

农业装备升降装置非接触式光纤位移传感器设计与试验

闫光^{1,2} 卢建中¹ 孟凡勇^{1,2} 鹿利单² 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;

2. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016)

摘要: 为了解决农业设备位移的宽量程、高灵敏度非接触测量问题,提出一种基于 Peanut - shape 迈克尔逊干涉结构的非接触式光纤位移传感器。分析了光纤 Peanut - shape 迈克尔逊干涉原理,设计了将磁场与 Peanut - shape 结构形成的全纤式迈克尔逊干涉相结合的传感器结构,并通过磁场仿真,得到磁场强度曲线。建立了传感器应变标定系统和位移测试系统。试验结果表明:Peanut - shape 迈克尔逊干涉的光纤传感器应变灵敏度达到 1.82 pm/μ ϵ , 是普通光纤的 1.5 倍,线性度为 0.997;位移测试得到的光谱曲线与磁场仿真曲线结果一致,可以实现位移的测量,且线性拟合度达到 0.999。

关键词: 农业设备; Peanut - shape; 迈克尔逊干涉; 磁场; 光纤位移传感器

中图分类号: TP212.12; TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0147-06

Design and Experiment of Non-contact Fiber Optic Displacement Sensor for Lifting Device

YAN Guang^{1,2} LU Jianzhong¹ MENG Fanyong^{1,2} LU Lidan² ZHU Lianqing^{1,2}

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System,

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to solve the problems of non-contact displacement measurement, wide-range and high sensitivity measurement in agricultural machinery equipment, a non-contact optical fiber displacement sensor based on Peanut - shape Michelson interference structure was proposed. The Peanut - shape fiber Michelson interference principle was analyzed, and the sensor structure combining the magnetic field and the Peanut - shape structure in fiber-type Michelson interference was designed, and by simulating the magnetic field, the magnetic field strength curve was obtained, theoretical analysis shows that a good sine wave can be obtained within the range of 1 ~ 3 mm between the sensing detector and the magnetic scale. While there is a distance range from 0 mm to 1 mm, due to the large contact area, a sawtooth-like wave is obtained, according to results of theoretical analysis, the distance between the experimental sensor head and the magnetic scale is determined. The strain calibration system and a displacement test system of sensor were established. Experimental result showed that the Peanut - shape Michelson interference fiber sensor strain sensitivity reached 1.82 pm/μ ϵ , which was 1.5 times of that of bare fiber, and the linearity was 0.997; the spectral curve obtained by the displacement test was consistent with the magnetic field simulation curve, displacement measurement can be achieved, and linear fitting degree was 0.999. By encoding the permanent magnets, the direction of motion can be discerned.

Key words: agricultural machinery; Peanut - shape; Michelson interference; magnetic field; fiber displacement sensor

收稿日期: 2018 - 08 - 28 修回日期: 2018 - 09 - 27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51675053)、北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20170510)和长江学者与创新团队发展计划项目(IRT_16R07)

作者简介: 闫光(1979—),男,副教授,博士,主要从事光纤传感与光电器件研究,E-mail: 584851848@qq.com

通信作者: 祝连庆(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与激光器、精密测量研究,E-mail: zhulianqing@sina.com

0 引言

大型拖拉机、高效联合收获机等高端农业装备及关键核心零部件的信息采集、精准作业、智能决策是推进形成面向农业生产信息化的重要内容,被列为中国制造 2025 十大重点突破领域之一^[1-3]。位移是较为容易测得的物理量,通过相关知识的转化,可以得到诸如应变、温度、加速度、应力等所需工程数据^[4-5],且位移与其他物理量相比,更容易获得较高精度数据,因此位移量的监测是工程测量技术中最基本的测量参数。

传统的电测位移方法在实际工程中不具有抗电磁干扰能力、难以组网复用,所以光纤传感器应运而生^[6-7]。光纤具有灵敏度高、体积小、质量轻和不受外界环境电磁辐射干扰等优点,在工程应用中可以有很大的自由空间^[8]。

