doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.051

丘陵地区蓝莓园智能灌溉决策系统设计

沈建炜　李　林　魏新华
(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室,镇江 212013)

摘要:针对丘陵地区蓝莓园灌溉过程中水资源浪费严重、劳动力严重短缺的问题,基于物联网技术,研究并设计了一套智能灌溉决策系统。系统包括信息采集模块、无线通信模块、智能决策模块和灌溉执行模块。信息采集模块通过布设的土壤水分传感器和小型气象站实时采集蓝莓园土壤墒情信息和环境信息(风速、降雨量、温度、湿度);无线传输模块将信息采集模块采集到的数据实时发送到服务器端进行分析处理,并将智能决策模块的计算结果传送给灌溉执行模块;智能决策模块中,基于前期采集的历史数据使用彭曼公式和土壤水平衡公式建立灌溉决策模型,实现蒸腾量和灌溉量的计算以及实时监控与报警,该模型可根据实时获取的数据,确定是否需要灌溉及最优的灌溉量;灌溉执行模块根据接收到的灌溉信息及实际的灌溉速度计算灌溉时间,进行远程灌溉;以 Visual Studio 软件为平台,设计了系统上位机的监控界面,可实现土壤和环境参数的实时检测和存储、作物需水状况的分析管理以及实时预警和灌溉决策。试验结果表明,该智能灌溉决策系统可在无人干预的情况下,根据传感器采集的信息自行判断作物需水情况,当系统认为作物需要灌溉时自行驱动灌溉装置完成灌溉,从而实现蓝莓园的远程精确灌溉,节省了人力物力,有效提高了灌溉水的利用率。

关键词:蓝莓园;智能灌溉;决策模型;需水规律;远程控制
中图分类号:TP273　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)S0-0379-08

Design of Intelligent Irrigation Decision System for Blueberry Garden in Hilly Area

SHEN Jianwei　LI Lin　WEI Xinhua
(*Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology*, *Ministry of Education*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of serious waste of water resources and serious shortage of labor in the irrigation process of blueberry gardens in hilly areas, a set of intelligent irrigation decision-making system was designed based on Internet of things technology. The system included an information acquisition module, a wireless communication module, an intelligent decision module and an irrigation execution module. The information collection module collected the soil moisture information and environmental information (wind speed, rainfall, temperature, humidity) of the blueberry garden through the soil moisture sensor and small weather station. The wireless transmission module sent the data collected by the information collection module to the server in real time. Analytical processing was carried out, and the calculation result of the intelligent decision-making module was transmitted to the irrigation execution module. In the intelligent decision-making module, based on the historical data collected in the previous stage, the Penman formula and the soil water balance formula were used to establish the irrigation decision model to realize transpiration amount and irrigation amount calculation and real-time monitoring and alarm. The model can determine whether irrigation and optimal irrigation amount were needed according to the data obtained in real time; the irrigation execution module calculated the irrigation time according to the received irrigation information and actual irrigation speed, and performed remote

收稿日期:2018-07-15　修回日期:2018-08-21
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700504)、江苏省重点研发计划项目(BE2016337)、国家自然科学基金项目(51575244)和农业部公益性行业科研专项(201503130)
作者简介:沈建炜(1993—),男,硕士生,主要从事农业信息化相关技术研究,E-mail:2264653216@qq.com
通信作者:魏新华(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事精准农业技术研究,E-mail:wxh@ujs.edu.cn

irrigation. Using Visual Studio software as the platform, the monitoring interface of the system host computer was designed to realize real-time detection and storage of soil and environmental parameters, analysis and management of crop water demand status, and real-time warning and irrigation decision. The test results showed that the intelligent irrigation decision-making system can independently judge the crop water demand based on the information collected by the sensor without intervention. When the system found that the crop needed irrigation, it would drive the irrigation device to complete the irrigation, thus realizing remote precision irrigation of blueberry garden. The remote precision irrigation saved manpower and material resources and effectively improved the utilization of irrigation water.

