

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.024

基于平衡水分模型的稻谷含水率实时监测系统*

梁琨 沈明霞 路顺涛 刘志强 李小林

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 基于静力学谷物平衡水分模型,利用无线传感器网络及嵌入式技术设计了仓储中稻谷含水率实时监测系统。通过试验验证改进 Henderson、改进 Chung-Pfost 和改进 Owin 模型及对应参数的稻谷含水率预测误差和精度,结果表明改进 Chung-Pfost 模型具有准确预测的精度,且当参数 $A=363.06$ 、 $B=0.1804$ 、 $C=26.674$ 时该模型的预测精度较高。通过测试传感器节点的传输质量,表明系统能够实现数据稳定的传输。

关键词: 稻谷 含水率 实时监测系统 平衡水分模型 无线传感器网络

中图分类号: S237; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0125-06

Real-time Monitoring System for Grain Moisture Content Based on Equilibrium Moisture Model

Liang Kun Shen Mingxia Lu Shuntao Liu Zhiqiang Li Xiaolin

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: A real-time monitoring system for grain moisture content in grain storage was developed based on equilibrium moisture model, wireless sensor network and embedded technology. The error and precision which forecast by the equilibrium moisture model of modified Henderson, modified Chung-Pfost and modified Owin were verified in this experiment. The results showed that there was high precision in the modified Chung-Pfost model. Moreover, the prediction result was with higher accuracy when A was 363.06, B was 0.1804, and C was 26.674. It was indicated that the system was able to realize stable data transmission by testing the transmission quality of sensor nod. This study presented a new method for real-time monitoring rough moisture content in grain storage, which was important significance for ensuring grain safety in storage.

Key words: Grain Moisture content Real-time monitoring system Equilibrium moisture model
Wireless sensor network

引言

粮食储藏安全是粮食安全的一个重要部分,是保障社会经济持续发展和社会稳定的重要因素^[1-2]。稻谷含水率是影响其仓储安全的重要指标,也是评价粮食品质和选择加工工艺条件的主要因素。稻谷含水率过高,在收购、运输和贮藏等环节中就会出现变质、霉烂等问题,从而严重影响食用品质^[3-5]。因此,快速、准确、实时监测仓储稻谷的含

水率对保证粮食安全有重要意义。

目前,我国仓储粮情监测由于没有用于检测谷物水分的传感器,不能实现谷物含水率的实时监测,故主要集中在采集粮堆温度和湿度指标^[6-9]。虽然很多学者研究了电加热干燥法、红外干燥法、蒸馏法、微波法等检测谷物含水率的方法^[10-12],但这些方法仅局限于实验室检测,距离实现实时监测仓储谷物含水率尚有一段距离^[13]。静力学平衡水分理论被广泛应用于稻谷平衡水分的研究^[14-16],而平衡

收稿日期:2012-07-02 修回日期:2012-08-07

* 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:梁琨,博士生,主要从事检测技术研究,E-mail: lkbb2006@126.com

通讯作者:沈明霞,教授,博士生导师,主要从农产品检测和无线传感器网络研究,E-mail: mingxia@njau.edu.com

水分模型及监测粮堆内平衡状态的温度和相对湿度,为仓储中稻谷含水率实时监测提供了一种新的研究方法^[13,17-18]。本文采用稻谷静力学平衡水分模型,结合无线传感器网络技术及嵌入式开发系统,实现仓储稻谷含水率的实时、准确监测及自动采集传输。

1 稻谷平衡含水率

稻谷平衡含水率是指稻谷在一定温度和空气相对湿度环境中空气达到相对平衡时所具有的含水率。粮仓中的粮堆不是严格静态或孤立的系统^[19]。谷物籽粒和粮堆是具有生命生理作用的物质,空间水分子通过籽粒毛细管的呼吸作用进入谷物内部,籽粒毛细管内的水蒸气频繁与周围环境中的水蒸气进行交换达到平衡,随周围环境湿度变化而变化^[20]。由于密闭粮堆内空间的湿度主要由粮食含水率决定,粮食在入仓储藏一段时间后,在粮堆密闭、谷物呼吸机能和温度的共同作用下,密闭粮堆稻

