

基于 CAN 总线的粮仓测温系统设计

郭 健, 周 丽, 朱 杰, 董萍萍

(北京物资学院 信息学院, 北京 101149)

摘要: 随着现代粮库规模的不断扩大, 其测温系统既要求简化现场布线又要远距离传输数据, 实现集中监控; 为此设计了一种基于 CAN 总线和 DS18B20 传感器的粮库测温系统; 文章介绍了该测温系统的软硬件设计方案, 实现了粮库现场布线的简化和数据的远距离传输; 实验证明, 该系统很好的适应了粮库测温系统的需求, 正负偏差在 0.3 以内, 具有成本低、可靠性高等特点。

关键词: 粮仓测温系统; CAN 总线; DS18B20 温度传感器; STM32F407

Design of Granary Temperature Measurement System Based on CAN Bus and Its Application

Guo Jian, Zhou Li, Zhu Jie, Dong Pingping

(Information School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

Abstract: With the continuous expansion of the scale of modern granary, its temperature measurement system requires not only to simplify the field wiring but also to transmit data in a long distance, so as to realize centralized monitoring. A kind of granary temperature measurement system based on CAN bus and DS18B20 sensor is designed. Using the characteristics of CAN bus and DS18B20, the simplification of field wiring and the long distance transmission of data are realized. The design of the software and hardware of the temperature measurement system is introduced in this paper, which realizes the simplification of the field wiring of the granary and the long distance transmission of the data. The experiment shows that the system is well adapted to the demand of the granary temperature measurement system, and has the characteristics of low cost and high reliability.

Keywords: granary temperature measurement system; CAN bus, DS18B20 temperature sensor; STM32F407 chip

0 引言

我国是农业大国且每年的粮食产量巨大, 加上部分旧粮积压, 大量粮食存储在粮库中, 粮库是保证粮食储存安全的重要基础设施^[1-2], 是粮食流通领域中一个重要环节。但是由于粮温、仓温、仓内相对湿度、通风条件、虫害发生情况以及气温、和空气的相对湿度等原因的影响, 会导致的粮食的陈化、劣变、霉变, 给粮食质量造成了严重的损失^[3-4], 据世界粮农组织调查, 每年因为虫食、储存不当、变质的粮食占世界总量的 8.5%, 几乎等于非洲饥荒的粮食需求量^[5]。粮食的霉变和虫害等的发生有时会直接反映到粮温的变化上, 反之, 粮仓的温度变化也会加速粮食的霉变和虫害的发生, 因此仓温是判断粮仓储粮现状的一个重要判断标志, 是全面衡量和判断粮仓粮情的重要依据, 为了保证库存粮食的质量, 最大限度减少粮食在储存过程中的损失, 粮库管理人员必须实时检测储存粮食的温度情况, 将粮仓内温度控制在一定范围内^[6]。大型粮库的粮仓

分布在一定距离内, 在几十甚至上百个仓库中有上万个测温点, 对于如此规模的粮库粮食检测采用分区取样的人工方法, 显然已经不适应粮库管理的需要^[7]。近年来, 随着电子技术的发展和测量技术的提高, 传统的人工查看粮温的方法, 已逐步被电子测温设备所取代^[8], 各种利用电子测温设备对粮仓的温湿度进行监控的系统被设计出来。刘雪梅^[9]等就以 MSP430F149 单片机为核心, 利用传感器 DHT11 对粮仓内的温湿度进行了检测, 并分别采用蓝牙模块和 GSM 网络将测量结果实时近距离或远程传送至用户手机; 吴海滨^[10]以 STM32F103 单片机为主控芯片, 利用 DS18B20、RF433 无线模块, 单总线通信方式, 最大允许接入 5120 个测量点, 设计了一粮仓测温及通风系统, 可实现上位机显示所有点温度, 并通过设置温度报警阈值进行自动报警, 开启超温部分的风机, 实现对温度的调整。赵懿琨^[11]等利用 DS18B20 数字温度传感器和 HIH3605 湿度传感器来检测粮仓环境, 并将实时嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 移植到 LPC2103 的处理器平台, 实现了对粮仓的多点温湿度数据的采集, 实验结果表明该系统可以实现对温度达到 60-70 度的夏季堆积湿粮的温度进行 35 度高温的报警。金晓龙^[12]利用 Zigbee 技术, 结合 ATmega128L 单片机和 CC2420 芯片, 对粮仓的测温系统进行了软硬件设计, 可实现对粮仓的温度检测, 并将检测结果动态显示并报警的功能。也有学者对粮仓的测量另辟蹊径, 利用光栅和声波等

