

# 基于 LSTM 算法的高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法

韩雪源

(国网安徽省电力有限公司芜湖供电公司, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 高压交联电缆线路承担的高电压、大容量电力输送任务存在复杂性。针对线路振荡波局部放电检测准确度较差,难以进行缺陷定位的问题,提出基于长短期记忆(LSTM)网络算法的高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法。应用振荡波电压法搭建高压交联电缆线路振荡波局部放电检测框架。基于小波包分解算法,提取典型局部放电信号特征,通过 LSTM 网络算法识别与检测振荡波局部放电信号,消除局部放电信号中的噪声。根据原始振荡波与反射振荡波到达测试端的时间差,结合振荡波传播速度,确定高压交联电缆线路缺陷位置,实现电缆线路振荡波的局部放电检测。试验结果表明,所提方法的局部放电信号识别准确度更高,电缆线路缺陷定位更精准,实际应用性能较佳。

**关键词:** 高压交联电缆线路; 局部放电; 振荡波; 长短期记忆网络算法

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)12-0041-06

doi: 10.12177/emca.2022.137

## Oscillating Wave Partial Discharge Detection Method of High Voltage Cross-Linked Cable Line Based on LSTM Algorithm

HAN Xueyuan

(Wuhu Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

**Abstract:** The tasks of high voltage and large capacity power transmission undertaken by high voltage cross-linked cable line are complex. Aiming at the problems that the detection accuracy of line oscillating wave partial discharge is poor and it is difficult to locate defects, a high voltage cross-linked cable line oscillating wave partial discharge detection method based on long short-term memory (LSTM) network algorithm is proposed. The oscillating wave voltage method is applied to establish the framework of oscillating wave partial discharge detection of high voltage cross-linked cable line. Based on the wavelet packet decomposition algorithm, the characteristics of typical partial discharge signals are extracted. The oscillating wave partial discharge signals are identified and detected by LSTM network algorithm to eliminate the noise in the partial discharge signals. According to the time difference between the original oscillating wave and the reflected oscillating wave reaching the test end, combined with the propagation speed of oscillating wave, the defect location of high voltage cross-linked cable line is determined, and the partial discharge detection of cable line oscillating wave is realized. The test results show that the partial discharge signal recognition accuracy obtained by the proposed method is higher, and the cable line defect location is more accurate, and the practical application performance is better.

**Key words:** high voltage cross-linked cable line; partial discharge; oscillating wave; long short-term memory (LSTM) network algorithm

收稿日期: 2022-07-26; 收到修改稿日期: 2022-09-15

作者简介: 韩雪源(1987—),男,本科,高级工程师,研究方向为高电压技术、电力设备检测技术和电能质量等。

## 0 引言

中国城镇化进程的加快与各行各业的高速发展,使得国内电力需求急剧增加。为了满足高速上涨的电力需求,电力系统向着高电压、大容量方向不断发展与升级。电力系统的发展虽然提升了发电量与储电量,但是也带来了很大的安全隐患,电力系统故障率也随之增加。若电力系统发生故障,轻则影响电能质量,重则引发停电事故,会对人们的生产与生活带来极大的不利影响。由此可见,保障电力设备、电力系统的稳定运行越来越重要。电缆线路作为输送电能的主要电力设备,与用电企业、设备有着紧密的联系。对电缆线路故障进行精确检测与定位至关重要,并具备一定的现实意义。

