

学科门类：工 学  
中图分类号：TP212.14

单位代码：10287  
密 级：公 开

博 士 学 位 论 文

# 三维编织复合材料性能及工艺的 光纤测试技术研究

博士生姓名 黄 睿

一级学科 仪 器 科 学 与 技 术

学科、专业 测试计量技术及仪器

研究方向 计算机测控及光纤传感

指导教师 陶 宝 祺 院 士

袁 慎 芳 教 授

南 京 航 空 航 天 大 学

二 〇 〇 二 年 四 月

学科门类: 工学  
中图分类号: TP212.14

单位代码: 10287  
密 级: 公 开

## 博 士 学 位 论 文

# 三维编织复合材料性能及工艺的 光纤测试技术研究

博士生姓名 黄 睿  
一级学科 仪器科学与技术  
学科、专业 测试计量技术及仪器  
研究方向 计算机测控及光纤传感  
指导教师 陶宝祺 院士  
袁慎芳 教授

南京航空航天大学

二〇〇二年四月

A Dissertation for Doctorate of Engineering

**Research on Performances & Technics of 3D Braided Composites**

**Based on Optical Fiber Measurement & Testing Technology**

Prepared by

**Rui Huang**

Under the Guidance of

**Chinese Academician Prof. Baoqi Tao**

**& Prof. Shenfang Yuan**

The Aeronautical Key Lab for Smart Materials & Structures

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics

April, 2002

## 摘 要

作为先进复合材料的一种,三维编织复合材料由于克服了层合复合材料层间脆弱的缺点,同时具有优异的整体性能和较高的强度、刚度、良好的抗冲击性能等优点,在航空航天等很多领域的应用日益广泛。但由于其编织工艺和固化成型工艺比较复杂,人们对它的认识还远远不够。目前对编织复合材料结构的健康状况、固化工艺的监测等相关研究还很少。

本文探索采用光纤传感技术对三维碳纤维/环氧编织复合材料性能和工艺进行了测试研究。主要研究内容如下:

1 对三维编织工艺进行了研究,提出光纤传感器编入编织复合材料的两种方法以及光纤的保护措施。采用四步法成功地将光纤传感器编入复合材料试件。随后研究了编织复合材料的固化成型工艺:树脂传递模塑(RTM)工艺。设计了含光纤编织试件的 RTM 固化成型系统,并成功地研制出编入光纤传感器的编织复合材料试件。

2 对编入材料的光纤与编织复合材料的相容性进行了研究。将光纤编入编织复合材料中,对光纤的截止波长、数值孔径、模场直径和串音进行了检测。实验结果表明这些光学性能参数在光纤编入编织复合材料试件后以及固化成型后变化较小。研究了光纤对编织复合材料性能的影响。对编入光纤试件和无光纤试件进行拉伸和压缩对比试验。结果表明光纤的编入对材料的拉伸弹性模量和压缩弹性模量影响也较小。当光纤及保护套管占的体积比约为 1%时,拉伸弹性模量下降的幅度约为 6%;压缩弹性模量下降的幅度约为 6.7%。另外对光纤传感器的安装和引出设计也进行了研究。

3 研究了光纤传感技术在编织复合材料内部应变检测中的应用。用射线理论分析了光线在梯度光纤和阶跃光纤中的传播机理。并用模式理论讨论了光纤波导的标量分析和矢量分析。分析了偏振式、法布里-珀罗干涉型和微弯式光纤传感器的原理,并通过实验研究了它们在编织复合材料内部应变检测中的应用。实验结果表明编入编织复合材料的光纤传感器可以检测出材料内部的应变。这种方法对深入研究编织复合材料结构的性能、内部损伤的检测以及健康状况的监控具有重要价值。

4 研究了碳密封涂覆光纤在编织复合材料中的应用。碳密封涂覆光纤具有强度高、抗疲劳性能高等许多优点。从实验中也发现,在编织复合材料中使用碳密封涂覆光纤具有良好的传感效果。

5 研究了使用编入材料内部的光纤微弯传感器对编织复合材料 RTM 固化工艺进行监测。实验结果表明光纤微弯传感器可以监测树脂粘度的变化,并给出树脂粘度最低点以及固化结束点。内部微弯式光纤传感器可以对编织复合材料的 RTM 成型工艺

进行监测。

本文的主要创新点：

- 1 首次提出光纤编入编织复合材料的方法，成功制作了编入光纤传感器的复合材料试件。
- 2 首次对编入材料的光纤与编织复合材料的相容性进行了研究。
- 3 首次采用偏振式、干涉型和微弯式光纤传感器对编织复合材料的内部应变进行了检测。
- 4 首次采用微弯式光纤传感器对编织复合材料的 RTM 工艺进行了监测。
- 5 首次研究了碳密封涂覆光纤在编织复合材料中的应用。

关键词： 光纤传感器，测试技术，三维编织，复合材料，应变检测，固化工艺监测，树脂传递模塑

## ABSTRACT

As one kind of advanced materials, 3D braided composites are used widely in many fields, such as aeronautics & astronautics, because of their high strength, stiffness and good resistance to impact. However, due to their complicated braiding and cure processes, knowledge about them is far from enough. Research of health monitoring and cure monitoring about braided composite are quite little.

