

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190136

# 特高压输电线路分布式故障诊断系统研制及其关键技术

周华良<sup>1,2,3</sup>, 宋斌<sup>1,2,3</sup>, 安林<sup>1,2</sup>, 饶丹<sup>1,2</sup>, 刁东宇<sup>1,2</sup>, 夏雨<sup>1,2,3</sup>

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;  
3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 分布式线路故障诊断系统作为特高压输电线路故障位置定位服务的关键产品, 对电力系统的安全、可靠与经济运行具有重要意义。结合实际系统的研制与应用, 提出了一种基于分布式安装的线路监测终端、监测运维中心站和移动终端应用服务于一体的新型故障诊断服务系统。阐述了产品与系统的关键实现方案, 并提出了基于监测终端的供能及其管理、高速采样及同步、时间同步及坐标定位、行波启动及识别处理技术, 基于监测运维中心站的双机冗余和数据安全隔离、测距和故障识别、GIS 信息与微气象服务技术以及移动终端 App 安全服务等自主关键技术。所述系统产品顺利通过国家权威检测机构组织的测试与认证并在西部特高压交流 1 000 kV 输电线路上网运行, 取得了稳定可靠运行的实际效果。

**关键词:** 特高压输电线路; 故障诊断系统; 故障定位; 线路监测终端; 在线监测运维中心

## Key technologies and development of distributed fault diagnosis system for EHV transmission line

ZHOU Hualiang<sup>1,2,3</sup>, SONG Bin<sup>1,2,3</sup>, AN Lin<sup>1,2</sup>, RAO Dan<sup>1,2</sup>, DIAO Dongyu<sup>1,2</sup>, XIA Yu<sup>1,2,3</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;  
2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, China;  
3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Distributed line fault diagnosis system, as the key product application of EHV transmission line fault location service, is of great significance to the safety, reliability and economic operation of power system. This paper combines the development and application of practical system, and presents a novel diagnostic service system based on distributed installation of transmission line measuring terminals, online monitoring and maintenance system and mobile terminal application service. The key implementation schemes of products and systems are described in this paper. In addition, some key technologies such as energy harvest and management, high-speed sampling and synchronization, time synchronization and coordinate positioning, traveling wave start-up and identification processing based on transmission line measuring terminal, dual servers hot backup redundancy and data security isolation, ranging algorithm and analysis, GIS information and micro-meteorological service technology based on online monitoring and maintenance system, and application security service of mobile terminal are proposed. The system products described in this paper have successfully passed the test and certification organized by the China Electric Power Research Institute, and run steadily and reliably on the EHV AC1000 kV transmission line in the western of China.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 524609170021).

**Key words:** extra high voltage (EHV) transmission line; power line faults diagnosis; fault location; transmission line measurements terminal; online monitoring and maintenance system

## 0 引言

随着中国电网建设的飞速发展, 特高压输电线

路投运或在建的总长度已超 3 万 km, 其电压等级高, 输电距离长, 跨越山区、河流、高铁、高速公路及重要电力线路的区段多, 其故障的性质、定位及诊断分析对电力系统的安全、可靠、经济运行具有重要意义。常规安装于变电站内的行波测距装置

虽然从原理上可以准确定位故障点位置,但在实际应用中,高阻故障等弱行波信号的有效提取、故障点反射波与对端母线反射波的有效识别和雷电干扰的有效辨识和定位等问题很大程度影响了其定位的准确性和实际效果<sup>[1-4]</sup>。

近年来业界提出了一种通过分布式安装监测终端,结合运维中心分析服务系统来综合诊断的新型技术路线,其相对于常规的站内测距装置,区间距离大为缩短,区间内的线路参数线性度大为增强,中心站功能实施也更加灵活,为大幅提高输电线路故障位置定位精度和诊断分析准确度提供了基础条件。目前国内外已有若干高等院校、科研院所和设备制造商进行了该领域解决方案的研究及产品制造,取得了一系列科研成果<sup>[5-6]</sup>,故障诊断效果有了明显进步,但在定位精度、系统实用性和可用性、运维友好性等方面仍待进一步提高。此外,针对监测终端装置严酷的野外运行环境,在其设备环境适应性、设备在线率与定位准确度、产品试验性能检测、人机交互友好性以及通信数据安全性等方面仍需继续深入研究与提升。

