

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312543

互感器边云协同实时监测系统设计*

徐颖钰 李岩松 刘君

(华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)

摘要: 电子式互感器作为智能变电站的信息源头,需对其进行实时监测。为解决现有互感器监测技术在实时性、精确度、存储容量等方面的问题,基于鸿蒙架构,设计了一套互感器边云协同实时监测系统。利用单片机采集互感器数据,以GPS秒脉冲为基准保证采样同步,再经鸿蒙操作系统存储上云,并在边缘计算侧引入KF与加凯塞窗的DFT算法,滤除数据采集过程中的噪声与谐波,当互感器精度不足时触发蜂鸣器报警。经实验验证,本系统实现了多互感器监测数据的实时、同步上传与大量储存,存储容量取决于云服务器大小,可随时扩容。本系统满足互感器实时监测的精度要求,幅值误差不超过0.75%,满足0.2的准确级要求,并允许工作人员随时、异地查看结果。此外,边云协同的工作模式具有一次开发、多端部署的特性,使本系统具有较强的移植性,可应用于其他不同电力系统场景。

关键词: 鸿蒙架构;嵌入式系统;边云协同;数据采集;电力物联网

中图分类号: TM932 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Design of transformer side cloud collaborative real-time monitoring system

Xu Guyu Li Yansong Liu Jun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As the information source of intelligent substation, electronic transformer needs real-time monitoring. In order to solve the problems of existing CT monitoring technology in terms of real-time performance, accuracy and storage capacity, this paper designs a set of CT side cloud collaborative real-time monitoring system based on Harmony architecture. The single chip microcomputer is used to collect the transformer data, and the GPS second pulse is used as the reference to ensure the sampling synchronization, and then the Harmony operating system is stored on the cloud, and the Kalman filter and the discrete Fourier algorithm with Cassel window are introduced on the edge computing side to filter the noise and harmonics in the process of data acquisition. When the transformer accuracy is insufficient, the buzzer alarm is triggered. Experimental verification shows that the system realizes real-time, synchronous uploading and mass storage of monitoring data of multiple transformers. The storage capacity depends on the size of cloud server and can be expanded at any time. The system meets the accuracy requirements of transformer real-time monitoring, the amplitude error is less than 0.75%, meets the accuracy level of 0.2, and allows the staff to view the results at any time and in other places. In addition, the edge-cloud collaborative working mode has the characteristics of one-time development and multi-terminal deployment, so that the system has strong portability and can be applied to other different power system scenarios.

Keywords: Harmony structure; embedded system; edge cloud synergy; data acquisition; electric internet of things

0 引言

随着经济社会不断发展,电力系统走向数字化、智能化成为必然趋势^[1]。智能变电站作为智能电网的重要组成部分,对智能变电站进行实时监测至关重要。而电子式互感器又是智能变电站的重要数字化源头^[2],对电子式互感器

输出信号进行准确的数据采集得到广泛关注。

相较于传统的互感器,电子式互感器具有体积小、造价低、暂态性能好等优点^[3-4],但在现场使用过程中故障率较高,因此需要进行实时监测^[5]。传统的互感器现场监测技术,需要对互感器进行断电操作^[6-7],不利于电网运行的可靠性和经济性,且易受谐波、噪声等因素的影响,导致数据

收稿日期:2023-01-03

* 基金项目:国家自然科学基金(51277066)项目资助

采集结果出现偏差。

近些年来,对电子式互感器的在线监测技术研究不断发展。带电作业法是最为基础的,技术人员通过绝缘材料保障操作的安全性,此方法对技术人员要求较高,缺乏便捷性^[7]。改良互感器器件结构,如设计组合式钳形电流传感器,构成标准电流通道,此方法对硬件要求较高,缺乏经济性^[8];或者采用菱形起重机连接标准互感器和高压母线,但铁芯可能出现饱和现象和铁磁共振^[9]。利用电流观测器对电子式互感器进行实时监测^[10],此方法依赖于精确的解析模型,难以获得较高精度。依托数据采集模块在电脑端设计上位机,对电子式互感器进行数据采样^[11-12],此方法对上位机的容量要求较高,且同步性及抗干扰能力较弱。

