

# 涡轮叶片 CBCT 散射与硬化伪影协同校正方法 \*

熊璐琛<sup>1</sup>, 龚 欣<sup>1</sup>, 潘强华<sup>2</sup>, 陈 曦<sup>1</sup>, 邬冠华<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

**摘要:**针对锥束 CT 成像中散射和射束硬化叠加导致图像对比度降低、灰度失真及微缺陷易漏检的问题,提出了一种考虑散射效应的 X 射线多色衰减校正模型,用于航空发动机涡轮叶片工业 CT 缺陷检测。该模型由散射项与硬化衰减项串联协同组成,散射项是使用斜光栅板对涡轮叶片进行两次扫描,采用内外散射场分离与双三次插值、角度样条插值等手段重建全角度散射分布,得到近似无散射的等效投影;硬化衰减项采用以投影灰度为自变量的指型硬化曲线,结合穿透厚度先验信息推导加权补偿表达式,引入灰度权衡因子的加权射束硬化校正方法。考虑到 CT 成像中散射与硬化是相互作用的,进一步将散射抑制与硬化校正结果统一到穿透厚度与曝光强度的映射框架中,得到穿透厚度与曝光强度串联的协同校正模型,可同步抑制散射伪影与杯状伪影。经过实验结果表明,在 450 kV 的 CBCT 系统上,所提方法使涡轮叶片重建图像的信噪比、对比噪声比和平均梯度分别提升 42.75%、75.92% 和 181.25%,优于仅采用散射校正算法或硬化校正算法,在缺陷测量能力上,人工设计 0.3 mm 气膜孔微缺陷深度测量精度达到  $0.28 \pm 0.008$  mm,与商业软件相比,平均绝对误差和相对误差均值分别降低 32.5% 和 2.2%。验证了该方法对真实涡轮叶片工业 CT 成像散射和硬化伪影的校正能力。

**关键词:** 涡轮叶片; CT 检测; 散射校正; 硬化校正; 协同校正

中图分类号: TN911.73 TH744 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4050

## Synergistic decoupling method for scatter and hardening artifacts in CBCT of turbine blades

Xiong Luchen<sup>1</sup>, Gong Xin<sup>1</sup>, Pan Qianghua<sup>2</sup>, Chen Xi<sup>1</sup>, Wu Guanhua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** An X-ray polychromatic attenuation correction model that explicitly accounts for scatter is proposed for industrial CT defect inspection of aero-engine turbine blades to address the superimposed scatter and beam hardening in cone-beam CT, which cause reduced image contrast, grayscale distortion, and missed detection of micro-defects. The model is constructed as a cascaded cooperative combination of a scatter term and a hardening attenuation term. In the scatter term, a tilted grating plate is used to scan the turbine blade twice, allowing internal and external scatter fields to be separated. Full-angle scatter distributions are reconstructed using bicubic interpolation and angular spline interpolation to obtain effective projections that approximate scatter-free conditions. In the hardening attenuation term, an exponential hardening curve with projection grayscale as the independent variable is employed, and a weighted beam hardening correction method is developed by deriving a compensation expression based on prior penetration-thickness information and introducing a grayscale trade-off factor. Considering that scatter and hardening are mutually coupled in CT imaging, the results of scatter suppression and beam hardening correction are further unified within a mapping framework between penetration thickness and exposure intensity, yielding a cascaded cooperative correction model that simultaneously suppresses scatter artifacts and cupping artifacts. Experimental results on a 450 kV CBCT system demonstrate that the proposed method increases the signal-to-noise ratio, contrast-to-noise ratio, and average gradient of turbine-blade reconstructions by 42.75%, 75.92%, and 181.25%, respectively, outperforming schemes that apply only scatter correction or only beam hardening correction. For an artificial 0.3 mm film-cooling-hole micro-defect,

the depth measurement accuracy reaches  $0.28 \pm 0.008$  mm, and the mean absolute error and mean relative error are reduced by 32.5% and 2.2%, respectively, compared with commercial software, confirming the effectiveness of the method in correcting scatter and beam hardening artifacts in real turbine-blade industrial CT imaging.

**Keywords:** turbine blades; CT inspection; scatter correction; hardening correction; synergistic correction

## 0 引言

锥束 X 射线计算机断层成像 (cone-beam computed tomography, CBCT) 技术能实现构件内部三维结构的无损可视化与精确测量, 已成为工业叶片微缺陷检测、评估、分析和尺寸测量的关键手段<sup>[1-2]</sup>。涡轮叶片常用的高密度镍基单晶高温合金材料及其复杂的薄壁曲面结构, 使得 X 射线穿透过程中极易产生严重的散射<sup>[3]</sup>与射束硬化效应<sup>[4]</sup>。这些物理效应在重建图像中表现为物体图像边界模糊、分辨率低以及部分图像信息失真, 严重影响图像质量与缺陷识别精度。因此, 需要采取有效方法对涡轮叶片 CBCT 图像进行伪影校正<sup>[5]</sup>, 恢复图像质量, 提高涡轮叶片工业检测准确性。

在对涡轮叶片进行射线扫描过程中, 会出现旋转中心位置微小偏移、重建算法、叶片自身散射以及多色射线束硬化等因素, 都将影响重建图像的成像质量。其中射线的散射效应和硬化效应对成像质量影响最为严重。只针对单一伪影进行的校正难以取得较好的效果, 由康普顿效应引发的散射效应校正后的图像依旧会出现灰度不均匀的杯状伪影<sup>[6]</sup>, 传统射束硬化校正算法很难直接应用于伪影很严重的情况。

