DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)10-0052-06

基于物联网的抽水蓄能电站低功耗安全监测系统研究

许双全[1]，安　悦[2]，张景程[1]，李希稷[1]，葛　鹏[2]
（1.山东潍坊抽水蓄能有限公司，山东 潍坊 262600；2.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司，北京 100024）

摘　要：抽水蓄能电站大坝施工期间需要及时准确掌握施工环境中位移、倾斜、应力、应变、渗压渗流等物理量的变化，然而施工期监测过程中有供电、通讯不稳定、测点数目不固定等问题，并且施工期内可能出现的电缆损坏、设备损坏等异常情况。研制能够适应施工期监测环境下的大坝自动化监测系统具有非常重要的现实意义 。为此，针对抽水蓄能电站大坝施工期监测的特点，通过研究物联网、短距离无线通讯、云平台、低功耗管理、故障检测等技术手段实现全套的由混合式采集模块、Lora 通讯网关、云平台组成的大坝施工期水工安全监测系统。系统在潍坊抽蓄电站监测工程中应用，运行状态良好，可以有效解决大坝施工期监测遇到的问题，适合在大坝施工期自动化监测中实际应用。

关键词：低功耗；物联网；云平台；抽水蓄能；施工期；安全监测
中图分类号：TP277　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1003-7241(2025)10-0052-06

Research on low power safety monitoring system for pumped storage power stations based on the IoT

XU Shuangquan[1], AN Yue[2], ZHANG Jingcheng[1], LI Xiji[1], GE Peng[2]
(1. Shandong Weifang Pumped Storage Co., Ltd., Weifang 262600, China;
2. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: During the construction of pumped storage power plant dams, it is necessary to timely and accurately grasp the changes in physical quantities such as displacement, tilt, stress, strain, seepage and seepage in the construction environment. However, during the monitoring process during the construction period, there are issues such as unstable power supply, communication, and the number of measurement points is not fixed, and abnormal situations such as cable damage and equipment damage may occur during the construction period. The development of a dam automation monitoring system that can adapt to the monitoring environment during the construction period is of great practical significance. This article focuses on the characteristics of monitoring during the construction period of pumped storage power station dams. By studying the internet of things, short-range wireless communication, cloud platform, low-power management, fault detection and other technical means, a complete set of hydraulic safety monitoring system for dam construction period composed of hybrid acquisition module, Lora communication gateway, and cloud platform is realized. The system is applied in the monitoring project of Weifang pumped storage power station, and its operation status is good. It can effectively solve the problems encountered in monitoring during dam construction and is suitable for practical application in automatic monitoring during dam construction.
Keywords: low power consumption; internet of things; cloud platform; pumped storage; construction period; safety monitoring

0　引言

在抽水蓄能电站大坝施工建设过程中，为监测位移、水位、倾斜、应力、应变、渗压渗流等物理量需要埋设对应的传感器，由于正处于施工期，电源、通信电缆无法布置，所以对这些传感器的数据采集也都是以人工方式进行，无法进行自动化监测，在这个过程中，耗费了大量的人力，并且一旦遇到恶劣天气，人工监测将会变得很困难甚至很危险[1]。因此，施工期自动化监测变得越来越重要，目前大部分施工期监测都还使用人工观测的方式。

目前大坝施工期监测布置存在以下难点[2]：1）现场工程施工影响，埋设的传感器以及电缆会遭到破坏；2）自动化采集设备容易受损[3]；3）现场无法稳定供电；4）现场测点的类型与测点个数不固定。

因此，研制能够适应施工期监测环境下的大坝自动化监测系统具有非常重要的现实意义。本文针对抽水蓄能电站大坝施工期监测的特点，研究通过物联网、短距离无线通讯、云平台、低功耗管理、故障检测等技术手段实现了全套的大坝施工期水工安全监测系统[4]。

