

便携式 X 射线数字成像技术（CR，DR）在 GIS 设备故障诊断和状态监测中的应用

青海电力科学试验研究院 闫斌；邓大勇；何喜梅；吴童生；王志惠；李生平

通用电气 检测控制技术 朱春旺、王航利、刘森玉、Yeung, Roy

摘要：随着电子技术、计算机技术的日新月异，工业用 X 射线 CR、DR 技术也在近 2 年取得了突破性的发展，高质量的图像质量和方便快捷的操作过程被广泛应用在电力、航空航天、石油化工等行业的尖端领域。以前电力行业在 GIS（Gas Insulated Switchgear）的定期检查、特殊检查过程中，缺乏有效的无损检测手段，设备运行存在隐患可能。本文通过大量实验和成功案例，为 GIS 设备的故障诊断和状态监测提供了一种全新、先进、成功的无损检测方案。

关键词：CR、DR、GIS、故障诊断、状态监测

1. 概述

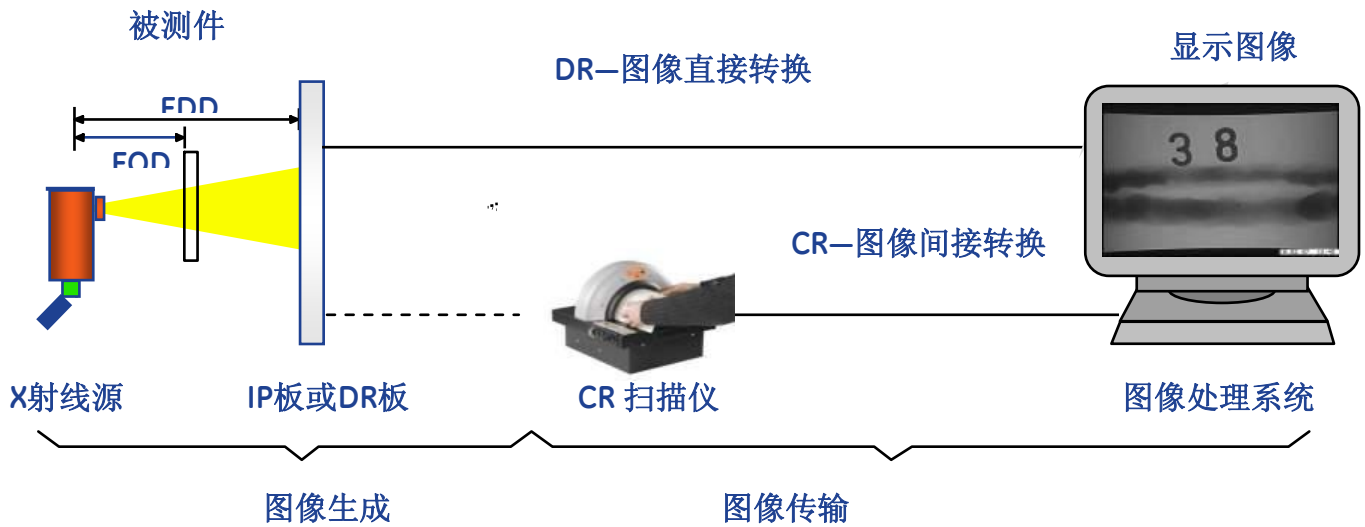
气体绝缘金属封闭开关简称 GIS，因其是全封闭结构，不受外界环境（潮湿、雨水和污秽等）的影响、运行可靠性高，安装速度快，检修间隔时间长、运行费用低而且占地面积也比较小，符合城市规划和美观的要求，现已成为国内外输配电行业开关设备中最尖端和最具有竞争力的设备。通过对 GIS 设备事故的分析发现，大部分严重事故，未能通过现有的检测手段在缺陷发展初期被发现，导致击穿、烧损等严重事故的发生 [1]。因此，采取有效、可靠的检测与诊断，使缺陷消除在萌芽状态，避免严重事故发生，已成为 GIS 设备可靠运行的迫切需求。X 射线数字成像检测技术 CR，DR 实现了 GIS 设备内部结构的“可视化”诊断，有效地解决了 GIS 设备内部结构复杂，且充有 SF6 绝缘气体、解体困难，检修技术含量高，耗时长，停电损失大等检测难题，为设备故障的准确定性及定位提供了极大的方便，同时也为设备的状态检修提供了有力的技术支持。该技术目前在青海、西藏、山西、云南、湖南等省得以广泛成功应用。

