



降落伞材料应力应变 监测解决方案

[摘要]

[在气囊或降落伞等柔性充气展开结构进行展开充气时，从折叠收缩状态变为充气张满状态，其结构外形变化剧烈，普通传感器无法进行这种大变形量条件下的测量，因此，对作用在柔性充气展开结构表面的应力和应变一直难以精确计算和测量，本文介绍了可以对柔性结构应变和应力进行测量的光纤传感器系统，可以广泛用于柔性织物的应变和应力的测量。详细内容见正文。]

让测量更简单

MAKE
MEASUREMENT
SIMPLE

深圳市简测科技有限公司

地址：深圳市南山区学府路1号

电话：0755-29235600

<http://www.jemetech.com/>

引 言

深圳市简测科技有限公司是一家开发基于光纤光栅技术在监测领域应用的科技型企业。公司可提供包括传感器子系统、数据采集与处理子系统、损伤识别、安全评定及预警子系统，以及结构健康监测数据采集分析软件系统等全方位端到端解决方案；公司系列产品可用于材料、安防、土木工程、交通、能源、航空、水利等工程领域；公司产品已在大型建筑、桥梁、大坝、水利、电力、安防、能源运输、石油平台等领域内具有成功的应用方案，公司的光纤光栅技术被国内高校广泛采用，公司完全具备可为高校实验室和大型企业提供基于光纤光栅技术的定制化应用方案的能力。

公司使命：Make measurement simple 使监测工作精确化、简单化、工程化。不断满足各领域客户的需求并提供监测方案。

一、引言

在进行有大气层的行星际探测时，降落伞和气囊是着陆探测器进行减速和最终着陆的最有效率的工具之一，其中美国“漫游者”和“探路者”火星探测器均采用了降落伞减速结合气囊着陆的设计。在降落伞和气囊工作时，均从压缩折叠包装状态进行展开和充气操作，其柔性材料在气动力作用下会产生较大的结构变形，普通传感器一般无法在材料这种大形变量情况下进行应力和应变的测量，因此在柔性充气展开结构的设计中，准确计算充气过程中的材料表面的应力和应变是件很困难的事情，通常只能考虑设置较大的强度裕度以保证安全性和可靠性，从而缩减了结构和重量的设计优化空间。特别是在航天深空探测方面，对重量非常敏感，迫切需要提高重量上的设计效率，优化设计结构。另外，在大量的柔性结构充气展开试验中，由于缺乏有效的测试测量方法，能够获取的数据非常有限，不能有效的将试验转化为对设计有用的数据，试验成本高，效率较低。因此，为解决这些问题，结合最新的光纤传感技术，我们提出了一种全新的能够在降落伞充气过程中测量伞衣

和伞绳应力和应变的方法，在测量对象表面安装光纤传感器，对应变和应力进行测量，通过使用不同配置的光纤传感器可以对伞衣和伞绳上的静态和动态载荷进行测量，本文对这种测量方法进行介绍。

光栅光纤传感器凭借自身抗电磁干扰、电绝缘性能好、耐腐蚀、体积小、传输损耗小、传输容量大、测量范围广等优点在管道沉降监测中得到广泛应用。当前，光纤传感器技术发展日趋成熟，应用领域广泛，在各领域中的应用很多展现出蓬勃发展的态势，极有可能替代传统的传感器。在光纤传感方面，光纤光栅技术又为光纤传感技术的发展开拓了新的领域，光纤光栅传感器质量轻、体积小、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰，具有良好的长期稳定性和耐久性。正是由于光纤光栅传感器具有上述优点，因此在材料测试应用了自主开发的光纤光栅应变传感器。

二、监测内容

采用光纤光栅应变传感器的新型测量系统，并以一种柔性的降落伞伞衣材料作为被测对象进行了原理性试验。该伞衣应力测量系统采用 FBG 技术测量伞衣材料的应力情况，采用双向拉伸机器测量降落伞伞衣材料在静态载荷条件下的应变，获得了较为满意的试验数据。其主要完成的试验是在静态载荷条件下，采用 FBG 技术测量的伞衣材料上的应变和应力。

