

便携式电缆 X 光数字实时成像检测成套设备的设计研究

何光华¹, 吴寅雄¹, 杨东兴¹, 周立²

(1.无锡供电公司, 江苏 无锡 214061; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 210000)

摘要: 本文阐述了基于数字实时成像技术的电缆 X 光检测成套设备的原理功能和整体设计方案, 通过理论研究和模拟试验的方法, 分别优化设计 X 光成像检测透照系统、图像处理系统模块, 并结合电缆现场运行实际环境, 研制新型的便携式现场防护系统模块, 实现可通用于不同电压等级、不同截面和不同结构的电缆本体和附件的具有密度变化差异特征的缺陷检测应用, 且具备操作安全、精度适用、灵活轻便、直观快速的特点, 有良好的使用推广价值。

关键词: 便携式; 电缆; X 光数字实时成像; 成套设备

0 引言

随着我国城市经济的发展, 城市电缆化率也逐年提高, 减少电缆故障成为提高供电可靠性的主要途径。当前电缆内部集中性缺陷主要采用传统电气试验和理化试验进行检测, 无法快速、精确的给出判断结论, X 光检测技术主要的胶片成像技术由于测试时间变长, 材料污染大、安全风险加大等问题较难推广。本文结合电缆和附件缺陷的类型和特点, 设计研制新型的 X 光无损实时数字成像检测便携式系统设备, 在不破坏电缆的基础上, 可快速、直观的查看电缆设备的内部情况, 及时发现电缆设备的潜在运行隐患, 为确定检修策略提供有效依据。

1 电缆 X 光数字化实时成像检测成套设备的功能目标

目标: 适用于不同电压等级、不同截面和不同结构的电缆本体和附件的具有密度变化差异特征的缺陷检测应用, 在不破坏电缆的基础上, 查看电缆设备的内部情况, 满足对电缆各类典型缺陷的检测评估要求。

要求: 系统设备操作检测对电缆不会造成损伤, 且具有操作安全可靠、现场使用灵活轻便、图像检测直观、快速, 测试精度适用, 具备图像软件后期清晰度处理、存储方便等特点。

根据系统目标和要求, 确定设备系统主要性能指标, 见表 1。

表 1 设备系统主要性能指标

序号	名称	标准要求
1	适用范围	10-220kV 电缆本体及附件具有密度变化差异(密度基本由小到大)特征的缺陷检测应用。
2	安全可靠	具备完善的安全防护系统, 根据电缆运行密集区域情况, 研制便携式防护箱。
3	测试成像直观、快速	1) 射线机、数字成像板技术参数满足快速、清晰成像要求。 2) 具备快速采集图形的采集系统。
4	测试精度适当, 满足典型缺陷的最小像素、灵敏度测试要求	成套系统内射线机、数字成像板技术参数满足金属颗粒 0.05mm 测试清晰的要求, 动态灵敏度不大于 2.0-2.5%, 静态灵敏度不小于 1-1.2%, 空间分辨率不低于 35-40 LP/cm。
5	图像软件具备后期清晰度处理、存储方便	1) 具备强大图像去噪、补偿、调节功能的处理软件功能。 2) 采用计算机存储方法。
6	设备便携轻便	发射机重量不超过 20kg; 便携式防护箱不超过 35kg。

2 成套设备系统工作原理和整体设计方案研究

根据该套设备功能目标和要求, 我们将系统分为具有三大系统模块: X 射线成像检测透照系统、图像处理系统以及射线防护系统, 其中, 透照系统主要由 X 射线机、成像板、工件以及附属设备构成, 图像处理系统主要由图像处理软件以及配套计算机设备构成, 而射线防护系统则由射线屏蔽装置、射线报警装置、个人剂量计等防护用品构成。详细见图 1 所示。