谷含水率和湿度变化基本处于稳定的平衡状态,直至接近理论平衡含水率^[19]。因此准确检测粮堆温湿度可作为粮堆含水率的分析依据,以此间接地分析稻谷含水率的变化^[20]。

本文根据粮食吸湿平衡原理,利用传感器检测的粮堆温湿度和平衡水分模型预测谷物含水率,这种方法为粮仓内谷物含水率实时监测提供了一种有效的手段^[9,17]。根据美国 ASAE 标准^[21],本文选择改进 Henderson、改进 Chung - Pfof 和 改进 Oswin 平衡水分模型公式预测稻谷含水率,在标准中没有符合我国稻谷类型对应模型的参数,因此本文选择改进 Henderson 和 Chung - Pfof 模型的两组参数分别用于预测稻谷含水率。本研究选用稻谷为南京远望富硒有限公司储粮基地的普通粳稻,平衡水分的公式和相关参数如表 1 所示,式中 T 为温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; R 为相对湿度; A 、 B 、 C 为常数, M_{CD} 为平衡水分公式预测的干基含水率,为实际比值的 100 倍。

表 1 稻谷平衡水分模型及参数

Tab. 1 Equilibrium moisture model and parameters of rough rice

模型名称	方程式	参数		
		A	B	C
改进 Henderson 1	$M_{CD} = \left[\frac{-\ln(1-R)}{A(T+C)} \right]^{1/B}$	0.000 048 524	2.079 4	45.646
改进 Henderson 2	$M_{CD} = \left[\frac{-\ln(1-R)}{A(T+C)} \right]^{1/B}$	0.000 035 502	2.31	27.396
改进 Chung - Pfof 1	$M_{CD} = -\frac{1}{B} \ln \left(\frac{-(T+C) \ln R}{A} \right)$	363.06	0.180 4	26.674
改进 Chung - Pfof 2	$M_{CD} = -\frac{1}{B} \ln \left(\frac{-(T+C) \ln R}{A} \right)$	433.88	0.168 6	48.282
改进 Oswin	$M_{CD} = \frac{A+BT}{\left(\frac{1}{R} - 1 \right)^{1/C}}$	14.816	-0.087 27	2.836 8

2 基于无线传感器网络实时监测系统设计

2.1 需求分析及总体设计

为了实现准确、实时地采集粮仓内稻谷的含水率,采用无线传感器网络节点对粮堆中不同深度稻谷的温湿度进行检测,由采集终端采集并显示采集数据。利用无线传输方式将采集的数据发送至上位机服务器,根据平衡水分模型预测稻谷含水率,实现粮仓中稻谷含水率、温度、湿度的实时监测,本系统要求具有精确的稻谷含水率监测精度,并满足可靠性和实时性的需求。

根据系统的功能要求,设计系统硬件组成图,如图 1 所示。系统硬件主要由 ZigBee 无线传感器网络和 S3C6410 微处理器采集终端组成。温湿度传感器与分布在粮堆内各个监测点的 ZigBee 终端节

点连接,将采集到的粮堆内温湿度通过 ZigBee 模块即协调器发送给微处理器;微处理器显示数据,并将数据通过 GPRS 无线传输方法发送给上位机服务器。上位机服务器根据采集的温湿度数据和平衡水分公式,实时预测及显示仓储中稻谷的含水率,实现稻谷含水率的实时监测。

