

翁连娟,蔡冲,陈锡爱,等. 基于 ZigBee 技术的桑园环境监控系统[J]. 江苏农业科学,2019,47(3):198-202.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.048

# 基于 ZigBee 技术的桑园环境监控系统

翁连娟<sup>1</sup>, 蔡冲<sup>1</sup>, 陈锡爱<sup>2</sup>, 姜建中<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学生命科学学院/浙江省生物计量及检验检疫技术重点实验室, 浙江杭州 310018;

2. 中国计量大学机电学院, 浙江杭州 310018)

**摘要:**桑树在食用、生态、药用等方面都有很高的价值,为能使桑树达到高产高质,必须要精确地检测和综合地调控桑树生长环境。设计一套基于 ZigBee 技术的环境监控系统,以 CC2530 作为主控芯片完成桑园环境信息的采集、处理和无线传输,传输到 PC 机上后通过上位机来显示实时信息并完成数据的存储。该系统以 IAR Embedded Workbench 作为开发平台编写 ZigBee 无线自组网、信息收集、信息传输和信息处理的 C 程序,并且通过模糊控制策略,自行开启或关闭灌溉系统和光补偿系统。结果表明,该系统功能完善、功耗低、性能稳定,可以较好地改善桑园的环境。

**关键词:**ZigBee; 桑园环境; CC2530; 监控系统; 模糊控制

**中图分类号:** S126; TP277.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0198-05

我国是世界上种桑养蚕最早的国家,桑树的栽培已有 7 000 多年的历史,桑树品种繁多,品质优良,全身都具有很好的功效,被誉为“树种之王”<sup>[1]</sup>。桑树不仅是家蚕的主要饲料,还有巨大的生态功能<sup>[2]</sup>。控制环境因子能够有效提高桑树光合效率,确保获得更大的经济利益。影响光合作用的环境因子主要有光照度、土壤水分等<sup>[3]</sup>。

随着科学技术、信息技术、网络技术的发展,现代通信技术已经在各个领域得到极为广泛的应用<sup>[4]</sup>,但是传统网络存在许多的局限性,许多特殊环境下网络难以覆盖,而无线通信技术正好解决了这一难题。目前无线传感器网络协议主要有无线局域网、超宽带通信、蓝牙、红外线数据通信及 ZigBee 技术等<sup>[5]</sup>。ZigBee 技术的无线传感网以其低成本、低功耗以及

良好的自组网特性和网络管理功能,被广泛应用于军事、智能家居、远程监控以及远程工业控制等领域<sup>[6]</sup>。

近年来,设施农业已经逐渐渗透到传统农业中,其在大棚温室中的应用已经成熟,但针对于桑园的设施农业却很少有研究。桑农思想观念落后、桑园种植规模小、对设施农业的宣传引导不够等因素制约了桑园设施化农业的发展。在这一背景下,设计一种基于 ZigBee 技术的桑园环境监控系统。该系统充分利用 ZigBee 的优点并结合桑树生长的特性,能够较良好地将桑园环境控制在适合桑树生长的环境内。

## 1 环境监控系统整体设计

本系统由数据采集、数据传输、数据处理和环境控制 4 个模块组成。该系统的核心处理器选用的是 CC2530,数据采集模块中的传感器选用的是 DHT11、5506 光敏电阻和土壤湿度检测器。ZigBee 网络包含协调器((zigbee coordinator,简称 ZC)、路由器(zigbee router,简称 ZR)、终端(zigbee endpoint,简称 ZE)3 种设备类型。协调器是整个设备的启动和控制网络。协调器存储关于网络的信息,包括作为认证中心和作为安全密钥的贮藏所。路由器可以扩展网络覆盖面,在障碍周围动态路由,并且提供备份路由以防网络拥挤和设备失败。

收稿日期:2017-11-05

基金项目:国家自然科学基金(编号:31401923);浙江省自然科学基金(编号:LY17C150003)。

作者简介:翁连娟(1993—),女,浙江衢州人,硕士研究生,研究方向为农业管理信息化。E-mail:840440837@qq.com。

通信作者:蔡冲,女,博士,副教授,研究方向为农产品质量安全控制技术。E-mail:ccjaen@cju.edu.cn。

[17] Soenen S A, Peddle D R, Hall R J, et al. Estimating aboveground forest biomass from canopy reflectance model inversion in mountainous terrain[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1325-1337.

