

引用格式: NI Song, CHEN Jie, YU Haijun, et al. High-efficiency Reconstruction Algorithm of Source Translation Scan Computed Tomography for High-voltage Cable[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7):0734002

倪松, 陈杰, 余海军, 等. 高压电缆源平移扫描 CT 高效重建算法[J]. 光子学报, 2023, 52(7):0734002

高压电缆源平移扫描 CT 高效重建算法

倪松¹, 陈杰¹, 余海军¹, 段晓礁¹, 陈大兵², 刘建军²

(1 重庆真测科技股份有限公司, 重庆 401332)

(2 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要:为提高在役高压电缆 X 射线扫描图像重建速度, 结合传统的滤波反投影算法, 提出基于数据平滑的局部扫描重建算法。分析了源直线扫描局部计算机断层成像方法存在的有限角和数据截断问题, 提出数据平滑方式解决方法。主要途径是利用余弦函数沿探测器方向和射线源方向分别进行数据平滑插值, 避免投影数据值在这两个方向上突然降为零, 起到抑制截断伪影和有限角伪影的作用。实验证明, 所提方法能有效抑制图像伪影, 有利于电缆阻水缓冲层缺陷识别。相较于原有的联合迭代重建算法, 该方法缩短了重建时间且图像重建质量相当; 相较于传统滤波反投影算法, 重建图像质量提高但重建耗时基本一致。

关键词:计算机断层扫描; 源直线扫描局部计算机断层成像; 滤波反投影算法; 数据平滑; 有限角成像; 数据截断; 伪影抑制

中图分类号: O434.19

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235207.0734002

0 引言

交变聚乙烯 (Cross-Linked Polyethylene, XLPE) 高压电缆因其出色的性能被广泛用于城市供电系统中。受工作环境、温度以及压力的影响, 电缆内部阻水缓冲层易发生烧蚀缺陷导致电缆出现故障, 严重影响输电安全^[1-3]。

目前, 局部放电检测技术^[4-6]是电缆缺陷检测常用方法之一, 但此技术容易受外部环境影响, 在实际电缆缺陷检测中受到一定限制。X 射线数字成像技术广泛用于各领域无损检测中^[7-8], 但其在一个方向上对物体进行扫描, 其图像反映的是该方向上物体结构叠加的信息, 结构层次性较差, 只能用于检测较为明显的缺陷。X 射线计算机断层扫描 (Computed Tomography, CT) 技术通过对物体进行不同方向上的扫描, 能清晰成像物体内部结构^[9-10]。射线源平移扫描局部 CT 成像方法 (Local Source-Translation Computed Tomography, L-STCT)^[11] 针对城市地下隧道中电缆检测, 该方法射线源沿直线运动, 通过重建图像判别是否存在缓冲层烧蚀缺陷。由于 L-STCT 主要对电缆局部扫描成像, 射线无法覆盖整个电缆从而导致数据截断。同时, 由于射线源移动距离和探测器宽度有限, 无法实现至少 180° 投影角覆盖, 存在有限角度成像问题。因此, L-STCT 扫描重建是一个包含数据截断和有限角成像的复合问题。

目前常用的图像重建方法主要分为解析类和迭代类算法。对于数据截断或有限角成像, 文献^[11]中使用联合迭代重建算法 (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT) 获得了较好的结果, 类似的还有联合代数重建方法^[12]、各向异性的全变分方法^[13]以及高阶全变分最小化方法^[14]。多次迭代重建过程使得迭代类算法计算量大, 重建速度较慢。解析类算法速度更快, 但数据存在截断或缺失时容易产生严重的伪影, 比如经典的滤波反投影算法 (Filtered Back-Projection, FBP)^[15]。OHNESORGE B 等提出了一种直接

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (No. 5500-202118134A)

第一作者: 倪松, nisong@cqu.edu.cn

通讯作者: 段晓礁, duan721@163.com

收稿日期: 2023-01-09; 录用日期: 2023-03-16

<http://www.photon.ac.cn>

插值补全截断投影数据的方法^[16],类似的在文献[17, 18]中也得到了应用。此外,针对数据插值误差较大的特点,提出了利用深度学习网络结合先验知识来补全数据,从而缓解截断并提高插值精度^[19-21]。QUITO ET等分析了产生有限角伪影的原因^[22, 23],并提出一种投影数据平滑处理方法来抑制有限角伪影。

本文提出一种基于数据平滑的局部扫描重建(Local-detecting FBP, LFBP)算法用于L-STCT扫描重建。数据平滑主要利用余弦函数沿探测器和射线源方向分别进行数据插值。在探测器两端向外插值,新增部分逐渐平滑到零的虚拟数据与原始投影数据进行拼接,从而避免数据在探测器两端突然降为零,起到缓解数据截断的作用。类似地,从射线源采样起始和终止点采集的数据开始,对射线源在靠近其移动轨迹两端采集到的部分原始数据进行平滑处理,处理后的数据沿着射线源轨迹的两端逐渐平滑到零,起到抑制有限角伪影的作用。

1 扫描模型及重建算法

1.1 扫描模型

L-STCT采用射线源平移直线扫描,成像模型如图1(a),扫描过程中,射线源和探测器置于待测电缆两侧,探测器和电缆固定不动,射线源平行于探测器做等距平移,并在每个位置发射锥束射线照射电缆。为了便于分析,取过射线源轨迹并垂直于探测器的平面为研究对象,得到图1(b)所示的L-STCT二维几何模型。根据之前的研究^[7],在L-STCT系统的扫描空间中,分别连接探测器上端点与射线源轨迹下端点、探测器下端点与射线源轨迹上端点,两线交点Q处可得到最好的成像质量。因此,以Q点为原点建立笛卡尔直角坐标系,其中x轴平行于射线源轨迹指向上,y轴指向探测器中心并垂直于探测器。由于电缆直径过大,难以全局成像,故将电缆中心o'相对坐标原点o向x负方向偏移距离 τ ,使待观测的缓冲层位于成像质量最好的Q点附近,仅对该区域进行局部成像。

