doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.010

基于电阻法的皮棉回潮率在线检测装置设计与试验

徐健康[1,2]　王培宇[1,2]　张若宇[1,2]　钱一夫[1,2]　方　亮[1,2]　常金强[1,3]　刘遵严[4]

(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.国家市场监督管理总局技术创新中心(棉花及制品检验检测技术),图木舒克 843900)

摘要:针对棉花加工过程中负压环境下定量取样困难、回潮率实时在线检测精度低且稳定性差等问题,研制了一种基于电阻法的皮棉回潮率在线检测装置,提出了一种“动态定量取样—称量恒压测量—多参数补偿”的在线检测方法,设计了翻转式取样机构和称量检测机构等关键部件,实现了皮棉在高速流动状态下稳定采样与连续检测。基于皮棉电阻特性及环境温湿度信息,构建了多参数回潮率预测模型,并通过多种算法对比,确定随机森林模型具有最佳预测性能,其决定系数为 0.98,均方根误差为 0.22%。开展装置性能验证试验,结果表明,该在线检测装置与标准测定仪的平均偏差为 0.1%,单次检测平均耗时为 23.4 s,样本质量对回潮率测量结果影响较弱(Pearson 相关系数为 0.47)。试验结果表明,该装置具有较高的检测精度和良好的稳定性,能够满足棉花加工过程对回潮率在线检测的实时性和准确性需求,为棉花加工过程的智能调控与质量追溯提供了可靠技术支撑。

关键词:皮棉;定量取样;回潮率;电阻法;在线检测

中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0097-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Online Lint Cotton Moisture Regain Detection Device Based on Resistance Method

XU Jiankang[1,2]　WANG Peiyu[1,2]　ZHANG Ruoyu[1,2]　QIAN Yifu[1,2]　FANG Liang[1,2]
CHANG Jinqiang[1,3]　LIU Zunyan[4]

(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. *Technology Innovation Center of Inspection and Testing Technology of Cotton and Its Products, State Administration for Market Regulation, Tumushuke* 843900, *China*)

Abstract: In response to the challenges of quantitative sampling under negative pressure, low real-time detection accuracy of moisture content, and poor stability during the cotton processing, an online moisture content detection device for lint cotton was developed based on the resistance method. A novel online detection method, combining “dynamic quantitative sampling—weight constant pressure measuremen—multi-parameter compensation” was proposed. Key components, including a flip-type sampling mechanism and weight detection system, were designed to achieve stable sampling and continuous detection of lint cotton in a high-speed flow state. Based on the electrical resistance characteristics of lint cotton and environmental temperature and humidity data, a multi-parameter moisture content prediction model was constructed. After comparing various algorithms, the random forest model was identified as the most accurate predictor, with a coefficient of determination (R^2) of 0.98 and a root mean square error (RMSE) of 0.22%. Performance validation tests showed that the average deviation between the proposed online detection device and the standard measurement instrument was 0.1%, with an average detection time of 23.4 s per sample. The impact of sample weight on the moisture content measurement results was

收稿日期:2025-09-29　修回日期:2025-10-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)、兵团科技攻关计划项目(2023AB014)、新疆棉花产业技术体系专项(XJARS-03)和国家棉花产业技术体系专项(CARS-15-17)

作者简介:徐健康(2000—),男,博士生,主要从事棉花品质检测研究,E-mail:xujiankang0923@163.com

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

weak (Pearson correlation coefficient was 0.47). The experimental results demonstrated that the device offered high detection accuracy and good stability, meeting the real-time and accuracy requirements for moisture content detection in cotton processing. This device can provide reliable technical support for intelligent regulation and quality traceability in the cotton processing industry.

Key words: lint cotton; quantitative sampling; moisture regain; resistance method; online detection

0 引言

棉花是我国农业的重要支柱之一,其中新疆棉花产量占全国总产量的 90% 以上[1],其棉花质量直接影响纺织行业的稳定性和产品品质。皮棉回潮率是棉花加工过程中决定产品质量的关键指标,其高低直接关系到棉纤维强度、色泽等性能及后续纺织工艺的稳定性[2-3]。过高的回潮率易导致棉纤维霉变、粘连,并增加杂质去除难度;而回潮率过低则可能导致棉纤维变脆,增加断裂风险[4-6]。随着棉花加工生产的连续化与自动化水平不断提升,对回潮率的实时在线监测技术要求也随之增高。

目前,棉花加工环节的回潮率检测仍以离线取样检测为主。常用的烘箱法虽具有较高的测量精度,但其单次检测周期通常超过 1.5 h[7],难以满足加工现场对参数实时调控的需求。手持式电阻检测仪具有一定的便捷性,但受操作规范性和环境温湿度波动影响较大[8],测量结果存在较大波动,难以实现过程控制闭环。因此,亟需研发适用于加工环节的在线检测装置,实现皮棉回潮率的动态、精准监测,以促进检测效率和检测精度的双重提升,推动棉花加工的智能化与数字化发展。

电阻法因其具有响应速度快、结构简单、易于系统集成等优势,已成为回潮率检测的主流技术之一[9-10]。其基本原理为:棉纤维电阻值与其含水率呈负相关关系,即含水率越高,导电率越强,电阻值越低。然而,在实际应用中,电阻法检测仍面临诸如皮棉样品密度不稳定、环境温湿度变化等干扰因素。例如,Uster 公司推出的 Intelligin 在线检测系统虽可实现连续检测,但需依赖复杂的温度补偿和压力调节机制来抑制干扰,导致系统结构复杂且成本较高[11-12];国内 YZ-1 型智能在线检测系统虽已应用于加工生产线[13],但在皮棉高速流动状态下难以获得稳定质量的测量样本。此外,皮棉在集棉管道中分布不均匀和瞬时密度波动大[14],也使得传统接触式电极结构难以采集稳定的电阻信息,极大限制了在线检测结果的可靠性和重复性。

为解决上述问题,本研究设计一种基于电阻法的皮棉回潮率在线检测装置,采用“动态定量取样—称量恒压测量—多参数补偿”的在线检测方法,集成翻转式取样机构、称量检测机构与自动控制系统等关键部件,通过集棉管道侧壁负压牵引,实现皮棉样本自动定量取样与回收,确保样品具有代表性且不干扰原有加工流程。以期为棉花加工过程中水分精细化控制与质量管理提供有效装备支撑与技术路径。

1 原理与方法

1.1 基于电阻法的回潮率检测原理

回潮率为衡量棉纤维含水量的关键指标,对棉纤维在加工过程中的质量稳定性及产品性能具有显著影响。电阻法作为一种经典的水分测量手段,其检测原理基于棉纤维含水状态下导电能力的变化特性。当棉纤维吸收水分后,水分中的离子为电流提供通路,从而显著降低其电阻。棉样可近似视为一个电阻元件,其电阻 R 与体积电阻率 ρ 之间满足关系