In this dissertation, internal strain and cure process of braided composites are studied using optical fiber sensing technology. The contents are as follows:

1. Based on study of 3D braiding process, two methods for optical fiber braiding and protecting are presented. Optical fibers are successfully braided into composite testpieces by four-step method. Cure process of braided composites is also studied. Resin Transfer Molding (RTM) cure system is designed. Testpieces with braided optical fibers are successfully fabricated.
2. Compatibility of optical fiber and braided composites is studied. Cut-off wavelength, mode field diameter, numerical aperture and cross talk are chosen as test parameters of optical fibers. Research of those parameters shows that they change just a little before, after optical fiber's being braided into the structures, and after the molding process. Contrast tests are also done to compare performances of testpiece with optical fiber with that of one without optical fiber. Tensional and compressive elastic moduli are researched. Results show that co-braided optical fibers have just a small quantity of effect on the elastic modulus of the braided composites. If volume ratio of optical fibers and their jackets to the braided testpiece is about one per cent, the tensional and compressive elastic moduli will decrease respectively by six and six point seven per cent. The fixing and lead-out design of optical fiber sensor are also studied.
3. Optical fiber sensing technology is applied in internal strain measurement of braided composites. First, transmission mechanism of light wave in graded index fiber and step

index fiber is analyzed using ray method. Scalar analysis and vector analysis are discussed using mode method. Mechanism of polarized, interferential and microbend optical fiber sensor is analyzed. Applications of these sensors in internal strain measurement of braided composites are experimentally studied. Results show that these sensors are effective for internal strain measurement. Method of internal parameter measurement based on co-braided optic fiber sensor is very valuable for further research to study structural features and monitor structural health condition.

4. The RTM cure process of braided composites is monitored using microbend fiber optic sensor. Experimental results show the sensor is able to monitor variation of resin viscosity and to indicate time that resin viscosity is lowest and cure ends.
5. Applications of optical fiber with carbon coating are also studied. This kind of optical fiber has advantages of high strength and antifatigue performance. Experimental results show that the optical fiber has good sensing features.

The original researches done in this dissertation are as follows:

1. The braiding and cure process for braided composites with monomode optical fiber are presented. Testpieces are successfully fabricated.
2. The compatibility between optical fibers and braided composites is studied
3. Internal strain of braided composites is measured by devising three kinds of optical fiber sensors. The sensors are polarimetric sensor, interferential sensor and microbend sensor.
4. The RTM process is monitored using co-braided microbend fiber optic sensor.
5. Applications of carbon hermetically coated optical fiber in braided composites are studied.

**Keywords:** optical fiber sensor, measurement and testing technology, three-dimensional braiding, composite, strain measurement, cure monitoring, resin transfer molding