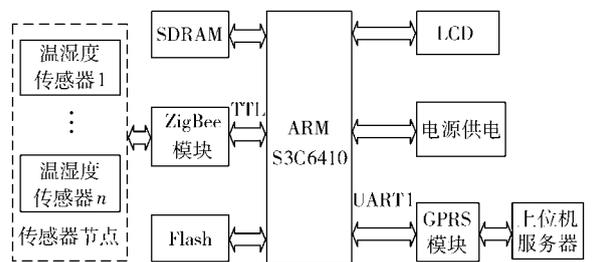


图 1 系统硬件结构图

Fig. 1 Diagram of system hardware architecture

2.2 传感器节点的设计

2.2.1 温湿度传感器

为了保证预测稻谷含水率的精度,需要精确测量粮堆内的温湿度,本系统采用瑞士 Sensirion 公司的 SHT75 型高精度温湿度复合传感器,采集分辨率温度为 14 位、湿度为 12 位,温度的量程为 -40 ~ 123.8℃,湿度量程为 0 ~ 100%。传感器引脚采用 I²C 与 ZigBee 终端节点连接,如图 2 所示,引脚 SCK 用于 ZigBee 节点芯片 CC2430 与 SHT75 同步通信,传感器电压为 3.3 V。

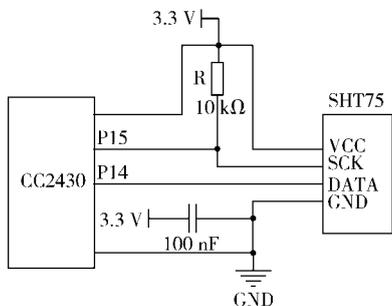


图 2 温湿度传感器与节点连接图

Fig.2 Diagram of system hardware architecture

温度传感器具有较好的线性,因此测量温度可以直接转换为实际温度,即

$$T = -39.6 + 0.01M \quad (1)$$

式中 M ——测量的温度,℃

T ——实际的温度,℃

实际的相对湿度计算公式为

$$R = \frac{-4 + 0.0405N - 2.8 \times 10^{-6}N^2}{100} \times 100\% \quad (2)$$

式中 N ——测量的相对湿度,%

R ——实际的相对湿度,%

相对湿度输出特性呈一定的非线性,因此需要对相对湿度进行补偿后得到最终的实际湿度^[22],即

$$R_r = R + \frac{(T - 25)(0.01 + 0.0008N)}{100} \times 100\% \quad (3)$$

式中 R_r ——温度补偿后的相对湿度,%

2.2.2 节点设计

考虑到粮仓内采集点数量大及长时间实时采集的特点,本系统选用 ZigBee 模块解决系统成本和功耗问题。ZigBee 终端节点选择 CC2430 芯片,支持 IEEE802.15.4 协议,最大数据传输速率 250 kbit/s,工作频段 2.4 GHz,3.3VDC 电源供电。节点电路由微处理器 CC2430、电源、调试电路、射频模块及传感器组成;协调器电路由微处理器 CC2430、电源、调试电路、射频模块组成,并且与 S3C6410 微处理器通过 TTL 串口相连(图 3)。终端节点 CC2430 周期性采集温湿度数据,通过无线射频发送给协调器,

ZigBee 协调器同样采用 CC2430 芯片,用于循环处理发送的数据,并将采集到的数据通过串口协议发送给 S3C6410 微处理器(图 4)。根据系统需要采集粮堆内平衡状态的要求,采集间隔设定 3 min,波特率为 19 200 bit/s,节点数据包格式为:“\$ AD < 节点标号 >, < 温度 >, < 湿度 >, END”。其中传感器节点标号为 2 个字节,标示网络地址;温湿度数据都是 4 个字节。

