

# 光纤光栅在航空结构健康监测中的应用前景

## Application of Optical Fiber Grating in Health Monitoring for Aircraft Structure

中航工业北京长城计量测试技术研究所 薛景锋 宋 昊 王文娟



薛景锋

高级工程师、硕士生导师，中航工业北京长城计量测试技术研究所光纤传感技术中心主任。1995年毕业于浙江大学机械工程专业，2005年在北京航空航天大学获得控制工程硕士学位，目前正在北京理工大学仪器科学与技术专业攻读博士学位。

光纤光栅传感作为一门快速发展的新型传感技术，具有精度高、体积小、重量轻、波分复用、寿命长、可靠性高、耐腐蚀、传输距离长等优点，可实现应力应变、温度、力、加速度等多种参量的测量，在飞机、舰船、发动

机光纤光栅传感作为一门快速发展的新型传感技术，具有精度高、体积小、重量轻、波分复用、寿命长、可靠性高、耐腐蚀、传输距离长等优点，可实现应力应变、温度、力、加速度等多种参量的测量，在飞机、舰船、发动机等重大装备的机载化测试以及地面综合测试中具有重大的应用前景，基于光的测量正在逐步成为航空试验测试技术发展的重要趋势。

机等重大装备的机载化测试以及地面综合测试中具有重大的应用前景，基于光的测量正在逐步成为航空试验测试技术发展的重要趋势。

光纤光栅是一种对应变及温度敏感的传感元件，可实现单根光纤对几十个应变节点的测量。基于光纤光栅传感原理的应变测量技术突破了传统电阻应变片布线复杂、疲劳寿命短、抗电磁干扰能力差、无法实现复合材料内部埋植等不足，对光纤光栅采用不同的封装方法，可形成光纤应变传感器、光纤温度传感器和力传感器等，从而为航空结构状态监测提供极具发展前途的测量新技术。

对于光纤光栅的应用，国内外开

展了大量研究工作，针对航空结构健康监测的相关研究也在逐步展开，本文主要结合航空相关应用研究展开讨论。

### 光纤光栅传感器的工作原理和技术特点

#### 1 光纤光栅传感器测量原理

当宽带入射光通过光纤光栅时，一部分窄带光被反射回去，回光的中心波长取决于光纤光栅的栅距，光纤光栅的栅距因机械应力或热应力而改变，因此通过对回光中心波长的检测就可获知被测点的应力和温度信息，若进行其他参量的测量时，需要将测量的变化转化为光纤光栅的

应变或温度变化。

在刻制光纤光栅的过程中,因为相位掩膜板参数的调整,可形成多种不同中心波长的光纤光栅,将若干光纤光栅通过串、并联等方式连接在一起,组成分布式测量网络,如图1所示。由于回光由不同中心波长的窄

带简化系统布线,使结构更加轻便、测量可靠性更高。如果作为机载传感系统,则可以保证在增加很小重量的情况下,实现多点结构应变监测,该优势随着测量点的增加而明显。

(2) 抗电磁干扰能力强。

在电磁干扰环境下,对试验件动

次后,光纤光栅传感器仍没有出现劣化现象;通过加速老化试验认为光纤光栅存活寿命大于30年。

(4) 体积小,重量轻。

光纤光栅直径为一般为0.25mm,特殊制作可以达到0.15mm。由于其结构纤细,适用于多种特殊的应用场合,尤其适合于埋入材料内部形成智能材料或结构,在国内外的研究中,已经实现可内埋于复合材料内部的构想,并进行了相关验证试验。

## 国外研究现状

重点结合光纤光栅传感器、波长解调仪表和应用研究对国外的研究情况进行说明。

(1) 光纤光栅传感器。

光纤光栅在某种程度上讲,更像是一种敏感器件,为了能够实现更

方便、更准确、更可靠的测量,往往要进行一定形式的封装,从而形成各种光纤光栅传感器。光纤光栅与被测结构的物理结合是研究的关键,若胶涂于光纤光栅表面,其应力传递的效果将直接影响测量,传感器的研究重点正在于解决该问题。