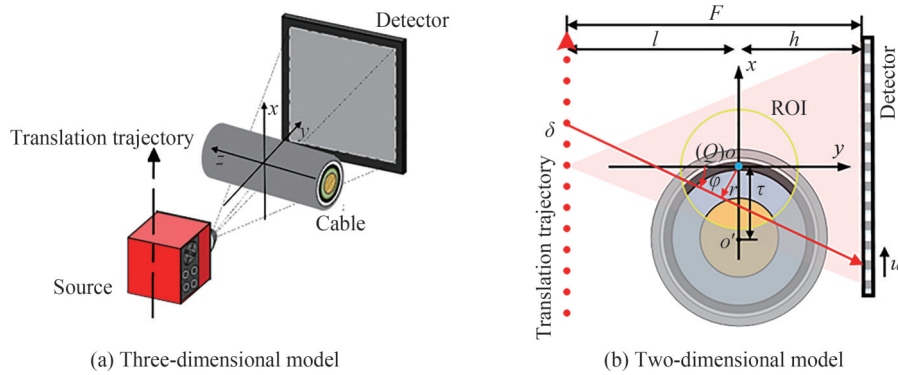


图1 L-STCT 扫描模型

Fig. 1 L-STCT scanning model

基于此,扫描过程中,探测器单元的坐标可表示为

$$D(u) = (u, h), \quad u \in [-d, d] \quad (1)$$

射线源焦点的坐标可表示为

$$S(\delta) = (\delta, -l), \quad \delta \in [-s, s] \quad (2)$$

式中, u 为探测器单元的局部坐标, δ 为射线源焦点位置的局部坐标, d 为探测器宽度的一半, s 为射线源移动轨迹长度的一半, h 和 l 分别表示原点 o 到探测器的距离和射线源轨迹到原点 o 的距离,有

$$h = Fd / (s + d) \quad (3)$$

$$l = Fs / (s + d) \quad (4)$$

F 表示射线源轨迹到探测器的距离。在扫描系统中,任意一条射线可由其与 y 轴的夹角 φ 以及该射线与坐标原点 o 的距离 r 指定。沿射线对路径上各点的衰减系数 $f(x, y)$ 进行积分即为该射线指定的投影,即

$$p(r, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(r \cos \varphi - t \sin \varphi, r \sin \varphi + t \cos \varphi) dt \quad (5)$$

在L-STCT扫描系统中,任意射线也可由 (δ, u) 进行唯一指定,有

$$p(\delta, u) = p(r, \varphi) \quad (6)$$

根据图1(b)所示的几何关系, (r, φ) 与 (δ, u) 的坐标对应关系为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\delta - u}{l + h}\right) \quad (7)$$

$$r = \frac{ul + \delta h}{\sqrt{(l + h)^2 + (\delta - u)^2}} \quad (8)$$

根据式(7),想要采集至少 180° 的投影数据以实现精确重建,需要 δ 的取值范围达到 $(-\infty, +\infty)$ 。但在实际扫描过程中,射线源移动距离 $2s$ 必然有限,因此L-STCT成像是一个有限角度问题。同时,由于电缆直径过大,射线源在每个位置发出的射线都只能覆盖电缆的一部分,探测器采集到的投影数据是截断的,L-STCT成像是一个有限角和数据截断复合问题。

1.2 LFBP重建算法

虽然FBP算法往往受不完备数据的影响显著,但其在重建效率上的优势仍使FBP算法有极大的研究价值。L-STCT扇形束扫描的FBP算法可利用变量替换从经典的平行束FBP算法中推导,结合图1(b)所示的L-STCT扫描模型,经典的平行束FBP重建算法可表示为

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} p(r, \varphi) \cdot q(x \cos \varphi - y \sin \varphi - r) dr d\varphi \quad (9)$$

式中, $q(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\xi| e^{i2\pi\xi x} d\xi$ 为斜坡滤波器卷积核函数。根据式(7)和(8)可得到 (r, φ) 到 (δ, u) 的雅可比行列式为

$$J(\delta, u) = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial \delta} & \frac{\partial \varphi}{\partial u} \\ \frac{\partial r}{\partial \delta} & \frac{\partial r}{\partial u} \end{vmatrix} = \frac{-(l + h)^2}{\left[(l + h)^2 + (u - \delta)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

$$dr d\varphi = |J(\delta, u)| d\delta du = \frac{(l + h)^2}{\left[(l + h)^2 + (u - \delta)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} d\delta du \quad (11)$$

将式(6)、(7)、(8)和(11)带入式(9)并化简可得

$$f(x, y) = \frac{l + h}{(y + l)^2} \cdot \int_{-s-d}^{+s+d} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{l + h}{\sqrt{(l + h)^2 + (u - \delta)^2}} \cdot p(\delta, u) \cdot q\left(\frac{x(l + h) + \delta(y - h)}{y + l} - u\right) du d\delta \quad (12)$$

式(12)即为L-STCT扇形束扫描的FBP重建公式。由于L-STCT扫描重建是一个包含了有限角和数据截断的问题,直接使用式(12)重建有限角度且截断的投影数据 $p(\delta, u)$ 会在重建图像中引入严重的条状伪影。受处理数据截断和有限角成像相关方法的启发,针对同时存在数据截断和有限角成像问题的L-STCT扫描方式,对应地提出一种数据平滑策略,从而抑制有限角和截断伪影,提高重建图像质量。

