

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.03.007

引用格式:张滔, 马龙, 袁伟, 等. 航空发动机小直径管焊缝微焦点 X 射线 DR 检测工艺参数优化方法[J]. 重庆大学学报, 2026,49(3): 71-83.



# 航空发动机小直径管焊缝微焦点 X 射线 DR 检测工艺参数优化方法

张滔<sup>1a,1b</sup>, 马龙<sup>2</sup>, 袁伟<sup>1a,1b</sup>, 周昕<sup>1a,1b</sup>, 刘丰林<sup>1a,1b</sup>

(1. 重庆大学 a. 光电技术及系统教育部重点实验室; b. 工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044;  
2. 中国航发动力股份有限公司, 西安 710000)

**摘要:**微焦点 X 射线数字成像(digital radiography, DR)检测具有检测分辨率高的特点,适用于航空发动机小直径管焊缝无损检测。针对航空发动机小直径管焊缝微焦点 DR 检测工艺参数优化,研究一种工艺参数与 DR 图像质量的数值模型,用于指导检测工艺参数选择。首先,使用与航空发动机小直径管同等材料的阶梯试块为对象模拟工件不同射线穿透厚度,建立管电压、管电流、放大倍数、透照厚度等工艺参数与空间分辨率和对比度噪声比等 DR 图像质量指标的二次回归模型。再选取 3 个不同壁厚的航空发动机小直径管作为典型工件,利用非支配遗传算法进行寻优,得到最佳工艺参数序列。实验结果表明,DR 图像质量指标的实测值与模型的预测值接近,证明建立的二次回归模型能较好地预测工艺参数与 DR 图像质量指标的关系。与逐个调整工艺参数方法相比,文中提出的工艺参数优化方法效率高、指导性强,可应用于同类 DR 检测。

**关键词:**射线数字成像;对比度噪声比;空间分辨率;响应面回归方法;航空发动机小直径管;工艺参数

中图分类号:TH89

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)03-071-13

## Process parameter optimization for microfocus X-Ray digital radio-graphy inspection of small-diameter aero-engine tube welds

ZHANG Tao<sup>1a,1b</sup>, MA Long<sup>2</sup>, YUAN Wei<sup>1a,1b</sup>, ZHOU Xin<sup>1a,1b</sup>, LIU Fenglin<sup>1a,1b</sup>

(1a. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education; 1b. Engineering Research Center of Industrial Computed Tomography Nondestructive Testing, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. AECC Aviation Power Co. Ltd., Xi'an 710000, P. R. China)

**Abstract:** Microfocus X-ray digital radiography (DR) offers high image resolution and is therefore well suited for the nondestructive inspection of small-diameter aero-engine tube welds. To optimize the inspection process parameters for microfocus DR applied to small-diameter aero-engine tube welds, a numerical model describing

收稿日期:2025-06-15

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0706400);中航发产学研合作项目(HFZL2020CXY015-2)。

Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFF0706400), and Aero Engine Corporation of China Industry-University-Research Cooperation Project (HFZL2020CXY015-2).

作者简介:张滔(1998—),男,硕士研究生,主要从事 X 射线成像研究,(E-mail)taozhang@cqu.edu.cn。

通信作者:刘丰林,男,教授,博士生导师,(E-mail)liufl@cqu.edu.cn。

the relationship between process parameters and DR image quality was developed to guide parameter selection. First, a step wedge made of the same material as the aero-engine small-diameter tubes was used to simulate different X-ray penetration thicknesses of the workpiece. A quadratic regression model was then established to characterize the relationships between key process parameters (tube voltage, tube current, magnification, and penetration thickness, etc.) and DR image quality indexes (spatial resolution and contrast-to-noise ratio). Then, three small-diameter aero-engine tubes with different wall thicknesses were selected as representative workpieces, and the optimal sequence of process parameters was determined using a non-dominated genetic algorithm. Experimental results show that the measured DR image quality indices closely match the predicted values of the model, demonstrating that the proposed quadratic regression model can effectively predict the relationship between process parameters and DR image quality. Compared with conventional methods that adjust process parameters individually, the proposed method exhibits higher efficiency and stronger guidance and can be extended to similar DR inspection applications.

**Keywords:** digital radiography; contrast-to-noise ratio; spatial resolution; response surface regression methods; small-diameter aero-engine tubes; process parameters

国家“十四五”规划提出,规模以上制造业企业大部分实现数字化网络化,重点行业骨干企业初步应用智能化<sup>[1]</sup>。航空制造业作为我国重点发展的产业,数字化发展迫在眉睫。在航空发动机的制造中,小直径管焊缝的检测是其中一个重要的检测流程,检测质量直接决定了航空发动机的可靠性。在以往的检测中,小直径管焊缝检测主要采用小焦点X射线源胶片成像,存在检测速度慢、胶片保存困难等问题,且不适用计算机管理<sup>[2]</sup>。随着X射线平板探测器的发展,X射线数字成像(digital radiography, DR)技术快速发展,并在实际检测中逐步替代胶片成像。DR成像的评价指标主要包括图像空间分辨率(spatial resolution, SR)、对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)和信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),影响这些指标的工艺参数有X射线源焦点尺寸、管电压、管电流、放大倍数和透照厚度等,这些工艺参数与评价指标存在着相互影响的关系。

与传统X射线球管DR检测相比,微焦点X射线源DR检测具有如下特点:1)普通X射线球管焦点尺寸为毫米量级,微焦点X射线源焦点尺寸范围为亚微米到几十微米,而DR检测系统平板探测器像素尺寸多为百微米量级。为提高DR检测分辨率,微焦点DR成像时,检测对象靠近射线源放置,DR成像的几何放大倍数较大;2)微焦点X射线源输出功率较小,射线能量和剂量率较低,适于穿透厚度较小的检测对象;3)普通X射线球管焦点尺寸是固定值,而微焦点X射线源焦点尺寸与射线源靶功率相关,随射线源功率变化。图1显示微焦点X射线源和普通X射线源的DR检测对比。微焦点X射线源的型号为Y.FXE300,普通X射线源的型号为Y.TU450。检测时,普通射线源和微焦点射线源的管电压都设置为280 kV,管电流都设置为1.5 mA,曝光时间设置为500 ms,焦距都在1 500 mm处,2次实验工件位置都在500 mm处。使用2 mm Cu作为滤薄片。其中,图1(a)为微焦点X射线源的检测结果,其空间频率测得4.37 LP/mm,像质值为D14;图1(b)为普通X射线源的检测结果,其空间频率为2.19 LP/mm,像质值为D11。可以看出,微焦点X射线源DR图像的空间分辨率和灵敏度相较于普通X射线源有明显提升。

