

基于北斗定位的便携式电缆局部放电检测系统

于莉莉^{1†}, 吴庆², 王志刚², 马胜¹, 张永欣¹

(1. 国网思极位置服务有限公司, 北京 102200; 2. 国网信息通信产业集团有限公司, 北京 100053)

摘 要:我国电力发展较快, 电缆使用时间较长, 导致故障率和用电隐患较多, 所以设计了一个基于北斗定位的便携式电缆局部放电检测系统。本系统使用长短期记忆网络算法(Long Short-term Memory, LSTM)来检测电缆的局部放电, 平均功率越大, 表示紫外光越强, 就可推出局部放电的强度大小。在此基础上进一步加入算法反向向量, 对算法进行改进, 改进后的 BiLSTM 网络的隐含层更具特殊性。另外本系统首次引入北斗定位系统, 实现对电缆非法放电区域进行精确定位的目标。采取 OPC-UA 技术实现对数据的统一传输和反馈, 该研究缓解了系统主机的计算压力。通过实验, 该系统技术核算的数据, 误差率在可接受范围内, 该研究为其他技术研究奠定基础。

关键词:放电检测; LSTM 算法; OPC-UA 技术; 北斗定位系统

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Portable Cable Partial Discharge Detection System Based on Beidou Positioning

YU Lili^{1†}, WU Qing², WANG Zhigang², MA Sheng¹, ZHANG Yongxin¹

(1. State Grid Location Based Service Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: Due to the rapid development of electric power in China and the long service life of cables, there are many failure rates and hidden dangers of power consumption. Therefore, this research designs a portable cable partial discharge detection system based on Beidou positioning. The system uses long short-term memory (LSTM) algorithm to detect partial discharge of cables. The higher the average power is, the stronger the UV light is, and the strength of partial discharge can be deduced. On this basis, an algorithm reverse vector is further added to improve the algorithm. The improved BiLSTM network has a more specific hidden layer. In addition, this system introduces the Beidou positioning system for the first time, achieve precise positioning of illegal cable discharge areas. Adopting OPC-UA technology to achieve unified data transmission and feedback alleviates the computational pressure on the system host. Through experiments, it was found that the error rate of the system's technical accounting data is within an acceptable range, laying the foundation for other technical research.

Key words: discharge detection; LSTM algorithm; OPC-UA technology; Beidou positioning system

随着我国电网系统的不断发展, 电力电缆的使用越来越广泛, 但是电缆的使用时间过长, 会导致故障率的增加, 用电隐患较多, 所以构建一个具有精确

定位能力的电缆局部放电检测系统迫在眉睫^[1]。

为此, 文献[2]提出利用 RS、GPS 定位和无人机组成一个三维体结构来实现对电网系统电缆局

部放电检测,这种方法能够全面系统地得到完善的放电数据,也能达到实时监测的目的,但是利用的技术造价较高,设备比较昂贵。文献[3]提出利用物联网来解决放电数据源传输的问题,此方案虽然能够全面快速地达到数据传输的效果,但是在学会用过程中,安全性既不稳定,容易造成数据丢失等情况,不利于系统的稳定和安全。文献[4]提出了一种用于线路脉冲检测的多相振荡模型,通过基于晶格准连续模型的分岔分析,设计振荡频率偏差准则,使用时域有限差分方法检测电流频率中的多相振荡,实现线路检测。但该方法受脉冲信号噪声影响较大,局部放电信号识别准确度不高。

针对上述技术不足,设计了一个基于北斗定位的便携式电缆局部放电检测系统,本系统使用长短期记忆网络算法(Long Short-term Memory, LSTM)来检测电缆的局部放电,平均功率越大,表示紫外光越强,所以就可推出局部放电的强度大小。在此基础上进一步利用反向 LSTM 向量,对算法进行改进,改进后的 BiLSTM 网络的隐含层更具特殊性,能够同时将历史信息与检测信息相结合。另外本系统首次引入北斗定位系统^[5-7],将紫外传感器与北斗定位系统结合,实现对电缆非法放电区域进行精确定位的目标。另外,在本系统中,加入了 5G 移动通信技术,加速对数据的传输和处理,保证电网系统的平稳运行,实现对局部放电的实时检测。

