

本文引用格式：钟飞,康铨潇,张国才,等.架空输电线压缩型耐张线夹接续故障分析及无损检测方法[J].自动化与信息工程, 2024,45(6):1-11.

ZHONG Fei, KANG Yixiao, ZHANG Guocai, et al. Joint failure analysis and non-destructive testing method for compressed strain clamps of overhead transmission lines[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(6):1-11.

架空输电线压缩型耐张线夹接续故障分析及无损检测方法

钟飞^{1,2} 康铨潇¹ 张国才³ 刘桂雄³

(1.广东粤电科试验检测技术有限公司, 广东 广州 510006

2.南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510006

3.华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要: 耐张线夹是架空输电线路中承载张力、承受电流的重要电力金具, 对其进行失效性能分析及无损检测非常重要。首先, 从行业标准规范入手, 详述压缩型耐张线夹的典型缺陷及压接质量评定项; 然后, 从理论计算与实验、计算数值模拟等方面阐述耐张线夹接续故障分析的研究进展, 并指出耐张线夹的机械性能、电气性能分析主要集中于单一失效机理分析, 较少涉及多物理场下的耐张线夹特征分析; 接着, 汇总耐张线夹4种无损检测方法; 最后, 提出耐张线夹无损检测值得进一步关注的研究方向。

关键词: 压缩型耐张线夹; 压接缺陷; 接续故障; 无损检测

中图分类号: TM206

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)06-0001-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.06.001

开放获取

Joint Failure Analysis and Non-destructive Testing Method for Compressed Strain Clamps of Overhead Transmission Lines

ZHONG Fei^{1,2} KANG Yixiao¹ ZHANG Guocai³ LIU Guixiong³

(1.Guangdong Yuedian Science and Testing Technology Co., Ltd., Guangzhou 510006, China

2.China Southern Power Grid Technology Co., Ltd., Guangzhou 510006, China

3.South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Strain clamps are important electrical fittings for carrying tension and current in overhead transmission lines, and it is crucial to conduct failure performance analysis and non-destructive testing on them. Firstly, starting from industry standards and specifications, describe the typical defects and crimping quality evaluation items of compressed strain clamps in detail; Then, the research progress of fault analysis of strain clamps connection is elaborated from the aspects of theoretical calculation, experiment, and numerical simulation. It is pointed out that the mechanical and electrical performance analysis of strain clamps mainly focuses on the analysis of a single failure mechanism, and rarely involves the analysis of the characteristics of strain clamps under multiple physical fields; Next, summarize four non-destructive testing methods for strain clamps; Finally, research directions worth further attention for non-destructive testing of strain clamps are proposed.

Keywords: compressed strain clamps; compression defects; joint failure; non-destructive testing

0 引言

耐张线夹作为架空输电线路的重要电力金具, 按其结构及安装方法可分为压缩型、螺栓型、楔型和预

绞式等类型。其中, 压缩型耐张线夹主要由铝管和钢锚组成, 通过施加压力使铝管和钢锚产生塑性变形, 从而确保耐张线夹与导线合为一体, 使大截面钢芯铝

绞线达到较大握力。耐张线夹在服役过程中不仅要承受张力、承载电流^[1-2]，还处于交替载荷、腐蚀等环境下，导致其易发生失效断线事故^[3-5]。为提升电力系统运行的安全性，国内外对耐张线夹的技术要求及压接工艺规范均有明确规定，如 ANSI/ASME PTC70—2009《接线夹额定值的性能试验代码》、GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》、GB/T 2317.4—2023《电力金具试验方法 第4部分：验收规则》、DL/T 757—2009《耐张线夹》、DL/T 5285—2018《输变电工程架空导线（800 mm²以下）及地线液压压接工艺规程》等^[6]。

1 耐张线夹典型缺陷

架空输电线路通常采用钢芯铝绞线输送电能。钢芯铝绞线综合了铝的轻质、高导电性^[7-8]及钢芯的高强度等特点，能够提供更大的张力、更小的垂度和更长的跨度。将钢芯铝绞线安装在输电塔上需使用耐张线夹进行压接^[9-12]。耐张线夹的压接结构如图1所示。

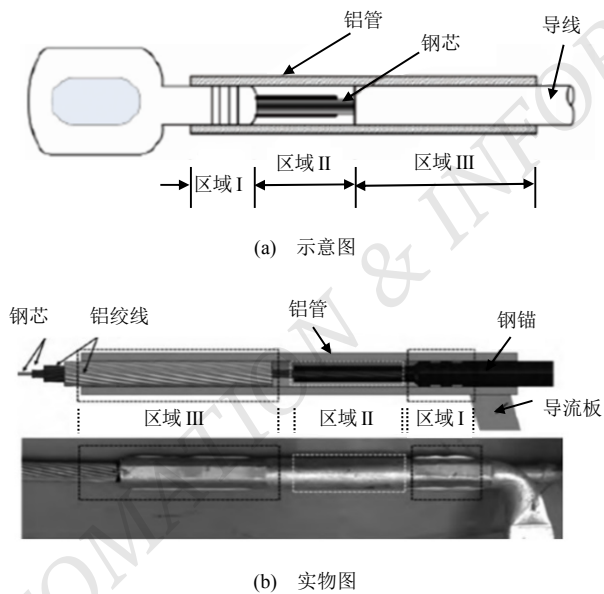
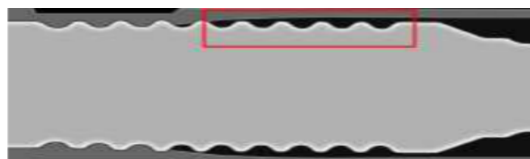
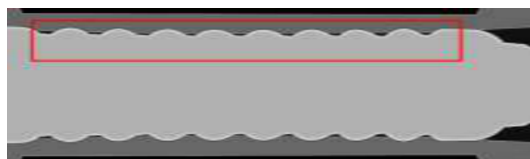