在散射伪影校正方面, 现有方法主要可分为硬件校正、软件校正及软硬件结合这 3 类。硬件校正方法包括 X 射线准直器、空气间隙法和过滤器法等<sup>[7-9]</sup>, 但是在锥束 CT 设备上抑制散射方面表现出有限的功效。软件校正方法不依赖于专门的硬件, 主要通过深度学习<sup>[10]</sup>和数学模型<sup>[11]</sup>实现对散射信息的估计。随着深度学习技术的兴起和发展, 其展现出了卓越学习能力和高效的特征提取能力, 基于卷积神经网络架构<sup>[12]</sup>的深度散射估计网络已成为一种开创性的解决方案, 可以在从实际测量的单能扫描投影和 CT 衰减投影中估计散射信息。Zhang 等<sup>[13]</sup>设计了一种基于卷积神经网络的耦合伪影校正算法, 但简单卷积无法充分提取 CT 图像特征, 难以彻底消除伪影。晏婷等<sup>[14]</sup>提出双编码 U-Net 网络模型, 结合二维离散小波变换提取差值图像的低频散射信号, 实现散射校正。Zhuo 等<sup>[15]</sup>提出散射核叠加启发的卷积网络用于 CBCT 散射校正, 解决了深度学习方法与物理散射模型结合不紧密、缺乏物理一致性的问題, 但散射核函数的设计依赖经验参数, 对不同设备的适配性需手动调整。柴世杰等<sup>[16]</sup>提出一种多尺度生成对抗网络, 实现耦

合伪影的校正。然而, 这些方法需要大量的训练数据和计算资源, 给工业上检测任务带来了巨大的挑战。且实际工业检测中常无法获取高质量数据集, 导致经验模型鲁棒性不足。因此软硬件结合仍是工业现场最常用的方法, 可快速精准检测散射信息。其中散射校正板 (beam stop array, BSA) 方法<sup>[17]</sup>是将散射校正板平行放置于探测器前获取整幅投影的散射分布, 已在传统 CBCT 中取得良好效果, 但检测过程中需进行重复扫描, 不仅增加了检测成本, 还因校正板在锥束 CT 成像时, 其投影会在探测器上产生半影效应, 限制了该方法的实际工程应用。

工业 CT 实际使用的射线源为多能射线束, 而常用的经典滤波反投影算法<sup>[18]</sup>基于单能射线束假设, 导致重建图像出现灰度从边缘到中心递减的“杯状”伪影。射束硬化伪影校正方面研究, 可以被分类为双能量方法<sup>[19]</sup>、统计迭代方法<sup>[20]</sup>和正弦图修复方法<sup>[21]</sup>。其中双能量校正方法需耗费较长后处理时间, 且对计算性能要求较高, 成为其应用瓶颈。迭代方法需先获取 X 射线能谱及材料能量相关衰减系数的先验信息<sup>[22]</sup>。Brabant 等<sup>[23]</sup>采用迭代重建算法在重建过程中考虑了射束硬化的影响。为了解决正弦图一致性问题, Cao 等<sup>[24]</sup>提出了射束硬化校正回归模型, 通过仿真数据训练模型, 有效提升尺寸测量精度。Romano 等<sup>[25]</sup>在重建后对射束硬化曲线进行线性化处理实现了精确校正。Zhao 等<sup>[26]</sup>通过模拟 X 射线光子与成像材料的物理相互作用, 开发出兼具快速性与准确性的射束硬化校正方法。李长春等<sup>[27]</sup>提出了做多阈值分割以获取伪影区域, 再用 B 样条插值重建缺失投影数据, 从而去除金属伪影。Xiu 等<sup>[28]</sup>依据射线等效穿透长度, 建立了基于三项式拟合的多色投影数学模型, 更贴近实际投影。Yang 等<sup>[29]</sup>在明确硬化信息与射线路径关联的基础上, 提出一种受泰勒公式启发的硬化曲线补偿校正方法, 并在 CBCT 系统上验证多色投影校正效果, 证明了补偿措施的有效性。

依据多种伪影在涡轮叶片 CT 图像特性, 提出一种考虑散射的多色射线衰减校正模型, 建立穿透厚度与曝光强度协同校正模型, 散射项通过设计倾斜栅条的光栅校正板, 消除探测器投影中的半影效应, 利用散射信息模糊特点, 稀疏采样插值散射信息; 硬化项利用指数函数模型和射线长度与投影关系的先验知识, 引入自适应权衡因子, 从多色投影估计单色投影。建立穿透厚度与曝光强度协同校正模型, 从而实现两种伪影的同步抑制, 提升工业叶片 CT 重建图像质量与微缺陷检测精度。

## 1 理论分析

### 1.1 基于斜光栅散射板的散射校正

#### 1) 斜光栅散射板原理

斜光栅散射校正板 (tilted beam stop array, TBSA) 是基于 BSA 法的改进散射校正方法, 使栅格中轴线聚焦射线源, 这样可以避免扫描半影区过多。斜光栅板放置于被测物体与探测器之间, 设计的几何示意图如图 1 所示。

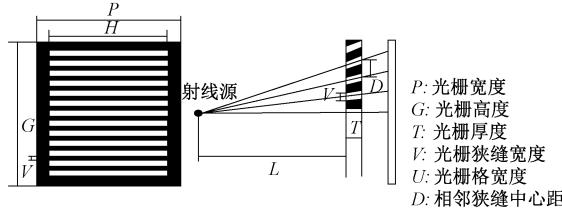


图 1 几何信息

Fig. 1 Geometric information

TBSA 方法计算散射图像需要两组投影数据, 如图 2 所示。第 1 组: 工件进行 CT 扫描的投影数据, 如图 2(a) 所示; 第 2 组: 在工件与探测器之间加斜光栅板后 CT 扫描的投影信息, 如图 2(b) 所示。

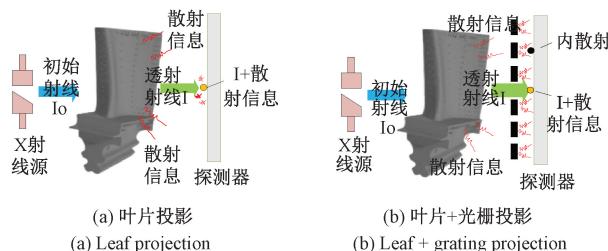


图 2 散射校正示意图

Fig. 2 Scatter correction schematic diagram

#### 2) 散射场估计步骤

无工件时, 光栅板 DR 投影数据中栅格区域灰度值已经超过了探测器本身的散射值, 这种情况被称为平板探测器内散射。因此在估计散射值的过程中, 也需要考虑在狭缝区域也含有内散射的影响。