在这个试验中，光学布拉格光栅光纤的光栅区域粘合在一幅伞衣尼龙材料的表面的中心部位，安装了光学布拉格光栅光纤的试验件安装在双向拉伸试验机上，试验结构原理如图1所示。

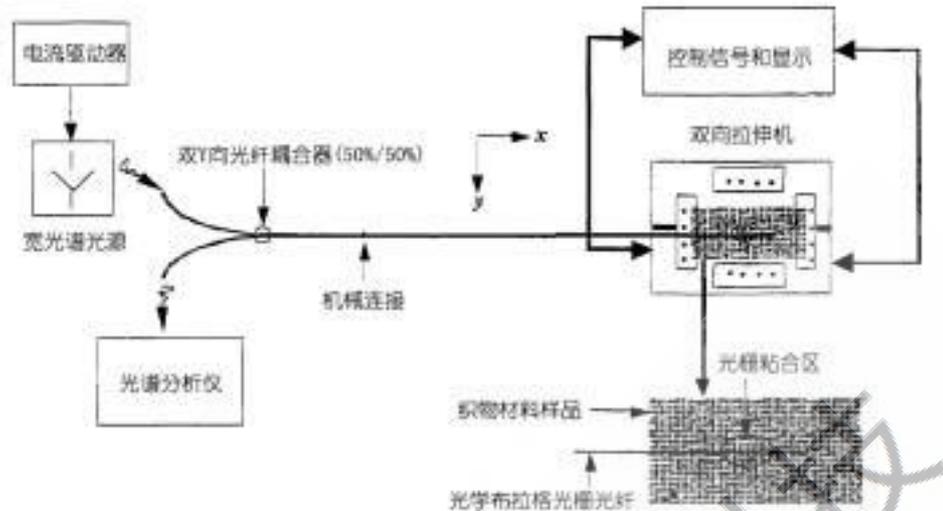


图1 使用FBG技术的试验原理图

试验中使用的光学布拉格光栅光纤的反射波长为 $\lambda=1539.97\text{nm}$ ，FBG试验中使用的解调仪，波长范围为1510-1590nm，波长带宽为80nm。波长分辨率为1pm，它的动态范围为50dB，波长重复性为 $\pm 2\text{pm}$ 。织物试验件安装在拉伸试验机并加载，试验对加载和不加载情况进行考核。

布拉格反射波长与作用在织物上的应力（拉力）之间的结果如图2所示，数据拟合较好，具有很好的对应关联性，传感器响应数据也具有非常好的可重复性，可见布拉格光栅光纤用于织物结构的应变测量或者用于柔性织物应变传感器是完全可行的。

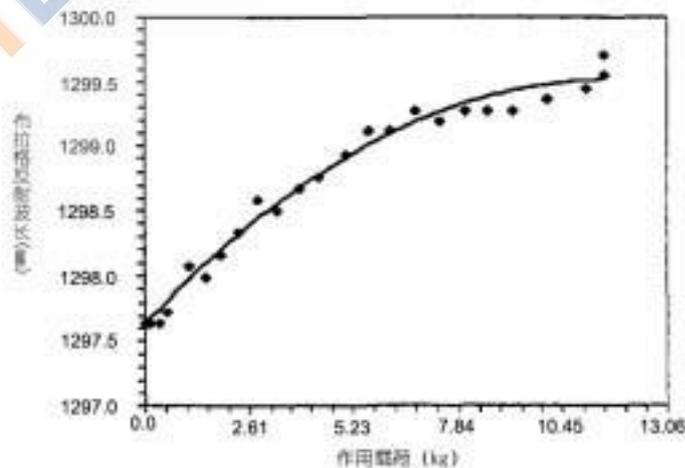


图 2 布拉格反射波长和作用载荷的关系

如图3所示，该降落伞光纤传感器测量系统基于FBG技术，由光纤光栅微型应变传感器，光纤光栅解调系统，数据传输模块，显示单元及软件分析系统组成。光纤光栅微型应变传感器由于其比较轻薄，重量较小，可以布置较多传感器并组成一个传感器阵列，如图13所示可以在降落伞每幅伞衣上都布置二维阵列的光纤光栅传感器，这些传感器沿降落伞伞衣径向和横向布置，同时在伞绳上也可布置光纤传感器测量伞绳的应力，这些光纤传感器将组成一个传感监控系统，并将传感器获取的数据实时传输到数据中心，及时处理并显示出来。