图1 耐张线夹的压接结构



(a) 漏压（钢锚凹槽漏压4-6槽）



(b) 欠压（钢锚凹槽压接处留有间隙）

图1中，耐张线夹压接主要涉及区域I（钢锚凹槽与铝管压接处）、区域II（导线钢芯插入钢锚内孔处）、区域III（导线侧铝管压接处）^[13-15]。

耐张线夹压接缺陷依据 T/CEC 526—2021《架空输电线路耐张线夹 X 射线检测技术导则》^[16]进行评定，压接质量评定项主要包括钢芯与钢锚压接、铝管压接、钢芯插入钢锚深度等12个（如表1所示）；压接典型缺陷主要包括漏压、欠压及少压等类型，如图2所示^[17]，其中(a)~(e)为未按压接标准，人为导致的压接缺陷；(f)~(h)为在自然环境下，耐张线夹由于长时间、大负荷工作引起的变形现象，以上缺陷均会导致输电线路故障。

表1 耐张线夹的压接质量评定项

序号	评定项描述	X 射线图像判断
1	钢芯与钢锚压接情况	钢芯、钢锚与铝管压接位置准确，压接到位。
2	铝管压接情况	铝管压接位置准确、压接到位
3	铝管弯曲情况	铝管未出现明显弯曲
4	钢芯插入钢锚深度	钢芯插入钢锚深度无明显未到位现象
5	钢锚旋入深度	钢锚螺纹旋入楔形夹夹座深度无明显未到位现象
6	钢锚与铝管相对位置	钢锚与铝管相对位置正常，无明显外露现象
7	铝绞线与钢锚端部相对位置	铝绞线与钢锚端部相对位置合适
8	钢锚形态	钢锚形态正常，无明显弯曲现象
9	铝绞线形态	铝绞线形态正常，无断股、散股及变形现象
10	钢芯形态	钢芯形态正常，无断股、散股及变形现象
11	毛刺、飞边、裂纹	钢锚压接后不存在毛刺、飞边、裂纹现象
12	异物	检测区域内无异物

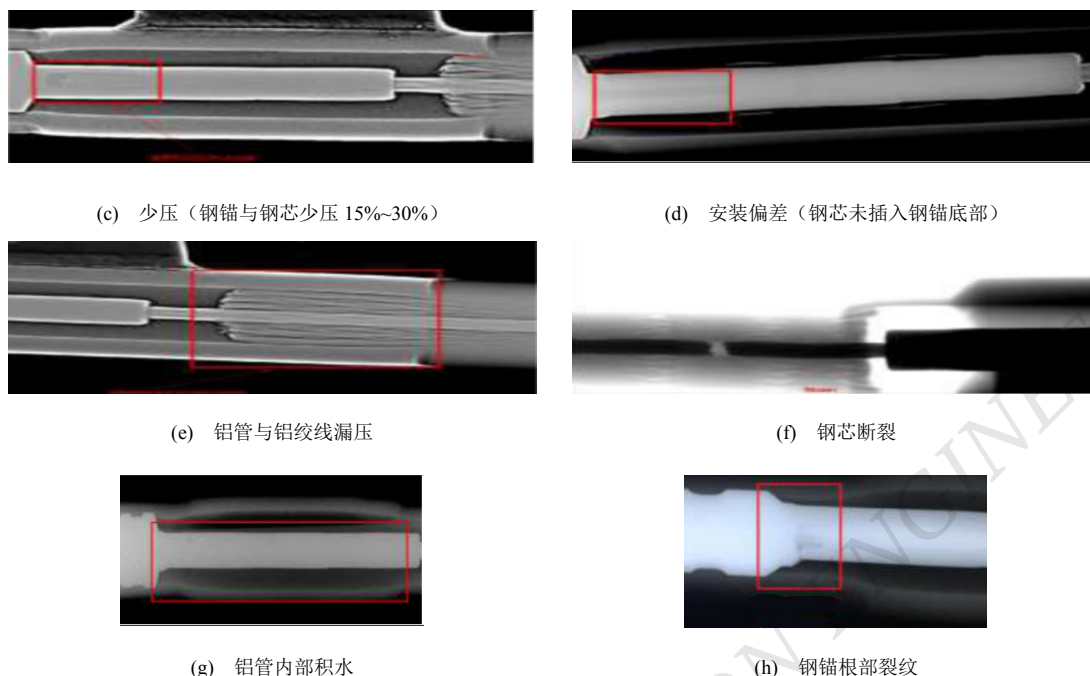


图2 耐张线夹的压接典型缺陷^[17]

2 耐张线夹接续故障分析的研究进展

耐张线夹接续故障分析包括机械性能、电气性能分析，主要采用理论计算与实验^[18-24]、计算数值模拟^[25]等方法。

2.1 接续故障机械性能分析

2.1.1 理论计算与实验方法

GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》规定，压缩型耐张线夹试验握力 F_S 、导线（地线）的额定拉断力 T_R 应满足 $F_S \geq 95\%T_R$ ，且计算握力 $F_J = T_R$ 。设导线的铝股拉断力、钢芯拉断力分别为 T_L 、 T_G ，铝线总截面积为 A_L ，铝线强度、镀锌钢线强度分别为 σ_L 、 A_G ，架空导线用钢线在标距 250 mm、伸长 1% 时，拉应力为 $\sigma_{G(1\%)}$ ，则 T_R 为^[26]

$$T_R = T_L + T_G = A_L \sigma_L + A_G \sigma_{G(1\%)} \quad (1)$$

耐张线夹握力设计需有足够的余量，因此钢锚凹槽压接剪切握力 T_1 、钢锚铝管压接握力 T_2 及铝管压接铝绞线握力 T_3 等需满足^[27-28]：

$$T_1 \geq T_L; T_2 \geq T_G; T_3 \geq T_L \quad (2)$$

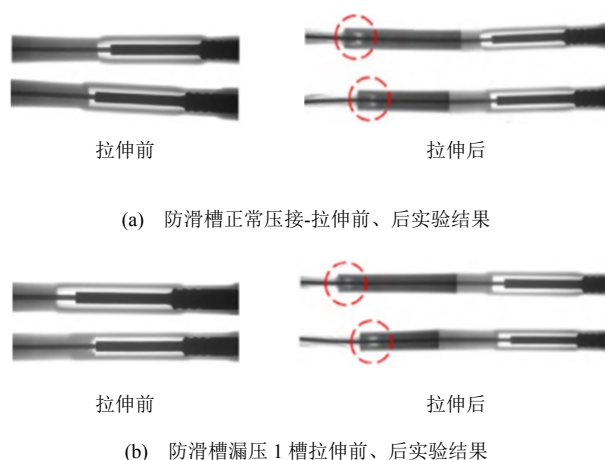
$$T_1 + T_2 + T_3 \geq T_L + T_G \quad (3)$$

