

# 瞬时性录波 FDTW 分解下配电线路早期绝缘故障 DTU 感知方法

刘洋, 李升健, 邓才波, 袁乐, 曹俊英

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:**为了准确感知到配电线路早期绝缘故障的畸变波形,研究了瞬时性录波快速动态时间规整(fast dynamic time warping, FDTW)分解下的配电线路早期绝缘故障站所终端(distribution terminal unit, DTU)感知方法;对绝缘故障信号进行瞬时性录波与 FDTW 分解处理;匹配分解信号的能量谱特征与 DTU 终端触发机制感知模式,从而完成配电线路早期绝缘故障 DTU 终端感知。实验结果表明,该方法既能够有效分析电压、电流波形的瞬时异常表现,也可以准确感知到早期绝缘故障的放电脉冲谐波畸变波形,有助于保障配电线路稳定运行。

**关键词:**瞬时性录波; FDTW 分解; 配电线路; 早期绝缘故障; DTU 终端; 故障感知

**中图分类号:** TM 726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2026)01-0029-05

## 0 引言

在复杂的输电环境中,配电线路同时面对湿气渗透、化学腐蚀、机械损伤等问题,可能使绝缘层直接暴露于环境之中,在长期过负荷状态下容易因受热而发生碳化,出现配电线路绝缘故障,配电线路陷入发热、老化、更严重发热的恶性循环<sup>[1]</sup>。因此,有必要感知配电线路的早期绝缘故障,针对性地进行线路维护。

针对配电线路早期绝缘故障,田子建等人提出了基于二阶段目标增强网络的检测方法<sup>[2]</sup>,该方法定义了固定的增强损失函数,难以适应故障波形变换,使得该检测算法准确性难以保障;王少飞等人提出了人机协同巡检下的故障检测方法<sup>[3]</sup>,由于无人机样本集合有限,所以个别故障表现有可能无法得到准确检测;刘鹏程等人提出了基于反射系数谱相关系数的检测方法<sup>[4]</sup>,电力信号阻抗的输入具有较强波动性,该检测算法难以适应该波动性,影响故障感知准确性;张龙等人提出了基于开口变压器法的检测技术<sup>[5]</sup>,通过感应电动势定义目标函数并不能避免信号波动对检测结果造成的影响,所以该方法的故障检测效果不理想。

快速动态时间规整(fast dynamic time warping,

FDTW)通过对路径约束条件与距离计算结果的改进,提升波形匹配效率<sup>[6]</sup>。通过动态规划定义两条时间序列之间的最优对齐路径,实现对存在局部形变或不同长度波形的对比。为了解决现有方法对故障波形变换适应性不足的问题,文中引入了 FDTW 算法,研究了瞬时性录波 FDTW 分解下的配电线路早期绝缘故障站所终端(distribution terminal unit, DTU)感知方法。通过 FDTW 算法分解不同波形,自适应故障波形畸变。

## 1 配电线路早期绝缘故障 DTU 终端感知的实现

DTU 终端感知配电线路早期绝缘故障,是指针对故障信号进行分解处理,再结合终端体系的信号触发机制,提取信号能量谱特征,从而将目标信号与触发机制感知模式匹配起来,实现对绝缘故障表现的检测。

### 1.1 故障信号的 FDTW 分解

DTU 终端实现对配电线路早期绝缘故障的感知,合理采集故障信号是关键环节。终端体系基于高频采样标准捕捉微弱的暂态故障特征,以确定故障信号表现,其采集对象包括信号间隔、电压信号与电流信号<sup>[7]</sup>。规定  $\omega$  表示信号采样频率,其取值满足  $\omega \geq 10$  kHz,离散化处理后,可将信号间隔  $T(\omega)$ 、电压信号  $U(\omega)$ 、电流信号  $I(\omega)$  的计

收稿日期:2025-09-07

作者简介:刘洋(1992),女,硕士,工程师,从事配电自动化、配网保护与控制研究。

算式表示为:

$$\begin{cases} T(o) = \frac{1}{\alpha_o} \\ U(o) = u(o \cdot T(o)) \\ I(o) = i(o \cdot T(o)) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha_o$ 表示采样点序号; $u$ 表示暂态电压; $i$ 表示暂态电流。

