

南京航空航天大学
论文集

(二〇一〇年) 第4册

航空宇航学院

(第4分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇一一年五月



NUAA2011039761

Z427
1033 (2010) -DI

航空宇航学院

013



2011039761

航空宇航学院2010年学术论文清单 (0134)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	张晓丽 梁大开 曾捷 赵志远 曾建民	博士 教授 副教授 硕士 硕士	0134 0134 0134 0134 0134	基于光纤SPR光谱分析的污水降解过程监测研究	光谱学与光谱分析	2010. 30. 02	2010. 02
2	张晓丽 梁大开 芦吉云 曾捷	博士 教授 助教 副教授	0134 0134 0134 0134	高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计	中国激光	2011. 38. 01	2011. 01
3	陆观 梁大开 胡兴柳 芦吉云 曾捷	博士 教授 博士 助教 副教授	0134 0134 0134 0134 0134	光纤复合材料结构低速冲击判位研究	仪器仪表学报	2010. 31. 05	2010. 05
4	胡兴柳 梁大开 曾捷	博士 教授 副教授	0134 0134 0134	基于长周期光线光栅对超声波检测的研究	压电与声光	2010. 32. 06	2010. 12
5	胡兴柳 梁大开 陆观 曾捷	博士 教授 博士 副教授	0134 0134 0134 0134	基于单长周期光纤光栅光谱特性的温度和应变同时区分测量	光谱学与光谱分析	2010. 30. 03	2010. 03
6	刘宏月 梁大开 曾捷 曹志斌 曾建民	博士 教授 副教授 ??	0134 0134 0134	基于长周期光纤光栅谐振光谱调制的氨氮降解监测研究	光谱学与光谱分析	2010. 30. 09	2010. 09
7	万艳 梁大开 曾捷 赵志远 张晓丽	硕士 教授 副教授 硕士 博士	0134 0134 0134 0134 0134	基于偏振分光棱镜的表面等离子体波传感系统	光学学报	2010. 30. 05	2010. 05
8	庞旭明 裘进浩 朱孔军 罗俊	博士 教授 教授 博士	0134 0134 0134 0134	Study on sintering mechanism of KNN-based lead-free piezoelectric ceramics	Journal of Materials Science	2010. 46. 07	
9	季宏丽 裘进浩 吴义鹏 程军	博士 教授 硕士 博士	0134 0134 0134 0134	Novel Approach of Self-Sensing Actuation for Active Vibration Control	Journal of Intelligent Material Systems and Structures	2010. 22. 02	
10	李生权 李娟 裘进浩 季宏丽 朱孔军	博士 教授 教授 博士 教授	0134 0134 0134 0134 0134	Control design for arbitrary complex nonlinear discrete-time systems based on direct NNMRAC strategy	Journal of Process Control	2010. 21. 01	
11	季宏丽 裘进浩 夏品奇	博士 教授 教授	0134 0134 0111	The Influences of switching phase and frequency of voltage on the vibration damping effect in a piezoelectric actuator	Smart materials and structures	2010. 20. 01	
12	陈远晟 裘进浩 季宏丽 朱孔军	博士 教授 博士 教授	0134 0134 0134 0134	Tracking control of piezoelectric actuator system using inverse hysteresis model	International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	2010. 33. 3-4	
13	刘建 裘进浩 常伟杰 季宏丽 朱孔军	博士 教授 硕士 博士 教授	0134 0134 0134 0134 0134	Metal core piezoelectric ceramic fiber rosettes for acoustoultrasonic Source localization in plate structures	International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	2010. 33. 3-4	
14	裘进浩 季宏丽 朱孔军 M. J. PAR K	教授 博士 教授 教授	0134 0134 0134 外单位	Response of metal core piezoelectric fibers to unsteady airflows	Modern Physics Letters B	2010. 24. 13	

15	季宏丽 裘进浩 朱孔军 Adrien Badel	博士 教授 教授 副教授	0134 0134 0134 外单位	Two-mode vibration control using nonlinear synchronized switching damping based on the maximization of converted energy	Journal of Sound Vibration	2010. 329. 1 4	
16	沈辉 裘进浩 季宏丽 朱孔军	博士 教授 博士 教授	0134 0134 0134 0134	A low-power circuit for piezoelectric vibration control by synchronized switching on voltage sources	Sensors and ActuatorsA: Physical	2010. 161. 1 -2	
17	沈辉 裘进浩 季宏丽 朱孔军	博士 教授 博士 教授	0134 0134 0134 0134	Enhanced synchronized switch harvesting: a new energy harvesting scheme for efficient energy extraction	Smart Mater. Struct	2010. 19. 11	
18	季宏丽 裘进浩 朱孔军	博士 教授 教授	0134 0134 0134	Vibration control of a composite beam using self-sensing semi-active approach	Chinese Journal of mechanical engineering	2010. 23. 05	
19	裘进浩 季宏丽	教授 博士	0134 0134	The application of piezoelectric materials in smart structures in China	International Journal of Aeronautical and Space Science	2010. 11. 04	
20	姜皓 季宏丽 裘进浩 陈远晟	硕士 博士 教授 博士	0134 0134 0134 0134	A modified prandtl-ishlinskii model for modeling asymmetric hysteresis of piezoelectric actuators	IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control	2010. 57. 05	
21	边义祥 裘进浩 王鑫伟 季宏丽 朱孔军	博士 教授 教授 博士 教授	0134 0134 0132 0134 0134	含金属芯压电纤维的传感特性研究	振动测试与诊断	2010. 30. 01	
22	马小陆 裘进浩 季宏丽 朱孔军 刘汝寿	博士 教授 博士 教授 硕士	0134 0134 0134 0134 0134	小波变换自适应算法的主动振动控制	振动、测试与诊断	2010. 30. 05	
23	刘建 裘进浩 常伟杰 季宏丽 朱孔军	博士 教授 硕士 博士 教授	0134 0134 0134 0134 0134	基于矩形压电片的冲击载荷定位新方法	振动、测试与诊断	2010. 30. 03	
24	常伟杰 刘建 季宏丽 裘进浩 朱孔军	硕士 博士 博士 教授 教授	0134 0134 0134 0134 0134	含金属芯压电纤维对Lamb波传感实验研究	压电与声光	2010. 32. 05	
25	刘汝寿 季宏丽 裘进浩 朱孔军 马小陆	硕士 博士 教授 教授 博士	0134 0134 0134 0134 0134	合成阻抗在振动噪声控制中的应用	传感器与微系统	2010. 29. 02	
26	裘进浩 袁明 季宏丽	教授 博士 博士	0134 0134	大型飞机舱内振动噪声主动控制技术的研究及 其应用	航空制造与技术	2010. 00. 14	
27	季宏丽 裘进浩 Daniel Guyomar	博士 教授 教授	0134 0134 外单位	Influence of switching phase and frequency on the control performance of SSD approaches	The 10th international conference on motion and vibration control		
28	季宏丽 裘进浩	博士教 授	0134 0134	Application of a negative capacitance circuit in synchronized switch damping techniques for vibration Suppression	Proc. of SPIE, Active and passive smart structures and integrated systems	2010. 7643- 1	
29	杜建周 裘进浩 朱孔军 季宏丽 罗俊	博士 教授 教授 博士 博士	0134 0134 0134 0134 0134	Electromechanical characterization and modeling analysis of piezoelectric ceramic fibers with Pt Core	Proceeding of the second asian conference on of functional materials and structures (ACMFMS 2010) conference program October		2010. 10