2. 检测原理及设备

2.1 X 射线数字成像系统 CR、DR 检测原理

工业用 X 射线成像原理和我们通常在医院、机场见到的拍片、CT、安检系统工作原理一样。X 射线在穿透不同的物体时与物质发生相互作用，因吸收和散射而强度变化，感光材料（胶片、IP 板、DR 板）接受到该强度变化信号后，经信号处理形成我们常见的影像，见原理示意图。通常，用于 GIS 检测的一套完整的检测系统包括：射线源（ERESCO 65 MF4, 300KV）、IP 板（软）或 DR 板（DXR250V）、CR 扫描仪(DR 不需要)、Rhythm 工作站（图像显示系统含图像处理分析软件）Rhythm Workstations including Rhythm Software、X 光机现场移动支架、移动工作站（车）等。

X射线数字成像原理示意图





DXR250V DR 板



ERESCO 65 MF4, 300KV 射线机



IP 成像板



X 光机现场移动支架



Rhythm 工作站含软件

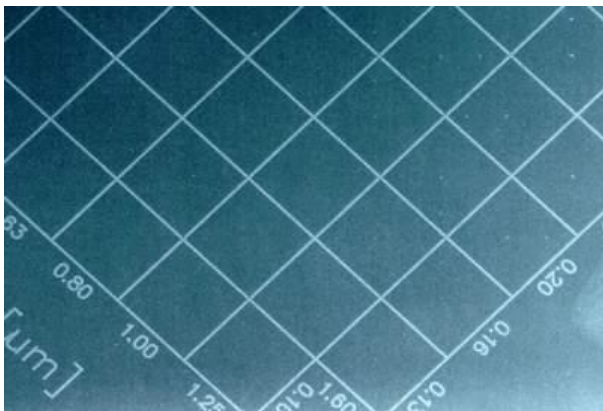
2.2 X 射线对 SF₆ 气体的影响

研究 X 射线对 SF₆ 气体的影响是采用 X 射线对 GIS 设备进行检测的前提，采用加拿大 SF6DPD 型 SF₆ 分解产物检测仪，精度为±0.1 μL/L，对样品气体和现场运行设备进行 X 射线照射，经气体成分测定，X 射线没有导致 GIS 设备 SF₆ 气体的分解。

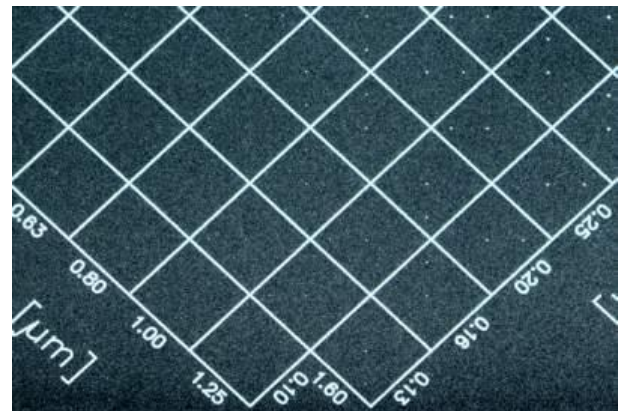
3. GIS 检查时，X 射线数字成像系统的关键技术指标。

3.1 信噪比和对比度

高的信噪比和高的对比度是图像质量最核心的技术指标。他们直接影响结构细节的分辨和故障的发现能力。2008 年以前，CR、DR 技术应用受到局限的主要因素就是受上述两指标的综合影响，图像质量达不到某些应用的高要求。当前技术能达到的最佳指标：信噪比：9 级；对比度：9 级。（视被检材料的变化而不同）。完全能和传统胶片的图像媲美。



传统胶片图像



DR 图像

3.2 感光材料工作时，能承受的最高射线能量

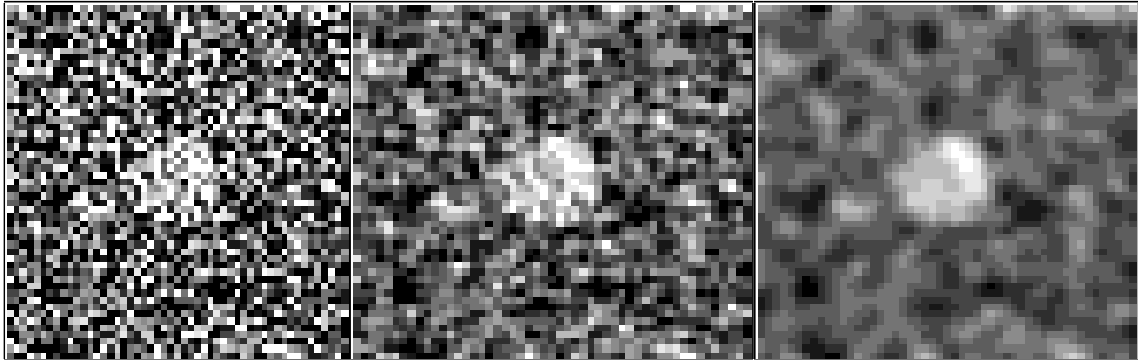
GIS 内部结构复杂，构件材料、厚度多样，需要较高的 X 射线穿透能力，才能得到理想的图像进行分析。当前 DR 能承受的最高 X 射线机能量是 350KV；CR 则能承受所有能量的 X 射线。