航空发动机小直径管具有几何尺寸小,射线穿透厚度小的特点,焊缝检测分辨率要求高,特别适合用微焦点X射线源进行DR检测。因此,开展航空发动机小直径管微焦点X射线源DR检测工艺参数研究非常重要。

针对特定工件的普通X射线球管DR检测成像工艺参数的研究较成熟,通过改变其中1个工艺参数,固定其他的工艺参数的方法研究最佳的成像工艺参数<sup>[3-7]</sup>。学者还建立了管电压、透照厚度等工艺参数与灰度值之间的定量关系<sup>[8-11]</sup>,研究了X射线DR成像的工艺参数对CNR和SNR的影响。俞梦倩等<sup>[12]</sup>采用二次回归正交旋转组合设计,以航空发动机涡轮叶片的同等材料试块为检测对象,研究了最佳的工艺参数组合,使图像信噪比达到最高。与针对单个成像工艺参数的研究不同的是,利用二次回归正交旋转实验的方法,建立了管电压、管电流等成像工艺参数与检测图像SNR之间的回归模型,并通过实验验证了模型的精度。

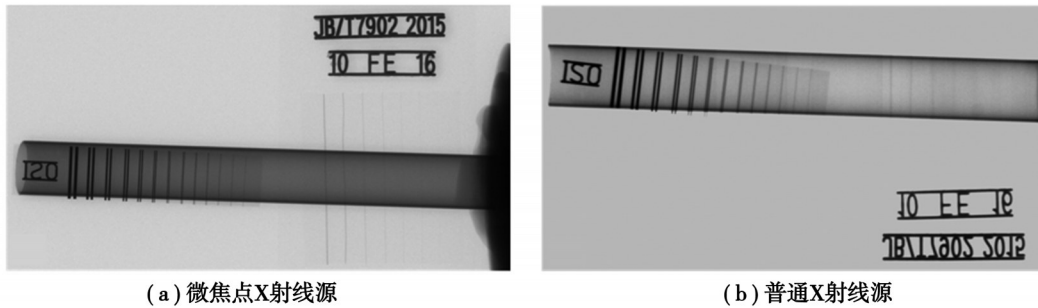


图 1 微焦点 X 射线源与普通 X 射线源 DR 检测对比

Fig. 1 Comparison of DR detection between microfocus X-ray source and ordinary X-ray source

航空发动机小直径管件号数量多、材料多样、焊接工艺多样、检测质量要求高,通过固定其他工艺参数研究优化一个成像工艺参数的方法不适用。由于微焦点 X 射线源焦点尺寸与射线源靶功率相关,需要深入研究其成像工艺参数优化问题。因此,对于航空发动机小直径管微焦点 X 射线源 DR 检测,根据射线穿透厚度分类检测对象,研究成像工艺参数对成像质量指标 CNR 和 SR 的影响,通过实验建立特定 DR 检测系统的检测工艺参数数学模型,对实际检测具有指导作用。

文中针对航空发动机小直径管焊缝微焦点 X 射线 DR 检测特点,以实际的微焦点 X 射线源检测系统为对象,研究工艺参数优化问题,以 CNR 和 SR 作为评价指标,基于多元非线性响应回归,建立工艺参数与质量指标之间的交互作用关系模型,最后利用非支配排序遗传算法求得最佳工艺参数序列,可用于指导实际检测。

## 1 优化目标及参数确定

### 1.1 确定优化目标

数字射线检测图像的质量主要有 3 个指标表征:对比度、SR 和 SNR。其中,对比度与 SNR 构成的 CNR 指标表征了检测图像的细节识别能力,SR 指标表征了检测图像分辨细节的最小间距。CNR 与 SR 是 DR 检测图像的基本评价指标。因此,以提高检测图像的 CNR 和 SR 为优化目标进行多目标优化。

#### 1.1.1 检测图像的对比度噪声比

由于噪声对检测图像的细节识别能力存在影响,引入 CNR 来表征检测图像存在噪声的情况下的细节识别能力。CNR 定义为检测图像 2 个区的平均信号差  $\Delta S$  与信号的统计标准差  $\sigma$  之比<sup>[13]</sup>,即

$$CNR = \frac{\Delta S}{\sigma}, \tag{1}$$

根据《承压设备无损检测 第 11 部分:X 射线数字成像检测》(NB/T 47013.11—2015)中对 X 射线数字检测的规定<sup>[14]</sup>,图像 CNR 可使用线型像质计进行测量。线型像质计示意如图 2 所示。

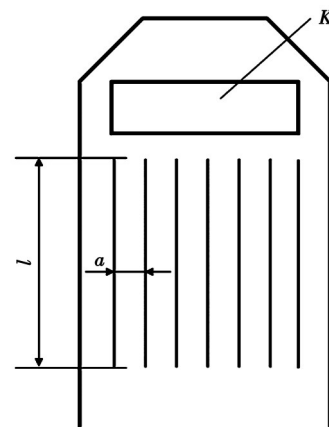
每个线型像质计中封装了 7 根直径不同的金属丝,其材料与被测工件的材料相同或相近。可通过测量不同成像参数下,同一根丝的 CNR 作为评价指标。

#### 1.1.2 检测图像的空间分辨率

检测图像 SR 表征的是图像分辨细节的能力。图像的 SR 越高,可分辨的细节的间距越小。检测图像的 SR 通常用图像不清晰度  $U_{im}$  或者空间频率  $R_{im}$  来表示。不清晰度的单位是 mm,空间频率的单位是 Lp/mm。空间频率与不清晰度互为倒数关系,即

$$R_{im} = \frac{1}{U_{im}}. \tag{2}$$

将双丝像质计放置在工件上靠近探测器一侧进行透照,通过



l: 线的长度 a: (中心线)线距 K: 标识的位置

图 2 线型像质计

Fig. 2 Linear image quality indicator

标准 ASTM E2736—17 中提供的方法可测得检测图像的清晰程度<sup>[15]</sup>。

## 1.2 选取工艺参数

微焦点 X 射线 DR 检测的工艺参数主要包括管电压、管电流、曝光量、放大倍数、透照厚度、探测器像素尺寸、帧平均数和曝光量等。文中选取管电压、管电流、放大倍数和透照厚度 4 个对成像质量影响最大的工艺参数进行研究<sup>[16-17]</sup>,同时其他参数保持一致。

