doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.007

采棉机籽棉回潮率传感器设计与试验

方　亮[1,2]　刘　康[1,2]　黄　杰[1,2]　常金强[1,3]　石喻文[1,2]　曾兆权[1,4]　张若宇[1,2]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832003;
3.兵团智慧农场数字化装备技术创新中心,石河子 832003;4.石河子大学能源与材料学院,石河子 832003)

摘要:针对采棉机在采收作业中,籽棉回潮率在线检测受环境温度与接触压力干扰大的问题,本文基于电阻法原理,设计了一种集成温度与压力补偿机制的采棉机籽棉回潮率传感器。通过优化电阻检测电路以拓宽测量范围,结合温度与压力传感单元,设计了可同步采集环境温度、接触压力及籽棉电阻的传感器硬件系统,并进行了校准与性能测试。搭建试验平台分析了温度、压力及回潮率对籽棉导电特性的影响规律,建立了融合多参数补偿的回潮率预测模型,结果表明,所设计的硬件电路温度测量平均绝对误差小于 0.4℃,压力测量平均相对误差小于 0.2%,电阻测量平均相对误差小于 3%;回潮率预测模型中 BPNN 算法效果最佳,决定系数(R^2)为 0.986,均方根误差(RMSE)为 0.377%。为了验证回潮率传感器的可靠性,进行了室内静态和田间收获试验。室内静态试验结果表明,传感器检测范围为 4% ~15%,平均绝对误差为 0.22%,平均相对误差为 2.32%;田间收获试验结果表明,检测结果绝对误差不大于 0.5%,相对误差不大于 4.32%。研究结果为采棉机籽棉回潮率在线检测提供有效的技术支撑。

关键词:籽棉回潮率;采棉机;电阻法;传感器;补偿算法

中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0062-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Moisture Regain Sensor for Seed Cotton in Cotton Pickers

FANG Liang[1,2]　LIU Kang[1,2]　HUANG Jie[1,2]　CHANG Jinqiang[1,3]　SHI Yuwen[1,2]
ZENG Zhaoquan[1,4]　ZHANG Ruoyu[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832003, *China*
3. *Technology Innovation Center of Smart Farm Digital Equipment*, *Xinjiang Production and Construction Corps*, *Shihezi* 832003, *China*
4. *School of Energy and Materials*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that the online detection of moisture regain of seed cotton during cotton picking operations is significantly interfered by environmental temperature and contact pressure, a moisture regain sensor for seed cotton in cotton pickers was designed based on the resistive method, integrating temperature and pressure compensation mechanisms. By optimizing the resistance detection circuit to broaden the measurement range and combining temperature and pressure sensing units, a sensor hardware system capable of synchronously collecting environmental temperature, contact pressure, and seed cotton resistance was designed, and it was calibrated and performance tested. An experimental platform was built to analyze the influence of temperature, pressure, and moisture regain on the conductive characteristics of seed cotton, and a moisture regain prediction model incorporating multi-parameter compensation was established. The results showed that the designed hardware circuit had an average absolute error of less than 0.4℃ for temperature measurement, an average relative error of less than 0.2% for pressure measurement, and an average relative error of less than 3% for resistance

收稿日期:2025-09-29　修回日期:2025-11-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)、国家棉花产业技术体系岗位科学家项目(CARS-15-17)、新疆棉花产业技术体系专项(XJARS-03)、兵团科技攻关计划项目(2023AB014)、石河子大学高层次人才科研启动项目(CJXZ202104)和兵团研究生科研创新项目(BTYJXM-2024-K07)

作者简介:方亮(1998—),男,博士生,主要从事智能农业传感与装备研究,E-mail:fangliang@stu.shzu.edu.cn

通信作者:张若宇(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事数字棉花技术与装备研究,E-mail:ry248@163.com

measurement. In the moisture regain prediction model, the BPNN algorithm performed best, with a coefficient of determination (R^2) of 0.986 and a root mean square error (RMSE) of 0.377%. To verify the reliability of the moisture regain sensor, indoor static tests and field harvesting tests were conducted. The indoor static test results indicated that the sensor's detection range was from 4% to 15%, with an average absolute error of 0.22% and an average relative error of 2.32%. The field harvesting test results showed that the absolute error of the detection results was no greater than 0.5%, and the relative error was no greater than 4.32%. The tests demonstrated good accuracy and practicality, providing effective technical support for the online detection of moisture regain of seed cotton in cotton pickers.

Key words: seed cotton moisture regain; cotton pickers; resistance method; sensor; compensation algorithms

0　引言

棉花作为重要的天然纤维和经济作物，在全球经济发展中占据重要地位[1]。采棉机显著提升了采收效率，尤其是自走式打包采棉机，极大地推动了棉花产业机械化进程[2-3]。然而，机械化采收也带来了更高的含杂率和回潮率，严重影响棉花品质[4]。回潮率是衡量棉花品质的关键指标，对采收、存贮、加工及贸易结算均有重要影响[5]。采收和加工环节，回潮率过高易导致机器堵塞，过低则易使纤维断裂、产生静电甚至引发火灾[6]。存贮环节，高回潮率会致棉花变黄霉变[7]，严重时可能引起棉包降解甚至自燃[8]。在交售环节，现有检测方法效率低、检测结果代表性差且易受人为因素干扰。

目前，棉花回潮率快速检测方法主要包括电阻法、电容法、微波法和红外法。相关研究包括：基于电阻法的便携式湿度计设计[9]；结合电容传感与光电技术的水分检测设备[10]；高精度微波水分测量仪应用[11]；以及光电双波法用于原棉含水率远程监测[12]。电阻法因成本低、稳定性好且技术成熟而具备明显优势。文献[13]提出一种基于压力补偿的电阻法籽棉回潮率检测方法，有效降低了籽棉压缩过程中因密度变化引起的误差；文献[14]提出融合电容、电阻、密度和温度信息的籽棉回潮率检测方法，提升了检测精度；文献[15]通过优化算法，发展了基于 Stacking 集成的籽棉回潮率信息融合检测算法。然而，上述研究均限于实验室环境。在农作物收获含水率无损在线检测领域，研究多集中于谷物。文献[16]通过测定单粒粮食动态电阻特性，揭示了水分含量与实时电阻波形的关系，提出了波形峰值和峰面积的解析方法，并开发了在线测量装置。文献[17]搭建了具备二次筛分除杂功能的采样台架，基于电容法设计了在线检测系统以提升精度与稳定性。此外，微波反射法被用于建立稻麦含水率检测模型并开发相应装置[18]；近红外传感技术则被用于设计检测系统，在光谱采集中综合考虑品种、流量等多种变量，并通过数据预处理、参数优化和稳定性测试来确保其可靠性[19]。然而，针对棉花采收环节回潮率在线检测研究报道较少，主要因其作业环境恶劣，环境温度与棉花压缩密度等不确定因素增加了检测难度。文献[20]设计了一种基于电阻法的回潮率传感器（传感器 V1），并将其搭载于采棉机开展田间试验，验证了该方法的可靠性。然而，因受电路性能限制，传感器 V1 在回潮率检测范围上存在一定局限，难以准确检测回潮率过高或过低的样本。

