

曝光量在 GIS 设备 X 射线可视化无损检测中的选择应用

郭涛涛¹, 王达达¹, 于虹¹, 吴章勤², 郭铁桥³

- (1. 华北电力大学云南电网公司研究生工作站, 昆明 650217;
2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院金属研究所, 昆明 650217;
3. 华北电力大学机械工程系, 河北保定 071003)

摘要:针对 GIS 设备缺乏有效检测手段且其在电网中的重要性, 云南电网在全球率先将 X 射线数字成像 DR 检测技术应用到 GIS 设备的可视化无损检测中。目前, X 射线数字成像 DR 检测技术在电力设备可视化检测中的应用才刚刚起步, 还没有现场试验操作规程、X 射线机参数选择标准、图像处理系统等理论支撑。然而, 在 X 射线成像过程中, 曝光量直接影响着 X 射线数字成像质量, 由此基于大量的现场试验及计算, 提出了曝光量在 GIS 设备 X 射线可视化图像的选择方法。

关键词: GIS; 曝光量; X 射线; 无损

中图分类号: TL 99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2012)05-0573-05

现代电力系统正朝着大电网、大机组、超高压、大容量的方向发展, 为保障电力系统的稳定性、可靠性, 对电力设备的安全运行也提出了更高的要求。GIS 设备是电网设备中变电与输电的重要设备, GIS 设备的安全运行关乎整个电网设备的正常运行。

GIS 设备内部任何故障与缺陷的存在都可能影响设备整体性能, 甚至造成所辖局部地区乃至全部地区的停电。在设备发生故障之前, 如有检测手段对其内部缺陷位置、性质及程度进行检测、可视化和分析诊断, 就显得尤为重要。对电气设备进行 X 射线可视化无损检测是近年发展起来的, 鉴于其成像速度快、图像质量好、缺陷特征明显等特点在工业检测领域得到了广泛的应用。目前 X 射线在电气设备的

检测中应用还是比较少, 但是基于 X 射线检测的多种优点使其在电气设备无损检测中有广阔的应用前景。

目前 X 射线检测技术在电网设备的无损检测中主要应用于 GIS 变电站的罐式断路器、变压器、母线、电流和电压互感器、隔离开关等重要电气设备的内部缺陷检测中。由于 X 射线检测在电气设备领域的应用时间还比较短, 目前还没有一个统一的现场操作规程、统一的 X 射线机参数选择标准、统一的 X 射线图像处理方法和完整的 X 射线图像处理系统。本文就是针对 X 射线检测技术在电气设备中应用时曝光量选择的讨论。

1 DR 检测时存在的问题

DR 检测技术是云南电网在世界上率先应用于电网设备的无损检测中。DR 技术应用于电网设备时, 检测过程中各种参数的选择没有一个统一的标准。检测过程中检测人员往往采取电压等级、电流等级由高到低的顺利依次对

收稿日期: 2011-12-15

作者简介: 郭涛涛(1986-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检测新技术, X 射线实时成像技术在电网设备中的应用等。

设备进行透照,这样不仅浪费了大量的检测时间,不利于对变电站 GIS 设备的普测,也增加射线机工作时间,缩短了射线机的使用寿命。同时,由于 X 射线对人体有害,长时间的透照也会对检测人员和变电站工作人员产生危害,这就要求在进行 X 射线检测时尽量减少透照的时间与透照强度。此外,经过研究表明,短时间的 X 射线照射对变压油、绝缘油等各种油样会有微小影响,所以长时间的 X 射线照射可能会对一些设备的绝缘油液、气体产生一定的影响,进而影响整体设备的稳定性。

鉴于以上原因,对曝光量的选择就要求在进行透照试验以前针对不同的 GIS 设备有针对性地选择曝光量的大小,进而选择合适的透照参数:管电压、管电流等。

2 曝光量及其选择规律

曝光量为射线源发出的射线强度与照射时间的乘积^[1]。对于 X 射线来说,就是射线机管电流 i 与检测所用时间 t 的乘积。曝光量是射线透照工艺的一个重要参数,在胶片 X 射线技术中,曝光量直接影响到照相影像的黑度,二者在一定范围成一定的线性关系,可以通过调节曝光量来调节影像的质量。同时,曝光量还影响着影像的对比度、颗粒度以及信噪比,进而影响到图像的灵敏度。