管电压影响了射线对工件的穿透能力以及检测图像的 CNR<sup>[16]</sup>。曝光量指的是管电流与曝光时间的乘积,其直接影响到了检测图像的 SNR<sup>[17]</sup>。放大倍数是影响检测图像清晰度的重要参数,选择合理的放大倍数有利于提高检测图像的空间频率。此外,X 射线源焦点尺寸的大小也与检测图像的空间频率有关,焦点尺寸越小,空间频率越大。而对于微焦点 X 射线源,焦点尺寸的大小又和 X 射线源功率相关,管电压和管电流的大小也会影响到检测图像的空间频率。

对于航空发动机小直径焊缝的 DR 检测来说,不同小直径管的壁厚不一致,不同小直径管的透照厚度也不一致,透照厚度决定了实际透照的管电压和像质计等级的选取,还影响了透照厚度比以及有效的透照区。因此,需要将透照厚度作为检测工艺参数,以针对不同壁厚的小直径管选择最佳的工艺参数。

## 2 多目标优化

### 2.1 微焦点 X 射线 DR 检测系统及试验工件设计

微焦点 X 射线 DR 系统由 3 部分组成:微焦点 X 射线源、平板探测器和运动控制机构。文中使用的射线源型号是滨松 L1012M,使用的探测器型号是奕瑞 0505J 非晶硅型探测器。系统的透照布置如图 3 所示。微焦点射线源和平板探测器所组成的检测系统的具体技术参数如表 1 所示。

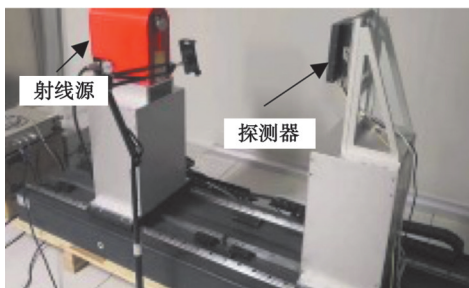


图 3 DR 透照布置实物图

Fig. 3 Physical map of DR transillumination layout

表 1 DR 系统技术指标

Table 1 Technical indicators of DR system

技术指标	参数
最大像素矩阵	1 536×1 536
像素点间距/ $\mu\text{m}$	85
AD 转换器/bit	16
闪烁体材料	CsI
探测器材料	非晶硅
极限空间分辨率/(LP· $\text{mm}^{-1}$ )	$\geq 5.5$ @Binning 1×1
	$\geq 2.2$ @Binning 2×2
射线源焦点大小/ $\mu\text{m}$	5~20
最大管电压/kV	150
最大管电流/ $\mu\text{A}$	500

L1012M微焦点射线源的焦点尺寸与靶功率相关,如图4所示。当射线源功率小于10 W时,焦点尺寸为 $5\ \mu\text{m}$ ,当射线源功率在10~30 W时,焦点尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ ,当射线源功率在30 W以上时,焦点尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 。系统使用的探测器有多种不同的增益挡位PGA+Binning组合的工作模式,文中使用的增益挡位为PGA3,其满阱电子值为 $1.2\ \text{pC}$ 。使用Binning  $2\times 2$ 模式,像素尺寸为 $170\ \mu\text{m}$ ,图像矩阵为 $768\times 768$ 。

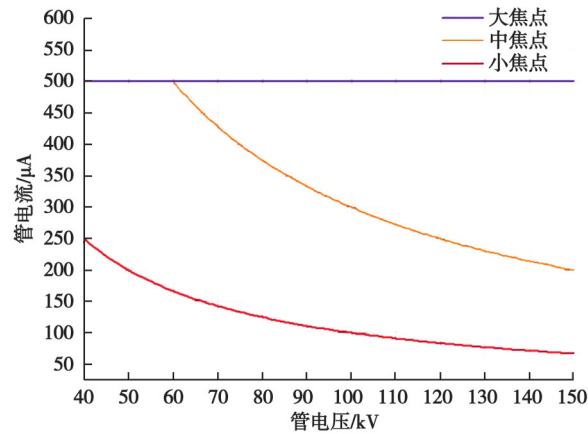
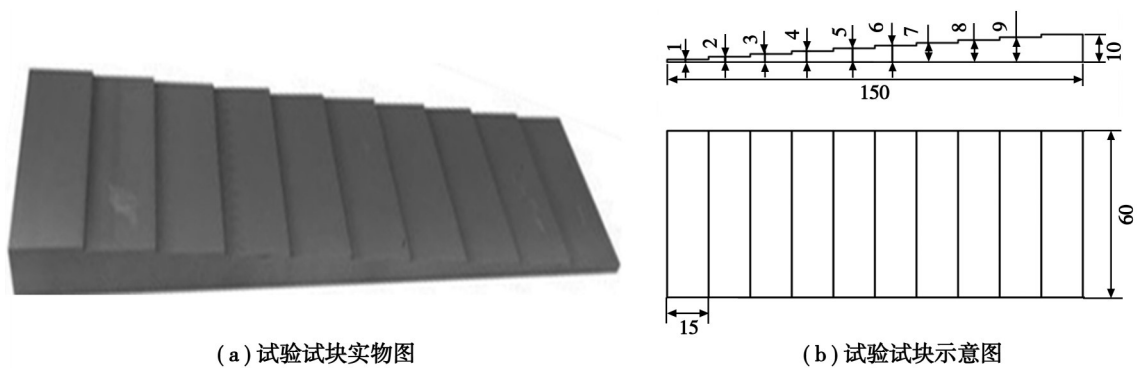


图4 射线源焦点尺寸与功率的关系

Fig. 4 Relationship between X-ray source focal spot size and power

由上可知,检测图像的 $R_{\text{im}}$ 随着焦点尺寸增大而减小,而射线源管电压和管电流的水平也会影响检测图像的CNR。因此,需要综合分析各个工艺参数对 $R_{\text{im}}$ 和CNR的影响。

文中研究工业DR检测同批次航空发动机小直径管焊缝,以便获得高质量模型的试验设计方法。考虑到实际工件检测中,小直径管的管壁厚度不一致,同时透照角度的差别也会影响射线的穿透厚度,为了确保试验的一致性,确定小直径管的最佳穿透厚度,在试验过程中,设计与检测工件相同的304不锈钢合金材料制成的阶梯试块进行透照试验,设计图及实物图如图5所示。试验试块总长150 mm、宽度60 mm。一共10个阶梯,每个阶梯的厚度从1~10 mm等厚变化。



