

文章编号: 1000-6893(2001) 04-0326-04

应用于智能结构的光纤传感新技术研究

黄民双, 梁大开, 袁慎芳, 陶宝祺

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

RESEARCH ON NOVEL FIBER OPTIC SENSING TECHNOLOGY IN THE APPLICATION OF SMART STRUCTURES

HUANG Min-shuang, LIANG Da-kai, YUAN Shen-fang, TAO Bao-qi

(The Key Laboratory for Smart Materials & Structures, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 介绍了研制成功的几种适合于埋入复合材料结构内的光纤应变传感器, 并将所研制的新型光纤传感器在载荷自诊断智能结构、复合材料梁振动试件上进行了试验, 效果良好。

关键词: 光纤传感器; 应变传感器; F-P 干涉; 激光自混合干涉; 智能结构

中图分类号: V 257 文献标识码: A

Abstract: Several fiber optic strain sensors embedded in the structure for composite material were given in this paper and all of them were used in the structure test for load-diagnosis and vibration for the composite material beam. The result shows that these sensors have good performance.

Key words: smart structures; composite material beam; fiber optic sensor; strain sensor; F-P interferometer; self-mixing laser diode interferometer

智能结构具有巨大应用前景。在国防领域, 智能结构适应了航空航天技术的需求, 不仅可增强结构的功能, 优化结构形式, 减轻重量, 提高生存能力。更重要的是它能促使飞行器制造、维护等观念的更新。

光纤传感器对于智能结构的实现意义重大, 传感器是关系到结构功能好坏的关键之一。光纤传感器由于具有电绝缘、耐腐蚀、能在强电磁干扰等条件下工作等独特的优点, 是智能结构中应用最多的传感器^[1,2]。美国已将基于光纤传感器的智能结构技术在 F-18, F-22, JSF 等战斗机、X-33 航天飞机、DALTA II 火箭上进行了初步应用研究。欧洲在联合研制的 Eurofight 2000 新型战斗机上亦采用了基于光纤传感器的结构健康监测技术。上述研究虽取得了令人鼓舞的进展, 但同时也揭示了目前仍存在的问题, 例如光纤传感器光路复杂, 光学器件体积大, 构成的传感器难于埋入飞行器结构、传感器自身的灵敏度、稳定性、精确度还有待提高, 光纤传感器在埋入结构及结构生产

过程中易损坏、光学性能变化规律不清等等。如果能够很好地解决上述问题, 不仅可以扩大光纤传感器本身在国防领域的应用, 更重要的是可以将智能结构实用化, 开拓其在民用领域的应用前景。

1 基于光纤端面镀膜的几种光纤传感器研究

对于应用于智能结构中的光纤应变传感器应该满足以下 4 个方面的要求: (1) 传感探头结构灵巧, 易于埋入材料或结构内; (2) 灵敏度高, 能感受到诸如碳纤维、环氧玻璃纤维等复合材料的微小应变; (3) 原理简单可靠, 信号容易探测; (4) 价格适中。

根据上述要求, 笔者通过解决在单根光纤端面磨平抛光及镀电介质膜等一系列相关的技术难题后, 成功地研制出了几种性能优良干涉型光纤应变传感器。

1.1 外腔式 Fabry-Perot 光纤应变传感器

外腔式 Fabry-Perot 干涉 (EFPI) 光纤应变传感器近年来被作为智能材料结构中的重要传感器进行了大量的研究报道^[3~9], 在这里, 在组成 EFPI 腔的 2 个光纤端面上, 不是直接利用光纤端

收稿日期: 2000-05-29; 修订日期: 2001-02-05

基金项目: 国家自然科学基金 (19872034)、航空科学基金 (99152082) 资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2001/04/0326/>

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

面本身的菲涅尔反射,而是在这2个端面上进行了磨平抛光处理后,采用真空镀膜法镀上一层反射率为70%的电介质膜,这样,光纤中的散射光和光纤中的其它菲涅尔反射光的影响就可忽略,从而显著提高了EFPI光纤传感器的信噪比和灵敏度,使得光路和信号探测处理系统简单、可靠。

