

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.031

翅片式双重极板水稻含水率检测装置优化设计与试验

万霖^{1,2} 唐宏宇¹ 马广宇² 车刚^{1,2} 邹丹丹² 孙文胜¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江省农机智能装备重点实验室, 大庆 163319)

摘要: 为提高水稻含水率在线检测准确度,以平行板电容器为研究对象,采用翅片式双重极板检测方式对水稻含水率的检测装置进行优化试验。以极板厚度、极板间距和相对面积为试验因素,采用二次回归正交组合试验方法进行电容比灵敏度影响试验,获得最优极板结构参数组合为极板厚度 2.98 mm、极板间距 101.60 mm、相对面积 32 583.69 mm²。应用 Matlab 软件建立非线性自回归神经网络 NARX 的水稻含水率预测与校正模型,通过对比分析确定了模型结构的参数以及优化算法。分析表明:基于量化共轭梯度算法的神经网络 NARX 水稻含水率预测模型为最佳,模型的隐含层为 1 层,神经元数量为 5,滞后阶数为 3,含水率预测值与 105℃ 恒重法实测值的误差范围在 ±0.5% 以内。测试含水率最大相对偏差为 0.65%,最小相对偏差为 0.26%,平均相对偏差为 0.44%。与静态电容式水分仪测试结果相比,本文水稻含水率检测装置的测试偏差浮动较小,检测性能满足水稻干燥生产实际要求。

关键词: 水稻; 含水率; 双重极板电容; 神经网络; 优化设计; 试验

中图分类号: S226.6; S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)02-0320-09

OSID:



Optimization Design and Experiment on Finned Double Plates Rice Moisture Content Measuring Device

WAN Lin^{1,2} TANG Hongyu¹ MA Guangyu² CHE Gang^{1,2} ZOU Dandan² SUN Wensheng¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of on-line detection technology of rice moisture content, the parallel plate capacitor was taken as the research object, and the fin type double plate detection method was adopted to optimize the detection value. Taking the plate thickness, plate spacing and relative area as experimental factors, the capacitance ratio sensitivity test was carried out by quadratic regression orthogonal combination test method. The optimal plate structure parameters were obtained as follows: plate thickness was 2.98 mm, plate spacing was 101.60 mm, and relative area was 32 583.69 mm². The prediction and correction model of moisture content based on nonlinear autoregressive neural network NARX was established by Matlab software. The parameters of model structure and optimization algorithm were determined by comparative analysis. The error analysis showed that the NARX prediction model based on the quantitative conjugate gradient algorithm was the best. The hidden layer of the model was 1 layer, the number of neurons was 5, and the lag order was 3. Compared with the 105℃ constant weight method, the calibration error range was within ±0.5%, the maximum deviation was 0.65%, the minimum deviation was 0.26%, and the average deviation was 0.44%. Compared with the static capacitance water meter, the deviation fluctuation of on-line test of rice drying production was small, which met the requirements of rice drying production.

Key words: rice; moisture content; double plate capacitor; neural network; optimization design; test

0 引言

水稻含水率是水稻安全储藏与加工的重要指

标,水稻含水率的准确在线测量具有重要意义。谷物含水率测量方法主要分为直接测量与间接测量两种形式^[1-4]。间接测量法为常用的测量方法,包括

收稿日期: 2020-09-02 修回日期: 2020-12-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B00)、黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA15B402)、全国基层农机推广补助项目(JCTG19-04)和黑龙江省省属高等学校科研项目(PJH202002)

作者简介: 万霖(1971—),女,教授,主要从事寒区大规模水稻生产全程机械化研究, E-mail: 381995603@qq.com

微波法^[5-6]、电容法^[7-10]、电阻法^[11]、红外法^[12]、频域法^[13-14]和中子法^[15]等。其中,电容法根据被测谷物不同的介电常数测量谷物含水率,成本低,测量方式无损,能够保证被测谷物的品质,可实现谷物含水率的快速检测,是目前水稻含水率在线测量的常用方法。电容法基于介电特性进行快速测量^[16],其灵敏度受环境、温度、湿度、频率等因素影响较大^[17]。针对上述影响因素,学者们对谷物含水率检测过程中的装置结构、数据处理及优化等进行了相关研究。张本华等^[18]提出了基于 SPA-SVR 算法的水稻含水率检测方法,建立了水稻含水率多元线性回归和支持向量机模型。麦智炜等^[19]基于非接触式平行板电容测量原理,研制了适用于恶劣环境的粮食水分检测装置。王月菊^[20]采用分段式 PID 算法对含水率检测装置进行热源控制,满足多种环境下的快速检测需求。目前,基于外部环境因子对电容传感器适应性的研究较多,而在电容极板结构的边缘效应^[21]方面的研究深度不足,且鲜见双重极板结构电容器的研究报道。本文基于平行板电容器,采取翅片式双重极板检测方式,通过优化极板结构提高电容器的灵敏度,建立基于量化共轭梯度算法的神经网络 NARX 水稻含水率预测模型,实现测试数据的泛化与校正。通过完善检测方式、检测结构和数据处理方式提高水稻含水率的在线检测精度,为在线检测装置的设计提供参考。

1 检测原理

相对介电常数作为影响电容器电容的参数之一,在确保其他影响参数不变的情况下,通过测量电容即可求出相应粮食的相对介电常数。结合水稻干燥机中水稻的流态特性与电容法测量的灵敏性,本文选择平行板式电容器作为试验对象。相对介电常数不同,电容器所产生的电容不同,从而将被测物理量转换为电容量^[22-23]。粮食含水率则由已经求出的相对介电常数与已标定的相应谷物含水率和相对介电常数的关系得出。平行极板式电容水分检测仪具有结构简单,板内电场均匀,电容与电容器本身的性质(如几何形状、尺寸和相对位置)相关,与电量和电势差无关^[24]。由高斯定理和场强叠加原理可知两平行板间的电场强度和电势差,根据电容器的定义可得平行板电容器的电容 C 为

