

# 基于 DSP 的光纤光栅解调系统的设计

## 引言

光纤布拉格光栅传感器(FBGs)是用光纤布拉格光栅(FBG)作敏感元件的功能型光纤传感器,可用于直接检测温度和应变,以及与温度和应变有关的其他许多物理量和化学量的间接测量。在光纤布拉格光栅传感器的应用研究中,波长解调是一个重要的方面。目前限制光纤光栅传感器应用的最主要障碍是传感信号的解调。波长解调方法主要有光谱仪、斜边滤波法、可调谐滤波法、干涉扫描法、匹配光栅法等。但是,在这几种方法中,光谱仪成本较高,斜边滤波法的分辨率较小,干涉仪没有好的重复性,而可调谐滤波器的扫描周期较长。因此,近年来,匹配光栅法越来越受到人们的青睐。为此,文中介绍了一种简单、廉价且由两个并联的匹配光栅解调来检测光纤光栅传感器的系统设计方法。

## 1 双光栅匹配原理

双光栅匹配系统示意图如图1所示。宽带光源发出的光经3 dB 耦合器进入传感 FBG。再由 FBG 反射后进入两路匹配光栅,对应的两个光电探测器得到与其对应波长有关的光信号,然后由光电探测器将其转换为电信号并进入信号采集处理电路提取有用信号,最后由后续信号处理系统实现数据的采集与处理。

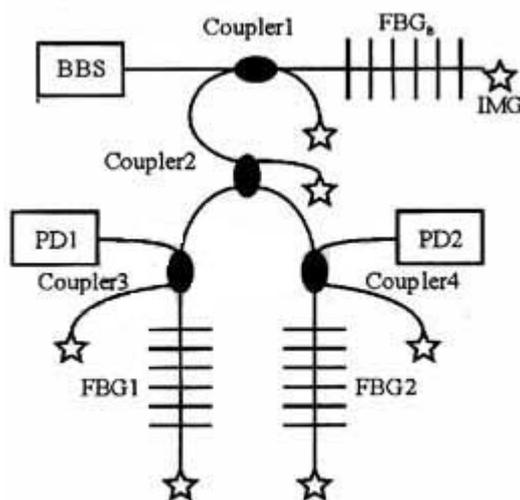


图1 双光栅匹配解调系统示意图

图1中, PD1和 PD2为光电探测器, 光电探测器所探测到的光功率  $P$  为:

$$P = I_1(\lambda) \cdot I_2(\lambda) \quad (1)$$

其中  $I_1(\lambda)$ 和  $I_2(\lambda)$ 分别为传感光栅和匹配光栅的反射功率谱密度函数。两者的反射功率谱函数均可用高斯函数近似表示:

$$I(\lambda) = I_0 \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\lambda - \lambda_s}{\Delta \lambda_s} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中,  $I_0$ 为反射谱强度峰值;  $\lambda_s$ 为反射谱强度为  $I_0$ 时对应的波长值;  $\Delta \lambda_s$ 为反射谱的3 dB 带宽。一般情况下, 光电探测器所探测到的光功率的大小与传感光栅和匹配光栅的反射谱的卷积大小成正比。传感光栅的中心波长  $\lambda_c$  与匹配光栅的中心波长  $\lambda_p$  的差值越小, 对应

的卷积值越大。由于 $\Delta\lambda$ 大于阈值 $\Delta\lambda_{min}$ 时，卷积值过小可能无法继续解调，因此，解调范围会受到限制。