散射场的估计基于相同成像参数下的两组投影数据。首先对斜光栅投影图像进行阈值分割, 定位完全屏蔽的栅格区域和透射的狭缝区域。从栅格区域提取初始的内散射场, 经双三次插值平滑得到其完整分布。接着利用内散射场对含斜光栅投影进行初步校正, 再分别从初步校正后的图像和无光栅的原始图像中提取狭缝区域的信号, 差值即为该区域外散射场估计。最后, 对外散射场估计图像进行双三次插值与高斯滤波处理, 得到投影图像完整散射场分布图像, 流程如图 3 所示。

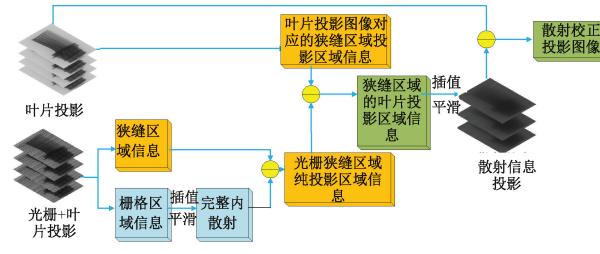


图 3 散射估计流程

Fig. 3 Scatter estimation flowchart

#### 3) 插值散射估计

散射图像特点是具有模糊性且不包含工件具体结构细节, 由工件内部结构的密度分布决定。CBCT 扫描得到投影数量通常为几百幅至上千幅, 相邻投影信息差异小。

结合散射场固有属性与投影采集特性, 可通过插值算子优化散射场投影数量, 降低工业中 TBSA 算法的使用成本。比如, 原始 720 张投影图像等间距选取 100 张重构对应角度散射场, 进行角度三次样条插值算法生成全角度散射场图像。这样能在大幅降低全角度散射场重构时间成本, 同时有效维持图像连续性与整体质量。

### 1.2 基于加权因子的射束硬化校正算法

#### 1) 线性硬化校正模型

当 CT 成像中多色 X 射线束穿过物体时, 低能 X 射线较高能光子优先被吸收。随路径增加, 高能光子占比上升, 射线平均能量升高, 衰减系数随路径变长递减。导致相同路径下多色与单色投影存在差异 (如图 4(a) 所示)。因此, 经射束硬化后的投影重建图像无法准确反映材料衰减系数 (如图 4(b) 所示), 表现为切片中心衰减系数小于边缘, 即产生杯状伪影。

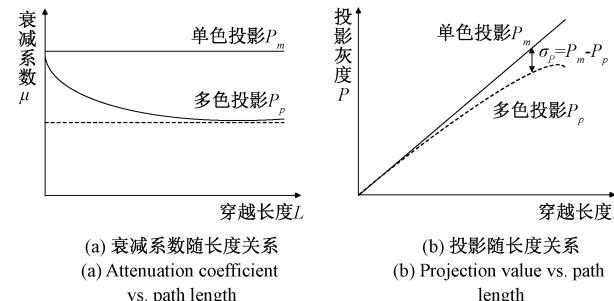


图 4 射束硬化过程变化曲线

Fig. 4 Beam hardening process variation curves

射束硬化校正模型含硬化曲线 (多色投影) 和校正直线 (单色投影), 其校正思路是: 建立两者数学表达式, 由硬化曲线算多色投影对应的穿越长度, 再通过校正直线得对应单色投影灰度。多色投影与衰减的关系随着穿过物体的光线长度的变化而变化, 因此多色投影是路径长度和衰减系数的线积分。而衰减系数是 X 射线能量的

函数,也与射线的长度有关。显然,多色投影为:

$$P_p = L \cdot \mu_a(E, L) \quad (1)$$

式中:  $P_p$  表示对数变换后的多色投影;  $L$  为射线穿过物体的长度;  $\mu_a(E, L)$  为长度为  $L$  的平均吸收系数。

文献[20]中的硬化校正(HC)算法是基于最小二乘法用指数模型拟合多色投影与路径长度,即:

$$L = \alpha \cdot P_p \cdot \exp(\beta \cdot (P_p)^\gamma) \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为拟合参数。

单色投影呈过原点线性增长,为路径长度与衰减系数的乘积。线性硬化校正(linear hardening correction, LHC)以一条校正直线修正多色引起的硬化数据,将式(2)中函数在零点处的导数作为该直线的斜率,即:

$$K = L'(0) = \alpha \quad (3)$$

修正直线的斜率  $K$  看作是等效的单色投影。得到硬化曲线后,对基于相同路径的多色投影的单色长度模型进行校正。则有:

$$L = K \cdot P_m = L'(0) \cdot P_m = \alpha \cdot P_m \quad (4)$$

式中:  $P_m$  是单色投影。

## 2) 加权因子推导

加权射束硬化校正算法(weighted-compensation hardening correction, WCHC)针对由于不同能量下的硬化趋势不同,单一 LHC 模型下的校正曲线过硬,导致了部分位置硬化校正过度,出现内亮外暗的现象。进一步地对硬化校正前后投影进行加权,达到中和过渡校正的目的。基于多色投影和衰减系数构建了反映两者关系的路径长度模型,即:

$$L(P_p) = P_p / \mu_a(E, L) \quad (5)$$

由泰勒公式,  $L(P_p)$  可近似表示为基于可微函数的

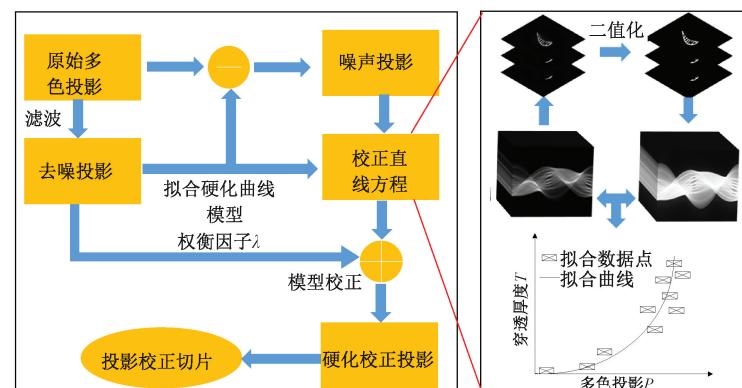
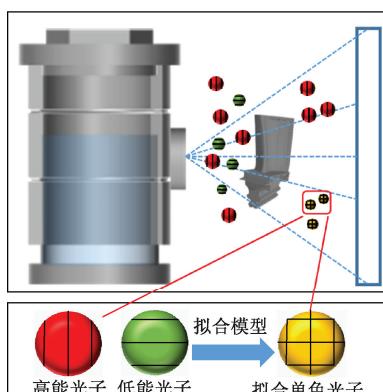


