

铸件 X 射线检测虚拟探伤图像生成方法

董 溟¹, 侯明君¹, 计效园¹, 李沁阳¹, 吴楚滢¹, 李硕宏¹,
郗喜望^{1, 2}, 陈 强³, 李 宁¹, 周建新¹, 高 亮⁴

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074;
2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 710100;
4. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 随着国防核心装备对零件的要求不断提高, 铸件向结构复杂化方向发展, 如大壁厚差、多交叉结构等, 致使铸件内部缺陷的无损检测更困难。X射线探伤过程中, 拍片依赖人工反复调整成像部位和参数, 存在探伤部位易漏检、成像质量波动大等问题, 亟需发展智能分区调参拍片技术。为此, 本文提出了铸件X射线检测虚拟探伤图像生成方法。首先, 建立了铸件坐标降维映射模型, 实现了铸件三维坐标降维映射到成像板平面二维坐标。其次, 建立了仿真成像参数拟合模型, 生成了点光源式虚拟射线对铸件三维模型的仿真探伤图像。最后, 开发了铸件X射线检测虚拟成像系统。该方法可为实际探伤提供优化的成像姿态和成像参数信息, 为智能分区调参拍片技术提供理论支撑。

关键词: X射线探伤; 铸件三维模型; 点光源成像; 虚拟探伤图像

作者简介:

董 溟 (2000-), 男, 硕士, 主要研究方向为缺陷检测与图像处理。E-mail: 1905184603@qq.com

通讯作者:

计效园, 男, 副教授, 博士生导师。E-mail: jixiaoyuan@hust.edu.cn

中图分类号: TG115.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

06-0835-08

基金项目:

国家重点研发计划项目 (2020YFB1710100); 国家自然科学基金(52275337、52090042和51905188)。

收稿日期:

2023-06-14 收到初稿,
2023-12-15 收到修订稿。

随着国防领域先进武器装备对零件的轻质化、整体化、优质化、低成本和短制造周期等要求不断提高, 机匣、轴承座、扩压器、垂尾支架等零件不断向结构复杂化方向发展。以精密铸造成形的某航空发动机钛合金机匣为例, 如图1所示, 其最小壁厚为2.5 mm, 不仅是发动机的气流通道、基座和承力部件, 也是安装的定位基准, 配有加强筋、凸台、径向孔、异形孔、异形槽等复杂结构, 具有大尺寸、大壁厚差、复杂曲面及内腔等特点, 关键质量控制点近千个。但是零件结构复杂化不但导致精铸件成形和内部质量控制难度上升, 而且致使精铸件内部缺陷的无损检测更困难。精铸件内部缺陷难以精准高效判定和清除已经成为精铸件质量差、成本高、周期长的主要原因之一。

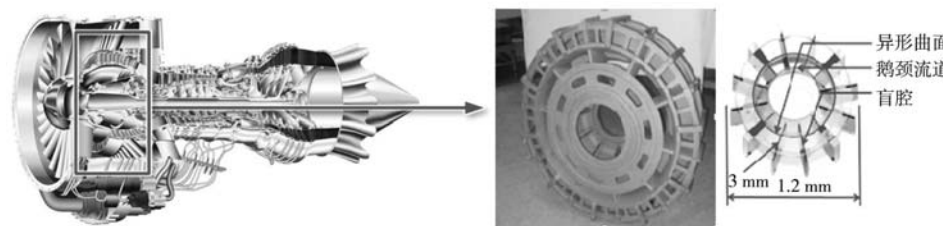


图1 航空发动机大型复杂钛合金机匣

Fig. 1 Large and complex titanium alloy case of aero-engine

现有的轻合金铸件X射线探伤技术在拍片前需要人为调整射线源、铸件和成像板三者相对位置与角度关系, 并调整电流、电压和对比度等成像参数。单个中小型铸件一般需要对几十个关键部位进行探伤, 大型复杂结构铸件一般需要几百个部位进行探伤, 若更改探伤部位后未拍到关键部位或成像质量不佳, 便需要人工反复调整再探伤, 因此依赖人工调整成像部位和参数存在着关键部位易漏检和成像质量波

动大等问题，如图2所示。以上问题大大降低了铸件质量和可靠性，导致设计部门有铸件不敢用，致使一些复杂结构设计思路无法实现，影响了先进高性能装备设计思想的实现，甚至严重影响飞行器等重大装备性能、寿命和安全性。因此，亟需发展智能分区调参拍片技术。

