

基于多能量 X 射线图像融合的电缆接头状态判断方法

余世文¹, 石钟锋², 程宏波²

(1. 湖北省铁路集团汉十城际铁路有限责任公司, 武汉 430062;

2. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘要: 电缆接头内部结构复杂、组成材质性质各异,为利用 X 射线实现电缆接头内部全部结构的清晰呈现,提出了一种基于多能量 X 射线图像融合的电缆接头状态判断方法。采用引导滤波将电缆接头 X 检测图像进行多尺度分解,将多能量 X 射线图像分为细节层和基础层,利用多尺度梯度函数生成细节层的显著性映射,归一化后得到细节层的融合权重图,基于曝光度的偏离程度分配不同基础层的融合权重,对基础层和细节层分别进行加权融合得到重构后的融合图像,将融合后的待检图像与标准图像进行差分计算来判断缺陷的位置。试验结果表明,采用分解后再融合的方法,所得融合图像在方差、信息熵、平均梯度与空间频率几个指标方面有明显的优势;与单一检测图像相比,多能量 X 射线融合图像能将电缆接头内部不同结构在一张图像上呈现的更清晰更完整,有利于电缆接头缺陷的精确识别和定位。

关键词: 电缆接头; X 射线; 图像融合; 引导滤波; 状态判断

Condition Judgement Method of Cable Joints Based on Multi Energy X-ray Image Fusion

YU Shiwen¹, SHI Zhongfeng², CHENG Hongbo²

(1. Hubei Railway Group Hanshi Intercity Railway Co., Ltd., Wuhan 430062, China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University,
Nanchang 330013, China)

Abstract: The cable joints is complex in internal structure and the composition of the material properties are different. In order to use X-ray to realize a clear presentation of all the internal structure of cable joints, a condition judgement method of cable joints based on multi-energy X-ray image fusion is proposed. The guided filtering is used to decompose the X-ray inspection image of cable joints into multi-scale and the multi-energy X-ray image is divided into both detail layer and base layer. The multi-scale gradient function is used to generate the significant mapping of the detail layer, and the fusion weight map of the detail layer is obtained after normalization, the fusion weights of different base layers are assigned based on the degree of deviation from the exposure degree, and the weighted fusion is performed on the base and detail layers to get the reconstructed fusion image. Moreover, the fused image to be examined is differentiated from the standard image to judge the location of defects. The test results show that the fusion image obtained by the method of decomposition and then fusion has better advantages in variance, information entropy, average gradient and spatial frequency. The multi-energy X-ray fusion image, compared with the single detection image, can present the different internal structures of the cable joints in a clearer and more complete image, which is conducive to the accurate identification and localization of the defects in the cable joints.

Keywords: cable joints; X-ray; image fusion; guiding filtering; status judgement

0 引言

电缆是牵引供电系统传输和分配电能的主要设备,受制作工艺、安装质量、敷设环境以及运行过程中电、热、磁等效应的影响,电缆会产生各种缺陷,导致供电事故的发生,给设备和行车带来巨大安全隐患^[1]。电缆接头结构复杂且工作环境恶劣,大部分电缆线路故障是由电缆接头引起的,电缆接头成为电缆中的薄弱环节^[2]。电缆接头故障将导致线路停电,严重时甚至会引起起火爆炸,影响牵引供电系统的安全运行。因此,准确判断电缆接头状态有利于保证电缆的正常运行,提高牵引供电的可靠性。

