

## 源平移扫描局部 CT 成像及其检测在役高压电缆

廖明娟<sup>1,2</sup>, 李雷<sup>2</sup>, 段晓礁<sup>1,2,3</sup>, 陈大兵<sup>4</sup>, 刘丰林<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;<sup>2</sup>重庆大学工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044;<sup>3</sup>重庆真测科技股份有限公司, 重庆 401332;<sup>4</sup>国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103

**摘要** 针对在役高压电缆缓冲层烧蚀缺陷多出现在电缆底部的特点, 提出一种源直线扫描局部计算机断层成像(L-STCT)方法, 实现在役电缆底部阻水缓冲层缺陷检测。L-STCT 扫描时, 平板探测器靠近检测电缆, 预估缺陷位置大致处于最大投影覆盖角度处, 通过射线源平移扫描采集投影数据。建立 L-STCT 成像模型, 分析扫描参数和扫描系统各数据点的最大投影覆盖角度对重建图像的影响, 搭建实验平台, 采用同步迭代重建(SIRT)算法重建 CT 图像。仿真和实验结果表明, L-STCT 能实现高压电缆阻水缓冲层的局部缺陷检测, 对在役高压电缆检测的实际应用具有重要参考价值。

**关键词** 成像系统; 计算机断层成像; 直线扫描; 高压电缆; 图像重建

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1611002

## Local Source-Translation CT Imaging for Testing In-Service High-Voltage Cables

Liao Mingjuan<sup>1,2</sup>, Li Lei<sup>2</sup>, Duan Xiaojiao<sup>1,2,3</sup>, Chen Dabing<sup>4</sup>, Liu Fenglin<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;<sup>2</sup>Industrial CT Non-Destructive Testing Engineering Research Center, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;<sup>3</sup>Chongqing Zhence Science and Technology Co., Ltd., Chongqing 401332, China;<sup>4</sup>Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, Jiangsu, China

**Abstract** In terms of the problem that ablation defects in the buffer layer of in-service high-voltage cables mostly appear at the bottom of the cable, a local source-translation computed tomography (L-STCT) method is proposed to detect defects in the water-blocking buffer layer at the bottom of in-service high-voltage cables. During the operation of L-STCT, the flat panel detector is placed close to the tested cable, estimated defect approximately exists at the maximum projection coverage angle, and projection data is collected by X-ray STCT. This paper establishes an L-STCT imaging model, analyzes scanning parameters and the maximum projection coverage angle of each data point of the scanning system, and studies their influence on image reconstruction. In addition, an experimental platform is set up to carry out a preliminary study on image reconstruction by the simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) algorithm. The simulation and actually experimental results show that L-STCT can detect local defects in the water-blocking buffer layer of high-voltage cables, which provides an important reference for the application of in-service high-voltage cable detection.

**Key words** imaging systems; computed tomography; linear scanning; high-voltage cables; image reconstruction

## 1 引言

交联聚乙烯(XLPE)高压电缆以其机械性能优

异、耐热性能好、安装维护方便等优点,在城市电力输送中发挥重要作用<sup>[1]</sup>。该电缆从里向外由导体、导体屏蔽层、XLPE绝缘层、绝缘屏蔽层、半导体阻水缓冲

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(62171067)、国家电网有限公司科技项目(5500-202118134A)

通信作者: \*liufl@cqu.edu.cn

层、铝护套和外护层组成。电缆长时间带电运行,地下工作环境湿度大,部分电缆沟或隧道积水严重,高压电缆底部阻水缓冲层容易受潮,析出白色粉末,使得绝缘屏蔽层与铝护套之间的接触电阻增大,从而在径向上产生一定的电压差。电压差大于某个值会导致空气间隙击穿,引起铝护套与缓冲层间的放电,长时间作用下导致缓冲层烧蚀,产生重大的安全隐患<sup>[2-3]</sup>。

目前,X射线数字成像(DR)技术是在役电缆缺陷无损检测的主要方法之一。DR图像以不同灰度值显示电缆各部分材料对X射线的吸收程度差异,可在电缆带电运行时直观地检测出电缆缺陷的位置及尺寸<sup>[4]</sup>。但由于DR呈现的是一个方向物体所有结构的叠加信息,受电缆皱纹铝套和外护套间无规律的间隙阴影干扰,DR只能检测出电缆内部缺陷较为明显的区域,不能满足在役高压电缆的检测需求。计算机断层成像(CT)技术通过从不同角度获取检测对象的投影信息,可以清晰呈现物体三维内部结构,得到缺陷的空间位置、形状及尺寸信息<sup>[5-6]</sup>。圆周扫描是CT成像中常见的扫描方式,使射线源与探测器相对检测对象做圆周旋转运动,采集完备的投影数据,实现对物体的精确图像重建<sup>[7]</sup>。但由于地下隧道电缆检测现场空间狭窄,电缆间多为一字或品字排列,使用传统圆周CT扫描检测在役电缆难度大<sup>[2]</sup>。因此,研究新型CT成像方法实现在役电缆检测,具有重要的实际应用价值。

大量现有检测报告表明,在役高压电缆阻水缓冲层缺陷多出现在电缆接头底部<sup>[8-9]</sup>,且缺陷沿电缆圆周切向分布。分析在役高压电缆CT检测需求,可只考虑电缆底部局部CT成像,以检测电缆圆周切向缺陷为主要目标。同时,相应的CT扫描成像设备应具有结构简单、扫描运动简单、可移动和便携等特点。另外:局部CT扫描成像不需要射线穿透电缆芯部高密度材料,可降低射线能量和功率要求;检测缺陷沿电缆圆周切向分布时,可考虑利用不完备投影数据重建CT图像。

直线扫描CT是利用射线源或者探测器平移采集数据的一种扫描方式<sup>[10-11]</sup>。由于直线运动更容易控制且结构更简单、更易制造,相对于圆周CT扫描而言,直线扫描CT更适合应用于工业流水线、安装管道、地下隧道等非常规条件下的检测。2013年,针对墙角的线缆、管道检测,Schön等<sup>[12]</sup>提出了一种射线源运动轨迹与探测器相互垂直的直线扫描CT。Gao等<sup>[13]</sup>利用大扇角射线源和大尺寸面阵探测器,设计了一套适用于安全检查和直线扫描CT系统。在扫描过程中,射线源、探测器固定,物体在扫描场中移动。针对石油管道检测,Liu等<sup>[14]</sup>研究了一种直线CT系统,即物体不动,射线源与探测器沿直线同向运动。2021年,Yu等<sup>[15]</sup>提出了一种新型X射线源平移扫描CT(STCT)成像方法,扫描过程中探测器和检测对象保持不动,射线源沿平行于探测器的方向做直线运动以扫描检测对象、获取投影数据,检测对象靠近射线源放置,通过改变射线源的平移扫描距离可改变成像视场(FOV)。

由于在检测过程中,STCT不涉及任何旋转运动,可以实现快速扫描,并且系统结构简单。

本文针对在役高压电缆缺陷检测需求,提出了一种局部STCT(L-STCT)成像方法,对在役高压电缆阻水缓冲层底部进行局部检测。L-STCT的扫描方式如下:被测电缆和平板探测器保持不动,X射线源沿平行于探测器方向进行等距直线移动并采集投影数据,检测对象靠近探测器放置。受射线源移动距离以及探测器大小限制,L-STCT无法采集完备的投影数据用于图像重建,为了保证采集最大投影角度覆盖范围,本文将成像区域中心放在源轨迹上端-探测器下端形成的直线与源轨迹下端-探测器上端形成的直线的交点处。

