

雨量传感器工作状态实时监测系统设计

郑俊锦¹, 刘超², 丘祖京¹, 李睿¹, 杨森¹

(1. 福建省大气探测技术保障中心, 福州 350008;

2. 上海市气象信息与技术支持中心, 上海 200030)

摘要: 为监测双翻斗式雨量传感器的工作状态并及时发现故障, 设计了一套无需改动传感器机械结构和自动气象站采集器接口电路的雨量传感器工作状态实时监测系统; 利用降雨检测模块来识别有效降雨, 通过漏斗堵塞检测、翻斗动作检测和干簧管状态检测等模块监测传感器内部关键部件的工作状态, 同时集成入侵监测和声光告警模块以驱离动物等潜在入侵者, 并通过通信模块实现数据的远程传输; 试验结果表明, 系统对于模拟故障现象均能准确地识别出来, 主要故障检测的平均响应时间在 290 s 以内, 并能记录故障类型及其发生时间, 有效地提高了雨量数据的可靠性; 系统积累的相关数据也有助于雨量传感器及其维护流程的持续优化。

关键词: 雨量传感器; 故障检测; 数据质量控制

Design of Real-time Monitoring System for Rainfall Sensor Working Status

ZHENG Junjin¹, LIU Chao², QIU Zujing¹, LI Rui¹, YANG Sen¹

(1. Meteorological Observation and Technical Support Center of Fujian Province, Fuzhou 350008, China;

2. Shanghai Meteorological Information and Technology Support Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to detect the working status of the double-tipping bucket rainfall sensor and ensure timely fault detection, a real-time monitoring system without changing the mechanical structure of the sensor and interface circuit of the collector in the automatic weather station is designed. It incorporates the rainfall detection module to effectively identify rainfall, while monitoring the working status of key components within the sensor through modules such as the funnel blockage detection, tip action detection, and reed tube status detection. Additionally, the intrusion monitoring and acousto-optic alarm modules are integrated to deter potential intruders like animals, enabling remote data transmission via communication modules. Experimental results demonstrate that this system can accurately identify simulated fault phenomena, and the average detection response time for major faults is within 290 seconds. Furthermore, this system can record the type and occurrence time of faults, effectively improve the reliability of rainfall data and accumulate relevant data, and continuously optimize the rain sensor and its maintenance process.

Keywords: rainfall sensor; fault detection; data quality control

0 引言

降雨观测是气象和水利等部门最重要的观测项目之一, 对于工农业生产、经济活动和人民群众的日常生活都有着深远的影响。常用的降雨观测传感器主要有翻斗式雨量传感器和称重式雨量传感器^[1]。SL3-1型双翻斗式雨量传感器因其出色的性能指标和广泛的适应性, 在我国气象部门得到了大规模的推广应用^[2]。该传感器采用机械结构与干簧管电路的组合设计, 其分辨率为 0.1 mm, 降雨强度范围为 0~4 mm/min, 其

输出信号为开关量, 即干簧管每闭合一次表示降雨量增加 0.1 mm。其核心结构包括承水漏斗、接雨漏斗、上翻斗、汇集漏斗、计量翻斗、干簧管和计数翻斗等。

然而, 在长时间且严苛的野外作业环境中, 双翻斗式雨量传感器不可避免地会出现多种故障问题^[3-5], 包括但不限于: 机械结构异常如堵塞和翻斗动作变形等, 干簧管因破损、性能退化或雨量数据线开路导致的故障, 以及非降雨液体意外进入传感器引起的误报大降雨量等(例如在实际工作中发现: 位于公园和校园等场所的区域站, 可能会存在园林浇水或者儿童撒

收稿日期: 2023-12-24; 修回日期: 2024-02-08。

基金项目: 福建省气象局研究型业务专项(2023YJ05)。

作者简介: 郑俊锦(1989-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 郑俊锦, 刘超, 丘祖京, 等. 雨量传感器工作状态实时监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 10-16, 31.

尿进入雨量筒里等现象)。干簧管传感器虽然在低负载下具有较高的耐用性,但机电式结构使得其工作寿命受薄片弹性和热胀冷缩的影响。此外,干簧管的玻璃封装也可能因外部空气进入而破裂,导致漏气,从而影响其正常工作。

当前,对于上述故障的检测主要依赖于人工定期巡检和后期数据质量控制等手段,但受限于巡检周期较长(通常按月或者按季度),往往无法实时发现并解决故障,且维护成本较高。数据质控通常基于相邻站点的数据对比或统计分析^[6],但这些方法具有滞后性和间接性,可能导致数据缺测。文献[7]通过改变干簧管相关电路并引入STM32最小系统进行状态监测,同时借用了机箱门开关检测信号来传递干簧管故障信息。这虽能够在一定程度上获取干簧管的工作状态信息,但该方法改变了我国气象业务定型的雨量传感器电路结构,增加了新的故障风险,而且未能覆盖全部故障类型,尤其是对于磁力衰减等隐性故障,目前仍缺乏及时有效的检测解决方案。此外,为解决单雨量传感器故障导致雨量数据异常或缺测的问题,中国气象局依托2019年山洪地质灾害防治气象保障工程建设任务——多传感器温度雨量标准系统建设项目,在国家地面观测站配备降水多传感器标准系统^[8]:将单雨量传感器升级为三雨量传感器。但是这也属于间接方式的数据质控,并且需要人工查验传感器故障,自动化程度不够高。