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (1)$$

式中 ε_0 ——真空介电常数,取 8.85×10^{-12} F/m
 ε_r ——两极板间介质相对介电常数
 A ——两极板间相对面积,mm²

d ——两极板间间距,mm

根据极板间介质相对介电常数、等效总电容与谷物含水率的关系,测算出谷物相应的含水率,且每次的检测结果为单一值^[25]。平行板电容器工作原理图如图1所示。

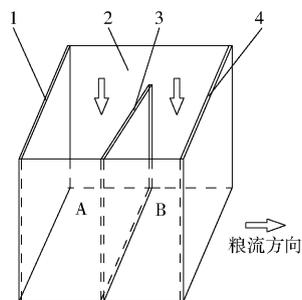


图1 双重极板电容检测原理图

Fig.1 Schematic of double plate capacitor detection

1.左外电极板 2.挡板 3.内电极板 4.右外电极板
A.左闭合电容 B.右闭合电容

图1双重极板检测装置可视为并联电容式结构,因加载到各电极板的电压相同,所以总电荷量与等效电容为两个电容器的电荷量与电容之和^[26],当极板间充满谷物时,其内部状态可视为由谷物的干物质、谷物中的水分以及谷粒孔隙间的空气三者组成。相对面积 A 可视为三者面积之和。总电容可表达为3种物质等效电容之和,即

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \left(\varepsilon_1 \frac{A_1}{A} + \varepsilon_2 \frac{A_2}{A} + \varepsilon_3 \frac{A_3}{A} \right) \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ——干物质、水分、空气相对介电常数

A_1, A_2, A_3 ——干物质、水分、空气面积,mm²

空气质量忽略不计,被测谷物含水率 W 计算式为

$$W = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中 ρ_1 ——水稻干物质密度,g/cm³

ρ_2 ——水密度,g/cm³

V_1 ——谷物干物质体积,cm³

V_2 ——谷物中水体积,cm³

以 $\rho_2 = 1$ g/cm³、 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m 为基础数据,假定极板间距范围内干物质、水分和空气紧密结合。将式(3)转换为各组分面积与谷物含水率的函数式,代入式(2)可得电容传感器的电容 C 与含水率的函数表达式为

$$C = K_0 \gamma \left(\varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2 W}{1 - W} \rho_1 \right) + K_0 \varepsilon_3 e \quad (4)$$

其中 $K_0 = 2\varepsilon_0 A/d$

式中 K_0 ——定常数

γ ——极板间谷物干物质容积与总容积比值

e ——同一高度下孔隙与谷物干物质颗粒体积比值

2 双重极板电容器结构与优化

2.1 双重极板电容器设计

双重极板电容器主要由带极外壳体、电极板、基座、控制器、激振电机等组成,如图2所示。检测区上端为进粮口,下端设有排粮口。通过绝缘基座将中间电极板与检测控制器封装并与外壳体相连接,采样装置的中空部分及前端嵌入干燥机出粮口内壁处。中间极板为翅片式,在保证装置整体测试水稻容积不变的情况下增大了电容,外设的激振电机的有序振动可以避免水稻间粘连,保证被测水稻孔隙度均匀分布,降低电容检测过程的不良影响。

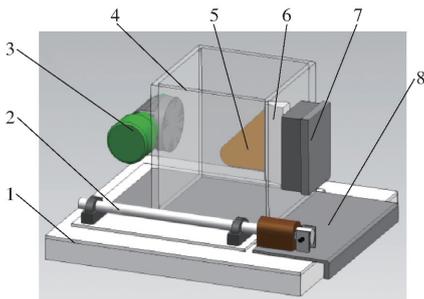


图2 水稻采样装置结构示意图

Fig.2 Rice sampling device

1.底座 2.电动推杆 3.激振电机 4.带极外壳体 5.中间极板 6.基座 7.控制器 8.排粮闸门

在检测过程中,考虑水稻流态化导致堆积密度变化对测量准确性存在一定偏差,设计了一种抽拉式排粮机构,实现水稻含水率分批量连续检测,如图3所示。抽拉式排粮机构采用单片机有序控制电动推杆实现底座内排粮闸门的开合,通过控制器可以控制水稻在极板间的堆积、振动、测量和排放时间,稳定水稻在线测试。

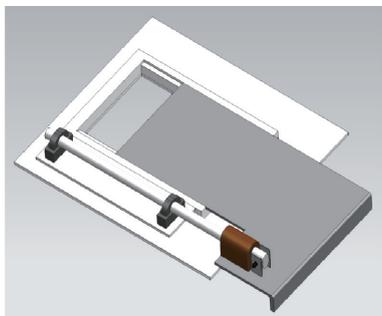


图3 排粮机构结构图

Fig.3 Food drainage agencies structure diagram

2.2 平行板结构参数优化

平行板电容器边缘效应主要是由于电场线在极板间区域向外部空间扩展过程中,电场线由平行线变为呈开口状分布,边缘电场线宽度改变,电场分布

集中在极板的边缘,产生附加电容^[27]。因此对极板结构进行合理的优化,有利于消除边缘效应产生的影响,提高电容检测的灵敏度。

2.2.1 试验材料与方法

选取初始含水率为19.43%的齐齐哈尔地区短粒粳稻为试验样品,采用105℃恒重法测定样品含水率。所用仪器包括DGG-9070B型电热恒温鼓风干燥箱和沈阳龙腾电子有限公司生产的电子天平。为保证测量结果准确,将被测样品均匀分成3份,测量结果取平均值。