3.3 感光材料有效接收面积

该指标直接影响 GIS 的检测效率和检出能力。DR 板常见的规格有：410x410 mm；200x200 mm，不可弯折。CR 用 IP 板：宽度最大是 350mm，长度任意，可弯折。

3.4 感光材料像素和系统分辨率

像素 ≤ 200 微米，系统分辨率 ≥ 2.5 IP/mm，就能达到 GIS 的检测要求，该指标一般都能被满足。需要注意的是：并不是像素越高越好，在一定条件下，提高像素并不能得到更好的图像。如下图所示，在信噪比 SNR=1 的相同条件下，不同像素的感光材料得到的图像质量没有明显的改善。



像素 高

像素 中等

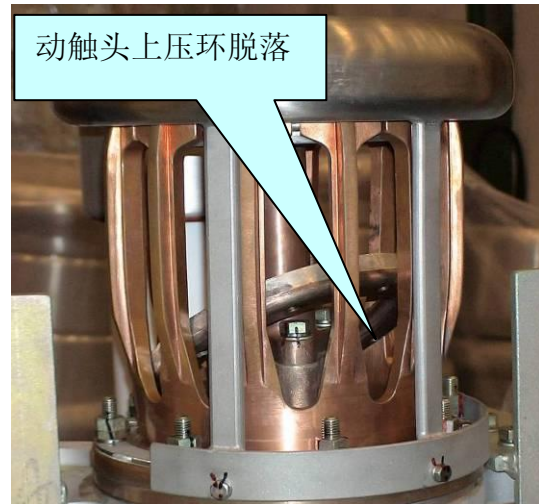
像素 低

4. GIS 设备典型故障

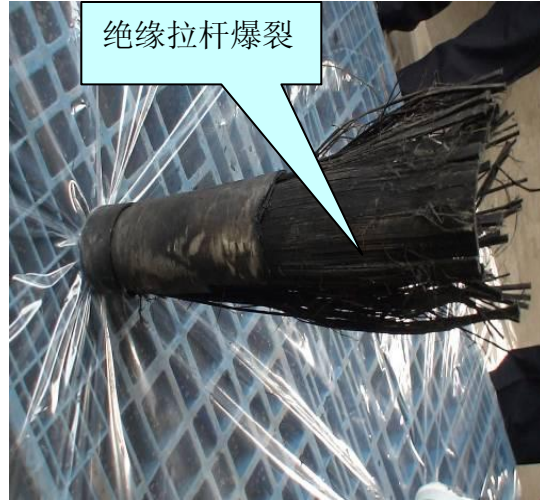
GIS 设备的典型故障主要是内部结构发生变形或严重损坏，如：零件松动脱落、螺丝松动、静触头触指变形，动触头上压环脱落，触指烧损，绝缘拉杆爆裂等如图所示。



静触头触指变形

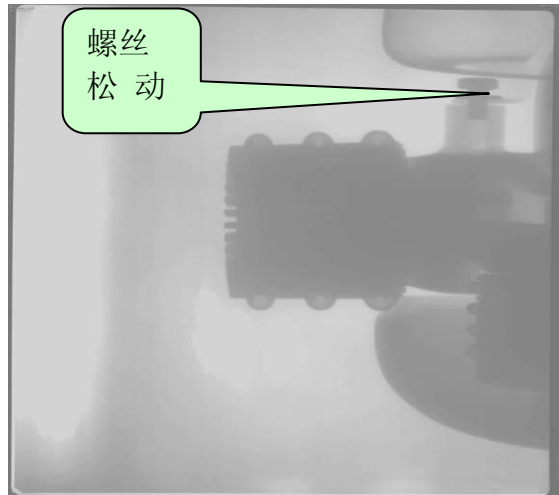
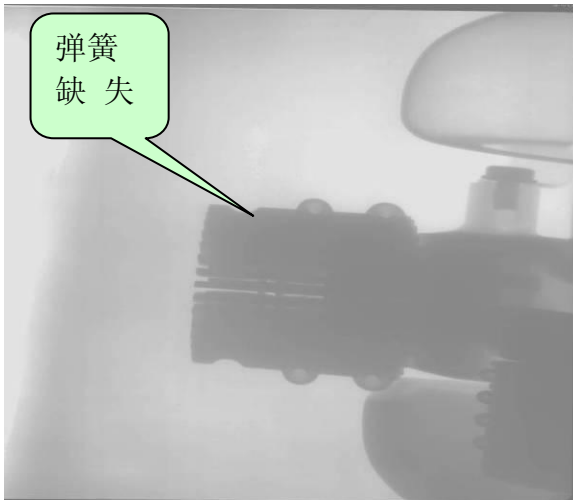