30	姚塞金 裘进浩 季宏丽 朱孔军	硕士 教授 博士 教授	0134 0134 0134 0134	Deicing method based on the piezoelectric actuators	Proceeding of the second asian conference on of functional materials and structures (ACMFMS 2010) conference program October		
31	刘建 裘进浩 常伟杰 季宏丽 朱孔军	博士 教授 硕士 博士 教授	0134 0134 0134 0134 0134	Lamb wave sensing with metal-core piezoelectric fiber for structural health monitoring	Proc. of SPIE, Active and passive smart structures and integrated systems	2010.- 7650.06-1	
32	宋培思 裘进浩 季宏丽 陈楠	硕士 教授 博士 硕士	0134 0134 0134 0134	Numerical simulation on drag and flow-induced noise reduction of turbulent flow based on the smart skin technique	Seventh international conference on flow dynamics		
33	刘世涛 裘进浩 刘建 朱孔军 季宏丽	硕士 教授 博士 教授 博士	0134 0134 0134 0134 0134	Damage monitoring of the transmission lines based on elastic wave	21st International conference on adaptive structures and technologies (ICAST) university park, Pennsylvania		
34	季宏丽 裘进浩 吴义鹏 程军	博士 教授 硕士 博士	0134 0134 0134 0134	Novel approach of self-sensing actuation for active vibration control	20th International Conference on Adaptive Structures and Technologies		
35	姜皓 季宏丽 裘进浩 朱孔军	说是 博士 教授 教授	0134 0134 0134 0134	A modified prandtl-ishlinskii model and its applications to inverse control of piezoelectric actuators	20th International Conference on Adaptive Structures and Technologies		
36	陈远晟 裘进浩 季宏丽 朱孔军	博士 教授 博士 教授	0134 0134 0134 0134	Tracking control of piezoelectric actuators using inverse hysteresis model	The 14th international symposium on applied electromagnetics and mechanics		
37	裘进浩 季宏丽 沈辉	教授 博士 博士	0134 0134 0134	Energy Harvesting and Vibration Control Using Piezoelectric Elements and a Nonlinear Approach	12th International Meeting on Ferroelectricity and 18th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics		
38	刘建 裘进浩 常伟杰 季宏丽 朱孔军	博士 教授 硕士 博士 教授	0134 0134 0134 0134 0134	Metal core piezoelectric ceramic fiber rosettes for acoustic-ultrasonic source localization in plate structures	The 14th international symposium on applied electromagnetics and mechanics		
39	沈辉 季宏丽 裘进浩 朱孔军	硕士 博士 教授 教授	0134 0134 0134 0134	A Semi-passive Vibration Damping System Powered by Harvested Energy	International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	2009. 31. 04	
40	沈辉 季宏丽 裘进浩 朱孔军	硕士 博士 教授 教授	0134 0134 0134 0134	能量自给的自感知半主动振动控制	全国压电和声波理论及器件技术研讨会暨2009年全国频率控制技术年会		2009
41	马小陆 裘进浩 季宏丽 朱孔军 刘汝寿 李生权	博士 教授 博士 教授 硕士 博士	0134 0134 0134 0134 0134 0134	基于负电容分支电路的主动-被动混合振动控制研究	全国压电和声波理论及器件技术研讨会暨2009年全国频率控制技术年会		2009
42	宋培思 裘进浩 季宏丽 陈楠	硕士 教授 博士 硕士	0134 0134 0134 0134	The Aerodynamic Characteristics Analysis of an Adaptive Wing with Flexible Trailing Edge Using CFD	21st International conference on adaptive structures and technologies (ICAST) university park, Pennsylvania		2010
43	沈星 吕娟 章建文 王宁	教授 研究生 研究生 研究生	0134 0134 0134 0134	基于压电阻抗技术和BP网络的结构健康监测	南京航空航天大学学报	2010. 42. 04	2010. 08