目前对电缆接头早期缺陷缺乏有效的检测手段,通常依据故障发生时伴随的电、光、热等物理现象进行检测,包括局部放电检测、温度监测、超声波检测等几种。当电缆接头出现绝缘缺陷时,其内部电场将发生畸变,容易引发局部放电现象^[3]。杜清提出一种利用现有射频传感器对电缆接头进行非侵入式局部放电检测的方法,验证了该方法可用于电缆接头缺陷检测^[4];杜志超通过搭建高压电缆局部放电检测系统对电缆放电现象进行检测分析,为铁路高压电缆局部放电超声信号检测与预警提供有效手段^[5];王晓康等结合多个电缆接头局放信号,并结合深度学习算法,提升了对不同缺陷的识别准确率^[6]。电缆接头缺陷会使接头处温度升高,众多学者通过对电缆接头的温度进行监测来评估接头的绝缘状态^[7]。李剑采用红外测温结合无线通信技术,从温度监测与数据传输两个方面对电缆接头进行设计,并探讨了其温升防火预警机制^[8];Zeng等研究了电缆接头的温度场分布,并开发了一种基于光纤光栅温度传感器的电缆接头温度监测系统^[9];贺毅等提出了铁道 27.5 kV 电缆接头芯温监测系统,可有效减少突发性的电缆事故^[10]。超声波检测具有速度快、灵敏度高及对人体无害等优点,广泛应用于工业检测^[11]。王梅林研究了电缆接头局部放电过程中超声波传播特性,开发了局部放电在线监测平台,实现了电缆接头运行状态的远程监测^[12];郭永玉利用超声实现了电缆中间接头多层结构定位检测,验证了超声对铅封进行定位检测的可行性^[13]。近年来,太赫兹检测技术开始应用于电气设备内部绝缘状态检测^[14]。杨栋等提出了一种结合太赫兹时域光谱成像技术与改进 YOLOv8 目标检测算法,实现了对电缆接头内部缺陷的精准检测,可有效识别电缆接头内部的类型及位置^[15]。上述方法,大多在故障发生时才能发现,属于故障后的被动处理,往往

会造成大面积、长时间的停电,且大多数情况下难以明确和追踪故障的真正原因。因此,迫切需要一种便捷有效的检测方法实现电缆接头缺陷尤其是早期内部缺陷的准确检测。

X 射线检测是一种有效的无损检测手段^[16],可以实现电缆接头早期缺陷的带电检测,结果形象直观。但由于电缆接头内部结构复杂、组成材质性质各异、不同部分等效厚度差异较大,单一检测图像无法体现电缆接头的完整信息。因此,本文提出一种基于多能量 X 射线图像融合的电缆接头状态判断方法,以实现电缆接头内部结构的完整呈现,提高电缆接头诊断的准确性。

1 电缆接头 X 射线检测图像的采集

X 射线具有较强的穿透性,由于被检测物体内部结构之间存在厚度和密度差异,X 射线穿过程中被吸收的量不同,剩余的 X 射线可在荧屏或 X 光片上呈现形成明暗不同的影像^[17]。

管电压对 X 射线检测结果有至关重要的影响,管电压的高低决定了 X 射线的穿透能力,管电压越高,X 射线的波长越短,能量越高,能够穿透更厚的物体或密度更大的材料^[18]。因此 X 射线检测图像的质量和管电压之间存在较强的关联,管电压过低射线能量不足,无法有效穿透材料,导致深层缺陷无法显现;过高的电压可能导致穿透过度,造成成像对比度的下降,影响缺陷的检测。射线源的强度与管电压关系为^[19]

$$H = \frac{E^2 C Z_i}{(hc)^2} \left(\frac{V}{12\,400} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: H 为射线源的强度; h 为普朗克常量; c 为光子速度; V 射线管电压; E 为 X 射线的能量; C 为常数; Z_i 为原子序数。

X 射线对不同材料的衰减特性是不同的。铜和钢铠对低能量 X 射线有一定衰减作用,但是对高能量 X 射线衰减作用不显著^[20];交联聚乙烯材料对低能量 X 射线衰减也不显著。

不同管电压下所测得的电缆接头 X 射线图像见图 1,从图 1 可以看到,在管电压低($V=80$ kV)的时候,密度较小的电缆绝缘层和屏蔽层被穿透,其结构显示的较为清楚,而密度较大的电缆铜芯和铜压接管则未被穿透,呈现黑色阴影,无法看清该部分结构;当电压升高时,密度大的电缆铜芯和铜压接管的结构逐步清晰,但密度较小的绝缘层和屏蔽层则逐渐曝光过度,当管电压升高到 $V=110$ kV 时,缆芯结构可清楚显示,但绝缘层和屏蔽层则几乎被完全穿透,呈现白色阴影。