Key words: blueberry garden; intelligent irrigation; decision model; water requirement rule; remote control

0 引言

我国蓝莓种植面积占世界种植面积的 13.4%；同时，蓝莓产量年均增长率达到 76.5%[1]。蓝莓是现有丘陵地区的主要经济作物之一[2]。然而丘陵地形起伏不平、土壤渗透性强、持水能力差，地表径流极易汇聚流失，经常出现不均匀干旱[3]。目前蓝莓园灌溉仍以人工定时观测土壤墒情，凭经验进行大水漫灌为主，灌溉水利用率不足 30%，水资源浪费严重[4]。近年来，物联网技术在农业方面应用愈加广泛[5-9]，因此需继续发展节水灌溉技术并集成物联网系统和节水灌溉系统，实现需水信息的远程自动监测和灌溉过程的远程智能控制。

蔡甲冰等[10]设计了一个可以在线连续监测田间作物冠层温度、环境信息和土壤墒情的实时灌溉决策系统，该系统运用模糊控制算法进行灌溉决策，但未实现远程信息采集与控制。WANG 等[11]设计了一种基于 C/S 架构的渠道灌溉管理决策系统，实现了灌溉预测和灌溉调度，但该决策系统未结合实时环境气象信息。JAAFAR 等[12]设计了一种基于 ET 模型的水仙需水量测定系统，该系统通过 3G 网络传输土壤和气象信息，实现了灌溉控制，但该模型只考虑降雨量和温度参数。虞佳佳[13]设计了基于远程数据采集和控制的精准决策灌溉系统，通过实时采集土壤水分值与预设阈值判断是否灌溉，但该系统未结合气象数据进行决策。陈智芳等[14]研发的节水灌溉与决策支持系统存在实时性差的问题。

针对以上系统的不足，本文基于物联网技术，设计一套智能灌溉决策系统，以实现土壤和环境参数的实时检测和存储、作物需水状况的分析管理以及实时预警和灌溉决策。

1 系统总体架构

基于物联网的丘陵地区果园信息测控及智能灌溉决策系统由信息采集模块、无线传输模块、智能决策模块和灌溉执行模块 4 部分组成。信息采集模块和无线传输模块通过控制器 Stc12c5a60s2 单片机进行连接，无线传输模块和智能决策模块之间通过无线网桥(Customer premise equipment，CPE)进行远程信息传输；智能决策模块由需水模型、预警模型及决策模型组成，最终决策结果通过服务器发送到灌溉执行模块进行灌溉，用户通过网络就可以获取实时数据信息及灌溉状态。系统架构如图 1 所示。

2 信息采集模块设计

信息采集模块主要采集土壤水分值及实时环境信息，其中环境信息包括风速、降雨量、温度、湿度。通过 Stc12c5a60s2 单片机对土壤水分传感器信号进行模拟量/数字量转换获取实时数据并通过 RS485 串口发送命令读取传感器信号。目前国内外的土壤水分传感器测量原理大都是频域反射法和时域反射法，其中频域反射法测量原理比较稳定，受环境影响较小，鉴于丘陵地区土壤空间差异性大等特点，选用基于频域反射法原理的土壤水分传感器更能准确反映土壤真实含水率，选用武汉新惠普公司 PH-TS 型土壤水分传感器和英国 GILL 公司 MaxiMet GMX600 型气象站，土壤水分传感器参数如表 1 所示，土壤水分传感器实物图如图 2 所示。

3 无线传输模块设计

3.1 短距离通信方式

目前常用的短距离无线通信模块包括 Zigbee 模块、GPRS 模块、433M 无线电台[15-17]，各模块性能对比如表 2 所示。

表 2 表明，Zigbee 通信距离较短，在果园中进行信息采集时需要数量过多，GPRS 在丘陵地区抗干扰性较弱，因此选择通信距离较远和抗干扰性强的 433M 无线电台模块进行组网。

433M 无线电台通信方式一般有点对多点通信方式、线形通信方式和差转通信方式[18-19]，如图 3 所示。线形通信方式组网方便但不方便管理，一旦发生故障较难检修，差转通信方式覆盖范围大但容