## 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 摘要                      | I   |
| ABSTRACT                | III |
| 第一章 绪论                  | 1   |
| § 1.1 编织复合材料技术的发展概述     | 1   |
| § 1.2 光纤传感技术的发展概述       | 4   |
| § 1.3 光纤智能复合材料与结构       | 7   |
| 1.3.1 光纤智能复合材料与结构的产生    | 7   |
| 1.3.2 国内外研究发展概述         | 8   |
| § 1.4 本文的研究意义和内容        | 13  |
| 第二章 含光纤传感器编织复合材料的制造技术   | 15  |
| § 2.1 引言                | 15  |
| § 2.2 编织复合材料的编织原理       | 15  |
| § 2.3 编织复合材料的固化成型技术     | 17  |
| 2.3.1 概述                | 17  |
| 2.3.2 树脂传递模塑法           | 18  |
| § 2.4 光纤传感器编入复合材料的方法研究  | 22  |
| § 2.5 含光纤传感器试件的固化成型工艺研究 | 23  |
| § 2.6 本章小结              | 24  |
| 第三章 编入光纤与编织复合材料的相容性研究   | 26  |
| § 3.1 引言                | 26  |
| § 3.2 应用于编织复合材料的光纤及其特性  | 26  |
| 3.2.1 常用光纤的特性及分类        | 26  |
| 3.2.2 应用于编织复合材料的光纤      | 28  |
| § 3.3 编织工艺及固化工艺对光纤性能的影响 | 29  |
| 3.3.1 光纤性能参数的选择         | 29  |
| 3.3.2 光纤性能参数的测试原理及方法    | 31  |
| 3.3.3 性能参数的测试结果         | 35  |
| 3.3.4 测试结果分析与讨论         | 40  |
| § 3.4 光纤对编织复合材料性能的影响    | 41  |
| 3.4.1 光纤对编织材料拉伸性能的影响    | 42  |
| 3.4.2 光纤对编织材料压缩性能的影响    | 45  |
| § 3.5 光纤传感器的安装与引出设计     | 46  |
| § 3.6 本章小结              | 49  |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第四章 基于光纤传感技术的编织材料内部应变检测 .....  | 51  |
| § 4.1 引言 .....                 | 51  |
| § 4.2 光纤传感原理及光纤传感器的选择 .....    | 51  |
| 4.2.1 光波在光纤中的传播原理 .....        | 51  |
| 4.2.2 常用的调制方法 .....            | 60  |
| 4.2.3 光纤传感器工作原理及分类 .....       | 60  |
| 4.2.4 应用于编织复合材料的光纤传感器 .....    | 61  |
| § 4.3 采用偏振式传感器的应变检测研究 .....    | 62  |
| 4.3.1 偏振式传感器原理 .....           | 62  |
| 4.3.2 实验系统设计 .....             | 64  |
| 4.3.3 实验结果及分析 .....            | 67  |
| § 4.4 采用法布里-珀罗传感器的应变检测研究 ..... | 70  |
| 4.4.1 法布里-珀罗干涉型传感器原理 .....     | 70  |
| 4.4.2 应变检测实验及结果分析 .....        | 71  |
| § 4.5 采用微弯式传感器的应变检测研究 .....    | 74  |
| 4.5.1 光纤弯曲的几何光学分析 .....        | 75  |
| 4.5.2 光纤微弯传感器原理 .....          | 77  |
| 4.5.3 应变检测实验及结果分析 .....        | 79  |
| § 4.6 本章小结 .....               | 83  |
| 第五章 编织复合材料固化工艺的监测 .....        | 85  |
| § 5.1 引言 .....                 | 85  |
| § 5.2 环氧树脂及其固化表征 .....         | 85  |
| § 5.3 固化工艺监测的实验研究 .....        | 87  |
| 5.3.1 实验原理及装置 .....            | 87  |
| 5.3.2 实验结果与分析 .....            | 89  |
| § 5.4 本章小结 .....               | 91  |
| 第六章 结束语 .....                  | 92  |
| § 6.1 全文的总结 .....              | 92  |
| § 6.2 存在的问题 .....              | 94  |
| § 6.3 今后的展望 .....              | 94  |
| 附录 .....                       | 95  |
| 参考文献 .....                     | 102 |
| 致谢 .....                       | 106 |
| 攻读博士期间发表的论文 .....              | 107 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 编织复合材料的发展概述

复合材料是指由两个(或以上)独立的物理相,包括粘结材料(基体)和粒料、纤维或片状材料等所组成的一种固体产物。它的分类方法有许多种,按其基体材料的不同可分为三大类:聚合物基复合材料,金属基复合材料和无机非金属基复合材料。聚合物基复合材料中的树脂基复合材料用量占有复合材料的用量的 90%以上<sup>[1]</sup>。如果按工艺分类,复合材料可以分为层合结构复合材料、缠绕结构复合材料、拉挤复合材料和纺织结构复合材料。

现代复合材料工业是以 20 世纪 40 年代初玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)的出现为标志。早期的玻璃钢制品采用的增强材料有:无捻布、加捻布、短切毡、表面毡等;树脂通常采用聚酯树脂和环氧树脂。到了 60 年代,随着具有高比强度、高比模量的碳纤维、硼纤维等高性能增强纤维的研制成功,以碳纤维/环氧树脂为代表的先进复合材料开始大量应用于航空航天等领域<sup>[1,2]</sup>。

与传统材料相比,在设计和制造上,树脂基复合材料有三个明显的特点:材料性能指标设计自由,材料与结构一致,产品型体设计自由。树脂基复合材料有许多优点,如:比强度高、减振性好、耐化学腐蚀、破损安全性好等。其中层合复合材料是由无纬布或纤维织物布用铺层工艺制成的纤维增强复合材料。它具有强度高、铺层灵活等优点,已经广泛用于飞机、导弹、卫星和航天飞机中,如飞机舱门、壁板、隔板、整流罩等。有的已经代替金属材料作为主承力构件。但常规的层合结构复合材料也存在一些缺点,如:厚度方向的刚度和强度性能低,面内剪切和层间剪切强度低,抗冲击能力差,易分层,不易制出复杂形状的构件等。这些缺点限制了层合复合材料在航空航天等领域的应用。为了改善层合复合材料的性能,人们开始将纺织技术中的编织技术与复合材料技术结合起来,最终产生了编织结构复合材料<sup>[2,3]</sup>。