1　系统总体设计

根据抽水蓄能电站大坝施工期安全监测的特点，系统要具备以下功能：

1）数据采集功能，任意一个通道均可支持工程监测中常用的差动电阻式仪器、振弦式仪器，标准量式仪器、

* 基金项目：国网新源集团山东潍坊抽水蓄能有限公司科技项目(SGXYKJ-2021-139)
收稿日期：2024-01-16

RS485 接口仪器，避免了配置不同类型的采集模块来采集不同的传感器数据[5]。

2）测点数可扩展，采集系统主模块可以通过扩展测量通道来增加采集的测点数。

3）传感器故障诊断功能，包括传感器的断线、短路、超阈值等状态，传感器的故障状态报送到数据中心后，维护人员可以及时有针对性地到现场进行维护。

4）充电管理功能，施工期间，电源供应不稳定，并且电源线路很有可能遭到施工破坏而造成安全隐患，因此需要监测系统具有太阳能充电管理功能，无需外界供电。

5）功耗管理功能，监测系统需要尽可能地降低功耗，以保证在没有外供电与没有充电的情况下长时间工作。

6）状态自报功能，系统能定期报送自身的工作状态包括温湿度、CPU 状态、内存状态、工作电流、充电状态、电池电压、无线信号强度、传感器状态等信息到数据中心，以便维护人员及时到现场进行系统维护。

7）无线通信管理功能，考虑到现场除了布置通讯线路不便，还存在部分区域没有移动通信信号的问题，需要布置短距离无线通信信号进行中继[6]。

根据以上功能分析，设计出基于物联网的低功耗大坝施工期安全监测系统，监测系统由混合式采集模块、混合式扩展模块、Lora 通讯网关、云平台组成，如图 1 所示。

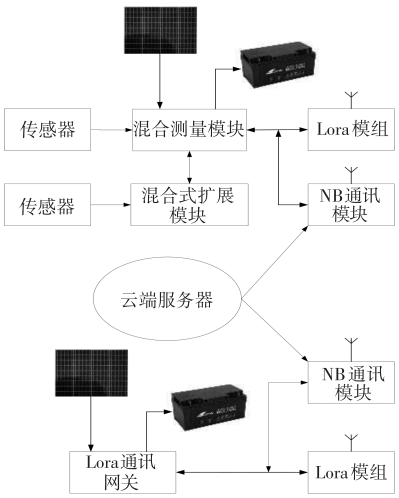


图 1　监测系统基本框图

其中混合式采集模块实现数据采集功能、测点扩展功能、传感器故障诊断功能、充电管理功能、功耗管理功能、状态自报功能、通信功能，使用无线功能时，当移动通信信号较好时使用 NBIOT 模组基于移动通信信号实现物联网通讯，当移动通信信号较差时，使用 Lora 模组实现短距离无线通讯。

混合式扩展模块用来扩展混合式采集模块的测量通道，实现功能包括数据采集功能、传感器故障诊断功能。

Lora 通讯网关用来实现在移动信号的延伸功能，在移动信号较好的位置布置 Lora 通讯网关，用 Lora 信号来覆盖安装位置移动信号不好的混合式采集模块，Lora 通讯网关与采集模块之间使用 Lora 通讯，然后将读取的测量数据使用 MQTT 协议与云平台通讯。当 Lora 通讯网关的 Lora 信道无法覆盖采集模块时，再增加一个 Lora 通讯网关充当 Lora 中继功能[7]。

2　硬件电路设计

水工安全监测的核心模块为混合式采集模块和 Lora 通讯网关。混合式采集模块主要由电源与充电电路、MCU 最小系统电路、混合式测量电路、无线通信接口电路、有线通信电路组成，具体如图 2 所示。