光纤位移传感器测量简单便捷,国内外科研人员对其做了大量研究。ZOU 等^[9]提出了由光纤光栅、双芯光纤和弹簧组成的用于位移测量的级联弹簧系统,测量范围达到 10 mm;贾旻等^[10]利用待测位移量可由反射光强变化得出的原理设计了基于反射式塑料光纤位移传感器,在 0~3 mm 位移范围内测量输出与实际位移呈线性关系,灵敏度为 2.13 mV/μm;张燕君等^[11]设计了一种基于悬臂梁结构的可调量程拉绳式光纤光栅位移传感器,传感器量程达到 60 mm,灵敏度为 47.7 pm/mm;ZHU 等^[12]使用两个 FBG 位移传感器,结合磁场搭建的非接触位移系统,实现了全范围、非接触、排除温度影响的位移测量;BABAIEV 等^[13]基于磁光效应非接触光纤位移传感器的算法研究,在 50 mm 测量范围内,非线性度不超过 0.01%。

虽然近年来位移传感器发展十分迅速,但在农业设备信息监测中^[14],上述位移传感器的量程范围仅限于纳米、微米、毫米、厘米级,这些特性限制了光纤在宽量程测量中的应用,而宽量程高灵敏度位移测量在实际工程领域中十分重要。本文提出基于 Peanut-shape 的迈克尔逊干涉结构的光纤位移传感器,将高精度、高灵敏度的全纤式迈克尔逊干涉结构与磁场相结合,由磁尺长度实现宽量程的测量。

1 传感测量原理与永磁阵列强度分析

光纤全纤式 Peanut-shape 迈克尔逊干涉结构如图 1 所示。

光纤输入光信号在经过 Peanut-shape 结构处时被分为两路光路,分别沿着纤芯和高阶包层膜进行传输,两路光传输一段距离后到达光纤最

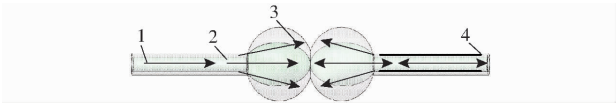


图 1 Peanut-shape 干涉结构示意图
Fig. 1 Diagram of Peanut-shape interference structure
1. 入射光 2. 纤芯光 3. 包层光 4. 反射光

终端面并从最终端面反射回来(最终端面相当于一面反射镜)。当在高阶包层膜中反射回来的光再次经过 Peanut-shape 结构时,会与纤芯中的光重新耦合在一起。由于纤芯和包层的相位不同,因此会发生两束光的干涉,即迈克尔逊干涉。所形成的迈克尔逊干涉可以用来测量许多环境参数^[15]。纤芯与包层两路光的相位差 $\Delta\phi$ 可以表示为

$$\Delta\phi = 4\pi\Delta n_{eff} \frac{L}{\lambda} = (2N + 1)\pi \tag{1}$$

- 其中
- 式 中 Δn_{eff} ——纤芯与包层有效折射率差
- n_{eff}^{co} ——纤芯基膜有效折射率
- n_{eff}^{cl} ——包层基膜有效折射率
- L ——Peanut-shape 结构与反射端面的干涉距离, m
- N ——干涉峰波谷或波峰阶数
- λ ——入射波长, m

干涉谱的光强可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\phi \tag{2}$$

- 式 中 I ——干涉谱光强, W
- I_1 ——纤芯光光强, W
- I_2 ——包层光光强, W

当相位差 $\Delta\phi = (2N + 1)\pi$ 时,可以得到第 N 阶干涉峰波谷的中心波长

$$\lambda_N = \frac{4\pi(n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl})L}{(2N + 1)\pi} \tag{3}$$

2 个干涉峰之间的距离 (FSR) 为

$$\Delta\lambda_N = \frac{\lambda^2}{2(n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl})L} \tag{4}$$

当作用在光纤迈克尔逊干涉结构上的应变或温度发生变化时,纤芯与包层的有效折射率及干涉距离 L 都会产生变化,从而引起干涉条纹的变化,由式(3)、(4)可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_N}{\lambda_N} &= K_T\Delta T + K_\varepsilon\Delta\varepsilon = \\ &\left(\frac{1}{\Delta n_{eff}}\frac{\partial\Delta n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)\Delta T + \\ &\left(1 + \frac{1}{\Delta n_{eff}}\frac{\partial\Delta n_{eff}}{\partial\varepsilon}\right)\varepsilon \end{aligned} \tag{5}$$

- 式 中 $\frac{\partial L}{\partial T}$ ——热膨胀系数

$\frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial T}$ ——光纤纤芯材料与包层材料的热光系数差, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
 ε ——作用在光纤的应变, $\text{m}/^{\circ}\text{C}$
 K_T ——温度系数, $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$
 ΔT ——温度变化量, $^{\circ}\text{C}$
 K_e ——应变系数, nm
 $\Delta \varepsilon$ ——应变变化量

