

基于 ZigBee 的蔬菜大棚自动灌溉系统设计

杨帆^{1,2}, 黄吴漾¹

(1. 武汉工程大学 电气信息学院, 武汉 430073;

2. 湖北省视频图像与高清投影工程技术研究中心, 武汉 430073)

摘要: 针对蔬菜大棚内传统的有线灌溉方式布线困难, 对各作物的控制效率较低等问题, 设计了基于 ZigBee 无线技术的蔬菜大棚自动灌溉系统; 系统由终端节点、协调器节点、WiFi 模块以及上位机构成, 使用 CC2530 芯片作为主控芯片, 通过 ZigBee 网络将多个终端节点与协调器节点进行无线通讯, 以 RTL8710 作为 WiFi 通讯芯片将数据上传至上位机, 于上位机实时显示数据和图像曲线; 设计了一种模糊控制和 PID 控制器的复合切换控制算法, 根据采集的温湿度和光照强度, 计算得到灌溉的需求量, 从而对不同成长情况的作物, 实现更好的控制灌溉效果; 通过测试, 在 80 m 距离内保持通讯稳定, 采用复合控制方法的稳态误差率不超过 0.6%, 整个系统运行正常且控制性能优良, 具有实际应用价值。

关键词: ZigBee; 自动灌溉; 无线通信; 复合控制

Design of Greenhouse Automatic Irrigation System Based on ZigBee

Yang Fan^{1,2}, Huang Wuyang¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Hubei Video and HD projection Engineering Technology Research Center, Wuhan 430073, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of traditional wired control methods in greenhouses, and low control efficiency of various crops. A greenhouse automatic irrigation system based on ZigBee wireless technology was designed. The system consist of terminal node, coordinator node, Wifi module and upper computer. The CC2530 chip was used as the main control chip, multiple terminal nodes and coordinator node were wireless communicated through the ZigBee network, and the data was uploaded to the WiFi communication chip by the RTL8710. The data and image curve was displayed by upper computer in real time. A composite switching control algorithm based on fuzzy control and PID controller was designed, the demand for irrigation was calculated based on the collected temperature and humidity and light intensity, the better control of irrigation effect for crops with different growth conditions was achieved. Through the test, the communication was stable within a distance of 80 meters, the steady-state error of the composite control method did not exceed 0.6 percent. The entire system ran normally and the control performance was excellent, which had practical application value.

Keywords: ZigBee; automatic irrigation; wireless communication; compound control

0 引言

从传统粗放生产变革到现代精准生产, 我国的农业水平正在朝着现代化不断发展, 当前的社会环境下, 国家将智慧农业设为目标, 将农业生产全面朝向信息化转变, 由此占据农业现代化的制高点^[1]。在这种条件下, 智慧园林、智慧养殖、智慧灌溉等技术应运而生, 其中蔬菜大棚的智能灌溉技术也逐渐进入到社会的视线里。

对于智能设备的多样化发展, 大多的技术也逐渐替代了传统的人工灌溉。在现有的灌溉系统中, 由于 ZigBee 技术不兼容传输控制协议/因特网互联协议 (transmission control protocol/internet protocol, TCP/IP) 无法直接连入互联网, 使其与上位机的通讯十分困难, 对大棚的监控和

管理也难以实现^[2-4]。一些系统采用全球移动通讯系统 (global system for mobile communications, GSM) 的数字通讯技术, 实现了监测和决策的集成, 但由于其成本较高, 技术还未全面推广^[5]。其他的灌溉系统研究中加入了 KcETO 等算法进行优化处理, 从而在节水灌溉方面达到完备的控制效果, 但在大棚中由于各蔬菜的成长情况不同, 因此操作的可行性较低^[6-7]。在控制灌溉方面, 当前大多系统采用 PID 的控制方法, 但在实际工业的过程中, 模型具有非线性特征, 其控制方式无法达到良好的控制性能, 对工况的适应能力较差。而模糊控制的方式能够在较远的偏离区域内也可以实现优良的控制效果, 但其本身消除系统稳态误差的性能较差, 无法达到较高的控制精度^[8-11]。因此设计了一套基于 ZigBee 技术的蔬菜大棚自动灌溉系统, 采用结合模糊控制和 PID 控制的复合切换算法, 优化系统的通讯连接和控制方式。