(a) 试验试块实物图

(b) 试验试块示意图

图5 试验试块实物图及设计图

Fig. 5 Experimental test block: photograph and design drawing

在检测过程中,不同小直径管的穿透厚度可以视为阶梯试块的阶梯厚度。而检测系统的管电压、管电流和放大倍数可以设定,将这些参数视为不确定的随机变量。

## 2.2 多目标优化总体设计

小直径管焊缝检测的工艺参数多目标优化的总体设计流程如图6所示。

步骤1:分析影响航空发动机小直径管焊缝DR检测图像质量的因素,选取需要优化的工艺参数,确定关键质量指标数据。

步骤2:多元非线性响应回归建模。确定工艺参数的试验因素区间,采集试验数据,借助 Design Expert 软件进行工艺参数和质量指标之间的多目标响应面回归拟合,得出质量指标与工艺参数之间的回归方程。

步骤3:NSGA-II多目标遗传算法优化。利用NSGA-II算法对得出的数学模型进行多目标优化,得出帕累托最优解。

步骤4:模型验证与分析。验证文中建立的CNR和 $R_{im}$ 的数学模型,计算NSGA-II算法得出的帕累托最优解与实际值之间的误差。

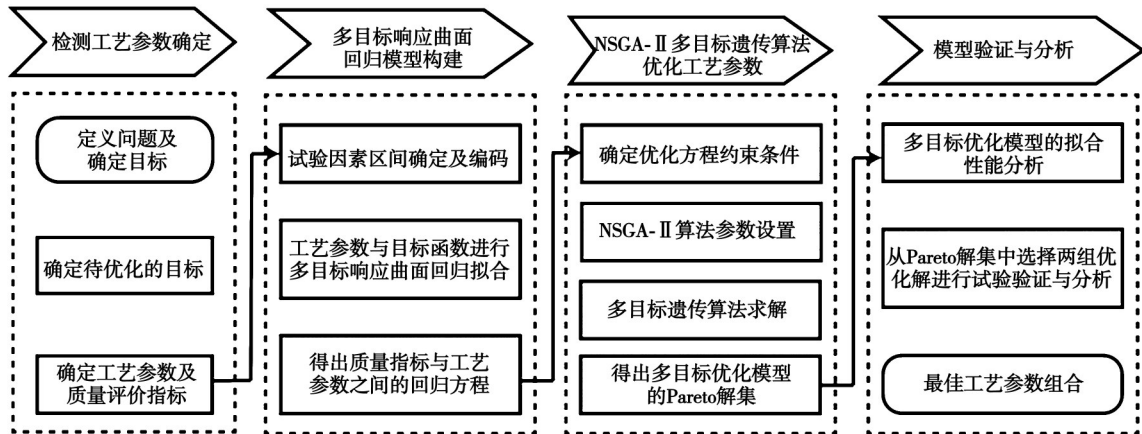


图6 小直径焊缝检测工艺参数多目标优化模型

Fig. 6 Multi-objective optimization model of process parameters for small-diameter tube welds

## 2.3 多目标优化模型的建立

### 2.3.1 试验因素及约束区间确定

响应曲面的试验因素为:管电压 $x_1$ ,管电流 $x_2$ ,放大倍数 $x_3$ 以及透照厚度 $x_4$ 。根据实际系统的检测能力和工程经验,确定需要优化的工艺参数的取值范围,进而确定CNR和 $R_{im}$ 的多目标优化模型数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} \text{CNR} = f_1(\mathbf{x}) &= \text{CNR}_{\max}(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ R_{im} = f_2(\mathbf{x}) &= R_{\max}(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ 80 &\leq x_1 \leq 150 \text{ kV} \\ 80 &\leq x_2 \leq 500 \mu\text{A} \\ 4 &\leq x_3 \leq 6 \\ 1 &\leq x_4 \leq 2 \text{ mm} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 。

### 2.3.2 响应曲面法试验设计

响应曲面法是一种用于开发、改进、优化的统计和数学方法<sup>[18]</sup>,可通过合理的试验设计方法解决如何建立目标、约束与设计变量之间的近似函数。二阶响应曲面模型公式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m (\beta_{ii} x_i^2) + \sum_{i < j} (\beta_{ij} x_i x_j) + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon, \quad (4)$$

式中: $x_i$ 和 $x_j$ 分别表示第 $i$ 个和第 $j$ 个输入参数; $m$ 表示因素个数; $\beta_0$ 为常数项; $\beta_i$ 表示 $x_i$ 的线性系数; $\beta_{ij}$ 表示 $x_i$ 和 $x_j$ 的线性系数; $\beta_{ii}$ 表示 $x_i$ 的二次项系数; $y$ 为响应输出; $\varepsilon$ 为误差项。

由于试验因素之间的量纲是不同的,需要对试验因素进行水平编码来消除不同量纲对试验结果准确性的影响。对公式(3)中的试验因素取值范围进行线性变换,结果如表2所示。

对试验因素进行水平编码处理之后,使用Box-Behnken Design(BBD)的响应曲面设计方法,对29组试验数据进行分析。构建了4因素3水平的响应曲面回归模型。通过模型拟合可分别建立小直径管工艺参数与CNR和 $R_{im}$ 之间的非线性关系。试验方案及结果如表3所示。

表2 因素水平表  
Table 2 Factor levels

因素	实际参数	水平		
		-1	0	1
$x_1$	管电压 $U/\text{kV}$	80	115	150
$x_2$	管电流 $I/\mu\text{A}$	80	240	400
$x_3$	放大倍数 $M$	4	5	6
$x_4$	透照厚度 $D/\text{mm}$	1	1.5	2

表3 小直径管BBD试验设计表及试验结果  
Table 3 BBD test design and results of small-diameter tubes