2.1.1.1 钢锚凹槽压接剪切握力 T_1 分析

钢锚凹槽压接剪切握力 T_1 与凹槽数 n 成正比。设环形凹槽宽度为 b ，钢锚实杆外径为 d_4 ，铝管材料的剪切力为 τ_a ，则有

$$T_1 = n\pi d_4 b \tau_a = A_L \sigma_L \quad (4)$$

文献[28]开展了不同防滑槽的漏压程度压接-拉伸模拟实验。压接-拉伸模拟实验前、后 X 射线探伤照片对比图如图 3 所示。



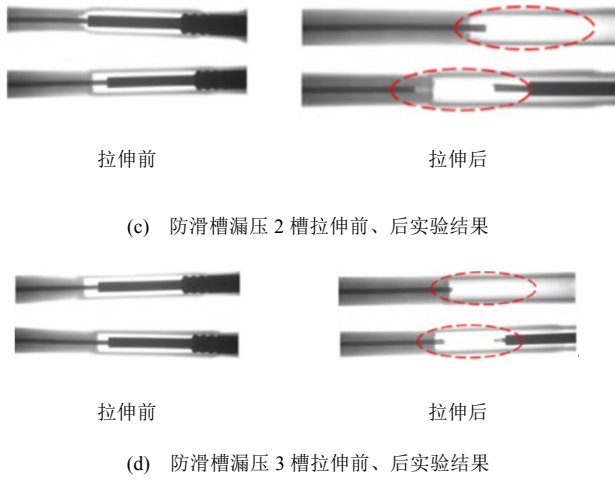


图3 压接-拉伸模拟实验前、后 X 射线探伤照片对比图^[28]

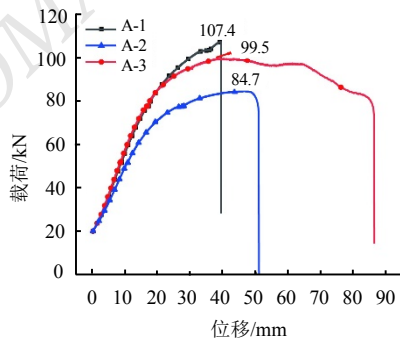
实验结果表明,随着防滑槽漏压程度的增加,耐张线夹的断裂位置从导线侧铝管端口附近的铝股转移到钢锚出口处的钢芯上。

2.1.1.2 钢锚铝管压接握力 T_2 分析

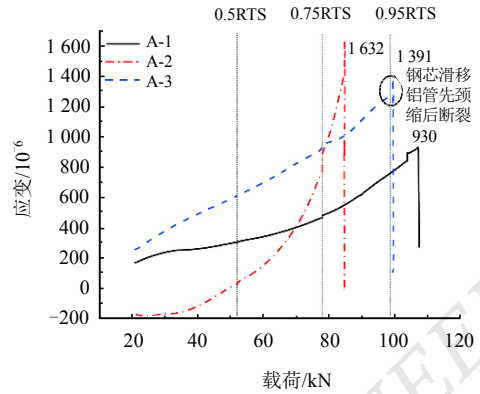
设铝管压接孔深(压接长度)为 L_g , 铝绞线的直径压缩系数为 K_μ , 铝绞线外径为 D_g 。因钢锚铝管压接握力 T_2 与压接后铝管内壁和镀锌钢绞线接触面积 $\pi(K_\mu D_g)L_g$ 、铝管内壁接触面上单位面积握力 σ_{fG} 成正比^[29-34], 故有

$$T_2 = \pi(K_\mu D_g)L_g \sigma_{fG} \geq T_G = A_G \sigma_G \Rightarrow L_g \geq \frac{A_G \sigma_G}{\pi(K_\mu D_g) \sigma_{fG}} \quad (5)$$

图4(a)、(b)分别为正常压接铝管 A-1、无压接铝管钢芯 A-2、铝管压接长度不足 A-3 的试件载荷-位移曲线和应变-载荷曲线。



(a) 载荷-位移曲线



(b) 应变-载荷曲线

图4 试件载荷-应变/位移曲线^[30]

由图4可知,当铝管压接孔深 L_g 不足时,会导致钢芯与钢锚穿管的接触面积减小,握力降低,致使钢芯从钢锚穿管抽出,增大了铝管的承受载荷^[35-37]。

2.1.1.3 铝管压接铝绞线握力 T_3 分析

在铝管与导线铝股压接时,令其压接长度为 L_l , 铝绞线外径为 D_l , 则有

$$T_3 = \pi(K_\mu D_l)L_l \sigma_{fL} \geq T_L = A_L \sigma_L \Rightarrow L_l \geq \frac{A_L \sigma_L}{\pi(K_\mu D_l) \sigma_{fL}} \quad (6)$$

电流从铝绞线流经铝管,故铝管与导线铝股压接长度 L_l 既影响握力,又影响耐张线夹的导通电阻^[18,38-39]。令导线载流量为 I_d , 面接触电流密度为 J_m , 则铝管压接长度 L_{ld} 为^[40]

$$L_{ld} \geq \frac{1.5I_d}{\pi(K_\mu D_l)J_m} \quad (7)$$

通常 $L_l \geq L_{ld}$ 。文献[40]通过对 1520 mm^2 大截面导体的耐张线夹、铝管进行设计及实验测试,建议取 $L_l = 6D_l$ 。

此外,文献[36]分析了拉伸强度与压痕深度之间的关系,并通过实验验证了其建立的抗拉强度数学模型的正确性。文献[35]对压接接头的抗拉强度、密封性、金相组织和接触电阻进行分析,指出连接器端子硬度、观察孔位置、线规与端子的匹配度等因素直接影响压接点的质量。有关文献提出,在耐张线夹压接

过程中，需考虑铝管压缩比 K_L ，如文献[41]指出日本钢芯铝绞线压缩型耐张线夹的铝管压缩比 $K_L \in [6.7\% \sim 10.0\%]$ ；采用 1050A 材质铝管时，文献[29]建议铝管压缩比 $K_L \in [6.3\% \sim 9.5\%]$ 。