44	孙红兵 袁慎芳 赵霞 周恒保 梁栋	博士 教授 博士 硕士 博士	0134 0134 0134 0134 0134	Technology of structure damage monitoring based on multi-agent	Journal of Systems Engineering and electronics	2010. 21. 04	2010. 08
45	吴健 袁慎芳	博士 教授	0134 0134	Multi-agent system design and evaluation for collaborative wireless sensor network in large structure health monitoring	EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS	2010. 37. 03	
46	黄红梅 袁慎芳 常琦	博士 教授 博士	0134 0134 0134	基于光纤Bragg光栅和支持向量机的冲击损伤识别研究	振动与冲击	2010. 29. 10	
47	邱雷 袁慎芳 张道越 王强 张炳良 杨伟伟	博士 教授 博士 博士 硕士 硕士	0134 0134 0134 0134 0134 0134	基于Shannon复数小波的复合材料结构时间反转聚焦多损伤成像方法	复合材料学报	2010. 27. 02	2010. 04
48	苏永振 袁慎芳 王瑜	博士 教授 博士	0134 0134 0134	基于多重信号分类算法的复合材料冲击定位	复合材料学报	2010. 27. 03	2010. 06
49	王强 袁慎芳	博士 教授	0134 0134	无参考主动Lamb波结构损伤时反成像监测方法	航空学报	2010. 31. 01	2010. 01
50	张道越 袁慎芳 邱雷	博士 教授 教授	0134 0134 0134	飞行器板结构中Lamb波解析建模研究	南京航空航天大学学报	2010. 42. 03	2010. 06
51	蔡建 袁慎芳 张道越 王强	博士 教授 博士 博士	0134 0134 0134 0134	Lamb波双面激励方法及其在近邻损伤监测中的应用	南京航空航天大学学报	2010. 42. 01	2010. 02
52	陈拥军 袁慎芳 吴键 张英杰	博士 教授 博士 博士	0134 0134 0134 0134	基于免疫系统的无线传感器网络性能优化	系统工程与电子技术	2010. 32. 05	2010. 05
53	季赛 袁慎芳 李含光	博士 教授 副教授	0134 0134 外单位	WSN中故障诊断性能与平均节点度研究	计算机工程	2010. 36. 07	2010. 04
54	季赛 袁慎芳	博士 教授	0134 0134	无线传感器网络中节点故障诊断方法的研究	计算机工程与应用	2010. 46. 23	
55	陈拥军 袁慎芳 吴键 张英杰	博士 教授 博士 博士	0134 0134 0134 0134	无线传感器网络故障诊断与容错控制研究进展	传感器与微系统	2010. 29. 01	
56	胥保春 袁慎芳 邱雷	博士 教授 博士	0134 0134 0134	Lamb波与瞬时相位技术在损伤识别中的应用	振动、测试与诊断	2010. 30. 03	2010. 06
57	周恒保 袁慎芳 邱雷	硕士 教授 博士	0134 0134 0134	基于PXI总线多通道程控电荷放大器设计	压电与声光	2010. 32. 04	2010. 08
58	黄红梅 袁慎芳	博士 教授	0134 0134	Composite Failure detection in π -joint composite structures using fiber Bragg grating sensors	2nd International Symposium on NDT in Aerospace		2010
59	邱雷 袁慎芳 张道越	博士 教授 博士	0134 0134 0134	一种复合材料结构冲击成像定位方法	2010年航空试验测试技术学术交流会		2010
60	董晨华 袁慎芳 吴键	硕士 教授 博士	0134 0134 0134	用于结构疲劳测试的无线传感器网络节点的设计	2010年航空试验测试技术学术交流会		2010
61	石晓玲 袁慎芳 邱雷	硕士 教授 博士	0134 0134 0134	压电智能夹层抗电磁干扰设计	2010年航空试验测试技术学术交流会		2010
62	梁栋 袁慎芳 吴键	博士 教授 博士	0134 0134 0134	基于模式识别核方法的桥梁传感器数据异常诊断研究	2010年大跨经桥梁结构损伤预警及状态评估技术研讨会		2010
63	王洋 袁慎芳 董晨华 吴键	硕士 教授 硕士 博士	0134 0134 0134 0134	一种无线传感器网络分布式连续数据采集系统的同步方法	2010年江苏省仪器仪表学会学术年会		2010

64	常琦 袁慎芳	博士 教授	0134 0134	A design strategy of structural health management system	International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	2010.33.3-4	
65	邱雷 袁慎芳 苏永振 张道越	博士 教授 博士 博士	0134 0134 0134 0134	基于Shannon 复数小波和时间反转聚焦的复合材料结构多源冲击成像定位方法	航空学报	2010.31.12	
66	夏彦君 郑世杰	硕士 教授	0134 0134	FBG轴向非均匀应变分布的遗传规划重构方法	光电子. 激光	2010.21.08	2010.08
67	宋振 郑世杰	硕士 教授	0134 0134	复合材料板壳任意位置处载荷识别	航空动力学报	2010.25.10	2010.10
68	黄烨 郑世杰	硕士 教授	0134 0134	基于模糊推理的复合材料柔性梁损伤识别研究	兵器材料科学与工程	2010.33.04	2010.07
69	宋振 郑世杰	硕士 教授	0134 0134	Investigation of encoding methods of the genetic algorithm for the load identification of composite structure	2009年全国压电和声波理论及器件技术研讨会暨全国减率控制技术年会		2009
70	郭华 朱孔军 王秀峰 裘进浩 季宏丽	硕士 教授 ? 教授 博士	0134 0134 ? 0134 0134	水热合成无铅压电陶瓷粉体	材料导报	2010.24.01	2010.01
71	刘培新 朱孔军 胡秀兰 裘进浩 季宏丽 纪士东	硕士 教授 ? ? 教授 博士?	0134 0134 ? 0134 0134 ?	水热辅助聚合物前驱体法制备铌酸钾钠薄膜	压电与声光	2010.32.05	2010.10
72	朱孔军 裘进浩 苏礼奎 季宏丽 梦兆磊	教授 教授 硕士 博士 ?	0134 0134 06 0134 ?	铌酸钾钠基无铅压电陶瓷材料的制备方法	中国科技论文在线	2010.05.04	2010.04
73	朱孔军 谢实晖 裘进浩 柏林 季宏丽	教授 硕士 教授 硕士 博士	0134 06 0134 06 0134	CuO 掺杂对NaNbO ₃ -BaTiO ₃ 无铅压电陶瓷性能的影响	硅酸盐学报	2010.38.06	2010.06
74	朱孔军 苏礼奎 季宏丽 裘进浩 柏林 柳泽河道	教授 硕士 博士 教授 硕士 博士	0134 06 0134 0134 06 外单位	水热-溶剂热法合成(K, Na)NbO ₃ 无铅压电陶瓷及其性能测试	无机材料学报	2010.25.11	2010.11
75	朱孔军 裘进浩 季宏丽	教授 教授 博士	0134 0134 0134	Crystallographic study of lead-substituted hydroxyapatite synthesized by high-temperature mixing method under hydrothermal conditions	Inorganica Chimica Acta		2010.03
76	苏礼奎 朱孔军 柏林 裘进浩 季宏丽	硕士 教授 硕士 教授 博士	06 0134 06 0134 0134	Effects of Sb-doping on the formation of (K, Na)(Nb, Sb)O ₃ solid solution under hydrothermal conditions	Journal of Alloys and Compounds		2010.07
77	朱仁强 朱孔军 裘进浩 柏林 季宏丽	硕士 教授 教授 教授 博士	06 0134 0134 06 0134	Coprecipitation-assisted hydrothermal synthesis of PLZT hollow nanospheres	Materials Research Bulletin		2010.04
78	朱仁强 朱孔军 裘进浩 郑勇 季宏丽	硕士 教授 教授 教授 博士	0134 0134 0134 06 0134	表面活性剂对水热合成 PLZT 陶瓷粉体物相及形貌的影响	硅酸盐学报	2010.38.04	2010.04
	苏礼奎 朱孔军 裘进浩 季宏丽	硕士 教授 教授 博士	06 0134 0134 0134	Isopropanol-assisted hydrothermal synthesis of (K, Na)NbO ₃ piezoelectric ceramic powders	Journal of Material Science		2010.03