常用CT图像重建算法主要分为解析型和迭代型重建算法<sup>[16-17]</sup>。解析型重建算法包括滤波反投影(FBP)、反投影滤波(BPF)和Linogram重建算法等,解析类算法的重建速度快,但是对数据完备性要求较高,在欠采样情况下会产生严重的伪影<sup>[18-20]</sup>。由于单段直线扫描投影数据不完全,解析类算法会导致重建图像受伪影干扰严重。迭代类算法以求解线性方程组的方式进行图像重建,该方法可以在投影数据不完全的情况下,结合先验知识提高图像质量,图像信噪比高<sup>[21]</sup>。因此,本文采用同步迭代重建(SIRT)算法对投影数据进行重建。

本文通过建立L-STCT几何模型,分析扫描系统内所有数据点的最大投影覆盖角度以及扫描参数;通过仿真验证该成像方法的可行性;搭建实验系统,对高压电缆进行CT扫描成像实验;采用SIRT算法进行图像重建;最后进行讨论和总结。

## 2 L-STCT扫描成像方法

### 2.1 几何模型

L-STCT几何模型如图1所示。X射线源和平板探测器放置在检测电缆的两侧,探测器靠近检测电缆,其中心对准电缆底部放置。扫描过程中,探测器固定,射线源沿着垂直方向平移,探测器通过读取不同射线源位置物体的衰减信息获取不同位置的投影数据。

为了便于分析,以电缆底部成像区域中心为原点,建立固定坐标系 $o-xyz$ 。如图1所示: $x$ 轴平行于射线源运动轨迹,向上为正; $y$ 轴垂直于射线源运动轨迹并指向平板探测器中心; $z$ 轴平行于探测器行阵。在扫描过程中,平板探测器和被扫描物体不动,射线源沿着 $x$ 轴方向等距平移,采集物体不同角度的投影数据,每个源位置发射的X射线束只能照到物体的一部分。

取锥束中心水平面 $xoy$ 平面对模型进行进一步分析,如图2所示。其中 $R$ 表示被测电缆半径; $d_m$ ( $m$ 表示探测器探元个数)和 $d_1$ 分别是探测器的上下两端点, $d$ 是探测器的长度。扫描过程中射线源从 $s_1$ 线性运动到 $s_n$ ( $n$ 表示L-STCT扫描采集的投影数), $s$ 表示射线源运动轨迹长度。 $h$ 表示检测对象( $x$ 轴)到射线源运动轨迹的距离, $l$ 表示平板探测器到检测对象( $x$

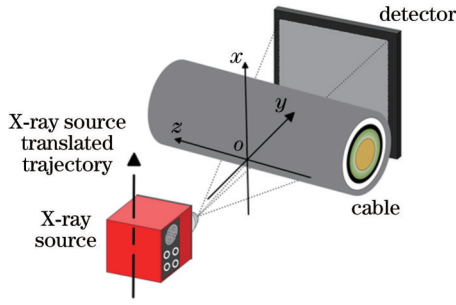


图 1 L-STCT 系统几何模型  
Fig. 1 Geometric model of L-STCT system

轴)之间的距离。射线源轨迹  $s_1$  与探测器  $d_m$  的连线和射线源轨迹  $s_n$  与探测器  $d_1$  的连线相交于点  $M$ , 称其为系统中心点, 坐标原点  $o$  与点  $M$  重合。物体中心与中轴线的水平距离为  $a$ , 系统成像区域的视场(FOV)设置为以坐标原点  $o$  为中心的矩形, 如图 2 矩形框, 对应高压电缆底部区域。下文中所说的高压电缆底部都对应成像系统平面图中电缆切片的左侧。

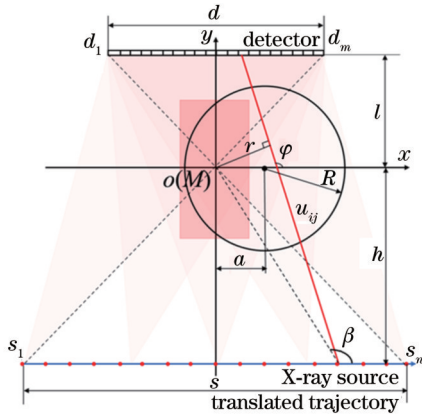


图 2 平面几何模型  
Fig. 2 2D geometry model

任意穿过检测对象的射线  $u_{ij}$  可以由射线与  $x$  轴的夹角  $\varphi$  和原点到射线的距离  $r$  唯一标识, 设  $\beta$  为射线源位置到中心  $o$  的连线与  $x$  轴正半轴的夹角, 则有

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l+h}{x_D - x_S}\right), \varphi \in (0, 180^\circ), \quad (1)$$

$$r = \sqrt{x_S^2 + h^2} \sin(\beta - \varphi), \quad (2)$$

式中:  $\beta = \arctan(-h/x_S), \beta \in (0, 180^\circ)$ ;  $x_D$  和  $x_S$  分别是射线与探测器和射线源运动轨迹交点的横坐标, 且  $x_D \in [-d/2, d/2], x_S \in [-s/2, s/2]$ 。在对投影数据进行重建时, 数据完备性原则是: 对于所有的  $r$ , 应至少有  $180^\circ$  的投影角度覆盖。于是, 对于任意  $r$ , 可以求得相应的投影角度覆盖范围  $\Delta\varphi$  为

$$\Delta\varphi(r) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{d}{l}\right), & r=0 \\ \varphi_1(r) - \varphi_2(r), & r>0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中

$$\varphi_1(r) = \arctan\left(\frac{dl/2 + r\sqrt{d^2/4 + l^2 - r^2}}{d^2/4 - r^2}\right), \quad (4)$$

$$\varphi_2(r) = \arctan\left(\frac{-sh/2 - r\sqrt{s^2/4 + h^2 - r^2}}{d^2/4 - r^2}\right), \quad (5)$$

式中:  $\varphi_1(r)$  表示射线源焦点位于  $s_1$  时发出的 X 射线与原点距离为  $r$  时, 此 X 射线与  $x$  轴形成的夹角;  $\varphi_2(r)$  表示到探测器单元  $d_1$  的 X 射线与原点距离为  $r$  时, 此 X 射线与  $x$  轴形成的夹角。引入以  $(r, \varphi)$  为坐标系的 Radon 变换空间来描述投影数据, Radon 空间中的每个点表示每条射线在不同投影角度和位置下得到的投影数据, 由式 (1)~(3) 可以得到 L-STCT 扫描在 Radon 空间中的投影数据分布, 如图 3 所示。当  $r=0$  时,  $\Delta\varphi$  取得最大值, 记为最大投影覆盖角度  $\Delta\varphi_{\max}$ 。