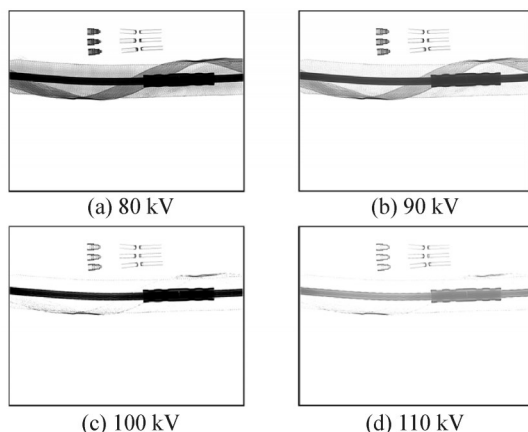


图1 不同电压下的采集图像
Fig. 1 Image acquisition under different voltages

因此,采用X射线进行电缆接头检测时,由于电缆接头结构及材料性质的多样性,单一管电压X射线检测图像将无法反映电缆接头内部完整的结构信息,要想实现对电缆接头内部结构的完整呈现,需要将不同管电压下获取的不同X射线图像结合起来,以实现全面、准确的诊断。

2 基于引导滤波的X射线检测图像融合

为将不同管电压下的X射线图像信息结合,需对每张图像先进行不同尺度的分解,以获取图像基础层和细节层的图像特征;然后通过梯度函数生成显著性映射并得到相应的权重图,可在每个尺度下将像素级图像互补信息转化为融合图像;考虑不同管电压下每张图像的曝光量不同,对不同曝光量的区域分配不同的权重,可得到曝光良好的基础层图像。最后,通过权重图加权融合基础层和细节层得到融合图像。

2.1 引导滤波多尺度分解

用引导滤波可对X检测图像进行多尺度分解,获得相应的基础层与细节层^[21]。假设 b^{n-1} 、 G^{n-1} 是第 $(n-1)$ 级的基础层和引导层,并且 r^n 、 ε^n 是第 n 级的邻域大小和调节参数,则可以将 G^{n-1} 作为引导图像来对 b^{n-1} 进行引导滤波,从而获得基础层 b^n 。细节层 d^n 可以由前一层基础层 b^{n-1} 与当前基础层 b^n 的差值来计算,计算公式为

$$b^{n-1} = GF(b^{n-1}, G^{n-1}, r^n, \varepsilon^n) \quad (2)$$

$$d^n = b^{n-1} - b^n \quad (3)$$

式中, n 为分解层数。

图像 I 的引导滤波分解流程见图2。使用引导滤波对 I_1 ($V=80$ kV)、 I_2 ($V=90$ kV)、 I_3 ($V=100$ kV)、 I_4 ($V=110$ kV)进行多尺度分解,得到细节层 D_1^k 、 D_2^k 、

D_3^k 、 D_4^k 和基础层 B_1^k 、 B_2^k 、 B_3^k 、 B_4^k ,当 $k=0$ 时的第一级细节层图像 D_1^1 、 D_2^1 、 D_3^1 、 D_4^1 见图3。

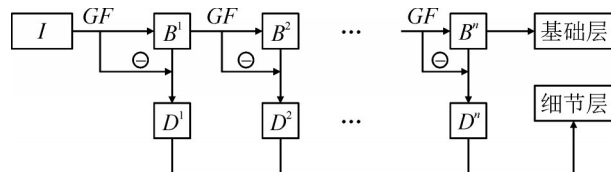


图2 图像 I 的引导滤波多尺度分解图
Fig. 2 Multi-scale decomposition diagram of guided filtering for image I