80	朱孔军 裘进浩 季宏丽	教授 教授 博士	0134 0134 0134	Microwave sintering of lead-free barium titanate piezoelectric ceramics from barium titanate powders synthesized by a hydrothermal method	Journal of Ceramic Processing Research		2010.03
81	柏林 朱孔军 苏礼奎 裘进浩 季宏丽	硕士 教授 硕士 教授 博士	06 0134 06 0134 0134	Synthesis of (K, Na)NbO ₃ particles by high temperature mixing method under hydrothermal conditions	Materials Letters		2010.01
82	柏林 朱孔军 裘进浩 季宏丽 苏礼奎	硕士 教授 教授 博士 硕士	06 0134 0134 0134 06	Phase evolution of (K, Na)NbO ₃ powder prepared by high temperature mixing under hydrothermal conditions	Particuology		2010.10
83	王会 朱孔军 裘进浩 罗俊 季宏丽	硕士 教授 教授 博士 博士	0134 0134 0134 0134 0134	Ferroelectric and Piezoelectric Properties Of Pb(Ni ₁ /3Nb ₂ /3)0.5(Ti _{0.7} Zr _{0.3})0.5O ₃ Ceramics Fabricated by Tape-Casting Process	Ferroelectrics		2010.04
84	朱孔军 裘进浩 曹洋 郑红娟 季宏丽	教授 教授 硕士 硕士 博士	0134 0134 0134 0134 0134	Fabrication of (K _{0.5} Na _{0.5})NbO ₃ lead-free piezoelectric film	The Second Asian Conference on Functional Materials and Structures		2010.10
85	顾洪汇 朱孔军 裘进浩 庞旭明 曹洋	硕士 教授 教授 博士 硕士	0134 0134 0134 0134 0134	水热高温混合法制备K _{0.1} Nb _{0.9} O ₃ 陶瓷粉体的研究	江苏省颗粒学会2010年学术年会		2010.11
86	曹洋 朱孔军 裘进浩 庞旭明 顾洪汇 郑红娟	硕士 教授 教授 博士 硕士 硕士	0134 0134 0134 0134 0134 0134	铌酸钾钠无铅压电陶瓷薄膜的制备方法研究	海峡两岸功能性复合材料论坛		2010.11
87	曹洋 朱孔军 柏林 裘进浩 季宏丽	硕士 教授 硕士 教授 博士	06 0134 0134 0134 0134	水热高温混合法制备NbNbO ₃ 及结构演变	江苏省颗粒学会2010年学术年会		2010.11
88	朱孔军 王会 裘进浩 罗俊	教授 硕士 教授 博士	0134 0134 0134 0134	Fabrication of 0.655Pb(Mg ₁ /3Nb ₂ /3)O ₃ -0.345PbTiO ₃ Ceramics and Devices by Tape-casting Process	第七届亚澳复合材料		2010.10
89	朱仁强 朱孔军 裘进浩 庞旭明 柏林 季宏丽	硕士 教授 教授 博士 硕士 博士	06 0134 0134 0134 0134 0134	PZT陶瓷粉体的水热合成及其物相和成分的研究	江苏省颗粒学会2010年学术年会		2010.11
90	孙丽华 徐志伟	硕士 教授	0134 0134	飞行器垂直尾翼的神经网络模型辨识	振动、测试与诊断	2010.30.06	2010.12
91	杨媛 徐志伟	硕士 教授	0134 0134	基于SMA的飞行器变体机翼驱动结构研究	兵器材料科学与工程	2010.33.01	2010.01

基于光纤 SPR 光谱分析的污水降解过程监测研究

张晓丽¹, 梁大开^{1*}, 曾捷¹, 赵志远¹, 曾建民²

1. 南京航空航天大学智能材料与结构重点实验室, 江苏 南京 210016

2. 广西大学有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 南宁 530004

摘要 讨论了光纤表面等离子体波传感器的工作原理, 并对将其用于监测以甲基橙为代表的污水降解过程的可行性进行了探讨。用光纤 SPR 传感器监测了 50 mL 初始浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的甲基橙原溶液在降解过程中浓度的变化, 对降解过程中光纤 SPR 传感器的光谱进行了详细的分析; 同时采用紫外-分光光度计对降解过程中溶液浓度的变化进行了监测, 并对 2 种方法所测的数据进行了分析对比。结果表明, 光纤 SPR 同常规方法的测量结果一致, 随着降解时间的增加, 甲基橙溶液的吸光度和浓度逐渐减小, 光纤 SPR 传感器的共振波长逐渐发生蓝移, 同初始标定的甲基橙原溶液共振光谱比较, 说明甲基橙逐渐被降解, 且在 2 h 内降解率达到 73%, 说明用光纤 SPR 传感器监测污水降解过程是完全可行的。研究结果不仅为污水降解过程提供了一种新的监测方法, 同时促进了我国 SPR 传感技术与环保监测研究结合, 为光纤 SPR 技术走向实用, 并最终实现产业化积累了经验。

关键词 SPR 光谱分析; 表面等离子体波; 光纤传感器; 污水降解监测

中图分类号: O433, X131.2 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)02-0532-05

引言

目前我国印染废水浓度提高速度快, 不少企业的废水处理设计工艺未达到要求, 造成废水排放达标困难或达标不稳定^[1]。因此, 必须在污水排放之前, 对其降解过程进行实时监测。传统的监测方法主要有原子吸收分光光度法、电化学方法等^[2]。但近年来, 随着水工程事业的发展, 人们对水质监测及分析的准确性、快速性、实时性的要求愈来愈高, 使得传统监测方法缺点日益突出。当今发展起来的生物传感器具有快速、实时、可以连续监测等优点^[3], 适应现代环境分析监测的需要, 在今后的环境分析监测领域将会大放异彩。

以表面等离子体波共振 (surface plasma resonance, SPR) 效应作为传感原理的光学传感器是一种典型的生物传感器, 它对环境液体介质折射率的变化非常敏感, 被广泛应用于诸如基因突变检测、生物分子反应动力学测定以及工业废水废气监控等^[4-6]领域, 是一种极具发展前途的生物传感器。在前人研究的基础上, 本文提出了用光纤 SPR 传感器监测以甲基橙为代表的有机染料废水降解过程的新型环境监测