1 基于 LSTM 算法的局部放电检测分析模型设计

在本算法中,采用振荡电压法搭建局部放电检测模型,如图 1 所示。

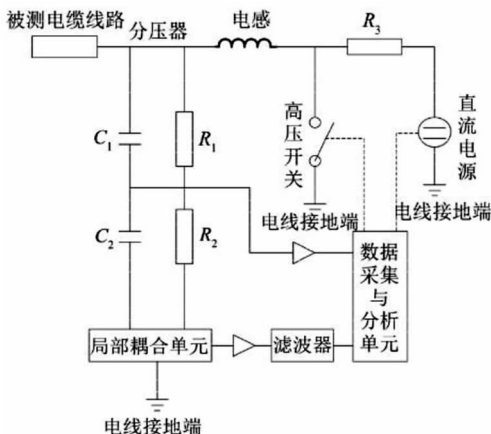


图 1 局部放电检测模型图

图 1 中,直流电源通过增加电压到固定值,完成被测端的充电,然后闭合高压开关,电感和被测端电缆的等效电容发生谐振,产生一个振荡回路。被测目标电缆会出现振荡电压,触发线路的故障点,从而检测出局部放电的情况。最后利用北斗定位系统进行定位。

依据振荡回路计算电缆线路额外的电压和电流,函数表达式是:

$$\begin{cases} U_c = Ne^{-\delta t} \sin(\lambda t + \theta) \\ I_c = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \lambda t \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, U_c 、 I_c 是电缆线路的额外电压和电流; N 是辅助计算参数; δ 是振荡影响因子; R 是电路总电阻; L 是电感; t 是振荡持续时间; λ 、 θ 是振荡波的角速度和初相位。

在高压电缆线路测试中,使用振荡波进行加压处理,使其波形和频率最大化近似工频,延迟小于 300 ms,防止振荡波额外电压对电缆造成损坏。

本系统进一步将分压器高压和低压臂对用的时间常量设置相同,有利于研究的数据的真实。保持 $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 。分压比会一直在一个固定的量,函数表达式是:

$$K = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

式(2)中, K 是分压比; C_1 、 C_2 是高压臂和低压臂的电容; R_1 、 R_2 分别是高压臂和低压臂的电阻。

以上是搭建高压电缆振荡波放电检测框架的步骤,进一步概括了振荡波对电缆增加额外的电压、电流、分压比的数值,为电缆的放电检测提供了数据支撑。

1.1 振荡波局部放电信号特征提取

电缆线路在该模型放电时,不仅存在局部放电信号,还存在电缆线路运行信号、干扰噪声等,且信号整体数量较大,所以检测难度较大。在本研究中,采取小波包分解算法提取典型放电信号特征,为后续分析做准备。据图步骤如下。

1. 采取 db4 小波对典型局部放电信号进行分解,获取 16 个频带特征信号,表示为 S_{4j} ($j = 1, 2, 3, 4$)。

2. 以上述步骤获取的频带特征信号为基础,对局部能量和熵进行计算,表达式是:

$$\begin{cases} E_{4j} = \int S_{4j}(t)^2 dt \\ W_{4j} = - \sum_i s_i^2 \log(s_i^2) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, E_{A_j} 、 W_{A_j} 分别是该模型的局部能量和熵; s_i 是频带特征信号正交的第 i 个系数。