本文结合实际系统的研制与应用,提出了一种基于分布式安装的故障诊断监测终端、监测运维中心站和移动终端应用服务于一体的新型诊断服务系统。文中首先阐述了系统整体架构、线路监测终端和监测运维中心站的具体实现方案,并结合本系统中三个主要组成模块的具体技术实现特点,进一步详细阐述了本文的自主关键技术、特色测试验证项目和实际工程应用。

## 1 故障诊断系统整体研制方案

### 1.1 系统整体实现方案

本系统整体实现由分布式故障诊断监测终端、监测运维中心站和移动终端应用(Application, App)组成。用户可在中心站或通过移动终端 App 登录相应页面查看故障诊断和实时监测数据,故障诊断监测终端和中心站之间通过无线接入点(Access Point Name, APN)专网连接。

各个诊断监测终端直接安装在输电线路导线上,采用分布式布置,线路大约每隔 20~30 km 安装一套<sup>[6-7]</sup>。终端实时监测导线电流行波信号、工频电量及导线温度等参数,在输电线路故障或遭受雷击时自动记录高频和低频电流采样波形并经确认后通过无线通信链路将数据发送到监测运维中心站进行系统分析与处理。

监测运维中心站系统采用主备机双套冗余模式运行,部署在生产控制 I 区。移动终端 App 应用服

务器部署在生产控制 III 区,提供基于移动终端的相关应用服务。I 区和 III 区之间采用电力专用正反向隔离加密装置提供安全防护。系统整体结构如图 1 所示。

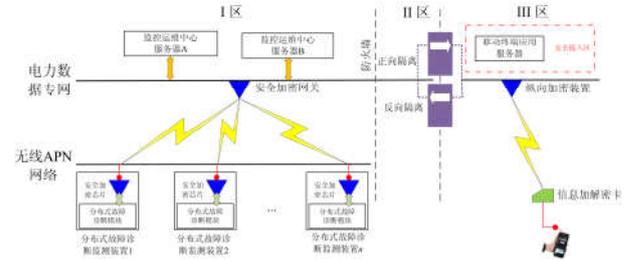


图 1 系统整体架构图

Fig. 1 System architecture

### 1.2 线路监测终端实现方案

在高压输电线路上 A/B/C 三相同一位置点处的导线上分别安装三个线路监测终端,全线路分布式、间隔性地安装多套设备<sup>[7]</sup>,其实现对输电线路故障时行波电流的实时采集、准确识别、启动录波以及数据的存储和转发上送功能。同时,同一位置点处的三相线路监测终端,可以通过相互之间的无线通信通道共享数据与启动信息,在线路各种故障情况下可实时启动三相同步录波并上送,为监测运维中心站故障数据分析提供完整信息。

线路监测终端主要由双 AD 同步高速采样单元、数据处理单元、数据存储单元、电源取能供能模块、高精度对时单元及无线通信模块等六个部分组成,其系统框图如图 2 所示。双 AD 同步高速采样单元是由两组完全独立的 Rogowski 线圈<sup>[8]</sup>、有源积分电路、高通滤波电路及高速 ADC 芯片构成。根据测量范围和精度的要求不同,分别为测量常态稳态电流值及弱故障行波的小量程采样回路以及用于测量暂态故障行波大电流的大量程采样回路。