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-08-09。

基金项目: 北京物资学院国家级科研项目培育基金项目 (GJB20164004); 北京市智能物流系统协同创新中心项目; 北京物资学院青年运河学者资助项目。

作者简介: 郭 健(1975-), 女, 辽宁锦州人, 博士学位, 教授, 主要从事智能仪器仪表开发等方向的研究。

对粮仓温度进行测量, 如王高^[13]等为满足粮仓的大范围温度测量的要求, 就利用了光纤布拉格光栅所测温度与中心波长之间的线性关系, 利用光谱线性频移函数获得粮仓各点的温度, 结果表明此系统所测温度基本与标准温度接近, 但其抗干扰性能更强; 陈冠男^[4]利用声波在粮食中通过粮食颗粒之间的孔隙的气体进行传播的原理, 定义了相同温度、相同传感器间距下自由空间声速与粮食中实测声速比值为声速转换因子, 针对粮食中温度检测的要求, 提出基于 Markov 径向基函数和 Tikhonov 正则化的温度场重建算法, 可以对粮仓中任意位置出现一个或多个热点进行准确定位, 探索了利用声学法检测粮仓温度的可能。

各学者对粮仓测温问题都进行了深入的研究, 并建立了相应的监测系统, 对于不同的应用场景具有一定的适用性, 但也存在一定的局限性, 如是否能应用于大型粮仓、是否适用于任何粮食等, 本文针对粮库测温系统的需求特点, 采用基于 CAN 总线和 DS18B20 传感器的方案, 设计了一套温度采集系统, 该系统可以有效减少现场布线, 具有成本低、可扩展性好、可靠性高等特点。

1 系统硬件设计

1.1 总线的选择

总线可以选择 CAN 总线和 RS485 总线, 但相比 RS485 总线, CAN 总线具有自身的一些特点和优势, 在传输距离与速度方面, 在高速率传输时, 两者的传输距离相差不多, 但在低速率传输时, RS485 的最大传输距离为 1219 米左右, CAN 总线的传输距离却可达 10 km, 因此 CAN 总线在长距离传输方面具有绝对优势; 在总线利用率方面, RS485 是单主从结构, 一个总线上只能有一台主机, 通讯均由该主机发起, 发出命令后, 要求即时回答, 收到答复后再发下一个命令, 它若没有发命令, 则下面的节点不能发送数据, 以免造成数据错乱, 而 CAN 总线是多从结果, 可以多节点发送, 一个节点发送完后, 另一节点探测到总线空闲, 即可以发送, 提高了总线的利用效率; 错误识别方面 RS485 无法识别错误, 而 CAN 总线可以对任何错误进行检测, 因此在安全性方面 CAN 总线也具有一定的优势; 另外 CAN 总线也不会发生 RS485 网络中, 系统发生错误后, 多节点同时向总线发送数据导致总线短路, 使总线处于死锁的现象, CAN 总线还具有完善的通信协议, 开发的周期也大大的被缩短了。正是由于 CAN 总线的这些高性能、高可靠性和突出的数据传输等性能^[13-14], 本文的粮仓温度测量系统选用 CAN 总线作为数据传输总线。

1.2 温度传感器的选择

DS18B20 是一款常用的数字温度传感器, 它输出的数字信号, 适应于 3.0~5.5 V 的电压范围; 它具有独特的单线接口方式, 在与微处理器连接时, 仅用一 IO 口条线就可以实现两者的双向通讯; 它还可实现组网多点测温, 在使用中不需要任何外围元件, 可测温度范围达到为 -55 ℃~+125 ℃, 可编程的分辨率为 9~12 位, 可完成对温度的高精度测量, 另外该传感器还具有体积小、硬件开销低、抗