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

式中 l——电极间距离,m

A——棉样横截面积,m^2

电阻率倒数为导电率

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RA} \tag{2}$$

已有研究表明,导电率 σ 与回潮率(MR)存在一定函数关系,常见形式包括线性、对数型及幂律型关系[15-16],通常表达式为

$$\begin{cases} \sigma = a\ln(MR) + b \\ \sigma = kMR^n \end{cases} \tag{3}$$

其中,a、b、k、n 等参数需通过试验数据拟合获得。通过实测电阻值计算导电率后,即可反推出对应的回潮率。考虑到环境温湿度、样本密度及外加电压等因素会干扰测量结果,故须设计相应的补偿机制[17-19]。

通过高精度温湿度传感器实时采集温湿度数据,通过预测模型校正电阻测量结果,以抵消温湿度环境变化带来的偏差;采用密度补偿结构,通过施加恒定压力等方式调节样本密度,使不同状态下棉样保持测量一致性;此外,采用稳定的电压源,以确保施加在棉样上的电压恒定,避免因电压波动引起的误差。其检测原理及补偿机制如图 1 所示。

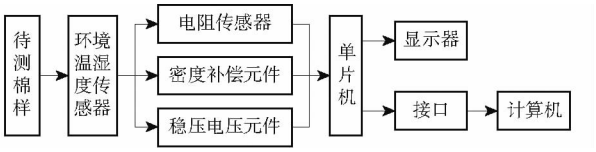

图 1　电阻法检测及补偿机制

Fig. 1　Resistance-based detection and compensation mechanism

1.2　皮棉回潮率在线检测应用方法

为实现高速输送条件下皮棉回潮率的在线精准测量，在电阻法检测原理基础上，提出了一种“动态定量取样—称量恒压测量—多参数补偿”的在线检测方法。

动态定量取样：通过专用机构从集棉管道中自动采集具有代表性的标准质量棉样，保证每次采集样品质量稳定，减少因棉流分布不均造成的测量误差。

称量恒压测量：对采集棉样进行质量检测，并在恒定压力条件下获取其电阻信号，以保持样品密度一致性，降低检测结果的离散性和随机误差。

多参数补偿：在采集电阻同时，实时获取环境温湿度，将多源信息输入训练好的预测模型，对环境波动进行补偿修正，输出最终回潮率结果。

2　在线检测装置设计

2.1　总体结构与工作原理

针对棉花加工过程中皮棉在动态条件下定量取样困难、回潮率检测稳定性差等问题，设计了一种皮棉回潮率在线检测装置。该装置主要由翻转式取样机构、称量检测机构及控制系统等组成，如图 2 所示。

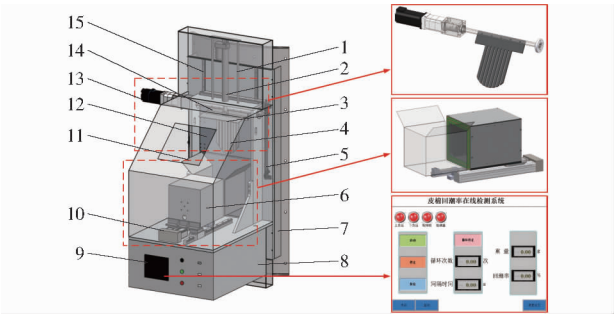

图 2　在线检测装置整机结构示意图

Fig. 2　Overall structural diagram of online detection device

1. 导向杆　2. 刮棉气缸　3. 刮棉板　4. 取样板　5. 负压调节气缸　6. 压棉盒　7. 连接板　8. 电气控制柜　9. 触摸屏　10. 滑台模组　11. 集棉盒　12. 负压调节板　13. 伺服电机　14. 旋转轴　15. 直线导轨

整机通过连接板固定安装于棉花加工厂皮棉集棉管道侧壁，管道壁体设有取样口和放样口。翻转式取样机构安装在取样口，用于实现皮棉在高速流动状态下的定量取样；称量检测机构则位于放样口处，负责获取棉样质量并完成电阻测量；控制系统由伺服电机、滑台模组和工控系统组成，负责取样、检测执行机构的运动控制与数据的实时采集和记录。装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1　在线检测装置主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of online detection device

参数	数值
装置总体尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	532×660×1 292
取样口尺寸(长×宽)/(mm×mm)	300×600
棉流流速/(m·s^{-1})	12～15
安装管道直径/mm	1 200
安装管道高度/m	≤15

装置启动后，取样口打开，取样机构从集棉管道中采集标准质量的棉样并输送至装置内部。在刮棉机构辅助下，将棉样压入集棉盒内，实现棉样收集。称量机构对棉样进行称量，以判断其是否满足检测质量要求。对于合格样品，检测机构移动至预定位置，对棉样进行压实处理，以保证样品密度的一致性。随后，电阻检测板通过电极传感器采集棉样的电阻值，结合环境参数输入回潮率预测模型，以预测棉样回潮率。预测结果实时上传至上位机并完成数据存储。检测完成后，放样口打开，负压气流将已检测棉样吸回集棉管道。各机构复位至初始零点状态，并在短暂延时后继续下一轮检测，实现连续在线检测。

2.2　关键机构设计

2.2.1　翻转式取样机构设计

为实现皮棉输送过程中回潮率的连续稳定检测，设计了一种翻转式取样机构。该机构主要由伺服电机、减速器、联轴器、电机支座、旋转轴、取样板和轴承座组成，其结构如图 3 所示。

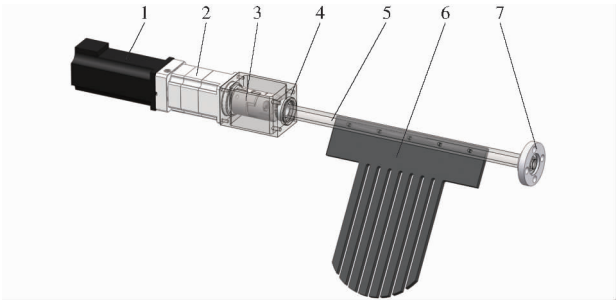

图 3　取样机构结构示意图

Fig. 3　Schematic of sampling mechanism

1. 伺服电机　2. 减速器　3. 联轴器　4. 电机支座　5. 旋转轴　6. 取样板　7. 轴承座

在取样板结构设计方面，依据 GB/T 6102.2—2012《原棉回潮率试验方法 电阻法》[20] 中对单次取

样质量(50 ±5) g 的要求,采集实际加工过程中 50 组合规样本,并测量其在自然蓬松状态下体积尺寸,如图 4 所示。综合测量结果,确定取样板尺寸为 250 mm ×250 mm ×8 mm,以保证每次取样质量满足检测要求。

