

文章编号: 1000-8055(2023)08-1837-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210731

航空发动机涡轮叶片 DR 检测工艺参数优化

俞梦倩¹, 吴 伟¹, 邬冠华¹, 夏志风², 傅伟成¹

- (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. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

摘 要: 针对工业领域数字射线(DR)快速选定检测工艺参数获取高信噪比图像的需求, 研究 DR 检测中多因素工艺参数不同组合对成像结果的影响。以航空发动机涡轮叶片同材料等效厚度试块为对象, 采用二次回归正交旋转实验方法, 建立检测图像信噪比与管电压、管电流、积分时间、不同等效厚度之间的二次回归方程模型, 并检验单因素及各因素间交互作用对检测图像信噪比的显著性。利用人工刻槽航空发动机涡轮叶片结合回归方程模型, 以检测图像信噪比为优化指标, 在已知透照厚度情况下得到最佳工艺参数组合, 比较检测图像信噪比的实际值与计算值。结果表明: 在 4 组验证实验下实际信噪比值与计算值比较接近, 误差范围在 1.4%~5.5%, 表明模型具有较高的可靠性。

关 键 词: 数字射线检测; 信噪比; 航空发动机涡轮叶片; 二次回归正交旋转组合设计; 工艺参数
中图分类号: V232.4 **文献标志码:** A

Optimization of DR detection process parameters for aero-engine turbine blades

YU Mengqian¹, WU Wei¹, WU Guanhua¹, XIA Zhifeng², FU Weicheng¹

- (1. Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Ministry of Education,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Shenyang Liming Aeroengine Corporation Limited,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110043, China)

Abstract: In view of the needs of digital radiography (DR) in the industrial field to quickly select the detection process parameters to obtain high signal-to-noise ratio images, the influences of different combinations of multi-factor process parameters on the imaging results in DR detection were studied. Taking the aero-engine turbine blade as the object, the quadratic regression orthogonal rotation test method was used to establish the quadratic regression equation model between the detection image signal-to-noise ratio and the tube voltage, tube current, integration time, and different equivalent thicknesses, and the single test was carried out. The significance of the factors and the interaction among the factors on the detection image signal-to-noise ratio were also discussed. Using the manual slotted aero-engine turbine blade combined with the regression equation model, the detection image signal-to-noise ratio was used as the optimization index, the optimal combination of process parameters was obtained under the condition of known translucency thickness, and the actual value and calculated value of the signal-to-noise ratio of the

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(62161030)

作者简介: 俞梦倩(1997—), 女, 硕士, 研究方向为智能图像处理。E-mail: 10362109935@qq.com

通信作者: 吴伟(1970—), 男, 教授、硕士生导师, 硕士, 研究方向为智能测试技术与射线检测、图像检测与智能识别等。E-mail: cwuwei@163.com

引用格式: 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 Mengqian, WU Wei, WU Guanhua, et al. Optimization of DR detection process parameters for aero-engine turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1837-1845.

detected image were compared. The results showed that the actual signal-to-noise ratio was close to the calculated value under four sets of verification tests, and the error range was 1.4%—5.5%, indicating the high reliability of the model.

Keywords: digital ray detection; signal-to-noise ratio; aero-engine turbine blades; quadratic regression orthogonal rotation combination design; process parameters

从 20 世纪 90 年代起, 数字射线(digital radiography, DR)检测技术^[1-3]已经引起了射线检测技术领域广泛关注。它具有快速检测、图像储存方便、环保等特点。信噪比是评价数字射线图像质量的重要指标, 为了获取高信噪比图像, 实际检测中需要结合工件厚度以及工程经验对 DR 工艺参数进行调整。

近年来众多学者对 DR 检测图像影响因素开展了研究, 张军辉等^[4]针对不同厚度的检测对象, 分析了曝光参数对图像灰度、对比度和信噪比的定性关系, 但并没有给出明确公式。郭文明等^[5]通过分析影响射线强度多种因素, 并结合射线强度与数字图像之间的转换方式, 得出灰度值与透照厚度之间的影响关系, 但实验误差有待改进。胡景东等^[6]以钢板为研究对象, 探讨 DR 图像灰度与工艺参数、透照厚度之间的关系, 并得到最终图像灰度-透照厚度关系模型。

相关射线理论^[7]指出, 管电压、管电流、积分时间、等效透照厚度是 DR 检测的 4 个重要参数, 如何找到这些参数的最优组合, 以获得最佳质量的图像, 是实际检测中设计工艺参数亟待解决的关键性问题。本文基于二次回归正交实验方法, 针对航空发动机涡轮叶片, 以检测图像信噪比为评价指标, 构建工艺参数、等效透照厚度之间的交互作用关系模型, 最终得到优化的工艺参数组合。

