

基于 LoRa 的智能灌溉系统设计

王 灿, 王中华, 王冬雪, 李 猛, 李岳扬

(济南大学 自动化与电气工程学院, 济南 250022)

摘要: 针对传统人工灌溉所带来的水资源利用率低、人力资源浪费等问题, 提出了一种基于 LoRa 的智能灌溉系统设计方案; LoRa 是一种基于扩频技术的超远距离无线传输方案, 最大程度地实现更远的通信距离与更低功耗; 通过设计基于 LoRa 通信技术的光照强度, 空气温、湿度以及土壤湿度等信息的采集单元, 通信网关, 结合水阀控制单元以及智能管理 PC 端灌溉控制平台软件设计, 实现自动或手动灌溉模式; 实验数据表明, 所设计的灌溉系统灌溉方式灵活多样, 智能高效, 实用性强, 满足系统需要, 可以实现灌溉作业的精细化管理。

关键词: LoRa; 智能灌溉; 精细化管理

Design of Intelligent Irrigation System Based on LoRa

Wang Can, Wang Zhonghua, Wang Dongxue, Li Meng, Li Yueyang

(School of Automation and Electrical Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: In view of the problems of traditional irrigation, such as waste of water resources and waste of human resources, the paper presents a design scheme of intelligent irrigation system based on LoRa. LoRa is an ultra-long-range wireless transmission scheme based on spread spectrum technology to maximize communication distance and lower power consumption. The automatic or manual irrigation mode is designed by designing the software of light harvesting, air temperature, humidity and soil moisture based on LoRa communication technology, communication gateway, combined water valve control unit and intelligent management of PC-side irrigation control software. The experimental data show that the designed irrigation system has flexible irrigation methods, intelligent and efficient, practicality, and meets the needs of the system, so as to achieve refined management of irrigation operations.

Keywords: LoRa; smart irrigation; fine management

0 引言

我国人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4, 被联合国列为 13 个贫水国家之一^[1]。每年农业用水占全国用水总量的 60% 以上, 其中用于灌溉方面的用水量超过 90%^[2-3]。水资源严重短缺、浪费, 地区分布不均衡以及灌溉自动化水平较低的现状严重制约着我国农业的发展, 因此提高灌溉效率, 发展节水灌溉农业, 实现灌溉智能化显得尤为重要。

节水灌溉技术发展比较好的地区是美国、以色列、澳大利亚、印度等国家, 这些国家积极推进农业节水体系建立, 根据水资源的地区分配, 大力推广滴灌、喷灌和地面节水灌溉技术, 其水资源利用率高达 70%^[4-5]。相对于一些发达国家, 我国部分地方正在大力推广节水灌溉技术。智能化半变量节水管理系统在中国科学院栾城农业生态系

统实验站建成, 成为地方高新技术与成果示范交流的基地。江苏省率先试用节水灌溉自动控制系统, 在节水示范方面为地方经济建设做出贡献^[6]。虽然近年来取得了不小的进步, 但是我国的节水灌溉技术并没有得到太多普及, 水资源利用率仅为 43%, 与发达国家依然存在较大的差距^[7]。

随着科技的不断进步, 物联网技术越来越多运用在农业方面, 常见的无线技术主要分为局域网与广域网^[8]。局域网通信主要包括 WiFi、ZigBee、蓝牙等通信协议, 广域网主要包括 2G/3G/4G 蜂窝通信技术^[9-10]。WiFi 技术的传输速率约为 6 M/s, 传输数据快, 产品成本低, 但是安全性不高, 稳定性比较弱, 功耗相对比较大。ZigBee 功耗低, 组网容量大, 但是传输距离短, 最远传输距离不超过 75 m, 只适用于小范围、短距离组网^[11]。蓝牙技术早期用于手机之间的文件传输, 其功耗介于 WiFi 与 ZigBee 之间, 但是传输距离最短。以上 3 种通讯方式均不适用于大规模农田灌溉无线组网。2 G/3 G/4 G 主要依赖于移动运营商提供的网络数据, 不但会产生额外的费用, 对基站的信号强度也有较高的要求, 不适合偏远地区的农作物的监控。