上述几种方法,都不同程度地受限于硬件工艺要求、数据采集准确度、数据上传的实时性、上位机存储容量等因素。随着近期鸿蒙操作系统(Harmony operating system, HarmonyOS)的兴起,电力物联网成为热点。鸿蒙分布式架构,依靠其软总线、硬件虚拟化等核心技术^[13],实现万物互联^[14-15]。考虑基于鸿蒙分布式架构,搭建互感器的边云协同^[16]实时监测系统,解决上述互感器在线监测过程中的难点。

本系统利用单片机与云平台相结合的方式,实现了多互感器数据实时同步上传,并解决了互感器采样数据难以大量储存的问题。同时,本系统的分布式架构,允许场站工

作人员随时随地查验数据结果,无需到达现场,极大地提升了便捷性。并且,边云协同方法的一次开发,多端部署特性,使本系统具有较强的可移植性与普适性,可应对其他不同电力系统场景。另外,本系统在上位机的边缘计算侧,引入了卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)与加凯塞窗的离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)算法,极大地抑制了互感器数据采集过程中产生的谐波与噪声,满足互感器监测的精度要求。

1 互感器边云协同实时监测系统设计

1.1 鸿蒙分布式架构

HarmonyOS 遵循分层设计,具体架构如图 1 所示。主要分为 4 个层级,从下至上依次为:内核层、系统服务层、框架层和应用层。HarmonyOS 采用多内核设计,支持针对不同的设备选择合适的内核。其独创的微内核技术,可以很好地应用于嵌入式系统的开发,有利于电力物联网的构建^[17]。系统服务层,包含多个子系统集,面向软件、硬件多个方面提供专业支持。其中硬件服务子系统集,支持向用户提供各种硬件服务,将各种终端设备并入鸿蒙生态中。框架层与应用层,提供多种语言开发框架,鼓励开发者积极拓展鸿蒙生态系统;并提供多种系统应用及第三方应用支持,以实现特定的业务功能;同时支持跨设备调度与分发,满足不同用户的一致、高效的应用体验。

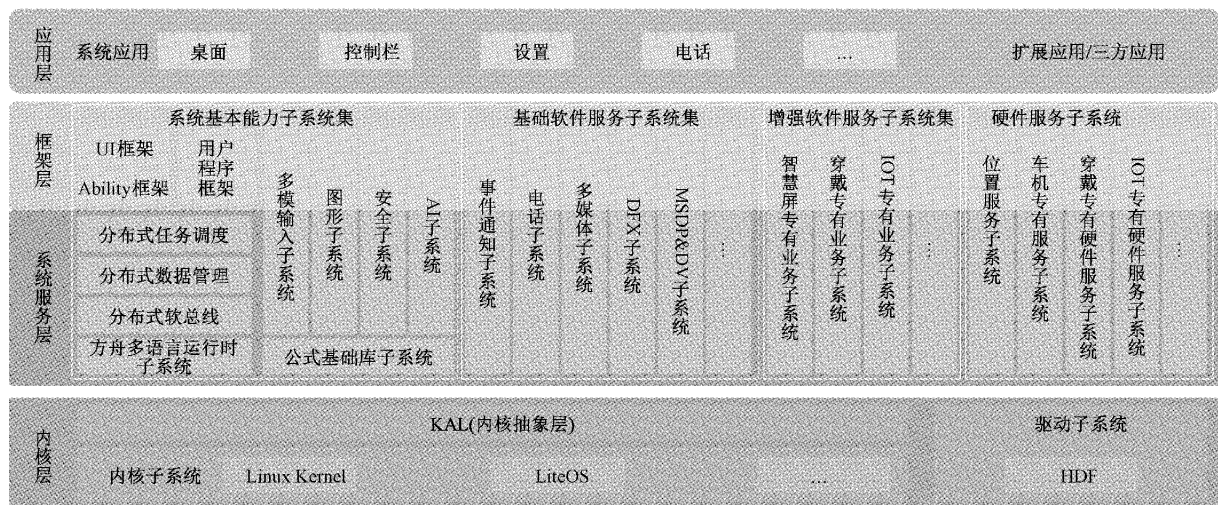


图 1 鸿蒙分布式架构

分布式软总线、分布式设备虚拟化、分布式数据管理、分布式任务调度共同构成了 HarmonyOS 的分布式架构,保证了多端共联、硬件互助与资源共享,实现一次开发,多端部署。

