

基于卡尔曼滤波的降雨起止时间手机远程监测装置研制

周 平^{1,2}, 杨启良¹, 李加念^{1*}, 杨具瑞¹, 韩焕豪¹, 刘小刚¹, 熊 凯¹

(1. 昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500; 2. 四川三河职业学院, 泸州 646200)

摘 要: 为解决设施农业的降雨监测系统难以精准检测降雨起止信号的问题, 研制了一种降雨起止时间远程监测装置。该装置主要由雨水感应模块、雨水检测电路、单片机、通用分组无线电系统数据传输单元模块 (General Packet Radio System Data Transmission Unit, GPRS DTU)、串口通信电路和手机端 APP 组成。通过自行设计的雨水感应模块检测降雨过程, 利用卡尔曼滤波器降低雨水检测信号的电阻热噪声干扰, 根据滤波后的信号差值建立降雨起止信号判别模型, 判定的降雨起止信号经通用分组无线电系统 (General Packet Radio System, GPRS) 远程无线传输至云服务器, 并以云服务器的同步时间作为基准时间, 实现了手机远程监测降雨起止时间。开展装置性能测试试验, 研究其稳定性、准确性与可靠性, 结果表明: 1) 降雨起止信号判别模型的判别周期取 10 s 最优; 2) 室内测试时的降雨起止信号错报率为 1.2%, 手机接收成功率为 100%; 3) 雨水感应模块的导线末端间距为 2 mm、基板间夹角为 120° 是能检测小雨及以上等级的最优参数组合。将装置安装于开阔的楼顶天台开展实测验证试验, 结果表明: 装置对降雨开始与停止时间的检测误差范围分别为 7~34、9~29 s, 室外仅出现 1 次错报, 信号错报率为 5.9%, 符合对自然降雨过程的检测要求。该装置能远程监测降雨起止时间, 可为今后进一步研究农业智能感雨监测系统提供技术支持和理论依据。

关键词: 卡尔曼滤波; 传感器; 手机; 降雨; 起止时间; 远程监测

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.023

中图分类号: TP212.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-2-0196-13

周平, 杨启良, 李加念, 等. 基于卡尔曼滤波的降雨起止时间手机远程监测装置研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 196-208. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.023 http://www.tcsae.org

Zhou Ping, Yang Qiliang, Li Jianian, et al. Design of mobile phone remote monitoring device for the initiation and termination time of rainfall based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 196-208. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.023 http://www.tcsae.org

0 引 言

降雨起止时间是降雨的基本要素之一^[1], 能为节水灌溉^[2-3]、地表径流与土壤养分迁移^[4-5]、设施农业自动遮雨控制^[6-7]等方面的降雨监测研究提供科学依据。目前用于感知降雨开始和停止的仪器装置主要有降水现象仪、雨量计和雨水传感器^[8-10]。降水现象仪和雨量计主要应用于农业气象站, 均能较准确地检测降雨量和降雨起止时间等, 但成本较高, 体积较大, 调试维护操作复杂^[11-12]。而在仅需感知降雨起止的设施农业测控系统中, 雨水传感器凭借结构简单、成本低、易集成等优点而被广泛应用^[13-14]。

常见雨水传感器分为电阻式、电容式、光电式 3 种, 这 3 种传感器分别利用雨滴附着传感器表面时的电阻、电容或光信号转换为电信号的原理来感知降雨过程。Zheng 等^[15]设计的超声波雨量计中, 使用雨水传感器快速检测降雨开始信号, 并控制超声波传感器执行降雨量检测。曹春号等^[16]研制的具有自动挡雨功能的蒸发器水面

蒸发量在线检测装置, 使用雨水传感器检测降雨开始或停止来执行挡雨或移除挡雨盖操作, 但传统雨水传感器对降雨停止响应滞后、检测灵敏度低, 仅当传感器表面雨水自然风干后才能响应降雨停止, 且金属表面易被氧化, 影响装置运行可靠性。为弥补传统雨水传感器的不足, 蔡坤等^[17]基于误码检测机制开发了一种红外光雨水传感器, 通过集雨器导雨管水流产生的通信误码判定降雨开始或停止, 研究表明离散水滴对通信误码影响显著, 导致系统会将雨停后集雨器表面残留雨水的滴落过程误判为降雨, 此外, 导雨管容易堵塞, 且未实现检测信号无线传输。

现有雨水传感器在设施农业的降雨监测系统中仍存在降雨起止信号检测灵敏度低、使用寿命短等问题, 为此, 本研究在传统电阻式雨水传感器基础上, 拟自行设计一种能快速感应降雨开始和停止的雨水感应模块, 并利用远程无线通信技术与云服务器技术, 研制一种结构简单、检测准确、运行可靠的小雨及以上等级降雨起止时间远程无线监测装置, 为实现农业智能感雨监测系统精准检测降雨起止信号提供一种可靠的方法和思路。

1 降雨起止时间手机远程监测装置结构与运行原理

1.1 整体结构设计

降雨起止时间手机远程监测装置主要由电源模块、

收稿日期: 2020-11-17 修订日期: 2021-01-10

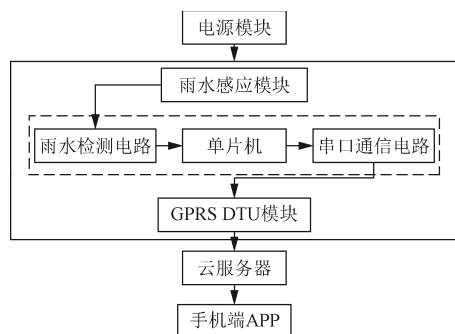
基金项目: 国家自然科学基金 (51509121、51979134)

作者简介: 周平, 讲师, 主要研究方向为农业智能化检测与控制技术。

Email: 609621843@qq.com

*通信作者: 李加念, 博士, 副教授, 主要研究方向为农业智能测控技术应用。Email: ljn825@163.com

雨水感应模块、雨水检测电路、Arduino UNO 单片机、串口通信电路、通用分组无线电系统数据传输单元模块 (General Packet Radio System Data Transmission Unit, GPRS DTU)、云服务器和手机端 APP 组成。装置的系统结构框图如图 1 所示。



注: GPRS DTU 为通用分组无线电系统数据传输单元模块。

Note: GPRS DTU represents general packet radio system data transmission unit.

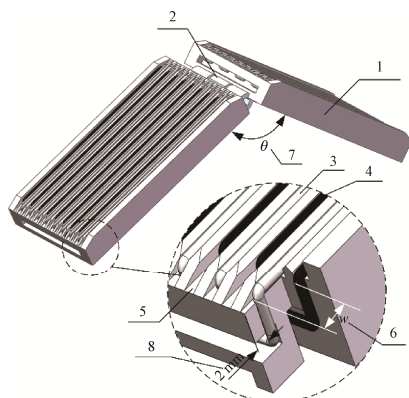
图 1 降雨起止时间手机远程监测装置的系统结构框图

Fig.1 System structure diagram of the mobile phone remote monitoring device for the initiation and termination time of rainfall

1.2 降雨起止信号的检测原理

1.2.1 雨水感应模块结构设计

雨水感应模块用于感应降雨开始和停止, 由两块相同规格参数的基板组成, 用阻尼铰链连接。基板采用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯材料打印制作, 长 80 mm、宽 40 mm、厚 10 mm, 其上表面等间距平行分布有 16 个导水槽。每个导水槽宽 1 mm、深 1.5 mm, 槽口为 90° 刃口状, 有利于模块表面附着的雨水排出。基板间夹角 (θ) 活动范围为 0~180°。受 3D 打印机性能限制, 导线末端间距 (w) 最小为 2 mm。选用具有导电能力的高密度聚乙烯导线^[18]作为雨水感应导线, 解决金属导线易被氧化的问题, 提高装置使用寿命。如图 2 所示, 将导线 I 和 II 间隔嵌入导水槽, 确保导线 I 和 II 互不连通。



1.基板 2.阻尼铰链 3.雨水感应导线 I 4.雨水感应导线 II 5.导水槽底部 6.导线末端间距(w , mm) 7.基板间夹角(θ , °) 8.固定位置
1.Substrate 2.Damping hinge 3.Rain sensing conductor I 4.Rain sensing conductor II 5.Bottom of flume 6.Distance between wire ends (w , mm) 7.Angle between substrates (θ , °) 8.Fixed position

图 2 雨水感应模块结构示意图

Fig.2 Structural diagram of rain sensing module

1.2.2 降雨起止检测原理

将雨水感应模块 2 个基板的雨水感应导线 I 和 II

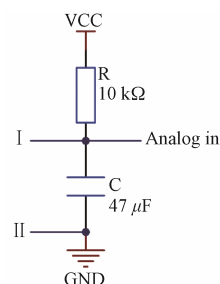
并联接入雨水检测电路, 如图 3 所示。降雨过程中的雨滴击溅或导水槽底端积水接通导线 I 和 II, 导线间的阻值变化约为 15~150 k Ω 。雨水感应导线与上拉电阻 R 串联的分压端与单片机模拟信号输入端口相连, 通过分压端的电压变化来检测降雨的起止。分压端电压信号经单片机内部集成的 10 位 A/D 转换器处理为 0~1 023 的数字信号后, 作为判别降雨起止的检测信号。雨水检测信号与降雨过程的关系特征如下:

1) 无降雨阶段。导线 I 和 II 之间为断开状态, 分压端输出 5 V 电源电压, 检测信号值最大且平稳。

2) 降雨开始阶段。降雨开始时, 雨水将导线 I 和 II 接通, 上拉电阻开始分压, 分压端输出电压降低, 雨水检测信号值陡然减小, 信号出现下降拐点时即为降雨开始。

3) 降雨持续阶段。随着降雨持续, 导水槽底端积水使得导线 I 和 II 间的电阻接近最小值, 检测信号值趋近最小, 但雨滴击溅会改变积水量, 从而改变导线 I 和 II 间的电阻值, 导致信号有小幅度波动。

4) 降雨停止阶段。随着导水槽底端积水排出, 导线 I 和 II 间的电阻值增大, 分压端输出电压升高, 雨水检测信号值短时快速增大, 信号出现上升拐点时即为降雨停止。随后积水排出速率减小, 雨水检测信号值缓慢增大并趋近最大值。



注: VCC 为 5 V 直流电压; GND 为接地; R 为上拉电阻; C 为滤波电容; I 和 II 分别为雨水感应导线 I 和 II; analog in 为单片机模拟信号输入端口。
Note: VCC is 5 V direct current; GND is ground; R is pull-up resistance; C is filter capacitor; I and II are rain sensing conductors I and II, respectively; The analog in is the analog signal input port.

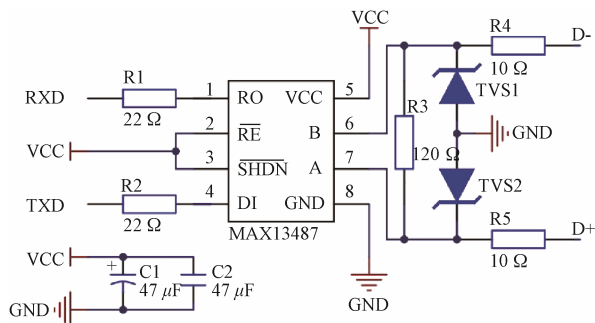
图 3 雨水检测电路示意图

Fig.3 Schematic diagram of rain detection circuit

1.3 降雨起止信号的传输原理

选用无线传输技术监测降雨起止时间, 可以节省网络布线成本, 提升装置适用性。降雨天气往往会影响到无线数据传输, 因此选择稳定可靠的无线通信方式是保障装置性能的关键。而现有 GPRS 通信技术具有永久在线、组网简单、传输速率快等特点^[19-20], 可以有效解决这一问题, 并已被广泛应用于传感器的远程监测^[21-22]。利用 GPRS DTU 模块 (济南有人物联网技术有限公司, 12 V) 可以实现端到端的无线和透明传输数据^[23]。通过 MAX13487 芯片设计的串口通信电路, 能将晶体管-晶体管逻辑电路 (Transistor-Transistor Logic, TTL) 电平信号转换为 RS485 电平信号, 实现单片机与 GPRS DTU 模块间的数据传输, 电路如图 4 所示。系统判定的降雨起止信号经单片机发送数据 (Transmit Data, TXD) 端口发送至 GPRS DTU 模块, 由模块内部嵌入式处理器对信号进

行传输控制协议 (Transmission Control Protocol, TCP) 封装, 经 GPRS 无线网络发送到云服务器数据中心进行存储, 把信号存储时间作为降雨起止检测时间。



注: VCC 为 5 V; GND 为接地; TXD 和 RXD 分别为单片机数据发送和接收口; D+和 D-分别为同向输入端和反向输入端; R1~R5 为 5 个匹配电阻; C1 和 C2 为滤波电容; TVS1 和 TVS2 为瞬态抑制二极管。
Note: VCC is 5 V DC; GND is ground; TXD and RXD represent ports to transmit data and receive data, respectively; D+ and D- are noninverting and inverting input, respectively; R1-R5 are five matching resistors; C1 and C2 are the filter capacitors; TVS1 and TVS2 are transient voltage suppressors.

图 4 串口通信电路示意图

Fig.4 Schematic diagram of serial communication circuit

2 降雨起止时间手机远程监测装置系统软件设计

2.1 系统软件总体流程

单片机底层软件用 C 语言在 IDE 1.8.7 集成开发环境中开发、编译、调试, 实现雨水检测信号采集、卡尔曼滤波处理和降雨起止信号判别。GPRS DTU 模块配置串口波特率、云服务器域名、TCP 端口和注册包后, 向云服务器发送 TCP 通信请求, 与服务器握手成功后建立 TCP 数据通信, 能将降雨起止信号透传至服务器数据中心进行存储。手机端 APP 用易语言在 E4A 6.5 可视化开发环境中调用 TCP/IP 类库进行开发与调试, 连接云服务器域名和 TCP 端口后, 登录装置 ID 向云服务器请求加载时间段内的存储数据, 请求成功后能在 APP 上显示对应装置的降雨起止检测时间。单片机和手机端 APP 与云服务器间均采用 JSON 数据格式沟通互传数据。系统软件总体设计流程如图 5 所示。

2.2 卡尔曼滤波器

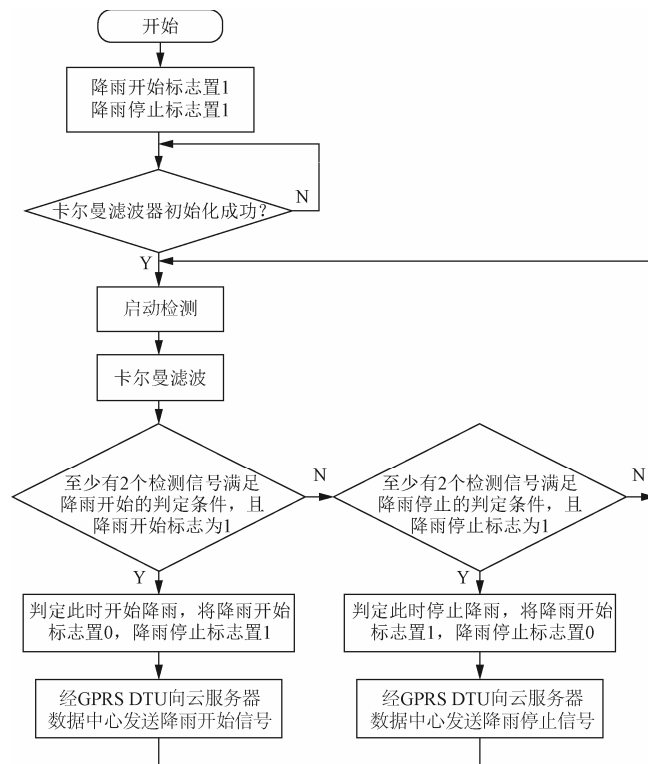
雨水接通导线 I 和 II 后, 雨水检测电路的回路电阻较大, 导致分压端输出的雨水检测信号受电阻热噪声干扰。电阻热噪声呈白噪声特点^[24]。而卡尔曼滤波器能有效降低白噪声干扰^[25], 鲁棒性强, 已被广泛应用于传感器检测信号优化^[26-27]。用卡尔曼滤波器对连续变化的雨水检测信号进行采样, 采样周期为 1 s, 根据检测信号 $k-1$ 时刻的最优估计值和 k 时刻的检测值, 通过递归估计获得 k 时刻的最优估计值, 实现信号优化, 具体包括预测和修正 2 个部分。

1) 在预测过程中, 卡尔曼滤波器根据雨水检测信号在 $k-1$ 时刻的最优估计值 $\hat{x}(k-1|k-1)$, 可以预测 k 时刻的估计值 $\hat{x}(k|k-1)$, 建立计算方程为

$$\hat{x}(k|k-1) = U \cdot \hat{x}(k-1|k-1) + V \cdot u(k-1) \quad (1)$$

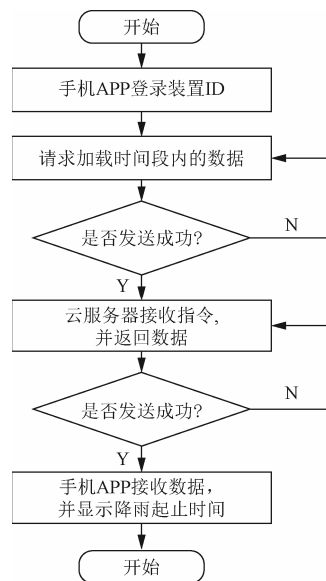
$$P(k|k-1) = U \cdot P(k-1|k-1) \cdot U^T + Q \quad (2)$$

式中初始时刻的最优估计值设定为 0, 即 $\hat{x}(0|0) = 0$; $P(k|k-1)$ 为 k 时刻估计值对应的协方差; $P(k-1|k-1)$ 为 $k-1$ 时刻最优估计值对应的协方差, 其中 $P(0|0) = 0$; $u(k-1)$ 为状态控制量, 因系统未加入控制量, 则 $u(k-1) = 0$; U 为状态转移矩阵, 因相邻时刻的雨水检测信号变化不大, 则 $U = 1$; V 为控制矩阵; Q 为过程激励噪声的协方差。



a. 底层软件的程序流程图

a. Program flow chart of underlying software



b. 手机端 APP 的程序流程图

b. Program flow chart of mobile phone application

图 5 降雨起止时间手机远程监测装置系统的程序流程图
Fig.5 Program flow chart of the mobile phone remote monitoring device system for the initiation and termination time of rainfall

