

# 一起电缆非贯穿性缺陷 X 光数字成像检测案例的图像误差分析 和对策研究

何光华<sup>1</sup>, 陈大兵<sup>2</sup>, 俞 骏<sup>1</sup>, 张志坚<sup>1</sup>

(1.无锡供电公司, 江苏 无锡 214061; 2.江苏省电力科学研究院, 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 本文针对一起电缆非贯穿性缺陷采用 X 光数字成像检测试验时发现射线机、电缆及成像板间摆放位置不同所拍摄的图像缺陷深度不一致的情况, 通过理论计算和试验验证分析, 得出了在检测中射线源位置、检测角度等对 X 光数字成像检测存在影响的结论, 提出了保证测试准确性的对策, 并结合局放等其他带电检测手段进行了验证, 其经验可供检测单位参考。

**关键词:** 电缆非贯穿性缺陷; X 光数字成像; 图像误差

## 0 引言

当前, 随着城市经济的发展, 城市电缆化率增长很快。据调研统计, 外力破坏成为造成其故障或缺陷的主要原因之一。近年来, 由于外力破坏引起的电缆非贯穿性缺陷或压伤等问题较多, 本单位采用了便携式 X 光数字成像检测设备进行现场检测以便取得直观、快速的电缆内部状态影像以便采用更有效的检修策略。在检测过程中发现, 当射线机、电缆、成像板间位置不同, 所拍摄的图像缺陷深度也不相同, 即图像失真误差。本文着重研究误差造成的原因, 并提出了相应的对策措施, 确保不造成误判, 经现场检验是可行有效的。

## 1 110kV 电缆本体非贯穿性缺陷 X 光数字成像检测案例暴露的问题

2012 年 4 月 21 日, 一根 110kV 用户电缆 B 相受到了野蛮施工外力破坏, 造成了 2 处非贯穿性损伤, 见图 1、图 2。公司应用便携式 X 光无损实时成像系统进行现场检测发现, 当 X 光射线源与电缆缺陷位置不同、射线机与电缆缺陷深度方向的角度不同, 所拍摄的电缆凹陷深度不一致, 且清晰度也不同, 即存在图像失真误差。从图 2 中可见, 若分不清哪种方式下测试结果可借鉴, 将可能造成误判断, 影响后期的检修处理。

