

# 基于伸缩杆结构的光纤光栅多级应变传感器

赵 勇, 何文正, 汤永超  
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了扩大光纤光栅称重传感器的测量范围,提高传感器的测量精度,在理论上设计了一套新型的可以扩大测量范围、提高测量精度的系统,并通过 Matlab 平台仿真.结果表明,单级传感器在波长变化小于 0.2 nm 时具有良好的线性度.该系统将双光纤光栅串联,分别粘贴于等强度梁的上下两侧,采用光强解调的方法实现对光纤光栅输出信号的解调;在解调基础上,利用伸缩杆结构传递载荷重力.实验测试结果验证了多级应变测量的可行性,在保证分辨力的同时扩大了传感器的测量范围.

**关 键 词:** 光纤光栅;称重传感器;多级传感;测量精度;光强解调

中图分类号: TP 212.1      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2018)08-1065-05

## Fiber Bragg Grating Multi-level Strain Sensor Based on the Structure of Extendable Rod

ZHAO Yong, HE Wen-zheng, TANG Yong-chao  
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Yong, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to expand the measurement range of optical fiber grating load cell and improve the measurement accuracy of the sensor, a novel multi-level load cell was designed theoretically and simulated by Matlab. Simulation result showed that the single sensor had good linearity when the fluctuation of wavelength is below 0.2 nm. In this system, the dual-optical fiber gratings were connected in series with the upper and lower sides of the equal-strength beam. And the output signal of the optical fiber grating was demodulated by the method of light intensity demodulation. By the extendable rod structure, the sensor becomes multi-level sensing, then the measurement range was broadened unchanging its measurement resolution. The feasibility of the proposed sensor was verified by experimental results.

**Key words:** fiber Bragg grating; load sensor; multi-level sensing; measurement accuracy; light intensity demodulation

光纤光栅应变传感器抗电磁干扰能力强、电绝缘性好、耐腐蚀能力强、性能稳定、安全性能好<sup>[1-3]</sup>,已广泛应用于健康检测、交通运输、石油勘测、航空航天,以及大型结构工程等领域<sup>[4-5]</sup>.以 Bragg 光栅为基础的光纤光栅传感技术虽然取得了很大成功,然而在发展中也遇到了瓶颈问题<sup>[6]</sup>,如波长解调成本高、解调速度低、光强解调受光源稳定性的影响大、测量范围小等,这些问题在一定程度上限制了该项技术的发展与应用.

为扩大光纤光栅应变传感器的测量范围,文献[7]采用一种弯梁结构,结构应变基于两点之间距离的变化;微动可调平移台的位移达到 14 mm(对应基长 190 mm),相当于 7% 的应变.但是这种弯梁结构的光栅工作范围过大,不利于解调,也不利于复用,因此不利于实用化.

与传统单级测量方法不同,多级传感系统可减少各级系统使用率,提高设备使用寿命,更为实际有效地提高测量范围,对实际生产应用有重要意义.本文在利用双光纤光栅强度解调的基础上,提出一种基于伸缩杆结构的可实现多级应变测量

的方法,并进行理论分析和实验验证.

# 1 光纤光栅应变多级传感系统

## 1.1 伸缩杆结构光纤光栅多级传感系统

图 1 为伸缩杆结构光纤光栅多级传感系统结构图,由 4 级悬臂梁组成 4 级传感系统. 每级悬臂梁对应一组解调设备,解调出的光强信号反映该悬臂梁的应变情况. 光源经过分光器进入 4 组解调设备. 施加载荷后,4 级传感系统分别输出相应光强信号,经算法分析可计算出当前载荷质量.

伸长状态,受力较大时可收缩. 限位杆限定每级悬臂梁工作在各自的工作范围内,不因载荷过大而发生塑性变形.

传感系统伸缩杆结构如图 3 所示. 外杆 2 固定于箱体的称重板上;内杆 4 与悬臂梁接触,传递载荷重力. 限位小球 6 可在限位弹簧 3 作用下锁定内杆与外杆的位置,当限位弹簧受力较大收缩时,限位小球进入外杆内部的导轨中,内杆进入外杆中,伸缩杆收缩. 卸载后,内杆 4 在复位弹簧 1 作用下,使限位小球回到限位孔内,使伸缩杆恢复至锁定状态. 套筒 5 可保证内杆不脱落.