基于电容器极板结构分析,确定极板厚度 h 、极板间距 d 、相对面积 A 作为影响电容器灵敏度主要因素,确定试验指标为电容比,即实测水稻含水率电容 C_1 与理论计算电容 C_2 之比,采用二次回归正交组合试验,获取电容器最佳参数组合。试验因素编码如表1所示。

表1 因素编码
Tab.1 Factors and codes

编码	因素		
	极板厚度 h/mm	极板间距 d/mm	相对面积 A/mm^2
1.682	3.0	200.0	36 000.0
1	2.6	179.7	31 134.4
0	2.0	150.0	24 000.0
-1	1.4	120.3	16 865.6
-1.682	1.0	100.0	12 000.0

2.2.2 试验结果与分析

利用Design-Expert 8.0.6软件处理试验数据,试验方案与结果如表2所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。通过回归分析处理试验结果,获取方差分析如表3所示,建立衡量电容器灵敏度的指标——电容比编码值的回归方程,并检验其显著性。

由表3可知,模型 $P < 0.01$,表明电容比的回归模型显著。各因素影响由大到小依次为:极板厚度、相对面积、极板间距。 X_3^2 对方程影响极显著, X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 对方程影响显著,其余各项影响不显著。剔除对方程不显著的因素后,得到电容比 Y_1 的回归方程为

$$Y_1 = 1.06 - 0.19X_1X_3 + 0.21X_2X_3 + 0.12X_2^2 + 0.26X_3^2 \quad (5)$$

而失拟项为不显著($P = 0.338$),表明方程拟合效果较好。

2.2.3 参数优化

依据试验结果和数据分析,以衡量电容器灵敏度指标(电容比)最小为目标,通过Design-Expert 8.0.6软件分析,极板厚度、极板间距、相对面积两两交互作用对电容比的影响如图4所示。极板厚度

表2 试验方案与结果

Tab.2 Experiment scheme and results

试验序号	因素			性能指标		
	X_1	X_2	X_3	实测电容 $C_1/\mu\text{F}$	理论电容 $C_2/\mu\text{F}$	电容比 C_1/C_2
1	1	1	1	39.49	32.11	1.23
2	1	1	-1	39.49	31.59	1.25
3	1	-1	1	29.76	29.18	1.02
4	1	-1	-1	38.72	27.66	1.40
5	-1	1	1	30.09	24.66	1.22
6	-1	1	-1	38.31	36.84	1.04
7	-1	-1	1	36.53	30.19	1.21
8	1	-1	-1	27.47	21.98	1.25
9	1.682	0	0	39.49	32.11	1.23
10	-1.682	0	0	34.20	31.96	1.07
11	0	1.682	0	38.01	28.79	1.32
12	0	-1.682	0	28.05	25.50	1.10
13	0	0	1.682	32.06	24.66	1.30
14	0	0	-1.682	34.20	24.42	1.40
15	0	0	0	37.41	33.40	1.12
16	0	0	0	39.49	38.34	1.03
17	0	0	0	35.68	34.98	1.02
18	0	0	0	35.79	29.09	1.23
19	0	0	0	39.56	38.78	1.02
20	0	0	0	36.19	35.14	1.03
21	0	0	0	37.54	36.09	1.04
22	0	0	0	31.54	30.62	1.03
23	0	0	0	32.16	31.53	1.02

表3 电容比方差分析

Tab.3 Variance analysis of capacitance ratio

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	0.29	9	5.71	0.002 **
X_1	0.015	1	2.58	0.132 6
X_2	3.883×10^{-3}	1	0.68	0.424 7
X_3	0.013	1	2.35	0.149 3
X_1X_2	8.45×10^{-3}	1	1.48	0.245 6
X_1X_3	0.036	1	6.38	0.025 3 *
X_2X_3	0.042	1	7.36	0.017 8 *
X_1^2	7.953×10^{-3}	1	1.39	0.259 3
X_2^2	0.03	1	5.30	0.038 5 *
X_3^2	0.14	1	24.13	0.000 3 **
残差	0.074	13		
失拟项	0.034	5	1.34	0.338
净误差	0.04	8		
总变异	0.37	22		

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

与极板间距交互作用趋势较为平缓,作用不显著。极板间距与相对面积、极板厚度与相对面积交互作用对电容比的影响大,在极板间距减小、极板厚度增大、相对面积变大的情况下,电容比较大。