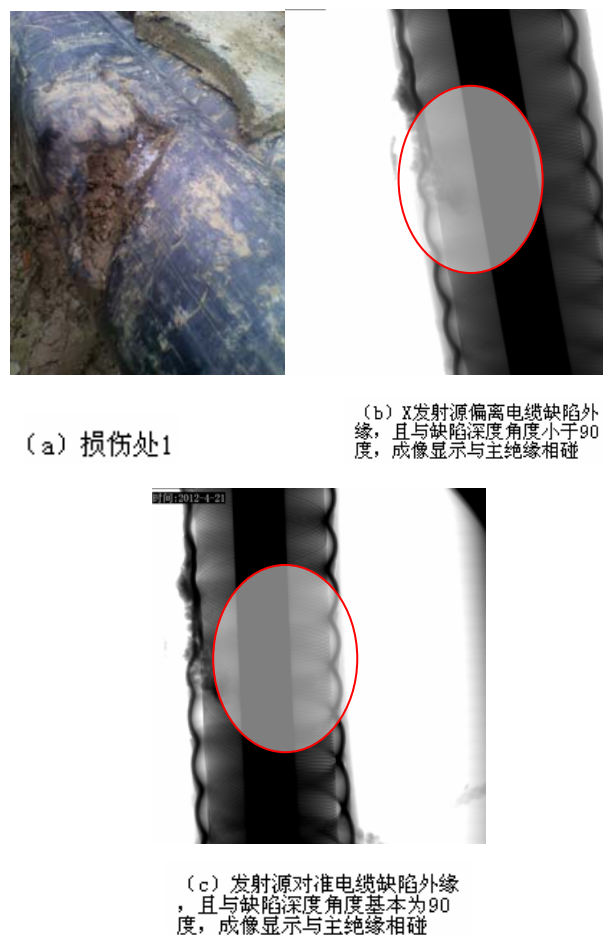


图 1 损伤 1 处 X 光图像对比图

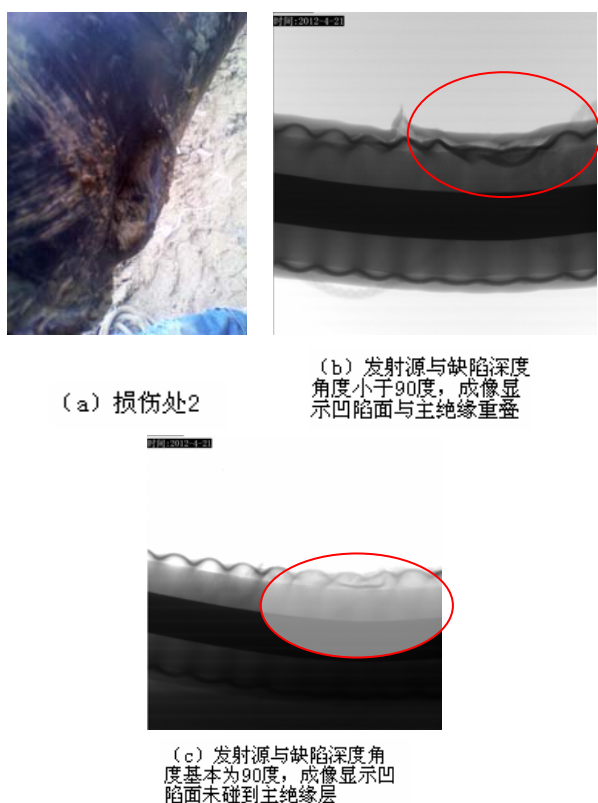


图2 损伤2处 X 光图像对比图

## 2 原因分析和对策措施

### 2.1 X 射线源位置对图像失真误差的影响

从射线照相的原理可以看出，电力电缆射线检测相当于电缆各层（或缺陷）在成像板上的投影。我们将其分为四种情况，见图3所示。

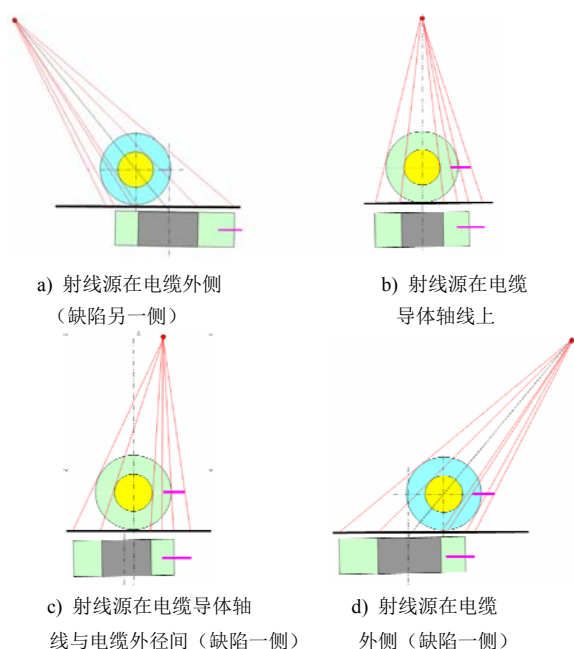


图3 X 射线源在不同位置的成像示意图

从上图可以看出，当射线源偏离电缆外侧、在缺陷另一侧（图3-a），缺陷在成像板所成图像上的相对深度会浅于实际深度；当射线源逐渐移动到电缆导体轴线上（图3-b），相对深度依然会浅于实际深度，但失真误差变小；当射线源移动到电缆导体轴线与电缆外径间（缺陷一侧）时（图3-c），失真度进一步变小，在某个位置测试值与实际深度一致；当射线源移动到电缆外侧（缺陷一侧）时（图3-d），缺陷在成像板所成图像上的相对深度会深于实际深度，且随着距离的拉大，偏差越大。从以上4个图像区域来看，图3-C的区间失真度最小，因此，我们着重研究该区间的误差率。

我们以220kV 2500mm<sup>2</sup>截面电缆为例，其导体直径=60mm，电缆外径=150mm，检测时的焦距设定为800mm，当射线源中心位于缺陷侧电缆外径正上方时，一深度为5mm的缺陷为例，如图5所示，OB=焦距=f，设电缆半径为R，导体半径为r，缺陷实际长度为l。

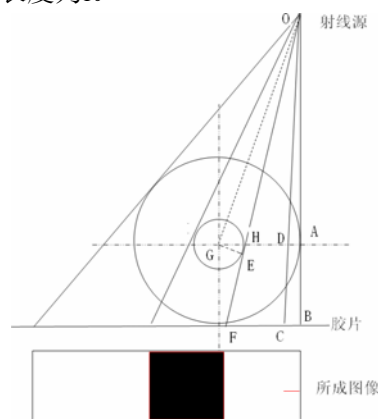


图5 缺陷成像案例

则由于  $\triangle OAD \sim \triangle OBC$ ，可得： $\frac{AD}{BC} = \frac{OA}{OB}$

即： $BC = \frac{OB \times AD}{OA} = \frac{f \cdot l}{f - R}$ ，也就是在底片上缺陷所

成图象长度为  $\frac{f \cdot l}{f - R}$ 。

由于我们在计算缺陷实际长度时，把缺陷和绝缘在底片上的投影认为是按同样的比例进行了放大，因此，缺陷的计算长度为：

$$l' = \frac{BC}{BF} \times (R - r) = \frac{\frac{f \cdot l}{f - R}}{f \cdot \tan[\arctan \frac{R}{f - R} - \arcsin \frac{r}{\sqrt{(f - R)^2 + R^2}}]} \times (R - r)$$