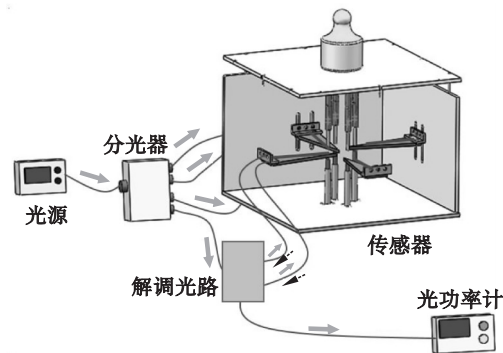
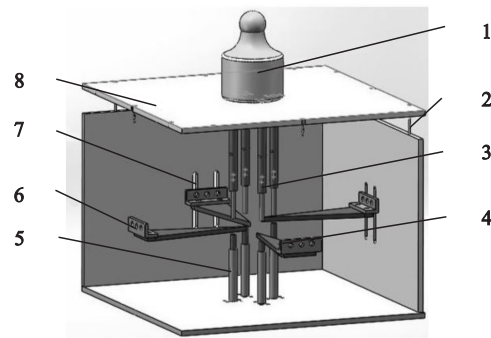


图 1 伸缩杆结构光纤光栅多级传感系统  
Fig. 1 Extendable rod multi-level structure of fiber Bragg grating sensing system

## 1.2 传感器结构设计及工作原理

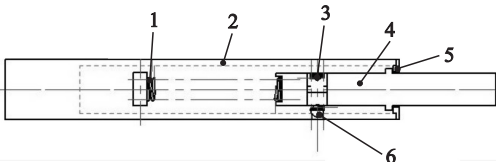
传感器箱体结构如图 2 所示.



1—砝码;2—支撑弹簧;3—伸缩杆;4—悬臂梁;5—限位杆;  
6—悬臂梁紧固件;7—悬臂梁位置调节孔;8—顶部称重板  
图 2 传感器箱体结构图

Fig. 2 Sensor enclosure structure

顶部称重板 8 用于放置载荷. 悬臂梁 4 有四级,用悬臂梁紧固件固定于箱体四壁,高度分别相差 3 mm(理论上此范围在线性区间),均采用等强度梁. 光纤光栅分别粘贴于每级悬臂梁的上下表面,并从紧固件 6 的过孔中穿出,连接到解调装置. 支撑弹簧 2 使载荷重力以线性比例传递给悬臂梁. 每级悬臂梁各对应一个伸缩杆 3 及限位杆 5. 伸缩杆具有伸缩功能,该杆受力较小时锁定在



1—复位弹簧;2—外杆;3—限位弹簧;4—内杆;  
5—套筒;6—限位小球

图 3 伸缩杆结构图

Fig. 3 Extendable rod structure

伸缩杆在受力不同时具有两种状态:锁定状态和缩入状态. 当只有悬臂梁作用于伸缩杆时,伸缩杆受力较小,限位小球卡在凹槽中,内外杆相对位置锁定,见图 4a. 当悬臂梁形变接触到限位杆时,伸缩杆受力较大,限位小球从限位孔中弹出,进入导轨,伸缩杆自动收缩,见图 4b.

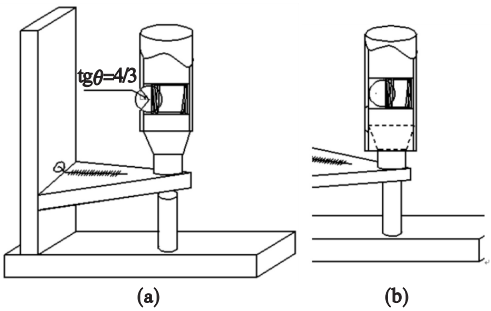


图 4 伸缩杆的位置状态

Fig. 4 Position of the extendable rod

(a)—悬臂梁作用时伸缩杆锁定状态;  
(b)—限位杆作用后伸缩杆缩入状态.