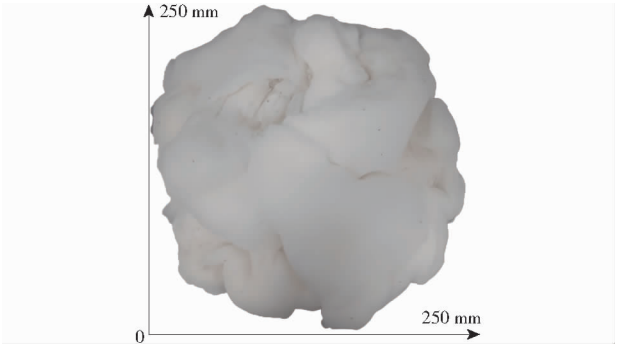

图 4 (50 ±5)g 皮棉样本体积尺寸

Fig. 4 Volume dimensions of (50 ±5) g lint cotton sample

工作过程中,取样板绕旋转轴以设定速度做圆周运动。初始状态下,取样板位于如图 5 所示“取样板 1”位置,此时棉流沿管道自下而上高速运动。当执行取样操作时,取样口打开,取样板顺时针旋转一定角度(运动过程①),至“取样板 2”位置,并在管道内短暂停留。由于取样板设有特定开孔结构,其上下表面在高速气流作用下产生压差,促使棉样附着并逐渐堆积。达到设定取样时间后,取样板逆时针旋转(运动过程②),将附着棉样带入装置内部。考虑到棉纤维在高速输送过程中呈现蓬松缠绕状态,为保证取样完整性,取样板需进一步旋转至水平方向(“取样板 3”位置),将棉样完全取进装置内部。随后取样口关闭,取样板顺时针旋转(运动过程③),返回初始位置。此时,由于负压环境消除,棉样脱离取样板并自然落入集棉盒中,完成一次取样流程。

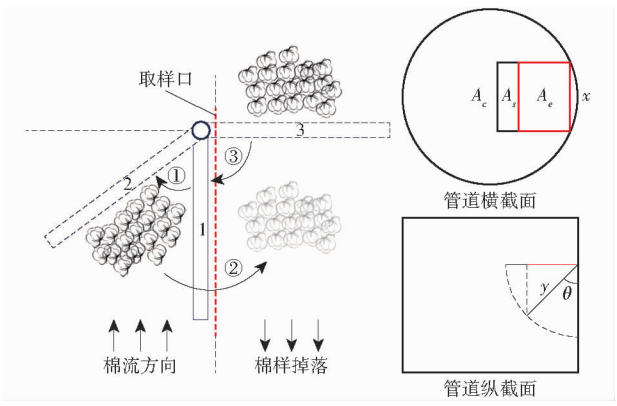

图 5 取样板工作原理示意图

Fig. 5 Working principle diagram of sampling plate

为量化该机构的取样性能,建立取样量 Q 的理论模型。假设皮棉在管道内呈均匀分布且速度稳定,单位面积质量流量为

$$m_d = \frac{m_c}{A_c} \tag{4}$$

式中 m_d——单位面积质量流量,kg/(s·m²)

m_c——管道总质量流量,kg/s

A_c——管道横截面面积,m²

取样板旋转至取样角度 θ 时有效拦截面积为

$$A_e = xy\sin\theta = A_s\sin\theta \tag{5}$$

式中 A_e——有效拦截面积,m²

x——取样板宽度,m

y——取样板长度,m

A_s——取样板面积,m²

θ——取样板与竖直方向夹角,(°)

通过有效拦截面积的质量流量为

$$m_{ci} = m_d A_e \tag{6}$$

式中 m_{ci}——有效面积质量流量,kg/s

理想取样量 Q 为

$$Q = m_{ci}t_s = \frac{A_s\sin\theta}{A_c}m_c t_s \tag{7}$$

式中 t_s——取样时间,s

从式(7)可知,在棉流稳定且取样板参数确定情况下,取样量主要受取样角度 θ 和取样时间 t_s 的影响。

考虑到取样板在复杂流场中需频繁启停、运转速度较高,且对取样角度与取样时间控制精度要求较高,因此伺服电机的选型尤为关键[21]。电机需克服气流阻力产生的负载转矩 M_1 及加速启动产生的瞬间负载转矩 M_2,则最大负载转矩计算式为

$$M = M_1 + M_2 \tag{8}$$

其中

$$M_1 = PSL \tag{9}$$

$$M_2 = J\alpha \tag{10}$$

式中 P——气流压强,取 1 024.45 Pa

S——取样板表面积,取 0.032 m²

L——力臂,取 0.125 m

J——负载惯量,kg·m²

α——负载角加速度,rad/s²

负载惯量 J 包括取样板惯量 J_1 与旋转轴惯量 J_2,即

$$J = J_1 + J_2 \tag{11}$$

其中

$$J_1 = \frac{1}{12}m_1(x^2 + y^2) + m_1 e_1^2 \tag{12}$$

$$J_2 = \frac{1}{8}m_2 d^2 + m_2 e_2^2 \tag{13}$$

式中 m_1——取样板质量,取 2 kg

e_1——取样板重心线与旋转轴线间的距离,取 0.125 m

m_2——旋转轴质量，取 0.939 kg

d——旋转轴直径，取 0.02 m

e_2——旋转轴重心线与旋转轴线间距离，取 0 m

其中，取样板宽度 x 取 0.008 m，取样板长度 y 取 0.25 m。

取加速时间 t_a 为 0.1 s，最高转速 n_1 为 1 000 r/min，则负载角加速度为

$$\alpha = \frac{2\pi n_1}{60 t_a} \tag{14}$$

最终计算得最大负载转矩 M 为 47.769 N·m。

基于上述计算，综合考虑取样机构实际运行工况及动态负载特性[22]，选取安全系数为 1.5。最终确定选用 MS6H－60CM30BZ 3－20P4 型伺服电机，其额定转矩为 1.27 N·m，最大转矩为 4.445 N·m，并配套传动比为 20 的减速机，输出转矩为 25.40 N·m，最大输出转矩可达 88.90 N·m，可充分满足装置工作需求。

2.2.2　称量检测机构设计

为实现棉样质量实时采集与回潮率在线检测，结合皮棉样本质量与测量精度要求，设计称量检测机构。该机构主要由集棉盒、称量传感器、上/下垫块、电极传感器、直线导轨、支撑板、滑台模组和压棉盒等组成，其结构如图 6 所示。