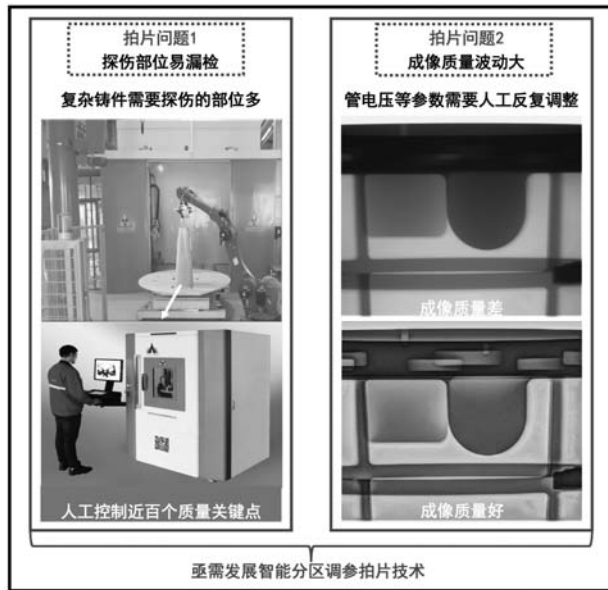


图2 发展智能分区调参拍片技术的必要性
Fig. 2 The necessity of developing intelligent partition adjustment and filming technology

铸件的缺陷对铸造产品的使用有着严重影响，故铸件在出厂时的质量检测是必不可少的步骤。伴随着X射线无损检测技术快速成熟的使用环境，该项技术被制造企业广泛的运用在了质量检测阶段^[1]，对铸件进行缺陷的数量和形态等评定，以保证铸件的质量。国内外人员针对X射线无损检测技术进行了深入的研究。2001年，智利天主教大学Domingo Mery建立椭球形空腔模拟三维缺陷^[2]，并按照X射线的衰减定律，将其投影并叠加到真实射线图像上。2011年，波塔利斯大学Miguel Carrasco等提出了一种从不同位置拍摄X射线图像来检测铝轮毂的方法，并设计了中间分类器ICB以提升探伤精度^[3]。2021年，安特卫普大学Alice Presenti等提出了Dynapose方法，该方法可以自动估计被测物体的三维姿态，同时动态获取最适合检测任务的X射线图像，从而依靠较少的X射线图像实现三维模型的探伤检测^[4]。

2020年，长春科技学院Yan Zhu等针对X射线产生过程中光子缺陷对成像的影响，提出了一种基于量子增强的成像积分滤波器^[5]，有效降低了X射线探伤系统对量子噪声的灵敏度。2021年，北京大学Minghui Liu等针对DR设备的装配缺陷会影响设备检测结果的问题，提出了一种基于X射线数字成像的DR设备装配缺陷智能检测方法^[6]，将探伤缺陷数据检测成功率提高了11.93%。华中科技大学华铸课题组在基于X射线图像的铸件内部缺陷定位领域取得了不少成果。计效园等在2021年提出的两相缺陷检测方法FSS/ED-CNN能够以接近100%的精度定位缺陷^[7]，并对低密度孔洞、孔隙率、线性缺陷、高密度夹杂物和铸件结构的分类准确率接近90%。颜秋余在2020年，武博在2022年针对航空钛合金铸件缺陷检测与分类问题开展了相关研究^[8-9]，并取得理想效果。李沁阳在2022年提出基于三维模型与射线探伤二维图像的铸件缺陷检测方法，并输出了对三维模型的平行光源射线探伤图像^[10]。

基于上述研究现状，虽然现有研究可以提高X射线探伤效率、也可初步预测铸件中缺陷的位置，但在面对大量部位需要检测的情况时，依然无法解决探伤部位易漏检的问题；虽然现有研究可以提高X射线探伤精度和成像准度，但是探伤成像需要人为调整电流、电压、对比度等成像参数，成像质量受限于操控人当时的状态，依然无法解决成像质量波动大的问题。因此，本文将针对上述不足进行铸件X射线检测探伤图像生成方法的研究，在生成铸件点光源式虚拟探伤图像的同时实现虚拟探伤参数与实际参数相对应，为智能分区调参拍片技术提供理论支撑。

本文研究路线如图3所示。首先建立了铸件坐标降维映射模型，结合空间距离和空间投影等公式推导了世界坐标系、射线源坐标系和图像坐标系之间的转换公式，实现了铸件三维坐标降维映射到成像板平面二维坐标；其次建立了仿真成像参数拟合模型，获取了虚拟射线与三维模型所有三角面片的交点，提取了虚拟射线与三维模型所有三角面片的交点，提取了虚