振荡波电压法是使用较为广泛的电缆线路局部放电检测和定位方法,加压时间相对较短,对电缆线路本身损伤较小,可以有效发现电缆线路存在的局部缺陷。与交流电源相比,振荡波电源具有作用时间短、等效性好、便于携带、操作便利等优势,是一种电缆线路缺陷诊断、试验的有效电源类型。已有一些学者通过此方法进行电缆线路检测。李巍巍等<sup>[1]</sup>通过对比分析3条绝缘老化程度差异明显、在电缆接头与终端分别出现绝缘缺陷的电力电缆,得到了绝缘老化程度与电缆局部放电参数(放电起始电压、放电电量等)之间的相关关系,凭借局部放电定位的方法,进行了电缆绝缘老化故障的位置分析。但该方法未结合振荡波传播速度确定高压交联电缆线路缺陷位置,局部放电信号识别准确度不高。张若兵等<sup>[2]</sup>提出基于经验模态分解(EMD)与动态时间规整(DTW)算法的振荡波下电缆局部放电定位方法,利用振荡波电压法进行局部放电检测。为了准确提取放电脉冲,其结合EMD与Teager能量算子分割局部放电脉冲,通过DTW算法计算放电脉冲相似度,基于约束条件匹配入、反射脉冲,采用时域反射法定位放电点,实现故障电缆检测。但该方法未消除局部放电信号中的噪声,检测结果准确性不足。王庆华等<sup>[3]</sup>提出一种基于DC/AC变换技术的新振荡波技术和测试系统,通过控制大功率DC/AC变换器输出端的双向半导体开关产生振荡波电压,显著降低了振荡波转换开关的工作电压,避

免了大量绝缘栅双极型晶体管(IGBT)或光控晶闸管(LTT)开关器件的使用。但该方法未提取典型局部放电信号特征,无法有效定位电缆线路缺陷。Sawai等<sup>[4]</sup>提出了一种用于线路脉冲检测的多相振荡模型,在谐振隧穿二极管生成周期性脉冲串,并通过有耗电感器建立耦合关系,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。郭小凯等<sup>[5]</sup>设计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,在谐振电路的逆变电源输出端增加双向高速固态开关,避免振荡波电压受到开关噪声干扰,使用电源对电容器组充电,并使用电容器组对系统供电,提高局部放电检测的灵敏度。但该方法没有考虑振荡波传播速度差异,局部放电检测结果不够精准。

长短期记忆(LSTM)网络算法是循环神经网络的改进模型,引入了状态单元与门的概念,通过控制检测信号传递的比例与速度,提升局部放电信号的检测率,消除信号噪声。为了弥补以上研究的不足,提高线路振荡波局部放电检测准确度,本文提出基于LSTM网络算法的高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法。基于振荡波电压法搭建局部放电检测框架,采用小波包分解算法提取典型局部放电信号特征。利用LSTM网络算法检测振荡波局部放电信号,消除噪声。根据原始振荡波与反射振荡波到达测试端的时间差,分析振荡波传播速度,确定线路缺陷位置,实现局部放电检测。所提方法提升了电缆线路故障检测及定位的精度,为电力系统稳定运行提供有效的保障。

## 1 高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法设计

### 1.1 高压交联电缆线路振荡波局部放电检测框架

为了提升检测效果,应用振荡波电压法搭建高压交联电缆线路振荡波局部放电检测框架,如图1所示,直流电源加压到特定数值,完成被测电缆线路的充电。再闭合高压开关,电感与被测电

缆线路的等效电容发生谐振,从而形成振荡回路。被测电缆线路上则会产生振荡电压,激发电缆线路薄弱点,发生局部放电现象,依据局部放电信号对电缆线路缺陷进行检测与定位。

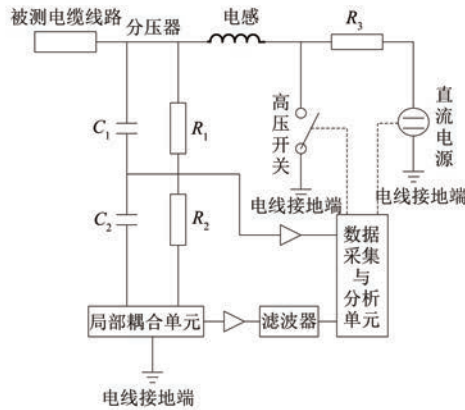


图1 高压交联电缆线路振荡波局部放电检测框架图

依据振荡回路能够计算电缆线路上施加的电压与电流,表达式为

$$\begin{cases} U_C = Ae^{-\delta t} \sin(\omega t + \theta) \\ I_C = \frac{U_C}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_C$  与  $I_C$  分别为振荡回路施加到电缆线路上的电压与电流;  $A$  为辅助计算参数,由  $\frac{U_C}{\sin \theta}$  计算而得;  $\delta$  为振荡波影响因子,由  $\frac{R}{2L}$  计算而得,  $R$  为总电阻,  $L$  为电感;  $t$  为振荡波持续时间;  $\omega$  与  $\theta$  分别为振荡波的角速度与初相位<sup>[6]</sup>。