方法。与传统的环境监测方法相比, 光纤 SPR 传感器具有抗电磁干扰能力强、测量机构简单、传感部分体积小, 适合远程遥测、易于实现实时监测等显著优点^[7-9]。用 SPR 传感器监测污水降解过程在国内还未见此方面的文章, Valtencir 等用基于 SPR 效应的生物传感器监测污水中邻苯二酚的降解^[10], 但它并不是以光纤作为基体。本文的研究不仅可以为污水降解过程提供一种新的监测方法, 而且还可以促进我国 SPR 传感技术与环保监测研究相结合, 为光纤 SPR 技术走向实用, 并最终实现产业化打下良好的基础。

1 监测原理

根据 1876 年 Wiff 提出的染料发色团说^[11], 染料颜色是由双键引起的, 这些含有双键的原子团叫发色团, 发色团必须连接在具有特殊结构的碳氢化合物上才能形成发色体。分析甲基橙的分子结构可知, 偶氮基 ($-\text{N}=\text{N}-$) 是发色团, 偶氮基与苯环形成的共轭结构是主要的发色体。在降解过程中, $-\text{N}=\text{N}-$ 键易于吸收紫外光而首先产生电子跃迁, 生成激发态电子, 从而活化分子的局部结构, 并使与偶氮基

收稿日期: 2009-01-29, 修订日期: 2009-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60907038), 江苏省自然科学基金项目 (BK2008388, BK2009370), 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室开放基金项目和南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金项目 (200901001, 200901002) 资助

作者简介: 张晓丽, 女, 1979 年生, 南京航空航天大学航空宇航学院博士研究生 E-mail: zxli_nuaa@nuaa.edu.cn

*通讯联系人 E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

相连的碳原子变得不稳定,进而促进 N—C 键的首先断裂。随着降解的进行,甲基橙的色基团、共轭体系、苯环和分子结构均被破坏,甲基橙分子被彻底降解。

而光纤 SPR 传感器对所测液体的折射率变化非常敏感,它利用入射光在纤芯与金属 2 种具有不同介电性质的分界面发生全反射时产生的倏逝波激发金属表面的自由电子,在金属与介质表面产生表面等离子体波 (surface plasma wave, SPW)。若 SPW 波和入射光在水平方向的波矢相等时,即

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1(\lambda) \epsilon_2(\lambda)}{\epsilon_1(\lambda) + \epsilon_2(\lambda)}} k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\lambda)} \sin \theta_{\text{spr}} \quad (1)$$

则发生表面等离子体共振效应。

当发生表面等离子体共振时,根据 Maxwell 方程和边界条件,可获得 4 层光纤结构的 Krestschmann 模型(如图 1)的光强反射率 R 为^[12,13]

$$r_{0123} = \frac{r_{01} + r_{23} e^{ik_{z1} d_1}}{1 + r_{01} r_{23} e^{ik_{z1} d_1}} \quad (2)$$

$$r_{123} = \frac{r_{12} + r_{23} e^{ik_{z2} d_2}}{1 + r_{12} r_{23} e^{ik_{z2} d_2}} \quad (3)$$

$$r_{mn} = (k_{zm}/\epsilon_m - k_{zn}/\epsilon_n) / (k_{zm}/\epsilon_m + k_{zn}/\epsilon_n) \quad (4)$$

$$k_{zm(n)} = k_0 \sqrt{\epsilon_{m(n)} - \epsilon_0 \sin^2 \theta_{\text{spr}}} \quad (5)$$

式中 $m, n = 0, 1, 2, 3$, r_{123} 为介质 1~3 层的反射系数, d_1 为调制层铬的厚度, d_2 为金属层金膜厚度, r_{mn} 为相邻 2 层膜界面上的反射系数, $k_{zm(n)}$ 为光波在介质 $m(n)$ 中 z 方向的波矢, $\epsilon_{m(n)}$ 为纤芯/金属层/环境介质 3 种介质在不同入射光波长下所对应的介电常数, k_0 为光波在真空中的波矢, c 为光速, ω 为光波频率。

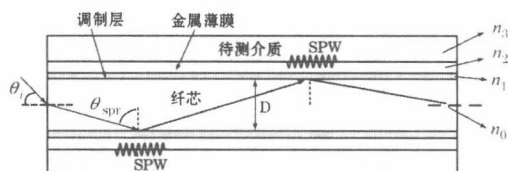


Fig 1 Four layers optical fiber Krestschmann model

通常光线在光纤 SPR 传感器的传感区域会发生多次全反射,由于对同一光线在每个点的反射系数相同,假定反射次数为 N ,则设光线以图 1 所示共振角 θ_{spr} 射进传感长度为 L 、直径为 D 的纤芯中发生衰减全反射的次数可表达为

$$N(L, D, \theta_{\text{spr}}) = \left\lfloor \frac{2L}{D \tan \theta_{\text{spr}}} \right\rfloor \quad (6)$$

则在整个传感器中光线总的反射率为 $R = R^{N(L, D, \theta_{\text{spr}})}$ 。

当光纤 SPR 探头结构固定时,则

$$R = f(\epsilon_3(\lambda_{\text{spr}})) \quad (7)$$

因此,发生表面等离子共振时的光波长即共振波长 λ_{spr} 与液体介质的折射率 ($\epsilon = n^2$) 存在确定的对应关系。

对以甲基橙为代表的有机染料废水在氧化降解动力学规律研究方面多以脱色率、COD 去除率等为表征量,在降解过程中,溶液的脱色率或降解率表征为^[14]

$$((c_0 - c_t) / c_0) \times 100\% \quad (8)$$

式中 c_0 为甲基橙溶液的初始浓度, c_t 为时间 t 时甲基橙溶液的浓度。

有机物溶液的折射率与浓度存在着一定的对应关系,随着甲基橙逐步被降解,甲基橙溶液的浓度随之发生变化,其折射率也随之变化,因此用光纤 SPR 传感器来监测以甲基橙为代表的环境污水降解过程理论上是可行的。

2 实验装置

染料工业废水处理的难点在于脱色和难降解有机物的处理^[15]。自 2001 年美国科学家利用电化学阳极氧化的方法在纯钛表面制备了 TiO_2 纳米管阵列后,基于 TiO_2 纳米管阵列光催化降解有机染料废水的方法引起了人们极大的关注^[16]。本文紧跟国内外先进技术,采用此方法降解以甲基橙为代表的染料废水,并用光纤 SPR 传感器对其降解过程进行监测,整个实验装置如图 2 所示。宽带光源(美国海洋光学公司)发出的光经 Y 型光纤耦合器(南京春辉科技实业有限公司)耦合进光纤 SPR 传感器,同紫外光催化降解后的甲基橙溶液发生表面等离子共振,共振后光线经光纤探头端面反射后经 Y 型耦合器的另一端进入光谱分析仪(美国海洋光学公司),并经计算机处理程序进行分析。