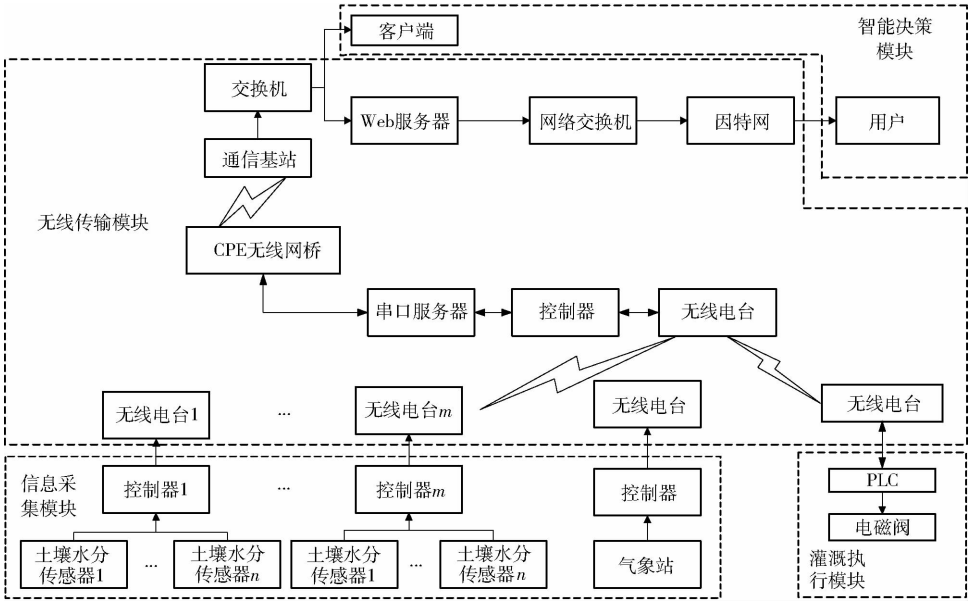

图 1　系统架构

Fig. 1　System construction

表 1　土壤水分传感器参数

Tab. 1　Soil moisture sensor parameters

参数	数值
量程/%	0 ~ 100
精度/%	± 3
分辨率/%	0. 1
稳定时间/s	1(通电后)

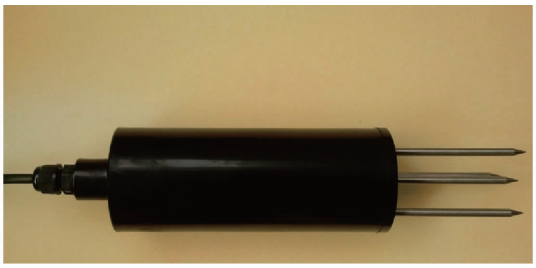

图 2　土壤水分传感器

Fig. 2　Soil moisture sensor

表 2　无线通信模块性能对比

Tab. 2　Performance comparison of wireless communication modules

类型	传输距离/m	抗干扰性	传输速率/(KB·s^{-1})
Zigbee	0 ~ 200	一般	250
GPRS	基站覆盖地区不限距离	弱	115
433M 无线电台	0 ~ 800	强	70

易发生数据丢失，点对多点通信方式比较简单且方便管理，因此，本文选择点对多点通信。

3.2　长距离通信方式

长距离通信模块是保证服务器和信息采集模块以及灌溉执行模块进行通信的转换模块。长距离通信模块选择传输距离较远、抗干扰性较强的 CPE 无线网桥模块进行传输，其中 Stc12c5a60s2 单片机和 433M 无线电台通过 RS485 进行串口通信，Stc12c5a60s2 单片机与 CPE 之间需要通过串口服务器将 RS485 通信转换成 TCP/IP 通信。一旦 Stc12c5a60s2 单片机接收到短距离通信网络传来的数据，串口服务器将 485 协议的信号转换成 TCP/IP 协议通过无线网桥进行传输。同样，串口服务器通过 CPE 接收到服务器发来的控制命令后，进行协议转换发送给控制系统进行相应的控制。长距离通信模块的工作流程如图 4 所示，实现了 433M 无线电台网络协议的转换，使短距离无线通信实时性更强，稳定性更高。

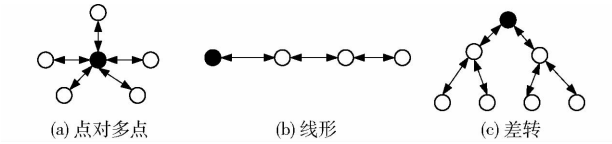

图 3　433M 无线电台多节点通信方式

Fig. 3　Multi node communication mode of 433M radio station

3.3　服务器接收模块

服务器模块采用 Socket 网络通信模型，设置允许最大 10 个客户端同时连接，服务器端先初始化 Socket，然后与端口绑定，对端口进行监听，调用 accept 阻塞，等待客户端连接。如果这时客户端初始化一个 Socket，然后连接服务器，建立连接。客户端发送数据请求，服务器端接收请求并处理请求，然后把回应数据发送给客户端，客户端读取数据，最后关闭连接，交互结束。工作流程如图 5 所示。

