

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.027

基于物联网和云架构的渠灌闸门智能控制系统

包志炎^{1,2} 王学斌³ 张海波² 郑高安² 马登昌² 王 萱²

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310014; 2. 浙江水利水电学院计算机应用技术研究所, 杭州 310018;
3. 浙江省特种设备检验研究院国家电梯产品质量监督检验中心, 杭州 310020)

摘要: 为了实现农田明渠灌溉的精准化控制,设计了一种基于物联网和云架构的渠灌闸门远程智能控制系统,系统由一体化旋转式闸门、本地控制软件、远程终端访问系统和云端中间件组成。闸门采用旋转式阀芯结构设计,降低闸门启闭时的驱动能耗;基于 ARM 开发了嵌入式控制系统,实现水闸运行的本地控制和状态数据采集;集成了无线通讯模块和光伏电源系统,解决传统水闸野外安装布线繁琐和供电困难问题;通过在阿里云服务器建立数据中心,部署中间件,实现水闸远程数据传送与控制指令传达;建立了基于水位、流量双反馈的闸门开度云控模型,实现水闸群智能运行;根据旋转式闸门启闭阶段角速度变化规律,提出了水闸运行异常报警方法;开发了 B/S 版和 APP 版的远程终端访问系统,实现了灌区数据大屏、闸群远程控制和智能调度,适用于农田灌溉中小型渠道输水、配水的精准化控制。

关键词: 明渠灌溉;一体化闸门;远程无线监控;智能控制;云架构;物联网

中图分类号: TV663; TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0222-07

Intelligent Control System of Canal Irrigation Sluice Based on Internet of Things and Cloud Architecture

BAO Zhiyan^{1,2} WANG Xuebin³ ZHANG Haibo² ZHENG Gaoan² MA Dengchang² WANG Xuan²

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

2. Institute of Computer Application Technology, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

3. National Elevator Product Quality Supervision and Inspection Center, Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The development of canal irrigation technology was briefly reviewed. In order to realize the precise control of irrigation canal water delivery in farmland, a remote intelligent control system of canal irrigation sluice was designed based on the Internet of things (IOT) and cloud architecture. The system was consisted of integrated rotary sluice, local control software, remote terminal access system and cloud middleware. Rotating structure was used to spool of the sluice in order to reduce the driving power consumption when opening and closing gates. An embedded local control system based on ARM was established to implement local control and data acquisition. Wireless communication module and photovoltaic power supply system were integrated to solve the problems of complicated wiring and difficult power supply in the field. Remote data transfer and control instruction delivery were implemented through database and cloud middleware in Ali cloud server. A cloud control model of gate opening based on double feedback of water level and flow was established to achieve intelligent operation of sluice groups. According to the rotating angular velocity variation of sluice at opening and closing stage, an abnormal warning method of sluice operation was put forward. Remote terminal access system, including B/S version and APP version was developed for users to monitor operation state data of the sluice group, remotely control any sluice, and carry out reasonable dispatch of water resources in the irrigation area. Experimental results showed that the remote intelligent control system had the characteristics of safe and

收稿日期: 2017-08-27 修回日期: 2017-09-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601461)、浙江省科技厅公益技术应用研究计划项目(2016C32093)、浙江省水利厅重点科技项目(RB1314)、浙江省博士后优先项目(201693)和浙江省重大科技专项计划项目(2014C01048)

作者简介: 包志炎(1982—),男,博士后,浙江水利水电学院副教授,主要从事智慧水利和制造业信息化研究,E-mail: baozhy0571@163.com

通信作者: 王学斌(1969—),男,高级工程师,主要从事特种设备检验技术研究,E-mail: hzr18888@163.com

reliable operation, fast response, high control accuracy and low maintenance cost. The intelligent control system of canal irrigation sluice could satisfy the precise control for water conveyance and distribution in the small and medium-sized irrigation canals.