3. 将上个步骤的计算结果为依据, 构造特征序列, 记作 E_j 、 W_j , 将量数据作为局部放电信号特征向量。

4. 将 E_j 、 W_j 进行归一化处理, 削减噪声对特征信号的提取。进一步提取局部放电信号的特征向量能量谱和熵谱。

1.2 振荡局部放电信号检测

本方案采用 LSTM 网络算法检测振荡局部放电信号。该算法扩大了算法的适应性, 扩大了算法的应用范围, 算法结构示意图如图 2 所示。

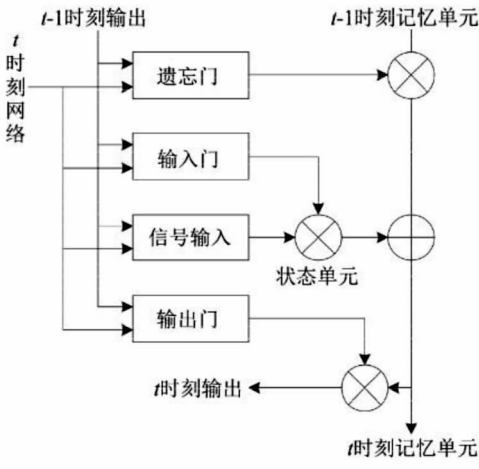


图 2 LSTM 算法示意图

如图 2 所示, 电缆检测信号作为算法的输入值, 经过遗忘门和输入门的计算, 控制检测信号传递的大小和速度^[8], 进一步提升检测效率。表达式是:

$$\begin{cases} f_i = \sigma(\mathbf{w}_f h_{i-1} + \mathbf{u}_f x_i + b_f) \\ q_i = \sigma(\mathbf{w}_q h_{i-1} + \mathbf{u}_q x_i + b_q) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, f_i 、 q_i 分别是遗忘门和输入门的输出值; σ 是 sigmoid 激活函数; h_{i-1} 是 $t-1$ 时刻算法单元的输出值; x_i 是所在时刻的输入值; $\mathbf{w}_f$ 、 $\mathbf{u}_f$ 是遗忘门中 h_{i-1} 、 x_i 的权重矩阵; $\mathbf{w}_q$ 、 $\mathbf{u}_q$ 是输入门中 h_{i-1} 、 x_i 的权重矩阵; b_f 、 b_q 是偏置项。

将局部放电特征向量 E_j 、 W_j 以状态单元输入到该算法中, 然后获取两向量和输入输出门的特征向量的距离, 用 d_{ij} 表示。如果 d_{ij} 在 0 到 1 之间, 则两个特征向量更近似, 对此数据保存。否则将数据删除。

然后将保存的特征向量初始化到信号形式, 从输出门输出, 此过程就是局部放电检测的过程。但是局部放电信号存在噪声干扰, 所以采取傅里叶变

换来进行过滤和消除, 保证数据的正确。函数表达式是:

$$Y_t^i = Y_t \times \text{STFT}(t) = \frac{Y_t}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y(\theta) h(\omega - \theta) d\theta \quad (5)$$

式(5)中, Y_t^i 是处理噪声后的局部放电信号; $\text{STFT}(t)$ 是傅里叶变换函数; $h(\omega - \theta)$ 表示时域有限宽的信号。

上述计算过程实现了振荡波局部放电信号的检测和处理, 给后续的线路定位提供真实的信号基础。

2 改进后的 LSTM 算法

改进模型如图 3 所示。

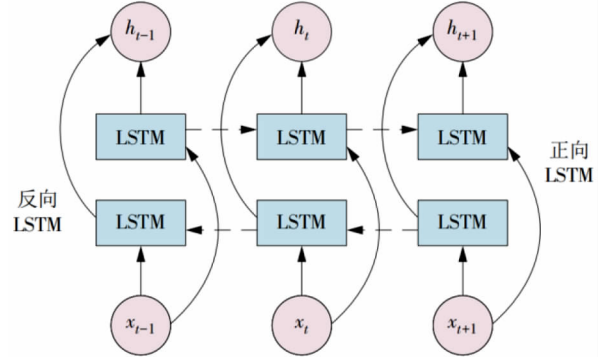


图 3 改进模型图

由图 3 可知, 改进后的 LSTM 网络由正向 LSTM 和反向的 LSTM 网络组成, 改进后的 BiLSTM 网络的隐含层更具特殊性, 能够同时将历史信息与检测信息相结合, 进一步容纳局部放电的历史数据^[9]。和改进前相比, BiLSTM 能够更有效地获取输入数据双线的传输信息, 大幅提高了预测模型对输入数据的特征表达能力。此模型的隐含层状态就是将正向隐含层状态和反向隐含层状态组合。计算公式为:

$$\vec{h}_t = \text{LSTM}(h_{t-1}, x_t) \quad (6)$$

式(6)中, $\vec{h}_t$ 是正向 LSTM 隐含层的输出; x_t 是输入的数据。

$$\overleftarrow{h}_t = \text{LSTM}(h_{t+1}, x_t) \quad (7)$$

式(7)中, $\overleftarrow{h}_t$ 是反向 LSTM 的隐含层输出。

$$h_t = \vec{\alpha} \vec{h}_t + \overleftarrow{\beta} \overleftarrow{h}_t \quad (8)$$

式(8)中, α 、 β 是常系数, 表示量隐含层的权重。改进前与改进后算法检测正确率对比如图 4

所示。

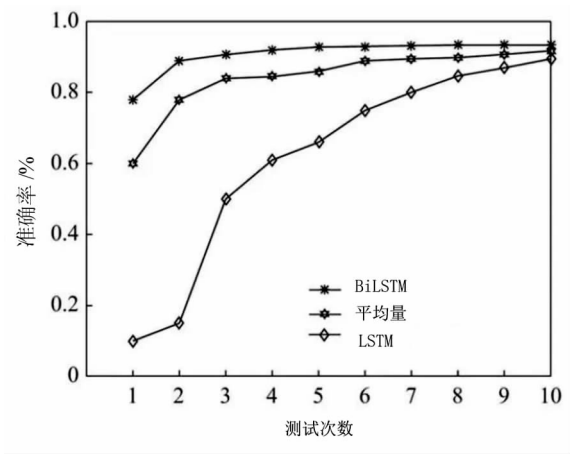


图 4 正确率对比图

由图 4 可知,改进后的算法正确率稳定且在 80%以上,对比本系统局部放电的检测效率有很大提升,进一步提高了检测效率,缓解了系统压力。

2.1 局部放电检测评判标准

局部放电信号检测测试中,局部放电信号识别准确度的判断指标计算公式是:

LQ= (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN) (9)

式(9)中,TP、TN 是准确识别的局部放电和无放电信号;FP、FN 是错误判断的局部放电和无放电信号。LQ 越大表示判断的正确度越高。

3 北斗定位系统设计

北斗定位系统包括采集单元,用户单元、传输单元、监控模块等。系统框图如图 5 所示。

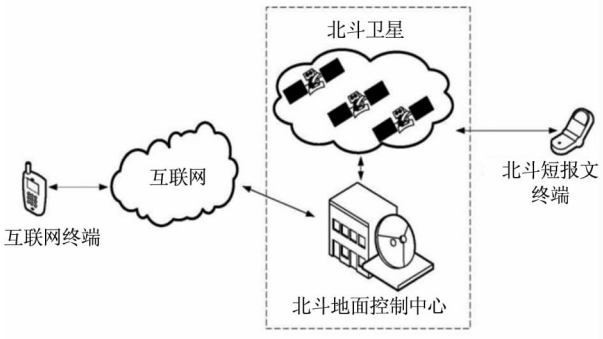


图 5 北斗定位系统框图

由图 5 可知,北斗定位系统实现了对无线通信网络的覆盖,尤其是北斗短报文通信的制定,克服了众多因环境原因造成的通信盲区的问题。对研究局部放电的检测提供了精确的定位和快速的信