[18] Gianquinto G, Orsini F, Fecondini M, et al. A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(3): 135-143.

[19] 王磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于 GreenSeeker 的冬小麦 NDVI 分析与产量估算[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 747-753.

[20] 冯美臣, 杨武德. 不同株型品种冬小麦 NDVI 变化特征及产量分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 87-92.

[21] 高中灵, 徐新刚, 王纪华, 等. 基于时间序列 NDVI 相似性分析的

棉花估产[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 148-153.

[22] 李新伟, 余炳凤, 吕新, 等. 不同氮水平下棉花冠层 NDVI 分析与产量估测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 231-236.

[23] 温鹏飞, 朱鹏, 张强, 等. 不同水氮耦合条件下棉花冠层 NDVI 分析与产量估算[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(1): 33-38.

[24] 高学慧, 黄淑娥, 颜流水, 等. 基于 MODIS 遥感资料的江西省双季早稻估产研究[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(2): 290-295.

[25] 范莉, 罗擎擎. 基于 MODIS-NDVI 的水稻遥感估产——以重庆三峡库区为例[J]. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1416-1419.

[26] 李志鹏, 刘珍环, 李正国, 等. 水稻空间分布遥感提取研究进展与展望[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(6): 9-18.

终端设备有发送或接收 1 个信息的作用,但是不执行任何路由操作,它们必须被连接到 1 个协调器或者 1 个路由器,终端设备不支持子设备。本系统设有 3 个终端节点和 1 个协调器,协调器同时收集 3 个终端节点采集到的环境信息,整理好以后通过串口传到电脑上。ZigBee 作为一种无线网络技术,有距离短、功耗低、数据传输速率低的特点,它可以形成星型、树型、网状等 3 种 zigbee 网络。本系统选取最为简单的星型拓扑形式来作为该系统的网络结构,即终端设备和协调器之间进行直接通讯。数据处理模块主要包括数据显示、数据存储。环境控制模块主要是桑园灌溉系统和光补偿系统(图 1)。

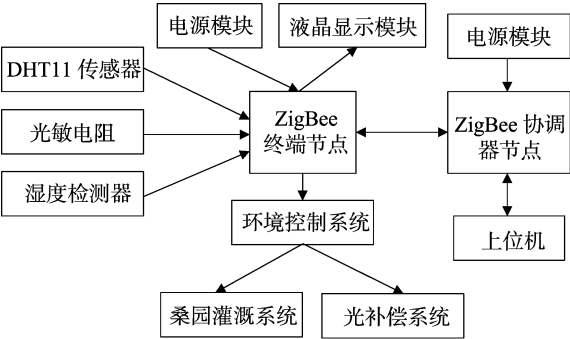


图1 环境监控系统结构

2 系统硬件设计

2.1 主控制模块

本系统选用 CC2530 作为核心处理器,CC2530 是 TI 公司在 2.4 GHz 频段推出的第 2 代支持 IEEE 802.15.4 和 RF4CE 的片上系统<sup>[7]</sup>。该芯片的工作频率范围是 2 400 ~ 2 483.6 MHz,支持数据传输到 250 kb/s,其内部集成 51 控制器、射频收发器,具有低功耗、节点设计简单、功能强等特点<sup>[8]</sup>。CC2530 有 16 个信道可供选择,完美支持 z-stack 2007Pro 协议栈,具有多种模式选择,完全符合该系统需求。

2.2 传感器的选择

2.2.1 温湿度传感器 本系统选用一款含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器 DHT11。DHT11 传感器包括 1 个电阻式感湿元件和 1 个 NTC 测温元件,并与 1 个高性能 8 位单片机相连接。因此,该产品具有品质卓越、超快响应、抗干扰能力强、性价比极高、体积超小、功耗极低<sup>[9]</sup>、信号传输距离可达 20 m 以上等优点,使其成为各类应用甚至最为苛刻

的应用场合的最佳选择。

2.2.2 光敏电阻 本系统选用的光敏电阻为 5506 光敏电阻。该电阻是一种由半导体材料制成的电阻,其导电率随着光照度的变化而变化(光线强阻值变弱,光线弱阻值变强)。5506 光敏电阻具有反应速度快、体积小、灵敏度高、可靠性好等特点,被广泛应用于各种光控设备中<sup>[10]</sup>。

