

高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计

张晓丽 梁大开 芦吉云 曾捷

(南京航空航天大学飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要 对采用光纤布拉格光栅(FBG)传感器网络监测某飞机机翼盒段外加载荷位置信息进行了研究。研究了 FBG 传感器网络中传感器失效对外加载荷位置识别精度的影响程度;针对传统 FBG 传感器网络拓扑结构可靠性低的缺点,引入光开关,设计了一种具有更高可靠性的传感器网络拓扑结构,并对这两种网络结构的可靠性进行了研究。结果表明,新传感器网络的可靠性明显高于传统传感器网络的可靠性。单个传感器的失效概率不同,两种传感器网络可靠性差别也不同;当单个元器件的失效概率在 0.001~0.01 之间变动时,若系统允许外加载荷位置识别误差在 5 mm 内,则新传感器网络的失效率降为传统网络失效率的 50%;若系统允许外加载荷位置识别误差在 10 mm 内,则新传感器网络的失效率至少降低为传统网络失效率的 12.5%。

关键词 光栅;光纤布拉格光栅;传感器网络;可靠性;支持向量机

中图分类号 T253; TN711 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0105004

A High Reliable Optic Fiber Bragg Grating Sensor Network Design

Zhang Xiaoli Liang Dakai Lu Jiyun Zeng Jie

(Key Laboratory of Vehicle Structure and Control, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The fiber Bragg grating (FBG) sensor network which is used to monitor the external load position information of a certain aircraft wing box is researched in this paper. The forecast precision influence of the disabled sensor number to the external load position information is researched; Optical switch is introduced to overcome the shortcoming of the traditional FBG sensor network topology low reliability, proposing a higher reliable network topology, and the reliability of the two types FBG network topologies are researched. The results indicate that the reliability of the new sensor network is superior to the traditional one obviously. The reliability of the two types network topologies is dependent on the failure rate of the single sensor. When the single component failure rate change between 0.001 and 0.01, if the acceptable position forecast error of the external load is less than 5 mm, the failure rate of the new sensor network is reduced to 50% of the traditional one; if the acceptable position forecast error of the external load is less than 10 mm, the failure rate of the new sensor network is reduced to 12.5% of the traditional one at least.

Key words gratings; fiber Bragg grating; sensor network; reliability; support vector machine

OCIS codes 060.1155; 060.2310; 060.2370

1 引 言

在各种航空航天飞行器中,结构在服役中将受到各种载荷和突发性外在因素的影响而出现局部损伤,且损伤的模式复杂多样,使得损伤预报与判别的

难度加大。光纤布拉格光栅传感器(FBG)因具有质量轻、体积小、耐腐蚀和易于实现分布式等独特优点^[1~3],在智能材料中得到了广泛的应用。若在结构的关键点安置 FBG 传感器网络,且配备恰当的数

收稿日期: 2010-04-15; **收到修改稿日期**: 2010-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(60907038)、江苏省自然科学基金(BK2008388)、航空科学基金项目(2008ZD52047)、611 航空科研基金、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(200901003,200901004)和南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010012)资助课题。

作者简介: 张晓丽(1979—),女,博士研究生,主要从事光纤传感网络可靠性方面的研究。

E-mail: zxli_nuaa@nuaa.edu.cn

导师简介: 梁大开(1956—),男,博士,教授,主要从事智能结构健康监测方面的研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

据分析和记录设备,即可知道结构部件的负载历史,从而对结构的实际承载能力做出较真实的评估,以提高航空航天结构的生存能力。美国诺斯罗普-格鲁门公司将光纤传感器安装在 F-18 战斗机机翼蒙皮上,实时在线检测机翼的受力分布及结构损伤^[4]。

工程应用中,FBG 传感系统通常采用分布式或准分布式拓扑结构埋置或粘贴在监测结构中^[5],这种拓扑结构的缺点是当网络某处发生损伤或断裂时,位于其后的所有传感器均会受到影响,一旦出现故障很难对其进行修复。随着 FBG 传感器网络应用的不断扩展,其可靠性已成为迫切需要解决的问题。自 20 世纪 70 年代起,网络可靠性理论已得到飞速发展,但它们大部分都基于通信网络、计算机网络等领域,随着 FBG 传感器网络应用领域的不断扩展,其可靠性得到了广泛的关注,如 Peng-Chun Peng 等^[6]提出了星形 FBG 传感器网络拓扑结构, Silvia Diaz 等^[7]提出了基于总线结构的 FBG 传感器网络拓扑结构。本文针对埋置于结构中的 FBG 传感器网络的故障情况,通过引入光开关,在不对网络结构进行修复的前提下重新实现结构的健康监测,设计了一种新型的高可靠 FBG 传感器网络拓扑结构。