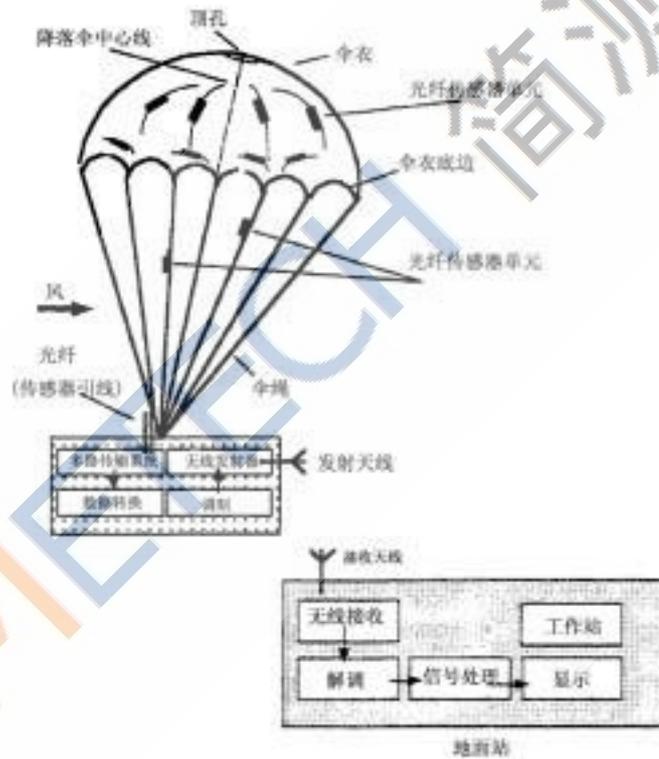


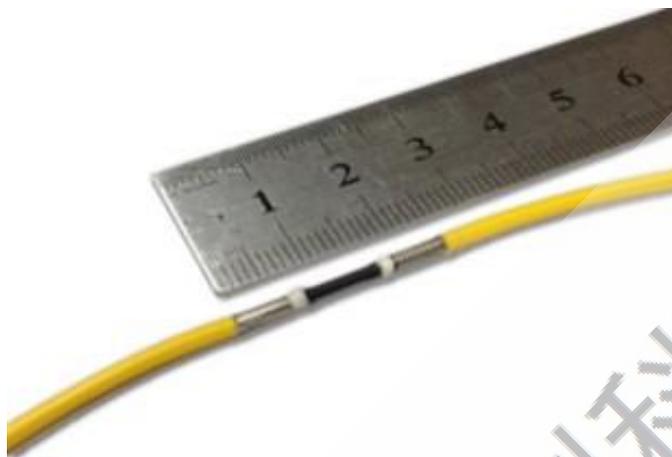
图 3 降落伞光纤传感器系统方案设计

三、监测产品构成

1、光纤光栅微型应变传感器

微型光纤光栅应变传感器兼有细径管保护式和夹持式的优点，直径最小

可达 1mm，既可以埋入结构中也可以通过辅助构件安装于结构表面。该传感器基于应变增敏/减敏封装机制，通过调节封装工艺中的参数，可以灵活改变传感器的应变灵敏度系数。是目前国内尺寸最小的光纤光栅应变传感器。



微型光纤光栅应变传感器	
量程	±2500 $\mu\epsilon$ (可定制)
分辨率	1 $\mu\epsilon$ (可定制)
波长范围	1510~1590nm
工作温度范围	-40~120°C
重量	4.8 克
规格尺寸	外径 1mm，测量标距 10mm (可定制)
尾纤	聚合物软管(Φ 0.9mm 和 Φ 2mm 可选)
连接方式	熔接或 FC/APC 连接头
安装方式	焊接、胶粘接、直接埋入

