

健康监测系统中光纤传感器网络优化布置研究

张晓丽^{1*}, 梁大开², 崔东辉³, 李彩玲¹, 范春风¹

(1. 信阳师范学院 物理与电子工程学院, 河南 信阳 464000; 2. 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; 3. 中国人民解放军空军第一航空学院 军事技术教研室, 河南 信阳 464000)

摘要:针对健康监测系统中不合理的传感器布置将影响传感器数据采集的有效性,降低监测系统的精度,以基于光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器网络的结构健康监测系统为研究对象,采用逐步积累法,对系统中传感器网络的优化排布方法进行了研究。首先采用 Ansys 力学仿真软件建立了试验件的有限元模型并进行了加载试验,然后采用仿真获得的数据对传感器排布位置进行了优化,最后按照仿真研究获得的传感器优化位置在试验件上进行了试验研究。结果表明,试验同仿真结果具有很好的一致性,相对于原始传感器网络的排布方案,在相同的系统监测精度下,优化后的传感器排布方案可以采用更少的传感器;如果采用相同数量的传感器,优化后的传感器排布方案可以获得更高的监测精度。

关键词:光纤 Bragg 光栅(FBG); 传感器网络; 优化布置; 支持向量机(SVM)

中图分类号:O23,O43,TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2014)09-1754-05

Study on the optimal placement for optical fiber sensor network in health monitoring system

ZHANG Xiao-li^{1*}, LIANG Da-kai², CUI Dong-hui³, LI Cai-ling¹, FAN Chun-feng¹

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Department of Mechanical Engineering, First Aeronautical College of Air Force of the PLA, Xinyang 464000, China)

Abstract: If sensors are arranged unreasonable in the monitoring system, the data validity collected by sensors will be affected, and the accuracy of the damage identification will be reduced. Based on the above consideration, an airplane structural health monitoring system based on the fiber Bragg grating (FBG) sensor network is taken as research object, the gradual accumulation method and support vector regression algorithm are used to optimize the arrangement and numbers of the fiber Bragg grating sensors in this paper. Firstly, the finite element model of the airplane structure is built by using Ansys mechanics simulation software, and certain loads are applied on different positions of the airplane structure. Secondly, the arrangement of the fiber Bragg grating sensors is optimized with the simulation data. Finally, the experimental system is built to verify the simulation results. The results indicate that the experiment is consistent with the simulation, corresponding to the initial arrangement mode of the fiber Bragg grating sensor network. The optimized fiber Bragg grating sensor network can adopt relatively few fiber Bragg grating sensors in the same monitoring system with predicting accuracy. Simultaneously, with the same number of fiber Bragg grating sensors, the optimized fiber Bragg grating sensor network can obtain the higher monitoring accuracy.

* E-mail: zxli_nuaa@163.com

收稿日期: 2014-04-29 修订日期: 2014-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(51275239)、国家自然科学基金国际交流(51161120326)、江苏省科技支撑计划项目(BE2011181)、航空科学基金(20125652055、2011ZA52013)、博士学科点专项科研基金(20123218110003)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、河南省科技攻关计划(142102210482)、河南省教育厅科学技术研究(13A510770)和信阳师范学院青年骨干教师资助计划资助项目

Key words: fiber Bragg grating (FBG); sensor network; optimal placement; support vector machine (SVM)

1 引言

航空航天、大型水坝、海上石油平台、机械结构、土木建筑和桥梁等现代工程结构,在服役过程中不可避免受到各种灾害因素的耦合作用,使结构出现不同程度和不同种类的损伤^[1~4]。光纤Bragg光栅(FBG)传感器因具有传感一体化、重量轻、体积小、柔韧性好、抗电磁干扰、本质安全和易于构建分布式或准分布式传感器网络等独特优点,在结构健康监测系统中得到了广泛的应用^[5~8]。而实际工程结构中,如果传感器布置的位置不合适,不仅影响传感器数据的有效性,降低监测系统的精度,而且会增加整个系统的成本。如何优化配置传感器数量、放置位置及其组网形式,获取真实、准确和详实的高分辨率结构效应数据,成为结构健康监测领域研究的基础性问题^[9]。