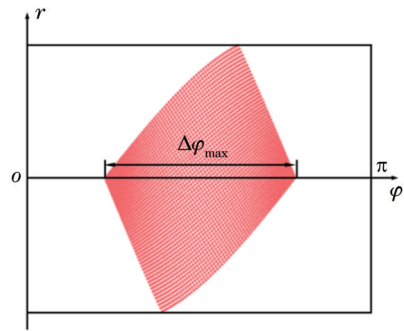


图 3 Radon 空间数据分布  
Fig. 3 Data distribution in Radon space

### 2.2 系统数据点最大投影覆盖角度和几何参数分析

如图 2 所示, 当射线源扫描轨迹、探测器宽度、射线源到探测器距离一定时, 确定一个  $M$  点, 其为过射线源扫描轨迹端点  $s_1$  和探测器端点  $d_m$  的直线  $s_1d_m$  与过射线源扫描轨迹端点  $s_n$  和探测器端点  $d_1$  的直线  $s_nd_1$  的交点, 点  $M$  到射线源运动轨迹的直线距离为  $\frac{s(l+h)}{s+d}$ 。当固定坐标系原点  $o$  位于  $M$  点时, 可以获得

最大投影覆盖角度  $\Delta\varphi_{\max}$ , 此时系统参数满足  $\frac{d}{l} = \frac{s}{h}$ 。

为证明点  $M$  的性质, 将系统以点  $M$  为中心分为如图 4 所示的 4 个区域, 分析 L-STCT 扫描系统中每个数据点的最大投影覆盖角度。由式 (1) 可以得到, 在射线源平移采集投影数据时, 不同区域的数据点  $P(x, y)$  相应的最大投影覆盖角度为  $\Delta\varphi_{\max} = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$  和  $\varphi_{\min}$  分别为对所有穿过  $P$  点的射线与  $x$  轴正半轴的最大夹角和最小夹角。

如图 5 所示: 在区域 1 中  $P$  点的最大投影覆盖角  $\Delta\varphi_{\max}$  为射线  $d_1P$  和射线  $s_1P$  的夹角; 在区域 2 中  $P$  点的最大投影覆盖角  $\Delta\varphi_{\max}$  为射线  $s_nP$  和射线  $s_1P$  的夹角; 在区域 3 中  $P$  点的最大投影覆盖角  $\Delta\varphi_{\max}$  为射线  $d_1P$  和射线  $d_mP$  的夹角; 在区域 4 中  $P$  点的最大投影覆盖角  $\Delta\varphi_{\max}$  为射线  $s_nP$  和射线  $d_mP$  的夹角。

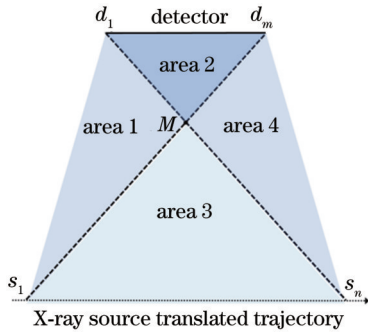


图 4 系统区域划分图

Fig. 4 System area division

具体地,  $\Delta\varphi_{\max}$  的计算如下:

$$\Delta\varphi_{\max} = \begin{cases} \varphi_{DL} - \varphi_{SL}, \text{ area 1} \\ \varphi_{SR} - \varphi_{SL}, \text{ area 2} \\ \varphi_{DL} - \varphi_{DR}, \text{ area 3} \\ \varphi_{SR} - \varphi_{DR}, \text{ area 4} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varphi_{SL} = \arctan\left(\frac{y+h}{x+s/2}\right)$ ,  $\varphi_{SR} = \arctan\left(\frac{y+h}{x-s/2}\right)$ ,  $\varphi_{DL} = \arctan\left(\frac{y-l}{x+d/2}\right)$ ,  $\varphi_{DR} = \arctan\left(\frac{y-l}{x-d/2}\right)$ 。从

图 5 可知: 在其他条件不变的情况下, 区域 1、区域 2 和区域 4 内数据点的最大投影覆盖角度会随着射线源移动距离的增大而增大; 选用更大尺寸的平板探测器时, 区域 1、区域 3 和区域 4 的最大投影覆盖角度会增大; 当减小射线源和被测物体之间的距离时, 区域 1、区域 2 和区域 4 的最大投影覆盖角度都会相应地增大, 反之则变小。

根据式 (6) 可以得到扫描系统每个数据点最大投影覆盖角度分布图。如图 6 所示, 纵横坐标确定数据点在系统中的几何位置, 对应的值表示最大投影覆盖

角度。点  $M$  处最大投影覆盖角度最大, 此时有

$$\Delta\varphi_{\max} = 2\arctan\left(\frac{d}{2l}\right) = 2\arctan\left(\frac{s}{2h}\right) \quad (7)$$

由上述分析可知: 在探测器宽度、射线源轨迹到探测器距离不变的情况下,  $s$  变大时,  $M$  点的  $\Delta\varphi_{\max}$  增大; 在射线源行程、射线源轨迹到探测器距离不变的情况下,  $d$  变大时,  $M$  点的  $\Delta\varphi_{\max}$  增大; 射线源行程、探测器宽度不变的情况下,  $h$  变大时,  $M$  点的  $\Delta\varphi_{\max}$  减小。

图 7 为图 6 过点  $M$  的水平线剖面图和垂直线剖面图。如图 7(a) 所示, 在点  $M$  左右, 即区域 1 和区域 4, 最大投影覆盖角度呈对称式分布且数据点到  $M$  点的距离和该数据点的最大投影覆盖角度呈负线性相关; 如图 7(b) 所示, 在点  $M$  上下, 区域 2 的最大投影覆盖角度与数据点到  $M$  点的距离呈非线性负相关, 区域 3 的最大投影覆盖角度与数据点到  $M$  点的距离呈线性负相关, 且靠近 X 射线源方向的那一侧减小得速度快。

综合以上分析可以看出, 受扫描系统和成像物体所处空间环境的限制, 投影角度受限, L-STCT 无法获得图像重建所需的完备数据。点  $M$  处的  $\Delta\varphi_{\max}$  最大但小于  $180^\circ$ , 在点  $M$  左右两侧, 各数据点的最大投影覆盖角度呈对称式分布且向两边减小, 在点  $M$  上下两侧, 各数据点的最大投影覆盖角度呈非线性减小。根据文献 [22], 利用有限角投影数据重建图像时, 如果被检测对象某一特征的边界与有限数据集中的一条射线相切, 那么该边界很容易由有限数据重建, 反之则不易被重建。对单个数据点而言, 投影覆盖角度越大, 重建出来的结果则会越好。在 L-STCT 成像系统中, 其他参数都保持不变时, 区域 1、3 和 4 的数据点投影射线角度的覆盖范围与探测器尺寸成正相关, 探测器宽度  $d$  越大,  $\Delta\varphi_{\max}$  越大, 采集到的投影数据越多, 所以实际使用中可尽量选用较大尺寸的探测器; 射线源行程越长, 区域 1、2 和 4 的数据点  $\Delta\varphi_{\max}$  越大, 不同角度的射线越

