

# 便携式储粮二氧化碳红外检测系统研制

刘玉娟<sup>1</sup>, 闫振<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 王云婷<sup>1</sup>, 孙玥<sup>1</sup>, 赵阳<sup>2</sup>, 刘哲<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林 长春

<sup>2</sup>吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年7月22日; 录用日期: 2022年9月30日; 发布日期: 2022年10月10日

## 摘要

针对粮食在储藏过程中的发热、虫霉危害等现象, 研制了一款便携式储粮二氧化碳红外自动检测系统, 通过对温度、湿度、二氧化碳浓度三个主要环境因素进行检测, 基于生物代谢的基本原理以及储粮生物危害判断模型, 实现对储粮过程中粮食霉变发热的早期检测和预报。使用SHT11温湿度传感器和T6615-50K型红外二氧化碳传感器来检测温湿度和二氧化碳浓度; 采用LabVIEW编程实现上位机人机交互界面的软件设计, 可实现参数设置、发送指令及接收数据; 采用C语言编程实现下位机控制器的程序设计, 用来接收指令、控制各部件工作运转及数据传输。上位机软件和下位机控制器采用RS485串口通讯模块进行通讯。测试结果表明, 本系统具有较高的检测精度, 较短的检测时间以及较为准确的粮食评定结果, 同时结合三维曲面模型, 更为全面地指导粮库粮食的安全管理。

## 关键词

便携式, 二氧化碳检测, 温湿度检测, 粮情预报, 粮食安全

# Development of Portable Grain Storage Carbon Dioxide Infrared Detection System

Yujuan Liu<sup>1</sup>, Zhen Yan<sup>1</sup>, Peng Li<sup>1</sup>, Yunting Wang<sup>1</sup>, Yue Sun<sup>1</sup>, Yang Zhao<sup>2</sup>, Zhe Liu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Earth Information Exploration Instruments, Jilin University, Changchun Jilin

<sup>2</sup>School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

Received: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Sep. 30<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 10<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Aiming at the phenomenon of heat generation and pest and mildew damage in the process of grain

\*通讯作者。

文章引用: 刘玉娟, 闫振, 李鹏, 王云婷, 孙玥, 赵阳, 刘哲. 便携式储粮二氧化碳红外检测系统研制[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(4): 509-521. DOI: 10.12677/jsta.2022.104062

storage, a portable infrared automatic detection system for grain storage carbon dioxide has been developed. By detecting the three main environmental factors of temperature, humidity and carbon dioxide concentration, based on the basic principle of biological metabolism and the judgment model of stored grain biohazard, the early detection and prediction of grain mildew and fever during grain storage are realized. Use SHT11 temperature and humidity sensor and T6615-50K infrared carbon dioxide sensor to detect temperature, humidity and carbon dioxide concentration; use LabVIEW programming to realize the software design of the upper computer man-machine interface, which can realize parameter setting, send instructions and receive data; use C language programming Realize the programming of the lower computer controller, which is used to receive instructions, control the operation and data transmission of various components. The upper computer software and the lower computer controller use the RS485 serial communication module to communicate. The test results show that the system has higher detection accuracy, shorter detection time and more accurate grain evaluation results. At the same time, combined with the three-dimensional surface model, it can guide the grain safety management of grain depots more comprehensively.

## Keywords

Portable, Carbon Dioxide Detection, Temperature and Humidity Detection, Grain Forecast, Food Security

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

中国是全球粮食生产、储藏和消费的大国, 据调查表明, 我国粮食产量虽然逐年提高, 但是粮食损失也在不断加大, 产后损失率高达 15%, 其中因储藏不善造成的损失则占总产后损失的 5% [1]。据国家统计局统计显示[2], 2021 年我国粮食总产量为 68,285 万吨, 若按 5% 测算, 那么因储藏不善造成的损失就达到约 102 亿斤, 损耗巨大。虫霉危害是我国粮食在储藏过程中常见的损失来源, 粮仓内温湿度上升导致的危险粮情是虫害、霉变现象发生的主要原因。控制好粮堆中温湿度, 能够减少粮食储藏过程中危险粮情的发生, 进而减少粮食储藏过程的损失, 这是保护粮食措施中的重要一环[3]。根据虫霉的生长和代谢活动可以产生  $\text{CO}_2$  气体的特点, 国内外储粮研究者提出了通过分析粮堆中  $\text{CO}_2$  气体浓度来监测粮食中虫霉活动的方法, 并进行实验证明了该方法的有效性[4]。唐芳等[5]研究发现, 稻谷真菌孢子数与  $\text{CO}_2$  浓度具有良好的相关性, 检测  $\text{CO}_2$  浓度对粮食中霉菌的发展具有提前预测的作用。经调研发现, 储粮中  $\text{CO}_2$  浓度变化要先于温度变化, 并且  $\text{CO}_2$  的变化幅度也远大于温度。Singh 等[6]对储粮中  $\text{CO}_2$  的扩散和热的传导进行了相关研究, 实验发现粮食中  $\text{CO}_2$  的扩散速度要比热传导速度快 30~40 倍。

因此, 本文结合传感器检测技术, 综合考虑储粮环境中的温度、湿度、二氧化碳浓度三个参数, 基于储粮生物危害判断模型, 研制了一款便携式储粮二氧化碳红外检测仪。若能有效减少粮食在储藏过程中的损失, 则可以为解决我国粮食安全问题做出重大贡献。