《中国气象局气象探测中心高质量发展实施方案(2023—2025年)》^[9]明确提出加强对观测端数据质量控制的任務要求。为此,本文设计一款双翻斗式雨量传感器在线监测系统,该系统集成了降雨检测、漏斗堵塞检测、翻斗动作检测以及干簧管状态检测等多项功能,能够实时、准确地识别和定位包括异常大雨量、水流通路堵塞、翻斗卡死、干簧管故障、雨量数据线缆开路在内的多种故障现象,并辅以入侵检测和声光报警驱离功能,以防止无关人员和动物对观测环境的干扰。此外,系统支持太阳能和市电双供电模式,通过无线通信模块将监测数据实时传送至数据中心,提升了降雨传感器故障检测和自动化管理的水平。

1 系统总体设计

本文通过嵌入式系统设计来实现相关功能。系统结构如图1所示。单片机为主控芯片,系统通过模块化设计来实现各项功能。系统通过降雨监测模块、堵塞监测模块、翻斗监测模块和干簧管监测模块来采集信号并实现雨量传感器的异常雨量识别和工作状态监测等功能。通过入侵检测模块和声光报警模块来保证降雨量观测场地的“干净”。各模块的详细功能如下。

1) 供电模块:根据观测站点的位置,选用市电或

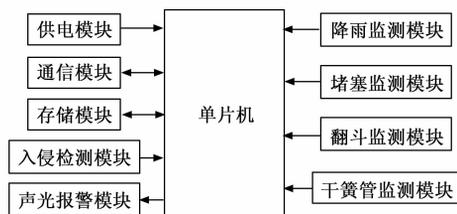


图1 系统结构框图

者太阳能供电。具备市电的站点,通过开关电源将市电降为系统所需要的低压直流电来供电;野外无市电的站点,通过太阳能充放电模块并结合蓄电池进行供电。

2) 入侵检测模块:为了防止无关人员和野生动物等入侵者影响到观测(包括鸟类停留在雨量筒上方,有可能导致粪便进入承水桶等),在雨量传感器周围及其上方,设置微波雷达等传感器进行入侵检测。

3) 降雨监测模块:本文通过设置多个液位传感器,进行异常降雨判断,以解决非预期的液体进入雨量筒造成的数据疑误问题。

4) 堵塞监测模块:通过设置于承雨漏斗、接水漏斗和汇集漏斗处的液位传感器来判断是否发生堵塞现象。当雨量传感器内部发生堵塞时,雨水会在这些组件处累积并造成水位偏高或者水满溢出的现象,从而被设置的液位传感器检测到。

5) 翻斗监测模块:如图2所示,通过设置在上翻斗和计数翻斗前侧或者后侧的红外光电传感器实现翻斗位置的检测,再根据时间前后的翻斗位置是否有变化,并结合另外一个翻斗是否正常翻动,来判断翻斗是否能正常工作。

6) 干簧管监测模块:通过设计光耦隔离式的干簧管状态监测电路,不影响原自动气象站接口电路,可识别干簧管故障以及线缆是否断路等问题。此外再结合翻斗监测模块的数据,还可识别出干簧管隐性故障,例如干簧管开关是否异常等。

7) 通信模块:负责系统参数设置、数据远程传输和远程控制等功能。存储模块:负责存储传感器工作状态数据及系统数据等。声光报警模块:发出声光警示信号以驱离入侵者。

系统结构设计如图2所示。其中,液位传感器1感应面向上,用于检测是否有降雨,与设置于传感器外围的液位传感器配合进行有效降雨检测,以排除异常大雨量疑误问题;液位传感器2、液位传感器3和液位传感器4分别用于承雨漏斗、接雨漏斗和汇集漏斗的堵塞检测;光电开关1和光电开关2分别用于检测上翻斗和计数翻斗的翻斗检测。系统人机交互通过按键模块、显示屏模块和无线通信模块来实现。