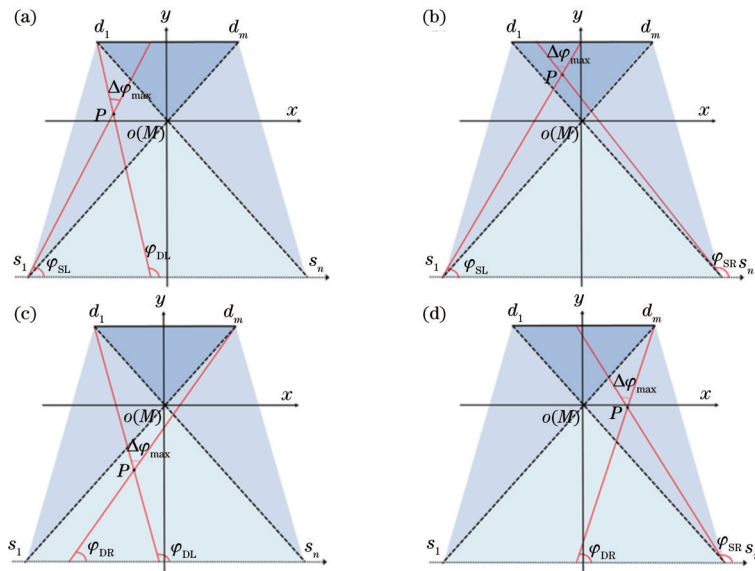


图 5 各子区域  $P$  点分析。(a) 区域 1; (b) 区域 2; (c) 区域 3; (d) 区域 4

Fig. 5 Analysis of  $P$  points in each sub-area. (a) Area 1; (b) area 2; (c) area 3; (d) area 4

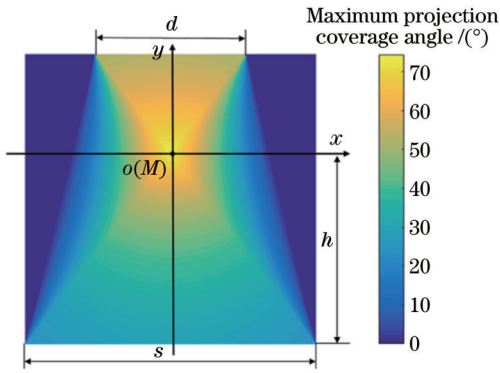


图 6 系统最大投影覆盖角度分布

Fig. 6 Maximum projection coverage angle distribution in this system

多,可通过增大射线源行程提高重建图像质量。除此之外,区域 1、2 和 4 数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  与射线源轨迹到被测物体的距离  $h$  呈负相关,两者距离越近,每个数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  增大。

在传统圆周 CT 扫描中,射线束至少需围绕检测

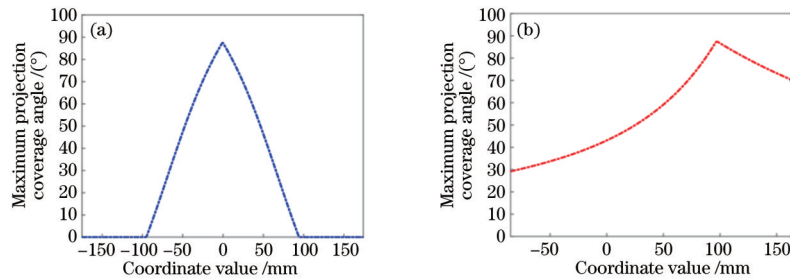


图 7 射线过点 M 的最大投影覆盖角度分布。(a) 水平线剖面图; (b) 垂直线剖面图

Fig. 7 Maximum projection coverage angle distributions for light passing point M. (a) Horizontal line section view; (b) vertical line section view

### 2.3 图像重建算法

L-STCT 成像本质是解决 CT 成像中的有限角问题,通过对构件的不完全扫描,实现对其内部结构形态及缺陷的层析检测<sup>[24]</sup>。在扫描过程中,对于每一个射线源焦点位置,都可以获得一份投影数据。由于实际电缆检测中,射线源和探测器的距离有限,且电缆体积较大,射线源发出的 X 射线只能照射到物体的一部分,每个角度的投影数据存在截断,只包含部分物体的投影,采用传统的解析重建算法(如 FBP 算法)会产生严重的截断伪影。为了获得更高质量的重建图像,本文采用迭代重建算法对图像进行重建。相比解析重建算法,迭代重建算法对数据一致性的要求较低,抗噪能力较强。传统的迭代重建算法有代数重建(ART)算法、联合代数重建(SART)算法和联合迭代重建(SIRT)算法等。SIRT 算法求解过程中用到的是经过该像素所有的射线,能够有效修正单条射线更新时引起的干扰,对测量误差不敏感,在数据不全的情况下也可以重建出质量较好的图像,故本文采用的是 SIRT 算法。

假设待重建图像为  $f = [f_1, f_2, \dots, f_J]^T$ ,  $J$  代表待重

对象旋转  $180^\circ$  加一个扇形角,以获取完备的投影数据用于图像重建,因而将所有角度下所有射线经过的公共区域定义为 FOV。FOV 为一个圆形区域,圆形区域半径大小与射线源到旋转中心的距离、旋转中心到探测器的距离和探测器有效宽度有关<sup>[23]</sup>。易知在该区域内每个点均至少有  $180^\circ$  的射线经过,因而可对该区域内每个点都实现精确重建。

当射线角度不足  $180^\circ$ ,重建过程转化为解决 CT 系统中的有限角问题。L-STCT 扫描不足以覆盖  $180^\circ$ ,故无法用一个完整的圆形区域来描述 L-STCT 的成像区域。但在有射线经过的区域内,一部分区域相对拥有更多的数据量,该区域主要集中在  $M$  点附近,经过该区域的投影覆盖角度范围相对较大,重建图像质量相对较好。故从提高成像质量的目的出发,本文将 L-STCT 成像区域 FOV 定义为以  $M$  点为中心的矩形区域。在对高压电缆阻水缓冲层缺陷进行检测时,将预估缺陷位置(高压电缆缓冲层底部)放在 FOV,此时矩形区域内每个数据点的最大投影覆盖角度最大,图像重建结果最好,FOV 区域大小根据实际检测需求确定。

建图像的像素个数,每个像素宽度为  $\delta$ ,  $P = [p_1, p_2, \dots, p_I]^T$  表示用  $I$  条射线投影得到的投影数据,则 CT 迭代重建的数学模型<sup>[25]</sup>可表示为

$$Af = P, \quad (8)$$

式中:  $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{I \times J}$  表示系统投影矩阵,  $a_{ij}$  称为权因子,表示第  $j$  个像素对第  $i$  条射线投影值的贡献。投影系统矩阵将断层图像矢量映射到投影数据,是迭代重建的关键因素,它的计算直接关系到重建的速度和精度。文中采用面积模型进行求解<sup>[26-27]</sup>,即将投影数据看作宽度为  $\tau$  的射束,  $a_{ij}$  表示第  $i$  条投影射线与第  $j$  个像素相交的面积与像素面积的比值。求解的过程中,投影矩阵  $A$  较大,无法通过直接求逆得到, SIRT 算法的求解过程如下:

$$f_j^{(t+1)} = f_j^{(t)} + \lambda \frac{1}{\sum_{i=1}^I a_{ij}} \sum_{i=1}^I \frac{p_i - \tilde{p}_i}{\sum_{k=1}^N a_{ik}^2} a_{ij}, \quad (9)$$

式中:  $t$  为 SIRT 当前的迭代次数;  $p_i$  为实际投影值;  $\tilde{p}_i = \sum_{k=1}^N a_{ik} f_k^{(t)}$  为计算投影值;  $\lambda$  是松弛因子