曝光量的选择遵循以下三个规律:(1)互易律^[2]:一定黑度的曝光量 $E = It$,当射线强度 I 和照射时间 t 变化时,只要二者乘积不变,则得到的图像黑度值是不变的。(2)平方反比定律^[2]:从 X 射线源发出的辐射,强度 I 与距离 F 的平方成反比,即存在以下关系: $I_1/I_2 = (F_2/F_1)^2$ 。原理是:在射线源照射方向上选择任意垂直的截面,单位时间在截面上通过的光量子总数是不变的,但是截面积与到射线源的距离的平方成正比,所以截面积的光量子密度,即辐射强度与距离平方成反比。(3)曝光因子^[2]将互易律和平方反比定律结合起来即可推导出曝光因子。存在以下关系式: $\Psi = it/F^2$,其中 i 为管电流, t 为照射时长, F 为焦距的大小。通过该式可以方便地确定射线强度、曝光时间和焦距三个参量中的一个或两个发生改变时,如何修正另一个或两个参量的值。

由互易律,可知曝光量与射线强度及其曝

光时间成正比,射线强度是由管电流决定的。在 X 射线胶片检测技术中,可以调节管电流和曝光时间来改变曝光量;而在 CR 与 DR 技术中,曝光时间一般是确定值(几秒到十几秒),可以通过调节管电流的大小来调节曝光量的大小。由平方反比定律,可知射线强度与焦距成平方反比关系,又射线强度与曝光量成正比可得出曝光量也与焦距成反比关系。曝光因子的定义就给了射线强度、曝光时间和焦距三个变量直观的关系式。

3 GIS 设备 X 射线 DR 技术曝光量的选择应用

X 射线数字成像 DR 技术是近年来发展起来的无损检测技术。DR 技术可以直观地在不拆卸设备的情况下,对设备内部故障、缺陷给出可靠、准确的定性/定量的分析判断,以提高对电力设备内部缺陷检测的可靠性、准确性,且其是对电力设备现有检测手段的强有力的补充。与此同时,X 射线数字成像技术如与局部放电、化学检测方法有效结合使用,将会成为检查电力设备缺陷及隐患的一种系统和有效的手段。

DR 技术采用先进的非晶硅、非晶硒、CMOS 阵列板,硒或硅元件按照吸收射线量的多少产生正比例的正负电荷对,存储于薄膜晶体管内的电容器中,所存储的电荷与其后产生的影像黑度成正比^[3]。扫描控制器读取电路将光电信号转换为数字信号,数据经处理后获得的数字图像在显示器上显示出来。上述曝光和获取图像的整个过程一般仅需要几秒钟至十几秒钟。所以对 DR 的曝光量改变一般只需要改变管电压或者管电流的大小。

典型 GIS 设备曝光量的选择应用:

3.1 220 kV 断路器曝光量的选择应用

220 kV 断路器罐体直径为 1 200 mm。选取断路器 A 相的梅花触头与导杆连接处作为检测位置。

首先按照焦距选择标准^[4]来计算断路器的最佳透照焦距值。

根据公式:

$$f \geq 10 d b^{2/3};$$

$$f \geq 10 \times 1.2 \times \sqrt[3]{360\,000}$$

得出透照距离: $f \geq 854$,再根据公式: $F = f + b$ 得出焦距: $F \geq 1\,454$ 。

其中, $d=1.2\text{ mm}$ 为焦点有效尺寸的大小, $b=D/2=600\text{ mm}$ 为罐体直径的一半。

选择焦距值为 $1\,400\text{ mm}$,在不同电压等级下对断路器进行透照试验。选择表 1 中的透照参数,图 1、图 2、图 3 为其相对应的 X 射线检测效果图。

表 1 不同参数下断路器 X 射线曝光量

序号	焦距 /mm	电压值 /kV	电流值 /mA	曝光量 /mA·min
1	1400	200	2	0.34
2	1400	250	2.5	0.42
3	1400	300	3	0.51