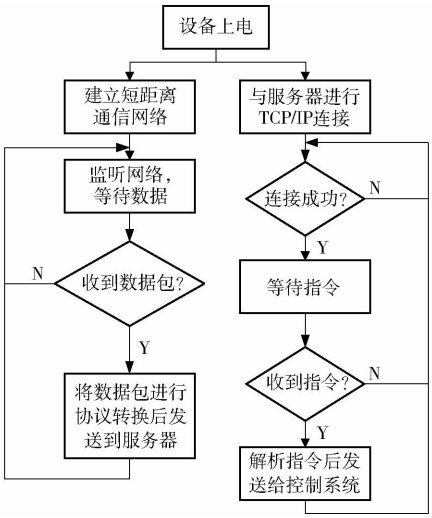

图 4 长距离通信模块工作流程

Fig. 4 Working process of long distance communication module

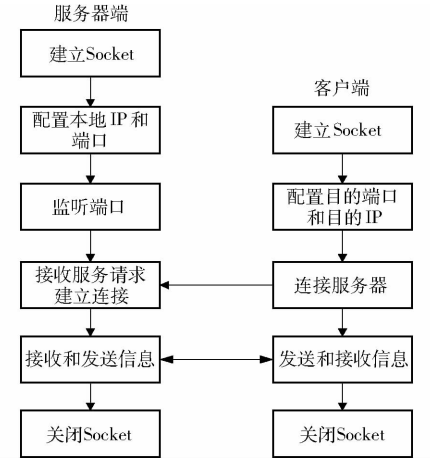

图 5 服务器和客户端工作流程

Fig. 5 Server and client workflow

4 智能灌溉决策模块设计

4.1 决策系统逻辑结构设计

本系统开发平台是 Visual studio 2013，采用 C# 语言进行编写。用户采用 C/S 模式，通过应用程序连接到本地数据库。按照逻辑结构可划分为 3 个层次：基础数据层、业务逻辑层和人机交互层。基础数据层实现数据资源的存储管理，由土壤水分和气象信息数据库组成；业务逻辑层按功能划分为实时监控预警和灌溉决策两个模块，实时监控预警模块主要实现土壤水分和气象信息数据显示功能，灌溉决策模块主要实现作物实际蒸腾量的计算、灌溉预报、计算灌溉量等功能；人机交互层采用 Winform 方式，提供用户与系统之间的接口。

4.2 数据库设计

本系统使用 SQL Server 和 ADO. NET 进行数据库编程。ADO. NET 是一个面向数据源的类库，它为应用程序提供了数据库操作功能。ADO. NET 中核心类有 4 个，分别为 SqlConnection 类、SqlDataAdapter 类、SqlCommand 类和 SqlParameter 类。SqlConnection 对象用于与数据库建立连接，并设置相关的服务器地址、数据库名和连接验证方式等。DataSet 对象是独立的数据集合。SqlDataAdapter 对象作为数据库适配器，用于读取数据并添加到 DataSet 中、设置连接和执行 SQL 语句等。数据库中的实时信息如表 3 所示。

表 3 实时信息

Tab. 3 Real time information

列名	数据类型	变量
ID	int	第 n 条数据
Time	datetime	时间
Soil Humidity	char	土壤湿度
Temp	char	温度
Humidity	char	空气湿度
Wind Speed	char	风速
Rainfall	char	降雨量

4.3 决策系统功能模块

灌溉决策系统包括 3 个模块，分别为基础信息设置、实时监控与报警、灌溉计算模块，具体结构如图 6 所示。

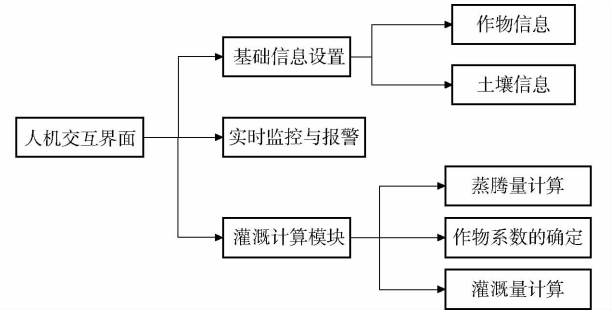

图 6 灌溉决策系统结构图

Fig. 6 Structure map of irrigation decision system

4.3.1 基础信息设置

该模块主要是让用户录入或更新蓝莓园基础信息资料和土壤特性资料等，为其他模块决策提供数据支持。

4.3.2 实时监控与报警

该模块分别通过表格和图形两种形式显示蓝莓园实时信息，每 5 min 自动刷新 1 次，实现动态显示的功能。通过采集的土壤水分信息计算土壤相对湿度指数，和干旱等级表对比得出当前干旱等级，系统会将干旱等级发送到用户手机端，实现报警功能。其中，图形界面更为直观，能更好地显示蓝莓园信息的变化趋势。干旱等级如表 4 所示。土壤相对湿度指数计算公式为[20]

$$R_{sm}=\frac{\partial}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{W_i}{f_{ci}}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中　∂——作物发育期调节系数，苗期为 1.1，水分临界期为 0.9，其余发育期为 1