息传输^[10]。

3.1 北斗定位系统的实施

北斗定位系统在本研究的功能框图如图 6 所示。

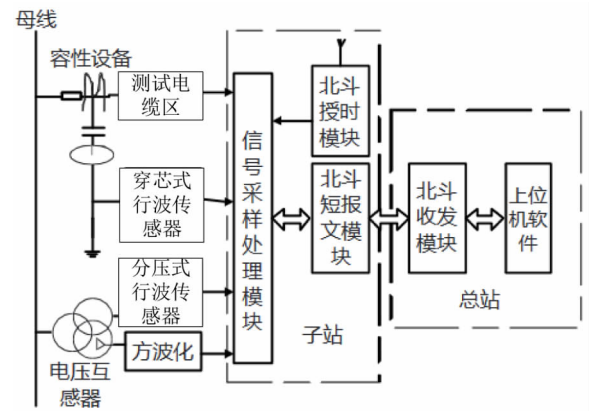


图 6 系统融合示意图

图 6 中,各传感器将检测的信号分解成两路信号,一路是脉冲信息,一路是行波信息。所有信息都经过鑫海采用处理,采样中心将电缆局部放电区出现时间记录,检测信息通过北斗短信通信发送到电力系统主机,然后通过双端法计算距离,以便于定位实施^[11]。

信息采集模块:信号处理主要由 FPGA、ARM、DSP 技术构成,信号首先由 FPGA 分析,采集模块收到的二次信号转化成多路模数转换集成电路端口可容纳的信号,对北斗的电文进行解调,然后和内部通信协议进行对接,进一步转换成数字信号传递到 ARM 中,最后传递到电力监控部门。

解调调制模块:北斗采用扩频调制,所以电力部门接受的实际信号较弱,采用过方法、变频、滤波后才能获取有用信息,进一步实现对北斗信号的变频和信号增益控制。北斗相关传输数据如表 1 所示。

表 1 北斗传输数据	
传输类型	参数
北斗—地面最小功率	-157.6 dBW
载波频率	2491.75 MHz
数据带宽	8.16 MHz
接收机灵敏度	-148 dBW

具体定位实施步骤如图 7 所示。由图 7 可知,北斗系统依照码跟踪和载波跟踪计算出原始振荡波和反射振荡的时间差,结合数据传输速度,能够实现对局部放电区域的准确定位。将局部放电信号 Y_i提取初始化振荡波和反射振荡达到测试端的时间,

用 t_1 、 t_2 表示。局部放电定位的具体计算公式是：

$$P=1-\frac{\Delta t\times v_e}{2}$$

(10)

式(10)中, P 是北斗系统定位的局部放电区域和测试接收端的距离, v_e 是振荡比在电缆线路中的传播速度。从而实现站与放电区的通信定位距离,保证电力输送的安全。

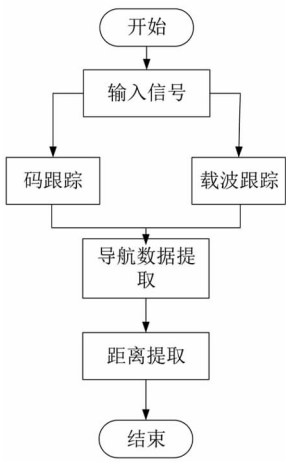


图 7 北斗实施逻辑图

3.2 北斗 OPC-UA 通信模型设计

由于北斗和本检测系统通信传输通道复杂,为了保证数据的正常传输,本系统融合了 OPC-UA 通信技术,OPC-UA 通信模型如图 8 所示。

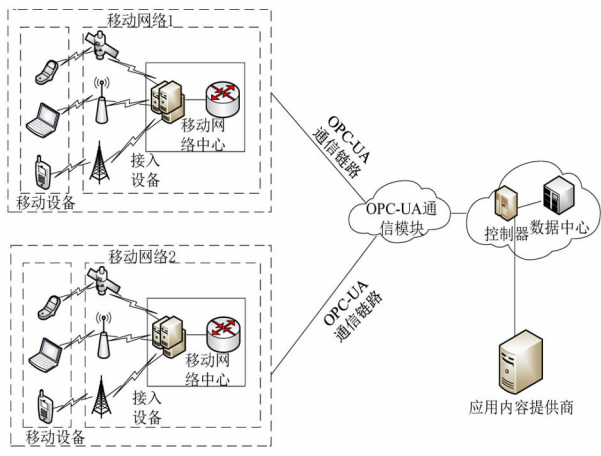


图 8 OPC-UA 多源异构通信模型图

OPC-UA 不被制造商所包含,本研究能够采用该技术通信。OPC-UA 增加了诸如平台独立、可伸缩性、高可用性和因特网服务等重要特性。通信模块功能如图 9 所示。

