doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.030

基于 GA－BP 的联合收获机小麦含水率检测模型研究

安晓飞[1,2]　代均益[1,2]　李立伟[2]　卢　昊[2]　尹彦鑫[2]　孟志军[2]

（1. 新疆农业大学机电工程学院，乌鲁木齐 830052；2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097）

摘要：为进一步提高基于介电特性的联合收获机小麦含水率检测装置模型检测精度和适用范围，本研究以“京冬 22 号”、“蜀麦 1958”、“涡麦 33”3 个品种小麦为研究对象，测量含水率范围为 8.41% ~21.6%，检测温度范围为 5 ~40℃，容重范围为 714.44 ~777.58 kg/m^3 的小麦相对介电常数。试验结果表明，同一温度条件下，容重越大，相对介电常数越大；在同一容重条件下，相对介电常数会随温度升高而增大，也随含水率升高而变大。采用校正集样本 150 个，预测集样本 42 个，基于遗传算法优化 BP 神经网络（GA－BP）的方法建立了相对介电常数、温度、容重与小麦含水率的关系模型，模型采用 3－5－1 结构，最大迭代次数 1 000 次，学习误差阈值 1×10^{-6}。校正集 R^2、RMSE、MAE 分别为 0.996、0.241%、0.189%；预测集 R^2、RMSE、MAE 分别为 0.993、0.295%、0.189%，该模型具有较高的检测精度和稳定性，为不同品种小麦含水率在线检测提供了一种新的检测方法。

关键词：联合收获机；小麦含水率；检测模型；遗传算法；BP 神经网络

中图分类号：S225.3；S237　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)02-0325-08　　**OSID**：

Wheat Moisture Content Prediction Model for Combine Harvester Based on GA－BP Method

AN Xiaofei[1,2]　DAI Junyi[1,2]　LI Liwei[2]　LU Hao[2]　YIN Yanxin[2]　MENG Zhijun[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Research Center of Intelligent Equipment Technology for Agriculture*,
Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: In order to improve the detection accuracy and applicability of wheat moisture content detection device for combined harvester based on dielectric properties, the wheat moisture content prediction model was established based on GA－BP method. Focusing on three varieties of wheat, namely “Jingdong 22”, “Shumai 1958” and “Womai 33”. The measured range of wheat moisture content was 8.41% to 21.6%, with the detection temperature ranging from 5℃ to 40℃ and the bulk density ranging from 714.44 kg/m^3 to 777.58 kg/m^3 for wheat dielectric constant. The experiment results indicated that at constant temperature conditions, higher bulk density corresponded to a larger dielectric constant. Similarly, under consistent bulk density, the dielectric constant was increased with the increase of temperature and moisture content. To establish the relationship between dielectric constant, temperature, bulk density, and wheat moisture content, a genetic algorithm－optimized back propagation neural network (GA－BP) with 150 samples in the calibration set and 42 samples in the prediction set was established. The model, with a 3－5－1 structure, a maximum iteration of 1 000 times, and a learning error threshold of 1×10^{-6}, demonstrated high detection accuracy and stability. The verification set R^2, RMSE, and MAE values were 0.996, 0.241%, and 0.189%, respectively, while the prediction set returned values were 0.993, 0.295%, and 0.189%. These results underscored the model's efficacy in providing a method for online moisture content detection in wheat of different varieties.

Key words: combine harvester; wheat moisture content; prediction model; genetic algorithms; BP neural networks

收稿日期：2024－01－17　修回日期：2024－02－26

基金项目：新一代人工智能国家科技重大项目(2021ZD0110902)、国家小麦产业技术体系项目(CARS－03)和山东省重点研发计划项目(2022CXGC010608)

作者简介：安晓飞(1986—)，男，正高级工程师，主要从事农机智能装备技术研究，E-mail：anxf@nercita.org.cn

通信作者：孟志军(1975—)，男，研究员，主要从事农机智能装备技术研究，E-mail：mengzj@nercita.org.cn

0 引言

小麦是我国第二大主粮作物[1-2],2023 年全国小麦播种面积为 $2.362\,72\times10^8$ hm^2,总产量为 $1.345\,3\times10^8$ t[3]。含水率是评价小麦品质和选取加工工艺条件的重要指标[4]。含水率过高会导致小麦霉变、发芽,降低小麦品质,造成收获损失[5-6]。

常用的含水率快速检测方法有电容法、近红外法、微波法等[7-16]。检测模型是实现谷物水分准确检测的关键,国内外许多学者取得了丰富的成果[17-29]。传统电容法容易受到边际效应的影响,微波法传感器造价昂贵,近红外法易受检测环境限制。而利用介电特性检测含水率有着不受场景限制、成本低等优点,是小麦含水率稳定和快速的检测方法[30-34]。