针对结构健康监测系统中传感器优化布置这一问题,提出了多种求解方法,如序列法、推断算法和随机类方法等。其中,序列法在模态试验的传感器布置中得到了广泛的应用^[10,11],目前,对结构健康监测系统中传感器网络的优化布置研究主要集中于土木工程结构的传感器优化配置^[12]。如2009年李功标等人^[13]提出了一种钢箱梁结构传感器测点的优化方法;2010年李毅谦等人^[14]对模态损伤识别过程中的传感器优化布置进行了研究,并以美国墨西哥州的I-40桥进行了验证。2012年江祥林等人^[15]采用EFI的传感器优化布置工具箱对大跨刚性桁架柔性拱桥的传感器优化布置进行了研究。航空结构在实际工作过程中所受的环境条件、所承受的载荷以及传感器所监测结构的状态参量同土木工程有着诸多区别,因此需要针对航空结构中的FBG传感器网络的优化布置展开研究。

本文以监测机翼形状铝合金板试验件的载荷位置为试验对象,对FBG传感器的优化布置进行研究。首先采用Ansys力学仿真软件,建立结构的有限元模型;然后对其进行集中载荷的加载,获得不同位置加载时结构上各点的应变数值^[16],并结合相关系数、序列法中的逐步积累法和支持向量机(SVM),对试验件上FBG传感器网络进行优化,得到对应于初始布置模式下传感器网络的最优布置;最后以所得最优布置进行试验验证。

2 FBG传感器网络优化排布原则

假设结构(有限元模型)中布置传感器的所有节

点为 n 个,构成集合 $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,每个节点具有2个自由度(x 方向和 y 方向),则所有节点可构成一个包含 $2n$ 个自由度的集合 A 。现在要从 A 中选择 m ($m \leq 2n$)个自由度进行传感器布置,因此传感器优化布置问题可表示成由目标函数和约束条件两部分组成的优化问题

$$\min f(X), x \in A \quad (1)$$

式中, $f(X)$ 为目标函数。

要解决式(1)表达的最优问题,首先要确定合理的、能够反映设计要求的目标函数 $f(X)$ 。研究的平台是基于FBG传感器网络的结构健康监测系统,其主要功能是采用支持向量机(SVM)对可能导致结构损伤的外部集中载荷位置进行识别。FBG传感器网络优化排布的最终目标是提高外部载荷位置识别精度,以外部载荷位置识别误差作为表达式(1)的目标函数。因此,目标函数值越小,则对外部载荷位置的识别精度越高,说明当前传感器排布组合优化程度越高。

计算目标函数具体步骤如下:1)从自由度集合 A 中选取一个子集 $X \in A$;2)在平台上进行仿真加载试验,得到一组外部载荷位置和子集 X 对应自由度的传感器数据;3)从数据中挑选一部分作为训练数据,一部分作为测试数据,采用训练数据集对SVM进行训练,得到SVM模型;4)将测试集中的 X 对应自由度传感器数据输入模型,对相应外部载荷位置进行预测;5)对比外部载荷位置预测结果和测试数据集中的实际位置,依据

$$f(x) = \sum_{i=1}^s \sqrt{(p_{xi} - \hat{p}_{xi})^2 + (p_{yi} - \hat{p}_{yi})^2}, x \in A \quad (2)$$

计算外部载荷位置识别误差。式中: p_{xi} 为第 i 个测试点 x 坐标预测值; p_{yi} 为第 i 个测试点 y 坐标预测值; \hat{p}_{xi} 为第 i 个测试点 x 坐标实际值; \hat{p}_{yi} 为第 i 个测试点 y 坐标实际值; s 为总测试点个数。

传感器优化布置是一个组合优化问题,即整数规划问题,需要从 $2n$ 个自由度中选择 m 个自由度布置传感器。当 m 和 n 非常大时,用穷举法往往难以求解,需要引入先进优化算法才能从根本上解决这一问题。采用逐步累积法优化传感器的排布位置,具体步骤如下:

1)在结构上选择 k 个加载点进行加载试验,对于每个自由度得到一个 k 维的向量 B_i ($1 \leq i \leq k$),对于获得的每一个自由度数据,选择一部分作为训练数据,剩余作为测试数据,对加载点的位置坐标进行识别,并计算目标函数值 $f(X)$,选取使目标函数值

最小的自由度作为传感器布置的第 1 个传感器布置点 P_1 , 对应的向量为 B_{P_1} 。

2) 计算剩余 $2n-1$ 个自由度 $B_j (1 \leq j \leq 2n-1)$ 向量与向量 B_{P_1} 的相关系数, 选择相关系数最小的自由度作为第 2 个传感器布置点 P_2 , 对应的向量为 B_{P_2} , 并计算目标函数值 $f(X)$;

3) 计算剩余的 $2n-2$ 个自由度 $B_j (1 \leq j \leq 2n-2)$ 向量与向量 B_{P_1} 、 B_{P_2} 的相关系数, 选择 B_j 与 B_{P_1} 、 B_{P_2} 相关系数均方根值最小的自由度作为第三个传感器布置点 P_3 , 对应的向量为 B_{P_3} , 并计算目标函数值 $f(X)$;

以此类推, 从剩余的自由度中继续挑选下一个传感器布置点, 并计算目标函数值, 直至目标函数值满足要求。

3 航空结构试验件 FBG 传感器网络优化布置仿真研究

以机翼形状的铝合金板试验件为研究对象, 采用机翼形状的铝合金板试验件尺寸如图 1 所示。根据试验件的几何形状大致均布及布置经验, 预设未优化时传感器数量为 5 个, 排布位置如图中黑点所示。首先对优化传感器布置位置进行仿真研究, 在 ANSYS 中建立几何模型。模型建好后, 在如图 1 所定义的坐标系中分别沿 x 方向和 y 方向每隔 60 mm 对机翼形状铝合金板试验件进行加载, 总共得到 58 个加载点。加载时, 所用载荷大小为 100 N, 文中选取 117 个节点作为传感器的预布置点, 如图 2 所示。加载时, 提取相应节点 x 方向和 y 方向的自由度应变数值, 共得到 234×58 个自由度应变数值。为了确定传感器的布置方向, 分别对 117 个节点处 x 方向和 y 方向自由度的相关系数进行了计算。结果表明, 节点处 y 方向自由度应变数值之间的相关系数变化梯度较 x 方向大, 最小相关系数接近 0。根据传感器布置原则, 应使各个传感器的数据尽量线性无关。因此, 选择节点 y 方向自由度的应变值作为传感器数据。相应的, 试验中 FBG 传感器同样沿 y 方向进行布置。

根据在模型中加载所得到的自由度应变数值, 依据传感器排布原则, 最终计算得节点 72 作为第 1 个传感器布置点; 然后, 依次选取节点 10、节点 7、节点 5、节点 48 作为传感器预布置点。它们之间的相关度大部分属于低度相关, 更换第 1 个可测点, 得到其它传感器可测点组合, 为了对比传感器布置优化前后的识别精度和确定最优传感器布置数量, 采用 200 N 的力对机翼形状的铝合金板试验件进行重新

加载, 记录加载位置和各自自由度应变数据作为测试数据。对所得到的传感器排布方案的目标函数值进行计算, 最终所得到的不同传感器排布组合及相应的目标函数值见表 1。并对未优化传感器排布位置方案的目标函数值进行了计算, 其结果是 $8\,327.2\text{ mm}^2$ 。

由以上分析可知: 当传感器数量为 3 个时, 目标函数值偏大; 当传感器数量增至 4 个和 5 个时, 传感器排布方案的目标函数值均显著减小, 而且优化后的传感器排布方案的目标函数值均明显优于未优化传感器排布方案的目标函数值。在优化后的传感器排布方案中, 传感器排布点为 72、10、7、5、48 时的目标函数值最小, 说明识别精度最高。继续增加传感器数量, 目标函数值变化不明显。因此在实际监测结构中, 分别在监测点 72、10、7、5、48 处粘贴 FBG 传感器对所得到的传感器优化布置方法进行试验验证。