2) 在修正过程, 卡尔曼滤波器根据对应雨水检测信号在 k 时刻的检测值 $z(k)$ 修正 k 时刻的估计值 $\hat{x}(k|k-1)$, 从而得出 k 时刻的最优估计值 $\hat{x}(k|k)$, 建立计算方程为

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + \lambda(k) \cdot (z(k) - H \cdot \hat{x}(k|k-1)) \quad (3)$$

$$\lambda(k) = P(k|k-1) \cdot H^T \cdot (H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R)^{-1} \quad (4)$$

$$P(k|k) = (1 - \lambda(k) \cdot H) \cdot P(k|k-1) \quad (5)$$

式中 $\lambda(k)$ 为雨水检测信号在 k 时刻的卡尔曼增益; $P(k|k)$ 为 k 时刻最优估计值对应的协方差; H 为测量矩阵, 由于 A/D 转换前后的信号是线性对应关系, 则 $H=1$; R 为测量噪声的协方差。

由于状态转移矩阵确定, 参数 Q 越小且不为 0 时的滤波收敛稳定性越好, 参数 R 过小或过大时的取值越小滤波收敛稳定性越差, 但 R 值越小滤波收敛越快^[28]。结合卡尔曼滤波器对雨水检测信号的滤波效果测试结果, 设置参数 $Q=10^{-4}$, $R=10$ 。重复上述预测过程和修正过程, 递归得出单个雨水检测信号的卡尔曼滤波信号, 能有效降低检测过程中产生的电阻热噪声对雨水检测信号的干扰, 实现平滑滤波, 滤波效果如图 6 所示。

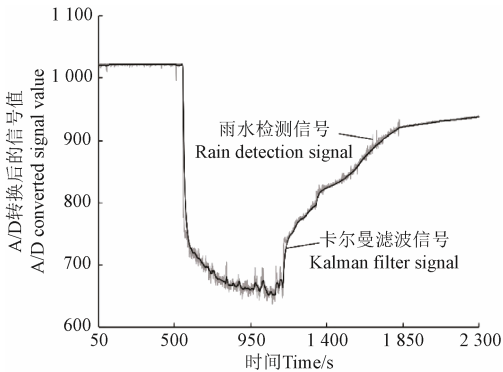


图6 单个雨水检测信号的卡尔曼滤波曲线

Fig.6 Kalman filter curve of individual rain detection signal

2.3 降雨起止信号判别模型

为提高降雨起止信号判别容错性, 采用 3 块相同参数雨水感应模块同时检测降雨, 并用 3 个卡尔曼滤波器分别处理, 得到 3 组卡尔曼滤波信号 $i(i=1,2,3)$ 在 k 时刻的值为 $\hat{x}_i(k|k)$ 。由于单个卡尔曼滤波器运行 1 次耗时约 0.2 ms, 因此可将顺序运行的 3 个卡尔曼滤波器视为同时运行。按下述步骤对 3 个卡尔曼滤波信号进行分析, 可实现降雨起止信号的判别。

1) 获取判别基准值。每间隔一段时间 (Δt) 同时采集得到各卡尔曼滤波的信号值 $\hat{x}_i(k/\Delta t|k/\Delta t)$, 分别作为各卡尔曼滤波信号在 k 时刻的判别基准值, 其中 $k/\Delta t$ 表示整除取商。系统每间隔 Δt 对各卡尔曼滤波信号的判别基准值进行周期性采样, 并以间隔时间 Δt 对卡尔曼滤波信号进行周期性判别, 故将 Δt 确定为判别周期。

2) 计算判别信号值。将判别周期内 k 时刻的各卡尔

曼滤波信号值减去对应判别基准值, 得到 k 时刻的判别信号值, 计算公式为

$$y_i(k) = \hat{x}_i(k|k) - \hat{x}_i(k/\Delta t|k/\Delta t) \quad (6)$$

式中 $y_i(k)$ 为 k 时刻卡尔曼滤波信号 i 的判别信号值; $\hat{x}_i(k|k)$ 为卡尔曼滤波信号 i 在 k 时刻的值; $\hat{x}_i(k/\Delta t|k/\Delta t)$ 为卡尔曼滤波信号 i 在 k 时刻对应的判别基准值。

3) 确定阈值上下限。将 k 时刻的判别信号值 $y_i(k)$ 分别与阈值上限 K_+ 、下限 K_- 对比分析, 可以动态判别各卡尔曼滤波信号的上升拐点和下降拐点, 从而判定降雨起止信号。由于降雨开始或停止时的信号值会快速下降或上升, 此阶段的卡尔曼滤波信号值每秒变化梯度至少为 1, 即降雨开始或停止时的判别周期 Δt 内, 卡尔曼滤波信号值变化幅度至少为判别周期值, 因此 K_+ 取 Δt 的正值, K_- 取 Δt 的负值。

4) 判定降雨起止信号。若在 k 时刻至少有 2 个卡尔曼滤波信号满足 $y_i(k) < K_-$, 判定信号从 k 时刻进入下降拐点, 此刻向 GPRS DTU 模块传输降雨开始信号; 若在 k 时刻至少有 2 个卡尔曼滤波信号满足 $y_i(k) > K_+$, 判定信号从 k 时刻进入上升拐点, 此刻向 GPRS DTU 模块传输降雨停止信号。通过程序设计, 避免了连续多次判定降雨开始或停止, 即系统判定的 1 次降雨过程中, 仅传输降雨开始和停止信号各 1 次。

重复上述步骤即可完成整个降雨过程的动态分析, 判定出降雨起止信号。

3 降雨起止时间手机远程监测装置性能测试

3.1 试验环境与试验装置

试验于 2020 年 7 月 13 日—8 月 2 日在昆明理工大学节水灌溉技术与设备实验室中进行, 室内平均温度为 25.4 °C, 并确保室内无风。选用工业卡胶针头和微型水泵 (江门鑫茂电机有限公司, 工作电压 10 V, 进水压力 3 MPa) 搭建模拟降雨装置, 选用透明玻璃罩保护的 USB 摄像头模块 (华锐视通科技有限公司, 工作电压 5 V) 观测降雨起止时间参考值, 选用自来水作为试验水样进行试验, 试验装置如图 7 所示。试验开始前, 根据试验方案装接对应型号的针头和雨水感应模块, 把支架调至离地 2 m 的高度, 并将装置通电后完成底层软件系统和 GPRS DTU 模块初始化。

3.2 装置性能测试指标

3.2.1 降雨起止信号判别错报率

降雨开始和停止信号判别的错报率为

$$F_S = (1 - N_S / N) \times 100\% \quad (7)$$

$$F_E = (1 - N_E / N) \times 100\% \quad (8)$$

式中 F_S 和 F_E 分别为系统判别降雨开始和停止信号的错报率, 正值表示漏报率, 负值表示误报率, %; N_S 和 N_E 分别为系统判别降雨开始和停止信号的次数; N 为模拟降雨总数。

3.2.2 降雨起止信号接收成功率

手机端 APP 接收降雨起止信号的成功率为

$$C_S = R_S / N_S \times 100\% \quad (9)$$

$$C_E = R_E / N_E \times 100\% \quad (10)$$

式中 C_S 和 C_E 分别为手机端 APP 接收降雨开始和停止信号的成功率, %; R_S 和 R_E 分别为手机端 APP 接收降雨开始和停止的次数。

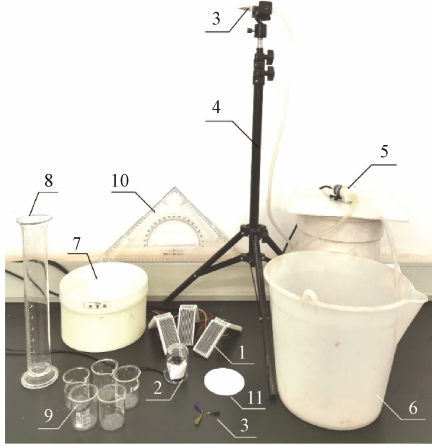


图 7 降雨起止时间手机远程监测装置性能测试装置图
Fig.7 Photo of performance testing device of the mobile phone remote monitoring device for the initiation and termination time of rainfall

3.2.3 降雨起止时间检测误差

剔除手机端 APP 接收到的降雨错报数据, 将手机端 APP 显示的降雨起止时间作为检测时间, 将 USB 摄像头所测降雨起止时间作为参考时间, 并将二者差值作为降雨起止时间检测误差。用检测值与参考值间的绝对误差评价降雨起止时间检测的准确度, 绝对误差越小表示检测结果越准确。

$$\Delta T_S = T_{MS} - T_{RS} \quad (11)$$

$$\Delta T_E = T_{ME} - T_{RE} \quad (12)$$

式中 ΔT_S 和 ΔT_E 分别为降雨开始时间和停止时间的检测误差, s; T_{MS} 和 T_{ME} 分别为降雨开始和停止的检测时间; T_{RS} 和 T_{RE} 分别为降雨开始和停止的参考时间。降雨起止时间检测误差为正值表示检测时间滞后于参考时间, 为负值表示检测时间超前于参考时间。