2.2.3 LM393 本系统选用以 LM393 电压比较器做成的湿度检测器来测量土壤湿度。该检测器表面采用镀镍处理,有加宽的感应面积,可以提高导电性能,防止接触土壤容易生锈的问题,延长使用寿命。该检测器结构简单、使用寿命长、灵敏度高,很适合用于本系统中。湿度检测器的内部结构如图 2 所示。

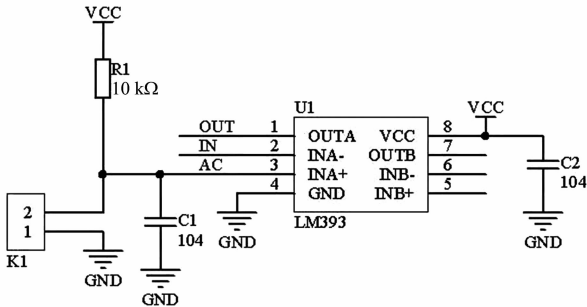


图2 湿度检测器内部结构

2.3 ZigBee 协调器节点的硬件设计

协调器主要负责启动和配置网络,这些完成后相当于路由器,协助网络内的终端节点和 PC 机相互通信。为方便起见,本系统直接采用 PC 机对协调器进行供电。协调器和终端节点在硬件上基本相同,只是协调器不需要传感器节点和继电器等电路,而终端节点大多时候都会有这些电路模块。协调器硬件结构如图 3 所示。

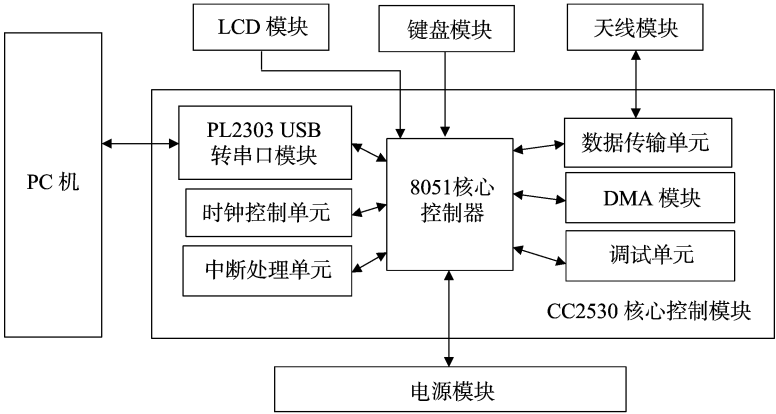


图3 协调器硬件结构

## 2.4 ZigBee 终端节点的硬件设计

ZigBee 技术是一种具有低功耗、低成本、安全可靠、时延短、自动组网能力强等特点的无线通信技术<sup>[11]</sup>。本系统终端节点由电源模块、串口电路、CC2530 芯片、天线、仿真模块、键盘模块、环境控制模块组成,其主要作用是获得桑园中的各种环境信息。环境信息由上述 3 种传感器获得,并通过 ZigBee 无线网络将有效信息发送到协调器中。在终端节点中光敏电阻、温湿度传感器、土壤湿度检测器与 CC2530 主控芯片的硬件接口分别为 P0.5、P0.7、P0.6。另外,ZigBee 终端上还连有液晶显示屏,用于显示实时的环境信息。本设计使用 OLED12864 液晶显示屏,该显示屏制造工艺简单、成本低、能耗低、低温特性好、显示屏更大,而且该显示屏可以自身发光,有利于使用者在夜间观察,很适合用于本系统中。此外,在本系统中,每个终端节点均带有一套环境控制装置,当终端节点接收到协调器发出的开启环境控制装置的命令时,开启灌溉装置或光补偿装置。