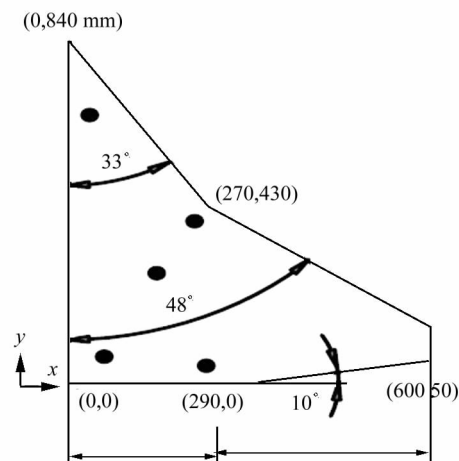


图 1 铝合金板试验件形状

Fig. 1 Aluminium alloy testing panel

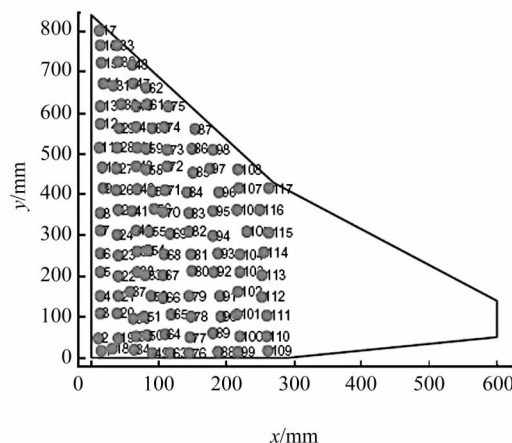


图 2 机翼形状铝合金板试验件所选节点位置

Fig. 2 Beforehand nodes of the sensors in testing panel

表 1 机翼形状铝合金板试验件上可能的
传感器排布组合及目标函数值

Tab. 1 Possible sensor arrangement combinations and
corresponding objective function value on the testing panel

First Point	Sensor arrangement points	Sensor arrangement combination	Objective function value/mm ²
72	4	72,10,7,5	2 122.7
	5	72,10,7,5,48	1 849.2
43	4	43,4,7,48	4 713.4
	5	43,4,5,7,48	1 917.5
22	4	22,7,58,44	4 960.9
	5	22,7,58,44,25	1 860.6
3	4	3,7,20,26	6 750.3
	5	3,7,20,26,43	1 865.6
17	4	17,7,28,3	3 292.6
	5	17,7,28,3,25	1 999.4

4 试验研究

4.1 试验装置

试验所用机翼形状铝合金板试验件和仿真模型相同,其厚为 2 mm,采用悬臂梁固支方式。在仿真中,所得到的最优可测点位置粘贴好 FBG 传感器的试验系统,如图 3 所示。光纤解调仪自带的宽带光源发出的光经过光纤耦合器耦合进 FBG 传感器网络;当在机翼形状铝合金板试验件上的不同位置施加单个不同的集中载荷时,采用温度补偿的方法消除传感器网络中温度的影响;由 NAI 型数字测力仪显示施加载荷的大小,FBG240 光纤光栅解调仪采集

FBG 传感器网络中各个传感器的中心波长并输入到计算机,由计算机对获得的数据进行保存和处理,从而获得 SVM 所需要的训练数据和预测数据。

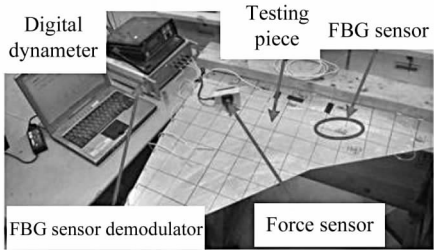


图 3 传感器优化布置验证试验系统
Fig. 3 The validation experimental system
of the optimal sensor arrangement