根据上述分析可知, 基于光纤全纤式 Peanut-shape 迈克尔逊结构可以用来对外界参数进行测量。利用麦克斯韦方程组和边界条件, 对磁场建立有限元分析模型, 如图 2 所示。

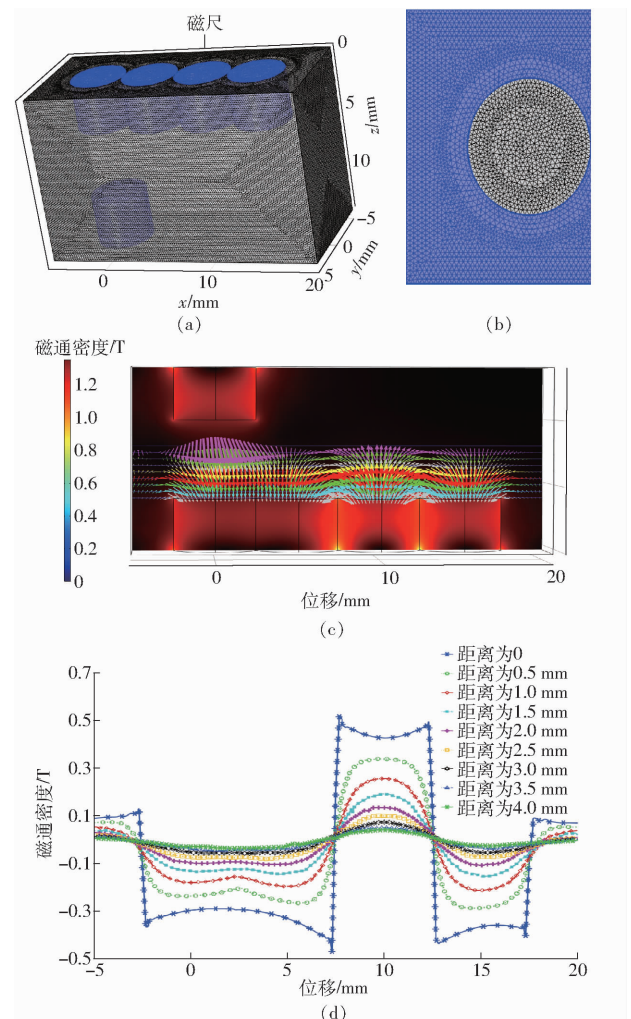


图 2 有限元分析
Fig. 2 Finite element analyses

对磁尺阵列表面的磁场及传感探头和迈克尔逊干涉的感应灵敏度及输出信号进行分析。仿真模型是由等效于线性滑动的 4 个永磁体阵列组成的。磁尺阵列上方为传感器探测器所在位置。通过对探测器进行移动, 会使其施加的磁场和作用于 Peanut-shape 迈克尔逊干涉结构的应变发生变化, 从而达到对位移的探测与信号处理。

进行有限元分析时对永磁体磁场进行静态磁场

计算与仿真。仿真计算时, 空气层厚度为 6 mm, 磁标距为 10 mm, 进行仿真的 4 个永磁体阵列使用的是 NNSN 排序, 前 2 个永磁体呈 NN 排序, 后 2 个永磁体呈 SN 排序, 同一张图得到两种排序的磁场曲线仿真结果。后面试验中则使用的均为 NS 交替排序方法。空气层的磁场强度较为显著, 为了得到更可靠的结果, 需要对其更为精细分割, 如图 2a、2b 所示。

图 2c 为与磁尺的距离从 0 到 4 mm 的磁尺表面磁感应强度密度分布, 每 0.5 mm 为一个步进。该图中的曲线由箭头方向不同的磁感应强度构成, 横坐标表示磁尺阵列的一段, 纵坐标表示为磁感应强度。如图 2d 所示, 距离磁尺的距离越近, 磁感应强度分布的变形就越严重, 类似于锯齿波; 而与磁尺的距离越大, N/S 排序连续磁场强度曲线越好, 越接近正弦。磁力的正弦曲线计算公式可以表示为^[16]

$$F = B \sin \left(2\pi \frac{x}{\tau} \right) \quad (6)$$

式中 B ——磁力振幅, N
 τ ——磁尺阵列 N/S 一个周期内的间距, m
 x ——传感探测器与磁尺阵列相对移动距离, m

位移传感器量程由磁尺阵列长度决定, 磁尺阵列可根据需求无限增加, 因此认为量程可无限增大。由图 2d 可知, 在传感探测器与磁尺之间的距离为 1~3 mm 时, 能够确定理想的正弦波形。通过理论分析, 可以找到最佳的磁间距来获得更好的分辨率。