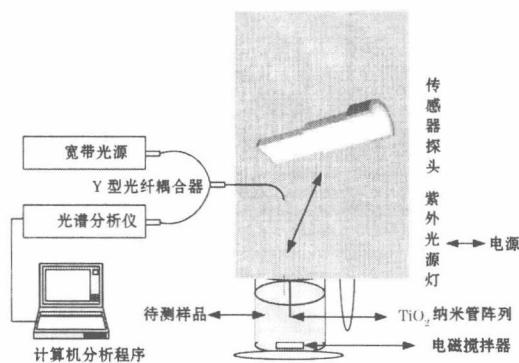


Fig 2 Experimental apparatus

3 实验结果

3.1 甲基橙原溶液的标定

在监测以甲基橙溶液降解过程前,首先测定了所用光纤 SPR 传感器针对不同浓度的甲基橙溶液所对应的共振波长。标定中所配制的溶液浓度与共振波长如图 3 所示。所测共振

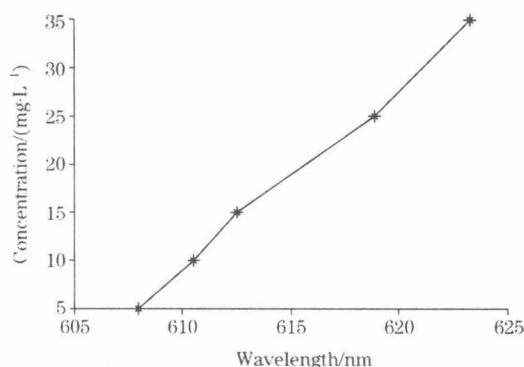


Fig 3 Curve of resonant wavelength and concentration

光谱如图 4 所示。由图中可以看出,随着浓度的逐渐升高,共振波长逐渐发生红移,说明甲基橙溶液浓度的变化会导致 SPR 共振光谱发生变化。

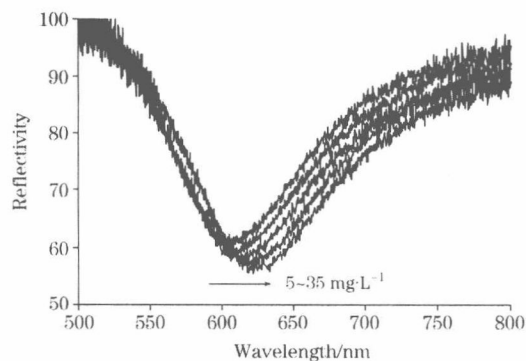


Fig. 4 Resonant spectrum of standardization solution

3.2 降解过程监测结果分析

试验中对 50 mL 初始浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的甲基橙溶液在室温下进行降解,降解时间为 2 h,每隔 30 min 取样一次进行测试,其光谱图和共振波长随时间变化分别如图 5 和图 6 所示,图 5 中箭头所指表示时间从 0~120 min 的共振光谱随降解的进行而偏移的方向。由图中可以看出,随着降解时间的增加,共振波长逐渐发生蓝移,同图 3 分析比较,说明随着光催化时间的增加,溶液的浓度逐渐降低,溶液中的甲基橙逐渐被降解。

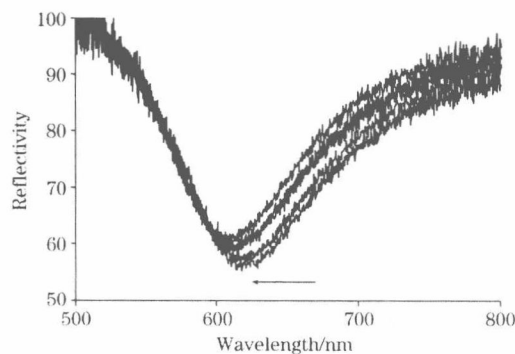


Fig. 5 Spectrum of 0-120 minutes methyl orange degradation

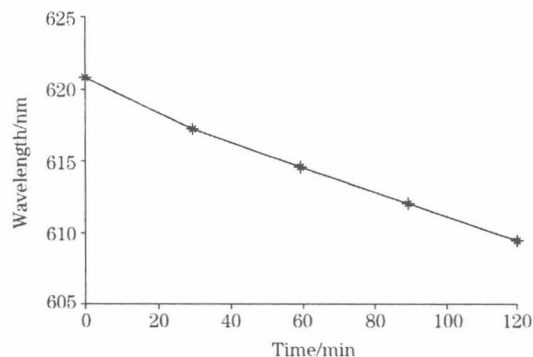


Fig. 6 Curve of resonant wavelength and time

3.3 常规监测方法

为了对光纤 SPR 传感器与常规监测结果进行对比,首先配置 0, 10, 20, 30, 40, 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的甲基橙溶液,用 UV-9200 型紫外-分光光度计对其吸光度进行测定,得出浓度同吸光度的标准曲线如图 7 所示,曲线的拟合度为 99.9%。根据朗伯-比尔定律,在一定浓度范围内,溶液的吸光度与其浓度成线性关系,即 $A = K'c^{[17]}$ 。因此,可以通过提前标定的吸光度来计算降解过程中不同时刻甲基橙溶液的浓度。采用紫外-分光光度计对降解过程的取样溶液吸光度进行测量,通过所标定的吸光度曲线计算其浓度,得出降解不同时刻对应的吸光度及浓度如表 1 所示。

Table 1 Time, absorbance and concentration

时间/min	0	30	60	90	120
吸光度	2.221	1.677	1.329	0.947	0.594
浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	29.5	22.2	17.8	13.1	8.2

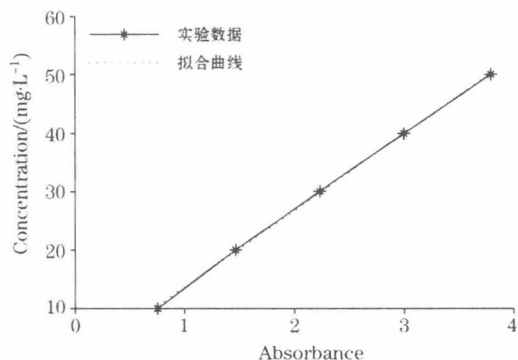


Fig. 7 Norm curve of concentration and absorbance

3.4 2 种监测方法的比较

根据前面所述有机染料废水在降解过程中其脱色率同浓度的关系式可得出用 2 种方法所得降解过程中溶液的脱色率同浓度的关系如图 8 所示。从图中可以看出,用光纤 SPR 传感器得到的脱色率同常规用吸光度方法得到的结果一致。

