

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.039

基于微波自由空间测量的小麦含水率检测方法

郭交^{1,2} 段凯文^{1,3} 郭文川^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了实现小麦含水率的快速检测, 采用微波自由空间测量法研究了信号频率(1~4 GHz)、温度(10~40℃)、含水率(11.35%~17.79%)和容积密度(低、高)对小麦相对介电常数的影响, 分析了影响相对介电常数变化的原因, 建立了不同频率下小麦含水率的预测模型, 并对模型进行了验证。研究表明, 在1~4 GHz频段内, 小麦的相对介电常数随含水率、温度和容积密度的增大而增大, 随着信号频率的增大而减小; 所建立的支持向量机模型取得了很好的预测效果, 对比于单频和多频, 全频下的预测模型最优, 其预测集相关系数、预测集均方根误差和剩余预测偏差分别达到了0.992 9、0.051 3%和18.67。研究表明, 微波自由空间法可用于检测小麦含水率。

关键词: 小麦; 含水率; 自由空间测量; 介电特性

中图分类号: S125 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)06-0338-06

Detection Method of Moisture Content of Wheat with Microwave Free-space Measurement

GUO Jiao^{1,2} DUAN Kaiwen^{1,3} GUO Wenchuan^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory for Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Services, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to explore a rapid method for detecting content of wheat content, based on microwave free-space measurement, the effects of frequency (1~4 GHz), temperature (10~40℃), moisture content (11.35%~17.79%) and bulk density (low and high) on the relative dielectric constant of wheat were studied. The factors causing the effect of changes in the relative dielectric constant of wheat were analyzed, the prediction models of wheat moisture content with different frequencies were established, and the model was verified. The experimental results demonstrated that in the frequency range of 1~4 GHz, the relative dielectric constant of wheat was increased with the increase of moisture content, temperature and bulk density of samples, but it was decreased when frequency was increased. Furthermore, all samples were partitioned into calibration set (60 samples) and prediction set (24 samples), the established support vector machine (SVM) model had good performance for the moisture content prediction. Compared with single-frequency and multi-frequency, the prediction model with full-frequency was the best, and the correlation coefficient of prediction, root-mean-square error of prediction and residual prediction deviation were 0.992 9, 0.051 3% and 18.67, respectively. The results indicated that the microwave free-space measurement could be used to detect moisture content of wheat. The research was helpful to develop a new wheat moisture detector which could be used in situ or online detection.

Key words: wheat; moisture content; free-space measurement; dielectric property

0 引言

我国小麦种植面积约占粮食作物总面积的

22%, 产量占粮食总产量的20%以上^[1]。小麦含水率是评价小麦品质的重要指标之一, 含水率不但决定了小麦贮藏的安全性, 同时也制约着小麦加工工

收稿日期: 2018-12-20 修回日期: 2019-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)、国家自然科学基金项目(41301450)和陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-NY-060)

作者简介: 郭交(1984—), 男, 副教授, 主要从事微波测量与参数提取研究, E-mail: jiao.g@163.com

艺与流通过程。过高的含水率易引起小麦发芽、发霉、不易存储等问题,含水率过低则会破坏粮食内部物理结构,使其营养价值降低,造成巨大的经济损失。因此,必须严格控制其含水率。

目前小麦的含水率测量应用较成熟的方法主要为直接法和间接法^[2-6],直接法检测精度高但费时费力,很难适用于在线检测。间接法主要有电阻法、电容法、射线法和红外线法等,这些方法都有各自的局限性,与实时在线测量的需求之间存在一定的差距。近年来国际上出现了一种新的含水率检测方法,即微波自由空间测量法^[7-9],该测量方法具有高精度、实时在线检测等优势。微波自由空间测量法是由矢量网络分析仪实现微波信号的传输,利用调频连续波技术替代矢量网络分析仪实现微波信号的产生,具有质量小、成本低、功耗低等优势,为该方法的实现提供了一个可靠的技术途径;调频连续波可方便地实现带宽测量,目前研究的大多是单频条件下建立含水率预测模型,而关于全频与单频的定量比较研究较少。因此,本文分别建立单频、多频和全频下的含水率预测模型,定量分析频段选择对预测精度的影响。

