

基于介电特性的联合收获机小麦含水率检测装置研究

安晓飞¹ 代均益^{1,2} 罗长海¹ 孟志军¹ 李立伟¹ 张安琪¹

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

摘要: 谷物水分的快速测量对谷物准确测产、粮食快速收储、精准农业实施具有重要意义。针对联合收获机动态作业条件下小麦水分检测稳定性差、测量精度低等问题,基于小麦介电特性原理,设计一种联合收获机水分在线检测装置,提出一种动态连续取样、静态间歇测量的新方法,实现了联合收获机作业条件下,在线快速稳定检测小麦含水率。在线检测装置由机械动态取样部分、电机控制模块、传感器模块、数据采集模块、卫星定位模块和显示终端组成。其中传感器模块包括水分传感器、温度传感器和料位传感器。开展了静态验证试验和田间动态验证试验。试验结果表明,静态条件下,含水率在线检测误差在3%以内;在田间动态变化条件下,建立了基于介电常数和温度因子的水分检测模型,实测值和检测值相关系数达到0.92,在线检测误差小于5%。采用动态连续采样、静态间歇测量的方法显著提高了含水率在线检测的精度,为实现小麦精准生产提供了一种快速测量手段。

关键词: 小麦含水率; 动态取样; 联合收获机; 介电特性

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0185-06

Development of Grain Moisture Detection Device on Combine Harvester Based on Dielectric Property

AN Xiaofei¹ DAI Junyi^{1,2} LUO Changhai¹ MENG Zhijun¹ LI Liwei¹ ZHANG Anqi¹

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: It is important to detect grain moisture content for grain yield monitor, grain accurate possession and precision agriculture. It limits the accuracy and stability of grain moisture on-line detection for the dynamic condition of combine harvester. A grain moisture on-line detection device on combine harvester was developed based on the principle of dielectric property. The dynamic constant volume sampling mechanism was proposed. With the help of the sampling mechanism, a method of dynamic continuous sampling and static interval measurement was also proposed. It could detect grain moisture on the operation condition of combine harvester. The device consisted of mechanical dynamic sampling part, motor control module, sensor module, data acquisition module, GPS module and a display terminal. Sensor module included moisture sensor, temperature sensor and grain height level sensor. In June 2020, experiments were carried out at Beijing Xiaotangshan National Demonstration Station of Precision Agriculture. Experimental results showed that under the static condition, grain moisture on-line detection error was within 3%. Grain moisture detection model was established integrated of permittivity and grain temperature. The dynamic experiment showed that the correlation coefficient between the predicted grain moisture value and that of standard value was 0.92. The relevant error was less than 5%. It could satisfy the practice need.

Key words: grain moisture; dynamic sampling; combine harvester; dielectric property

收稿日期: 2022-06-10 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 科技创新重大项目(2021ZD0110902)、北京市农林科学院创新能力建设项目(KJCX20210433)和北京市农林科学院青年基金项目(QNJ202103)

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研究,E-mail: anxf@nrcita.org.cn

通信作者: 李立伟(1989—),男,高级工程师,主要从事农机智能装备研究,E-mail: lilw@nrcita.org.cn

0 引言

谷物含水率是谷物产量测量、粮食交易、粮食收储过程中非常重要的一个指标^[1-4],准确快速获取含水率对小麦生产全环节都非常重要。目前,谷物含水率测量方法主要包括直接法和间接法,其中直接法包括电烘箱法、快速失重法、红外加热法、微波加热法、蒸馏法、卡尔·费休法、溶液混合法;间接方法包括电解法、电阻法、介电法(电容式、同轴探头法、传输线法)、近红外光谱法、微波法、中子法等^[4-13]。直接法测量准确,但检测时间长;间接法是通过检测含水率相关的物理量,建立模型,进而实现谷物含水率快速检测。