( $0 < \lambda < 1$ ), 影响迭代过程中的收敛速度。 $\lambda$  过大时, 算法收敛速度快, 但重建图像引入的噪声成分增多;  $\lambda$  过小时, 重建图像会变得平滑, 但是收敛也趋于缓慢。迭代时图像的初值设为 0, 具体地, 算法实现过程如下: 1) 输入投影数据  $P$ , 并对图像赋初值  $f_j^{(0)} = 0$ ; 2) 对于第  $i$  条射线, 计算投影数据估计值  $\tilde{p}_i = \sum_{k=1}^N a_{ik} f_k^{(i)}$ ; 3) 使用式(9)对  $f_j$  中的每个像素值进行修正; 4) 将上一轮的结果作为初值, 重复步骤 2)、3), 直到满足迭代终止条件。

### 3 高压电缆阻水缓冲层检测仿真和实验

#### 3.1 仿 真

为了验证 L-STCT 检测高压电缆阻水缓冲层缺陷的可行性, 对图 8 所示的模体进行了仿真扫描与重建。模体模拟高压电缆的结构, 由多个同心圆构成, 中间部分是金属导体, 图像大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。阻水缓冲层材料螺旋重叠缠绕包裹于 XLPE 绝缘层之外, 在高压电缆工作运行过程中阻水缓冲层受潮后吸水膨胀, 在铝保护套压力的作用下会发生化学反应, 产生较多的白色粉末堆积在电缆底部, 视觉上会显示出阻水缓冲层变粗或重叠。随着白色粉末增多, 阻水带和铝保护套间的电位差急剧上升导致电流击穿, 引发绝缘屏蔽层烧蚀, 出现烧蚀孔洞, 甚至穿透绝缘屏蔽层。因此, 仿真时, 在模体的缓冲层底部设置如图 9 所示的不同模拟缺陷, 圆形和椭圆形模拟电流击穿导致烧蚀缺陷, 条形模拟裂纹或其他缺陷。通过观察模体本身环形结构的变化情况可判断电缆是否发生渗漏水并产生白色粉末堆积。

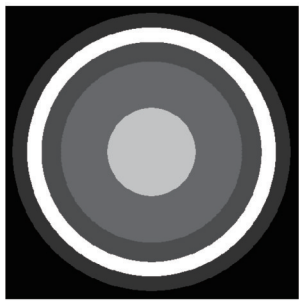


图 8 仿真模体

Fig. 8 Simulation phantom

在仿真过程中, 系统中心  $M$  和坐标原点  $o$  重合, 将预估缺陷位置(电缆底部)放在系统中心。对设置不同缺陷的模体进行仿真扫描, 再利用 SIRT 算法对 FOV 进行重建, 重建图像大小为  $308 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。SIRT 的松弛因子设置为 0.8, 迭代 500 次。编程环境为: Matlab R2017a, Windows10 64 位系统, 8.0 GB 内存, 3.4 GHz CPU, NVIDIA GeForce GT 720。具体的扫描参数如表 1 所示。

图 9(a) 中不同行对应不同缺陷模体的重建结果,

表 1 仿真扫描参数

Table 1 Scanning parameters of simulation

Parameter	Value
Distance from source to object $h$ / mm	120
Distance from detector to object $l$ / mm	63
Detector array number $m$	1536
Detector pixel size / mm	0.085
Source translation distance $s$ / mm	250
Model radius $R$ / mm	50
Distance from model center to coordinate origin $a$ / mm	35
Number of samples per L-STCT $n$	400

第一列是原图, 后面三列是在其他参数不变的情况下, 射线源行程  $s$  分别为 150, 200, 250 mm 的重建结果。可以看到: 由于 L-STCT 扫描获得的投影数据不完整且投影数据截断, 重建图像中出现了一些箭头 1 所指的白色条状伪影。由于与  $x$  轴平行方向相切的射线较少, 环形结构和圆形模拟缺陷的上下部分存在明显的伪影, 但是电缆底部结构被完整地重建出来, 椭圆形缺陷和条状缺陷清晰可见且结构完整。随着  $s$  的增大, 扫描系统区域 1、区域 2 和区域 4 内每个数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  相对变大, 相切的投影射线增多, 使得重建结果的上方结构更完整, 如箭头 2 所示。缺失投影信息导致的条状伪影减少, 如箭头 1 所示, 环形结构和圆形缺陷上部分条状伪影减少, 结构变得完整, 图像细节变清晰。图 9(b) 为改变探测器宽度  $d$  时的重建结果,  $d$  等于探测器探元个数  $m$  与探元大小的乘积, 仿真中通过改变  $m$  来改变  $d$  的大小。图 9(b) 中每一行是不同缺陷模体的重建图像, 第一列是原图, 后面三列是探元个数  $m$  分别为 1536, 2536, 3536 的重建图像。随着  $d$  的增大, 扫描系统区域 1、区域 3 和区域 4 内每个数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  相对变大, 探测器接收到的有效投影数据增多, 与边缘结构相切的射线变多, 使得重建结果的下方结构变得完整, 如箭头 3 所示, 环状结构下部分变得清晰, 重建图像质量变好。图 10 为感兴趣区域(ROI)放大细节图。

实际检测过程中, 确定被扫描物体到射线源和探测器的距离至关重要。在被测电缆到平板探测器距离  $l$  不变时, 被测电缆到射线源的直线距离  $h$  越小, 相同的射线源行程下射线覆盖被测物体的面积越大, 扫描系统中区域 1、区域 2 和区域 4 内每个数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  变大。图 11 第一列为原图, 后面三列是在其他参数条件不变时,  $h$  分别为 70, 120, 170 mm 时的重建图像。随着  $h$  的增大, 如箭头 4 和箭头 5 所示, FOV 上部结构变得模糊, 图像中的条状伪影变多, 重建图像质量变差。图 12 是重建结果 ROI 细节放大图。

图 13 为模体 1 在不同系统参数下的重建图像第 50 行剖面图灰度值的对比图, 由于单段 L-STCT 扫描中每个数据点采集的投影数据有限, 图像的灰度值并不能得到完全的恢复。从图 13(a)、(c) 可以看到射线源移动距离  $s$  的增大和射线源到被测物体距离  $h$  的减小都会使灰度变化曲线更加贴近模体图像; 而探测器

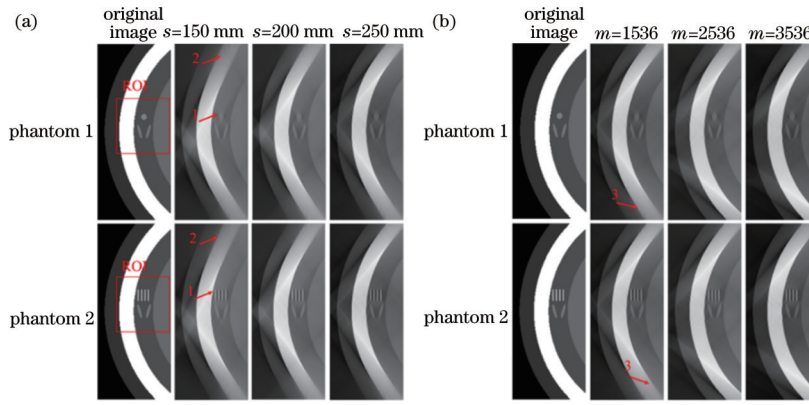


图 9 仿真结果。(a)不同射线源行程下的重建结果;(b)不同探测器宽度下的重建结果

Fig. 9 Simulation results. (a) Reconstruction results for different source translation distances; (b) reconstruction results for different detector widths