本文以小麦为研究对象,基于微波自由空间测量研究测量信号频率(1~4 GHz)、温度(10~40℃)、含水率(11.35%~17.79%)和容积密度(低、高)对小麦相对介电常数的影响,进而建立预测小麦含水率的数学模型,以期开发基于微波自由空间法的小麦含水率在线无损检测设备奠定基础。

1 微波自由空间法测量原理

微波自由空间法是利用 S 参数与介电常数的关系来计算介质的复相对介电常数, S 参数是描述网络各端口的归一化入射波和反射波关系的网络参数。基于微波自由空间法的数据测量系统由矢量网络分析仪、发射天线、接收天线、计算机、小麦样品及辅助设备构成,如图1所示。待测样品放置于发射天线与接收天线中间,矢量网络分析仪完成微波信号的发射与接收,计算机用于 S 参数的存储和数据分析。

根据电磁波的传播理论对待测样品的电磁信号进行分析,设待测样品的复相对介电常数为 ϵ_r ,厚度为 d ,频率为 f 的平面波 E_i 垂直入射于待测物品,传播方向沿 z 轴正向,如图2所示。待测样品左右两边均为空气,电磁波在空气中的传播常数为 β_0 ,入射方向与待测物品垂直。根据微波分析理论,待测物品可以等效为二端口网络,电磁波将对该网络发生反射和透射。通过矢量网络分析仪测量出的 S

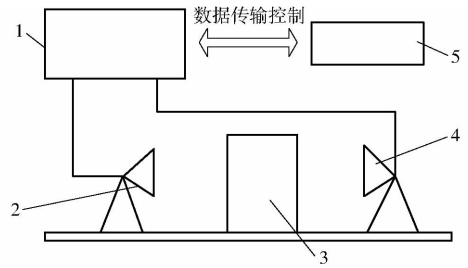


图1 测量系统框图

Fig. 1 Measurement system chart

1. 矢量网络分析仪 2. 发射天线 3. 小麦样品 4. 接收天线
5. 计算机

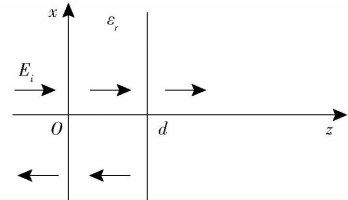


图2 电磁波通过待测样品的传播示意图

Fig. 2 Schematic of propagation of electromagnetic waves through tested sample

参数值,并由麦克斯韦方程和边界条件可以得到散射系数 S_{11} 、 S_{21} 计算公式为^[10]

$$S_{11} = \frac{(\eta_r^2 - 1)(1 - e^{-2j\beta d})}{(\eta_r + 1)^2 - (\eta_r - 1)^2 e^{-2j\beta d}} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{4\eta_r e^{-j\beta d}}{(\eta_r + 1)^2 - (\eta_r - 1)^2 e^{-2j\beta d}} \quad (2)$$

其中
$$\eta_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (3)$$

$$\beta = \beta_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (4)$$

式中 η_r ——待测样品的特性阻抗
 β ——电磁波在待测样品中的传播常数
 μ_r ——待测样品的相对磁导率

将式(1)和式(2)化简,可得^[11]

$$S_{11} = \frac{Q(1 - T^2)}{1 - T^2 Q^2} \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - Q^2)}{1 - T^2 Q^2} \quad (6)$$

其中
$$Q = \frac{\eta_r - 1}{\eta_r + 1} \quad (7)$$

$$T = e^{-j\beta d} \quad (8)$$

式中 Q ——样品材料与空气交界处的反射系数
 T ——样品材料与空气交界处的透射系数

联立式(5)和式(6),通过求解方程可得到散射系数 S_{11} 、 S_{21} 与 Q 、 T 的关系,即

$$Q = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (9)$$

其中
$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (10)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - Q}{1 - (S_{11} + S_{21})Q} \quad (11)$$