基于间接方法,国内外研究人员开展了大量研究^[14-25]。张越等^[14]设计了一种便于应用在玉米籽粒收获机上的基于谷物介电特性的同心圆平面电容水分在线测量仪,介电常数受到温度影响较大,利用SVM建立了玉米含水率回归预测模型,台架试验表明,在-15~40℃,含水率14%~30%范围内,水分测量仪平均相对误差为1.09%,测量时间小于2.3 s。李泽峰等^[15]设计了一种平板电容式含水率在线检测装置用于联合收获机谷物水分在线检测,但检测周期为17 s,时间较长。陈进等^[16]选取10 MHz的高频信号为监测装置激励信号,设计了高频电容式谷物含水率在线监测装置,该装置能对谷物含水率进行在线监测、实时显示以及存储。结果表明,室内静态监测试验最大相对误差为1.57%,田间在线监测试验最大相对误差为2.07%。麦智炜等^[17]基于非接触式平行极板浮地电容测量原理,设计了一种适用于连续式干燥机恶劣环境的电容式粮食水分检测装置,结合静态批次测量法和无线通信技术,实现传感器与计算机客户端的实时数据传输,克服了干燥现场恶劣工况对数据信号传输的影响,适用于干燥机干燥过程中的谷物含水率在线实时检测。试验结果显示,玉米含水率范围在14%~21%动态变化的条件下,在线检测结果与国标规定的烘箱法测量相比,偏差小于±0.4%。孙耀强^[18]针对粮食干燥过程中含水率在线准确检测的问题,依据粮食含水率与电容式传感器之间的相关特性,开发了一套电容式含水率在线检测系统,在试验平台上进行了测试验证。廉飞宇等^[19]研究了一种利用甚高频电磁波快速检测大型粮堆内部水分的方法,利用电磁波在粮堆中不同深度的反射和折射原理,获取粮堆表层介电常数,利用表层介电常数,根据菲涅尔公式,反演出粮堆其他层介电常数分布。根据介电-水分经验模型,将粮堆各层的介电常数分布转换为水分

分布,误差小于3%。上述水分检测装置均受到温度、容重的影响,且在收获机作业过程中还受到收获机振动、谷物流动等因素的影响,严重影响了水分检测精度和测量稳定性。

本文基于介电特性设计联合收获机小麦含水率在线检测装置,提出一种动态连续取样、静态间歇测量的新方法,消除谷物温度、谷物流动对装置的影响,建立含水率与介电常数、温度的数学模型,并对模型进行田间验证,实现联合收获机小麦含水率的快速检测。

1 试验材料与方法

1.1 小麦联合收获机水分在线检测装置设计

1.1.1 总体结构设计

针对联合收获机动态条件下小麦含水率在线检测难、稳定性差的问题,基于介电特性,设计了一种联合收获机小麦含水率在线检测装置,提出了一种动态连续取样、静态间歇测量的新方法,实现了小麦含水率的在线快速稳定检测。水分在线检测装置由机械取样部分、电机控制模块、传感器单元、数据采集模块、卫星定位模块和显示终端组成。联合收获机小麦含水率在线检测装置安装在升运器出口口位置,当联合收获机开始作业时,直流电机以匀速带动排粮轴转动,将落入集粮盒中的谷物排出,当检测中断发生时,电机停止转动,当料位传感器显示集粮盒满粮时,水分传感器和温度传感器开始采集数据,STM32F103单片机对数据进行处理,并通过RS485通信方式进行通信。传输完成后,电机开始转动,排空集粮盒中粮食,等待下一次采样,采用动态连续采样,静态间歇测量的方法可提高水分在线检测过程中的稳定状态,进而提高检测精度和稳定性。图1为联合收获机谷物含水率在线检测装置总体结构图。图2为联合收获机谷物含水率在线检测装置原理图。