普通的匹配法只有一个传感光栅一个匹配光栅，对应只有一个 $\Delta\lambda$ 。当该 $\Delta\lambda \geq \Delta\lambda_{min}$ 时，解调系统将无法继续解调。对于双光栅匹配解调系统，传感光栅与两个并联的匹配光栅的中心波长近似相等，但略有差别。三者关系为： $\lambda_{p1} < \lambda_c < \lambda_{p2}$ ， $\lambda_{p1}$ 和 $\lambda_{p2}$ 分别表示两个匹配光栅的中心波长。 $\lambda_c$ 是传感光栅的中心波长。传感光栅在外界应力作用下时， $\Delta\lambda_1 = \lambda_c - \lambda_{p1}$ ， $\Delta\lambda_2 = \lambda_c - \lambda_{p2}$ ；当 $\lambda_c$ 增大时 $\Delta\lambda_1$ 增大， $\Delta\lambda_2$ 减小；当 $\lambda_c$ 减小时， $\Delta\lambda_1$ 减小， $\Delta\lambda_2$ 增大。图2所示为 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 和 $\lambda_c$ 三者的关系图，其中 $\Delta\lambda_{min}$ 是光电探测器可以探测到的最小值。因此，根据图2可知，在理论上，双光栅匹配解调系统总是至少有一个光电探测器可以探测到可用光信号。

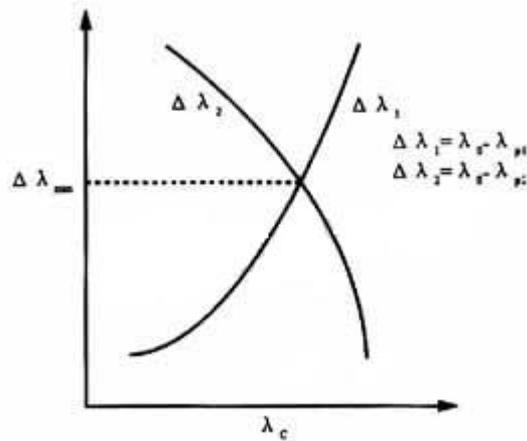


图2 扩大测量范围示意图

## 2 基于 DSP 的解调系统设计

### 2.1 系统硬件设计

匹配光栅反射回来的光入射到光电探测器(PD)上可转换为电信号。光电转换部分和信号采集部分主要完成对 PD 输出电信号的采集，采集到的信号再转化为数字信号由 DSP 进行处理。DSP 主要完成数据的插值运算和寻峰处理，并根据处理结果反馈给 DSP，由 DSP 依照反馈信号控制步进电机完成下一步的解调工作，其系统硬件框图如图3所示。

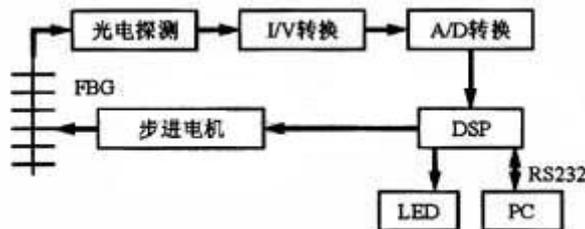


图3 系统硬件设计框图

为了实现高精度的数据采样，本系统选用美国 AD 公司推出的一种12位带并行微机接口的逐次逼近型模 / 数转换芯片 AD1674来实现系统的模数转换，AD1674内部自带采样保持器(SHA)、10V 基准电压源、时钟源以及可和微处理器总线直接接口的暂存 / 三态输出缓冲器。

本系统采用 TMS320VC5402作为主控芯片。这种定点 DSP 芯片可实现光纤光栅传感信号的处理、步进电机的控制和显示等。该芯片具有强大的数据运算和处理功能，利用其 RPT 和 MAC 指令可以在单指令周期内实现乘累加运算。其灵活的循环缓冲区和高效的 C 语言可

使 TMS320VC5402 方便地实现数据的循环寻址与卷积运算，从而实现高速度解调。

## 2.2 系统软件设计

DSP 系统的软件部分主要由初始化程序、线性插值子程序或者曲线拟合子程序、显示程序、驱动程序、中断服务程序等几部分组成，可以将 A / D 转换和串行通讯代码放在中断服务程序中来实现。

初始化程序用于完成 DSPI / O 口、内部 A / D 转换器、串行口、中断等资源的初始化。为了协调 A / D 转换和步进电机的控制，可由 DSP 发出控制信号来控制步进电机，以使经过 A / D 转换所得的数字信号与加在匹配光栅上的步数一一对应。显示部分的程序可将此数字信号经代数变换转换为直接表示应力的数字量，然后通过查表动态实现应力显示。