使用中要求将光纤光栅牢固、均匀、稳定与被测参量耦合起来,因此在传感器封装和安装形式上进行了大量研究。

(2) 波长解调仪表。

20世纪90年代以来,国外提出多种光纤光栅传感解调方案,其中可调谐F-P腔滤波器和衍射光栅原理的解调技术越来越受到重视。

可调谐F-P腔滤波器方法是当前技术较为成熟、实用性较好的解调方法之一,可实现由多传感组成系统

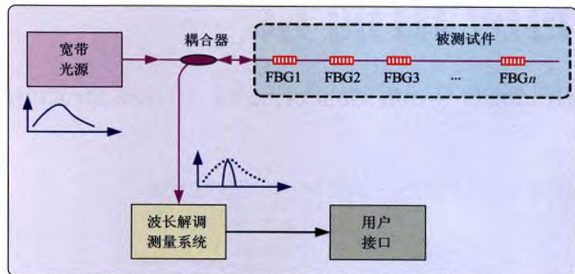


图1 波分复用的FBG传感器网络测量系统

带光组成,不同测点的测量信号可以相互区分,从而可以在一根光纤上形成多点测量(一般可以达到20~30点)。

FBG传感器网络测量系统由宽带光源、信号传输线(光纤或光缆)、FBG传感器网络、光纤耦合器以及波长解调测量系统组成,宽带光源将有一定带宽的光通过光纤耦合器入射到光纤光栅中,由于光纤光栅的波长选择性作用,符合条件的光就会被反射回来,再经由光纤耦合器送入解调装置测出光纤光栅的反射波长变化。

## 2 光纤光栅的技术特点

针对结构应变测量,与传统金属应变片进行比较,光纤光栅传感器具有多种显著的技术特点。

(1) 波分复用、大大提高测量效率。

单路光纤上可以制作多个光栅。一根光纤串接20只光纤光栅,为解决320点应变测量问题,只需16根光纤,而应变片则至少需要640根导线。因此,使用光纤光栅传感技术可以大

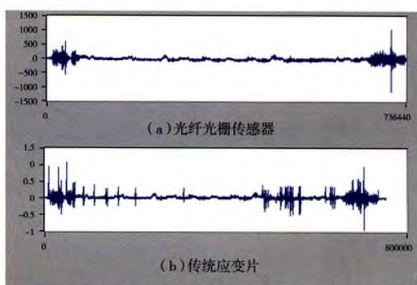


图2 动态加载下光纤光栅和应变片测得的应变数据比较

态加载时应变片测量数据与光纤光栅测量数据进行比较。图2(a)为光纤光栅测量结果,图2(b)为应变片测量结果,可以看出应变的测量结果有明显的干扰噪声和尖刺,而光纤光栅数据则非常平滑,若应用于状态监测系统,将大大提高数据分析质量、降低误判率。

(3) 寿命长,可靠性高,耐腐蚀。

国外将光纤光栅传感器埋入碳纤维复合材料进行应变测试,试验结果表明:在0~2000  $\mu\epsilon$  循环320000

的动态和静态测量,动态测量可以达到 2kHz 的测量速率。基于此方法的国外相关解调仪表主要以美国微光 (MOI) 公司的产品为代表。

基于衍射光栅的解调方法越来越引起人们的重视,该解调方法由光电探测阵列对入射光束一次成像而获得波长信息,无机械运动部件,因此解调频率在理论上只受到光电探测阵列读出速率的限制。美国 Bayspec 和丹麦 Ibsen 公司研制了相关技术和产品,最高采样频率可以达到 5kHz,但是当前尚未完全实现实时解调。

除了上述两种原理的波长效解调技术之外,国外研究机构和公司也广泛研究了其他波长效解调原理并形成相关产品,如美国 Blue Road Research 公司就推出一种基于啁啾光栅的解调系统,取样率可达 7kHz,并声称还可以更高,但这种解调系统只能解调一个光纤光栅,而且分辨率和精度尚待提高<sup>[1]</sup>。

目前,美欧等国都积极开展适合于军事应用的光纤光栅解调技术研究,其特点是更加便携,环境适应能力更强。

### (3) 光纤光栅应用研究。

美国的光纤传感器研究开始最早,投资最大,并把光纤传感器列为军备改造计划的 15 项重点之一,制定了专门的纤维光学传感器规划。美国 Luna 检测公司、Luna 能源公司和 Lockheed Martin 公司联合发展了光纤分布式传感系统,利用了光频域反射计来监测 P-3C 猎户座飞机结构的整体疲劳过程<sup>[2]</sup>。