式(9)正负号的选取应保证 $|Q| < 1$ 。由式(8)可以得到电磁波在待测样品中的传播常数

$$\beta = j \frac{\ln T}{d} \quad (12)$$

联立式(9)~(12),可以得到待测样品的复相对介电常数表达式

$$\varepsilon_r = \frac{\beta}{\beta_0} \frac{1 - Q}{1 + Q} \quad (13)$$

由此可见,如测得二端口网络的 S_{11} 、 S_{21} 参数,即待测样品的 S_{11} 、 S_{21} 参数,则可通过式(9)~(13)计算得到待测样品的复相对介电常数。

2 材料与方 法

2.1 材 料

试验所用的小麦样品为西北农林科技大学自主培育的小偃22号,初始含水率(湿基)为11.35%。试验前,用筛网筛除破粒及杂物。选用形状完整、籽粒饱满的小麦作为试验样本。

2.2 测 量 方 法

2.2.1 含 水 率 测 量

将小麦样品置于133℃的电热鼓风干燥箱内干燥19 h^[12],根据干燥前后小麦样品质量的变化计算得到湿基含水率。

2.2.2 样 品 制 备

利用电子分析天平分别称取6份约1 000 g的试验样品,放置于密封性良好的玻璃器皿中,根据初始小麦含水率和配制样品要求,计算出需要添加的去离子水质量,配置不同含水率的小麦样品,加水后,将试验材料放入密闭性较好的密封袋中,将密封袋放置于阴凉不通风处,2~3 d后,使其均匀吸水,期间每天摇动3~4次。试验所配制的含水率为11.35%、12.37%、13.45%、14.75%、15.95%和17.79%。各含水率下的试验样品在测量时设置成两个容积密度等级,分别用低、高容积密度表示。低容积密度是将试验样品以自由落体的方式装入容器内;高容积密度是通过将试验样品振动或加压增加容器内样品的质量。

2.2.3 测 量 步 骤

在电子分析天平上称得空容器的质量,将小麦样品以自由落体的方式装满容器,测量装有样品的容器质量,计算出容器内样品的容积密度,作为低容积密度值。将装有试验样品的容器放入冰箱中冷藏,待温度降至5℃后,将容器放入红外恒温干燥箱内,同时将数字温度计插入试验样品中,当样品温度

达到10℃时,测量所选频率下的 S 参数值。随后依次设定干燥箱的温度为15、20、25、30、35、40℃。当试验样品温度达到设置值时,依次测量每个温度下的 S 参数值,测量3次,并取其平均值作为测试结果。在低容积密度值基础上,通过振动和加压的方式改变容器内小麦样品的质量,从而改变容积密度值,得到高容积密度值的小麦样品。按照上述测量步骤对各含水率等级下高容积密度值的样品进行测试,最终测量得到84组试验样品的 S 参数值,根据试验中参数的变化,试验样品的质量范围为550~610 g。最后由式(9)~(13)计算得到复相对介电常数。复相对介电常数可表示为 $\varepsilon_r = \varepsilon' + j\varepsilon''$,其中 ε' 为相对介电常数, ε'' 为介电损耗因数。本文研究分析相对介电常数的影响机理,故取复相对介电常数的实部 ε' 进行分析。

2.3 数 据 分 析 与 处 理 方 法

2.3.1 支 持 向 量 机

支持向量机(Support vector machine, SVM)^[13]是一种基于风险最小化思想的机器学习算法,通过寻求结构化风险最小来提高学习机泛化能力。SVM可以有效地克服经典神经网络模型中模型复杂、计算速度慢、易过拟合等缺点,从而提高模型的精度,并且能较好地解决小样本、非线性等实际问题。