W_i——第 i 层土壤湿度

f_{ci}——第 i 层土壤田间持水量

R_{sm}——土壤相对湿度指数

n——各观测层土壤湿度测量次数，作物播种期和苗期为 2，其他生长阶段为 5

表 4　干旱等级

Tab.4　Drought rating scale

等级	类型	土壤相对湿度指数/%
1	轻旱	[50,60)
2	中旱	[40,50)
3	重旱	[30,40)
4	特旱	[0,30)

4.3.3　灌溉计算模块

(1)蒸腾量

彭曼-蒙特斯公式是目前联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Union，FAO)专家小组推荐的标准计算方法和公式[21]，以能量守恒和水蒸气扩散理论为依据，考虑到作物生长的生理特点，并考虑空气动力学原理和参数的变化，具有完整的理论依据和较高的计算精度、准确性和多功能性。

彭曼-蒙特斯公式为

$$ET_0=\frac{0.408\Delta+\gamma\dfrac{900u_2(e_s-e_a)}{T+273}}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \tag{2}$$

其中

$$\Delta=\frac{4\,098\left(0.610\,8\exp\dfrac{17.27T}{T+237.3}\right)}{(T+237.3)^2} \tag{3}$$

$$\gamma=0.001\,63\frac{p}{\lambda} \tag{4}$$

$$\lambda=2.501-2.361\times10^{-3}T \tag{5}$$

$$e_s=\frac{e_0(T_{max})+e_0(T_{min})}{2} \tag{6}$$

$$\begin{cases}e_0(T_{min})=0.610\,8\exp\dfrac{17.27T_{min}}{T_{min}+237.3}\\ e_0(T_{max})=0.610\,8\exp\dfrac{17.27T_{max}}{T_{max}+237.3}\end{cases} \tag{7}$$

$$e_a=e_s\frac{R_{Hmean}}{100} \tag{8}$$

式中　Δ——温度与饱和水汽压间的曲线斜率，kPa/℃

ET_0——作物参考蒸腾量，mm

T——2 m 高处平均气温，℃

u_2——2 m 高处平均风速，m/s

e_s——饱和水汽压，kPa

e_a——实际水汽压，kPa

p——大气压强，kPa

γ——干湿表常数，kPa/℃

e_0——某个时刻饱和水汽压，kPa

λ——水蒸气潜热

R_{Hmean}——平均相对湿度

T_{max}——日最高气温　　T_{min}——日最低气温

(2)作物系数

蓝莓作物系数与品种和生育期有关，用户通过人机交互界面输入品种和生长阶段，系统便会根据条件从作物系数表中查询相应的作物系数。

参考作物需水量在计算时只考虑了气象因素对其影响，但在实际生产中作物的需水量还与土壤因素有着一定的联系，因此需要将参考作物需水量乘以作物系数对其进行修正，修正后的作物需水量包括作物植株的蒸腾量和作物之间的蒸发量。对其修正公式为

$$ET_C=K_CET_0 \tag{9}$$

式中　ET_C——作物实际蒸腾量，mm

K_C——作物系数

(3)灌溉量

水量平衡法[22]以农田土壤水分在变化过程中遵循质量守恒原理为其理论依据，针对某地块来说，在一定的时间段内对所研究区域内的水的补给量、储存量和消耗量之间的动态变化过程进行监测与计算。土壤含水量的计算模型为

$$W_t-W_0=W_r+P_0+M-ET+K \tag{10}$$

其中

$$P_0=\alpha P \tag{11}$$

$$\alpha=\begin{cases}0 & (P\leqslant5)\\ 0.9 & (5<P\leqslant50)\\ 0.75 & (P>50)\end{cases} \tag{12}$$

$$W_r=10(H_2-H_1)\theta_w\rho_b \tag{13}$$

$$K=(X-0.1G_{DW})ET \tag{14}$$

$$W_0=10\theta_w\rho_bH \tag{15}$$

式中　W_t——测定周期内任一时刻 t 时的计划土壤含水量，mm

W_0——测定周期内初始时期土壤含水量，mm

W_r——在测定周期内，随着计划湿润层的增加而增加的土壤含水量，mm，在测定周期较短，没有跨越作物不同的生长时期时，计划湿润层的深度不会产生变化，此时 W_r 为 0