序号	$U/\text{kV}$	$I/\mu\text{A}$	$M$	$D/\text{mm}$	CNR	$R_{\text{im}}/(\text{LP}\cdot\text{mm}^{-1})$
1	115	400	5	1.0	6.834 8	6.839 95
2	115	80	5	2.0	4.424 6	7.621 95
3	115	240	4	1.0	8.203 7	6.877 58
4	150	400	5	1.5	6.303 1	6.393 86
5	115	240	5	1.5	6.594 7	7.692 31
6	115	80	4	1.5	4.203 7	7.042 25
7	150	80	5	1.5	5.072 5	7.936 51
8	115	240	5	1.5	6.467 8	7.530 12
9	115	240	5	1.5	6.565 3	7.727 98
10	80	400	5	1.5	5.372 3	6.821 28
11	80	240	5	2.0	4.226 8	7.288 63
12	150	240	5	2.0	5.681 8	6.811 99
13	115	240	4	2.0	5.574 1	6.877 58
14	150	240	4	1.5	5.324 5	6.418 49
15	150	240	5	1.0	5.657 1	6.925 21
16	115	240	6	1.0	7.074 6	8.333 33
17	115	400	6	1.5	6.166 6	6.830 60
18	115	400	5	2.0	6.548 7	6.702 41
19	115	80	6	1.5	4.323 9	8.576 33
20	80	240	6	1.5	4.912 2	8.561 64
21	150	240	6	1.5	6.584 6	7.299 27
22	80	240	4	1.5	4.740 0	6.775 07
23	115	240	5	1.5	6.983 3	7.898 89
24	115	240	5	1.5	6.854 6	7.898 89
25	115	240	6	2.0	5.918 4	8.103 73
26	80	80	5	1.5	2.514 4	7.704 16
27	80	240	5	1.0	6.811 6	7.898 89
28	115	400	4	1.5	6.413 6	6.337 14
29	115	80	5	1.0	5.136	7.961 78

## 2.4 多目标优化模型拟合

选用精度较高的BBD设计方法对 $R_{im}$ 和CNR与成像工艺参数之间进行二次多项式拟合,可分别得到所构建的二阶响应面回归方程 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 表达式为

$$f_1(\mathbf{x}) = 0.075 1x_1 + 0.997 0x_2 - 0.113 9x_3 - 0.793 2x_4 - 0.406 8x_1x_2 + 0.272 0x_1x_3 + 0.652 4x_1x_4 + 0.106 3x_2x_4 + 0.368 4x_3x_4 - 1.05x_1^2 - 1.03x_2^2 - 0.266 2x_3^2 + 0.472 0x_1^2x_3 + 0.797 1x_1x_2^2 + 0.489 1x_1x_3^2 + 0.543 9x_2^2x_4 + 6.75, \quad (5)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = -0.767 3x_1 + 1.34x_3 - 0.238 4x_4 - 0.329 9x_1x_2 - 0.452 9x_1x_3 + 0.248 5x_1x_4 + 15.50 - 0.619 2x_1^2 - 0.520 3x_2x_3 - 0.635 9x_2^2 - 0.319 7x_3^2 - 0.267 2x_4^2 + 0.669 8x_1x_2^2 - 0.323 5x_2^2x_3 - 1.15x_2. \quad (6)$$

## 2.5 多目标优化模型寻优

针对多目标优化模型的寻优问题,通常的做法是将多目标转换为单目标问题来求解,而带精英策略的非支配遗传算法不需要将多目标转换为单目标问题<sup>[19]</sup>。在航空发动机小直径管焊缝的DR检测指标CNR和 $R_{im}$ 之间,对于多目标优化问题,各个指标之间可能会存在相互矛盾的情况,即在2个目标函数上并非同时存在最优解,其解应为非支配解或者帕累托最优解。图7给出了非支配遗传算法的流程图。NSGA-II算法首先初始化种群并设置,然后对初始种群进行非支配排序和选择、交叉以及变异生成第一代种群,再将父代种群和子代种群合并为新种群并判断是否已经生成新的父代种群,若没有就执行快速非支配排序、计算拥挤度、精英策略等操作生成新的父代种群;否则,对生成的父代种群进行选择、交叉、变异等操作生成子代种群。判断进化代数Gen是否等于最大进化代数,满足则算法停止运行,否则继续运行。

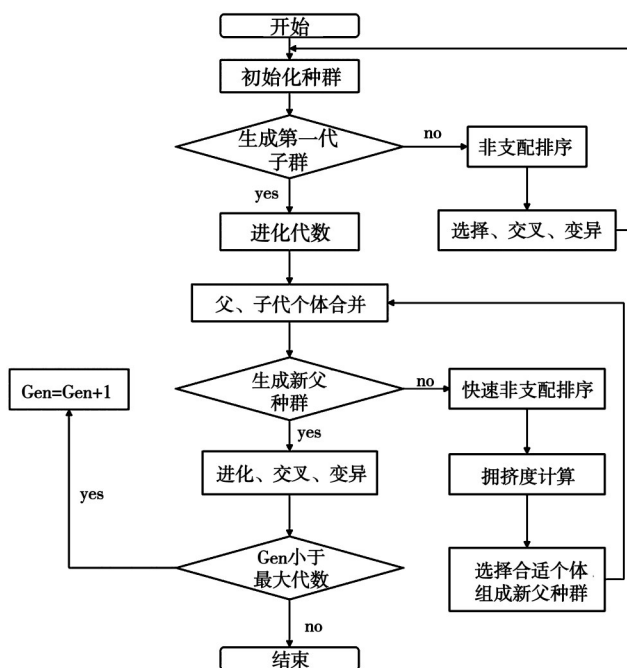


图7 NSGA-II流程图

Fig. 7 NSGA-II flow chart

选择3个不同壁厚的典型小直径管进行实际试验,其等效透照厚度分别为1、1.5、2 mm。将等效厚度作为定值代入公式(11)和公式(12)中,在工艺参数的取值范围内,通过非支配遗传算法对目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 进行求解,其中设置最大迭代次数为500次,种群数量为200,最优前端个体系数0.3,适应度函数偏差 $1 \times 10^{-100}$ 。对优化模型求解后得到的3个等效透照厚度下CNR和 $R_{im}$ 所对应的100组帕累托解集如图8所示。

从3个透照厚度得到的帕累托解当中,分别选取了3个解对阶梯试块进行了实验,测量CNR与 $R_{im}$ 的值,结果如表4所示。可以看出,透照厚度小,CNR和 $R_{im}$ 相比透照厚度更大都更优。在帕累托解集中,靠近X轴右端的解CNR更大, $R_{im}$ 更小。靠近X轴左端的解 $R_{im}$ 更大,CNR更小。因此,选择该区域的目标函数的折中解在接下来的试验验证中进一步分析。