3.2.4 降雨起止时间检测稳定性

对同一水平的重复试验所测降雨开始或停止时间的检测误差求极差, 即计算检测误差最大值与最小值之差, 极差越小, 表示降雨开始或停止时间的检测越稳定。

3.3 试验方法

3.3.1 模拟降雨装置率定试验

将单针头固定在支架上, 通过微型水泵提供水压,

以具有一定初速度的喷水方式可以实现模拟降雨^[29]。将针头水平放置, 以平抛式喷水来模拟降雨, 可以降低针头离地高度。将支架调至离地 2 m 的高度后, 分别装接 21 G (内径和外径分别为 0.52、0.82 mm)、19 G (内径和外径分别为 0.72、1.08 mm) 和 17 G (内径和外径分别为 1.11、1.49 mm) 3 种型号的针头来模拟小雨、中雨和大雨 3 种降雨等级。为确保模拟降雨的降雨强度、降雨均匀度、雨滴直径和雨滴终点速度 4 个降雨特征与大部分自然降雨相符^[30], 用下述方法和标准对该装置的降雨特征进行对比分析。

1) 在降雨面较宽的位置选择 20 cm×20 cm 的区域, 用雨量器和雨量筒测得降雨强度 I 。若所选区域的降雨强度符合小雨 (I 为 0.3~0.5 mm/min)、中雨 (I 为 1.5~2.5 mm/min)、大雨 (I 为 3.8~4.2 mm/min) 对应的范围^[31], 则标记为对应降雨强度的有效降雨面。

2) 采用降雨均匀系数评价模拟降雨均匀度, 且模拟的降雨均匀系数应在 80 % 以上^[32]。将 5 个容积为 50 mL 的量杯分别置于有效降雨面中心和 4 个顶点, 统计分析各量杯中的水量可以求出有效降雨面的降雨均匀系数为

$$\mu' = 1 - \frac{\sum_{j=1}^5 |L_j - \bar{L}|}{5\bar{L}} \quad (13)$$

式中 μ' 为有效降雨面的降雨均匀系数, %; L_j 为有效降雨面上第 j 测量点的雨量, mL; \bar{L} 为有效降雨面上的雨量均值, mL。

3) 采用色斑法测量雨滴直径, 参考孙恺等^[33]通过针管式人工降雨装置拟合的滤纸色斑与雨滴直径关系式 (14) 推算雨滴直径。

$$d = 0.451D^{0.665} \quad (14)$$

式中 d 为雨滴直径, mm; D 为滤纸色斑直径, mm。

由于有效降雨面较小, 在其区域内的雨滴直径分布比较均匀, 因此选用雨滴中数直径来表示模拟降雨过程的雨滴直径。统计降雨量中不同直径雨滴所占体积比, 由式 (15) 计算出雨滴中数直径作为检测值。

$$2 \sum_{d_{\min}}^{D_{50}} (d^3 \cdot N(d)) \geq \sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} (d^3 \cdot N(d)) \quad (15)$$

式中 D_{50} 为雨滴中数直径的检测值, mm; d_{\min} 为最小雨滴直径, mm; d_{\max} 为最大雨滴直径, mm; $N(d)$ 为直径为 d 的雨滴个数。

利用周跃等^[34]通过贝斯特自然降雨分配经验公式得出的降雨强度与雨滴中数直径关系式 (16) 计算出雨滴中数直径的理论值。

$$D'_{50} = 2.486 I^{0.221} \quad (16)$$

式中 D'_{50} 为雨滴中数直径的理论值, mm; I 为降雨强度, mm/min。

4) 装置模拟雨滴在重力、空气浮力和空气阻力作用下作平抛运动, 垂直方向的运动方程为

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot (1 - \rho_a / \rho_w) - F_D \quad (17)$$

式中 m 为雨滴质量, g; a 为平抛运动垂直方向的加速度, m/s^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_a 和 ρ_w 分别为空气和水的质量密度, g/m^3 ; F_D 为空气阻力 (N), 计算公式^[35] 如下:

$$F_D = 0.3m \cdot a \quad (18)$$

根据式 (17)、式 (18) 和平抛运动速度公式 (19) 可估算有效降雨面的雨滴终点速度检测值。

$$v_m = \sqrt{a \cdot (l^2 / 2h + 2h)} \quad (19)$$

式中 v_m 为雨滴的滴落终点速度检测值, m/s ; l 为有效降雨面中心至装置的水平距离, m ; h 为针头离地垂直高度, m 。

利用 Atlas 等^[36] 拟合的雨滴直径与雨滴终点速度关系式 (20) 计算出雨滴终点速度理论值。

$$v'_m = 9.65 - 10.3e^{-0.6D_{50}} \quad (20)$$

式中 v'_m 为雨滴终点速度理论值, m/s 。

3.3.2 装置性能测试试验

雨水检测主要通过导水槽底端积水使导线 I 和 II 接通或断开, 而降雨强度、导线末端间距和基板间夹角是影响导线感应积水的主要因素, 此外, 降雨起止信号判别模型的判别周期选择也会影响判别效果, 所以选择这 4 个主要因素进行试验。

1) 判别模型的判别周期选择试验

设计判别周期的单因素试验测试判别周期 Δt 取值对降雨起止信号判定的影响。由降雨起止信号判别模型的判别规则可知, 判别周期取值越小, 判别响应越快, 但判别错报率越高, 容易将降雨过程中的信号波动错报为降雨起止信号; 判别周期取值越大, 判别响应越慢, 不符合快速检测降雨起止信号的设计要求。结合卡尔曼滤波器的采样周期为 1 s, 综合考虑设计判别周期为 5、10、15、20 s, 各重复 3 次。选择降雨强度为小雨, 每次试验模拟的无降雨、降雨持续、降雨停止 3 个连续阶段各进行 10 min, 并选用导线末端间距为 3 mm、基板间夹角为 90° 的雨水感应模块进行试验。通过试验, 确定判别周期的最优取值, 使降雨起止信号判别错报率最低和降雨起止时间检测误差最小。

2) 雨水感应模块的参数选择试验

由于导线末端的最小间距为 2 mm, 因此将导线末端间距水平设置为 2、3、4 mm。基板间夹角活动范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 因此将基板间夹角水平设置为 60° 、 90° 、 120° 。根据模拟降雨装置率定结果, 将降雨强度水平设置为小雨、中雨、大雨。选择判别模型最优判别周期进行三因素三水平的全面试验, 每组试验重复 3 次, 共 27 组 81 次试验, 每次模拟降雨过程与单因素试验相同, 试验方案如表 1 所示。通过试验, 确定能检测小雨及以上等级的雨水感应模块最优参数组合, 使降雨起止信号判别错报率最低, 降雨起止时间检测误差最小和稳定性最好。

表 1 雨水感应模块参数选择试验方案
Table 1 Test schemes for parameter selection of rain sensing module

| 试验号 Test No. | 降雨强度 Rainfall intensity (A) | | 导线末端间距 Distance between ends of wires (B) | | 基板间夹角 Angle between substrates (C) | |
|-----------------|------------------------------------|-------------|--|-------------|---------------------------------------|-------------|
| | 值 Value/(mm·min ⁻¹) | 水平 Level | 值 Value/mm | 水平 Level | 值 Value/(°) | 水平 Level |
| | | | | | | |
| 1 | 0.3~0.5 | 1 | 4 | 1 | 60 | 1 |
| 2 | 0.3~0.5 | 1 | 4 | 1 | 90 | 2 |
| 3 | 0.3~0.5 | 1 | 4 | 1 | 120 | 3 |
| 4 | 0.3~0.5 | 1 | 3 | 2 | 60 | 1 |
| 5 | 0.3~0.5 | 1 | 3 | 2 | 90 | 2 |
| 6 | 0.3~0.5 | 1 | 3 | 2 | 120 | 3 |
| 7 | 0.3~0.5 | 1 | 2 | 3 | 60 | 1 |
| 8 | 0.3~0.5 | 1 | 2 | 3 | 90 | 2 |
| 9 | 0.3~0.5 | 1 | 2 | 3 | 120 | 3 |
| 10 | 1.5~2.5 | 2 | 4 | 1 | 60 | 1 |
| 11 | 1.5~2.5 | 2 | 4 | 1 | 90 | 2 |
| 12 | 1.5~2.5 | 2 | 4 | 1 | 120 | 3 |
| 13 | 1.5~2.5 | 2 | 3 | 2 | 60 | 1 |
| 14 | 1.5~2.5 | 2 | 3 | 2 | 90 | 2 |
| 15 | 1.5~2.5 | 2 | 3 | 2 | 120 | 3 |
| 16 | 1.5~2.5 | 2 | 2 | 3 | 60 | 1 |
| 17 | 1.5~2.5 | 2 | 2 | 3 | 90 | 2 |
| 18 | 1.5~2.5 | 2 | 2 | 3 | 120 | 3 |
| 19 | 3.8~4.2 | 3 | 4 | 1 | 60 | 1 |
| 20 | 3.8~4.2 | 3 | 4 | 1 | 90 | 2 |
| 21 | 3.8~4.2 | 3 | 4 | 1 | 120 | 3 |
| 22 | 3.8~4.2 | 3 | 3 | 2 | 60 | 1 |
| 23 | 3.8~4.2 | 3 | 3 | 2 | 90 | 2 |
| 24 | 3.8~4.2 | 3 | 3 | 2 | 120 | 3 |
| 25 | 3.8~4.2 | 3 | 2 | 3 | 60 | 1 |
| 26 | 3.8~4.2 | 3 | 2 | 3 | 90 | 2 |
| 27 | 3.8~4.2 | 3 | 2 | 3 | 120 | 3 |

