

进一步,焦平面中心在探测器平面的投影的  $x$  坐标值为:

$$x_{D_i} = (S_D - S_0) \cdot \tan[\gamma - \Delta\gamma \cdot (i - 1)] \quad (4)$$

当射线源以等距方式移动扫描时,射线源的  $x$  坐标值可表示为:

$$x_{S_i} = \frac{L_S}{N - 1}(i - 1) - \frac{1}{2}L_S \quad (5)$$

进一步,焦平面中心在探测器平面的投影的  $x$  坐标值为:

$$x_{D_i} = \frac{1}{2}L_D - \frac{L_D}{N - 1}(i - 1) \quad (6)$$

此外,根据 CL 系统几何关系,系统的几何放大比可表示为:

$$M_f = \frac{S_D}{S_0} \quad (7)$$

## 2 直线 CL 扫描 VW-FBP 重建算法

不同于 CT 断层图像垂直于探测器平面的情形,本文研究的 FBP 方法是基于 CL 分层方向进行重建,即分层图像平行于探测器平面。当投影视角为  $\theta$  时,建立待重建物体  $f(x, y, z)$  与物体在探测器平面的投影  $p(u, v)$  的关系为:

$$p_\theta(u, v) = \mathfrak{R}f(x, y, z) \quad (8)$$

其中,  $\mathfrak{R}$  为投影 Radon 变换,满足 Lambert-Beer 定律,投影  $p_\theta(u, v)$  为探测器采集的数据经对数变换后的值,  $f(x, y, z)$  为物体的衰减系数,通常与物体的密度成正比。由投影重建图像是 Radon 变换  $\mathfrak{R}$  的逆变换,即反投影重建过程。

定义  $BP$  为反投影算子,  $h_{\theta,z}(x, y)$  为投影视角为  $\theta$ 、分层位置为  $z$  时的反投影视角图,有如下关系成立:

$$h_{\theta,z}(x, y) = BP_{\theta,z}(p_\theta(u, v)) \quad (9)$$

则反投影重建图像  $f(x, y, z)$  的过程可定义为所有反投影视角图的加权累加,即:

$$f(x, y, z) = \sum_{\forall \theta \in \Gamma} w_{u,v}(x, y, z, \theta) BP_{\theta,z}(p'_\theta(u, v)) \quad (10)$$

$$p'_\theta(u, v) = [k(u, v) \times p_\theta(u, v)] * h(u) \quad (11)$$

$$k(u, v) = \frac{S_0}{\sqrt{S_D^2 + u^2 + v^2}} \quad (12)$$

式中:  $k(u, v)$  射线修正系数;  $h(u)$  为滤波函数,本文取斜坡滤波函数,  $*$  为卷积运算;  $p'_\theta(u, v)$  为滤波后投影。式(10)中,  $w_{u,v}(x, y, z, \theta)$  是投影视角为  $\theta$  时投影点  $(u, v)$  的反投影加权系数,一般采取线性插值获取,但会造成图像模糊。

为便于阐述,设物体具有两个点,如图 2(a) 所示,该物体中两点经 CL 投影即 Radon 变换形成的轨迹为正弦

线,如图 2(b) 所示。在投影过程,当射线同时穿过非焦平面高密度特征与焦平面内特征时,两者对应的正弦线相交,投影值显著凸起,如图 2(c) 中星状标志所示。若简单采用线性加权方式会导致其他视角的反投影值偏离真实值,即高密度特征扩散至其他视角造成图像模糊。基于此,本文引入投影视角加权思想,改进 CL 反投影重建过程的加权系数,以减少非焦平面高密度特征对焦平面内结构的干扰,从而提升焦平面图像清晰度。以下讨论本文提出的 VW-FBP 算法的推导过程。

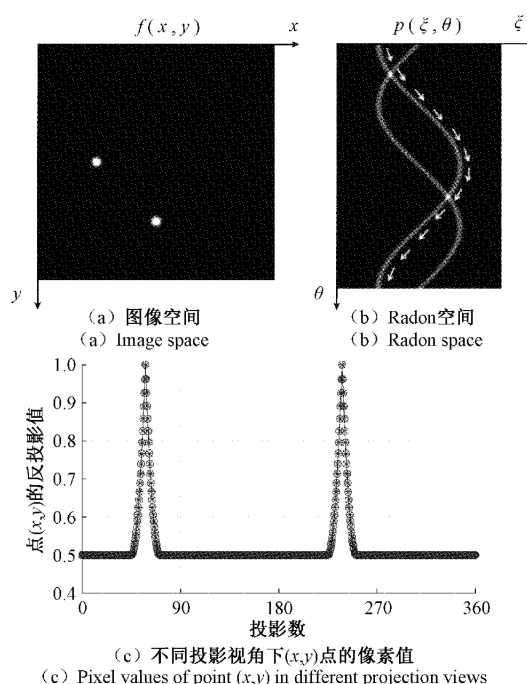


图 2 不同情况下的点特征

Fig. 2 Point characteristics under different conditions

如图 3(a) 所示,当射线源移到点  $S_i$  时,点  $A_x$  在探测器上对应的点为  $C_x$ ,根据三角形相似关系可推导出  $C_x E$  的长度为:

$$C_x E = S_{(N+1)/2} S_i \cdot (M_f - 1) \quad (13)$$

其中,点  $S_{(N+1)/2}$  表示射线源移动行程的中间点。

$C_x E$  的长度即为探测器中心移动的距离,故点  $C_x$  在  $xoy$  坐标系中对应的  $x$  坐标值为:

$$C_{xx} = u + S_{(N+1)/2} S_i \cdot (1 - M_f) \quad (14)$$

其中,  $u$  表示点  $C$  在探测器上的物理坐标,根据  $C_{xx}$  可得  $C_x F$  的长度为:

$$C_x F = - [u + S_{(N+1)/2} S_i \cdot (1 - M_f) - S_{(N+1)/2} S_i] \quad (15)$$

同样,根据三角形相似性可推导出  $A_x D$  的长度为:

$$A_x D = - [u + S_{(N+1)/2} S_i \cdot (1 - M_f) - S_{(N+1)/2} S_i] \cdot k_z \quad (16)$$