SoC 数据处理单元集成了双核 ARM Cortex-A9

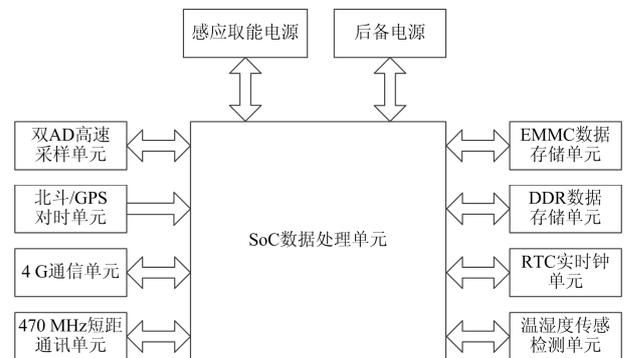


图 2 线路监测终端功能框图

Fig. 2 Architecture of line measuring terminal

处理器和 FPGA 协处理器的高性能 CPU 处理系统, 同步控制并采集双通道电流数据, 通过行波暂态电流阈值启动不同量程的数据录波并打包存储原始录波数据, 再通过无线通信单元<sup>[9]</sup>将故障电流数据传给运维监测中心进行分析处理。电源取能供能模块主要由取能一次单元、前端冲击保护电路、整流滤波电路、过压保护电路、DC-DC 模块和储能单元构成。其后备电源单元选用可充电的锂电池作为备用电源, 当输电线路负荷电流较低或者故障跳闸等原因导致线路停电时为监测终端装置的正常工作提供短时可靠的电源供电保障。GPS/北斗对时单元可以支持接收 GPS/北斗模块的对时信号、时间和地理信息报文至 SoC 核心处理单元, 并同步将故障发生的准确时刻和地理位置信息添加入相应的采样数据录波报文中。4G/GPRS 无线通信单元除了把终端设备运行状态信息及行波故障诊断数据等上送给运维监测中心外, 可同时接收监测中心下传的参数设置、程序在线升级等操作命令。470 MHz 无线短距通信单元负责三相导线监测终端之间的高速无线数据共享, 完成故障时同步启动三相录波。

### 1.3 监测运维中心实现方案

监测运维中心主要负责采集输电线路诊断终端的各种运行信息并加以存储、分析和展示, 是直接面向线路运维人员的主要操作界面, 主要完成数据处理与故障诊断、无线通信服务、诊断装置远程监测与维护等功能。系统功能采用面向服务的体系架构(Service Oriented Architecture, SOA)进行定制开发, 在通用服务功能的基础上, 设计并实现了前置处理、故障诊断、应用服务以及图形展示四大核心模块, 其系统框图如图 3 所示。

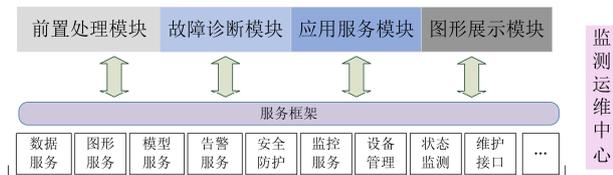


图 3 监测运维中心功能体系架构

Fig. 3 Architecture of monitoring and maintenance center

#### 1) 前置处理

支持通过无线方式与多个线路监测终端同时进行数据交互, 能够解析的报文包括监测数据、控制数据以及工况数据, 其中报文格式的定义符合标准 GB/T 35721-2017 和 Q/GDW 11660-2016 的要求。

#### 2) 故障诊断

当线路发生故障时, 故障诊断模块对产生的故障波形文件进行计算分析, 识别故障产生的时间、

位置、相别, 推理故障原因以及应对措施, 推送告警信号至实时告警窗, 帮助运行人员实时对线路运行状态进行分析诊断。

#### 3) 应用服务

在监测运维系统提供的基础支撑服务框架之上, 围绕分布式故障诊断功能需求进一步开发了如线路负荷统计与预测、终端设备在线监测等高级应用功能以及手机 App 应用服务, 功能涵盖了从服务器端到移动终端的多种应用场景。

#### 4) 图形展示

基于地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术, 能够在地理坐标图上实时展示线路测量终端位置、杆塔位置、线路走廊以及装置运行工况信息, 方便对装置进行参数设置和远程复位, 提高终端设备的运维效率以及管控能力。

## 2 线路监测终端设备关键技术

### 2.1 供能及其管理技术

常规输电线路监测终端的取能方式主要有太阳能供电、电流互感器取能、地线取能等, 但普遍存在着易受环境影响、感应取能电流工作范围窄、抗高压尖脉冲能力不强、供电系统整体可靠性偏低等不足<sup>[10]</sup>。

为提升电源供能系统的环境适应性和可靠性, 本文所述终端设备的供能系统采用取能转换模块与双温后备电池模块相协作的新方法, 供能系统组成如图 4 所示。

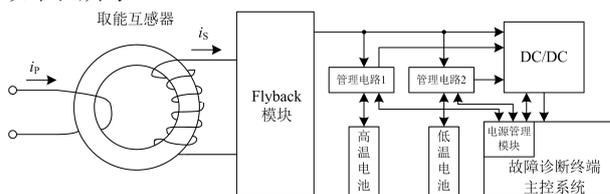


图 4 诊断终端设备供能系统框图

Fig. 4 Diagram of power supply system for fault diagnosis equipment

主要采用了以下三种关键技术。

1) 宽幅互感器取能技术: 取能互感器输出侧采用宽范围的反激变换器, 拓宽了取能电流工作范围, 增强了抗电流冲击能力, 提高了取能效率。

2) 双温后备电池互补技术: 后备电池系统采用高温电池和低温电池相组合, 供电管理系统根据外部环境温度变化自主选择电池进行储能或者供电, 大幅提高了电池使用寿命和后备供电的可靠性。