以监测飞机机翼盒段外加载荷位置信息的 FBG 传感器网络为试验对象,采用具有良好小样本学习能力和推广泛化性能的支持向量机(SVM)技术,研究了 FBG 传感器网络中的某个或某些 FBG 传感器断裂对外加载荷位置识别精度的影响程度,同时针对传统波分复用 FBG 传感器网络拓扑结构失效率高的缺点,采用光开关技术,提出了一种具有更高可靠性的 FBG 传感器网络拓扑结构,并对这两种网络拓扑结构的可靠性进行了详细的比较。

2 SVM 识别机翼盒段外加载荷位置

2.1 FBG 传感器的工作原理

FBG 传感器只反射某个特定波长附近的光,而对其他波长的光没有影响,该特定波长称为布拉格中心波长。当 FBG 传感器处于外界应力场或温度场中时,布拉格中心波长将由 λ_B 变为 λ'_B ,此时,由光弹性理论可以导出布拉格中心波长变化 $\Delta\lambda$ 满足关系^[8,9]

$$\Delta\lambda = \lambda_B[(1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T], \quad (1)$$

式中 ϵ 为光纤轴向应变, α 为热膨胀系数, ξ 为热光系数, ΔT 为环境温度变化量, P_e 为有效光弹系数,对于纯石英芯、三氧化二硼掺杂包层的光纤有 $P_e =$

$0.22^{[10,11]}$ 。若温度场不变,仅考虑应变引起的中心波长变化时,则光纤光栅中心波长的相对偏移量为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon. \quad (2)$$

因此可以通过监测 FBG 传感器中心波长的变化来监测材料结构的变形,从而对施加在结构上的载荷信息进行监测。由于 FBG 解调仪的限制,在实际工程应用中 FBG 传感器网络通常采用波分复用技术,即把多个不同中心波长的 FBG 传感器通过串联方式连接成一个网络,如图 1 所示。从宽带光源发出的光经光纤耦合器耦合进 FBG 传感器网络,包含被测量信息的反射光通过耦合器进入 Si425 型光栅解调仪,解调仪对反射光进行解调得到各个传感器的中心波长并输入到计算机中。

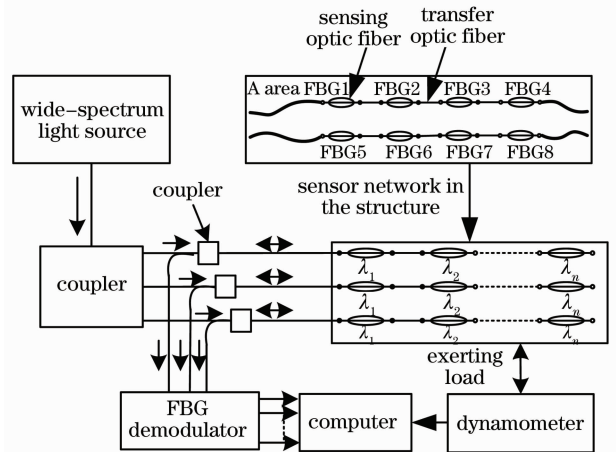


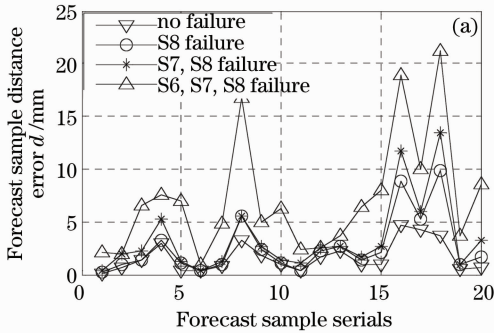
图 1 试验系统装置图

Fig. 1 Experimental apparatus system

2.2 基于 SVM 的机翼盒段载荷位置识别

SVM 是 Vapnik 等于 1995 年根据统计学习理论中的 VC 维和结构风险最小化原则提出的,是近几年发展起来的一种新的机器学习方法^[12,13]。它既可以解决分类问题又可以解决回归问题,在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出独特的优势和良好的应用前景^[14,15]。这里采用 SVM,通过分析 FBG 传感器网络中各传感器中心波长的变化量来识别施加在机翼盒段上载荷的位置。SVM 需要首先用已知传感器中心波长变化量和载荷位置信息的数据进行训练,然后才能根据传感器中心波长变化量预测载荷的位置信息。因此首先需通过试验获得 SVM 所需要的训练数据和预测数据。机翼盒段由铝合金和碳纤维筋板构成,机翼盒段被筋条和隔板分隔成 7 行 6 列共 42 个单元,每一单元尺寸为 240 mm × 85 mm × 2 mm。选择两个相邻单元进行试验。在整个试验区域共布置了 8 个