其中,  $k_z = \frac{S_0 - z}{S_D}$ ,  $z$  为分层位置。

进而求得  $A_x$  的  $x$  坐标值为:

$$A_{xx} = S_{(N+1)/2} S_i - [u + S_{(N+1)/2} S_i \cdot (1 - M_f) - S_{(N+1)/2} S_i] \cdot k_z \quad (17)$$

由图 3(b) 中的几何关系, 可推导出  $A_y$  的  $y$  坐标值:

$$A_{yy} = k_z \cdot v \quad (18)$$

其中,  $v$  表示点  $C$  在探测器上的物理坐标。

综上, 可得出探测器投影坐标  $(u, v)$  与重建物体坐标  $(x, y, z)$  之间的反投影映射关系为:

$$\begin{cases} x = x_{S_i} - [u + x_{S_i} \cdot (1 - M_f) - x_{S_i}] \cdot \frac{S_0 - z}{S_D} \\ y = \frac{S_0 - z}{S_D} \cdot v \\ z = z \end{cases} \quad (19)$$

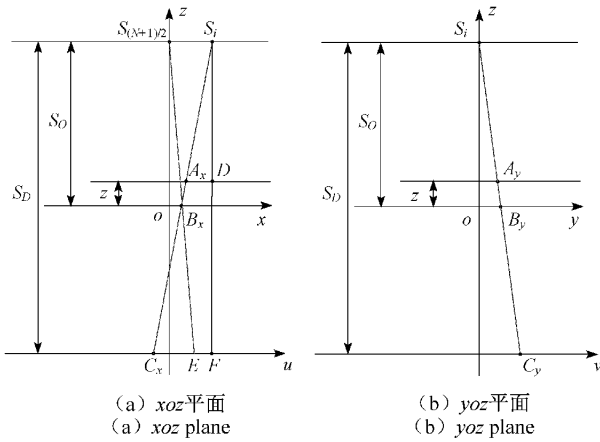


图 3 CL 成像系统几何关系图

Fig. 3 Geometric relationship diagram of CL imaging system

### 3 视角加权系数

在反投影重建图像时, 为减少分层图像间特征的干扰, 我们引入了分层图像间的不相似度  $d_{\theta,z}(x, y)$ , 以区分分层图像高密度特征, 从而不同密度的特征赋予不同的权值, 即:

$$d_{\theta,z}(x, y) = \frac{|h_{\theta,z}(x, y) - M_z(x, y)|}{range}, d \in (0, 1) \quad (20)$$

其中,  $M_z(x, y)$  为所有投影视角下, 分层图像灰度均值;  $range$  为投影最大值与最小值之差。

由此, 建立分层图像间不相似度与分层图像反投影加权系数间的关系如式 (21), 不相似度与加权系数呈反比关系, 即不相似度越大, 加权系数越小, 反之亦然。

$$w_{u,v}(x, y, z, \theta) = \left( \frac{1 - d_{\theta,z}(x, y)}{1 + \alpha d_{\theta,z}(x, y)} \right)^\beta, w \in (0, 1) \quad (21)$$

其中,  $u \in [1, U], v \in [1, V], U \times V$  为面阵探测器矩阵大小;  $h_{\theta,z}(x, y)$  为投影视角  $\theta$ 、分层位置为  $z$  时的反投影重建图像;  $\theta \in \Gamma$  为 CL 扫描采样点  $S_i$  与  $z$  轴的夹角, 通常  $0^\circ < \Gamma < 180^\circ$ ;  $\alpha, \beta$  为加权系数调整参数。

本文采用 3 组加权系数进行分析讨论。图 4 给出了  $\alpha, \beta$  分别为  $\alpha = 0, \beta = 1; \alpha = 2, \beta = 1; \alpha = 2, \beta = 2$  时不相似度与加权系数曲线, 可以看出, 当  $\alpha \geq 1$  时,  $\beta$  越大, 加权系数非线性特征愈明显。

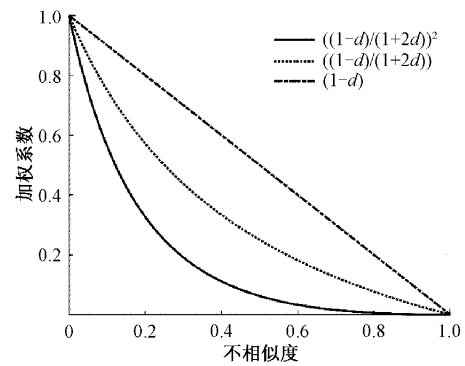


图 4 加权系数与不相似度的关系曲线

Fig. 4 The relationship curve of weighting coefficient vs. dissimilarity

综上, 我们建立了式 (10) 重建模型, 推导了探测器投影坐标  $(u, v)$  与重建物体坐标  $(x, y, z)$  之间的反投影映射关系, 如式 (19), 并赋予了恰当的反投影加权系数, 如式 (21), 直线 CL 扫描 VW-FBP 重建算法实现伪代码如下。

#### VW-FBP 算法

输入: 投影数据  $p_\theta(u, v)$

输出: 重建图像  $f(x, y, z)$

初始化: 重建图像  $f$  及重建参数

S1. 投影数据对数变换

S2. 利用式 (11) 对投影数据修正并滤波

S3. 利用式 (9) 得到反投影视角图  $h_{\theta,z}(x, y)$

S4. 视角加权反投影

for  $n = 1; N$

for  $z = 1; Z$

for  $u = 1; U$

for  $v = 1; V$

由式 (19) 得到重建坐标  $(x, y, z)$

由式 (21) 得到反投影加权系数

```

end for v
end for u
end for z
end for n

```

S5. 由式(10)加权反投影累加得到图像 $f(x, y, z)$

## 4 实验和结果

### 4.1 仿真实验

为了验证 VW-FBP 算法的可行性,本文先对仿真模体进行模拟扫描实验,图5分别为仿真模体在3个方向中间层的剖面图,为更好地展示重建效果,分别沿 $x$ 方向和 $y$ 方向对其进行扫描,使仿真实验数据更充足。具体仿真扫描参数如表1所示。