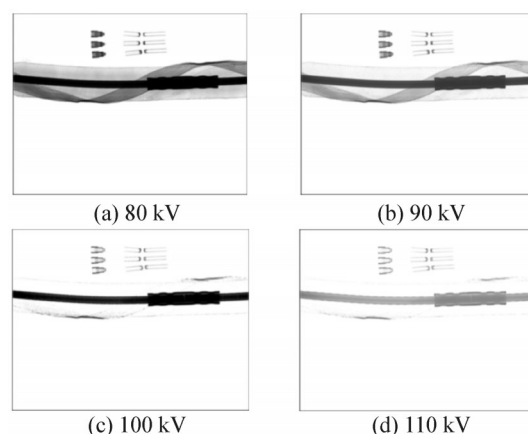


图3 第一级基础层图像
Fig. 3 Basic layer image of first level

从图3可以看到,经过第一级分解后的基础层图像体现电缆接头的大体轮廓信息,且不同电压下的图像结构的轮廓信息不同。另外,通过原图像与基础层进行像素相减可得到体现细节信息的细节层。

2.2 融合策略

2.2.1 细节层融合策略

视觉显著性可在不同尺度上提取重要细节信息,采用多尺度梯度函数生成显著性映射,并将显著图归一化后得到融合的权重图,以权重图为依据进行加权组合可得到最终融合后的细节层图像^[22]。

将多尺度分解得到的细节层 D_1^k 、 D_2^k 、 D_3^k 、 D_4^k 的幅度取绝对值获得视觉显著性 H_1^k 、 H_2^k 、 H_3^k 、 H_4^k ,然后对 H_1^k 、 H_2^k 、 H_3^k 、 H_4^k 进行归一化得到细节层融合权重系数,公式为

$$H_1^k = |D_1^k|, H_2^k = |D_2^k|, H_3^k = |D_3^k|, H_4^k = |D_4^k| \quad (4)$$

$$W_1^k = \frac{H_1^k}{\sum_{i=1}^4 H_i^k}, W_2^k = \frac{H_2^k}{\sum_{i=1}^4 H_i^k}, W_3^k = \frac{H_3^k}{\sum_{i=1}^4 H_i^k}, W_4^k = \frac{H_4^k}{\sum_{i=1}^4 H_i^k} \quad (5)$$