上压环脱落



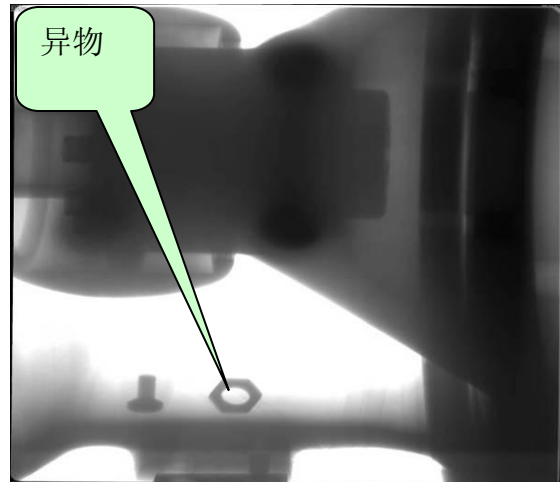
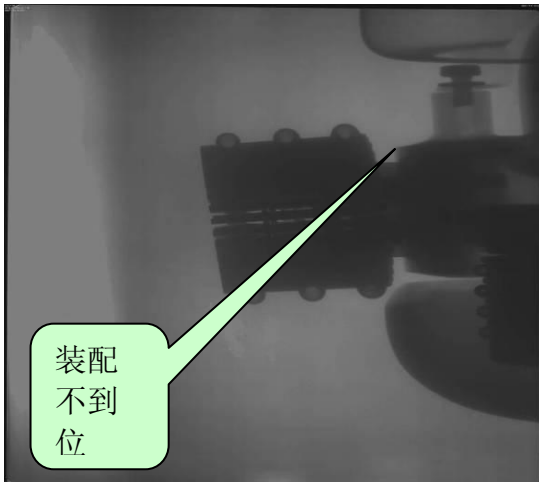
静触头触指烧损

绝缘拉杆爆裂



抱紧弹簧缺一个

螺丝松动



静触头装配不到位

隔离开关内存在异物

5. 现场实际检测

5.1 CR 成功案例 1 -----GIS 现场维修结果确认

2010 年，某供电局 GIS 发生故障，由 GIS 生产厂家来现场更换后，无法用常规手段检查维修效果，故委托 GE 公司免费进行 CR 透视，图 1 是合格产品，图 2 是修复后的产品。经比较，见图中红框部分，修复后产品中弹簧明显错位，判为修复不合格，需重新处理。最终，客户非常满意检测效果并于 2010 年 11 月购买了一套 CR 检测设备。