3) 电源管理技术: 诊断终端设备中通过对双温后备电池管理、电源状态监测等功能, 实现了对整

个供电系统的取能监测与管理。

## 2.2 高速采样同步技术

分布式故障定位的关键在于行波信号的有效提取以及行波波头起始时刻的准确判断<sup>[11-12]</sup>。由于输电线路电流变化范围较大,需选用相应的具有较高频率电流传感能力和快速暂态响应的传感器,以避免行波信号的失真。罗氏线圈的微分特性对输电线路故障电流的突变有很好的响应能力,因此本文采用了两套完全独立的罗氏线圈及相应的电流数据采集电路来实现,其原理框图如图5所示。SoC处理单元中的FPGA协处理器同时控制两路高速ADC芯片以10 MHz的速率进行故障电流数据的采集。同时充分利用FPGA的高性能数字锁相环及时钟电路处理能力,实现对GPS/北斗信号的定时和守时功能,提供精确到纳秒(ns)级的故障硬件时戳。

由于行波电流频率一般较高<sup>[13-14]</sup>,ADC采样单元设计采样率达到10 Mbps,因此在进行高速同步采样时,本文将行波电流启动判别逻辑放在SoC处理单元中的FPGA模块来实现,在逻辑单元中缓存故障前后录波原始数据,再通过SoC处理单元内部的高速通道上送至RAM中后交由ARM处理内核进行处理。

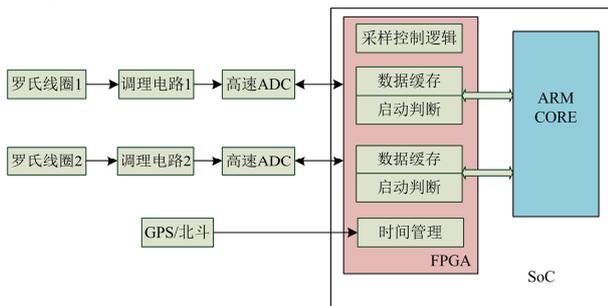


图5 同步采样原理框图

Fig. 5 Architecture of synchronous sampling principle

此外,为了降低系统整体电源功耗,在设计实现上本文采取了休眠和唤醒两种工作模式,除定时上送基本工况信息外,当终端装置未检测到行波电流时,系统工作在休眠模式下,此时系统通信单元的工作电源开关关闭。

## 2.3 时间同步及坐标定位技术

由于行波双端测距定位的精准度受测量终端的定时同步及守时性能影响较大,而对时及守时精度常受GPS/北斗授时模块自身晶元偏差的影响,此外由于高性能恒温晶振的功耗、体积和寿命等原因一般不宜在此场合直接采用,因此本文结合温补晶振短时间内稳定性好、双模授时模块1PPS没有频率偏移和累积误差的特点,提出了一种基于温补晶振

频率校准的改进对时守时算法。其主要的方法是,首先采用改进滑动平均滤波对授时模块输出1PPS进行预处理,抑制授时模块抖动;之后将预处理的授时模块1PPS和温补晶振进行比较,对两者间的相位差进行Kalman滤波,同时,结合晶振温变曲线的特性将滤波迭代获得的当前时刻相位差进行校准,从而输出本地1PPS用于运行过程中的实时同步。经分析和实测,本文所述的双端终端设备之间的对时偏差小于100 ns。

由于双模授时模块提供的地理信息亦受相对论效应、电离层延迟、对流层延迟、地球自转、卫星通道延迟误差等因素影响,为提高单点终端的定位精度,本文通过用偏微分和数值导数这两种方法进行以大地坐标、高斯坐标为参数的单点定位解算,验证了数值导数方法的可靠性,该方法可提升单点终端的经纬度地理坐标定位精度。

## 2.4 行波启动与识别技术

电力系统正常运行时,负荷变化相对缓慢<sup>[15]</sup>,可认为在相邻两个周波内,其电流瞬时值接近,其对应的电流变化率也比较小。而发生故障时,其幅值或电流一阶导数可能出现突变,因此可根据上一个周波对应相位的电流变化率,乘以一定系数后作为当前时刻高速数据采集的设定阈值,从而实现设定阈值对输入电流信号的动态跟踪。当电流变化超过设定值时,启动高速数据采集模块。