干扰能力强等特点, 因此本文设计的粮仓测温系统选择 DS18B20 作为温度传感器, 来测量粮仓中粮垛内的温度场, 且传感器的数量根据粮垛的大小来进行确定。

1.3 系统硬件的设计

本粮仓测温系统由测量层和控制层两部分组成, 测量层由一系列的测量单元并联组成, 每个测量单元包括微控制器、温度传感器组、CAN 收发器等; 控制层由带 CAN 接口卡的计算机组成。两部分由 CAN 总线相连接, 系统的结构如图 1 所示。多个 DS18B20 并联在唯一的单线上, 实现多点测温。考虑温度传感器单总线的驱动能力和现场应用需求, 每个微控制器的 IO 引脚并联 8 个温度传感器。具体电路如图 2 所示。

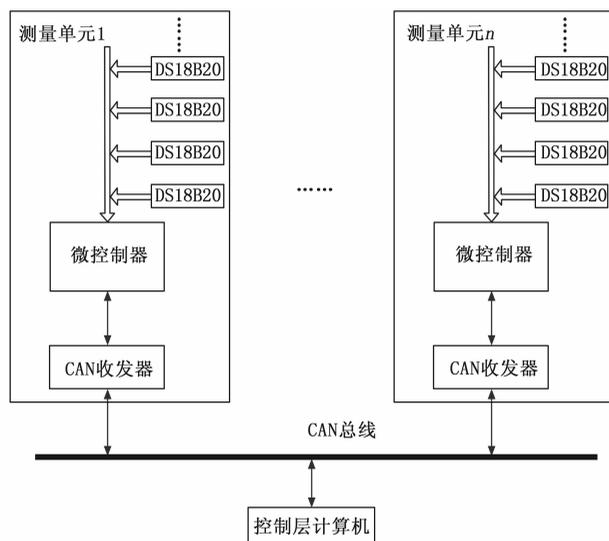


图 1 粮仓测温系统结构图

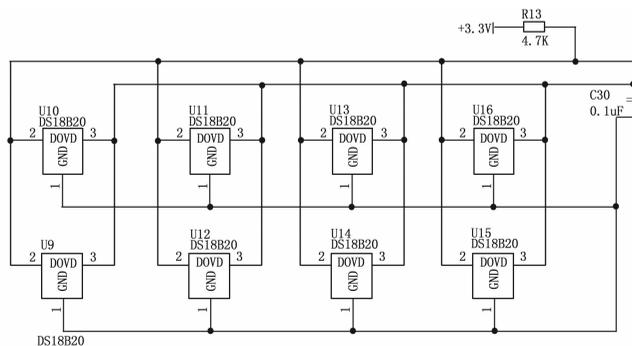


图 2 温度传感器电路

微控制器 STM32F407ZET6 是本系统的核心, 通过 CAN 总线与计算机进行通信, 接收计算机的命令、上传数据; 通过 IO 接口与多组并联的温度传感器相联。与单总线相连的接口须为漏极开路或 3 态输出, 因此 STM32F407ZET6 的 IO 设置为漏极开路 (open-drain) 输出模式, 其电路如图 3 所示。

CAN 通信模块实现与上位机的数据通信, 本文选用 STM32F407ZET6 自带的 CAN 控制器, 采用 SN65HVD230 作为 CAN 收发器。为了增强抗干扰能力, 在收发器和对外