拟射线与三维模型所有三角面片的交点，提取了虚

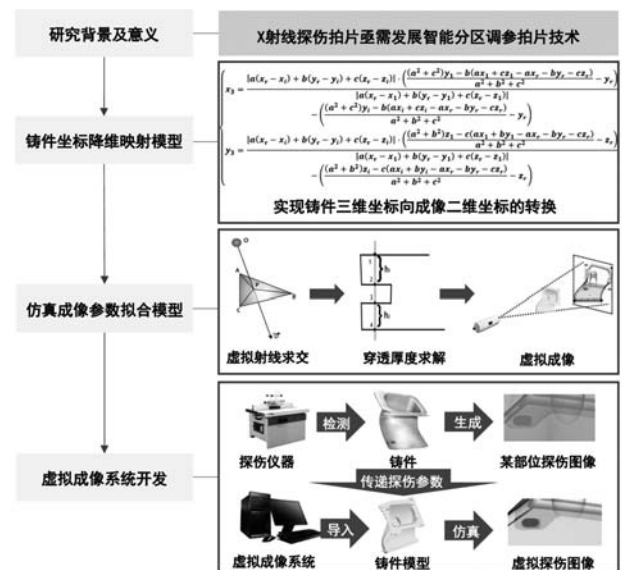


图3 研究路线
Fig. 3 The research route

拟射线穿透三维模型的厚度信息,生成了点光源式虚拟射线对铸件标准三维模型的仿真探伤图像;最后集成两个模型开发了铸件X射线检测虚拟成像系统,实现了输入stl格式的三维模型文件和相应探伤参数,输出点光源式虚拟射线探伤图像。

1 研究方法

1.1 铸件坐标降维映射模型建立

本小节提出的铸件坐标降维映射模型包括世界坐标系、射线源坐标系和图像坐标系的建立以及这三个坐标系之间的转换关系,实现了输入铸件模型上某点在世界坐标系下三维坐标、射线源模型中心坐标、成像板模型中心坐标和成像板平面法向量后,输出铸件模型上某点在射线源坐标系下的三维坐标和铸件模型

上某点的投影点在图像坐标系下的二维坐标,为下一小节仿真成像参数拟合模型的建立打下基础。

为了建立铸件坐标降维映射模型,需要先建立一个二维直角坐标系和两个空间直角坐标系,如图4所示。建立的二维直角坐标系称为图像坐标系,其原点为成像板模型的中心, X 轴沿成像板模型的水平方向,规定向右为正; Y 轴沿成像板模型的竖直方向,规定向上为正。建立的第一个空间直角坐标系称为世界坐标系,其原点为承载着铸件模型的转盘模型中心, Y 轴与图像坐标系 X 轴平行, Z 轴与图像坐标系 Y 轴平行,可根据坐标系右手定则确定 X 轴;建立的第二个空间直角坐标系称为射线源坐标系,其原点为射线源模型中心, X 、 Y 轴分别与图像坐标系的 X 、 Y 轴平行,可根据坐标系右手定则确定 Z 轴。

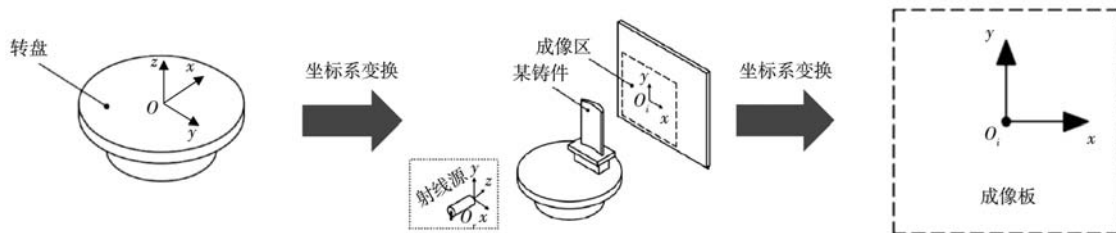


图4 坐标系建立与转换

Fig. 4 Coordinate system establishment and transformation

为了描述射线源模型、铸件模型和成像板模型三者相对位置与角度关系,需要先给定在世界坐标系下的初始条件,即成像板模型的朝向,成像板模型中心坐标,射线源模型中心坐标和铸件模型上某点坐标。为了描述成像板模型的朝向,可将成像板模型简化为三维空间中的某一平面,再用垂直于该平面的法向量来描述该平面的朝向。规定成像板平面法向量 $\vec{l} = (a, b, c)$,成像板模型中心坐标 $O_i(x_i, y_i, z_i)$,射线源模型中心坐标 $O_r(x_r, y_r, z_r)$,铸件模型上某点A的坐标 (x_1, y_1, z_1) 。