LoRa 是美国 Semtech 公司推广的一种基于扩频技术的超远距离无线传输方案, 作为 LPWAN (low power wide area network) 技术的一种, 与以上通讯技术相比, 可以最大程度地兼顾远距离传输、低功耗和抗干扰性能^[12]。LoRa 最大链路预算可达 168 dB, 灵敏度超过 -148 dBm, 传输速

收稿日期:2017-12-28; 修回日期:2018-01-24。

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0603);山东省重点产业关键技术项目(2016CYJS06A01)。

作者简介:王 灿(1992-),男,山东巨野人,硕士研究生,主要从事测控系统与故障诊断技术方向的研究。

王中华(1967-),男,山东巨野人,博士,教授,硕士生导师,主要从事非线性控制理论与应用、汽车电子、机电一体化、嵌入式系统开发等方向的研究。

率为 0.018~37.5 kbps。接收电流仅 9.9 mA，休眠电流小于 200 nA，一节普通 5 号电池理论上可以使用 5~10 年，延长电池更换周期。LoRa 融合了扩频调制和前向纠错编码技术 (Forward Error Correction, FEC)，扩大了数据传输距离，提高了数据传输的抗干扰性。在宽阔地带，通过 LoRa 技术传输数据的距离超过 15 km^[13]。另外，该技术支持标准的 FSK、MSK 及 OOK 等调制方式，可在全球免费频段 (包括 433、868、915 MHz) 内使用。

本文提出一种基于 LoRa 的智能灌溉系统设计，旨在提高用水效率，实现农业灌溉精准化，智能化。本文的第 1 部分为系统的网络架构，包括 LoRa 网络框架、终端的分类以及 LoRa 传输模式分类。第 2 部分为数据采集节点硬件设计，包括微控制器，采集单元，水阀控制单元，数据传输单元，电源单元以及灌溉模式指示。第 3 部分为软件设计，包括数据采集节点以及 PC 端灌溉控制平台的开发。第 4 部分为实验结果与分析，搭建模拟生态系统，随机选取几个节点，对本设计的功能性以及操作性进行实际测试及演示。最后是关于本设计的总结和对智能灌溉技术的展望。

1 网络架构

1) LoRa 网络架构，采用典型的星型网络拓扑结构，主要包括终端、网关、云服务器以及应用服务。LoRa 的网络框架如图 1 所示。终端包括各种温度、湿度、光照等传感器，完成对相应数据的采集，并通过 LoRa 扩频技术传输。同时，接收上一级设备的命令信息，进行灌溉作业。网关负责终端设备上行数据的接收和下行数据的发送，并通过 TCP/IP 协议与云服务器通讯。LoRa 网关融合了速度自适应调整 (adaptive data rate, ADR)，根据网关与节点的距离，自动调节数据传输速率^[14]。当距离比较近时，终端节点将采用较高传输速率，反之，传输速率降低，有效提高了网络吞吐量。云服务器实现对采集数据和操作命令信息的处理，存储，加密以及发布，与传统的服务器相比较，具有集约化程度高，资源配置速度快，容量无限大以及对用户端的设备要求低等优势。应用服务主要通过各种设备，比如手机，平板或者 PC 等利用蜂窝数据或者以太网