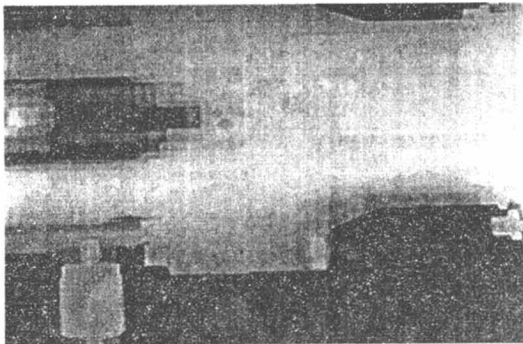


图 1 曝光量较小时的效果图

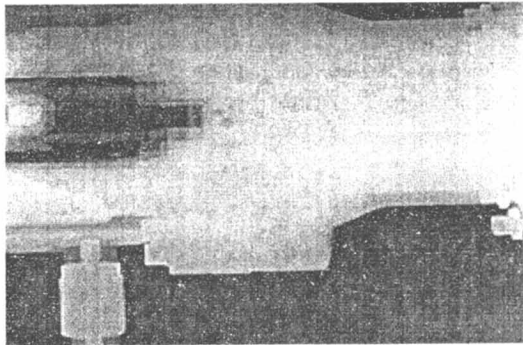


图 2 曝光量适当时的效果图

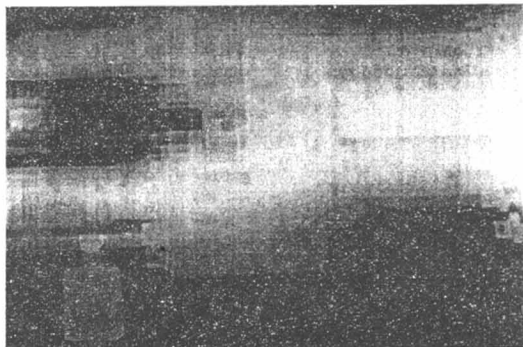


图 3 曝光量较大时的效果图

根据试验可得,焦距为 $1\,400\text{ mm}$,管电压为 200 kV ,管电流 2.5 mA 时图像效果最好。

根据公式:

$$E = it;$$

$$E = i \times 0.17;$$

$$E = 2.5 \times 0.17;$$

$$E = 0.42\text{ mA} \cdot \text{min}$$

其中,时间 t 为 10 s 。

通过以上计算值与实际现场试验的数据可以得出:断路器、避雷器等内部结构不是很复杂的部位在 DR 技术检测时所需的曝光量仅为 $0.42\text{ mA} \cdot \text{min}$ 左右即可得到最佳的 X 射线图像效果图。

通过图 2 和图 3 的对比在曝光量较大时图像的边缘被弱化不清晰,在曝光量合适时就可以得到比较好的图像。

3.2 220 kV 隔离开关曝光量的选择应用

首先选取隔离开关正位作为检测位置。罐体直径为 $1\,000\text{ mm}$,根据焦距选择标准计算出最佳透照焦距值。

根据公式:

$$f \geq 15 d b^{2/3};$$

$$f \geq 15 \times 1.2 \times \sqrt[3]{250\,000}$$

得出透照距离: $f \geq 1134$,再根据公式: $F = f + b$ 得出焦距: $F \geq 1\,634$ 。

其中, $d=1.2\text{ mm}$ 为焦点大小, $b=500\text{ mm}$ 为隔离开关罐体直径的一半。

选择焦距值为 $1\,650\text{ mm}$,在不同管电压、管电流等级下进行透照试验。选择表 2 中的透照参数,图 4、图 5、图 6 为其相对应的 X 射线成像效果图。

表 2 不同参数下隔离开关 X 射线曝光量

序号	焦距 /mm	电压值 /kV	电流值 /mA	曝光量 /mA·min
4	1650	230	2.5	0.42
5	1650	260	3	0.51
6	1650	180	3	0.51