## 1.3 系统工作流程

1) 工作时,上方称重板受载荷重力作用向下运动,与之相连的伸缩杆随之运动. 伸缩杆最初处于锁定状态,顶在第 1 级悬臂梁上,使其变形;粘贴于第 1 级悬臂梁上的光纤光栅反射光谱发生移动,经过解调系统解调,可计算出载荷质量.

伸缩杆规格相同,由于各悬臂梁之间有高度差,故当载荷质量较小时,第 2,3,4 级悬臂梁没有进入工作状态;当其解调系统输出光强变化超过

2 nW 时 (最小分辨力为 1 g, 最小输出变化 0.6 nW, 2 nW 对应略大于 3 g 的过渡裕量), 则认为悬臂梁进入工作状态。

2) 为保证每级悬臂梁测量曲线的线性度, 将每级线性测量上限标定为悬臂梁挠度为 3 mm 时 (实际线性测量范围大于此值), 即相邻两级悬臂梁高度差为 3 mm。当载荷质量较大时, 第 1 级悬臂梁的线性测量范围已达标定上限  $\Delta I_{10}$ , 此时应使第 1 级悬臂梁停止工作, 第 2 级悬臂梁进入工作状态。设置各级悬臂梁下方限位杆与其高度差为 3.5 mm (略大于 3 mm, 提供一定测量裕度)。第 1 级悬臂梁向下运动接触到限位杆时, 使伸缩杆收缩, 悬臂梁不再继续变形, 第 2 级悬臂梁此时已处在工作位置。实际载荷对应的光强改变量为第 2 级悬臂梁当前光强改变量  $\Delta I_2$  加上第 1 级悬臂梁在变形 3 mm 时的光强改变量  $\Delta I_{10}$  (该数据已经过标定)。

3) 若测量范围仍然不够, 则可扩大测量范围到第 3 级直至第 4 级。

4) 当载荷撤离测量系统时, 在复位弹簧和支撑弹簧的作用下, 使伸缩杆、箱体回到初始位置。称重板与箱体连接处的阻尼弹簧可有效减小到达稳定过程的系统振荡。

相邻两级传感系统在工作范围过渡时, 若处理不当易产生误差。图 5 为第 1 级传感系统向第 2 级传感系统过渡的数据处理流程。 $\Delta I_{(m)}$  为载荷实际产生的光强改变量,  $\Delta I_{1\max}$  为第 1 级线性测量范围最大值。第 3 级, 第 4 级工作时数据处理方法同图 5。

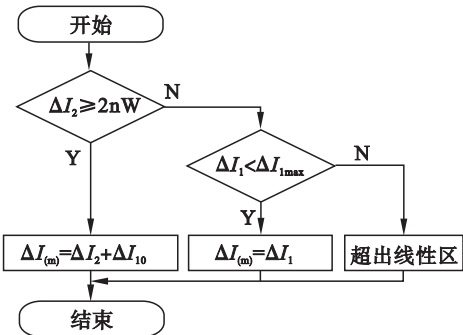


图 5 第 1 级传感系统向第 2 级过渡的数据处理流程  
Fig. 5 Data processing of the transition from the first level sensor system to the second level one

## 2 传感器解调原理

### 2.1 载荷质量与波长漂移分析

根据文献[8-9]可知, 单级悬臂梁自由端顶

点所受到的正应力  $F$  与其挠度关系为

$$F = 3wEI / (2L^3) \quad (1)$$

式中:  $w$  为悬臂梁自由端顶点的挠度;  $L$  为梁的长度;  $E$  和  $I$  分别为梁的弹性模量和惯性矩。

悬臂梁自由端顶点所受正应力与两光纤光栅中心波长漂移量的关系为

$$\Delta d = \Delta \lambda_a - \Delta \lambda_b = \frac{12(1 - P_e) \lambda_a L F}{h^2 b E} \quad (2)$$