$k=0$ 的第一级显著图见图4,表现了电缆接头中最易引起视觉注意的结构,归一化后得到对应的第一级权重图见图5,是后续图像融合时权重分配的依据。

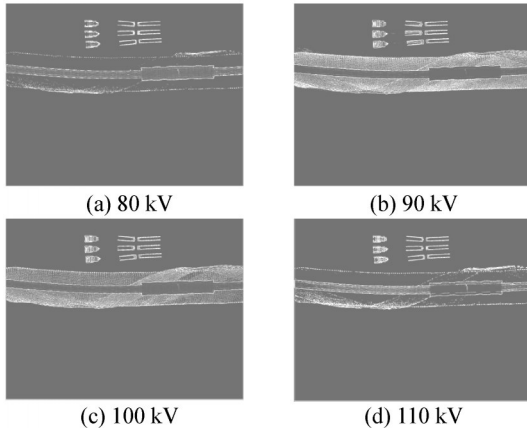


图4 显著图
Fig. 4 Saliency map

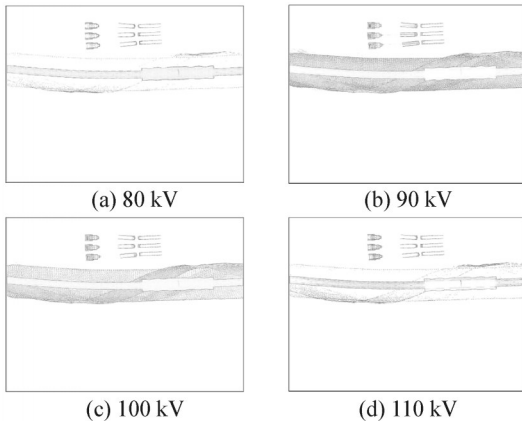


图5 权重图
Fig. 5 Weight map

利用权重图对每一层的细节图像进行加权组合,得到最终融合后的细节层,公式为

$$D_F^k = W_1^k D_1^k + W_2^k D_2^k + W_4^k D_4^k \quad (6)$$

$$D_F = \sum_{k=1}^4 D_F^k \quad (7)$$

2.2.2 基础层融合策略

由图1可以看出,由于电缆接头内部不同材料对X射线的衰减不同,导致在同一幅X射线图像中存在过曝光和欠曝光的区域。因此,可以根据过曝光、欠曝光和正常曝光区域的像素分配不同的权重,以平衡不同X射线能量的曝光度差异,确保最终融合后的图像整体曝光适中、结构特征清晰。给予归一化值在0.5附近即正常曝光的像素较高的权重,给予归一化值与0.5偏离较大的像素较低的权重,利用多能量X射线图像曝光的互补性得到一张曝光适度的基础层融合图像。

先计算序列X射线图像基础层的归一化像素平均值 $\bar{I}$,其中 $\bar{I} \in [0, 1]$ 。当 $\bar{I}$ 小于0.5时代表图像整体偏暗,对应的曝光权重计算公式为

$$w_i(i,j) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{I_i(i,j)}{0.3} \right)^2, & I_i(i,j) \in (0, 0.3) \\ 1 - \left(\frac{I_i(i,j) - 0.5}{0.2} \right)^2, & I_i(i,j) \in (0.3, 0.7) \\ 1 - \left(\frac{1 - I_i(i,j)}{0.5} \right)^2, & I_i(i,j) \in (0.7, 1) \end{cases} \quad (8)$$

当 $\bar{I}$ 大于0.5时代表图像整体偏亮,对应的曝光权重计算公式为

$$w_i(i,j) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{I_i(i,j)}{0.5} \right)^2, & I_i(i,j) \in (0, 0.3) \\ 1 - \left(\frac{I_i(i,j) - 0.5}{0.2} \right)^2, & I_i(i,j) \in (0.3, 0.7) \\ 1 - \left(\frac{1 - I_i(i,j)}{0.3} \right)^2, & I_i(i,j) \in (0.7, 1) \end{cases} \quad (9)$$

将序列图像的基础层,根据曝光权重进行线性组合得最终基础层 B_F ,公式为

$$B_F = \sum_{k=1}^i w_k I_k \quad (10)$$

通过上述步骤得到X射线图像的融合细节层和融合基础层,通过对融合后的细节层 D_F 和基础层 B_F 加权融合重构得到融合图像 I_F ,公式为

$$I_F = B_F + D_F \quad (11)$$

3 电缆接头缺陷的诊断

融合后的X射线图像能够体现出电缆接头较为完整的内部结构信息,为对被测电缆接头的状态进行判断,可以将被测电缆图像与标准电缆接头的图像进行比对,从而实现电缆缺陷的自动检测。将融合后的被测图像与标准图像通过差分法进行比对,计算两个图像在像素上的差异,得到差分图像,分析差分图像的像素变化,判断被测图像与标准图像是否存在差异,从而检测缺陷。

设融合后图像为 I_F ,标准图像为 I_S ,将 I_F 和 I_S 的像素值进行逐像素的减法运算,得到一张差分图像,公式为

$$Diff(x,y) = |I_F(x,y) - I_S(x,y)| \quad (12)$$

式中: $I_F(x,y)$ 和 $I_S(x,y)$ 分别是融合图像和标准图像在像素点 (x,y) 处的灰度值。得到的差分图像中,每个像素值表示两个图像在该像素点处的差异。

应用阈值将差分图像转化为二值图像,突出显示差异区域,公式为

$$B(x,y)=\begin{cases} 255, & Diff(x,y)\geq T \\ 0, & Diff(x,y)<T \end{cases} \quad (13)$$

式中: T 是预设的阈值,二值化图像中,像素(255)代表存在显著差异的区域,像素(0)表示没有差异的区域。最后,对差分图像进行分析,寻找差异较大的区域。可以通过统计差异区域的面积、形状等信息来判断缺陷的性质和严重程度。