由于光纤属于各向同性的圆柱结构, 所以光纤所受到的应力可以分为 3 部分, 沿着光纤方向的轴向应力在光纤波长变化中发挥着重要作用。

在弹性范围内, 给光纤施加轴向力, 光纤受到的横向压缩或拉伸, 可以使用胡克定律表示

$$\begin{cases} \sigma = c\varepsilon \\ F = A\sigma \end{cases} \quad (7)$$

式中 σ ——应力张量
 c ——弹性模量
 A ——横截面积

实验室环境, 在不考虑温度影响的情况下, 联立式(5)~(7), 可以得到光纤中心波长变化与位移引起的应变之间的关系

$$\frac{\Delta \lambda_N}{\lambda_N} = D \sin \left(2\pi \frac{x}{\tau} \right) \quad (8)$$

其中 $D = BK_e / (Ac)$

式中 D ——灵敏度, pm
 D 可以通过改变 B 来调整, 当磁场增加或探测器与磁尺间的间隙变小时, 灵敏度增高。

2 传感器结构制作与封装

利用光纤全纤式 Peanut - shape 迈克尔逊干涉结构及磁力效应进行了传感器设计, 光纤本身的 Peanut - shape 结构使光路产生迈克尔逊干涉结构, 产生干涉光谱, 传感探头为永磁体, 负责将磁力信号转换为位移参数的信号。磁力强度的变化会使得 Peanut - shape 迈克尔逊结构的干涉谱发生变化。

使用 CO₂ 激光熔接工作站 (Fujikura, LZM100 型) 对光纤进行 Peanut - shape 结构制作。图 3 为试验过程中利用光纤熔接机制作出的光纤 Peanut - shape 结构显微图。

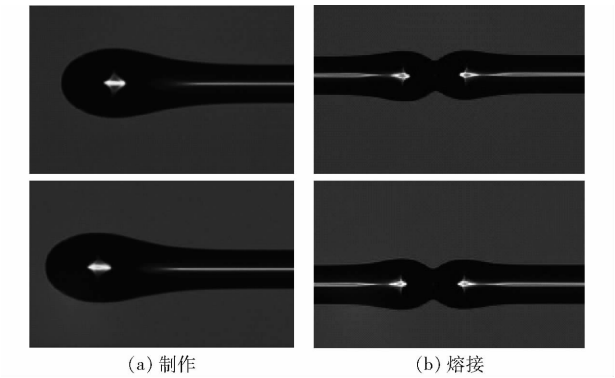


图 3 光纤 Peanut - shape 结构显微图
Fig. 3 Optical fiber Peanut - shape micrographs

具体制作过程如下: 首先将一端切平的光纤放入光纤熔接机中, 对光纤端面进行熔融。系统具体参数设置如下: 光纤球过渡直径设置为 180 μm , 可调整偏差为 5 μm , 光纤直径 125 μm , 预热 10 s。由于放电能量较大, 会使光纤切平端面熔为一个球形。待两根光纤球形端面制作完成后, 对光纤进行熔接, 形成 Peanut - shape 结构, 构成迈克尔逊干涉。

封装时, 将弹簧套在制作的光纤 Peanut - shape 结构处, 弹簧长度约 14 mm, 使用环氧树脂胶 (DP420) 将弹簧与光纤一端胶粘在永磁体表面, 并置于锥形橡胶管中, 在锥形橡胶管尾部套入光纤保护套管, 使用环氧树脂胶 (DP420) 进行胶装。封装完成的传感器及位移平台系统示意图如图 4 所示。

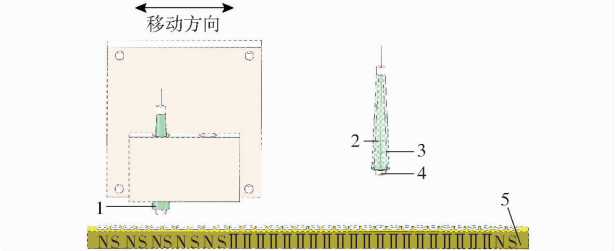


图 4 传感器及位移平台示意图
Fig. 4 Schematic of sensor and displacement platform
1. 传感器 2. 弹簧 3. Peanut - shape 结构 4. 永磁体 5. 磁尺

