文章编号:1001-5078(2015)01-0066-04　　·光纤及光通讯技术·

光纤光栅传感网络的优化研究

王桂娜[1,2],曾　捷[1],穆　昊[3],梁大开[1]
(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016;
2. 苏州大学机电工程学院,江苏 苏州 215131;3. 南京吉隆光纤通信有限公司,江苏 南京 210000)

摘　要:光纤光栅传感网络在大型复杂结构健康监测中具有广泛的应用前景,对光纤光栅传感网络优化的研究具有重要的意义。分析了结构健康监测中光纤传感网络优化布局和可靠性的研究现状,对光纤传感网络优化中的传感器优化布局与光纤传感网络可靠性两方面进行研究。通过对结构响应特性研究,提出了对结构静力响应参数监测时,传感器布局的一般规则。将概率计算引入光纤 FBG 传感网络不同拓扑结构,给出了基于不同拓扑结构的光纤传感网络形式及其可靠性数值分析。

关键词:FBG 传感网络;结构健康监测;可靠性;布局优化;拓扑结构
中图分类号:TN253　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.01.015

Optimization of fiber Bragg grating sensor network

WANG Gui-na[1,2], ZENG Jie[1], MU Hao[3], LIANG Da-kai[1]
(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215131, China; 3. Nanjing Jilong Optical Communication Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: Fiber Bragg Grating sensor network has a wide application prospect in the structural health monitoring for large and complex structures. The research on the optimization of fiber Bragg grating sensor network is important. Research status on the optimal placement and reliability of the fiber Bragg grating network and the static load identification are analyzed. And then, the optimal placement of sensors and reliability of the fiber Bragg grating network are studied. Through the analysis of structural response characteristics, the general rules of sensors placement in structural static response parameters monitoring is proposed. Probability calculation is introduced into the FBG sensor network reliability comparison of different topologies, and numerical analysis of the FBG sensor network reliability based on several simple topologies is given.

Key words: fiber Bragg grating sensor network; structural health monitoring (SHM); reliability; layout optimization; topology structure

1　引　言

光纤 FBG 传感器是目前研究较为成熟的一种传感器,通过对 FBG 传感器特性的研究可以利用基于 FBG 传感器构建光纤传感网络。与传统电类传感器对比,光纤 FBG 传感器具有质量轻、体积小、可弯曲、频带宽、抗腐蚀与抗电磁干扰等特点[1]。基于这些优点,FBG 传感器可以用在结构健康监测中。结构健康监测的目的是监测物体的结构损坏[2],包括:1)结构中是否存在损伤;2)对损伤的位置判定以及能级判定;3)损伤对结构的危害程度。

在设计光纤传感网络时,应考虑到两个方面内容[3],即光纤光栅传感网络对传感器的利用效率,

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60907038、No. 51275239),国家自然科学基金项目国际交流(No. 51161120326),教育部高等学校博士点基金(No. 20123218110003)以及江苏高校优势学科建设工程资助项目。
作者简介:王桂娜(1979 -),女,讲师,博士生,主要研究方向为光纤光栅传感应用及结构健康监测。E-mail:ntyjxx@126.com
收稿日期:2014-04-30;**修订日期**:2014-06-05