接口之间加入了共模电感、瞬态电压抑制二极管和 100 皮法电容。

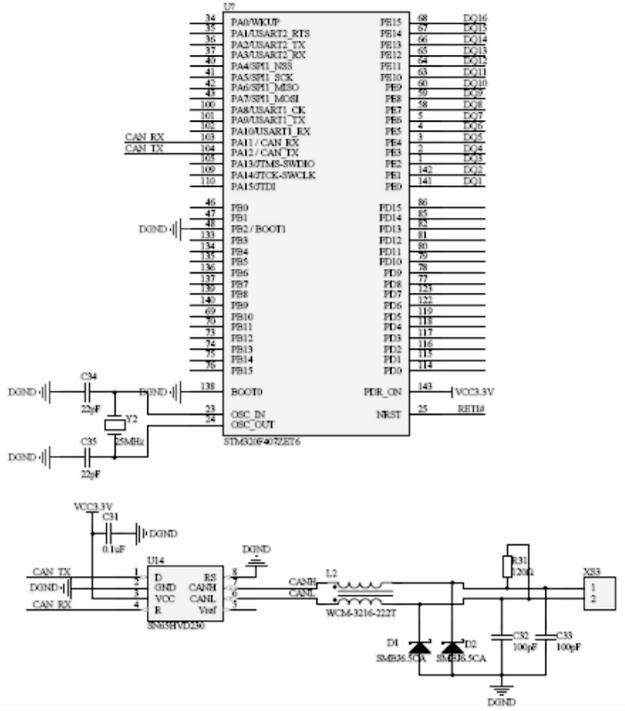


图 3 单片机和 CAN 网络收发器电路图

2 系统软件设计

2.1 对 DS18B20 的操作代码设计

DS18B20 需要严格的单总线协议以确保数据的完整性。协议包括如下信号类型：复位脉冲、存在脉冲、写 0、写 1、读 0 和读 1。这些信号都有严格的时间要求，除存在脉冲外，都是由总线控制器发起的【datasheet】。其时序如图 4~5 所示。

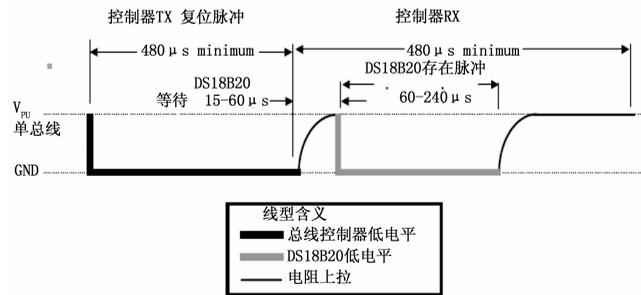


图 4 DS18B20 的复位和存在脉冲时序

分析图 4 和图 5 可知，下降沿或上升沿后加一定的保持时间间隔是单总线信号的基本组成单位。协议包括的所有信号都是这些基本单位的一种组合。对 DS18B20 的任何一种功能操作又都是这些信号的一种组合。其伪代码如下：

复位和读存在脉冲函数序列：

```
ResetFallingEdge(void) {
    Gpio output zero;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 640us;
}
```