图 5 权值硬化算法

Fig. 5 Weighted hardening correction algorithm

### 1.3 穿透厚度与投影值映射的协同校正模型

散射场校正基本思路是在曝光强度中估计出散射强度,而硬化校正基本思路是建立穿透厚度与多色投影的映射模型。两者协同校正需统一变量,假设散射场校正

$P_{p0}$  值附近的导数,长度模型可改写为:

$$L(P_p) = t(P_{p0}) \cdot P_p + t'(P_{p0}) \cdot (P_p - P_{p0}) + o((P_p - P_{p0})^n) \quad (6)$$

式中:  $P_{p0}$  为多色投影的平均值;  $t(P_{p0})$  为线性衰减系数的倒数;  $o((P_p - P_{p0})^n)$  为多项式残差。将式(6)中的二次及后续多项式残差近似设计为非线性模型。然后射束硬化曲线模型可以构造成:

$$L(P_p) \approx c \cdot P_p + a(P_p)^b \quad (7)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为模型系数,且  $a > 0, b > 0, c > 0$ 。由于多色和单色的路径长度相同,因此可以从上面得到的模型中得到校正后的投影,即:

$$P_m = L(P_p) / L'(0) + \Delta = (c \cdot P_p + a(P_p)^b) / c + \Delta \quad (8)$$

其中  $\Delta$  为噪声估计值,为了减少初始线的斜率对整个校正结果的影响,引入一个权衡因子  $\lambda$ ,作为对校正投影的妥协。然后计算出最终的投影(单色投影)可以计算为:

$$P_m = (aP_p^b + cP_p) / c + \lambda \cdot P_p + \Delta \quad (9)$$

其中权衡因子  $\lambda$  定义为:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^M (P_m)_i}{\sum_{i=1}^M (P_p)_i} = \frac{\sum_{i=1}^M (ax_i^b + cx_i) / c}{\sum_{i=1}^M x_i} \quad (10)$$

基于二值化切片及采样射线求交的硬化曲线获取方法:对投影数据预重建得到切片图像,经二值化处理后,按像素交线权值计算特定射线路径位置与角度下射线和体素的长度和。

此时,将多色投影拉回单色投影的校正已经完成。图 5 为权值硬化算法的流程图。

演变成核函数与图像的卷积,文献[30]提到可以将散射场强度  $I_s$  与曝光强度  $I_D$  的映射模型为:

$$I_s = f(I_D) = a_s \cdot I_D^{b_s} \quad (11)$$

式中:  $a_s$  为调整散射场的全局强度参数;  $b_s$  为待调整散射场的局部强度参数。

根据 Lambert-Beer 定律核心是“衰减与强度对数相关”, 这里有效曝光强度是“总曝光强度减去散射场强度”, 即:

$$P_p = \ln\left(\frac{I_{b_g, \text{eff}}}{I_{D, \text{eff}}}\right) = \ln(I_{b_g} - a_s \cdot I_{b_g}^{b_s}) - \ln(I_D - a_s \cdot I_D^{b_s}) \quad (12)$$

式中:  $I_{b_g}$  为背景曝光强度;  $I_{b_g, \text{eff}}$  为背景(无物体衰减)的有效曝光强度;  $I_{D, \text{eff}}$  为含物体时的有效曝光强度。

因此将式(12)代入式(9), 即可建立穿透厚度  $T$  与曝光强度  $I_D$  的串联协同校正模型, 如式(13)所示。

$$T = a[\ln(I_{b_g} - a_s \cdot I_{b_g}^{b_s}) - \ln(I_D - a_s \cdot I_D^{b_s})]^b + c(1+\lambda)[\ln(I_{b_g} - a_s \cdot I_{b_g}^{b_s}) - \ln(I_D - a_s \cdot I_D^{b_s})] + \Delta \quad (13)$$

## 2 实验验证

### 2.1 试验对象与参数

本次 CT 扫描试验检测设备配置为 450 kV 的 YXLONFF85CT 型工业用微焦点 X 射线 CT 系统。系统采集图像灰度范围为 0~65 535, FDD(射线源中心到探测器的距离)为 453 mm; FOD(光源中心到物体的距离)为 1 133 mm, 探测器大小为  $3 054 \times 3 054$ , 像素尺寸为 0.139 mm。涡轮叶片自然缺陷样本难获取, 故设计加工多种人工缺陷: 6 个  $0.6 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$  裂纹及 4 个直径 0.3 mm 气孔, 被检缺陷叶片和检测现场如图 6 所示。

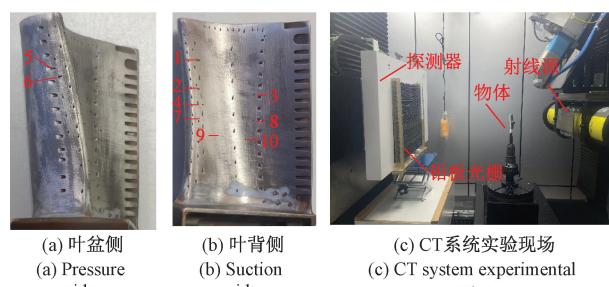


图 6 被检叶片和检测现场

Fig. 6 Tested blade and inspection site

涡轮叶片检测使用的铅板斜光栅设计几何参数如表 1 所示。

### 2.2 散射估计及拟合硬化曲线

在相同扫描参数(扫描电压为 425 kV、扫描电流为 1.5 mA)下, 用 TBSA 算法计算两组投影数据的散射信息, 图 7 给出了估计散射场过程, 图 7(a)为叶片 DR 投影图像, 图 7(b)为含斜光栅板的 DR 投影图像, 图 7(c)为估计散射场图像。

