

# 基于蛛网共振感知原理的可穿戴柔性应变传感器与棉秆起拔力原位检测

张佳喜<sup>1,2</sup> 李肖烽<sup>1,2</sup> 王毅超<sup>1,2</sup> 邢春晓<sup>1,2</sup> 李金明<sup>1,2</sup> 申世龙<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 针对棉秆拔除过程起拔力无法精准获取问题,本文基于蛛网共振感知原理,设计一种新型棉花茎秆可穿戴仿生柔性应变传感器,对棉秆起拔力进行原位检测。使用 Solidworks 软件设计 2 种蛛网仿生结构,并通过有限元仿真确定最佳蛛网结构几何参数(半径梯度为 36、38、40 mm,线宽和间距均为 1 mm),以热塑性聚氨酯(TPU)为弹性基底,采用丝网印刷技术制备并封装柔性传感器,搭建数据采集系统对传感器的灵敏度、响应时间、漂移和稳定性等性能进行测试。测试结果表明,传感器灵敏度系数(GF)随应变呈线性增长,响应时间为 250 ms,恢复时间为 590 ms,经过 100 次拉伸循环,电阻变化表现出良好的稳定性,应变在 0% ~ 12% 范围内最大迟滞误差为 3.6%,且温度波动 -15 ~ 25℃ 时电信号变化微弱。通过传感器-棉秆静态载荷标定试验,将棉花茎秆的力信号转换成电信号,两者输出信号变化趋势一致,并建立了起拔力-电阻变化模型( $R^2 = 0.998$ ),验证试验结果平均相对误差不大于 4.78%。田间测试结果验证了传感器在棉秆拔除过程能实时监测,准确感知起拔力动态变化。研究结果可为棉秆收获装备优化改进提供数据支撑,为柔性传感技术在各种作物原位检测的应用提供参考。

**关键词:** 蛛网共振; 柔性应变传感器; 仿生结构; 原位检测

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)14-0022-10

OSID:



## Wearable Flexible Strain Sensor Based on Principle of Spider-web Resonance Sensing and In-situ Detection of Cotton Stalk Pulling Force

Zhang Jiayi<sup>1,2</sup> Li Xiaofeng<sup>1,2</sup> Wang Yichao<sup>1,2</sup> Xing Chunxiao<sup>1,2</sup> Li Jinming<sup>1,2</sup> Shen Shilong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** In response to the problem that the pulling force during cotton stalk removal cannot be accurately obtained, based on the principle of spider-web resonance perception, a type of wearable bionic flexible strain sensor for cotton stalks was developed to conduct in-situ detection of the pulling force. Two types of web bionic structures were designed using Solidworks software, and the optimal geometric parameters of the web structure (radius gradient of 36 mm, 38 mm, and 40 mm, line width and spacing of 1 mm) were determined through finite element simulation. Using thermoplastic polyurethane (TPU) as the elastic substrate, the flexible sensor was fabricated and encapsulated by screen printing technology, and a data acquisition system was set up to test the sensor's sensitivity, response time, drift, and stability. The test results showed that the sensor's sensitivity coefficient (GF) was increased linearly with strain, the response time was 250 ms, the recovery time was 590 ms, and after 100 stretching cycles, the resistance change exhibited good stability, with a maximum hysteresis error of 3.6% within a strain range of 0% to 12%, and the electrical signal change was weak when the temperature fluctuated between -15℃ and 25℃. Through the static load calibration test of the sensor and cotton stalks, the force signal of the cotton stalks was converted into an electrical signal, and the output signal change trends of both were consistent. A tensile force - resistance change model ( $R^2 = 0.998$ ) was established, and the average relative error of the verification test results was no more than 4.78%. The field test results

收稿日期: 2025-04-22 修回日期: 2025-06-05

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目(XJJBGS-MG202403)、国家自然科学基金项目(52365038)和科技创新领军人才项目(2024TSYCLJ0014)

**作者简介:** 张佳喜(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事循环农业技术与装备研究,E-mail:563810112@qq.com

verified that the sensor could accurately monitor the dynamic changes of the pulling force during the cotton stalk removal process in real time. The research results can provide data support for the optimization and improvement of cotton stalk harvesting equipment and offer a reference for the application of flexible sensing technology in-situ detection of various crops.

**Key words:** spider-web resonance; flexible strain sensor; bionic structures; in-situ detection

0 引言

可穿戴柔性传感技术作为新兴交叉领域,已在人体健康监测、医疗诊断及人机交互等方向广泛应用。在现代农业发展的背景下,智能感知技术正推动着我国传统农业向智慧化、信息化方向转型<sup>[1]</sup>。在棉秆收获过程,棉秆起拔力精准获取成为棉秆拔除装备设计的关键因素<sup>[2]</sup>。现阶段传感器与植物生理状态相结合,推动了新型植物可穿戴传感器的发展<sup>[3]</sup>,通过实时原位采集植物状态信息,为构建智能化农业生产体系提供了创新性技术<sup>[4]</sup>。

传统刚性传感器会造成植物表面损伤,然而柔性可拉伸传感器能够紧密附着在作物表面,实现原位实时监测<sup>[5]</sup>。黄窈<sup>[6]</sup>制作了一种具有纳米银膜和双 V 形凹槽仿生植物传感器,并作为蝎子微尺度狭缝感受器监测植物生长。Zhang 等<sup>[7]</sup>依据柔性传感器的延展性与透气性,受 3D 折纸艺术启发,研制了一套三维折纸结构的穿戴式南瓜叶片传感器用于监测伸长量与微环境,推动了植物柔性传感技术在植物表型监测等领域应用。Wang 等<sup>[8]</sup>研制一种蝎子夹缝-蜘蛛网耦合的仿生柔性应变传感器,具有灵敏度高、结构稳定、耐用性好的特点,主要应用于人体运动检测和语音检测。以上研究结果表明,柔性可穿戴传感器可以凭借其易附着在植物表面的优势,为捕捉植物表面力学信号提供了新思路,从而对植物状态进行实时监测,对农业可持续性发展具有重要意义<sup>[9]</sup>。

目前所研制的植物柔性传感器无法准确监测棉秆拔除时多方向力学特征,且复杂的田间环境会导致信号漂移,因此本文设计一种基于蛛网共振全向感知机制棉花茎秆起拔力原位监测的可穿戴仿生柔性传感器。设计传感层结构并利用有限元仿真确定蛛网结构的详细参数,搭建传感器数据采集系统,开展传感器灵敏度和机械鲁棒性测试,验证传感器的有效性和可靠性,对柔性传感器和棉秆进行静态载荷标定试验,在棉秆拔取过程对棉秆进行起拔力原位监测。以期能够精准获取棉秆拔除过程力学响应信息,为棉秆拔除装置参数优化提供关键数据支撑。

1 材料和方法

1.1 蛛网共振感知原理

传感器性能主要受敏感单元的材料和结构影响,受蛛网共振全向感知机制启发,通过优化传感器结构提高灵敏度<sup>[10]</sup>。

自然界中蜘蛛网具有独特的神经感知系统,是一种“天然传感器”,利用丝网振动感应捕捉猎物<sup>[11]</sup>,通过径向对称的支撑框架与螺旋排列的丝线协同作用,体现各向均匀分布力特性,有效抑制应力集中现象<sup>[12]</sup>。蜘蛛网具有多尺度机械共振感知能力,机械响应与信号转化机制为柔性传感器结构设计提供了依据。相较于常见的矩形或线性格网结构应变传感器,蛛网结构在承载变形时具备多个传导路径和信号响应均衡性,增加了传感器对微小变化的灵敏度,适合棉秆拔除时应力状态下全向感知,如图 1 所示。