## 2. 检测原理

### 2.1. 红外吸收法测量二氧化碳原理

物质可以凭借其分子内部的振动吸收红外光谱, 产生红外吸收光谱需满足两个条件: 一是辐射能量

足够大使物质产生振动跃迁；二是辐射与物质之间存在相互耦合作用[7]。根据气体的选择性吸收理论，当光源的发射波长与气体的吸收波长相等时就会发生共振吸收。CO<sub>2</sub>在4.26 μm处有明显的吸收光谱，其吸收关系服从 Beer-Lambert 定律[8]，出射光强  $I$  的计算公式为：

$$I = I_0 e^{-KCL} \quad (1)$$

变换得到气体浓度  $C$  的计算公式如下：

$$C = \frac{\lg(I_0/I)}{KL} \quad (2)$$

式中： $I_0$ 为入射光强； $I$ 为出射光强； $C$ 为气体浓度； $L$ 为吸收路径长度； $K$ 为摩尔吸光系数。

目前用于气体检测的探测器可以分为分光型和非分光型。如图1所示，分光探测器能分离窄波长的单色光，精度高，但不能共用同一气室，常被用于实验室中；非分光探测器直接将具有连续光谱的红外光送入气室，在探测器表面增加不同波长的滤光片，使不同测量通道共用同一气室[9]，因此在便携化场合应用较多。

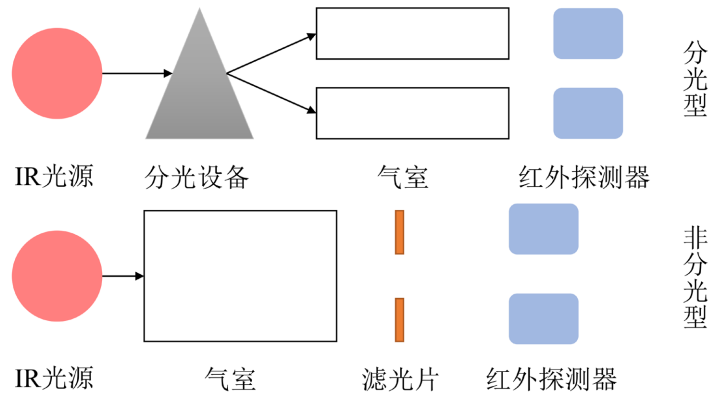


Figure 1. Gas detector schematic  
图1. 气体探测器示意图

本系统的 T6615-50K 二氧化碳传感器基于非分光检测技术[10]，如图2所示，使用两个探测器，一个作为传感器，一个作为参考，通过比较检测信号来测量红外光的衰减，进而获得待测气体中的 CO<sub>2</sub> 浓度。

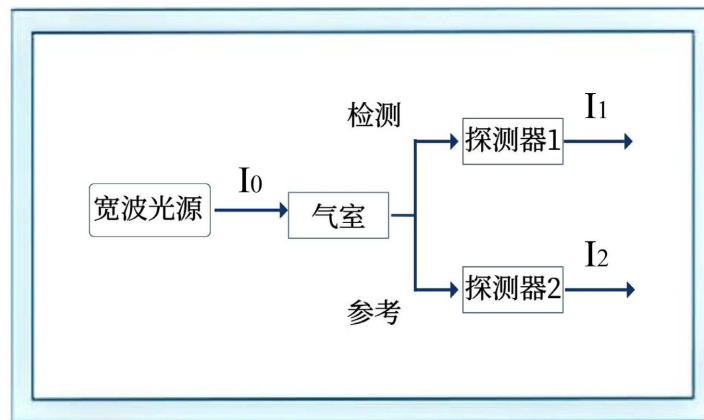


Figure 2. Schematic diagram of carbon dioxide sensor detection  
图2. 二氧化碳传感器检测原理图

## 2.2. 温湿度测量原理

SHT11 温湿度传感器实物如图 3 所示。

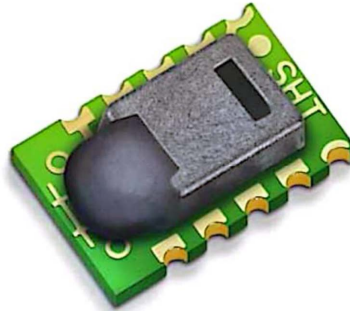


Figure 3. SHT11 temperature and humidity sensor physical map  
图 3. SHT11 温湿度传感器实物图

SHT11 系列传感器无需外部电路，可直接由微控制器访问。具有体积小、灵敏度高、集成度高、抗干扰能力强[11]、功耗低[12]等特点。采用能隙材料，通过 PTAT 电路实现与绝对温度成正比的电压输出。如图 4 所示电路图[13]，输出电压只与温度有关，而与电源的变化无关。