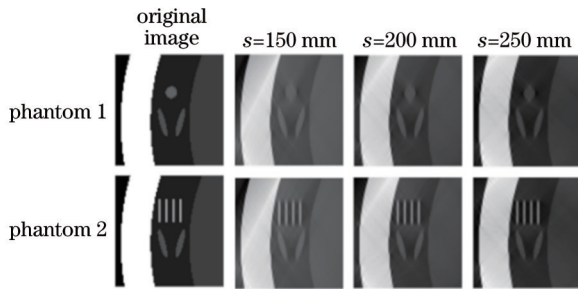


图 10 图 9(a)中 ROI 放大图

Fig. 10 Magnified ROI images in Fig. 9(a)

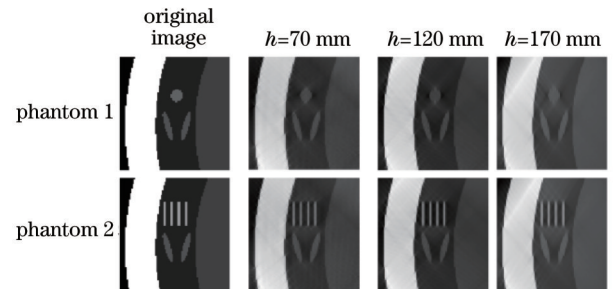


图 12 图 11(a)中 ROI 放大图

Fig. 12 Magnified ROI images in Fig. 11(a)

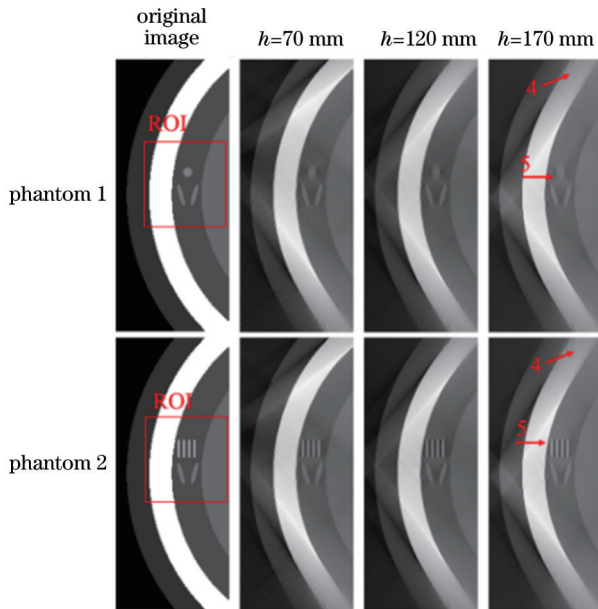


图 11 改变射线源到被测物体距离的重建结果

Fig. 11 Reconstruction results obtained by changing distance from X-ray source to measured object

宽度  $d$  的增大对灰度变化的影响较小,这是由于  $d$  的增大主要是会使扫描系统区域 1、区域 3 和区域 4 的  $\Delta\varphi_{\max}$  增大,重建图像第 50 行位于 FOV 偏上部分,改

变  $d$  的大小对该区域像素点的影响相对较小,但是整体重建图像质量得到了提高,这与第 2.2 节中的结论相符合。

为了进一步比较系统参数变化对重建结果的影响,引入客观评价指标均方根误差 (RMSE)  $E_{\text{RMS}}$  和结构相似性 (SSIM)  $S_{\text{SSIM}}$  来评价重建图像质量,定义如下:

$$E_{\text{RMS}}(f, \hat{f}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (f_j - \hat{f}_j)^2}{J}}, \quad (10)$$

$$S_{\text{SSIM}}(f, \hat{f}) = \frac{(2\mu_f\mu_{\hat{f}} + C_1)(2\sigma_{f\hat{f}} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_{\hat{f}}^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2 + C_2)}, \quad (11)$$

式中:  $f$  为重建图像;  $\hat{f}$  为模体图像;  $J$  为图像的像素大小;  $\mu_f$  和  $\mu_{\hat{f}}$  分别为  $f$  和  $\hat{f}$  的像素平均值;  $\sigma_f$  和  $\sigma_{\hat{f}}$  分别为  $f$  和  $\hat{f}$  的图像方差;  $\sigma_{f\hat{f}}$  表示两幅图像的协方差;  $C_1$  和  $C_2$  是与图像中像素值动态范围的最大值相关的常数。RMSE 用来度量重建图像与参考图像之间像素值的差异性, RMSE 值越小表示两幅图像越相似,重建结果越好; SSIM 用来度量重建图像与参考图像之间的结构相似度, SSIM 值越大表示两幅图像的结构信息越接近,重建图像质量越好。表 2 为模体 1 在不同系统参数下重建图像的量化指标,可以得到:随着射线源移动距离  $s$  的增大和探测器个数  $m$  的增多, RMSE 逐渐减小,

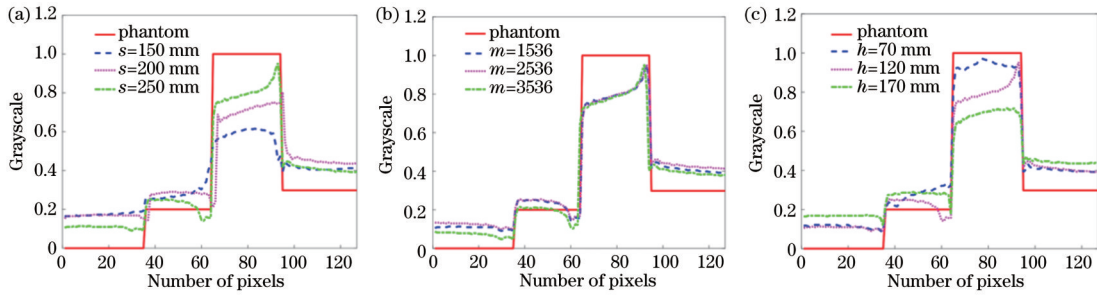


图 13 不同系统参数下重建图像第 50 行剖面图。(a)不同射线源的移动距离;(b)不同探测器宽度;(c)不同射线源到被测物体的距离

Fig. 13 Profiles along 50<sup>th</sup> row of image reconstructed with different system parameters. (a) Different source translation distances; (b) different detector widths; (c) different distances from X-ray source to measured object

SSIM 逐渐增大,重建结果与模体图像的差异性减小、结构相似度变高。另外,减小射线源与检测物体之间的距离  $h$  也会使 RMSE 减小,SSIM 增大,重建图像质量变好。

表 2 不同系统参数下重建图像的量化指标

Table 2 Quantification indexes of reconstructed images with different system parameters

Parameter		RMSE	SSIM
Source translation distance $s$	150 mm	0.1909	0.7892
	200 mm	0.1801	0.8219
	250 mm	0.1452	0.8857
Detector array number $m$	1536	0.1453	0.8863
	2536	0.1336	0.9066
	3536	0.1302	0.9139
Distance from source to object $h$	70 mm	0.1342	0.9067
	120 mm	0.1453	0.8856
	170 mm	0.1734	0.8348

综上所述,对于 L-STCT 扫描方法,电缆底部能得到较好的重建图像,电缆阻水缓冲层的缺陷也能明显观察到,这证明了方案的有效性。增大  $s$  或者减小  $h$  会使相应子区域内最大投影覆盖角度增大,FOV 上方可见结构增加,条状伪影减小,模拟缺陷结构变清晰,重建图像质量提高;随着  $d$  的增大,相应子区域内最大投影覆盖角度增大,FOV 下方结构变得完整,也会使重建结果变好。