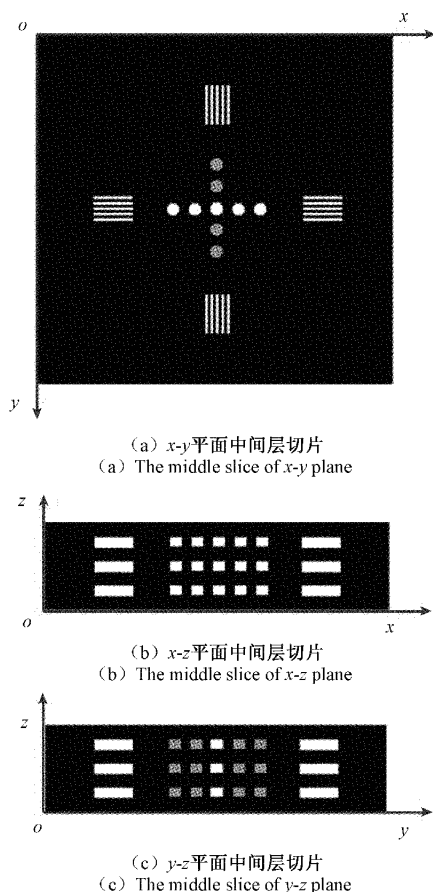


图5 仿真模体3个方向的中层切片

Fig. 5 The middle slices of the simulation module in three directions

加权系数由不同投影视角分层图像间的不相似度确定,可通过改变式(21)中的 $\alpha$ 、 $\beta$ 值来确定不同的加权系数,仿真实验中选取了3组加权系数来验证 VW-FBP 算

表1 直线 CL 模拟扫描参数

Table 1 Simulated scanning parameters of linear CL

参数	值
射线源到探测器的距离( $S_{DD}$ )/ Pixel	600
射线源到物体的距离( $S_{OD}$ )/ Pixel	300
探测器矩阵	256×256
像元大小/Pixel <sup>2</sup>	1×1
投影个数	64
扫描角度	90°
采样方式	等角采样
图像矩阵	256×256×65

法的可靠性,3组加权系数分别为 $w_1 = 1 - x$ ,  $w_2 = \frac{1 - x}{1 + 2x}$ ,  $w_3 = \frac{1 - x}{(1 + 2x)^2}$ ,并对比了不同加权系数的效果。

图6展示了仿真模体 $x$ - $y$ 平面的第52层结果。图6(a)为未加权的重建结果、图6(b)~(d)分别为不同调整参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 的重建结果。对比图6箭头所指区域可看出,随着加权系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 的增大,重建图像伪影逐渐减弱,这是由于改进后的加权系数有效降低分层间结构的干扰。

为进一步评估重建图像质量,比较投影加权前后的重建效果,分别选取 $x$ - $y$ 平面第52层重建图像中 $y = 63$ 水平线和 $x = 111$ 竖直线进行灰度对比,如图7所示。

对比投影加权前后重建图像的灰度曲线,在图7(a)和图7(b)横坐标0~30范围内,未经加权图像的灰度波动较大,而加权后重建图像的灰度波动较小,表明对投影进行恰当加权可有效抑制混叠伪影,在图7(a)横坐标30~40区域,加权系数 $w_3$ 相比加权系数 $w_1$ 和 $w_2$ 的波动更小,说明加权系数 $w_3$ 的去模糊效果更好。对比图7(b)横坐标40附近灰度曲线峰值,加权系数 $w_3$ 灰度曲线峰值最高、变化也最为陡峭,而加权系数 $w_2$ 和 $w_1$ 灰度曲线峰值逐渐变小,表明加权系数 $w_3$ 图像更为清晰,证明了加权系数 $w_3$ 可取得较好的图像质量。

进一步,引入层灵敏度曲线(slice sensitivity profile, SSP),以定量评价加权后图像混叠伪影的改善情况。从本质上讲,层灵敏度曲线与CT成像中的点扩展函数(point spread function, PSF)一样,都是由于图像中的信息扩展到临近区域而导致的图像模糊,均反映图像的清晰度和分辨能力。如图8所示,水平面代表CL的分层平面,竖直面为CT的断层平面,图8中SSP曲线表征了黑色圆点的灰度值扩散到相邻层面的灰度变化情况。