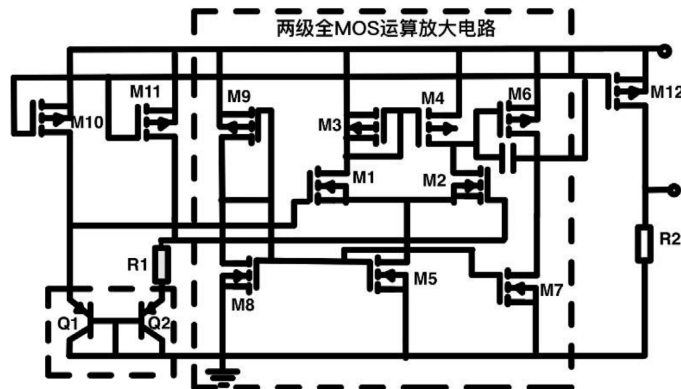


Figure 4. PTAT temperature sensing circuit diagram  
图 4. PTAT 温度传感电路图

环境湿度的变化导致湿敏电容器的介电常数发生变化，进而对电容产生影响，电容变化量与相对湿度成正比。SHT11 传感器芯片的电容除了保持电容式湿敏器件的原有特性外，还可以防止外部影响[12]。

## 3. 储粮生物危害判断模型

本系统采用唐芳[14]提出的生物危害判断模型，储粮微生物预测值  $F$  的计算公式为：

$$F = \exp(\alpha \cdot T + \beta \cdot t + \gamma \cdot Mc - C) \quad (3)$$

式中： $F$  为储粮微生物量预测值； $T$  为粮堆温度值； $t$  为粮堆储藏时间； $Mc$  为粮食水分； $\alpha$  为粮堆的温度值系数； $\beta$  为粮堆的储藏时间系数； $\gamma$  为粮堆含水率的系数； $C$  为常数项。不同粮种真菌生长预测模型， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  系数和  $C$  常数项不同。

对于粮食平衡水分的检测通常是采用粮堆内某一待测点的湿度进行代替估计，具体转换公式如下[15]：

$$Mc = \frac{\ln(1 - RH) - \ln RH - A - C \cdot T}{B} \quad (4)$$

式中： $Mc$  为平衡水分； $RH$  为粮堆湿度； $T$  为粮堆温度； $A$ 、 $B$ 、 $C$  为拟合方程的系数，其取值如表 1 所示[15]。

由上述公式可知，在使用传感器测得粮仓某一位置的温度和湿度后，即可计算出粮食的含水率  $Mc$  和储粮微生物预测值  $F$ ，再结合二氧化碳浓度，能够更为准确地对储粮状况级别进行评估。

**Table 1.** A three-parameter CAE model expressed in the form of  $Mc = F(T, RH)$

**表 1.** 以  $Mc = F(T, RH)$  形式表达的三参数 CAE 模型

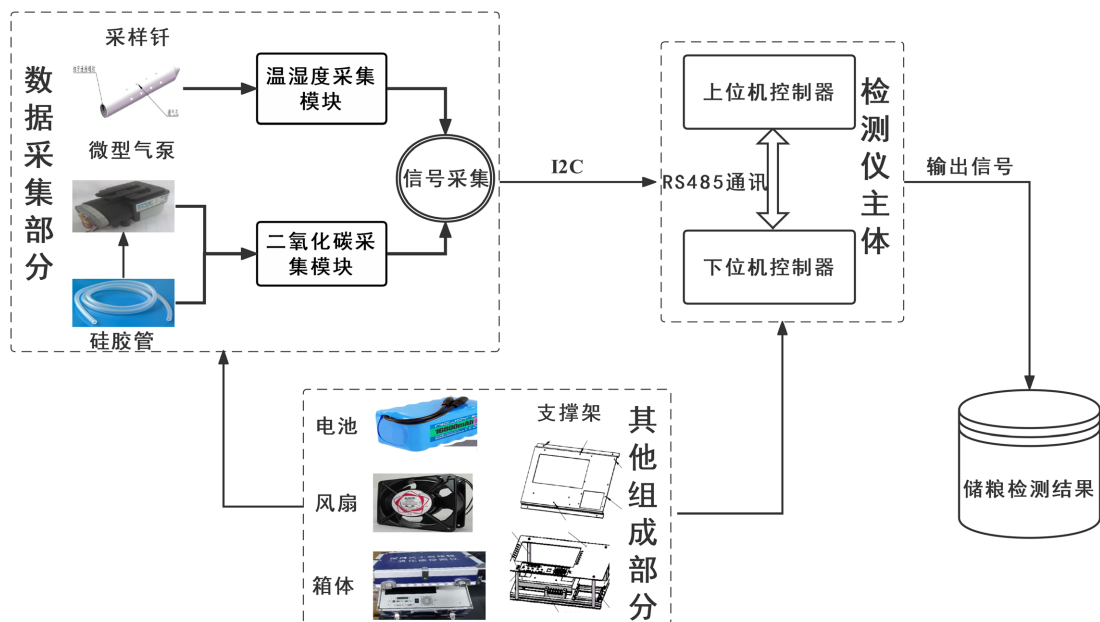
类型		方程参数			拟合度	
		$A$	$B$	$C$	$R^2$	MRE%
稻谷	吸附	3.344	-31.219	-0.00916	0.9853	5.2246
	解吸	4.282	32.145	-0.0212	0.9890	3.5761
玉米	吸附	3.244	-30.227	-0.00743	0.9816	6.5103
	解吸	4.164	-31.247	-0.0253	0.9843	0.6103
小麦	吸附	3.091	-27.808	-0.00717	0.9782	2.0775
	解吸	3.909	-29.649	-0.019	0.9775	5.2391