同时获得多个最佳参数组合,列举出其中5个符合期望的优选方案,如表4所示。由表3和式(5)可知,相对面积是影响电容器灵敏度的关键因素。由方

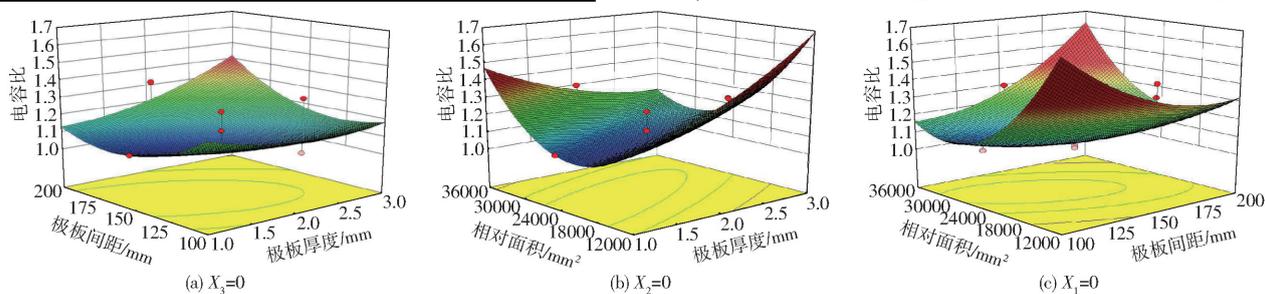


图4 各因素交互作用对电容比的影响

Fig.4 Impact of interaction on capacitance ratio

差分析可知,减小电容器极板面积,可减小测试误差,因此,确定相对面积的期望值为最小值。结合实际电容器加工制造水平,获得电容器最优结构方案为极板厚度 2.98 mm,极板间距 101.60 mm,相对面积为 32 583.69 mm²。

表4 测试极板的较优条件

Tab.4 Better conditions of electrode plate

序号	极板厚度 h/mm	极板间距 d/mm	相对面积 A/mm^2	电容比 Y_1	期望度
1	2.98	101.60	32 583.69	0.999 484	1
2	2.99	102.85	35 093.57	0.999 354	1
3	2.96	102.18	33 370.64	0.998 884	1
4	2.97	100.34	35 261.28	0.998 579	1
5	2.96	102.54	34 705.93	0.998 244	1

3 测量系统设计

3.1 电容测量电路设计

电容式含水率传感器测量电路通常为调频测量电路,根据电容变化时振荡器的振荡频率发生变化对电容进行测量,具有较高灵敏度。但频率变化受环境因素影响较大,故该电路稳定性较差。因此,本文选择运算放大器电路作为电容测量电路,根据其较高的放大系数 K 和输入阻抗 Z_i ,可保证电路的稳定性,是较为理想的测量电路。

3.1.1 运算放大电路

电容测量方式采用运算放大电路,主要由 LM741 和 LM709 组成。运算放大电路如图 5 所示。

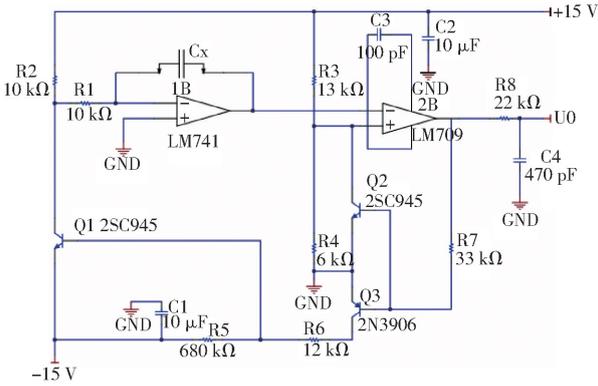


图5 运算放大电路

Fig. 5 Capacitance measurement circuit

该电路的测量是根据两被测电容间充电和放电所产生的三角波振荡周期变化,从而测得电容。图中 LM741 构成密勒积分电路, LM709 构成施密特整形电路形成正反馈而产生振荡,振荡周期不受电源电

压的影响。主控芯片将模拟量转换成数字量。

3.1.2 温度测量传感器及 A/D 转换

温度变化是影响电容测量精度的重要因素,温度的改变会导致被测谷物介电常数的变化。因此,对被测谷物进行实时的温度监测,对电容整体测量结果有重要意义。温度传感器选用 PT100 热电阻温度传感器,其型号为 PT100WZP - 187。利用 AD7793 芯片的高转换精度和自校准、系统校准功能,能够消除零点误差、满量程误差和温度漂移带来的影响。采用 3 差分模拟输入通道,可直接接收来自传感器的模拟量输入;由于芯片自身具有低噪声特点,通过 RC 低通滤波器即可达到滤波效果,大大降低前段抗混叠滤波器的需求。通过 MCU 灵活控制和配置 AD7793 芯片内寄存器,实现对 AD7793 芯片的控制。A/D 转换电路如图 6 所示。

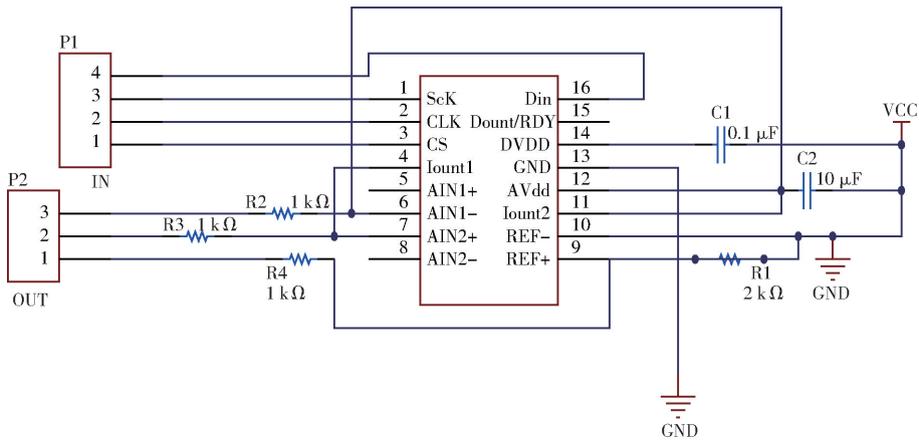


图6 A/D 转换电路

Fig. 6 AD conversion circuit

3.1.3 电源稳压及补偿电路

温度变化会引起被测谷物的介电常数变化,温度系数的改变会影响电路的输出信号,产生温漂,进而影响测试结果。本文设计以 LM732 芯片为核心的电源稳压电路,具有温度控制作用。利用其温度控制特点,可减弱温漂所产生的信号误