针对采棉机作业中籽棉回潮率检测范围有限及环境干扰严重的问题，本文设计一种集成温度与压力补偿机制的电阻法采棉机籽棉回潮率传感器（传感器 V2），以实现更宽检测范围内的高精度、鲁棒性在线检测。

1　检测原理与整体方案设计

1.1　检测原理

籽棉回潮率为棉花中水分质量占棉花干质量百分比[21]，计算式为

$$M_R = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中　M_R——籽棉回潮率，%

m——籽棉干燥前质量，kg

m_0——籽棉干燥后质量，kg

电阻法检测籽棉回潮率是利用籽棉回潮率与导电性之间的关系进行间接检测，微小的水分变化会显著影响籽棉纤维电阻率，从而改变绝缘电阻[22]。根据欧姆定律，通过测量电压和电流，可以确定籽棉纤维电阻，进而推断其导电性能，即

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{U}{I} \tag{2}$$

式中　R——籽棉绝缘电阻，Ω

ρ——材料电阻率，Ω·m

L——材料长度，m

A——材料横截面面积，m^2

U——测量电压,V

I——测量电流,A

籽棉绝缘电阻 R 与回潮率 M_R 之间存在明确的关联[23],在规定条件下,通过测量籽棉绝缘电阻 R,可计算其回潮率 M_R,计算式为

$$\lg R = -X\lg M_R + Y \tag{3}$$

式中 X——常数,表征籽棉电阻对回潮率的敏感度

Y——常数,表征籽棉固有属性的电阻基准值

1.2 硬件设计

1.2.1 方案设计

基于电阻法设计一种集成温度与压力补偿功能的籽棉回潮率传感器 V2,其整体方案如图 1 所示。传感器 V2 部署于采棉机打包室侧壁,可在打包过程对籽棉进行回潮率在线检测,并将采集数据实时上传至上位机显示。传感器 V2 由驱动电极、感测电极、绝缘材料、压力传感器以及信号调理电路组成。其感知单元采用平面结构,工作时直接与棉花纤维接触。测量电流经由驱动电极、棉花纤维和感测电极形成闭合回路。基于不同回潮率对应不同棉花纤维绝缘电阻的特性,感测电极检测回路电流,进而计算出棉花纤维电阻。该电阻再结合环境温度进行修正;同时,压力传感器测量接触压力(反映棉包局部压缩密度),并将压力作为电阻法测定回潮率的补偿参数。最终,通过温度与压力综合补偿,传感器 V2 能够间接准确地测定籽棉回潮率。

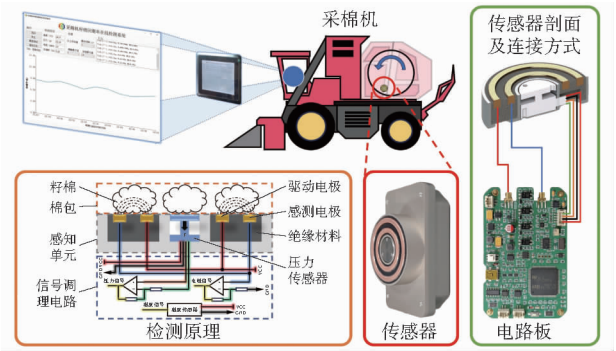

图 1 回潮率传感器整体方案

Fig. 1 Overall scheme of moisture regain sensor

1.2.2 电路设计

硬件电路包含模拟电路模块、数字电路模块和电源管理模块,电路架构图如图 2 所示。模拟电路模块包含电阻测量模拟前端、压力测量模拟前端、温度传感器、数模转换器和参考电压源。其中电阻测量模拟前端包含输入保护电路、通道选择器和运算放大器,输入保护电路与传感器驱动电极和感测电极连接,通道选择器可以根据待测电阻自动选择合适的采样通道;压力测量模拟前端包含压力传感器接口、失调电压矫正器和运算放大器,压力传感器接口与感知模块压力传感器连接;模数转换器与温度传感器、电阻测量模拟前端和压力测量模拟前端连接,并将模拟信号转换为数字信号;参考电压源为电阻测量模拟前端、压力测量模拟前端和模数转换器提供参考电压。数字电路模块包含最小系统外围电路、微控制单元和通信电路。其中最小系统外围电路由晶振和复位电路组成,晶振为 MCU 提供基准时钟,复位电路用于系统复位;微控制单元用于完成信号的采集处理;通信电路包含 CAN 通信电路和 RS485 通信电路,用于完成信号的传输。电源管理模块主要包括直流电源接口、反接保护电路、BUCK 电路、BOOST 电路和 LDO 电路,为各硬件单元提供稳定供电。

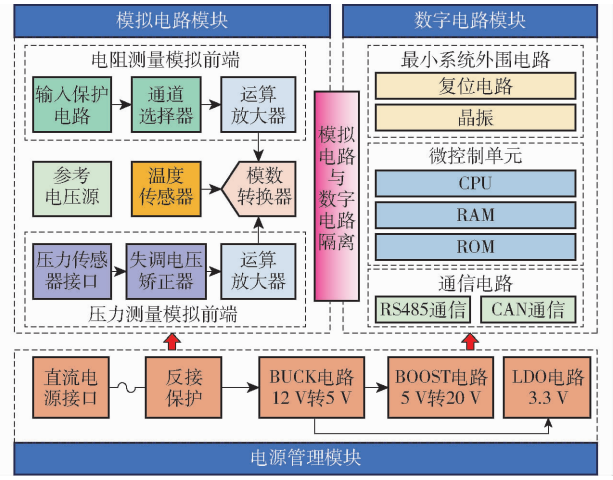

图 2 硬件电路系统架构

Fig. 2 Architecture of hardware circuit system

硬件电路核心模块即电阻检测模拟前端模块,采用多量程自适应切换设计,其原理是通过测量籽棉样本的电流特性实现电阻测量。原理图如图 3a 所示,电路包含 2 个驱动电压源 V_D(5 V 和 20 V),经单刀双掷开关 S5 实现电压切换。4 个采样电阻(R_1 = 10 Ω、R_2 = 1 kΩ、R_3 = 100 kΩ、R_4 = 10 MΩ)分别连接开关 S1 ~ S4,同时配置运算放大器和模数转换器实现信号放大与数字化,R_G用于调节运算放大器放大倍数。测量时,棉花电阻 R_c接入电路。闭合任一开关 S1 ~ S4 可使对应采样电阻 R_s接入测量回路形成闭合电路。通过同相比例放大电路测量输入电压 V_{in},经闭环增益 A_f线性放大后,输出电压 V_{out}由模数转换器数字化处理。输入电压 V_{in}、电流 I 及棉花电阻 R_c计算式为

$$\begin{cases} V_{in} = \dfrac{V_{out}}{A_f} \\ I = \dfrac{V_{in}}{R_s} \\ R_c = \dfrac{V_D - V_{in}}{I} \end{cases} \tag{4}$$