Key words: canal irrigation; integrated sluice; remote wireless monitoring; intelligent control; cloud architecture; Internet of things

引言

水是农业的命脉,节水灌溉在提高农业用水效率、农民增产增收及生态环境建设等方面发挥着重要作用。渠灌因设施成本低,管理方便,仍然是目前运用最广泛的灌溉方式之一。世界灌溉技术发展的总趋势是节水、节能、多目标利用以及智能控制,渠灌技术日益走向精准化和可控化^[1]。国外学者对渠道自动化输水与配水研究较早^[2-6],美国、澳大利亚、日本、以色列等国家纷纷采用计算机技术调控渠系输水与配水,实现灌区水资源的合理配置,其中澳大利亚食盆(Foodbowl)灌区引进 Rubicon 公司的“全渠道控制系统”,安装了近 2 万台一体化闸门,干渠的输水效率从 70% 增加至 85%,减少水流失约 39%^[1,7]。水利部曾引进该产品,分别在安徽淠史杭、宁夏青铜峡、甘肃昌马等灌区开展试点,运行效果良好,但引进成本昂贵。我国大部分灌区采用单闸门的离散手动操作和开环控制,测流计量和灌溉方式粗放,农业用水流失比较严重。为此,国内学者也进行了相关研究^[8-12]。本文面向中小型灌溉渠道,从系统的观点出发,充分利用新一代信息技术在系统研发、部署、运行、使用等方面的优势,将传统的机电一体化技术与物联网、云、移动互联等技术相结合,开发一种基于阿里云的渠灌闸门智能控制系统,以期实现渠灌输水的精准化和可控化,提高农业用水效率。

1 系统技术架构

物联网和云计算都是新一代信息技术的典型代表。物联网系统通常包括感知、传输和应用 3 个层次,基本特征是全面感知、可靠传送和智能处理^[13]。近年来农业传感仪器和感知技术得到了迅速发展和广泛应用^[14-15]。云服务不但可以拥有便捷的云端数据存储、大量的开放软件服务和强大的云计算支撑,而且具有移动互联、实时在线、安全稳定和用户终端设备配置要求低等优点,向用户提供自由、方便和灵活的服务,极大地改变了传统数据中心的运行模式,大大降低了用户运维成本,这种新的服务模式在互联网+时代引起了业界又一次重大的产业变革^[16-18]。

本系统采用阿里云服务器,实施物联网技术架构,分为感知层、传输层、支撑层和应用层,如图 1 所示。基本思路是各类传感设备按照预先设置频率采集数据,嵌入式控制模块负责将感知信息进行有效处理,并经无线通讯发送至阿里云。在云端建立灌区数据中心,开发中间件,利用云计算资源,实现数据汇集、整理、存储和呈现。用户只需使用较低的终端配置设备即可实现闸门的实时监测、远程控制和智能调度等功能。

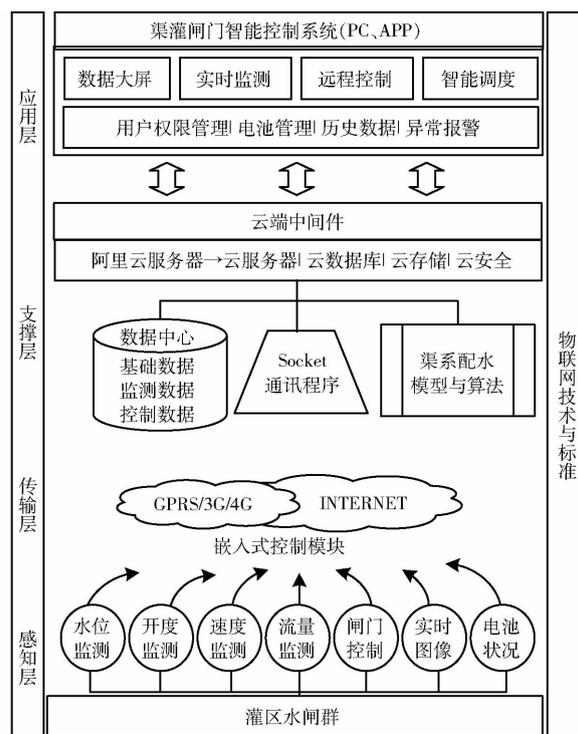


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

感知层集成了水位传感器、闸门开度仪、电机控制器、光伏控制器和摄像头(部分重要水闸站点)等,通过数据采集和计算即可实现对上下游水位、闸门启闭状态、闸门开度、闸门运行速度、过闸流量、现场图像、电压电流以及电池状况等信息的汇聚。系统在阿里云服务器拥有固定 IP 地址。在传输层,嵌入式模块通过 GPRS 模块向指定 IP 地址发送状态数据或接受控制指令。在支撑层,阿里云服务器为系统提供云服务器、云数据库、云存储和云安全等服务,满足系统在云端建立灌区数据中心、部署中间件等需要;在应用层,根据不同应用需求,分别研发面向 PC 的 B/S 版和面向移动终端的 APP 版应用系