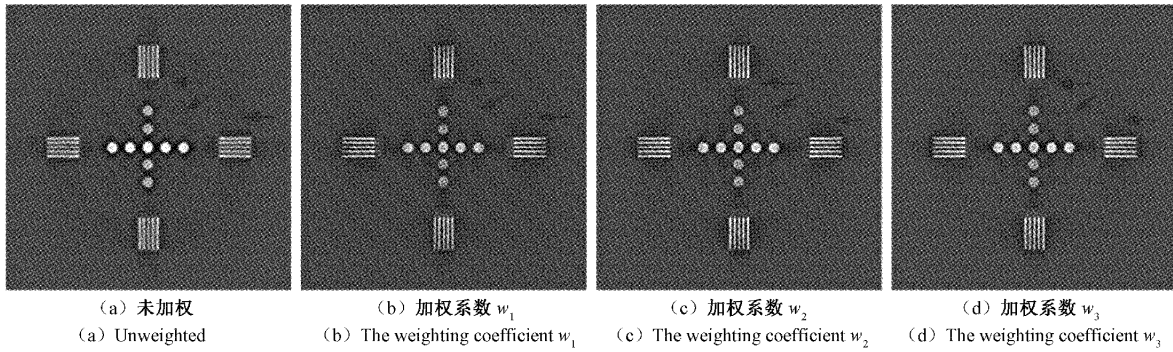
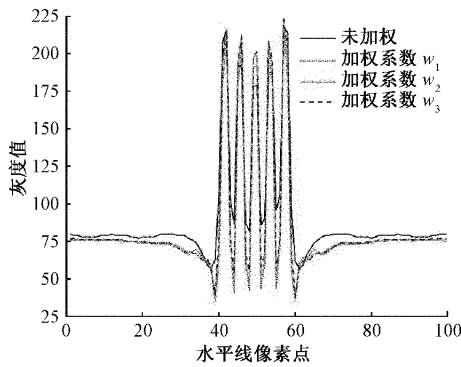
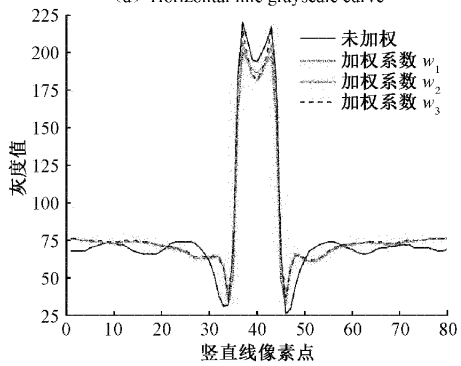


图 6 第 52 层仿真实验结果

Fig. 6 The 52<sup>nd</sup> slice simulation experiment results



(a) 水平线灰度曲线  
(a) Horizontal line grayscale curve



(b) 竖直线灰度曲线  
(b) Vertical line grayscale curve

图 7 不同加权系数图像的灰度曲线

Fig. 7 Grayscale curves of the images with different weighting coefficients

加权前后层灵敏度曲线如图 9 所示,该图表示的是不同层位置一定区域的平均灰度值,所取的层为图 9 中所给出的  $yo_z$  平面的竖线部分。由于层扩展效应的影响,导致不同分层间的信息混叠,重建分层图像的灰度值也偏离原模拟值,本文引入了调制传递函数(modulation transfer function, MTF),将调制度作为定量评价加权效果的标准,调制度的计算如式(22)所示,其中  $\Delta\mu$  表示理想情况下不同层最大和最小灰度值的差值,  $\Delta\mu_c$  表示实际

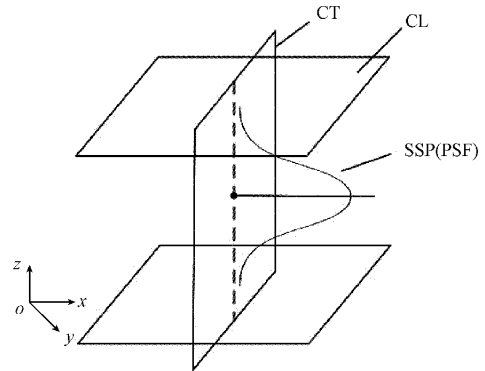


图 8 CL 和 CT 的层灵敏度曲线

Fig. 8 Slice sensitivity profiles for CL and CT

情况下不同层的最大和灰度值的差值<sup>[25]</sup>,比值越大,说明重建图像与理想图越接近,图像清晰度越高。在图 9 中,分别取第 2 分层至第 10 分层的局部灰度均值来计算调制度。从分层 2 至分层 10,未加权图像的灰度值范围为 143~164,加权系数为  $w_1, w_2, w_3$  图像的灰度值变化分别为 152~220, 138~212, 130~205;相应地,调制度依次为  $MTF_{未} = 0.082, MTF_{w_1} = 0.267, MTF_{w_2} = 0.290,$

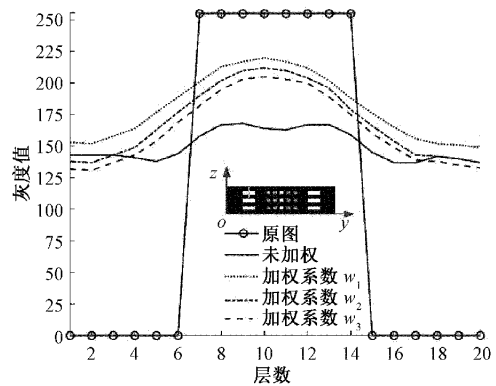


图 9 不同加权系数 CL 图像的层灵敏度曲线

Fig. 9 Slice sensitivity profiles of the CL slices with different weighting coefficients



$MTF_{w_3} = 0.294$ 。经视角加权后图像的调制度差别不大,但相较未加权图像的调制度均增加了约 0.2,表明 VW-FBP 算法有效减少分层间混叠,提升了图像清晰度。

$$MTF = \frac{\Delta\mu_c}{\Delta\mu} \quad (22)$$

#### 4.2 实际实验

为进一步验证 VW-FBP 算法的可靠性,分别对两个不同的印刷电路板和 U 盘进行 CL 扫描,具体扫描参数如表 2 所示。其中 3 组不同的参数  $S_{DD}$  和  $S_{OD}$  依次表示大电路板、U 盘和小电路板实验参数,其他参数则相同。

图 10 为大电路板第 30 层的重建图像,高密度特征即虚线方框区域的伪影比较严重,实线方框区域为非高密度特征,加权前后重建结果区别不大,为便于展现重建结果的差异,对图中虚线方框区域进行局部放大。由图中箭头所指区域可看出,未经加权重建图像存在严重拖

表 2 实际实验扫描参数

Table 2 Scanning parameters of actual experiment

参数	值
射线源到探测器的距离( $S_{DD}$ )/mm	164/230/224
射线源到物体的距离( $S_{OD}$ )/mm	45.85/95/45.85
探测器矩阵	1 536×1 536
像元大小/mm <sup>2</sup>	0.085×0.085
投影个数	101
扫描角度	80°
采样方式	等角采样
图像矩阵	1 536×1 536×101