P_0——有效降雨量，mm

M——测定周期内的灌溉水量，mm

ET——作物实际需水量，mm

K——地下水补给量,地下水补给量的计算以日为单位,若要计算测定周期内的地下水补给量,只需对每日的数值累加即可,mm

α——降雨入渗系数

P——实际降雨量,mm　　X——补给系数

H_1、H_2——时段初期、末期计划湿润层深度,cm

θ_w——计划湿润层的质量含水率

ρ_b——土壤的干容重,g/cm^3

H——计划湿润层的深度,cm

G_{DW}——地下水面到地表的距离,即地下水埋深,m

通常作物生长发育所需的最适宜的土壤含水量会介于一定的范围内,即计划湿润层内土壤含水总量会有上限和下限,灌溉量的多少会影响蓝莓的生长状态,因此通过预测值与作物生长发育适宜的土壤含水量的范围进行比较可以判定田间作物是否缺水。

若已知当前时刻土壤含水量以及要达到的土壤含水量,可以对灌水量进行精确的计算,并做出相应的灌溉决策,决策为

$$M = W_t - W_r - P_0 - K + ET - W_0 \tag{16}$$

灌溉决策系统界面如图 7 所示。

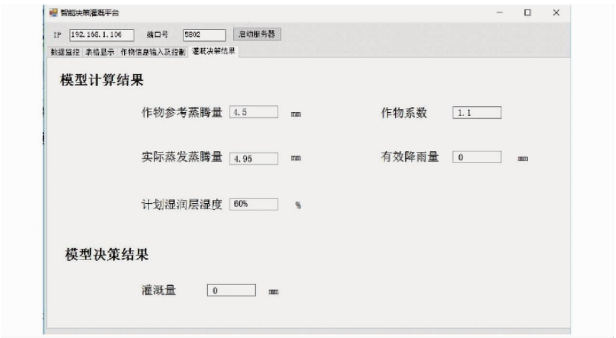

图 7　灌溉决策系统界面

Fig. 7　Irrigation decision system interface

5　灌溉执行模块

灌溉执行模块通过 433M 无线电台接收服务器发送的控制指令,其中控制指令包括灌溉量及灌溉时间,由 PLC 对电磁阀进行开启或者关闭操作。选用西门子 S7 - 200 型 PLC,该型号控制器满足系统需要。灌溉执行模块组成如图 8 所示。

6　系统应用与数据分析

6.1　系统安装与应用

研发的智能灌溉决策系统于 2018 年 3 月安装在江苏省连云港市赣榆区黑林镇特色水果园区。

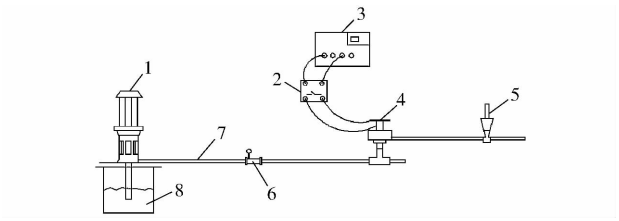

图 8　灌溉执行模块构成

Fig. 8　Irrigation execution module

1. 水泵　2. 继电器　3. PLC　4. 电磁阀　5. 喷头　6. 过滤器　7. 管路　8. 水源

6.2　信息采集模块精度分析

6.2.1　土壤水分传感器精度分析

通过恒温干燥箱、铝盒、环刀等材料对土壤水分传感器进行了标定。土壤水分传感器标定如图 9 所示。

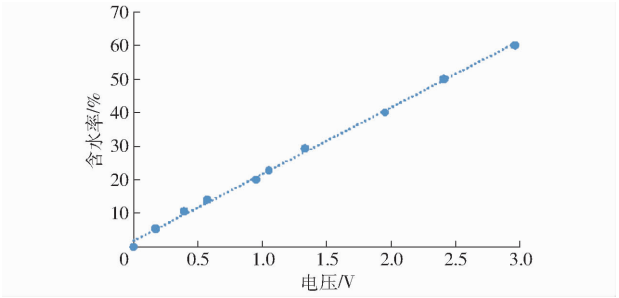

图 9　传感器标定

Fig. 9　Sensor calibration

从图 9 可以看出,输出电压和土壤相对含水率呈一定的线性关系。因为传感器精度为 3%,当土壤相对含水率低于 3% 时,测出的数据没有可信度;当相对含水率超过 10% 时,线性度非常好。传感器输出电压和土壤相对含水率关系式为

$$R_H = 0.198\,4U + 0.018\,3 \tag{17}$$

式中　R_H——土壤相对含水率

U——传感器输出电压,V

6.2.2　气象站精度分析

选用英国 Gill MaxiMet 微型气象站,可测量降雨量、风速、温度、湿度信息。其中降雨量精度为 2%,风速精度为 3%,温度精度为 ±0.5℃,湿度精度为 ±2%。该气象站满足本系统精度要求。