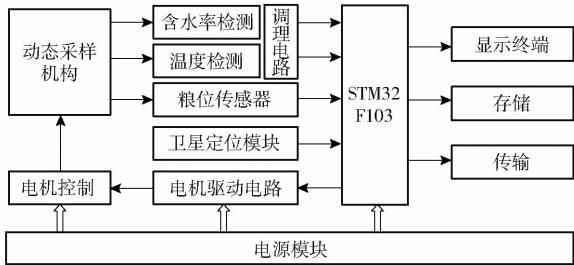


图1 联合收获机谷物含水率在线检测装置总体结构图

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

1.1.2 含水率在线检测装置动态连续取样机构设计

为了保证联合收获机作业过程中,小麦含水率

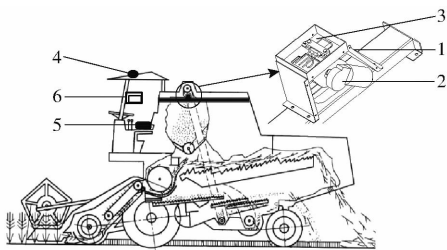
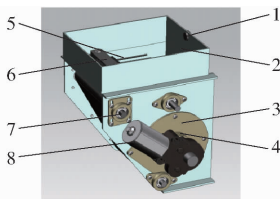


图2 谷物含水率在线检测装置原理图

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

1. 机械取样部分 2. 电机控制模块 3. 传感器单元 4. 卫星定位模块 5. 数据采集模块 6. 显示终端

检测能够稳定测量,设计了一种动态连续取样机构,安装于联合收获机升运器出粮口位置。该机构主要由集粮盒、排粮轴、排粮电机、调速器、传感器固定支架、传动张紧轮和电机固定支架组成,三维结构图如图 3a 所示。集粮盒尺寸为 80 mm × 53 mm × 75 mm,排粮轴采用外槽轮结构,排粮电机选择 XD-3420-2 型直流电机(广东信达电机有限公司),供电电压 12 V,功率 60 W,电机速度正反可调,调速范围 0 ~ 100 r/min。



(a) 三维图



(b) 实物图

图3 含水率在线检测装置动态采样机构结构

Fig.3 Dynamic sampling part of grain moisture on-line detection device

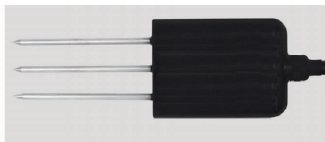
1. 粮位电容传感器 2. 集粮盒 3. 电机支架 4. 排粮轴 5. 含水率温度传感器 6. 传感器固定部件 7. 传动张紧轮 8. 排粮电机

该机构可以通过调节电机转速控制集粮盒中谷物排出速度,实现在联合收获机作业条件下谷物连续动态取样。在该机构中安装水分传感器、温度传感器和料位电容传感器。当小麦从升运器掉落时,落入集粮盒中,覆盖上方水分和温度传感器,料位传感器显示为充满状态,当电机停止转动时,数据采集器进行水分值采样、滤波和传输;数据传输完成后,排粮电机将本批次粮食从下方排出至粮仓,等待下一次采样测量。图 3b 为水分在线检测装置动态采样机构安装实物图。

1.1.3 传感器单元设计

含水率在线检测装置传感器单元包括水分传感

器、温度传感器和料位传感器,水分传感器利用电磁脉冲原理,根据电磁波在介质中传播频率来测量谷物的介电常数,从而得到谷物含水率,传感器供电电压 9 ~ 12 V,静态检测精度 1.0%,响应时间 1 s,与采集器通过 RS485 通信;采用温度传感器(PT100,温度测量范围 -50 ~ 100℃,误差 0.15%)测量谷物检测温度,对谷物水分测量进行补偿;料位传感器安装于集粮盒上方侧壁,感知集粮盒中是否充满粮食,采用电容传感器,检测距离 0 ~ 5 mm,5 V 供电。核心处理芯片选择 STM32F103 核心处理器,3 路传感器信号输入至 STM32F103 芯片,对数据进行均值滤波,与显示终端通过 RS485 通信。水分温度传感器以及料位电容传感器选型如图 4 所示。