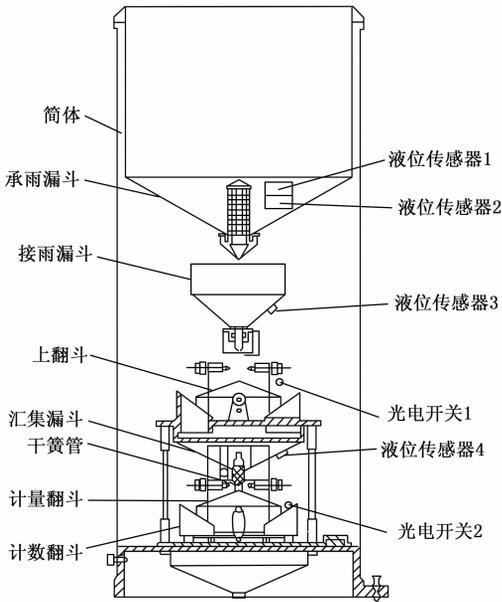


图 2 系统结构设计示意图

2 系统电路原理设计

2.1 控制系统电路设计

主控芯片选用国产单片机 STC32G12K128^[10]。STC32G 系列是国产的 32 位 8051 单片机，由深圳国芯人工智能有限公司制造。具有宽电压适应、高可靠性、低能耗和高级加密技术等特点。其最小系统配置无需外接晶振和复位电路。在相同工作频率下，STC32G 系列单片机的运行速度比传统 8051 提高约 70 倍。单片机具

备 IDLE 和 STOP 两种省电模式。数字外设丰富（包括多个串口、定时器、SPI、USB、CAN 和 LIN 接口等），可方便地进行功能扩展。STC32G 系列指令集丰富，支持 32 位算术指令和 16 位乘除指令，并配备 32 位硬件乘除单元。支持 USB-HID 协议，允许通过 USB 直接下载程序，并且无需额外安装驱动。最小系统电路如图 3 所示。

显示模块包括：LED 状态指示灯和 OLED 显示屏，用于显示系统工作状态：雨量传感器的故障状态、降雨量和系统通信状态等信息。OLED 显示屏选用 0.96 寸的分辨率 128 × 64 的 OLED^[11]。该显示屏的驱动芯片为 SSD1306，单片机仅需 2 个 IO 口就可通过 IIC 协议来控制其显示内容（显示屏模块引脚数为 4 个：SCL 和 SDA 接单片 IO 口，VCC 和 GND 供电）。

2.2 状态监测模块

雨量传感器状态监测主要包括降雨监测、堵塞监测、翻斗监测和干簧管监测。自 2019 山洪项目中多传感器温度雨量融合系统建设项目实施以来，我国部分气象观测站点降水观测所用到的雨量传感器由 1 个升级为 3 个^[12-13]。在单一传感器配置中，传感器直接连接至自动气象站主采集器；而在三传感器配置中，则是先通过降水多传感器标准控制器进行数据融合后再接入，如图 4 所示。因此，系统设计需兼容这两种配置。