4 试验结果分析

为验证所提算法的有效性,将其与其他3种图像融合方法进行对比。本文算法融合图像见图6。

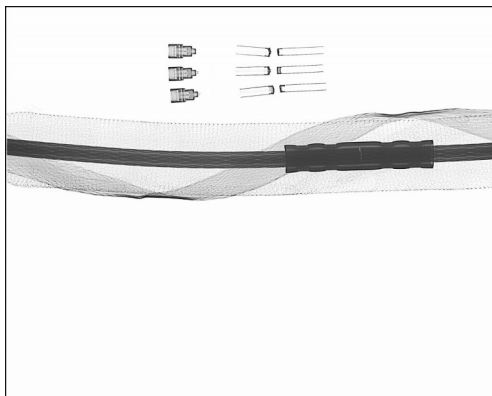


图6 本文算法融合图像
Fig. 6 Fusion image by algorithm in this paper

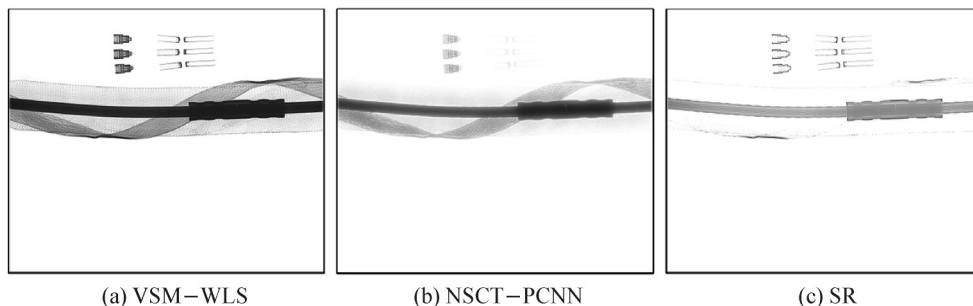


图7 其他不同算法融合图像
Fig. 7 Fusion of images using other different algorithms

对融合后图像的特定指标进行分数化评价,采用方差(variance, VAR)、信息熵(entropy, EN)、平均梯度(average gradient, AG)、空间频率(spatial frequency, SF)来反映图像的边缘纹理、结构特征和信息能量。不同融合算法的评价指标值见表1。

表1 不同算法融合的评价指标值
Table 1 Evaluation index values of fused images using different algorithms

评价 指标	方法			
	VSM-WLS	NSCT-PCNN	SR	本文方法
VAR	66.167 5	69.482 1	63.428 7	70.849 5
EN	2.947 2	2.824 7	2.574 0	3.216 7
AG	5.582 7	5.824 7	5.280 6	6.002 1
SF	16.806 3	18.965 0	10.633 2	20.439 4

从融合图像可清晰的观察到电缆接头内部结构,包括绝缘层、电缆铜芯、压接管、钢铠带。在此基础上观察电缆接头是否存在绝缘层划伤、击穿、杂质以及钢铠带是否断裂等缺陷,也可判断到电缆铜芯与金属连接管压接情况。实现在一幅图像上观察所有结构的信息,提高电缆接头运行状态判断的准确性。

其他算法融合图像见图7。从图7可以看出,不同算法的融合效果不同,但均优于单一电压下的X射线图像。本文方法得到的融合图像,电缆接头的绝缘层、屏蔽层和导电层都能清晰地展示,细节部分也能清晰的呈现,融合效果较佳;基于加权最小二乘法的多尺度融合(VSM-WLS)^[23]对绝缘层的融合效果较好,但是铜导电层的清晰度较低,影响对导体运行情况的判断;基于非下采样轮廓波变换-脉冲耦合神经网络(NSCT-PCNN)^[24]的融合图像细节部分严重缺失,同时存在一些伪边缘;而基于稀疏表示(SR)^[25]的融合图像对导电层的融合效果较好,但是缺失绝缘层的细节。综上,本文融合算法在主观视觉效果上优于其他3种融合算法,能较好的解决在单一检测电压下往往无法完整呈现接头结构的全部信息的问题。

从表1可以看出,本文采用的融合方法4项评价指标值均优于其他3种方法,表明本文方法对不同能量X射线图像融合效果上均由于其他3种,所含信息更丰富,细节信息保留更多,图像质量较优。

