**光纤传感器从它诞生四十年以来，以其灵敏度高、耐腐蚀性好、安全可靠、体积小、可塑性强等总多有点，在传感器领域取得了不小的地位。而其中的佼佼者要数布拉格光纤光栅传感器，它能对应变、温度、位移、加速度、压力等进行测量。本项目用到的是其第一项功能——对可变机翼形变的测量。**

**首先对光纤做一个大概的介绍，光纤传感技术的核心是光纤–一条纤细的玻璃线，光波能够在其中心进行传播。光纤主要由三个部分组成：纤芯(core)，包层(cladding)和保护层(buffer coa**[**TI**](http://bbs.elecfans.com/zhuti_715_1.html)**ng)。其中包层能够将纤芯发出的杂散光波反射回纤芯中，以保证光波在纤芯中具有最低的传输损耗。这个功能的实现原理是纤芯的光折射率比包层的折射率高，这样光波从纤芯传播到包层的时候会发生全内反射。最外面的保护层提供保护作用，避免外界环境或外力对光纤造成损坏。而且可以根据需要要强度和保护程序的不同，使用多层保护层。**

**光纤布拉格光栅传感器是一种使用频率最高，范围最广的光纤传感器，这种传感器能根据环境温度以及/或者应变的变化来改变其反射的光波的波长。光纤布拉格光栅是通过全息干涉法或者相位掩膜法来将一小段光敏感的光纤暴露在一个光强周期分布的光波下面。这样光纤的光折射率就会根据其被照射的光波强度而永久改变。这种方法造成的光折射率的周期性变化就叫做光纤布拉格光栅。当一束广谱的光束被传播到光纤布拉格光栅的时候，光折射率被改变以后的每一小段光纤就只会反射一种特定波长的光波，这个波长称为中心波长，公式**

**λb=2neffΛ，**

**其中neff为纤芯有效折射率，Λ为光栅周期。从式中可得，FBG的中心波长主要有光栅周期和有效折射率决定，因此影响这两个参数的物理过程都会导致FBG的中心波长发生偏移。温度保持恒定时，光纤光栅受纵向拉伸或压缩作用， 即其仅受轴向应变 ε，光栅周期 Λ 将会改变，此时中心波长 会发生漂移 ΔλB 为 ΔλB ＝λB·（１ －Pe）·ε， Pe 为光纤的弹 光系数。FBG的被测点可以建模为圆形截面的变形梁，当 对其施加一个轴向应变时，变形梁上下表面会同时承受拉 伸和压缩，会形成一个圆弧。在变形弯曲变形 区内，在缩短和伸长的两个变形区之间，应变中性层的长度 始终不变，即应变量为 ０。L为微元 长度， ΔL为结构微元长度的变化量，ρ 为曲率半径， θ 为圆 弧的圆心角。推导得 L ＝ρθ， L ＋ΔL ＝（ρ ＋h/２） θ， 则，微元的曲率为 k ＝ １ ρ ＝ ２ h ΔL L ＝ ２ h ε， ε ＝ΔL/L为应变。那么， FBG的中心波长的漂移转化为曲率的变化 k＝ ΔλB /λB·（１ －Pe）·h＝AΔλB （２） 对于FBG传感器， λB， h， ΔλB， Pe均为常量，因此式（２） 中A为常数，曲率 k 的大小与 ΔλB 呈线性关系，只要检测 FBG传感器测点的中心波长变化量 ΔλB 即可获得k的大小， 为基于曲率信息的机翼原型曲面重构算法提供基础数据。**

**由于FBG具有交叉敏感特性，温度变化和应变都会导致中心波长发生偏移，而使用FBG传感器测量结构的形变时，是在温度不变的理想条件下，但实际测量中，难以保证光纤光栅周围的温度场恒定不变，因此，必须对其进行温度补偿，以减小或消除温度变化造成的误差，保证测量精度。目前常用的温度补偿技术主要有参考光纤光栅法、双光纤光栅法、软件补偿等**

### **机翼形变监测硬件系统构成**

**硬件系统主要由无人机机翼模型、FBG传感网络、光纤光栅解调仪、计算机等组成，大致工作流程为：机翼模型发生形变，布设于其中的FBG传感网络感应形变并将其调制为中心波长的变化，光纤光栅解调仪获得中心波长的变化并传输到计算机上，通过信号处理、算法计算、三维显示等步骤，最终将机翼模型的形变实时显示于电脑屏幕上。**

**光纤光栅解调仪采用MOI公司的SM130解调仪，该解调仪基于高频扫频激光和硬件寻峰技术，解调得到的中心波长带宽仅为0.3nm，具有较高的解调精度；同时，该系统的解调频率可达1KHz，可以有效地进行静态解调和动态解调，保证了检测的实时性。**

**机翼模型设计**

**RQ-7影子无人机是“影子”系列当中最新的无人机系统，翼展为3.9米，展弦比为18.94。其作为一款全天候高空无人侦察机，可以探测到距离陆军战术作战中心125千米以外的目标，可以让陆军指挥官在作战中“第一发现，第一了解，第一行动”，享有“陆军的眼睛”之美称。**

**本项目以该型无人机机翼作为原型，但由于实验条件有限，对其机翼结构进行了简化，所设计的机翼主要由翼梁，翼肋和蒙皮三部分组成。其中，翼梁由前后两根梁组成，考虑到结构强度和重量方面的要求，前梁和后梁都采用了空心碳纤维杆，前梁外径为4mm，内径为2mm，后梁外径为2mm，内径为1mm；翼肋材料选择聚苯乙烯聚乙烯混合泡沫塑料（EPO），由于该材料硬度大且韧性好，尺寸稳定性好，非常适合用于航模的制作；蒙皮由碳纤维复合材料组成。最终的机翼模型翼展长1.2m，弦长为0.2m。**