OPC-UA 通信模块是一个可靠、加密性好且具备多源传输的通信技术^[12]。OPC-UA 使用一种优化的基于 TCP 的二进制协议完成数据交换;另外支持 Web 服务和 HTTP。集成的安保机制确保

了通过因特网也能安全通信,独立于电力企业和北斗平台的工业通信的数据交互规范。

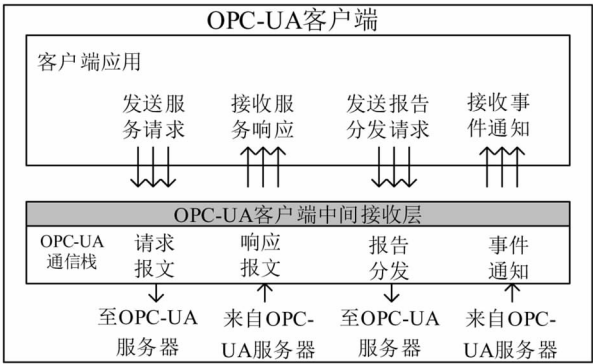


图 9 OPC-UA 通信模块功能示意图

4 实验流程与结果

本实验通信网络传输速度为 70 MB/s。现场实验环境测试实验环境为:半双工总线采用 RS485 型,实验系统选择 Windows 10 专业版,CPU 采用 Intel i8 9600KF,微机配置为 64+256 G 内存,32 位,MSP430 芯片仿真采用 Proteus 8.6 仿真,误差仿真则使用 MATLAB 2019 版本实验室中根据实验记录报表,经过后续分类汇总,实验环境如图 10 所示。