影,而加权后的重建图像的混叠伪影显著减少,图像清晰且对比度增强。随着加权调整参数  $\alpha, \beta$  的增大,如图 10(b)~(d),混叠伪影逐渐减弱。

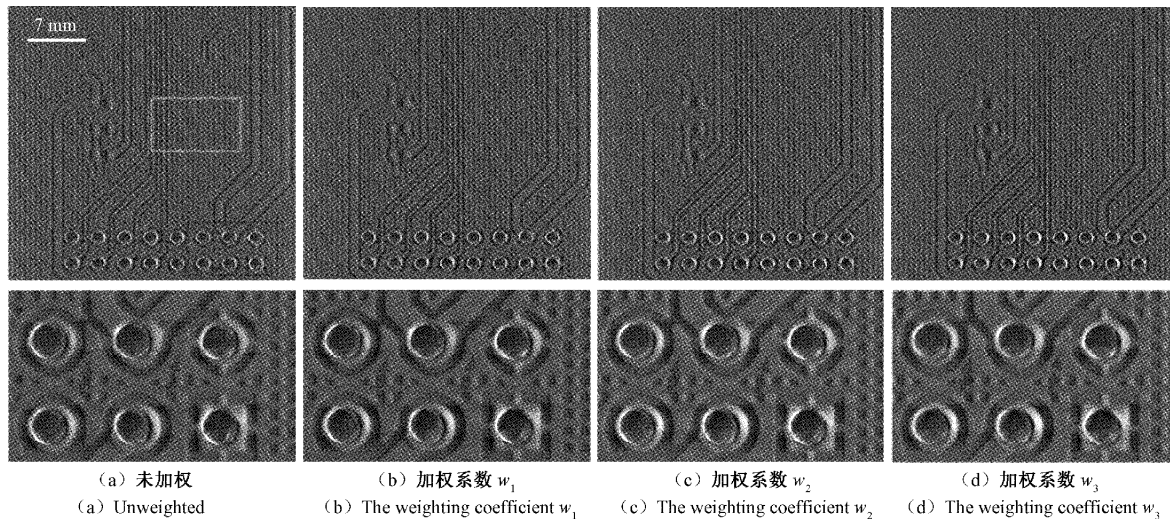


图 10 大电路板第 30 层重建结果

Fig. 10 The 30<sup>th</sup> slice reconstruction results of a big circuit board

图 11 为 U 盘第 80 层的重建图像,由局部放大图中箭头所指区域可看出,未经加权重建图像圆孔结构模糊,而加权后的重建图像混叠伪影减少,圆孔结构清晰。随着加权调整参数  $\alpha, \beta$  的增大,如图 11(b)~(d),混叠伪影逐渐减弱,圆孔结构越来越清晰。

图 12 为 U 盘不同分层的重建结果图。其中,图 12(a)为本文所推导的基于 CL 分层方向 CL-FBP 算法的重建结果,图 12(b)~(d)分别为采用 CT-FBP、CL-FBP 未加权重建和加权系数为  $w_2$  的 VW-FBP 重建结果的局部放大图,其对应区域均为图 12(a)方框。对比箭头所指区域,可看出图 12(b)~(d)的伪影逐渐减少,图像越来越清晰。

图 13 为小电路板第 38 层的重建图像。其中,虚线方框区域为高密度特征,拖影较为严重;实线方框区域为低密度特征,加权前后重建图像清晰度变化并不显著;为便于展现 VW-FBP 算法的重建效果,对虚线方框区域进行放大,由局部放大图中箭头所指区域可以看出,未经加权重建图像存在严重拖影,而加权后的重建图像的拖影得到抑制,图像清晰且对比度增强。随着加权调整参数  $\alpha, \beta$  的增大,如图 13(b)~图 13(d),混叠伪影逐渐减弱。

图 14 为小电路板不同分层的重建结果图。其中,图 14(a)为本文推导的 CL-FBP 算法的重建结果,图 14(b)~(d)分别为采用 CT-FBP、CL-FBP 未加权重