为了实现世界坐标系向射线源坐标系的转换,首先需要规定世界坐标系下的射线源平面,该平面经过射线源模型中心 O_r 并垂直于成像板平面法向量 \vec{l} 。

其次,需要计算铸件模型上某点A到射线源平面的距离,如图5a所示,得到:

$$O = |\vec{n}| = \frac{|a(x_r - x_1) + b(y_r - y_1) + c(z_r - z_1)|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (1)$$

再次,需要计算铸件模型上某点A垂直投影到射线源平面后的点A'坐标,如图5b所示。设点A'坐标为 (x'_1, y'_1, z'_1) ,得到:

$$\begin{cases} x'_1 = \frac{(b^2 + c^2)x_1 - a(b y_1 + c z_1 - a x_r - b y_r - c z_r)}{a^2 + b^2 + c^2} \\ y'_1 = \frac{(a^2 + c^2)y_1 - b(a x_1 + c z_1 - a x_r - b y_r - c z_r)}{a^2 + b^2 + c^2} \\ z'_1 = \frac{(a^2 + b^2)z_1 - c(a x_1 + b y_1 - a x_r - b y_r - c z_r)}{a^2 + b^2 + c^2} \end{cases} \quad (2)$$

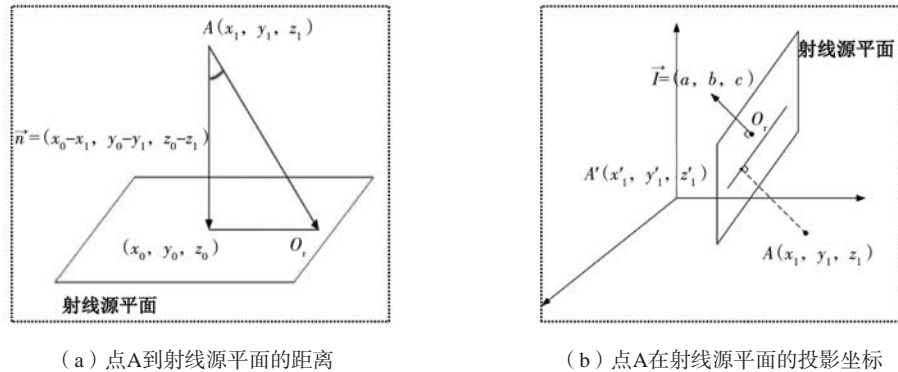
最后,得到铸件模型上某点A在射线源坐标系下的坐标 (x_2, y_2, z_2) :

$$\begin{cases} x_2 = y'_1 - y_r = \frac{(a^2 + c^2)y_1 - b(a x_1 + c z_1 - a x_r - b y_r - c z_r)}{a^2 + b^2 + c^2} - y_r \\ y_2 = z'_1 - z_r = \frac{(a^2 + b^2)z_1 - c(a x_1 + b y_1 - a x_r - b y_r - c z_r)}{a^2 + b^2 + c^2} - z_r \\ z_2 = d = \frac{|a(x_r - x_1) + b(y_r - y_1) + c(z_r - z_1)|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \end{cases} \quad (3)$$

为了实现射线源坐标系向图像坐标系的转换,首先需要计算成像板模型中心 O_i 到射线源平面的距离:

$$f = |\vec{m}| = \frac{|a(x_r - x_i) + b(y_r - y_i) + c(z_r - z_i)|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4)$$

其次,需要计算成像板模型中心 O_i 垂直投影到



(a) 点A到射线源平面的距离

(b) 点A在射线源平面的投影坐标

图5 坐标系变换时的数学运算

Fig. 5 Mathematical operations during coordinate system transformation

射线源平面后的点 O'_i 坐标。设点 O'_i 坐标为 (x'_i, y'_i, z'_i) ，得到：

$$\begin{cases} x'_i = \frac{(b^2+c^2)x_i - a(by_i+cz_i - ax_r - by_r - cz_r)}{a^2+b^2+c^2} \\ y'_i = \frac{(a^2+c^2)y_i - b(ax_i+cz_i - ax_r - by_r - cz_r)}{a^2+b^2+c^2} \\ z'_i = \frac{(a^2+b^2)z_i - c(ax_i+by_i - ax_r - by_r - cz_r)}{a^2+b^2+c^2} \end{cases} \quad (5)$$