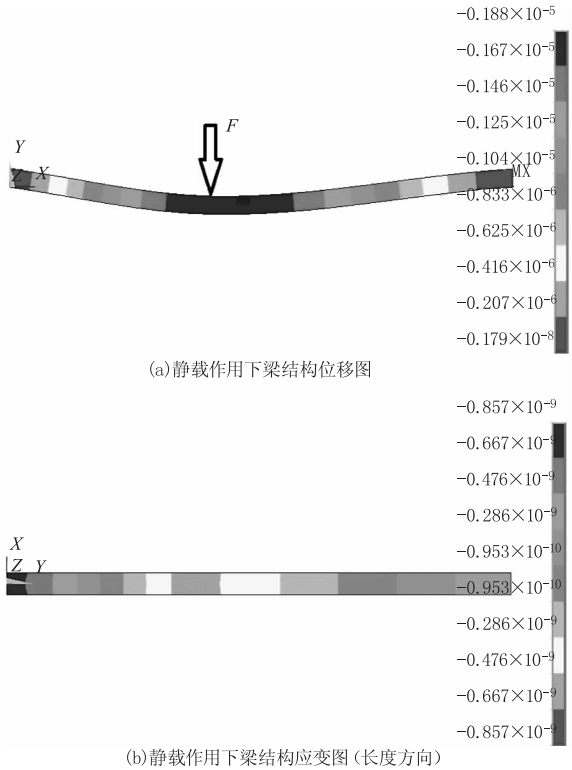
以及光纤传感网络系统可靠性的问题。这两个问题在一定程度上是对立的，在达到既定要求的前提下，布置尽可能少的传感器以提高系统效率，降低传感网络的成本；而实际使用中可能出现传感器失效或者传输光纤断裂的情况，又必须通过各种方法提高传感系统的可靠性。因此在光纤传感网络研究中应综合考虑着两方面的内容，考虑在规定使用时间内，对传感网络可能产生的失效进行预估，在此基础上实现光纤传感网络的最优布局[4]。

2　光纤光栅传感网络布局分析

以一维梁为例，研究光纤光栅传感网络布局优化。

一维梁结构主要有承担拉压的桁架结构以及承担弯扭的梁结构，由于桁架受载形式较梁结构形式简单，本内容主要通过有限元分析梁结构受载后的应变特点，并结合实验数据研究梁结构健康监测的传感器布局。

在有限元分析[5]软件 ANSYS 中建立简支梁模型，梁材料为铝合金，弹性模量 $E=71$ GPa，泊松比 $v=0.31$，长、宽、高分别为 500 mm、20 mm、6 mm，沿梁长度方向设置 20 个单元，每个单元长 25 mm。仿真中对每个节点施加 100 N 的 Y 方向载荷，获取梁结构响应参数。加载后梁结构中位移和应变情况如图 1 所示。



(a)静载作用下梁结构位移图

(b)静载作用下梁结构应变图（长度方向）

图 1　梁结构静载作用下响应图

其中可以看出梁结构中位移最大位置处于梁结构中心附近，应变最大位置处于约束附近。因此针对不同形式加载，传感器粘贴位置也有所不同，当主要研究结构动力响应特性时，传感器应布置在结构位移较大的区域，对两端固支梁结构而言，中间是梁位移较为明显的区域，属于关键测点，而约束附近位移很小，传感器响应不敏感。当研究结构静力响应参数时，板结构中正应变位置是载荷加载位置，负应变集中在梁结构约束位置。因此对结构静力参数的分析就需要将传感器布置在约束附近。

3　光纤传感网络可靠性研究

当光纤 FBG 布局确定之后，应确定光纤光栅的组网方式，并根据最大可靠性原则设计光纤 FBG 监测系统。目前对 FBG 传感网络来说，光纤 FBG 适合通过波分复用的方式实现单通道多点测量。从传感网络拓扑形式上看，光纤 FBG 特别适合以串联和并联的方式组成监测网络，对传感网络的结构进行拓扑优化[6]可以提升监测系统对结点损伤的容忍度，以及系统自修复的能力。

3.1　基于概率分析[8]的光纤 FBG 传感网络可靠性研究

根据光纤光栅传感网络的布置特点，确定各结点发生损坏的概率。对光纤 FBG 监测系统可靠性而言，主要以光纤 FBG 栅区失效以及传光光纤断裂作为失效原因。

光纤 FBG 失效概率用 P_1 表示，传光光纤断裂概率用 P_2 表示，那么其对应的可靠概率分别为 $(1-P_1)$ 与 $(1-P_2)$。整个系统的失效概率用 P 表示，其对应的失效概率根据光纤光栅传感网络拓扑模型确定。

图 2 是最简单的光纤光栅拓扑结构，也是实际工程与实验中最常见到的光纤 FBG 串联形式[7]。

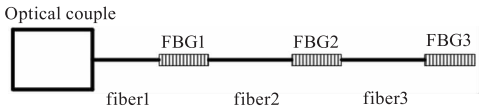


图 2　光纤 FBG 传感器串联形式布局

在图中 3 个 FBG 串联的光纤光栅网络中，测量系统的可靠性可由下式表示，P_0 表示传感光栅传感网络保持完好的无损概率。

$$P_0=(1-P_1)^3(1-P_2)^3 \tag{1}$$

但上式表示的网络无损概率并不能完好地完全对光纤光栅传感系统可靠性进行表述，所以，对光纤光栅传感网络需要定义一个系统完整度，用 T 表示，其意义是光纤光栅传感网络发生损伤之后系统