2.1.2 计算数值模拟方法

计算数值模拟方法是耐张线夹压接过程的力学性能及缺陷影响研究的有效方法。文献[42]开展了压接力、压接有效宽度等参数对模锻压接力学性能影响的仿真研究，仿真结果表明：当压接力较小时，失效形式为铝绞线从耐张线夹中滑脱；当压接力逐渐增大时，失效形式转变为铝管断裂。文献[43]采用 ABQUS 软件对大截面导线铝绞线压接过程中可能出现的缺陷进行拉断应力仿真，得到了加载 0 ~ 1 300 MPa 压接压强时，铝绞线的拉断应力曲线。文献[44]结合理论力学、数值仿真、智能优化以及多学科软件协同仿真技术，研发了对多种连接工艺普适性较好的优化方法及自适应优化系统。文献[44]利用 Minitab 18 程序，优化 064 系列终端在压接过程中的拉伸机械性能。文献[45]建立了压缩拼接位置电缆的耐张线夹有限元模型，研究弹塑性和收缩问题，并对可压缩位置的整个压缩过程进行了模拟。文献[46]考虑了辐射、空气自然对流对散热的影响，采用三维多物理场力-电-热耦合的方法对 J 型线夹的应力分布、电流密度以及温度分布进行分析。文献[47]对电压、集磁器及放置位置等工艺参数进行仿真，研究电磁压接工艺参数的优化组合。文献[25]采用 Forge® 软件模拟压接操作，评估压接连接的机械强度、预测应力及应变分布，识别分析因压接不当而导致的缺陷。

2.2 接续故障电气性能分析

DL/T 757—2009《耐张线夹》规定，承受电气负荷的耐张线夹不应降低导线的导电性能，且压缩型耐张线夹的电阻 \leq 相同长度导线的电阻；耐张线夹导线接续处的温升 \leq 被接续导线的温升；耐张线夹的载流量 \geq 被安装导线的载流量。

通过分析压缩型耐张线夹的流通过路发现，铝管压接铝股与导流板处的接触电阻对耐张线夹的导线

电阻影响最大^[48-49]。接触电阻是接触面的导电斑点平均半径、材料导电率、材料表面微硬度及接触压力的函数。令粗糙表面接触压力为 P ，等效粗糙表面的粗糙度为 σ ，两粗糙表面微硬度中较小值为 H_c ，接触面名义接触面积为 A_a ，接触金属材料的电阻率分别为 ρ_1 、 ρ_2 ，互补误差函数为 $erfc(\cdot)$ ，则接触电阻 R_c 的计算公式为^[48]

$$R_c \approx 35.81 \frac{P \sigma^{0.48}}{H_c A_a} (\rho_1 + \rho_2) \cdot \left(\frac{H_c}{P} + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{H_c \pi}{P}} \right) \exp \left(\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{2P}{H_c} \right) \right) \quad (8)$$

在公式(8)的基础上，文献[1]、[50]等构建了耐张线夹的三维有限元模型，并进行电磁-热耦合温度场仿真分析。耐张线夹缺陷在导流板压接部位的温度场分布图、耐张线夹温度拟合曲线分别如图 5、6 所示。

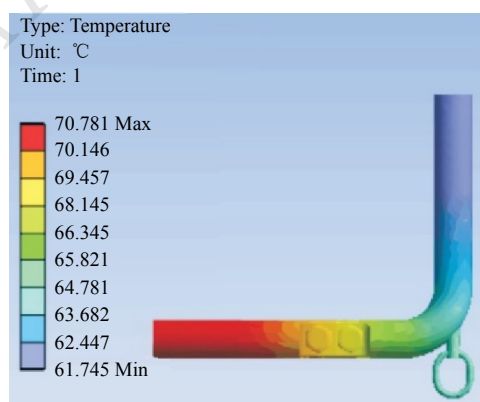


图 5 耐张线夹缺陷在导流板压接部位的温度场分布图^[50]

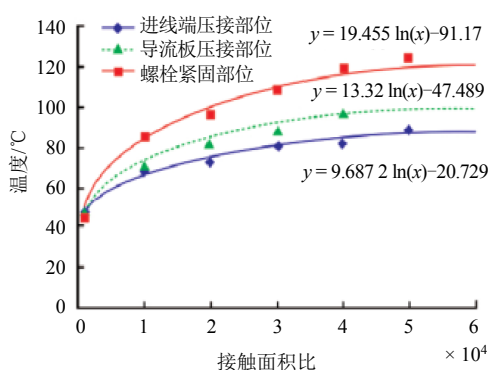


图 6 耐张线夹温度拟合曲线^[50]

由图 5、6 可以看出，导流板处接触电阻增大，对耐张线夹整体温度升高影响最大。

此外，文献[48]深入研究不同的压接力、压接点数、压接位置对压接电阻的影响。文献[31]采用一次、两次压接的方式分析压接质量，得出压力分布不平衡时，功效损失常发生在压接质量较好的一侧。

综上所述，目前对耐张线夹的机械性能、电气性能分析主要集中于单一失效机理分析，较少涉及多物理场下的耐张线夹特征分析，包括在各种缺陷下的应力分布、温度分布及服役过程中应力松弛、热应力对耐张线夹的性能影响等。同时，在评估耐张线夹的使用寿命时，还应考虑耐张线夹的时间维度应力变化对其性能的影响。

3 耐张线夹无损检测方法研究进展

耐张线夹无损检测的常用方法主要包括渗透、热红外成像、超声、X 射线等。

3.1 渗透检测

首先，在被检耐张线夹表面施涂含有荧光或着色染料的渗透液，在毛细作用下，渗透液渗入耐张线夹表面开口的缺陷中；然后，去除耐张线夹表面多余的渗透液；最后，在干燥后的耐张线夹表面施涂显像剂，放大缺陷，在一定光源下可检测出缺陷形态与分布状态^[51]。

设液体表面张力系数为 γ ，接触角为 θ ，液体密度为 ρ ，毛细管内壁半径为 r ，重力加速度为 g ，则渗透液渗透深度 h 为^[52]