再次，需要计算出铸件模型上某点 A 经射线源中心投影在成像板模型上且位于射线源坐标系下的投影点坐标 (x'_2, y'_2, z'_2) ，射线源中心投影如图6所示。由于射线源坐标系的 Z 轴垂直于射线源平面，并且坐标系原点为射线源模型中心，则该投影点在射线源坐标系

下 Z 值为：

$$x'_2 = f = \frac{|a(x_r - x_i) + b(y_r - y_i) + c(z_r - z_i)|}{|\sqrt{a^2+b^2+c^2}|} \quad (6)$$

由针孔成像的相似三角形定理可得：

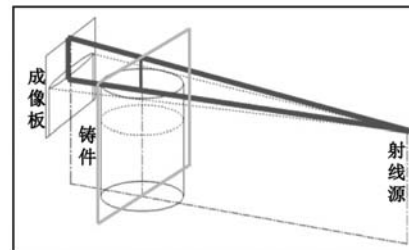
$$\begin{cases} x'_2 = \frac{f \cdot v_2}{z_2} \\ y'_2 = \frac{f \cdot y_2}{z_2} \end{cases} \quad (7)$$

最后，得到铸件模型上某点 A 经射线源中心投影在成像板模型上且位于图像坐标系下的投影点坐标 (x_3, y_3) ：

$$\begin{cases} x_3 = x'_2 - (y'_i - y_r) \\ y_3 = y'_2 - (z'_i - z_r) \end{cases} \quad (8)$$



(a) 实际探伤示意图



(b) 探伤模型示意图

图6 射线源中心投影成像

Fig. 6 Ray source center projection imaging

1.2 仿真成像参数拟合模型建立

实际X射线探伤利用材料厚度不同对X射线吸收的差异性，通过X射线透视摄片法和成像板实时成像，从成像板上显出材料的内部缺陷。而在虚拟成像系统中，可利用stl格式铸件模型的三角面片提取探伤厚度信息，即每条从射线源模型中心发射的虚拟X射线会与stl格式铸件模型的三角面片相交，只要计算出这些相交点之间在铸件模型内部的距离就能够表示该条虚拟X射线穿透铸件模型的厚度。本小节的流程如图7所示。

三角形内的任意一点可以用向量的方式来表示。若点 P 为三角形 ABC 内的任意一点，则可以写成如下形式^[10]：

$$P = (1-m-n)A + mB + nC \quad (9)$$

式(9)的含义是三角形 ABC 内任意一点 P 可以表示成点 A 、 B 、 C 分别乘某个系数然后相加，系数的约束条件为 $m \geq 0, n \leq 0, m+n \leq 0$ 。得到式(9)后，也可以写成如下形式：

$$O-A = (B-A)m + (C-A)n - tD \quad (10)$$

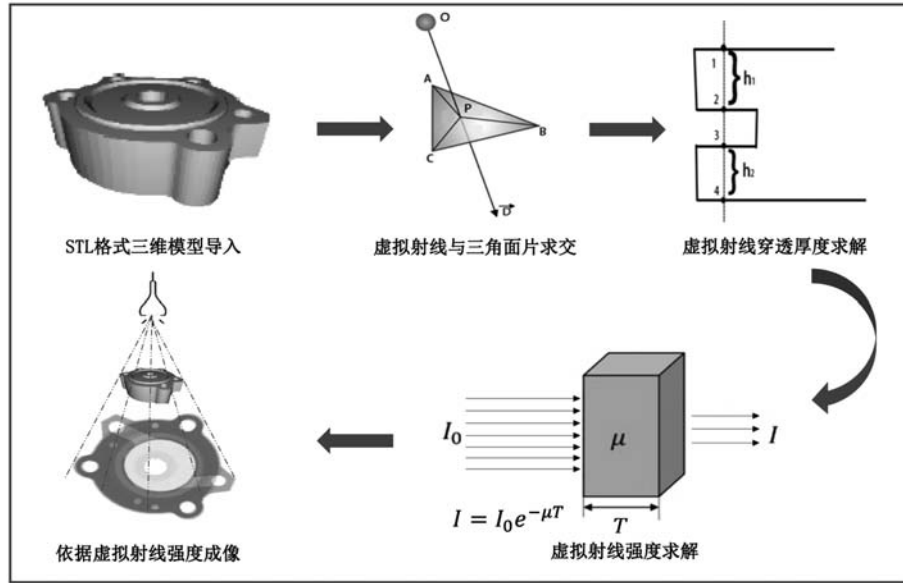


图7 利用三角面片提取探伤厚度信息并成像

Fig. 7 Using triangular facets to extract flaw detection thickness information and image