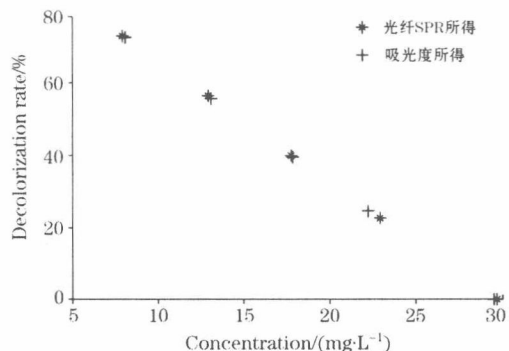


Fig. 8 Relationship of concentration and decolorization rate

在降解过程中,用 2 种方法所得的脱色率与时间、浓度与时间的关系曲线分别如图 9 和图 10 所示。从图中可以看出,用光纤 SPR 传感器监测以甲基橙为代表的污水降解所

取得的效果同常规吸光度方法接近一致, 同样说明用光纤 SPR 监测环境污水降解是可行的。

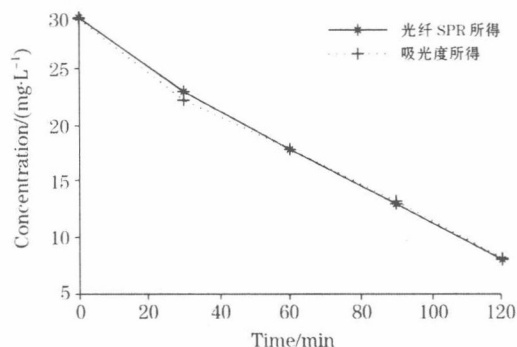


Fig 9 Curve of concentration and time

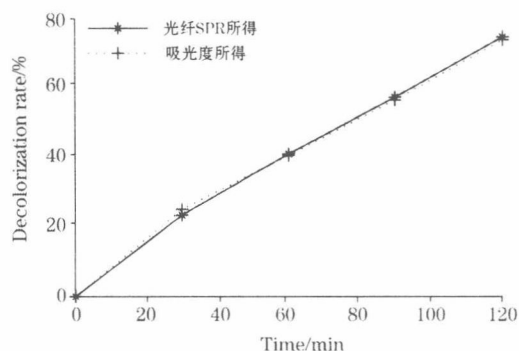


Fig 10 Curve of decolorization rate and time

TiO₂ 纳米管阵列光催化降解有机染料废水主要是靠其产生的羟基来氧化分解相邻的有机物^[18,19], 刚开始降解时甲基橙溶液的浓度较大, 和羟基结合的速度较快, 降解速度较快。整个光催化阶段, 羟基的数目基本稳定不变, 因此, 随着溶液浓度的降低, 两者结合的几率变小, 降解速度逐渐变缓, 脱色率及浓度变化量减小。从图 10 中可以看出, 在 60 min 时甲基橙的脱色率变化比较大, 达到 40%, 而在后 1 h, 变化量比较小, 光催化 2 h 后, 脱色率达到 73% 左右。

4 结束语

在研究污水降解过程中某个时间的降解程度、动力学规律时, 通常采用紫外-分光光度计对降解过程取样进行吸光度测量, 通过吸光度来计算其浓度, 这样导致对降解过程不能实现在线监测, 同时, 若溶液浓度过大, 则需要对浓度进行一定的稀释使其达到朗伯-比尔定律要求的范围, 这样会造成一定的误差, 且给测量带来了不便, 而光纤 SPR 传感器对液体的折射率非常敏感, 液体的折射率与浓度存在一定的对应关系, 以甲基橙为代表的印染废水在降解过程中由于化学分子的不断变化导致其折射率变化, 从而使共振波长有规律的发生显著的变化, 因此可以通过测量光纤 SPR 传感器中共振光谱的变化来测量污水降解的程度。此方法可以实现对污水处理的实时、在线监测, 大大提高了监测的效率。本文的研究不仅为光纤 SPR 传感器开辟了新的应用空间, 同时为废水监测提供了新的方法, 促进了环境监测的进一步发展。

参 考 文 献

- [1] YUAN Xun, LIU Yuying, ZHUO Shuping (袁 勋, 柳玉英, 褚淑萍). Acta Chimica Sinica (化学学报), 2007, 65(17): 1814.
- [2] State Environment Protection Administration Editorial Committee (国家环保总局编委会编). The Water and Wastewater Monitoring Method (水和废水监测分析方法). Beijing: China Environmental Science Press (北京: 中国环境科学出版社), 2002. 13.
- [3] WEI Xiao-lan, MO Zhi-hong (韦晓兰, 莫志宏). Progress in Biochemistry and Biophysics (生物化学与生物物理进展), 2004, 31(9): 855.
- [4] Mitsualki Watanabe, Kotaro Kajikawa. Sensors and Actuators B, 2003, 89: 126.
- [5] Kotaro Kajikawa, Keita Mitsui. SPIE, 2004, 5593: 494.
- [6] Jorgenson R C. Sensors and Actuators B, 2001, 73(4): 236.
- [7] ZENG Jie, LIANG Da-kai, ZENG Zhen-wu (曾 捷, 梁大开, 曾振武). Acta Optica Sinica (光学学报), 2007, 27(3): 404.
- [8] Homola J, Lu H B, Yee S S. Electron. Lett., 1999, 35(13): 1105.
- [9] WU Lei, HUANG Ming-hui, ZHAO Jian-long (吴 蕾, 黄明辉, 赵建龙). Progress in Biochemistry and Biophysics (生物化学与生物物理进展), 2005, 32(12): 1130.
- [10] Valtencir Zucolotto, Andressa P A Pinto, et al. Biosensors and Bioelectronics, 2006, 21(7): 1320.
- [11] LI Hong (李 红). Dyestuffs and Coloration (染料与染色), 2007, 44(6): 43.
- [12] Chiu Minghung, Shih Chihhsien, Chi Minghsin. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 123(2): 1120.
- [13] Wang Shinnfwu, Chiu Minghung, Hsu Jincherng, et al. Optics Communications, 2005, 253(4-6): 283.
- [14] LIU Zuo-hua, LIU Ren-long, MOU Tian-ming (刘作华, 刘仁龙, 牟天明). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2008, 28(8): 1900.
- [15] WANG Dong-li (王东立). Hebei Chemical Engineering and Industry (河北化工), 2007, 30(6): 77.
- [16] XIAO Xue-feng, LI Mingou, LIU Rong-fang (肖秀峰, 李明欧, 刘榕芳). Rare Metal Materials and Engineering (稀有金属材料与工程), 2008, 37(7): 1245.
- [17] SHEN Hua-li, XU Chong-feng, HUANG Zhen-yu (申华莉, 许崇峰, 黄珍玉). Chinese Journal of Analytical Chemistry (分析化学), 2003, 31(6): 755.
- [18] Wang H, Yip C T, Cheung K Y. Applied Physics Letters, 2006, 89(2): 23508.