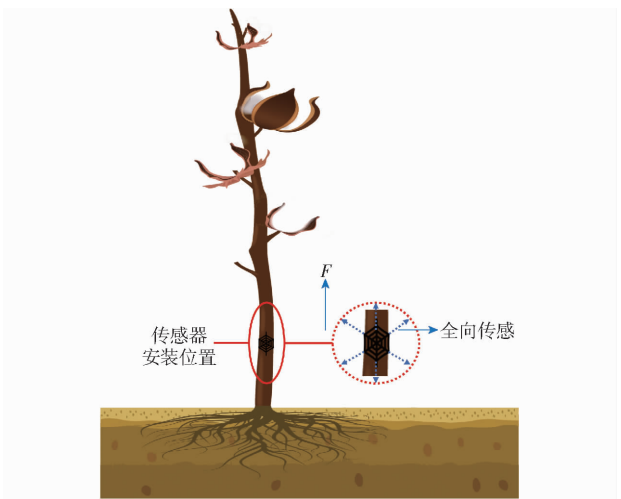


图 1 传感器的安装和全向感知示意图

Fig. 1 Schematic of sensor installation and omnidirectional perception

1.2 柔性传感器设计和制备

1.2.1 蛛网结构设计

为增强传感器在传感范围内全向响应特性,使用 Solidworks 2022 设计 2 种不同蛛网结构模型,并导入 Abaqus 软件进行有限元仿真。考虑到茎秆直径和后期传感器安装,2 种结构整体长度和宽度均保持一致。如图 2a ~ 2d 所示,传感器由柔性基底层和导电传感层组成,在模型一侧施加固定约束,另一侧分别沿 0°和 90°方向施加相同位移,网格划分为

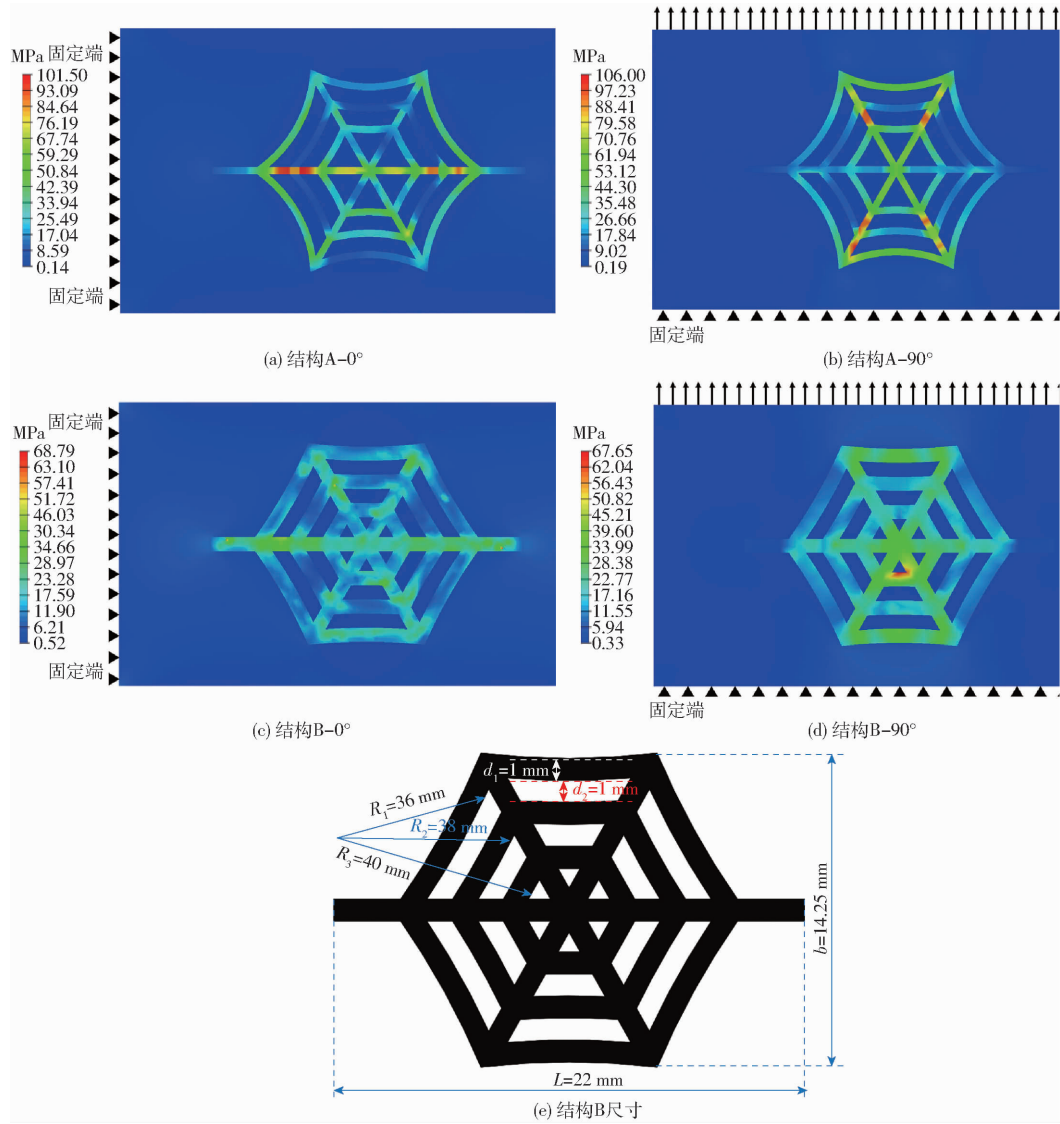


图 2 有限元仿真

Fig. 2 Finite element simulation

0.1,材料属性设置为密度  $1.21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量 20.02 MPa,泊松比 0.47<sup>[13]</sup>。

由图 2 可知,结构 B 在 0°和 90°方向最大应力比结构 A 分别降低 32.2%和 36.18%,且有效降低了局部应力集中现象,各方向应变响应较为均衡,有利于全向性感知和增强传感器对外界微小变化的敏感性,验证了结构 B 作为设计方案的可行性。综上分析,蜘蛛网状结构模型几何参数如图 2e 所示,整体长度  $L$  为 22 mm,宽度  $b$  为 14.25 mm,由外层到中心层,半径  $R_1$  为 36 mm, $R_2$  为 38 mm, $R_3$  为 40 mm,线宽  $d_1$  为 1 mm,每层间距  $d_2$  为 1 mm。

1.2.2 制备方法

柔性蛛网传感器制备流程如图 3a 所示,使用四面制备器将 TPU 胶体均匀地涂在光滑的玻璃基材上,将涂布的基材置于 50℃真空干燥箱中加快固化,形成厚度为 0.15 mm 的 TPU 基材<sup>[14]</sup>。在网版上定制出需要的图案后,取洁净 TPU 薄膜置于印刷

台上并固定,防止印刷时发生偏移。将 200 目丝网放置在 TPU 基板上方使两者紧密粘合,适量的丝网印刷油墨沉积在网板上,油墨膜厚度通过印刷压力和刮板角度调节,将刮板倾斜 45°并往复施加压力,确保丝网印刷过程油墨在 TPU 基材上无缝转移,从而勾勒出目标图案电极<sup>[15]</sup>。将印制后的图案在 80℃真空干燥箱中干燥 20 min,增加油墨层与 TPU 薄膜之间的附着力。为实现传感器与外部电路稳定连接,采用导电银浆对传感电极进行封装处理。最后在室温下干燥 1 h,使银浆完全固化。如图 3b 所示,对 TPU 作为基底的柔性应变传感器进行测试,表现出优异的柔韧性、拉伸性和可弯曲性。