4 结果与分析

4.1 模拟降雨装置率定试验

模拟降雨装置的率定结果如表 2 所示。结果表明, 该装置使用 3 种不同型号针头模拟的 3 种降雨强度分别符合小雨 (I 为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/min}$)、中雨 (I 为 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm/min}$)、大雨 (I 为 $3.8 \sim 4.2 \text{ mm/min}$) 等级范围, 3 种降雨强度下的有效降雨面均达到 80% 以上降雨均匀度的试验要求。模拟降雨的雨滴中数直径随降雨强度增大而增大, 符合自然降雨的变化趋势。

表 2 模拟降雨特征率定结果

| 降雨特征 Rainfall characteristics | | 针头型号 Type of needle | | |
|--|--|---------------------|------------|------------|
| | | 21G | 19G | 17G |
| 水平距离 Horizontal distance/m | | 3.00±0.01 | 4.00±0.02 | 4.50±0.02 |
| 降雨强度 Rainfall intensity/(mm·min ⁻¹) | | 0.44±0.02 | 2.35±0.03 | 4.12±0.08 |
| 降雨均匀度 Rainfall uniformity/% | | 93.54±0.25 | 86.17±0.25 | 80.74±0.23 |
| 雨滴中数直径 Mean diameter of raindrop/mm | | 1.73±0.07 | 2.56±0.05 | 3.01±0.09 |
| 雨滴终点速度 Terminal velocity of raindrop/(m·s ⁻¹) | | 6.86±0.01 | 7.76±0.02 | 8.26±0.02 |

由表 3 可知, 不同降雨强度下的雨滴中数直径检测值均小于理论值且误差较大, 由于所选有效降雨面较小,

同一降雨强度下的雨滴直径变化较小,统计降雨量累积体积达到 50%时的雨滴直径偏小,导致所测雨滴中数直径小于理论值,但模拟降雨的雨滴中数直径检测值能达到相同降雨强度自然降雨雨滴中数直径理论值的 80%以上^[37]。不同降雨强度下的雨滴终点速度检测值均大于理论值,但雨滴终点速度越大,雨滴滴落在雨水感应模块表面时更容易溅出。

具有 80%以上降雨均匀度的有效降雨面,能确保雨水感应模块在其不同位置均能较好地检测降雨过程。模拟降雨的雨滴中数直径范围为 1.73~3.01 mm,雨滴终点速度范围为 6.86~8.26 m/s,在比自然降雨偏小的雨滴直径和偏大的雨滴终点速度的模拟条件下进行试验,能更好检验雨水感应模块通过雨滴击溅或导水槽底端积水来感应降雨过程的可靠性,因此认为该模拟降雨装置能用于降雨起止时间手机远程监测装置性能测试试验。

表 3 不同降雨强度下的雨滴特征误差分析
Table 3 Error analysis of raindrop characteristics under different rainfall intensities

| 降雨强度 Rainfall intensity (mm·min ⁻¹) | 雨滴中数直径 | | | 雨滴终点速度 | | |
|--|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|--|---------------------------------|
| | Mean diameter of raindrop | | | Terminal velocity of raindrop | | |
| | 检测值 Measured value /mm | 理论值 Theoretical value/mm | 相对 误差 Relative error/% | 检测值 Measured value /(m·s ⁻¹) | 理论值 Theoretical value /(m·s ⁻¹) | 相对 误差 Relative error/% |
| 0.44 | 1.73 | 2.07 | -16.43 | 6.86 | 6.09 | 12.64 |
| 2.35 | 2.56 | 3.00 | -14.67 | 7.76 | 7.43 | 4.44 |
| 4.12 | 3.01 | 3.40 | -11.47 | 8.26 | 7.96 | 3.77 |

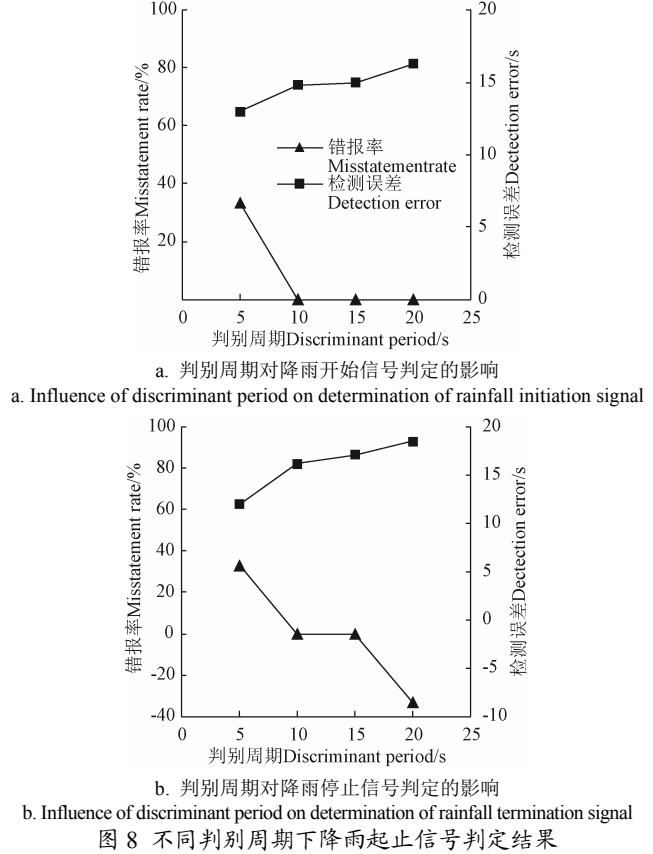
4.2 降雨起止时间手机远程监测装置性能测试试验
4.2.1 降雨起止信号判别模型的判别周期检验

降雨起止信号判别模型的判别周期检验结果如图 8 所示。判别周期取值越小,降雨起止时间的检测误差越小,检测结果越准确。对于降雨起止信号判别错报率指标,判别周期取 5 s 时,容易将降雨持续阶段的小幅度信号波动误判为降雨起止信号;判别周期取 20 s 时,由于小雨停止信号短时快速上升后,信号变化速率下降,使得判别周期内的判别信号值无法达到对应阈值上限,容易漏报降雨停止信号。判别周期分别取 10 和 15 s 时的降雨开始时间检测误差无明显差异,但判别周期取 10 s 时的降雨停止时间检测误差更小。因此选择最优判别周期为 10 s。

表 4 降雨起止时间手机远程监测装置运行可靠性分析
Table 4 Reliability analysis of operation of mobile phone remote monitoring device for detecting initiation and termination time of rainfall

| 试验号 Test No. | 降雨开始信号的判别测试 Discrimination test of rainfall initiation signal | | | | | 降雨停止信号的判别测试 Discrimination test of rainfall termination signal | | | | |
|--------------------|---|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | 模拟次数 Simulation count | 判定次数 Discrimination count | 接收次数 Received count | 错报率 Misstatement rate/% | 成功率 Success rate/% | 模拟次数 Simulation count | 判定次数 Discrimination count | 接收次数 Received count | 错报率 Misstatement rate/% | 成功率 Success rate/% |
| 1 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 |
| 2 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 |
| 3 | 3 | 4 | 4 | -33.3 | 100 | 3 | 4 | 4 | -33.3 | 100 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 27 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 | 3 | 3 | 3 | 0 | 100 |

4.2.3 装置运行准确性与稳定性检验
将同一水平 3 次重复试验的降雨开始和停止的检测



4.2.2 装置运行可靠性检验
装置运行可靠性检验结果如表 4 所示。试验中共模拟 81 次降雨过程,系统判定降雨开始和停止次数均为 82 次,信号错报率为 1.2%,手机端 APP 接收到降雨开始和停止的数据均为 82 条,接收成功率为 100%。说明装置运行可靠。在 3 号试验中,系统误判了 1 次降雨起止过程,这是因为该组试验的降雨强度较小、基板夹角较大、导线末端间距较大,小雨初期的雨水检测信号值随导水槽底端积水量增加而减小,若积水表面张力破除而排出时,信号值会有较大幅度的波动。在 747 s 同时检测到卡尔曼滤波信号 2 和 3 对应的判别信号值大于 10,导致系统误判为降雨停止;在 768 s 同时检测到卡尔曼滤波信号 2 和 3 对应的判别信号值小于-10,导致系统误判为降雨开始,结果分析如图 9 所示。

误差分别取均值,得出结果如表 5 所示。结果表明,降雨开始和停止的检测时间均滞后于参考时间。降雨开始

时间的检测误差随降雨强度的增大而减小，其检测误差的均值范围为 4~16.3 s。对于降雨停止时间的检测误差，小雨水平下所测的误差最大，中雨和大雨水平下所测的误差无明显差异，其检测误差的均值范围为 5~18.7 s。