式中　V_D——电源电压，V

图 3b 为通道 1 的测量电路原理图，在此配置下，开关 S1 闭合，S2 ~ S4 断开，而 S5 切换至 5 V 挡位（即连接 5 V 电源）。此时，电源 5 V、棉花电阻 R_c 和采样电阻 R_1 构成闭合回路。图 3c ~ 3e 分别展示了通道 2 ~ 4 测量电路原理图。图 3f 为通道 5 测量电路原理图，其配置为开关 S4 闭合，S1 ~ S3 断开，而 S5 切换至 20 V 挡位（即连接至 20 V 电源）。此时，电源 20 V、R_c 和 R_4 构成闭合回路。

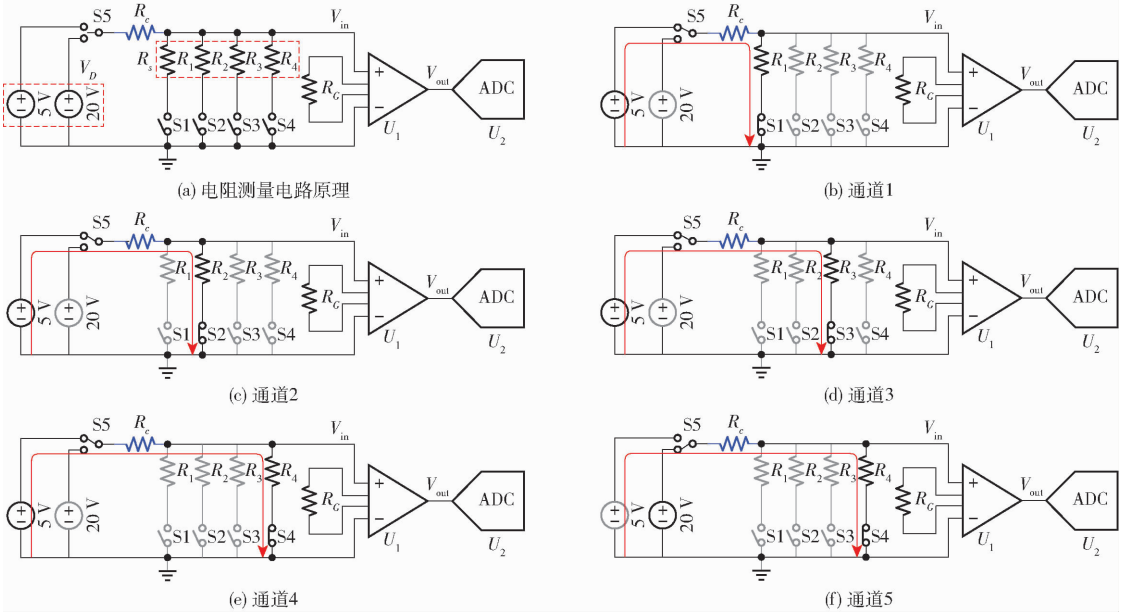

图 3　电阻测量电路

Fig. 3　Resistance measurement circuit

电阻测量电路自动量程状态机如图 4 所示，通过电压比较机制实现自动量程选择：①初始化：复位默认激活通道 5（$i=5$）。②动态调整：若 V_{in} 低于下限电压 V_{LL}（1 mV），切换至 $i-1$ 通道（$i \geqslant 1$）；若 V_{in} 高于上限电压 V_{UL}（100 mV），切换至 $i+1$ 通道（$i \leqslant 5$）；若 V_{in} 处于有效范围（$V_{LL} < V_{in} < V_{UL}$），维持当前通道进行信号处理。通过该控制流程实现自动最优量程匹配功能。

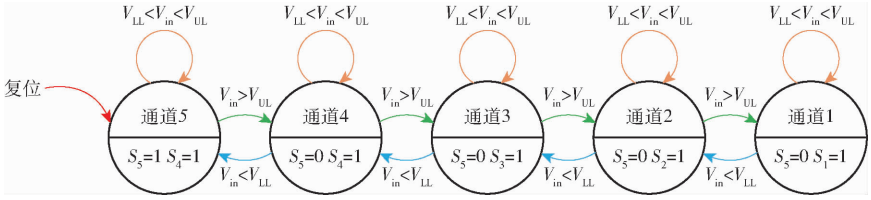

图 4　系统控制状态机

Fig. 4　System control state machine

2　试验

2.1　试验材料

试验对象为 2022 年 11 月获取的锯齿机采细绒棉，采收地点位于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州吉木萨尔县（44°30′N，88°89′E）。品种为新路早 80，棉铃 5 室，卵圆形，较大，单铃质量 5.6 g，吐絮集中，不落絮，宜机采。根据棉花纤维的吸湿原理制备不同回潮率的棉花样本，将棉样进行干燥预处理，使其处于较低的原始回潮率（小于 4%），随后将棉样放入 YG(B)751DG 型恒温恒湿试验箱（温州市大荣纺织仪器有限公司，温度偏差为 -2 ~ 2℃，相对湿度偏差为 -2% ~ 2%）中在不同的温度和相对湿度下平衡 24 h，如表 1 所示，以获得不同回潮率籽棉样本。待棉样平衡后，称取 2 份 150 g 棉样和 1 份 50 g 棉样。其中 2 份 150 g 棉样放入压棉装置，用于电阻法检测回潮率，并求均值；50 g 棉样依据《原棉回潮率试验方法　烘箱法》中的试验标准[24]，利用 YG767 型半自动快速恒温烘箱（南通三思机电科技有限公司）测量回潮率真实值，用于对籽棉回潮率