1.3 数据采集系统设计

为实时记录传感器电阻变化,开发了配套的传感器信号采集系统<sup>[3]</sup>,主要由数据采集模块和上位机组成,采集频率为 100 Hz,实现对柔性应变传感器电阻变化的高精度采集,如图 4 所示。

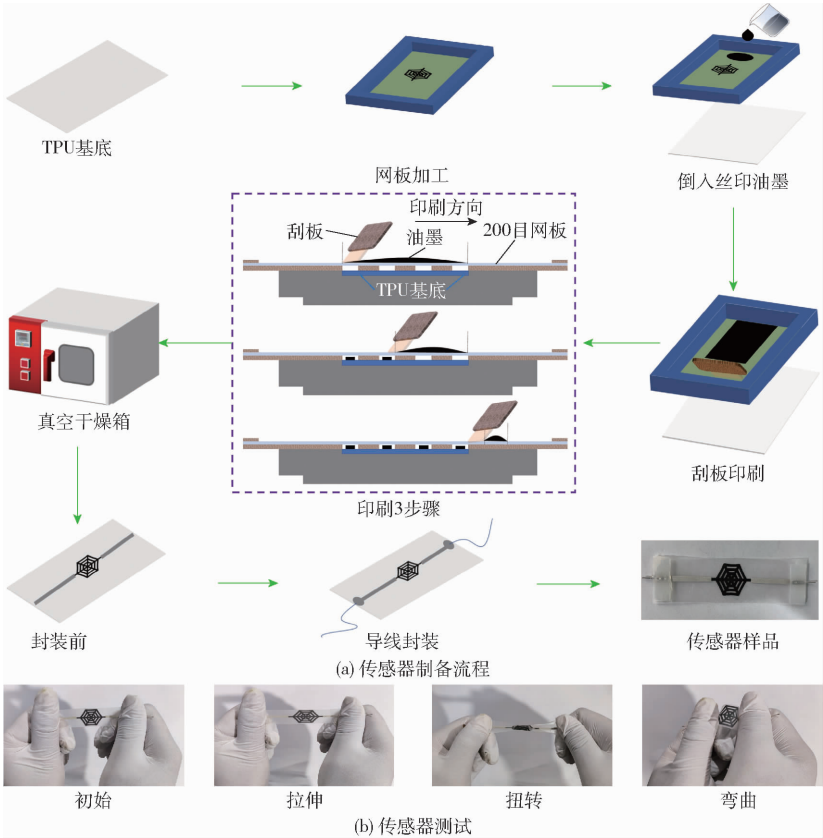


图 3 柔性传感器制备流程与测试  
Fig. 3 Flexible sensor preparation process and testing

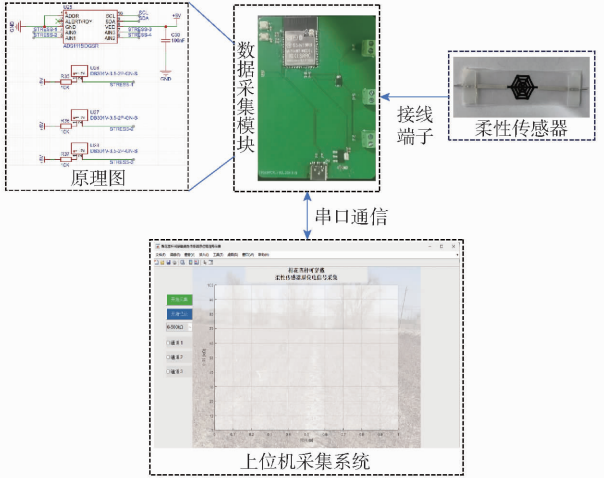


图 4 数据采集系统  
Fig. 4 Data acquisition system

数据采集模块主要包含控制器模块、应变检测模块、信号采集模块和电源管理模块。采用乐鑫公司生产的 ESP32 - S3 芯片作为核心微控制器,具有 WiFi 和蓝牙功能。应变检测模块采用经典的分压电路,通过与柔性应变传感器串联固定电阻构成,每个传感器通过直插接线端子接入电路,柔性传感器在不同应变状态下,会导致自身电阻发生变化,从而引起分压电路中输出电压的相应变化。信号采集模块配置 16 位高精度模数转换器 (ADS1115),具备 4 路输入通道,用于高精度采集柔性应变传感器的输

出电压信号,ADS1115 将模拟信号转换为数字信号,并通过 I2C 接口将数据传输给 ESP32 - S3 控制器。电源管理模块通过 AMS1117 - 3.3 稳压芯片将 5 V 电压转换为 3.3 V,提供稳定的低功耗电源,同时也作为应变检测电路中的分压基准电压。

基于 Matlab 平台编写上位机采集系统界面,主要实现主界面数据实时显示、动态曲线绘制以及数据保存等功能,通过串口通信接收数据采集模块获取的电压数据。

1.4 传感器原理及性能评价指标

传感器工作原理是基于传感材料在外部应变作用下电阻发生变化,拉伸时电阻变化主要由通道长度的增加和横截面积的减小引起<sup>[16]</sup>。对于传感材料,电阻  $R$  计算式为

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{1}$$

式中  $\rho$ ——敏感元件电阻率,  $\Omega \cdot \text{mm}$   
 $l$ ——敏感元件长度,  $\text{mm}$   
 $A$ ——敏感元件横截面积,  $\text{mm}^2$

在灵敏度、响应时间、工作范围等性能评价指标中,灵敏度是最受关注指标之一,石墨烯柔性传感器电阻率会因变形导致石墨烯导电电路径变化而改变,因此柔性可穿戴应变传感器灵敏度可以反映其检测外部环境中微小变化信号能力,是评估传感器性能

关键参数,直接影响实际应用的有效性和准确性<sup>[17]</sup>。传感器灵敏度( $GF$ )定义为相对电阻变化率与施加应变比值,即

$$GF = \frac{\Delta R}{R_0} / \varepsilon \tag{2}$$

其中

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_\varepsilon - L_0}{L_0} \times 100\% \tag{3}$$

$$\Delta R = R_\varepsilon - R_0 \tag{4}$$

式中  $\Delta R$ ——传感器在某应变下电阻变化量,  $k\Omega$   
 $R_0$ ——传感器初始电阻,  $k\Omega$   
 $R_\varepsilon$ ——某应变下传感器电阻,  $k\Omega$   
 $\varepsilon$ ——传感器应变, %  
 $\Delta L$ ——传感器长度变化量, mm  
 $L_0$ ——传感器初始长度, mm  
 $L_\varepsilon$ ——某应变长度, mm

2 结果与分析

2.1 传感器测试系统

为评估柔性传感器性能,搭建拉伸测试系统<sup>[16]</sup>。如图 5 所示,系统由往复推杆机构、量程调节滑块、频率控制器和信号采集模块组成,将传感器固定在夹具两端,传感器电极端子连接到数据采集系统。

2.2 传感器灵敏度测试

传感器相对电阻变化率和灵敏度与施加应变之间的关系如图 6 所示。整个范围分 3 个典型区域,即应变为 0% ~ 3% (Ⅰ区)、3% ~ 9% (Ⅱ区)、9% ~ 12% (Ⅲ区),每个范围数据与线性趋势紧密一致。如图 6a ~ 6c 所示,3 段均显示出拟合良好,不同应