统。用户在任何时间、任何地点,均可通过计算机或手机访问云服务器,实时查看水闸运行状态数据,远程控制闸门的开启、关闭、开度以及运行时间等,制定并执行灌溉方案。

2 硬件设计

2.1 机械结构设计

旋转式闸门的机械结构如图2所示,它主要由支架、底座、阀芯、定位销、电动机以及传动机构等组成。水闸工作时,电动机驱动传动机构,传动机构通过齿轮驱使阀芯转动。当阀芯与底板垂直时,阀芯与底座构成单向密闭空间,隔断水流;当电动机继续转动时,阀芯与底板形成的开度连续增大,实现闸门流量的精确控制。在底座两侧设置定位装置,当闸门运行至预设开度停止时,通过定位销锁住阀芯,以防止水流对阀芯的长期冲击而影响其使用寿命。采用旋转式阀芯结构设计,使闸门驱动力与水流的推力同向,利用水流冲力助推闸门的开闭,降低了闸门启闭时驱动能耗,为实现水闸低功耗运行创造了条件。

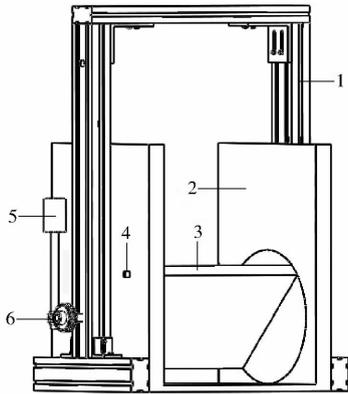


图2 旋转式闸门机械结构

Fig.2 Mechanical structure of rotary sluice

1. 支架 2. 底座 3. 阀芯 4. 定位销 5. 电动机 6. 传动机构

文献[9]利用明渠测流理论^[19]对矩形平板闸门的测流方法进行了深入探讨,提出了具体的计算方法,并通过实验验证了其有效性。针对本文提出的旋转式闸门,当闸前水位低于阀芯半径时,符合该测流方法的适用条件,同时需将部分参数作等效转换。

图3给出了旋转式闸门流量计算分析图。因在

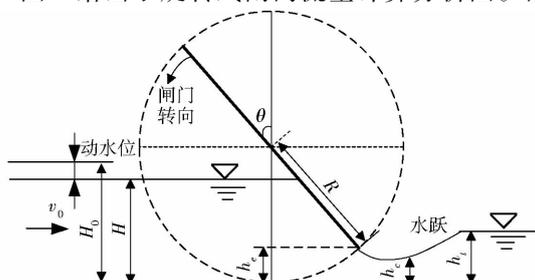


图3 旋转式闸门流量计算分析图

Fig.3 Calculation chart of rotary sluice

明渠灌溉中,水流速度较小,实际应用中可忽略动水位,用 H 代替 H_0 。经过分析可知,当闸门阀芯旋转 θ 角时,闸门的实际有效开度为

$$h_e = \begin{cases} R(1 - \cos\theta) & \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\right) \\ R(1 - \cos(\pi - \theta)) & \left(\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi\right) \\ R(1 - \cos(\theta - \pi)) & \left(\pi < \theta \leq \frac{3\pi}{2}\right) \\ R(1 - \cos(2\pi - \theta)) & \left(\frac{3\pi}{2} < \theta \leq 2\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R ——水闸旋转半径