表 1　恒温恒湿试验箱平衡条件

Tab. 1　Constant temperature and humidity test chamber equilibrium conditions

因素	水平
温度/℃	5、10、15、20、25、30、35、40
相对湿度/%	30、40、50、60、70、80、85、90、95

传感器 V2 标定。

2.2 试验方法

2.2.1 试验平台搭建

采用前期研究搭建的试验平台[13]，由计算机、STM32F103 型单片机（广州市星翼电子科技有限公司）、电机驱动器、UTP8303M 型线性直流电源（优利德科技（中国）股份有限公司）、信号采集电路板、CANalyst-Ⅱ型 CAN 分析仪（珠海创芯科技有限公司）、铝型材机架、24 V 直流电动推杆（行程 150 mm；最大推力 1 000 N）、有机玻璃籽棉样品盒（直径为 16 cm）与压棉单元组成，其中压棉单元包括压棉板、驱动电极、感测电极和平面压力传感器（测量范围 0～5 kg；满量程精度 0.3%），试验平台如图 5 所示。试验时由线性直流电源供电，将籽棉放入压棉装置样品盒内，单片机控制电机驱动器驱动电动推杆对籽棉施加载荷。通过信号采集电路板实现环境温度、接触压力和籽棉电阻信号采集和传输，并通过 CAN 分析仪将 CAN 信号转换为 USB 信号进而传输至计算机。

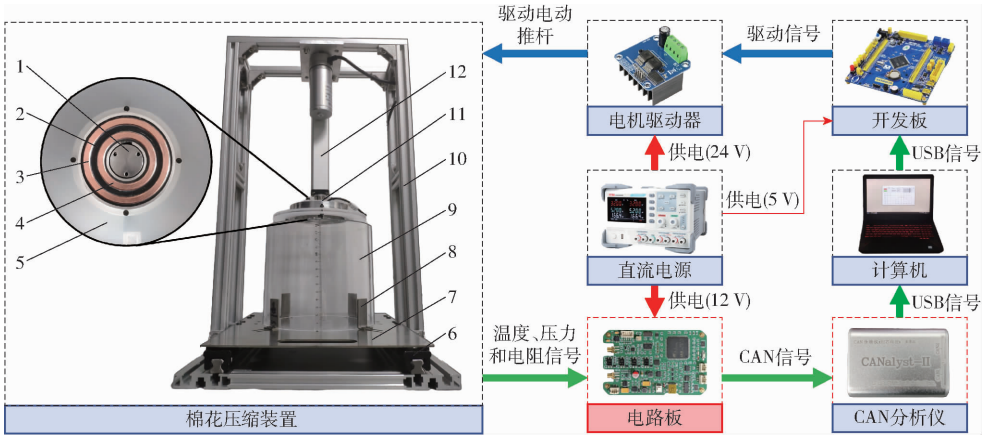

图 5 试验平台

Fig. 5 Experimental platform

1. 压力传感器 2. 绝缘材料 3. 驱动电极 4. 感测电极 5. 压棉板 6. 滑轨 7. 托盘 8. 样品盒固定脚架 9. 籽棉样品盒 10. 铝型材机架 11. 压棉单元 12. 直流电动推杆

2.2.2 试验数据采集

如图 6 所示，基于图 5 所示试验平台进行试验数据采集，开展籽棉压缩试验以探究环境温度和密度对电阻法回潮率检测的影响。参照文献[25]，新疆 9 月平均气温为 19.7℃。鉴于棉花收获期内采棉机打包室温度略高于环境温度，试验设置温度 5～40℃。依据采棉机技术参数[26]，棉模打包密度为 186.9～207.7 kg/m^3，故试验压缩密度设置为 150～250 kg/m^3。选定 72 组不同回潮率棉样（每组含 2 份 150 g 样品），在不同温度下对每组样品进行压缩试验：将棉样从高度 5 cm 压缩至 3 cm（每组试验压缩 10 次，单次压缩递减 2 mm）。试验过程实时记录环境温度、接触压力、电阻及回潮率，累计获取 1 584 组数据（回潮率梯度（72）×样本（2）×密度等级（11）），如表 2 所示。

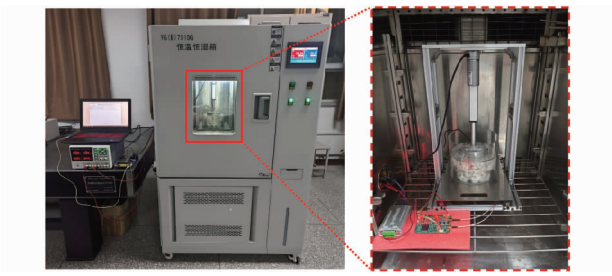

图 6 试验数据采集

Fig. 6 Collection of experimental data

表 2 籽棉电阻、回潮率数据分布区间

Tab. 2 Distribution range of seed cotton resistance and moisture regain

参数	数值分布区间						
电阻/MΩ	[0.02, 0.2)	[0.2, 2)	[2, 20)	[20, 200)	[200, 2 000)	[2 000, 20 000)	[20 000, 200 000]
回潮率/%	11.77～15.16	8.76～13.30	7.39～11.34	6.37～9.32	5.33～7.34	4.49～6.25	3.63～5.31
数据量	92	408	270	246	206	182	180

2.2.3 回潮率检测模型构建

基于采集的试验数据构建回潮率检测算法模型。选取环境温度、接触压力和电阻作为籽棉回潮率预测模型的特征变量，并对数据进行归一化处理、数据集划分，采用多元线性回归（Multiple linear regression，MLR）、随机森林（Random forest，RF）和反向传播神经网络（Back propagation neural network，BPNN）3 种算法进行训练，并借助交叉验证优化模

型参数，采用决定系数（R^2）和均方根误差（RMSE）作为模型评价指标，确定最佳模型。

3　结果与讨论

3.1　电路校准和性能测试

为了确保试验结果准确性，通过硬件电路系统校准建立传感器 V2 输出信号与实际物理量的精确数学模型，有效提升测量精度，采用 PT100 热敏电阻、标准砝码及标准电阻分别对温度、压力与电阻检测模块进行校准。每个校准点测量样本量为连续采集 10 个数据，并取其平均值作为该点最终有效数据，校准结果如图 7 所示。由图 7a 可知，温度传感器输出电压与温度呈显著线性正相关，由图 7b 可知，压力传感器输出电压与压力也呈线性正相关，二者均通过线性回归获得高精度数学模型；由图 7c 可知，针对电阻测量，实施 5 通道独立校准，各通道输出电压与电阻均呈稳定的线性负相关关系，通过各通道拟合获得 5 个独立校准方程。所有校准方程及其参数见表 3。