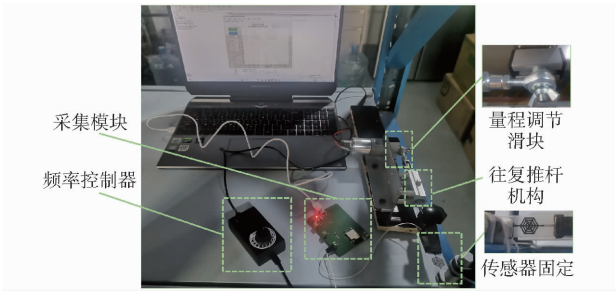


图 5 传感器拉伸测试系统示意图

Fig. 5 Schematic of sensor tensile test system

变范围拟合曲线  $R^2$  均大于 0.98,每个区域斜率都会随着施加的应变而增加。

由于应变传感器以石墨烯为活性材料,应变敏感性增加由几何效应引起,例如薄膜厚度减小、石墨烯网络排列等,因此导致曲线整体呈现非线性。如图 6d 所示,通过 Origin 软件对整体曲线进行多项式拟合,拟合决定系数  $R^2 = 0.999$ ,拟合公式为

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 144.4\varepsilon^2 + 3\varepsilon \tag{5}$$

由于相对电阻变化率-应变的灵敏度  $GF$ ,也可表示为拟合函数的一阶导数,即相对变化速率<sup>[18]</sup>。为了获得更直观的  $GF$  变化,表达式为

$$GF = \frac{d\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)}{d\varepsilon} = 288.8\varepsilon + 3 \tag{6}$$

灵敏度与应变关系曲线如图 6e 所示,传感器灵敏度随应变增加呈线性增加,说明在各应变区间内,拟合函数斜率随应变增加而递增,进一步验证了灵敏度与应变之间呈正相关。

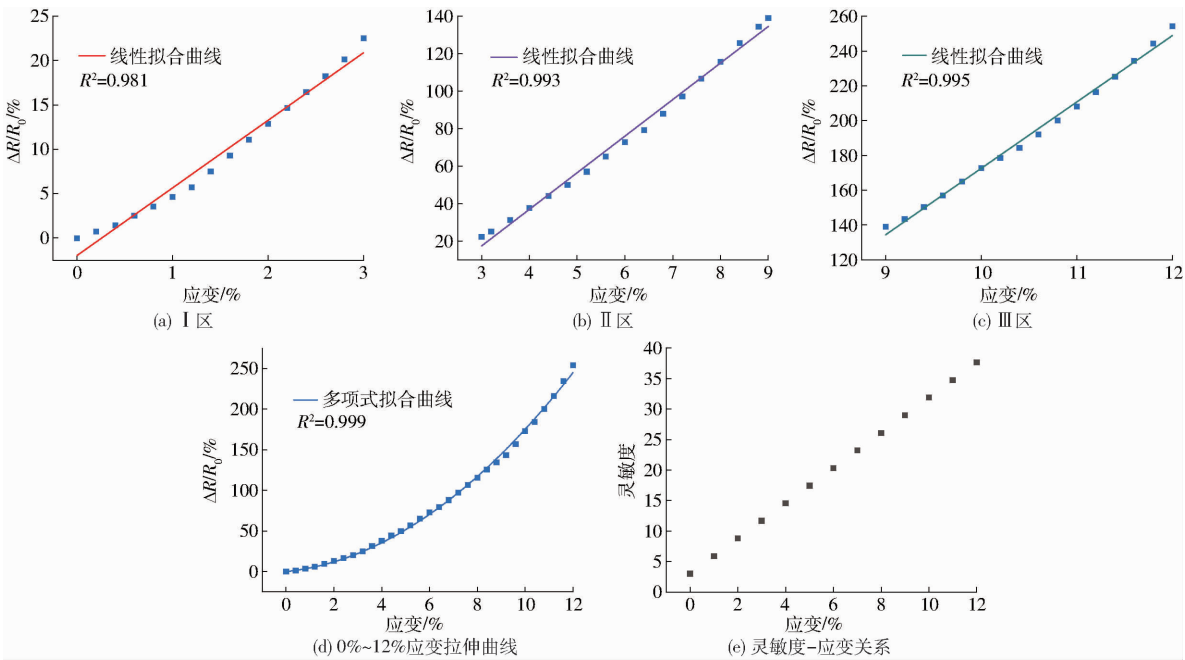


图 6 传感器测试结果

Fig. 6 Sensor test results

2.3 传感器机械鲁棒性

响应性能反映传感元件检测目标信息(微小形变)的能力<sup>[18]</sup>。响应时间(恢复时间)定义为:当传感器在加载(卸载)过程,应变加载(卸载)开始到柔性应变传感器输出信号稳定所需时间。如图 7 所示,传感器响应时间约为 250 ms,恢复时间约为 590 ms,凸显传感器在微小变形下快速响应的特点。

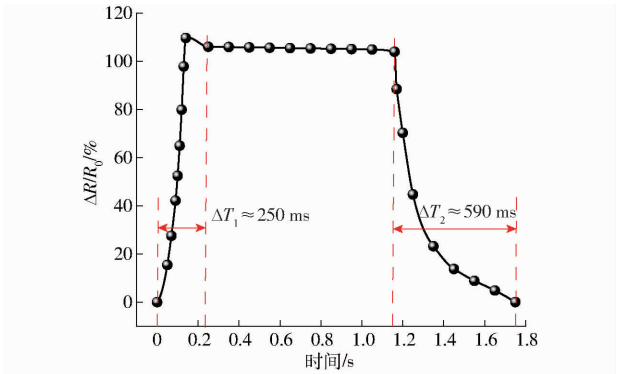


图 7 响应性能  
Fig. 7 Response performance

测试传感器在不同应变(8%、10%、12%)下 4 个周期的动态响应,结果如图 8 所示。随着应变的增加,传感导电层产生的微裂纹就越多<sup>[19]</sup>,从而导致传感器相对电阻变化率增加,同时传感器在不同应变条件下输出信号具有良好的一致性,未出现明显的信号漂移现象,表明其具备良好的动态响应性能。

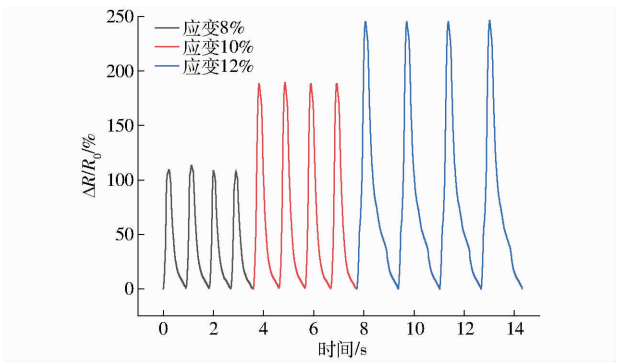


图 8 不同应变下动态响应  
Fig. 8 Dynamic response under different strains

传感器应变 8% 保持不变,以不同频率(0.5、1、1.5 Hz)进行拉伸-释放测试,即同幅不同频,响应曲线如图 9 所示。由图 9 可知,应变传感器输出信号峰值没有明显差异,表明在不同频率下具有良好的响应能力<sup>[20]</sup>。

在长期监测的应用场景中,传感器稳定性尤为重要,稳定性直接影响数据采集的准确性和可靠性<sup>[21]</sup>。传感器在应变 10% 和频率 1 Hz 下进行拉伸 100 次测试,通过数据采集系统记录传感器输出信号随时间的变化。测试前均对传感器进行预拉伸,有助于导电通路重新建立平衡状态,使传感器的相