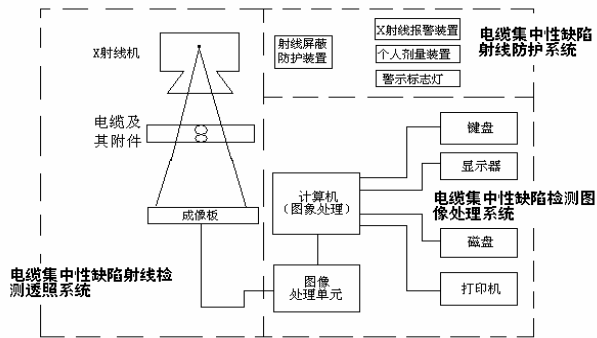


图 1 电缆 X 射线检测成套设备总体构成

其工作原理为：射线机发出 X 射线，通过被检电缆及其附件，强度发生衰减，被成像板接收，成像板将不同强度的射线转换为电信号，输送至图像处理单元，通过图像处理软件处理，形成数字图像快速显示，供检测人员现场评估判断。透照过程中，射线屏蔽装置屏蔽住大部分的射线，防止工作人员接受过量射线，同时，采用个人剂量装置、射线报警装置等辅助确保射线防护效果。

3 成套设备系统模块功能优化设计研究

3.1 X 射线成像检测透照系统的优化设计

X 射线成像检测透照系统的主要部件分为 X 射线机、成像板、工件以及附属设备构成，下面对主要部件进行优化设计选型。

3.1.1 X 射线机的优化设计

目前工业常用的 X 射线源主要是工业 X 射线机。一般来说，选择射线机的首要因素就是射线机所发出的射线对被检的试件具有足够的穿透力，并在此基础上充分考虑检测灵敏度、检测方便性等各种因素。

(1) X 射线机的基本结构与类型

工业射线照相探伤中使用的低能 X 射线机，简单地说是由四部分组成：射线发生器(X 射线管)、高压发生器、冷却系统、控制系统。当各部分独立时，高压发生器与射线发生器之间应采用高压电缆连接。

X 射线机可以从不同方面进行分类。按照 X 射线机的结构，X 射线机通常分为三类，便携式 X 射线机、移动式 X 射线机、固定式 X 射线机，表 2 列出了各类型的主要特点。根据高压电缆线路集中性缺陷无损检测的特点，应选用现场易于使用的便

携式 X 射线机。

表 2 X 射线机类型对比表

类型	结构特点	最高管电压 /kV	管电流 /mA
便携式	X 射线管与高压发生器组合，采用 低压电缆与操作箱连接。重量轻、 体积小	320	可调，达 5
移动式	X 射线管与高压发生器分离，采用 高压电缆相互连接	160	可调
固定式	X 射线管与高压发生器分离，采用 高压电缆相互连接，有良好的冷却 系统。重量大、体积大	450	可调，达 30

(2) 射线机管电压的确定

对射线检测来说，最高管电压决定了射线透照电压调节范围。管电压本身决定了射线源产生的射线的能量。它对射线照片的影像质量和射线照相灵敏度都具有重要影响。主要是随着射线能量的提高，线衰减系数将减小。推荐的选取射线能量的原则是，在保证射线具有一定穿透能力条件下选用较低的能量。因此，选取的射线能量应与透照物体的材料和厚度相适应。