1.2 总体架构

基于上述鸿蒙架构,将整个系统主要分为 3 大模块:数据采集模块、存储上云模块、边缘计算模块。整体架构如图 2 所示。

数据采集模块以 stm32c8t6 为主控芯片,驱动全球定位系统(global positioning system, GPS)模块完成授时,以每秒脉冲(pulse per second, PPS)触发模拟数字转换(analog to digital conversion, ADC)模块进行数据采集,以保证多互感器数据采集的同步性。

存储上云模块以搭载 Hi3861V100 芯片的小熊派开发板为主控模组,集成蜂鸣报警器,以随时提醒场站工作人员互感器运行状态。网络协议层通过传输控制协议

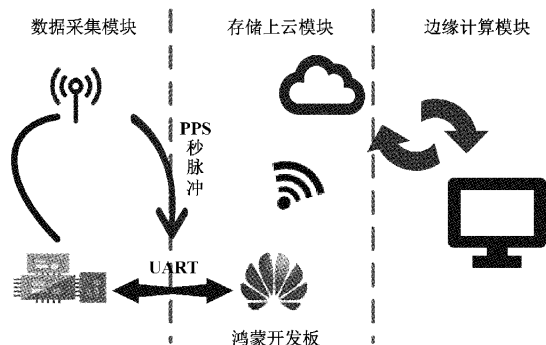


图 2 互感器边云协同实时监测系统总体架构

(transmission control protocol, TCP)将接收到的数据通过局域网上传到应用层,再由应用层通过消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议上传至华为云服务器,与云端进行双向通信。

由于本系统存储上云模块对上传数据的速率与存储容量要求较高,华为云平台免费试用服务无法满足要求,故而选用华为云耀私有云服务器(hyper elastic cloud server, HECS)。HECS 具备独立、完整的操作系统和网络功能,提供快速应用部署和简易的管理能力,适用相对较低负载的应用场景,具有易搭建、更实惠、易维护、更安全的特点。本系统中选用 2 核、1 M 带宽、4 G 存储容量的私有云服务器,若后续更换应用场景,可对 HECS 进行升级。

为满足互感器实时监测的低延迟性和高精度性,在上位机端引入边缘计算模块。边缘计算本质上是一种分布式计算,大量数据无需在云端进行高精度的计算操作,让云端服务器专注于数据的存储以及与用户的交互,极大地降低了对云服务器传输能力和计算能力的要求。

边云协同的整体架构构成了本系统最大的亮点。既解决了互感器实时监测数据无法大量储存的问题,又能让工作人员通过云端服务器实现异地、随时查看。此外,搭载 Hi3861V100 芯片的开发板只是终端设备与云服务器平台的通信枢纽,这意味着除了互感器实时监测外,本系统可应用于电力系统的其他方面,具有较强的可移植性。

1.3 硬件电路

本系统的主要硬件电路集中在上文所述的数据采集模块和存储上云模块,其逻辑框图如图 3 所示。

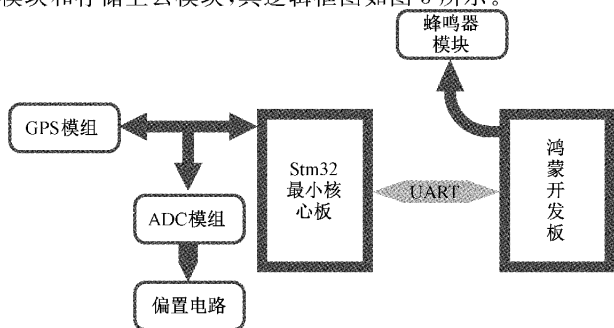


图 3 硬件电路结构框图

由数据采集模块采集电子式互感器电流数据,经由小熊派开发板中转传递到华为云端,实现数据的大量、异地存储,再导入边缘计算模块进行后续计算操作。

其中,数据采样模块电路如图 4 所示。由于 ADC 采样模块是由 stm32 最小核心板驱动的,默认只能采集正向电压,需利用电阻分压将输入电流相量偏置到正值,图中 LM358 运放模块只起增强驱动能力的作用。