误差值绝对值为：

$$l'-l = \frac{\frac{f \cdot l}{f-R}}{f \cdot \tan[\arctan \frac{R}{f-R} - \arcsin \frac{r}{\sqrt{(f-R)^2 + R^2}}]} \times (R-r) - l$$
$$= \frac{\frac{800 \cdot 5}{800-75}}{800 \cdot \tan[\arctan \frac{50}{800-75} - \arcsin \frac{30}{\sqrt{(800-75)^2 + 75^2}}]} \times (75-30) - 5$$

=0.006mm

误差率为  $(l'-l) / l=0.12\%$  小于  $0.2\%$ ，从误差绝对值来看，其误差也几乎可以忽略。

根据三角形相似原理，我们以上述电缆数据为例，取偏离值为 h，取电缆缺陷侧的外径边界为 Y 轴 0 值，左边为负值，右边为正值（见图 6），对上述四个区域均进行计算，得到表 1，其曲线分布见图 7。

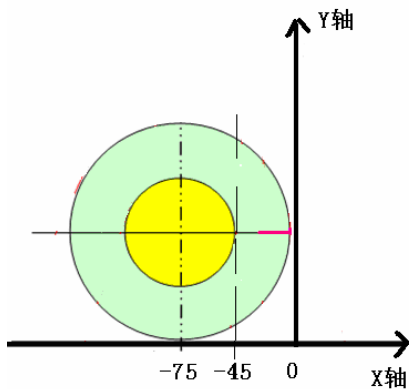


图 6 电缆区间划分图

表 1 放射源在电缆不同区间的误差分析

放射源位置	偏离值 h	缺陷投影	缺陷计算深度/mm	误差值绝对值/mm
电缆中心	-100	5.912	1.551	3.449
	-80	5.580	1.977	3.023
	-75	5.517	2.142	2.858
	-50	5.321	3.958	1.042
导体边缘	-45	5.306	4.829	0.171
	-30	5.306	4.830	0.170
电缆边缘（缺陷侧）	0	5.517	5.006	0.006
	10	5.525	5.016	0.016
	200	8.526	7.545	2.545

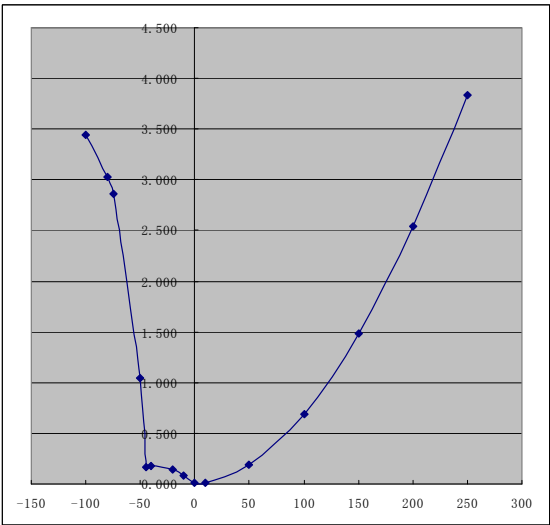


图 7 放射源在电缆不同区间的误差分布图

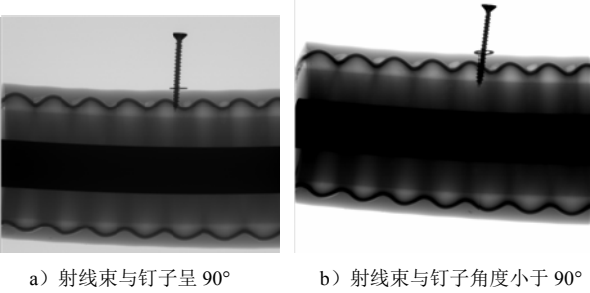
从上述分析可见，射线源在电缆边缘区间某点为误差变浅区，过后变为误差变深区。

当射线源在上述位置处于电缆导体外缘与电缆外缘区间（缺陷侧）时，误差绝对值在 0.006-0.171mm，几乎可以忽略。从图形看误差零点更为靠近电缆靠近缺陷一侧的电缆外缘处。同时理论计算中，我们把射线源看做了一个点源，而实际上射线源为有一定尺寸的源，某种程度上减小了此变形量。