## 4. 仪器系统组成

### 4.1. 系统结构

便携式储粮二氧化碳红外检测系统的基础硬件组成主要包括：箱体和支撑架、采样钎、微型气泵、二氧化碳传感器、温湿度传感器、RS485 转换模块、微机控制器、散热风扇、供电电源、12 V 锂电池等。

本检测系统的各个硬件之间的连接见图 5。



**Figure 5.** System structure block diagram

**图 5.** 系统结构框图

检测仪在使用过程中，由于操作不规范，可能会导致检测精度降低，甚至造成仪器损坏。因此，为提高检测精度和使用寿命，检测仪运行环境要求温度位于 0 摄氏度以上，湿度在 0~95% RH 范围内，超出该范围时，检测仪不能正常工作。

## 4.2. 硬件系统设计

系统的硬件电路设计分为以下几个部分：主控制器电路、放大驱动气泵电路、RS485 串行通讯电路等。

### 4.2.1. 主控制器电路

硬件电路的核心控制芯片为 NuMicro™ M058。如图 6 所示，2 脚接复位电路，用来使单片机从初始状态开始运行；3、5 脚接 RS485 通讯电路，实现上位机与下位机的通讯；14 脚用于驱动气泵；30、31 脚分别接 CO<sub>2</sub> 传感器的 TXD 脚与 RXD 脚，传输 CO<sub>2</sub> 浓度检测数据。

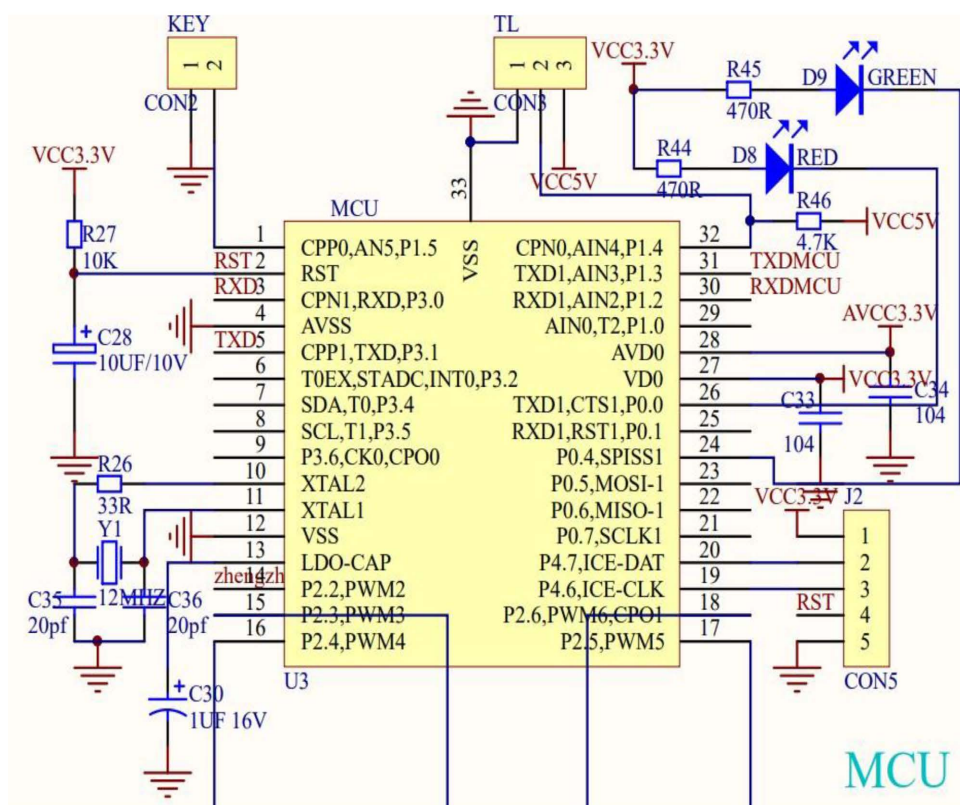


Figure 6. Main controller circuit diagram  
图 6. 主控制器电路图

### 4.2.2. 放大驱动气泵电路

如图 7 所示，当主控制器的 14 脚输出低电平时，光电耦合器 3、4 脚导通，3 脚高电平，促使三极管导通，驱动气泵转动。

### 4.2.3. RS485 串行通讯电路

本系统的主控制器和上位机采用高效稳定的 RS485 通讯协议[16]进行通讯。使用 MAX485 半双工通讯芯片，如图 8 所示，2 脚为低电平时，下位机接收数据；3 脚为高电平时，下位机发送数据。