(a) 水分和温度传感器



(b) 料位电容传感器

图4 传感器选型

Fig.4 Sensor module

1.1.4 含水率在线检测装置数据采集处理软件设计

上位机采用 VMC1000 终端,基于 VS2010 开发平台,采用模块化设计思想,包括参数设置模块、数据采集模块、数据处理模块和数据保存模块,主要实现传感器数据采集、显示和存储功能。系统采样频率 1 Hz,可以显示谷物含水率、温度、定位信息等。主控制器与上位机采用 RS485 通信方式,波特率 9 600 b/s,数据位 8 位,无奇偶校验位,停止位 1 位。图 5 为所配套的上位机数据采集软件。

1.1.5 谷物含水率静态间歇测量算法设计

考虑到联合收获机作业条件下,谷物一直处于流动状态,谷物介电特性无法保证持续稳定测量,本文设计一种动态连续采样的机构,保证在非检测状态时,谷物连续排出,在检测状态时,排粮电机停止转动,且粮位传感器显示集粮盒中充满谷物,系统开始稳定采样 3 次,考虑到收获机的振动影响,将数据经均值滤波后传输至主控制器。含水率在线检测装置初始设计为 8 s 作为一个动态采样周期,其中电机匀速转动 5 s,静态稳定时间为 3 s。图 6 为谷物水分静态间歇测量算法流程图。

1.2 评价方法

为了实现联合收获机小麦含水率在线检测,需



(a) 设置参数界面



(b) 数据采集主界面

图 5 上位机数据采集软件

Fig. 5 Data acquisition software

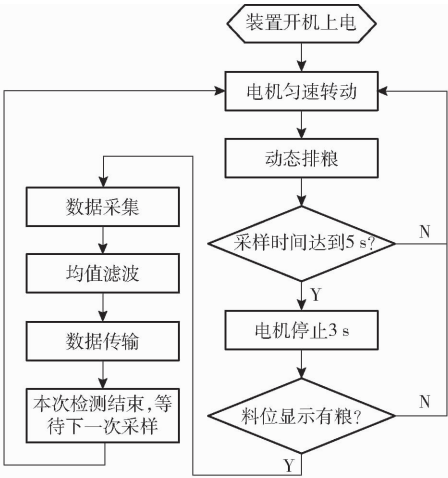


图 6 算法流程图

Fig. 6 Static interval telematic algorithm flow chart

要针对不同电机转速对含水率检测精度的影响、不同温度对介电常数的影响和田间谷物含水率检测精度进行验证。评价指标为相对误差。

2 结果与讨论

2.1 不同因素对含水率在线检测装置的影响

2.1.1 转速对谷物含水率检测装置的影响

室温 26.8℃ 下,5 种转速下,将含水率检测装置测量结果与 LDS-1G 型标准含水率测量仪(上海青浦绿洲检测仪器有限公司,静态测量误差小于 0.5%)结果进行对比。

试验结果如表 1 所示,电机停止转动条件下测量结果与含水率仪检测误差仅为 2.9%,其他 4 种转速条件下检测误差分别为 5.8%、8.6%、9.9%、13.0%,排粮电机转速越大,含水率检测误差越大,说明谷物流动对含水率的检测影响很大。原因为谷物流动影响了在集粮盒中粮食之间的间隙程度,进

表 1 不同转速水分检测结果(室温 26.8℃)

Tab.1 Grain moisture detection result at different motor speeds (26.8℃)

排粮电机 转速/ (r·min ⁻¹)	第 1 次 测量/ %	第 2 次 测量/ %	第 3 次 测量/ %	平均 值/ %	水分仪 测量 值/%	相对 误差/ %
0	6.8	6.9	7.0	6.9	7.0	2.9
18	6.5	6.3	6.6	6.5	6.9	5.8
25	6.2	6.4	6.7	6.4	7.0	8.6
38	6.6	6.4	6.1	6.4	7.1	9.9
41	5.8	5.9	6.2	6.0	6.9	13.0