差。根据其较强的调压范围(2 ~ 37 V),可降低电容变化时产生的干扰波纹,对测量电容起到稳定的作用。该电路根据温度、电容的模拟量,将物理变化转为电压变化,通过对电压的补偿调节,间接对电容和温度进行补偿。电源稳压电路如图 7 所示。

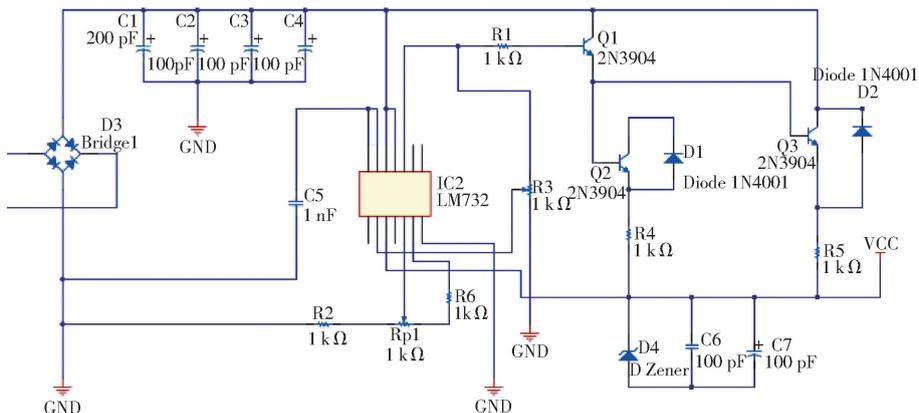


图7 电源稳压电路

Fig. 7 Power supply voltage regulator

3.2 上位机监测界面

采用 Visual Basic 6.0 进行上位机软件程序编写。程序界面如图 8 所示,主要包括串口调试模块、配置调试模块、设备地址、Modbus 通讯测试模块、校准水分模块、校准温度模块。主界面包括水分和温度数显,设备信息与粮食类型以及数据曲线图。实现水稻含水率的实时检测。

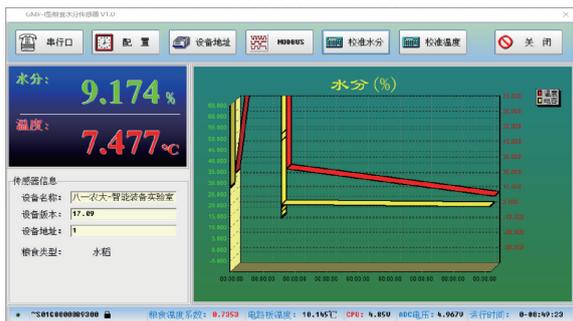


图 8 含水率监测主界面

Fig. 8 Main interface for moisture content monitoring

4 基于神经网络的水稻含水率预测与校正

水稻干燥环境复杂、多变,传感器的灵敏度会受到环境因素变化的干扰。面对自然环境不可控因素的干扰,含水率的精确预测可减少 105℃ 恒重法或电阻校正法的试验次数,配合上位机软件中水分校正模块,可提升含水率检测结果的准确性。

4.1 NARX 水稻含水率预测模型

本文采用的 NARX 动态神经网络如图 9 所示,具有非线性自回归的网络特性,适用于单输出、单输入的网络训练。在自然环境相对稳定状态下,以实际测量的电容为输入函数,以恒重法标定的含水率为目标输出函数对含水率进行预测。

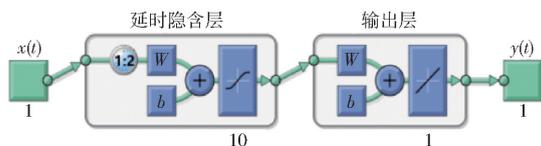


图 9 NARX 水稻含水率测量模型

Fig. 9 NARX rice moisture content measurement model

4.2 预测模型参数

通过对比验证确定神经网络模型的参数。本文对网络不同的隐含层数、神经元数、优化算法、滞后阶数进行对比分析。其中,隐含层数通常设定为 1 层,过多的隐含层数不利于模型的整体训练,可能会使模型陷入极值问题。

4.2.1 优化算法对比

在 Neural Network Start 中,针对模型的优化训练算法包括 LM (Levenberg - Marquard) 算法、BR (Bayesian regularization) 算法、SCG (Scaled conjugate

gradient) 算法。以 3 种优化算法对应训练模型结果的均方误差 (MSE) 和复相关系数 R 作为模型评价指标,其中均方误差 (MSE) 越低越好,0 代表无误差;复相关系数 R 越接近于 1,表明模型相关性越紧密,0 代表随机相关。评价结果如表 5 所示。

表 5 算法模型优化评价结果

Tab. 5 Algorithm model optimization evaluation results

算法	MSE	R
LM	4.18266×10^{-2}	0.986623
BR	1.30909×10^{-2}	0.999999
SCG	9.50679×10^{-6}	0.991851

由表 5 可知,SCG 模型的均方误差在 3 种模型中最接近于 0,效果最优;LM 模型的均方误差略大于 SCG 模型;3 种模型的复相关系数均接近于 1, R 表现差别不大。最终确定 SCG 算法作为模型的优化算法。