综上所述,谷物含水率检测模型研究成果较多,但综合考虑不同品种温度、容重、相对介电常数的谷物含水率检测模型研究较少。本文探讨不同品种条件下温度、容重、小麦含水率对相对介电常数的影响,建立基于 GA-BP 神经网络的联合收获机小麦含水率检测模型,并开展试验验证。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选取研究对象为北京地区种植的“京冬 22 号”与四川、安徽地区种植的“蜀麦 1958”、“涡麦 33”小麦。试验地点为北京市国家精准农业示范基地。试验开始前,选用 5 目筛网筛除石子、麦秆、麦糠等杂质。随机选取小麦样品并用游标卡尺(K15G278418 型数显卡尺,桂林广陆数字测控股份有限公司)测量,该测试样品平均长径为 6.00 mm,使用电子天平(MTB2000D 型,深圳市美孚电子有限公司)测得谷物千粒质量为 44.30 g。所需样品装于 PE 密封袋,置于 25℃的室温环境。

1.2 基于介电特性的谷物水分在线检测装置

试验选用自主开发的基于介电特性的联合收获机小麦含水率在线检测装置。该装置结构如图 1 所示,装置由采样机构、温度与含水率传感器、定位模块、数据采集模块、数据传输模块组成。采样机构内含 XD-3420-2 型直流电机(广东信达电机有限公司)、电机驱动模块,支撑横梁、排粮器、集粮盒与固定支架。数据采集模块由含水率、温度传感器与 2 个粮位传感器组成。数据传输模块使用 RS485 通信与串口通信实现数据传输。图 2 为联合收获机小麦含水率在线检测装置原理图,联合收获机作业时,小麦从净粮升运器抛出落入集粮盒内,当小麦填满集粮盒时,触发安装于集粮盒顶部的粮位传感器,开启持续 4 s 的检测时序,采集小麦温度与相对介电常数等数据。当检测数据采集完毕时,切换为排粮时序。排粮电机开始运行,集粮盒内的小麦排出,排粮持续 4 s 后系统周期性切换。图 3 为检测装置组成图,与恒温恒湿箱组合,采集小麦温度与相对介电常数。预设恒温恒湿箱温度以调节试验温度;使用不同质量的砝码置于试验样品表面,以改变小麦容重[35]。

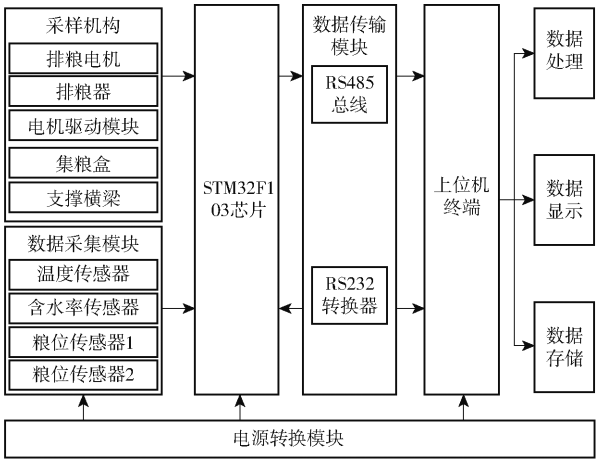


图 1 检测装置总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of wheat moisture on-line detection device

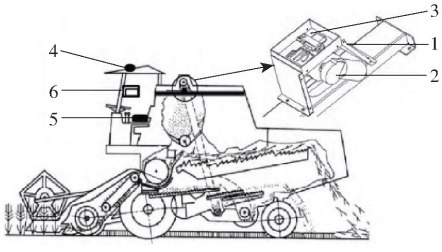


图 2 联合收获机小麦含水率在线检测系统原理图

Fig. 2 Schematic of wheat moisture on-line detection device

1. 采样装置 2. 排粮电机 3. 温度与含水率传感器 4. 定位模块 5. 数据采集模块 6. 数据显示终端

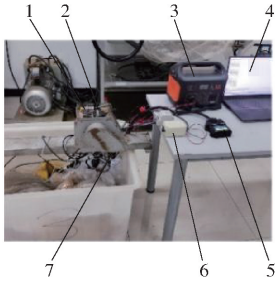


图 3 检测装置组成图

Fig. 3 Diagram of detection system components

1. 高位粮位传感器 2. 温度与含水率传感器 3. 12 V 供电电源 4. 上位机 5. 下位机控制器 6. 电机控制模块 7. 采样机构

1.3 试验方案

1.3.1 样品制配

利用电子天平分别称取 8 份质量 1 500 g 的小

麦。将完成筛选除杂的小麦置于密封容器中，通过添加若干去离子水配置含水率不同的小麦样品。使用喷壶添加去离子水的同时摇匀搅拌，以增大小麦样品对去离子水的吸收效率。小麦样品所需配置的含水率过高（大于 17%）时，采用分批多次添加去离子水的方式确保样品水分吸收。样品每隔 3 ~ 4 h 搅动一次，在配置添加完成 1 d 后，所有样品密封置于 2℃的冰箱内 3 ~ 5 d。在此期间，每天摇匀样品 3 ~ 4 次，使小麦充分吸收去离子水，达到试验标准。