整体而言，降雨强度越大，降雨起止时间的检测误差越小，检测结果越准确。在 27 组试验结果中，降雨开始和停止时间检测误差均值的极差范围分别为 0~6、1~6 s，检测结果稳定性较好。

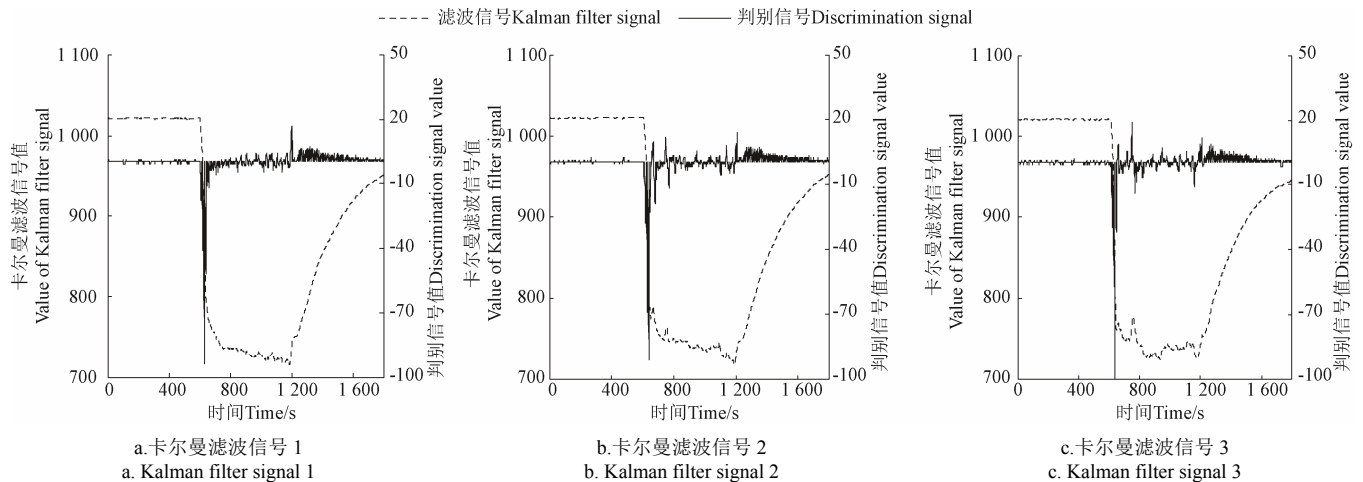


图 9 3 号试验的降雨起止信号误报结果

Fig.9 False alarm results of rainfall initiation and termination signals in test No.3

表 5 降雨起止时间手机远程监测装置的检测误差分析

Table 5 Error analysis of mobile phone remote monitoring device for detecting initiation and termination time of rainfall

| 试验号 Test No. | 降雨开始时间 Rainfall initiation time/s | | 降雨停止时间 Rainfall termination time/s | |
|-----------------|--------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
| | 均值 Mean | 极差 Range | 均值 Mean | 极差 Range |
| 1 | 16.3 | 4 | 14.7 | 3 |
| 2 | 15.0 | 6 | 15.7 | 3 |
| 3 | 14.0 | 5 | 15.3 | 5 |
| 4 | 14.7 | 2 | 15.3 | 3 |
| 5 | 14.0 | 2 | 16.0 | 3 |
| 6 | 13.3 | 1 | 17.0 | 3 |
| 7 | 11.7 | 3 | 18.3 | 2 |
| 8 | 11.0 | 3 | 18.3 | 6 |
| 9 | 11.0 | 2 | 18.7 | 3 |
| 10 | 8.7 | 6 | 5.7 | 1 |
| 11 | 8.3 | 6 | 6.0 | 2 |
| 12 | 8.0 | 4 | 6.3 | 3 |
| 13 | 7.7 | 5 | 5.7 | 6 |
| 14 | 7.3 | 6 | 5.7 | 2 |
| 15 | 7.3 | 3 | 6.3 | 1 |
| 16 | 6.0 | 2 | 8.0 | 3 |
| 17 | 6.7 | 4 | 7.7 | 3 |
| 18 | 6.3 | 3 | 8.3 | 3 |
| 19 | 7.0 | 2 | 5.0 | 2 |
| 20 | 6.7 | 3 | 6.0 | 2 |
| 21 | 6.3 | 4 | 5.7 | 1 |
| 22 | 5.7 | 1 | 5.7 | 2 |
| 23 | 5.0 | 2 | 6.0 | 3 |
| 24 | 4.7 | 1 | 6.0 | 3 |
| 25 | 4.3 | 2 | 7.3 | 3 |
| 26 | 4.0 | 0 | 7.7 | 1 |
| 27 | 4.0 | 2 | 8.0 | 2 |

由表 6 可知，在不同降雨强度水平下，因素 B 对降雨开始和停止时间检测误差的影响均为极显著，所以因素主次顺序为 B>C。因素 B 和 C 分别与降雨开始时间的检测误差呈正相关和负相关，即导线末端间距越小、基

板间夹角越大，检测误差越小，结果越准确，所以降雨开始时间检测误差最小的因素水平为 B₃C₃。而因素 B 和 C 分别与降雨停止时间的检测误差呈负相关和正相关，即导线末端间距越大、基板间夹角越小，检测误差越小，结果越准确，所以降雨停止时间检测误差最小的因素水平为 B₁C₁。而同一降雨强度水平下，B₃C₃ 组合（试验 9、18 和 27）所测降雨开始和停止时间检测误差均值的极差均不大于 B₁C₁ 组合所测结果，说明 B₃C₃ 组合检测稳定性更好，因此选择雨水感应模块综合最优参数组合为 B₃C₃，即导线末端间距为 2 mm、基板间夹角为 120°。

表 6 各试验因素与降雨起止时间检测误差均值的皮尔逊相关

Table 6 Pearson correlation between each experimental factor and mean detection error of rainfall initiation and termination time

| 降雨强度 Rainfall intensity /(mm·min ⁻¹) | 试验因素 Experimental factors | 相关系数 Correlation coefficient | |
|---|---------------------------------|--|---|
| | | 降雨开始时间检测 Detection of rainfall initiation time | 降雨停止时间检测 Detection of rainfall termination time |
| 0.44 | B | 0.898** | -0.911** |
| | C | -0.341 | 0.256** |
| 2.35 | B | 0.952** | -0.816** |
| | C | -0.127* | 0.204 |
| 4.12 | B | 0.955** | -0.883** |
| | C | -0.248* | 0.238* |

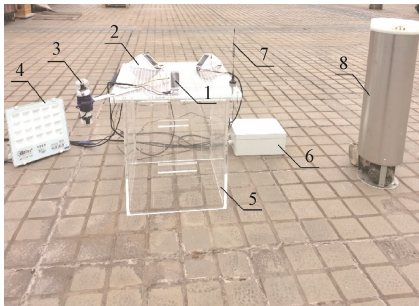
注：**，在 0.01 级别（双尾）相关性显著；*，在 0.05 级别（双尾）相关性显著。
Note: **, Correlation is significant at 0.01 level (double tail); *, Correlation is significant at 0.05 level (double tail).

5 验证试验

5.1 室外验证试验及结果

根据降雨起止时间手机远程监测装置运行的准确性与稳定性试验结果，使用 3 块导线末端间距为 2 mm、基板间夹角为 120° 的雨水感应模块进行试验，试验装置如图 10 所示。试验于 2020 年 8 月 7 日—8 月 16 日在昆明理工大学农业与食品学院的天台进行，试验期间正值昆明市

雨季,降雨类型主要为小雨和中雨,日降雨量最小值和最大值分别为 0.45 和 78.75 mm。将雨水感应模块和雨量器固定在周围无遮挡物的位置,并选用 2 个摄像头分别垂直地面向上和向下实时观测降雨天气。每天 08:00 用雨量器专用量筒(内径为 40 mm,测量范围为 0.05~10 mm)测出前 24 h 的降雨强度,并擦拭摄像头玻璃罩。手机端 APP 记录的日降雨过程如图 11 所示,10 d 共观测到 15 次降雨过程,实际检测到 15 次降雨过程,手机 APP 接收信号成功率为 100%。降雨起止时间的检测误差分析结果如表 7 所示,其中 8 月 15 日的 1 次零星小雨检测出现了 1 次误报,错报率为 5.9%。剔除误报数据后,该装置对自然降雨开始和停止时间检测的最大误差分别为 34 和 29 s,最小误差分别为 7 和 9 s。结合摄像头视频可知,降雨强度较小的降雨起止时间检测误差要偏大,与室内试验结果基本一致。结果表明,装置在室外复杂环境中运行较可靠,降雨起止时间检测较准确。



1.雨水感应模块 2.固定基座 3.摄像头 4.照明灯 5.支架 6.控制箱
7.天线 8.雨量器
1.Rain sensing module 2.Fixed base 3.Camera 4.Illuminating light
5.Bracket 6.Control box 7.Antenna 8.Rain gauge
图 10 室外验证试验装置图