4.2.2 神经元数量及滞后阶数确定

依据 SCG 算法优化算法模型,采用控制变量方法,分别调整神经元数量、滞后阶数对模型进行训练,得到最佳的参数数值。测试神经元数量选择为 5、10、15;测试滞后阶数为 1、2、3。以 MSE 和 R 作为评价指标,评价结果如表 6 所示。

表 6 神经元数量及滞后阶数评价结果

Tab. 6 Results of evaluation of number of neurons and lag order

参数	MSE	R	
神经元数量	5	6.88397×10^{-3}	0.998818
	10	7.13854×10^{-3}	0.998864
	15	8.77293×10^{-3}	0.998641
滞后阶数	1	8.77293×10^{-3}	0.998641
	2	8.49527×10^{-3}	0.998292
	3	2.01104×10^{-3}	0.999676

由表 6 可知,神经元数量为 5 时,模型的 MSE 最低,相关性均为紧密,差异不大;滞后阶数为 3 时,模型的 MSE 最低,且与滞后阶数为 1、2 时差别较大,三者回归相关性差异不大。最终确定模型的神经元数量为 5,滞后阶数为 3。

4.3 预测结果及分析

将含水率为 10% ~ 20% 的水稻样品依次放置在检测装置中进行电容测试,记录对应含水率下的水稻电容作为模型训练的输入值和输出值。按照网络默认设置的训练集 70%、验证集 15%、测试集 15% 对训练样本进行划分。训练结果如图 10 所示。

如图 10 所示,随着训练次数的增加,均方误差逐渐降低,在训练次数达到 17 次后,训练集、验证集、测试集的均方误差不再变化,保持恒定。因此训

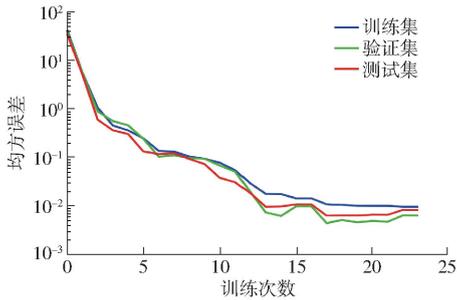


图10 水稻含水率 NARX 预测模型训练结果

Fig. 10 Training results of NARX prediction model of rice moisture content

训练次数达到 17 时为最优。训练完成后,可得出水稻含水率 NARX 预测结果误差,通过分析预测值与实测值,判断预测模型的拟合效果。水稻含水率 NARX 预测结果误差如图 11 所示。由图 11 可以看出,误差范围在 $\pm 0.5\%$ 以内,模型预测结果较好。

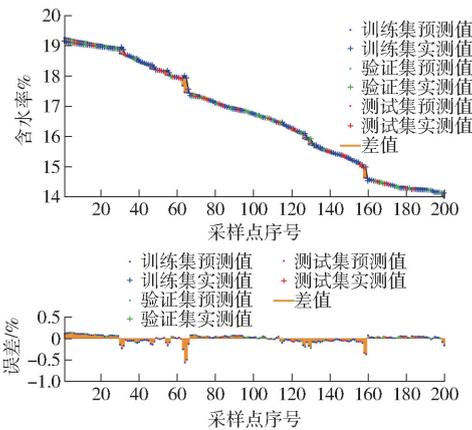


图 11 水稻含水率 NARX 预测结果误差

Fig. 11 Error of rice moisture content NARX prediction

图 12 中训练集拟合度 N 为 0.998 19,验证集拟合度 N 为 0.999 31,测试集拟合度 N 为 0.998 72,综合集拟合度 N 为 0.998 39。根据训练集、验证集、

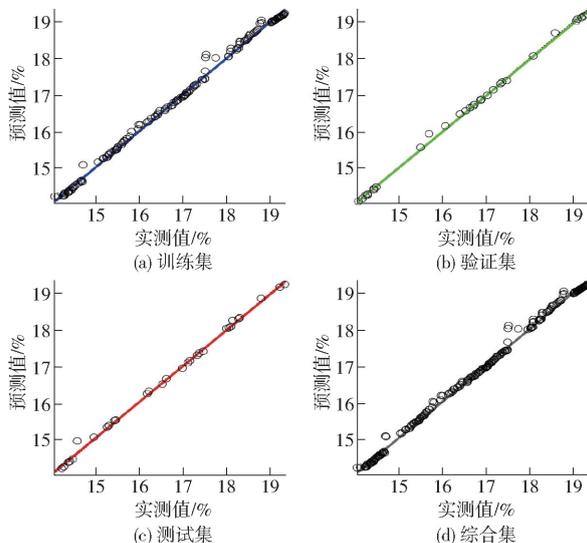


图 12 水稻含水率 NARX 回归预测结果

Fig. 12 NARX regression prediction of rice moisture content

测试集和综合集拟合度结果分析,针对水稻含水率范围在 10% ~ 20% 的预测准确性较好,表明模型适用于水稻含水率的预测。

5 试验结果与分析

5.1 静态测试试验

静态测试试验在黑龙江省农机智能装备重点实验室进行,采用带温度补偿模块的水分检测装置,并在上位机软件设置水分校正模块,进行温度系数的补偿和水分偏差修正。实验室内温度调控为 5 ~ 7℃,符合常规干燥作业的环境温度。采用含水率为 13.92% ~ 19.22% 的水稻样品 100 份,分组标记后依次放入检测装置中进行检测。采用 105℃ 恒重法进行校对,测试试验台如图 13 所示。