为缓解数据截断造成的截断伪影,对投影数据沿探测器两端向外进行插值平滑。定义 M 和 N 分别表示每行探测器单元阵列个数和射线源采样点数,探测器单元 u 接收射线源位置 δ 发出的射线得到投影数据值 $p(\delta, u)$,取不同的 δ 和 u 形成数据矩阵 \mathbf{p} ,其维度为 $M \times N$,定义向外插值 M' 列虚拟平滑数据。数据外插平滑过程中,首先分别提取原始数据最左侧一列数据 $\mathbf{p}(\cdot, u_1)$ 和最右侧一列数据 $\mathbf{p}(\cdot, u_M)$ 进行向外插值平滑处理,可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{p}_L(\cdot, u_m) = \mathbf{p}(\cdot, u_1) g\left(x_m - \frac{\pi}{2}\right) & m = 1, 2, \dots, M' \\ \mathbf{p}_R(\cdot, u_m) = \mathbf{p}(\cdot, u_M) g(x_{m-M-M'}) & m = M' + M + 1, \dots, 2M' + M \end{cases} \quad (13)$$

式中,平滑函数 $g(x) = \cos x$, 其中 $x \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 。 $p_L(\cdot, u_m)$ 和 $p_R(\cdot, u_m)$ 分别为左右两侧数据插值产生的虚拟平滑数据, $x_m = (m-1)\Delta\gamma$, $\Delta\gamma = \frac{\pi}{2(M'-1)}$ 。平滑后的原始数据可表示为

$$\tilde{p}(\cdot, u) = \begin{cases} p_L(\cdot, u_m) & m = 1, 2, \dots, M' \\ p(\cdot, u_m) & m = M'+1, \dots, M'+M \\ p_R(\cdot, u_m) & m = M'+M+1, \dots, 2M'+M \end{cases} \quad (14)$$

可以看出,数据向外插值平滑在原始数据基础上增加了部分虚拟数据。其次是对投影数据沿射线源采样方向进行向内插值平滑,从而抑制有限角成像导致的伪影。定义向内插值 N' 行数据进行平滑处理,平滑后的数据可表示为

$$\hat{p}(\delta, \cdot) = \begin{cases} \tilde{p}(\delta_n, \cdot) g\left(x_n - \frac{\pi}{2}\right) & n = 1, 2, \dots, N' \\ \tilde{p}(\delta_n, \cdot) & n = N'+1, \dots, N-N' \\ \tilde{p}(\delta_n, \cdot) g(x_{n-N+N'}) & n = N-N'+1, \dots, N \end{cases} \quad (15)$$

式中, $x_n = (n-1)\Delta\beta$, $\Delta\beta = \frac{\pi}{2(N'-1)}$ 。数据向内插值平滑处理没有增加数据量,仅对原数据进行平滑处理。

经过两次数据平滑处理后,数据预处理完成。图2展示了数据平滑处理的过程。图2(a)是原始采集的数据 $p(\delta, u)$, 经过数据向外插值平滑后,在原始数据的左右两侧增加了小部分虚拟的平滑数据,得到数据 $\tilde{p}(\delta, u)$, 如图2(b)所示。进一步在此基础上对原始数据上下两侧小部分数据进行向内插值平滑处理,得到最终的数据 $\hat{p}(\delta, u)$, 如图2(c)所示。

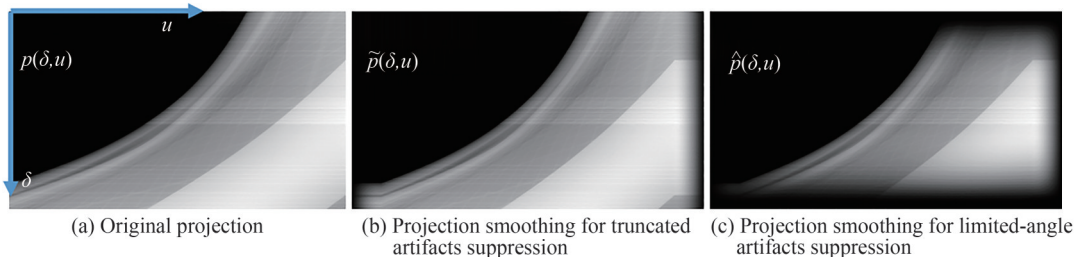


图2 数据平滑过程

Fig. 2 Diagram of projection smoothing

使用预处理后的数据 $\hat{p}(\delta, u)$ 进行重建,式(14)可进一步表示为

$$\hat{f}(x, y) = \frac{l+h}{(y+l)^2} \cdot \int_{-s-d}^{+s+d} \int_{-\sqrt{(l+h)^2 + (\delta-u)^2}}^{\sqrt{(l+h)^2 + (\delta-u)^2}} \frac{l+h}{\sqrt{(l+h)^2 + (\delta-u)^2}} \cdot \hat{p}(\delta, u) \cdot q\left(\frac{x(l+h) + \delta(y-h)}{y+l} - u\right) dud\delta \quad (16)$$