1 工艺参数、透照厚度与信噪比的关系

1.1 单因素对灰度影响

DR 检测图像灰度 G 反映了工件内部最终信息。研究表明, 输入探测器的射线强度(即穿透工件衰减后的射线强度)与计算机输出图像灰度值存在线性关系^[8]:

$$G = c_1 It \quad (1)$$

式中 c_1 为比例系数; I 为射线强度; t 为积分时间; It 也称为射线检测中的曝光量。再由 X 射线平方反比定理得出下式:

$$G = \frac{c_2 i v^2 t}{F^2} \exp(-\mu h) \quad (2)$$

式中 c_2 被定义为灰度值常数; i 为管电流; v 为管电压; F 为工件表面到射线源的距离; μ 为线衰减系数; h 为工件厚度。在其他检测参数不变情况下, 改变某一参数所引起的灰度值变化都可由式(2)直观地看出, 但灰度值的变化往往不是简单地由参数单独决定, 更多情况是由参数间的交互作用引起的。

对于同批次工件及固定检测系统的高效工业检测, 工件表面到射线源的距离 F 和线衰减系数 μ 常常是固定的, 所以选择研究灰度 G 值与管电压 v 、管电流 i 、积分时间 t 、工件厚度 h 这些影响因素之间的关系。

1.2 灰度对图像信噪比的影响

DR 检测图像中感兴趣区域的灰度平均值 $\bar{S}$ 与灰度标准差之比 σ 定义为图像的信噪比 R ^[9]:

$$R = \frac{\bar{S}}{\sigma} \quad (3)$$

文献 [5] 指出, 在厚度一定的情况下, 信噪比随图像灰度值增加而增加, 达到一定范围后趋于平缓。对于相同图像灰度值, 厚度越大信噪比也越大。

因此, 通过式(2)可获得管电压 v 、管电流 i 、积分时间 t 、工件厚度 h 对灰度 G 的单因素影响, 进一步结合式(3)可以将这些参数映射到 R , 用于评价对成像质量的好坏。

2 二次回归正交旋转实验设计

从现有的研究结果来看, 仅用单因素实验确定检测图像信噪比模型并不合理, 回归正交旋转实验设计是将正交实验法和回归分析两者优势相结合产生的一种科学、简便实验方法^[10]。其基本思路是: 确定因素的实验范围后选择适当的实验点数, 建立正交组合表后可用较少的实验次数建立一个拟合效果显著且统计性能优异的回归方程, 并能解决确定最优条件的问题。回归正交实验法能够对选择的因素进行系统、综合的研究, 具有实验次数少、计算简洁的优点, 并解决了因素间回归系数相关性干扰的问题^[11-12], 在质量控制领域获得广泛关注。

2.1 DR 检测系统及实验工件设计

工业 DR 系统主要由射线源和平板探测器两大部分组成。射线源由高压发生器和冷却系统组成,其主要功能是产生 X 射线,它的阴极由钨丝绕成,当通电时,钨丝加热释放出电子,电子在阳极高电压作用下加速撞击金属靶而产生 X 射线。本文使用的射线机型号是 FORM 225.030,透照布置如图 1 所示。

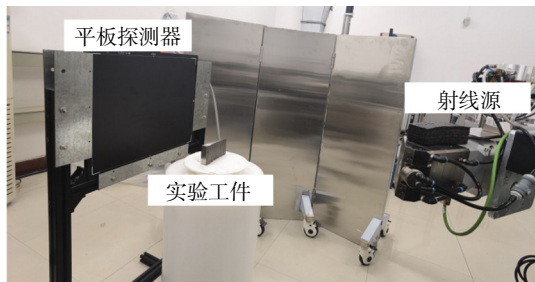


图 1 DR 透照布置实物图
Fig. 1 Physical map of DR transillumination layout

平板探测器主要功能是接收射线并转化成电子信号,最后经 AD(模数转换器)转换形成数字图像。表 1 为 FORM 225.030 射线机和 XRpad2 4336 平板探测器所组成 DR 系统的技术指标。

表 1 DR 系统技术指标 Table 1 Technical indicators of DR system	
技术指标	参数及说明
像素尺寸	3 524 × 4 288
像素点间距/μm	100
AD 位数/bit	16
探测器质量/kg	3.2
闪烁体材料	主要为 CsI(Tl)
探测器材料	非晶硅
探测器工作温度/℃	10~35
探测器工作湿度/%	10~90
射线源焦点大小/μm	5
最大管电压/kV	225
最大管电流/μA	3 000