通过高频采样,DTU终端可以有效提取早期绝缘故障信号在间隔、电压与电流方面的微弱暂态表现,为配电线路的故障预警提供数据支撑。在配电线路中,早期绝缘故障通常表现为高频输出的瞬态信号,其持续时间一般只能保持在微秒或毫秒级范围内。基于瞬时性录波技术捕捉早期绝缘故障信号,是以短时窗波形和高采样率标准识别输入信号。DTU终端在感知配电线路早期绝缘故障时,对输入信号的暂态真实性要求较高。故障信号在单位传输周期内的峰值表现,最能体现其暂态真实性<sup>[8]</sup>。所以,针对故障信号的瞬时性录波处理,应以定义信号峰值表现为基础。以电压、电流为例,求解早期绝缘故障信号峰值,如式(2)所示。

$$\begin{cases} U(o)_{\max} = \delta_0 \cdot \bar{U} \sin(2\pi U(o)t) \\ I(o)_{\max} = \bar{I} \cdot \delta_0^t \cdot \sin(2\pi I(o)t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t$ 表示信号传输周期; $\bar{U}$ 表示信号传输周期内的电压均值; $\delta_0$ 表示故障信号的工频基波( $\delta_0=50$  Hz); $\bar{I}$ 表示信号传输周期内的电流均值。

基于式(2),推导故障信号瞬时性录波的短时窗波形 $w$ 和高采样率标准 $e$ 的计算式为:

$$w = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \int U(o)_{\max} \cdot I(o)_{\max} \cdot \chi \left( \frac{|W_1 - W_2|}{t} \right) dt \quad (3)$$

$$e = \sum_{\varepsilon \rightarrow \infty} \left| \beta(U(o)_{\max}, I(o)_{\max}) \right|^2 \quad (4)$$

式中: $\beta$ 表示故障信号录波参数; $\chi$ 表示故障信号的瞬时衰减系数; $W_1$ 、 $W_2$ 分别表示故障与非故障情况下的信号短时窗波幅; $\varepsilon$ 表示不包含噪声的信号瞬时采样率。

瞬时性录波通过短时窗波形和高采样率标准约束故障信号的暂态真实性,进而提升电网主机对配电线路绝缘状态监测的可靠性。

在配电网中,瞬时性录波虽然提出了短时窗波形和高采样率标准,但在延迟性方面,取样信号并不

能达到完全对齐的形式。FDTW分解意在处理目标对象在时间序列方面的相似性度量关系,基于该原则处理早期绝缘故障信号,可以使目标信号在延迟性方面高度对齐,从而保障了DTU终端对故障表现的感知准确性<sup>[9]</sup>。针对早期绝缘故障信号,FDTW算法通过动态规划确定输入信号之间的最优对齐路径。对于最优对齐路径的定义如式(5)所示。

$$Q = \text{sign} \left( \sum_{\gamma=1}^{+\infty} \frac{q_{\gamma}}{U(o)I(o)} \right) \quad (5)$$

式中: $\gamma$ 表示调节系数; $q_{\gamma}$ 表示基于系数 $\gamma$ 所设定的信号最优对齐标准。

对齐标准过于严格,可能将部分有效的、存在微小形变的故障对齐路径错误地拒绝。在信号最优对齐路径的基础上,找到一个信号对象,并使其到达所有信号的距离之和,取得最小值,以该信号为标准进行FDTW分解<sup>[10]</sup>。基于式(5),推导配电线路早期绝缘故障信号的FDTW分解运算式为:

$$E = 1 - \frac{Q(Y_{\min}, T_{\min})}{\phi(Y_{\phi}, T_{\phi})} \quad (6)$$

式中: $\phi$ 表示随机信号对象; $Y_{\phi}$ 表示 $\phi$ 信号在距离方面的对齐标准; $T_{\phi}$ 表示 $\phi$ 信号在延迟时间方面的对齐标准; $\phi$ 表示FDTW决策阈值; $Y_{\min}$ 表示距离最小值; $T_{\min}$ 表示延迟时间最小值。

FDTW分解后,故障信号的对齐状态更突出,DTU终端对于配电线路早期绝缘故障的感知准确性也就能得到有效保障。

## 1.2 DTU终端触发机制设计

DTU终端在感知配电线路早期绝缘故障时,所采取的信号触发机制遵循多级联合触发配合瞬时录波与FDTW分解的原则,涉及统一采样频率、明确触发标准两方面内容。配合瞬时录波与FDTW分解原则统一故障采样频率,可以基于拉格朗日插值法,将不同采样率的输入数据转换为统一频率标准,以消除频率差异对故障感知准确性的影响<sup>[11]</sup>。基于拉格朗日插值法的故障采样频率统一标准如下:

$$P(a) = \sum_{i=1}^{+\infty} A_i^2 + \left| \frac{E}{we} (fa) \right| \quad (7)$$