图1为EFPI传感器的结构。单膜光纤作为输入-输出光纤,多模光纤作为反射镜。2根光纤分别放入1个空心管中,于是在2根光纤的平行端面间就形成了F-P腔。为了减小反射光的干扰,多模光纤的另一端浸在折射率匹配液里。激光通过1个3dB耦合器耦合入EFPI。一部分光在单膜光纤的镀膜一端(R_1)反射,另一部分透射光,在多模光纤的镀膜一端(R_2)反射。这2束反射光在单膜光纤内干涉,然后通过3dB的耦合器入射到探测器。若将探头埋入结构(材料)内,或者将其贴付于结构表面,其结构的应变将使得空心管被拉伸或压缩,引起F-P腔长 S 变化,从而导致干涉条纹发生移动,移动的条纹数的多少就表示腔长 S 变化的大小。

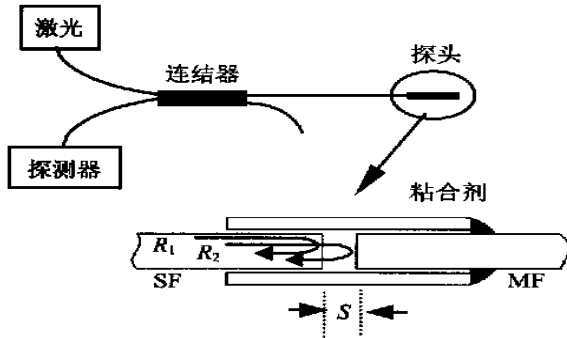


图1 EFPI传感器探头结构

Fig.1 EFPI sensor structure

1.2 自混合激光干涉全光纤传感技术的研究

近年来,半导体激光器(LD)自混合干涉方法引起了人们的广泛的注意,这是因为该方法简单、元件少、稳定性好。在自混合干涉结构中,从LD光源发出的光的一部分被外部反射镜反馈到激光器的谐振腔中,这部分反馈光和谐振腔中的光相混合并调制激光器的输出功率,由于外部光反馈的存在改变了激光器结构,只有满足新的外腔谐振激发条件的光子才能产生输出光,无论反射距离多远。其他的光子没有参与这个过程,作为激发过程选择的结果,被滤掉而对输出没有贡献,利用激光器壳体后部的光电探测器或外部光电探测器监测到输出功率变化。外部谐振腔长度的变化,将

导致激光输出功率的变化。因为强度调制同传统的干涉相似,也被称为“自混合干涉”。

图2为依靠光纤镀膜端面构成的自混合激光干涉全光纤传感器原理图。与现有的LD自混合干涉传感器^[10-14]不同之处在于:用1根一端镀膜的光纤代替反射镜,其整个光纤均为敏感段,很显然,该传感器适合于埋入结构(材料)内。

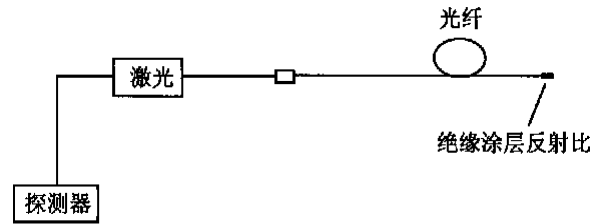


图2 自混合激光干涉全光纤传感器

Fig.2 Self-mixing interference inside a laser diode

LD激光器发出的光入射到光纤,激光在光纤的镀膜端面反射,又返回到激光器并与激光器谐振腔中的光混合干涉。如光纤上有扰动信号存在,返回的光信号将发生变化,激光器壳体后部的光电探测器的输出也将发生变化。通过检测这一信号,就可以得到要测的扰动信号。

1.3 外接光纤的机敏结构光纤传感器研究

由于碳纤维等复合材料在制作过程中,要进行高温处理,这将对已被埋入的光纤传感器造成损伤。同时,由于光纤传感器应用于结构必须将光源引入及信号取出,所以必须将光纤引出到结构外。目前因光纤在智能结构的制作中常常会出现断裂,致使结构内的光纤传感器报废,影响使用,也增加成本。为解决这一问题,笔者突破了传统的将光纤传感器埋入结构内的概念,提出了一种新的方案:即先将光纤埋入复合材料结构中固化成型,结构完成后,选择完好的光纤,在外部接上一端已镀膜的光纤,这样就形成了光纤传感器的敏感臂,此时,这根光纤全部为传感器的敏感臂,可以输出沿光纤的平均应变。该技术对于光纤传感器在智能结构中的应用具有十分重要的作用。