6.2.3　土壤水分传感器布置

蓝莓根系在 0 ~ 30 cm 的土层中分布最为集中,在 30 ~ 60 cm 的土层中迅速减少。在浅土层内分布根系的长度大,随着土层深度增加,细根长度迅速减小。蓝莓根系如图 10 所示。

基于蓝莓根系分布特征,本文在每颗蓝莓根系上坡方向 20 cm 处埋设一个土壤水分传感器。

6.3　无线传输模块试验分析

无线传输模块包括汇聚节点控制箱和子节点控制箱,其安装图如图 11、12 所示。



图 10　蓝梅根系

Fig. 10　Blueberry root



图 11　汇聚节点控制箱

Fig. 11　Convergence node control box

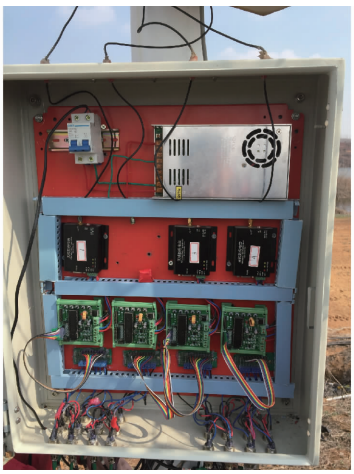

图 12　子节点控制箱

Fig. 12　Child node control box

子节点和汇聚节点控制箱安装位置相隔 400 m，传输速率为 70 KB/s，平均日发送 1 440 条记录，平均每天接收 1 436.3 条记录，平均丢包率为 0.26%，满足系统实时性需要。

6.4　系统决策测试

智能灌溉决策模块在不同生长时期将蓝莓的生长土壤含水率控制在最佳范围内，蓝莓需水信息如表 5 所示。

表 5　蓝莓需水信息

Tab. 5　Blueberry water demand information

生长时期	土壤含水率/%
萌芽期至开花期	60 ~ 65
果实膨大期	70 ~ 75
果实变色至成熟	60 ~ 65
营养生长期	50 ~ 60

由蓝莓需水信息可知，萌芽期至开花期土壤含水率在 60% ~65% 之间最适宜蓝莓生长，在此期间进行系统决策测试，传感器土壤含水率监测值变化曲线如图 13 所示。

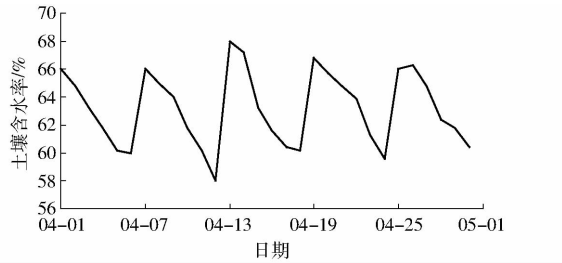

图 13　土壤含水率曲线

Fig. 13　Soil moisture content curve

以上结果说明系统能根据采集实时信息进行土壤含水率监测，并进行灌溉，使得蓝莓始终处于最适生长条件中。

7　结论

（1）基于物联网设计了蓝莓园智能灌溉系统，主要包括信息采集模块、无线通信模块、智能决策模块和灌溉执行模块。

（2）该系统可通过信息采集模块实时采集土壤水分和环境信息；通过无线通信模块将实时信息远程发送至服务器保存至数据库；通过智能决策模块依据数据库计算出灌溉量和灌溉时间，同时控制灌溉执行模块工作，实现了蓝莓园的远程精确灌溉。

参　考　文　献

1　牛竹梅. 中国果树资源利用现状与发展潜力分析[J]. 中国果菜, 2008,28(5):5 - 7.

2　王瑶,文光琴,李永霞. 丘陵地区蓝莓园艺定向培育研究现状及发展前景分析[J]. 南方农业,2015, 9(33):29 - 30.