θ ——水闸旋转角度

当有效开度和水位之比 $h_e/H \leq 0.65$ 时,属于闸孔出流状态。此时,根据 h_i 不同取值,又可以分为自由出流和淹没出流两种情形。

在自由出流时流量为

$$Q = u_0 b h_e \sqrt{2gH} \quad (2)$$

式中 u_0 ——孔流流量系数 b ——闸门宽度

在淹没出流时流量为

$$Q = \varphi b \varepsilon h_e \sqrt{2g(H - h)} \quad (3)$$

式中 φ ——孔流流速系数

ε ——垂向收缩系数

h ——淹没有效水深

当有效开度和水位之比 $h_e/H > 0.65$,属于堰流状态,此时流量为

$$Q = \sigma m_0 b \sqrt{2g} h_a^{3/2} \quad (4)$$

式中 σ ——堰流淹没系数

m_0 ——堰流流量系数 h_a ——堰上水头

国内外学者就不同闸门结构及流态下的各计算系数取值对测流精度的影响展开了研究^[9,20-21],式(2)~(4)中涉及的各项系数均可通过特定公式或查表得到^[9]。

2.2 光伏供电模块

水闸装置中耗电部件主要包括各类传感器、控制器、电动机和控制板。在满足水闸系统供电要求的基础上,选用功率较低的太阳能电池板和容量较低的蓄电池,以降低产品尺寸及成本。光伏电源系统采用两组12V、12A·h的铅酸蓄电池,两组10W的太阳能板,长、宽、高尺寸分别为340、170、18mm,为水闸提供24V和5V两种等级的输出电压。单个闸门开启或关闭时最大功耗45W,水闸静止时功耗小于5W,光伏电源能基本保持水闸连续15d阴天情况下的正常使用。通过光伏控制器可以实现对负载工作模式、停充电压、欠压恢复电压和欠压保护电压等参数设定,并进行实时电量监测。

2.3 嵌入式控制模块

远程实时监测和控制是智能水闸的显著特点,这部分功能主要由嵌入式控制模块完成。它负责与水位传感器、开度仪、摄像头、光伏控制器、电动机控制器以及 GPRS 模块保持数据交换,如图 4 所示。控制板选用 STM32 系列 MCU,采用成熟的工业级芯片 STM32F103ZET6,其内核为 32 位 ARM Cortex - M3,主频 72 MHz,功耗低,尺寸小,价格便宜;水位和开度传感器均采用成熟的 MODBUS 产品。电动机控制采用多功能直流电动机控制器,具有多种调速模式,支持刹车、转速控制及斜坡起动等。摄像头可按需集成,满足重要水闸站点的实时图像传送需要。经二次开发,嵌入式控制模块能通过液晶屏、发光二极管等媒介在本地显示闸门开度、水位、流量、故障报警等信息,同时完成与云端服务器间的数据远程传送。

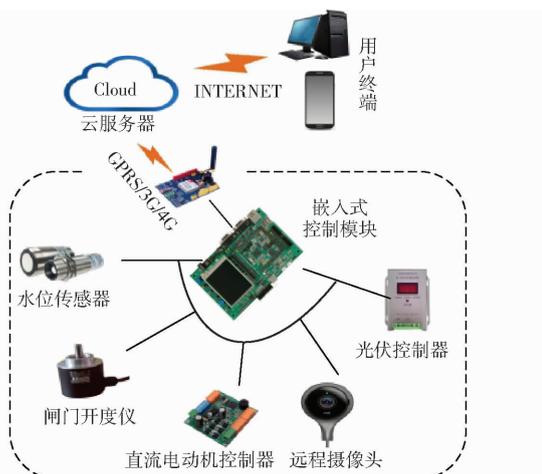


图 4 嵌入式控制模块运行原理图

Fig. 4 Runtime interactions of embedded controller

2.4 水闸安装部署

将传感器、嵌入式控制模块、无线通讯模块、太阳能电源与机械本体结构进行一体化集成,其中嵌入式控制模块、无线通讯模块和太阳能电池统一装入小型控制盒,电动机封装在水渠外侧并高于阀芯;阀芯和底座之间做好专门的防漏处理。一体化设计的水闸产品可以在出厂前便完成大部分调试,施工时采取整体吊装,降低了户外安装调试工作量。因采用太阳能电源和 GPRS/3G/4G 无线通信,降低了布线成本,有助于解决传统水闸野外布线繁琐、供电困难等问题。在闸门产品化时,预先生产常见尺寸的系列产品;根据灌区渠系实际情况,可以按需选择并组合安装水闸,如图 5 所示。