1 总体方案设计

系统主要包括终端节点、协调器节点、WiFi 模块以及

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2019-12-27。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51541709)。

作者简介: 杨帆(1966-), 女, 湖北公安人, 硕士, 教授, 主要从事测控技术与智能仪器仪表方向的研究。

上位机共 4 部分，系统的结构如图 1 所示。终端节点采集获得大棚内的环境数据，通过 ZigBee 网络将数据发送给协调器节点，协调器节点接收到各个终端节点发来的环境数据后，采用串口通信透传给 WiFi 模块，WiFi 模块与上位机建立 TCP 连接，将接收的数据发给远端服务器，上位机接收后实时显示管理相应的环境数据。上位机通过加入模糊控制和 PID 控制复合切换的 Fuzzy-PID 算法，根据实际情况自动切换控制模式，将采集的空气温湿度和光照强度代入分析，通过算法得到需要的灌溉量，再依照参数之间的关联，确定该作物要达到土壤湿度的最适值，控制电磁阀的启动和停止，实现对大棚内不同生长状况的作物的实时自动控制灌溉效果，进一步达到远程节水灌溉的要求。

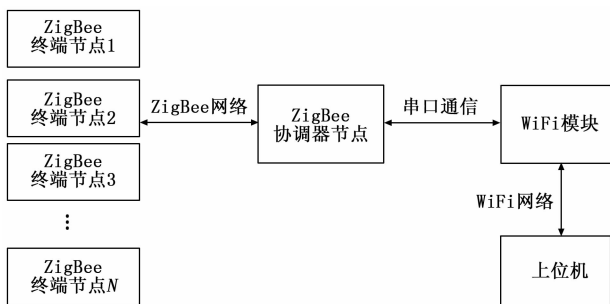


图 1 系统结构图

2 系统硬件设计

2.1 终端节点硬件设计

终端节点采用 CC2530 作为主控芯片，由电源模块、串口模块、功放模块、天线模块、显示模块、传感器模块和控制模块共同组成，其硬件结构图如图 2 所示。

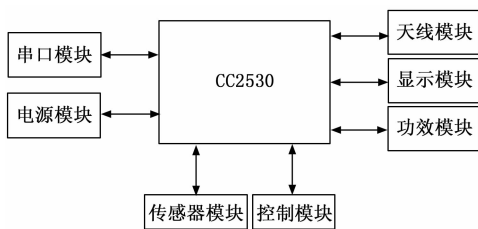


图 2 终端节点结构图

电源模块选用 AMS1117 芯片，将接入的 5 V 电压转化为 3.3 V 的固定输出电压，实现对 CC2530 芯片的实时供电。串口模块选用 CH341 芯片，实现 USB 的转接，可由 5V 输出电源为其供电，可通过串口电路对终端节点的运行参数进行设置。功放模块选用 CC2591 芯片，加入巴伦电路将 CC2530 和 CC2591 相连，提高节点的输出功率和接收灵敏度，延长其通讯范围。天线模块采用 PCB 天线与 SMA 无源全向天线的双天线模式，增强数据的传输。显示模块设置 LED 指示灯，反应节点的通信状态和工作情况。

传感器模块由空气温湿度传感器、土壤湿度传感器及

光照传感器组成。空气温湿度传感器选用 DHT11，可 3.3 V 电源供电，DATA 用于 DHT11 与 CC2530 的通讯和同步，在数据端和电源正之间接 4.7 K 的上拉电阻，提高稳定性。土壤湿度传感器选用 EC-5，输出模拟信号，反应灵敏，可靠性高。光照传感器选用 ISL29020，其功耗低，低光照条件下的灵敏度高。

控制模块采用继电器控制电磁阀的开关，从而控制对作物的灌溉。采用 SRD-24VDC-SL-C 继电器，在 CC2530 和继电器之间加入 TLP521-2 的光耦，可有效延长继电器的使用寿命。