式(16)即最终用于L-STCT扫描的LFBP解析重建公式。

2 模拟仿真

为了验证本文算法针对L-STCT扫描重建的有效性,设计了仿真实验。以110 kV和220 kV两种型号电缆为实验对象,对应的结构尺寸分别为 $\varnothing 100$ mm和 $\varnothing 160$ mm,其内部结构基本一致。在材料方面,220 kV内部阻水缓冲层为铜丝纤维编织布,而110 kV为普通聚酯纤维编织布,其他基本相同。根据电缆的内部结构,设计了如图3所示的仿真模体,并根据实际情况模拟了潜在的缓冲层缺陷。模体大小为512 pixel \times 512 pixel,由Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU 3.6 GHz \times 8、NVIDIA GeForce GT 720、8 GB RAM、Windows10专业版64位计算机在MATLAB R2018b环境下完成。

实验主要针对电缆局部进行扫描重建,重建图像大小为300 pixel \times 300 pixel,分别使用SIRT、FBP和LFBP方法进行图像重建对比。SIRT方法重建时,相关重建参数与之前工作^[7]中一致,共迭代500次。FBP方

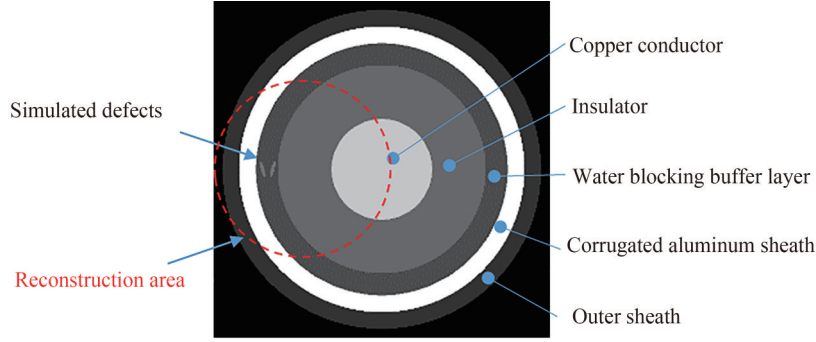


图3 电缆仿真模体

Fig. 3 Simulation phantom of cable

法直接使用原始数据重建。LFBP方法重建时,数据平滑参数 M' 设置为50, N' 设为100。采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和结构相似性(Structure Similarity Index Measure, SSIM)来进行定量评价, RMSE表征重建图像和原始模体之间的偏差, SSIM表征重建图像与原始模体的结构相似度,其具体定义为

$$I_{\text{RMSE}}(f, \hat{f}) = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (f_{mn} - \hat{f}_{mn})^2}{MN}} \quad (17)$$

$$I_{\text{SSIM}}(f, \hat{f}) = \frac{(2\mu_f \mu_{\hat{f}} + C_1)(2\sigma_{f\hat{f}} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_{\hat{f}}^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2 + C_2)} \quad (18)$$

式中, f 为重建图像; \hat{f} 为原始模体; μ_f 和 $\mu_{\hat{f}}$ 分别为重建图像和原始模体的像素平均值; M 和 N 分别为重建图像的行和列; σ_f 和 $\sigma_{\hat{f}}$ 分别为重建图像和原始模体的标准差; $\sigma_{f\hat{f}}$ 为协方差; C_1 和 C_2 是常数项。一般RMSE值越小,SSIM值越高,重建图像质量越好。

由于电缆内部铜芯密度高,射线难以穿透,且电缆缺陷多集中在缓冲层的一侧,因此主要成像电缆易产生缺陷的局部区域。针对实际的检测需求,对电缆 $\varnothing 100$ mm和 $\varnothing 160$ mm两种型号进行扫描重建仿真,参数如表1所示。两种电缆除尺寸不同外,其内部结构基本一致,且产生的缺陷类型也基本一致,因此通过设置不同的模体尺寸进行仿真。

表1 仿真参数

Table 1 Parameters for simulation

Parameter	Value	Value
Diameter of cable/mm	100	160
Distance from source to object l /mm	110	110
Distance from detector to object h /mm	110	110
Detector array number	1 536×1 536	1 536×1 536
Detector pixel size/mm	0.154	0.154
Number of source sampling views	500	500
Source translation distance $2s$ /mm	240	240
Offset distance τ /mm	35	55
Reconstruction matrix	300×300	300×300

图4展示了两种电缆通过不同重建方法得到的局部重建结果。所提的LFBP方法和SIRT重建图像质量接近,均优于FBP重建结果。由于数据截断和有限角问题,FBP重建结果如图4(a)所示,出现了明显的截断伪影(图中红色箭头所示)和有限角伪影(图中绿色箭头所示),干扰了几何结构以及缺陷的识别。SIRT算法通过500次迭代得到的重建结果中,截断伪影被明显抑制,图像清晰度提升,但有限角伪影依旧明显(图4(b))。LFBP方法使用经平滑处理后的投影数据重建,其结果如图4(c)所示,图像中无明显截断伪影,

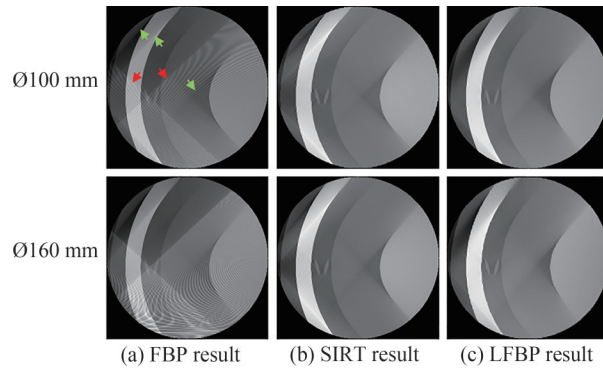


图4 FBP、SIRT、LFBP三种方法仿真重建结果
Fig. 4 Simulated reconstructions of FBP, SIRT and LFBP methods