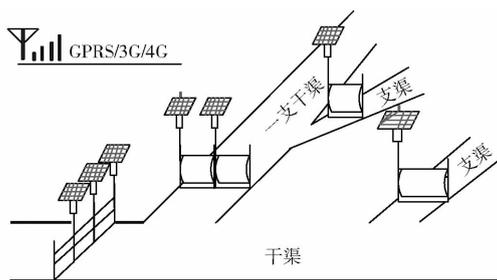


图 5 水闸群部署图

Fig. 5 Deployment diagram of sluice group

云端等 3 个层次的程序设计。本地控制端软件基于 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 操作系统研发,主要完成传感器数据采集与显示、水闸手动开启与关闭、运行模式设置以及与云端保持数据通讯;远程终端访问系统包括 Web 网站和移动 APP,为用户提供用户权限管理、灌区数据大屏、水闸远程监测与控制、智能调度与异常报警等功能,实现人机交互;数据大屏通过数据可视化技术全方位、多角度呈现当前灌区所有渠系和水闸相关实时数据的动态变化;云端中间件为远程控制终端和水闸终端之间搭建桥梁,水闸运行状态数据经嵌入式模式发送至云端存储并处理,供远程控制终端访问;用户通过远程控制终端经云端向水闸发送控制指令。此外,云端中间件还为系统提供数据可视化、渠系配水等模型与算法的支撑。系统软件主要功能模块如图 6 所示。

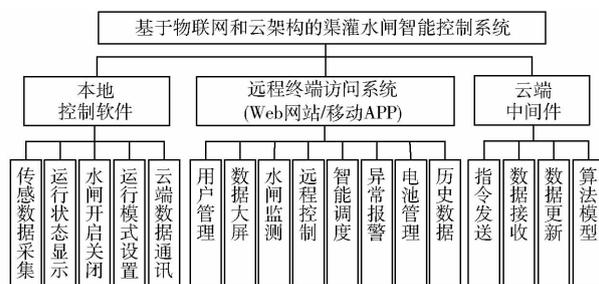


图 6 系统软件构成框图

Fig. 6 Software composition block diagram

3 软件设计

3.1 系统构成

系统软件设计包括本地控制端、远程终端以及

3.2 数据通讯

通过设置定时中断完成水闸运行状态数据的采集。在闸门静止时,每 1 000 ms 一次轮询各类传感器;在闸门运行时,轮询周期缩短至 100 ms,以提高数据实时性。在获得传感器应答后,分别进行数据的 CRC 校验、时序校验和合理性校验,以提高数据可靠性。如数据错误则返回错误代码。

采用 Socket 通讯程序,将采集到的水闸运行状态数据发送至云端并接受处理,如图 7 所示。在云端服务器初始化 Socket 后,与端口建立绑定,进行监听并阻塞,等待水闸端连接。灌区中所有水闸端均可以向云端发送建立连接请求。在与云端建立连接后,水闸端按照预定编码向云端发送数据请求,此

时仅发送有更新的数据,以降低运行功耗;云端接收数据并按预定格式解码。若解码成功,将更新云端数据,更新操作日志,然后把回应数据反馈给水闸端。双方使用 $\text{send}()$ 和 $\text{receive}()$ 完成数据的全双工发送。