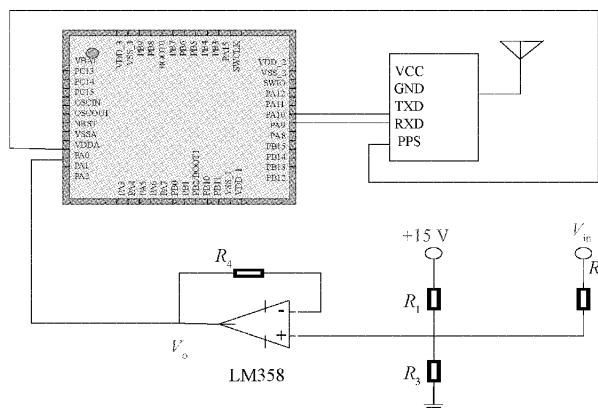


图 4 数据采样电路

由图 4 可知,电压偏置转换公式为:

$$V_o = \frac{V_{in} \cdot R_1 \cdot R_3 + 15 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3} \quad (1)$$

ADC 采样模组利用 stm32c8t6 集成的 ADC 采样接口直接进行数据采样,方便快捷。采样率可调,最高可达 14 MHz;采样精度 12 bit,可满足互感器实时监测的精度。若需更高精度,则可接入其他更高位采样模块。

GPS 模组采用 GT-U8 模块,搭配有源天线。GT-U8 支持多种卫星定位授时,包含 32 条跟踪通道,极端情况下可同时接收 6 个卫星导航系统的信号,进行多卫星的联合定位与授时,跟踪灵敏度最高可达 -162 dBm。以 GT-U8 模块的 PPS 触发启动每秒的 ADC 采样,满足多互感器数据采样的同步性要求。

鸿蒙开发板选用 bearpi-hm_nano,搭载 Hi3861V100 芯片。小熊派开发板是一款轻量级物联网开发板,支持复杂环境下自动速率、弱干扰免疫等可靠性通信算法,且具有灵活的组网能力和完善的网络支持,具有较高的可靠性和安全性。

Stm32c8t6 最小核心板与鸿蒙开发板之间进行串口通信,串口通信最高速率可达 921 600 bsp,满足数据实时采集上云的需求。并且串口通信接线简单,远距离通信经济性较好。另外,两个开发板之间的串口通信也是由 GT-U8 模块的 PPS 触发的,进一步保证了多互感器监测时的同步性。

蜂鸣器模块利用 E53 接口与鸿蒙开发板连接,E53 标准接口为物联网案例标准,可满足不同的应用场景。在互感器输出电流幅值出现较大偏差时,远程遥控其报警以提

醒现场值班人员。

根据上述原理搭建实物电路如图 5 所示。

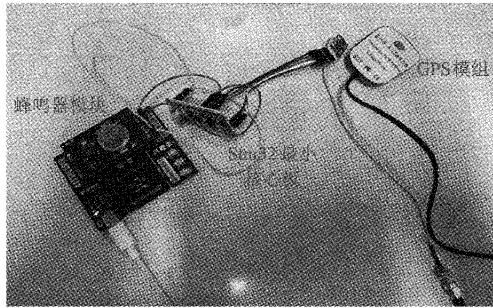


图 5 实物连接电路

2 边缘计算算法

新能源渗透率不断提升,加上大量非线性负载不断接入,配电网端的谐波大幅度增加,极大地影响了互感器输出波形质量^[18]。加上数据采集过程中硬件电路自身产生的噪声及抖动偏差,导致上述系统采样数据精度不足,考虑在边缘计算侧利用软件对原始采样数据进行误差修正。

2.1 KF 算法

KF 本质是一种状态估计算法,通过不断地迭代,递推得到目标模型的最优估计值^[19]。KF 可以在不确定信息的动态系统中应用^[20],占用内存小、速度快且具有较强的抗噪声能力。利用 KF 对数据采集过程中产生的噪声及硬件抖动带来的误差进行滤除。

算法具体原理如下。设整个数据采集过程中产生的噪声为高斯白噪声。系统的状态方程为:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}u_t + \mathbf{w}_t \quad (2)$$

系统的观测方程为:

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (3)$$

式中: \mathbf{x}_t 为当前时刻状态向量, \mathbf{x}_{t-1} 为上一时刻状态向量, \mathbf{z}_t 为当前时刻观测向量。 \mathbf{F} 和 \mathbf{H} 为系统的状态转移矩阵和观测矩阵, \mathbf{B} 为系统输入矩阵。 \mathbf{w}_t 和 \mathbf{v}_t 分别为状态过程噪声和观测过程噪声,两个噪声对应的方差分别为 \mathbf{Q}_t 和 \mathbf{R}_t 。