2.3.2 模 型 评 价

模型准确性用校正集相关系数 R_c 、校正集均方根误差、预测集相关系数 R_p 、预测集均方根误差表示。以剩余预测偏差(RPD)作为评价模型性能的指标。文献[14]指出当模型的RPD小于1.5时,则该模型不能进行预测;当RPD在1.5~2.0时,模型仅能给出预测值的大小情况;当RPD在2.0~2.5时,模型可用于粗略预测;当RPD大于2.5时,模型具有较好的预测准确性^[15]。

3 结 果 与 分 析

3.1 频 率

图3为不同温度、低容积密度下频率对含水率为12.37%和13.45%的小麦相对介电常数的影响规律曲线。由图3可知,在1~4 GHz频段内,两个含水率下小麦的相对介电常数均随着测量频率的增大而减小。频率越低,小麦的相对介电常数减小越快。在频率不变的情况下,温度越高,小麦的相对介电常数越大。在所测试的频段内,温度对小麦相对介电常数随频率的变化规律没有影响。相对介电常数的变化规律主要是由非均匀混合物中的偶极子、电子和原子的极化和Maxwell-Wagner效应造成

的^[16-17]。当频率不断增大时,偶极子的振动速度将滞后于电场的变化,当频率增大到一定程度时,偶极

子的取向极化便停止。于是,随着测量信号频率的增大,相对介电常数呈减小趋势。

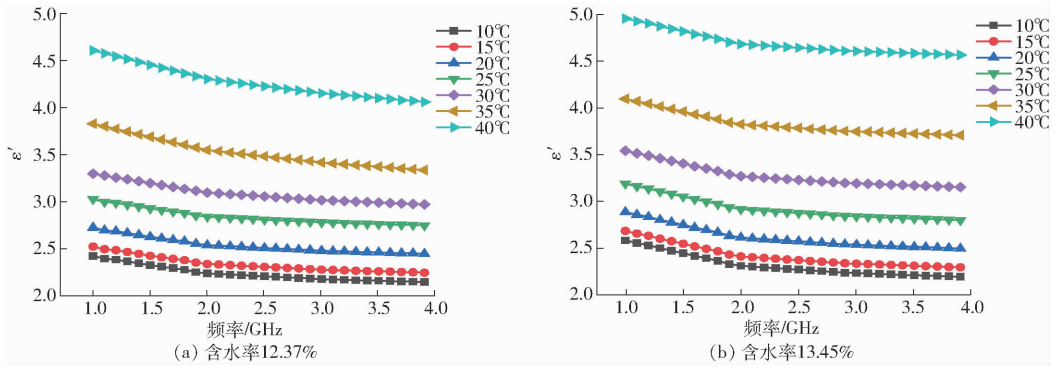


图 3 不同温度下频率对小麦相对介电常数的影响曲线

Fig. 3 Effects of frequency on relative dielectric constant of wheat at different temperatures

3.2 含水率

图 4 为低容积密度时,不同温度下频率为 2 GHz 和 3 GHz 的小麦相对介电常数随含水率的变化规律曲线。由图 4 可知,在两个频点下,小麦相对介电常数均随含水率的增大而不断增大。同一含水率下,温度越高,小麦的相对介电常数越大,各温度间相对介电常数差值随含水率的增大而增大。水的相对介电常数为 81,水作为一种强极性的分子,具

有很强的电偶极矩,因此水是影响小麦介电特性的主要因素^[18-20]。当小麦的含水率较低时,内部的水分为结合水,细胞处于休眠状态,在此状态下细胞内的离子运动并不活跃,因此水分对相对介电常数的影响并不显著。随着含水率的增大,自由水含水率增大,细胞由于吸水其内部的原生质溶解,细胞体积膨胀,导致整体代谢加速并且内部离子运动随之加快,此时小麦的相对介电常数表现出增大的趋势。