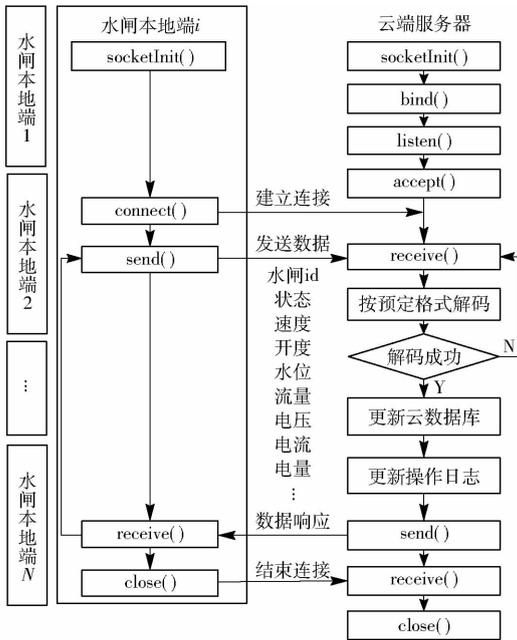


图 7 水闸状态数据发送与接收

Fig. 7 Transmission and reception of sluice running data

用户通过访问终端委托云端中间件向水闸发送控制指令,嵌入式模块接受并执行指令。水闸在执行启动和关闭指令时,电动机均采用变速方式,提高启闭过程的平稳性,如启动时采用 5 s 爬坡启动,中间匀速运行,停止时采用 3 s 减速停车。采用高分辨率绝对式编码器获得闸门实时开度。在水闸即将达到预设开度前,根据闸门运行速度,提前发出停车指令,减少闸门运动惯性带来的定位误差。

3.3 智能调度

智能调度是指用户按照所在灌区不同区域不同时间不同农作物的灌溉需求,制定灌溉方案,让系统在渠系配水优化模型的作用下,自动决定需要开启或关闭的水闸及其运行模式、开启时间、开启时长、开度等参数设置,通过远程遥控,自主完成灌溉任务,同时将运行结果数据反馈至用户端供辅助决策。

渠灌系统由很多渠道串联而成,每段渠道被水闸分割。某个水闸开度变化时,将引起闸门前后水位和流量的变化。将实时监测获取的闸后水位、流量与目标值的偏离量作为控制水闸开度的反馈输入,建立基于水位、流量双反馈的闸门开度云控模型,并在此基础上开发云端中间件。通过云端软件包对水闸群的联动控制,完成自动调水。假定下游用户要在 C_i 段渠道取水,在稳定输水工况下,自动

调水流程(图 8)如下:

- (1) 用户向云端提出订水请求,并告知需水量 ΔW_i 。
- (2) 云端接受订水请求,并远程控制相关上游水闸 $G_0 \sim G_i$ 开开放水。
- (3) 实时监测水闸 G_i 闸后水位 L_i 、过闸流量 Q_i 和累计水量,并发送至云端。
- (4) 云端中间件程序根据 L_i 和 Q_i 计算偏离量,进而求得此时 G_i 的闸门开度增量 Δg_i ,并通过远程控制,驱动闸门自动调节;以此类推,让所有闸门 $G_0 \sim G_{i-1}$ 自动完成调节。调节过程中防止各段渠道 $C_0 \sim C_i$ 溢水。
- (5) 当调水量达到订水量时,调水结束;否则重复步骤(3)、(4)。

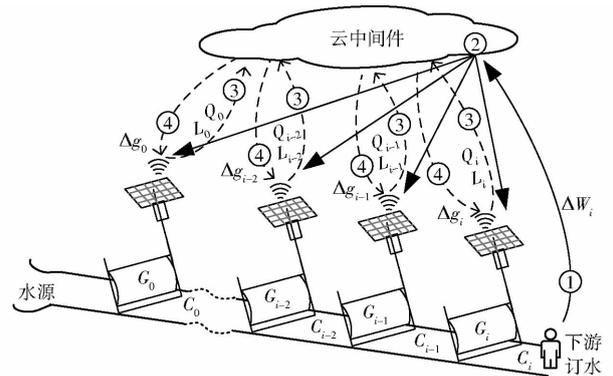


图 8 水闸群控运行图

Fig. 8 Working diagram of sluice group control

3.4 异常报警

当水闸供电不足或者水闸未按指定指令执行时系统将自动报警。前者通过对光伏控制器实时监测电量来实现,后者根据旋转式闸门开启或关闭时的角速度变化规律作出判断。水闸运行角速度 ω 为瞬时角度 θ 的变化率, θ 可以通过开度仪实时监测获取。根据选用的开度仪和传动机构性能,预设合理上限角速度 ω_{\max} 和下限角速度 ω_{\min} 。在正常开启时, ω 值是一个逐步增速、匀速开启(大于 ω_{\min} 且小于 ω_{\max}) 和逐步减速的过程,如图 9 中的 f_0 所示;如果值较长时间小于 ω_{\min} 或趋于零,如 f_1 ,需要检查水闸是否被异物堵塞;如果值较长时间大于 ω_{\max} ,如 f_2 ,需要检查传感器或传动机构是否发生故障。