连通 FBG 所占比例。

如果该系统中产生一个断点,那么系统完整度的期望如下:

$$E(T) = P_1T_{F1} + P_1T_{F2} + P_1T_{F3} + P_2T_{f1} + P_2T_{f2} + P_2T_{f3} \quad (2)$$

式中,T_f 表示对应的传光光纤断裂之后的系统完整度;T_F 表示对应 FBG 失效之后的系统完整度。当串联光栅个数为 n 的时候,式(2)可表示为:

$$E(T) = P_1 \sum T_{Fi} + P_2 \sum T_{fi} \quad (3)$$

由于 FBG 是双向传光型传感器,因此,如果从串联的传感器后端引一根尾纤与解调仪相连,如图 3 所示,此时传感网络中产生一个断点时,FBG 里的信号仍然可以读取,因此环形系统一个断点不会破坏传感网络的完整度。分析传感网络中产生两个断点的情况,此时,计算出系统完整度期望为 $E(T) = 0.5P_2$。

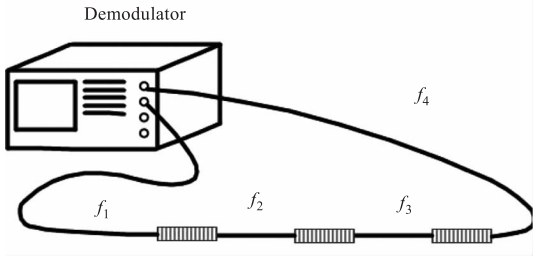


图 3 光纤 FBG 传感器环形串联形式布局

光耦合器可以将多条串联支路以并联的形式连接到光纤光栅解调仪上,在这种情况下,组成的传感网络如图 4 所示。

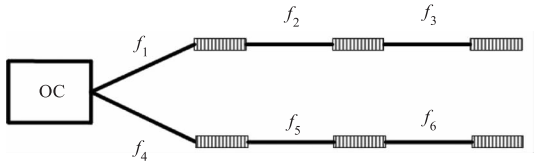


图 4 光纤 FBG 传感器并联形式布局

根据结构拓扑特点,可以计算出每一段光纤产生断点所对应的系统完整度,按式(2)计算在存在一个断点的情况下,系统完整度的数学结果$E(T) = 0.25P_2$。与串联形式对比,可以将系统的完整度的数学期望提高一倍,并联形式相对串联形式是更优的拓扑结构。

对于复合光纤光栅传感网络,对每个 FBG 传感器通过设计附加连通光路,可以大大提高单个 FBG 传感器的性能,如果对单个传感器设计冗余光路,那么该传感器的可靠性大大提高。当一个 FBG 通过图 5 方式与组成传感网络相连时,该传感器的可靠性会得到极大提升。

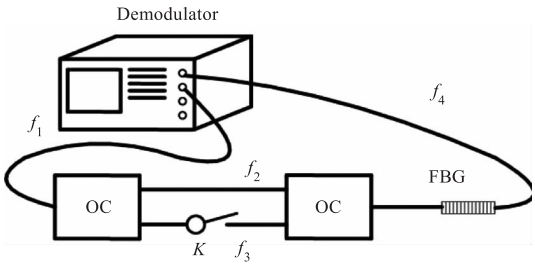


图 5 冗余光纤形式布局

3.2 光纤传感网络可靠性优化研究

目前对光纤光栅传感网络拓扑结构优化提高可靠性的方式,主要是以 FBG 传感节点失效作为优化的目标,通过布置冗余 FBG 并提高光路连通性提高光纤传感网络的可靠性。而实际中传输光纤与 FBG 测量区在材料上都是石英材料包裹涂覆层,其中 FBG 栅区一般会有特别的封装结构,其安全性往往较传输光纤更高。本文提出网络-环形拓扑光纤光栅拓扑结构。示意图如图 6 所示。