3 试验与结果分析

3.1 应变标定试验

取制作好的 Peanut - shape 光纤, 进行应变标定试验。将光纤粘贴于拉伸试验件, 并将拉伸件夹在 MTS 拉伸试验机上, 对其施加应变 0 ~ 1 600 $\mu\epsilon$, 光谱仪采集的光谱如图 5 所示。

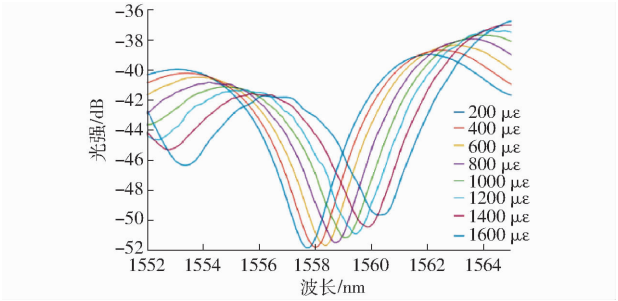


图 5 不同应变下的光谱
Fig. 5 Spectrum of different strains

使用 Matlab 进行波谷寻峰, 得到应变与中心波长的标定关系如图 6 所示。

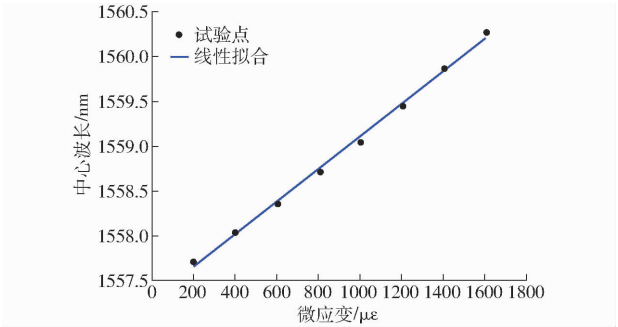


图 6 应变标定
Fig. 6 Strain calibration

3.2 位移试验系统

取相同规格的光纤进行封装, 对封装完成的传感器进行位移测试, 评估传感器性能。采用 AQ6370D 型光谱分析仪、光源、计算机、PSMX25 系列微位移平台、步进电机、开关电源等搭建试验系统。整体试验系统如图 7 所示。

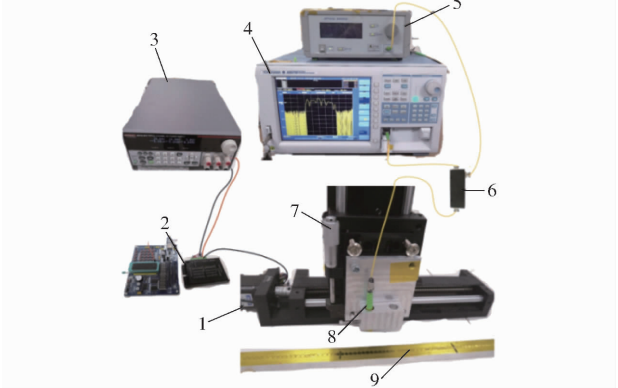


图 7 试验系统
Fig. 7 Field experimental system

1. 步进电机 2. 控制驱动器 3. 供电电源 4. 光谱仪 5. 光源
6. 耦合器 7. 微位移平台 8. 传感器 9. 磁尺

光源发出的光波通过耦合器进入光纤 Peanut - shape 迈克尔逊结构的光纤传感器中,经反射后将光谱信号传输到光谱仪中,通过光谱仪对返回光谱数据的监测,能够评价传感器性能。传感器的迈克尔逊干涉反射谱如图 8 所示。