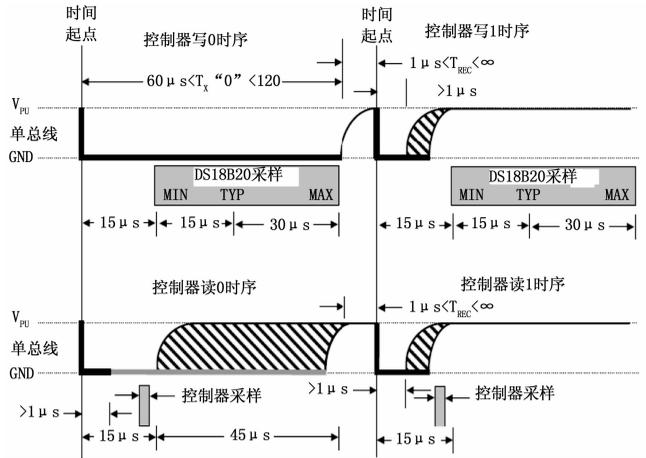


图 5 DS18B20 的读写时序（线型含义同图 4）

```
}
ResetRisingEdge(void) {
    Gpio output one;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 70us;
}
ReadPresencePulse(void) {
    Read gpio input;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 570us;
}
写“1”的函数序列：
WriteOneFallingEdge(void) {
    Gpio output zero;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 10us;
}
WriteOneRisingEdge(void) {
    Gpio output one;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 70us;
}
写“0”的函数序列：
WriteZeroFallingEdge(void) {
    Gpio output zero;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 70us;
}
WriteZeroRisingEdge(void) {
    Gpio output one;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 10us;
}
读操作的函数序列：
ReadFallingEdge(void) {
    Gpio output zero;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 5us;
}
ReadRisingEdge(void) {
    Gpio output one;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 10us;
}
```

```
ReadValue(void){
    Read gpio input;
    Set the timer counter so that the timing cycle is 65us;
}
```

为了实现控制器在单总线上以精确的时间输出这些信号组合, 本文采用定时器驱动的方法。利用 2 个定时器, 第一个定时器确定温度的转换周期, 第 2 个定时器实现操作时序。在第 2 个定时器的中断处理函数中依次调用上述的一种函数序列即可实现对 DS18B20 的复位操作、写“1”操作、写“0”操作或读操作。下面以温度转换操作为例叙述其实现方法。DS18B20 的温度转换的命令序列如表 1 所示。

表 1 DS18B20 的温度转换的命令序列表

控制器状态	数据(LSB 在前)	内容
TX	复位	控制器发出复位脉冲
RX	存在	DS18B20 返回存在脉冲
TX	55h	发匹配 ROM 指令
TX	64 位 ROM 编码	发 DS18B20 地址
TX	44h	发温度转换指令

将上表中命令序列所组成的位序列所需要的函数的指针放到函数指针数组中, 构成一个实现温度转换的指针数组。代码如下:

```
typedef void (* pf)(void);
pf pcSequenceTx[163] = {
    ResetFallingEdge, ResetRisingEdge, ReadPresencePulse, //复位及读存在操作
    WriteOneFallingEdge, WriteOneRisingEdge, //写 1
    WriteOneFallingEdge, WriteOneRisingEdge, //写 0
    WriteZeroFallingEdge, WriteZeroRisingEdge,
    WriteZeroFallingEdge, WriteZeroRisingEdge,
    .....
};
```

定义指向函数指针数组的指针: pf (* ppf) [], 将 pcSequenceTx 数组的首地址赋给 ppf, 在第 2 个定时器的中断服务程序中调用 ppf (n) 即可实现对 DS18B20 的操作, 中断服务程序的代码如下:

```
Timer2_irqhandler(){
    Disable interrupt;
    n = n + 1;
    ppf(n);
    Enable interrupt;
}
```

同理, 其他操作都可以构成一个函数指针数组, 再将其数组的首地址赋给 ppf, 启动定时器 2 即可实现所需要的操作。如温度读取操作, 其命令序列如下表 2 所示。

表 2 中命令序列所组成的位序列所需要的函数的指针放到函数指针数组中, 构成一个读取温度值的指针数组。代码如下:

表 2 DS18B20 的温度读取命令序列表

控制器状态	数据(LSB 在前)	内容
TX	复位	控制器发出复位脉冲
RX	存在	DS18B20 返回存在脉冲
TX	55h	发匹配 ROM 指令
TX	64 位 ROM 编码	发 DS18B20 地址
TX	BEh	读取指令
RX	2 data bytes	仅读取 2 字节温度值
TX	复位	复位结束读取数据

```
typedef void (* pf)(void);
pf pcSequenceRx[211] = {
    ResetFallingEdge,
    ResetRisingEdge,
    .....
}
```

系统需要温度转换时, 启动第一个定时器, 第一个定时器的定时周期即是温度采集的间隔周期, 第一个定时器的中断函数中设置标志位, 主程序中根据此标志位启动第 2 个定时器, 先把上次转换的温度结果读出, 再启动本次的转换。以上述操作顺序先对同一 IO 口的温度传感器进行操作, 再操作另一 IO 口的温度传感器。所有 IO 的读取温度值和转换命令结束后, 把标志位清除。第一个定时器的中断服务程序代码如下:

```
Timer1_irqhandler(){
    Disable interrupt;
    ttflag = 1;
    Enable interrupt;
}
```