根据试验图像在管电压 180 kV ,管电流在 3 mA 时图像效果最好。

根据公式:

$$E = it;$$

$$E = i \times 0.17;$$

$$E = 3 \times 0.17;$$

$$E = 0.51\text{ mA} \cdot \text{min}$$

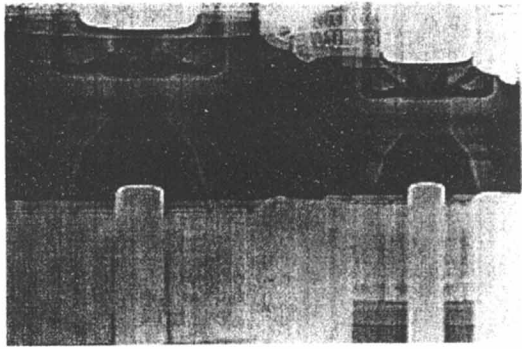


图4 曝光量较小时的效果图

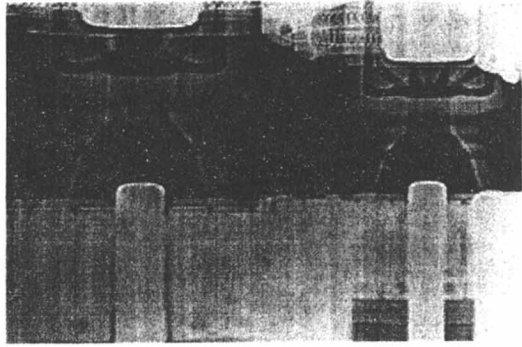


图5 曝光量合适、电压过大效果图

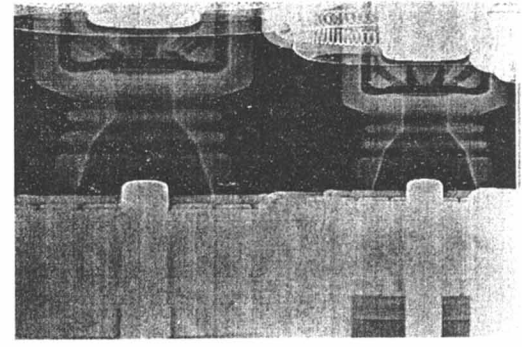


图6 曝光量合适时的效果图

其中,时间 t 为 10 s。

通过以上计算值与实际现场试验的数据可以得出:隔离开关、电压互感器、盆式绝缘子等内部结构比较复杂的部位在 DR 技术检测时所需的曝光量为 $0.5 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 左右即可得到最佳的 X 射线图像效果图。

3.3 220 kV 母线曝光量的选择应用

首先选取母线中断作为检测位置。罐体直径为 1 200 mm,根据焦距选择标准计算出最佳透照焦距值。

根据 JB/T 4730.2—2005 标准,选择 A 级射线检测等级^[5]。

$$f \geq 7.5 d b^{2/3};$$

$$f \geq 7.5 \times 1.2 \times \sqrt[3]{360\,000}$$

得出: $f \geq 640$,再根据公式: $F = f + b$ 得出: $F \geq 1\,240$ 。

其中, $d = 1.2 \text{ mm}$ 为射线机焦点有效尺寸大小, $b = D/2 = 600 \text{ mm}$ 是罐体直径的一半。

选择焦距值为 1 200 mm,在不同管电压、管电流等级下进行透照试验。选择表 3 中的透照检测参数进行试验,得到如图 7、图 8、图 9 的成像效果图。

表3 不同参数下母线 X 射线曝光量

序号	焦距 /mm	电压值 /kV	电流值 /mA	曝光量 /mA · min
7	1200	120	2.5	0.42
8	1200	100	2	0.34
9	1200	80	1.5	0.26