2.2.1 降雨和堵塞监测

降雨监测常用的雨量传感器包括翻斗雨量传感器、称重式雨量传感器和光学雨量计等^[14]。鉴于成本和项目需求的综合考虑（仅需判断降雨的有无），本文选用

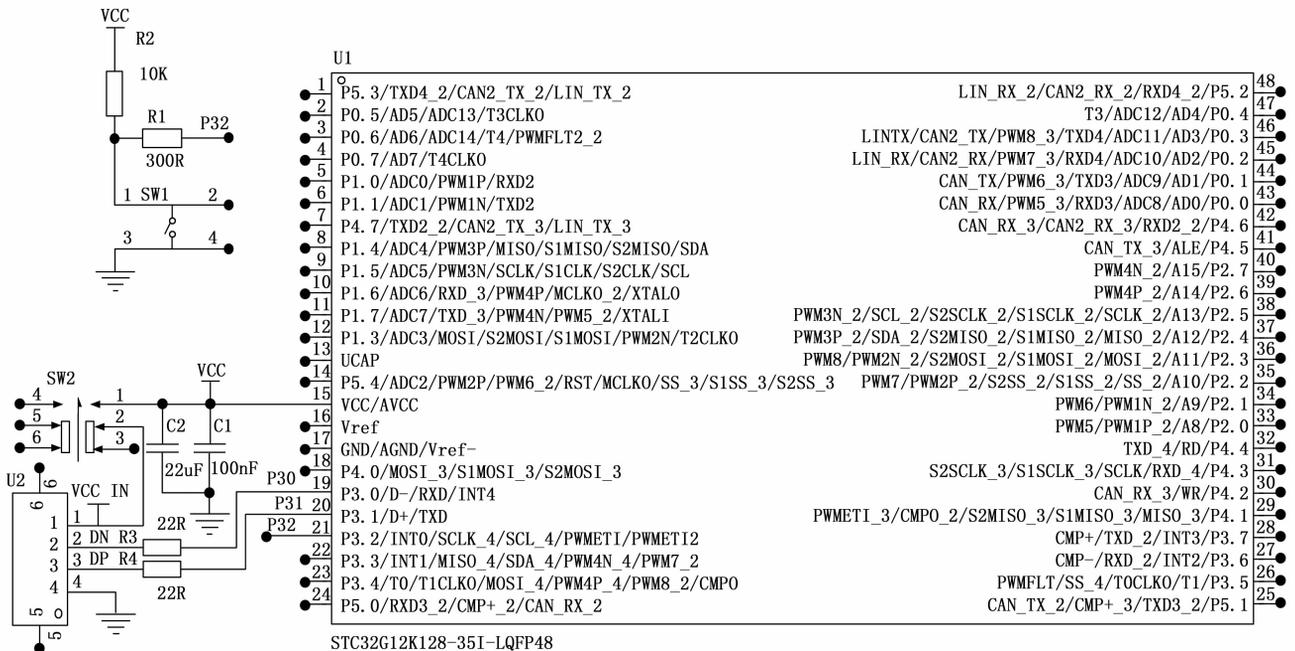


图 3 单片机最小系统电路图

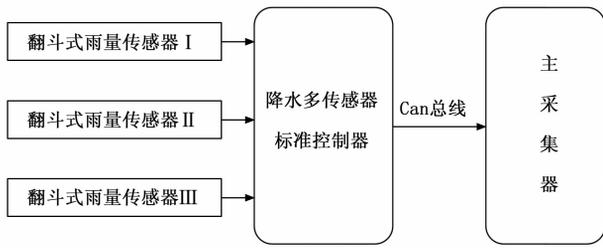


图 4 降水多传感器标准系统硬件结构示意图

液位传感器进行降雨监测和堵塞监测。采用的是深圳神兆电子科技有限公司生产的非接触式液位检测芯片 PL10^[15]。其工作电压范围为 2~5.5 V, 工作电流小于 2 mA, 支持自定义校正, 且可感应壁厚不超过 6 mm 的液体。其输出信号包括数字量和模拟量数值: OUT 引脚输出液位状态, 当感应面上存在且感应量超过标定量时, 输出高电平; 否则输出低电平。TX 引脚通过串口发送感应量和标定量的数据, 波特率为 115 200。MARK 引脚用于设置标定量, 而 LED 引脚则显示液位状态, 有液体且感应量超过标定量时, 指示灯亮。通过感应量的数值变化, 可以推测积水量的变化。液位传感器的电路如图 5 所示。在实际应用中, 当液位达到预设阈值时, 用户可通过按下 MARK 引脚的按键来设置标定量。单片机通过读取芯片输出的高低电平, 即可实现降雨的检测功能。

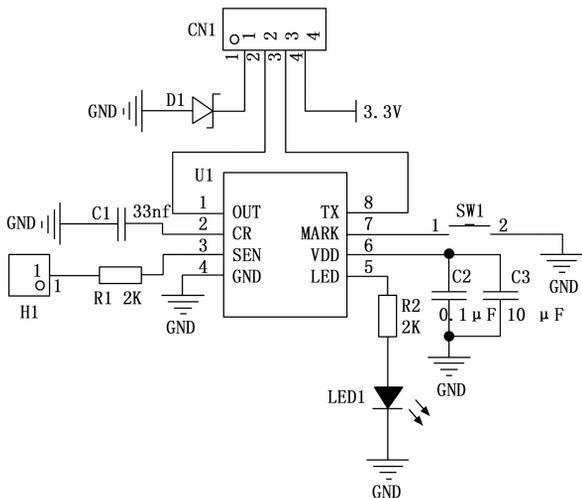


图 5 液位检测模块电路图

2.2.2 翻斗监测

翻斗监测即翻斗动作监测, 通过在翻斗结构的转动部位布置光电传感器, 利用光电效应监测翻斗在运动过程中对光源遮挡状况的变化。将 2 个光电对管分别放置于上翻斗和计数翻斗的前侧 (或者后侧)。检测方法是基于接收管是否接收到翻斗对发射光线的反射, 以判断翻斗所处的状态 (翻斗的两种状态为: 上翻至

最高位置或下翻至最低位置)。通过记录翻斗状态随时间的变化, 可以识别出翻斗的动作。鉴于户外光照条件的复杂性, 选用具有日光过滤功能的红外反射传感器 TCRT5000^[16-17], 该传感器集成了高发射功率的红外发光二极管和高灵敏度光电三极管。此外, 电压比较器选用 2 路电压比较器 LM393。雨量传感器的翻斗监测电路如图 6 所示。