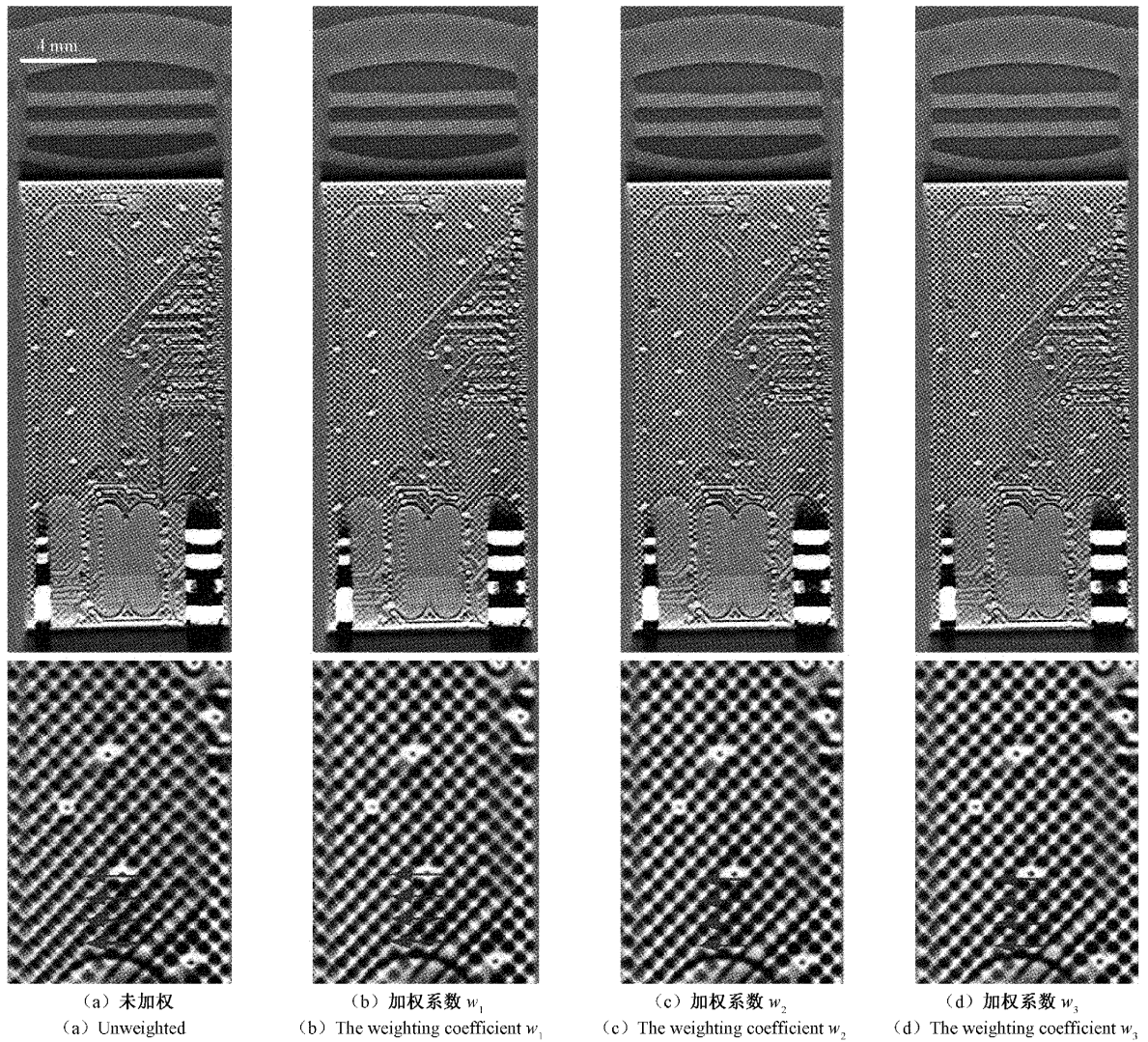


图 11 U 盘第 80 层重建结果

Fig. 11 The 80<sup>th</sup> slice reconstruction results of a USB flash disk

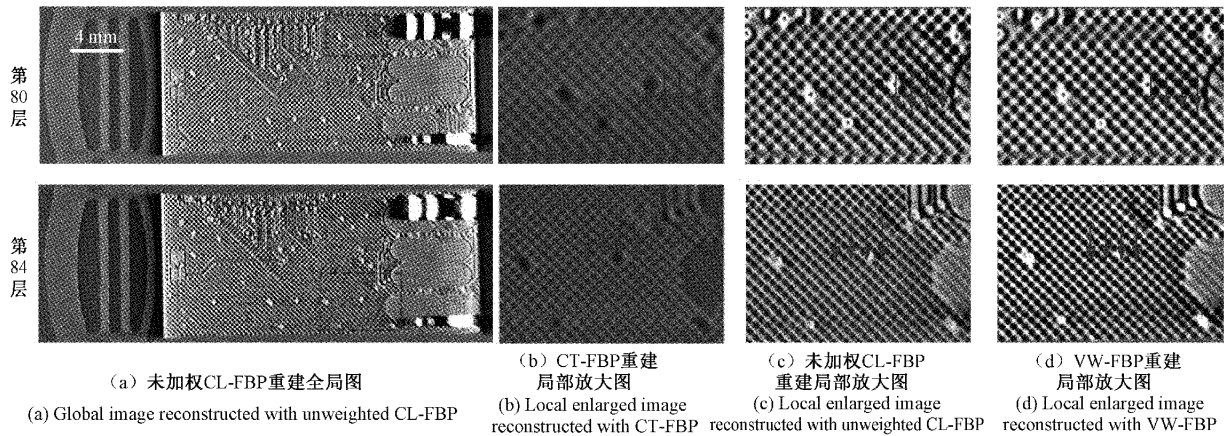


图 12 U 盘重建结果

Fig. 12 Reconstruction results of a USB flash disk



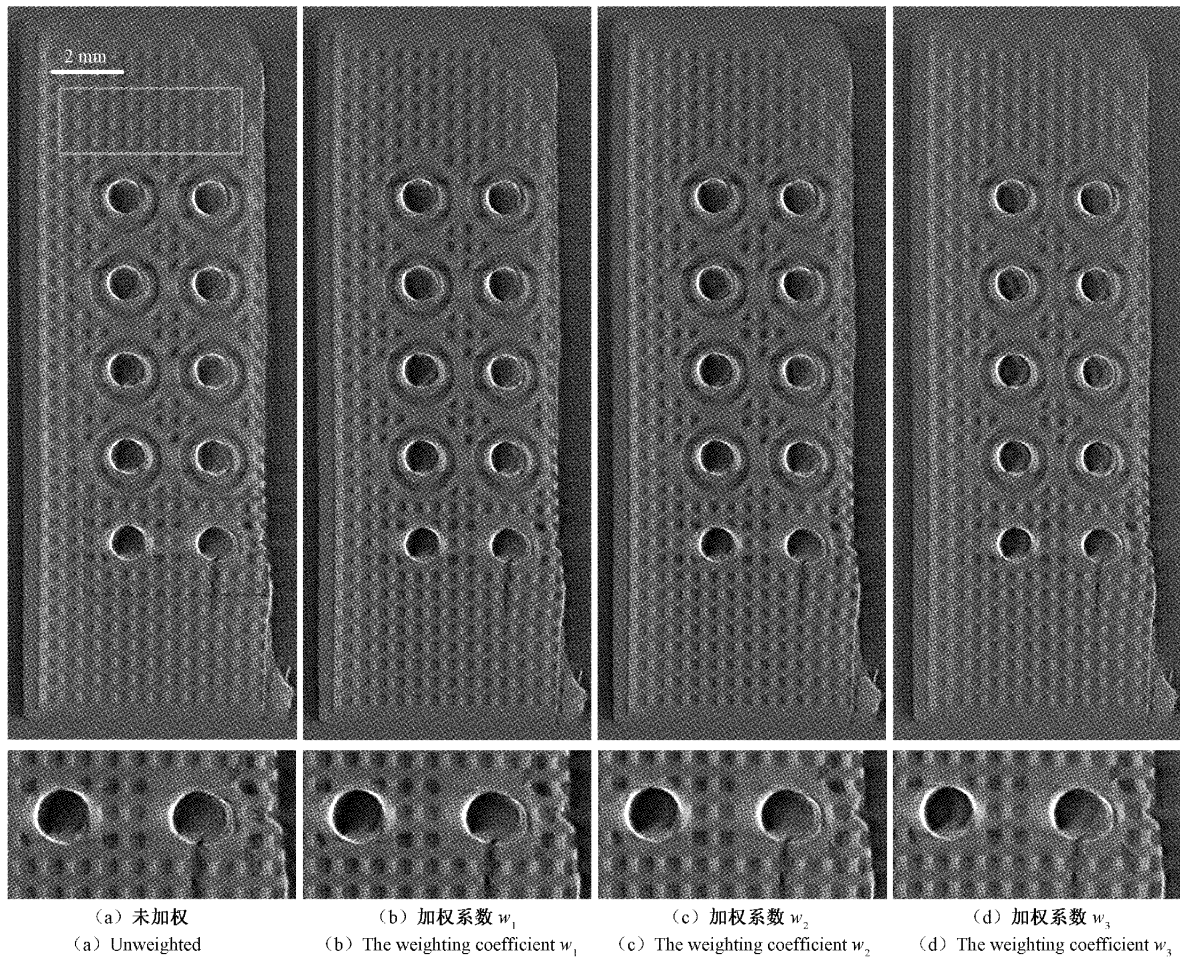


图 13 小电路板第 38 层重建结果

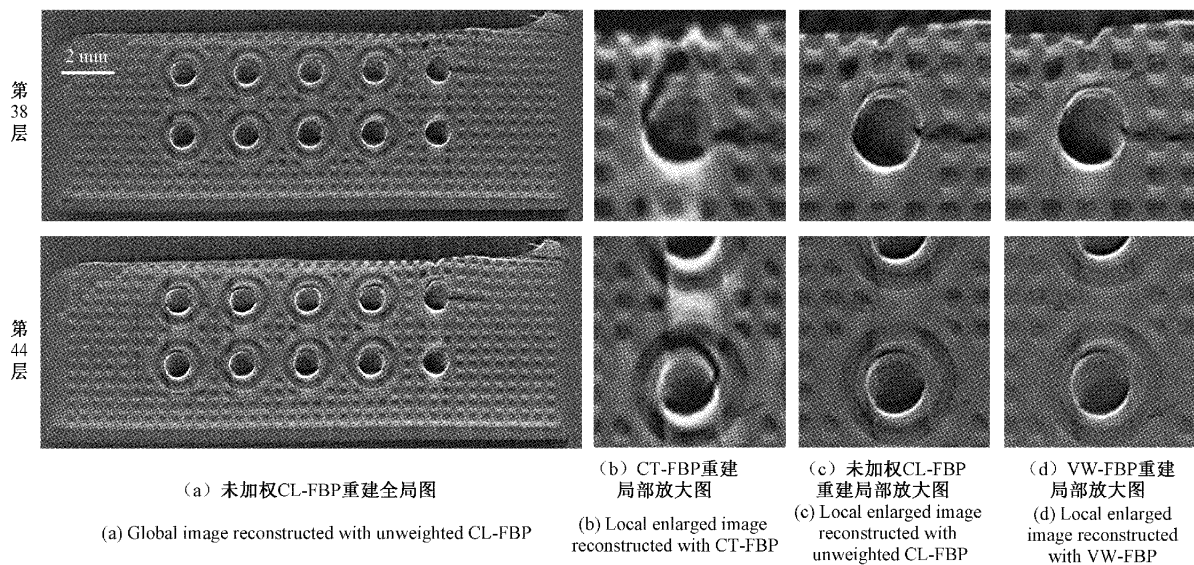
Fig. 13 The 38<sup>th</sup> slice reconstruction results of a small circuit board

图 14 小电路板重建结果

Fig. 14 Reconstruction results of a small circuit board



建和加权系数为  $w_2$  的 VW-FBP 重建结果的局部放大图,其对应区域均为图 14(a) 方框。同样,对比箭头所指区域可看出,从图 14(b)~(d),分层图像中的拖影逐渐减弱。

综上,仿真和实际 CL 扫描实验,均验证了 VW-FBP 算法对抑制混叠伪影的优越性。

## 5 结 论

CL 技术对板状构件的无损检测有其独特的优势,但是由于其扫描结构的限制,不能获得完备的投影数据,据此研究 CL 重建算法以提高重建图像质量十分必要。针对直线扫描 CL 结构,本文推导了按分层方向重建的直线 CL 扫描 FBP 重建算法;为减少分层图像间的混叠,采用反投影视角图加权的思想,引入反投影加权系数,提出了直线 CL 扫描 VW-FBP 算法。仿真数据和实际扫描数据均验证了 VW-FBP 算法的优越性,加权调整参数越大,图像清晰度越好,相较未加权图像的调制度提高了 0.2。此外,CL 扫描几何参数的准确性也是决定图像质量的关键因素,后续研究工作将几何参数偏差引入图像重建算法,结合改进算法以提高 CL 图像质量,进一步满足实际成像需求。