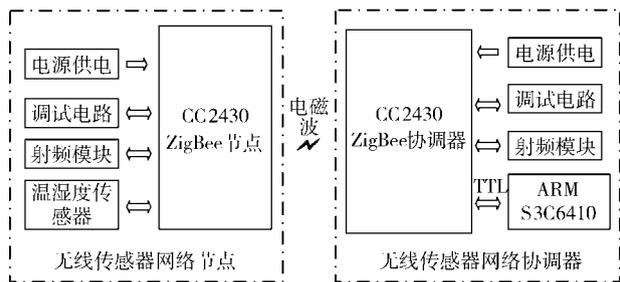


图 3 ZigBee 节点与协调器结构框图

Fig.3 Architecture of ZigBee sensor node and coordinator

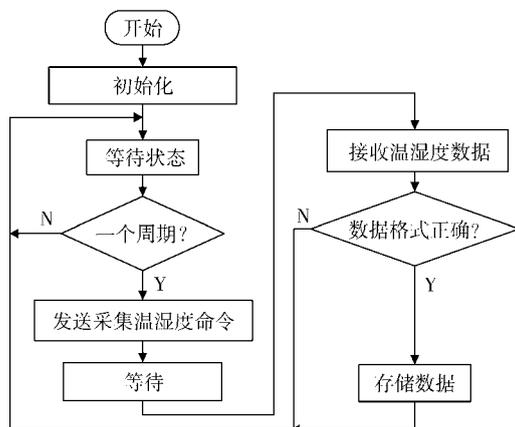


图 4 数据周期性采集流程图

Fig.4 Flow chart of periodic collection

2.3 采集终端的设计

本系统采集终端选用三星微处理器 S3C6410,采用 arm1176jzf 内核,其低功耗、高性能、成本低的特点适用于本系统采集终端在粮仓中长期稳定工作的需求,LCD 显示屏用于显示采集的数据。微处理器主要满足显示采集数据及通过 GPRS 无线传输方式传输到上位机,同时考虑到系统良好的移植性,系统以 Linux 和 Qt/Embedded 为基础,开发 GUI 人机交互界面,便于显示和操作。采用与 S3C6410 配套的 Q2403A 型 GPRS 模块实现无线传输,与处理器以串口方式连接,通信方式采用串口协议通信,以点对点连接方式传输。

3 系统试验

3.1 系统监测精度

本试验于 2012 年 5 月 26 日在南京市远望富硒

公司的储粮基地9-2号粮仓采集数据。粮仓稻谷样本于2011年10月储藏,品种为普通粳稻。试验前将SHT75型温湿度传感器节点埋于粮堆内表层10~80 cm深度,以采集不同深度的温湿度信息。试验时每个采集位置测量3次,每隔3 min采集一次数据,3次测量结果稳定不变,则认为该节点所测粮堆内处于平衡状态,记录采样点温湿度,并利用改进 Henderson、改进 Chung-Pfost 和改进 Oswin 平衡水分公式预测采样点含水率。同时采集该处稻谷样本约50 g,试样共采集13个样本点。根据我国粮食水分检测标准^[23],采用隧道式干燥箱法测量样本的标准含水率,选用上海东方衡器公司生产的HGZ-25型干燥法水分测定仪测定,测量前该仪器采用105℃恒重法校准。测定前将样本除去稻梗等杂质,并置于粉碎机(FSD-100A型)研磨粉碎,取每种样本10 g测量含水率。比较平衡水分方程预测值与干燥法水分测定仪测定的误差。

3.2 系统稳定性

为了测定系统工作稳定性,2012年8月4日在南京市远望富硒公司的储粮基地9-2号粮仓对本系统设计的无线传感器网络的传输质量进行试验。试验设计采用4个传感器节点汇集到一个网关;考虑到粮仓内长期监控的需求,每个节点采用有线电源供电。针对粮仓内需要的监测点密集程度,布置传感器节点位置(图5),传感器节点和网关距粮堆表面1 m高处,分别在距网关0.5、1、1.5、2 m处放

置传感器节点,温湿度传感器埋于距粮堆表面10~80 cm深度。采用E8000A-EDU型频谱分析仪测试无线传感器节点的信号强度;并测试4个传感器节点运行12 h的数据包传输率。