1.3.2　数据获取

小麦介电常数数据采集试验前，需提前将室内温度设定为 25℃，恒温恒湿干燥箱温度调节为 5℃。在试验中，将配置完成的 1.2 kg 试验样品均分为 3 份装入 500 mL 的玻璃容器中，标记后将含水率与温度传感器插入小麦样品的正中心，使传感器探针完全浸入试验样品。检测系统预热完成后将待测样品放入恒温恒湿箱中。在其中 2 份样品表面分别施加 500 g 和 1 000 g 的砝码，改变样品容重，记录当前样品容重状态。随后将恒温恒湿箱温度依次设置为 10、15、20、25、30、35、40℃。样品达到预设温度且稳定时记录 3 次相对介电常数的测量值，取平均值作为小麦在当前温度下的相对介电常数。

取同批配置完成的小麦样品 300 g，使用电热鼓风干燥箱（DHG9240A 型，上海一恒科学仪器有限公司）干燥 4 h 至样品质量恒定，对比干燥前后小麦样品质量。测得所配制的小麦样品含水率为 8.41%（原始含水率）、10.30%、12.95%、13.80%、15.50%、17.00%、19.10%、21.60%。

2　结果与分析

2.1　容重和温度对相对介电常数的影响分析

通过开展如表 1 所示的不同小麦含水率、温度、容重条件下的小麦相对介电常数检测试验，得到图 4 所示的容重和含水率对相对介电常数的响应曲面图。由图 4a 可知，设置温度为 25℃不变条件下，随着小麦容重在 714.44 ~ 778.58 kg/m^3 的区间内不断升高，小麦相对介电常数呈单调递增趋势，且随着含水率在 8.41% ~ 21.6% 范围内的增大改变其上升趋势。其原因为随着容重增大，小麦籽粒间隙降低，单位体积内小麦含量增高，单位体积所具有的去离子水含量也随之增大，最终导致相对介电常数增大。由图 4b 可知，当容重保持不变时，随着温度在 5 ~ 40℃范围内的升高，小麦相对介电常数也不断增大，且其单调递增的趋势随着含水率的改变而变化。相对介电常数反映水这一极性分子在小麦内部的运动状态，温度升高加速小麦内部自由水的离子运动和极性趋向，最终导致相对介电常数增大。

表 1　不同含水率、容重和温度下小麦相对介电常数

Tab.1　Relative dielectric constant of wheat at different moisture contents, bulk weights and temperatures

含水率/%	容重/(kg·m^{-3})	温度/℃ 5	10	15	20	25	30	35	40
8.41	761.3	1.7	1.9	2.4	2.6	3.1	3.4	3.7	4.0
	770.1	2.3	2.6	3.0	3.2	3.4	3.7	4.2	4.5
	778.5	2.7	3.0	3.4	3.7	3.9	4.2	4.7	4.9
10.30	750.6	2.3	2.5	2.8	3.2	3.5	3.8	3.9	4.2
	760.7	2.5	2.8	3.2	3.4	3.6	3.8	4.3	4.6
	769.1	2.9	3.1	3.5	3.7	4.0	4.3	4.8	5.0
12.95	747.0	2.5	2.7	3.0	3.4	3.7	4.1	4.3	4.4
	755.1	2.7	3.0	3.3	3.6	4.0	4.3	4.5	4.8
	763.2	3.2	3.6	3.8	4.0	4.3	4.5	4.9	5.1
13.80	744.6	2.6	2.8	3.1	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6
	753.1	2.9	3.2	3.5	3.7	4.1	4.3	4.6	4.9
	761.0	3.3	3.7	4.1	4.4	4.6	4.8	5.0	5.3
15.50	736.8	3.0	3.3	3.7	4.0	4.3	4.6	4.7	5.0
	744.8	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	5.1	5.4
	752.6	3.7	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.3	5.6
17.00	730.0	3.2	3.5	3.8	4.3	4.5	4.7	5.0	5.2
	737.1	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.5
	745.6	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.9
19.10	721.78	3.4	3.6	3.9	4.3	4.6	4.8	5.1	5.3
	729.1	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.2	5.4	5.6
	736.9	3.9	4.2	4.5	4.9	5.2	5.4	5.7	6.0
21.60	714.4	3.7	4.0	4.3	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4
	721.8	4.0	4.2	4.5	4.7	5.1	5.3	5.5	5.7
	729.3	4.3	4.4	4.7	5.1	5.4	5.6	6.0	6.2