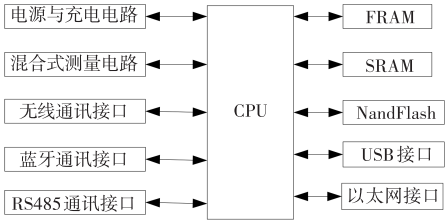


图 2　混合式采集模块电路结构框图

MCU 选用意法半导体的 STM32F407ZG，该芯片最大主频 168 MHz，芯片集成的对外通讯接口包括 USB、以太网、I^2C、SPI 以及多个串口，最多可用 IO 口达 112 个，非常便于进行控制与通信，外部使用 I^2C 集成了铁电存储器 FM24V05，用于存储参数，通过 FSMC 总线扩展了 SRAM 芯片 IS61WV102416 芯片，用于数据缓存以及程序堆栈存放，另外扩展了 NandFlash 芯片 MT29F4G08 用于大容量数据存储。

在现场使用中，蓄电池选择有铅酸电池或锂电池，标称 12 V 铅酸电池的充电电压为 14.2 V，标称 12 V 的锂电池的充电电压为 12.6 V，目前常用充电芯片的充电电压由电阻搭配产生，针对这两种电压需要有不同的电阻配比进行，经过芯片选型，选用南芯半导体的 SC8886A 进行充电管理，CPU 可以根据配置的电池类型使用 I^2C 接口对 SC8886A 的充电电压、充电电流进行灵活配置，为保证电路具备极低的静态功耗，SC8886A 输出的 12 V 电压选用 DC-DC 芯片 LT3481 转换成 5 V 电压，5 V 电压通过线性稳压芯片 MAX604 转换成 3.3 V 电压，LT3481 与 MAX604 均具备极低的静态工作电流。电源电路的基本框图如图 3 所示。

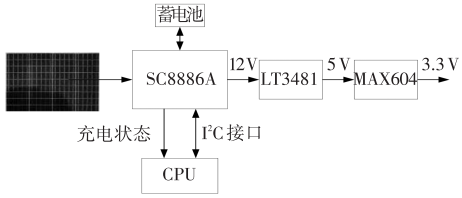


图 3　电源电路基本框图

混合式测量电路包括弦式测量单元、差阻测量单元、电压电流测量单元、RS485 测量单元组成。这几类测量电路针对的传感器最多的电缆为差阻式传感器是 5 芯，再加上电缆屏蔽线，因此设计每个测量端子为 6 路输入。

弦式测量单元由通道切换电路、激励电路、信号调理测频电路组成。如图 4 所示，传感器通道总线通过继电器的常开端接入各个测量电路，弦式传感器接入混合通道的 1~5 路，其中 1~4 路为传感器四芯信号线，5 路为屏蔽层，弦式测量单元将传感器通道总线中的 1~4 路分两组分时接入测量电路，根据使用场合第 5 路可接入内部地。

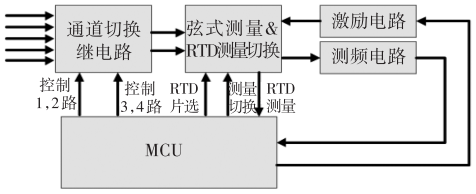


图 4　弦式测量单元基本框图

弦式测量单元的故障诊断通过测量电阻的方式进行，当传感器的线圈回路与电阻回路电阻小于 10 欧姆，认定为短路，当传感器的线圈回路与电阻回路电阻大于 100 K 欧姆，认定为断路，差阻测量单元由电压电流驱动电路、驱‖动选择电路、测量电路组成，需要测量的电阻比和电阻和的精度要求达到 0.000 1，16 位 AD 理论上是满足测量要求的。考虑到噪声、增益和输出数据速率的影响，AD 的实际有效位数是低于理论值的，所以选用 16 位 AD 会给测量误差带来一定的风险。为了排除此风险及给测量带来一定的裕量，选用24位的AD芯片AD7124。为克服电缆电阻对差阻式传感器测量的影响，设计了如图 5 所示测量的原理，$R1$、$R2$ 为差阻式传感器的两个分线电阻，$r1$、$r2$、$r3$、$r4$、$r5$ 分别为蓝、黑、红、绿、白五芯的芯线电阻，R_s 为标准电阻，I_0 为恒流源，由于运算放大器的“续断”特性，所以芯线电阻 $r2$、$r4$ 对测量 $R1$、$R2$ 不产生影响。通过测量 U_1、U_2、U_s 即可计算出电阻和、电阻比。