表 1 光栅板几何参数

Table 1 Grating plate geometric parameters

项目	数值/mm
光栅材料	铅锑合金
光栅宽度( $P$ )	430
光栅高度( $G$ )	466
光栅板厚度( $T$ )	20
光栅狭缝宽度( $V$ )	3
光栅格宽度( $U$ )	2
相邻狭缝中心距( $D$ )	5

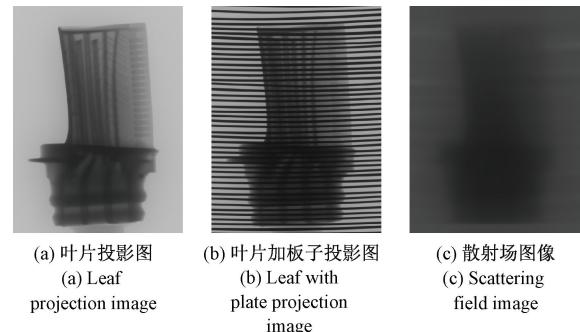
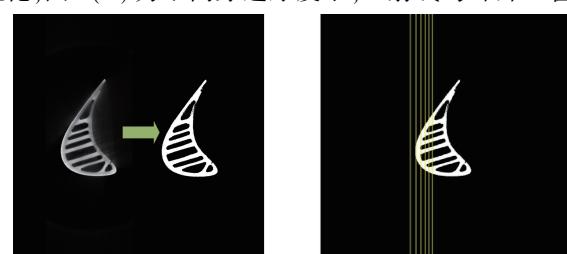


图 7 估计散射信息

Fig. 7 Compute scattering information

图 8 为硬化曲线拟合的过程, 图 8(a)为重建切片二值化, 图 8(b)为不同穿透厚度下, X 射线与叶片二值图



(a) 散射校正切片二值化  
(a) Scatter-corrected slice  
binary

(b) 二值化射线路径侦测  
(b) Binary ray-path  
detection

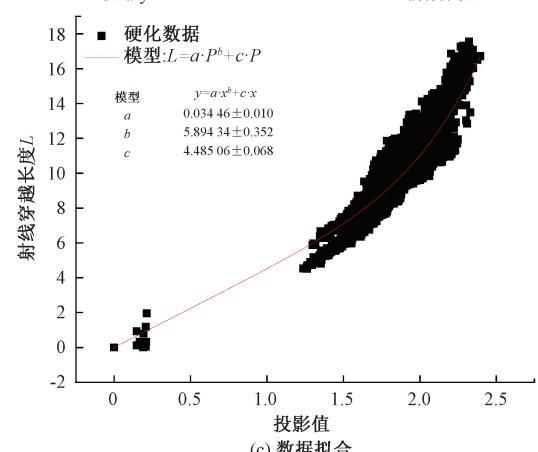


图 8 硬化曲线拟合

Fig. 8 Beam hardening curve fitting

像的作用序列,图 8(c)给出了采用指数函数对采样离散数据的拟合曲线,表 2 为计算的硬化曲线拟合参数。

表 2 曲线拟合采样参数

Table 2 Sampling parameters of curve fitting

硬化曲线	$a$	$b$	$c$	$\lambda$
数值	0.034 46	5.894 34	4.485 06	1.590 3

### 2.3 伪影校正对比分析

为证实提出方法在叶片 CT 图像伪影校正方面的有效性,对比分析涡轮叶片的原始图像、TBSA、LHC、WCHC、TBSA-LHC 及 TBSA-WCHC 的第 100 层、第 512 层 CT 切片图像。图 9 结果显示:TBSA 有效抑制了叶盆区域的散射伪影,提升轮廓清晰度,结构细节更易辨识,但仍存在边缘亮、中心暗的杯状伪影。单一硬化校正方法(LHC/WCHC)因未剔除散射信号的干扰,导致硬化校正曲线拟合精度不足,复杂结构区域校正效果差,无法有效改善图像质量。TBSA-LHC 虽能一定程度减轻杯状伪影,但出现内部过亮、外部偏暗的过度校正。在所有对比方法中,TBSA-WCHC 协同校正方法在有效提升投影清晰度、抑制散射伪影的基础上,改善了图像灰度均匀性。

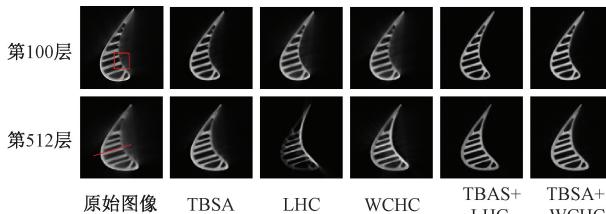


图 9 不同方法处理后切片图像

Fig. 9 Sliced images processed by different methods

取第 512 层不同方法重建切片的同一位置直线灰度值,归一化后结果如图 10 所示。

TBSA 校正后,工件结构更清晰、对比度及灰度值有提升,但叶片边缘存在明显灰度跳变,呈典型杯状伪影,边界模糊导致叶盆边缘难识别。而未先去除散射成分而直接进行硬化校正(LHC/WCHC),因散射信号严重干扰衰减曲线拟合,灰度曲线杂乱。相比之下,TBSA-WCHC 协同校正后,图像灰度分布均匀,杯状伪影有效抑制,体现了散射校正与权值硬化校正协同改善 CT 图像质量的综合优势。

为了定量评估校正前后图像的表现,采用信噪比(signal to noise ratio, SNR)、对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)及平均梯度(arverage gradient, AG)等<sup>[31]</sup>量化指标进行效果验证,图 11 为第 100 层选取的感兴趣区域进行评价指标的定量分析。

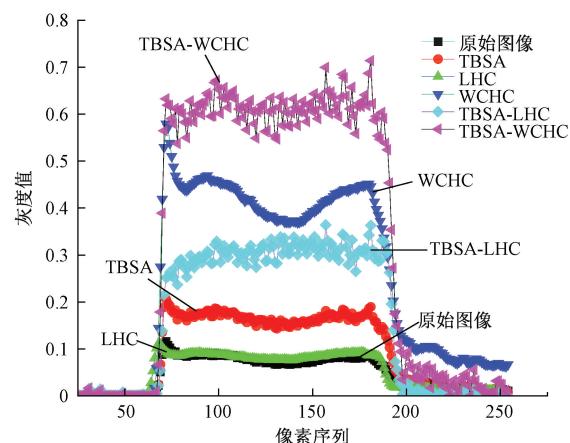


图 10 第 512 层沿直线灰度变化对比

Fig. 10 Comparison of grayscale variations along a straight line on the 512th slice