2.2 协调器节点硬件设计

协调器节点硬件构成与终端节点基本相同，其结构图如图 3 所示。增加复位模块，复位电路与 RESET 引脚相连，通过按键使得 CC2530 能及时复位，防止工作过久系统出现问题。

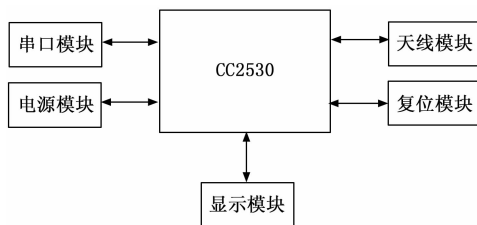


图 3 协调器节点结构图

在串口模块设置了跳线，通过拨动开关对协调器进行设置，原理图如图 4 所示。开关在上部是将 CH341 与 WiFi 模块相连，实现上位机对 WiFi 模块的设置；开关在中部是将 CC2530 与 WiFi 模块相连，实现 CC2530 和 WiFi 模块之间的通信和数据接收；开关在下部是将 CC2530 与 CH341 相连，实现上位机对 CC2530 的设置。通常将开关拨到中部使得系统可以正常工作。

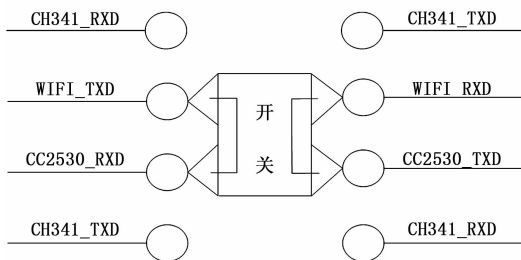


图 4 串口跳线原理图

2.3 WiFi 模块硬件设计

WiFi 模块选用 RTL8710 芯片，内置 TCP/IP 协议栈，支持 802.11 b/g/n 2.4GHz 协议，由电源模块、串口模块、天线模块和显示模块共同组成，其硬件结构图如图 5 所示。电源模块选用 AMS1117，提供 3.3V 的供电。串口模块选用 CH341，用来转接 USB 接口。天线模块采用 SMA 无源全向天线，增强信号的接收。显示模块设置 LED 灯显示 WiFi 模块的工作状态。

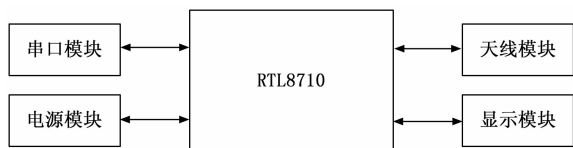


图 5 WiFi 模块结构图

3 系统软件设计

3.1 终端节点软件设计

终端节点首先对串口进行初始化, 检查网络参数的设置, 若未检测到相应参数, 则需等待串口发送命令, 对其进行设置。然后侦听是否存在 ZigBee 网络, 当搜索到网络存在时, 则发送请求加入 ZigBee 网络, 若加入网络未能成功, 则等待 1 s 后重新搜索网络, 发送入网请求。成功加入网络后, 触发事件启动定时器设置为 5 s, 到达时间后, 终端节点开始进行数据的采集, 之后将节点的 ID 号和数据打包, 通过调用函数将数据包发送给协调器节点。终端节点的程序流程如图 6 所示。