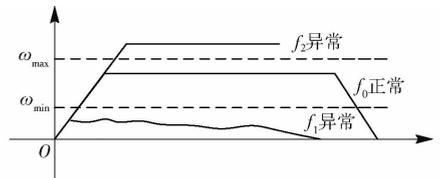


图 9 水闸开启时角速度变化曲线

Fig. 9 Angular velocity varying graph of sluice at opening stage

4 试验

2017 年 8 月,在浙江水利水电学院搭建模拟灌区,安装了 5 扇试验水闸,使用了阿里云服务器、云数据库和云安全等服务,对本系统进行了为期 15 d 运行测试。试验期间,使用不同配置的用户终端设备在不同信号强弱下对本系统的远程控制响应时间、闸门开度控制精度、水位控制精度以及传感器节点数据丢包率进行了测试,测试原始数据如图 10 所示。测试结果表明 APP 远程控制响应时间最长为 0.5 s,最大的开度控制误差 1.2 mm,动态水位控制误差为 6.5 mm,网络丢包率接近为零。此外,本系统采用了文献[9]的闸门测流方法,在自由出流和淹没出流 2 种状态下的最大误差分别为 4.55% 和 8.29%。系统在测试期运行安全稳定,云端数据管理便捷,响应速度快,运维成本低,并不需要配置专门的服务器、用户终端设备和其他支撑环境。渠道水闸远程控制 APP、本地控制软件及旋转式闸门如图 11 ~ 13 所示。



图 11 渠道水闸智能控制 APP

Fig. 11 Intelligent control APP of canal irrigation sluice

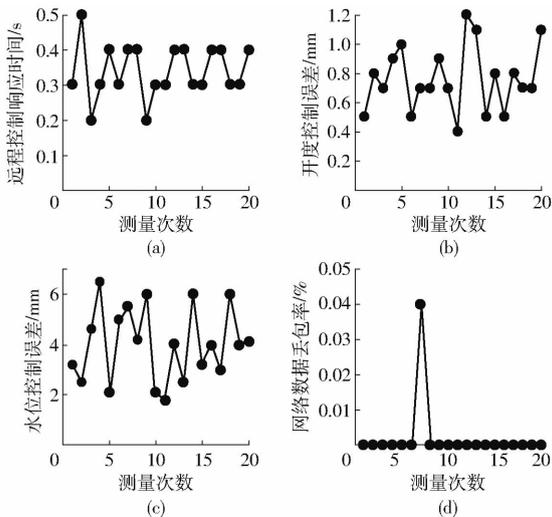


图 10 系统测试结果

Fig. 10 Results of system running test

5 结论

(1)以无线公共网络作为传输媒介,在物联网和云技术架构上进行了系统开发,利用云中间件实现了水闸终端与云端的双向通讯,并使用移动 APP 作为用户访问终端,探索了利用新一代信息技术实现渠道水闸远程监测与控制的可行性。

(2)旋转式闸门的结构设计和电动机启停的变速控制方式,降低了水闸开启和关闭阶段的驱动能耗,提高了水闸控制的可靠性。



图 12 本地控制软件

Fig. 12 Local control software



(a) 试验装置

(b) 产品实物

图 13 旋转式闸门

Fig. 13 Rotary sluice

(3)试验结果表明,开发的基于物联网和云架构的渠道水闸智能控制系统,运行安全可靠,响应速度快,控制精度高,运维成本低,可适用于农田灌溉中小型渠道的输水、配水的精准化控制。