与SIRT重建图像质量相当。相较于FBP和SIRT重建图像,有限角伪影也得到了抑制。

为了进一步对比不同算法重建图像的差异,提取重建图像第150行中第1到160号像素与模体图像进行灰度对比,如图5所示。由于数据截断产生的条纹截断伪影使得FBP重建图像对应的灰度值曲线出现明显波动,偏离了真实值。SIRT重建结果对应的灰度值曲线明显更加平滑,贴近于真实值。但由于有限角伪影影响,仿真的高密度电缆外部铝护套重建灰度值偏低,而在其他低密度且没有受到伪影影响的区域重建灰度接近原始模体。LFBP重建由于综合考虑了数据截断以及有限角问题,重建图像灰度值和SIRT结果接近,并且由于抑制了部分有限角伪影使得其在高密度外围铝护套图像重建灰度值比SIRT更加贴近真实值,但在低密度区域重建灰度值偏差略高于SIRT重建结果。

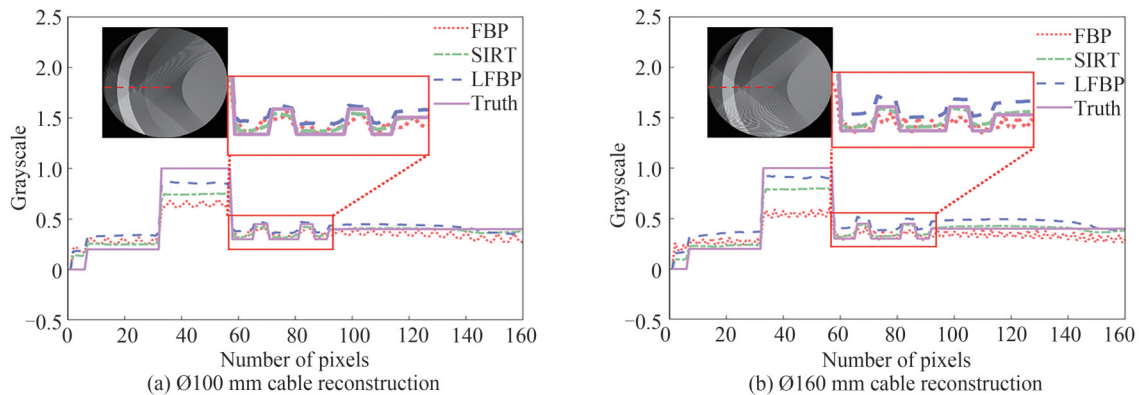


图5 不同方法重建图像第150行局部区域灰度图
Fig. 5 Profiles along 150th row of image reconstructed by different methods

为了进一步比较图像质量,表2给出了根据不同方法重建结果计算的量化指标。结果显示LFBP重建图像质量和SIRT接近,且明显优于FBP重建图像。对比RMSE值,SIRT和LFBP指标明显低于FBP,说明重建图像与模体间的误差更小。同时,由于直接FBP重建导致的伪影覆盖了电缆的结构特征,其SSIM值低于其他两种算法。

表3对比了不同算法的重建时间。可以发现解析重建方法FBP和LFBP的重建效率相当,比SIRT迭

表2 不同方法重建图像量化指标
Table 2 Quantitative evaluation metrics for different methods

		FBP	SIRT	LFBP
Ø100 mm	RMSE	0.191 6	0.117 0	0.130 3
	SSIM	0.657 7	0.923 8	0.917 2
Ø160 mm	RMSE	0.225 2	0.108 5	0.131 8
	SSIM	0.595 5	0.923 6	0.909 4

代算法快约45倍。由于对原始投影数据进行向外插值50($M'=50$)列的平滑数据,额外增加了约1/15的虚拟数据,因此LFBP重建时间较直接使用原始数据重建的FBP方法略有增加,但仅0.04 s的差距几乎可以忽略。结合上述对重建图像质量和重建时间的对比,可以发现LFBP既保证了重建效率与FBP相当,同时成像质量与SIRT迭代重建相当。

表3 三种方法重建时间对比
Table 3 Time consumption for different reconstruction methods

Method	FBP	SIRT	LFBP
Time/s	1.38	62.46	1.42

3 实验验证

为了验证算法的有效性,搭建了如图6所示的实验平台,包含X射线源(L10321, Hamamatsu, 日本)、平板探测器(PaxScan1313DX, Varian, 美国)、平移台(M-ILS250PP, Newport, 美国)和待测电缆样品。射线源允许的最大管电压和管电流为100 kV和200 μ A;平移台最大行程为250 mm;探测器阵列包括1024 \times 1024个探测器单元,单元尺寸为0.127 mm \times 0.127 mm。射线源安装在平移台上,实际扫描过程中由平移台带动射线源直线运动,待测电缆和探测器固定不动。由于两种电缆尺寸不同,对 \varnothing 100 mm电缆设置射线源工作电压电流为70 kV和110 μ A,对 \varnothing 160 mm电缆设置射线源工作电压电流为100 kV和110 μ A。其他参数与仿真一致。