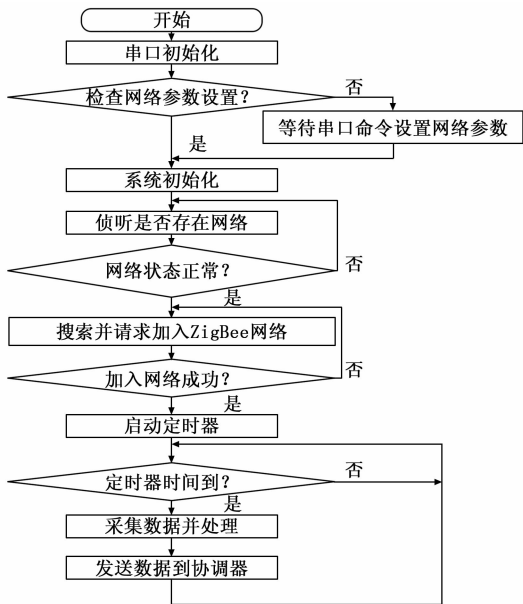


图 6 终端节点程序流程图

3.2 协调器节点软件设计

协调器节点首先对串口进行初始化操作, 检查网络参数的设置, 若未检测到相应参数, 则需等待串口发送命令, 对其进行设置。然后进行信道的扫描, 扫描出通信范围内的网络信息, 选择合适的信道和 ID, 建立起一个新的 ZigBee 网络, 保持监听状态, 允许其他节点加入网络并为其分配节点地址。当终端节点成功加入网络后, 协调器从串口接收上位机命令, 并将命令发送给终端节点, 传感器接收到相应指令后进入工作状态, 开始采集数据, 并将数据发送给协调器节点。协调器节点成功接收到数据后, 对数据进行判断处理, 获取出对应的终端节点和数据, 通过串口透传给 WiFi 模块。若未能成功接收数据, 则等待 1 s 后重

新进行数据接收。协调器节点程序流程如图 7 所示。

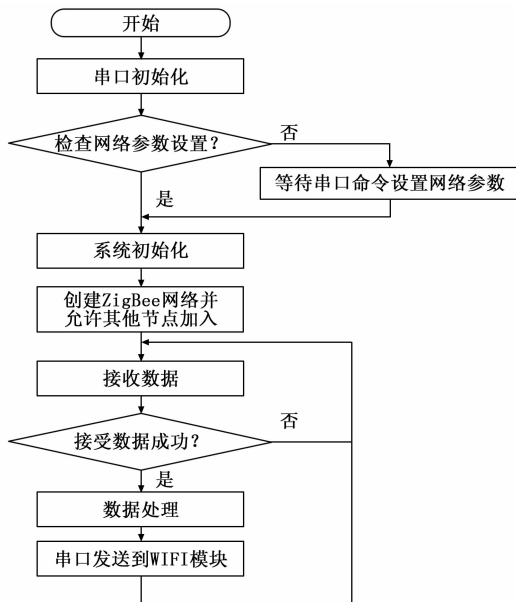


图 7 协调器节点程序流程图

3.3 WiFi 模块软件设计

WiFi 模块是实现 WiFi 和 ZigBee 网络之间的转换, 首先初始化串口, 检查参数的设置, 然后寻找到 WiFi 网络并成功加入, 创建用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 端口, 通过连接 TCP 服务器, 将协调器节点接收的数据上传至上位机。

根据网络服务动态发现 (Web Services Dynamic Discovery, WS_Discovery) 协议, 采用 Ad_Hoc 模式实现服务发现功能, 在网络范围内通过广播发送探测消息, 依据信息条件找到目标服务。而目标服务获取到相关的探测消息后, 对其信息进行条件判断, 满足条件则回复信息到客户端, 客户端得到信息后进行分析, 调用合适的服务运行。而软件设计将此协商流程简化, 内容转变为二进制的形式, 使得 WiFi 模块和上位机软件可自动建立 TCP 连接, 从而省去重新设置地址等操作。

首先启用 WiFi 模块, 通过找寻网络成功创建一个新的 UDP 端口。开始启用上位机, 在上线时通过 UDP 以广播的形式发送一个 Hello 消息。WiFi 模块作为接受者接收到消息后, 将自身的服务编号携带打包, 通过广播回复一个 Probe 消息给服务器。上位机在接收到 Probe 消息后, 对消息携带的相应信息进行判断处理, 若满足此 Probe 消息的条件, 则将自身携带 IP 地址和端口号打包, 回复一个探针匹配 (Probe Match, PM) 消息给 WiFi 模块。WiFi 模块确认接收到 PM 消息, 可成功连接上 TCP 服务器, 直接调用其 IP 地址。