美国军方于 20 世纪 90 年代初就提出了智能机翼的研究计划,以实现控制机翼的扭转和曲面,其中就使用了光纤光栅应变计。F/A18 飞机舱壁的全面疲劳试验采用了光纤传感器检测翼梁中的小量扭矩,以提高安全性和减少维护量。意大利的结构检测大规模研究开始于 1990 年前

后,开始的主要成就集中在就航空航天和大型的民用结构领域。

意大利米兰理工大学的航空航天工程系开展了很多针对于航空智能材料的研究,将光栅光纤传感器或者发射器埋入复合材料中,并且进行了成功的数值模拟。传感器/激发器/结构特性通过了国防与航天中心动力学分析检测,对埋入工艺进行了评估,考虑了力、热、化学的兼容性<sup>[3]</sup>。

2009 年 11 月,意大利的 Valentina Latini 等研究了一种基于耐高温 FBG 传感器和耐恶劣环境蓝宝石光纤的新型结构健康检测体系,工作温度可达 600℃,该传感器应变灵敏度可达 0.6  $\mu\epsilon$ ,应用于等离子风洞<sup>[4]</sup>。

Alenia Aeronautica 公司对结构健康检测的研究主要集中在传统传感器检测系统和光纤传感系统上。SMIST (Structural Monitoring with advanced Integrated Sensor Technologies) 是一个欧洲资助项目,由空中客车领导,主要集中在基于光纤光栅传感器技术的整体结构健康检测的研究。提出的技术被用于 C-27J “斯巴达人”运输机的实验室和空中检测研究,对利用光纤光栅传感器得到的微应变与利用硅基传感器的结果进行了比较,结果显示很理想。

日本是一个材料研究很发达的国家,从其材料研究的趋势可看出光纤光栅传感器的新应用领域和新发展方向。其中对于灵敏复合材料的健康监测研究,主要资助项目为 NEDO 和 RIMCOF,项目集中发展含有埋入发展的小直径光纤和光纤光栅传感器的飞机复合结构的结构健康监测技术,同时发展航空结构件的损伤检测系统。利用埋入小直径光纤传感器发展了实时监测冲击损伤系统,是东京大学与 Kawasaki 重工业合作的结果<sup>[5]</sup>。

## 国内研究现状

光纤光栅传感技术自产生以来,在国内受到广泛的关注和研究,特别是高校和研究机构在前沿技术的跟踪和探索方面进行了大量的研究工作,在工程应用领域,主要集中在土木结构、大型管路等民用领域,在航空应用的研究相对比较少,下面主要结合航空领域,在光纤光栅刻制、传感器封装、波长解调仪表和应用研究等方面的进展进行总结。

### (1) 光纤光栅刻制。

国内开展光纤光栅刻制的单位较多,包括研究所、高校和一些高科技公司。对光纤光栅长度,国内目前所能达到的刻制水平以 10mm 为主,超短光纤光栅的刻制尚在试验研究阶段。超短型光纤光栅对于复杂的航空结构监测非常关键,主要解决在小狭小空间和曲面上的安装,为了进行二维点应变测量,也迫切希望传感器尺寸尽量小。

### (2) 传感器封装。

国内的光纤光栅应变传感器主要面向建筑、土木工程、大坝等民用方面,开展此方面研究和工程应用单位比较多,结合航空应用,此类传感器尚存在如下不足:传感器体积和重量较大,不适合在飞机结构监测中使用;封装后传感器的工作温度范围较窄,不能满足机载环境温度要求。

为满足航空需求,中航工业计量所对光纤光栅应变传感器的小型化封装、安装和性能评价等光纤传感的关键技术进行了前期研究。在航空专用的光纤光栅传感器的研制方面,结合航空型号的实际测试,比较系统地开展了一些研究工作,研制出金属框架光纤应变传感器,可实现  $\pm 3000 \mu\epsilon$  的测量。

### (3) 波长解调仪表。

国内当前解调仪表主要是配合已经广泛应用的民用领域,主要是基



于FP腔式原理,针对民用领域的建筑结构大应变报警和疲劳监测等应用,仪表的体积重量都比较大,而且解调频率一般在几百赫兹以下,仪表工作温度范围主要在0~40℃,尚不能满足机载测试需要。