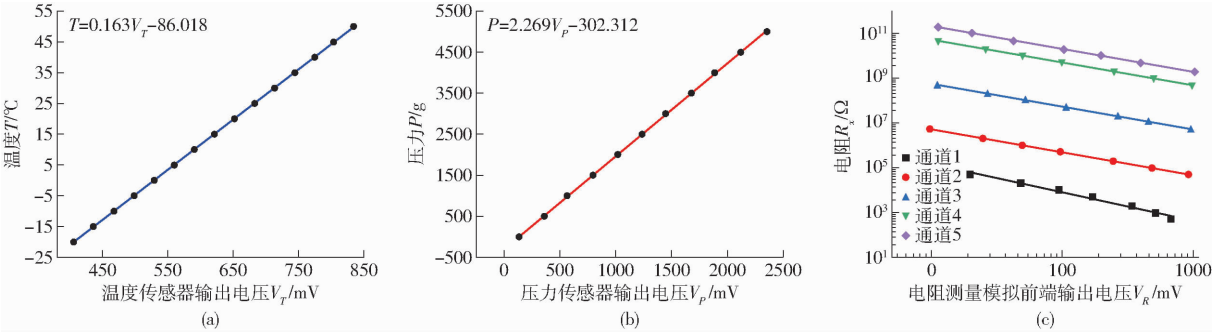

图 7　电路校准结果

Fig. 7　Circuit calibration results

表 3　电路校准方程

Tab. 3　Circuit calibration equation

类别	样本梯度	公式	模型参数		R^2
			a	b	
温度检测电路/℃	50、45、40、35、30、25、20、15、10、5、0、－5、－10、－15、－20	$y=a+bx$	－86.018	0.163	0.999
压力检测电路/g	0、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500、5 000	$y=a+bx$	－302.312	2.269	0.999
电阻检测电路（通道 1）/Ω	500、1 000、2 000、5 000、10 000、20 000、50 000	$\lg y=a+b\lg x$	6.459	－1.278	0.986
电阻检测电路（通道 2）/Ω	5×10^4、1×10^5、2×10^5、5×10^5、1×10^6、2×10^6、5×10^6	$\lg y=a+b\lg x$	7.724	－1.014	0.999
电阻检测电路（通道 3）/Ω	5×10^6、1×10^7、2×10^7、5×10^7、1×10^8、2×10^8、5×10^8	$\lg y=a+b\lg x$	9.749	－1.012	0.999
电阻检测电路（通道 4）/Ω	5×10^8、1×10^9、2×10^9、5×10^9、1×10^{10}、2×10^{10}、5×10^{10}	$\lg y=a+b\lg x$	11.721	－1.012	0.999
电阻检测电路（通道 5）/Ω	2×10^9、5×10^9、1×10^{10}、2×10^{10}、5×10^{10}、1×10^{11}、2×10^{11}	$\lg y=a+b\lg x$	12.319	－1.008	0.999

校准完成后，采用 PT100 热敏电阻、标准砝码及标准电阻分别对温度、压力与电阻检测模块进行系统验证，并与传感器 V1 进行对比。温度测量模块验证中，将检测电路与 PT100 热敏电阻一同置于恒温恒湿箱内，通过设置 10 个温度梯度，每个温度点采集 10 组数据求均值，以 PT100 高精度测温值作为基准，计算系统测量值绝对误差。试验结果如图 8a 所示，传感器 V2 在各测量点处平均绝对误差均小于传感器 V1，且所有平均绝对误差均低于 0.4℃，展现出优异的温度检测精度。压力检测验证采用平面压力传感器，通过 10 个不同质量的标准砝码进行加载试验，每个加载点采集 10 组数据，以砝码标称值为基准计算相对误差。试验结果如图 8b 所示，传感器 V2 在各测量点平均相对误差均小于传感器 V1，平均相对误差低于 0.2%，表明系统具有良好的一致性与重复性。电阻检测模块验证选用 VC326 型绝缘电阻测试仪（深圳市驿生胜利科技有限公司）测量的标准电阻为基准，在室温（22.32℃）环境下进行测试，每个标准电阻实施 10 次独立测量。试验结果如图 8c 所示，传感器 V2 平均相对误差与传感器 V1 相比未见明显优势，平均相对误差在 3% 以内，但显著提高了电阻测量量程，从原来的 $1\times10^5\sim1\times10^9$ Ω 扩展至 $2\times10^3\sim2\times10^{11}$ Ω。

3.2　室内静态试验

3.2.1　籽棉导电性能与环境影响因素关系

试验保持压缩密度恒定（191.3 kg/m^3），不同湿度下籽棉电阻随温度的变化曲线如图 9a 所示。由图 9a 可知，各湿度条件下籽棉导电性随温度变化趋势一致，均呈先降后升，转折点在 25℃ 或 30℃。原因为水分在电荷传输中起媒介作用[27]：初始阶段，

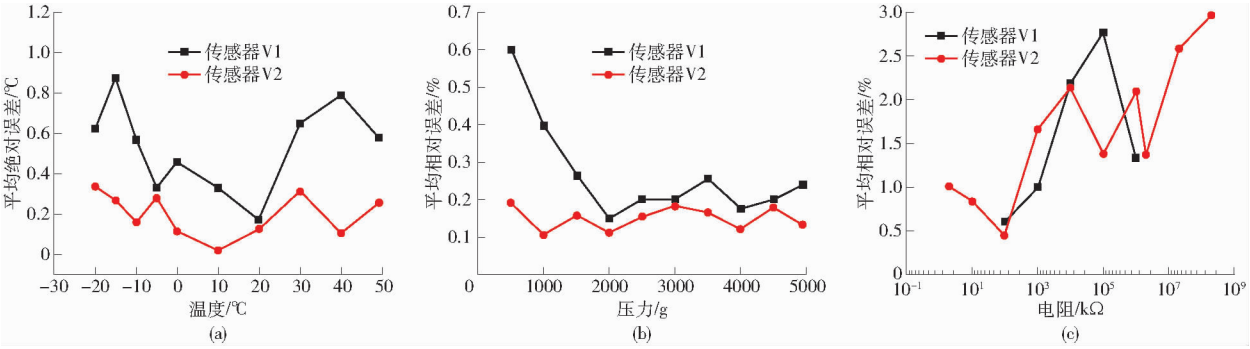

图 8 电路性能验证结果

Fig. 8 Circuit performance verification results

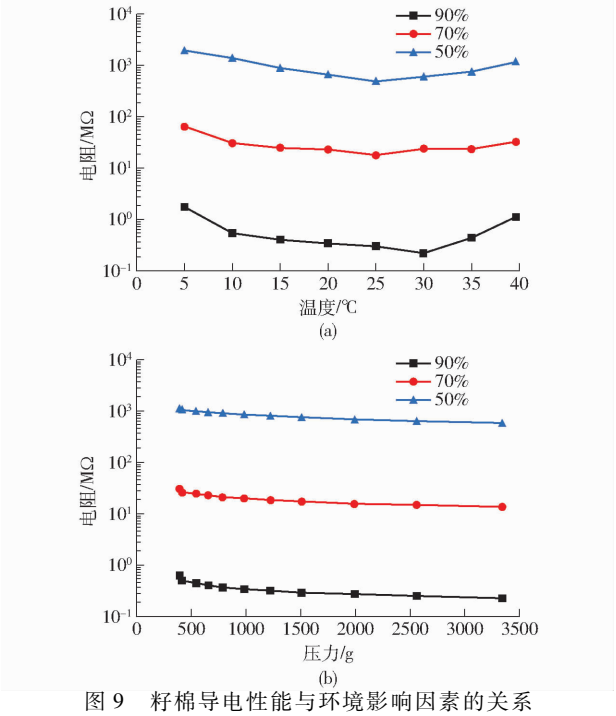

图 9 籽棉导电性能与环境影响因素的关系

Fig. 9 Relationship between seed cotton electrical conductivity and environmental factors