2、光纤光栅解调仪

光纤光栅解调仪凭借自身分辨率高、重复性好、采集速度快、可靠性高、处理能力强、传输损耗小、传输容量大、测量范围广等优点在结构健康监测中得到广泛应用。当前，光纤传感器技术发展日趋成熟，应用领域广泛，在各领域中的应用很多展现出蓬勃发展的态势，极有可能替代传统的传感解调手段。



JEME-iFBG-D 系列产品是一款基于嵌入式硬件平台和实时操作系统的多通道光纤光栅同步解调仪，采用波长扫描型光纤激光器作为光源，具有多路同步采集及单光路 20dB 信号增益能力。100Hz 采样频率可以测量动态变化的温度、应变等物理参数。每个光学通道具有 80nm 波长范围（1510~1590nm），单通道可同时连接多个 FBG 传感器（取决于传感器波长范围）。

■ 光纤光栅解调部分：

- ★ 4、6、8、12、15、24 路同步采集，大功率波长扫描型激光光源
- ★ 单通道 20dB 信号增益
- ★ 光纤光栅反射光功率可达-5dBm
- ★ 波长解调带宽（40nm、80nm 可选）
- ★ 内置绝对波长参考，不需要外部波长校准

■ 硬件系统部分：

- ★ 以太网接口，系统支持远程工作方式
- ★ 内嵌 VxWorks 实时操作系统提供工业级的系统稳定性能
- ★ 内嵌资源丰富的 FPGA 硬件逻辑芯片
- ★ 可定制的信号实时处理功能
- ★ 低功耗，可支持移动电源
- ★ 可增加无线传输模式

■ 监测系统软件

- ★ 系统开发环境

NI LabVIEW 是目前测试测量领域内领先的软件开发工具，广泛应用于系统测试和控制等行业。自软件问世以来，依靠其强大的图形化开发环境，引起了世界各地科研人员和工程人员的极大关注，成为其开发项目的重要开发工具，LabVIEW 可以帮助用户缩短程度开发时间，保证软件质量，提高工程和生产效率，被认为是下一代高级计算机程序开发语言。

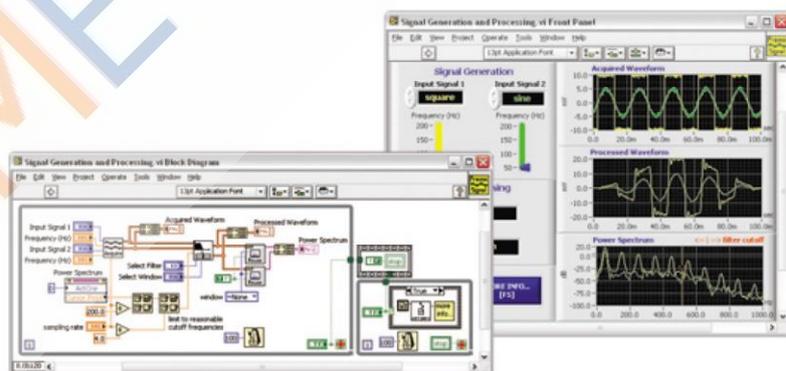


图 5.1 NI LabVIEW 图形化界面

LabVIEW 开发环境友好，具有拖放式的用户界面，内置内容丰富的函数库，函数代码高度封装，使编程过程变得简单、易行，于此同时，LabVIEW 同样具

备界面设计功能，变量与控件直接相互关联，用户在编写代码的过程中，可以及时调整软件界面，缩短了程序的开发时间。LabVIEW 同样是一种高度开放的程序语言，与其他编程环境具有很好的兼容性和交互性，可以方便快捷的调用其他开发软件的运行结果，软件的通用性较高。LabVIEW 软件开发平台与以往的程序语言相比，最大的不同之处在于其内置了数据采集、分析和显示功能，具有高度开放的 I/O 接口，硬件部署对象广泛，节约了硬件投资成本。如图 5.2 所示，LabVIEW 与许多硬件平台都实现了完美的无缝对接。