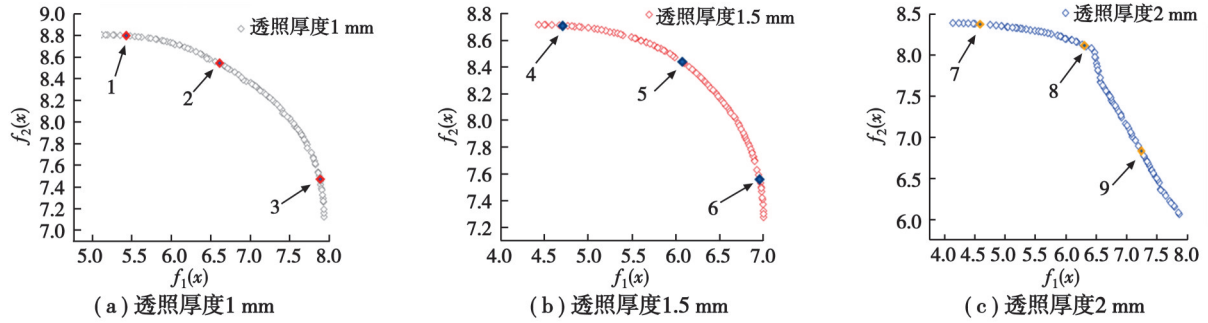


图 8 不同透照厚度的 Prato 最优解集

Fig. 8 Prato optimal solution set with different transparency thicknesses

表 4 从 3 个不同透照厚度的 Prato 解集中选取 3 个解对阶梯试块的实验结果

Table 4 Experimental results of three selected Prato solutions from sets corresponding to different radiographic thicknesses on stepped test blocks

工件 参数	透照厚度 1 mm			透照厚度 1.5 mm			透照厚度 2 mm		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
管电压/kV	81.04	94.36	106	92.22	110.72	113.70	101.11	149.98	138.14
管电流/ $\mu$ A	178.25	216.47	284.38	164.64	230.67	292.59	143.42	80.52	362.11
放大倍数	5.97	5.97	5.99	5.99	5.99	5.99	6.00	5.99	6.00
预测 CNR	5.34	6.60	7.88	4.67	6.15	6.95	4.38	6.13	7.23
实际 CNR	5.50	6.50	7.56	4.70	6.20	6.91	4.23	6.20	7.02
预测 SR	8.80	8.54	7.47	8.67	8.40	7.55	8.58	7.23	6.83
实际 SR	8.72	8.42	7.52	8.53	8.33	7.52	8.32	7.02	6.51

### 3 试验验证与分析

#### 3.1 多目标优化模型拟合性能分析

由 Design Expert 软件得到如图 9 所示的 CNR 和  $R_{im}$  2 个指标的预测值与测量值的对比结果。图 9 中, 直线表示由响应函数关系式得到的预测结果。可以看出, 目标函数的实际值散点集中分布在预测值直线两侧附近, 说明建立的多目标优化模型能够很好地拟合 2 个指标与工艺参数之间的关系。

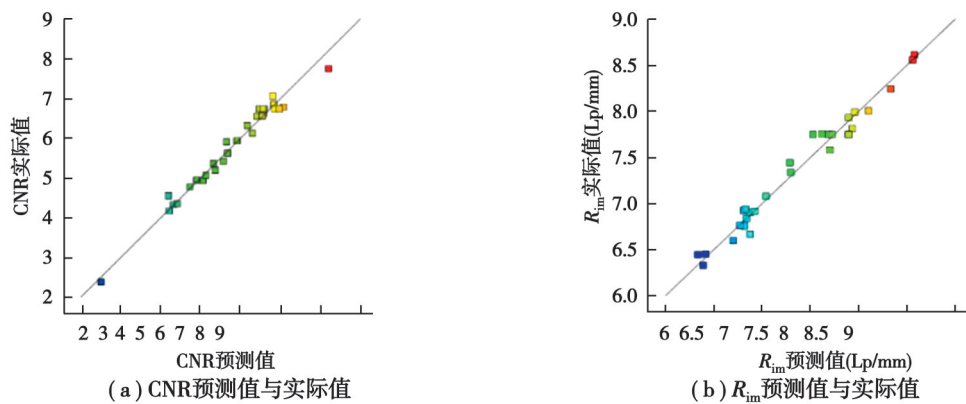


图 9 CNR 和  $R_{im}$  预测值与实际值对比

Fig. 9 Comparison between predicted and measured values of CNR and spatial frequency

为了进一步验证目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 的显著性,使用方差分析检验回归模型反映工艺参数与目标函数之间关系,模型的方差分析如表5所示。由表4可知,2个模型的 $F$ 检验值分别为30.72和39.62,且对应的显著水平 $P$ 值均小于0.000 1,表明回归模型的拟合效果显著。其次,2个模型的决定系数 $R^2$ 分别为0.976 2和0.950 8,其值非常接近1,进一步表明该回归模型具有良好的拟合性能,目标函数可以反映工艺参数与优化目标之间的规律。

表5 回归方程显著性分析

Table 5 Significance analysis of regression equation

模型	平方和	均方值	$F$ 检验值	$P$ 值
$f_1(\mathbf{x})$	37.95	2.37	30.72	<0.000 1
$f_2(\mathbf{x})$	46.80	3.34	39.62	<0.000 1

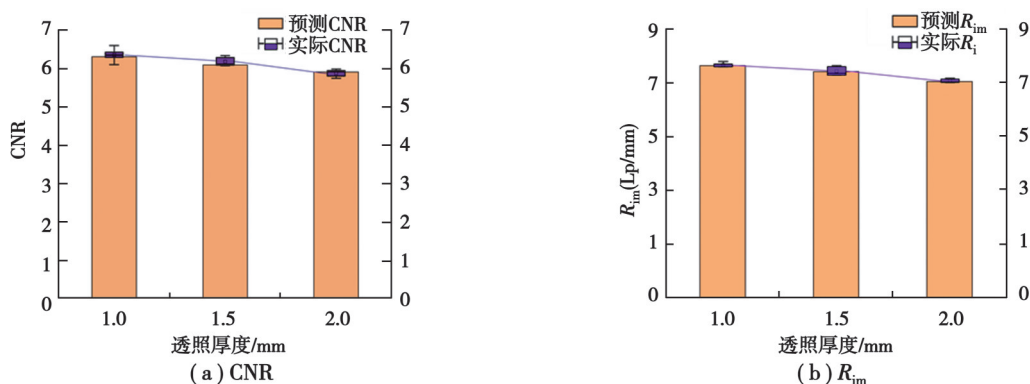
### 3.2 多目标优化结果分析及验证

为了验证经NSGA-II得到的帕累托解集的准确性,从3组透照厚度的解集中分别选取1个优化解来验证模型的有效性。基于上述的DR系统,以实际的航空发动机小直径管为实验对象,结合表6中多目标优化后得到的工艺参数进行检测,测量得到CNR和 $R_{im}$ 的实际值,对比模型预测值与实际值在3种不同厚度的小直径管上的结果如图10所示。