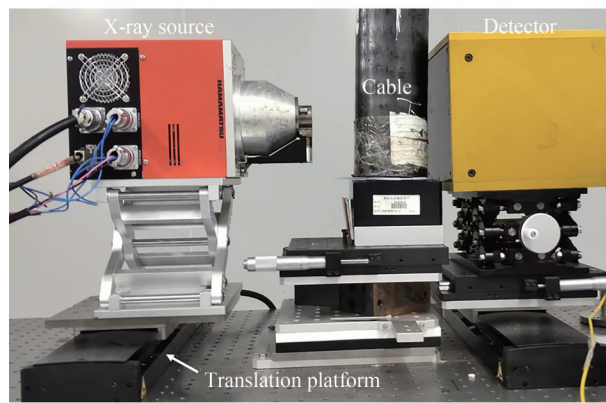


图6 实际实验平台
Fig. 6 Practical experiment platform

图7展示了 \varnothing 100 mm和 \varnothing 160 mm电缆分别使用FBP、SIRT和LFBP方法重建的结果。由于实际扫描重建时需读取扫描数据,重建时间略高于仿真实验,分别为2.5 s、64.8 s和2.7 s。LFBP和FBP重建效率相当且明显高于SIRT算法。由于投影数据存在截断和有限角问题,直接使用FBP算法重建导致了严重的截断伪影和有限角伪影,对电缆缺陷的识别造成干扰。SIRT重建结果有效地抑制了截断伪影,增强了电缆结构的识别度,但无法进一步处理有限角伪影。LFBP重建结果显示,不仅截断伪影得到了有效地抑制,而且弱化了有限角伪影,减小了其对真实几何结构的影响。

为了进一步展示所提方法对伪影的抑制效果,以 \varnothing 100 mm电缆为例,对比了不同位置横截面有无伪影的重建结果。结果显示,所提出的重建方法能有效抑制截断伪影,并弱化有限角伪影。进一步对比缺陷处细节放大图像,第一排没有进行伪影抑制的图像中,缺陷淹没在伪影里难以识别。第二排经过伪影抑制后的图像,能从细节放大图中清楚地看到电缆缓冲层的烧蚀缺陷(如图8黄色箭头所示)。实验充分反映了在电缆缺陷检测中进行重建图像伪影抑制对缺陷识别的重要性。

在实际扫描过程中,针对 \varnothing 100 mm和 \varnothing 160 mm两种型号电缆,提取了射线覆盖范围内电缆不同位置横截面的投影数据,从而重建出不同位置的截面图像。尽管电缆几何结构在其长度方向上是一致的,但其内部的缺陷分布和数量是不同的。通过重建不同位置的切片图像既增大了发现缺陷的概率,也可以对电缆在长度方向上存在缺陷的部分进行定量分析。图9展示了使用LFBP方法对两种型号电缆的不同高度截面进

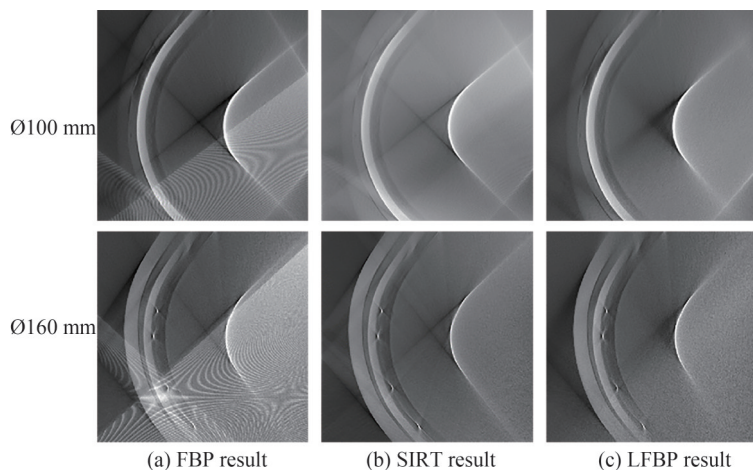


图7 不同方法重建结果

Fig. 7 Images reconstructed by different methods

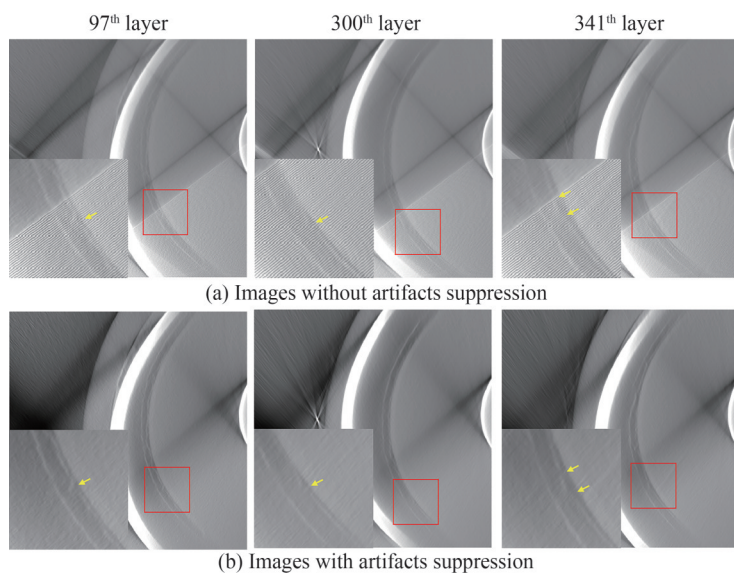


图8 Ø100 mm 电缆不同位置截面重建有无伪影结果对比

Fig.8 Comparison of image with and without artifacts suppression for different layers of Ø100 mm cable