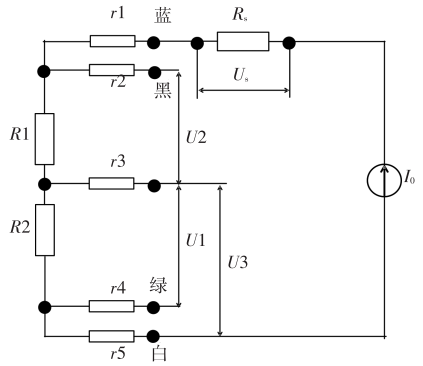


图 5　差阻式传感器测量原理图

差阻式测量单元的故障诊断通过测量电阻的方式进行，当电阻和小于 10 Ω，认定为短路，当传感器的线圈回路与电阻回路电阻大于 1 000 Ω，认定为断路，电压电流测量单元的核心电路是 AD 采集电路，AD 采集电路使用 ADS1220 芯片，电压参考源使用 REF195，为隔离外围电路，使用光耦与飞渡电容组合电路进行隔离采集，如图 6 所示。

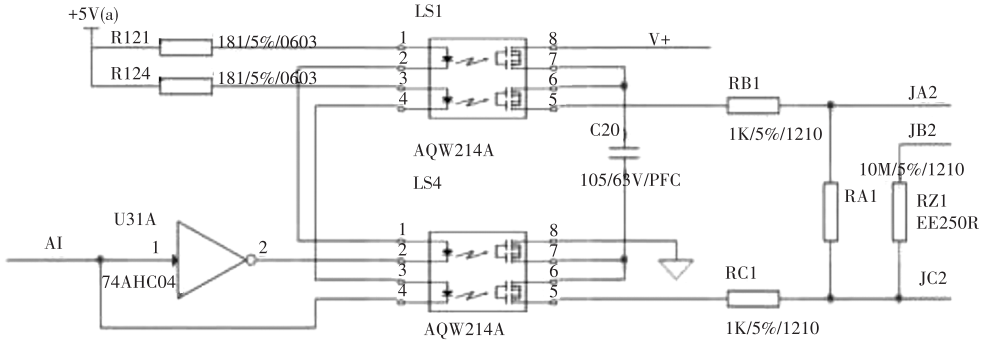


图 6　隔离采样电路

在图 6 中，模拟量电压由 JA2，JC2 输入，模拟量 4~20 mA 电流接入时，JA2 与 JB2 短接后，电流接在 JA2 与 JC2 之间。测量开始时，控制引脚 AI 置低，此时光耦 LS1 的 3、4 引脚与光耦 LS4 的 3、4 引脚内部的光电二极管形成回路，从而使得 JA2、JC2 之间的电压对飞渡电容 C120 充电，延时一段时间后，等飞渡电容 C120 充满电，再将控制引脚 AI 置高，此时光耦 LS1 的 1、2 引脚与光耦 LS4 的 1、2 引脚内部的光电二极管形成回路，电容 C120 与 V+连接，从而通过 ADS1220 芯片采集到电压值。

电压电流测量单元的故障诊断无法通过测量电阻的方式来判断是否发生断线或者断路，通过判断测量的电压电流值是否超限来判断是否发生故障 RS485 接口测量电路负责根据配置的传感器类型来使用相应的传感器通信协议来采集数据，采集不成功时采集结果置通信故障。

无线通讯接口电路采用扩展板搭载无线模块的方式，扩展板与主板通过插针插座连接，连接器总计 24 针包含：一组 UART、一组 SPI、6 根 IO 控制引脚，2 根 5 V 电源输入、2 根 12 V 电源输入、2 根 3.3 V 电源输入、4 根地线、3 根地址识别线，地址识别线用于无线模块的类型，在不改变主板电路的情况下实现按需搭载无线模块。