### **用于翼梁形变监测的形状传感器设计**

**基于光纤光栅的形状传感器的作用是追踪翼梁的形状变化并将其编码为FBG网络的中心波长信息，与直接粘贴FBG的布设方式相比，形状传感器保证了检测装置与被测对象分离，具有可重复利用、布设方便等优点，避免了直接粘贴方式中传感器一旦损坏就无法更换只能报废的缺点。为了能够准确无误的感应形状变化，且能适用于机翼的特殊条件，要求形状传感器具有体积小、质量轻、柔性好等特点，同时，本文的形变重构算法要求在同一个节点处，三个FBG间隔120°分布。基于此设计要求，本文采用直径1mm的记忆合金丝作为基材，主要利用其特有的超弹性来克服基材的相变影响，避免FBG长期处于拉伸或者压缩的状态，在其周围采用环氧树脂胶粘贴的方式，等间隔120°粘贴3根光纤光栅串，最后使用热缩管对形状传感器进行封装保护。**

**由于FBG的直径相对于记忆合金丝的直径来说并不可忽略，因此FBG的安装角度及其与基材之间的孔隙会带来较大的误差，为保证光纤光栅串的安装精度，设计加工了光纤卡槽。在制作过程中，四个卡槽同时使用，不仅可以保证同一节点处的三个FBG间隔120°，也可以保证同一根光纤上的所有FBG节点位于同一直线上。**

**利用光纤光栅的波分复用技术时，一个关键问题是FBG阵列的波长选择问题，主要考虑到的因素包括光纤光栅解调仪的工作范围、每个FBG的工作范围、缓冲区大小及FBG的个数等。在本文中，光纤光栅解调仪采用的是MOI公司的SM130，工作范围为1510-1590nm，则需要所有FBG的中心波长在此范围内。每个FBG的工作范围选择1.5nm，即可满足设计要求，同时缓冲区取1nm，则相邻两个FBG的中心波长间隔为4nm，但实际上FBG存在加工误差，相邻两个FBG之间波长间隔近似4nm。在每根光纤上设置10个测量节点，间隔10cm，则光纤光栅阵列的中心波长如表4.2所示。**

**表4.2 形状传感器FBG阵列中心波长**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **节点** | **A1** | **A2** | **A3** | **A4** | **A5** |
| **中心波长/nm** | **1527.03** | **1531.38** | **1535.37** | **1539.42** | **1543.21** |
| **节点** | **A6** | **A7** | **A8** | **A9** | **A10** |
| **中心波长/nm** | **1547.15** | **1550.98** | **1554.96** | **1558.86** | **1562.86** |
| **节点** | **B1** | **B2** | **B3** | **B4** | **B5** |
| **中心波长/nm** | **1527.40** | **1531.38** | **1535.39** | **1539.36** | **1543.21** |
| **节点** | **B6** | **B7** | **B8** | **B9** | **B10** |
| **中心波长/nm** | **1547.18** | **1550.94** | **1554.95** | **1558.87** | **1562.86** |
| **节点** | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** | **C5** |
| **中心波长/nm** | **1527.33** | **1531.56** | **1535.60** | **1539.42** | **1543.04** |
| **节点** | **C6** | **C7** | **C8** | **C9** | **C10** |
| **中心波长/nm** | **1547.40** | **1551.12** | **1554.75** | **1558.86** | **1562.67** |

**最小弯曲半径是形状传感器的一个重要参数，它描述了形状传感器的柔性，最小弯曲半径越小，则可弯曲的程度越大，柔性越好，就可以感知更复杂的形变，理论最小弯曲半径R可根据下式进行计算。**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**上式中，代表记忆合金丝的半径，本实验中为0.5mm，代表光纤的半径，本文采用的是普通石英光纤制成的FBG，半径为125，为FBG可承受最大的应变，一般取0.5%，因此计算可得形状传感器的理论最小弯曲半径为12.5cm，相对于传感器132cm的长度，具有较好的柔性，同时传感器的直径比较小，非常容易布设于翼梁内部。形状传感器的其他一些参数如表所示。**

**形状传感器参数列表**

|  |  |
| --- | --- |
| **传感器指标** | **参数** |
| **长度** | **120cm** |
| **最大直径** | **2mm** |
| **最小弯曲半径** | **12.5cm** |
| **节点数量** | **10** |

### **用于蒙皮形变监测的传感网络设计**

**本文的机翼模型蒙皮由碳纤维复合材料组成，可以将其简化为三维曲面。根据上文的仿真，无人机机翼蒙皮的形变主要分布于翼展方向，沿着翼弦方向的变化较小，因此设计传感网络时可以沿翼展方向较为密集，沿着翼弦方向相对稀疏。结合基于曲线重构的曲面重构算法和空分、波分复用技术。**

**在实际布设FBG传感网络的时候，考虑到碳纤维复合材料柔性较大，如果直接将FBG粘贴于上面，则机翼蒙皮产生形变的时候，容易导致FBG内部应变分布不均匀，从而产生啁啾效应，使得解调系统无法获得准确的中心波长，同时FBG可能长期处于应力状态下，将会缩短传感网络的工作寿命。因此，本文利用记忆合金丝的超弹特性，将直径1mm的记忆合金丝作为基材，把FBG粘贴于其表面，再用环氧树脂胶将传感阵列粘贴于碳纤维复合材料上，从而保证了FBG测量节点处形变连续和不处于长期应力状态下。**