温度升高使棉花中游离水和吸附水的离子浓度增加,分子运动加快,促进离子扩散,提高导电性;进一步升温则导致水分蒸发,可供电荷移动的介质减少,从而降低导电性[28]。在恒定温度(20℃)下进行试验,不同湿度籽棉电阻随压力的变化曲线如图 9b 所示。由图 9b 可知,各湿度条件下电阻随压力增大迅速下降,但降幅逐渐减小。原因为压力增大使籽棉压缩密度提高,纤维间空隙减少、结构更紧密,接触点和接触面积增加,从而为电荷传递提供了更多路径[29]。

3.2.2 籽棉导电性能与回潮率关系

为了探究籽棉导电性能与回潮率之间关系,在恒定温度(20℃)下进行试验,同时保证压缩密度恒定(191.3 kg/m^3),即尽量保证接触压力恒定,籽棉随着回潮率变化而产生的电阻变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知,籽棉回潮率与导电性能(电阻)

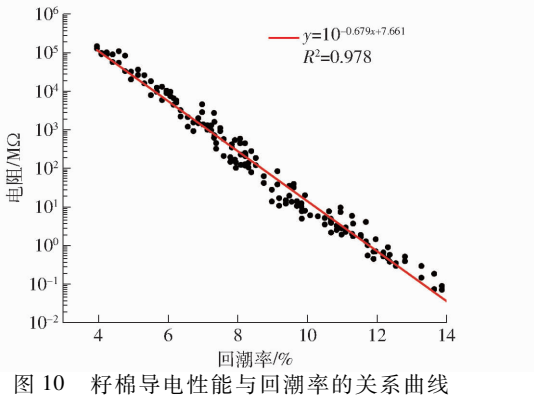

图 10 籽棉导电性能与回潮率的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between electrical conductivity of seed cotton and moisture regain

之间为对数函数关系。经对数处理后电阻与回潮率存在线性负相关关系,因为棉花纤维是一种吸湿性纤维,易于从周围大气中吸收或释放水分[30]。水分吸收会导致棉花纤维中游离水的增加,同时棉花纤维表面也会存在吸附水,形成一层水膜,这些水分子在材料中形成导电路径,使得电流易于通过,增加了材料导电性能。

3.2.3 模型性能对比

经上述试验得知,籽棉导电性能与接触压力、环境温度和回潮率之间均存在一定相关性。因此,可将接触压力、环境温度和电阻作为回潮率预测模型特征值,进而探究籽棉电阻与环境温度、接触压力和回潮率之间的关系如图 11 所示。当温度一定时,随着接触压力增加,电阻也在不断减小,此时回潮率保持不变,由此可知,将压力作为电阻法测定回潮率的补偿值可行。当压力一定时,随着温度增加,电阻随着温度先减小后增加,此时回潮率也基本保持不变,由此可知,根据环境温度对电阻进行修正,进而提高回潮率检测精度也可行。

将接触压力、环境温度与电阻作为回潮率预测模型特征值,选取 3 种算法 MLR、RF 和 BPNN 进行建模,并使用测试集对各个模型预测精度进行评估,为了探索最佳籽棉回潮率预测模型,对 3 种算法预测性能进行对比,各个模型预测精度如图 12 所示。

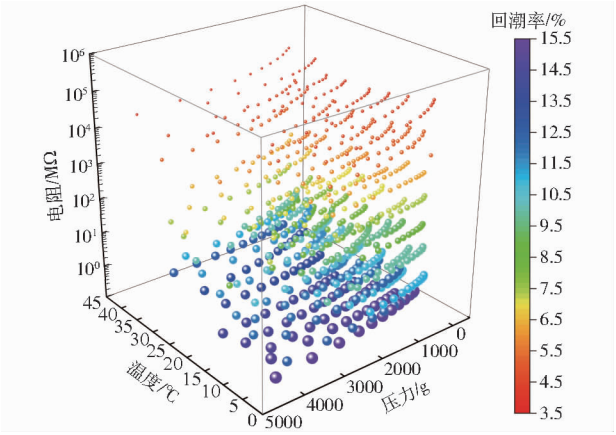

图 11　籽棉导电性能影响因素分析

Fig. 11　Analysis of influencing factors on seed cotton electrical conductivity

由图 12 可知，MLR 算法 R^2、RMSE 分别为 0.928、0.842%；RF 算法 R^2、RMSE 分别为 0.984、0.392%；BPNN 算法 R^2、RMSE 分别为 0.986、0.377%，BPNN 具有强大的非线性映射能力和自动学习特征间复杂交互效应的潜力，因此在数据充足时表现优于 MLR 和 RF 模型。

为进一步验证籽棉回潮率预测模型可靠性，制备 10 组具有不同回潮率的籽棉测试样本进行验证试验。每组样本设置 3 个平行样，分别采用 3 种方式检测：①使用传感器 V2 进行测量。②使用传感器 V1 进行测量，其回潮率由上位机软件直接显示。③采用半自动快速恒温烘箱法进行测定，并以烘箱法结果作为标准值。将传感器 V2 与传感器 V1 测