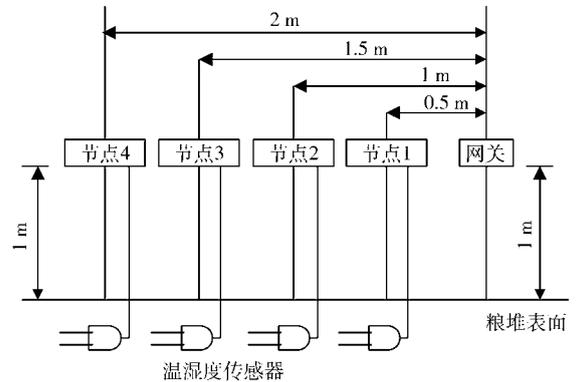


图5 传感器节点位置示意图

Fig.5 Sensor node location

3.3 试验结果及分析

表2为粮堆内13个采样点采集的温湿度数据,每个采样点的数据利用表1中平衡水分公式及相应的参数计算预测,得到本文方法测得的稻谷含水率。采用平衡水分公式预测的含水率为干基含水率 M_{CD} ,将 M_{CD} 转换为湿基含水率 M_{CW} ^[18],即

$$M_{CW} = 100M_{CD} / (100 + M_{CD}) \quad (4)$$

表3为采用各平衡水分模型预测的稻谷含水率 M_{CW} 及干燥法水分测定仪测量的稻谷含水率 M'_{CW} 结果。

表2 粮堆内样本点温湿度

Tab.2 Temperature and humidity data of samples in bulk grain

测量参数	样本序号												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
温度/℃	22.7	22.1	22.2	22.5	21.5	23.1	22.7	22.5	22.6	22.2	23.4	22.0	23.7
相对湿度/%	66.9	66.3	63.2	64.8	70.2	63.9	65.3	63.9	67.1	64.9	63.3	64.4	65.8

表3 平衡水分模型预测和干燥法水分测定仪测量的含水率

Tab.3 Moisture contents measured by equilibrium moisture model and drying method of moisture determination meter

样本序号	干燥法水分测定仪	模型预测值 M_{CW}				
	测量值 M'_{CW}	改进 Henderson 1	改进 Henderson 2	改进 Chung-Pfost 1	改进 Chung-Pfost 2	改进 Oswin
1	13.3	14.0	13.9	13.9	13.9	14.1
2	13.3	14.0	13.9	13.8	13.8	14.1
3	14.4	13.5	13.5	13.4	13.4	13.5
4	15.9	13.7	13.7	13.8	13.6	13.8
5	16.1	14.7	14.5	14.5	14.5	14.9
6	12.9	13.5	13.5	13.4	13.4	13.5
7	13.4	13.8	13.7	13.6	13.6	13.8
8	13.2	13.6	13.5	13.5	13.4	13.6
9	14.2	14.1	14.0	13.9	13.9	14.2
10	14.0	13.8	13.7	13.6	13.6	13.8
11	13.0	13.4	13.4	13.3	13.3	13.4
12	13.3	13.7	13.7	13.6	13.5	13.7
13	13.1	13.8	13.7	13.6	13.7	13.8

表 4 为采用本文方法预测的稻谷样本含水率与干燥法水分测定仪测量的标准值的偏差。在所测量 13 个样本中, 样本 3、4、5 的偏差绝对值在 1% ~ 2.3% 之间, 其余样本测量偏差均小于 0.8%, 样本 3、4、5 测量偏差较大的原因是由于粮堆内这 3 个采样的稻谷实际含水率比较高, 需要的平衡稳定时间较长, 平衡稳定时间越长时预测结果越接近真实值^[18]。比较 5 个模型及参数的预测误差结果, 在正偏差时改进 Henderson、Chung - Pfof 和 Oswin 公式预测的偏差偏小, 而在负偏差时改进 Henderson 公式预测值偏差偏小。为了进一步比较每个模型及对应参数的预测精度, 定义系统误差精度评价标准为