而影响了谷物容重,最终影响测量结果。

本文设计一种动态采样机构,提出了动态采样、静态测量的方法,排粮电机匀速转动 5 s,然后保持静止 3 s,水分检测装置在排粮轴 3 s 静止状态时进行测量,保证了谷物在检测过程中处于静止状态,消除了谷物流动对水分检测的影响。

从表 1 可以看出,转速为 18 r/min,测量相对误差为 5.8%,效果最优,因此在田间试验过程中,水分在线检测装置排粮电机转速设置为 2 挡 18 r/min。

2.1.2 温度对谷物介电常数的影响

本文开展温度 25 ~ 40℃ 对谷物介电常数的影响试验。通过恒温加热箱设置不同温度,获得同一含水率条件下,不同温度的谷物样本,分别通过含水率在线检测装置进行检测,图 7 为不同温度条件对谷物介电常数的影响。从图 7 可以看出,在小麦含水率 7.5% 时,随着温度 25 ~ 40℃ 逐步升高,介电常数线性关系逐渐升高,介电常数从 2.9 升高到 3.8,变化范围超过 30%,与文献[10-11]中的变化规律一致。因此在含水率检测建模时,需将温度因素作为一个自变量因子,对模型进行温度补偿。

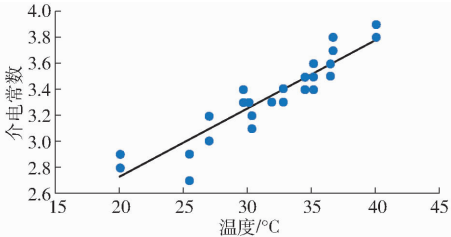


图 7 不同温度条件对谷物介电常数的影响
(小麦含水率 7.5%)

Fig. 7 Permittivity result at different temperatures
(grain moisture 7.5%)

2.2 含水率在线检测装置动态检测试验

2020 年 6 月 17 日,在北京小汤山国家精准农业研究示范基地进行试验(图 8),温度 35.0℃,小麦品种为京冬 22 号,搭载含水率在线检测装置的中联谷王 TB60 型联合收获机作业幅宽 2.36 m,喂入量 4 kg/s,单车测量后采用 LDS-1G 型含水率检测

仪,检测 3 次取平均值。



图 8 联合收获机田间实际收割

Fig. 8 Field experiment

以小麦介电常数、温度作为自变量,以含水率作为因变量,含水率为 8% ~ 13% 时建立线性水分检测模型

$$y_i = 3.25m_i - 0.29t_i + 6.10 \quad (1)$$

式中 y_i ——谷物含水率, %

m_i ——谷物介电常数

t_i ——谷物温度, °C

显著水平 0.05 条件下,模型通过了 F 检验和 t 检验, F 检验值 78.51,模型总体显著。

以 20 个联合收获机含水率检测样本对模型验证,误差如图 9 所示。在考虑温度对模型的影响下,含水率在线检测装置检测结果和 LDS-1G 型水分仪实测值相关系数达到 0.92,相对误差为 -4.95% ~ 4.99%,最大不超过 5%,满足田间测量需要。

该装置通过设计动态采样机构,实现了联合收获机作业过程中的水分在线准确测量,但在测量过

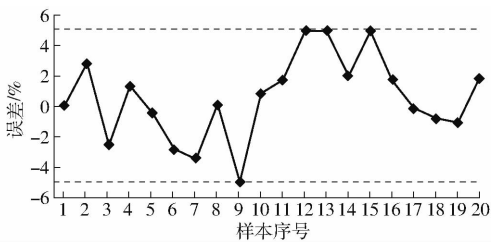


图 9 模型误差曲线

Fig. 9 Model validation error

程中,升运器仍然在连续输送谷物,会造成采样盒中谷物出现堆积,虽横向螺旋输送器会将多余部分输送至粮仓另外一端,但仍不可避免地会造成采样盒内谷物堆积发生变化,进而影响到测量精度。