由于 ZigBee 和 WiFi 都采用 2.4GHz 的工作频段, 在该频段上, 这两种协议之间存在信道重叠的现象, 而使用相同的频段进行通信时, 则会出现噪声干扰, 使得传输发生

冲突。因此，系统使用非协同的工作方式，WiFi 先选取 1、6、11 三个信道发送信号，然后 ZigBee 网络选择与 WiFi 信道不重叠的 11、15、20、26 信道，并设置只保留这四个信道一直通信，通过选择互不重叠的动态信道进行分配，从而避免 ZigBee 和 WiFi 同时占用相同的信道，最大程度地减小了两者之间的干扰。

3.4 上位机软件设计

上位机采用 Visual Studio 软件进行设计，界面设计包含登录界面和监控界面。通过登录界面控制由固定用户才可进行使用，保证系统的安全性。通过监控界面实时查看各节点的环境参数和图象曲线，可以根据数据采集结果提示是否需要灌溉以及灌溉的需求量，由此控制电磁阀进行灌溉，实现在满足设定条件下的自动控制。

3.5 复合切换控制器设计

对于大棚内不同生长状态的作物，从土壤湿度方面来看，通过设置上下限范围的闭环设计不能做到有效的控制。因此设计一种 Fuzzy-PID 的复合切换控制器，当系统和实际情况相比存在较小的偏差时，控制方式选用为 PID 的控制，从而减小其静态误差；而当两者之间的偏差较大时，则切换为模糊控制的方式，从而加快其响应速度。控制原理框如图 8 所示。

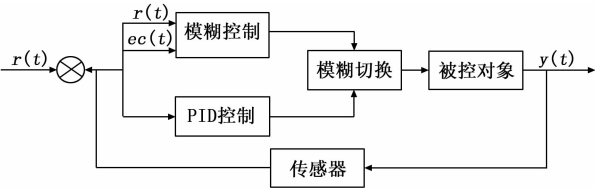


图 8 Fuzzy-PID 复合控制原理框图

在模糊控制器中，双输入变量为土壤湿度偏差 $e(t)$ 和偏差变化率 $ec(t)$ ，单输出变量为灌溉量 $u(t)$ ，设第 t 个时刻土壤湿度的实际测量值和设定值为 $H(t)$ 和 $H_d(t)$ ，则它们之间的关系为：

$$e(t) = H_d(t) - H(t) \quad (1)$$

$$ec(t) = e(t) - e(t-1) \quad (2)$$

设定 $e(t)$ 和 $ec(t)$ 的论域为 $[-30, 30]$ 和 $[-6, 6]$ ，量化论域为 $[-6, 6]$ ， $u(t)$ 的论域为 $[0, 60]$ ，量化论域为 $[0, 6]$ ，量化因子 k_j 和比例因子 k_u 关系为：

$$k_j = \frac{l_j}{x_j} \quad (3)$$

$$k_u = \frac{y_u}{n} \quad (4)$$

其中： l_j 为输入变量量化论域最大值， x_j 为输入变量论域最大值， y_u 为输出变量论域最大值， n 为输出变量量化论域最大值。根据式 (3) 得量化因子 $k_e = 0.2$ ， $k_{ec} = 1$ 。根据式 (4) 得比例因子 $k_u = 10$ 。

根据理论结果，土壤湿度偏差小于 2%RH 时，采用 PID 进行控制较好，湿度偏差超过 6%RH 时，采用模糊控

制可以达到更好的控制效果，从而采取中间形梯形隶属函数的切换算法，平稳的切换这两种控制方法。规定将复合控制器的输出设为 U_{F-P} ，模糊控制器的输出设为 U_{Fuzzy} ，PID 控制器的输出设为 U_{PID} ，切换的规则为 If e is y then U_{F-P} is U_{PID} , else U_{F-P} is U_{Fuzzy} 。得到模糊切换的隶属度函数如图 9 所示。