式(10)中 O 为虚拟射线起点, D 为虚拟射线方向, t 为时间, 规定:

$$\begin{cases} E_1 = B - A \\ E_2 = C - A \\ E_3 = O - A \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)可得:

$$[-D \ E_1 \ E_2] \begin{bmatrix} t \\ m \\ n \end{bmatrix} = E_3 \quad (12)$$

式(12)这类形如 $Px=Q$ 的式子, 可用克莱姆法则求解^[11]。也就是说, 在 A 、 B 、 C 、 O 、 D 都已知的条件下, 可以根据克莱姆法则和向量混合积求得 t 、 m 、 n :

$$\begin{cases} t = \frac{(E_3 \times E_1) \cdot E_2}{E_1 \cdot (D \times E_2)} \\ m = \frac{(D \times E_2) \cdot E_3}{E_1 \cdot (D \times E_2)} \\ n = \frac{(E_3 \times E_1) \cdot D}{E_1 \cdot (D \times E_2)} \end{cases} \quad (13)$$

如果求得的 t 、 m 、 n 同时满足: $t > 0$, $0 \leq m \leq 1$, $0 \leq n \leq 1$, $m+n \leq 1$, 则虚拟射线与三角面片有交点, 并且 (t, m, n) 就是虚拟射线与三角面片的交点。得到某条虚拟射线与铸件模型三角面片的所有交点后, 便可计算出该条虚拟射线穿过铸件模型的距离。经过实际测试后发现, 绝大多数的虚拟射线与铸件模型三角面片的交点数量为偶数, 只有在铸件模型的边界点上会出现交点数量为奇数的情况。为了便于处理, 本小节在计算虚拟射线穿过铸件模型的距离时默认交点数量为偶数, 而忽略少量的交点数量为奇数的情况。由

于虚拟射线在穿过铸件模型时必定是先进后出, 因此可根据该规律计算虚拟射线穿过铸件模型的距离: 按顺序记录下虚拟射线与铸件模型三角面片的交点, 并按顺序将这些交点分为两个一组, 随后计算每组交点之间的距离, 将距离值求和后得到的就是虚拟射线穿过铸件模型的距离。

提取完所有探伤厚度信息以后, 便可以着手生成铸件模型对应的虚拟探伤图像。在实际探伤中, 射线穿过物质的衰减规律符合Beer定律^[12]:

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (14)$$

式(14)中 μ 为射线穿过单位厚度物质后的衰减系数, T 为探伤厚度, I 为透射后的射线强度, I_0 为透射前的射线强度。射线图像是以灰度值的形式显示的, 即和光电变换系数、模数转换器转换系数、灰度值位数等有关^[13], 可用 $f(R_0, E_0, D_0)$ 表示关于光电变换系数、模数转换器转换系数、灰度值位数的函数。在固定检测系统后, $f(R_0, E_0, D_0)$ 应为一个常数, 简化为调整系数 K 。 I_0 和管电流 A 、管电压 U 、探伤距离 F 等参数有关^[14], 在X射线机发射器固定情况下, 可得图像灰度值的表达式为:

$$G = \frac{KAU^2 e^{-\mu T}}{F^2} \quad (15)$$

图8为生成的虚拟X射线探伤图像。可以看到, 生成的虚拟X射线探伤图像效果清晰, 对铸件内部的结构映射正确, 但是在图像的边界处生成了一些噪点。经排查发现, 生成噪点的原因是本节在计算虚拟射线穿过铸件模型的距离时默认交点数量为偶数, 忽略了少量的交点数量为奇数的情况, 使得这些噪声点灰度数