3　苏杨, 朱健, 王平,等. 土壤持水能力研究进展[J]. 中国农学通报, 2013,29(14):140 - 145.
SU Yang, ZHU Jian, WANG Ping, et al. Research progress in soil water holding capacity[J]. Chinese Agricultural Science

Bulletin, 2013, 29(14): 140 – 145. (in Chinese)
4 谌昔林, 何金海, 赵兵,等. 现代节水灌溉技术与传统灌溉方式对比试验及分析[J]. 江西农业大学学报,2009, 21(8):105 – 108.
SHEN Xilin, HE Jinhai, ZHAO Bing, et al. Comparative experiment and analysis of modern water-saving irrigation technology and traditional irrigation methods[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2009, 21(8): 105 – 108. (in Chinese)
5 崔敏. 农业物联网研究与应用现状及发展对策[J]. 计算机与网络, 2016, 45(15):222 – 230.
CUI Min. Current status and development countermeasures of agricultural internet of things research and application [J]. Computers and Networks, 2016, 45(15): 222 – 230. (in Chinese)
6 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(1):1 – 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180101&falg=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001.
LI Daoliang, YANG Hao. Research progress and development trend of agricultural internet of things technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1): 1 – 20. (in Chinese)
7 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10):216 – 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20131035&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Research progress in agricultural internet of things and sensors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 – 226. (in Chinese)
8 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报,2016, 32(11):233 – 243.
LIAO Jianshang. Design method of environmental monitoring system for greenhouses based on internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 233 – 243. (in Chinese)
9 TZOUNIS A, KATSOULAS N, BARTZANAS T, et al. Internet of things in agriculture, recent advances and future challenges[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164:31 – 48.
10 蔡甲冰, 许迪, 司南,等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 133 – 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20151219&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.019.
CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring and irrigation decision system based on canopy temperature and soil moisture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133 – 139. (in Chinese)
11 WANG W, CUI Y, LUO Y, et al. Web-based decision support system for canal irrigation management[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017. DOI: 10.1016/j.compag.2017.11.018.
12 JAAFAR H, KHRAIZAT Z, BASHOUR I, et al. Determining water requirements of biblical hyssop using an ET-based drip irrigation system[J]. Agricultural Water Management,2017, 180(Part A):107 – 117.
13 虞佳佳. 基于物联网和专家决策系统的农田精准灌溉系统[J]. 轻工机械, 2014, 32(1):58 – 60.
YU Jiajia. Farmland irrigation system based on the technology of the internet of things and expert decision system[J]. Light Industry Machinery, 2014, 32(1): 58 – 60. (in Chinese)
14 陈智芳, 宋妮, 王景雷. 节水灌溉管理与决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2):1 – 6.
CHEN Zhifang, SONG Ni, WANG Jinglei. Water saving irrigation management and decision support system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2):1 – 6. (in Chinese)
15 张瑞瑞, 赵春江, 陈立平,等. 农田信息采集无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):213 – 218.
ZHANG Ruirui, ZHAO Chunjiang, CHEN Liping, et al. Design of wireless sensor network nodes for farmland information collection[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 213 – 218. (in Chinese)
16 李德旺, 许春雨, 宋建成,等. 基于物联网的远程智能灌溉控制系统的开发[J]. 节水灌溉, 2017(10):87 – 91.
LI Dewang, XU Chunyu, SONG Jiancheng, et al. Development of remote intelligent irrigation control system based on internet of things[J]. Water Saving Irrigation, 2017(10):87 – 91. (in Chinese)
17 李小敏, 臧英, 罗锡文,等. 兰花大棚内无线传感器网络433 MHz信道传播特性试验[J]. 农业工程学报,2013, 29(13): 182 – 189.
LI Xiaomin, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Experimental of propagation characteristics based on 433 MHz channel of WSN in orchid greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 182 – 189. (in Chinese)
18 王圣雄. 浅谈超短波差转中继通信网在航空护林地空通信中的应用[J]. 森林防火, 2002(4):35 – 36.
19 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.
HU Peijin, JIANG Ting, ZHAO Yandong. Soil moisture monitoring system based on zigbee wireless network[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 230 – 234. (in Chinese)
20 GB/T 32136—2015 农业干旱等级[S]. 2015.
21 王菱, 陈沈斌, 侯光良. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法[J]. 气象学报, 1988,46(3):381 – 383.
WANG Ling, CHEN Shenbin, HOU Guangliang. Method for altitudinal corrections of penman evapotranspiration formula[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1988,46(3):381 – 383. (in Chinese)
22 聂卫波, 马孝义, 幸定武,等. 基于水量平衡原理的畦灌水流推进简化解析模型研究[J]. 农业工程学报, 2007,23(1):82 – 85.
NIE Weibo, MA Xiaoyi, XING Dingwu, et al. Simplified analytical model for water conveyance of irrigated irrigation based on water balance principle[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 82 – 85. (in Chinese)