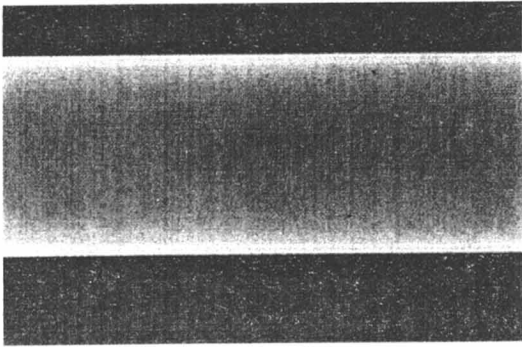


图7 曝光量较大时的效果图

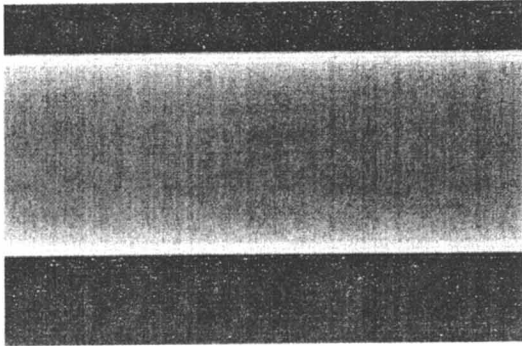


图8 曝光量合适时的效果图

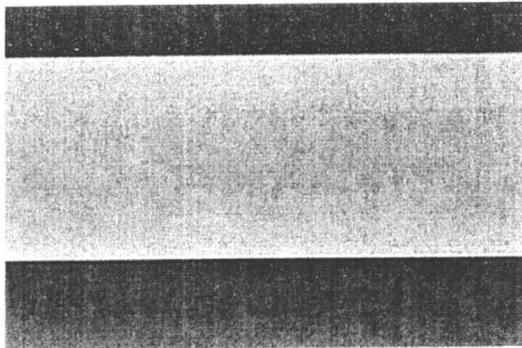


图9 曝光量较小时的效果图

根据公式:

$$E = it;$$

$$E = i \times 0.17;$$

$$E = 2 \times 0.17;$$

$$E = 0.34 \text{ mA} \cdot \text{min}$$

其中,时间 t 为 10 s。

通过以上计算值及实际现场试验的数据可以得出:母线、套筒等内部结构很简单的设备在 DR 技术检测时所需的曝光量为 $0.34 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 左右即可得到最佳的 X 射线图像效果图。

综合上述计算数据与图像分析可以给 DR 技术在 GIS 中的检测总结出一个推荐曝光量表(见表 4)。

表 4 GIS 设备 DR 技术检测时推荐曝光量

内部设备复杂程度	推荐焦距值	曝光量/ $\text{mA} \cdot \text{min}$
高	B 级(1 650 mm)	0.5
中	AB 级(1 400 mm)	0.42
低	A 级(1 200 mm)	0.34

注:该表格建立在现场试验的基础上,GIS 设备罐体直径在 1200 mm 左右。

4 结论

曝光量在 X 射线检测中直接影响着图像质量,是射线检测中最重要的参数。正确地选择曝光量不仅可以得到最好的图像质量还可以

根据曝光量选择焦距、照射时间等技术参数,从而可以大大提高射线照相的效率,减轻技术人员的工作负荷。

通过对 X 射线胶片技术和 X 射线 DR 技术在电气设备中曝光量选择的计算,以及现场试验的证实,易知 DR 技术的曝光时间和所需曝光量都很小,选择正确的曝光量不仅提高了现场检测的效率,也减小了外界各种噪声的干扰,对提高图像质量有很大的帮助。而选出 DR 技术检测推荐的曝光量后,又可以选择正确的焦距、管电压与管电流,大大提高了射线检测的工作效率。

参考文献:

[1] 强天鹏. 射线检测[M]. 中国劳动社会保障出版社,2007.
[2] 宋天民. 射线检测[M]. 中国石化出版社,2011.
[3] 郭祖力. 长焦距 X 射线检测时获取管电压、曝光时间的探讨[J]. 无损检测,2010,34(5):36-39.
[4] 李衍. 微焦点 X 射线照相法的特性和应用[J]. 无损探伤,1995,19(1):6-11.
[5] 王俊涛,郑世才. X 射线机焦点尺寸测量方法的标准分析[J]. 无损检测,2009,32(10):801-806.

The Application on X-ray Focal Length Parameter Selection in the Visualization Nondestructive Testing

GUO Tao-tao, WANG Da-da, YU Hong, WU ZHANG-qin, WANG Jin

- (1. Graduate Workstation of North China Electric Power University & Yunnan Power Grid Corporation, Kunming, 650217,
2. Metals Research institute of Yunnan Electric Power Testing Research institute Company, Yunnan Kunming, 650217,
3. Department of Mechanical Engineering of North China Electric Power University, Baoding, 071003)

Abstract: Considering the important position in the power grid of GIS equipment. Yunnan power Grid has taken the lead to put X-ray digital representation technological in the application of Visualization Nondestructive Testing. But now, the application of X-ray used in electrical equipment is still at the beginning, there is still no field investigation operation rules, standards for X-ray machines to chose, image processing system and other theory foundations. The article based on a goodly amount of field investigation and also a lot of calculations, and put forward a theory about the selection method of X-ray exposure parameter in the application of Visualization Nondestructive Testing.

Key words: GIS, exposure, X-ray, Non-destructive