2.2 系统通信的实现

建立在 CAN 总线之上的数据传输可以根据具体的实际情况构建自己的数据交换规则, 即应用层协议。粮仓测温系统的工作包括了控制层计算机向测量单元发送控制命令、参数设置及测量单元根据命令进行温度转换和上传温度数据。因此, 本系统的控制层计算机和测量单元的微控制器间的通信采用主从结构, 控制层计算机为主站, 测量单元为从站。从站不主动发送数据, 只有接到主站的命令后才根据命令进行温度转换或上传温度数据。

CAN 规范的帧格式分为标准格式与扩展格式, 且均有 4 种不同的帧类型, 本应用层协议只用到 CAN 标准帧中的数据帧。数据帧标识符的定义如表 3 所示。

表 3 数据帧标识符的定义

ID10 ID9	ID8 ID7 ID6 ID5 ID4 ID3 ID2 ID1 ID0
帧类型	从站地址

帧类型定义如表 4 所示。

主站发出的广播帧优先级最高, 其从站地址可忽略, 用于向所有的测量单元发送相同的操作命令, 如相同的温度采样间隔时间设置命令等。

表 4 帧类型定义

ID10 ID9	描述
00	主站发出的广播帧
01	主站发出的命令帧
10	从站发出的数据帧
11	从站发出的状态帧

从站地址标识了不同的测量单元，每个测量单元分配一个从站地址。主站可依次给每个测量单元发送上传数据命令，从而得到测量单位的数据。

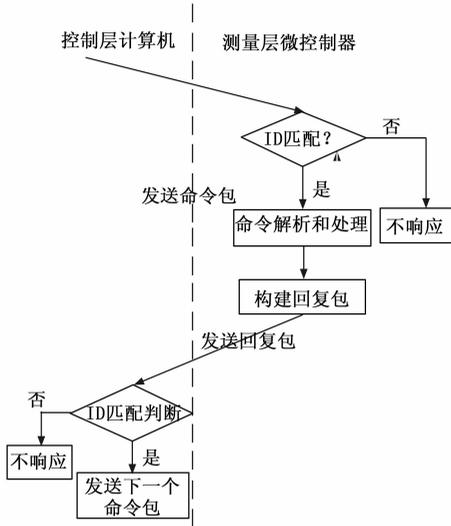


图 6 通信流程

测量单元作为被动通信方，只接收处理并回复控制层计算机发送的命令包，而不主动向控制层计算机发送命令。通信流程如图 6 所示。控制层计算机向测量层控制器发送命令包，测量层控制器判断 ID 是否匹配，若不匹配择不做任何响应，若匹配，则进行命令包的解析和处理，并构建回复包后发送回控制层，控制层也要进行 ID 匹配的判断，若不匹配，则不做任何响应，若匹配，则再继续发送下一个命令包。

2.3 主程序设计

系统启动后，程序进行初始化，包括了 CPU 的初始化和系统工作参数的初始化，如温度测量间隔、温度测量精度等初始化为系统默认值，以及识别每个 IO 口上的 DS18B20，完成后程序一直处于接收状态。上位机下发给下位机的命令主要包括：温度测量间隔设置命令、温度测量精度设置命令、温度单次测量命令、传感器识别命令、温度连续测量命令、读取温度命令等，下位机接受到上位机的命令后，要对命令进行相应的识别，并在识别后执行该命令，上传回复包。主程序的软件流程如图 7 所示。