2 光纤传感技术在智能结构中的应用

2.1 在平板智能结构中的应用实验研究

以光纤传感技术为首选的自诊断网络是实现结构智能功能的基础,而平板是一种常见的构件形式。所以,在本项目中,将研制的光纤传感技术应用到这种结构构成了光纤智能复合材料结构系

统,对结构中的应变进行实时监测。为验证所研制的光纤传感器在智能复合材料结构中的可应用性,建立了一套基于各种传感器的光纤智能复合材料结构系统,系统组成如图3所示。复合材料结构采用环氧玻璃纤维平板结构,长×宽×厚=850mm×850mm×5mm,4边通过16颗螺钉固定在刚性支座上。2只外腔式F-P光纤传感器和2只自混合激光干涉全光纤传感器埋入复合材料结构,用于对复合材料结构不同位置的应变进行监测,传感数据由计算机数据采集系统采集,经数据处理软件处理,指示应变的大小。同时所采集的数据经处理软件及人工神经网络处理及识别,可指示载荷的作用位置。经过实验表明所研制的光纤传感器埋入方便、性能稳定、灵敏度高,完全适用于光纤智能复合材料结构。

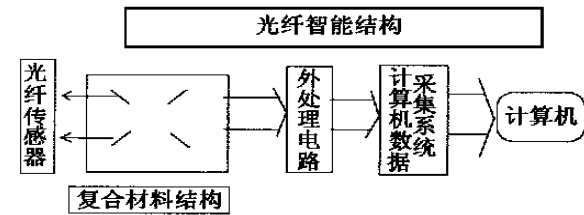


图3 光纤智能结构实验系统

Fig. 3 Experimental system to smart structure of optical fiber

2.2 在复合材料梁振动测试中的实验研究

光纤传感器完全可以在动态测试中应用。在本项目中,将研制的光纤传感器粘贴在一由激振器激振的梁上进行了动态试验,并和采用应变片测量的测试结果进行了对比,图4为系统原理图。应变片同光纤传感器分别粘贴在梁的上下表面上的相同位置,以保证它们测试对象的一致性。应变片测得的信号接入动态应变仪,给出测试结果。对比实验表明,30mm标距的EFPI传感器测试的

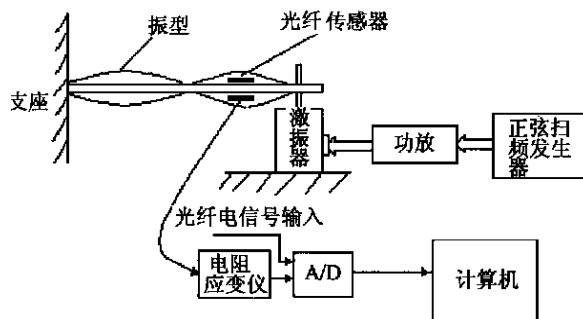


图4 动态测试系统原理图

分辨率为每个波对应 $20\mu\epsilon$,因此光纤传感器对绝对位移的测量值是 $0.6\mu\text{m}$,该结果与理论计算值 $0.65\mu\text{m}$ 是相当吻合的。

复合材料梁振动时光纤传感器输出的波形如图5所示,与文献[12]中采用反射镜所获得的结果完全一致。

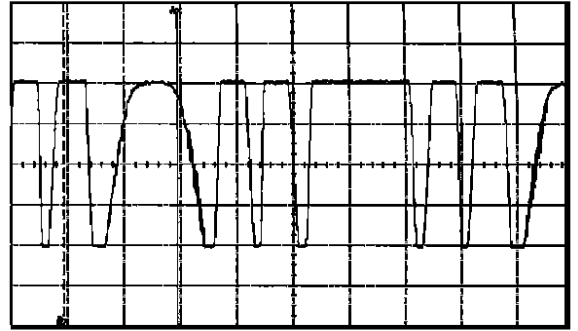


图5 复合材料梁振动时光纤传感器输出的波形

Fig. 5 Output wave as compounded-material girders

3 结束语

本项目所研制的光纤传感器结构灵巧简单、灵敏度高、稳定性好、抗干扰能力强,完全能满足工程实际的要求;F-P光纤传感器和自混合激光干涉全光纤传感器的位移灵敏度为 $0.6\mu\text{m}$,位移测量范围为 $\pm 100\mu\text{m}$,长时间工作稳定可靠,由于LD输出功率为几个 μW ,整个传感器系统消耗的功率很小,将所研制的新型光纤传感器埋入复合材料方板构件及复合材料梁振动试件上进行了应用研究,表明所研制的光纤传感器易埋入、工作稳定可靠。所研制的传感器系统调试方便,还可以同时在线观测多路(1~8路)传感器信号输出。