式中: $a$ 表示统一的采样频率; $t$ 表示拉格朗日插值基数; $A_i$ 表示拉格朗日插值法所构造的故障信号采样多

项式; $f$ 表示统一采样频率下的信号转换参数。

明确DTU终端的触发标准,就是基于统一的故障信号采样频率定义触发逻辑。在统一采样频率下运算输入数据,梳理DTU终端的感知触发标准,以定义唯一的配电线路早期绝缘故障信号能量谱函数<sup>[12]</sup>。利用式(7),可将DTU终端触发机制的定义式表示为:

$$D(a) = -\lambda \cdot \log_a P(a) \cdot 2\kappa \hat{d} \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 表示故障信号的逻辑标记参数; $\kappa$ 表示信号数据输入; $\hat{d}$ 表示触发感知下的信号暂态特征。

触发机制具有多级联动效应,对于DTU终端而言,被输入信号在统一频率下得到感知,可使配电线路早期绝缘故障得到针对性检测。需要注意的是,由于早期绝缘故障信号具有“持续时间短、幅度小”的特点,如果采样频率降低到5 kHz,对高频分量的响应能力将减弱,导致信号的时间分辨率降低。采样率的降低将削弱DTU终端对此类信号的感知能力,使其难以准确捕捉微秒或毫秒级的瞬态波形细节。

### 1.3 DTU终端早期绝缘故障的感知

结合DTU终端触发机制,确定目标故障信号在能量谱函数中的表达形式。能量谱描述了故障信号所携带能量幅值的集中表现,在DTU终端触发机制下提取能量谱特征可以感知信号幅值变化状态,从而在DTU终端感知绝缘故障时提供支持<sup>[13]</sup>。

基于式(8),推导早期绝缘故障信号的能量谱函数如下:

$$F = \int_{-\infty}^{+\infty} D(a) \times G(g-h) j^{\mu\nu} dj \quad (9)$$

式中: $j$ 表示故障信号能量熵; $g$ 表示信号帧长度; $h$ 表示信号脉冲长度; $\mu$ 表示本征模态参数; $\nu$ 表示频带能量。

在式(9)的基础上,可将早期绝缘故障信号的能量谱特征提取运算表示为:

$$J = -\frac{kF}{1/g^2} \cdot \ln \left| \frac{m}{L} \right| \quad (10)$$

式中: $k$ 表示故障信号频谱相关性; $g$ 表示能量谱函数中的信号调制参量; $m$ 表示故障信号频带质量; $L$ 表示故障信号频带长度。

在DTU终端触发机制的感知模式下,针对性描述能量谱特征,使其更符合目标信号的故障表现,从而确保故障检测的准确性<sup>[14]</sup>。

DTU终端通过对早期绝缘故障信号能量谱特征

的分析,建立特征-触发阈值的动态匹配模型,实现对故障表现的精准感知。结合瞬时性录波与FDTW分解条件,匹配能量谱特征与触发机制感知模式,就是根据故障信号在不同频段内的功率分布情况,感知配电线路工作状态<sup>[15]</sup>。由于只有早期绝缘故障表现会触发能量谱特征发生突变,所以DTU终端对于故障表现的感知准确性能够得到有效保障。设 $\hat{X}$ 表示早期绝缘故障所造成的能量谱特征突变; $C$ 表示触发阈值; $v$ 表示动态匹配参数; $\omega$ 表示功率分布参量; $Z$ 表示调整系数。联立式(10),可将能量谱特征与触发机制感知模式之间的匹配关系描述为:

$$B = \left[ -\frac{C}{\frac{\hat{X}}{J}} - v^2 \right] \times \omega Z \quad (11)$$

在瞬时性录波与FDTW分解框架下,DTU终端通过多维度特征提取、动态时间对齐、故障模式匹配之间的协同机制,感知配电线路早期绝缘故障,进而实现对故障表现的预警与检测。