3 实验结果分析

为了验证该系统温度采集的可靠性和准确性，设计了采集单元数据采集试验、CAN 通讯试验和对该系统在室温

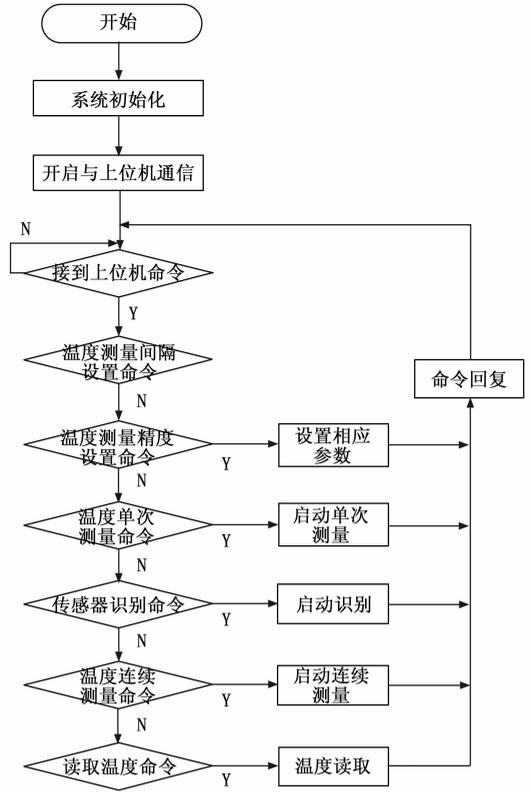


图 7 主程序流程图

下进行了温度采集的准确性实验。

3.1 采集单元数据采集试验

首先利用仿真器使得采集单元的 MCU 在仿真下运行，可指定对每个 IO 上的一个 DS18B20 进行温度读取和温度转换。同时利用逻辑分析仪采集该 IO 线上的数据，把获得的数据与 MCU 软件中发出的数据进行比较，如果一致则证明该 IO 线上的温度转换操作正确，否则说明软硬件存在问题。通过这种方法，验证了采集单元采集温度是正确的、可行的。

3.2 CAN 通讯试验

为了验证 CAN 通信的可行性和可靠性，利用 CAN-Scope-Pro 型 CAN 分析仪对 CAN 通信的物理层、数据链路层和应用层进行了验证。物理层主要验证节点及系统在电路设计、物理电平特性等方面的性能，这是保证节点能够正确接入总线的基础。数据链路层测试包括了位定时测试、采样点测试、SJW 测试等，各个节点中这些参数保持一致才能使网络正常有效的工作。应用层测试用于验证应用层协议运行正确与否。通过试验测试验证了系统网络工作稳定可靠。

3.3 温度采集的准确性实验

实验时先将测温系统放到实验台上，开机十分钟后开始测量，每 5s 测量读出一温度值，测量精度设置为 12 位。实验中用标准水银温度计检测室温并用配套的读数装置读出水银温度计的指示温度，每 10s 读出记录一次。实验结果如表 5 所示。

表 5 实验测量值 ℃

测温点	测量值	对照值	偏差值
1	22.5	22.5	0
2	22.3	22.5	-0.2
3	22.2	22.5	-0.3
4	22.5	22.5	0
5	22.4	22.5	-0.1
6	22.5	22.5	0
7	22.4	22.5	-0.1
8	22.3	22.5	-0.2
9	22.5	22.5	0
10	22.2	22.5	-0.3

由表可知, 系统能够可靠的测量到各温度点的温度值, 且最大偏差小于 0.3, 系统测温方案的可靠性较强。

4 结束语

通过电子测温设备对粮仓储存粮食的温度情况进行检测, 可有效提高粮库的工作效率和管理质量, 文章充分利用 CAN 总线高性能、高可靠性传输数据的性能, 利用 DS18B20 作为温度传感器, 设计了一款粮仓测温系统, 系统分为测量层和控制层两部分, 并通过 CAN 总线连接, 实现了现场布线的简化和数据的远距离传输。实验结果表明, 该测量系统测量结果可保持在 0.3 的偏差范围内, 验证了系统测温方案的可靠性, 可较好的应用于粮仓的测温中。

参考文献:

[1] 杨盛泉, 刘海泉, 刘白林. ZigBee 与 RS485 混合网络的粮情监控系统的设计 [J]. 西安工业大学学报, 2016, 36 (9): 749 - 756.