表6 验证实际参数计算结果

Table 6 Verification of experimental parameter calculations

小直径管编号	1	2	3
等效透照厚度/mm	1.0	1.5	2.0
$x_1$ 试验因素水平值/实际值/kV	-0.589 5/94.36	-0.108 727/111.19	0.999 741 5/149.98
$x_2$ 试验因素水平值/实际值/ $\mu$ A	-0.147 02/216.47	-0.151 857/215.70	-0.996 697/80.52
$x_3$ 试验因素水平值/实际值	0.973 689/5.97	0.982 689 6/5.98	0.996 697/5.99

图10 实际工件CNR与 $R_{im}$ 验证Fig. 10 Verification of CNR and  $R_{im}$  of actual workpiece

可以看出,预测CNR和 $R_{im}$ 与实际值基本一致,对于等效透照厚度为1 mm的小直径管,CNR的误差在0.284%~1.87%, $R_{im}$ 的误差在0.377%~1.59%;对于等效透照厚度为1.5 mm的小直径管,CNR的误差在0.284%~4.00%, $R_{im}$ 的误差在0.876%~2.45%;对于透照厚度为2 mm的小直径管,CNR的误差在0.36%~3.72%, $R_{im}$ 的误差在0.634%~1.23%。实际航空发动机小直径管DR透照检测结果,如图11所示。实验证明了在选取最佳DR检测工艺参数上多目标优化模型的可靠性。

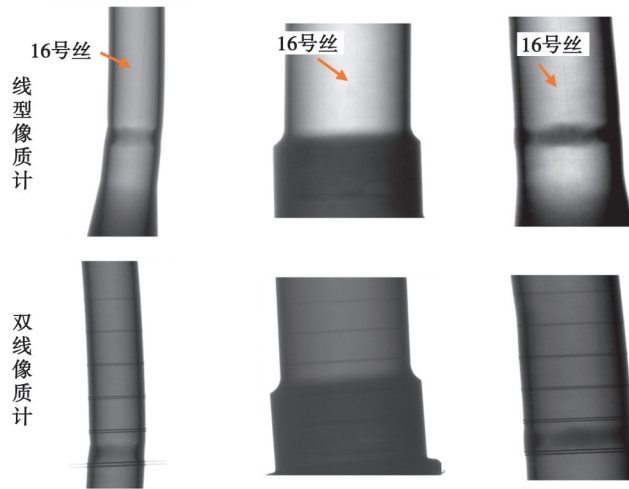


图 11 航空发动机小直径管 DR 图像

Fig. 11 DR image of an aero-engine small-diameter tube

通过阶梯试块透照试验获得 BBD 试验数据,建立多目标响应曲面优化模型。CNR 与  $R_{im}$  和工艺参数之间的关系如图 12 所示。在同一透照厚度下,CNR 随着管电压和管电流的升高而升高,随着透照厚度的升高,CNR 呈现下降趋势。对于  $R_{im}$  来说,随着管电压和管电流的升高,导致微焦点 X 射线源功率的提高,使焦点大小变大, $R_{im}$  随之降低。而透照厚度对  $R_{im}$  影响较低,透照厚度的上升只导致  $R_{im}$  的微小下降。采用 NSGA-II 算法对模型求解得到最优解序列。根据优化结果进行实验验证,等效透照厚度为 1 mm 的工件,设置管电压 94 kV、管电流 216  $\mu$ A、放大倍数 5.97;等效透照厚度为 1.5 mm 的工件,设置管电压 111 kV、管电流为 215  $\mu$ A、放大倍数 5.98;等效透照厚度为 2 mm 的工件,设置管电压 149 kV、管电流 80  $\mu$ A,放大倍数 5.99。结果表明,3 个典型工件验证实验的实际 CNR 误差不超过 3.72%, $R_{im}$  误差不超过 2.45%。