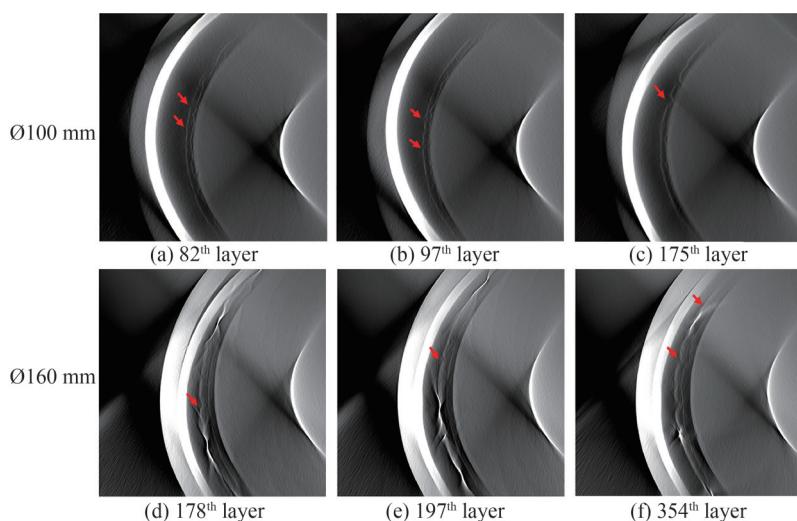


图9 不同位置投影数据LFBP重建结果

Fig. 9 Images reconstructed by LFBP method with projections at different locations

行重建的结果,红色箭头所示为检测出的缓冲层烧蚀孔洞缺陷。重建的电缆局部截面结构清晰可见,使用该方法能较好地抑制伪影,从而有效地检出缺陷,满足实际需求。实验进一步验证了所提方法针对不同型号电缆缺陷检测的有效性,有望直接用于实际电缆三维解析重建中。

4 结论

本文提出一种基于数据平滑的高压电缆X射线扫描图像解析重建方法(LFBP)。在处理截断伪影时,采取了数据向外插值平滑的策略,增加了部分虚拟数据,在重建过程中起到抑制截断伪影作用。在处理有限角伪影时,对投影数据采用向内平滑的策略,对射线源在移动轨迹两端采集的部分原始采样数据进行了平滑处理,在重建过程中对有限角伪影有一定的抑制作用。实验结果表明,直接使FBP重建会产生严重的有限角伪影和截断伪影,LFBP能有效抑制两种伪影且重建效率基本相同;SIRT通过较长时间的迭代,较好地抑制了图像伪影,但LFBP能有效缩短重建时间且图像重建质量相当。综上,LFBP重建方法能兼顾重建效率和重建图像质量,可推动L-STCT扫描方式应用于实际电缆检测。

参考文献

- [1] ZHENG Jiankang, SU Xiaoting, LI Geng, et al. Electrochemical corrosion properties and failure analysis of water-blocking buffer layer in high voltage power cables [J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(2): 91-96.
郑建康, 苏小婷, 李庚, 等. 高压电缆阻水缓冲层电化学腐蚀特性及失效研究[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(2): 91-96.
- [2] MENG Zhengzheng, LI Xu, YU Yang, et al. Application status and research prospects of HVDC extruded cables [J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 33-41.
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.
- [3] LI Wenjie, OUYANG Benhong, SONG Pengxian, 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.
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.
- [4] SU Wenqun, ZHANG Li, QIAN Yong, et al. Study on XLPE cable partial discharge monitoring technique and its applications[J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(4): 654-657.
苏文群, 张丽, 钱勇, 等. XLPE电缆局放检测技术及其应用[J]. *华东电力*, 2011, 39(4): 654-657.
- [5] PANG Shengyang. Overview on partial discharge detection technology for XLPE cable [J]. *Electric Safety Technology*, 2021, 23(10): 17-21, 25.
庞圣养. 交联聚乙烯电缆局放检测技术综述[J]. *电力安全技术*, 2021, 23(10): 17-21, 25.
- [6] LU Zhixiong, SHEN Liangping. Overview of partial discharge detecting technology for XLPE cable [J]. *Hubei Electric Power*, 2004, 28(4): 26-28.
陆志雄, 沈凉平. XLPE电力电缆局部放电检测技术综述[J]. *湖北电力*, 2004, 28(4): 26-28.
- [7] ZHANG Qingle, LIU Songping, LIU Feifei. Fast inspection of large-scale composite honeycomb sandwich structures using automated X-ray digital radiography scanning imaging technique [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(13): 78-83.
章清乐, 刘松平, 刘菲菲. 大型复合材料蜂窝夹芯结构X射线数字成像自动化快速扫描检测技术[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(13): 78-83.
- [8] SUN Huan, LIU Xiaoli, YE Zhenni, et al. A new proposed method for observing fluid in rock fractures using enhanced X-ray images from digital radiography [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(1): 1-16.
- [9] BALL K, LEE Y, FURTADO C, et al. Gaining mechanistic insight into key factors contributing to crack path transition in particle toughened carbon fibre reinforced polymer composites using 3D X-ray computed tomography [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 61-66.
- [10] CHUNG S Y, KIM J S, STEPHAN D, et al. Overview of the use of micro-computed tomography (micro-CT) to investigate the relation between the material characteristics and properties of cement-based materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116843.
- [11] LIAO Mingjuan, LI Lei, DUAN Xiaojiao, et al. Local source-translation ct imaging for testing in-service high-voltage cables [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 96-106.
廖明娟, 李雷, 段晓礁, 等. 源平移扫描局部CT成像及其检测在役高压电缆[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 96-106.
- [12] ANDERSEN A H, KAK A C. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm [J]. *Ultrasonic Imaging*, 1984, 6(1): 81-94.
- [13] CHEN Zhiqiang, JIN Xin, LI Liang, et al. A limited-angle CT reconstruction method based on anisotropic TV minimization [J].