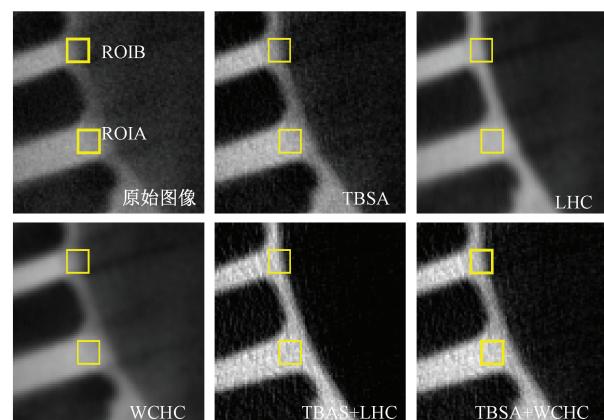


图 11 第 100 层 ROI 区域

Fig. 11 ROI region on the 100th slice

表 3 显示,TBSA-WCHC 协同校正算法的重建切片相比原始重建切片感兴趣区域的各指标提升明显,SNR 提升 42.75%,CNR 提升 75.92%,AG 提升 181.25%,表明协同方法在伪影抑制与细节保留上的表现优于单一校正方法。

### 2.4 缺陷检测精度对比验证

验证协同校正方法对工业 CT 检测涡轮叶片气膜孔周微缺陷定量检测的提升效果。原始无处理重建因伪影无法检出缺陷及定量分析,仅将 TBSA 校正和 TBSA-WCHC 校正结果后的三维重建数据导入 VG Studio MAX 软件,与使用 VG Studio MAX 软件重建时调用内置的伪影校正功能对比。图 12(a)为 TBSA 校正结果,其中 10 处缺陷里除缺陷 6 的重建结果相对平缓,仅呈现微弱起伏外,其余 9 处缺陷的检出结果中,缺陷特征清晰可辨,叶片部分区域缺失严重,整体灰度差异大。图 12(b)为 TBSA-WCHC 校正结果,与图 12(c)的 VG 软件校正

表 3 校正前后切片数值对比

Table 3 Numerical comparison of slices before and after correction

切片层号	校正方法	SNR		CNR		AG	
		数值	增长率%	数值	增长率%	数值	增长率%
第 100 层	原始图像	11.341 5	/	1.172 5	/	0.001 6	/
	TBSA	11.787 8	3.93	1.680 8	43.33	0.002 4	50.00
	LHC	11.778 2	3.85	1.740 5	48.44	0.001 7	6.25
	WCHC	11.589 2	2.18	1.357 5	15.78	0.001 3	-18.75
	TBSA-LHC	12.867 3	13.45	1.967 1	67.77	0.003 3	106.25
	TBSA-WCHC	16.189 7	42.75	2.062 7	75.92	0.004 5	181.25

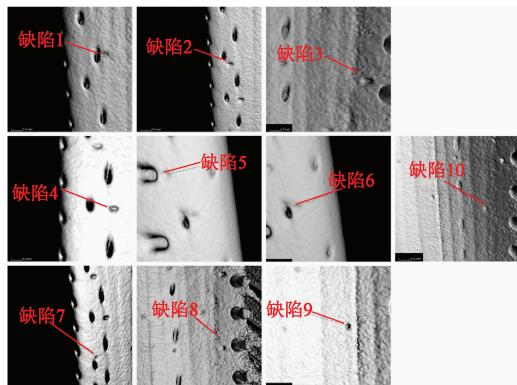
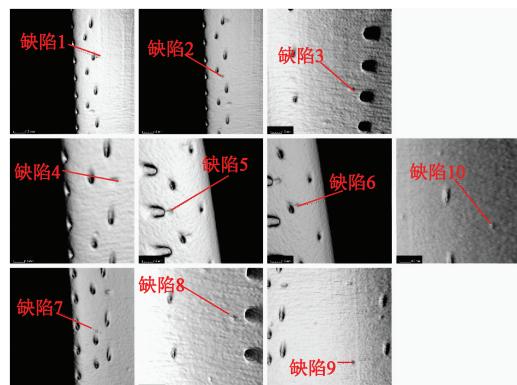
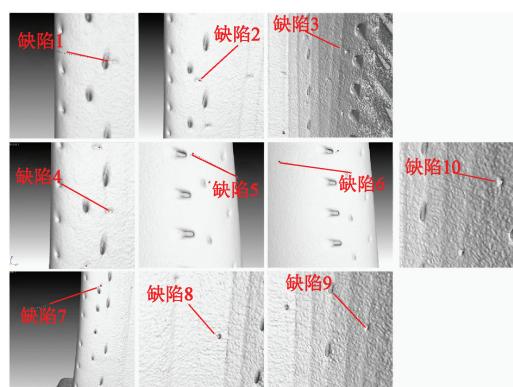
(a) TBSA 校正  
(a) TBSA correction(b) TBSA-WCHC 校正  
(b) TBSA-WCHC correction(c) VG 校正  
(c) VG correction

图 12 测量缺陷

Fig. 12 Defect dimension

结果可以对比看出, 协同方法与商用软件重建结果在检出结果上一样, 都可以准确识别出 10 个微缺陷, 而且叶片重建结果信息基本上完整, 灰度均匀。

表 4 显示在协同算法处理后微裂纹缺陷尺寸, 缺陷测量深度为  $0.28 \pm 0.008$  mm, 各缺陷测量深度与真实缺陷深度(0.3 mm)更加接近。