目前测量模块使用 NBIOT 模组直接与云平台通信，物联网技术是在互联网基础上发展起来的一种新的应用技术[8]，NB-IoT 是 IoT 领域一个新兴的技术，支持低功耗设备在广域网的蜂窝数据连接[9]，也被叫作低功耗广域网（LPWAN）。NB-IoT 支持待机时间长、对网络连接要求较高设备的高效连接。

蓝牙通讯接口用于使用手机 APP 对采集模块进行参数设置、测量调试、数据导出等功能。

Lora 通讯网关的电路框图如图 7 所示，相当于在混合式采集模块的电路上去掉了测量功能，无线通讯接口增加为 2 个，从而实现了 Lora 通讯数据与物联网平台数据互通。

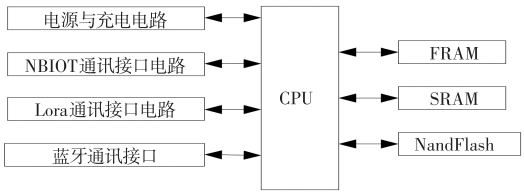


图 7　Lora 通讯网关电路结构框图

3　嵌入式软件设计

3.1　任务划分

系统的嵌入式软件基于 uC/OS-Ⅱ操作系统设计，根据系统功能，系统划分定时任务、发信任务、测量任务、数据接收处理任务、串口通信任务、无线通信任务、功耗管理任务，通过这 8 个任务实现了数据通信、数据存储、传感器测量、充电管理、功耗管理功能，以降低功耗。

3.2　Lora 网关通信机制

为定期了解 Lora 网关工作状态，Lora 网关需定时向云平台发送心跳信息，心跳信息包括电池电压、充电电压、无线信号强度、内存占比、温度、湿度等信息[10-11]。

当混合式测量模块使用 Lora 模组通讯时，当有自报数据或者心跳数据需要发送数据到云平台时，混合式测量模块根据预置的 Lora 通讯网关的地址与频率发送数据到 Lora 通讯网关，同时 Lora 通讯网关需要给混合式测量模块回复确认以确保 Lora 通讯网关正确接收到数据，随后 Lora 通讯网关将数据按照 MQTT 格式打包发送到云平台[12]。

云平台有指令或确认报文时，数据将直接发送 Lora 通讯网关，Lora 通讯网关通过报文内容匹配对应的混合式测量模块，从而决定通过 Lora 通信发送到对应的混合式测量模块。

3.3　功耗管理

在低功耗运行模式下，当系统超时一定时间没有对外进行交互通信，并且不需要测量，此时认为系统处于空闲状态，CPU 关断所有外设电路电源，包括 AD 采集电路、SRAM、FLASH、无线模组等，然后在下次测量时间时 CPU 苏醒，计算下次测量时间如式(1)所示，再计算下次心跳时间，如式(2)所示：

$$T_{nm} = T_c - (T_c \% T_a) + T_a \tag{1}$$

$$T_{nh} = T_c - (T_c \% T_h) + T_h \tag{2}$$

其中，T_{nm} 为下次测量时间，T_c 为当前时间，T_a 为定时测量间隔，T_{nh} 为下次心跳时间，T_h 为心跳间隔。

设置 CPU 的下次 ALARM 的时间为 T_{nm} 与 T_{nh} 中较小的值。心跳周期与测量周期越大，功耗越小。设置完成后 CPU 进入休眠，休眠模式下的电流小于 0.1 mA。

如果采集周期设置为 2 h，每次苏醒后的平均工作电流大约为 100 mA，采集传输所需时间为 2 min，休眠模式下的电流以 0.1 mA 计算，则每天消耗电能大约为 0.1 mA×24 h+100 mA×0.4 h=42.4 mAh。

如果配置一个 12 V/15 Ah 锂电池，则理论上可以在没有外充电的情况下工作大约为 353 d，在运行中配备了太阳能板充电，可以保证在施工期间无需额外充电，减少维护工作量。