2.2　GA－BP 神经网络模型构建

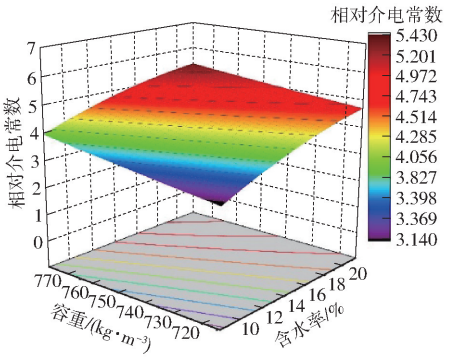
2.2.1　样本集划分

小麦样本的实际含水率为 8.41% ~ 21.6%，试验在 5 ~ 40℃温度范围内以容重 714.44 ~ 777.58 kg/m^3 条件下，分别采集样本的相对介电常数与温度，共获得 192 组数据。随机将样本数据中的 150 组设为校正集，42 组作为预测集。

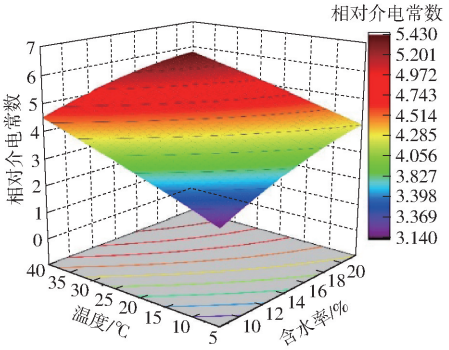
2.2.2　检测模型建立

BP 神经网络算法是一种多层前馈神经网络模型，通过设置输入层、隐含层、输出层 3 层神经元对温度、相对介电常数、容重等输入特征进行处理。信号正向传播进行优化找出最优初始化参数，误差反向传播调整网络的权值和阈值。

遗传算法（GA）是基于自然选择思想而设计的优化算法，在建模过程中使用选择、交叉与变异等操作寻找最优适应度的个体。在使用遗传算法优化 BP 神经网络进行含水率模型的建模预测时，可结合 GA 算法搜索能力和 BP 神经网络学习能力，获得更准确的小麦含水率预测结果。



(a) 温度25℃



(b) 样品表面施加500 g砝码，容重为721.8~770.1 kg/m³状态下

图 4 容重和温度对相对介电常数的响应曲面

Fig. 4 Influence of bulk density and temperature of straw on relative permittivity

将小麦相对介电常数、温度、容重作为输入特征，将小麦含水率设为输出，采用 3 层神经网络结构，如图 5 所示，通过多次测试比较选择隐含层节点数为 5。

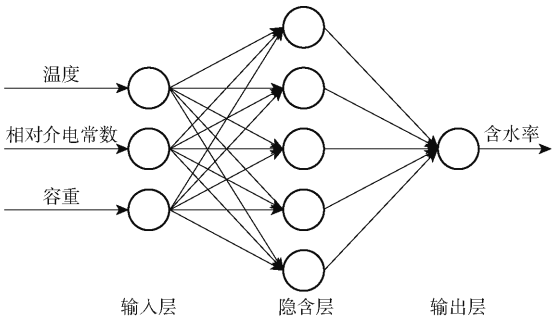


图 5 BP 神经网络结构图

Fig. 5 BP neural network structure

模型采用 tansing 函数作为输入层到隐含层的激活函数，选取 purelin 函数作为隐含层到输出层的激活函数[36]。在进行 BP 神经网络运算前，为减弱相对介电常数、温度等因素因不同量纲对网络模型训练与含水率输出的影响，将输入数据做归一化处理，量纲限制在[0,1]区间内。