(上接第 25 页)

需要反复进行阈值调整, 而本文的方法可以依据随机森林预测每个点是角点的概率, 选取概率最大的点作为角点, 不会存在角点集群问题。

3) 传统的特征点检测算法只能进行像素级角点提取, 欲进行亚像素级角点提取, 则会根据梯度等信息来对角点及邻近角点进行插值或者最小二乘拟合, 本文则直接充分利用机器学习的预测的概率来进行加权求取, 更加简单和直观, 具备良好的可解释性。

通过一系列的研究和改进, 精确的将像素坐标转化为三维世界坐标, 从而利用点的三维世界坐标来实现三维测量。

参考文献:

[1] 全燕鸣, 黎淑梅, 麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量 [J]. 光学精密工程, 2013, 21 (4): 1054 - 1061.
 [2] 朱先锋. 基于双目视觉的工件尺寸三维测量 [D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.

[2] 姜 辉, 甄 彤, 王 锋. 基于 ARM/ZigBee 的远程粮情监控系统的研究与设计 [J]. 中国农机化学报, 2015, 36 (2): 99.
 [3] 张海峰, 李艳亮, 李雅娟. 基于物联网技术的粮仓智能监控系统建设研究 [J]. 现代化农业, 2018, 1: 71 - 72.
 [4] 陈冠男. 声学法仓储粮食温度测量关键技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
 [5] 阚晓婷, 刘智超, 赵世萍. 浅谈大型粮仓内温度监测技术的类型与应用 [J]. 电子世界, 2015, 9: 184 - 185.
 [6] 胡俊辉, 黎洪生. 基于 STM32 的粮仓温湿度无线监控网络系统设计 [J]. 数码设计, 2017, 8: 1 - 3.
 [7] 张元良, 何希平, 张敏, 王金龙. 具有故障自诊断的粮仓温湿度监控系统 [J]. 机械工程与自动化. 2017, 6: 166 - 169.
 [8] 王明志, 马忠宝. 无线大型粮库温度监控系统 [J]. 机械设计与制造, 2008, 9: 41 - 43.
 [9] 刘雪梅, 李建勇, 宋孟华. 基于无线通信的粮仓温湿度监测系统的设计 [J]. 机电信息, 2017, 27: 124 - 125.
 [10] 吴海滨. 基于单片机控制的粮仓测温及通风系统设计 [J]. 电子测试, 2016, 13: 28 - 29.
 [11] 赵懿琨, 李长友, 卿艳梅, 麦智炜. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的粮仓多点温湿度无线采集系统的设计与测试 [J]. 华南农业大学学报, 2015, 36 (2): 95 - 99.
 [12] 金晓龙. 基于 Zigbee 的粮仓无线测温系统的设计 [J]. 测控技术, 2011, 30 (10): 44 - 47.
 [13] 王高, 刘少聪, 闻强, 赵辉, 赵宇. 基于光谱线性频移的粮仓温度网络监测系统的设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33 (4): 1146 - 1150.
 [13] 王红旗, 李 辉, 陶 慧. 基于 CAN 现场总线的智能温度采集模块的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (1): 125 - 127.
 [14] 许松南. 基于 STM32 和 CAN 总线的双通道正弦信号发生器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22: 627 - 629.
 [3] 田小超, 李忠科. 双平面法标定的双目视觉三维测量系统 [J]. 光电与控制, 2015, 22 (3): 54 - 57.
 [4] 董丽霞. 基于双目视觉的三维尺寸测量方法研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
 [5] 肖永强, 王海晖, 刘奥丽, 等. 双目实时目标三维测量实现方法的研究 [J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38 (4): 387 - 388.
 [6] 张广军. 视觉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
 [7] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330 - 1334.
 [8] 汤兴黎. 水下摄像机标定与测量算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
 [9] 王 茜. 车辆识别系统中的背景去除算法研究 [J]. 装备制造技术, 2009 (12): 43 - 44.
 [10] 党永芳. 基于分层随机森林的面部特征点检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
 [11] 耿英楠. 立体匹配技术的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.