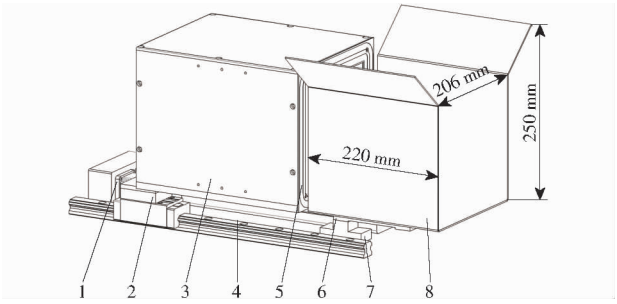

图 6　称量检测机构结构示意图

Fig. 6　Structural schematic of weighing detection mechanism

1. 滑台模组　2. 支撑板　3. 压棉盒　4. 直线导轨　5. 电极传感器　6. 称量传感器　7. 垫块　8. 集棉盒

其中，集棉盒采用三端开口结构，通过 3D 打印成型。前端开口便于检测模块沿导轨前后移动，后端开口用于样品检测完成后的快速回收，避免残留影响后续检测。根据取样板尺寸与棉样体积特性，确定集棉盒尺寸为 206 mm×220 mm×250 mm。称量传感器选用中航 L6D－C3－5kg－0.45B－FS 型，具有较高的灵敏度和稳定性。为缓解负压环境对称量精度的影响，设计了上/下垫块结构：上垫块连接集棉盒与称量传感器，可有效缓冲负压环境下集棉盒变形带来的影响，避免因应力传导引起的测量误差；下垫块则用于连接称量传感器与安装底板，确保传感器结构稳定、安装高度一致。

为提高电阻法在线检测中的测量稳定性，设计了压棉机构，以实现棉样的均匀压实，确保每次检测过程中棉样密度的一致性，从而减少密度波动对电阻测量结果的影响。该压棉机构由伺服电机驱动，通过压棉盒对棉样施加恒定压力，为电阻检测提供稳定的接触环境。为精确获取棉样电阻，设计了一种单极板回字形电极传感器，电极宽度为 10 mm，间距为 6 mm，如图 7 所示。

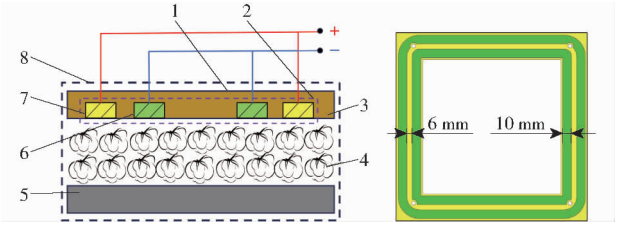

图 7　电极传感器结构示意图

Fig. 7　Schematic of electrode sensor

1. 压棉板　2. 电极传感器　3. 绝缘体　4. 皮棉　5. 挡板　6. 电极Ⅰ　7. 电极Ⅱ　8. 集棉盒

该电极通过安装孔固定在压棉盒表面，并随检测机构沿导轨前后移动。在压棉过程中，电极在恒压作用下与棉样充分接触，从而获得稳定、准确的电阻信号。电极传感器通过导线与电阻检测板连接，检测板集成稳压供电模块与环境温湿度采集模块，并通过 RS232 通讯接口与上位机进行数据通信，实现数据实时采集与传输。其检测原理示意图如图 8 所示。

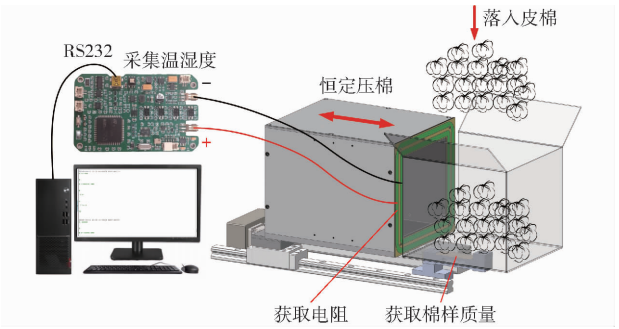

图 8　回潮率在线检测原理示意图

Fig. 8　Schematic of online moisture regain detection principle

2.3　控制系统设计

为实现检测流程的自动化控制与数据采集，系统采用 XDH－30A16 型可编程逻辑控制器（PLC）作为核心控制单元，结合伺服电机、滑台模组和气动执行器，实现取样、称量、电阻检测等机构的协调运行，控制逻辑流程如图 9 所示。

系统通过 RS485 总线通信，采用 MODBUS RTU 协议完成各检测单元之间的数据交互。上位机基于信捷 TS5－700－4G 触摸屏设计人机交互界面，具备启动、停止、复位等基本控制功能，同时可实时显示回潮率、棉样质量等关键参数，并存储历史数据，方

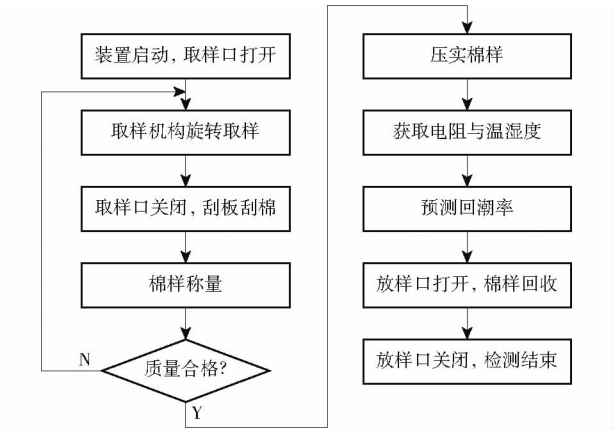

图 9 在线检测装置控制过程

Fig. 9 Control process of online detection device

便操作人员实时监控装置运行状态。人机交互界面如图 10 所示。



图 10 人机交互界面

Fig. 10 Human-machine interface

3 试验与结果分析

开展了室内静态试验和棉花加工厂动态试验。室内静态试验制备皮棉样品 264 组，完成了电阻检测板可靠性验证，建立了皮棉回潮率检测模型。棉花加工厂动态试验以正常加工过程集棉管道内的皮棉为对象验证了皮棉回潮率在线检测装置的实用性与可靠性。

3.1 室内静态试验

3.1.1 样品制备与数据采集

所用皮棉样本取自新疆生产建设兵团第十二师二二二团某棉花加工企业，样品在其正常加工过程中从集棉管道中采集，经过籽棉清理、轧花及皮棉清理等加工环节，具有代表性。

考虑到新疆棉花加工季节期间昼夜温差较大，环境温湿度波动显著，且对皮棉回潮率有直接影响，为获取覆盖多种工况条件下的数据样本，在不同环境温湿度组合下进行样本预处理。具体设置如下：环境温度为 5 ~ 40℃，每 5℃ 设定一个梯度，共设置 8 个温度梯度；相对湿度为 30% ~ 80%，每 5% 设定一个梯度，共设置 11 个湿度梯度，由此形成 88 种不同温湿度组合。所有皮棉样本均在恒温恒湿箱中培养 24 h。

在每种环境温湿度组合下，采集 3 份独立样本，每份样本质量为（100 ± 10）g，分别进行以下处理：①取（50 ± 5）g 棉样通过在线检测装置进行压棉并采集电阻数据。②剩余（50 ± 5）g 棉样使用原棉回潮率测定仪测量其回潮率真实值。最终，共采集 264 组（88 × 3）皮棉样本数据，各组样本实测回潮率为 3.84% ~ 9.87%。为便于展示与统计分析，表 2 为每组温湿度组合下 3 份样本回潮率平均值，该数据为后续回潮率预测模型的训练与验证提供了基础支持。