GA－BP 神经网络模型的建模流程如图 6 所示，具体过程如下：

(1)数据变换。将选取的校正集和预测集样本，通过归一化处理，消除因量纲不同造成的系统误差。

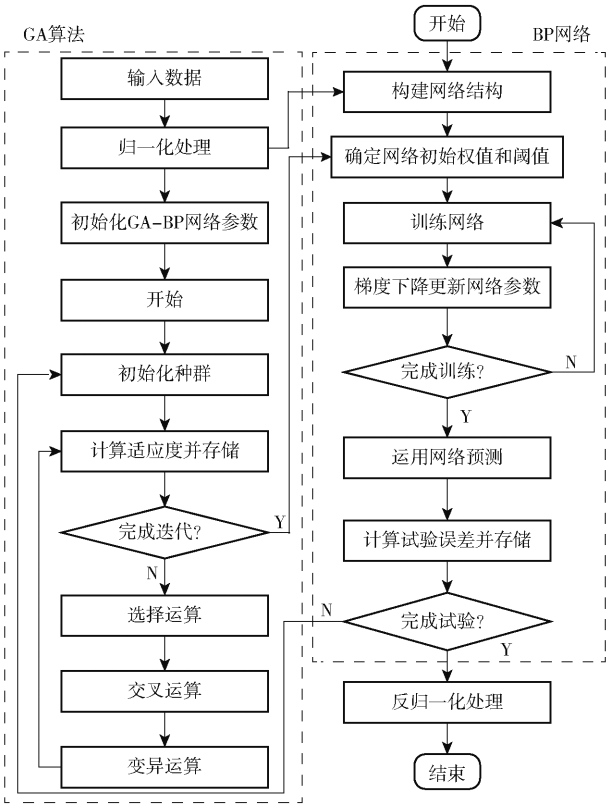


图 6 遗传优化算法流程图

Fig. 6 Process chart of genetic algorithm

(2)设置神经网络参数。将模型最大迭代次数设置为 1 000，学习率设置为 1×10^{-4}，学习误差阈值设置为 1×10^{-6}。

(3)初始化参数。设置遗传优化算法的初始种群规模数 N 和最大迭代次数 T，本文将初始种群规模设置为 20，遗传代数设置为 100。

(4)适应度计算。通过适应度函数计算个体适应度，利用选择交叉和变异操作找到最优适应度的相应个体。

(5)BP 神经网络用得到的最优个体对网络进行初始权值和阈值赋值，模型经训练后输出预测结果。

通过均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、决定系数(R^2)与相对误差这 4 个指标评价模型性能。

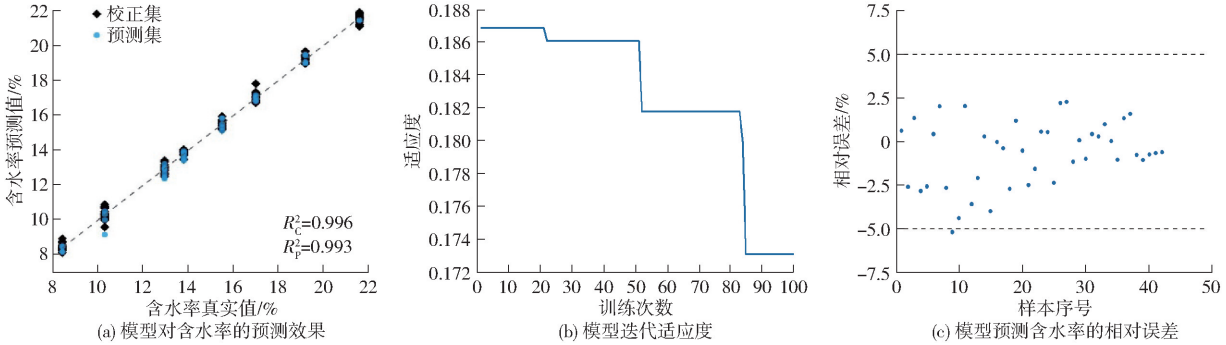
MAE、RMSE、相对误差越小，说明模型输出的含水率预测值与实际值越接近，预测越精确。决定系数 R^2 表示模型拟合优度，越接近 1 表明模型预测效果越好。

2.3 模型验证

为了验证模型可靠性，将原始数据划分好的 150 组校正集、42 组预测集代入基于 GA－BP 神经网络建立的小麦含水率预测模型中，GA－BP 神经网络模型校正集和预测集所输出的预测值与含水率

真实值的对比如图 7a 所示，GA－BP 神经网络模型校正集、预测集的均方根误差 RMSE 分别为 0.241% 和 0.295%；平均绝对误差 MAE 为 0.189% 和 0.219%；决定系数 R^2 分别为 0.996 和 0.993。

本模型设置训练次数为 100 次，适应度曲线如图 7b 所示，通过 84 次训练达到了最佳性能，训练误差为 0.017 6。图 7c 为 GA－BP 神经网络预测对比，含水率预测相对误差为 －5.19% ～2.27%，其中 97.61% 的误差处于 ±5% 以内，说明模型预测精度较高。



(a) 模型对含水率的预测效果　(b) 模型迭代适应度　(c) 模型预测含水率的相对误差

图 7　GA－BP 神经网络预测结果

Fig. 7　Wheat moisture content predicted results of GA－BP model

通过选用与 GA－BP 神经网络模型相同的训练环境及训练参数条件，将校正集和预测集分别代入支持向量机(SVM)、BP 神经网络、基于粒子群算法的 BP 神经网络模型(PSO－BP)中，将 3 种不同建模方法输出的预测结果与 GA－BP 神经网络模型进行比较，各模型输出预测结果如表 2 所示。

表 2　不同建模方法模型效果

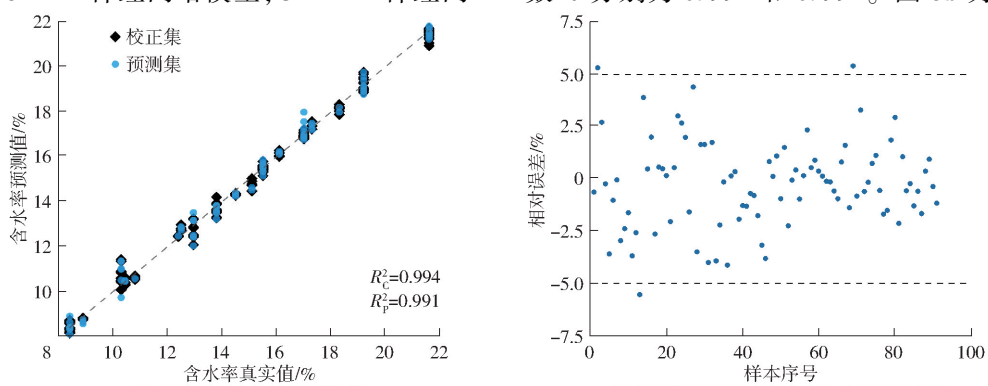
Tab. 2　Effect of different modeling methods