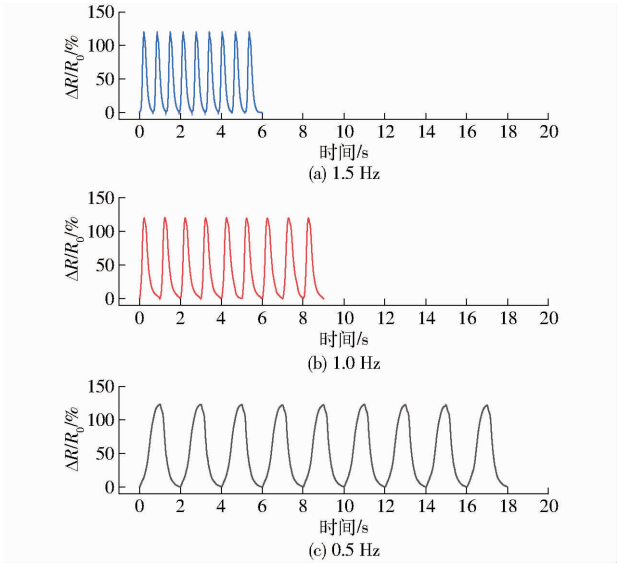


图 9 拉伸频率对动态响应特性的影响  
Fig. 9 Influence of tensile frequency on dynamic response characteristics

对电阻变化率能够保持稳定<sup>[22]</sup>。如图 10 所示,100 次测试传感器信号没有显著差异,表明传感器长期使用仍能保持良好的工作状态和耐用性<sup>[23]</sup>。

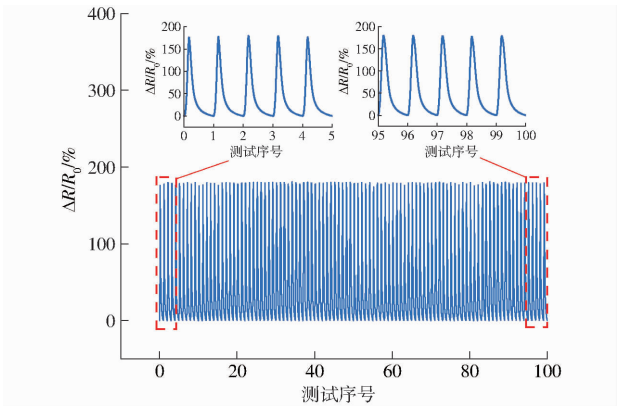


图 10 传感器稳定性测试  
Fig. 10 Sensor stability testing

2.4 迟滞测试

柔性传感器迟滞现象是在加载或卸载时,相同应变条件下传感器输出的差异。为量化滞后现象,定义为加载曲线与卸载曲线之间差异面积之比,柔性传感器迟滞用滞后度  $H$  表示<sup>[24]</sup>,即

$$H = \frac{A_{\text{load}} - A_{\text{unload}}}{A_{\text{load}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中  $A_{\text{load}}$ ——加载曲线与横坐标应变围成的面积  
 $A_{\text{unload}}$ ——卸载曲线与横坐标应变围成的面积

图 11 为传感器迟滞特性曲线,当应变达 6% 时,传感器开始出现迟滞现象,当应变达 12% 时,加载与卸载过程导电层可能产生裂纹,导致迟滞误差相对较大,滞后度  $H$  为 3.6%。

2.5 温度测试

在实际田间环境和室温条件下,柔性应变传感

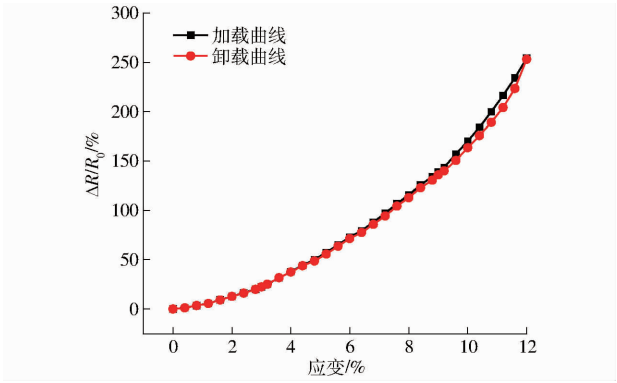


图 11 传感器迟滞性测试  
Fig. 11 Sensor hysteresis test

器性能会受环境温度影响,因此对温差敏感性进行研究<sup>[25]</sup>。如图 12 所示,在温度 -15 ~ 25℃ 时传感器相对电阻变化率最大为 1.03%,表明传感器在温度波动时表现出良好的动态稳定性能<sup>[26]</sup>。

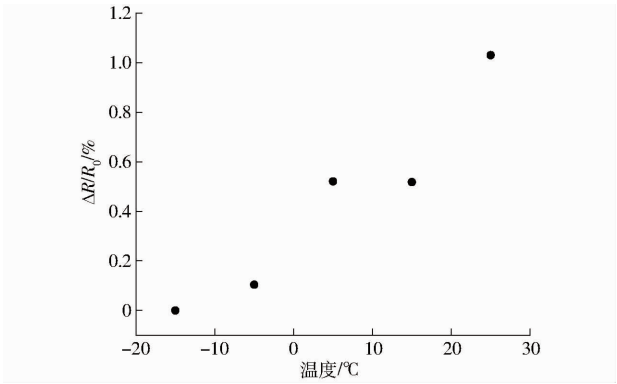


图 12 温度对传感元件的影响

Fig. 12 Effect of temperature on sensor components

3 柔性传感器-棉秆标定试验

3.1 试验材料

在新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州尉犁县现场采集同一时期、同一棉田棉秆作为样本,棉秆株高平均 60 ~ 80 cm,如图 13a、13b 所示。以棉秆与地面接触点为第 1 点,使用游标卡尺测量距该点上方 5 cm 处直径(该位置也是试验方法中传感器统一安装的中心位置),随机选择 35 根直径 10.5 mm (±0.1 mm) 的棉秆,计算平均值作为测试该类样本的直径,如图 13c 所示。将 35 根棉秆样本分为 2 组,1 组 30 根用于标定,1 组 5 根用于验证。

3.2 含水率测量

将该批次棉秆放置在电子称上进行称量,直至数值不变并记录数据,测量后样本放入电热鼓风干燥箱,温度设定 90℃,进行连续干燥 12 h,最后从样本中取出一部分进行称量,每隔 2 h 进行 1 次称量,反复进行 3 次,直至质量几乎不变,此时样本已完全干燥<sup>[27]</sup>。计算棉秆干燥前质量与干燥



图 13 标定样本采集

Fig. 13 Calibration sample collection

后质量之差,质量差与干燥前棉秆质量之比为含水率,计算式为

$$N = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \tag{8}$$

式中  $N$ ——样本含水率, %

$M_0$ ——样本干燥前质量, g

$M_1$ ——样本干燥后质量, g

以含水率 25.6% 的棉秆标定,含水率测定结果如表 1 所示。

表 1 棉秆含水率测定结果

Tab. 1 Measurement result of cotton stalk moisture content

| 编号  | 干燥前质量/g | 干燥后质量/g | 含水率/% |
|-----|---------|---------|-------|
| 1   | 23.45   | 17.77   | 24.21 |
| 2   | 26.12   | 19.12   | 26.80 |
| 3   | 24.83   | 18.52   | 25.41 |
| 4   | 25.67   | 18.95   | 26.17 |
| 5   | 23.92   | 18.16   | 24.09 |
| 6   | 26.85   | 19.56   | 27.15 |
| 7   | 24.37   | 18.09   | 25.78 |
| 8   | 25.23   | 18.78   | 25.56 |
| 9   | 23.18   | 17.68   | 23.73 |
| 10  | 26.38   | 19.23   | 27.10 |
| 平均值 |         |         | 25.6  |