在高压交联电缆线路测试过程中,应用振荡波对其进行加压处理,故使振荡波波形与频率尽可能接近工频,持续时间小于 100 ms,防止振荡波加载电压损伤电缆线路<sup>[7]</sup>。

另外,为了方便研究的进行,认定分压器高压臂与低压臂对应的时间常数一致,即  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 。分压比不会因为振荡波频率的变化而产生变化,维持在一个固定值,表达式为

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

式中:  $K$  为分压比;  $C_1$  与  $C_2$  分别为高压臂与低压臂对应的电容;  $R_1$  与  $R_2$  分别为高压臂与低压臂对应的电阻。

上述过程完成了高压交联电缆线路振荡波局部放电检测框架的搭建,并分析了振荡波对电缆线路施加的电压、电流与分压比数值,为后续振荡波局部放电信号的识别与处理奠定基础<sup>[8]</sup>。

## 1.2 振荡波典型局部放电信号特征提取

电缆线路振荡波局部放电检测过程中,不仅存在局部放电信号,还存在电缆线路运行信号、干扰信号等,并且信号整体数量较大,为局部放电检测带来了一定的困难。因此,本文应用小波包分解算法提取典型局部放电信号特征,为后续振荡波局部放电信号检测做准备<sup>[9]</sup>。基于小波包分解算法提取典型局部放电信号特征的具体步骤如下所示。

步骤一:采用 db4 小波对典型局部放电信号进行小波包分解,获得 16 个频带特征信号,记为  $S_{4j}(j = 1, 2, 3, 4)$ 。

步骤二:以步骤一获得的频带特征信号为基础,对频带特征信号的局部能量与熵进行计算,表达式为

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

式中:  $E_{4j}$  与  $W_{4j}$  分别为频带特征信号的局部能量与熵;  $s_i$  为频带特征信号正交基上的第  $i$  项系数<sup>[10]</sup>。

步骤三:以步骤二的计算结果为依据,构造特征序列,分别记为  $E_j$  与  $W_j$ ,将其作为典型局部放电信号特征向量。

步骤四:对特征向量  $E_j$  与  $W_j$  进行归一化处理,消除量纲对数据分析的影响<sup>[11]</sup>。以此为基础,提取典型局部放电信号的特征向量能量谱与熵谱。

## 1.3 振荡波局部放电信号检测与处理

以上文提取的振荡波典型局部放电信号特征为基础,应用 LSTM 网络算法检测振荡波局部放电信号。但受复杂环境、采集设备自身振动等因素的影响,检测到的局部放电信号中存在大量的噪声,会影响高压交联电缆线路缺陷的定位精度<sup>[12]</sup>。因此,对检测的局部放电信号进行降噪处理,具体过程如下文所示。

LSTM 增加了算法的适应性,扩大了算法的

应用范围<sup>[13]</sup>,其单元结构如图2所示。

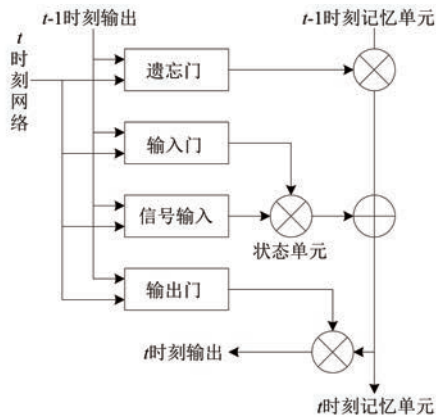


图2 LSTM单元结构示意图

如图2所示,将电缆线路检测信号作为LSTM网络算法的输入值,经过遗忘门与输入门的计算,控制检测信号传递的比例与速度,以此来提升局部放电信号的检测率<sup>[14]</sup>。遗忘门与输入门的输出值表达式为