### 3.2 实验

为了验证 L-STCT 成像方法在高压电缆阻水缓冲层缺陷检测中的有效性,本文搭建了 L-STCT 实验系统,如图 14 所示,并进行了实验。该系统由 X 射线源、平板探测器、两个直线滑台和计算机组成。两个直线滑台的作用是控制射线源和探测器的移动,以及改变射线源的平移距离;计算机用来协调各子系统之间的工作以及数据的采集和传输。

基于以上实验系统对高压电缆进行 L-STCT 扫描,被扫描电缆半径  $R$  为 50 mm,由多个环形结构组成。在该实验系统下射线源在水平方向移动,将电缆沿垂直方向放置,电缆中心位置到坐标原点的距离  $a$

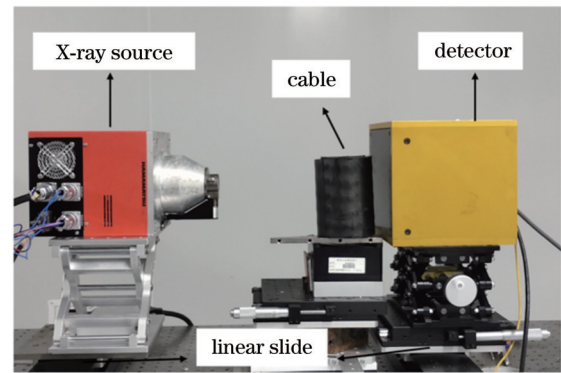


图 14 L-STCT 实验系统

Fig. 14 Experimental system of L-STCT

为 35 mm,对其左侧进行局部成像。射线源到探测器的距离为 150 mm,射线源到物体的距离  $h$  为 98 mm,探测器到物体的距离  $l$  为 52 mm,射线源行程  $s$  为 250 mm,确定系统中心点  $M$ ,其与坐标原点  $o$  重合。成像区域 FOV 设置为电缆底部以  $M$  为中心、大小为  $30 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  的矩形区域。其他扫描参数如表 1 所示,使用 SIRT 算法进行重建,SIRT 的松弛因子设置为 0.8,迭代 500 次。

图 15(a)、(b)为在其他参数不变的情况下,射线源行程分别为 120 mm 和 250 mm 时,电缆第 900 层的切片重建结果。由于投影数据截断且不完整,重建图像中仍存在如箭头 6 所示的部分条状伪影,但是阻水缓冲层内的细纹条状结构清晰可见,细纹条状结构是由缓冲层无纺布材料一层一层缠绕导体芯部形成的。随着  $s$  的增大,FOV 结构更加完整,条状伪影减少,图像细节变清晰,重建图像质量变好。图中的细小亮点是切割电缆时掉落至电缆段内部的金属屑(铜或铝)。模拟实际检测条件,对电缆进行浸水处理,并对浸水前后的电缆在同一实验条件下分别进行扫描重建。图 15(c)、(d)为电缆未浸水和浸水 10 h 之后第 900 层的切片重建结果,可见未浸水的缓冲层结构如箭头 7 所示,线条较细且整齐。在浸水后阻水缓冲层发生化学反应,产生白色粉末,随着水分子完全渗透,白色粉末增多,缓冲层线条结构变粗,最终线条间的间隙完全消失,缓冲层结构发生较为明显的变化。另外,电缆的环



形结构得到了完整的恢复,可见并没有发生严重的电流击穿、电缆被烧蚀损坏的现象。

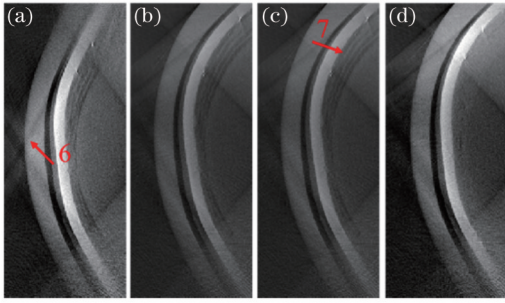


图 15 重建结果对比。(a)  $s=120$  mm;(b)  $s=250$  mm;(c) 电缆未浸水;(d) 电缆浸水 10 h  
Fig. 15 Comparison of reconstruction results. (a)  $s=120$  mm; (b)  $s=250$  mm; (c) cable is not immersed in water; (d) cable is immersed in water for 10 h

图 16 为另一节相同大小电缆的重建结果,  $s=120$  mm,其他参数保持不变,将浸水 2 h 后的电缆分别静置 25 min 和 4.5 h。浸水后水分子进入缓冲层,缓冲层材料整体密度增大,随着水分子扩散时间的延长,电缆铝护套进一步发生化学反应,产生的白色粉末堆积在阻水缓冲层,缓冲层的线条结构进一步变粗,结构变化效果增强,如箭头 8 所示,从图 16 能够明显观察到电缆渗漏水范围和实际情况。

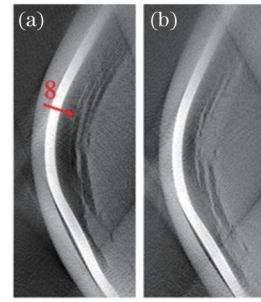


图 16 浸水结果对比。(a) 静置 25 min;(b) 静置 4.5 h  
Fig. 16 Comparison of immersion results. (a) Standing for 25 min; (b) standing for 4.5 h

### 3.3 讨论

L-STCT 扫描的实际实验中,由于 CT 投影角度受限和投影信息截断,图 15 和图 16 的重建结果存在明显的伪影,但是渗漏水引起的结构变化清晰可见,FOV 被完整地重建,这验证了该成像方式在高压电缆缺陷检测中的有效性。如图 17 所示,L-STCT 在扫描运动方式上和 STCT<sup>[15]</sup>相似,其主要区别为:STCT 扫描物体靠近射线源放置,通过多段 STCT(mSTCT)扫描采集物体的完备投影数据;而 L-STCT 探测器靠近扫描物体,根据成像区域中每个点的最大投影覆盖角度分布,使检测对象的局部成像中心靠近最大投影覆盖角度  $M$  点,对局部进行 CT 成像。受成像物体所处空间环境的限制,投影角度也受限,这是典型的有限角问题。

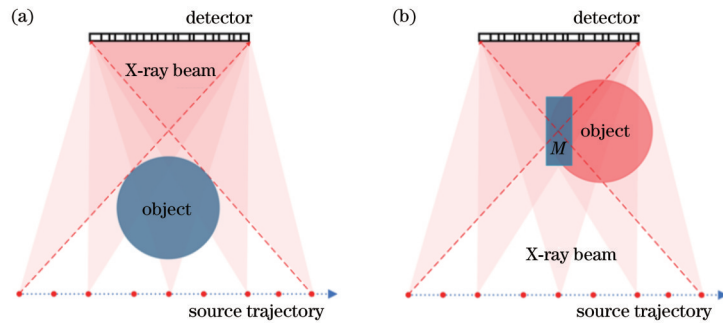


图 17 扫描方式示意图。(a) STCT;(b) L-STCT  
Fig. 17 Illustrations of scanning modes. (a) STCT; (b) L-STCT