式中:  $P_e$  为光纤光栅的有效弹光系数, 对于普通石英光纤,  $P_e$  可取 0.22;  $\lambda_a, \lambda_b$  为上、下表面光纤光栅中心波长;  $h, b$  为悬臂梁的厚度和宽度。式中无温度项  $T$ , 理论上该方法可实现温度补偿。悬臂梁对载荷提供的支持力远小于弹簧提供的弹力, 但二者竖直方向变形量相同。故支撑弹簧弹力  $F_T$  与悬臂梁挠度及载荷质量关系如式(3)所示,  $k$  为支撑弹簧劲度系数,  $m$  为砝码质量,  $g$  为重力加速度。

$$F_T = 8kw = mg \quad (3)$$

因此可得波长漂移量  $\Delta d$ :

$$\Delta d = 3gh(1 - P_e) \lambda_a m / (16kL^2) \quad (4)$$

除了砝码质量  $m$ , 其他各参量与悬臂梁的设计参数及光纤光栅的材料有关, 均为定值, 因此波长漂移量与砝码质量成线性相关关系。

### 2.2 输出光强信号与波长漂移量分析

本文设计的多级系统共有 4 组解调装置, 均采用光强解调方案。第 1 级解调光路见图 6。

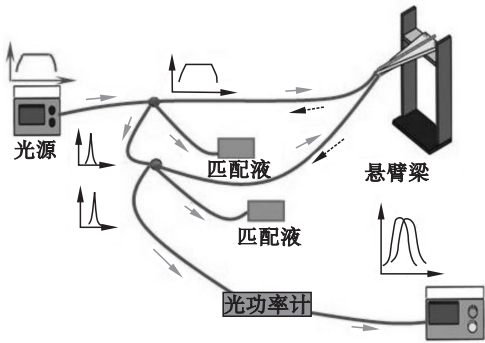


图 6 第 1 级光纤光栅解调光路  
Fig. 6 Fiber Bragg grating demodulation optical path of the first level

解调装置主要由宽带光源、解调光路、光功率计组成。经解调光路进入光功率计的光信号强度为

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} k_0 \rho R(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式中:  $k_0$  为光功率波动相关系数;  $\rho$  为宽带光源的光谱密度, 实验中, 解调系统所用光源带宽远大于传感光纤光栅的反射谱带宽, 且所用光纤光栅反

射谱带宽处在光源中心位置,因此可认为,在光纤光栅的频谱变化范围内 $\rho$ 是均匀的; $R(\lambda)$ 是上下两传感光栅合成的反射谱密度函数。

文献[10]给出了光纤光栅反射谱理论分析模型:

$$R(\lambda)=R_0\exp(-4\ln2(\frac{\lambda-\lambda_0}{\Delta\lambda})^2). \tag{6}$$

式中: $R_0$ 为反射谱强度峰值; $\lambda_0$ 为反射谱强度等于 $R_0$ 时对应的波长值; $\Delta\lambda$ 为反射谱的3 dB带宽. 悬臂梁上下表面光纤光栅相对反射强度仿真曲线如图7所示. 实际解调输出光强为二者功率重叠部分:

$$I=k\rho R_0[\int_{-\infty}^{\lambda_0}T_2(\lambda)d\lambda+\int_{\lambda_0}^{+\infty}T_1(\lambda)d\lambda]. \tag{7}$$

$$T_1(\lambda)=\exp(-4\ln2(\frac{\lambda-\lambda_1}{\Delta\lambda})^2),$$

$$T_2(\lambda)=\exp(-4\ln2(\frac{\lambda-\lambda_2}{\Delta\lambda})^2),$$

$$\lambda_1=\lambda_0-\frac{\Delta d}{2},\lambda_2=\lambda_0+\frac{\Delta d}{2}.$$

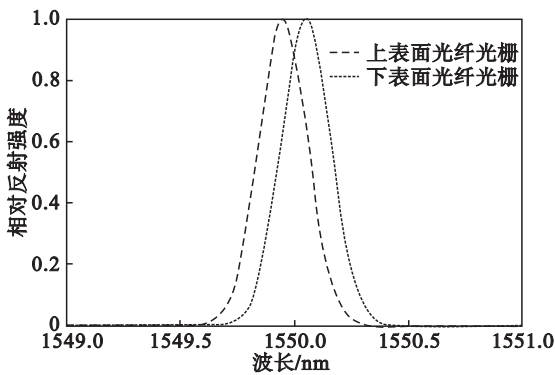


图 7 光纤光栅的相对反射强度仿真曲线  
Fig. 7 Simulating curves of relative reflection intensity of the fiber Bragg grating

光强与波长的关系为超越函数,已知中心波长漂移量可求其数值解. 理论仿真得其关系曲线如图8所示.