## 3 系统软件设计

系统软件设计包括 ZigBee 网络中终端设备与协调器设备的软件设计、上位机监控软件的设计 2 个部分。本系统软件是基于 TI 公司的 Z-Stack 协议栈开发的。Z-Stack 实质上就是一套 ZigBee 系统程序,是 TI 公司为自己的开发板量身定做的,提供了符合 ZigBee2007 协议栈体系结构所要求每层操作相关的各种事件处理函数和 1 个名为操作系统抽象层 OSAL 的协议栈调度程序<sup>[12]</sup>。ZigBee 终端和协调器共同的协议栈相同,不同的地方通过 #ifdef 来选择编译。Z-Stack 的 main() 函数做 2 件事:(1) 系统初始化;(2) 开始执行轮转查询式操作系统。Main() 函数在一开始关闭所有中断,然后进行一系列的硬件初始化,之后调用 osal\_init\_system() 函数对操作系统进行初始化。在 osal\_init\_system() 函数中最重要的是任务初始化函数 osalInitTasks(), 在该函数中又进行一系列的任务初始化,最后进行用户创建的任务初始化 SampleAPP\_Init(taskID)。在一系列的初始化完成以后,main() 函数最后调用 osal\_start\_system() 函数执行操作系统,并不再返回。如下程序为 main() 函数的程序。

```
int main( void)
{
    osal_int_disable( INTS_ALL ); //关闭所有中断
    HAL_BOARD_INIT(); //初始化系统时钟
    zmain_vdd_check(); //检查芯片电压是否正常
    ..... //一系列的硬件初始化
    osal_init_system(); //操作系统初始化
    osal_int_enable( INTS_ALL ); //使能全部中断
    InitBoard( OB_READY ); //最终板载初始化
    zmain_dev_info(); //显示设备信息
#ifdef LCD_SUPPORTED
    zmain_lcd_init();
#endif
#ifdef WDT_IN_PM1
    WatchDogEnable( WDTIMX );
#endif
    osal_start_system(); //正式开始执行操作系统,进入
```

后不再返回

```
return 0;
```

```
}
```

## 3.1 ZigBee 协调器节点的软件设计

协调器节点是 ZigBee 网络的第 1 个开始的设备,或者是 1 个 ZigBee 网络的启动或建设设备。协调器工作的主要流程结构如图 4 所示。上电之后,首先进行 CC2530 和协议栈的初始化,然后协调器节点会尝试建立网络,并指定该网络的 ID 号。建立网络的 2 个主要步骤是网络初始化和节点加入网络<sup>[13]</sup>。

网络初始化首先要确定网络协调器,协调器节点通过调用 NLME\_NetworkFormationRequest() 函数请求组建 1 个新网络并允许自己成为该网络的协调器,若该节点没有加入到其他网络中并且具有协调器功能,则进行下一步信道扫描工作,扫描 1 个合适的信道并为新网络配置网络参数,然后网络层管理实体通过 MLME\_START.request 原语通知 MAC 层启动并运行新网络,至此,网络初始化基本完成。

1 个节点加入网络有 2 种方法:(1) 通过使用 MAC 层关联进程加入网络;(2) 通过与先前指定父节点连接而加入网络。本系统的终端节点是通过使用 MAC 层关联进程加入网络的。首先,终端节点通过 NLME\_NETWORK\_DISCOVERY.request 原语发起加入网络的进程,网络层接收到这个请求后进行信道扫描来搜索周围是否存在协调器,若周围有协调器的存在,网络层管理实体发送 1 个 MLME\_ASSOCIATE.request 原语到 MAC 层,地址参数设置为该协调器的地址,尝试加入网络。协调器通过 MLME\_ASSOCIATE.indication 原语通知网络层管理实体 1 个节点正尝试加入网络,如果协调器的地址资源足够,它就会同意该节点加入网络并给该节点分配 1 个 16 位的短地址,至此终端节点和协调器连接成功并可以相互通信(图 4)。