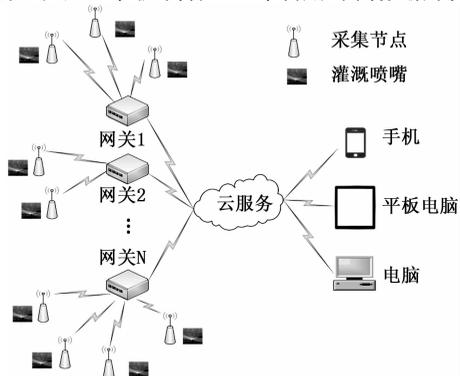


图 1 LoRa 的网络框架

从云服务器获取数据。拥有管理员权限，还可以对指定终端进行远程操作，方便高效。

2) 终端设备分类，根据终端设备与网关之间通讯模式的不同，将终端设备分为 3 类，分别为 Class A，Class B 和 Class C^[16]。

Class A (双向通讯终端设备)：终端节点每次发送一个上行信号后，按照一定时间间隔定期开放两个下行接收窗口。接收窗口的时间长短可以根据数据量的大小进行调整，所以 Class A 功耗最低。只有终端发送上行信号，网关才能进行下行数据传输。Class A 应用最为广泛。

Class B (具有预设接收槽的双向通讯终端设备)：工作模式与 Class A 类似，不同之处在于终端设备开放多余的接收窗口，同时通过 Beacon 信号与网关保持时间同步。Class B 功耗大于 Class A。

3) LoRa 传输模式分类，主要分为透明广播模式和定向传输模式。透明广播模式就是地址相同、信道相同的模块，任意一个发送，其余的都能可以收到，接收方收到是数据。定向传输模式指的是发送模块在发送的数据前面需要增加“目标地址+目标信道”，接收方收到的是数据。

2 数据采集节点硬件设计

数据采集节点硬件设计主要包括微控制器，采集单元，水阀控制单元，数据传输单元，电源单元以及灌溉模式指示，实现对照射强度，空气温、湿度以及土壤的湿度等数据的采集，处理以及传输。通过控制电磁阀的通断，进而控制农作物灌溉水量。

1) 微控制器，采集节点采用 STM32F103C8T6 单片机为控制核心，其内核为 ARM32 位的 Cortex-M3 CPU。最高 73 MHz 工作频率，64 K 闪存的程序存储器，内嵌 8 MHz 的 RC 振荡器，2 个 12 bit 模数转换器，2 个 I²C，3 个 USART，3 个通用定时器，1 个高级定时器。STM32F103C8T6 具有较强的数据处理能力及外设接口，可以满足系统需求。

2) 信息采集单元，主要包括光照模块，空气温、湿度模块以及土壤湿度模块。光照模块采用 BH1750FVI 光照传感器，可以计算 1.1lx 到 10000lx 马克斯/分钟的范围。空气温、湿度模块采用 DHT11 数字传感器，测量范围：湿度 20~90%RH，温度 0~50℃，测量精度：湿度±5%RH，温度±2℃。采用土壤传感器做土壤湿度的检测，表面采用镀镍处理，延长使用寿命。

3) 水阀控制单元，水阀控制单元电路图如图 2 所示。U1 为光耦合器，Q1 为三极管，K1 为继电器。当光耦合器导通，继电器工作，电磁阀打开，水泵开始抽水。同时，蓝色指示灯 RELAY LED 长亮。灌溉作业结束时，电磁线圈突然断电，产生反向电动势。为防止反向电动势的电压值超过串联回路上元器件的反向击穿电压，对元器件造成严重损坏，在线圈两端反向并联二极管 D1，用于电磁线圈的能量快速泄放，增加继电器动作的可靠性。

4) 数据传输单元, 数据传输方面采用 SX1278 无线模块, LoRa 扩频传输, 匹配高增益胶棒全向天线, 工作频率为 410~441 MHz, 共 32 个信道, 每个信道有 65536 个地址。MD0 与 MD1 进行高低电平组合, 确定 4 种工作模式, 包括一般模式, 唤醒模式, 省电模式和休眠模式。TXD、RXD 引脚分别接单片机的 USART2。AUX 用于无线收发缓冲指示和自检指示。AUX 引脚一般输出高电平, 当模块发送或者接收打包好的数据过程中或者上电复位时, 开始硬件自检并初始化配置, AUX 输出低电平, 然后恢复为高电平。设计 AUX 指示灯, LoRa 模块进行数据传输时, 黄色 LED 灯长亮, 数据传输完毕, 黄色 LED 灯熄灭。