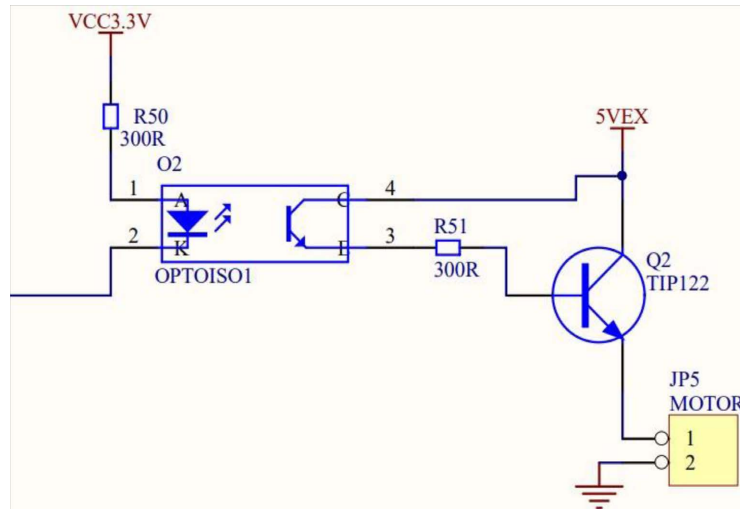


Figure 7. Amplified drive air pump circuit diagram  
图 7. 放大驱动气泵电路图

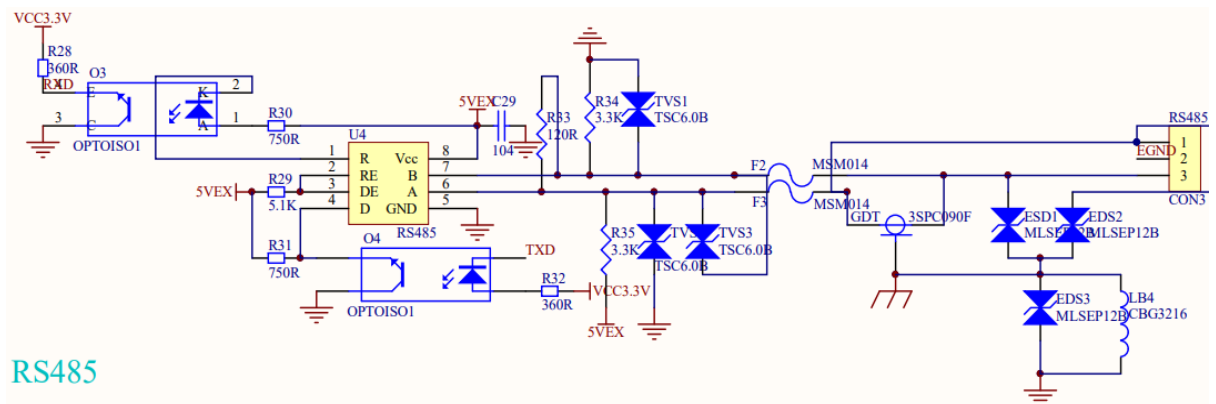


Figure 8. RS485 serial communication circuit diagram  
图 8. RS485 串口通讯电路图

#### 4.2.4. 电源模块电路

如图 9 所示，该部分电路先将锂电池输出的 12 V 电压转换成 5 V 电压，为气泵和二氧化碳传感器供电。再将 5 V 电压经过 AMS1117 芯片转换成 3.3 V，以满足单片机等其他电器元件的使用。

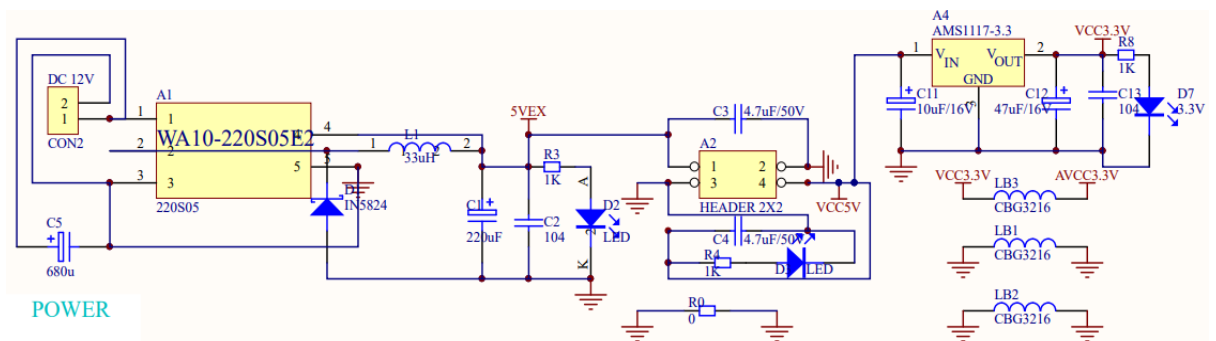


Figure 9. Power module circuit diagram  
图 9. 电源模块电路图

### 4.3. 软件系统设计

图 10 为本系统的软件工作流程图。本检测仪的软件系统由两部分组成，第一部分为下位机控制器的程序设计，采用 C 语言编译；第二部分为上位机人机交互的软件设计，使用 LabVIEW 进行编译。LabVIEW 作为图形编译平台，具有仪器控制、数据采集分析和结果显示等功能。直观的程序语言也使其具有更好的人机交互功能，方便理解与修改[17][18]。