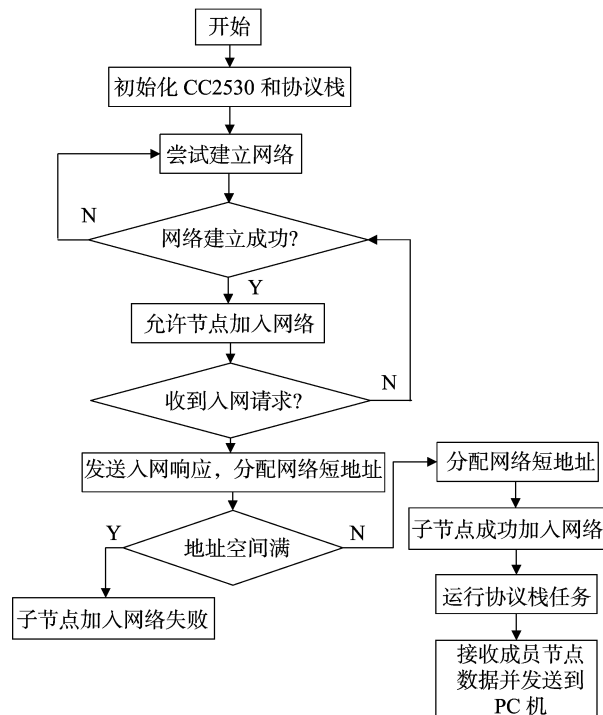


图4 协调器节点工作流程

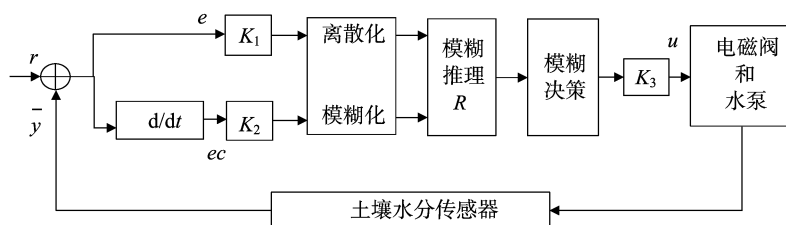
### 3.2 ZigBee 终端节点的软件设计

本系统的终端节点包括数据采集、环境控制等 2 个模块,环境控制模块又包括灌溉模块、光补偿模块等 2 个部分。终端节点对桑园温度、湿度、光照度信息实时采集,若是采集到的数据格式正确,终端节点则把数据打包传送给协调器,协调器处理完数据后产生相应的命令发回给终端节点。为方便采集环境信息的实时查看,每个终端节点都配有 OLED 显示屏,上面显示实时的环境信息和网络的连接状态。

土壤湿度处于 50% ~ 60% 时,桑树叶净光合速率高于其他的湿度范围,且光量子通量密度在  $500 \sim 2\,000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  范围内,桑树叶净光合速率维持在较高值,且没有光抑制现象。影响桑树净光合速率的主导因子由土壤湿度过渡到光照度,土壤湿度的临界值为 51.17%<sup>[3]</sup>。桑园光补偿过程:在指定时间区域内,桑园光量子通量密度低于  $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,开启光补偿装置,光量子通量密度高于  $1\,000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

时,光补偿装置关闭。由于桑树吸收水分的根系主要分布在地表以下 20 ~ 40 cm 深处,地表灌溉水需要经过较长时间才能渗透到桑树吸收水分根系的主要分布区,导致灌溉系统产生一定的时滞,所以停止灌溉时不能用简单的阈值分析来控制灌溉系统。为解决桑园控制环境具有大惯性、非线性和时延且很难建立精确的数学模型的特点<sup>[14]</sup>,本设计采用模糊控制的原理作为灌溉系统的理论基础。

该模糊控制器为双输入单输出的模糊控制器,其输入变量为土壤水分的误差  $e$  和误差变化率  $ec$ ,输出变量为灌溉时间长度  $u$ 。模糊控制系统的操作流程是先将输入变量模糊化,在此将输入变量  $e$  模糊化结果记为  $E$ ,将  $ec$  模糊化结果记为  $EC$ 。接着根据  $E$ 、 $EC$  及模糊控制规则  $R$ ,按模糊推理合成规则计算控制量,再通过清晰化算法将输出量反模糊,得到精确的控制量  $u$ ,根据控制量  $u$  来判定电磁阀和水泵的开闭时间。模糊控制系统框如图 5 所示。



“ $r$ ”表示最适合桑树生长的土壤水分;“ $y$ ”表示当前实际的土壤水分

图5 模糊控制系统框架

### 3.3 上位机软件设计

本设计以 Visual studio 2013 软件作为上位机软件的开发平台。该上位机软件可以实时显示每个节点的温度、湿度、光照度,并将环境信息以曲线图的形式显示出来,所有采集到的环境信息均能存储到 Access 中。此外,上位机还可以显示灌溉系统或光补偿系统的开启时长,并且上位机有按钮,可以直接在上位机上操作,进行环境控制系统的开启与关闭。

上位机软件采用定时器的方式来读取串口数据,设定 timer4 的定时器间隔为 100 ms,即每 100 ms 调用 1 次定时器。在定时器函数中读取并处理串口数据,使环境数据显示到相应的 textbox 空间当中。上位机程序流程如图 6 所示。