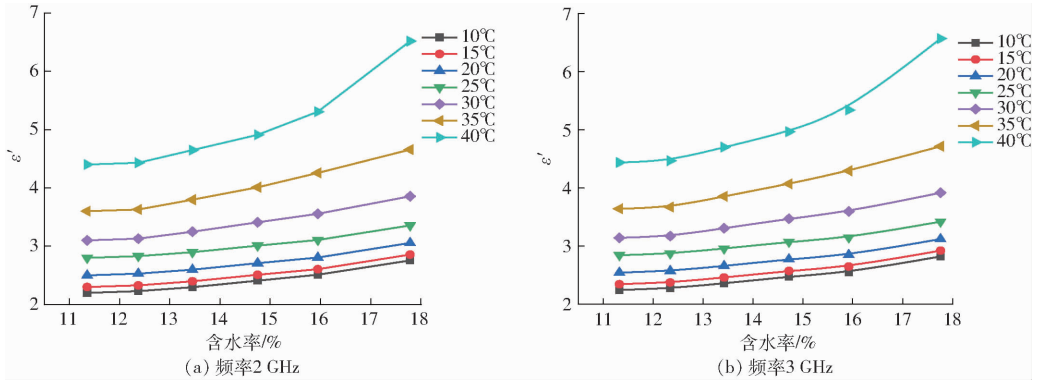


图 4 不同温度下含水率对小麦相对介电常数的影响曲线

Fig. 4 Effects of moisture content on relative dielectric constant of wheat at different temperatures

3.3 温度

图 5 为不同含水率、低容积密度,1 GHz 和 2 GHz 下温度对小麦相对介电常数影响规律曲线。

由图 5 可知,相对介电常数随着温度的增大而增大,在样品测量范围内,含水率没有改变小麦相对介电常数随温度增大而不断增大的变化规律。介电常数

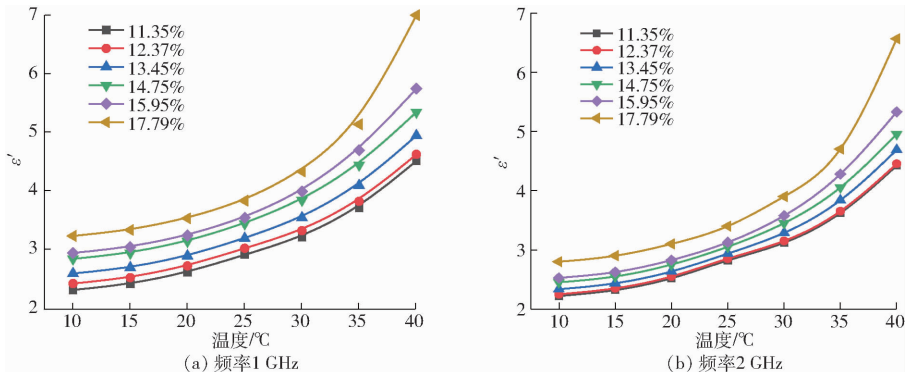


图 5 不同含水率下温度对小麦相对介电常数的影响曲线

Fig. 5 Effects of temperature on relative dielectric constant of wheat at different moisture contents

反映静电场下分子极化和布朗运动间的动态平衡^[21]。温度升高有利于极性分子的取向,导致单位体积内极性分子数增加,温度升高加速了物料内自由水的布朗运动,最终使小麦相对介电常数增大。

3.4 容积密度

图6为25℃时,不同含水率下容积密度对频率

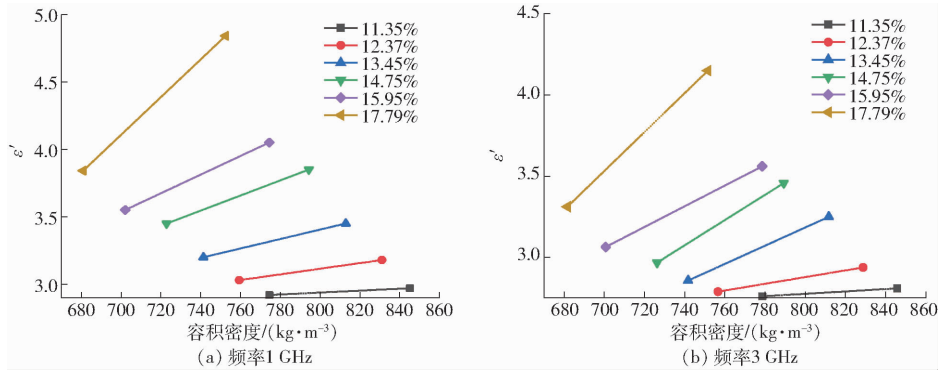


图6 不同含水率下容积密度对小麦相对介电常数的影响曲线

Fig. 6 Effects of bulk density on relative dielectric constant of wheat at different moisture contents