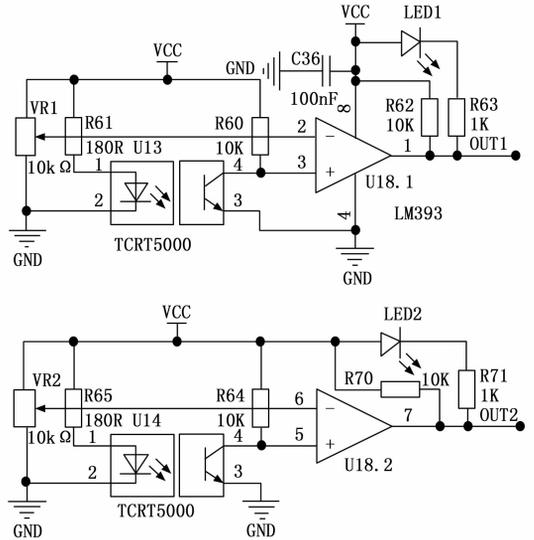


图 6 翻斗动作检测模块电路图

通过调节可调电阻 VR1 和 VR2 来设置比较器的负输出端的阈值电压, 从而调节光电传感器对障碍物的检测距离。在 TCRT5000 前方无障碍物的情况下, 发射管发出的光线不会反射至接收管, 或者反射光线的强度不足以激活接收管, 导致光电三极管处于截止状态。此时, 比较器的正输入端保持高电平, 由于正输入端电压高于负输入端, 比较器输出高电平, 指示灯保持熄灭状态。相反, 当 TCRT5000 前方存在障碍物时, 发射管发出的光线被障碍物反射, 部分光线抵达接收管。当接收到的光线强度超过预设阈值时, 接收管导通, 比较器的正输入端变为低电平, 正输入端电压低于负输入端, 比较器输出低电平, 指示灯点亮。因此, 利用单片机的 IO 口检测比较器输出端的高低电平变化, 可以判断翻斗的状态; 通过监测翻斗状态随时间的变化, 可以识别翻斗的动作及其翻动次数。

2.2.3 干簧管监测

干簧管的状态检测是通过采用电压跟随器与光耦反馈电路相结合的方法来实现的。通过采集干簧管的输出信号, 并将其与翻斗动作监测模块的数据相结合来诊断干簧管的隐性故障。具体而言, 当翻斗动作监测模块记录的计数翻斗的翻动次数与干簧管状态检测模块记录的干簧管开关次数出现不一致时, 即可判定干簧管存在隐性故障。

由于自动气象站采集器内部电路的雨量数据线上拉电阻为 100 kΩ，若直接将上拉电阻的负端连接至光耦发射管，则流经光耦发射管的电流将过于微弱，导致光耦无法正常工作。因此前级引入高输入阻抗的电压跟随器；通过光耦实现监测系统与自动气象站采集器的电源和地线隔离，以尽可能减少检测电路对自动气象站采集器中原有干簧管接口电路的干扰，同时又可实现干簧管故障状态的识别以及线缆断线的无损检测。干簧管可能出现的故障类型包括常开、常闭以及不稳定开关状态（例如由于磁力减弱导致的干簧管开关困难，可能导致雨量测量值偏低）。在正常工作条件下，光耦的输出信号与干簧管产生的降雨信号均为脉冲信号，且相位相反，可通过软件处理予以识别。

干簧管监测电路如图 7 所示，可实现 3 个雨量传感器的干簧管状态监测。在应用于非多雨量融合系统的观测站点时，仅需接入其中一路传感器即可。检测模块可放置于降水多传感器标准控制器采集箱内部。其中，12 V 和 GND_AWS 为 HY1361 降水多传感器标准控制器的供电，VCC 和 GND 为监测系统的供电；RIN 1、RIN 2 和 RIN 3 连接 HY1361 采集器内的雨量 1、雨量 2 和雨量 3 的信号线 I1、I2 和 I3（非接地端）。RAIN1、RAIN2 和 RAIN3 连接监测系统，用于采集雨量信号。当检测降雨发生且翻斗动作正常时，若光耦的输出电平没有变化，则说明干簧管损坏。具体表现为：当干簧管开路时，RIN 恒为高电平，运放输出高电平，光耦内部 LED 发光，光耦输出维持低电平；当干簧管短路时，

RIN 恒为低电平，运放输出低电平，光耦内部 LED 不发光，光耦输出维持高电平。

此外，本监测电路还可检测雨量传感器与自动气象站采集器之间地线线缆断线的功能。当发生地线或信号线缆开路时，RIN 端将恒为高电平，运算放大器输出高电平，导致光耦内部的 LED 发光，从而使光耦输出维持低电平。

2.3 入侵检测模块

选用宁波迈阶电子科技有限公司生产的雷达感应模块 MG5850B 来检测是否有入侵者。该模块具有小体积、超低功耗和可级联（即通过多个模块级联覆盖更大区域）等特点。该模块采用高性能 5.8 GHz 微波雷达传感器，包含中频放大电路以及信号处理器，供电电压为 2.8~12 V，输出电压为 3.3 V，工作电流为 40 μA，其正面的感应距离为 0.1~15 m 可调，挂高可感应 3 m，感应半径 6 m，延迟时间为 0.6 s~4 h 可调，接口为 2.54 mm 排针，其通信方式为串口通讯和 IO 口高低电平信号。G5850B 出厂自带参数，上电即可使用，同时也可以通过 IIC、普通 IO 口和串口通讯等多种方式来进行参数调节。