## 4 测试结果

测试 3 个终端节点和 1 个协调器的桑园环境监控系统,该系统的协调器直接用数据线连接在 PC 机上,终端节点均匀地分散在桑园中。在给终端上电之前先给协调器上电,上电后协调器 D3 是长亮的,终端上电后 D1 闪烁,入网成功后 D3 常亮,入网成功后按下终端 S1 键开始上传数据。打开上位机,将波特率改成与协调器程序相对应的波特率并打开串口,设置上位机更新数据的速率,可以监测到桑园的环境信息,图 7 为上位机接收到的 1 号终端数据生成的温湿度曲线。

## 5 结论

本研究设计 1 种基于 ZigBee 技术的桑园环境监控系统,充分利用 ZigBee 无线技术的低功耗、低复杂度、可靠性高等优点,结合桑树生长特性,成功实现对桑园土壤水分和光照度

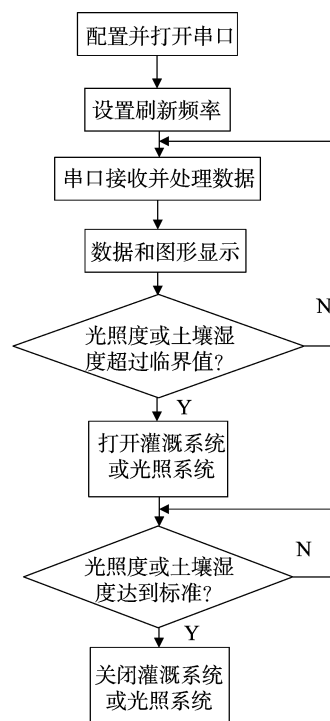


图6 上位机程序流程

的控制。现场实际测试结果表明,本系统能很好地采集桑园的温度、湿度、光照度等环境信息,并将其上传到上位机中,以使用户实时查看。根据采集到的环境信息,CC2530 芯片通过模糊控制的理论基础进行分析后,系统能很好地控制灌溉系统和光补偿系统,使桑树能够处于适合于其生长的环境当中。