FBG 传感器(S1~S8)。同时,为尽量减少网络中每个 FBG 传感器由于安装差异带来的误差,通过在所安置的 FBG 传感器附近粘贴型号为 BX120-3AA,灵敏系数为 $(2.08 \pm 1)\%$,精度等级为 A 级的电阻应变片对其应变特性进行标定。试验时在试验区域选择了 42 个加载点,每个加载点分别施加 6 次载荷,采用 Si425 型光纤光栅解调仪测量 8 个 FBG 传感器的中心波长变化量,共得到 6 组包含位置信息和传感器中心波长信息的数据。选用其中 5 组数据进行平均后作为训练数据对 SVM 进行训练,剩余的一组数据用于对 SVM 进行测试并计算预测误差。



2.3 传感器故障对识别结果的影响

在研究 FBG 传感器网络中传感器故障对载荷位置识别精度的影响时,采用断开传感器连接光纤的方法来模拟 FBG 传感器的断裂故障。传感器故障有很多种组合,仅对传感器 S8 故障,传感器 S7 与 S8 故障,传感器 S6,S7,S8 故障,传感器 S4 故障,传感器 S3 与 S4 故障,传感器 S3,S4,S8 故障 6 种故障形式进行了研究,并针对每种传感器故障形式抽取 20 个加载点的识别结果绘制成图,结果如图 2 所示。

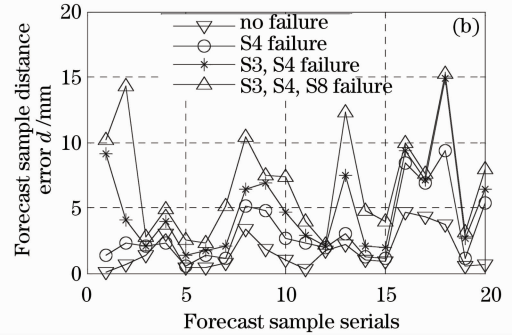


图 2 不同的传感器故障形式对载荷位置预测精度的影响

Fig. 2 Influence of different sensor failure forms to forecast precision of the load position

从图 2 可以看出,随着故障传感器数量的增加,载荷位置识别精度显著降低,不同区域受影响的程度也不相同;而且不同的传感器故障组合对识别精度的影响区域和程度不完全相同。根据图 2 可知,如果规定的载荷位置识别误差不能大于 5 mm,则传感器网络中所有传感器均不能发生故障;如果规定的载荷位置识别误差不能大于 10 mm,则传感器网络中最多只能容许 1 个传感器发生故障。

3 FBG 传感器网络的可靠性研究

3.1 FBG 传感器网络可靠性定义

系统的可靠概率是对系统可靠性的概率度量,定义为在规定时间内和规定条件下系统完成预定功能的概率;相反,系统不能完成预定功能的概率称为失效概率。由于失效概率比可靠概率具有更明确的物理意义,习惯上常用失效概率来度量系统的可靠性,系统的失效概率越小,表明系统的可靠性越高^[16]。把 FBG 传感器网络的可靠度定义为系统以规定的精度识别出载荷位置的概率,把系统不能以规定的精度识别出载荷位置的概率定义为 FBG 传感器网络的故障率。因此 FBG 传感器网络的可靠度和故障率可表示为

$$P_{\text{net}}(s) = P(e_{\text{max}} < s), \quad (3)$$

$$F_{\text{net}}(s) = P(e_{\text{max}} \geq s), \quad (4)$$

式中 $P_{\text{net}}(s)$ 为在规定精度下网络的可靠度, s 为规定的载荷位置识别精度, $P(e_{\text{max}})$ 为事件发生的概率, e_{max} 为载荷的最大识别误差, $F_{\text{net}}(s)$ 为在规定载荷位置识别精度下网络的故障率。