$$P = \sum_{i=1}^m \frac{|Y_i - X_i|}{m} \quad (4)$$

式中 Y_i ——采用本文方法测定的第 i 个样本湿基含水率

X_i ——采用干燥水分测定仪测定的第 i 个样本湿基含水率

m ——样本个数

采用本文提出的平衡水分公式及对应参数预测稻谷样本含水率的精度评价标准 P , 改进 Henderson 1 的误差精度评价标准 $P = 0.7000$; 改进 Henderson 2 的误差精度评价标准 $P = 0.6923$; 改进 Chung - Pfof 1 的误差精度评价标准 $P = 0.6615$; 改进 Chung - Pfof 2 的误差精度评价标准 $P = 0.6692$; 改进 Oswin 的误差精度评价标准 $P = 0.6846$ 。其中改进 Chung - Pfof 公式具有较好的预测精度, 当参数 $A = 363.06, B = 0.1804, C = 26.674$ 时, $P = 0.6615$, 预测模型精度较高。因此采用本文方法预测稻谷含水率时推荐的公式为改进 Chung - Pfof ($A = 363.06, B = 0.1804, C = 26.674$), 此时满足系统监测仓储稻谷含水率准确预测的需求。

表 4 平衡水分模型预测与干燥法水分测定仪测量的含水率误差

Tab. 4 Error between equilibrium moisture model and measured by drying method of moisture determination meter

样本序号	模型预测误差				
	改进 Henderson 1	改进 Henderson 2	改进 Chung - Pfof 1	改进 Chung - Pfof 2	改进 Oswin
1	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8
2	0.7	0.6	0.5	0.5	0.8
3	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9
4	-2.2	-2.2	-2.1	-2.3	-2.1
5	-1.4	-1.6	-1.6	-1.6	-1.2
6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6
7	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4
8	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4
9	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	0.0
10	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.2
11	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4
12	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4
13	0.7	0.6	0.5	0.6	0.7

表 5 为传感器系统传输质量, E8000A - EDU 型频谱分析仪的中心频率为 2.41 GHz, 扫描频宽为 50 MHz; 当节点与接收网关距离为零时信号强度为 25 dBm。4 个节点的信号强度从 -39 ~ -58 dBm, 信号强度随着传输距离的增加而降低, 但是数据包传输率均在 90% 以上, 该系统可以良好地运行, 实现稳定的数据传输。

表 5 传感器节点传输质量

Tab. 5 Transmission quality of sensor node

节点序号	信号强度/dBm	数据包传输率/%
1	-39	100
2	-46	100
3	-47	96
4	-58	100

4 结束语

提出利用稻谷平衡水分模型, 结合无线传感器网络技术实时监测仓储稻谷的含水率, 该方法可以实现对粮堆内稻谷温度、湿度、含水率的实时监测。设计了基于无线传感器网络及嵌入式系统的稻谷含水率采集及发送系统, 并通过试验验证, 采用本文提出的方法时, 改进 Chung - Pfof 平衡水分模型预测具有准确的精度, 参数 $A = 363.06, B = 0.1804, C = 26.674$ 时的精度评价标准 P 为 0.6615。其误差产生的原因主要与平衡水分模型的参数有关。经过传感器节点传输质量测试表明, 该系统可以在粮仓内长期稳定工作。