编织技术从几何结构上可分为二维编织和三维编织。三维编织技术是由二维编织技术发展起来的高新纺织技术。三维编织复合材料的突出特点和优点是增强纤维呈空间多向分布,是完全整体、连续的纺线网络。这类材料已不再是层板结构,从结构上克服了层合复合材料层间脆弱的缺点。三维编织复合材料具有良好的力学性能,如较高的强度、刚度,较强的抗损伤能力等。三维编织复合材料的基本单元纤维束是空间四向结构,在力学上更具合理性。这种结构具有良好的综合性能指标。三维编织复合材料的设计灵活,易于使用计算机进行参数优化设计。另外,三维整体编织技术能编

织异形整体织物,按部件的形状和尺寸直接仿型编织出织物,这是其他工艺无法做到的。三维编织复合材料大量采用树脂传递模塑工艺进行固化,可以省去纤维布裁剪及铺层的工序,减少环境污染,降低制造成本。

复合材料的编织技术起源于纺织科学。纺织科学主要包括两个过程:纺纱和织造。纺纱是将纤维纺成纱线的过程;织造是将纱线织成织物的过程。按照工艺划分,可以将织造分为三种:机织、针织和编织。按纤维结构则可分为:线性(一维)、平面(二维)和立体(三维)。如图 1.1 所示<sup>[2]</sup>。下面以二维纺织工艺为例,简单介绍机织、针织和编织的工艺及其区别。

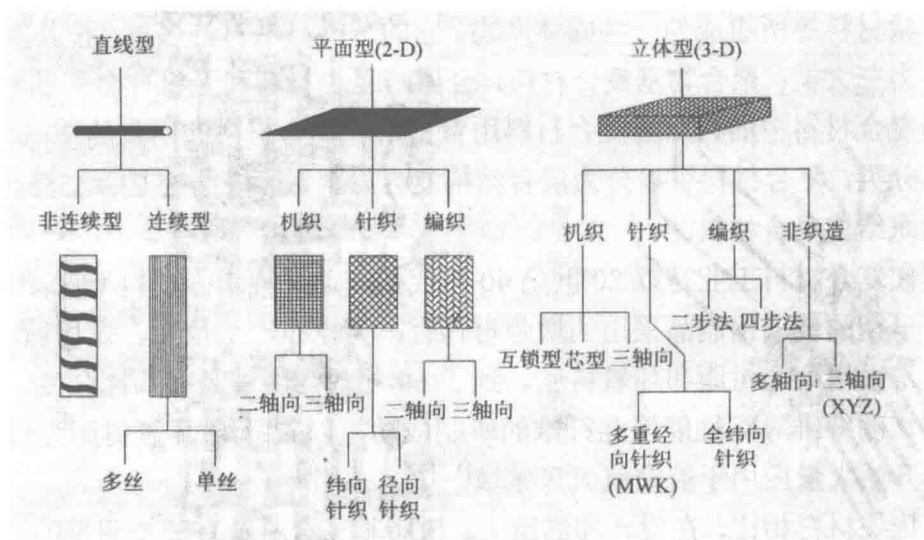


图 1.1 纺织技术的分类<sup>[2]</sup>

机织是两组纱线分别沿 0 度和 90 度延伸并且互相交织形成织物。在织物内与边缘平行的 0 度(或平行于织机机深方向)排列的纱线称为经纱,与边缘垂直成 90 度排列的纱线称为纬纱。其工艺原理如图 1.2 所示。针织是纱线沿 0 度或 90 度采用成圈的方法交织形成织物的过程。其工艺原理如图 1.3 所示。编织工艺是一组纱线沿 0 度方向延伸,并且所有的纱线都偏移一个适当的角度,然后互相交织形成织物的过程。其工艺原理如图 1.4 所示<sup>[2]</sup>。