评价指标	SVM		BP 神经网络		GA－BP 神经网络		PSO－BP 神经网络	
	校正集	预测集	校正集	预测集	校正集	预测集	校正集	预测集
MAE/%	0.361	0.529	0.221	0.315	0.189	0.219	0.245	0.331
RMSE/%	0.440	0.605	0.289	0.409	0.241	0.295	0.327	0.409
R^2	0.988	0.979	0.995	0.989	0.996	0.993	0.993	0.991

从表 2 可知，BP 神经网络、GA－BP、PSO－BP 神经网络均能较好地对不同温度不同容重状态下的小麦进行含水率预测。而相对于传统的 BP 神经网络模型和 PSO－BP 神经网络模型，GA－BP 神经网络模型在校正集和预测集上均有更低的 RMSE 与 MAE，同时决定系数 R^2 更接近 1，GA－BP 神经网络模型能更好地挖掘温度、容重、相对介电常数与小麦含水率之间的非线性映射关系，其建立的小麦含水率检测模型预测精度高于其他 2 种神经网络模型。

2.4　不同品种小麦含水率检测模型

为验证 GA－BP 神经网络模型的泛化能力，将不同小麦品种样本为校正集，配置“涡麦 33”、“蜀麦 1958”2 个品种小麦的不同含水率样本，在配置完成之后收集这 2 个品种小麦在 5～40℃范围内的相对介电常数并记录当前小麦样本容重。采集到的含水率、温度、相对介电常数、容重等影响因素共 272 组数据，将 180 组数据作为校正集，剩下的 92 组数据作为预测集代入 GA－BP 神经网络模型。如图 8a 所示，将品种这一输入特征引入 GA－BP 模型后，模型校正集、预测集的 RMSE 分别为 0.247% 与 0.282%；MAE 分别为 0.175% 和 0.206%；决定系数 R^2 分别为 0.994 和 0.991。图 8b 为模型预测不



(a) 模型对含水率的预测效果　(b) 模型预测不同品种小麦含水率相对误差

图 8　添加品种后 GA－BP 神经网络模型预测结果

Fig. 8　GA－BP model prediction results after adding varieties

同品种小麦含水率相对误差,预测相对误差为 -5.80% ~5.53%,其中 96.73% 的误差处于 ±5% 以内,可知 GA - BP 神经网络模型在不同品种、不同温度、不同容重状态下对含水率有良好的预测精度,模型具有较强的鲁棒性。

2.5 含水率检测模型田间动态验证试验

为验证小麦含水率检测模型在动态收获条件下的精确度,联合收获机小麦含水率在线检测装置动态验证试验于 2023 年 6 月 20 日开展,如图 9 所示。试验地点选择北京小汤山国家精准农业示范基地,试验田位于 116°26′54.66″ ~ 116°27′02.41″E、40°11′15.50″~40°11′11.61″N,面积 3.3 hm^2。试验田中种植“京冬 22 号”小麦。当日气温 19 ~32℃,所收获小麦含水率为 11.7% ~12.5%。含水率在线检测装置搭载于中联谷王 TB60(4LZ - 6B)型小麦联合收获机,在含水率检测装置运行过程中,每收割 300 m 进行一次停机采集并标记收获小麦。将所标记收获小麦使用电热鼓风干燥箱进行烘干,将烘干前后对比得出的小麦含水率真实值与对应时间段收获的数据进行对比,结果如图 10 所示。



图 9 田间动态验证试验

Fig. 9 Field experiment

由动态验证试验中得出含水率真实值与预测值相对误差为 -4.84% ~5.19%,其中 97.05% 样本相对误差处于 ±5% 的范围内,满足动态收获条件下进行田间检测的需求。

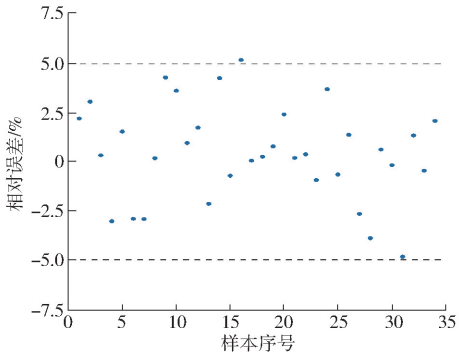


图 10 模型误差

Fig. 10 Model validation error

3 结论

(1)通过设计正交试验探究温度、容重、相对介电常数对小麦含水率的影响,当温度不变时,随着小麦容重在 714.44 ~778.58 kg/m^3 的区间内不断升高,小麦相对介电常数呈现单调递增趋势;当容重保持不变时,随着温度在 5 ~40℃范围内升高,小麦相对介电常数也不断增大。