4 含水率模型建立与验证

4.1 样本划分

经过样品配制后,每组含水率下得到14份样品,在6组含水率下总计共得到84份样品,在每组含水率下随机选取4份作为预测集,共得到24份预测集,其余60份作为校正集。

4.2 SVM建模结果

由前期试验可知,小麦的相对介电常数、温度、容积密度和频率与其含水率之间具有相关性,因此为了提高实际应用时含水率测量结果的准确性和可靠性,利用SVM模型分别对单频、多频和全频下的样品进行建模,并用预测集对模型进行检验。试验结果显示,所测量的30个频点中,3.8 GHz测量的小麦相对介电常数熵值最大,1.2、2.1、2.9 GHz测量的小麦相对介电常数熵值较大,故选用以上4个频点作为单频下建模的信号频率,选用3.6~4 GHz作为多频建模下的信号频率。建模后的模型参数如表1所示。在单频条件中,3.8 GHz对应的 R_c 和 R_p 分别为0.967 8和0.978 1,校正集均方根误差和预测集均方根误差分别为0.248 9%和0.314 5%,RPD为6.98,建模预测效果良好;在多频条件中,3.6~4 GHz下, R_c 和 R_p 分别为0.976 9和0.983 0,校正集均方根误差和预测集均方根误差分别为0.196 5%和0.131 0%,RPD为10.89,建模预测效果极佳;全频下 R_c 和 R_p 分别为0.994 8和0.992 9,校正集均方根误差和预测集均方根误差分别为0.048 7%和0.051 3%,RPD为18.67,建模预测效

在1 GHz和3 GHz时小麦相对介电常数的影响曲线。由图6可知,随着容积密度的增大,小麦样品的相对介电常数整体上呈现单调递增趋势,并且含水率越高,其相对介电常数越大。容积密度增大,容器中的电介质数也相应增多,当出现外加电场时,电介质被极化,样品储存能量的能力变大,因此导致相对介电常数增大^[22]。

果较好;所以,基于SVM模型可以对小麦含水率进行预测,但其单频下的预测效果没有多频和全频的预测效果好,且频点越多,含水率预测模型的精度越高。

表1 SVM建模参数

Tab. 1 Modeling parameters of SVM

频率	R_c	校正集		预测集		
		均方根 误差/%	R_p	均方根 误差/%	RPD	
单频	1.2 GHz	0.963 2	0.253 9	0.973 7	0.322 3	6.87
	2.1 GHz	0.962 3	0.251 2	0.972 0	0.314 5	6.65
	2.9 GHz	0.957 9	0.284 5	0.968 7	0.354 6	5.98
	3.8 GHz	0.967 8	0.248 9	0.978 1	0.314 5	6.98
多频	0.976 9	0.196 5	0.983 0	0.131 0	10.89	
全频	0.994 8	0.048 7	0.992 9	0.051 3	18.67	

4.3 模型的验证

为了对上述所建模型的准确性及适用性进行评估,本文进行了模型验证试验。在含水率11.35%~17.79%范围内,随机配制了10组不同含水率的小麦样品,并分别测量样品的相对介电常数。将这10组样品的测量结果作为预测集代入上述模型中进行定量预测。含水率预测值和以干燥法测量的含水率实测值曲线如图7所示,决定系数 $R^2=0.996 8$,说明利用小麦的相对介电常数测量其含水率的方法具有较高的准确性。