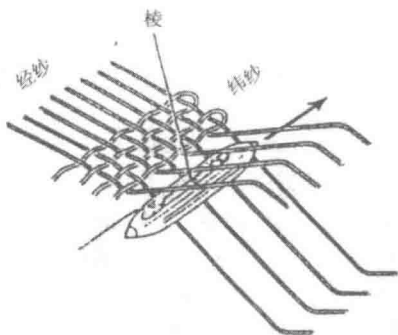


图 1.2 机织工艺的原理图<sup>[2]</sup>

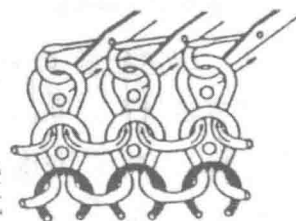
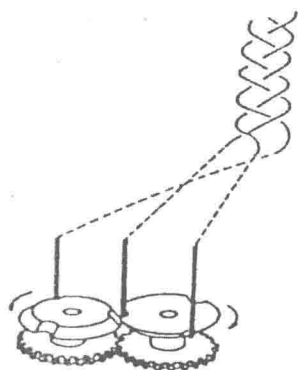


图 1.3 针织工艺的原理图<sup>[2]</sup>

图 1.4 编织工艺的原理图<sup>[2]</sup>

编织工艺是人类发展史上使用最早的纺织技术之一。然而直至 20 世纪 40 年代，人们才把编织作为一种工程技术来分析。W. Hamburer 分析了几何因素与编织性能的关系。50 年代，D. Brunnschweiler 论述了管状编织的成形和拉伸性能。60 年代，W. Douglass 从机械和工艺的角度对编织技术进行了论述。此时纤维编织技术不够成熟，纤维编织设备的研究还没有得到重视。70 年代以后，由于航天上的需要，编织技术被首先用于火箭头部表面防热层。人们逐渐研制出各种二维编织机械，二维编织复合材料也得到较大的发展。1977 年，Sander 提出可以将三维整体编织技术引入复合材料的制造。80 年代初，Brown 研制成功了三维整体编织技术中的四步法工艺。后来，Popper 和 McConell 提出了二步法三维编织技术。计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术也使编织技术更加自动化。编织技术从手工、二维、板状编织发展到了机器、三维、管状（以及更复杂形状的）编织<sup>[2,3]</sup>。这些技术使得三维编织复合材料的研究进入了一个新领域。人们也逐渐认识到三维编织复合材料比传统层合复合材料有更多的优点。

与此同时，针对编织结构件的复合材料成型工艺也在不断研究和发展。其中有真空浸渍法、预浸纱成型法、普通模压法等。后来，树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)逐渐成为编织构件的主要成型工艺。到 80 年代末至 90 年代初，关于 RTM 工艺的实验及理论研究达到了高潮。美国航空航天局(NASA)在 80 年代末制定了名为“先进复合材料技术”(Advanced Composites Technology, ACT)的计划<sup>[4-6]</sup>。该计划耗时 6 年，投资一亿多美元，其目的主要是在亚音速大型民用飞机中大量使用复合材料。编织技术及其成型技术是该计划三项重要内容之一。随着人们对编织复合材料制造工艺和性能的进一步研究以及更先进编织机的研制成功，编织复合材料在航空航天、交通运输等领域的应用也越来越广泛。

在国内，目前已有多家科研机构和公司 对编织复合材料进行研究和开发。天津纺织工学院、南京玻璃纤维研究设计院等机构对三维编织技术进行了较为深入的研究。其中，天津纺织工学院为航天部门编织了多层整体锥套<sup>[1]</sup>。该锥套为三层整体结构，

从横截面看外层为金属纤维,中层为碳纤维,内层为玻璃纤维。具有不同的性能的三层编织层共同构成多功能的整体部件。南京玻璃纤维研究设计院也采用三维编织技术编织了多种鼻锥、雷达罩等构件。航空工业总公司 637 研究所采用 RTM 技术制成了歼-8、歼-10 等多种军用飞机的雷达罩。航空工业总公司 621 研究所、625 研究所、同济大学、西北工业大学、南京航空航天大学等机构对 RTM 工艺及专用树脂等进行了研究。深圳中华复合材料制品有限公司研制了我国第一台 144 线轴大型编织机,并开发出用于自行车车架的可焊接碳纤维编织复合材料管等部件和产品,并初步形成了产业化。

三维编织复合材料的产生从根本上克服了层合材料层间强度低、抗冲击能力差的缺点,因而自从它出现以来,得到了广泛的重视。但是人们对它的认识尚浅,在力学性能、结构健康监测、固化监测等诸多方面的研究也较少,因而影响了它的应用。本文提出了研究编织复合材料性能和工艺的新方法,它基于光纤测试技术和传感技术。下面简要介绍光纤传感技术的发展概述。

## 1.2 光纤传感技术的发展概述

传感技术是当今世界发展最为迅速的高新技术之一。新型传感器不仅追求高精度、大量程、高可靠、低功耗和微型化,而且向着集成化、多功能和智能化发展,以满足工业、农业、国防和科研等各个领域的需求。