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{r\rho g} \quad (9)$$

文献[53-54]根据 GB/T 2317.4—2023《电力金具试验方法 第 4 部分：验收规则》阐述了电力耐张线夹的渗透检测工艺流程，并介绍了如何依据该流程发现耐张线夹焊接部位的弧坑裂纹、气孔、咬边、未焊满等缺陷。图 7(a)、(b)分别为施涂渗透液、显像剂后的耐张线夹。



(a) 施涂渗透液后的耐张线夹



(b) 施涂显像剂后的耐张线夹

图 7 耐张线夹渗透检测^[54]

渗透检测方法虽然技术成熟，但仅限于表面开口的缺陷检测，无法用于深层的内部缺陷检测，且要求耐张线夹表面清洁。

3.2 热红外成像检测

热红外成像检测是利用自然界中温度高于绝对零度 (-273°C) 的物体都会辐射出红外线，且红外线载有物体特征信息的原理，判别被测目标的温度高低及热分布场^[55-56]。在耐张线夹中，导线通过液压工艺与夹体连接，跳线夹通过螺栓与夹体连接，这两个连接处如果接触不良均会导致电阻增加、局部发热^[1,37]。为此，文献[55]研究了一种基于热稳定性原理的在线监测技术，用于判断耐张线夹的温度是否异常。在耐张线夹稳态时，设其电流为 I ，端口处稳态温度为 t_c ，交流电阻为 $R_c(\theta_c)$ ，吸收的阳光辐射热、热辐射、环境对流散热分别为 W_S 、 W_R 、 W_F ，固有参数分别为 ζ 、 τ ，则有

$$t_c = \frac{W_R + W_F - W_S - I^2 \zeta I^r R_{20}}{I^2 \zeta I^r R_{20} \alpha} \quad (10)$$

利用热红外技术感知 t_c ，可监测耐张线夹的状态。

输电线巡检机器人采用热红外技术^[56]进行巡检。文献[57]利用机器人携带的红外热像仪对耐张线夹缺陷的发热区域进行传感感知与图像分割，通过目标占比、骨架提取、凸缺陷、引线位置、LBP 特征向量等特征，自动区分缺陷类型。热红外缺陷点定位结果如图 8 所示。

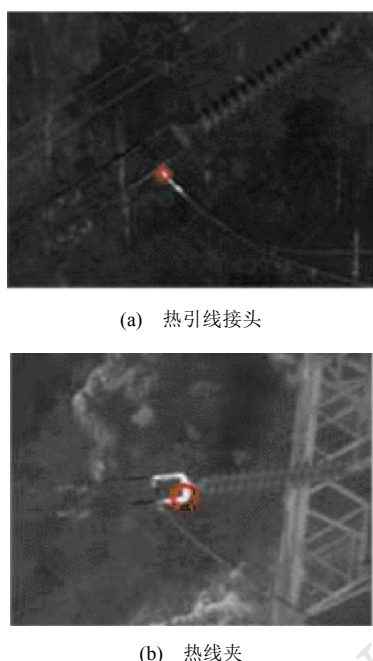


图 8 热红外缺陷点定位结果^[57]

热红外成像检测方法具有非接触的特点，可实现远距离的实时温度监测，但温度测量精度一般。

3.3 超声检测

超声检测是利用不同材料的声阻抗差异，以及声波在材料边界处产生的反射、透射，或超声在空气界面产生近似全反射的特性，对压接缺陷进行检测。通过检测压接区与未压接区的回波时间、幅值差^[58]及压接区内相控阵超声成像图中空气的大小与分布来检测漏压、欠压等缺陷^[27]。

文献[59-60]利用超声检测沿钢锚侧面压接铝外壳厚度的变化，定位钢锚凹槽数量，反映钢芯铝绞线的压接质量。文献[61]基于压接后 NY-630/45 型耐张线夹的内部结构，根据超声脉冲反射原理，通过理论分析、有限元仿真实验，探究超声检测耐张线夹压接

缺陷的有效性。超声在铝管铝线间空气界面的反射图、压接缺陷时域波形图分别如图 9、10 所示。

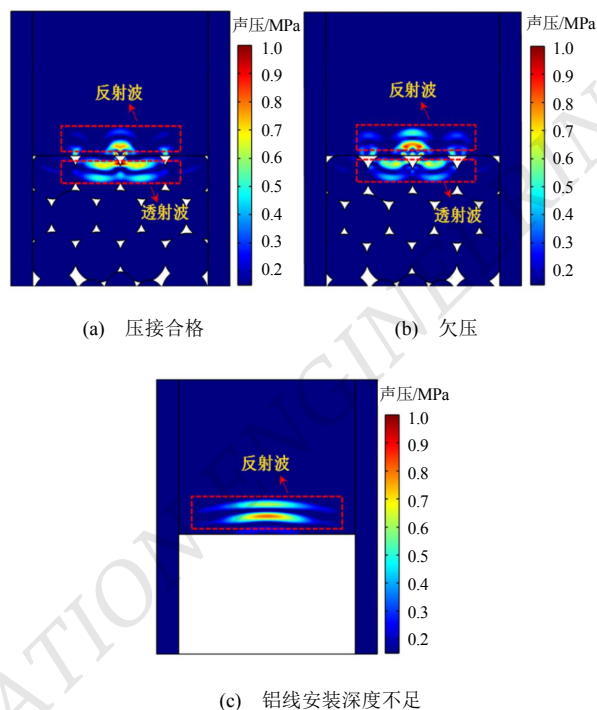


图 9 超声在铝管铝线间空气界面的反射图^[62]

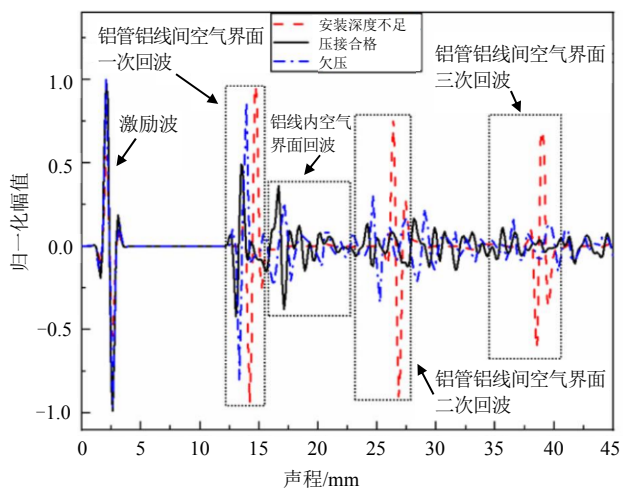


图 10 压接缺陷时域波形图^[62]