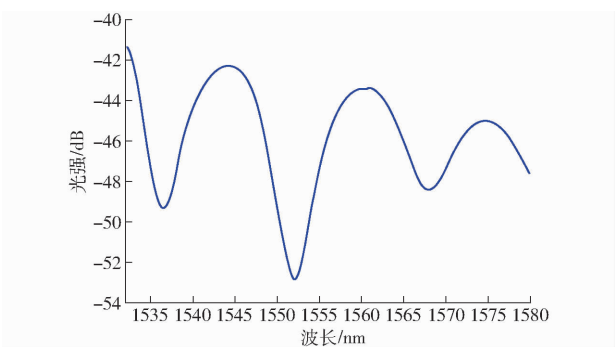


图 8 干涉反射谱
Fig. 8 Interference reflection spectrum

波峰或波谷的中心波长及偏移量可通过光谱分析仪进行监测,步进电机的电压设为恒压 20 V,通过调节步进电机控制器(JF24D03M 型)的 DIP 开关来控制电机速度与方向,通过不同的端口开关,可以控制不同的转速模式及运动方向。

3.3 试验结果分析

分析图 2d、图 5 及式(6)~(8)可知,光谱仪物理分辨率固定为 0.02 nm,传感探头与磁尺距离越近时,传感器位移相同时所受到的力及应变 ε 就越大,光谱漂移量越大。缩小传感探头与磁尺间距离,或增加永磁体强度,即可提高测量精度与灵敏度。

分析图 6 可以得到中心波长 y 与微应变 ε 的关系式为

$$y = 0.00182\varepsilon + 1557.294 \quad (R^2 = 0.997) \quad (9)$$

分析式(9)可知,Peanut - shape 光纤传感器应变灵敏度达到 1.82 pm/ $\mu\varepsilon$,是普通裸光纤的 1.5 倍,灵敏度得到了较大的提高,线性度为 0.997。

当探测器与磁尺之间的距离过小时,位移与磁场之间的关系类似于锯齿波。所设计的传感器灵敏度可调,通过探测器与磁尺间距离的调整,可以改变传感器的灵敏度,距离越近,灵敏度越高。综合比较,探测器与磁尺间的间隙为 1.5 ~ 2 mm 之间时,灵敏度与反射谱波形比较合适。

试验中,传感器的位置由 PSMX25 系列精密位移平台进行驱动与方向的控制,探测器与磁尺之间的距离为 2 mm。使用 Matlab 对随位移变化的其中一个波谷中心波长进行拟合。图 9 试验曲线是传感器干涉谱波谷中心波长随位移变化的拟合曲线,呈正弦曲线趋势。图 2d 为仿真曲线。图 9 与图 2d 的后半段 NS 仿真曲线都呈正弦曲线分布,故两者趋

势一致。

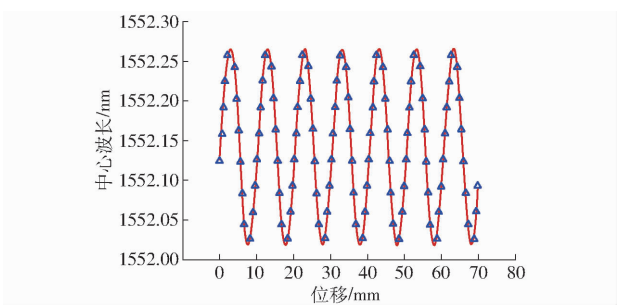


图 9 位移与中心波长关系拟合曲线
Fig. 9 Fitting diagram of relation between displacement and central wavelength

拟合曲线的公式可以表示为

$$\lambda_N = 0.9823 \sin\left(2\pi \frac{x}{10}\right) + 1552.15 \quad (10)$$

分析图 9 及式(10)可知,封装完成的光纤 Peanut - shape 迈克尔逊干涉位移传感器灵敏度高,线性拟合度达 0.999,最大波长偏移量为 0.982 3 nm,制作的 Peanut - shape 光纤传感器应变灵敏度为 1.82 pm/ $\mu\varepsilon$,即应变测量可以达到 545.7 $\mu\varepsilon$ 。

位移传感器方向辨别,可通过两个传感器形成正弦余弦曲线相互作用,或对磁尺永磁体的序列排序编码实现^[12,17]。

由文献[12]可知,将两个传感器并排在磁尺上方,两传感器探头间隔为 $(1/4 + n)$ 个永磁体距离,1 号传感器在位移时得到的数据拟合为正弦波,2 号传感器数据拟合为余弦波。当正方向移动时,1 号传感器领先于 2 号传感器 90° 相位差,反之,2 号传感器领先于 1 号传感器 90° 相位差,通过观察拟合数据的相位,可以得出传感器的移动方向。

由文献[17]电磁栅位移传感器设计可知,对磁尺上的永磁体进行霍尔编码排序,N、S 极输出高低电平,对应不同的三位、四位编码。通过编码与查表的方式及观察光谱的变化,可以判定传感器的运动方向,后续试验会继续验证。