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代随着光纤技术和光纤通信技术的发展而迅速发展起来的。它代表了新一代传感技术的发展趋势。光纤传感器产业已被国内外公认为最具有发展前途的高新技术产业之一,它以技术含量高、经济效益好、渗透能力强、市场前景广等特点为世人所瞩目<sup>[7-9]</sup>。

在 20 世纪 60 年代,光导纤维通过全反射限制光波的传输原理已为人们熟知,并已作为短距离传光媒质用于胃镜等医疗器械。但当时作为光导纤维材料的玻璃损耗很大。直到 60 年代中期,光学性能良好的石英玻璃损耗仍然高达 1000 dB/km。以分贝 (dB) 为单位的损耗  $a$  定义为输入功率  $P_i$  与输出功率  $P_o$  比值的对数的 10 倍,即为:

$$a=10\lg (P_i/P_o)$$

当光信号在损耗为 1000 dB/km 的光纤中传输 1km 以后,输出功率与输入功率的比值为  $P_o/P_i=10^{-100}$ 。显然,利用衰减如此大的介质进行通信是不现实的。1966 年,英国 Harlow ITT 实验室的高锟 (Charles K Kao) 博士测量了纯石英玻璃的块状样品的损耗,发现其数值约为几十 dB/km<sup>[10]</sup>。他进而指出,通过降低石英玻璃中杂质的含量,可以减少其损耗。并提出可以利用石英玻璃纤维作为光波导用于通信。1970 年,康宁公司制成了损耗为 20 dB/km 的高纯度石英玻璃光纤 (GaAlAs 半导体激光器也在同年实现了室温下连续工作)。从此以光纤作为波导的光通信技术得到了迅猛的发展。现在的光纤最低损耗已经降低到 0.2dB/km 以下。短短的十几年光纤通信技术就从实

验室研究走向实用化。

与此同时, 光纤传感技术也已从无到有, 并迅速发展。1977 年美国海军研究所 (NRL) 开始实施光纤传感系统计划, 标志着光纤传感器的问世<sup>[7]</sup>。从此以后, 关于光纤传感器的研究在各个国家相继展开。从 70 年代到 80 年代中期, 光纤传感器的种类已达近百种, 并且应用于航空航天等国防军事领域和能源、医学、交通运输、仪器仪表等民用领域。与其他传感器相比, 光纤传感器具有以下优点:

- (1) 灵敏度高, 抗电磁干扰;
- (2) 光纤是无源器件, 对被测对象无影响;
- (3) 耐高电压, 耐腐蚀, 在易燃、易爆等危险环境可以安全工作;
- (4) 频带宽, 动态范围大;
- (5) 体积小, 重量轻, 形状灵活可变化, 适应性强;
- (6) 可以实现分布式测量、集中式管理以及远程监测、遥测、遥控;
- (7) 与光电子技术紧密联系, 易于集成化。

正因为光纤传感器具有诸多优点, 从它一问世, 世界各国均投入大量人力、物力用于光纤传感器的研究与发展。

美国的光纤传感器研究开始最早, 投资最大。仅在 80 年代, 投资就有几十亿美元<sup>[7,9]</sup>。美国把光纤传感器列为军备改造计划的十五项重点之一, 制定了专门的纤维光学传感器专门规划。美国海军研究所、美国航空航天局 (NASA)、西屋电气公司、斯坦福大学、弗吉尼亚理工学院等几十个单位从事光纤传感器的研究。Specikic Babeck & Wilcox 公司、Fiberdynamics 公司、Eotec 公司、Optra 公司在研制和开发光纤传感器方面享有盛名。一种可以测量地球应力的光纤传感器已用于预报地震。它具有灵敏度高、结构简单、成本低等特点。Optech 公司已完成了微型光纤加速度计的设计, 它通过改善加速度的检测方法来提高武器的性能。1986 年美国国防部研究计划局开始主持一项反潜计划, 其核心是研究光纤水听器及测声系统, 以提高海军反潜艇作战能力。光纤陀螺由于内部没有可移动的部件而提高了可靠性, 已经用于导弹的导引头、姿态控制和飞行控制系统中。在导航机器人和飞机弹射座椅中也采用了光纤陀螺。光纤陀螺已被列入美国军方的重点投资项目, 仅 90 年就投资 6000 多万美元。目前, 在美国国防部、航空航天局等机构的主持下, 在以下几各方面进行了光纤传感器的研究: 飞行控制系统 (加速度计、陀螺仪)、发动机监控系统 (温度、叶尖间隙)、飞机结构健康监测等。