当匹配光栅反射波长与光纤光栅反射波的中心波长重叠时，光电转换输出脉冲信号，并向 DSP 请求中断，然后由 DSP 执行中断服务程序，以将 DSP 内部 A / D 转换器转换所得的数字量读入 DSP 并保存起来，最后通过串行口发送到上位机再中断返回。

## 3 实验结果分析

由实验可得，在砝码质量从 0 g 增加到 60 g 的过程中，粘贴在悬臂梁上的 FBG1 中心波长漂移 0.716 nm，图 4 所示为 FBG1 中心波长随砝码质量变化的曲线图。由图 4 可知，悬臂梁上的 FBG 中心波长变化量与悬臂梁自由端所施加的砝码质量成较好的线性关系，并且具有较高的灵敏度。

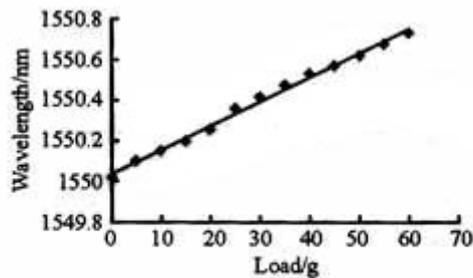


图4 FBG反射中心波长随砝码质量变化的曲线

实验中可通过增加砝码的质量施加对悬臂梁不断增加的拉伸应力。两个匹配光栅反射光信号分别被各自对应的光电探测器所接收。光电探测器输出的模拟电压信号则由以 DSP 为核心的信号处理系统的一系列处理得出传感光纤布拉格光栅所感测到的外界物理量的大小。

当 PD1 对应处理后的电压信号值为 5 V 时，对应的点为 A 和 C，即对应的有两个光纤布拉格光栅的波长值。因此，对于这个 5 V 电压，解调系统无法直接判断出对应的悬臂梁负载的质量是 A 点还是 C 点所对应的质量。对于双光栅匹配解调系统，往往会存在两个匹配光栅并对应两个光电探测器。除存在 PD1 外，还存在 PD2。系统可以通过 PD1 和 PD2 两者所对应的电压值来确定产生 5V 电压时所添加的砝码质量。实际上，可通过 DSP 系统的运算处理得到匹配光栅中心波长的变化量，从而得到传感光栅的中心波长变化量。对于双光栅匹配解调系统，对应的传感光栅可以取反射谱的双边，从而扩大传感光栅的测量范围。光电探测器的输出经信号调理电路后的电压随应力的变化曲线如图 5 所示。

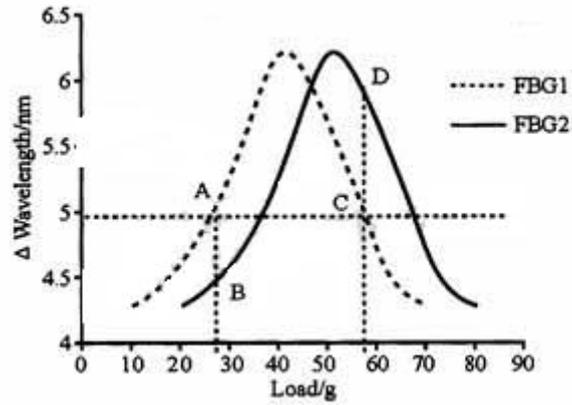


图5 输出与应力的变化曲线

#### 4 结束语

双光栅匹配解调系统是以匹配法为基础并加以改进新方法。它继承了匹配法结构简单、成本低、实现容易等优点。同时，双光栅匹配解调系统还解决了因光电探测器导致的测量范围受限的问题，也解决了匹配法中存在的双值问题。该解调系统将匹配光栅粘贴于特殊悬臂梁上，并采用 DSP 进行处理，不仅提高了响应速度，而且提高了解调的精度和稳定性。减小了匹配光栅因应力过大而损坏的可能性。利用拉力作为系统的待测量进行解调实验证明该系统具有良好的线性度、解调精度、速度及灵敏度。