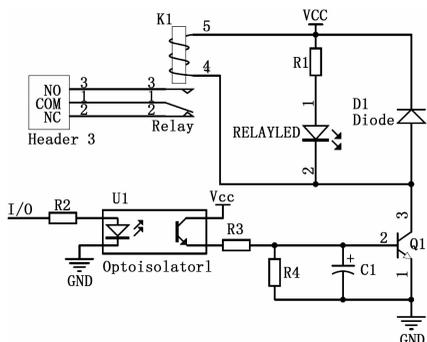


图 2 水阀控制单元电路图

5) 电源单元, 采用 DC24V/1A 的电源适配器为采集节点提供外部电源, 主要为继电器提供电源。经过 LM2576 开关稳压集成电路, 将 DC24V 稳压到 5 V, 主要为 LoRa 模块提供持续稳定的电源。之后采用 AMS1117 芯片, 为微处理器及各种传感器提供 3.3 V 直流电源。打开采集节点电源, 绿色电源指示灯长亮。

6) 灌溉模式指示, 为了验证 PC 端灌溉控制平台的设定模式, 采集节点配置了灌溉模式 SET 红色指示灯, 配合继电器工作蓝色指示灯 D1, 用于显示不同的设定模式。灌溉模式的设定指示如表 1 所示。当系统处于自动灌溉模式中, 每次调整灌溉条件后, 红色 LED 灯亮 1 s 后熄灭, 然后再根据 D1 的亮灭, 判断该区域是否处于灌溉作业中。当系统处于手动模式中, 如果选择紧急停止, 红灯长亮, 灌溉作业紧急停止; 如果选择手动浇灌, 红灯长灭, 开始灌溉作业。数据采集节点的 PCB 板如图 3 所示。

表 1 灌溉模式设定指示

模式设定	停止作业状态	灌溉作业状态
自动模式	蓝灯长灭; 红灯亮 1 s 后熄灭。	蓝灯长亮; 红灯亮 1 s 后熄灭。
手动模式	蓝灯长灭; 红灯长亮。	蓝灯长亮; 红灯长灭。

3 软件设计

3.1 数据采集节点

利用 Keil uVision5 开发平台, 对采集节点进行 C 语言

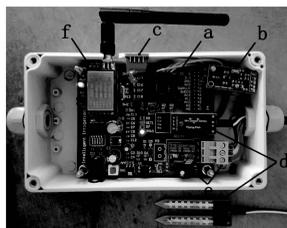


图 3 数据采集节点 PCB 板

- (a) 微处理器; (b) BH1750FVI 光照传感器;
- (c) DHT11 空气温、湿度传感器; (d) 土壤湿度传感器及其探头;
- (e) 继电器及其接口; (f) LoRa 模块。

编程, 增强了程序的可读性, 可以实现系统软件在线调试, 方便程序移植、优化、二次开发。数据采集节点的工作流程如图 4 所示。采集节点上电初始化为最后一次正确配置的自动灌溉模式, 定期向 PC 端灌溉控制平台发送数据, 发送结束后自动进入休眠状态, 此时功耗最低。间隔一定时间后, 开放下行接收窗口, 如果接收到 PC 端指令, 执行相应灌溉模式设定以及灌溉作业。每次作业结束为工作一次, 继续定时发送数据, 循环进行检测工作。