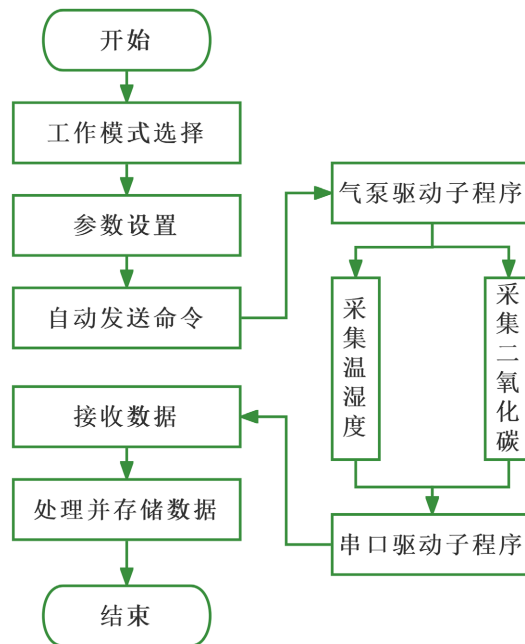


Figure 10. Software work flow chart

图 10. 软件工作流程图

上位机作为便携式储粮生物危害检测仪的核心，负责向下位机发送指令和接收下位机返回的数据，并将接收的数据进行处理，根据处理结果对储粮状况等级进行评定，最后将结果呈现在显示器上。图 11 为参数设置界面，可以对检测粮种、储藏时间、二氧化碳标定值以及端口选择等四个主要参数进行设置。设置完成后点击设定按钮即可对设置结果进行保存。



Figure 11. Host computer parameter setting interface diagram

图 11. 上位机参数设置界面图



当下位机上电后，首先会初始化主程序，以保证各部件均处于待命状态。当下位机控制器收到上位机发送的检测指令时，指令正确，则下位机立即驱动气泵旋转，温湿度传感器和二氧化碳传感器开始采集数据。下位机控制器将各传感器返回的数据存储在寄存器中，通过串行通讯，再将数据返回到上位机进行显示。图 12 即为上位机的显示界面。



Figure 12. Host computer display interface diagram

图 12. 上位机显示界面图

## 5. 应用实验与检测结果分析

本文基于长春地区的气候特点，选择我国具有代表性的水稻、玉米 2 个粮种共 5 个粮仓，对每个粮仓内的 16 个点进行测量，每个检测点连续测量 3 次，得到 48 组储粮温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度的测量结果和储粮状况等级评定结果，比较分析实际储粮中各参数对虫霉危害的检测效果和粮食状况判断的准确性。

### 5.1. 实验仓基本信息

2021 年 12 月 2 日对吉林省长春市某粮库进行应用试验，仓房基本情况如表 2 所示。

Table 2. Basic information of the granary

表 2. 粮仓基本情况

粮种	仓号	入仓时间	仓房面积	通风时间	测量点
水稻	2	2018.11.28	23*29 米	2021.11.24 通风	左右 7 米；前后 9 米
玉米	5	2019.03.07	23*29 米	基本未通风	左右 7 米；前后 9 米
水稻	9	2020.12.20	23*29 米	2021.11.24 通风	左右 7 米；前后 9 米
玉米	24	2020.05.21	23*59 米	9 月份和当天通风	左右 7 米；前后 19 米
玉米	32	2021.02.04	28*58 米	2021.11.24 通风	左右 9 米；前后 9 米

### 5.2. 实验数据结果分析

分别对各个粮仓的 16 个测量点进行了 48 次检测，下面以 2 号仓水稻的实测数据为例，每一个检测位置进行 3 次检测，取平均后作为该检测点的实测数据，如表 3 所示。

Table 3. Measured data of No. 2 warehouse

表 3. 2 号仓实测数据

检测位置	温度/℃	湿度/%	CO <sub>2</sub> 浓度/ppm	平衡水分/%	安全等级
点 1	9.6	80.5	450	15.2	安全
点 2	9.5	84.4	439	16.0	安全

Continued

点 3	10.9	83.8	439	15.8	安全
点 4	12.2	78.2	436	14.7	安全
点 5	10.3	73.9	438	13.9	安全
点 6	11.2	81.6	442	15.3	安全
点 7	13.0	85.2	447	16.1	安全
点 8	14.0	84.2	454	15.9	安全
点 9	13.9	78.6	452	14.6	安全
点 10	14.5	80.2	457	15.0	安全
点 11	15.2	84.0	468	15.8	安全
点 12	15.0	74.1	462	14.4	安全
点 13	13.8	72.8	333	13.6	安全
点 14	14.0	72.0	370	13.5	安全
点 15	13.9	74.8	388	13.9	安全
点 16	13.9	73.7	422	13.7	安全

将 2 号仓的实验数据带入公式(3)，得到真菌生物量预测值  $F$ ，分别对每次实验的温度、水分和真菌生物量预测值  $F$  生成三维曲面进行数据展示，如图 13 所示。