(2)建立了基于 GA - BP 神经网络小麦含水率预测模型。基于 GA - BP 神经网络的含水率检测模型校正集、预测集的 RMSE 分别为 0.241% 和 0.295%;MAE 分别为 0.189% 与 0.219%;决定系数 R^2 分别为 0.996 和 0.993,田间动态验证试验表明模型误差为 -4.84% ~5.19%。4 种不同建模方法的模型效果表明,GA - BP 神经网络含水率预测模型效果最优。

(3)基于 GA - BP 神经网络的含水率模型应用于不同品种的小麦上,模型校正集、预测集 RMSE 分别为 0.247% 和 0.282%,MAE 分别为 0.175% 和 0.206%,决定系数分别为 0.994 和 0.991,模型具有较好的精确度和鲁棒性。

参 考 文 献

[1] 李婷婷,王艳飞. 俄乌冲突对全球小麦供应链和中国市场的影响及内循环面临的挑战[J]. 世界农业,2023(10):27 -38.
LI Tingting, WANG Yanfei. The impact of the Russia-Ukraine conflict to the global wheat supply chain and China's domestic market and the challenges faced in the internal circulation[J]. World Agriculture, 2023(10):27 -38. (in Chinese)

[2] ZHANG Jing, GUO Zhen, REN Zhishang, et al. Rapid determination of protein, starch and moisture content in wheat flour by near-infrared hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 117:105134.

[3] 卢琦. 小麦联合收获机清选损失监测装置设计与试验[D]. 郑州:河南农业大学, 2024.
LU Qi. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[4] 廖西元,李凤博,徐春春,等. 粮食安全的国家战略[J]. 农业经济问题,2011,32(4):9 -16,110.
LIAO Xiyuan, LI Fengbo, XU Chunchun, et al. National strategy for food security[J]. Issues in Agricultural Economy, 2011, 32(4):9 -16, 110. (in Chinese)

[5] LI Chenxiao, ZHAO Chenyu, REN Yuan, et al. Microwave traveling-standing wave method for density-independent detection of grain moisture content[J]. Measurement, 2022, 198:111373.

[6] 李泽峰,金诚谦,刘政,等. 谷物联合收获机水分在线检测装置设计与标定[J]. 中国农机化学报,2019,40(6):145 -151.

LI Zefeng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Design and calibration of on-line moisture detection device for grain combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(6):145－151. (in Chinese)

[7] 刘锦,裘姗姗,周洁,等. 基于微带微波传感器的谷物含水率便携式检测装置的开发和应用[J]. 食品安全质量检测学报,2022,13(17):5485－5494.
LIU Jin,QIU Shanshan,ZHOU Jie, et al. Development and application of portable measuring device for grain moisture content based on microstrip microwave sensor[J]. Journal of Food Safety & Quality,2022,13(17):5485－5494. (in Chinese)

[8] 陈阳. 电阻式谷物水分仪采样机构研究及结构参数优化[D]. 合肥:安徽农业大学,2017.
CHEN Yang. Research on resistive grain moistureteller sampling and optimization of structural parameters[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2017. (in Chinese)

[9] 郭文川,杨军,刘驰,等. 基于交流阻抗法的小麦秸秆含水率检测仪设计[J]. 农业工程学报,2013,29(23):46－52.
GUO Wenchuan, YANG Jun, LIU Chi, et al. Wheat straw moisture meter based on alterative current impedance method[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 46－52. (in Chinese)

[10] 孙俊,莫云南,戴春霞,等. 基于介电特性与 IRIV－GWO－SVR 算法的番茄叶片含水率检测[J]. 农业工程学报,2018,34(14):188－195.
SUN Jun, MO Yunnan, DAI Chunxia, et al. Detection of moisture content of tomato leaves based on dielectric properties and IRIV－GWO－SVR algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 188－195. (in Chinese)

[11] 蔡泽宇,刘政,张光跃,等. 谷物含水率测量技术研究进展[J]. 中国农机化学报,2021,42(4):99－109.
CAI Zeyu, LIU Zheng, ZHANG Guangyue, et al. Research progress of grain moisture measurement technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 99－109. (in Chinese)

[12] 万霖,唐宏宇,马广宇,等. 翅片式双重极板水稻含水率检测装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):320－328.
WAN Lin, TANG Hongyu, MA Guangyu, et al Optimization design and experiment on finned double platesrice moisture content measuring device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):320－328. (in Chinese)

[13] 赵晨宇. 基于微波空间驻波法的谷物含水率无损检测方法及装置研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
ZHAO Chenyu. Research and design of non-destructive detection of grain moisture content based on microwave traveling-standing wave method[D]. Changchun:Jilin Agricultural University,2023. (in Chinese)

[14] 王月红. 基于高频电容的联合收获机谷物含水率在线监测装置研制[D]. 镇江:江苏大学,2019.
WANG Yuehong. On-line monitoring device of grain moisture content in combine harvester in using high frequency capacitance [D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2019. (in Chinese)

[15] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 118－122, 261. (in Chinese)

[16] YAN Jinshan, TIAN Hao, WANG Shuai, 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.