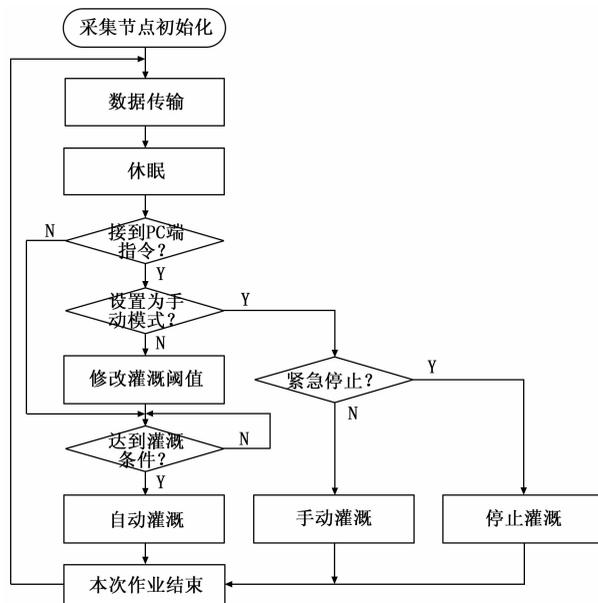


图 4 数据采集节点的工作流程图

3.2 PC 端灌溉控制平台

PC 端灌溉控制平台的开发环境为 Visual Studio 2010, 使用 C# 语言, 实现智能灌溉系统人机界面设计。数据库选用微软的 SQL server2012, 实现对各种数据的实时存储与分析。使用 .NET Framework 提供的 Serial Port 类, 设定串口通信波特率, 数据位、校验位和停止位, 选择串口号, 实现 PC 端灌溉控制平台 LoRa 节点与 PC 端之间的数据传输, 再将自动打包好的数据经过 LoRa 扩频传输, 最终实现 PC 端灌溉控制平台与采集节点之间的通讯。为了方便灌溉作业的管理与维护, 设定游客权限和管理员权限。拥有游

客权限的用户无法自主设定灌溉模式和阈值，系统灌溉模式默认为自动模式，用户只能看到实时显示值，而拥有管理员权限的用户进行相应管理。为了方便演示，仅展示 A、B 两个灌溉区域的监控界面，并随机设定了两个区域光照强度，空气温、湿度，土壤湿度的阈值。只有配置为自动模式，同时满足 4 个条件，相应区域才能自动进行灌溉作业。PC 端灌溉控制平台自动灌溉模式监控界面和手动灌溉模式监控界面分别如图 5 和图 6 所示。



图 5 自动灌溉模式监控界面



图 6 手动灌溉模式监控界面

PC 端灌溉控制平台处的 LoRa 节点通过 USB 接口与 PC 端进行硬件连接。PC 端灌溉控制平台的工作流程如图 7 所示。通过 LoRa-USB 通信网关，电脑自动识别串口号，点击“打开串口”按钮，相应按钮自动变为“关闭串口”，此时，开始接收数据。首先，PC 端将接收到的串口数据存在到定义的 buf 数组中，然后判断数据的来源与数据的完整性。最后将处理后的数据显示在相应位置。输入管理员用户名和密码，验证无误后，各地区灌溉阈值变成可编辑状态，此时，手动模式不可操作。重新设定最优灌溉条件，点击“确认”按钮，即可实现指定区域自动灌溉。点击“手动控制”，系统切换到手动模式，此时，自动模式不可操作。手动模式可以实现对指定区域的手动灌溉以及突发状况的紧急停止。

4 实验结果与分析

为了测试节点之间的传输距离，随机选取 A、B 两个 LoRa 节点，在相对空旷的地区进行实验测试。两节点均配置为定向传输，通信信道 433 MHz，波特率 9 600 bps，空中速率 19.2 kbps，发射功率 20 dBm，FEC 功能打开，匹配可弯折全向胶棒天线。利用串口调试助手进行数据传输测试，发送端每组发送约 100 次数据，每次发送 12 个字节