表 2 不同环境温湿度培养下的回潮率

Tab. 2 Moisture regain under different ambient temperature and humidity conditions %

相对湿度/%	温度/℃							
	5	10	15	20	25	30	35	40
30	4.86	4.71	4.62	4.53	4.39	4.25	4.16	4.07
35	4.74	4.42	4.58	4.67	4.47	4.43	4.11	3.84
40	5.73	5.63	5.47	5.35	5.23	5.10	5.04	4.95
45	5.41	5.24	5.49	5.01	5.20	4.84	5.06	4.85
50	6.60	6.53	6.41	6.34	6.22	6.16	5.93	5.83
55	6.29	6.17	6.22	5.78	6.07	5.62	5.61	5.77
60	7.34	7.26	7.16	7.03	6.90	6.88	6.79	6.71
65	6.88	6.88	6.57	6.79	6.35	6.45	6.34	6.05
70	8.39	8.29	8.20	8.01	7.91	7.73	7.54	7.44
75	8.66	8.17	8.08	7.49	7.58	7.86	7.67	7.43
80	9.87	9.79	9.68	9.56	9.32	9.15	9.03	8.87

3.1.2 电阻检测板可靠性验证

为验证试验所用电阻检测板的精度与稳定性，采用覆盖装置量程范围的标准电阻作为比对基准，分别开展线性度与重复性测试。在常温常湿条件下，选取多组标准电阻进行单次测量，并与理论阻值进行回归分析。为避免大跨度阻值分布对拟合结果的影响，对测量数据进行了对数变换。拟合结果显示，回归方程决定系数 R^2 为 0.999 9，表明测量值与标准值具有高度线性相关性，验证了检测板在宽量程内具备良好的线性测量能力。

为评估重复测量性能，选取 7 个典型标准电阻（10 kΩ ~ 10 MΩ），在恒定环境条件下各进行 10 次重复测量。测试结果如表 3 所示，各组测量值相对误差均小于 6%，且标准差较小，表明该系统具有良好的测量稳定性和一致性。

综合上述结果，电阻检测板在精度、线性度和稳定性方面均满足皮棉回潮率在线检测要求，可用于后续实际测量。

3.1.3 压棉距离对电阻测量的影响

为确定适用于皮棉电阻测量的最优压棉距离，

表 3　电阻检测板测量误差分析

Tab. 3　Measurement error analysis of resistance detection board

标准电阻/kΩ	10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000	10 000 000
平均值/kΩ	9. 423	96. 458	973. 897	10 597. 546	99 827. 602	980 776. 794	10 035 055. 000
标准差/kΩ	0. 002	0. 024	0. 255	4. 921	685. 687	477. 173	15 802. 825
相对误差/%	5. 768	3. 542	2. 610	5. 976	0. 172	1. 922	0. 351

深入探究压棉密度变化对测量结果的影响，在恒温（25℃）条件下开展对比试验。选取 4 组具有代表性的回潮率水平（4. 71%、5. 86%、6. 12%、7. 64%）的棉样，分别在 5 个压棉距离（2. 0、2. 5、3. 0、3. 5、4. 0 cm）下进行 10 次重复电阻测量。统计各条件下电阻均值与标准差，绘制散点误差棒图，如图 11 所示。

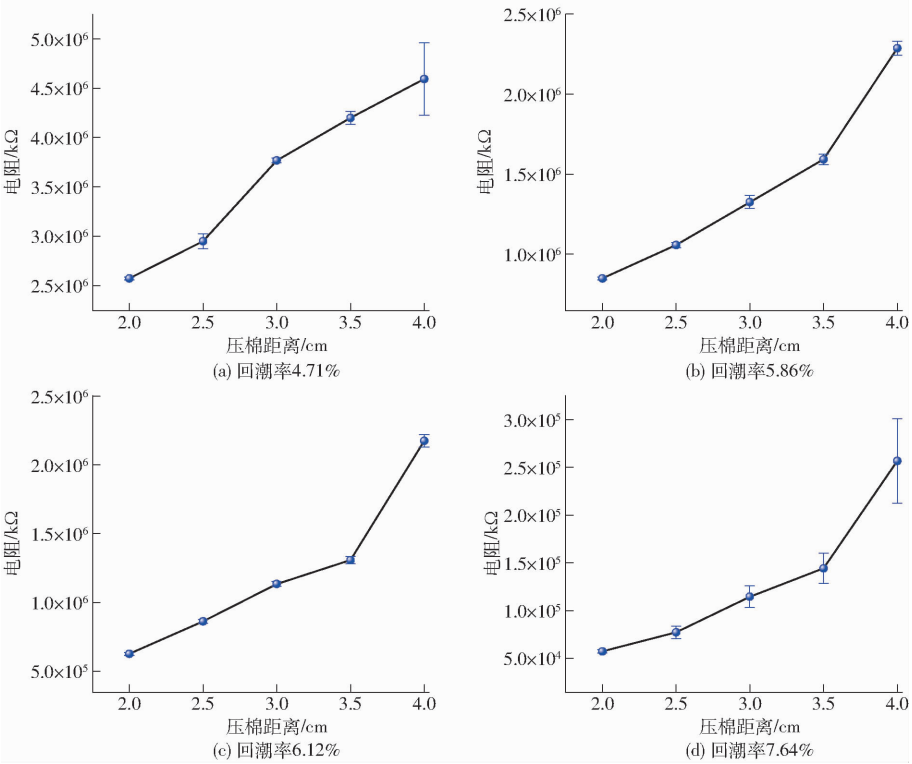

图 11　压棉距离对电阻测量的影响

Fig. 11　Effect of compression distance on resistance measurement

由图 11 可知，随着压棉距离减小，棉样从蓬松状态向压紧状态过渡，其内部接触密度逐渐增加，电阻呈明显下降趋势。尤其在压棉距离由 4. 0 cm 减至 2. 5 cm 区间，电阻下降显著；而继续减小至 2. 5 cm 后，电阻下降幅度趋缓，各组数据的波动性亦同步减小，测量结果逐步趋于稳定。4 组不同回潮率条件下均表现出高度一致性，说明压棉距离对电阻测量具有系统性影响。

进一步对比 2. 0 cm 和 2. 5 cm 条件下的测量稳定性可知，两者均具有较小波动和较小误差。但由各回潮率条件下误差棒长度对比（图 11）可见，2. 0 cm 压棉距离下电阻测量均值较低，误差棒较短，表明其在导电接触稳定性及测量重复性方面表现更优。此外，考虑到电极结构及供电安全设计要求，若压棉距离进一步小于 2. 0 cm，可能会导致电极之间接触过于紧密，增加短路风险，影响系统运行的稳定性和使用寿命。

因此，在综合考虑测量精度、重复性及结构可行性的基础上，最终确定 2. 0 cm 作为本装置的最优压棉距离。该参数下测量误差最小，电阻稳定，可为后续回潮率预测建模提供可靠的数据支持。