5 结论

(1)在测量频率1~4 GHz下,小麦的相对介电

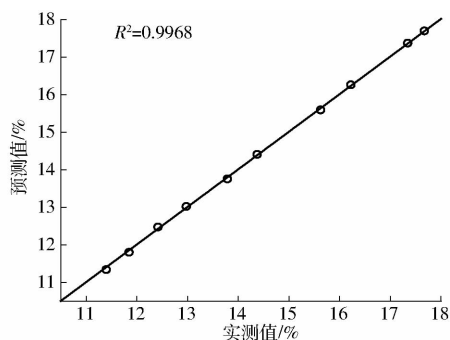


图 7 含水率实测值与预测值的比较

Fig. 7 Comparison between measured and predicted moisture contents

常数随频率的增大而减小;小麦相对介电常数随含水率、温度和容积密度的增大而增大。

(2)经样本划分后,SVM模型的预测结果为:单频条件下,3.8 GHz 的相关系数最佳,模型的 R_c 和 R_p 分别为 0.967 8 和 0.978 1;在多频条件中,3.6 ~ 4 GHz 下,模型的 R_c 和 R_p 分别为 0.976 9 和 0.983 0;在全频条件下,模型的 R_c 和 R_p 分别为 0.994 8 和 0.992 9。试验结果表明,SVM 模型可用于对小麦含水率进行预测。

(3)单频下的预测效果没有多频和全频的预测效果好,且频点越多,含水率预测模型的精度越高。

参 考 文 献

- [1] 王一杰,辛岭,胡志全,等.我国小麦生产、消费和贸易的现状分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(5):36-45.
WANG Yijie, XIN Ling, HU Zhiqian, et al. Current situation of production, consumption and trade of wheat in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(5):36-45. (in Chinese)
- [2] 郭文川,王婧,刘驰.基于介电特性的薏米含水率检测方法[J/OL].农业机械学报,2012,43(3):113-117.
GUO Wenchuan, WANG Jing, LIU Chi. Predicating moisture content of pearl based on dielectric properties [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):113-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120322&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.022. (in Chinese)
- [3] 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/OL].农业机械学报,2016,47(4):257-264.
SUN Jun, ZHANG Guokun, MAO Hanping, et al. Non-destructive moisture content detection of corn leaves based on dielectric properties and regression algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):257-264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160434&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.034. (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] NELSON S O, TRABELSI S. Principles for microwave moisture and density measurement in grain and seed [J]. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, 2004, 39(2):107-117.
- [6] 刘志壮,朱湘萍,张文昭,等.介电法小麦含水率检测试验研究[J].传感技术学报,2017,30(12):1857-1861.
LIU Zhizhuang, ZHU Xiangping, ZHANG Wenzhao, et al. Wheat moisture content detection based on dielectric constant[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(12):1857-1861. (in Chinese)
- [7] TRABELSI S, NELSON S O. Free-space measurement of dielectric properties of cereal grain and oilseed at microwave frequencies [J]. Measurement Science & Technology, 2003, 14(5):589-600.
- [8] GUO W, TIWARI G, TANG J, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2):217-224.
- [9] TRABELSI S, NELSON S O, LEWIS M A. Microwave nondestructive sensing of moisture content in shelled peanuts independent of bulk density and with temperature compensation[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2009, 3(2):114-121.
- [10] HASHIMOTO O, SATO A, HANAZAWA M, et al. A study on measurement of dielectric constant by free space transmission method at C band[J]. Electronics & Communications in Japan, 2004, 87(10):18-25.
- [11] 张云祥,赵志钦,史维光.自由空间法分析介质蜂窝等效复介电常数[J].电讯技术,2013,53(11):1518-1522.
ZHANG Yunxiang, ZHAO Zhiqin, SHI Weiguang. Analysis of dielectric honeycombs effective complex permittivity using free space method[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(11):1518-1522. (in Chinese)
- [12] ASAE. ASAE standards 2005: standards engineering practices data [S]. ASAE, 2005.
- [13] 王小燕,王锡昌,刘源,等.基于SVM算法的近红外光谱技术在鱼糜水分和蛋白质检测中的应用[J].光谱学与光谱分析,2012,32(9):2418-2421.
WANG Xiaoyan, WANG Xichang, LIU Yuan, et al. Application of near infrared spectroscopy technique based on support vector machine in the measurement of moisture and protein contents in surimi[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(9):2418-2421. (in Chinese)
- [14] NICOLAI B M, DEFRAEVE T, De KETELAERE B, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2014, 5(1):285-312.