5 结语

1)X射线单一检测图像无法清晰体现电缆接头内部完整的结构信息,将多能量X射线图像进行融合,能将电缆接头内部不同结构在一张图像上呈现的更清晰更完整,从而有利于电缆接头状态的准确判断。

2)利用引导滤波经多尺度分解后,可得到反映电缆接头主体结构特征的基础层和反映电缆细节

信息的细节层,根据曝光度和视觉显著性,将不同能量 X 射线图像的基础层和细节层加权融合,可得到包含完整结构信息的融合图像。

3)分解后再融合方法所得图像在方差、信息熵、平均梯度与空间频率几个指标上都有较好的优势,反映出本文方法融合后图像包含的结构信息更丰富,因而更有利于进行电缆接头的状态判断。

参考文献

- [1] 张泽辉,王凯金,周学影,等. 铁路 27.5 kV 电缆护层感应电压与接地电流监测系统研究[J]. 中国铁路, 2025(1): 148-155.
ZHANG Zehui, WANG Kaijin, ZHOU Xueying, et al. Research on induced voltage and grounding current monitoring system for 27.5 kV cable sheath in railway[J]. Chinese Railways, 2025(1): 148-155.
- [2] 李成祥,杜建,陈丹,等. 基于电磁脉冲成形技术的电缆接头压接装置的研制及实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2941-2950.
LI Chengxiang, DU Jian, CHEN Dan, et al. Development and experimental study of cable joint pressure connecting device based on the electromagnetic pulse forming technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2941-2950.
- [3] 沈位军. 面向中压配电电缆的多维状态评价体系研究[J]. 电力与能源, 2024, 45(5): 589-593.
SHEN Weijun. Research on multi-dimensional state evaluation system for medium-voltage distribution cables[J]. Power & Energy, 2024, 45(5): 589-593.
- [4] 杜清. 交联聚乙烯中间接头局部放电的射频检测研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [5] 杜志超. 高压电缆接头局部放电检测研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(Z2): 127-130.
DU Zhichao. Research on partial discharge detection of high voltage cable joints[J]. Electric Railway, 2023, 34(Z2): 127-130.
- [6] 王晓康,丁雷,何嘉斌,等. 基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障检测方法研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(3): 125-130.
WANG Xiaokang, DING Lei, HE Jiabin, et al. Research on cable joint fault detecting method based on deep learning fusion evidence theory[J]. Insulating Materials, 2025, 58(3): 125-130.
- [7] 鲁浩然. 多物理场耦合下单芯电缆中间接头压接缺陷及温度分布仿真分析[J]. 电工技术, 2024(22): 105-108.
LU Haoran. Simulation analysis of crimping defects and temperature distribution of multi-physics coupling single-core cable joints[J]. Electric Engineering, 2024(22): 105-108.
- [8] 李剑. 电力电缆接头温度检测及预警系统的设计[J]. 新型工业化, 2020, 10(6): 35-36.
LI Jian. Design of power cable joint temperature detection and early warning system[J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(6): 35-36.
- [9] ZENG H, JING C, ZHANG D, et al. Design of cable joint temperature monitoring system based on fiber bragg grating temperature sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2018(3): 225-235.
- [10] 贺毅,代文平,肖琨. 铁道 27.5 kV 电缆接头芯温监测系统方案研究[J]. 电气技术, 2020, 21(2): 114-118.
HE Yi, DAI Wenping, XIAO Kun. Research on the system scheme for core temperature monitoring of cable joints which used in electric railway[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(2): 114-118.
- [11] 胡晨旭. 核电厂一回路管座焊缝超声波检测仿真研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(2): 145-149.
HU Chenxu. Simulation research of ultrasonic inspection of primary tube seat weld in nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(2): 145-149.
- [12] 王梅林. 电缆接头局部放电超声传播分析与监测研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [13] 郭永玉,方春华,周固,等. 基于超声的高压电缆中间接头多层结构定位检测[J]. 现代电子技术, 2024, 47(18): 35-40.
GUO Yongyu, FANG Chunhua, ZHOU Gu, et al. Ultrasonic based multi-layer structure location detection of high-voltage cable intermediate joint[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(18): 35-40.
- [14] 李帅兵,李天耕,淡嘉豪,等. 电气设备复合绝缘结构的太赫兹无损检测综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 194-209.
LI Shuaibing, LI Tiangeng, DAN Jiahao, et al. Review of terahertz non-destructive testing of composite insulation structures for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 194-209.
- [15] 杨栋,宋文博,李帅兵,等. 基于改进 YOLOv8 的电缆复合绝缘结构内部缺陷太赫兹成像识别方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4142-4151.
YANG Dong, DUO Wenbo, LI Shuaibing, et al. Terahertz imaging recognition method for internal defects in cable composite insulation structure based on improved YOLOv8[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4142-4151.
- [16] 刘三伟,段肖力,黎刚,等. 高压电缆缓冲层缺陷数字 X 射线无损检测技术研究[J]. 湖南电力, 2020, 40(6): 18-21.
LIU Sanwei, DUAN Xiaoli, LI Gang, et al. Research on digital X-ray non-destructive testing technology of cable buffer layer defects[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(6): 18-21.
- [17] 刘斐,王风丽,王新,等. 基于双能 X 射线透射成像与能量色散衍射的物质分类与识别虚拟仿真实验[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(8): 35-40.