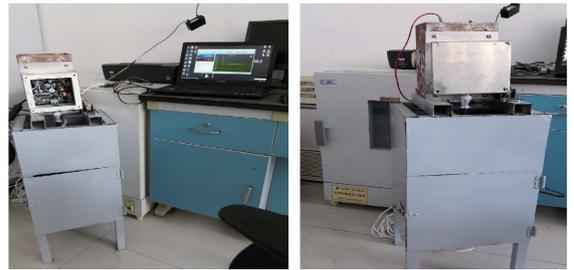


图 13 测试试验台

Fig. 13 Laboratory test lab

检测装置执行阶段检测,执行 20 s 检测周期(可调),检测过程电动推杆不动作,阀门关闭,5 s 充粮,测试含水率,取平均值;检测完成后,电动推杆动作,阀门打开,5 s 排粮。每组试验重复 3 次,取平均值。含水率测试结果如表 7 所示。

表 7 含水率测试结果

Tab. 7 Result of moisture content test %

序号	检测值	标准值	相对偏差
1	19.87	19.22	0.65
2	19.22	18.63	0.59
3	17.85	17.36	0.49
4	15.28	15.65	0.37
5	14.37	14.10	0.27
6	15.96	16.34	0.38
7	15.30	14.95	0.35
8	18.28	18.93	0.65
9	17.51	17.07	0.44
10	17.27	16.84	0.43
11	14.18	13.92	0.26
12	14.22	14.54	0.32
13	18.13	17.60	0.53
14	17.27	16.84	0.43

由表 7 可知,含水率最大相对偏差为 0.65%,最小相对偏差为 0.26%,平均相对偏差为 0.44%,

满足测试要求,检测结果接近恒重法测量值。

5.2 水稻干燥在线测试

水稻干燥在线测试地点为北大荒米业集团五常市加工基地干燥现场,水稻品种为长粒稻花香,含水率为18%~20%。将两套水稻含水率检测装置安置于干燥机提升机入粮斗侧壁内和皮带输送机排粮出口处,水稻干燥机与在线检测装置如图14所示。



图14 检测装置实测安装图

Fig. 14 Installation of test device

因鲜食稻谷加工的需求,水稻干燥含水率控制在15%左右。在线完成一次水分检测周期需30s,其中收集与振动时间需12s,含水率检测一次的时间为10s,排粮电动推杆完成开合时间为8s。利用该装置进行了24h连续在线测试稻谷含水率,采样间隔30min,对比KettPM8188A型静态电容水分仪测试的数据,测试结果如图15所示。稻谷水分相对偏差在±0.5%以内,测试结果较稳定。

6 结论

(1)提出一种翅片式双重极板水稻含水率检测方式,通过二次回归正交组合试验建立电容比的有



图15 水稻水分测试结果对比

Fig. 15 Comparison chart of rice moisture test results

效回归方程。结合边缘效应最低需求,得到极板参数最优组合为极板厚度2.98mm、极板间距101.60mm、相对面积32583.69mm²。

(2)采用运算放大器电路作为电容的测量电路,设计了以LM741芯片为核心的电容测量电路,利用温度传感器与A/D转换电路实现数据转换,并利用电源稳压电路进行了补偿;设计了上位机监测系统,完成对水稻含水率的实时采集与监控。

(3)建立了水稻含水率NARX预测模型。确定神经元数量为5,滞后阶数为3,最佳优化算法为SCG算法。训练集、验证集、测试集和综合集拟合度均接近1,模型拟合度良好。水稻含水率预测值与105℃恒重法测试值的误差范围在±0.5%以内。

(4)实验室静态测试与干燥机在线测试试验表明,应用双重极板电容测定装置进行在线测试,最大相对偏差为0.65%,最小相对偏差为0.26%,平均相对偏差为0.44%,满足水稻含水率测试要求。水稻干燥生产现场在线测试结果与静态电容水分仪测试结果相比,含水率测试偏差浮动较小,相对偏差在±0.5%以内,检测性能稳定。

参 考 文 献

- [1] 翟宝峰,郭宏林,许会.粮食水分检测技术的综合分析及发展概况[J].沈阳工业大学学报,2001,23(5):413-416. ZHAI Baofeng, GUO Honglin, XU Hui. Synthetic analyses and development survey of moisture measuring technology of grain [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2001, 23(5): 413-416. (in Chinese)
- [2] 孙健,周展明,唐怀建.国内外粮食水分快速检测方法的研究[J].粮食储藏,2007,36(3):46-49. SUN Jian, ZHOU Zhanming, TANG Huaijian. Rapid determination of moisture content in grain [J]. Grain Storage, 2007, 36(3): 46-49. (in Chinese)
- [3] 杨彬,车刚,万霖,等.谷物在线水分传感器的研究[J].农机化研究,2017,39(4):256-262. YANG Bin, CHE Gang, WAN Lin, et al. The study of online detecting measurement on grain moisture content [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 256-262. (in Chinese)
- [4] 李长友.稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(3):56-59. LI Changyou. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 56-59. (in Chinese)
- [5] 郭交,段凯文,郭文川.基于微波自由空间测量的小麦含水率检测方法[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):338-343,378. GUO Jiao, DUAN Kaiwen, GUO Wenchuan. Detection method of moisture content of wheat with microwave free-space measurement [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 338-343, 378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190639&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.039. (in Chinese)
- [6] 姜宇,曹军,杨国辉.微波谐振腔含水率传感器的设计方法[J].现代科学仪器,2006,16(2):26-29. JIANG Yu, CAO Jun, YANG Guohui. Method for designing moisture sensor based on microwave resonant [J]. Modern Scientific Instruments, 2006, 16(2): 26-29. (in Chinese)
- [7] 郭文川,王婧,朱新华.基于介电特性的燕麦含水率预测[J].农业工程学报,2012,28(24):272-279. GUO Wenchuan, WANG Jing, ZHU Xinhua. Moisture content prediction of oat seeds based on dielectric property [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 272-279. (in Chinese)
- [8] 赵丽清,尚书旗,高连兴,等.基于同心轴圆筒式电容传感器的花生仁水分无损检测技术[J].农业工程学报,2016,