(与数据采集节点实际工作时发送最大数据长度相同)，发送间隔 1 s。因配置为定向传输，正确接收时，每次数据长度仅为 9 个字节。

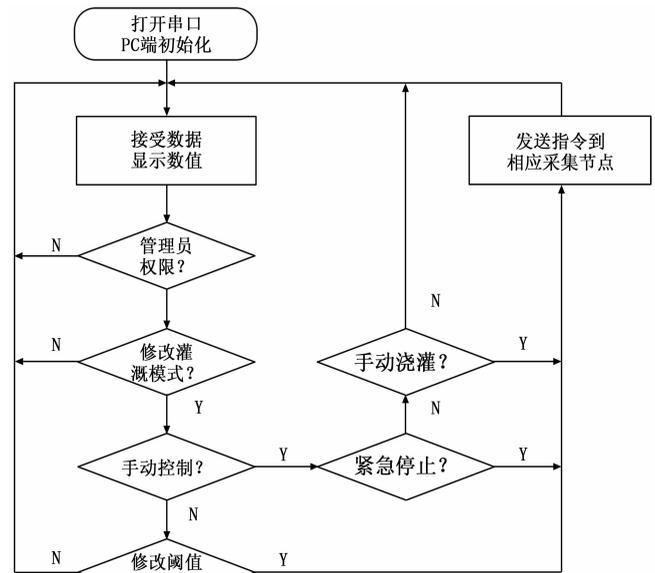


图 7 PC 端灌溉控制平台的工作流程图

A、B 两个节点同时匹配增益为 6 dB 或 3 dB 全向天线时，传输距离测试数据分别如表 2，表 3 所示。对上述实验数据进行分析：

表 2 传输距离测试数据(6 dB)

测试距离 /千米	测试组数	A 发 B 收 丢包率 1	B 发 A 收 丢包率 2	平均丢包率
0.18	2	0.0%	0.0%	0.0%
0.47	2	0.0%	0.0%	0.0%
0.95	2	0.0%	0.0%	0.0%
1.27	5	3.9%	4.0%	3.9%
1.58	5	10.0%	9.9%	10.0%
1.89	5	18.6%	20.8%	19.7%
2.11	5	41.6%	39.0%	40.3%

表 3 传输距离测试数据(3 dB)

测试距离 /km	测试组数	A 发 B 收 丢包率 1/%	B 发 A 收 丢包率 2/%	平均丢包率/%
0.18	2	0.0	0.0	0.0
0.47	2	0.0	0.0	0.0
0.53	5	0.0	0.0	0.0
0.59	5	0.0	0.0	0.0
0.61	5	1.2	1.0	1.1
0.65	5	19.8	18.9	19.4
0.71	5	29.5	31.6	30.6
0.95	5	41.4.7	46.8	46.8

1) 数据传输的丢包率与传输距离有关。随着传输距离的不断 增加，信号强度逐渐削弱，丢包率逐渐增加。

2) 数据传输的丢包率与天线增益有关。当天线增益为 6 dBi 时, 传输距离远达 1 千米; 当天线增益为 3 dBi 时, 传输距离仅为 600 米。

3) 数据传输的丢包率与障碍物有关。受测试场地限制, 当测试距离超过 600 米, 传输信号陆续受到高楼, 树林等障碍物影响。

若选用表 2 中的 LoRa 节点, 可以实现方圆 1 千米范围内的土地灌溉。如果灌溉区域宽阔, 合理匹配天线, 灌溉范围更加广泛。实验表明, LoRa 扩频传输可以实现远距离无线传输, 能够较好的满足系统需要。

5 总结

本系统采集节点设计以 STM32 单片机为控制核心, 采用模块化的设计方案, 由 LoRa-USB 通信网关, 信息采集单元, 水阀控制单元, 数据传输单元, 电源单元以及灌溉模式指示组成。实现了多元信息及时上传以及灌溉作业的快速响应, 从而达到提高水资源利用率, 实现精细化灌溉的目的。利用 C#, 设计 PC 端灌溉控制平台界面, 用户可以随时查看农作物生长的环境参数, 同时自由选择灌溉模式。自动模式可以根据农作物在不同阶段的生长情况, 灵活设定相应的灌溉条件; 手动模式可以实现对指定区域的快速灌溉以及突发状况的紧急停止。选用 SQL server 2012 作为数据库, 实现了各种环境参数读取、设定, 灌溉模式选择等重要数据的及时存储。对后期数据的处理分析, 特别是在农作物不同生长时期, 灌溉阈值与灌溉时间的最优设定与选取等方面, 具有深远意义。数据传输方面采用 SX1278 芯片, LoRa 扩频传输, 使该系统既可以满足温室大棚进行短距离灌溉, 也可以满足户外大面积、远距离灌溉要求, 应用场景广泛, 成本低廉, 操作简单, 可扩展性强。