为尽可能减少现场维护的工作量，防止电池电量过大引起损坏，适应长时间没有外供电以及阴雨天气太阳能板长期无法充电的情况，需要开辟一个线程进行功耗管理。

图 8 为系统的功耗管理线程的工作流程图，线程启动后，读取当前电池电压与充电状态，当电池电压低于 10 V 时，置欠压标志，表示蓄电池长期未得到充电，如果系统继续正常工作将会导致电池发生不可逆损害，此时系统关闭外围电路后直接休眠，每隔 15 s 苏醒一次后喂看门狗、对充电芯片配置参数，然后更新欠压标志，在欠压模式下不再进行测量操作，直到电池电压恢复正常。

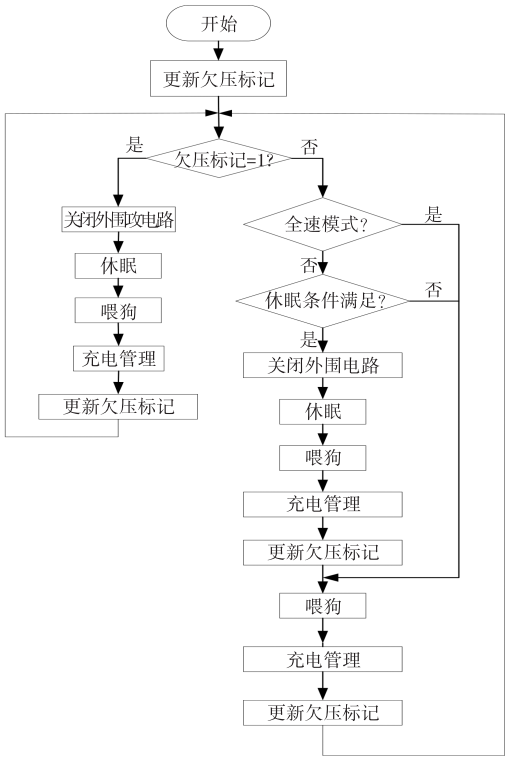


图 8　功耗管理线程流程图

当电池不处于欠压状态时，查看系统工作模式，如果是低功耗模式，就判断休眠条件是否满足，满足条件后关闭外围电路后直接休眠，如果是全速模式就定时进行喂狗、充电管理、更新欠压标志。

4　监测系统平台设计

传统的平台软件需要安装采集软件、数据库软件，对采集计算机的配置要求较高，对于施工期监测应用来说没有必要，为此使用基于 HTML5 技术的 Web 架构才设计平

台软件。HTML5 将 Web 带入一个成熟的应用平台，在智能表单、绘图画布、多媒体、地理定位、数据存储、多线程等方面的应用都有独特的优势。

基于 HTML5 技术的平台软件由模型管理、参数配置、远程操作、数据采集、图表展示输出这 5 个板块组成，软件结构框图如图 9 所示。

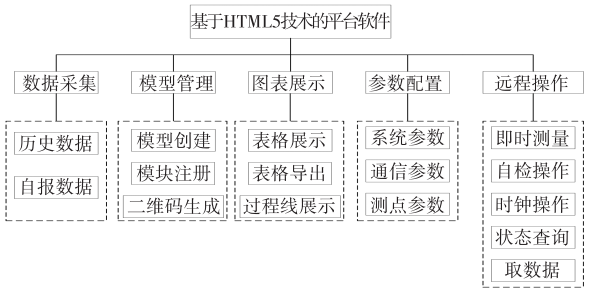


图 9　平台软件结构框图

为方便对测站进行管理，设计了模型管理板块，用创建测站模型，生成测站二维码，二维码作为测站的注册信息，测站通过二维码注册成功后确定测站所处的位置、工程、包含的测点等信息。