Fig.10 Photo of outdoor verification test device



图 11 8 月 9 日检测降雨起止时间的 APP 截图
Fig.11 Screenshot of APP showing the initiation and termination time of rainfall on August 9

5.2 与其他装置对比结果

将室外验证试验得出的降雨起止信号错报率和降雨起止时间检测误差的均值 2 个指标,同张晓宇等^[38]评估的 Parsivel 与 LNM 2 种激光雨滴谱仪降水观测性能进行对比,对比结果如表 8 所示。结果表明,该装置的降雨开始和停止时间的错报率更低,降雨起止时间的检测更可靠。该装置能更快检测到降雨停止,这是因为激光雨滴谱仪会将雨后空气中悬浮的微小雨滴粒子判定为仍在降雨^[39]。虽然该装置无法超前于摄像头检测到降雨开始信号,但根据《降雨自动监测仪技术要求及检测方法》行业标准^[40]对感雨器应在 60 s 内感知降雨的要求,说明该装置对降雨开始信号的检测仍符合标准。

表 7 室外验证试验结果
Table 7 Test results of outdoor verification

| 降雨日期 Rainfall date | 24-h 降雨量 24-h rainfall/mm | 日降雨序号 No. of daily rainfall | 降雨开始时间的检测 Detection of rainfall initiation time | | | 降雨停止时间的检测 Detection of rainfall termination time | | |
|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|--|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|
| | | | 参考值 Reference | 检测值 Measurement | 差值 Difference/s | 参考值 Reference | 检测值 Measurement | 差值 Difference/s |
| 08—07 | 0.45 | 1 | 11:19:41 | 11:19:54 | 13 | 11:53:19 | 11:53:34 | 15 |
| | | 1 | 13:03:29 | 13:03:53 | 24 | 13:44:41 | 13:45:09 | 28 |
| 08—09 | 11.7 | 2 | 15:14:17 | 15:14:27 | 10 | 16:11:12 | 16:11:27 | 15 |
| | | 3 | 17:21:29 | 17:21:38 | 9 | 19:41:53 | 19:42:09 | 16 |
| | | 4 | 20:19:33 | 20:19:45 | 12 | 21:13:07 | 21:13:30 | 23 |
| 08—13 | 19.93 | 1 | 11:21:45 | 11:21:59 | 14 | 11:42:56 | 11:43:12 | 16 |
| | | 2 | 15:48:48 | 15:48:55 | 7 | 16:53:22 | 16:53:31 | 9 |
| | | 3 | 20:09:22 | 20:09:33 | 11 | 20:57:50 | 20:58:03 | 13 |
| 08—14 | 0.48 | 1 | 20:36:19 | 20:36:32 | 13 | 20:58:37 | 20:58:49 | 12 |
| 08—15 | 5.31 | 1 | 14:11:42 | 14:18:34 | 412 | 14:30:46 | 14:25:27 | -319 |
| | | 2 | 23:15:04 | 23:15:12 | 8 | Null | Null | Null |
| 08—16 | 78.75 | 0 | Null | Null | Null | 0:12:07 | 0:12:24 | 17 |
| | | 1 | 1:13:16 | 1:13:43 | 27 | 3:22:40 | 3:22:58 | 18 |
| | | 2 | 6:25:25 | 6:25:59 | 34 | 6:46:18 | 6:46:47 | 29 |
| | | 3 | 12:37:08 | 12:37:23 | 15 | 13:38:45 | 13:39:05 | 20 |
| | | 4 | 14:42:57 | 14:43:04 | 7 | 17:15:39 | 17:15:57 | 18 |

表 8 降雨起止时间手机远程监测装置与其他雨滴谱仪的性能对比

Table 8 Performance comparisons of mobile phone remote monitoring device and other raindrop spectrometers for detection of initiation and termination time of rainfall

| 型号 Model | 降雨数 Numbers of rainfall | 错报率 Misstatement rate/% | | 检测误差的均值 Mean of detection error/s | |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| | | 开始信号 Initiation signal | 停止信号 Termination signal | 开始信号 Initiation signal | 停止信号 Termination signal |
| 本装置 Our device | 15 | 5.9 | 5.9 | 14.6 | 17.8 |
| Parsivel | 38 | 13 | 23 | -60 | 120 |
| LNM | 38 | 23 | 34 | -240 | 240 |

6 结 论

通过 3 块相同参数的雨水感应模块检测降雨过程，用 Arduino UNO 单片机实现雨水检测信号采集、卡尔曼滤波处理和降雨起止信号判别，经通用分组无线电系统数据传输单元模块（General Packet Radio System Data Transmission Unit, GPRS DTU）远程无线传输降雨起止信号后，能通过手机远程监测降雨起止时间，实现了一种能快速检测、无线传输的降雨起止时间远程监测装置。

1) 在室内用简易模拟降雨装置开展装置性能测试试验，结果表明，判别周期为 10 s 时的降雨起止信号判别模型最优，降雨起止信号判别错报率为 1.2%，降雨起止信号接收成功率为 100%，装置运行稳定可靠。雨水感应模块的导线末端间距为 2 mm、基板间夹角为 120° 时，装置运行稳定性和准确性的综合性能较好，是能检测小雨及以上等级的雨水感应模块最优参数组合。

2) 验证试验结果表明，装置对降雨开始时间与停止时间的检测分别滞后 7~34、9~29 s，室外仅出现 1 次错报，降雨起止信号判别错报率为 5.9%，比其他雨滴谱仪更快检测降雨停止且能在 60 s 内检测降雨起止信号，装置性能符合对自然降雨过程的检测要求。

由于雨水感应导线需要人工嵌入雨水感应模块表面导水槽，难免造成导线固定不牢靠，且增加了人工成本，因此后续将通过改进雨水感应模块结构及制作工艺来提高降雨起止时间的检测精度。

【参 考 文 献】

- [1] 缪韧. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [2] Barkunan S R, Bhanumathi V, Balakrishnan V. Automatic irrigation system with rain fall detection in agricultural field[J]. Measurement, 2020, 156(5): 107552.
- [3] Hema N, Kant K. Hourly real-time rainfall estimation for improved smart irrigation system using nearby automated weather station[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2017, 18(5): 1-13.
- [4] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):

2151-2158.

Chen Ling, Liu Defu, Song Linxu, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow brown under different rainfall intensities[J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2151-2158. (in Chinese with English abstract)

- [5] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林地表径流和壤中流及氮素流失特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2732-2740.

Wang Rongjia, Gao Peng, Li Cheng, et al. Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Quercus acutissima* forest land under simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2732-2740. (in Chinese with English abstract)

- [6] 陈涛涛, 孙德环, 张旭东, 等. 干湿交替灌溉下水氮耦合对沸石处理稻田产量和水氮利用的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 154-162.

Chen Taotao, Sun Dehuan, Zhang Xudong, et al. Impact of water-nitrogen coupling on grain yield, water and nitrogen usage in zeolite-amended paddy field under alternate wetting and drying irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 154-162. (in Chinese with English abstract)

- [7] 王淑君, 夏桂敏, 李永发, 等. 生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 285-290, 301.

Wang Shujun, Xia Guimin, Li Yongfa, et al. Effect of biochar-based fertilizer and water stress on Peanut yield, water consumption and nutrition absorption[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 285-290, 301. (in Chinese with English abstract)

- [8] 朱亚乔, 刘元波. 地面雨滴谱观测技术及特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 685-694.

Zhu Yaqiao, Liu Yuanbo. Advances in measurement techniques and statistics features of surface raindrop size distribution[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 685-694. (in Chinese with English abstract)

- [9] 曾杨, 莫月琴, 王志成, 等. 几种雨量观测方式比对试验分析[J]. 气象科技, 2017, 45(2): 228-233.

Zeng Yang, Mo Yueqin, Wang Zhicheng, et al. Comparative experimental analysis of several rainfall observation methods[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(2): 228-233. (in Chinese with English abstract)

- [10] 赵巧妮. 雨滴传感器检测原理的对比和研究[J]. 价值工程, 2016, 35(16): 253-254.