- resistance based on Wismer-Luth model[J/OL]. *Neural Computing and Applications*, 2019. <http://doi.org/10.1007/s00521-019-04012-3>.
- [25] TAGHAVIFAR H, MARDANI A, KARIM-MASLAK H, et al. Artificial neural network estimation of wheel rolling resistance in clay loam soil[J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(8): 3544 – 3551.
- [26] GENT A N, WALTER J D. The pneumatic tire [M]. Washington D. C.: U. S. Department of Transportation, 2006.
- [27] PACEJKA H B. Tire and vehicle dynamics[M]. Butterworth-Heinemann; Elsevier, 2012.
- [28] YAM L, SHANG J, GUAN D, et al. Study on tyre rolling resistance using experimental modal analysis[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2002, 30(3): 251 – 262.
- [29] YAM L, GUAN D, ZHANG A. Three-dimensional mode shapes of a tire using experimental modal analysis[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4): 369 – 375.
- [30] GUAN D, YAM L, MIGNOLET M, et al. Experimental modal analysis of tires[J]. *Experimental Techniques*, 2000, 24(6): 39 – 45.
- [31] 刘任先. 拖拉机轮胎刚度和阻尼特性研究[J]. *农业机械学报*, 1988, 19(2): 17 – 24.
LIU Renxian. Study of tractor tire stiffness and damping characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1988, 19(2): 17 – 24. (in Chinese)
- [32] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [33] THOMSON W T. Theory of vibration with applications [M]. London: Taylor & Francis, 2010.
- [34] 王慧, 刘正士. 一种识别结构模态阻尼比的方法[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6): 201 – 202, 169.
LIU Hui, LIU Zhengshi. A method of identifying structural modal damping ratio[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6): 201 – 202, 169. (in Chinese)
- [35] 毛海彪. 基于 PVDF 压电薄膜胎内传感器的有限元纵滑仿真及压电解算[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
MAO Haibiao. Simulation and modeling of the in-tire sensor under longitudinal slip with PVDF film[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [36] 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 167 – 171.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 167 – 171. (in Chinese)

(上接第 343 页)

- [15] 郭文川, 林碧莹. 牛奶含水率介电谱结合化学计量学检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 249 – 255.
GUO Wenchuan, LIN Biying. Detecting moisture content of cow's milk using dielectric spectra and chemometrics[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 249 – 255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160935&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.035. (in Chinese)
- [16] GUO W, TRABELSI S, NELSON S O, et al. Storage effects on dielectric properties of eggs from 10 to 1 800 MHz[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(5): 335 – 340.
- [17] 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/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)
- [18] GUO W, ZHU X, LIU Y, et al. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(2): 275 – 281.
- [19] CHUA H S, PARKINSON G, HAIGH A D, et al. A method of determining the moisture content of bulk wheat grain [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(4): 1155 – 1158.
- [20] 郭文川, 康飞, 朱新华. 频率、温度和 大豆蛋白对牛乳介电特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 274 – 278.
GUO Wenchuan, KANG Fei, ZHU Xinhua. Influence of frequency, temperature and soy protein on dielectric properties of raw milk[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 274 – 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151036&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.036. (in Chinese)
- [21] 郭文川, 吕俊峰, 谷洪超. 微波频率和温度对食用植物油介电特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8): 124 – 129.
GUO Wenchuan, LÜ Junfeng, GU Hongchao. Effect of frequency and temperature on microwave dielectric properties of edible vegetable oils[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 124 – 129. (in Chinese)
- [22] NELSON S O. Density-permittivity relationships for powdered and granular materials [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(5): 2033 – 2040.