参数配置板块用于远程配置测站的系统参数、通信参数、测点参数。测点参数经过参数比对进入测点数据库，测点参数可以与测站的测点参数进行双向同步。

数据采集板块可以接收并处理来自定时自报数据以及历史数据，接收到数据后进行后续的公式计算并入库。

远程操作板块用于远程对测站进行对时、自检、测量、取历史数据、状态查询等操作，方便远程调试。

图表展示输出用于测点过程线展示、测点数据表格显示以及表格导出。方便观察传感器的运行情况，用户只需要通过账号密码，在任意一台可以上网的 PC 就可以观察到采集数据及其变化趋势，如图 10 及图 11 所示。

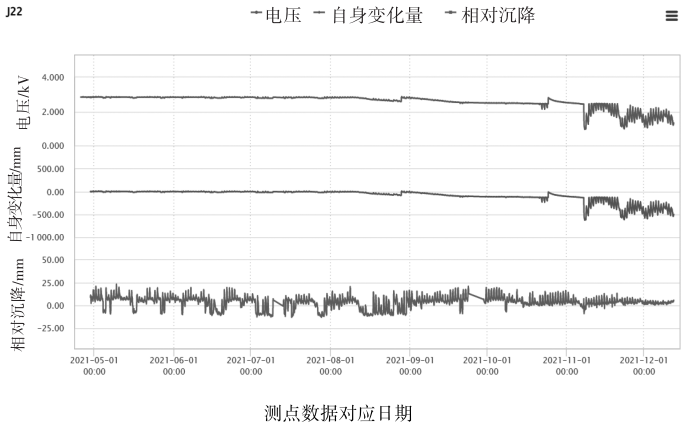


图 10　测点图形展示界面

时间	相对沉降(mm)	自身变化量(mm)	电压(V)
2021-12-12 13:00:00	5.66	-498.28	1.325
2021-12-12 11:00:00	4.66	-523.94	1.248
2021-12-12 10:00:00	5.33	-518.28	1.265
2021-12-12 09:00:00	3.99	-539.27	1.202
2021-12-12 08:00:00	3.99	-537.27	1.208
2021-12-12 07:00:00	4.33	-541.27	1.196
2021-12-12 06:00:00	3.99	-533.28	1.220
2021-12-12 05:00:00	3.99	-523.28	1.250
2021-12-12 04:00:00	4.99	-497.61	1.327
2021-12-12 03:00:00	3.99	-453.62	1.459
2021-12-12 02:00:00	3.99	-456.28	1.451
2021-12-12 01:00:00	3.66	-446.28	1.481

图 11　测点表格展示界面

5　结束语

本文介绍了通过物联网、云平台、低功耗管理、故障检测等技术手段实现的抽水蓄能电站水工安全监测系统的设计方法，解决了建设施工期现场供电与通讯不稳定、测点数目不固定等问题，并且对施工期内可能出现的电缆损坏、设备损坏等异常情况有完善的报警措施，该系统已在潍坊抽蓄电站监测工程中应用，运行状态良好。

参考文献

[1] 葛继空，李卫军. 基于测量机器人的深基坑自动化监测系统优化研究[J]. 测绘技术装备，2021（4）：11-15.

[2] 彭涛，文豪. 双江口地下厂房洞室群施工期安全监测临时自动化系统规划[J]. 大坝与安全，2021（5）：10-14.

[3] 胡旭阳，陈昌华，段杭，等. 白鹤滩水电站施工期安全监测自动化技术的应用[J]. 中国水利，2019（18）：99-102.

[4] 赵新华，李慧滢，何宇，等. 新安江水电站大坝安全监测系统探讨和监测效果分析[J]. 水利科学与寒区工程，2021，4(6)：61-63.

[5] 毛索颖，周芳芳，曹浩. 一种振弦差阻复用型读数仪的设计与实现[J]. 电子测量技术，2021，44(6)：149-155.

[6] 刘梦，王小平，马月辉. 基于 LoRa 的铁路路基沉降数据采集系统设计[J]. 大地测量与地球动力，2019，39(9)：987-990.

[7] 刘懿俊，梁军，张强. 基于 LoRa 双频段网关节点的数据采集系统设计[J]. 物联网技术，2021，11(1)：36-38.

（下转第 61 页）