本文旨在研究工业 DR 检测同批次航空发动机涡轮叶片,如何快速获得高信噪比模型的实验设计方法。考虑到实际工件整体厚度不等,为确保实验一致性,减少信噪比实验数据误差,在回归正交旋转实验过程中,设计与检测工件同种高温镍基合金材料制造的实验试块进行透照实验,设计图及实物如图 2 所示。

实验试块总长为 100 mm,宽为 50 mm,由 5 个长为 20 mm 的阶梯组成。由于 DR 图像在进行

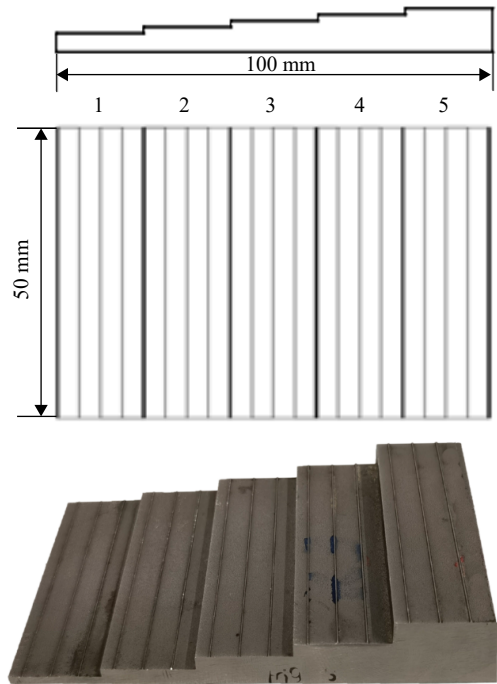


图 2 实验试块设计及实物图
Fig. 2 Test block design and physical diagram

质量评定前需要像质计灵敏度达到规定要求,而像质计材料与工件一致时精确度最高。因此,为保证实验的准确性,在每块阶梯上加工 3 根等直径、与试块同种材料的圆柱形丝线,丝线直径根据标准 NB/T 47013.11-2015 中满足检测技术等级 AB 级时像质计应识别丝号来确定,阶梯规格与各阶梯上丝线直径如表 2 所示。

表 2 工件各阶梯制作规格 Table 2 Production specifications of each step of the workpiece					
参数	阶梯规格				
	阶梯 1	阶梯 2	阶梯 3	阶梯 4	阶梯 5
等效厚度/mm	2	5	8	11	14
丝径/mm	0.08	0.125	0.2	0.25	0.25

除实验试块的等效厚度外,射线机可以设定管电压、管电流和积分时间,所以将这些参数视为不确定随机变量;而由于 DR 检测系统及检测材料固定,将焦距,线衰减系数视为定值。

2.2 回归正交设计功能函数确定

如文中第 1.2 节所述,检测图像信噪比取决于感兴趣区域灰度值的平均值与标准差。通常为获得良好的图像质量,首先通过预实验获得各随机因素上水平与下水平取值,DR 实验透照布置为:焦距固定为 500 mm,射线源距离平板探测器

600 mm, 放大倍数为 1.2 倍, 获取对应试块检测图像 25 像素 × 25 像素大小为感兴趣区域, 根据表 3

所示工艺参数进行预实验, 图 3 为各阶梯 DR 检测图像。

表 3 各阶梯预实验选择参数

Table 3 Selection parameters at each step of pre test

各阶梯预实验	管电压/kV	管电流/μA	积分时间/ms	阶梯厚度/mm	灰度均值 G
第 1 块	120	500	1 000	2	31 125
第 2 块	130	800	200	5	30 076
第 3 块	140	1 400	2 000	8	29 854
第 4 块	150	1 700	2 500	11	33 689
第 5 块	160	1 700	3 000	14	30 689

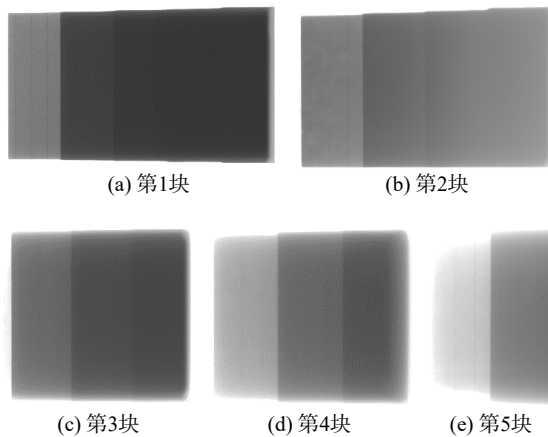


图 3 各阶梯 DR 检测图像

Fig. 3 DR detection images of each step

根据 NB/T47013.11-2015 标准中 AB 等级的最佳灰度值在满量程的 20%~80% 之间, 同时 5 组预实验相应阶梯上的丝线清晰可见, 根据 NB/T47013.11-2015 标准中 AB 等级图像灵敏度要求, 可见丝线直径满足对应厚度评定需求。