本设计未来发展的方向如下所示:

- 1) 采集节点供电方面可以采用太阳能板等可再生资源供电, 对能源转化、存储与消耗做系统分析;
- 2) 与计划灌溉做对比实验, 定量分析水资源利用率;
- 3) 对 SQL 存储的数据进行系统分析, 规划各种农作物不同时期最优灌溉阈值和灌溉时间。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王 莉. 基于 ZigBee 网络和机械臂的智能灌溉系统设计 [J]. 农机化研究, 2017, 39 (7): 137-142.
- [3] 李 琦. 基于无线嵌入式技术的温室自动灌溉监控系统的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [4] 国 亮, 邵砾群, 惠荣荣. 基于国外经验的农业节水灌溉技术推广措施分析 [J]. 陕西农业科学, 2013, 59 (6): 117-119.
- [5] Atzberger C. Advances in Remote Sensing of Agriculture; Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs [J]. Remote Sensing, 2013, 5 (2): 949-981.
- [6] 赵凌彩. 节水措施在农业水利灌溉中的有效应用 [J]. 江西建材, 2017 (17): 107-108.
- [7] 濮少翔, 周 恺. 智能灌溉系统的设计与实现 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版), 2016, 32 (6): 28-29.
- [8] Mat I, Kassim M R M, Harun A N, et al. IoT in Precision Agriculture applications using Wireless Moisture Sensor Network [A]. Open Systems [C]. IEEE, 2017: 18-23.
- [9] 王 瑞. 基于 LORA 通信的无线水表抄表系统的设计 [D]. 东华理工大学, 2016.
- [10] Gutierrez J, Villa-Medina J F, Nieto-Garibay A, et al. Automated irrigation system using a wireless wensor network and GPRS Module [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 63 (1): 166-176.
- [11] 陈 辉. 基于 ZigBee 与 GPRS 的温室番茄远程智能灌溉系统的研究与实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] 赵 静. LoRa 无线网络技术分析 [J]. 移动通信, 2016, 40 (21): 50-57.
- [13] 郑华开. LoRa 技术给未来物联网产品带来新的起点 [J]. 电子世界, 2016, (15): 146.
- [14] 孙 曼, 张乃谦, 金立标, 等. 基于 LoRa 标准的 MAC 层协议研究电视技术 [J]., 2016, 40 (10): 77-81.
- [15] 王 阳, 温向明, 路兆铭, 等. 新兴物联网技术——LoRa [J]. 信息通信技术, 2017, 11 (1): 55-59, 72.
- [16] 刘 琛, 邵 震, 夏莹莹. 低功耗广域 LoRa 技术分析与应用建议 [J]. 电信技术, 2016, 1 (5): 43-46.
- [9] Jing Y Z, Liao H J, Zhang C H, et al. Design of auto detection system for high-voltage insulator inspection robot [A]. 2017 International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS) [C]. 2017: 16-19.
- [10] Yan T T, Yang G D, Yu J Z. Feature fusion based insulator detection for aerial inspection [A]. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC) [C]. 2017: 10972-10977.
- [11] Liao S L, An J B. A robust insulator detection algorithm based on local features and spatial orders for aerial images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12 (5): 963-967.
- [12] Jabid T, Md. Zia Uddin. Rotation invariant power line insulator detection using local directional pattern and support vector machine [A]. 2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET) [C]. 2016: 1-4.
- [13] Zhao Z B, Xu G Z, Qi Y C. Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23 (5): 2858-2866.

(上接第 216 页)