预测过程和更新过程,组成了整个滤波过程。预测部分方程为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_t^- = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{t-1}^- + \mathbf{B}u_{t-1} + \mathbf{w}_t \\ \mathbf{P}_t^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{t-1}^-\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_t^-$ 为当前时刻的先验估计值, $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}^-$ 为上一时刻的最优估计值, \mathbf{P}_t^- 为当前时刻先验估计值对应的协方差矩阵。

更新部分方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^-\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_t^-\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_t^- + \mathbf{K}_t(\mathbf{z}_t - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_t^-) \\ \mathbf{P}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t\mathbf{H})\mathbf{P}_t^- \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{K}_t 为当前时刻对应卡尔曼增益系数, \mathbf{P}_t 为当前时刻

最优估计值对应的协方差矩阵。

整个 KF 过程为:首先根据预测部分方程,由上一时刻的状态最优估计值,推算出当前时刻的估计值,称为先验估计,并求出对应先验估计协方差矩阵。再带回更新部分方程,以获取最新的卡尔曼增益系数,根据卡尔曼增益系数的不同,将当前时刻的观测值与先验估计值加权比较,获取当前时刻最优估计。如此循环反复,得到数据采集的最优估计,达到滤波的效果。

故将本系统的状态转移矩阵和观测矩阵设为单位阵,卡尔曼初始增益设为 1,采集到的电流向量设为观测向量,初始时刻先验估计值设为初始时刻电流采集值,即:

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{I} \\ \mathbf{K}_0 = 1 \\ \mathbf{z}_t = \mathbf{V}_t \\ \hat{\mathbf{x}}_0^- = \mathbf{V}_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: \mathbf{V}_t 为各时刻采集到的电流值向量, \mathbf{I} 为单位矩阵。

上述算法原理中,仍存在两个噪声协方差参数 \mathbf{Q}_t 和 \mathbf{R}_t 无法确定,它们直接关系到 KF 的效果。 \mathbf{Q}_t 和 \mathbf{R}_t 本质上属于超参数,是在滤波开始之前确定的参数,而不是通过训练或优化得到的参数。

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法,能够从随机解出发,通过追随当前搜索到的最优值来获取全局最优解,具有较快的响应速度和较好的精度^[21]。故引入 PSO 算法,以确定两个噪声协方差参数。

调参的具体过程为,以状态过程噪声协方差和观测过程噪声协方差为自变量,某时刻最优估计对应协方差为适应度,进行超参数调节,算法具体流程如图 6 所示。

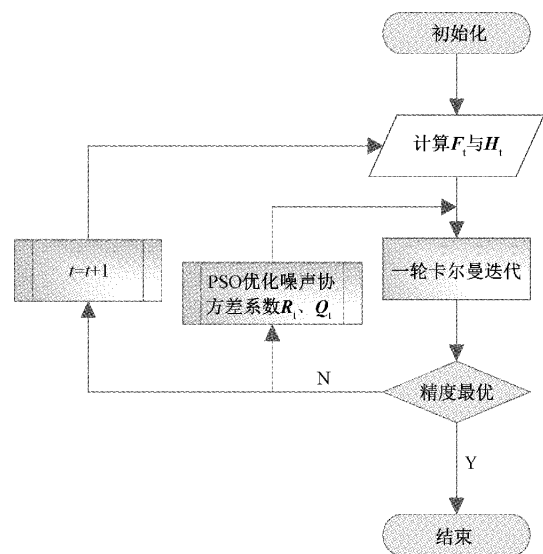


图 6 基于 PSO 调参的 KF 流程

2.2 凯塞窗 DFT 算法

采样数据经过 KF 之后,已显著地减少了噪声与硬件抖动造成的误差,但复杂配网环境产生的谐波成分仍然存在

在。故考虑在滤波之后,利用加凯塞窗的 DFT 算法^[22-23],以获取采样数据中的有效信息。

凯塞窗函数相较于三角窗函数、汉宁窗函数和海明窗函数,旁瓣显著衰减,有利于减少频谱泄露。待处理的信号为未知信号且含有多个频率分量时,使用凯塞窗可以很好地满足要求。并且凯塞窗函数参数可调,可以根据实际环境进行优化。本系统中,由于实测信号是未知的,且可能含有大量谐波分量,故考虑采用加凯塞窗进行 DFT 算法。具体算法原理如下。