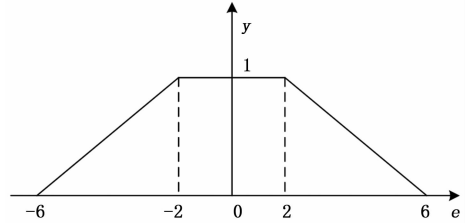


图 9 模糊切换隶属度函数

$$y(e) = \begin{cases} 0, & e < -6 \\ \frac{e - (-6)}{4}, & -6 \leq e < -2 \\ 1, & -2 \leq e \leq 2 \\ \frac{6 - e}{4}, & 2 < e \leq 6 \\ 0, & e > 6 \end{cases} \quad (5)$$

设 λ 作为 U_{PID} 的控制权重，则 $(1-\lambda)$ 为 U_{Fuzzy} 的控制权重，通过加权平均法，计算得到输出 U_{F-P} 为：

$$U_{F-P} = \lambda U_{PID} + (1-\lambda) U_{Fuzzy} \quad (6)$$

根据数学模型，设定被控对象的传递函数为：

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (7)$$

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u_0} \quad (8)$$

其中： K 为静态增益， $y(t)$ 为土壤湿度，其值根据时间变化。采用无量纲形式，取部分实验数据计算得到：

$$G(s) = \frac{76}{18s + 1} e^{-42s} \quad (9)$$

以冬季的番茄为例，给出灌溉量与各环境参数的关系为：

$$Q = 2.76306 \exp(0.006766t_1 - 0.00523h_1 + 0.030928l_1) \quad (10)$$

其中： Q 为灌溉量， t_1 为温度， h_1 为湿度， l_1 为光照强度。将式 (9) 进行拉普拉斯反变换得到：

$$y(t) = (-76) * \text{heaviside}(t - 42) * (\exp(42/18 - t/18) - 1) \quad (11)$$

将 t 设为灌溉量 Q ， $y(t)$ 设为土壤湿度 H_d ，从而实现计算的灌溉量与土壤湿度的转换。

4 系统测试与分析

系统使用 4 个终端节点分别进行丢包测试、功能测试和控制效果仿真比较。将 4 个节点分别放置在离协调器节点 20~80 m 的范围内，设置节点在 10 分钟内发送 1000 个

数据包, 发送完毕后, 分别对协调器节点和上位机的接收包进行统计, 计算得出 ZigBee 和 WiFi 网络的丢包率, 测试数据如表 1 所示。

由表 1 中测试结果显示, 在周围 80 m 的范围内, 随着距离的增加, ZigBee 的丢包率会随之提升, 但总体范围内的平均丢包率为 3%, 可以适用于大棚环境中; 而 WiFi 网络的连接比较稳定, 丢包率为 0。通过增加功放模块、天线、

表 1 网络丢包率测试

| 距离/m | 协调器接收包 | 上位机接收包 | ZigBee 丢包率/% | WiFi 丢包率/% |
|------|--------|--------|--------------|------------|
| 20 | 992 | 992 | 0.8 | 0 |
| 40 | 974 | 974 | 1.6 | 0 |
| 60 | 958 | 958 | 3.4 | 0 |
| 80 | 913 | 913 | 6.2 | 0 |

巴伦电路等硬件, 优化了系统的通讯效果, 能够在较远的距离保持稳定的通讯连接。

将 4 个终端节点放置于大棚内进行功能测试。监控界面如图 10 所示, 在监控界面中, 启动网络服务后成功建立网络连接, 选择节点 2, 点击开始数据采集, 界面实时的显示出该节点采集的各环境数据。通过采集得到的空气温度、空气湿度和光照强度, 根据式 (10) 计算出该节点中作物的灌溉需求量, 由此提示是否需要灌溉, 自动启用灌溉功能, 整个过程中系统的工作运行正常。