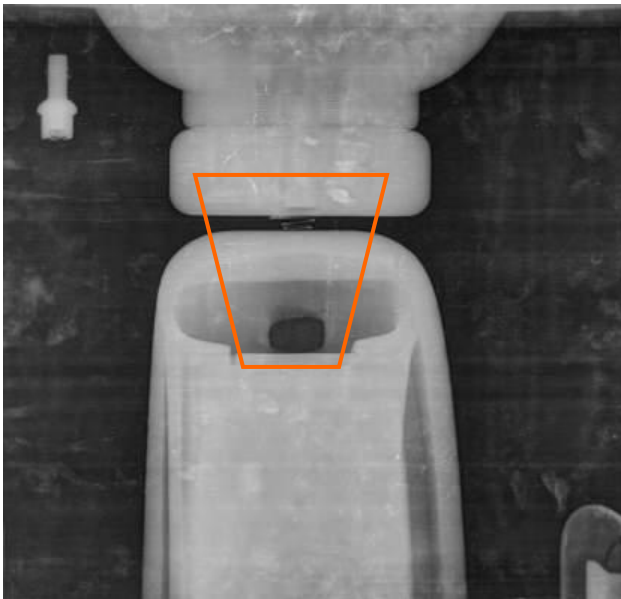


图 1

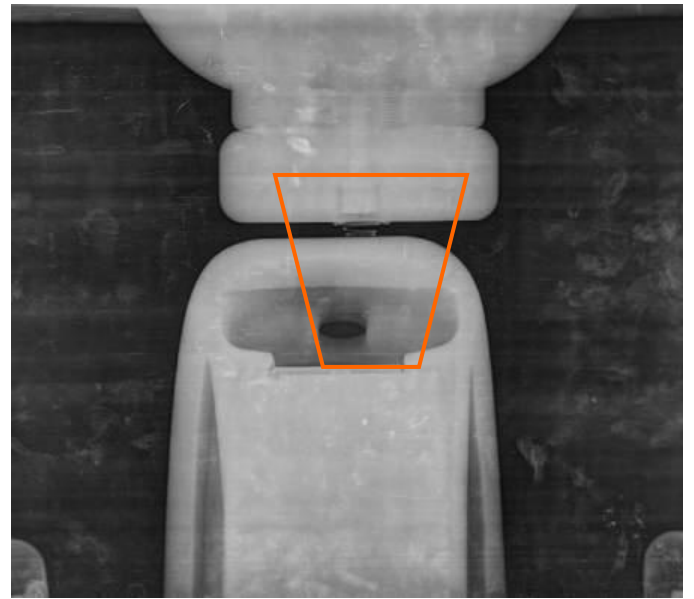


图 2

5.2 CR 成功案例 2 -----110kV GIS 断路器设备 X 射线成像检测

X 射线机对准断路器进线侧和出线侧中间，成像板放置在断路器对面。为防止断路器内部三相影像重叠，X 射线机机头正对断路器正中，成像板放置在断路器对面左、右两侧，可分别透照出 A、C 相断路器；X 射线机正对断路器正中，再逆时针或顺时针旋转 20° ，成像板放置在断路器对面正中，可透照出 B 相断路器（见图 3、4）。



图3 X射线机、成像板摆放位置

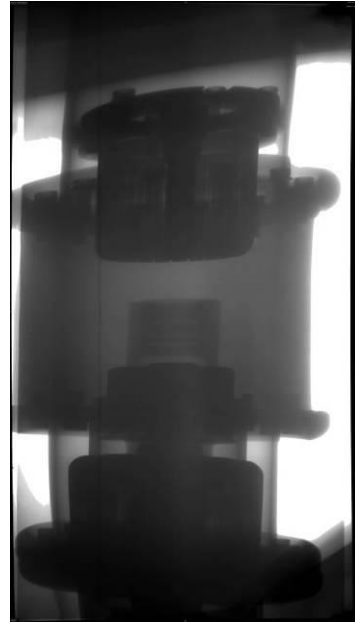


图4 断路器影像照片

5.3 CR 成功案例 3----- 330kV GIS 隔离开关设备 X 射线成像检测

X 射线机正对隔离开关球状壳与圆筒的连接处，成像板放置在射线机正对面（见图 5），可获得 330kV GIS 隔离开关断口影像照片（见图 6）。



图5 射线机、成像板摆放位置



图6 隔离开关分闸状态

5.4 CR 成功案例 4-----330kV GIS 母线连接处 X 射线成像检测

X 射线机窗口正对母线连接处，成像板放置在射线机窗口正对面（见图 7），可获得 330kV GIS 母线连接处影像照片（见图 8）。



图 7 射线机、成像板摆放位置



图 8 母线连接影像

5.5 CR 成功案例 5----- 330kV GIS 断路器设备 X 射线成像检测



图 9 射线机、成像板摆放位置



图 10 断路器影像

5.6 CR 成功案例 6----- 750kV GIS 断路器设备 X 射线成像检测

将 2 张成像板紧挨着断路器顶部人孔放置，X 射线机机头中心正对两张成像板中心，（见图 11、12），便可获得 750kV GIS 断路器断口影像照片（见图 13）。