因此,本文为提高诊断监测终端行波测距的精度,将终端硬件采样系统行波电流信号的采样频率提高至10 MHz,由FPGA协处理器来控制双路高速ADC采样,同时采用增强型变步长自启动录波算法,提高FPGA行波自启动的有效性,一旦电流行波高频录波启动,FPGA将同时记录下高频采样启动时刻。另一方面,监测终端通过对电流信号的低频采样值、有效值及希尔伯特黄变换算法确定的扰动点时间窗对行波电流高频录波进行有效性对比判断,从而实现对真正故障的可靠识别。

同时为了保证故障诊断不同相别间的数据完整性,本系统首次采用了本地不同相别的故障诊断测量终端之间互传启动信号的信息机制,任何一相故障均通过无线模块快速(通信延时小于5 ms)启动另外两相装置同时记录数据。终端发送的启动信息中主要包含启动时刻(世纪秒及纳秒)、发送相别、接收相别等信息。启动数据交互框图如图6所示。

## 2.5 环境适应性技术

为适应架空线工作环境,本诊断终端结构上采用上、下分体形式,将上盖和下箱体锁紧后紧密包裹在导线上。终端将浮动双转轴铰链、等电位连接

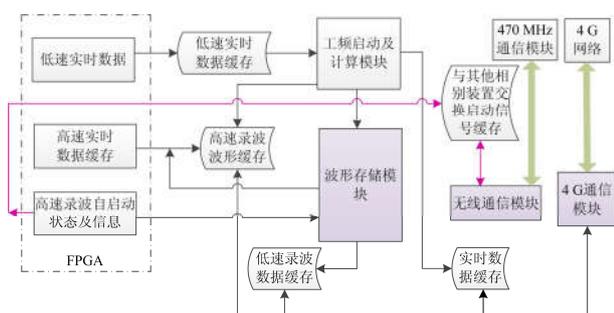


图6 启动数据交互框图

Fig. 6 Architecture of start-up data interaction

弹簧机构、射频天线模组等置于轻型高强度的镁铝合金压铸外壳内，整体外形类似胶囊设计，表面无锐边锐角，有效防止高压电晕放电。本终端箱体设计有高防护电气舱，用于布置主处理模块和核心元件。取能与测量线圈、射频天线、测温传感器的信号线穿过电气舱壁接入相应电气回路，在信号线贯穿位置处采用耐候胶密封进行防水处理。终端严格满足 GB/T 35721-2017 和 Q/GDW 11660-2016 关于 IP65 防护试验要求，能够适应各种恶劣的户外运行环境。在设计中终端及各零部件的固有频率避开 100 Hz 振动频点，避免终端受电磁力作用时产生共振，同时在取能线圈固定结构处增加橡胶垫和弹簧减震措施，降低壳体振幅，避免终端紧固件松动。

## 2.6 测试及检测专项方法

分布式诊断系统例行出厂试验项目包括有精度测试和功能测试，其中在精度测试项目中，工频电流与行波电流精度采用常规测试方法，即工频电流精度通过升流器在 20~1 500 A 范围内进行校验，行波电流精度采用 8/20  $\mu$ s 的标准雷电流冲击波形进行校准。

本文结合分布式诊断系统特性，在精度测试环节中增加了对时同步性能的本质测试和故障测距精度测试的改进项目。在分布式诊断终端设备上先预留有 1PPS 输出接口，通过此接口的输出信号对比标准时钟源 1PPS 信号在厂内校准微调分布式诊断终端的对时同步精度。厂内测试时，需要两个不同时刻的脉冲波形信号源，按故障诊断设备每 30 km 左右安装一套计算，两个脉冲波形的间隔在 0~100  $\mu$ s 区间内，因此本文采用了两组分布式诊断终端设备并联的方式实现，如图 7 所示，同时在其中一路脉冲电流上串入移相器改变脉冲波的相位，进而获得两组不同时刻的脉冲波形，用于测距精度的可靠校验。