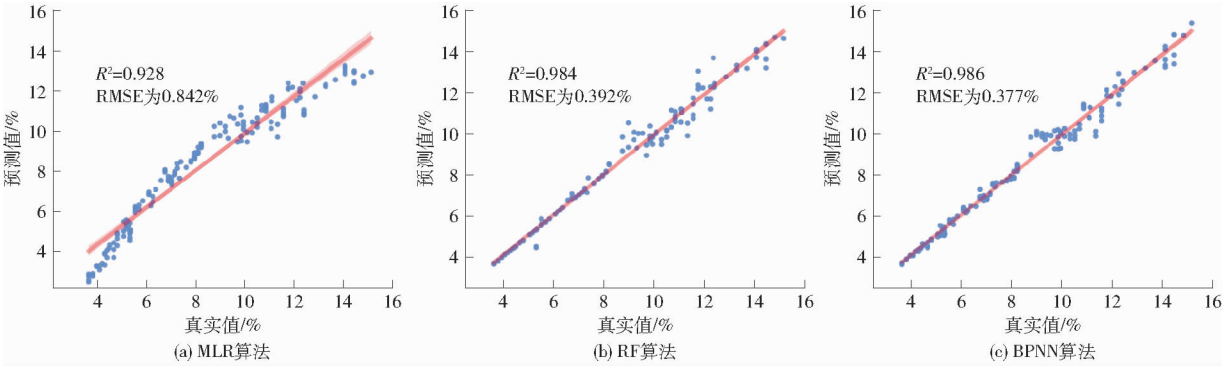

图 12　不同算法预测精度

Fig. 12　Prediction accuracy of different models

量结果进行对比，如表 4 所示。由表 4 可知，与传感器 V1 相比，传感器 V2 将测量范围扩展至 4% ~ 15%，平均绝对误差为 0.22%，平均相对误差为 2.32%；而传感器 V1 平均绝对误差为 0.3%，平均相对误差为 3%。表明传感器 V2 在测量精度方面取得了显著提升。性能检验结果进一步表明，基于温度与压力补偿的电阻法能够可靠地实现籽棉回潮率在线检测，且在不同回潮率范围内均表现出良好的稳定性。

表 4　室内静态试验结果

Tab. 4　Results of laboratory test　%

组号	烘箱法测量值	回潮率检测值		绝对误差		相对误差	
		传感器 V2	传感器 V1	传感器 V2	传感器 V1	传感器 V2	传感器 V1
1	3.90	3.99	\	0.09	\	2.31	\
2	5.01	5.13	\	0.12	\	2.40	\
3	6.12	6.24	6.28	0.12	0.16	1.96	2.61
4	7.48	7.64	7.31	0.16	0.17	2.14	2.27
5	8.63	8.92	8.98	0.29	0.35	3.36	4.06
6	10.06	10.27	10.35	0.21	0.29	2.09	2.88
7	11.34	11.01	10.95	0.33	0.39	2.91	3.44
8	12.53	12.74	12.23	0.21	0.30	1.68	2.39
9	13.81	13.43	13.35	0.38	0.46	2.75	3.33
10	14.88	15.12	\	0.24	\	1.61	\
均值				0.22	0.30	2.32	3.00

3.3　田间收获试验

2024 年 9 月 30 日在新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州阜康市(44°36′N，88°00′E)进行了籽棉收获田间试验，如图 13a 所示。试验样机为山东天鹅棉业机械股份有限公司 4MZD－6 型六行自走式打包采棉机，作业宽度为 5.9 m，作业前进速度为 3.6 km/h。收获作业时，籽棉回潮率传感器 V2 安装在采棉机打包室侧壁，采收过程中由系统上位机记录棉包回潮率。棉包中不同半径位置的棉花通常对应不同时间采收的棉花，但在同一时间段内，其回潮率整体差异较小。为了准确测定棉包实际回潮率，在棉包中心和不同半径处共收集 5 个样本(R = 0、25、50、75、100 cm)，取样位置如图 13b 所示。当棉包落地后立刻采集样本，放于密封袋中并进行称量，最后带回实验室用半自动快速恒温烘箱进行干燥，通过质量差确定真实回潮率，最后对 5 个样本测定结果取平均值，作为该棉包回潮率。

对田间收获试验数据进行分析，从籽棉收获过程实时检测的回潮率中选取 500 s 时段，如图 14 所示。由图 14 可知，传感器 V2 测量温度呈上升趋



(a) 采棉机作业现场 (b) 单个棉包样本采集位置

图 13 田间收获试验

Fig. 13 Field harvesting test

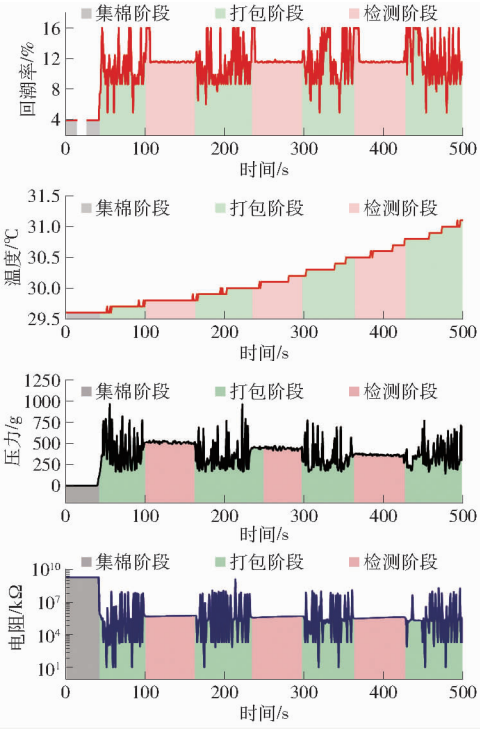

图 14 籽棉回潮率在线检测原始数据

Fig. 14 Raw data analysis of online seed cotton moisture regain measurement

势,主要原因为:籽棉开始打包时,会与打包室侧壁发生剧烈摩擦,导致传感器 V2 与棉包接触面温度升高。此外,打包过程中压力与温度测量值随棉包转动而产生剧烈波动,从而造成回潮率检测值波动。根据打包流程可分为 3 个阶段:集棉阶段(0 ~45 s):采收的棉花进入集棉箱,打包室内无棉包,传感器 V2 检测空气,因此检测值处于下限。打包阶段(45 ~100 s):集棉箱棉花已满,开始进入打包室,棉包在打包室内不断旋转,导致其与传感器 V2 产生相对位移,接触压力发生巨幅变动。此时,电阻检测值和回潮率检测值均呈现较大浮动。检测阶段(100 ~165 s):集棉仓继续储棉,打包室停止打包,棉包与传感器 V2 相对静止,接触压力呈稳定下降趋势,电阻轻微上升。此阶段回潮率检测值相对稳定。结果表明,检测阶段回潮率稳定性验证了基于压力和温度补偿回潮率检测方法的可行性。

田间试验共对 9 个棉包进行采样,分别记录回潮率传感器 V2 检测值以及烘箱标定值,并对二者进行对比,结果如表 5 所示。由表 5 可知,传感器 V2 绝对误差不大于 0.5%,相对误差不大于 4.32%,满足预设要求。田间试验结果表明,籽棉回潮率传感器 V2 可适用于田间作业,但与室内试验相比,田间试验相对误差较大,原因为田间试验时,打包过程中由于摩擦造成的局部温度升高和接触压力浮动较大以及传感器 V2 自身存在误差等,均会造成较大的误差。

表 5 田间收获试验结果

Tab. 5 Results of field harvest test %

组别	回潮率		绝对误差	相对误差
	传感器 V2 检测值	烘箱标定值		
1	11.08	11.58	0.50	4.32
2	10.26	10.54	0.28	2.66
3	9.89	10.08	0.19	1.88
4	10.17	9.83	0.34	3.46
5	9.78	9.52	0.26	2.73
6	9.32	9.64	0.32	3.32
7	9.64	9.49	0.15	1.58
8	9.38	9.02	0.36	3.99
9	8.34	8.25	0.09	1.09