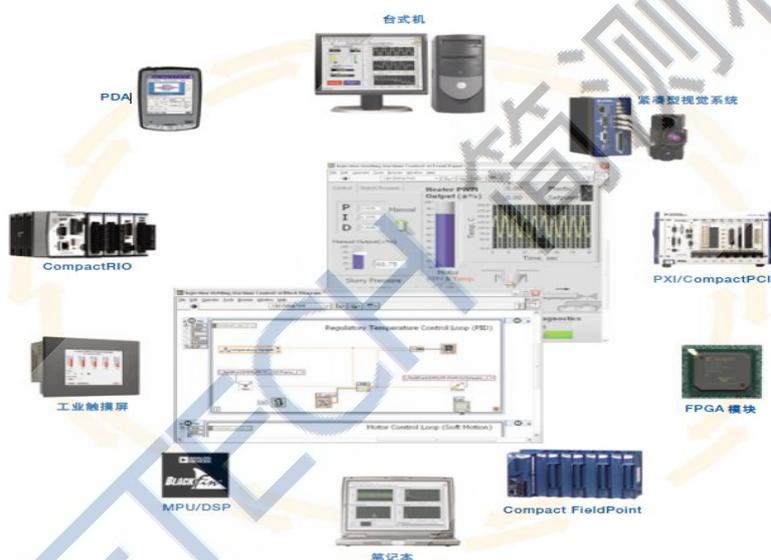


图 5.2 NI LabVIEW 硬件兼容平台

★ 监测系统功能

信号实时同步显示

该系统实时同步采集各通道传感器信号，随时调用目标传感器，在上位机中同步显示各通道传感器信号。实时同步采集技术，对分析结构阵型、阻尼比、地震动响应、基准频率、高阶频率等特性具有重要意义，为实时监测管道内力变化进行参考。监测系统界面如图 5.3 所示。

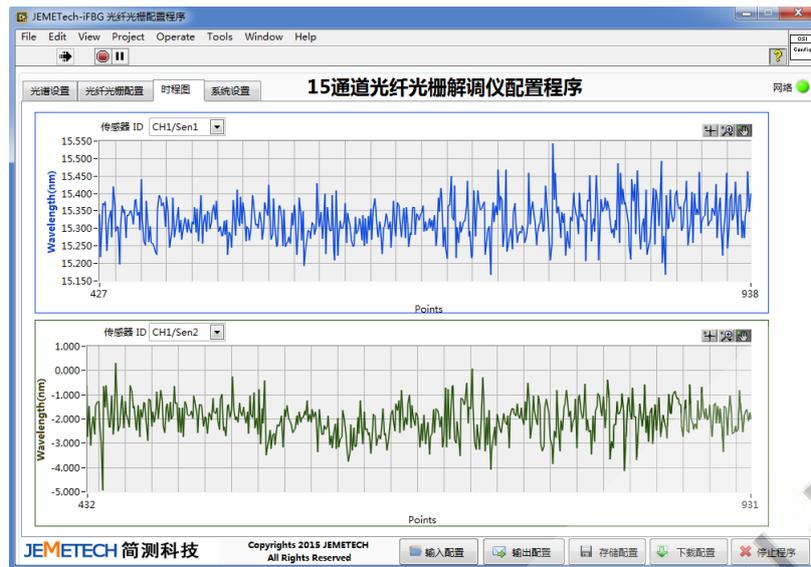


图 5.3 监测系统界面

数据自动存储功能

该系统的数据存储方式与以往相比具有较大不同，改变了以往人为操作触发存储的方式，存盘开始时间、结束时间、文件保存方式均作了存盘触发判断，均由系统自动识别完成。

该系统为数据存储路径做了特别设计，除用户指定的基本存储路径外，系统将按年-月-日-系统时间的顺序逐级建立子目录，保证文件不会被覆盖和重名，同时也方便用户在海量数据文件中调用需要的文件，如图 5.4 所示。

图 5.4 系统数据存储设置

自动报警功能

该系统设计了多个结构安全指示灯，当管道结构某一部位发生应力过大时，该指示灯显示为红色，表示该部位处于异常状态，需要启动相应的应急预案。该指示灯能正确表征应力过大的部位，对采取紧急措施具有指导意义。报警信息通过手机短信和 E-mail 电子邮件的方式发送（如图 5.5 所示），保证了重要报警信息的及时性。



图 5.5 系统报警机制