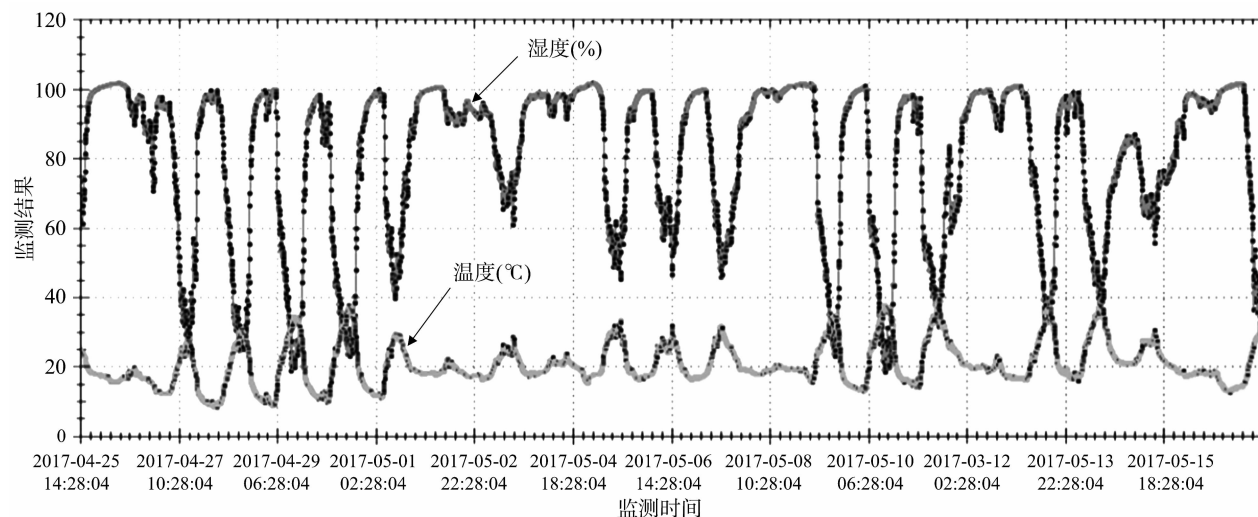


图7 温湿度曲线

## 参考文献:

- [1] 王钰婷,李瑞雪,夏家凤,等. 桑树的经济价值及其在生态保护中的应用[J]. 中国市场,2017(11):239-240.
- [2] 吴海平,周金钱. 蚕桑产业的生态价值[J]. 蚕桑通报,2015,46(1):1-4.
- [3] 耿悦,杨重法,王颖. 桑树光合速率对土壤水分和光照强度的响应[J]. 热带生物学报,2015,6(4):403-407.
- [4] 程坤,朱勇,赵剑楠,等. 基于 PIC 单片机的无线数据传输系统设计[J]. 无线电通信技术,2016,42(5):35-37.
- [5] 余向阳. 无线传感器网络研究综述[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2008(8):8-12.
- [6] 邓然,朱勇,詹念,等. 基于 ZigBee 技术的温湿度数据采集系统设计[J]. 无线电通信技术,2017,43(3):81-84.
- [7] 余欢,王运圣,徐识溥,等. 基于 ZigBee 技术的葡萄温室环境数据采集系统研究[J]. 上海农业学报,2016,32(1):72-75.
- [8] 章伟聪,俞新武,李忠成. 基于 CC2530 及 ZigBee 协议栈设计无线网络传感器节点[J]. 计算机系统应用,2011,20(7):184-187,120.
- [9] 徐文文. 基于 STM32 的无线网络数据采集系统设计及应用[J]. 机电信息,2015(33):130-131.
- [10] 何乾伟,张钰,赵莹. 光敏电阻频率特性测定实验及分析[J]. 科技创新与应用,2015(24):183.
- [11] 胡培金,江挺,赵燕东. 基于 zigbee 无线网络的土壤墒情监控系统[J]. 农业工程学报,2011,27(4):230-234.
- [12] 李建勇,李洋,刘雪梅. 基于 ZigBee 的粮库环境监控系统设计[J]. 电子技术应用,2016,42(1):65-67,71.
- [13] 郝晓萌. 基于 ZigBee 的无线粮情监测系统中路由协议的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2009.
- [14] 郭正琴,王一鸣,杨卫中,等. 基于模糊控制的智能灌溉控制系统[J]. 农机化研究,2006(12):103-105,108.
- [15] 于守超,张秀省,冀芦莎. 基于 Photoshop CS5 的植物叶面积测定方法[J]. 湖北农业科学,2012,51(15):3340-3342.
- [16] 李震,洪添胜,吴伟斌,等. 植物多叶片图像目标识别和叶面积测量方法[J]. 华南农业大学学报,2007,28(3):105-109.
- [17] 陈爱军,李东升,董光辉. 一种基于 MATLAB 的植物叶片参数测量系统[J]. 中国计量学院学报,2010,21(4):310-313.
- [18] 王静,张清泉,杨培林. 基于数字图像处理的植物叶片面积测量方法研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2014,28(3):49-52.
- [19] 廖士中,高培焕,苏艺,等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法[J]. 中国图象图形学报,2000,5(7):57-60.
- [20] 马丽华,梁志毅,郑宏志. 一种显示器投影成象系统的彩色图像几何畸变校正方法[J]. 光子学报,2001,30(5):624-627.

(上接第 192 页)

- [1] 比较研究[J]. 中国农学通报,2013,29(19):193-197.
- [2] 张新平,董洁,张芳芳,等. 几种常用的树木叶面积测量方法比较[J]. 中国城市林业,2016,14(2):38-42.
- [3] 左欣,韩斌,程嘉林. 基于数字图像处理的植物叶面积测量方法[J]. 计算机工程与应用,2006,42(27):194-196+221.
- [4] 冯冬霞,施生锦. 叶面积测定方法的研究效果初报[J]. 中国农学通报,2005,21(6):150-152,155.
- [5] 宫志宏,薛庆禹,于红,等. 基于数字照片解析的黄瓜叶片面积测定及效果分析[J]. 中国农学通报,2015,31(23):230-234.
- [6] 张全法,何金田,陈渝仁. 提高植物叶片面积测量精度的方法[J]. 河南农业大学学报,2002,36(1):91-95.
- [7] 杨劲峰,陈清,韩晓日,等. 数字图像处理技术在蔬菜叶面积测量中的应用[J]. 农业工程学报,2002,18(4):155-158.