超声检测方法对漏压、欠压缺陷具有较高的检测精度，但对探头频率、操作技能等要求较高。

3.4 X 射线检测

X 射线检测基于材料对 X 射线的不同吸收特性，通过 X 射线穿透物体的影像来探测材料或工件的内部缺陷^[63]。文献[64]采用 X 射线检测方法，通过改变

钢锚与外铝套的压接部位、芯线与锚管（或芯线连接管）的压接尺寸、外管与导线（或中间套管）的压接尺寸，分析典型缺陷对输电线路配件压接质量的影响。

通常 X 射线检测在役耐张线夹的缺陷时需停电，并由人工将 X 射线成像板及射线机搬至耐张线夹位置处，耗时耗力，且存在作业危险及辐射危害^[65-66]。近年来，我国开展了无人机+X 射线检测设备的研究^[67-68]，有望在不停电作业下，实现耐张线夹的无损

检测^[66,69-70]。目前，X 射线检测主要依赖专业技术人员的经验，存在漏判、误判甚至传输图像造假的现象。利用人工智能技术，在复杂环境下开展无人机+X 射线耐张线夹的检测点精确定位与自动路径规划^[71-72]、缺陷智能识别与评价^[70,73]、图像传输可信增强^[74-75]等研究是未来的发展趋势。

4 种耐张线夹无损检测方法的原理、特点和应用场景汇总如表 2 所示。

表 2 4 种耐张线夹无损检测方法汇总表

检测方法	原理	特点	应用场景
渗透	毛细管现象	工艺简单、缺陷显示直观，但只能检测表面开口的缺陷，需停电检测	耐张线夹焊缝开口缺陷 ^[51-54]
热红外成像	热辐射	非接触式远距离带电检测，发热故障定位不精准	跳线夹螺栓不牢固 ^[1,37,55-57,76-77]
超声	声学弹性原理	压接内部缺陷显示直观，需停电检测，无法检测钢锚压接质量	防滑槽漏压、欠压 ^[27,58-62,78]
X 射线	材料的射线衰减不同	可以带电检测、内部缺陷显示直观、灵敏度高，缺陷定位精准，需克服电磁干扰	压接缺陷 ^[63-70,73,79-80]

渗透检测方法对表面开口裂纹较敏感，适用于离线检测耐张线夹导流板与铝管焊接处的开口裂纹。热红外成像检测方法适用于远距离耐张线夹在役带电接触不良检测。超声、X 射线检测方法均通过直观的图像来反映耐张线夹的内部压接质量，但超声检测需依赖声传递耦合剂，不适合耐张线夹在役带电检测。耐张线夹在役带电 X 射线检测，需提高抗干扰能力及自动化水平（如无人机检测点的精确定位、拍照等）。

4 结束语

耐张线夹是架空输电线路中承载张力、承受电流的重要电力金具，对其进行失效性能分析及无损检测非常重要。目前，对耐张线夹的机械性能、电气性能分析主要集中于单一失效机理分析；且体积小、质量轻的便携式 X 射线数字成像系统已成为耐张线夹在役检测的主要设备。以下研究方向值得关注：

1) 基于力-热-电多物理场分析的架空输电线耐张线夹特性研究，需考虑应力松弛、热应力、接触电阻等因素对耐张线夹机械性能、电气性能的影响，以及耐张线夹在时间维度上的应力变化对性能的影响，

寻求建立更接近真实的数值分析模型；研究基于力-热-电多物理场分析的耐张线夹在各种缺陷下的应力分布、温度场分布，可进一步为耐张线夹的健康评估提供理论支撑；

2) 无人机+人工智能的 X 射线耐张线夹在役带电检测是重要的发展方向，且需增强无人机系统的抗电磁干扰能力，并适应架空输电线复杂的布线环境，在检测过程中，结合人工智能技术实现自主识别导航、悬挂控制以及智能缺陷检测与分级；

3) 研究含可见光、热红外、X 射线检测特征的多模态人工智能算法，是提高耐张线夹缺陷检测准确性的有效途径。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

[1] DONG X, QU F, LI Y, et al. Experimental analysis of temperature distribution in high-voltage strain clamp[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applica-