在电力系统中,对含有谐波分量的原始信号进行处理,需保留其中的工频分量,理想的频域响应函数为 $H_d(e^{j\omega})$,则对应理想时域函数为 $h_d(n)$,则有关系式:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{jn\omega} d\omega \quad (7)$$

凯塞窗函数为:

$$\omega(n) = \frac{I_0[\beta \sqrt{1 - (\frac{2n}{N-1})^2}]}{I_0(\beta)}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (8)$$

式中: $I_0(\beta)$ 为零阶贝塞尔函数,参数可调。

利用凯塞窗函数对理想时域函数进行截断处理,表达式为:

$$h(n) = h_d(n)\omega(n) \quad (9)$$

频域响应为:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)e^{jn\omega} \quad (10)$$

式中: N 为窗函数的长度。

为保留原信号中的工频分量,考虑将通带边缘频率设为 40π 和 60π ,阻带边缘频率设为 20π 和 80π 。若保留频率分量不同,则通带边缘需要进行自适应调整。

但是,利用窗函数对原始信号进行截断后,信号幅值会发生一定程度的衰减,考虑根据幅值相等原则进行幅值恢复。幅值相等原则为,时域截断后,幅值恢复系数使加窗后峰值处的幅值与同样长度信号不加窗处理时峰值幅值相等,且不加窗处理时要保证原始信号是整周期截断的。

对形如 $x(t) = A\cos(2\pi ft)$ 的待处理信号做加凯塞窗 DFT 运算,求出峰值频率处对应的幅值,即为 A' ,再与待处理信号幅值 A 相比,得出幅值恢复系数。求得凯塞窗的幅值恢复系数约为 1.145。

3 系统验证与分析

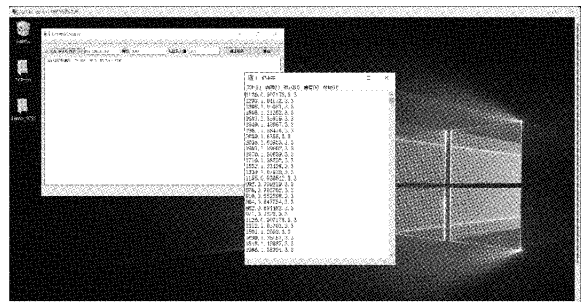
按照上文所述整体架构与具体硬件电路,搭建基于鸿蒙架构的互感器边云协同时监测系统,进行模拟实验,具体实物搭建情况如图 7 所示。

将小熊派开发板与接入 GPS 模组的 stm32c8t6 单片机相连,并接通电源,复位小熊派开发板,自动接入局域网,搭建好与云服务器的通信通道。



图 7 互感器边云协同时监测实验电路

用信号发生器模拟电子式互感器电流信号输出,输出一路峰峰值为 1 A、频率为 50 Hz 的正弦交流电信号。利用搭建好的系统进行采集、存储上云、边缘计算等一系列操作。ADC 采样率设为 1 kHz,由 GPS 秒脉冲触发每秒采样,每次采样 500 个点。每秒采样结束后通过 TCP 协议存储到云服务平台,并在最后附上时间戳,保证在进行多互感器监测时,上传数据具有同步性。云端接收采样数据结果如图 8 所示。



文件	幅值	相位
1498	1.20688	3.3
1684	1.35674	3.3
1842	1.48403	3.3
1962	1.58071	3.3
2030	1.6355	3.3
2034	1.63872	3.3
1980	1.59521	3.3
1871	1.5074	3.3
1720	1.38574	3.3
1540	1.24072	3.3
1344	1.08281	3.3
1157	0.932153	3.3
996	0.802441	3.3
877	0.706567	3.3
810	0.652586	3.3
803	0.646946	3.3
858	0.69126	3.3
2022/10/31 13:42		
1117	0.899927	3.3
1284	1.03447	3.3
1299	1.04656	3.3
1494	1.20366	3.3