为了明确管电压的取值范围，我们从穿透能力方面考虑，根据目前应用最为普及的不同电压等级和截面的电缆和附件型号进行了模拟试验，结果如图 2 所示。

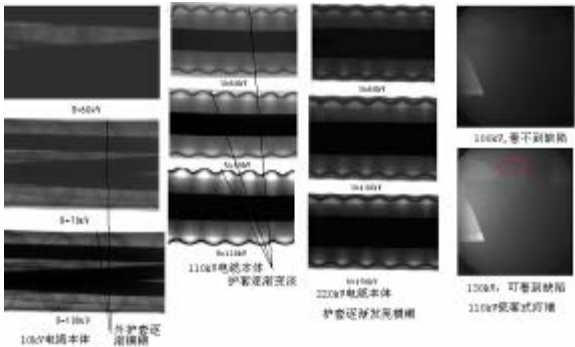


图 2 电缆本体、附件检测图像随透电压变化趋势

经过试验分析，得到不同电压等级电缆、附件的管电压推荐值，见表 3。

表 3 管电压推荐值

电压等级	型号	管电压推荐值/kV
10kV 电缆本体	YJV22-8.7/15-3*240	60-70
110kV 电缆本体	YJLW03-64/110-1*630	60-90
220kV 电缆本体	YJLW03-127/220-1*800	70-120
110kV 电缆终端	充油式瓷套式电缆终端	100-130

考虑到现场焦距变化、终端及接头穿透厚度的增大对射线能量的衰减作用，射线机最高电压一般

可在 160kV 左右。因此，射线机选择最高管电压取值在 60-160kV 范围内。

(3) 射线机其他指标优化设计

射线机其他指标优化设计见表 4。

表 4 射线机其他指标优化设计表

性能指标	关键影响因素	结论
管电流	管电流方面，管电流越大，检测灵敏度越高，综合考虑性价比，选取工业工业探伤用射线机通用电流档。	5mA 为宜
焦点尺寸	小焦点有助于提高射线检测灵敏度，但相应的冷却系统要求急剧升高，体积增大，成本提升。经研究，检测电缆，是在所成图像中分辨各层结构的完整性和相对位置，以 0.05mm 金属颗粒为测试点进行取值。	0.8×0.8 (mm) 为宜
射线管类型	射线管是射线机的核心部分，目前工业 X 射线管有玻璃管、波纹陶瓷管和金属陶瓷管。金属陶瓷管以不锈钢代替玻璃，以陶瓷作为绝缘介质，具有结构牢固，使用性能好、体积小、寿命长，重量轻的优点，价格相对较高。	综合考虑，金属陶瓷管射线机为宜
自动训机功能	为确保了 X 射线管每次都是工作在最佳性能状态并延长使用寿命，X 射线机长期不用时，需进行训机。	应具备
装置自我保护功能	过电压保护，过流、欠载保护，射线管低压监控保护，射线管预热失败保护，射线管温度过高保护，高压接触器双重监控等措施；还应考虑防震，抗干扰，防尘等性能。	应具备
人员保护功能	为保证操作人员安全，需设置有紧急停止按钮，双重独立互锁等功能，还须配置长距离操作电缆，使作业人员能在较远距离操作射线机。	应具备
滤波装置	不添加任何滤波装置，附带产生部分波长较长，穿透物质能力较弱的软 X 射线会使边缘和细节发生模糊。	应具备
稳定性	对电缆测试部分重复观测，但受现场限制，射线测试不宜多，稳定性应考虑。	应具备
电压电流调节	同一参数的 kV 等级的射线机，其 kV 和 mA 的设定范围在不超过发生器额定值的条件下，按照近似射线管功率曲线进行设置和使用为佳。	应具备

综上所述，射线机选择丹东公司的 1605 型射线机基本能够满足电缆检测的需要。

3.1.2 成像板的优化选型

各种 X 射线成像检测技术在工业领域均得到了广泛的应用，但综合比较，发现它们各有优缺点，具体见表 5 所示，经过综合对比，由于我们要进行电缆及附件的现场检测，要求检测速度快，检测结果直观，操作简便，综合考虑我们择优选择数字平板直接成像技术（DR）。