3 结论

(1)设计了一种小麦联合收获机水分在线检测装置,提出了一种动态连续采样、静态间歇测量的谷物含水率在线检测方法,实现了在联合收获机作业条件下谷物含水率在线准确检测。

(2)考虑了谷物容重、谷物流动、温度对介电常数的影响,建立了含水率与介电常数、温度因素的数学模型,田间验证结果表明,含水率在线检测装置检测结果和 LDS-1G 型含水率检测仪实测值相关系数达到 0.92,相对误差最大不超过 5%,满足了田间测量需要。

参 考 文 献

[1] 郭文川,朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报,2009,25(2):308-312.
GUO Wenchuan, ZHU Xinhua. Foreign dielectric property measurement techniques and their applications in agricultural products and food materials[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 308-312. (in Chinese)

[2] 张亚秋,吴文福,王春燕,等. 粮食收购智能定等系统的研究[J]. 中国粮油学报,2007,22(1):118-121.
ZHANG Yaqiu, WU Wenfu, WANG Chunyan, et al. Developing a system of intelligent grain grading in grain purchase[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007, 22(1): 118-121. (in Chinese)

[3] 方建卿. 联合收割机谷物比例率在线测量技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.

[4] 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)

[5] CSIBA M, KOVACS A J, VIRAG I, et al. The most common errors of capacitance grain moisture sensors: effect of volume change during harvest[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(2): 215-223.

[6] KIM K B, LEE J W, LEE S S, et al. On-line measurement of grain moisture content using RF impedance[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(3): 861-867.

[7] LIU Xueqiang, CHEN Xiaoguang, WU Wenfu, et al. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm[J]. Food Control, 2007, 18(8): 928-933.

[8] KANDALA C V K, LEFFLER R G, NELSON S O, et al. Capacitive sensor for nondestructive measurement of moisture content in nuts and grain[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2007, 56(5): 1809-1813.

[9] 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.

[10] 郭文川,王婧,刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 113-117. (in Chinese)

[11] 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)

- [12] 赵希雷. 谷物水分测定方法比较与分析[D]. 郑州:河南工业大学,2015.
- [13] 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,2016.
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 陈进,王月红,练毅,等. 高频电容式联合收割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 CASE,2018,34(10):36-45. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 孙耀强. 电容式粮食水分在线检测仪的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
- [19] 廉飞宇,李青. 介电常数法检测大型粮堆水分分布的研究[J]. 计算机工程与应用,2012,48(35):19-24.
LIAN Feiyu,LI Qing. Study for detection of moisture-distribution of large grain pile using dielectric constant method[J]. Computer Engineering and Applications,2012,48(35):19-24. (in Chinese)
- [20] 方建军. 粮食水分在线测量的声学方法[J]. 北方工业大学学报,2000,12(1):57-60.
FANG Jianjun. Acoustic method for online measurement of moisture content in grains[J]. Journal of Northern University of Technology,2000,12(1):57-60. (in Chinese)
- [21] 丁英丽. 基于电容式传感器的粮食水分测量仪[J]. 传感器技术,2003,22(4):54-56.
DING Yingli. Grain's moisture teller based on capacitive sensor[J]. Journal of Transducer Technology,2003,22(4):54-56. (in Chinese)
- [22] 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 online moisture metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(3):56-59. (in Chinese)
- [23] 崔清亮,郭玉明,郑德聪. 冷冻干燥物料水分在线测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(4):91-96.
CUI Qingliang,GUO Yuming,ZHENG Decong. Design and test of on-line measurement system for the moisture content of the freeze-drying materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(4):91-96. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 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)