- 32(9):212-218.
ZHAO Liqing, SHANG Shuqi, GAO Lianxing, et al. Nondestructive measurement of moisture content of peanut kernels based on concentric cylindrical capacitance[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(9):212-218. (in Chinese)
- [9] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦播种量电容法检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):51-58.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity[J]. Transactions of the CASE,2018,34(18):51-58. (in Chinese)
- [10] 郭文川,赵志翔,杨沅陈. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):188-193.
GUO Wenchuan, ZHAO Zhixiang, YANG Chenchen. Moisture meter for coarse cereals based on dielectric properties[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):188-193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130533&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.033. (in Chinese)
- [11] 车刚,陈正发,王鑫,等. 自主转送式杂粮水分快速测定仪的设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):357-366.
CHE Gang, CHEN Zhengfa, WANG Xin, et al. Design and experiment on autonomous transferring and quick measuring equipment of moisture content of coarse cereals[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(11):357-366. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.040. (in Chinese)
- [12] 张亚伟,王书茂,陈度,等. 基于近红外的小麦植株含水率检测方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):118-122,261.
ZHANG Yawei, WANG Shumao, CHEN Du, et al. Measurement of wheat plants water content based on near-infrared photoelectric sensors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):118-122,261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s019&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.019. (in Chinese)
- [13] 息裕博. 基于射频技术的粮食在线水分仪的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2016.
XI Yubo. Research on RF technology grain moisture on-line detector[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [14] 穆永航,李莉,王俊衡,等. 基于频域法传感器的基质含水率检测性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):341-346.
MU Yonghang, LI Li, WANG Junheng, et al. Performance evaluation of substrate moisture detection based on frequency domain sensor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):341-346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s052&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.052. (in Chinese)
- [15] 杨悦乾,王剑平,王成芝. 谷物含水率中子法在线测量的可行性研究[J]. 农业工程学报,2000,16(5):99-101.
YANG Yueqian, WANG Jianping, WANG Chengzhi. Study on on-line measurement of grain moisture content by neutron gauge[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(5):99-101. (in Chinese)
- [16] 陈进,王月红,练毅,等. 高频电容式联合收获机谷物含水量在线监测装置研制[J]. 农业工程学报,2018,34(10):36-45.
CHEN Jin, WANG Yuehong, LIAN Yi, et al. Development of on-line monitoring device of grain moisture content in combine harvester with high frequency capacitance[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(10):36-45. (in Chinese)
- [17] 刘志壮,吕贵勇. 基于电容法的稻谷含水率检测[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):179-182.
LIU Zhizhuang, LÜ Guiyong. Moisture content detection of paddy rice based on capacitance approach[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):179-182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.031. (in Chinese)
- [18] 张本华,钱长钱,焦晋康,等. 基于介电特性与 SPA-SVR 算法的水稻含水率检测方法[J]. 农业工程学报,2019,35(18):237-244.
ZHANG Benhua, QIAN Changqian, JIAO Jinkang, et al. Rice moisture content detection method based on dielectric properties and SPA-SVR algorithm[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(18):237-244. (in Chinese)
- [19] 麦智炜,李长友,徐凤英,等. 浮地式粮食水分在线检测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):207-213.
MAI Zhiwei, LI Changyou, XU Fengying, et al. Design and test based of grain moisture online measuring system on floating ground capacitance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):207-213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.032. (in Chinese)
- [20] 王月菊. 基于 PID 算法控温的热干燥式水分测量装置的设计[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Yueju. Design of thermal drying moisture measurement device based on PID algorithm[D]. Changchun: Jilin University,2019. (in Chinese)
- [21] 吴哲琼,范锦彪,王雪蛟. 电容式电子测压器的边缘效应分析[J]. 中国测试,2018,44(5):142-146.
WU Zheqiong, FAN Jinbiao, WANG Xuejiao. Edge effect analysis of capacitive electronic pressure measuring device[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(5):142-146. (in Chinese)
- [22] 徐冬平,张鹏鹏,孙诗裕. 基于 FDC1004 的电容式谷物水分检测仪的设计[J]. 农机化研究,2016,38(8):173-178.
XU Dongping, ZHANG Pengpeng, SUN Shiyu. Design of a grain moisture detector based on dielectric character[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(8):173-178. (in Chinese)
- [23] 胥保文,蔡健荣,孙力,等. 粮食水分检测装置设计[J]. 食品与机械,2017,33(9):81-83.
XU Baowen, CAI Jianrong, SUN Li, et al. Design of grain moisture detection device[J]. Food and Machinery,2017,33(9):81-83. (in Chinese)
- [24] 邓法金. 大学物理[M]. 2版. 北京:科学出版社,2004:492-495.
- [25] 邱禹,李长友,徐凤英,等. 基于平板结构的电容式粮食水分检测仪的设计[J]. 农机化研究,2013,35(1):78-83.
QIU Yu, LI Changyou, XU Fengying, et al. Design of capacitance grain moisture detector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(1):78-83. (in Chinese)
- [26] 鲍钢飞. 基础物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2007:316-320.
- [27] PEDRO A B, KARINA DE J S, EROS E DE M, et al. Predicting sorghum moisture content with radio frequency dielectric functions[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food,2019,12(2):222-231.