$$\begin{cases} f_t = \sigma(\mathbf{w}_f h_{t-1} + \mathbf{u}_f x_t + b_f) \\ q_t = \sigma(\mathbf{w}_q h_{t-1} + \mathbf{u}_q x_t + b_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_t$ 与 $q_t$ 分别为遗忘门与输入门的输出值; $\sigma(\cdot)$ 为sigmoid激活函数; $h_{t-1}$ 为 $t-1$ 时刻LSTM单元的输出值; $x_t$ 为当前时刻的输入值; $\mathbf{w}_f$ 与 $\mathbf{u}_f$ 为遗忘门中 $h_{t-1}$ 与 $x_t$ 的权重矩阵; $\mathbf{w}_q$ 与 $\mathbf{u}_q$ 为输入门中 $h_{t-1}$ 与 $x_t$ 的权重矩阵; $b_f$ 与 $b_q$ 为偏置项。

将典型局部放电信号特征向量 $\mathbf{E}_j$ 与 $\mathbf{W}_j$ 作为状态单元输入LSTM网络算法,并计算其与输入门输出值的特征向量的距离,记为 $d_{ij}$ 。当 $d_{ij} \in [0,1]$ 时,认为两个特征向量之间的相似度较大,对其进行保留操作;当 $d_{ij} \notin [0,1]$ 时,认为两个特征向量之间的相似度较小,对其进行删除操作。

将保留下来的特征向量还原为信号形式,从输出门输出,即可完成局部放电信号的检测。为了方便研究的进行,将检测到的局部放电信号记为 $Y_t$ 。但是,局部放电信号中存在噪声信号,会影响电缆线路缺陷的最终定位,故应用短时傅里叶变换消除局部放电信号中噪声信号,表达式为

$$Y'_t = Y_t \cdot \text{STFT}(t) = \frac{Y_t}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y(\theta) h(\omega - \theta) d\theta \quad (5)$$

式中: $Y'_t$ 为处理噪声后的局部放电信号; $\text{STFT}(t)$ 为短时傅里叶变换函数; $h(\omega - \theta)$ 为窗

函数。

上述过程完成了振荡波局部放电信号的监测及处理,为后续高压交联电缆线路缺陷定位提供准确的信号支撑。

### 1.4 高压交联电缆线路缺陷定位

以上文经过检测与消噪获得的振荡波局部放电信号为基础,依据原始振荡波与反射振荡波达到测试端的时间差,结合振荡波传播速度,即可实现高压交联电缆线路缺陷的定位<sup>[15]</sup>。

依据振荡波局部放电信号 $Y_t$ 提取原始振荡波与反射振荡波达到测试端的时间,记为 $t_1$ 与 $t_2$ ,时间差记为 $\Delta t, \Delta t = t_2 - t_1$ 。则局部放电源点(高压交联电缆线路缺陷位置)计算式为

$$P = 1 - \frac{\Delta t \times v_e}{2} \quad (6)$$

式中: $P$ 为局部放电源点与测试端的距离; $v_e$ 为振荡波在高压交联电缆线路中的传播速度。

根据式(6)的计算结果即可快速定位高压交联电缆线路缺陷位置,完成电缆线路的测试,为电缆线路的应用提供帮助,从而保障电力输送的安全。

## 2 试验与结果分析

### 2.1 试验准备阶段

为了验证所提方法的应用性能,选取GIS盆式绝缘子表面缺陷的局部放电检测作为对比方法<sup>[16]</sup>,设计对比试验。在试验进行之前,需要进行充分的准备工作,保障试验的稳定进行,提升结果的准确性。

依据电缆线路振荡波局部放电检测试验的需求,确定试验准备阶段内容为试验对象、试验设备选取与试验环境搭建。其中,试验对象为高压交联电缆线路,其基本参数如表1所示。

表1 高压交联电缆线路基本参数表

参数名称	参数值
线路长度/m	4 150.21
接头数量/组	17
横截面积/mm <sup>2</sup>	400
额定电压/kV	35
线心	铜心
绝缘类型	交联聚乙烯绝缘