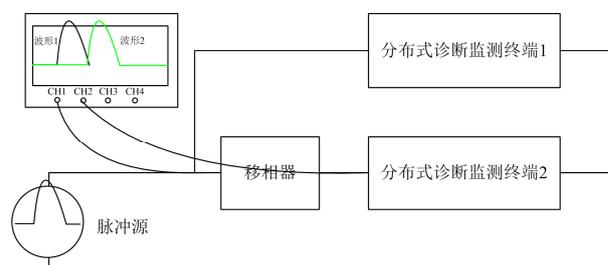


图7 故障测距精度测试框图

Fig. 7 Architecture of fault location accuracy test

## 3 监测运维中心关键技术

### 3.1 数据安全隔离技术

本系统中数据传输通道涉及电力有线专网以及无线公网，信息网络传输环境复杂，特别是移动终端的引入，使得监测运维中心信息安全防护形势愈加严峻。本系统在传统输电线路状态监测安全接入技术的基础上，新增加了独立的移动终端 App 应用服务器，并通过电力专用的安全隔离装置与监测运维双服务器实现了数据安全隔离，降低其对监测运维主备服务器构成的数据安全风险系数。移动终端 App 服务器与移动客户端之间通过纵向加密装置以及嵌入式加解密卡实现信息的安全传输。

如前图 2 所示：安全加密芯片与分布式终端整机有机集成，最大化利用终端装置内部空间，低功耗、高可靠，信息传输通过无线 APN 专网与监测运维中心服务器进行交互；移动终端应用服务器与监测运维中心服务器之间采用正反向隔离装置物理隔离防护；移动端和移动端服务器采用纵向加密装置和信息加解密卡进行安全加密，提高信息传输可靠性。

### 3.2 测距与故障识别技术

本系统将输电线路分割成若干小段，充分利用故障行波到达故障区段两端时暂态电流行波极性相反以及衰减和变形因素影响较小的特点<sup>[16]</sup>，采用小波变换可准确定位波头到达时刻，根据行波波头到达终端的时差<sup>[17-18]</sup>进一步将故障定位到杆塔之间，因此双端测距方法的精度比较高<sup>[18-20]</sup>。当故障发生在变电站与最近的分布式故障诊断装置之间或双端测距不具备条件时，故障诊断系统将采用单端测距原理，通过适当的数据处理算法，反射波头位置定位的误差可控制在允许范围内。

针对户外雷击与非雷击故障<sup>[20-21]</sup>，本系统充分利用雷电流剧烈冲击放电过程中雷电流的行波波尾通常比线路故障行波的波尾明显要小的特点来区分雷击与非雷击故障。雷电击中绝缘子串但未击穿之前，放电电流将在输电线路中感应出电流行波，其

行波幅值通常较小且与绝缘子串击穿后的反击雷电流行波极性刚好相反,而绕击雷却没有这个现象的特征,依此来有效地识别绕击雷与反击雷。

直接安装于户外的诊断监测终端工作环境恶劣,采样数据易包含较强的噪声<sup>[21]</sup>,这给行波波头定位及高阻故障等弱故障的检出、测距精度都带来严重影响,此外雷击诊断中需要判断波头及波尾的宽度,在强噪声下可能会造成较大误差。为克服现有技术的不足,本项目采用了一种基于离散傅氏变换的快速算法(Fast Fourier Transformation, FFT)及数学形态法的信号去噪方法。即首先对信号采样序列进行 FFT 变换,根据 FFT 变换的结果计算出功率谱,按照功率谱能量占比和设定的阈值反推出信号频谱集中区域的宽度(即频域的有效截断长度),根据有效截断长度在频域进行 FFT 逆变换求取经过 FFT 初步降噪后的信号数据序列 A;对得到的数据序列 A 进一步采用数学形态学滤波运算,先进行闭运算(膨胀后腐蚀)再进行开运算(腐蚀后膨胀)得到数据序列 B,之后再对数据序列 A 进行开运算(腐蚀后膨胀)接着进行闭运算(膨胀后腐蚀)得到数据序列 C,最后对数据序列 B 和 C 做中值运算得到滤波后的最终序列,信噪比得到显著提高。

### 3.3 GIS 信息与微气象服务技术

由于输电线路分布式终端设备常年暴露在野外环境中,其建设运营、健康状态受环境气象因素影响很大,特别是在终端、线路附近的微气象信息对线路及终端状态监测及寿命评估比较重要。通过在输电线路测量终端 GIS 图上显示降雨、风向、风速、温度、气压、湿度等微气象信息,可以直观地表达各种气象要素对输电线路和终端的影响程度和范围。在此基础上,本系统进一步提供历史数据查询功能,展示历史气象信息对输电线路的影响,为深度分析历史气象数据与输电线路安全运行的相互作用关系提供了基础平台。其功能结构如图 8 所示。