图8 虚拟X射线探伤图像

Fig. 8 Virtual X-ray inspection images

值异常。后续可通过中值滤波等图像处理手段将这些噪声点去除。

2 系统开发及实例验证

图9为开发的铸件X射线检测虚拟成像系统主界面。导入stl模型文件并输入管电流、管电压和探伤距离，点击模拟探伤后，就会自动生成衰减系数和调整系数，并按照设备参数和探伤参数生成虚拟探伤图像。在本系统中，设置衰减系数的大小与铸件的实际材质和管电压大小有关。以铝为例，材料的衰减系数与射线能量的表达式^[15]为：

$$\mu = -\frac{3.225 \times 10^5}{\varepsilon^4} + \frac{1.243 \times 10^5}{\varepsilon^3} + \frac{2.374 \times 10^3}{\varepsilon^2} + \frac{39.28}{\varepsilon} + 0.1885 - 5.956 \times 10^{-5} \varepsilon \quad (16)$$

式(16)中 μ 为材料的衰减系数， ε 为射线能量。由于图像灰度值与管电流成正比，与管电压的平方成正比，与探伤距离的平方成反比，因此调整系数的作用就是控制这些变量对图像灰度值的影响，使得图像灰

度值不会因为变量的改变而发生大幅度的变化。若对模拟结果不满意，也可在设备参数设置区域重新调整。图10表示初始设定的虚拟射线能量为100 keV，后续可继续增加虚拟射线能量至200 keV或250 keV以达到理想的模拟效果。

虚拟探伤图像与实际探伤图像的对比可见图11。虚拟成像系统依据实际的管电流、管电压、探伤距离、成像距离、材料衰减系数等信息实现了较高程度的仿真效果。

3 结论

本文提出了铸件X射线检测虚拟探伤图像生成方法，可用于获得点光源式虚拟射线对铸件标准三维模型的仿真探伤图像，为智能分区调参拍片技术提供理论支撑。

(1) 建立了铸件坐标降维映射模型。结合空间距离和空间投影等公式推导了世界坐标系、射线源坐标系和图像坐标系之间的转换公式，实现了铸件三维坐



图9 虚拟成像系统主界面（探伤距离：射线源-铸件；成像距离：铸件-成像板）

Fig. 9 Main interface of virtual imaging system (flaw detection distance: radiation source-casting; imaging distance: casting-imaging plate)

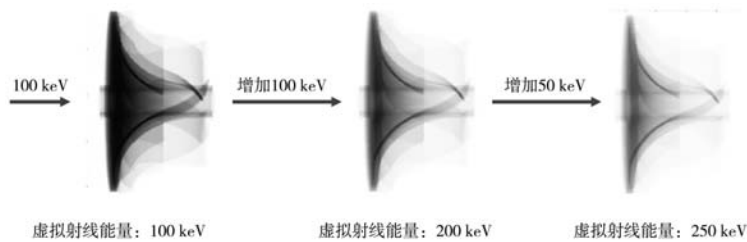


图10 调整设备参数后的模拟探伤结果

Fig. 10 Simulation results of flaw detection after adjusting equipment parameters

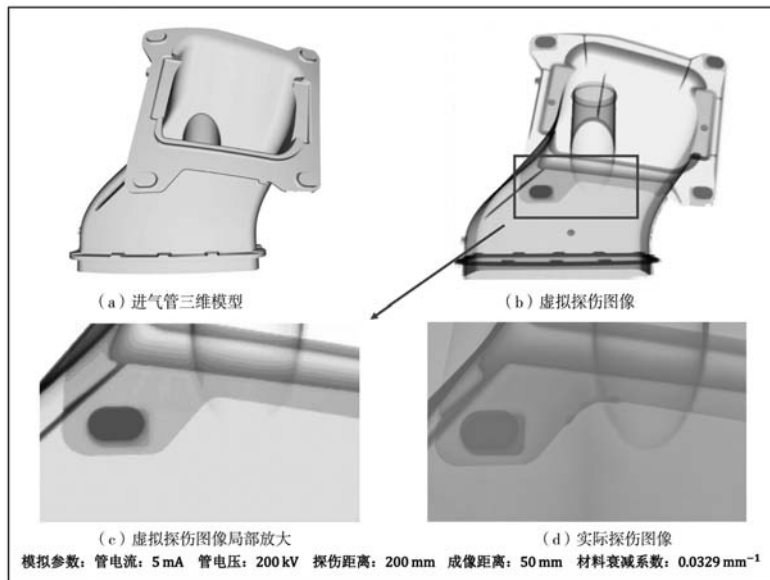


图11 虚拟探伤图像与实际探伤图像对比

Fig. 11 Comparison of virtual flaw detection image and actual flaw detection image