### 参考文献

- [1] WOOD C E, O' BRIEN N, DENYSOV A, et al. Computed laminography of CFRP using an X-ray cone-beam and robotic sample manipulator systems [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66 (3): 655-663.
- [2] FU J, ZHANG CH SH, ZHU G G, et al. Development and application of X-ray computed laminography for aerospace [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14):49-54.
- [3] 齐洁,胡志华,邓秋云,等. X 线数字断层融合技术在骨关节外伤诊断中的应用价值[J]. 现代医院,2019, 19(1): 131-133.  
QI J, HU ZH H, DENG Q Y, et al. The application value of X-ray digital tomosynthesis in the diagnosis of traumatic bone and joint [J]. Modern Hospitals, 2019, 19(1):131-133.
- [4] LI Y, LIU S Q, LI C M, et al. Automated defect detection of insulated gate bipolar transistor based on computed laminography imaging [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 115: 113966.
- [5] ZUBER M, LAAB M, HAMANN E, et al. Augmented laminography, a correlative 3D imaging method for revealing the inner structure of compressed fossils [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-11.
- [6] 蔡玉芳,李屏懿,王珏,等. 板壳结构物体计算机分层成像检测技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1):14-28.  
CAI Y F, LI P Y, WANG J, et al. Recent advances in computed laminography for nondestructive testing of plate-shell objects [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2020,41 (1):14-28
- [7] 田忠建,余海军,汪粼波,等. 正交直线扫描计算机分层成像研究[J]. 光学学报,2020,40(22):97-106.  
TIAN ZH J, YU H J, WANG L B, et al. Orthogonal translational computed laminography (OTCL) imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (22): 97-106.
- [8] 王珏,葛敏雪,蔡玉芳,等. 基于线框模型的锥束 CT 几何参数校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (2): 177-184.  
WANG J, GE M X, CAI Y F, et al. Geometric parameters calibration method for cone beam CT system based on square-line phantom [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (2): 177-184.
- [9] 张才鑫,黄魁东,陈华. 基于标定量具的快速锥束 CT 几何校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2019 40(1):175-182.  
ZHANG C X, HUANG K D, CHEN H. Fast cone-beam computed tomography geometric calibration method based on measuring tools [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):175-182.
- [10] WEI Z, YUAN L, LIU B, et al. A micro-CL system and its applications [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(11): 115107.
- [11] GOU J N, DONG H Y. Sparse projection CT image reconstruction based on the split bregman less iteration[J]. Springer International Publishing, 2017, 455: 213-219.
- [12] MANDELKORN F, STARK H. Computerized tomosynthesis, serioscopy, and coded-scan tomography [J]. Applied Optics, 1978, 17 (2): 175-180.
- [13] GODFREY D J, MCADAMS H P, DOBBINS III J T. Optimization of the matrix inversion tomosynthesis (MITS) impulse response and modulation transfer function characteristics for chest imaging [J]. Medical Physics, 2006, 33(3): 655-667.
- [14] YLEVAKHINA Y. Three-dimensional digital tomosynthesis; Iterative reconstruction, artifact reduction and alternative acquisition geometry [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [15] LIU B, LUO Y, LI K, et al. X-ray layered refocusing



- imaging based on linear scanning [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1-12.
- [16] 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): 118-129.  
LI L, TAN CH 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): 118-129.
- [17] ZHANG T, XING Y X, ZHANG L, et al. Stationary computed tomography with source and detector in linear symmetric geometry: Direct filtered backprojection reconstruction [J]. *Medical Physics*, 2020, 47(5): 2222-2236.
- [18] 贾统, 刘双全, 孙校丽, 等. CL 迭代重建算法的 GPU 实现 [J]. *中国体视学与图像分析*, 2020, 25(4): 393-400.  
JIA T, LIU SH Q, SUN X L, et al. GPU implementation of an iterative reconstruction algorithm for Computed Laminography [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2020, 25(4): 393-400.
- [19] QUE J M, CAO D Q, ZHAO W, et al. Computed laminography and reconstruction algorithm [J]. *Chinese Physics C*, 2012, 36(8): 777-783.
- [20] WU W W, YU H Y, CONG W X, et al. Theoretically exact backprojection filtration algorithm for multi-segment linear trajectory [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2018, 63(1): 015037.
- [21] XI T, ZHANG H, WANG Y B, et al. VVBP-tensor in the FBP algorithm: Its properties and application in low-dose CT reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2019, 39(3): 764-776.
- [22] LAURITSCH G, HÄRER W H. Theoretical framework for filtered back projection in tomosynthesis [C]. *Medical Imaging 1998: Image Processing*. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3338: 1127-1137.
- [23] GONG CH CH, ZENG L. Adaptive iterative reconstruction based on relative total variation for low-intensity computed tomography [J]. *Signal Processing*, 2019, 165: 149-162.
- [24] LEVAKHINA Y M, MÜLLER J, DUSCHKA R L, et al. Weighted simultaneous algebraic reconstruction technique for tomosynthesis imaging of objects with high-attenuation features [J]. *Medical Physics*, 2013, 40(3): 031106.
- [25] 国家市场监督管理总局. 无损检测 工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法: GB/T 29069-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 5.  
State Administration for Market Regulation. Non-destructive testing-Test method for measurement of industrial computed tomography (CT) system performance: GB/T 29069-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 5.

### 作者简介



E-mail: caiyf@cqu.edu.cn

**Cai Yufang** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 1998 from Northwest Normal University, received her M. Sc. degree in 2002 from Chongqing University. Now, she is an associate research fellow and master supervisor in Chongqing University. Her main research interest includes instrument science and technology, pattern recognition and image processing, industrial computed tomography (CT) technology and system.



**Li Pingyi** received her B. Sc. degree in 2018 from Henan University of Science and Technology. Now, she is a master student in Chongqing University. Her main research interest includes instrument science and technology, industrial computed tomography (CT) technology and system.

**蔡玉芳** (通信作者), 1998 年于西北师范大学获得学士学位, 2002 年于重庆大学获的硕士学位, 现为重庆大学副研究员和硕士生导师, 主要研究方向为仪器科学与技术、模式识别与图像处理、工业 CT 技术与系统。

**李屏懿**, 2018 年于河南科技大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为仪器科学与技术、工业 CT 技术与系统。

E-mail: 201808021031@cqu.edu.cn