针对这一问题,中航工业计量所开展了机载光纤波长解调仪的研制,重点解决了小型化工作,如图3所示,工作温度范围可实现-20~60℃,



图3 F1220型光纤光栅解调仪

为实现机载测试打下比较好的基础。

#### (4) 航空应用情况。

目前国内多数研制生产光纤光栅传感器的单位主要针对民用,服务于电力、土木、石化、钢铁等行业,在

测试环境特殊、测试精度和可靠性要求很高的航空航天等军事领域,中航工业计量所与主机单位、综合试验单位和相关专业所联合研究团队主要开展了光纤光栅传感器在多个飞机型号的应用研究,如某型机全机疲劳试验的应变监测、某型机复合材料应用验证、某型无人机液压导管脉动应力测量、飞机PHM光纤光栅应变载荷监测技术攻关等项目,获得了比较丰富的工程应用经验,目前正在积极探索发动机领域的应用研究。

根据型号应用,得到如下结论:将光纤光栅用于飞机结构应变监测是可行的,与传统电阻应变片相比,光纤光栅的环境适应性更强、信号质量更优,尤其对在强电磁环境下和恶劣腐蚀环境下使用的飞机结构应变测量具有不可替代的优势;既可以实时获得可靠的应变数据,又能够对其附近结构的裂纹状态进行有效判断,较应变片的监测结果虚警率更低、更为准确。

目前也开始可对复合材料内埋的研究,图4为将光纤光栅埋入标准复合材料试件及其测试数据,通过图4(b)可以看出,光纤光栅埋入后,材料内部具有上万微应变的测量范围以及非常好的测量线性度,同样对标准复合材料试件的力学性能进行

测试,尚未发现性能下降。

在应用研究中,既证实了光纤传感测量系统在武器结构健康监测中的技术优势和应用前景,也发现了很多应用中的难题及瓶颈技术,如小型化、超大应变光纤光栅;光纤光栅传感器的封装、安装以及在飞机上的集成应用技术;机载高速解调仪表研制等,为下一步研究指明了方向。

#### (5) 与国外研究差距。

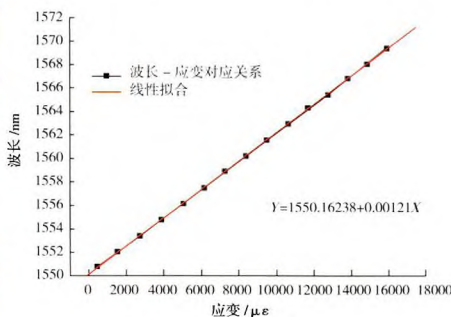
国外已经将光纤光栅传感技术比较广泛地应用到军事、民用方面,在军事应用方面,不仅限于航空武器,也包括在舰船、核设施等方面。我国对光纤光栅传感技术的研究集中在建筑、石油、电力、钢铁等民用领域,在军事领域的研究刚刚起步。从应用的深度来看,国外将光纤光栅传感器已经用于一些比较关键的测试,不仅在金属结构表面安装,也成功在复合材料内部埋植,形成了一些很特殊的服务能力。在光纤光栅技术的各方面,如光纤光栅刻制、传感器封装和安装及信号解调等,都形成了显著的技术优势。与国外相比,需要加快光纤光栅在航空结构健康方面的应用研究以及核心单元模块技术的研究。

### 应用前景设想

#### (1) 用于飞行载荷测试。



(a) 标准试件



(b) 测试数据

图4 光纤光栅埋植于复合材料标准试件及测试数据

飞行载荷测试对于飞机设计验证和改进具有重大意义。传统的测量方式采用金属应变片进行测量,如果实施上万点的应变测试,测试设备本身的重量可以达到几吨,复杂的布线不仅大大增加重量,还要求对飞机进行较大程度的改装,增加了施工难度,延长了测试周期。由于飞机状态的变化,对试验验证效果以及真实载荷数据获取都产生了不利影响。

到目前为止,我国尚未出现机载状态下对飞机载荷进行长期监测(一个大修周期以上)的应用案例,主要原因在于传统应变测量方式系统资源占用过多、使用寿命有限、机载电磁环境下抗干扰能力差,光纤光栅传感技术的出现将十分有助于解决航空结构飞行载荷长期监测的技术难题。