参 考 文 献

- 1 鞠茂森. 关于灌溉现代化的思考[J]. 水利发展研究, 2013(3):10-15.
JU Maosen. Thinking of irrigation modernization[J]. Water Resources Development Research, 2013(3):10-15. (in Chinese)
- 2 李晓俐. 以色列灌溉技术对中国节水农业的启示[J]. 宁夏农林科技, 2014, 55(3):56-57.
LI Xiaoli. Israeli enlightenment to China's water-saving agricultural irrigation technology[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2014, 55(3):56-57. (in Chinese)
- 3 ALMINAGORTA O, MERKLEY G P. Transitional flow between orifice and non-orifice regimes at a rectangular sluice gate [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(3):382-387.
- 4 BABU B M, MISHRA P K, SATYANARAYA N A T. Performance of baffle-sluice modules with changed module dimensions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(5):310-313.
- 5 LIN C H, YEN J F, TSAI C T. Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(4):249-252.
- 6 GUO Huanlou, KANG Weili. Research on control system for sluice gate flow based on fuzzy neural network PID [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 199(2):1779-1782.
- 7 金宏智, 严海军, 钱一超. 国外节水灌溉工程技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):59-63.
JIN Hongzhi, YAN Haijun, QIAN Yichao. Overseas development of water saving irrigation engineering technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):59-63. (in Chinese)
- 8 曾微波, 王履华, 吴长彬, 等. 基于虚拟现实与物联网技术的水闸智能调度系统研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(11):120-123.
ZENG Weibo, WANG Lühua, WU Changbin, et al. Study on virtual reality and internet of things based sluice intelligent operation system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(11):120-123. (in Chinese)
- 9 张从鹏, 罗学科, 李功一, 等. 面向灌区调水工程的远程自动计量闸门研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8):172-177, 275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140827&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.027.
ZHANG Congpeng, LUO Xueke, LI Leyi, et al. Development of remote automatic metering sluice oriented to irrigation water diversion project [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):172-177, 275. (in Chinese)
- 10 沈明霞, 丛静华, 张祥甫, 等. 基于 ARM 和 DSP 的农田信息实时采集终端设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6):147-152.
SHEN Mingxia, CONG Jinghua, ZHANG Xiangfu, et al. Design and implementation of terminal for agricultural data real-time acquisition based on ARM and DSP [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):147-152. (in Chinese)
- 11 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 太阳能渠道式喷灌机自主导航研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):141-146. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160921&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.021.
LIU Kenan, WU Pute, ZHU Delan, et al. Autonomous navigation of solar energy canal feed sprinkler irrigation machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):141-146. (in Chinese)
- 12 李臣明, 赵丽华, 吴学文, 等. 基于水位、流量预测信息的水闸群调节方法[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3):70-74.
LI Chenming, ZHAO Lihua, WU Xuewen, et al. Adjust methods of floodgates based on flow forecast information [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3):70-74. (in Chinese)
- 13 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网:概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3):1-9.
SUN Qibo, LIU Jie, LI Shan, et al. Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology problem [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3):1-9. (in Chinese)
- 14 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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):216-226. (in Chinese)
- 15 CAMMALLERI C, ANDERSON M C, GAO F, et al. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rain fed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014(186):1-11.
- 16 RAHIMI M R, REN J, LIU C H, et al. Mobile cloud computing: a survey, state of art and future directions [J]. Mobile Networks and Applications, 2014, 19(2):133-143.
- 17 崔勇, 宋健, 缪葱葱, 等. 移动云计算研究进展与趋势[J]. 计算机学报, 2017, 40(2):273-295.
CUI Yong, SONG Jian, MIAO Congcong, et al. Mobile cloud computing research progress and trend [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(2):273-295. (in Chinese)
- 18 李瑞轩, 董新华, 辜希武, 等. 移动云服务的数据安全与隐私保护综述[J]. 通信学报, 2013, 34(12):158-166.
LI Ruixuan, DONG Xinhua, GU Xiwu, et al. Overview of the data security and privacy-preserving of mobile cloud services [J]. Journal on Communications, 2013, 34(12):158-166. (in Chinese)
- 19 张志昌, 肖宏斌, 毛兆民. 明渠测流的理论与方法[M]. 西安:陕西人民出版社, 2004.
- 20 AKOZ M S, KIRKGOZ M S, ONER A A. Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47(2):167-176.
- 21 HABIBZADEH A, VATANKHAH A R, RAJARATNA M N. Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(9):1079-1084.