4 结论

(1)基于电阻法设计了一种具有温度和压力补偿的采棉机籽棉回潮率传感器及硬件电路,可有效降低环境温度和接触压力的影响,设计的硬件电路可实现温度、压力和电阻的实时测量,温度测量平均绝对误差小于 0.4℃,压力测量平均相对误差小于 0.2%,电阻测量平均相对误差小于 3%。

(2)探究了环境温度、接触压力和回潮率对籽棉导电性能的影响,采用 MLR、RF 和 BPNN 3 种算法建立了籽棉回潮率预测模型,并对最佳模型进行室内静态试验验证模型稳定性。结果表明,BPNN 算法表现最佳,R^2 为 0.986,RMSE 为 0.377%。

(3)室内静态试验和田间收获试验结果表明,传感器回潮率检测范围为 4% ~15%,室内静态试验平均绝对误差和平均相对误差分别为 0.22% 和 2.32%;田间收获试验中绝对误差不大于 0.5%,相对误差不大于 4.32%。

参 考 文 献

[1] 张若宇, 张建强, 夏彬, 等. 数字棉花技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 1 - 16.

ZHANG Ruoyu, ZHANG Jianqiang, XIA Bin, et al. Research progress on digital cotton technology and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):1 - 16. (in Chinese)
[2] HARDIN R G, BARNES E M, DELHOM C D, et al. Internet of things: cotton harvesting and processing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107294.
[3] 石茂林, 高小雅, 张卫东, 等. 采棉机关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 167 - 183.
SHI Maolin, GAO Xiaoya, ZHANG Weidong, et al. Development status and prospect of research on key technologies of cotton pickers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):167 - 183. (in Chinese)
[4] WILLIAMSON E B, RILEY J A. Interrelated effects of defoliation, weather and mechanical picking on cotton quality[J]. Transactions of the ASAE, 1961, 4(2): 164 - 165.
[5] DADGAR M. The harvesting and ginning of cotton[M]// Cotton science and processing technology: gene, ginning, garment and green recycling. Singapore: Springer Singapore, 2020: 61 - 78.
[6] DELHOM C, RODGERS J. Cotton moisture—its importance, measurements and impacts[C]// Proceedings of the 33rd International Cotton Conference Bremen, 2016: 16 - 18.
[7] VAN DER SLUIJS M H J, LONG R L. The effect of seed cotton moisture during harvesting on-part 1-fiber quality[J]. Textile Research Journal, 2016, 86(18): 1925 - 1936.
[8] VAN DER SLUIJS M H J, LONG R L, BANGE M P. Comparing cotton fiber quality from conventional and round module harvesting methods[J]. Textile Research Journal, 2015, 85(9): 987 - 997.
[9] BYLER R K. Resistance-type portable cotton lint moisture meter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 13 - 17.
[10] KRAJEWSKI A S, GORDON S G. An in-line, non-invasive cotton moisture measurement device for gin ducts[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1331 - 1339.
[11] RODGERS J, ZUMBA J, DELHOM C. Microwave moisture measurement of cotton fiber moisture content in the laboratory[J]. AATCC Journal of Research, 2017, 4(3): 1 - 7.
[12] KULDASHOV O K, KULDASHOV G O, MAMASODIKOVA Z Y. Infrared sensor for remote monitoring of moisture content in raw cotton[J]. Journal of Optical Technology, 2019, 86(6): 390 - 393.
[13] FANG L, ZHANG R, DUAN H, et al. Resistive sensing of seed cotton moisture regain based on pressure compensation[J]. Sensors, 2023, 23(20): 8421.
[14] HONG M, FANG L, WANG H, et al. Moisture regain sensing method for seed cotton under multi-factor fusion[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110073.
[15] 钱一夫, 黄杰, 方亮, 等. 基于 Stacking 集成的籽棉回潮率信息融合检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 159 - 166.
QIAN Yifu, HUANG Jie, FANG Liang, et al. Moisture regain detection of seed cotton using information fusion based on Stacking ensemble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):159 - 166. (in Chinese)
[16] LI C, LI B, HUANG J, et al. Developing an online measurement device based on resistance sensor for measurement of single grain moisture content in drying process[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4102.
[17] 王金武, 汤天永, 唐汉, 等. 联合收获机电容式稻谷含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 143 - 152.
WANG Jinwu, TANG Tianyong, TANG Han, et al. Design and experiment of on-line detection device for capacitive paddy rice moisture content of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):143 - 152. (in Chinese)
[18] 张伟, 杨刚, 雷军波, 等. 基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 21 - 28.
ZHANG Wei, YANG Gang, LEI Junbo, et al. Development of on-line detection device for grain moisture contentusing microwave reflection method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 21 - 28. (in Chinese)
[19] YAN J, TIAN H, WANG S, et al. Paddy moisture on-line detection based on ensemble preprocessing and modeling for combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107050.
[20] FANG L, ZENG Z, QIAN Y, et al. Real-time sensing of seed cotton moisture on cotton harvesters with temperature and pressure compensation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110939.
[21] SHEPHERD J V. Standard procedures for foreign matter and moisture analytical tests used in cotton ginning research[M]. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1972.
[22] BYLER R K. Resistivity of cotton lint for moisture sensing[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(3): 877 - 882.
[23] MURPHY E J, WALKER A C. Electrical conduction in textiles. Ⅰ The dependence of the resistivity * of cotton, silk and wool on relative humidity and moisture content[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1928, 32(12): 1761 - 1786.
[24] 中国纤维检验局. 原棉回潮率试验方法 烘箱法:GB/T 6102.1—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
[25] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
[26] WATTONVILLE J D. 7760 cotton picker[C]//2008 ASABE Annual International Meeting, 2008.
[27] BARRON J J, ASHTON C. The effect of temperature on conductivity measurement[J]. TSP, 2005, 7(3): 1 - 5.
[28] WALKER A C. Effect of atmospheric humidity and temperature on the relation between moisture content and electrical conductivity of cotton[J]. Journal of the Textile Institute Transactions, 1933, 24(4): 145 - 160.
[29] ATHANASOPOULOS N, SIKOUTRIS D, SIAKAVELLAS N J, et al. Electrical resistivity prediction of dry carbon fiber media as a function of thickness and fiber volume fraction combining empirical and analytical formulas[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 81: 26 - 34.
[30] WALDIE A H, HUGHS S E, GILLUM M N. Automatic moisture sensor for measurement and control of cotton ginning processes[J]. Journal of Engineering for Industry, 1983, 105(1): 27 - 30.