图 10 试验环境

在试验过程中,通过测量装置电压和电流的测量,可以推算出本系统的稳定性,将实时推算的数据通过图 11 表示。

在图 11 中,外圈表示测试时间,竖线代表测量数值。本系统可以同时记录多个类型的用户参数,体现出本系统有较高的工作效率。电缆线路基本参数数据如表 2 所示。

依据上述参数,选取被测电缆参数,如表 3 所示。

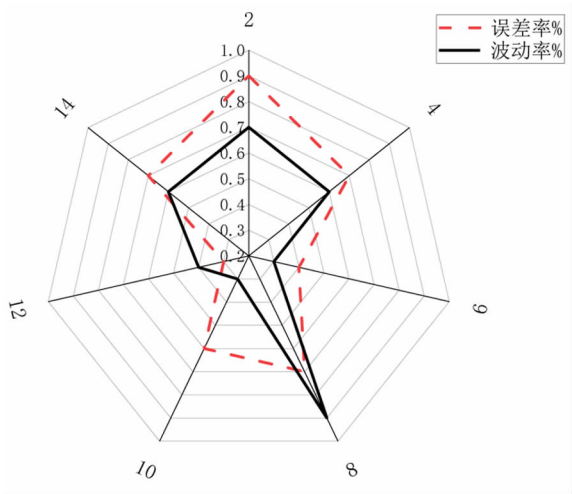


图 11 系统稳定度示意图

表 2 电缆线路基本参数数据

参数名称	参数值
电缆长度/m	4150.21
接头数量/组	17
横截面积/mm ²	400
电压/kV	35
线类型	铜
绝缘类型	交联聚乙烯

表 3 选取电缆数据

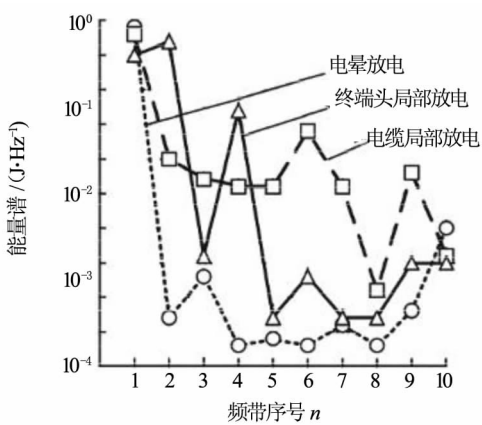
参数名称	参数值
测试电缆长度/km	200
接头数量/组	17
充电电流/mA	5
电压/kV	35
局部放电测量范围/nC	1~100
振荡频率/Hz	150

由表 3 可知,本系统的检测比较精确和智能,将相关数据全都测试标注,保证了实验的正确性。本研究在实验中的检测类型和相关数据图如图 12 所示。

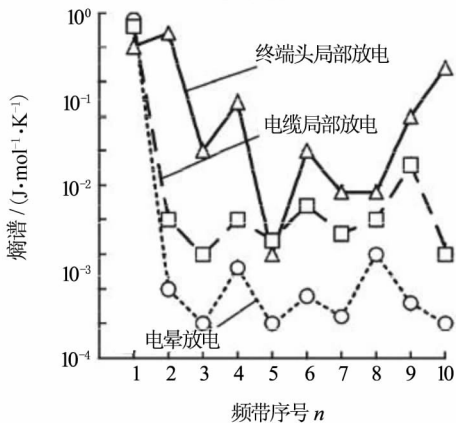
由图 12 可知,本系统对电缆局部放电检测类型较全面,且监测效率符合本研究系统要求,也表明在融合北斗系统后,定位也更精确和清晰。检测某一放电区所显示页面参数如表 4 所示。

由表 4 可知,本系统能够将放电区的详细参数以及地理信息全部显示,表明本系统在实际应用中,能够在很大程度上减少检测周期,提高检测效率。

由表 5 可以看出,在该北斗系统数据测试中,通过多次试验将系统的稳定数据记录,确保定位业务的正常实施,保证整个系统的稳定。本系统 LSTM 算法测试实验样本计算数据表如表 6 所示。



(a) 能量谱



(b) 熵谱

图 12 实验统计数据图

表 4 放电区定位实验数据

检测放电区类型	参数
波特率	0115200 bits
经度	E112 度 53 分 48 秒
纬度	N28 度 13 分 21 秒
系统零值	978000 ns
高度	38 m
经度方差	0.00000022
经度均值	112.89872282
纬度方差	0.00000066

表 5 北斗系统测试数据

试验编号	首次冷启时间/s	获取灵敏度/dBm	跟踪灵敏度/dBm	工作电流/mA
1	37.2	-147	-162	25.9
2	37.2	-147	-162	25
3	34.3	-147	-16	25.3
4	32.3	-148	-162	25.8
5	32.3	-147	-162	26
6	34.3	-148	-161	25.8
7	34.3	-147	-162	25.9

表 6 样本数据表

粒度类型	局部放电数据样本		
	平均异常分数	局部放电数据方差	局部放电数据极差
[1]	0.4667	0.0034	0.2467
[2]	0.4771	0.0033	0.2477
[3]	0.4673	0.0031	0.2577
[4]	0.4575	0.0042	0.2918
[5]	0.4761	0.0033	0.2239
[6]	0.4677	0.0034	0.2417
[7]	0.4671	0.0037	0.2433
[8]	0.4637	0.0033	0.2411
[9]	0.4611	0.0032	0.2417
[10]	0.4664	0.0031	0.2477
[11]	0.2667	0.0033	0.2476
[12]	0.4697	0.0036	0.2411
[13]	0.4679	0.0034	0.2463
[14]	0.4677	0.0032	0.2477