图 11 成像板放置位置



图 12 X射线机放置位置

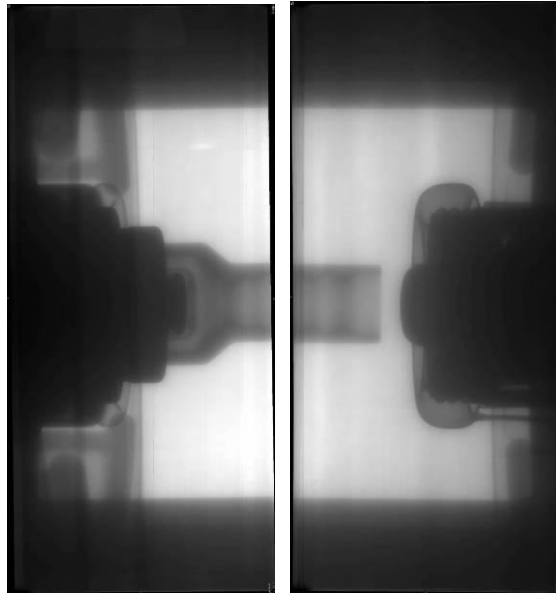
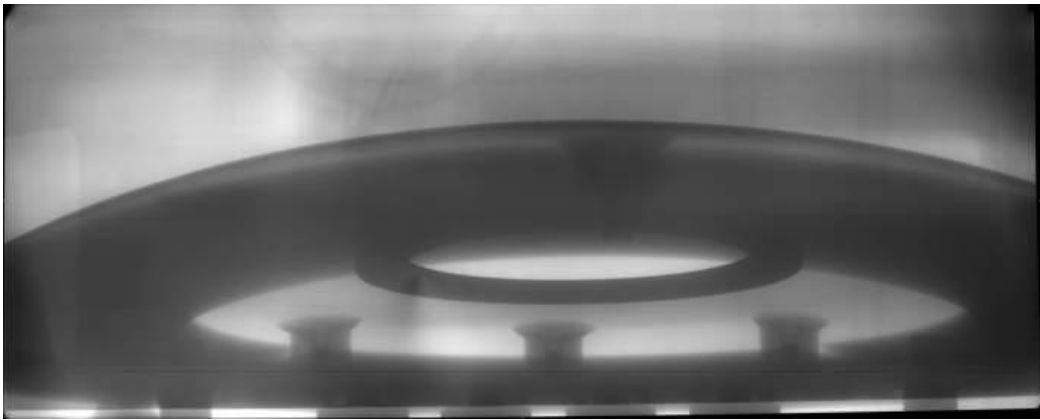