3. 1. 4　皮棉回潮率模型建立

为实现皮棉回潮率的准确在线预测，基于前期采集的 264 组环境温湿度、电阻与对应回潮率样本数据，采用多种建模方法构建预测模型。按照比例 7∶3 划分为训练集与测试集，其中训练集用于模型训练，测试集用于模型性能评估。在建模过程中，构建 4 种主流预测模型[23-25]：多元线性回归（MLR）、BP 神经网络（BPNN）、K 近邻（KNN）和随机森林（RF）模型。为提升模型在测试集上的泛化能力，各模型在建立过程中进行了交叉验证和超参数调优。各模型在测试集上的预测结果对比如图 12 所示。

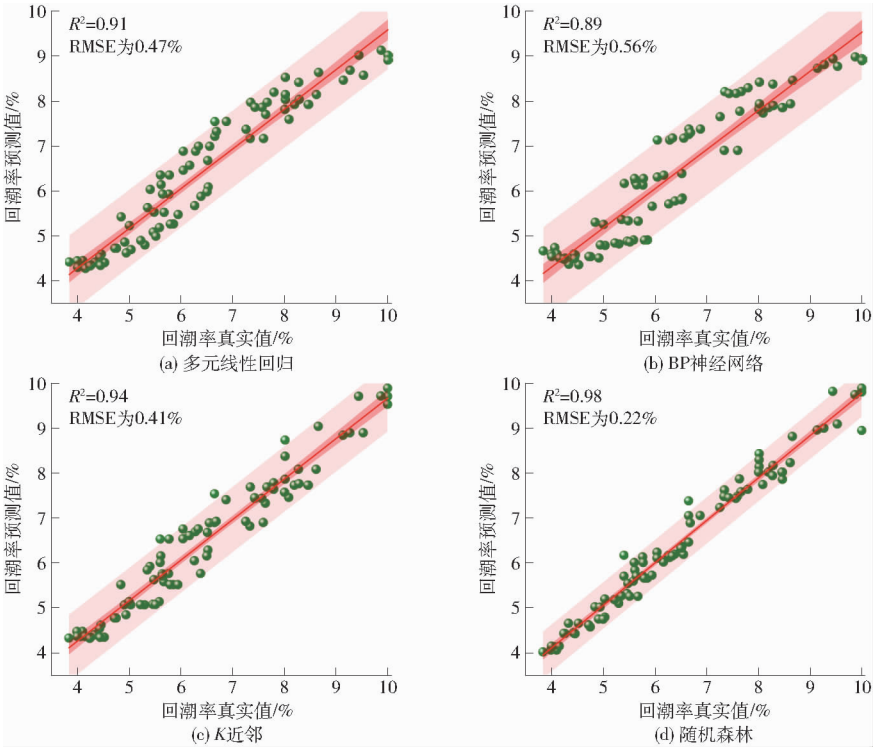

图 12 不同模型对预测集的预测效果

Fig. 12 Prediction performance of different models on test set

为全面评估模型的预测性能，选取决定系数（R^2）和均方根误差（RMSE）作为评价指标[26-28]。结果显示，随机森林模型在所有模型中表现最佳，在测试集上具有最高的决定系数（R^2 为 0.98）和最低的预测误差（RMSE 为 0.22%），展现出较强的非线性拟合能力和良好的抗过拟合性能。综上所述，随机森林模型更适用于本装置中皮棉回潮率在线预测，具备较高的准确性和稳定性。

3.2 棉花加工厂动态试验

在完成关键机构设计与控制系统集成后，研制了皮棉回潮率在线检测装置试验样机，并进行了实地动态试验。选取新疆生产建设兵团第十二师二二二团某棉花加工厂作为试验场地，将所研制的在线检测装置安装于皮棉集棉管道上，以实际生产过程中输送的皮棉作为试验对象，对装置在动态工况下的稳定性、准确性和响应性进行了系统性测试与评估，试验样机现场安装情况如图 13 所示。



图 13 皮棉回潮率在线检测装置现场安装图

Fig. 13 On-site installation of lint cotton moisture regain online detection device

3.2.1 取样最优参数确定

根据 GB/T 6102.2—2012《原棉回潮率试验方法 电阻法》的要求，皮棉回潮率测定所需样品质量应控制在 45 ~ 55 g。2.2.1 节中建立的取样量模型表明，取样角度和取样时间是影响取样板采样的主要因素。因此，为确定在线检测装置中最适宜参数组合，在棉花加工厂实际生产条件下开展了系统性采样试验。试验设置 5 个取样角度（50°、60°、70°、80°、90°）和 4 个取样时间（1、1.5、2、3 s），共 20 组参数组合。每组连续采样 10 次，并记录棉样质量，评估其分布特征及是否落入目标范围（45 ~ 55 g）。图 14 为不同取样角度和取样时间对应的棉样质量箱线图，并用 2 条水平线标示合格质量范围。

由图 14 可知，当取样角度为 50°时，取样板与棉流接触面积最小，导致所采集棉样质量普遍偏低；而当取样角度增大到 90°时，虽接触面积增加，但由于取样板进入气流主流区较深，受高速气流扰动影响显著，导致取样质量波动增强。取样时间方面，取样时间越长，取样质量越大。当时间为 3 s 时，多数角度下采集质量明显超过标准上限值（55 g）；而当取样时间缩短至 1 s 时，绝大多数角度下采集质量