3.3 试验方法

通过对柔性传感器的机械鲁棒性测试,表明该柔性传感器适用于棉秆起拔过程原位力学信号的实时监测,棉秆表面受到微小形变并传递到粘合的柔

性应变传感器。为实现传感器与棉秆表面的紧密贴附,选取无虫害、顺滑、无突兀结节的部位进行安装<sup>[28]</sup>,用酒精棉清洁棉秆表面,干燥后将 TPU 柔性应变传感器放置在两层防水 PU 膜之间,沿棉秆表面轴向贴合,贴合后静置 10 min,如图 14a 所示。将安装好传感器的棉秆样本修剪成长度 12 cm,便于固定在拉力机夹头,为增强摩擦力并防止拉伸过程样本滑移,采用医用胶布对样本两端进行包裹处理<sup>[29]</sup>,如图 14b 所示。如图 14c 所示,将测试样本固定在万能拉力试验机上进行拉伸,通过导线将柔性传感器连接到数据采集模块,以采样频率 100 Hz 记录拉伸过程电阻变化,确保动态捕捉。

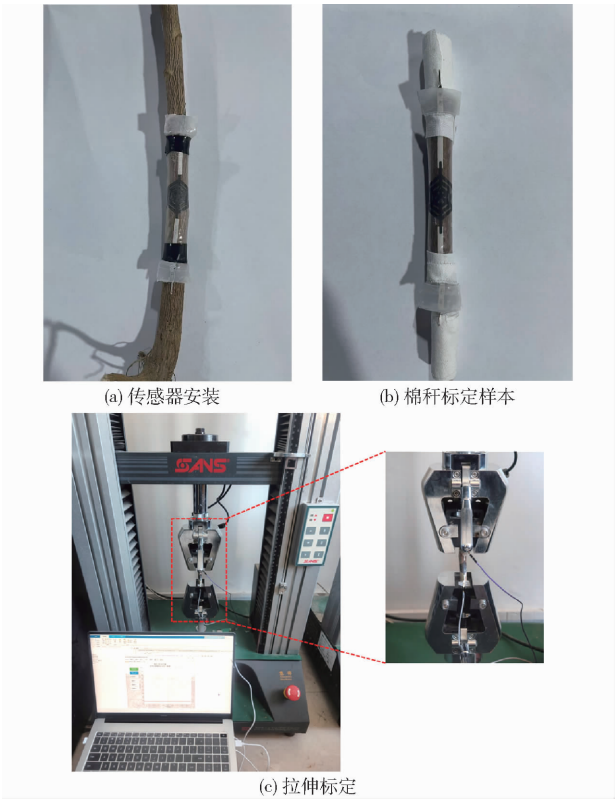


图 14 标定测试

Fig. 14 Calibration test

设置万能试验机加载范围为 0 ~ 800 N,拉伸速率为 2 mm/min,加载步长为 50 N,每次对柔性传感器加载,保持时间为 10 s,记录拉力(棉秆起拔力) $F$ 和最后 3 s 传感器稳定后电阻均值,对 30 个测试样本分别进行采集。

3.4 试验结果

3.4.1 一致性分析

棉秆实际起拔力和传感器电信号变化曲线如图 15 所示,结果表明,柔性传感器相对电阻变化率趋势与起拔力曲线表现的一致性,验证了在棉秆拔除监测应用中良好适应性及准确性。

3.4.2 起拔力量化标定结果

为研究柔性应变传感器的电信号与棉秆拔除时

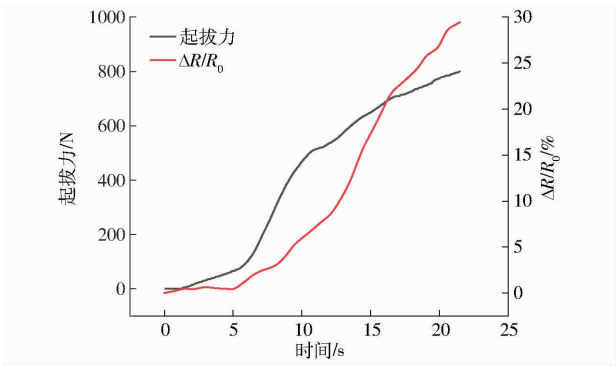


图 15 棉秆起拔力与传感器电信号

Fig. 15 Cotton stalk tension and sensor electrical signal

起拔力的对应关系,测量 30 组样本在不同拉力下传感器电阻变化率( $\Delta R/R_0$ )并求均值。以相对电阻变化量稳定性变异系数(CV)评价标定方法可靠性。

标定结果如表 2 所示,在起拔力 800 N 范围内,以 50 N 梯度增加,记录 30 组样本相对电阻变化量平均值、标准差和稳定性变异系数。由表 2 可知,稳定性变异系数最大为 3.28%,表明标定结果具有较好的一致性、可靠性和稳定性,可满足后续试验要求。

表 2 30 组样本标定结果

Tab. 2 30 sets of calibration results

| 起拔力/N | 平均相对电阻变化量/kΩ | 标准差/kΩ  | 稳定性变异系数/% |
|-------|--------------|---------|-----------|
| 50    | 0.47         | 0.013 2 | 2.79      |
| 100   | 1.22         | 0.040 0 | 3.28      |
| 150   | 1.89         | 0.052 5 | 2.78      |
| 200   | 2.45         | 0.065 7 | 2.68      |
| 250   | 2.74         | 0.020 2 | 0.74      |
| 300   | 3.18         | 0.044 2 | 1.39      |
| 350   | 3.68         | 0.042 3 | 1.15      |
| 400   | 4.59         | 0.077 6 | 1.69      |
| 450   | 5.65         | 0.106 1 | 1.88      |
| 500   | 6.67         | 0.061 4 | 0.92      |
| 550   | 9.35         | 0.105 6 | 1.13      |
| 600   | 12.35        | 0.090 2 | 0.73      |
| 650   | 17.31        | 0.080 6 | 0.47      |
| 700   | 21.83        | 0.134 8 | 0.62      |
| 750   | 25.86        | 0.333 5 | 1.29      |
| 800   | 29.43        | 0.301 2 | 1.02      |

如图 16 所示,通过 Origin 软件对数据进行拟合,得到  $F-\Delta R/R_0$  关系曲线,决定系数  $R^2$  为 0.998,拟合方程即检测模型为

$$F = 114.2906 \frac{\Delta R}{R_0} - 7.9026 \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 + 0.2491 \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)^3 - 0.0028 \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)^4 \quad (9)$$