4 应用举例

联合收获机作业时,需要调节割茬高度,割台必须升降方便。割台升降油缸采用液压装置,在使用时,升降的距离十分重要,若出现故障,会造成很大的安全和经济损失,因此需要对升降距离进行实时监测。

以北京 - 2.5 型联合收获机为例,将 Peanut - shape 迈克尔逊干涉光纤位移传感器应用于割台升降装置中,如图 10 所示。

将割台柱塞开一横槽,置入永磁体阵列,形成磁尺装置,传感器固定在卡箍,悬于磁尺上方,构成位

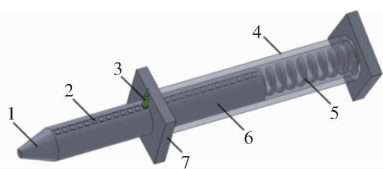


图 10 割台升降装置

Fig. 10 Lifting device of cutting table

1. 顶杆 2. 永磁体 3. 传感器 4. 缸体 5. 弹簧 6. 柱塞
7. 卡箍

移测试系统。当柱塞活动时,可对升降位移参数进行实时监测。

5 结论

(1)提出一种基于光纤全纤式 Peanut-shape 迈克尔逊干涉结构,设计了一种非接触式光纤位移传感器,该结构与传统位移传感器相比,易于制作,成

本低,封装简单,并可结合磁场进行仿真。数值仿真模拟表明,传感器探头和磁尺之间的间隙对传感器灵敏度与输出曲线有一定影响。传感器量程由磁尺阵列长度决定。

(2)对传感器进行测试,建立了应变标定系统与位移测试系统。Peanut-shape 迈克尔逊干涉的光纤传感器应变灵敏度达到 $1.82 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度为 0.997;位移光谱曲线与仿真结果一致,线性拟合度为 0.999,可测量应变达到 $545.7 \mu\epsilon$ 。

(3)通过减小传感探头与磁尺的间距或提高磁场强度可以提高灵敏度系数,使得传感器具有较高精度与灵敏度。在仿真曲线和试验拟合曲线中都可以观察到很好的中心波长与位移曲线关系。此外,传感器灵敏度和测量范围都可以通过改变设备的尺寸进行调节。

参 考 文 献

- [1] 李耀明,陈劲松,梁振伟,等.履带式联合收获机差速转向机构设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):127-134.
LI Yaoming, CHEN Jinsong, LIANG Zhenwei, et al. Design and experiment of differential steering mechanism for track combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):127-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160718&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.018. (in Chinese)
- [2] 叶秉良,朱浩,俞高红,等.旋转式水稻钵苗移栽机构动力学分析与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):53-61.
YE Bingliang, ZHU Hao, YU Gaohong, et al. Dynamics analysis and tests of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):53-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160508&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.008. (in Chinese)
- [3] LIU S X. Innovation design: made in China 2025[J]. Design Management Review, 2016, 27(1):52-58.
- [4] 张小龙,丁文俊,葛胜迅,等.乘用车驻车制动性能转毂测试与评价方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):361-367.
ZHANG Xiaolong, DING Wenjun, GE Shengxun, et al. Test and evaluation method for parking brake performance of passenger vehicle based on dynamometer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):361-367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170346&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.046. (in Chinese)
- [5] 武亮,彭东林,鲁进,等.基于平面线圈线阵的直线时栅位移传感器[J].仪器仪表学报,2017,38(1):83-90.
WU Liang, PENG Donglin, LU Jin, et al. Linear time grating displacement sensor based on linear array of planar coils[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1):83-90. (in Chinese)
- [6] 位耀光,张力彩,李道亮.智能光纤浊度传感器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):199-204.
WEI Yaoguang, ZHANG Licai, LI Daoliang. Research and experiment of intelligent optical fiber turbidity sensor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):199-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.032. (in Chinese)
- [7] 郭永兴,熊丽,孔建益,等.滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J].光学精密工程,2017,25(1):50-58.
GUO Yongxing, XIONG Li, KONG Jianyi, et al. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1):50-58. (in Chinese)
- [8] 张川,刘新阳,王毅,等.环流型光纤生物膜制氢反应器的底物传输与降解特性[J/OL].农业机械学报,2015,46(3):174-179.
ZHANG Chuan, LIU Xinyang, WANG Yi, et al. Performance of substrate transport and bio-degradation within annular optical-fiber-illuminating biofilm reactor during continuous photo-H₂ production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):174-179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150324&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.024. (in Chinese)