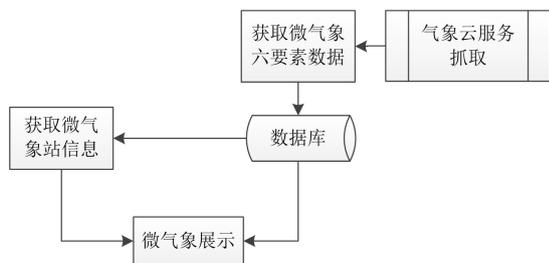


图 8 微气象信息处理工作流程

Fig. 8 Workflow of micro-meteorological information processing

系统通过分布式终端提供的经纬度地理位置信息,周期性地从气象云服务公网上抓取微气象六要

素信息,储存在数据库相关表结构中,形成微气象展示数据源,结合微气象站点信息,在输电线路终端 GIS 图上对其进行展示和查询。同时,在输电线路发生故障时,本系统自动收集相关联的分布式终端附近的微气象信息,结合行波定位位置信息来提升线路诊断终端定位以及外部环境监测的协同分析能力。

### 3.4 移动终端 App 安全应用技术

本系统中分布式故障诊断信息通过移动公网安全发布到认证用户,用户能够随时随地查阅杆塔、线路、分布式故障终端等信息。当线路故障时,将故障信息实时推送到用户手机客户端,信息内容包括有故障点地理位置、故障发生时间、故障线路名称、故障类型、故障相别、故障波形以及故障地故障时刻的天气状态等信息。

与传统业务的短信通知方式比较,本系统具有信息安全可靠推送、信息量全面丰富的优势。通过后台消息的极光推送(JPush)机制,将故障消息发送到手机客户端通知栏,当后台判断推送失败,则启动短信方式通知,采取此双重通知方式实现了通知的可靠传达。本系统采用了混合模式移动应用(Hybrid App)的方式,兼顾用户的交互体验感、数据响应的及时和跨平台开发的应用优势。手机客户端 App 软件还具备输电线杆塔终端 GIS 展示、故障可视化定位、故障波形展示等丰富的界面功能,同时通过超文本传输安全协议(Hyper Text Transfer Protocol over Secure Socket Layer, HTTPS)协议可实时请求各种工况信息和历史数据,动态地展示终端实时数据。

在信息安全方面<sup>[22]</sup>,除了采用多服务器方案隔离内外网数据传输外,移动终端 App 应用服务器采用了用户安全认证机制、用户访问权限管理、通信数据 AES 加密、各省服务器物理隔离等安全机制,保证了数据访问的安全性。

## 4 结论

本系统已通过权威检测机构的完整检测与认证,其内容涵盖故障诊断终端的性能试验、功能试验以及监测运维中心站的各项功能试验等。三相诊断终端装置之间的时间一致性最大偏差小于 0.1  $\mu\text{s}$ ,测距误差小于 100 m;监测运维中心站数据接入稳定,响应迅速并能够可靠识别雷击故障和非雷击故障类型。依本项目研制的输电线路分布式故障诊断终端系统已在国内交流 1 000 kV 特高压输电线路挂网运行,装置投运后,通信正常,系统稳定可靠运行。

随着特高压输电线路的广泛建设, 线路沿线环境工况日趋复杂, 对线路运维设备的智能化提出了越来越高的要求, 本项目后续将在导线舞动、微风振动、风偏、温度及导线动态增容等方面进一步开展相关的研究与应用工作。