在欧洲, 英国、德国等国家也十分重视光纤传感器的研究<sup>[7,9]</sup>。1982 年英国贸易工业部发起成立了英国光纤传感器合作协会, 其中包括 Sira Ltd、中央电气研究所、Delta 控制公司、标准电信研究所以及一些主要大学。英国中央电气研究所研制的高压光纤电流测量装置, 伦敦大学研究的光纤陀螺、水听器、光纤流体流量计, 牛津大学研究的光全息以及南安普敦大学和 York 公司联合研究的低双折射光纤、高双折射光纤、激光光纤、光纤测试仪器等都具有较高的水平。英国 Land 公司研制的红外辐

射温度传感器,配有 LANPARK 信息处理器。英国坦克瞄准器制造公司 Barr & Stroud 研制了一种光纤激光测距仪,已成为一流的军用检测设备,能提高武器的瞄准精度。德国的光纤陀螺研究规模和水平仅次于美国。法国、意大利等国也投入相当大的力量研制和开发光纤传感器。

日本早在 80 年代就制定了“光应用计划控制系统”的七年规划,总投资为 70 亿美元。用于解决强磁场干扰和易燃、易爆等恶劣环境下的信息检测、传输和过程控制。日本有松下、三菱、东京大学等著名公司和大学从事光纤传感器的研究。每年申请的关于光纤传感器的专利达一百多件。其科研成果转化为商品的速度较快。目前已有商品投入市场,如松下电器公司的光纤电流表、光纤电压表、光纤温度计、LEX 公司的红外辐射温度计等<sup>[7,9]</sup>。

根据美国加州的市场调查公司 Forst & Sullivan 的调查和预测显示,全世界各种光纤传感器的销售总额,1997 年为 5.6 亿美元,1999 年则超过 11.2 亿美元。目前全球光纤传感器市场年销售额约为 86 亿美元。由此可见光纤传感器市场的发展是非常迅速的。

我国光纤传感器的研究于 70 年代末起步<sup>[7,8]</sup>。1983 年召开了第一次全国性光纤传感器会议。研究工作主要集中在大学和研究所。清华大学、武汉理工大学、华中理工大学、重庆大学、哈尔滨工业大学、南京大学以及南京航空航天大学等高校以及核工业总公司九院、电子工业部 1426 所等研究院所都在从事光纤传感器的研究。研究内容覆盖面也较广,包括用于测量应变、振动、电流、电压、磁场、温度、水声、转动等许多物理量的光纤传感器,以及利用光纤传感系统对材料和结构的健康状况进行监测。在“七五”规划中,提出了 15 项光纤传感器项目,其中有光纤放射线探测仪、光纤位移传感器、光纤陀螺、集成光学传感器、医用光纤传感器、光纤传感器用的有源、无源器件的研制等。国家发展计划委员会和科学技术部于 1999 年制定的《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南》以及 2001 年对该“指南”进行的修订都把光纤传感器列为重点发展的内容之一。

一直以来,我国在光纤传感器的研究与开发,尤其是在商品化、产业化方面,远远满足不了市场需求<sup>[8]</sup>。与发达国家相比,光纤传感器的市场销售额占我国传感器销售额的比例很小。近些年来,加大了有关光纤传感器关键技术科技攻关的力度,在光纤传感器产品化方面取得了可喜的成绩,例如在高温传感器和光纤光栅传感器方面获得了较大突破。1998 年,武汉理工大学承担了“光纤传感技术国家工业性试验基地”项目,通过对一些关键技术如敏感材料的工程化技术、光纤传感器共有制造技术、光纤传感器工程技术及器件、仪表进行攻关,取得许多成果,并已通过国家级验收。依托该基地组建了武汉工大光纤传感科技股份有限公司,使科研成果走向产业化。该公司将于 10 年中累计投资 10178 万元,建成我国最大的光纤传感器示范生产基地。该项目将于 2002 年 10 月开始投入生产。项目建成后,预计年销售收入将达 5 亿元。

## 1.3 光纤智能复合材料与结构

20 世纪 70 年代,人们就已将光纤传感技术应用于复合材料领域。将光纤传感器埋入复合材料,可以构成具有自检测、自诊断和自修复等智能化功能的光纤智能复合材料与结构。本节简要分析光纤智能复合材料与结构的产生与发展历程。

### 1.3.1 光纤智能复合材料与结构的产生

随着先进复合材料技术及光纤传感技术的逐步发展及应用,以及由于它们各自所具有的优势和实际工程应用的需求,80 年代后期,由美国军方首先提出并开展了一项将两者结合的新兴技术——智能材料与结构技术的研究。