## 4 结论

针对高压电缆阻水缓冲层的缺陷检测需求,提出 L-STCT 成像方法;通过建立几何模型,对成像系统中各个数据点的最大投影覆盖角度  $\Delta\varphi_{\max}$  和扫描参数进行分析,发现在系统中心点  $M$  的  $\Delta\varphi_{\max}$  最大。随着射线源行程  $s$  和探测器宽度  $d$  的增大,对应子区域内数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  增大,采集到的投影信息增多;减小被测电缆到射线源的直线距离  $h$  也会使扫描系统对应子区域内各数据点的  $\Delta\varphi_{\max}$  增大。初步采用 SIRT 图像重建算法进行重建,仿真和实验结果表明:将预估缺陷位置放在在以点  $M$  为中心的矩形区域内,成像区域内的缺陷

结构得到较好的重建,可实现对高压电缆阻水缓冲层底部沿圆周切向方向的缺陷检测,通过增大  $d$ 、增大  $s$  或者减小  $h$  可以提高重建图像质量。

L-STCT 成像方法运动方式简单、成像速度快,通过对高压电缆阻水缓冲层的局部扫描与重建实现对缺陷隐患的在役检测,即使在检测现场拥挤、电缆间距较小的情况也能实现投影数据的采集,为高压电缆内部缺陷检测提供了新的思路和解决方案。L-STCT 图像重建与有限角 CT 图像重建类似,物体内部所有数据点都只能在有限的投影视角范围被 X 射线穿透,且存在投影数据截断,导致重建结果出现明显的条状伪影。后续将考虑改进迭代图像重建算法或者引入正则项和先验信息提高重建图像质量,研究解析图像重建算法

以提高重建速度,从而更好地满足实际的检测需求。另外,通过三维重建观察电缆内部结构损伤情况也是需要研究的内容之一。

## 参 考 文 献

- [1] 孟峥峥,李旭,于洋,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层故障研究现状综述[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 33-41, 55.  
Meng Z Z, Li X, Yu Y, et al. Review on the research status of the high voltage XLPE cable buffer layer failure [J]. Electric Power, 2021, 54(4): 33-41, 55.
- [2] 李文杰,欧阳本红,宋鹏先,等. 电力电缆缓冲层烧蚀故障分析及试验研究[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(6): 38-41.  
Li W J, Ouyang B H, Song P X, et al. Analysis and experimental study on erosion failure of cushion layer of power cable[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(6): 38-41.
- [3] 黄宇,尹毅,吴长顺. 高压电缆阻水缓冲层电性能研究[J]. 电线电缆, 2018(6): 6-9, 19.  
Huang Y, Yin Y, Wu C S. Study on electrical properties of water blocking buffer layer in high voltage cables[J]. Wire & Cable, 2018(6): 6-9, 19.
- [4] Muharam R, Lestariningsih I, Nurlely, et al. Designing phantom in-house for quick check computed radiography (CR) and digital radiography (DR) system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1568(1): 012023.
- [5] de Chiffre L, Carmignato S, Kruth J P, et al. Industrial applications of computed tomography[J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 655-677.
- [6] 吕寒玉,邹晶,赵金涛,等. 纳米计算机断层扫描成像技术进展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 140001.  
Lü H Y, Zou J, Zhao J T, et al. Review on development of nano-computed tomography imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 140001.
- [7] 皮真真,余海军,李雷,等. 一种三源摆动螺旋安检 CT 成像方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1611003.  
Pi Z Z, Yu H J, Li L, et al. Triple-source swinging spiral CT imaging method for security inspection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1611003.
- [8] 刘三伟,段肖力,黎刚,等. 高压电缆缓冲层缺陷数字 X 射线无损检测技术研究[J]. 湖南电力, 2020, 40(6): 18-21.  
Liu S W, Duan X L, Li G, et al. Research on digital X-ray non-destructive testing technology of cable buffer layer defects[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(6): 18-21.
- [9] Su C Q. Failure analysis of three 230 kV XLPE cables [C]//2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), November 8-10, 2010, Sao Paulo, Brazil. New York: IEEE Press, 2010: 22-25.
- [10] 田忠建,余海军,汪灏波,等. 正交直线扫描计算机分层成像研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2211002.  
Tian Z J, Yu H J, Wang L B, et al. Orthogonal translation computed laminography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2211002.
- [11] 李雷,谭川东,廖明娟,等. 基于 Radon 逆变换的相对平行直线扫描 CT 解析重建[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0611003.  
Li L, Tan C D, Liao M J, et al. Analytic reconstruction for parallel translational computed tomography based on radon inverse transform[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0611003.
- [12] Schön T, Fuchs T, Hanke R, et al. A translation-based data acquisition method for computed tomography: theoretical analysis and simulation study[J]. Medical Physics, 2013, 40(8): 081922.
- [13] Gao H W, Zhang L, Chen Z Q, et al. Straight-line-trajectory-based X-ray tomographic imaging for security inspections: system design, image reconstruction and preliminary results[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(5): 3955-3968.
- [14] Liu B D, Zeng L. Parallel SART algorithm of linear scan cone-beam CT for fixed pipeline[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2009, 17(3): 221-232.
- [15] Yu H J, Li L, Tan C D, et al. X-ray source translation based computed tomography (STCT) [J]. Optics Express, 2021, 29(13): 19743-19758.
- [16] Chetih N, Messali Z. Tomographic image reconstruction using filtered back projection (FBP) and algebraic reconstruction technique (ART) [C]//2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), May 25-27, 2015, Tlemcen, Algeria. New York: IEEE Press, 2015: 15418482.
- [17] Jiang M, Wang G. Convergence of the simultaneous algebraic reconstruction technique (SART) [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 957-961.
- [18] 伍伟文,全超,刘丰林. 相对平行直线扫描 CT 滤波反投影图像重建[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911009.  
Wu W W, Quan C, Liu F L. Filtered back-projection image reconstruction algorithm for opposite parallel linear CT scanning[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911009.
- [19] Kong H H, Yu H Y. Analytic reconstruction approach for parallel translational computed tomography[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2015, 23(2): 213-228.
- [20] Gao H W, Zhang L, Xing Y X, et al. Volumetric imaging from a multisegment straight-line trajectory and a practical reconstruction algorithm[J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 077004.
- [21] Xu J Q, Zhao Y S, Li H W, et al. An image reconstruction model regularized by edge-preserving diffusion and smoothing for limited-angle computed tomography[J]. Inverse Problems, 2019, 35(8): 085004.
- [22] Quinto E T. Artifacts and visible singularities in limited data X-ray tomography[J]. Sensing and Imaging, 2017, 18(1): 1-14.
- [23] 闫镔,韩玉,魏峰,等. 锥束 CT 超视野成像重建算法综述[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(2): 373-384.

- Yan B, Han Y, Wei F, et al. Review of algorithms for over FOV size object in cone-beam CT[J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2013, 22(2): 373-384.
- [24] Mitsuya Y. Compressed sensing-based reconstruction for computed tomography with translational trajectory[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2020, 28(4): 497-512.
- [25] Wang G, Schweiger G D, Vannier M W. An iterative algorithm for X-ray CT fluoroscopy[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1998, 17(5): 853-856.
- [26] van Aarle W, Palenstijn W J, Cant J, et al. Fast and flexible X-ray tomography using the ASTRA toolbox[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25129-25147.
- [27] 黄力宇, 朱守平, 匡涛. 医学断层图像重建仿真实验[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.
- Huang L Y, Zhu S P, Kuang T. Simulation experiment of medical image reconstruction[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2015.