[17] ABDOLLAHPOUR S, KOSARI-MOGHADDAM A, BANNAYAN M. Prediction of wheat moisture content at harvest time through ANN and SVR modeling techniques[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(4): 500－510.

[18] 张津阳. 基于多频微波扫描测量技术的谷物含水率在线检测装置的研发与应用[D]. 杭州:浙江大学,2023.
ZHANG Jinyang. Development and application of online grain moisture content detection device based on multi-frequency microwave scanning measurement technology[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2023. (in Chinese)

[19] 赵志翔. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
ZHAO Zhixiang. Design of water content detector for small grains based on dielectric properties[D]. Yangling: Northwest A&F University,2013. (in Chinese)

[20] 孙文胜. 电容式水稻在线水分检测装置的优化设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
SUN Wensheng. Optimal design and experimental study of capacitive on-line water detection device for rice[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2023. (in Chinese)

[21] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6): 338－343,378. (in Chinese)

[22] 张越,赵进,赵丽清,等. 基于介电特性谷物水分在线测量仪的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2020,41(5):105－110.
ZHANG Yue,ZHAO Jin,ZHAO Liqing,et al. Design and experiment of on-line measuring instrument for grain moisture based on dielectric properties[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(5):105－110. (in Chinese)

[23] 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]. 农业机械学报,2014,45(10):207－213.
MAI Zhiwei,LI Changyou,XU Fengying,et al. Design and test of grain moisture online measuring system based on floating ground capacitance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 207－213. (in Chinese)

[24] 宋华鲁,闫银发,宋占华,等. 利用介电参数和变量筛选建立玉米籽粒含水率无损检测模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 262 - 272.
SONG Hualu, YAN Yinfa, SONG Zhanhua, et al. Nondestructive testing model for maize grain moisture content established by screening dielectric parameters and variables[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 262 - 272. (in Chinese)
[25] 段东瑶,马坊岩,赵丽清,等. 基于微波介电特性的茶叶含水率无损检测模型[J]. 传感器与微系统,2023,42(8):127 - 130.
DUAN Dongyao, MA Fangyan, ZHAO Liqing, et al. Nondestructive detection model of tea moisture content based on microwave dielectric characteristics[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023,42(8):127 - 130. (in Chinese)
[26] 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)
[27] 杨盛杰. 机载式谷物水分近红外光谱检测系统原理样机开发与试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
YANG Shengjie. Development and experimental study of the principle prototype of airborne near-infrared spectrum detection system for grain moisture[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
[28] ZHANG Yanmin, GUO Wenchuan. Moisture content detection of maize seed based on visible/near-infrared and near-infrared hyperspectral imaging technology[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(2): 631 - 640.
[29] 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 an online detection device for grain moisture content based on microwave reflection method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 21 - 28. (in Chinese)
[30] 王丹阳,王洁,张本华,等. 基于介电特性的稻谷干燥含水率检测模型构建与验证[J]. 沈阳农业大学学报,2022,53(6):752 - 758,
WANG Danyang, WANG Jie, ZHANG Benhua, et al. Construction and verification of detection model of moisture content for paddy rice drying based on dielectric properties[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(6): 752 - 758. (in Chinese)
[31] 郭文川,赵志翔,杨沉陈. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计与试验[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 188 - 193. (in Chinese)
[32] 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)
[33] 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)
[34] 孙俊,张国坤,毛罕平,等. 基于介电特性与回归算法的玉米叶片含水率无损检测[J]. 农业机械学报,2016,47(4):257 - 264,279.
SUN Jun, ZHANG Guokun, MAO Hanping, et al. Non-destructive moisture content detection of corn leaves based on dielectric properties and regression algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 257 - 264, 279. (in Chinese)
[35] 孟志军,刘淮玉,安晓飞,等. 基于 SPA - SSA - BP 的小麦秸秆含水率检测模型[J]. 农业机械学报,2022,53(2):231 - 238,245.
MENG Zhijun, LIU Huaiyu, AN Xiaofei, et al. Prediction model of wheat straw moisture content based on SPA - SSA - BP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 231 - 238, 245. (in Chinese)
[36] 刘雪,李亚妹,刘娇,等. 基于 BP 神经网络的鲜鸡蛋货架期预测模型[J]. 农业机械学报,2015,46(10):328 - 334.
LIU Xue, LI Yamei, LIU Jiao, et al. BP neural network based prediction model for fresh egg's shelf life[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 328 - 334. (in Chinese)