以 1 号缺陷为例, 测量深度为 0.294 3 mm, 对比仅

TBSA 时的测量结果, 误差改善为 0.022 9; 2 号缺陷测量深度为 0.296 4 mm, 误差改善为 0.034 0, 精度有明显的提升。此前未检出的 6 号缺陷(仅 0.090 5 mm), 经过 TBSA-WCHC 后, 测量深度为 0.284 5 mm, 误差改善为 0.194 0。微气孔缺陷中 7 号与真实值仅差 0.077 mm, 处于结构复杂的叶片叶盆区域 8 号和 10 号缺陷重建结果都为 0.27 mm 以上, 均优于单一 TBSA 校正。与 VG 检

表 4 VG 测量缺陷尺寸

Table 4 Defect dimension measurement using VG

(mm)

序号	TBAS	TBSA-WCHC	VG
1	0.271 4	0.294 3	0.283 5
2	0.262 4	0.296 4	0.275 5
3	0.246 5	0.283 8	0.274 7
4	0.256 0	0.297 5	0.277 3
5	0.236 9	0.292 5	0.290 6
6	0.090 5	0.284 5	0.286 0
7	0.274 4	0.292 3	0.289 0
8	0.255 1	0.279 2	0.275 8
9	0.272 5	0.276 0	0.264 0
10	0.253 2	0.270 9	0.286 1

测结果对比, TBSA-WCHC 的平均绝对误差(0.013 3 mm)较 VG(0.019 7 mm)降低 32.5%, 相对误差均值仅 4.4%, 低于 VG 的 6.6%。

综合来看, 在使用 VG 软件测量时, 经过协同算法伪影校正后, 从无法检出缺陷到大多数缺陷的测量深度趋近真实值, 整体测量误差的平均值有所降低, 进一步体现出散射与硬化协同算法对涡轮叶片缺陷深度测量的准确性。

### 3 结 论

针对工业 CT 检测涡轮叶片时, 因散射与射束硬化效应导致的图像质量退化及微小缺陷漏检问题。针对这一问题, 提出了基于斜光栅散射校正(TBSA)与加权射束硬化校正(WCHC)的协同伪影抑制算法, 并在 CBCT 系统上对该方法的性能进行了验证。实验结果表明, 该算法在多色投影下的重建效果优于仅散射校正或仅硬化校正算法。

与近期兴起的基于深度学习的校正方法相比, 提出的 TBSA-WCHC 协同伪影抑制方法不依赖于大规模、高质量的标注数据进行训练, 其校正能力源于对物理过程的显式建模, 在训练数据难以获取的工业检测场景下更具实用性和鲁棒性。尽管深度学习在特定条件下可能达到优异的性能, 但其“黑箱”特性与协同方法强调的物理可解释性路径不同。因此, 该算法有望成为复杂几何形状和高能 X 射线成像的无损检测工业中提供一种高效、透明且不依赖数据驱动的替代方案。协同方法讨论的关键问题更多地涉及工业无损成像。实验研究中使用的叶片是单一材料的, 所提出的模型对于复杂物体的权衡因子自适应估计也是有效的。但对于射线穿过多种材料时

的权衡因子的估计仍存在不足。因此, 基于多种材料的 CT 散射硬化协同校正方法是下一步研究的关键。

### 参考文献

- [1] 戚俊成, 刘宾, 陈荣昌, 等. X 射线光场成像技术研究[J]. 物理学报, 2019, 68(2): 96-101.  
QI J CH, LIU B, CHEN R CH, et al. Research on X-ray light field imaging technology [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(2): 96-101.
- [2] 陈思宇, 李磊, 闫镔, 等. 基于动态电流的锥束 CT 环状伪影校正方法[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 343-349.  
CHEN S Y, LI L, YAN B, et al. Ring artifact correction method for cone-beam CT based on dynamic current[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 343-349.
- [3] 段晓礁, 唐天旭, 周志政, 等. 涡轮叶片锥束微纳 CT 散射校正[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 39-47.  
DUAN X J, TANG T X, ZHOU ZH ZH, et al. Scatter correction for cone-beam micro-nano CT of turbine blades[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 39-47.
- [4] AHMED O M H, SONG Y SH. A review of common beam hardening correction methods for industrial X-ray computed tomography [J]. Sains Malaysiana, 2018, 47(8): 1883-1890.
- [5] HU D L, LIU J, LYU T L, et al. Hybrid-domain neural network processing for sparse-view CT reconstruction[J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2020, 5(1): 88-98.
- [6] ZHAO W, VERNEKOHL D, ZHU J, et al. A model-based scatter artifacts correction for cone beam CT[J]. Medical Physics, 2016, 43(4): 1736-1753.
- [7] SIEWERDSEN J H, MOSELEY D J, BAKHTIAR B, et al. The influence of antiscatter grids on soft-tissue detectability in cone-beam computed tomography with flat-panel detectors: antiscatter grids in cone-beam CT[J]. Medical Physics, 2004, 31(12): 3506-3520.
- [8] SIEWERDSEN J H, JAFFRAY D A. Optimization of X-ray imaging geometry (with specific application to flat-panel cone-beam computed tomography) [J]. Medical Physics, 2000, 27(8): 1903-1914.
- [9] SORENSEN J A. Scatter rejection by air gaps: An empirical model[J]. Medical Physics, 1985, 12(3): 595690.
- [10] 马燕, 余海军, 钟发生, 等. 基于残差编解码网络的 CT 图像金属伪影校正[J]. 仪器仪表学报, 2020,