- tions of Dielectric Materials (ICPADM). IEEE, 2018:829-832.
- [2] LI J X, MCCLURE G, WANG S H. Ensuring the structural safety of overhead transmission lines by design [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2021,34(3):147-152.
- [3] XU C, LI Q, ZHOU Q, et al. Power line-guided automatic electric transmission line inspection system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 2022,71:1-18.
- [4] ROSAS-CASALS M, SOLE R. Analysis of major failures in Europe's power grid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011,33(3):805-808.
- [5] CONGRESS U S. Office of Technology Assessment. Physical vulnerability of electric system to natural disasters and sabotage [R]. OTA-E-453, Washington, DC: US Government Printing Office, 1990.
- [6] 中国电力企业联合会. DL/T 5285—2018 输变电工程架空导线(800 mm² 以下)及地线液压压接工艺规程[S/OL]. [2024-10-21]. <https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/bookpdf/probation?SiteID=1&bookID=152739>.
- [7] YANG J, XIONG H, YAN Z, et al. Variation law of equivalent bending stiffness of steel-cored aluminum stranded wire under bending [C]/IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021,676(1):012035.
- [8] GUO T. Research on X-ray detection technology and image processing technology of electrical equipment [J]. North China Electric Power University, 2013,13(1):77-89.
- [9] ZHOU C, WEI C, WANG W. A new detection method based on magnetic leakage theory and BP neural network for broken steel strands in ACSR conductor [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20):19620-19634.
- [10] THRASH F. Transmission conductors—A review of the design and selection criteria [J]. Tech. Support Artic. Southwire Company, 2014,23 (12):90-96.
- [11] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Evaluation of tensile strength of ACSR conductors based on test data for individual strands [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 22(1): 627-633.
- [12] DRURY M D. The effect of prestressing on the inelastic (creep) behaviour of Australian made bare overhead conductors [J]. Engineering, Materials Science,1993,13(3):100-112.
- [13] 杨帆,曾林平,马永翔,等. 架空输电线路耐张线夹 X 射线检测与分析[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2018,34(1): 29-33.
- [14] OMRANI A, LANGLOIS S, VAN DYKE P, et al. Fretting fatigue life assessment of overhead conductors using a clamp/conductor numerical model and biaxial fretting fatigue tests on individual wires [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021,44(6):1498-1514.
- [15] LI H, XIE L, WANG X, et al. A comparative study on the detection of tension clamp DR and phased array for transmission line[C]/Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1635(1): 012098.
- [16] 中国电力企业联合会.T/CEC 526—2021 架空输电线路耐张线夹 X 射线检测技术导则[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [17] 国家电网有限公司. Q/GDW 11793—2017 输电线路金具压接质量 X 射线检测技术导则[S/OL]. [2024-10-21]. <https://www.doc88.com/p-6863842260049.html?s=like&id=5>.
- [18] LIU W, CAO X, HU Y, et al. Failure analysis of the strain clamp steel anchor corrosion of a 500 kV transmission line[C]/E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021,252: 02032.
- [19] 刘继,刘纯,熊亮,等.500 kV 输电线路耐张线夹钢锚断裂分析[J].上海电力,2010,23(4):264-266.
- [20] 朱迪锋,吴坤祥,许杨勇.超特高压输电线路耐张线夹新缺陷分析与解决措施[J].内蒙古电力技术,2017,35(5):57-60.
- [21] 王夫成.高压输电耐张线夹腐蚀损伤机理研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [22] 无损检测 NDT.射线检测助力三跨输电线路耐张线夹缺陷量化统计分析[EB/OL]. [2024-10-21]. <https://www.ccnta.cn/article/6725.html>.
- [23] 徐望圣,孙志林,谢亿,等.500 kV 输电线路耐张线夹钢锚断裂分析[J].矿冶工程,2020,40(2):144-146;153.
- [24] 杨思元,刘程.输电线路耐张线夹压接工艺检测系统试验研究[J].中国金属通报,2021(10):175-176.
- [25] MOCELLIN K, PETITPREZ M. Experimental and numerical analysis of electrical contact crimping to predict mechanical strength [J]. Procedia Engineering, 2014, 81 (C):2018-2023.
- [26] FENG L, LI M-Z, LIU L, et al. Study on completed fittings of 1520 mm² large section conductors [J]. Energy Procedia, 2017, 107:284-290.
- [27] SUN M, TAN C, ZHANG C, et al. Analysis of strain clamp failure on 500 kV transmission line [J]. Journal of Materials Science & Chemical Engineering, 2018,6(4):47-56.
- [28] 陈家慧,王方强,兰贵天,等.耐张线夹防滑槽漏压的失效分析与机理研究[J].热加工工艺,2022,51(12):146-150;155.
- [29] GOUDREAU S, LÉVESQUE F, CARDOU A, et al. Strain measurements on ACSR conductors during fatigue tests III—Strains related to support geometry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010,25(4):3007-3016.

- [30] LI J, BIAN M, LIANG S, et al. Experimental study of strain clamps crimped under unbalanced condition[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020,1650(2): 022028.
- [31] OCOLEANU C-F, CIVIDJIAN G, MANOLEA G. Solutions for quality pre-control of crimp contacts used in electric power systems and electrical machines[C]//3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA). IEEE, 2014: 1-6.
- [32] SEEFRIED J, GLÄBEL T, ZÜRIN M, et al. Evaluation of monitoring approaches for the ultrasonic crimping process of tubular cable lugs[C]//2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2017:1-6.
- [33] 骆国平,章继高. 并沟线夹可靠性研究[J]. 高压电器,2000, 36(1):31-34.
- [34] 肖贵乾. 冲压连接工艺力学性能优化理论及其自适应优化系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [35] CHEN Y, ZHANG M, CAO R, et al. Reliability study on crimping joint of copper-clad aluminum wire cable in spacecraft[C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). IEEE, 2020:1-5.
- [36] LI P, LIU G, FAN J, et al. Mathematical model for the tensile strength of the crimping assembly of aviation wiring harness end [J]. Scientific Reports, 2021,11(1):17868.
- [37] LIU R, HU X, ZHANG H, et al. Research on detection technology of wire clamp on overhead lines [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 872-875.
- [38] MEINERS M, MAYR A, KUHN M, et al. Towards an inline quality monitoring for crimping processes utilizing machine learning techniques [C]//2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2020:1-6.
- [39] 朱登杰,赵林杰,李昊,等. 耐张线夹失效过程和传力特性[J]. 南方电网技术,2022,16(7):61-66.
- [40] WILLIAMS D M, RANGE M E, PASCUCCI V C, et al. Forensic analysis of thermally stressed crimp connections[C]//2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). IEEE, 2015:331-337.
- [41] LARIN S, LARINA M, NUZHIDIN G. Analysis of the stress state of cylindrical workpieces during pipe end crimping with wall thinning[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1901(1).
- [42] 刘光辉,杨晓辉,叶中飞,等. 输电线路耐张线夹模锻压接质量分析及实验研究[J]. 热加工工艺,2023,52(3):106-111;119.
- [43] 董晓虎,程绳,涂天成,等. 大截面钢芯铝绞线导线压接拉断仿真分析[J]. 电子测量技术,2021,44(4):62-69.
- [44] JONGWUTTANARUK K, THAVORNWAT C. Optimization of mechanical crimping in the terminal crimping process using a response surface methodology [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022(1):6508289.
- [45] WANG Z Q, LI J, YANG W G, et al. The finite element analysis on the compression splicing position of strain clamp in guy tower [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3571(680):249-253.
- [46] 吴勤斌,马冬二,邹德华,等. 基于多物理场耦合的J型线夹仿真分析[J]. 南方电网技术, 2021,15(5):115-121.
- [47] 韩宏文,冉洋,高雷. 接线端子电磁脉冲压接工艺仿真及验证[J]. 激光杂志,2020,41(10):111-116.
- [48] MOHD R, HUZAINIE S, AHMAD B. Study of cable crimping factors affecting contact resistance of medium voltage cable ferrule and lug [J]. [s.n.], 2013:1017.
- [49] 李辉,王晓,赖伟,等. 压接型IGBT 器件接触电阻计算及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(15):5320-5329.
- [50] 马小敏,范松海,毕茂强,等. 一种基于温升监测的输电线路耐张线夹缺陷智能诊断方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(5):207-213.
- [51] 张鸿武,冯楠楠,刘蕊,等. 核电站主变压器设备线夹断裂原因分析[J]. 机械强度,2022,44(5):1101-1106.
- [52] LI Z, MENG Z. A review of the radio frequency non-destructive testing for carbon-fibre composites [J]. Measurement Science Review, 2016,16(2):68-76.
- [53] ZHONGBIN L, LIU X, ZHANG B, et al. Dynamic characteristic of conductor after ice-shedding and simulation analysis of the tension insulator string [J]. IEEE Access, 2022, 10:118484-118497.
- [54] 骆国防,章学兵,赖江波. 220 kV 输电线路耐张线夹缺陷分析[J]. 电力与能源,2022,43(2):132-134;158.
- [55] JINGSHAN H, YI W, XIAOANG K, et al. Research on abnormal heating alarm technology of conductor strain clamp based on thermal steady state principle [C]//2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2021,5:1052-1055.
- [56] ALHASSAN A B, ZHANG X, SHEN H, et al. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020,118:105862.
- [57] ZHANG J, YANG H-M, ZHANG Z-N, et al. An automatic diagnostic method of abnormal heat defect in transmission