## 2 实验验证

某供电公司配电网实际运行中记录的配电线路早期绝缘故障(如图1所示)具有隐蔽性强、危害性大的特点,若不开展有效的事前预警,不但干扰电力网络的运行稳定性,还会导致电力设备误动作的问题。本次实验基于实际的配电线路早期绝缘故障案例数据进行验证。对基于瞬时性录波FDTW分解下的配电线路早期绝缘故障DTU终端感知方法(实验组)、基于二阶段目标增强网络的检测方法(A对照组)、人机协同巡检下的检测方法(B对照组)进行研究,通过电压波形、电流波形、放电脉冲谐波变化,分析不同方法对早期绝缘故障的监测能力。



a) 案例1:电缆接头老化



b) 案例2:绝缘层潮湿放电

图1 配电线路早期绝缘故障问题

如图1所示,实验实际案例存在配电网中常见的电缆接头老化与绝缘层潮湿放电两类场景,均表现出秒级间歇性放电特征。案例1:电缆接头氧化导致阻抗突变,在5.2 s、13.5 s出现两次谐波畸变;案例2:绝缘层受潮后放电脉冲重复周期延长至8~15 s,进一步验证长周期观测的必要性。在220 V±10%的配电线路安装DTU终端、PT柜与电气隔离模块,配置DTU通信参数,以确保其与配电网上位机监控平台的稳定连接,详情见图2。

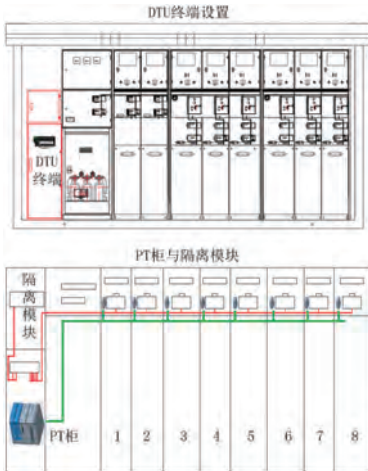


图2 DTU终端安装方案

针对录波数据进行异常值检测,并从中剔除噪声干扰,再利用统计学算法,计算同源通道录波数据之间的相似度,以验证实验组、对照组检测方法在无通道标识场景下的有效性。实验过程中,录波性能指标的设置如表1所示。

表1 性能指标

项目	指标	目标取值
1	录波分辨率/(bit/MHz)	16
2	信号检测灵敏度/mA	局部放电:0.1
3	信号响应时间/ms	初级触发:≤1
4	信号误触发率/%	< 0.1
5	电源电压/V	220±22
6	电源频率/Hz	50±5
7	线路能耗/W	<30

图3—4对比了故障与非故障情况下的电压、电流波形情况。

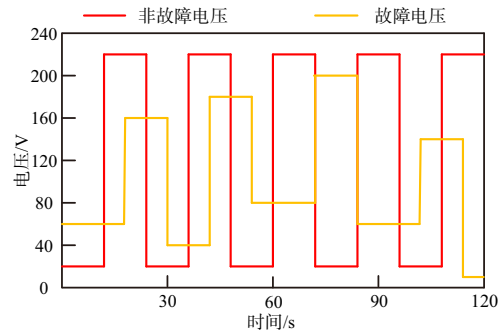


图3 故障与非故障情况下的电压波形

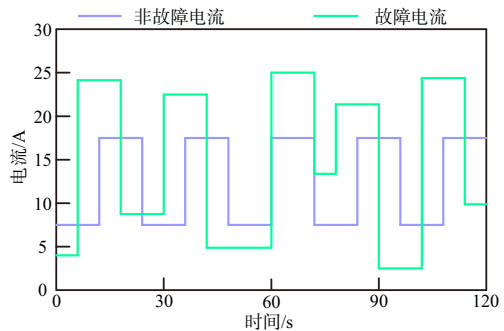


图4 故障与非故障情况下的电流波形

根据图3—4可知,配电线路不存在早期绝缘故障问题时,电压、电流波形均呈现出较为规律的变化趋势,在各个变化阶段时间周期和波形幅值均完全相等;存在早期绝缘故障问题时,电压、电流规律性变化的波形趋势被打破,各个变化阶段的时间周期与波形幅值特性均受到了严重影响。

基于实验组、对照组方法监测早期绝缘故障下的电压与电流波形,如果检测波形明显异于图3中的非故障波形,则表示故障检测的准确性较高;如果检测结果依然存在较为规律的波形曲线,则表示故障检测的准确性相对有限。针对早期绝缘故障下电压与电流波形的检测如图5—6所示。