参 考 文 献

- 1 熊鹤鸣, 王晓清, 周天智, 等. 散装稻谷储藏品质变化规律的研究[J]. 粮食储藏, 2002, 31(3): 5~10.
- 2 陈德民, 张元, 李鹏. 传感器网络在粮食平房仓中的应用[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 69~73.
Chen Demin, Zhang Yuan, Li Peng, et al. Application of sensor network in grain storehouse[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 30(2): 69~73. (in Chinese)
- 3 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 barley based on dielectric properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 113~117. (in Chinese)
- 4 滕召胜, 蔡铁, 王可宁, 等. 一种智能化粮情自动检测系统[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 144~147.
Teng Zhaosheng, Cai Tie, Wang Kening, et al. Intelligent measuring system for grain condition in storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(4): 144~147. (in Chinese)
- 5 周玉龙, 贾富国, 付倩, 等. 贮藏条件对糙米水分变化的影响规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 383~386.
Zhou Yulong, Jia Fuguo, Fu Qian, et al. Influence regularity of storage conditions on brown rice moisture changes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 383~386. (in Chinese)
- 6 杨柳, 毛志怀, 蒋志杰, 等. 基于无线传输的粮仓温湿度远程监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 155~159.
Yang Liu, Mao Zhihui, Jiang Zhijie, et al. Remote detection system of granary temperature and moisture based on wireless transmission[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 155~159. (in Chinese)
- 7 袁江, 曹金伟, 邱自学. 基于RFID读写器网络的粮库温湿度分布式监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 131~136.
Yuan Jiang, Cao Jinwei, Qiu Zixue. Temperature and humidity distributed monitoring for grain depot based on RFID reader networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(10): 131~136. (in Chinese)
- 8 韩安太, 何勇, 李剑锋, 等. 基于无线传感器网络的多参数粮情自动检测系统设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 231~237.
Han Antai, He Yong, Li Jianfeng, et al. Design of multi-parameter automatic measuring system for stored grain condition based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 231~237. (in Chinese)
- 9 包长春, 李志红, 张立山, 等. 基于ZigBee技术的粮库监测系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 197~201.
Bao Changchun, Li Zhihong, Zhang Lishan, et al. Design of monitoring system for grain depot based ZigBee technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 197~201. (in Chinese)
- 10 李业德. 基于介质损耗因数的粮食水分测量方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 14~17.
Li Yede. Method for measuring grain moisture content based on dielectric loss tangent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 14~17. (in Chinese)
- 11 Khalid K, Jafari F, Yusoff W M D W, et al. The analysis and design of multi-layer microstrip moisture sensor for rice grain[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(3): 324~331.
- 12 Amodeh M T, Khoshtaghaza M H, Minaei S. Acoustic on-line grain moisture meter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 52(1~2): 71~78.
- 13 Uddin M S, Armstrong P R, Zhang N. Accuracy of grain moisture content prediction using temperature and relative humidity sensor[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 267~273.
- 14 陈金智. 稻谷平衡水分经验公式及其推导[J]. 郑州粮食学院学报, 1993(2): 97~102.
- 15 杨洲, 罗锡文, 李长友. 稻谷动平衡含水率试验研究[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 24(1): 74~76.
Yang Zhou, Luo Xiwen, Li Changyou. Studies on dynamic equilibrium moisture content of rice grain[J]. Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition, 2003, 24(1): 74~76. (in Chinese)
- 16 李兴军, 吴子丹. 稻谷平衡水分的测定及EMC/ERH等温线方程的选择[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(6): 1~8.
Li Xingjun, Wu Zidan. Fiting parameters of EMC/ERH model for Chinese rough rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Assication, 2010, 25(6): 1~8. (in Chinese)
- 17 Gonzales H B, Armstrong P R, Maghirang R G. Simultaneous monitoring of sensor grain with relative humidity, temperature, and carbon dioxide sensors[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(4): 595~604.
- 18 Chen C. Moisture measurement of grain using humidity sensors[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1241~1245.
- 19 黄淑霞, 田海娟, 蔡静平. 粮食吸湿及湿空气在粮堆中的扩散特性研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 15~18.
Huang Shuxia, Tian Haijuan, Cai Jingping. Study on moisture absorption characteristics of rain and moisture diffusion characteristics in grain bulk[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 31(2): 15~18. (in Chinese)
- 20 万华平, 吴宪莉, 樊裕民, 等. 粮情检测与精细化管理[J]. 粮食加工, 2007, 32(5): 73~76.
- 21 ASAE D245.5—1995 Moisture relationships of plant-based agricultural products[S]. 1995.
- 22 大连北方测控工程有限公司. 数字式温湿度传感器SHT1x/SHT7x中文使用指南[M]. 2008.
- 23 GB/T 5497—85 粮食、油料检验水分测定法[S]. 1985.