图 8 云服务器存储数据结果

经过 TCP 协议实时接收数据采集模块上传数据,并自动存储为文本格式,便于后续处理。在边缘计算侧将数字采样数据恢复模拟波形,互感器输出原始波形如图 9 所示。

原始波形含有大量的噪声和谐波分量,无法直接获取互感器输出电流的幅值,继续在边缘计算模块进行滤波及

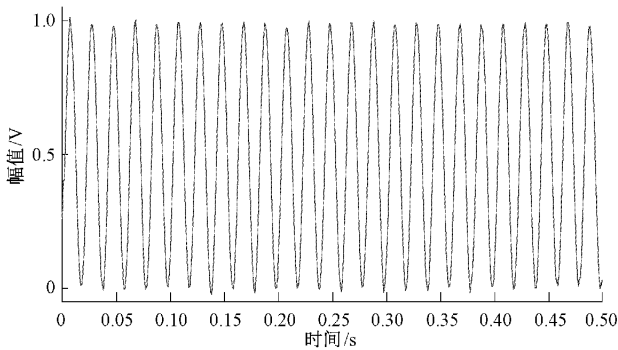


图 9 原始采样波形

误差修正,结果如图 10 所示。由图 10 的处理结果可知,在边缘计算侧,经过 KF 后,很好地消除了系统噪声与硬件误差,再经过加凯塞窗的 DFT 算法,有效地滤除了采样频率波动产生的谐波分量,获取互感器有效幅值。

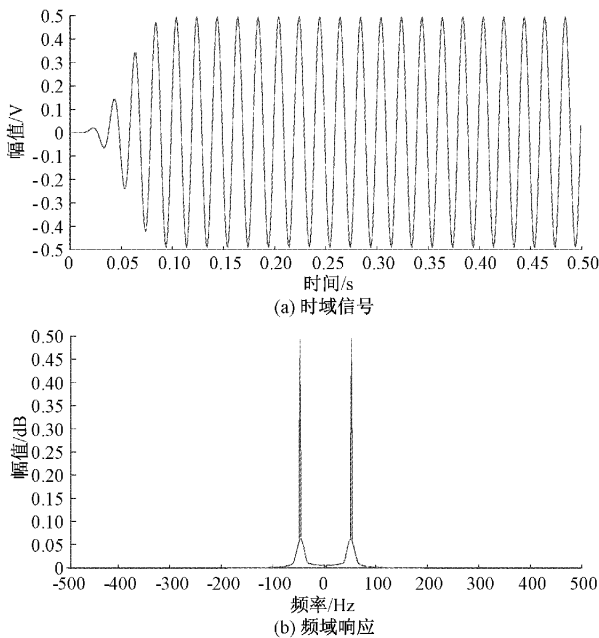


图 10 互感器实时监测结果

设定信号发生器输出不同峰峰值的电流信号,对本系统精确度进行进一步验证,结果如表 1 所示。

表 1 不同峰峰值信号下互感器监测结果

峰峰值/A	幅值误差/ $\pm\%$
1.0	0.14
1.5	0.12
2.0	0.09
2.5	0.14
3.3	0.12

由表 1 的实验结果可知,在无干扰的理想状态下,本系统监测任意电流信号,幅值误差均小于 0.75%,满足 0.2

的准确级要求。

设定信号发生器输出峰峰值为 1 A,但频率、信噪比、谐波不同的波形,继续对本系统的抗干扰性能进行验证,结果如表 2 所示。

表 2 干扰环境下互感器监测结果

信号	幅值误差/ $\pm\%$
工频信号加 40 dB 噪声	0.38
工频信号加 30 dB 噪声	0.42
工频信号加 15 dB 噪声	0.52
工频信号加 3 次谐波	0.36
工频信号加 5 次谐波	0.24
工频信号加 3 次谐波加 15 dB 噪声	0.61
55 Hz 信号加 3 次谐波	0.41
55 Hz 信号加 3 次谐波加 15 dB 噪声	0.74
60 Hz 基频加 15 dB 噪声	0.68
40 Hz 基频加 15 dB 噪声	0.59

由表 2 的实验结果可知,随着噪声信噪比的增加,互感器数据采集精度下降,但幅值误差仍然小于 0.75%,满足 0.2 的准确级要求。由于凯塞窗函数通带的设定,使得本系统在面对高次谐波时性能更有优势。不同基频分量叠加多次谐波与噪声时,互感器采集数据幅度误差均能满足 0.2 准确级要求。

若实际工程应用中,互感器实时监测幅值与额定值输出值发生较大偏差,则利用云平台下发蜂鸣器报警命令,触发现在蜂鸣器报警,提醒场站工作人员及时修理。具体操作如图 11 所示。