由图 16 可知,在起拔力 0 ~ 500 N 范围内,传感

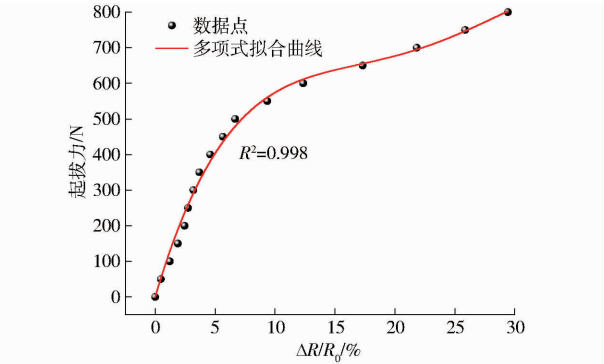


图 16 棉秆起拔力-传感器输出信号关系曲线

Fig. 16 Cotton stalk uprooting force – sensor output signal relationship curve

器信号变化随起拔力力变化较为缓慢,在起拔力 500 ~ 800 N 范围内,信号随起拔力的增大而显著增强。

3.4.3 标定曲线验证

为验证关系模型的准确性,设计了误差验证试验。选择同批次 5 个棉秆样本在 6 种起拔力梯度下分别随机进行 5 组测试,通过拟合方程计算出预测值,并与实际值进行比较,验证结果如表 3 所示。预测值与标准值平均相对误差不大于 4.78%,属于合理的试验误差范围,说明检测拟合方程的准确性和可行性。

| 表 3 验证结果                  |        |        |        |        |        |              |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| Tab.3 Verification result |        |        |        |        |        |              |
| 实际值/<br>N                 | 预测值/N  |        |        |        |        | 平均相对<br>误差/% |
|                           | 样本 1   | 样本 2   | 样本 3   | 样本 4   | 样本 5   |              |
| 200                       | 192.03 | 189.85 | 209.94 | 190.30 | 210.03 | 4.78         |
| 350                       | 365.36 | 332.81 | 360.20 | 354.29 | 337.12 | 3.43         |
| 450                       | 435.66 | 461.73 | 467.83 | 433.36 | 451.21 | 2.75         |
| 500                       | 510.89 | 481.47 | 475.60 | 515.63 | 488.77 | 3.23         |
| 620                       | 630.21 | 637.06 | 595.15 | 644.58 | 605.46 | 2.95         |
| 750                       | 716.14 | 760.44 | 765.41 | 723.07 | 727.61 | 2.91         |

4 柔性传感器田间测试

在尉犁县对研制的茎秆可穿戴柔性传感器进行田间测试。安装方法与标定试验方法保持一致,选择直径 10.5 mm 左右的棉秆,在根部向上 5 cm 处无突兀结节部位安装传感器,如图 17 所示。

棉秆在起拔过程电信号和起拔力变化曲线如图 18 所示。从整体上看,可分为 2 个阶段:起拔力上升阶段,棉秆根部克服根系与土壤之间黏着力和摩擦力向上运动,当棉秆主根和大多数侧根完全断裂时,棉秆起拔力达到最大值;起拔力下降阶段,在棉秆起拔力达到最大值后快速下降<sup>[30]</sup>。

田间测试结果表明,传感器能够精准捕捉起拔

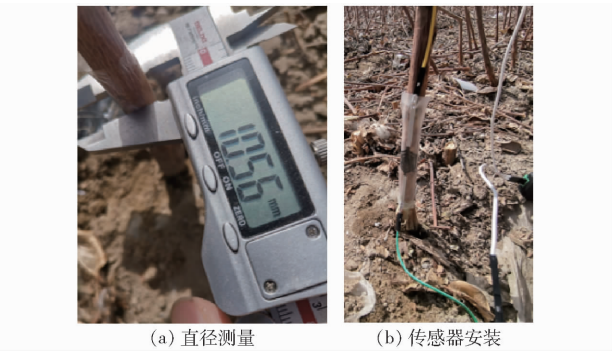


图 17 棉秆起拔田间测试

Fig. 17 Cotton stalk pull-out field test

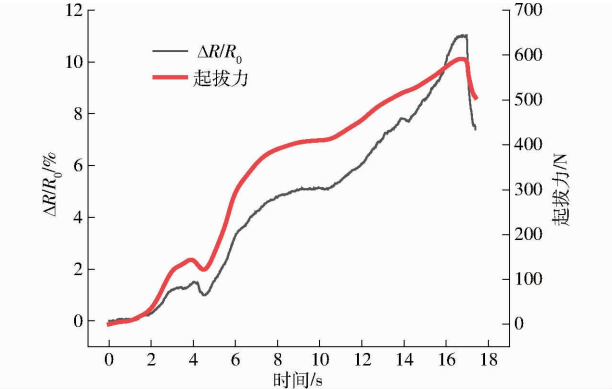


图 18 田间测试结果

Fig. 18 Field test results

过程起拔力的变化,在突变阶段,信号曲线与实际起拔力相对应,为未来棉秆收获装备提供了调控依据,实现力学反馈机制。

5 结论

(1)受蛛网共振感知启发,通过丝网印刷技术研制一种棉花茎秆可穿戴柔性应变传感器。设计了应变检测电路和数据采集电路对电信号进行高精度采集,通过上位机显示并存储数据。传感器可贴合棉花茎秆表面,通过采集电信号实现起拔力的原位检测。

(2)通过有限元仿真对 2 种仿生传感结构在 0° 和 90° 方向进行分析,并确定了传感器结构参数。仿真结果表明蛛网结构具有应力均匀分布的特性,验证了该结构的机械-信号快速转换机制,有助于增强对微小变化全向感知的灵敏度。

(3)从传感器机械性能、稳定性、响应时间和耐用性(100 次循环)等方面评估了传感器的可靠性,在温度变化(−15 ~ 25℃)下传感器表现出显著的稳定性。

(4)通过棉秆拉力标定试验建立了起拔力-电阻变化率模型( $R^2 = 0.998$ ),验证试验结果表明预测值与实际值平均相对误差不大于 4.78%,证明了模型的准确性。田间测试结果表明,在棉秆拔除过程中传感器能够实时捕捉起拔力动态变化,验证了原位监测的实用性。

参 考 文 献

[1] 张小栓,张梦杰,王磊,等. 畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 1-14.  
Zhang Xiaoshuan, Zhang Mengjie, Wang Lei, et al. Research status and development analysis of wearable information monitoring technology in animal husbandry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 1-14. (in Chinese)

[2] 亚森江·白克力,宋玲,岳勇,等. 基于离散元的棉秆根系-土壤系统建模与起拔过程界面破坏机制研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 353-364.  
Yasenjiang Baikeli, Song Ling, Yue Yong, et al. Modeling of cotton root-soil system based on discrete element method and investigation of interface failure mechanisms during uprooting process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 353-364. (in Chinese)

[3] 渠纯纯,孙文秀,李臻,等. 植物柔性传感器研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 32-43.  
Qu Chunchun, Sun Wenxiu, Li Zhen, et al. Research progress and prospects of the plant flexible sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(8): 32-43. (in Chinese)

[4] 王纪章,王涛,付益辉,等. 数字孪生技术在农业生产管控中的应用现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 1-20.  
Wang Jizhang, Wang Tao, Fu Yihui, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in agricultural production process control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 1-20. (in Chinese)

[5] 王永康. 植物叶片蒸腾信息原位无损检测的柔性可穿戴传感器设计与实验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2023.  
Wang Yongkang. Design and experimental study of a flexible wearable sensor for in-situ non-destructive detection of plant leaf transpiration information[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)

[6] 黄竊. 基于微纳仿生结构的可穿戴作物传感器制备及其性能研究[D]. 重庆:西南大学, 2024.  
Huang Yao. Research on fabrication and performance of wearable crop sensor based on micro nano bionic structure[D]. Chongqing: Southwest University, 2024. (in Chinese)

[7] Zhang C, Kong J, Wang Z, et al. Origami-inspired highly stretchable and breathable 3D wearable sensors for in-situ and online monitoring of plant growth and microclimate[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 259: 116379.

[8] Wang J, Liu L, Yang C, et al. Ultrasensitive, highly stable, and flexible strain sensor inspired by nature[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(14): 16885-16893.