### 参考文献

- [1] 沈虹. 分布式输电线路故障精确定位及诊断系统研究与应用[J]. 机电信息, 2014(18): 134-136.  
SHEN Hong. Research and application of distributed fault location and diagnosis system for transmission lines[J]. Mechanical and Electrical Information, 2014(18): 134-136.
- [2] 黄志都. 基于分布式行波测距的输电线路故障诊断技术研究与应用[J]. 广西电力, 2013, 36(6): 1-4.  
HUANG Zhidou. Research and application of transmission line fault diagnosis technology based on distributed traveling wave location[J]. Guangxi Electric Power, 2013, 36(6): 1-4.
- [3] 马超然. 输电线路行波故障定位技术发展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(24): 11-15, 20.  
MA Chaoran. Prospect and development of transmission line fault location using travelling wave[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(24): 11-15, 20.
- [4] 姚磊, 于立叁, 施翔, 等. 分布式智能故障诊断系统在架空输电线路上的应用研究[J]. 电气应用, 2015(增刊2): 452-456.  
YAO Lei, YU Lisan, SHI Xiang, et al. Application of distributed intelligent fault dispute system in overhead transmission lines[J]. Electrotechnical Application, 2015(S2): 452-456.
- [5] 赵增华, 石高涛, 韩双立, 等. 基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 80-84.  
ZHAO Zenghua, SHI Gaotao, HAN Shuangli, et al. A heterogeneous wireless sensor network based remote district high-voltage transmission line on-line monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 80-84.
- [6] 张斯淇, 李永丽, 陈晓龙. 非全程同杆并架双回输电线路非同步数据故障测距算法[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(7): 87-93.  
ZHANG Siqi, LI Yongli, CHEN Xiaolong. Asynchronous fault location algorithm for non-full-length double-circuit transmission lines[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(7): 87-93.
- [7] 邵庆祝. 分布式输电线路故障定位装置的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.  
SHAO Qingzhu. Design and implementation of distributed fault location device for transmission lines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [8] 金丹. 输电线路雷电流测量用 Rogowski 线圈低频失真校正技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 96-100.  
JIN Dan. Low-frequency distortion correction technology of Rogowski Coil applied to lightning current measurement on transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 96-100.
- [9] 程远, 韦磊, 焦群. 一种用于输电线路状态监测的低功耗通信技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 69-73.  
CHENG Yuan, WEI Lei, JIAO Qun. A low power communication technology for power line status surveillance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 69-73.
- [10] 李先志, 杜林, 陈伟根, 等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 76-80.  
LI Xianzhi, DU Lin, CHEN Weigen, et al. A novel scheme of draw out power supply utilized in transmission line state monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 76-80.
- [11] 苏彪, 于建友, 郑益慧, 等. 基于分布式检测的多分支输电线路故障精确定位技术[J]. 电气自动化, 2017, 39(3): 35-38.  
SU Biao, YU Jianyou, ZHENG Yihui, et al. Accurate fault location technology for multi-branch transmission lines based on distributed detection[J]. Power System & Automation, 2017, 39(3): 35-38.
- [12] VLADIMIR T, ZORAN M R, GARY P. Flexible synchronized measurement technology-based fault locator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 866-873.
- [13] 黄荣辉, 李勋, 张宏钊, 等. 线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 73-81.  
HUANG Ronghui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. Research on combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line and influencing factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 73-81.
- [14] 程宏波, 高雅琦, 王勋, 等. 基于故障类型识别的输电线路自适应测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 131-138.  
CHENG Hongbo, GAO Yaqi, WANG Xun, et al. Adaptive fault location method for transmission line based on fault type recognition[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 131-138.
- [15] 范新桥, 朱永利. 基于双端行波原理的多端输电线路

- 故障定位新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 261-269.
- FAN Xinqiao, ZHU Yongli. A novel fault location scheme for multi-terminal transmission lines based on principle of double-ended traveling wave[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 261-269.
- [16] 刘亚东. 输电线路分布式故障测距理论与关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- LIU Yadong. Distributed fault location theory and the key technologies for transmission lines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [17] MEHRDAD M, MEHDI E A. A new fault location technique in smart distribution networks using synchronized/nonsynchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1358-1368.
- [18] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [19] FELIPE V L, KARICUS M D, KLEDER M S, et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 873-880.
- [20] 高艳丰. 基于电流行波的输电线路雷击识别和故障定位方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- GAO Yanfeng. Study on method of lightning strike identification and fault location of transmission lines based on current traveling waves[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [21] 周会峰, 曾祥君, 邓丰, 等. 输电线路故障行波网络定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 93-99.
- ZHOU Hui Feng, ZENG Xiangjun, DENG Feng, et al. A new network-based algorithm for transmission line fault location with traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 93-99.
- [22] 叶水勇. 基于回溯技术的全景信息安全防护探究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(7): 34-39.
- YE Shuiyong. A panoramic information security protection study based on backtracking technology[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(7): 34-39.

---

收稿日期: 2019-01-29

作者简介:

周华良(1980—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力二次设备保护控制共性平台技术; E-mail: zhouhualiang@sgepri.sgcc.com.cn

宋斌(1968—), 男, 硕士研究生, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: songbin@sgepri.sgcc.com.cn

安林(1974—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: anlin@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)