- LIU Fei, WANG Fengli, WANG Xin, et al. Virtual simulation experiment for classifying and identifying substances based on dual-energy X-ray imaging and energy dispersive x-ray diffraction[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(8): 35-40.
- [18] 程宇, 隋岩, 陈俊因, 等. 航空发动机小径管焊接质量数字射线检测工艺仿真与测试[J]. 焊接技术, 2024, 53(10): 29-33.
- CHENG Yu, SUI Yan, CHEN Junnan, et al. Simulation and test of digital X-ray inspection process for welding quality of aero engine small tube[J]. Welding Technology, 2024, 53(10): 29-33.
- [19] 杨帆. 基于X射线成像技术的耐张线夹检测系统设计与应用研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2018.
- [20] 刘睿, 于华伟, 祝倩, 等. X射线密度测井屏蔽体的蒙特卡罗模拟研究[J]. 核技术, 2024, 47(8): 8-14.
- LIU Rui, YU Huawei, ZHU Qian, et al. Monte carlo simulation analysis of X-ray density logging shields[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(8): 8-14.
- [21] 张慧, 韩新宁, 韩惠丽, 等. 基于引导滤波二尺度分解的红外与可见光图像融合[J]. 红外技术, 2023, 45(11): 1216-1222.
- ZHANG Hui, HAN Xinning, HAN Huili, et al. Two-scale image fusion of visible and infrared images based on guided filtering decomposition[J]. Infrared Technology, 2023, 45(11): 1216-1222.
- [22] BAVIRISETTI D P, XIAO Gang, ZHAO Junhao, et al. Multi-scale guided image and video fusion: a fast and efficient approach[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2019, 38(12): 5576-5605.
- [23] MA Jinlei, ZHOU Zhiqiang, WANG Bo, et al. Infrared and visible image fusion based on visual saliency map and weighted least square optimization[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 82(2): 8-17.
- [24] 贺林峰, 张晓敏, 武梅梅, 等. 基于非下采样轮廓波变换的中子/X射线图像融合算法研究[J]. 核科学与工程, 2021, 41(3): 662-674.
- HE Linfeng, ZHANG Xiaomin, WU Meimei, et al. Neutron and X-ray radiation images fusion method study based on NSCT[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(3): 662-674.
- [25] ZHAO Rongge, LIU Yi, ZHAO Zhe, et al. Multi-energy X-ray images fusion method based on fuzzy entropy and sparse representation for complex castings[J]. NDT & E International, 2021, 124: 102535.

作者简介:

余世文(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事铁路四电工程管理工作。

石钟锋(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备无损检测。E-mail: 1925506621@qq.com。

程宏波(1979—), 男, 教授, 研究方向为电力设备故障诊断。