4.2 试验结果及分析

采用 SVM 模型对采集到的数据进行位置识别。选择 40 N 的力加载时所得到的中心波长变化量作为训练数据集,选择 60 N 的力加载时所得到的中心波长变化量作为测试数据集。分别对如下两组布置位置进行试验验证:1) 未优化传感器排布方案;2) 预布置点 72、10、7、5、48;最终所得目标函数值分别为 8791.7 mm² 和 2156 mm²。不同位置的预测值与实际值的距离误差分别如图 4 所示。从试验结果可以看出,试验结果和仿真结果一致,优化后的传感器排布方案的预测精度均明显优于未优化传感器排布方案的预测精度,同时两种情况下试验结果较仿真结果的目标函数值均有所增加。

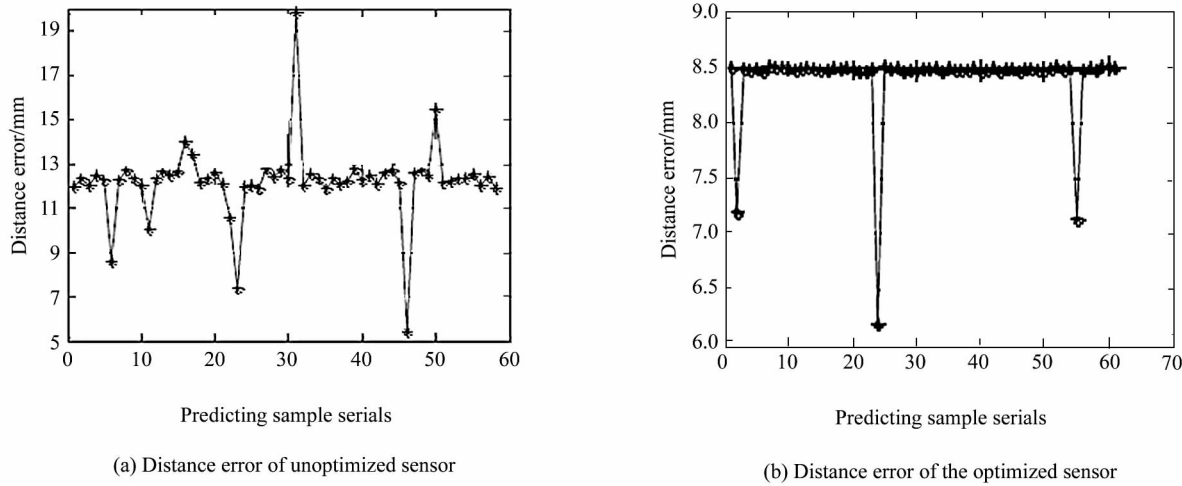


图 4 试验所得测试集实际位置与预测位置的距离误差

Fig. 4 Experimental distance error between real and predicted positions in the testing set

5 结 论

以机翼形状的铝合金板试验件为研究对象,以不同 FBG 传感器数据之间的相关系数为依据,采用逐步累积法和 SVM 优化 FBG 传感器的布置位置和数量。首先采用力学仿真软件建立相应的力学分析模型,根据在力学模型上一定位置进行集中载荷加载得到结构上的自由度应变数值;然后结合 SVM 模型对试件上传感器网络的优化配置方案进行性能评估;最后根据评估得到的传感器最优布置方案,在机翼形状的铝合金板试验件上布置一定数量的 FBG 传感器,并对其进行试验验证。结果表明:经过优化后的 FBG 传感器网络不仅提高了结构健康监测的识别精度,而且提高了结构健康监测系统的综合效益。研究成果可为实际工程应用中航空结构健康监测系统 FBG 传感器网络的优化布置提供了一定的指导作用。

参考文献:

- [1] LI Hong-nan, LI Dong-sheng, SONG Gang-bing. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures* [J]. 2004, **26**(11): 1647-1657.
- [2] YUAN Shen-fang, LAI Xiao-song, ZHAO Xia, et al. Distributed structural health monitoring system based on smart wireless sensor and multi-agent technology [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, **15**(1): 1-8.
- [3] Zhi Zhou, Thomas W Graver, Luke Hsu, et al. Techniques of advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges [J]. *Pacific Science Review*, 2003, **5**(2): 116-121.
- [4] GUO Yong-xing, ZHANG Dong-sheng, ZHOU Zu-de, et al. A novel surface-mounted FBG strain sensor and its application in highway bridge engineering [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(3): 435-441.
郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 表面式 FBG 应变传感器及其在高速公路桥梁工程中的应用 [J]. *光电子 • 激光*, 2014, **25**(3): 435-441.
- [5] ZHANG Xiao-li, LIANG Da-kai, LU Ji-yun, et al. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(1): 0105004.
张晓丽, 梁大开, 芦吉云. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105004.
- [6] MA Xiao-chuan, ZHOU Zhen-an, LIU Ai-chun, et al. A high-sensitivity and stable fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(7): 1245-1250.
马晓川, 周振安, 刘爱春, 等. 高灵敏度稳定光纤光栅温度传感器的研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(7): 1245-

- 1250.
- [7] Mieloszyk M, Krawczuk M, Zak A, et al. An adaptive wing for a small-aircraft application with a configuration of fiber Bragg grating sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, **19**(8): 085009.
- [8] ZHU Fang-dong, ZHANG Dong-sheng, FAN Peng, et al. FBG sensing network with bus topological structure based on optical frequency domain reflectometry [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **24**(3): 526-531.
朱方东, 张东生, 樊鹏, 等. 基于光频域反射的总线型拓扑结构 FBG 传感器网络 [J]. *光电子 • 激光*, 2014, **24**(3): 526-531.
- [9] Xiang Fei, Hani S Mahmassani. Structural analysis of near-optimal sensor locations for a stochastic large-scale network [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, **19**(3): 440-453.
- [10] Duan Hong-jie. The research of optimal sensor placement for health monitoring of bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
段鸿杰. 桥梁健康监测中的传感器优化布置研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [11] Yi Ting-hua, Li Hong-nan. Methodology developments in sensor placement for health monitoring of civil infrastructures [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, **2012**(10): 1-12.
- [12] XIE Qiang, XUE Song-tao. A hybrid algorithm for optimal sensor placement of structural health monitoring [J]. *Journal of Tongji University (Natural science)*, 2006, **34**(6): 726-730.
谢强, 薛松涛. 结构健康监测传感器优化配置的混合算法 [J]. *同济大学学报*, 2006, **34**(6): 726-730.
- [13] LI Gong-biao, ZHAI Wei-lian. Optimum strain gauges distribution for loading identification following fuzzy pattern recognition and hybrid genetic [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, **27**(2): 291-293.
李功标, 翟伟廉. 荷载模糊模式识别中的应变传感器优化布置 [J]. *武汉理工大学学报*, 2009, **27**(2): 291-293.
- [14] Li Yi-qian, Xiang Zhi-hai, Zhou Ma-sheng, et al. Optimal sensor placement for mode-shape based damage identification on bridges [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, **50**(2): 312-315.
李毅谦, 向志海, 周马生, 等. 基于模态的损伤识别过程中的传感器优化布置 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, **50**(2): 312-315.
- [15] WANG Xiang-lin, CHENG Gao. Optimal sensor placement for bridge modal testing based on EFI method [J]. *Bridge Construction*, 2012, **42**(2): 59-65.
江祥林, 程高. 基于 EFI 法的桥梁模态测试中传感器优化布置 [J]. *桥梁建设*, 2012, **42**(2): 59-65.
- [16] WANG Chun-bao, ZHANG Wei-gang, RUAN Juan, et al. Characteristic analysis of a novel F-P interferometer based on a pair of FBGs with built-in LPFGs [J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8**(2): 0084-0088.

作者简介:

张晓丽 (1979—), 女, 河南省平顶山市人, 博士, 讲师, 主要从事智能结构健康监测系统中的数据处理及光纤传感网络研究。