#### (2) 用于结构疲劳和寿命监测。

结构应变是军用飞机结构安全和可靠性监测的关键指标。在飞行过程中对结构关键部位进行在线监测,可获得长期飞行的结构应变数据,据此评估飞机机体结构潜在的损伤增长,可由传统的定期维修向更加经济可靠的视情维修转变,并为单机管理和监控提供技术支撑。对结构应变数据的实时监测同样可以为安全报警提供重要的依据,提前探知可能存在的危险。我国当前有大量二代机和三代机在役,为保证飞机的飞行安全,掌握飞机运行状态,要求对飞机关键部位的应变进行记录分析,光纤光栅传感器有望成为实现这一目标的关键传感技术。

#### (3) 用于复合材料监测。

复合材料的使用是新一代飞机设计的趋势,其所占机体结构重量的比例已经成为衡量飞机先进性的重要标志之一,对复合材料结构的健康监测已经成为新一代飞机研制急需解决的重要课题。在对复合材料健康状态的监测过程中,结构应变和冲击载荷监测是一个重要的方面。光

纤光栅传感器可粘贴于复合材料表面(如机身、机翼蒙皮处)或者埋入其内部,构成分布式智能传感网络,实时监测飞行器的应力、应变情况,为健康状态的判别提供重要依据。对将应变传感器埋入复合材料内部,传统金属应变片几乎不可能,而光纤光栅具有纤细的结构,国外已经成功埋入复合材料内部。在复合材料结构上实施应变监测,重大的难题是电磁干扰的影响,采用光纤光栅传感器可以有效克服该难题。

#### (4) 用于发动机结构状态监测。

发动机研制过程中的部件级测试、地面综合试验、机载测试试验以及飞行状态下的长期监控重点关注的参数包括压力、温度、流量、应变、振动、气体成分等。发动机测试的特点体现在如下几个方面:环境严酷,特别是温度、振动及电磁环境,要求测试系统具有非常好的环境适应性和长期可靠性;被测结构复杂,不便安装,要求传感器必须灵巧、量程大、精度高;另外,需要测量的测点多、种类多。光纤传感技术是一种新型的传感技术,具有体积小、抗电磁干扰、容易实现分布式传感网络、成本低、可靠性好、周期长等优点,将在发动机测试中拥有广阔的应用前景。

### 走向航空应用迫切需要解决的问题

在光纤光栅刻制方面,需要解决高抗拉强度、耐高温光纤光栅串的刻制难题,提高光纤光栅品质一致性,为更好解决在复合材料中的应用问题,需研究更细、抗弯半径更小的光纤光栅。在光纤光栅传感器封装安装方面,尽快解决小型光纤应变花的封装问题,通过改结构、改基底材料和安装胶,提高传感器在不同结构材料的安装适应能力,解决长期安装有效的耐久性和可靠性测试。

光纤传感器的发展正在朝高速

度、高可靠、多参量、高集成、网络化的方向发展,对于光波解调系统,要求发展具有自主知识产权的核心解调光电器件和模块,提高解调系统的速度和测量精度,高度集成化设计以实现微型化。高速光纤波长效解调系统是所有光纤传感器的数据采集和运算分析平台,解调系统的精度、速度、范围以及耐受环境能力直接关系到光纤传感器在航空上应用的可行性和应用深度,应针对航空测量特点,重点突破速度、带宽、小型化及多通道测量网络实现技术,满足航空发动机地面和机载测试需要。

光纤传感作为一种新型传感技术,面对航空应用的复杂环境,保障数据准确可靠成为应用的关键环节,对于无法反复拆装的光纤传感器的数据准确性评价成为校准的难点,如光纤应变传感器,需要对此类传感器研究安装前校准、安装后校准、安装一致性评价以及现场校准,解决温度补偿难题。急需开展以型号测试为背景的综合应用研究,发现问题,通过改进不断提高技术成熟度。

### 参考文献

- [1] Friebele P. Fibre bragg grating strain sensors: present and future applications in smart structures. *Optics and Photonics News*, 2008, 9:33-37.
- [2] Duncan R G, Gifford D K, Chiders B A, et al. A distributed sensing technique for aerospace applications. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2004: 1-8.
- [3] Turner A. Italians take fibre-optic approach to health monitoring. *Flight Test International*, 2008.
- [4] Chehura E, James S W, Lawson N, et al. Pressure measurements on aircraft wing using phase-shifted fibre Bragg grating sensors. *Proc of SPIE* 2009, 7503(750334): 1-4.
- [5] Aoki T, Yokozeki T. Some of the topics in composites research projects in Japan. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, 2009: 1-20. (责编 良展)