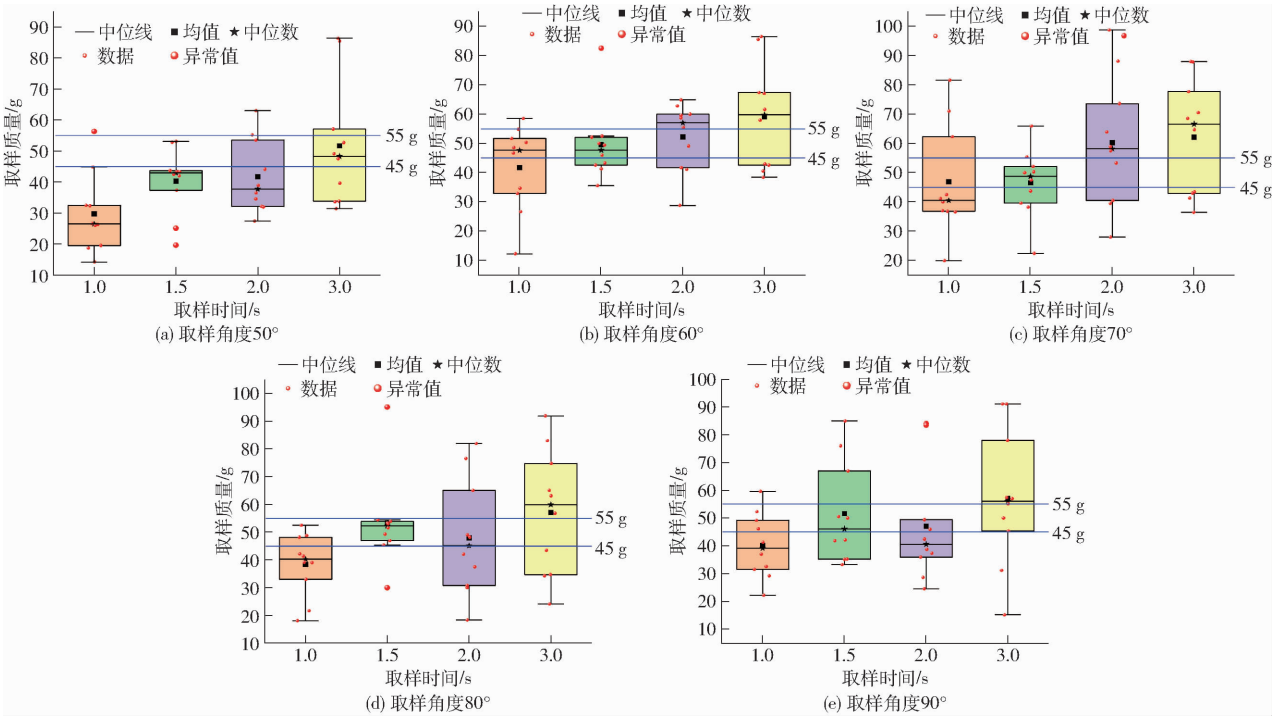

图 14　不同取样角度和取样时间对取样质量的影响

Fig. 14　Effect of different sampling angles and sampling times on sample weight

低于标准下限值(45 g),显示出显著的时间敏感性。综合各组箱线图可见,当取样角度设定为 80°、取样时间设定为 1.5 s 时,取样质量最接近目标值中值(50 g),且样本分布较为集中,离散性较小。该组合下大多数样本位于 45 ~ 55 g 合格范围内,具备良好的取样代表性和重复性,为在线检测回潮率提供了较为稳定可靠的样本基础。

3.2.2　回潮率在线检测验证

在确定最优参数组合(取样角度为 80°、取样时间为 1.5 s、压棉距离为 2 cm)后,开展了回潮率在线检测装置的实地验证试验。利用所研制的在线检测装置,连续定量采集了 50 次皮棉样本进行回潮率在线检测。试验过程中,平均每次检测耗时约为 23.4 s,所有单次检测时间均小于 25 s,检测过程如图 15 所示,满足加工过程中对实时性和响应效率的要求。

为验证在线检测装置的测量准确性,同步采用人工取样方式,在取样口处手动采集棉样,并使用 XJ130 型原棉回潮率测定仪进行离线检测。图 16 为在线检测装置与标准测量仪器的结果对比,在线检测装置测得的回潮率平均值为 4.53%,标准测量仪器所测为 4.62%,二者平均偏差为 0.1%,最大误差不超过 0.5%,这一结果表明,在线检测装置具有良好的测量精度,能够满足加工企业对回潮率实时检测的精度需求。然而,在皮棉负压输送过程中,由于流场波动引起的样本密度变化,以及在恒定压棉过程中电极与棉样接触状态的微小差异,仍会对测量精度产生一定影响。

同时,为评估取样质量波动对回潮率检测结果的影响,采用皮尔逊相关性分析方法对取样质量与在线检测装置回潮率测量值之间的关系进行分析。结果显示,皮尔逊相关系数为 0.47,表明二者之间存在弱相关性(图 17)。即使在样本质量出现一定

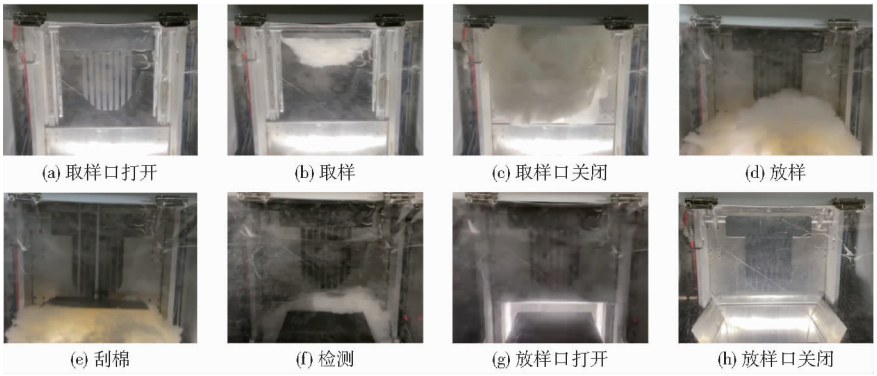

图 15　在线检测过程

Fig. 15　Online detection process

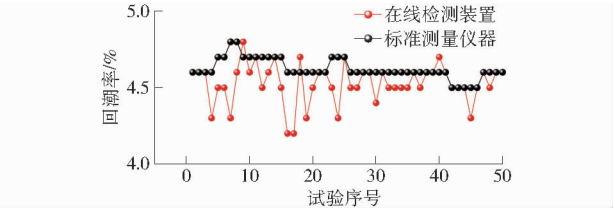

图 16 回潮率检测结果对比

Fig. 16 Analysis of detection results

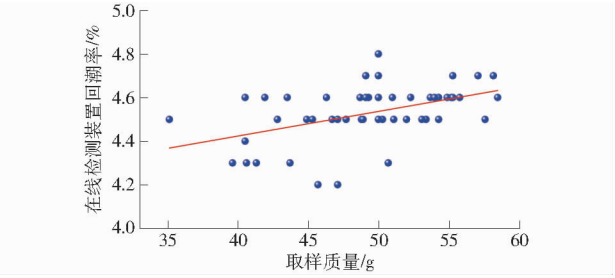

图 17 取样质量对回潮率的影响

Fig. 17 Effect of sample weight on moisture regain

波动的情况下,回潮率测量值仍能保持相对稳定,表明检测结果对样本质量的敏感性较低。这一结果验证了该在线检测装置具备良好的取样一致性和检测稳定性,能够适应皮棉在负压输送环境下的不均匀性,实现皮棉回潮率连续、精准在线检测。

4 结论

(1)设计了一种基于电阻法的皮棉回潮率在线检测装置,结合“动态定量取样—称量恒压测量—多参数补偿”检测方法,有效解决了负压高速输送工况下回潮率在线检测实时性差、稳定性不足的问题。

(2)设计了翻转式取样机构和称量检测机构等关键部件,提升了皮棉样本采集的代表性和电阻测量的一致性,增强了装置在复杂气流环境下的检测精度与稳定性。

(3)构建了融合电阻值与环境温湿度的多参数回潮率预测模型,通过模型评估,随机森林模型的预测效果最佳(R^2 为 0.98,RMSE 为 0.22%),验证了该模型在皮棉回潮率预测中的准确性和可靠性。

(4)动态试验结果表明,在线检测装置与标准测量仪器的回潮率测量结果平均偏差为 0.1%,最大误差不超过 0.5%。同时,样本质量对回潮率测量结果影响较弱(Pearson 相关系数为 0.47),验证了该装置在复杂环境下具备连续、稳定、精准的在线检测能力。所研制的皮棉回潮率在线检测装置结构紧凑、模块化程度高,与传统烘箱法和人工离线检测方式相比,本装置显著缩短了检测周期,提升了检测效率与响应速度,同时有效避免了人为操作误差和环境波动的影响,更适用于连续生产工况,可实现皮棉回潮率在线精准检测,为棉花加工过程的智能调控与质量追溯提供可靠技术支撑。实际应用中仅需定期清理电极表面与校准传感器,维护简便,具备较强的工程推广与应用价值。

参 考 文 献

[1] 张贺轩, 徐爱武. 新疆棉花生产地位分析[J]. 中国棉花加工, 2020(4): 4-7.