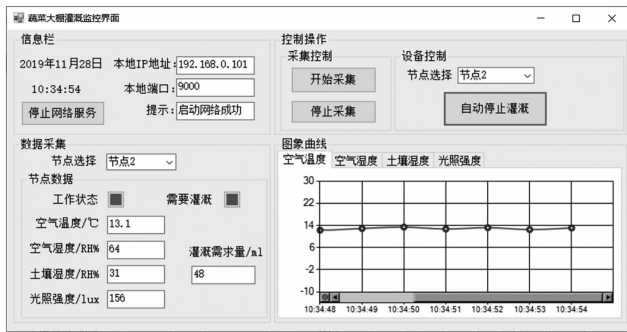


图 10 上位机监控界面

以节点 2 的数据为例, 通过算法计算得出需要的灌溉量为 48 ml, 根据式 (11) 获得对应的土壤湿度约为 33% RH 最为合适, 仿真用 3 种控制方式达到土壤湿度的最适宜, 其响应结果如图 11 所示。根据结果对比可以得出, 采用 PID 的控制方式会存在较大的超调量, 与另外两种控制方式相比, 其需要较长的时间才能达到最适宜; 采用模糊控制的方式会产生稳态误差; 而采用复合控制的效果优于其他控制方式, 系统只需较短的时间就能达到最适宜, 其控制的稳态误差不超过 0.6%, 具有更加优良的性能, 适用于蔬菜大棚的节水灌溉中。

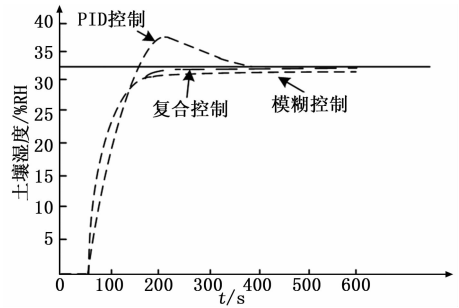


图 11 响应结果对比图

5 结束语

所设计的蔬菜大棚自动灌溉系统, 在运用 ZigBee 无线采集的基础上结合 WiFi 通讯技术, 通过硬件的优化设计提升了节点之间的通信效果, 采用非协同的工作方式解决两种通信方式的冲突问题, 设计了一种复合切换控制器, 对不同成长情况的作物进行更好的控制灌溉效果。整个系统的工作正常, 在较远的距离范围内通讯连接稳定, 成本较低且可靠性强, 在当今设备智能化发展的时代, 具备广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘育辰, 李江全, 左乾坤. 基于物联网的农田滴灌远程监控系统设计 [J]. 自动化与仪表, 2018 (04): 82 - 86.
- [2] 李 金. 基于物联网的农田灌溉系统设计 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [3] Wang S W, Zhang C L. Study on farmland irrigation remote monitoring system based on ZigBee [C]. International Conference on Computer and Computational Sciences, 2015: 193 - 197.
- [4] Bradu B, Gayet P, Niculescu S I. A process and control simulator for large scale cryogenic plants [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17 (12): 1388 - 1397.
- [5] 刘经山. 基于 GSM 数字通讯技术在自动灌溉控制中的应用 [J]. 南方农机, 2018 (04): 127.
- [6] 彭晓云, 高 亮, 王 斌. 基于 KcET0 算法的农田灌溉节水自动控制系统的的设计 [J]. 河北农业大学学报, 2015, 38 (2): 118 - 123.
- [7] 顾 群, 郝晓弘, 巨圆圆. 基于 DTW-ILC 算法的农业灌溉用水量调控方法 [J]. 农业机械学报, 2013, 44 (11): 117 - 120.
- [8] 栗岩峰, 李久生, 赵伟霞. 再生水高效安全灌溉关键理论与技术研究进展 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (6): 102 - 110.
- [9] 许童羽, 王建东, 须 晖, 等. 基于 ZigBee 与 WiFi 的北方日光温室群监控系统设计 [J]. 中国农机化学报, 2016 (1): 59 - 64.
- [10] 韩团军. 基于 WiFi 与 ZigBee 的山区农田环境监测系统研究 [J]. 现代电子技术, 2019 (2): 14 - 17.
- [11] 刘松阳, 赵全明, 范书瑞, 等. 基于扩频通信的农田自动灌溉系统设计与试验 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (23): 262 - 267.