- Physics in Medicine & Biology, 2013, 58(7): 2119–2141.
- [14] YANG Jiansheng, YU Hengyong, JIANG Ming, et al. High-order total variation minimization for interior tomography[J]. Inverse Problems, 2010, 26(3): 350131–3501329.
- [15] KATSEVICH A. Microlocal analysis of an FBP algorithm for truncated spiral cone beam data[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2002, 8(5): 407–426.
- [16] OHNESORGE B, FLOHR T, SCHWARZ K, et al. Efficient correction for CT image artifacts caused by objects extending outside the scan field of view[J]. Medical Physics, 2000, 27(1): 39–46.
- [17] SOURBELLE K, KACHELRIESS M, KALENDER W A. Reconstruction from truncated projections in CT using adaptive detruncation[J]. European Radiology, 2005, 15: 1008–1014.
- [18] HSIEH J, CHAO E, THIBAUT J, et al. A novel reconstruction algorithm to extend the CT scan field-of-view[J]. Medical Physics, 2004, 31(9): 2385–2391.
- [19] HUANG Yixing, PREUHS A, MANHART M, et al. Data extrapolation from learned prior images for truncation correction in computed tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(11): 3042–3053.
- [20] KETOLA J H, HEINO H, JUNTUNEN M A, et al. Deep learning-based sinogram extension method for interior computed tomography[C]. SPIE, 2021, 11595: 963–969.
- [21] KHURAL B S, BAER-BECK M, FOURNIE E, et al. Deep learning-based extended field of view computed tomography image reconstruction; influence of network design on image estimation outside the scan field of view[J]. Biomedical Physics & Engineering Express, 2022, 8(2): 025021.
- [22] FRIKEL J, QUINTO E T. Characterization and reduction of artifacts in limited angle tomography[J]. Inverse Problems, 2013, 29(12): 125007.
- [23] QUINTO E T. Artifacts and visible singularities in limited data X-ray tomography[J]. Sensing and Imaging, 2017, 18(1): 9.

High-efficiency Reconstruction Algorithm of Source Translation Scan Computed Tomography for High-voltage Cable

NI Song¹, CHEN Jie¹, YU Haijun¹, DUAN Xiaojiao¹, CHEN Dabing², LIU Jianjun²

(1 Chongqing Zhence Science and Technology Co., Ltd., Chongqing 401332, China)

(2 Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Cross-linked Polyethylene (XLPE) cable is widely used in urban power supply systems because of its excellent performance. Its inner structure—the water-blocking buffer layer—is prone to suffer from ablation defects after a long time of working, which will threaten the safety of the city's power supply. Therefore, the accurate detection of such cable defects is an urgent problem to be solved. In our previous work, we proposed a Local Source-translation Computed Tomography (L-STCT) method for cable detection. This method focuses on scanning part of the cable around the water-blocking buffer layer, and can intuitively observe the internal structure and identify defects with the reconstructed image. However, the used reconstruction method—Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT)—requires massive iterations for final images, lowering reconstruction efficiency. To meet the high-efficiency reconstruction in engineering applications, we propose a Local-detecting Filtered Backprojection (LFBP) method in this paper, as the analytical method is much fast for image reconstruction. The typical analytic algorithm—Filtered Backprojection (FBP)—requires complete and detruncated projection for artifacts-free reconstruction. As L-STCT scans only part of the cable, the X-ray beam cannot cover the entire object, resulting in projection truncation. At the same time, limited source trajectory and detector width cannot achieve at least 180° angular coverage, resulting in projection missing. The L-STCT scan suffers from the problems of projection truncation and limited-angle computed tomography. Performing analytic reconstruction with raw incomplete and truncated projection will produce severe artifacts, affecting defect identification. To suppress the potential artifacts, the projection smoothing method is introduced according to projection characteristics. Projection smoothing mainly uses the cosine function to interpolate data along the detector direction and source sampling direction respectively. At both ends of the detector, the new part of virtual data gradually smoothing to 0 is splicing with the original data, avoiding data dropping to

0 suddenly and alleviating projection truncation. Similarly, starting from the projection sampled at the start and end source sampling points, smoothing is carried out on the part of the original projection collected near the two ends of the source sampling trajectory. The processed data gradually smooth to 0 along the two ends of the X-ray source trajectory to suppress limited-angle artifacts. In the experiment, we respectively used SIRT, FBP, and LFBP methods to reconstruct the image with the same set of projections, and calculated the SSIM and RMSE values to evaluate the image quality quantitatively. The results show that images reconstructed by the FBP method suffer from severe limited-angle and truncated artifacts, which interfere with the basic structure of the cable and potential defect identification. The images reconstructed by SIRT and LFBP are similar in quality, as both methods suppressed artifacts and clarified the basic structure of the cable. A lower RMSE and higher SSIM mean better image quality. Obviously, for $\varnothing 100$ mm cable imaging, the values of RMSE and SSIM are 0.117 0 and 0.923 8 for SIRT, which is close to that of LFBP (0.130 3 and 0.917 2). It proves that the image quality is comparable for both methods. By contrast, a higher RMSE (0.191 6) and lower SSIM (0.657 7) further indicates that artifacts greatly degrade reconstructed image for FBP. A similar result also can be found for $\varnothing 160$ mm cable imaging. For computational consumption, LFBP costs 1.38 s, FBP costs 1.42 s, and SIRT costs 62.46 s. Due to the added additional projection in the projection smoothing process, LFBP reconstruction is slightly longer than that of FBP but can be completely negligible. As the SIRT method gets the final image after 500 iterations, its reconstruction speed is much lower than the other two methods. Therefore, the LFBP method takes into account the reconstruction image quality and reconstruction efficiency, which is more suitable for practical engineering applications.

Key words: Computed tomography; Local source-translation computed tomography; Filtered backprojection; Projection smoothing; Limited-angle imaging; Projection truncation; Artifact suppression

OCIS Codes: 340.7440; 110.7440; 110.6955; 110.6960; 110.3010