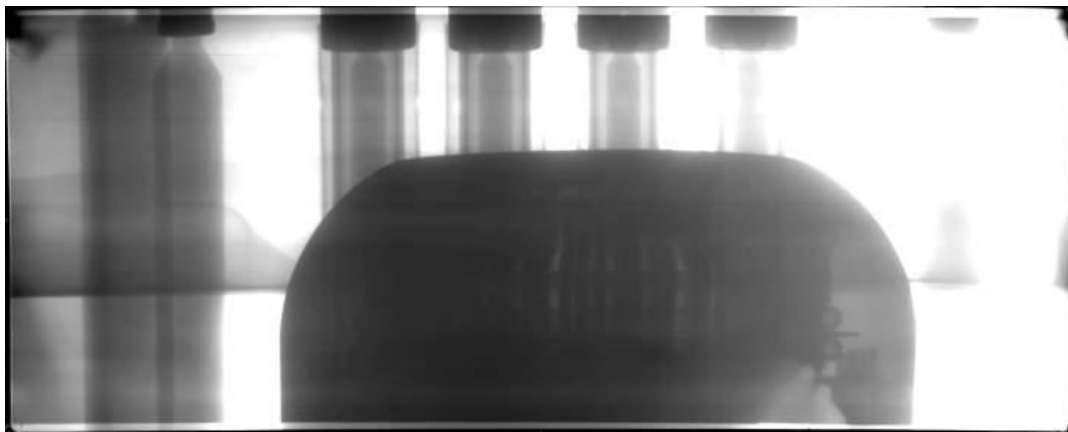
图 13 断路器断口影像

5.7 CR 成功案例 7----- 750kV GIS 隔离开关 X 射线成像检测

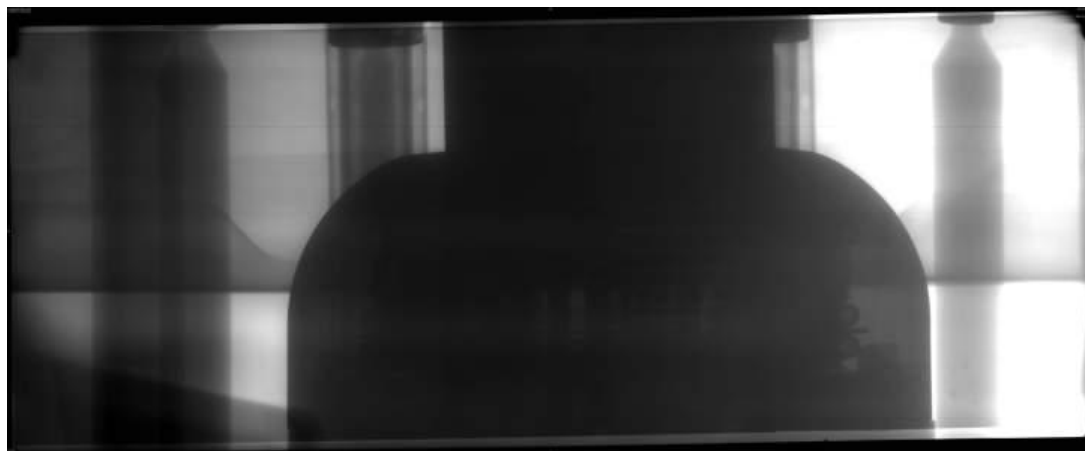
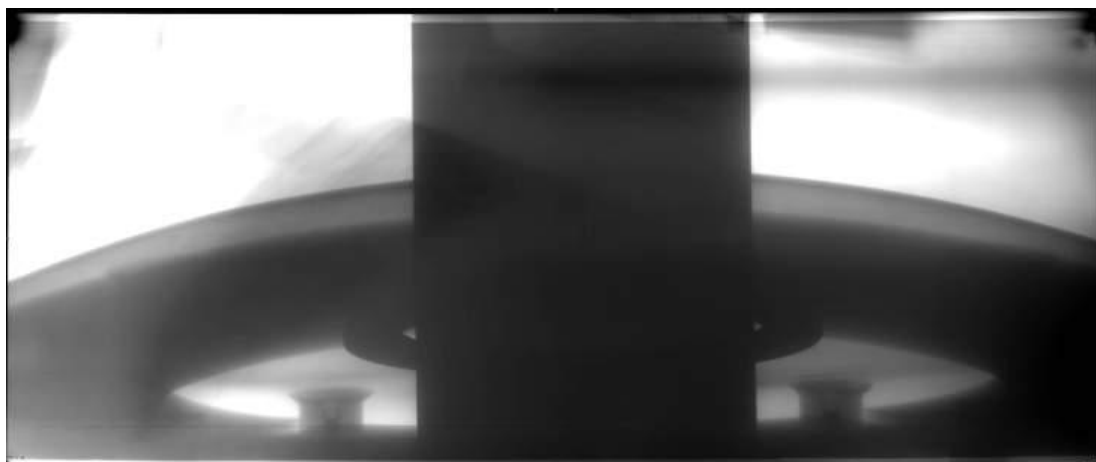


现场设备布置





开关断开时影像



开关闭合时影像

5.8 DR 成功案例

图14—图19，是2010年11月，在国内某知名开关集团做的3组DR实验，左边是DR图像，右边是对应的产品实际结构，可以看出图像质量非常高，弹簧、螺丝的细节非常清楚，完全能满足客户现场要求的快速、方便、清晰地要求。