2.4 通讯模块

选用 GPRS 模块 SIM800A 通过运营商网络与数据中心进行通讯^[18]。SIM800A 是一款 SMT 封装的双频 GSM/GPRS 模块。其性能稳定，外观小巧，性价比高。SIM800A 工作频率为 GSM/GPRS 900/1 800 MHz，可以低功耗实现语音、SMS 和数据信息的传输。SIM800A 尺

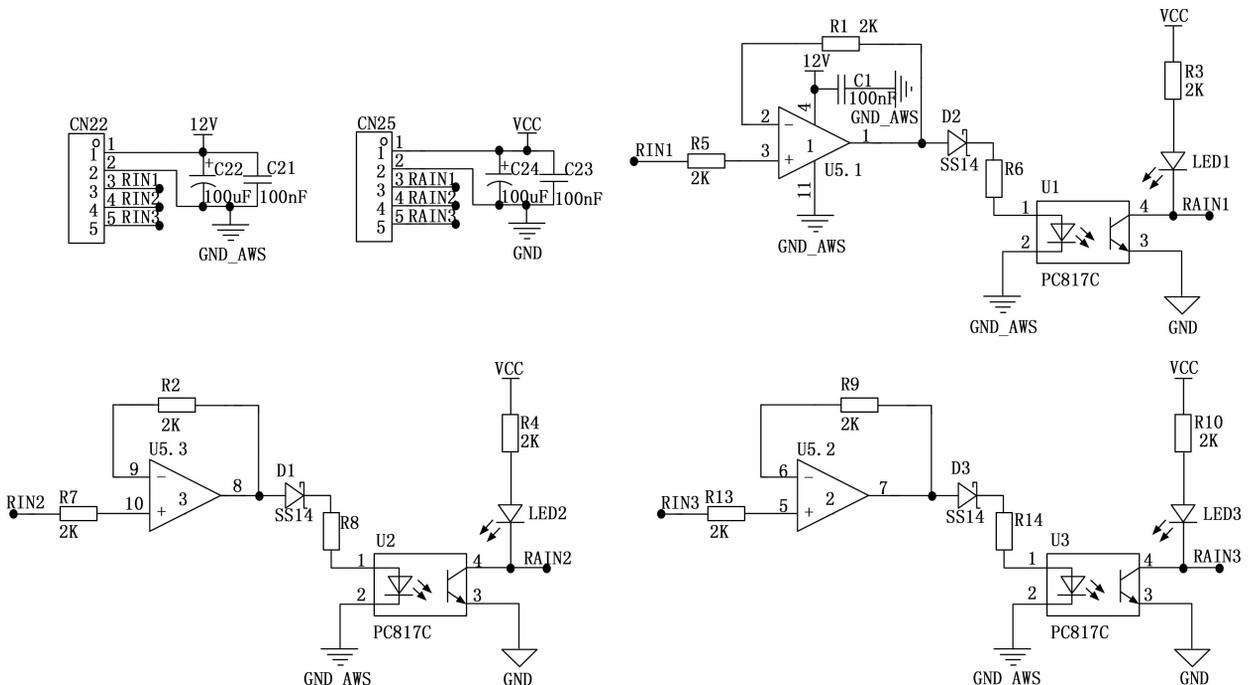


图 7 干簧管状态检测电路图

寸为 $24 \times 242 \times 3$ mm,符合本文的紧凑型产品设计需求。

2.5 声光报警模块

通过语音模块和声光报警器来实现声光报警功能。声光报警器选用 JS103,供电电压为 12 V,声音大小可调。其标准电流为 230~310 mA;声压指数 ≥ 110 dB/300 mm;闪灯频次为 150 次/分钟。语音模块则选用深圳市迈优科技有限公司生产的串口语音模块 MY1680U-12P^[19],其核心主控芯片 MY1680U-16S 可由串口控制并外挂 FLASH 存储芯片。支持 MP3、WAV 格式;连接电脑即可通过模拟 U 盘的方式更换音频文件;模块最大支持 16 Mbyte 和外接 U 盘;其具有 24 位 DAC 输出,动态范围支持 93 dB,信噪比支持 85 dB;可通过 UART 异步串口控制播放、暂停和音量加减等功能;可直接连接耳机或者外接功放播放;其串口为 3.3 V 的 TTL 电平,波特率 9 600;供电电压为 3.4~5.5 V,静态电流 13 mA。语音模块电路如图 8 所示。

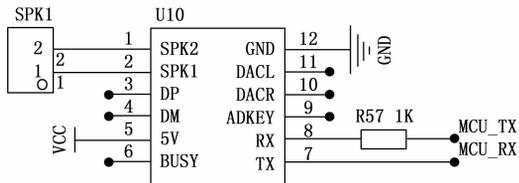


图 8 语音模块电路图

2.6 其他模块

根据观测场地是否具备市电的条件选用不同的供电方式。城区观测场具备市电时,将市电经开关电源降压为直流电给系统供电,在野外无市电时,则选用太阳能供电模块进行供电。数据存储选用 Micro SD 卡,单片机通过 SPI 接口对其进行初始化和读写等操作。