依据被测电缆基本参数,选取 HDDAC-60 振荡波局部放电检测系统作为试验设备,其由振荡波单元、测控主机、外部安全控制盒与标准脉冲校准器等构成,其性能指标如表 2 所示。

表 2 HDDAC-60 振荡波局部放电检测系统性能指标表

参数名称	参数值
电缆电压等级/kV	35
供电电源/V	AC220
振荡频率/Hz	20~300
振荡波输出最大电压/kV	60
局部放电测量范围/nC	1~100
高压充电电流/mA	5
测试电缆长度/km	200~20 000

依据表 2 所示性能指标对 HDDAC-60 振荡波局部放电检测系统进行配置与调试,保障其稳定运行。

试验平台包括 1 台 10 kW/220/380 V 的变频电源,1 台 10 kVA/1.25 kV/0.4 kV 的激励变压器,3 节 50 H/22 kV/2 A 的高压电抗器。其中调频串联谐振原理如图 3 所示。试验中局部放电现象如图 4 所示。

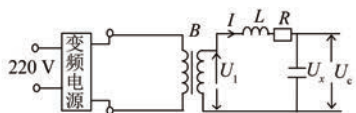


图 3 调频串联谐振原理



图 4 局部放电现象

当电缆的以下部件出现下列的局部放电超标情况,应视为缺陷情况:(1)电缆本体>300 pC(新交接 100 pC);(2)电缆终端>5 000 pC(新交接 3 000 pC);(3)电缆中接头>500 pC(新交接 300 pC)。

电缆振荡波局部放电超标异常情况的处理措施包括带电情况下采用超声波、地电波、红外等方

式进行状态监测,保供电期间缩短带电测试周期,必要时更换局部放电超标部件。

## 2.2 试验结果分析

依据上述试验准备内容进行高压交联电缆线路振荡波局部放电检测试验,通过局部放电信号检测效果与电缆线路故障定位情况验证所提方法的应用性能。提取典型局部放电信号的特征向量能量谱与熵谱,如图 5 所示。

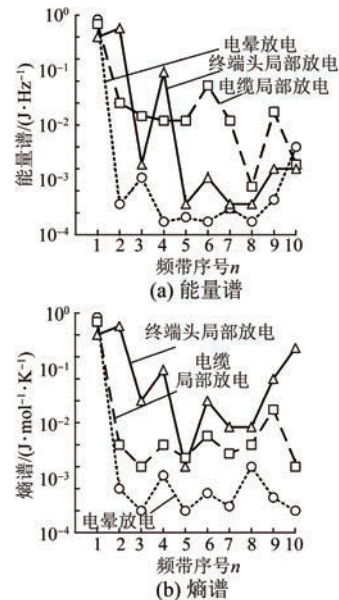


图 5 提取的局部放电信号能量谱与熵谱结果

由图 5 可知,本文提取的电缆局部放电信号能量谱处于  $10^{-3} \sim 1$  J/Hz。将上述数据作为训练样本进行局部放电信号检测。使所有样本同时训练,每个样本又包含从该样本往后的连续 LSTM 细胞单元样本,对所有特征样本进行多维度训练。