- YU Mingming, ZENG Yongnian. Cellular automata model of urban spatial expansion considering the differences of land types transition and its application research [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20 (1):48–56. (in Chinese)
- [25] 张启斌, 岳德鹏, 于强, 等. 磴口县景观格局 AES-LPI-CA 模型演化模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5):128–134.
- ZHANG Qibin, YUE Depeng, YU Qiang, et al. Simulation of landscape pattern evolution in Dengkou County using AES-LPI-CA model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5):128–134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170515&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.015. (in Chinese)
- [26] SOARES-FILHO B S, CERQUEIRA G C, PENNACHIN C L. DINAMICA—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 154(3):217–235.
- [27] ALMEID A C M, GLERIANI J M, CASTEJON E F, et al. Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(9):943–963.
- [28] 曹敏, 史照良. 基于遗传神经网络获取元胞自动机的转换规则[J]. *测绘通报*, 2010(3):24–27.
- CAO Min, SHI Zhaoliang. Transformation rules of cellular automata based on genetic neural network [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2010(3):24–27. (in Chinese)
- [29] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. *地理研究*, 2005, 24(1):19–27.
- LI Xia, YE Jiaan. Cellular automata for simulation complex land use systems using neural networks [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1):19–27. (in Chinese)
- [30] 毛健, 赵红东, 姚婧婧. 人工神经网络的发展及应用[J]. *电子设计工程*, 2011, 19(24):62–65.
- MAO Jian, ZHAO Hongdong, YAO Jingjing. Application and prospect of artificial neural network [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(24):62–65. (in Chinese)
- [31] 田静, 邢艳秋, 姚松涛, 等. 基于元胞自动机和 BP 神经网络算法的 Landsat-TM 遥感影像森林类型分类比较[J]. *林业科学*, 2017, 53(2):26–34.
- TIAN Jing, XING Yanqiu, YAO Songtao, et al. Comparison of Landsat-TM image forest type classification based on cellular automata and BP neural network algorithm[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(2):26–34. (in Chinese)
- [32] 韦春竹, 郑文锋, 孟庆岩, 等. 基于元胞自动机的遗传神经网络在土地利用变化模拟分析中的应用[J]. *测绘工程*, 2014, 23(1):45–49.
- WEI Chunzhu, ZHENG Wenfeng, MENG Qingyan, et al. Genetic neural network based on cellular automata applied to the simulation analysis of land use change [J]. *Engineering of Survey and Mapping*, 2014, 23(1):45–49. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- [9] ZOU Y, DONG X, LIN G, et al. Wide range FBG displacement sensor based on twin-core fiber filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(3):337–343.
- [10] 贾旻, 孙伟. 基于反射式塑料光纤传感器的微位移测量技术研究[J]. *电子测试*, 2017(9):45–46.
- JIA Min, SUN Wei. Research on micro-displacement measurement technology based on reflective plastic optical fiber sensor [J]. *Electronic Test*, 2017(9):45–46. (in Chinese)
- [11] 张燕君, 田永胜, 付兴虎, 等. 可测量程拉绳式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. *光电工程*, 2017, 44(6):626–632.
- ZHANG Yanjun, TIAN Yongsheng, FU Xinghu, et al. Adjustable range draw-wire type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(6):626–632. (in Chinese)
- [12] ZHU L, LU L, ZHUANG W, et al. Non-contact temperature-independent random-displacement sensor using two fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(3):447–453.
- [13] BABAEV O G, MATYUNIN S A, PARANIN V D. Linearization of positional response curve of a fiber-optic displacement sensor[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 302(1):012051.
- [14] 郭俊, 姬长英, 方会敏, 等. 正反旋转耕后土壤和秸秆位移试验分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):21–26.
- GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up-cut and down-cut rotary tillage[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):21–26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160504&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.004. (in Chinese)
- [15] WU D, ZHU T, LIU M. A high temperature sensor based on a Peanut-shape structure Michelson interferometer[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24):5085–5088.
- [16] LU L, ZHUANG W, LI H, et al. Fiber Bragg grating-based measurement of random-rotation parameters[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2):211–217.
- [17] 陈亮. 磁栅绝对直线位移传感器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.