- 41(8):160-169.
- MA Y, YU H J, ZHONG F SH, et al. CT metal artifact reduction based on the residual encoder-decoder network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 160-169.
- [11] NIU T Y, XU L, REN Q, et al. UBES: Unified scatter correction using ultrafast boltzmann equation solver for conebeam CT [J]. Computers in Biology and Medicine, 2024, 170: 108045.
- [12] JIANG Y K, YANG CH L, YANG P F, et al. Scatter correction of cone-beam CT using a deep residual convolution neural network (DRCNN) [J]. Physics in Medicine & Biology, 2019, 64(14): 145003.
- [13] ZHANG X R, JIANG Y K, LUO CH, et al. Image-based scatter correction for cone-beam CT using flip swin transformer U-shape network [J]. Medical Physics, 2023, 50(8): 5002-5019.
- [14] 晏婷, 何朝良, 全骞, 等. 基于双编码 U-Net 及离散小波变换的 CBCT 图像散射校正 [J]. 光学学报, 2025, 45(9): 107-121.
- YAN T, HE CH L, TONG Q, et al. Scatter correction for CBCT images based on dual-encoding U-Net and discrete wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(9): 107-121.
- [15] ZHUO X, LU Y CH, HUA Y X, et al. Scatter correction for cone-beam CT via scatter kernel superposition-inspired convolutional neural network [J]. Physics in Medicine & Biology, 2023, 68(7): 075011.
- [16] 柴世杰, 黄魁东, 杨富强, 等. 基于多尺度生成对抗网络的锥束 CT 图像耦合伪影校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 44-54.
- CHAI SH J, HUANG K D, YANG F Q, et al. Coupled artifacts removal in cone-beam computed tomography images based on multi-scale generative adversarial network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(9): 44-54.
- [17] 唐天旭, 段晓礁, 周志政, 等. 基于散射校正板的锥束微纳 CT 系统的散射校正 [J]. 光学学报, 2019, 39(8): 411-421.
- TANG T X, DUAN X J, ZHOU ZH ZH, et al. Scatter correction for cone-beam micro-nano CT system based on scatter correction plate [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 411-421.
- [18] LIU Y, WANG J, ZHANG H, et al. Noise study on cone-beam CT FDK image reconstruction by improved area-simulating-volume technique [J]. Medical Imaging 2014, 2014: 903339.
- [19] CHANG Y B, XU D, ZAMYATIN A A. Metal artifact reduction algorithm for single energy and dual energy CT scans [C]. 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, 2012: 3426-3429.
- [20] TANG SH T, HUANG K D, CHENG Y Y, et al. Optimization based beam-hardening correction in CT under data integral invariant constraint [J]. Physics in Medicine & Biology, 2018, 63(13): 135015.
- [21] TOVEY R, BENNING M, BRUNE C, et al. Directional sinogram inpainting for limited angle tomography [J]. Inverse problems, 2019, 35(2): 024004.
- [22] YANG CH L, WU P W, GONG SH T, et al. Shading correction assisted iterative cone-beam CT reconstruction [J]. Physics in Medicine & Biology, 2017, 62(22): 8495-8520.
- [23] BRABANT L, PAUWELS E, DIERICK M, et al. A novel beam hardening correction method requiring no prior knowledge, incorporated in an iterative reconstruction algorithm [J]. NDT & E International, 2012, 51: 68-73.
- [24] CAO W CH, HAWKER S, FARDELL G, et al. An improved segmentation method for multi-material beam hardening correction in industrial x-ray computed tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(12): 125403.
- [25] ROMANO C, MINTO J M, SHIPTON Z K, et al. Automated high accuracy, rapid beam hardening correction in X-ray computed tomography of multi-mineral, heterogeneous core samples [J]. Computers & Geosciences, 2019, 131: 144-157.
- [26] ZHAO W, LI D W, NIU K, et al. Robust beam hardening artifacts reduction for computed tomography using spectrum modeling [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2018, 5(2): 333-342.
- [27] 李长春, 李元金. 基于多阈值分割和 B 样条插值的 CT 图像金属伪影去除方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 128-132.
- LI CH CH, LI Y J. Research on metal artifacts reduction for CT image based on multi-threshold segmentation and B-spline interpolation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 128-132.
- [28] XIU G Y, YUAN CH Y, CHEN X H, et al. An innovative beam hardening correction method for computed tomography systems [J]. Traitement du Signal, 2019, 36(6): 515-520.

- [29] YANG F Q, ZHANG D H, ZHANG H, et al. Cupping artifacts correction for polychromatic X-ray cone-beam computed tomography based on projection compensation and hardening behavior [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2020, 57: 101823.
- [30] SUN M, STAR-LACK J M. Improved scatter correction using adaptive scatter kernel superposition [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2010, 55(22): 6695-6720.
- [31] 钱玉洋, 魏巍, 陈灯. 基于改进 MSR 的锂电池 X 射线图像增强算法 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45(9): 113-120.
- QIAN Y Y, WEI W, CHEN D. X-ray image enhancement algorithm for lithium batteries based on improved MSR [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(9): 113-120.

## 作者简介



**熊璐琛**, 2022 年于南昌航空大学获得学士学位, 2025 年于南昌航空大学获得硕士学位, 现为南昌航空大学博士研究生, 主要研究方向为数字射线检测与成像、组织结构超声智能检测与评价。

E-mail: xiongluchen0@163.com

**Xiong Luchen** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanchang Hangkong University in 2022 and 2025, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Nanchang Hangkong University. His main research interests include digital radiography detection and imaging, and intelligent ultrasonic detection and evaluation of organizational structures.

**龚欣**, 2023 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为组织结构超声智能检测与评价。

E-mail: gongxin020209@163.com

**Gong Xin** received her B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2023. She is currently a master's candidate at Nanchong Hangkong University.



Her main research interest includes the intelligent ultrasonic detection and evaluation of organizational structures.



**潘强华**, 2019 年于中国社会科学研究院获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院高级工程师, 国家 NDT 质量监督检验中心办公室主任, 主要研究方向为特种设备无损检测技术研究及应用工作。

E-mail: pqh123@163.com

**Pan Qianghua** received his Ph. D. degree from the Chinese Academy of Social Sciences in 2019. He is currently a senior engineer at the China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interest includes the research and application of non-destructive testing (NDT) technologies for special equipment.



**陈曦**, 2019 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授。主要研究方向为材料组织结构的超声智能评价与可视化生成。

E-mail: chenxi@nchu.edu.cn

**Chen Xi** received her Ph. D. degree from Beihang University in 2019. She is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. Her main research interest includes the intelligent ultrasonic evaluation and visual generation of material micro-structures.



**邬冠华** (通信作者), 1986 年于北京航空学院获得硕士学位, 现为南昌航空大学教授。主要研究方向为射线检测与智能评价、组织结构超声检测与评价。

E-mail: wuguanhua@nchu.edu.cn

**Wu Guanhua** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Aeronautics in 1986. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include radiography detection and intelligent evaluation, and ultrasonic detection and evaluation of organizational structures.