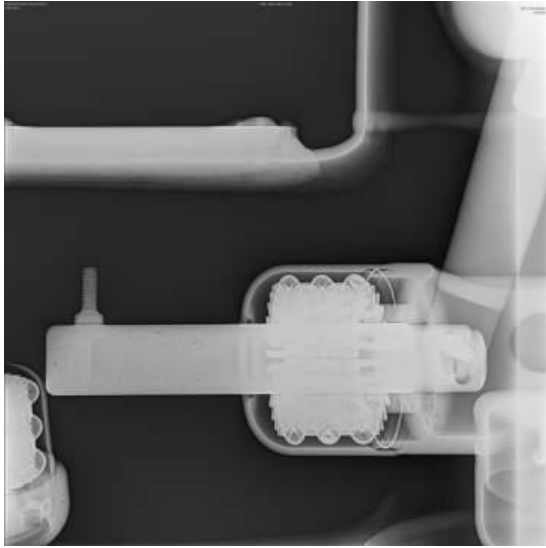


图 14

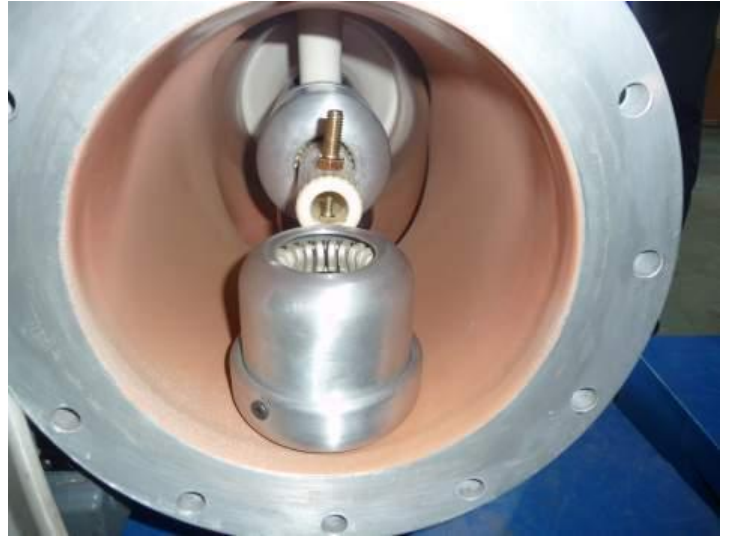


图 15

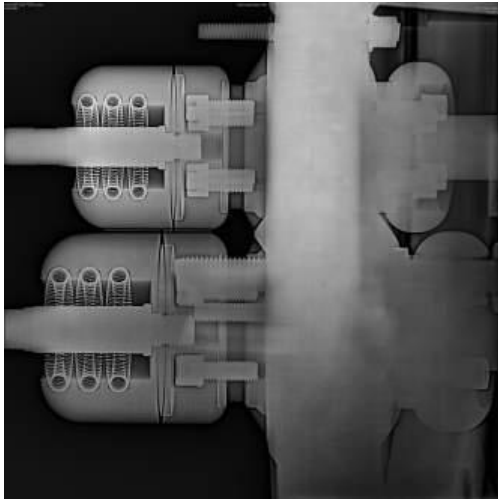


图 16



图 17

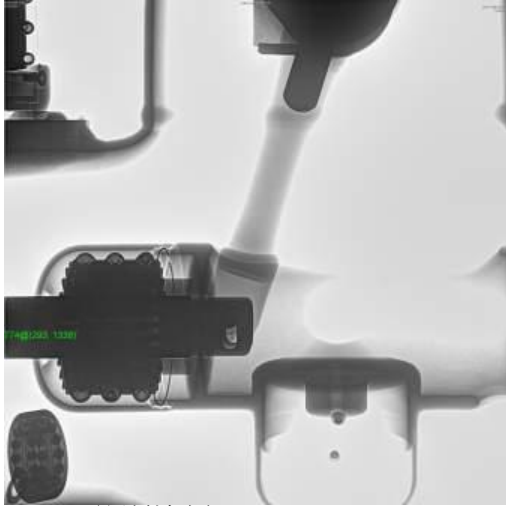


图 18



图 19

6. 结论

青海电力科学试验研究院金属所从 2008 年开始，从事了大量 GIS 设备故障诊断和状态监测的课题攻关，在中国率先提出应用 X 射线进行 GIS 等电力设备内部状态的可视化检测诊断方法，解决了 GIS 设备内部故障隐患难以有效识别与判断的重大难题。近几年，通过全国 10 多家企业的现场实践，大家普遍认为当前的 X 射线数字成像技术具有方便、快速、图像质量高、结果直观、便于快速决策、图像适合长期保存、适合野外作业、能在带电状态检测等特点，是判断 GIS 设备内部故障隐患的有效手段。目前已有 7 家以上单位使用了该技术，取得了可观的经济效益。同时在使用过程中，总结出如下经验：

1. CR 和 DR 都能满足现场检测要求，CR 能承受更高的 X 射线能量，柔性板更适合复杂环境；DR 成像速度更快，效率更高。客户可按自身需求合理选择。同时，两种方法都能兼顾常规的无损检测任务如：焊缝检测、铸件探伤等。

2. 青海省电力公司于 2011 年 1 月 1 日，颁布了国内首个企业标准 Q/QDL10-15002-2011 《气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）X 射线数字成像检测技术导则》指导下属企业广泛应用该技术。

Q/QDL

青海省电力公司企业标准

Q/QDL10-15002-2011

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）

X 射线数字成像检测技术导则

Guide of X-ray digital imaging system examination for
gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS)
equipment

2011-01-01 发布

2011-01-01 实施

青海省电力公司 发布

参考文献:

- [1] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
 - [2] GIS 设备 X 射线可视化检测技术, 闫斌, 何喜梅, 吴童生, 王志惠, 李生平, 青海电力科学实验研究院, 中国电力, 2010,第 7 期。
 - [3] Digital Conversion DXR TSM Guide, GE Inspection Technologies, Nov, 2010
 - [4] Industrial Radiography Image Forming Techniques, GE Inspection Technologies, 2008
- 作者简介: 闫斌(1967—), 男, 青海省西宁市, 高级工程师, 从事技术监督工作。E-mail: qhdyjs@yahoo.com.cn, 联系方式: 13997239381 0971-6175321
- 朱春旺: 高级工程师, 20 年以上无损检测工作经验, RT、UT, III 级。通用电气检测控制技术(上海)有限公司, 电力行业大客户经理, E-mail: chunwang.zhu@ge.com; Phone: 0086 134 82830918.