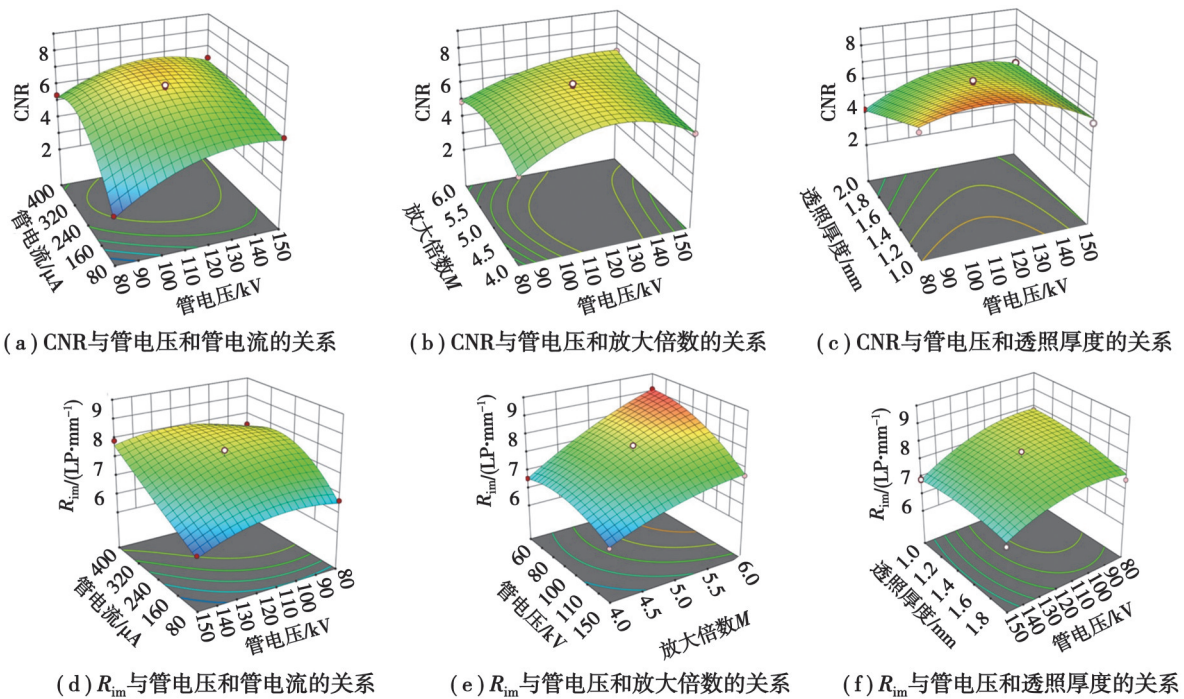


图 12 CNR、 $R_{im}$  与各个工艺参数之间的关系

Fig. 12 Relationship between CNR,  $R_{im}$  and various process parameters

## 4 结 论

文中针对微焦点X射线源焦点大小随功率变化的特点,以航空发动机小直径管焊缝DR检测为研究对象,将DR检测图像空间分辨率和对比度噪声比作为优化目标,建立微焦点DR检测工艺参数管电压、管电流、放大倍数、透照厚度与检测图像空间分辨率和对比度噪声比的二次回归模型,利用非支配遗传算法进行寻优,得到最佳工艺参数序列。所提出的方法只需通过较少的实验就能在进行DR检测时,获得这一类检测对象的成像工艺参数和最佳评价指标(SR和CNR)的定量关系。试验验证了文中航空发动机小直径管焊缝微焦点X射线DR检测工艺参数优化方法的可行性和有效性,具有重要的应用价值。对于其他领域的微焦点X射线的DR检测,成像工艺参数和质量指标是一致的,文中方法也可以推广到其他类型的工件检测中。

## 参考文献

- [1] 任保平, 豆渊博. “十四五”时期新经济推进我国产业结构升级的路径与政策[J]. 经济与管理评论, 2021, 37(1): 10-22.  
Ren B P, Dou Y B. The path and policy of the new economy to promote the upgrading of China's industrial structure during the 14th Five-Year Plan[J]. Review of Economy and Management, 2021, 37(1): 10-22. (in Chinese)
- [2] 王景人, 支泽林, 靳超. 小径管焊缝X射线数字成像检测与相控阵成像检测技术对比[J]. 无损检测, 2018, 40(4): 30-35, 40.  
Wang J R, Zhi Z L, Jin C. Comparison of X-ray digital imaging detection and phased array imaging detection technique of small diameter tube welds[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(4): 30-35, 40. (in Chinese)
- [3] Tao L, Li Z H, Zuo K, et al. Research on the optimal radiographic parameters of X-ray digital imaging; proceedings of the international conference on future computer science and application (FCSA 2011), Kota Kinabalu, Malaysia, F Jul 16-17, 2011 [C]//Kota Kinabalu, Malaysia:FCSA,2011.
- [4] Tao L, Tong Y J, Zhao H. Decision method of optimal X-ray digital imaging parameters; proceedings of the International Conference on Sensors, Mechatronics and Automation (ICSMA), Shenzhen, Peoples R China, F Dec 24-25, 2013 [C]//Shenzhen:ICSMA,2013.
- [5] 程辉, 王蕾, 张洪君. 铝合金焊缝X射线探伤工艺参数的选择[J]. 轻金属, 2013(2): 60-62.  
Cheng H, Wang L, Zhang H J. Parameters selection of X-ray detection for aluminum alloy welding seams[J]. Light Metals, 2013(2): 60-62. (in Chinese)
- [6] 胡文刚, 陆云鹏, 郭世雄, 等. 基于DR数字射线成像技术的铝合金焊缝缺陷检测[J]. 焊接, 2021(2): 46-51, 64.  
Hu W G, Lu Y P, Guo S X, et al. Weld defect detection of aluminum alloy based on digital radiography[J]. Welding & Joining, 2021(2): 46-51, 64. (in Chinese)
- [7] 刘凯, 王晓勇, 袁孟春. 碳纤维缠绕发动机壳体数字射线DR成像检测图像质量控制[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(5): 76-82.  
Liu K, Wang X Y, Yuan M C. Quality control of images of digital radiography testing for carbon filament-wound motor case[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(5): 76-82. (in Chinese)
- [8] Chen L, Li B, Zhou H, et al. Detection of three-dimensional parameter of defects for gas turbine blades based on two-dimensional digital radiographic projective imaging[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(4): 101.
- [9] 彭光含, 杨学恒, 韩忠, 等. 连续谱X射线在ICT中的能谱硬化修正模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(11): 1880-1883.  
Peng G H, Yang X H, Han Z, et al. Hardening correction model of energy spectrum for continuous spectrum X-ray ICT[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(11): 1880-1883. (in Chinese)
- [10] 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, 59.  
Guo W M, Chen Y L. Quantitative relationship between gray value of X-ray image and radiographic thickness[J]. Nondestructive Testing Technology, 2016, 38(2): 14-17, 59. (in Chinese)
- [11] 胡景东, 梁丽红, 刘雪梅, 等. 射线数字成像透照厚度与灰度模型研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1034001.  
Hu J D, Liang L H, Liu X M, et al. Research on penetrated thickness and gray model of radiographic digital imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1034001. (in Chinese)

- [12] 俞梦倩, 吴伟, 邬冠华, 等. 航空发动机涡轮叶片DR检测工艺参数优化[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 1837-1845.  
Yu M Q, Wu W, Wu G H, et al. Optimization of DR detection process parameters for aero-engine turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1837-1845. (in Chinese)
- [13] 倪培君, 王俊涛, 闫敏, 等. 数字射线检测技术理论研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 13-18.  
Ni P J, Wang J T, Yan M, et al. Research progress on digital radiography theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 13-18. (in Chinese)
- [14] 国家能源局. 承压设备无损检测 第11部分: X射线数字成像检测: NB/T 47013.11—2015[S]. 北京: 新华出版社, 2015.  
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Nondestructive testing of pressure equipments: Part 11: Standard practice for X-ray digital radiography: NB/T 47013.11—2015[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015. (in Chinese)
- [15] Standard Guide for Digital Detector Array Radiography: ASTM E2736-17[S].
- [16] 陈乐, 强天鹏, 盛佩军, 等. 管电压对射线数字成像检测成像质量的影响[J]. 无损检测, 2020, 42(2): 12-16.  
Chen L, Qiang T P, Sheng P J, et al. Influence of X-ray voltage on image quality of digital radiography[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(2): 12-16. (in Chinese)
- [17] 强天鹏. 射线检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.  
Qiang T P. Radiographic detection[M]. Beijing: China Labor Social Security Press, 2007. (in Chinese)
- [18] Jeff Wu C F, Hamada M. Experiments: planning, Analysis, and optimization[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2021.
- [19] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. 2002, 6(2): 182-197.

(编辑 陈移峰)