根据其定义,对于相同的规定精度有

$$P_{\text{net}}(s) + F_{\text{net}}(s) = 1. \quad (5)$$

3.2 两种 FBG 传感器网络的可靠性研究

在实际的 FBG 传感器网络中,FBG 传感器通常埋置于结构中,难以维修和更换,其他部件如耦合器、光源、光开关等,则通常放置在结构外面,易于维修和更换,因此在分析 FBG 传感器网络的可靠性时假定只有埋置于被监测结构中的光纤传感元件可能会失效,其他部件则不会失效。FBG 传感器网络被埋置于监测结构中的部分如图 1 中的 A 区所示。在图 1A 区中包含两种基本的元器件——传感器和传感器之间的传输光纤,其 FBG 传感器网络可以等效为图 3(a)所示的形式。这种网络结构的不足之处在于后面 FBG 传感器的信号需要通过其前面 FBG 传感器进行传输,如果某个 FBG 传感器或某段传输光纤失效,则其后的所有传感器的信号将无

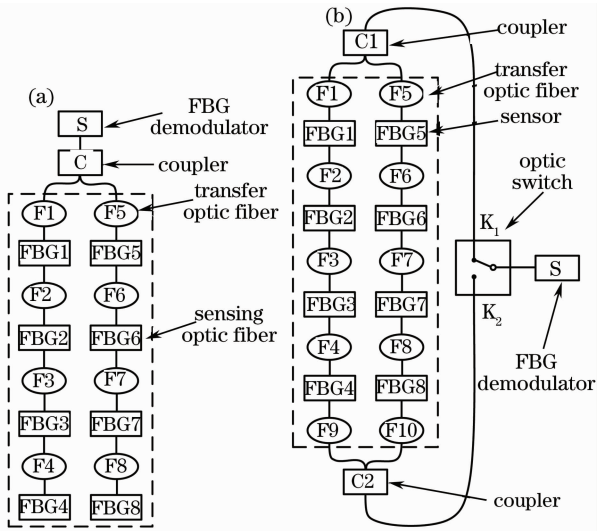


图 3 FBG 传感器网络简化图。(a) 传统网络连接, (b) 新型网络连接

Fig. 3 Simplified FBG sensor network. (a) traditional network, (b) new network

法传输至解调设备,造成网络的局部瘫痪。

为提高 FBG 传感器网络的可靠性,提出了一种采用光开关的高可靠光纤 FBG 传感器网络,其等效结构如图 3(b) 所示。在这种网络结构中如果某个传感器或某段传输光纤发生故障,通过切换光开关,为网络中全部或部分未发生故障的 FBG 传感器提供新的信号传输路径,从而减少受影响的 FBG 传感器数量,提高网络的可靠性。

从第 2.3 节的研究结果可以看出,失效传感器的数量对载荷位置识别精度影响很大,根据图 2 中的结果可以得到

$$P_{\text{net}}(5 \text{ mm}) = P(e_{\text{max}} < 5 \text{ mm}) = P(n_f = 0), \quad (6)$$

$$P_{\text{net}}(10 \text{ mm}) = P(e_{\text{max}} < 10 \text{ mm}) = P(n_f \leq 1), \quad (7)$$

式中 n_f 为失效的传感器数量。

设图 3 所示的两种网络系统中传感器与传输光纤的失效概率相同,且均为 p ,根据图 3 所示的结构图可以计算得到两种监测网络的失效率 R_N, R_T 比值随单个元器件的失效概率的变换趋势,如图 4 所示。下标 N 代表高可靠 FBG 传感器网络,T 代表传统 FBG 传感器网络; d 为预测误差距离。从图中可以看出,高可靠 FBG 传感器网络的失效率明显低于传统 FBG 传感器网络的失效率;单个元器件的失效概率不同,两种 FBG 传感器网络失效率相差程度也不相同。当单个元器件的失效概率在 0.001~0.01 之间变动时,若系统允许载荷位置预测误差在

5 mm 内,则新 FBG 传感器网络的失效率降低为传统网络失效率的 50%;若系统允许载荷位置预测误差在 10 mm 内,则新 FBG 传感器网络的失效率至少可以降低为传统网络失效率的 12.5%。

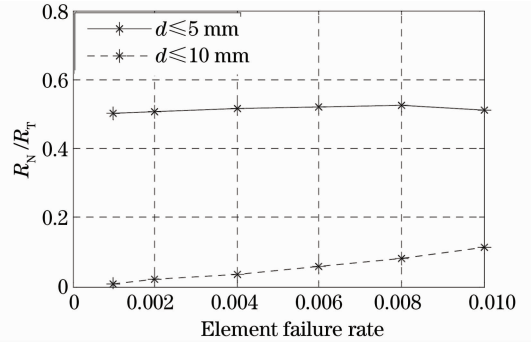


图 4 新型网络失效率与传统网络失效率的比值随单个元件失效率的变化趋势

Fig. 4 Ratio between failure rate of new network and traditional network variation with single disabled component