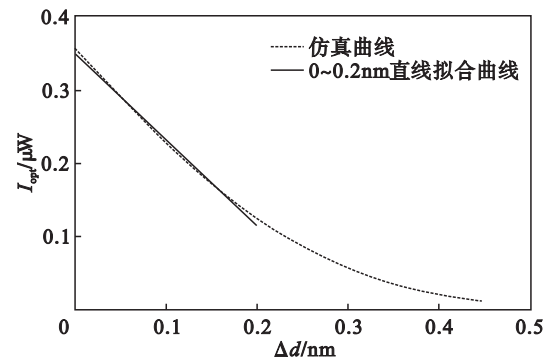


图 8 输出光强 $I_{\text{opt}}$ 与波长漂移 $\Delta d$ 关系及其拟合曲线  
Fig. 8 Relationship between the output intensity and the wavelength drift and the fitting curve

由图8可以看出,两光纤光栅中心波长漂移量大于0.2 nm时的仿真曲线线性度较差. 将0~0.2 nm的数据作直线拟合,求出的拟合曲线 $I_{\text{opt}}=-1.183\,2\Delta d+0.350\,9$ ,相关指数 $R^2=0.997$ . 因此设计时令 $\Delta d_{\text{max}}\leq 0.2\text{ nm}$ .

### 3 实验测试与分析

实验设计的4级悬臂梁以有机玻璃为材料,相关参数分别为: $L=200\text{ mm}$ , $b=40\text{ mm}$ , $h=2\text{ mm}$ . 实验时,先固定第1级悬臂梁,使其与对应的伸缩杆相接触,然后固定其他3级悬臂梁,使其高度各差3 mm. 维持光源恒定,施加载荷为0时,测得第1级输出光强为358.2 nW,对系统施加0到1.6 kg砝码,每次增加20 g,待系统稳定后,记录解调系统的各级光功率计检测值,并将其变化量 $\Delta I_{\text{opt}}$ 与输出光强初始值 $I_0$ 作比值处理.

作出施加载荷质量与相对光强改变量关系曲线,在保证测量精度的前提下,用最小二乘法对其进行拟合,其中第1级解调系统相对光强改变量与载荷关系及其拟合曲线如图9所示.

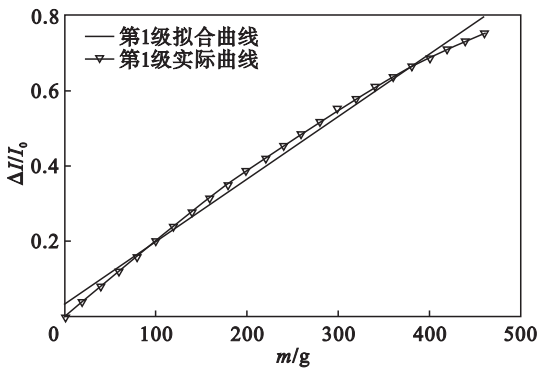


图 9 第1级相对光强与载荷关系及其拟合曲线  
Fig. 9 Relationship between relative light intensity and load of the first level and its fitting curve

求得拟合方程为 $\Delta I_{\text{opt}}/I_0=0.001\,7\,m+0.023\,4$ ,相关系数 $R^2$ 为0.996. 当载荷为400 g时,上下两光栅中心波长差为0.191 nm,由图9可看出,第1级传感系统在0~400 g的测量范围内,测量灵敏度为0.6 nW/g. 其余3级传感系统输出曲线特性与第1级相同,分别对应测量区间400~800 g,800~1 200 g,1 200~1 600 g,拟合方程相关系数均在0.99以上. 该结果验证了多级传感测量系统具有较好的应力响应性能,且可有效扩大测量范围.

(下转第1079页)