Zhao Qiaoni. Contrast and research of rain sensors' detection principle[J]. Value Engineering, 2016, 35(16): 253-254. (in Chinese with English abstract)

- [11] 杜传耀, 尹佳莉, 李林, 等. 降水现象仪观测应用评估[J]. 气象, 2019, 45(5): 730-737.
- Du Chuanyao, Yin Jiali, Li Lin, et al. Application evaluation of precipitation phenomenon instrument observation[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(5): 730-737. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李耀宁, 陶立新, 黄湘. 不同雨量计测值误差分析[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 670-672.
- Li Yaoning, Tao Lixin, Huang Xiang. Causal analysis of measurement differences between various raingauges[J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(5): 670-672. (in Chinese with English abstract)
- [13] 岳学军, 刘永鑫, 洪添胜, 等. 基于土壤墒情的自动灌溉控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 241-246, 250.
- Yue Xuejun, Liu Yongxin, Hong Tiansheng, et al. Design and experiment of automatic irrigation control system based on soil moisture meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 241-246, 250. (in Chinese with English abstract)
- [14] 代品宣, 王青云, 梁瑞宇. 鲁棒的物联网智能农业控制系统设计与实现[J]. 电子器件, 2015, 38(1): 178-183.
- Dai Pinxuan, Wang Qingyun, Liang Ruiyu. Design and implementation of robust smart agricultural control system[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2015, 38(1): 178-183. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zheng G L, Xu Z W, Ding L. An innovative principle in self-calibration by dual ultrasonic sensor and application in rain gauge[J]. Sensor Letters, 2013, 11(3): 617-621.
- [16] 曹春号, 杨启良, 李加念, 等. 自动挡雨预警推送蒸发器手机在线控制装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 145-151.
- Cao Chunhao, Yang Qiliang, Li Jianian, et al. Design of mobile phone on-line control device for evaporator with automatic rainproof and early warning push function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(16): 145-151. (in Chinese with English abstract)
- [17] 蔡坤, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于误码检测机制的滴灌系统红外光雨水传感器的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 70-77.
- Cai Kun, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Design of infrared rain sensor of irrigation system using error detection mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨祯. 基于 LoRa 技术的校园环境无线监测系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- Yang Zhen. The Design and Implementation of Campus Environment Wireless Monitoring System Based on LoRa Technique[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于 GPS 和 GPRS 的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 162-168.
- Huang Dongyan, Zhu Longtu, Jia Honglei, et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 162-168. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘教瑜, 吴美玲, 谭杰. GPRS DTU 的设计及研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 3(26): 89-91.
- Liu Jiaoyu, Wu Meiling, Tan Jie. Design and research on GPRS DTU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 3(26): 89-91. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘海洋, 陈智, 侯占峰, 等. 基于 GPRS 的土壤风蚀实时监测系统研制与测试[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 163-172.
- Liu Haiyang, Chen Zhi, Hou Zhanfeng, et al. Development and test of real-time monitoring system for soil wind erosion based on GPRS network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 163-172. (in Chinese with English abstract)
- [22] 祁力钧, 杜政伟, 冀荣华, 等. 基于 GPRS 的远程控制温室自动施药系统设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 51-57.
- Qi Lijun, Du Zhengwei, Ji Ronghua, et al. Design of remote control system for automatic sprayer based on GPRS in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(23): 51-57. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王永涛, 吴艳英, 李家春, 等. 基于 GPRS DTU 的农业灌溉施肥智能化控制系统的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(12): 93-97.
- Wang Yongtao, Wu Yanying, Li Jiachun, et al. Research on agricultural irrigation fertilization intelligent control system based on GPRS DTU[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(12): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨磊, 杨明, 付桑笛, 等. 电阻噪声实验教学系统设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(1): 89-93, 109.
- Yang Lei, Yang Ming, Fu Sangdi, et al. Design and implementation of the resistor noise experimental teaching system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(1): 89-93, 109. (in Chinese with English abstract)

- [25] 刘涛, 张文平, 陈慧芳, 等. 卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1643-1647.
Liu Tao, Zhang Wenping, Chen Huifang, et al. Reduction of system noise in distributed optical fiber Raman temperature sensor by Kalman filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1643-1647. (in Chinese with English abstract)
- [26] 管海翔, 陈娟, 祁欣. 基于高灵敏度电化学传感器的有害气体检测系统设计[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2020, 47(2): 107-114.
Guan Haixiang, Chen Juan, Qi Xin. A measurement system for harmful gases based on a high sensitivity electrochemical sensor[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2020, 47(2): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [27] 牛萍娟, 程峥, 田海涛, 等. 非色散红外 CO₂ 传感器温度补偿模型研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 17-20.
Niu Pingjuan, Cheng Zheng, Tian Haitao, et al. Research on Temperature compensation model of non-dispersive infrared CO₂ sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(8): 17-20. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王学斌, 徐建宏, 张章. 卡尔曼滤波器参数分析与应用方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(6): 212-215.
Wang Xuebin, Xu Jianhong, Zhang Zhang. On analysis and application approach for Kalman Filter parameters[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(6): 212-215. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙恺. 针管式人工降雨装置的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
Sun Kai. Research and Application of Needle-tubing Artificial Rainfall Device[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 56-60.
Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Li Pingkang. Principles and properties of artificial trough rainfall simulator[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(6): 56-60. (in Chinese with English abstract)
- [31] 冯讷敏, 章树安, 徐海峰. 翻斗式雨量计: GB/T 11832—2002[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [32] 苏激娜, 田一梅, 高波, 等. 人工模拟降雨装置的设计及其参数率定[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 120-123.
Su Weina, Tian Yimei, Gao Bo, et al. Design and calibration of an artificial rainfall simulator[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 120-123. (in Chinese with English abstract)
- [33] 孙恺, 张季如. 针管式人工降雨装置的设计与应用[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(12): 125-129, 134.
Sun Kai, Zhang Jiru. Design and calibration of needle-tubing artificial rainfall device[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(12): 125-129, 134. (in Chinese with English abstract)
- [34] 周跃, 王杰, 胡少伟. Kust03-1 型人工模拟降雨实验装置的设计与率定[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2008, 33(2): 81-85.
Zhou Yue, Wang Jie, Hu Shaowei. Designing and calibration of Kust03-1 rainfall simulating system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 33(2): 81-85. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙三祥, 张云霞. 降雨及坡面径流模拟试验相似准则[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 93-98.
Sun Sanxiang, Zhang Yunxia. Similarity criterion in physical simulation of rainfall and sheet flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 93-98. (in Chinese with English abstract)
- [36] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Reviews of Geophysics, 1973, 11(1): 1-35.
- [37] 倪际梁, 何进, 李洪文, 等. 便携式人工模拟降雨装置的设计与率定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 78-84.
Ni Jiliang, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and calibration of portable rainfall equipment of artificial simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 78-84. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张晓宇, 雷勇, 王柏林, 等. Parsivel 与 LNM 激光雨滴谱仪降水观测的差异[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 548-554.
Zhang Xiaoyu, Lei Yong, Wang Bailin, et al. Experiment on precipitation observation differences between Parsivel laser raindrop spectrometer and LNM[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(4): 548-554. (in Chinese with English abstract)
- [39] 汪玉, 谈图, 王贵师, 等. 激光雨滴谱仪光学设计与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3952-3957.
Wang Yu, Tan Tu, Wang Guishi, et al. Optical design and analysis of laser precipitation monitor[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(12): 3952-3957. (in Chinese with English abstract)
- [40] 中国环境监测总站, 河北先河科技发展有限公司. 降雨自动监测仪技术要求及检测方法: HJ/T 175-2005[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2005.

Design of mobile phone remote monitoring device for the initiation and termination time of rainfall based on Kalman filter

Zhou Ping^{1,2}, Yang Qiliang¹, Li Jianian^{1*}, Yang Jurui¹, Han Huanhao¹, Liu Xiaogang¹, Xiong Kai¹

(1. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Sichuan Sanhe College of Professionals, Luzhou 646200, China)

Abstract: The initiation and termination time of rainfall occurrences were essential to the rainfall process. In this study, a novel remote monitoring device was designed to accurately detect the termination time of a rainfall in the facility agriculture. This device was mainly composed of the rain sensing module, rain detection circuit, Arduino UNO microcontroller, GPRS DTU module, a serial communication circuit, antenna, and mobile phone application. A total of 16 flumes were evenly spaced parallel on the upper surfaces of two substrates in the rain sensing module. Two HDPE wires were embedded in the flumes to ensure that the wires were separated from each other without connecting. The rain contacted the two wires when the rainfall initialized, where the resistance value between the wires decreased rapidly. When the rainfall terminated, the water on the substrates surface drained from the flumes, where the resistance value between the wires increased gradually. The rain detection circuit converted the changes in resistance values between the wires into the changes in voltage values, then output the rain detection signals. The rainfall process was detected simultaneously through 3 rain sensing modules with the same specification. 3 Kalman filters were selected to simultaneously optimize the process, after reading the rain detection signals by Arduino UNO. A discriminant model was used to determine the initiation and termination signals of rainfall. The detected signals of rainfall were transmitted to the GPRS DUT module through the serial communication circuit, then to the cloud server for storage. A reference time of rainfall was set according to the storage time of signals in the server and the device system. The mobile phone was applied to receive and view the initiation and termination time of rainfall in the period. The test factors were selected, including the rainfall intensity, the distance between the ends of wires, the angle between substrates, and the discrimination period of the discriminant model, in order to determine the optimal parameters for the discriminant model and rain sensor module. The performance of the device was evaluated using the evaluation indexes, such as the misstatement rate of signal discriminant, the success rate of mobile phone reception, and time detection accuracy. The experimental results showed that: 1) The discriminant model with a discrimination period of 10 s had the best discriminant effect; 2) The signal misstatement rate was 1.2%, while the success rate of mobile phone reception was 100%, indicating the device operated reliably; 3) When the distance between ends of wires was 2 mm and the angle between substrates was 120°, the stability and accuracy of the device operation were better, indicating an optimal combination of parameters to detect the light rain. The verification experimental results showed that the detection error range for the initiation and termination time of rainfall were 7-34 and 9-29 s, respectively, and the signal misstatement rate was 5.9%, which met the detection requirements of natural rainfall, showing the device ran well. Therefore, the device can be expected to serve as the remote monitoring of the initiation and termination time of rainfall.

Keywords: Kalman filters; sensors; mobile phones; rainfall; initiation and termination time; remote monitoring