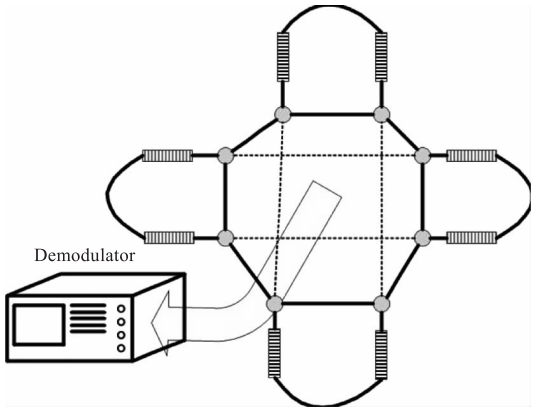


图 6 网络-环形拓扑形式的光纤 FBG 传感网络布局

图 6 中 FBG 传感器子网通过耦合器连接到环形主网中,对单个 FBG 而言,只有 FBG 本身出现失效或者 FBG 两端传输光纤均发生断裂,无法连接到耦合器时,该 FBG 才完全失效。而对环形网络而言,如果环形主网中出现 2 个断点,出现失效的 FBG 数目的期望为 FBG 总数的一半。因此同样出现两个断点的情况下,出现在环形主网中的危害性远大于其出现在 FBG 子网的情况。在设计对 FBG 传感网络拓扑结构优化时,应重点提高主网的可靠性。图 6 虚线表示在环形主网中的结点布置冗余光路。通过增加主网可靠性的方法可以提高光纤传感网络可靠性。

4 结束语

本文首先介绍了 FBG 传感器的优点,其次结合梁结构对 FBG 传感器布局进行研究。当传感器布置位置确定之后,需研究传感器连接形式,并对传感

器可靠性进行分析。文中进一步研究了 FBG 不同组网形式的可靠性,结合概率方法,以传感网络中出现断点时对传感网络的影响作为传感网络拓扑结构可靠性的评估指标。

致 谢:本文工作在南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室完成。

参考文献:

[1] Jung-RyulLee, Seung-Seok Lee, Dong-Jin Yoon. Simultaneous multipoint acoustic emission sensing using fibre acoustic wave grating sensors with identical spectrum[J]. Journal of Optics a: Pure and Applied Optics, 2008, 10(8): 085307.

[2] WANG Wei, ZHANG Baoju, YIN Xiaohui. Damage identification in T-joint structure with fiber bragg grating[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(2): 175 – 178. (in Chinese)
王为,张宝菊,尹晓慧. 基于光纤光栅的 T 形节点结构损伤识别[J]. 激光与红外,2012,42(2):175 – 178.

[3] Said SAAD, Lotfi HASSINE. Hydrogen detection with FBG sensor technology for disaster prevention[J]. Photonic Sensors, 2013, 3(3): 214 – 223.

[4] Christopher KY Leung, Kai Tai Wan, Daniele Inaudi, et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering Applications[J]. Materials and Structures, 2013.

[5] ZHANG Yanjun, JIA Bingbing, HUANG Baokai, et al. Research on mine collapse monitoring based on distributed grating sensor network[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 319 – 323. (in Chinese)
张燕君,贾冰冰,黄保凯,等. 基于分布式光栅传感网络的矿井坍塌监测研究[J]. 激光与红外,2012,42(3):319 – 323.

[6] A Panopoulou, S Fransen, V Gomez-Molinero, et al. Experimental modal analysis and dynamic strain fiber Bragg gratings for structural health monitoring of composite antenna sub-reflector[J]. CEAS Space J, 2013, 5: 57 – 73.

[7] LIANG Wenbin, LIN Yuchi, ZHAO Meirong, et al. Applications of fiber bragg grating in ship structural monitoring [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 682 – 685. (in Chinese)
梁文彬,林玉池,赵美蓉,等. 光纤光栅在船舶结构状态监测中的应用[J]. 激光与红外,2012,42(6):682 – 685.

[8] Alon N, Spencer J H. The probabilistic method [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.