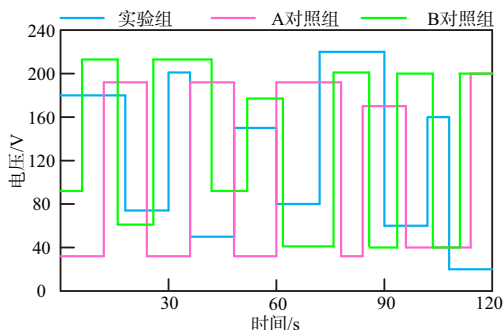


图5 故障电压波形检测

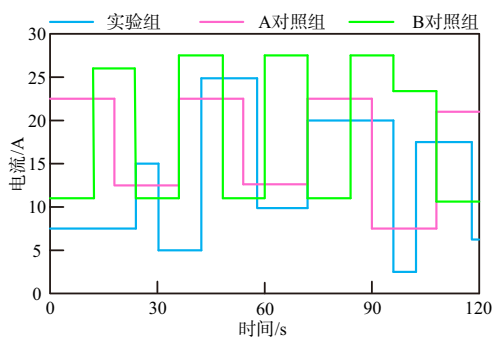


图6 故障电流波形检测

分析图5—6可知,在实验组方法针对电压波形、电流波形的检测结果中,没有表现出明确的规律性,无论是周期还是幅值都与非故障波形具有显著的差异性;在A对照组、B对照组针对电压波形、电流波形的检测结果中,周期和幅值都具有阶段性的规律变化表现,对比与非故障波形,相似程度明显更高。

图7反映了实验组、对照组方法对放电脉冲谐波畸变的检测情况。

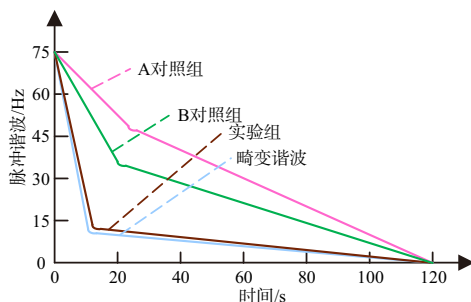


图7 放电脉冲谐波的畸变波形检测

分析图7可知,早期绝缘故障影响下放电脉冲谐波的畸变表现在13.5 s,相较于非故障情况,脉冲谐波的下跌幅度为61.2 Hz;实验组检测到放电脉冲谐波畸变表现的时间为13.9 s,谐波的下跌幅度为60.9 Hz,较为接近真实畸变谐波;A对照组、B对照组检测到放电脉冲谐波畸变表现的时间都超过了20 s,明显滞后于真实畸变谐波,检测到的脉冲谐波下跌幅度也都没有超过50 Hz。

### 3 结语

精准感知配电线路早期绝缘故障是实现电网主动运维、提升供电可靠性的关键。瞬时性录波技术的应用,不仅捕捉到了传统保护装置难以记录的微弱故障信号,还实现了对信号频率的监测与调节,为电网的稳定运行提供了有力保障;FDTW分解方法则意在

将非平稳的瞬时波形转化为可被量化的时频特征,通过集成瞬时性录波技术、FDTW分解、特征提取等智能算法,不但可以为局部放电、绝缘劣化等早期线路故障隐患提供预警保障,也实现了对微弱故障信号的精准识别与灵敏捕捉。

FDTW算法的核心是通过找到最优路径,在时间轴上对齐两个具有变形的相似序列。然而,叠加的5%谐波干扰是一种持续的、与故障无关的背景噪声,会扭曲故障信号的真实波形。在计算序列间距离和寻找对齐路径时,这种失真将导致FDTW中的信号畸变,并且能谱特征和触发机制之间的匹配精度也将明显降低。因此,在未来的研究中,针对微弱的早期故障特征,尤其是高频放电分量,需要增加有效的抗干扰措施,进一步优化FDTW分解算法,并推动DTU终端与数字孪生、物联网等新型技术手段的深度融合,保证能量谱特征是纯净的故障特征,才能够构建更高级的智能化闭环运维体系,从而筑牢配电网网络安全防线。

### 参考文献:

- [1] 张立志,曹成军,张伟,等.基于场路耦合法的10 kV干式空心串联电抗器匝间绝缘故障电气特征量研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(02):265-275.
- [2] 田子建,吴佳奇,张文琪,等.基于二阶段目标增强网络的低照度复杂环境下绝缘子故障检测方法[J].电网技术,2024,48(03):1331-1343.
- [3] 王少飞,吴琼水,田猛,等.人机协同巡检下绝缘子分类及故障检测方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(01):91-98,111.
- [4] 刘鹏程,田立斌,高磊,等.基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法[J].绝缘材料,2023,56(05):95-102.
- [5] 张龙,武玉才.基于开口变压器法的交流电机定子非激励相绕组匝间短路检测研究[J].电机与控制学报,2024,28(02):54-63.
- [6] 戴志辉,张富泽,杨鑫,等.基于FDTW算法的故障录波数据智能比对方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(23):82-91.
- [7] 陆新原,李新兴,王越超,等.发电机绝缘故障位置自动化在线监测诊断系统[J].电子设计工程,2025,33(02):181-184,191.
- [8] 李绪,肖志云,姜晔东,等.基于改进YOLOv7的异源绝缘子的故障检测与识别[J].红外技术,2024,46(11):1325-1333.
- [9] 宋智伟,黄新波,纪超,等.基于Flexible YOLOv7的输电线路绝缘子缺陷检测和故障预警方法[J].高电压技术,2023,49(12):5084-5094.