参考文献

- [1] Measres R M. Smart structures with nerves of glass[J]. PROG Aerospace Sci, 1989, 26: 289- 351.
- [2] 黄民双, 曾励, 黄尚廉, 等. 分布式光张布里渊散射应变传感器参数计算[J]. 航空学报, 1999, 20(2): 137- 140.
- [3] HUANG M in-shuang, LIANG Da-kai, QIU Hao, et al. Development of extrinsic Fabry-Perot fiber sensor and its application to smart materials[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 17(1): 15- 19.
- [4] Zhao Wei, Wang Jun, Wang Anbo, et al. Geometric analyses of optical fiber EFPI sensor performance [J]. Smart Mater. Structure, 1998, 7(7): 907- 910.
- [5] Murphy K A, Bhatia V, Claus R O, et al. Multiplexed extrinsic Fabry-Perot interferometers and applications [J]. SPIE, 1995, 2507: 2- 13.
- [6] Nau G M, Sudarshanam V S, Claus R O. Static strain

sensitivity optimization of fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric strain gage[J]. 1993, 1918: 248- 255.

- [7] Murphy K A, Michael F, *et al.* Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. Opt Lett, 1991, 16(4): 273- 275.
- [8] Yoshino T, Kurosawa K, Itoh K, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, QE-18(10): 1624 - 1633.
- [9] Anbo Wang, Mark S M, David S, *et al.* Advances in the extrinsic Fabry-Perot interferometer optical fiber sensors [J]. SPIE, 1992, 1798: 32- 36.
- [10] Suzuki T, Hirabayashi S, Sasaki O, *et al.* Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer [J]. Optical Engineering 1999, 38(3): 543- 548.
- [11] Bosch T, Servagent N, Gouaux F, *et al.* The self-mixing interference inside a laser diode: application for displacement[J]. SPIE, 1997, 3478: 98- 108.
- [12] Wang W M, Grattan K T V, Boyle W J O, *et al.* Active optical feedback in a dual-diode laser configuration to

displacement self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[J]. App Opt, 1994, 30(10): 1795- 1801.

- [13] Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V, *et al.* Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[J]. App Opt, 1993, 32(9): 1551- 1558.
- [14] Hauptmann M A, Grattan K T V, Palmer A W, *et al.* Silicon resonator sensor systems using self-mixing interferometer Sensors and Actuators[J]. Physical, 1996, 55(2-3): 71- 77.

作者简介:



黄民双(1964-) 男, 湖南省郴州市人, 1995年12月获重庆大学精密仪器及机械专业博士学位, 现任北京工业大学激光工程研究院副教授, 主要研究方向: 光电仪器、医疗仪器、光纤传感与智能结构、测试计量技术及仪器等。

最新出版 科技读物

航空精英——世界著名航空设计师和飞行员》 航天精英——世界著名航天科学家和宇航员》 已出版发行

为纪念航空诞生100周年, 中国航空工业部创建50周年及航天诞生100周年, 由原航空工业总公司策划并组织编写, 周士林主编, 由航空工业出版社出版了这两本传记形式的科技读物。

这两部书从航空航天100年科技发展的高度, 扼要介绍了最具代表性的航空和航天人物的发明、发现及其辉煌业绩和作用, 正文中精选了若干精美的插图、照片和名言, 各项内容融为一体, 生动活泼、图文并茂。其中《航空精英——世界著名航空设计师和飞行员》, 44万字, 选编了85位航空人物(外国64位, 中国21位), 定价36元。《航天精英——世界著名航天科学家和宇航员》, 20元。凡订购图书均由出版社挂号邮寄至订户指定地点。如订购数量大, 将享受优惠价格。

预购联系人: 罗中明, 通信地址: 北京9817信箱, 航空工业出版社, 邮政编码: 100029, 联系电话: 010-64922211-341

(李铁柏)