3 系统软件设计

本文的软件设计侧重于单片机端的程序开发,同时充分利用现有的物联网中心站平台进行功能验证与数据交互。在单片机端的程序设计中,主要包括:单片机内部资源初始化(对单片机的 I/O 端口、定时器/计数器以及其他外设资源进行配置和初始化)、传感器工作状态监测、动物入侵检测识别及驱离(当微波雷达检测到非法入侵者时,系统通过联动声光报警装置进行威慑和驱离,同时记录入侵事件的相关信息)、状态数据存储(记录和存储各类状态数据,包括但不限于雨量数据、传感器工作状态、入侵检测记录等,以供后续查询分析或远程查看)和 GPRS 数据通信(与物联网中心站之间双向通信,实时传输雨量数据、传感器状态信息和入侵事件报告,确保数据的实时上传与指令的准确下达)等。系统主程序流程如图 9 所示。其中,雨量传感器工

作状态检测是系统的核心功能,详细的程序流程介绍如下:

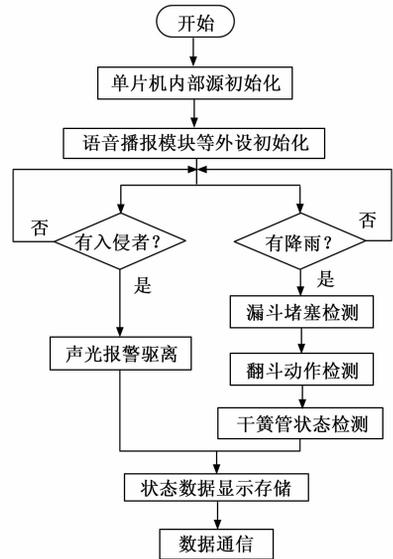


图 9 系统程序流程图

1) 系统采用了多层次和多重冗余的检测机制以保证数据的准确性。在检测到降雨的情况下,系统将启动雨量传感器工作状态的检测流程。流程包括漏斗堵塞检测、翻斗动作检测和干簧管状态检测,每个检测步骤依次进行。在当前检测结果通过后,系统进入下一项检测。

2) 降雨检测:利用安装在承雨漏斗内(液位传感器 1)和双翻斗式雨量传感器外围(液位传感器 5)的两个液位传感器同步检测是否有水,双重确认可以有效防止因外部因素导致的误报降雨情况。

3) 漏斗堵塞检测:液位传感器 2、3、4 分别部署在承雨漏斗、接水漏斗和汇集漏斗的外壁,通过检测各部分水位是否超过预设阈值以及是否有溢出现象(即从漏斗中溢出并流至液位传感器处)来判断是否存在堵塞问题。当任何一个液位传感器检测到水位超过设定阈值,系统将及时识别并标记该处可能发生堵塞故障。

4) 翻斗动作检测:使用光电开关 1 和 2 分别监测上翻斗和计数翻斗的动作。当翻斗正常翻转时,光电开关能捕捉到遮挡物的变化,据此判断翻斗的机械运动是否正常。在降雨期间,如果光电开关未能检测到预期的翻转动作,并对比另外一个翻斗的翻转情况,则可认定相关翻斗可能存在机械故障。

5) 干簧管检测:用于检测雨量传感器内部的干簧管的工作状态。在正常降雨条件下,当计数翻斗翻转时,干簧管触发脉冲信号,指示降雨量的增加。当计数翻斗翻转时,如果干簧管没有产生相应的信号,系统将判断干簧管存在故障或者干簧管接线座与气象站原有的

数据采集电路连接所用的线缆损坏。此外,当干簧管检测到的闭合次数与翻斗动作监测中计算出的计数翻斗翻动次数不一致时,表明干簧管模块可能存在隐性故障,如磁力下降导致的测量值偏小(即计数翻斗上的磁钢虽然随着翻动靠近干簧管,但是却无法使其有效闭合)。

4 系统测试与分析

本文采用模拟故障现象的方式对雨量传感器的工作状态监测系统进行了测试。模拟故障类别主要包括漏斗堵塞、翻斗翻动动作异常、入侵检查和有效降雨检测等关键场景。模拟故障测试结果如表 1 所示。其中,“间歇性用磁铁靠近干簧管”是指在降雨过程中,在计数翻斗无翻转时,用磁铁靠近干簧管,模拟干簧管过于容易导通的情况;“拆下或短路干簧管一段时间”是指在降雨过程中,中途停止干簧管脉冲信号输出,模拟干簧管闭合次数偏少的情况;“外围干燥,雨量筒内有降水”是指雨量筒外围传感器未检测到降雨,只有在雨量筒有降雨,模拟异常大雨量的情况。从表中可以看出,系统可正确识别出雨量传感器的各种故障类别及通信异常情况等情况。