智能材料与结构(Smart/Intelligent Materials and Structures)是一门新兴的多学科交叉的综合科学<sup>[11,12]</sup>。它可以简单定义为:将具有仿生命功能的材料融合到基体材料中而制成具有智能功能的材料与结构。在智能材料与结构中融合有传感器、执行器和控制器,因而使其具有智能和仿生特征。早在 20 世纪 50 年代,人们提出了自适应系统(Adaptive System)的概念,可以看作是智能材料与结构思想的雏形。智能材料与结构的概念由美国军方于 80 年代正式提出。1988 年 9 月,美国陆军研究办公室组织了首届智能材料结构和数学的专题研讨会。1989 年,日本航空电子技术审议会提出了从事具有对环境变化作出响应能力的智能材料的研究。随后十几年中,智能材料与结构的发展十分迅速,并且引起世界各国研究者的重视。目前,这一领域有许多国际及地区性学术会议定期召开,以交流这方面的进展,如 SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials、International Workshop on Structural Health Monitoring、European Conference on Smart Structure and Material。

由于具有前述一系列独特的优点,光纤传感器是智能材料与结构研究中应用时间最早、应用范围最广的传感器。1979 年美国航空航天局将光纤埋入复合材料,用来监测材料的应变及温度。到 80 年代初这一段时期,研究的问题主要是光纤、光纤传感器的选择与设计、光纤和复合材料相容性以及光纤埋入复合材料的工艺等。80 年代中后期开始,光纤传感技术被用于监测复合材料固化过程、测试材料承载后的动态性能以及评估材料的损伤等。90 年代初,光纤智能蒙皮完成关键技术研制和飞行性能评估,开始进入应用研究。近年来,美国、加拿大和英国等国家的许多公司在多种飞机的机翼等部件上安装了光纤传感系统并进行了成功的试飞研究。除了航空航天等军事领域,光纤传感技术也被大量用于土木工程(尤其是桥梁、大坝等大型建筑工程)、船舶、汽车等诸多民用领域,构成智能系统用来对结构的健康状况进行监测<sup>[11-15]</sup>。

### 1.3.2 国内外研究发展概述

#### 1 智能表层

智能表层 (Smart Skin, 也称智能蒙皮) 是航空航天领域重点研究内容之一<sup>[11,12]</sup>。它是将各种传感器、驱动器集成在飞行器的表层中。其功能为: 使飞行器自动检测并自动适应周围环境的变化; 具有识别、干扰、隐蔽通信、隐身和电子保障系统, 以适应电子对抗的需要。另外, 对于材料表面及内部的损伤、缺陷、噪声和振动等, 智能表层具有自诊断、自修复和自适应的功能。

图 1.5 为将光纤网络埋入 DASH—8 飞机表层中, 形成的光纤智能表层 (见图中深色部分)。使用光纤智能表层的战机具有如下优点<sup>[12]</sup>:

- (1) 通过监测复合材料表层的成型过程, 可以提高材料的性能和可靠性, 并可降低制造成本;
- (2) 起飞前可以自动进行对机身构件及表层性能的评估, 以确定能否飞行;
- (3) 在飞行过程中, 可以自动实时监测飞机受到的气动参数、应变以及温度变化等;
- (4) 在战斗过程中, 可以监测飞机结构的损伤状况, 并为飞行员提供作战参考;
- (5) 着陆后, 可以利用智能表层系统记录的数据对飞机进行结构完整性评估以及必要的维修。

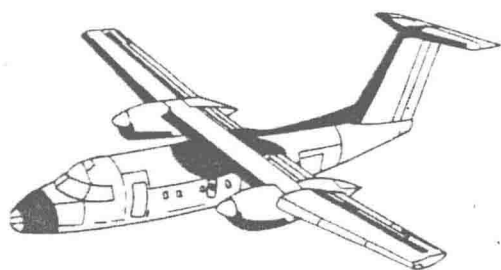


图 1.5 使用智能表层的飞机<sup>[12]</sup>

在智能表层中, 利用应力对 Bragg 光栅反射波长的影响测量材料的应变的技术已较为成熟。在此基础上, 英国南安普敦大学光电研究中心提出了用双波长光纤 Bragg 光栅同时测量温度和应变的方法<sup>[12,16]</sup>。EADS (European Aeronautic Defense and Space) Airbus 试验中心将光纤 Bragg 光栅应变传感器安装在 A340-600 机翼表面, 进行了现场试验 (包括地面试验和飞行试验), 如图 1.6 所示<sup>[17]</sup>。试验结果表明光纤 Bragg 光栅传感器与电阻应变测量的结果非常吻合。智能表层除了在飞行器的机翼中使用, 也在舰艇的蒙皮、推进器叶片等部件中使用。