结论：在实际检测时，在保证具有足够大的焦距（3 倍电缆直径以上）的前提下，射线源中心对准缺陷侧电缆外缘和内层导体外界面之间的位置附近即可，可尽量靠近电缆外缘侧。

2.2 主射线束和外破深度方向所成角度对图像误差的影响

从下面的试验拍摄图 8 可见，当射线束与缺陷深度方向的角度不同时，成像板上所成图像中缺陷深度也不相同。



a) 射线束与钉子呈 90°      b) 射线束与钉子角度小于 90°

图 8 和主射线束呈不同角度相同深度缺陷成像示意图

其原因可见图 9，当主射线束和缺陷深度方向呈 90°时，成像板上所成图像中缺陷相对深度位置与实

际一致，当主射线束和缺陷深度方向所成角度小于  $90^\circ$  时，缺陷相对深度明显变深。

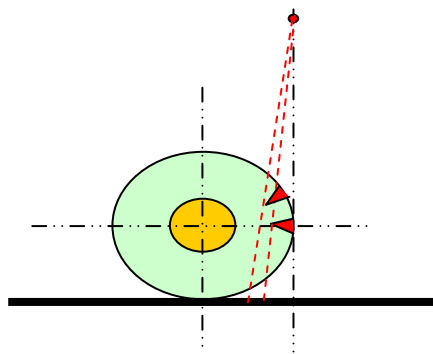


图9 成像分析

结论：实际检测过程中，应判断实际缺陷深度的方向，测试时应使主射线束和缺陷深度方向尽量呈  $90^\circ$ ，当不知道缺陷哪个方向最深时，应在靠近电缆外缘范围小角度变换多拍几张，以深度浅的作为判断依据，确保不造成误判。

### 3 案例判断和验证

#### 3.1 案例判断

1) 通过上述分析可见，损伤 1 处图像 C 可作为判断依据，且由于多角度拍摄均已与主绝缘相碰，因此可判断该处主绝缘已损伤，应加强监测，有条件的情况下，予以更换。

2) 损伤 2 处已符合第 2 节测试要求的图像作为有效判据，因此图像 C 可作为判断依据（该图像也是多角度拍摄中深度最浅的），因此可判断该处尚未损伤到主绝缘，应尽快安排护套修补处理，并加强检测（加大局放、环流、红外测温等项目检测和密度），若数据长期稳定可继续运行，否则应做好检修处理。

#### 3.2 局放项目验证

为了更好的掌握该损伤电缆的状态，4 月底公司进行了使用 CPDM-100 电缆局放测试仪对该 110kV 单芯电缆的 A、B、C 三相进行了局放测试对比，在中心频率为 2MHz 时使用 3pard 进行信号分离处理，分离之后在该电缆上发现局部放电信号，且 B 相的信号明显大于 A、C 两相，判断局部放电发生在 B 相，与 X 光检测情况相符。

### 4 结论

(1) 总结上述试验，X 光数字实时成像检测技术具有直观、快速的优点，但必须要掌握正确的检

测方法，即确定正确的射线源位置应选择在电缆缺陷侧的电缆导体外缘与电缆外缘间，射线源与缺陷深度的角度尽量保持  $90^\circ$ ，从而确保电缆图像的误差符合测试精度要求，防止由于人为检测工艺的原因造成误判。

(2) 影响图像质量的原因还有透照电压、焦点尺寸、焦距选择、成像板与电缆的距离等多种因素，但其主要是影响其成像清晰度，不作为本文的重点展开。

(3) X 光具有辐射性，在现场测试时，应先提前做好观察准备，明确缺陷位置，在严格执行防护系统操作要求的基础上，进行工艺检测参数的调节，以尽可能的减少测试次数带来的辐射量。

(4) X 光数字成像检测是带电检测方式的一种，在有条件的情况下，可配合开展电缆红外测温、局放等测量，从而通过综合判据，进一步提升状态检测的准确性，减少误判率。

#### 参考文献：

- [1] 李舟,蚁泽沛.应用 X 射线技术检测电缆内部缺陷[J].广东电力,1990(1).
- [2] 李家伟.无损检测手册[M].北京:机械出版社,2012.
- [3] 何光华等.便携式电缆 X 光数字实时成像检测成套设备的设计研究[R].2012.

#### 作者简介：

何光华（1978-），女，高级工程师，无锡供电公司广盈电缆公司副经理，长期从事电缆线路和绝缘监督专业工作；

陈大兵（1978-），男，高级工程师，江苏省电力公司电力科学研究院设备状态评价中心，长期从事电力设备无损检测与评价研究工作；

俞 骏（1978-），男，技师，无锡供电公司广盈电缆公司电缆专职，长期从事电缆线路专业工作；

张志坚（1980-）男，高级工程师，无锡供电公司广盈电缆公司项目经理，长期从事电缆线路专业工作。