表 5 成像技术综合对比表

成像技术	原理	优点	缺点
射线照相技术（CR）	将 X 射线透过工件后的信息记录在成像板上，经扫描装置读取，再由计算机生出数字化图像。	原有的 X 射线设备不需要更换或改造，可以直接使用；宽容度大，曝光条件易选择；可减小照相曝光量；存储、传输、提取、观察方便。	不能直接获得图像，必须将 CR 屏放入读取器中才能得到图像；不能在潮湿的环境中和极端的温度条件下使用。
线阵列扫描成像技术(LDA)	由 X 射线机发出的经准直为扇形的一束 X 射线，穿过被检测工件，被线扫描成像器（LDA 探测器）接收，将 X 射线直接转换成数字信号，然后传送到图像采集控制器和计算机中。	成像速度快，存储、传输、提取方便。	不能直接获得图像，为得到完整图像需要反复的进行扫描，然后还需要计算机进行组合。
数字平板直接成像技术（DR）	X 射线首先撞击其板上的闪烁层，该闪烁层以与所撞击的射线能量成正比的关系发出光电子，这些光电子被下面的硅光电二极管阵列采集到，并将它们转化成电荷，X 射线转换为光线需要中间媒体。	不必更换胶片和存储荧光板，仅仅需要几秒钟的数据采集，就可以观察到图像，检测速度和效率大大高于胶片和 CR 技术。	成像质量不及 CR。

我们对目前 GE 公司、以色列维迪思科公司、瓦里安（VARIAN）公司等主流厂家的产品技术参数进行比较，发现成像板分辨率、重量等技术参数均基本能够满足本项目的需要，因此，考虑因素主要是价格因素。综合性价比，择优选择瓦里安（VARIAN）公司 PaxScan4030E 面板探测器。

3.2 图像处理系统的优化设计

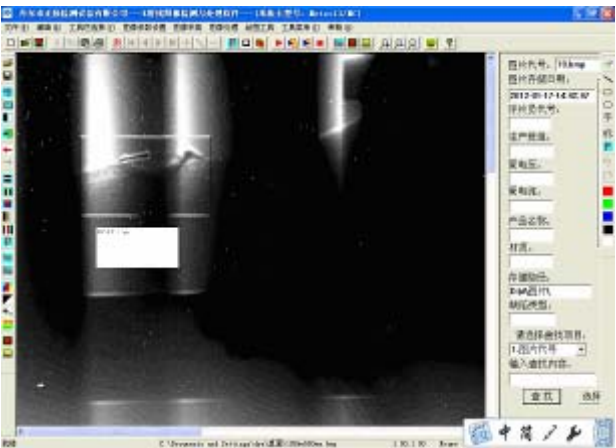


图 3 图像处理软件界面

为了实现对电缆及附件缺陷检测图像的处理和显示,软件系统选择具有对比度增强、图像锐化、图像平滑、边缘增强、直方图均衡、浮雕、伪彩色等数字图像处理功能的软件,通过上述数字去噪图像处理方法,实现对电缆检测抓图的优化处理,提高成像质量。见图 3。

3.3 X 光防护系统的优化设计

(1) 从事射线工业检测,必须进行辐射防护,通常工业射线防护主要通过控制三个因素来解决射线的防护问题,分别是①时间——控制射线对人体的曝光时间;②距离——控制射线源到人体间的距离;③屏蔽——在人体和射线源之间隔一层吸收物质。

根据电缆现场实际运行环境,我们对上述方式进行了分析,见表 6。

表 6 成像技术综合对比表		
防护内容	防护方法分析	结论
电缆缺陷现场 X 光检测	所采用的 DR 数字成像检测技术曝光时间只有几秒钟,且每次工作所需要的照射次数是固定的,因此,通过控制射线对人体的曝光时间相对较难以实现。	不适用
	距离防护简单有效,一般超过 15 米即可。	适用于现场空间环境较开阔、人员稀少的场合,人口密集区较难实现
	1) 检测人员配置专业防护服、测量笔等。 2) 研制新型的屏蔽防护箱	用于人口密集区域,应配置防护服和新型屏蔽防护箱

(2) 射线防护系统的研究

根据 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》对职业照射和公众照射剂量限值,屏蔽防护箱的研制以公众照射剂量防护为准。根据工艺操作规范,本课题采用 X 射线机作为照射源,其工作电压一般位于 150kV 以下,因此,屏蔽前照