(下转第70页)

元接地刀闸紧固螺栓松动,导致接地刀闸在正常运行情况下发生接地。

2) 设备厂家应采用具有防松动措施的刀闸结构,在制造过程中应使用相应力矩扳手紧固螺栓。

3) 运维单位应对相应产品重点关注,结合停电取油进行油中溶解气体测试。若发现气体超标,及时进行分析处理。检修过程中,可转动刀闸操作杆,正常情况下,操作杆行程应在“运行-试验”位置之间,若发现行程超出,应及时进行处置。

4) 加强电压互感器二次电压运行监测,发现电压异常时,应及时查明原因,必要时停电开展诊断性试验。

### 参考文献:

- [1] 张帅,肖兰,梁博,等.500 kV 变电站不同电压等级线路 PT 断线的原理分析及研究[J].电气技术与经济,2023(01):31-35,44.
- [2] 柯新,叶翰靖,魏艺君.一起 500 kV 变电站保护装置 PT 断线的故障分析与查找[J].江西电力,2023,47(01):43-45.
- [3] 刘妮娜.电压二次回路异常引起的过电压保护误动作分析与反措[J].工程建设与设计,2017(02):52-53.
- [4] 孙其寿.变电站二次系统运行维护实用技术[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [5] 孙艳军,谢蓓敏,唐延明.500 kV 线路 PT 二次电压不平衡的原因分析[J].电力安全技术,2015,17(03):38-43.
- [6] 左亚芳.变电站二次系统典型异常级故障 100 例[M].北京:中国电力出版社,2017.

(上接第 33 页)

- [10] 邱刚,陈杰,张迺龙,等.基于 YOLOv3 和 HSV 颜色空间的绝缘子低/零值故障诊断研究[J].高压电器,2023,59(01):148-153.
- [11] 武涵聪,陈思磊,孟羽,等.基于 Chirplet 稀疏表示的大电流光伏系统微弱故障电弧检测方法[J].中国电机工程学报,2025,45(03):1148-1160.
- [12] 王琼苑,褚继峰,李秋霖,等.基于微型气体传感阵列的空气绝缘设备放电故障识别[J].电工技术学报,2023,38(23):6494-6502.

- [13] 杨正盛,刘芳.基于 LSTM 和多头注意力的气体绝缘开关柜局部放电检测框架[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(02):108-115.
- [14] 张廷荣,段承成,胡延文,等.一种用于接触网腕臂绝缘子破损大小检测的 YOLOv7-OpenCV 算法[J].铁道科学与工程学报,2025,22(04):1870-1882.
- [15] 孙新娟,杨天宇.融合注意力机制的改进型 YOLOv5 绝缘子缺陷故障检测方法[J].科学技术与工程,2024,24(17):7221-7230.

(上接第 50 页)

- [3] 王永强,胡芳芳,谢军,等.GIS 盆式绝缘子气隙缺陷下电场变化规律仿真研究[J].绝缘材料,2016,49(01):40-45.
- [4] 王浩然,郭子豪,张丝钰,等.缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J].高电压技术,2018,44(03):982-992.
- [5] 常文治,毕建刚,刘姝嫫,等.GIS 盆式绝缘子典型缺陷的电场仿真[J].高压电器,2018,54(05):138-143.
- [6] 孟庆红.不同绝缘缺陷局部放电下 SF<sub>6</sub> 分解特性与特征组

分检测研究[D].重庆:重庆大学,2010.

- [7] 刘东阳,王瑶,佟维妍,等.一种降低 GIS 盆式绝缘子局部放电的方法及应用[J].绝缘材料,2025,58(01):137-144.
- [8] 刘惠龙.典型缺陷对盆式绝缘子的影响及相关检测方法研究[D].南昌:南昌大学,2024.
- [9] 黎斌.SF<sub>6</sub> 高压电器设计(第 5 版)[M].北京:机械工业出版社,2019.