[19] Nikitenko S I, Venault L, Moisy Ph. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2004, 11(3-4): 139.

Monitoring the Sewage Degradation by Analyzing Optic Fiber SPR Spectrum Character

ZHANG Xiao-li¹, LIANG Da-kai^{1*}, ZENG Jie¹, ZHAO Zhi-yuan¹, ZENG Jian-min²

1. The Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metals and Materials, Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract The working principle of the optic fiber SPR sensor was discussed in the present paper at first. The feasibility of using it to monitor the degradation process of the environmental sewage represented by the methyl orange was studied. Finally, the optic fiber SPR sensor was adopted to monitor the change in degradation concentration represented by the original methyl orange solution on the base of 50 mL initial concentration $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the optic fiber SPR spectrum character of degradation process was analyzed in detail. Meanwhile the UV spectrophotometer was used to measure the change in concentration in the course of the degradation. The measurement data were analyzed and compared at large. The research work indicates that both the methods have consistent results, as the degradation time increases, the absorbance and concentration of the environmental sewage represented by the methyl orange solution decrease by and by, and the resonant wavelength of the optic fiber SPR sensor blue shifts step by step, as compared to the original standardization methyl orange solution resonant spectrum. It was shown that the methyl orange solution was degraded, and the rate of degradation was up to about 73 percent within two hours. The comparative results illustrate that it is feasible to use the optic fiber SPR sensor to monitor the environmental sewage degradation. The research result not only provides a new monitoring method for the degradation process of the environmental sewage, but also promotes the technique of the SPR sensor combined to the environment monitor by a long way.

Keywords SPR spectrum analysis; Surface plasma wave; Optic fiber sensor; Sewage degradation monitoring

(Received Jan. 29, 2009; accepted May 2, 2009)

*Corresponding author

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 Xiadi 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^[13], 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, 且配备恰当的数据

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

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_0 变为 λ ,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]

$$\Delta\lambda = \lambda_0[(1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T], \quad (1)$$

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

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - P_e)\varepsilon \quad (2)$$

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。

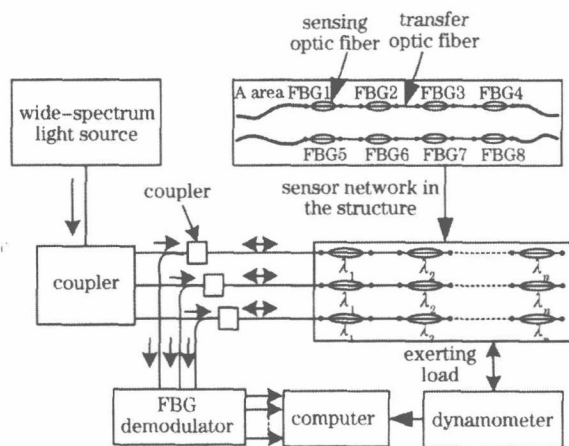


图 1 试验系统装置图

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。因此首先需要通过试验获得 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。

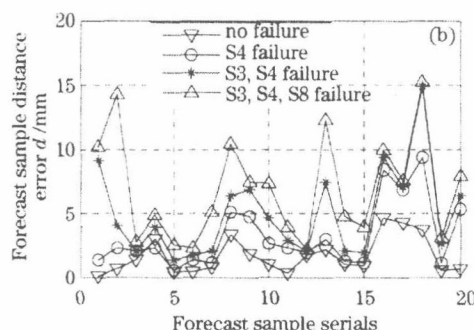
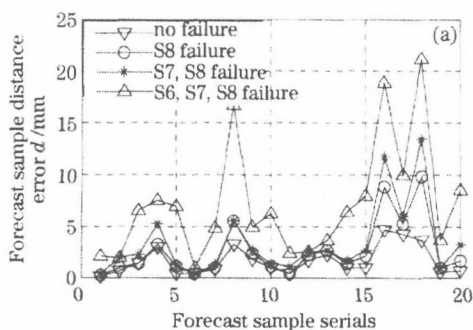


图 2 不同的传感器故障形式对载荷位置预测精度的影响

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^[6]。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

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。

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

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

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

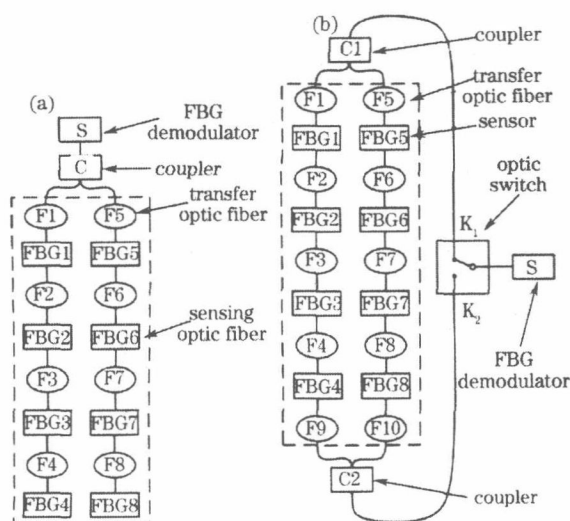


图3 FBG传感器网络简化图。(a) 传统

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%。

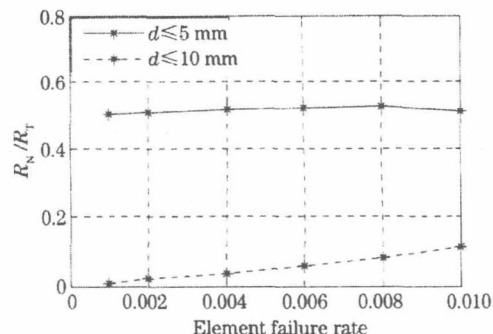


图4 新型网络失效率与传统网络失效率的比值随单个元件失效率的变化趋势

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。研究结果表明,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

- 1 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): 727731
- 2 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): 727731
- 3 Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 629631
- 4 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): 629631
- 5 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): 5357
- 6 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): 5357