射量(照射率)公式为 $I_0=10mSv/min$

1) 按国家规定,屏蔽后的安全剂量应为 $I=2.5\mu Sv/h$

2) 则以铅作为屏蔽材料时,半价层的个数应为: $n=\log_2\frac{I_0}{I}=13$

3) 查阅强衰减、宽 X 射线束的近似半价层厚

$T_{1/2}=0.030cm$, 因此所需铅屏蔽层的厚度应为

$T=n\times T_{1/2}=n\times 0.030=0.4cm$

4) 该防护箱以铅为材料,经计算厚度取 0.4cm,综合考虑现场环境,方案设计见图 4,应用该便携式防护装置,实现操作面的安全距离大大缩小,对人口密集区域的防护起到了较好的辅助保护作用。

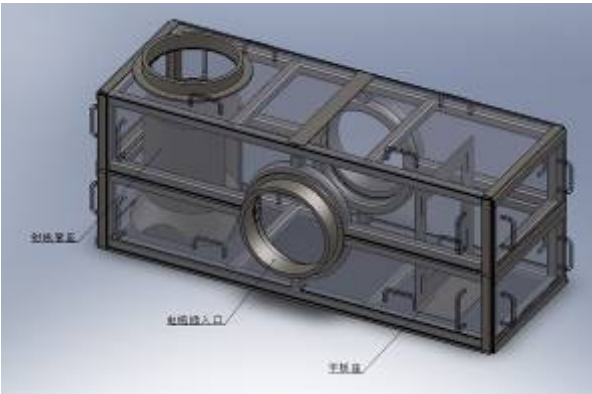


图 4 防护箱设计图

4 现场实例

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,使用该设备,采取相应的检测工艺,快速、直观、准确的完成了 X 光现场检测,经其他带电局放项目和更换后解剖验证,结论正确。该成套设备结构轻便,成像快捷,安全可靠,达到了预期效果。

5 结论

(1) 该套电缆 X 光检测成套设备基于实时成像技术,克服了以往对于 X 光胶片成像的缺点,具有结构轻便,成像快捷、对图像后期处理功能强大等特点,填补了国内在该领域的技术空白。

(2) 结合电缆实际缺陷发生概率,该检测设备主要应用于电缆非贯穿性缺陷的判断,可达到快速、直观、准确的效果,为下一步的检修策略提供有效依据。对于电缆附件的缺陷判断,不建议作为第一检测手段,可在发现有疑似缺陷的情况下,结合实际情况作为诊断性试验方法,作为有效的补充。

(3) 设备应用时,应使用正确的检测工艺,根据测量现场的实际运行情况,选择最佳防护措施,确保操作地区人员的安全。

讨论会论文集[C].2012.

参考文献:

- [1] 机械工业出版社. 无损检测仪器工业用 X 射线管主参数 [M].北京:机械工业出版社, 2010.
- [2] 李家伟. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [3] 何光华,陈大兵, 陈伟嵩.基于 X 光数字实时成像技术的电缆集中性缺陷检测工艺的研究[J]. 江苏科技信息(学术研究),2012(11):82-85.
- [4] 何光华,陈大兵,俞骏,等. 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[A]. 华东六省一市电机工程(电力)学会输配电技术讨论会,第二十届华东六省一市电机工程(电力)学会输配电技术

作者简介:

何光华(1978—), 女, 高级工程师, 无锡供电公司电缆工程公司副总经理, 长期从事电缆线路和绝缘监督专业工作;

吴寅雄(1976—), 男, 工程师, 无锡供电公司电缆工程公司工程专职, 长期从事电力系统专业工作;

杨东兴(1973—), 男, 无锡供电公司电缆工程公司技师, 长期从事电力系统专业工作;

周立(1982—), 男, 江苏省电力科学研究院工程师, 长期从事电力系统专业研究工作。