### 2.2.1 局部放电信号检测效果分析

局部放电信号检测效果直接关系到电缆线路缺陷的定位精度。试验选择局部放电信号识别准确度作为评价指标,计算式为

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (7)$$

式中:TP 与 TN 分别为正确识别的局部放电信号与非局部放电信号;FP 与 FN 分别为错误识别的局部放电信号与非局部放电信号。

通过试验获得所提的局部放电信号识别准确度如图 6 所示。对比方法为文献[16]中的 GIS 盆式绝缘子表面缺陷的局部放电检测方法,该方法

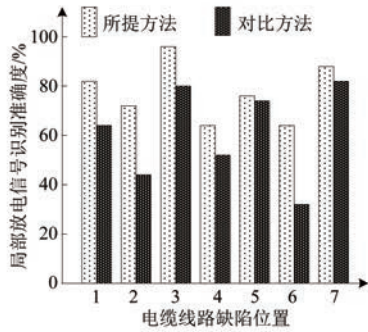


图6 局部放电信号识别准确度数据图

使用了脉冲电流法、特高频方法等多种局部放电检测方法,并通过光电效应验证了局部放电试验的结果,对盆式绝缘子表面缺陷的检测识别,以及绝缘子制造工艺的改进具有重要的参考意义。与对比方法相比,应用所提方法获得的局部放电信号识别准确度更高,证明了所提方法的局部放电信号检测效果更好。

### 2.2.2 电缆线路故障定位情况分析

通过试验获得的电缆线路故障定位情况如图7所示。

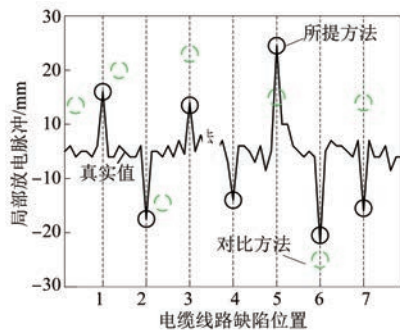


图7 电缆线路故障定位情况示意图

如图7所示,实线圆圈代表本文所提方法的电缆线路故障定位结果,虚线圆圈代表对比方法的电缆线路故障定位结果。与给定电缆线路缺陷位置进行对比可知,应用所提方法获得的缺陷定位位置与给定位置保持一致,而对比方法只识别出缺陷位置在3、5、6、7,错误率达42.86%,由此可见,本文所提方法的电缆线路缺陷定位精度更高。

上述试验结果表明,本文所提方法获得的局部放电信号识别准确度更高,电缆线路缺陷定位精度更高,充分证实了该方法的有效性与可行性。

## 3 结 语

为了提高线路振荡波局部放电检测的准确度,本文引入 LSTM 网络算法设计了新型高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法。试验结果表明本文所提方法提高了局部放电信号识别准确度与电缆线路缺陷定位精度,能够为电缆线路测试提供更有效的方法支撑,也为局部放电检测相关研究提供了一定的理论参考。

### 【参考文献】

[ 1 ] 李巍巍,白欢,吴惟庆,等. 基于振荡波局部放电检测的电力电缆绝缘老化状态评价与故障定位[J]. 电测与仪表,2021,58(9): 147.

[ 2 ] 张若兵,金森,杜钢. 基于 EMD 与 DTW 算法的振荡波下电缆局部放电定位方法[J]. 高电压技术,2020,46(1): 273.

[ 3 ] 王庆华,卢雨欣,沈谢林,等. 10 kV 电缆测试用 DC/AC 充电型振荡波系统研究[J]. 电力电子技术,2021,55(6): 52.

[ 4 ] SAWAI S, NARAHARA K. Submillimeter-wave multiphase oscillation using traveling pulses in a resonant-tunneling diode-oscillator lattice[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves,2021,42(4): 426.

[ 5 ] 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.

[ 6 ] 唐玉龙,孙丽华. 局部放电检测法在高压变频机组绝缘检测中的应用[J]. 电气传动,2021,51(19): 77.

[ 7 ] 苑吉河,杨阳,张曦,等. 基于材料和电场分布的不同电缆缺陷的震荡波表征效果研究[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(4): 42.

[ 8 ] 陈凌,王京保,刘睿,等. 基于振荡波的干式空心电抗器绝缘检测系统[J]. 沈阳工业大学学报,2020,42(6): 601.

[ 9 ] 李宾宾,刘成,田宇,等. GIS 局部放电检测用阿基米德螺旋天线设计研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(2): 175.

[ 10 ] 庞丹,王朝斌,王晓岩,等. 内置 SAW 传感器的高压电缆接头温度在线监测[J]. 压电与声光,2021,43(4): 505.

(下转第 80 页)