表 1 模拟故障测试结果

测试方法	语音播报	显示屏显示容
堵住承雨漏斗	承雨漏斗水位异常,请检查	堵塞:承雨漏斗
堵住接雨漏斗	接雨漏斗水位异常,请检查	堵塞:接雨漏斗
堵住汇集漏斗	汇集漏斗水位异常,请检查	堵塞:汇集漏斗
粘住上翻斗	上翻斗无翻转,请检查	翻转异常:上翻斗
粘住计数翻斗	计数翻斗无翻转,请检查	翻转异常:计数翻斗
拆下干簧管	干簧管无数据,请检查	干簧管:异常
短路干簧管	干簧管无数据,请检查	干簧管:异常
间歇性用磁铁靠近干簧管	干簧管数据偏大,请检查	干簧管:异常
拆下或短路干簧管一段时间	干簧管数据偏小,请检查	干簧管:异常
外围干燥,雨量筒内有降水	疑似非正常降雨,请检查	降雨:异常
用玩偶靠近雨量观测区域	有入侵者,请检查	入侵:有
拔出手机卡	通信异常,请检查	通信:异常

同时,本文利用杭州佐格通信设备有限公司生产的 ARC100 全自动雨量校准仪^[20],创建了一个可重复和可控的测试环境,以评估双翻斗雨量传感器在不同降雨条件下的故障响应时间。该校准仪能够模拟产生 100 档不同的降雨强度和 2 档降雨量。测试设置大雨和小雨的降雨强度分别对应 49 单位和 13 单位。受限于校准仪操作台高度的,测试主要集中在雨量筒内部传感器的故障检测响应时间,并在大雨和小雨条件下分别进行了测试。

测试结果如表 2 所示。

表 2 不同雨强条件下故障响应时间测试结果

故障类别	雨强条件	响应时间 1/s	响应时间 2/s	响应时间 3/s	响应时间 4/s	响应时间 5/s	平均响应时间/s
接雨漏斗堵塞	大雨	79.4	74.6	81.4	80.4	80.6	79.3
	小雨	288.0	289.3	287.5	286.9	289.0	288.1
汇集漏斗堵塞	大雨	32.4	33.6	33.3	35.0	33.7	33.6
	小雨	129.5	128.3	128.6	125.8	126.6	127.8
上翻斗卡死	大雨	7.4	6.6	6.2	5.9	6.7	6.6
	小雨	19.6	18.8	15.9	18.5	14.7	17.5
计数翻斗卡死	大雨	6.3	5.5	6.9	5.8	6.7	6.2
	小雨	19.6	18.8	15.9	14.7	18.5	17.5
干簧管开路	大雨	2.8	2.0	3.5	3.2	2.9	2.9
	小雨	2.4	4.0	7.3	6.7	1.9	4.5
干簧管短路	大雨	1.8	1.2	1.6	3.5	4.5	2.5
	小雨	9.4	1.3	1.9	9.8	8.5	6.2

从表 2 中可看出:平均故障响应时间保持在 290 s 以内,相较于以往依赖后期数据质量监控和人工巡检发现故障的方法,大大提高了故障检测的速度。此外,系统在不同雨强条件下对各类故障现象的响应时间表现出显著的差异性,且在大雨条件下普遍具有更短的响应时间。这主要是因为故障检测依赖于降雨量的积累,而在大雨条件下,相同时间内积累的降雨量更大,从而使得故障更容易被检测到。

另外,在相同雨强下,干簧管短路较之于开路其响应时间波动较大。这是由于雨量传感器的输出信号是低电平有效,短路故障一旦发生,就会导致降雨量增加 0.1 mm。如果短路发生在干簧管闭合时,需要等到下一次计数翻斗翻动时才能检测到故障;而如果短路发生在干簧管空闲时,则可以立即被检测到。而开路故障一般都需要在下次计数翻斗翻动时才能被检测到。

5 结束语

针对双翻斗雨量传感器存在着机械结构异常和隐性故障不易被及时发现的技术难题,本文设计了一套基于液位传感器、光电传感器、雷达感应模块等多元传感器技术,并整合嵌入式系统设计的实时监测系统。该系统能够高效且准确地识别出堵塞情况、机械结构动作异常以及非正常降雨等问题,并通过入侵检测和驱离功能确保观测环境的安全。系统记录的故障数据为雨量传感器数据质量控制提供了直接且充分的依据,也为未来雨量传感器的设计优化和维护工作积累了实践经验和数据支撑。

在后续的工作中,为进一步提升系统的功能性和准确性,在软件层面可增加对雨量传感器翻斗的翻动协调性分析等精细化监测功能的开发;在硬件层面,考虑增设进水及水流控制模块,以实现实时自动校准雨量传感

(下转第 31 页)