- lines based on infrared video [C]//2016 IEEE PES 13th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-Line Maintenance (ESMO). IEEE, 2016:1-4.
- [58] OUYANG K-J, YANG X-W, ZHAN L, et al. Quality test of clamping connection of transmission lines across tensile line [J]. *Vibroengineering Procedia*, 2018,20:156-160.
- [59] XIE Y, Yang L, Wang S, et al. Study on nondestructive testing methods for crimping quality of steel cored aluminum strand [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019,295(3):032097.
- [60] 季昌国,余超.相控阵超声检测成像技术在耐张线夹压接质量检测的应用研究[J].*应用声学*,2020,39(6):857-867.
- [61] 张睿哲,周恺,蔡瀛淼,等.基于脉冲反射法的耐张线夹压接质量超声检测技术研究[J].*电测与仪表*,2023,60(3):153-156;171.
- [62] 方春华,游海鑫,胡冻三,等.基于超声脉冲反射法的耐张线夹压接缺陷检测[J/OL].*中国测试*,2022:1-6. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20220930.1640.002.html>.
- [63] 李秀坤,李兴康,贾益军,等.DR 检测发现的铝合金焊接接头开裂原因分析[J].*焊接技术*,2022,51(S1):113-116.
- [64] BI X, CHEN D, GAO S, et al. Application of X-ray digital imaging technology in hardware quality test of transmission line [C]//2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE, 2019:1-5.
- [65] WANG Y, CHEN J. Research on X-ray digital image defect detection of wire crimp[C]//Communications, Signal Processing, and Systems: Proceedings of the 8th International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems 8th. Springer Singapore, 2020:2217-2222.
- [66] 谭兴华,杨东,张辉,等.基于无人机与 X 射线数字成像技术的输电线路耐张线夹检测方法[J].*自动化与仪表*,2021,36(9):58-62;68.
- [67] 姜宇航.电力耐张线夹原位 X 射线无损检测系统的研制[D].长春:长春理工大学,2020.
- [68] 杨东,张辉,谭兴华,等.考虑线路电磁屏蔽的带电环境耐张线夹 X 射线检测方法[J].*机械与电子*,2021,39(8):51-55.
- [69] 白洋,俞华,韩钰.面向无人机的 X 射线耐张线夹检测系统[J].*山西电力*,2021(3):6-9.
- [70] WEINAN Q, GUANGKAI Y, CHI Y, et al. Research on electromagnetic interference protection of X-ray detecting device for tension clamp of transmission line[C]//2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). IEEE, 2022:1436-1440.
- [71] 梁华尘,周稳,倪旭东,等.面向多目标联合电力巡检的车载无人机协同巡检路径规划方法[J].*南方电网技术*,2023,17(11):138-147.
- [72] 粟骏龙.面向风电场巡检场景的无人机自动路径规划方法研究[D].武汉:武汉大学,2023.
- [73] LI P, LIU R. X-ray image recognition method for crimping defects of strain clamp based on OpenCV [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021,2121(1):145-179.
- [74] SHEN C, KASRA M, PAN W, et al. Fake images: The effects of source, intermediary, and digital media literacy on contextual assessment of image credibility online [J]. *New Media & Society*, 2019,21(2):438-463.
- [75] ZHAO Z, LIU W, REN J, et al. Uncertainty-driven trustworthy defect detection for high-resolution powder bed images in selective laser melting [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024,72:59-73.
- [76] HEINZ D, HALEK B, KREŠÁK J, et al. Methodology of measurement of steel ropes by infrared technology [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022,133:105978.
- [77] QU Z, JIANG P, ZHANG W. Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques [J]. *Sensors*, 2020,20(14):3851.
- [78] 方春华,游海鑫,胡冻三,等.基于相控阵超声的压接管潜伏性缺陷检测技术[J].*中国测试*,2023,49(5):39-44;163.
- [79] LIU Y, ZHAO P, QIN X, et al. Research on X-ray in-situ image processing technology for electric power strain clamp [C] //AOPC 2021: Optical Sensing and Imaging Technology. SPIE, 2021, 12065:335-341.
- [80] QIU Z, LI J, SHI D, et al. X-ray imaging defect detection of transmission line strain clamps based on a YOLOX model[C]//2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). IEEE, 2022:1-4.

作者简介:

钟飞,男,1979年生,博士研究生,教授级高级工程师,主要研究方向:电力设备及材料检测。E-mail: 1882083721@139.com

刘桂雄(通信作者),男,1968年生,博士研究生,教授,主要研究方向:先进传感与网络化控制研究。E-mail: megxliu@scut.edu.cn