[9] 宋鹏,李正达,杨蒙,等. 作物表型机器人研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 1-17.  
Song Peng, Li Zhengda, Yang Meng, et al. Current status and prospects of crop phenotyping robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 1-17. (in Chinese)

[10] Zou J, Chen X, Song B, et al. Bionic spider web flexible strain sensor based on CF-L and machine learning[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(18): 23761-23770.

[11] 黄梁松,张雨,张鹏,等. 受蛛网启发的海绵纤维基柔性电阻式压力传感阵列[J]. 传感技术学报, 2025, 38(2): 214-221.  
Huang Liangsong, Zhang Yu, Zhang Peng, et al. Biomimetic sponge fiber-based flexible resistive pressure sensor array inspired by spider web[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2025, 38(2): 214-221. (in Chinese)

[12] 王景祥. 基于蝎子髯骨缝感受器的多性能协同仿生柔性传感元件研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.  
Wang Jingxiang. Research on multi-functional coupling bionic flexible sensors inspired by the patella slit sensillum of scorpion[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)

[13] 胡洁. 图案化柔性应变传感器的制备及其性能研究[D]. 西安:西安理工大学, 2022.  
Hu Jie. Preparation and properties of patterned flexible strain sensor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese)

[14] Yang X, Gui J, Dong C, et al. Laser-induced graphene for screen-printed strain sensors[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(23): 21679-21687.

[15] 张淼,王丽茹,李浩榛,等. 柔性电导率芯片设计与营养液监测试验研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 386-393.  
Zhang Miao, Wang Liru, Li Haozhen, et al. Design and hydroponic monitoring of flexible electroconductivity chip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 386-393. (in Chinese)

[16] 朱银龙,沈宏骏,吴杰,等. 基于柔性应变传感器的数据手套手势识别研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 451-458.  
Zhu Yinlong, Shen Hongjun, Wu Jie, et al. Data glove gesture recognition based on flexible strain sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 451-458. (in Chinese)

[17] 朱银龙,华超,苏晓芳,等. 柔性压力传感器阵列及其信号采集系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 400-405, 413.  
Zhu Yinlong, Hua Chao, Su Xiaofang, et al. Investigation on flexible pressure sensor array and signal acquisition system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 400-405, 413. (in Chinese)

[18] Feng Y, Cai R, Zhou Y, et al. A high-performance porous flexible composite film sensor for tension monitoring[J]. RSC Advances, 2022, 12(40): 26285-26296.

[19] Lu H, Feng Y, Wang S, et al. A high-performance, sensitive, low-cost LIG/PDMS strain sensor for impact damage monitoring and localization in composite structures[J]. Nanotechnology, 2024, 35(35): 355702.

[20] Zhou W, Du Y, Chen Y, et al. Bioinspired ultrasensitive flexible strain sensors for real-time wireless detection of liquid leakage[J]. Nano-Micro Letters, 2024, 17(3): 318-335.

[25] Targ S, Almeida D, Lyman K. Resnet in resnet: generalizing residual architectures[ PP/OL]. V1. arXiv (2016 - 03 - 25) [2026 - 04 - 10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.08029>.

[26] 黄小平,侯现坤,郭阳阳,等. 基于改进 YOLO v7 - Pose 的牛脸关键点检测与姿态识别方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11):84 - 92, 102.  
Huang Xiaoping, Hou Xiankun, Guo Yangyang, et al. Bull face key point detection and pose recognition method based on improved YOLO v7 - Pose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11):84 - 92, 102. (in Chinese)

[27] 王法安,何忠平,张兆国,等. 基于 PN - YOLO v8s - Pruned 的轻量化三七收获目标检测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11):171 - 183.  
Wang Faan, He Zhongping, Zhang Zhaoguo, et al. Lightweight object detection method for *Panax notoginseng* based on PN - YOLO v8s - Pruned[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11):171 - 183. (in Chinese)

[28] Badgajar C M, Poulouse A, Gan H. Agricultural object detection with You Only Look Once (YOLO) algorithm: a bibliometric and systematic literature review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223: 109090.

[29] Khanam R, Hussain M. Yolov11: An overview of the key architectural enhancements[ PP/OL]. V1. arXiv (2024 - 10 - 23) [2026 - 04 - 10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725>.

[30] Jegham N, Koh C Y, Abdelatti M, et al. Evaluating the evolution of yolo (you only look once) models: a comprehensive benchmark study of yolo11 and its predecessors[ PP/OL]. V4. arXiv (2025 - 03 - 17) [2026 - 04 - 10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.00201>.

[31] Tong Z, Chen Y, Xu Z, et al. Wise - IoU: bounding box regression loss with dynamic focusing mechanism[ PP/OL]. V3. arXiv (2023 - 04 - 28) [2026 - 04 - 10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10051>.

(上接第 31 页)

[21] 颜小飞,孙传京,杜太生,等. 作物茎秆膨胀收缩监测柔性可穿戴传感器研制与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(10): 222 - 227.  
Yan Xiaofei, Sun Chuanjing, Du Taisheng, et al. A flexible and wearable sensor to monitor plant stem expansion and contraction[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(10):222 - 227. (in Chinese)

[22] 王子连. 基于柔性应变传感器的智能设备的研究及应用[D]. 长春:吉林农业大学, 2022.  
Wang Zilian. Research and application of intelligent equipment based on flexible strain sensor[ D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[23] Huang J, Zhou J, Luo Y, et al. Wrinkle-enabled highly stretchable strain sensors for wide-range health monitoring with a big data cloud platform[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(38): 43009 - 43017.

[24] 孙英,汪忠晟,韩智昊,等. 镓基液态金属柔性应变传感器的设计优化与实验验证[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 16 - 26.  
Sun Ying, Wang Zhongsheng, Han Zhihao, et al. Design optimization and experimental validation of the gallium-based liquid metal flexible strain sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 16 - 26. (in Chinese)

[25] Liu J, Zhang J, Liu J, et al. A scalable flexible strain sensor with adaptive response capability to varying microenvironments for digital healthcare[J]. Composites Science and Technology, 2025, 261: 111034.

[26] 赵厚琦. 面向航天器大尺度薄膜结构仿生超敏柔性应变传感元件研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.  
Zhao Houqi. Research on bionic super-sensitive flexible strain sensor for spacecraft large-scale thin film structure[ D]. Changchun:Jilin University, 2023. (in Chinese)

[27] 刘晨阳,张立萍,郑威强,等. 不同含水率对罗布麻力学特性及剥麻效果的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(11): 2797 - 2806.  
Liu Chenyang, Zhang Liping, Zheng Weiqiang, et al. Effects of different moisture contents on the mechanical properties and peeling effect of *Apocynum venetum*[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(11): 2797 - 2806. (in Chinese)

[28] 孟翔宇,刘洋,曹肆林,等. 棉秆在不同弯折方式下的力学性能研究[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(19): 175 - 179,194.  
Meng Xiangyu, Liu Yang, Cao Silin, et al. Research on the mechanical properties of cotton stalk under different bending methods[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(19): 175 - 179,194. (in Chinese)

[29] 樊士玉. 夹拔式生姜收获实验平台设计与实验研究[D]. 扬州:扬州大学, 2024.  
Fan Shiyu. Design and experimental research of clamp pull ginger harvesting experimental platform[ D]. Yangzhou:Yangzhou University, 2024. (in Chinese)

[30] 刘雄,张佳喜,陈明江,等. 棉秆起拔力关键因素的研究与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 157 - 163.  
Liu Xiong, Zhang Jiayi, Chen Mingjiang, et al. Study and experiment on the key factors of pull-up force of cotton stalk[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(9): 157 - 163. (in Chinese)