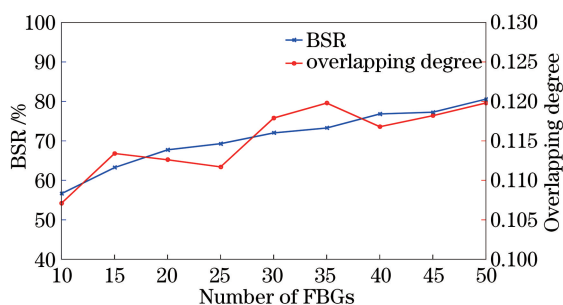


图 9 不同数量 FBG 传感网络优化设计选取分配方案后的带宽节约程度以及光谱重叠程度

Fig. 9 BSR and overlapping degree after FBGs sensor network optimization design with different number of FBGs

## 4 结 论

针对具有非对称光谱且工作范围可重叠的 FBG 传感网络,建立了相应的多目标带宽资源优化配置模型,充分考虑了非对称光谱对重叠概率的影响,并借助多目标优化算法 NSGA-II 寻找出合适的初始布拉格波长分配方案。通过不同数量 FBG 传感网络的设计实验表明,本文提出的优化设计方法能够同时给出 100 组符合帕累托最优的设计方案,一定程度上消除了非对称反射光谱对带宽重叠设计的影响。最终的解决方案能以极少的光谱重叠程度为代价,节约近 40% 的光源带宽资源量,对 FBG 传感网络的实际应用具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

[1] Maheshwari M, Tjin S C, Asundi A, et al. Combined fiber Bragg grating and fiber optic polarimetric sensors on a single fiber for structural health monitoring of two-dimensional structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2016, 15(5): 599-609.

[2] Huang S L, Chen W M, Rao Y J, et al. Fiber optic strain sensors and their applications in structural health monitoring [J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(5): 1-4, 8.

黄尚廉, 陈伟民, 饶云江, 等. 光纤应变传感器及其

在结构健康监测中的应用[J]. *测控技术*, 2004, 23(5): 1-4, 8.

- [3] Jiang H, Wang Y G, Chen J, et al. Wavelength detection of overlapping spectra in FBG sensor network based on gated recurrent unit network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706001.
- 江灏, 王尤刚, 陈静, 等. 基于门控循环单元网络的 FBG 传感网络重叠光谱的波长检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0706001.
- [4] Zhang F X, Wang C, Jiang S D, et al. Dynamic fiber Bragg grating sensor array with increased wavelength-division multiplexing density and low crosstalk[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 56(3): 037101.
- [5] Shi C Z, Chan C C, Jin W, et al. Improving the performance of a FBG sensor network using a genetic algorithm[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 107(1): 57-61.
- [6] Shi C Z, Zeng N, Zhang M, et al. Adaptive simulated annealing algorithm for the fiber Bragg grating distributed strain sensing [J]. *Optics Communications*, 2003, 226(1/2/3/4/5/6): 167-173.
- [7] Ding H, Wu X N, Liang J Q, et al. Application of PSO algorithm in wavelength detection of FBG sensors [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 563-566.
- 丁晖, 吴相楠, 梁建奇, 等. 粒子群优化算法在光纤光栅传感器波长解调中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 563-566.
- [8] Zhang M, Zhang W, Zhang P, et al. Parameter optimization in particle swarm algorithm for spectral shape multiplexing demodulation of fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0706001.
- 张梅, 张伟, 章鹏, 等. 光纤光栅谱形复用解调中粒子群算法的参数优化[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0706001.
- [9] Jiang H, Chen J, Liu T, et al. A novel wavelength detection technique of overlapping spectra in the serial WDM FBG sensor network [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 198: 31-34.
- [10] Liu D, Tang K, Yang Z Y, et al. A fiber Bragg grating sensor network using an improved differential evolution algorithm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(19): 1385-1387.
- [11] Wang Q N, Yang Y H. A FBG spectrum peak detection technique based on steger image algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0810004.
- 王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0810004.

- [12] Zhou K M, Zhao Y L, Wang Z P, et al. Reasons for invalidation of FBG sensor applied in geotechnical engineering and improvement method [J]. *Dam & Safety*, 2016(2): 6-10.  
周克明, 赵允亮, 王振平, 等. FBG 传感器在岩土工程应用中常见失效成因及改进方法 [J]. *大坝与安全*, 2016(2): 6-10.
- [13] Jiang H, Zhou Q X, Chen J, et al. Wavelength detection optimization of fiber Bragg grating sensing networks based on distortion spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006002.  
江灏, 周清旭, 陈静, 等. 畸变光谱下光纤布拉格光栅传感网络波长检测优化方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006002.
- [14] Wu F, Li L X, Li Y P, et al. Study of fiber Bragg grating characterization by transverse force to a small grating section [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(11): 1270-1273.  
吴飞, 李立新, 李亚萍, 等. 光纤 Bragg 光栅横向局部受力特性的研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2005, 16(11): 1270-1273.
- [15] Kim S W. Characteristics of strain transfer and the reflected spectrum of a metal-coated fiber Bragg grating sensor [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 96: 83-93.
- [16] Erickson M, Mayer A, Horn J, et al. Multi-objective optimal design of groundwater remediation systems: application of the niched pareto genetic algorithm (NPGA) [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(1): 51-65.
- [17] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.