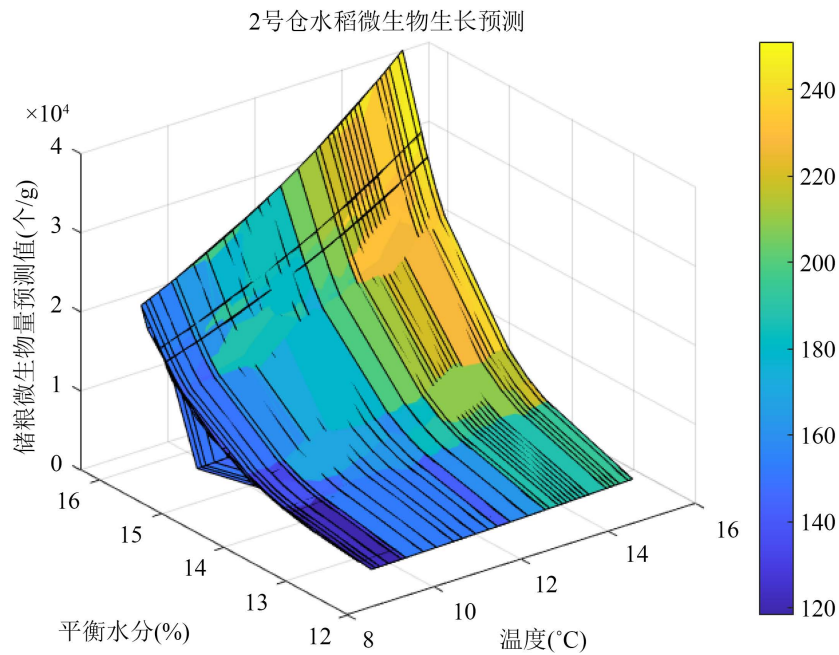
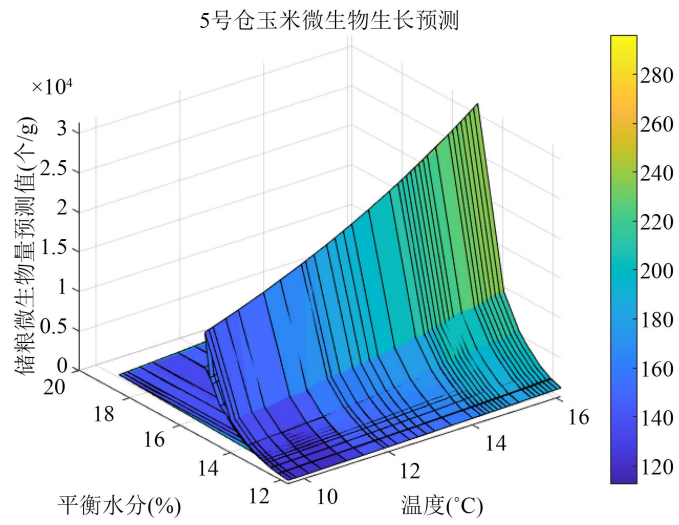


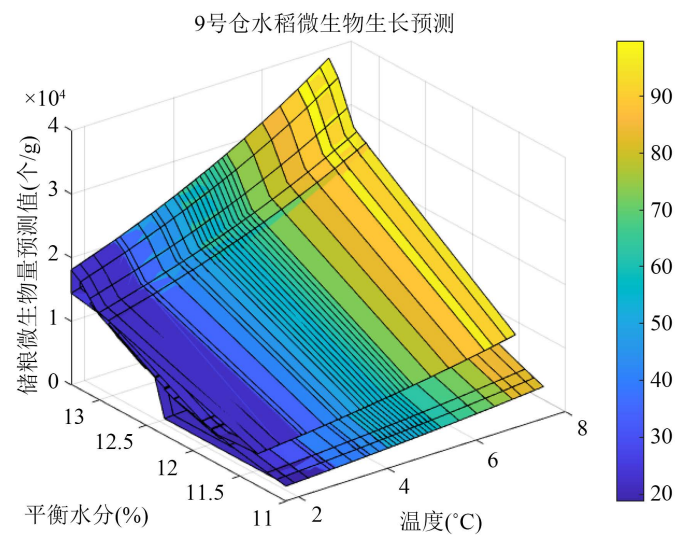
Figure 13. 3D fitting surface plot of fungal microorganism prediction in No. 2 warehouse

图 13. 2 号仓真菌微生物预测三维拟合曲面图

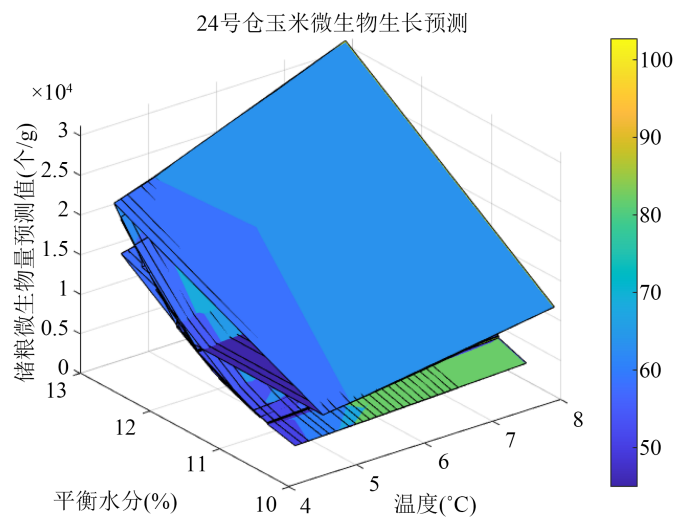
理论上，该三维曲面图应符合形似 e 指数衰减的曲面，经过实验发现，实验结果大致符合原理。因为真菌生长所受的各种因素过多，所以在预测值  $F$  的准确性上还有待提高，但可以很好地反应整体的趋势。图 14(a)~(d)分别是 5 号仓、9 号仓、24 号仓、32 号仓的三维曲面模型。