4 结 论

以用于监测某飞机机翼盒段外加载荷信息的 FBG 传感器网络为试验对象,采用 SVM 技术,分析了在一定的外加载荷位置识别精度范围内允许发生故障的最大传感器数量,在此基础上,分析了所采用的传统 FBG 传感器网络可靠性低的缺点,针对其缺点提出了一种改进的 FBG 传感器网络拓扑结构,新传感器网络中通过引入光开关来降低 FBG 传感器故障对整个网络的影响,并对这两种 FBG 传感器网络的可靠性进行了比较。研究表明,所设计的 FBG 传感器网络拓扑结构的可靠性明显高于传统 FBG 传感器网络的可靠性。研究结果为工程应用中提高 FBG 传感器网络可靠性提供了新的思路。

参 考 文 献

- Zhang Jinlong, Wang Kuiru, Yu Chongxiu *et al.*. A high-precision demodulation scheme for fiber grating sensors based on polarization-maintaining fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 727~731
张锦龙, 王葵如, 余重秀等. 基于保偏光纤的高精度光纤光栅传感解调方案[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 727~731
- Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 629~631
兰玉文, 刘波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 629~631
- He Meng, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. A wide range fiber Bragg grating demodulation method based on thin film filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 53~57
何萌, 刘铁根, 江俊峰等. 基于薄膜滤波器技术的大量程光纤布拉格光栅解调方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(5):

- 4 Qiu Jinhao, Bian Yixiang, Ji Hongli *et al.*. Application of smart materials and structure in aviation industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, **4**(3): 26~29
裘进浩, 边义祥, 季宏丽等. 智能材料结构在航空领域中的应用[J]. *航空制造技术*, 2009, **4**(3): 26~29
- 5 Sun Yajie, Yuan Shenfang, Wang Bangfeng. Research on using extreme value theory to recognize damage in structural health monitoring for composite materials[J]. *J. Astronautics*, 2007, **28**(5): 1366~1370
孙亚杰, 袁慎芳, 王帮峰. 极值理论在复合材料结构健康监测中的应用研究[J]. *宇航学报*, 2007, **28**(5): 1366~1370
- 6 Peng-Chun Peng, Hong-Yih Tseng, Sien Chi. A hybrid star-ring architecture for fiber Bragg grating sensor system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(9): 1270~1272
- 7 Silvia Diaz, Beatriz Cerrolaza, Gorka Lasheras *et al.*. Double Raman amplified bus network for wavelength-division multiplexing of fiber-optic sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 733~739
- 8 Roberto Montanini, Simone Pirrotta. A temperature-compensated rotational position sensor based on fibre Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **13**(2): 533~540
- 9 Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1959~1961
曹彬, 欧攀, 贾明等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1959~1961
- 10 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
冯艳, 张华, 李玉龙等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 336~341
- 11 Kuo Li, Zhen'an Zhou. A high sensitive fiber Bragg grating strain sensor with automatic temperature compensation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 191~193
- 12 J. C. Xiu, L. Yong, Robert Harrison *et al.*. Type-2 Fuzzy logic-based classifier fusion for support vector machines [J]. *Appl. Soft Computing*, 2008, **8**(3): 1222~1231
- 13 Yu Zhongdang, Wang Longshan. Salt & pepper noise switching filter based on LS-SVR convolution mask [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 163~168
于忠党, 王龙山. 基于回归型最小二乘支持向量机卷积模板的椒盐噪声开关滤波器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 163~168
- 14 Z. W. Guo, G. C. Bai. Application of least squares support vector machine for regression to reliability analysis [J]. *Chinese J. Aeronautics*, 2009, **22**(2): 160~166
- 15 Md. Mahmudur Rahman, Bipin C. Desai, Prabir Bhattacharya. Medical image retrieval with probabilistic multi-class support vector machine classifiers and adaptive similarity fusion [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2008, **32**(2): 95~108
- 16 Li Qingfu, Gao Jianlei, Le Jinchao *et al.*. Engineering Structures Reliability Principles [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1995. 74
李清富, 高健磊, 乐金朝等. 工程结构可靠性原理[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1995. 74