由以上数据可知,本研究系统的原则是让正常样本异常分数的方差和极差变得更小,正常样本的平均异常分数越大,就代表着系统对异常数据的区分能力越强,系统的好坏就在于其是够稳定。系统实验对比如图 13 所示。

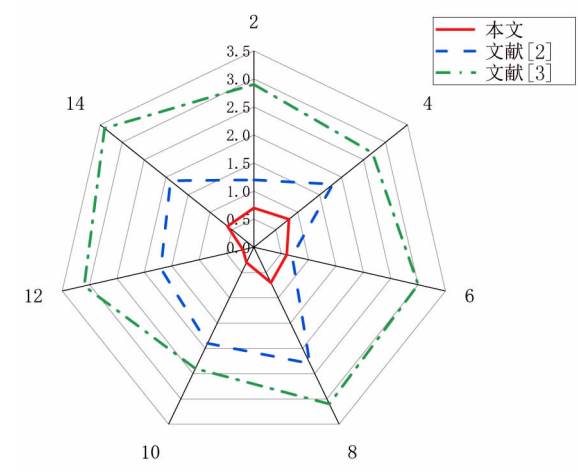


图 13 系统实验对比图

由图 13 可知文献[2]中的目标特征误差主要集中在 1%~5% 范围内,其中 4% 以上的误差较少,实验时间在 5~10 h 出现的 4% 以下的目标特征误差较多。文献[3]则是在实验前 10 h 目标检测的特征误差在 4% 以下,在 15 h 后的特征误差最大达到 4.8%。

5 结 论

设计了一个基于北斗定位的便携式电缆局部放电检测系统,在系统内加入了 5 G 通信模块,达到低时延、高可靠性的对相关数据传输进行加速和处理的要求,融合了 OPC-UA 通信模块对传输通道进行改进。本系统使用 LSTM 算法来检测电缆的局部放电,平均功率越大,表示紫外光越强,所以就可推出局部放电的强度大小。但本研究系统存在各个环节功能不稳定,需要人工监控来防止出现系统不稳定情况,这也是后续本系统需要加强和改进的方向。

参考文献

[1] 贾志杰,范松海,王志川,等. 高压开关柜局部放电检测设备的机械特性保护与检修[J]. 铸造,2022,71(8):1082.

[2] 周宏扬,马国明,张猛,等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报,2022,42(21):8016—8025.

[3] 司文荣,傅晨钊,卜剑,等. 基于多孔式敏感膜片的 MEMS 光纤珐珀传感器及其局部放电检测[J]. 光学精密工程,2021,29(11):2613—2621.

[4] 霍耀佳,马莉,李晔,等. 基于低频阶跃脉冲的矿井低压漏电保护技术[J]. 宁夏电力,2022(1):42—49.

[5] 蔡塋,袁文泽,张轩瑞,等. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. 高电压技术,2021,47(6):2041—2050.

[6] 李凤龙,张敏. 以北斗卫星系统为基础的配电网行波故障定位方法的研究[J]. 中国新通信,2019,21(7):131.

[7] 冯新岩,李沐,蔺晓琨,等. 基于自动时差分析的特高频局部放电检测时域抗干扰技术[J]. 高压电器,2020,56(8):217—223.

[8] 郭小凯,卢雨欣,孙廷玺,等. 用于电缆局部放电检测的储能式交流激励型振荡波测试系统[J]. 西安交通大学学报,2020,54(10):100—107.

[9] 马国明,周宏扬,刘云鹏,等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J]. 高电压技术,2020,46(5):1768—1780.

[10] 罗艳,周秀,唐长应,等. 基于声电联合定位法在换流变局部放电检测中的应用[J]. 变压器,2020,57(1):73—78.

[11] 余泽轩,帕孜来·马合木提. 基于改进双端法的高压交流输电线路故障定位[J]. 光电子·激光,2021,32(10):1099—1104.

[12] 马跃,何雨婷,尹震宇,等. 一种面向 OPC UA 消息通信的多优先级动态调度算法的设计与实现[J]. 小型微型计算机系统,2021,42(8):1747—1752.