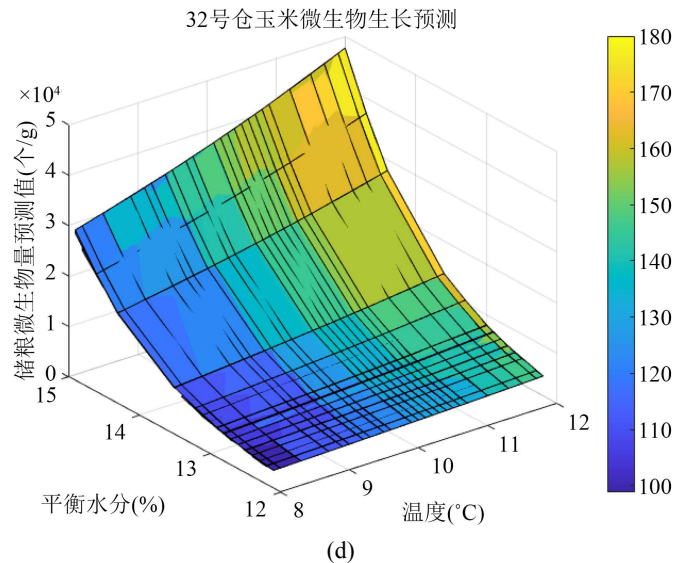
(a)



(b)



(c)



**Figure 14.** 3D fitting surface plot of fungal microorganism prediction in warehouse No. 5, No. 9, No. 24, and No. 32  
**图 14.** 5 号仓、9 号仓、24 号仓、32 号仓真菌微生物预测三维拟合曲面图

通过上述三维拟合曲面,发现 5 号仓与其余粮仓的区别较大,查验数据发现,5 号仓的温度和平衡水分均略高于其余各仓,结合粮仓的基本情况,发现 5 号仓基本未通风,综合考虑认为这是导致该结果的原因之一。因此该三维拟合曲面可以作为模型判断和趋势分析依据,指导粮仓通风建议。

## 6. 结论

针对粮食在储藏过程中因霉变,虫害等原因造成粮食损失的现象,本文基于储粮生物危害判断模型,采用多传感技术,研制一款便携式储粮二氧化碳红外检测系统,实现了对储粮状况级别的评定。利用 LabVIEW 程序设计人机交互界面,操作简单,且检测时间较短,便于粮仓管理人员使用。通过实验测试分析,本系统工作较为稳定,检测精度较高,能够较为准确地对危险粮情做出预测和判断,对粮库粮食安全检测具有重要应用价值。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(41974210, 62175236); 吉林省自然科学基金项目(20200201205JC)。

## 参考文献

- [1] 刘鹏, 丁乐. 降低粮食损耗与确保粮食安全研究[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(5): 5-7.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 国家统计局关于 2021 年粮食产量数据的公告[EB/OL]. [http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202112/t20211206\\_1825071.html](http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202112/t20211206_1825071.html), 2021-12-06.
- [3] 冯鸿超. 基于温湿度粮情的储粮安全风险预警模型及应用[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- [4] 翟焕趁, 张帅兵, 蔡静平, 蒋澎. 利用 CO<sub>2</sub> 检测法监测大型粮仓储粮的虫霉危害[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 17-21.
- [5] 唐芳, 程树峰, 伍松陵. 稻谷储藏危害真菌生长与 CO<sub>2</sub> 浓度的相关性[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(3): 71-74.
- [6] Sarkar, M. (2015) A New Theoretical Formulation of Dew Point Temperatures Applicable for Comfort Air-Cooling Systems. *Energy & Buildings*, **86**, 243-256. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.029>
- [7] 郑玲娇. 基于红外吸收光谱的设施园艺二氧化碳检测系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.

- 
- [8] 吴玉锋, 田彦文, 韩元山, 翟玉春. 气体传感器研究进展和发展方向[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(10): 731-734.
- [9] 袁博. 基于 NDIR 原理的 CO<sub>2</sub> 浓度传感器的制备与研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [10] 沈文豪. 便携式储粮生物危害检测仪的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [11] 王水寒. 稻谷储藏品质与耦合因子关系的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [12] Grisha, N.K. (2004) Measurement of Temperature and Humidity Using SHT11/71 Intelligent Sensor. *ELECTRONICS'2004*, Sozopol, 22-24 September 2004, 1-6.
- [13] 殷万君, 武建寿, 郑君, 祝建科. 一种 PTAT 的 MOS 温度传感电路的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2016, 24(9): 110-112.
- [14] 唐芳, 祁智慧, 张海洋, 程树峰. 一种储粮生物危害的检测方法及装置[P]. 中国专利, CN201811383877.8, 2021-03-09.
- [15] 陈思羽, 吴文福, 李兴军, 吴子丹, 张亚秋, 张忠杰, 等. 谷物湿热平衡新模型及热力学特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 110-114.
- [16] 吴志忠, 王克家, 苗春卫, 吴利予. 一种储粮检测系统 RS-485 通信网络的设计[J]. 应用科技, 2001, 28(10): 11-13.
- [17] 裴清福. 数据采集及处理系统 LabVIEW 程序设计和界面设计[J]. 微型电脑应用, 2018, 34(7): 55-58.
- [18] 王昆. 基于 LabVIEW 的数据采集与信号处理系统设计与实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(15): 94-97.