图 11 触发蜂鸣器报警

4 结 论

本文基于鸿蒙架构,设计了一套互感器边云协同实时监测系统。相较于已有互感监测技术,云服务器充足的存储空间满足互感器采样数据大量存储的要求;互感器边云协同方法允许多端共联,满足多互感器的实时同步监测的需求;数据采集结果存储于云服务器,允许工作人员随时、异地查看,提升了便利性;边缘计算侧的优化算法能很好地滤除采样过程中的谐波与噪声,使数据采集精度满足 0.2 准确级的要求;边云协同的工作方法,只需改变终端设

备,便可适用于其他电力系统场景,具有较强的可移植性。

参考文献

- [1] 宋伟,张家齐,张文杰,等. 基于 ViBe 的变电站智能监控技术研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(S2):36-41.
- [2] 蒋愈勇,习伟,刘立斌,等. 基于 IEC61850 的电子式互感器在线监测与校验系统设计[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(21):117-122.
- [3] LI Z, YU C, ABU-SIADA A, et al. An online correction system for electronic voltage transformers [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106611.
- [4] 袁玉宝,夏经德,刘欢庆,等. 一种考虑电流互感器饱和影响的变压器保护算法[J]. 国外电子测量技术,2019,38(7):106-111.
- [5] 谢完成,戴瑜兴. 一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(8):705-710.
- [6] 李雨田,刘婧一,吴尚阳,等. 高压互感器现场校验技术分析[J]. 吉林电力,2022,50(2):51-53.
- [7] 李雨田,刘婧一,于旭,等. 智能变电站电能计量装置现场校验技术研究[J]. 吉林电力,2021,49(4):38-41.
- [8] 张亚楠,张浩芳. 电子式电流互感器在线校验技术研究[J]. 电子技术与软件工程,2015(24):250.
- [9] 张志. 电子式电流互感器在线校验关键技术及相关理论研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [10] LI Z, LI C, LI Z, et al. A high accuracy on-line calibration method for electronic voltage transformers with digital output [J]. Automation Electric Power Syst 2015; 39(13): 163-167.
- [11] WANG T, ZHANG N, LIU L, et al. Research and application of electronic transformer fault diagnosis [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 74-79.
- [12] 赵双. 基于 GPS 授时的电流互感器在线校验技术研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2020.
- [13] 张松琛. 基于 FPGA 的互感器校验仪研究[J]. 机械工程与自动化,2020(5):169-170,173.
- [14] 华为鸿蒙系统:引领万物互联突破科技封锁[J]. 股市动态分析,2021(12):6-11.
- [15] 李冲. 鸿蒙系统:万物互联将成现实[J]. 华东科技,2021(7):14-15.
- [16] 吕建勋,孙玉成,赵鹏辉,等. 边云协同程控恒流源动态连续域模型辨识方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):90-97.
- [17] 郭德财,彭石林. 基于海思芯片与鸿蒙操作系统的智慧灌溉系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2022,22(3):11-15.
- [18] 吴道,纪国宜. 基于谐波小波包理论的轴承故障诊断[J]. 国外电子测量技术,2011,30(1):17-20.
- [19] 邢开亮,尹义蓉,黄永华,等. 提高网络授时精度的 Kalman 滤波方法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(4):949-954.
- [20] 于洪林,郭爱煌,罗巍. 一种基于 GPS 定位数据的测距方法[J]. 电子测量技术,2011,34(7):95-98.
- [21] 徐根祺,曹宁,李璐,等. 基于改进粒子群优化支持向量机的泥石流灾害预测模型[J]. 国外电子测量技术,2022,41(9):73-81.
- [22] 唐思豪,姚文轩,邱伟,等. 基于脉冲星信号的自适应同步采样方法 [J]. 仪器仪表学报,2021,42(10):121-128.
- [23] 李建国,康耀军,马尚鹏. ZPW2000 系列移频信号谐波干扰处理方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(3):184-193.

作者简介

徐顾钰,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制。

E-mail:1078388247@qq.com

李岩松(通信作者),教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、智能传感与透明电网。

E-mail:liyansong811@126.com

刘君,副教授,硕士,主要研究方向为电力系统分析与控制、智能传感与透明电网。

E-mail:liujunlishu@126.com