标降维映射到成像板平面二维坐标。

(2) 建立了仿真成像参数拟合模型。获取了虚拟射线与三维模型所有三角面片的交点，提取了虚拟射线穿透三维模型的厚度信息，生成了点光源式虚拟射

线对铸件标准三维模型的仿真探伤图像。

(3) 开发了铸件X射线检测虚拟成像系统。实现了输入stl格式的三维模型文件和相应探伤参数，输出点光源式虚拟射线探伤图像。

参考文献:

- [1] 侯若明. X射线实时成像影像的识别和评定 [J]. 无损检测, 2012, 34 (1) : 57-60.
- [2] DOMINGO Mery. A new algorithm for flaw simulation in castings by superimposing projections of 3D models onto X-ray images [C]//IEEE Computer Society: 21st International Conference of the Chilean-Computer-Science-Society, 2001.
- [3] MIGUEL Carrasco, DOMINGO Mery. Automatic multiple view inspection using geometrical tracking and feature analysis in aluminum wheels [J]. Machine Vision and Applications, 2011, 22: 157-170.
- [4] ALICE Presenti, JAN Sijbers, JAN De Beenhouwer. Dynamic few-view X-ray imaging for inspection of CAD-based objects [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 180: 115012.
- [5] ZHU Yan, XU Ningxin, MU Yining, et al. A quantum integral spectral enhancement method for X-ray imaging [J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16 (5) : 390-395.
- [6] LIU Minghui, ZHANG Fang, LIU Xiaoyu, et al. Intelligent detection method of DR detection equipment assembly defects based on X-ray digital imaging [C]// SPIE-Int Society Optical Engineering: International Conference on Optoelectronic Materials and Devices (ICOMD), 2021.
- [7] JI Xiaoyuan, YAN Qiuyu, HUANG Dong, et al. Filtered selective search and evenly distributed convolutional neural networks for casting defects recognition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292: 117064.
- [8] 颜秋余. 基于X射线图像的航空钛合金铸件缺陷检测与分类研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [9] 武博. 航空钛合金铸件内部缺陷自动识别关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [10] 李沁阳. 基于三维模型与射线探伤二维图像的铸件缺陷检测技术 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [11] 李沁阳, 孙晓龙, 计效园, 等. 基于三维模型和射线探伤二维图像的铸件缺陷检测技术 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10) : DOI10.15980.
- [12] PENG Guanghan, YANG Xueheng, HAN Zhong. Hardening correction model of energy spectrum for continuous spectrum X-ray ICT [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25 (11) : 1880-1883.
- [13] CASALTA S, DAQUINO G G, METTEN L. Digital image analysis of X-ray and neutron radiography for the inspection and the monitoring of nuclear materials [J]. NDT&E International, 2003, 36 (5) : 349-355.
- [14] 郭文明, 陈宇亮. X射线图像灰度值与透照厚度的定量关系 [J]. 无损检测, 2016, 38 (2) : 14-17.
- [15] 冯长春, 周炜. X射线衰减系数与射线管电压的关系初探 [J]. 无损检测, 1997, 19 (1) : 11-13.

Method of Generating Virtual Flaw Detection Image for X-Ray Inspection of Castings

DONG Hao¹, HOU Ming-jun¹, JI Xiao-yuan¹, LI Qin-yang¹, WU Chu-hao¹, LI Shuo-hong^{1,2}, CHEN Qiang³, LI Ning¹, ZHOU Jian-xin¹, GAO Liang⁴

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. No.59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 710100, China; 4. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

With the continuous improvement of the requirements for parts of national defense core equipment, castings are developing in the direction of complex structures, such as large wall thickness differences and multi-cross structures, which make it more difficult to detect internal defects in castings. In the process of X-ray flaw detection, filming relies on manual adjustment of imaging parts and parameters. There are problems such as easy missed detection of flaw detection parts and large fluctuations in imaging quality. It is urgent to develop intelligent partition parameter adjustment filming technology. For this reason, this paper proposes a method for generating virtual flaw detection images for X-ray inspection of castings. Firstly, the casting coordinate dimension reduction mapping model is established, and the dimension reduction mapping of the casting three-dimensional coordinates to the two-dimensional coordinates of the imaging plate is realized. Secondly, the simulation imaging parameter fitting model is established, and the simulation flaw detection image of the standard three-dimensional model of the casting is generated by the point source virtual ray. Finally, a virtual imaging system for X-ray inspection of castings is developed by integrating the two models. This method can provide optimized imaging attitude and imaging parameter information for actual flaw detection, and provide theoretical support for intelligent partition parameter adjustment and filming technology.

Key words:

X-ray inspection; 3D model of casting; point imaging; virtual flaw detection image