[2] 万少安, 夏彬, 禹建鹰, 等. 棉花贮存过程中回潮率对颜色级的影响[J]. 棉纺织技术,2019,47(5): 49-51.
WAN Shaoan, XIA Bin, YU Jianying, et al. Effect of moisture regain on color grade during cotton storage[J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47(5): 49-51. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 史书伟, 向天明, 刘伟刚, 等. 棉花加工过程中回潮率对皮棉质量的影响[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(8): 19-23.
SHI Shuwei, XIANG Tianming, LIU Weigang, et al. Influence of moisture regain on ginned cotton quality in cotton processing[J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(8): 19-23. (in Chinese)

[5] 刘洋, 李孝华. 新疆机采棉加工过程中棉花回潮率对棉花加工质量的影响[J]. 中国棉花加工, 2023(4): 20-23.

[6] CAO Jiqiang, LÜ Cheng, ZHANG Limin, et al. Further studies of mechanical damage on machine-harvested cotton fiber via coupling effect of moisture regains and low temperature[J]. Journal of Natural Fibers, 2024, 21(1): 2309913.

[7] 王皖新, 王俊洋, 张金婵, 等. 棉花回潮率检测及预测现状分析[J]. 中国纤检, 2024(1): 44-49.
WANG Wanxin, WANG Junyang, ZHANG Jinchan, et al. Analysis on detection and prediction of cotton moisture regain rate[J]. China Fiber Inspection, 2024(1): 44-49. (in Chinese)

[8] 王梦, 李成松, 坎杂, 等. 棉花回潮率测量方法发展现状[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 268-270.

[9] 张建强, 黄杰, 常金强, 等. 基于电阻法的棉花束纤维回潮率检测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 150-158.
ZHANG Jianqiang, HUANG Jie, CHANG Jinqiang, et al. Moisture regain detection of cotton bundle fibers based on resistance method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 150-158. (in Chinese)

[10] 王婷婷. 基于机器学习的棉花回潮率检测技术研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2022.

WANG Tingting. Research on moisture regain detection technology of cotton based on machine learning[D]. Aral: Tarim University, 2022. (in Chinese)

[11] BYLER R K, ANTHONY W S. System for analyzing moisture content of materials such as cotton: US5514973[P]. 1996-05-07.

[12] BYLER R K, GALYON M E, ANTHONY W S. Measurement of cotton bale moisture content after moisture restoration[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(1): 99-104.

[13] 安少元, 郭敬瑶, 刘晓刚. YZ-1 型棉花加工线智能在线检测系统的研究与应用[J]. 纺织器材, 2020, 47(6): 44-47.
AN Shaoyuan, GUO Jingyao, LIU Xiaogang. Research and application of the intelligent on-line detection system YZ-1 of cotton processing line[J]. Textile Accessories, 2020, 47(6): 44-47. (in Chinese)

[14] 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.

[15] 桑小田. 基于质量比电阻的籽棉回潮率在线检测系统设计[D]. 郑州:郑州大学, 2016.
SANG Xiaotian. Design of seed cotton moisture on-line detecting system based on mass specific resistance[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)

[16] 陈峰. 基于电阻抗原理的棉花含水率检测方法研究[D]. 杭州:中国计量大学, 2019.
CHEN Feng. The research of cotton moisture content detection based on the principle of electrical impedance[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019. (in Chinese)

[17] 倪玉婷. 温湿度对棉花回潮率测定影响研究及新型电测器的研制——访中国纤维检验局总工程师徐水波[J]. 中国纤检, 2009(2): 10-13.

[18] 张成梁, 冯显英, 杨丙生, 等. 基于相对湿度的棉花回潮率在线检测[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(4): 445-450.
ZHANG Chengliang, FENG Xianying, YANG Bingsheng, et al. Online detection of cotton moisture regain based on relative humidity[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(4): 445-450. (in Chinese)

[19] 王波, 纪晓杰, 陈洪民, 等. 棉纤维回潮率测试方法——电测器法[J]. 中国纤检, 2010(13): 66-67.
WANG Bo, JI Xiaojie, CHEN Hongmin, et al. Test method for moisture regain in raw cotton—electrical moisture meter[J]. China Fiber Inspection, 2010(13): 66-67. (in Chinese)

[20] 中国纤维检验局. 原棉回潮率试验方法 电阻法: GB/T 6102.2—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

[21] 卢彩云, 李洪文, 何进, 等. 间歇式自动取样条播排种器排种性能检测试验台研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 10-19.
LU Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, et al. Development of testbed for seed metering performance test of drill seeding device based on intermittent automatic sampling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 10-19. (in Chinese)

[22] 贾洪雷, 房殿海, 刘慧力, 等. 车载智能土壤采样系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 292-301,312.
JIA Honglei, FANG Dianhai, LIU Huili, et al. Design and experiment of vehicle-mounted intelligent soil sampling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 292-301,312. (in Chinese)

[23] SHI F, ZHANG F, SHEN N, et al. Quantifying interactions between slope gradient, slope length and rainfall intensity on sheeterosion on steep slopes using multiple linear regression[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168090.

[24] MASEKO S, VAN DER LAAN M, TESFAMARIAM E H, et al. Evaluating machine learning models and identifying keyfactors influencing spatial maize yield predictions in data intensive farm management[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 157: 127193.

[25] BAC N, CARLOS M, BERNARD D B, et al. Large-scale distance metric learning for k-nearest neighbors regression[J]. Neurocomputing, 2016, 214: 805-814.

[26] 张安琪, 高宁, 温昌凯, 等. 基于电容法和深度补偿的机载式玉米播种种沟土壤墒情在线检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 87-97.
ZHANG Anqi, GAO Ning, WEN Changkai, et al. Design and experiment of airborne on-line soil moisture detection system based on capacitance method and depth compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 87-97. (in Chinese)

[27] 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.

[28] 安晓飞, 代均益, 李立伟, 等. 基于 GA-BP 的联合收获机小麦含水率检测模型研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 325-332.
AN Xiaofei, DAI Junyi, LI Liwei, et al. Wheat moisture content prediction model for combine harvester based on GA-BP method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 325-332. (in Chinese)