经过预实验后, 确定因素上下水平取值、各因素 $x_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的实验范围, 进而对随机因素水

平进行编码处理, 得到规范变量 $z_j (j = 1, 2, \dots, m)$ ^[13]。如果随机因素 x_j 的上下水平用 x_{j2} 和 x_{j1} 表示, 设为随机因素 x_j 的上下星号臂水平为 $x_{j\gamma}$ 与 $x_{-j\gamma}$, 则得出以下关系式:

$$x_{j0} = \frac{x_{j1} + x_{j2}}{2} = \frac{x_{j\gamma} + x_{-j\gamma}}{2} \quad (4)$$

$$\Delta_j = \frac{x_{j\gamma} - x_{-j\gamma}}{2\gamma} \quad (5)$$

其中 x_{j2} 、 x_{j1} 和 x_{j0} 分别代表随机因素的上水平、下水平、零水平; $x_{j\gamma}$ 与 $x_{-j\gamma}$ 为随机因素 x_j 的上下星号臂水平且同样表示为因素的上下限; Δ_j 为变化间距。式中 γ 值可查二次正交旋转组合参数表, 当选取零水平实验次数 $m=4$ 时, γ 值为 2。对各个因素水平取值进行线性变换, 得到水平编码:

$$z_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta_j} \quad (6)$$

式中 z_j 为自然变量 x_j 转变成的无量纲规范变量。

设计正交旋转实验规范变量编码表如表 4 所示, 其中自然变量 x_1 为管电压 v , x_2 为管电流 i , x_3 为积分时间 t , x_4 为阶梯厚度 h 。

表 4 DR 参数水平编码表

Table 4 DR parameter level coding table

自然变量 z_j	上星号臂水平 $\gamma(2)$	上水平 1	零水平 0	下水平 -1	下星号臂水平 $-\gamma(-2)$	变化间距 Δ_j
x_1/kV	160	150	140	130	120	10
$x_2/\mu\text{A}$	1 700	1 400	1 100	800	500	300
x_3/ms	3 000	2 500	2 000	1 500	1 000	500
x_4/mm	14	11	8	5	2	3

3 实验分析

3.1 二次回归正交组合设计实验结果

考虑到不确定因素个数为 4, 查找二次正交旋转组合参数表确定二水平实验次数 $m_c = 16$, 星号实验次数 $m_r = 8$, 零水平实验次数 $m_0 = 12$, 结合表 2 和表 4 进行数值实验, DR 实验透照布置与预

实验相同进行 36 组实验, 取对应试块检测图像信噪比值为响应值, 实验结果如表 5 所示。

表 5 中二次回归方程中的二次项为 $z_{ji}^2 (j = 1, 2, \dots, m_j; i = 1, 2, \dots, n)$, 其对应的中心化处理编码用 z_{ji} 表示。对所得实验数据分析结合式 (7) 运算, 确定拟合方程的各项系数, 计算公式如下:

$$\left\{\begin{aligned}a &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \bar{y} \\ b_j &= \frac{\sum_{i=1}^n z_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^n z_{ji}^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ b_{kj} &= \frac{\sum_{i=1}^n (z_k z_j)_i y_i}{\sum_{i=1}^n (z_k z_j)_i^2}, \quad j > k, k = 1, 2, \dots, m-1 \\ b_{ij} &= \frac{\sum_{i=1}^n z'_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^n (z'_{ji})^2}\end{aligned}\right. \quad (7)$$

其中 a 、 b_j 、 b_{kj} 、 b_{ij} 为方程各项系数, y 为试验指标因变量, 经过式(7)得出信噪比的二次回归拟合方

程为
$$y = 33.80 + 1.75z_1 + 1.25z_2 + 1.49z_3 - 1.47z_4 + 0.47z_1z_2 + 0.0875z_1z_3 - 0.0625z_1z_4 + 0.7963z_2z_3 - 0.0537z_2z_4 - 0.0387z_3z_4 - 1.33z'_1 - 1.44z'_2 - 1.85z'_3 - 1.30z'_4$$

式中 y 为信噪比编码; z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 分别为管电压、管电流、积分时间、等效厚度水平编码; z'_1 、 z'_2 、 z'_3 、 z'_4 分别为管电压、管电流、积分时间、等效厚度二次项中心化编码。
检验待定系数的显著性相关公式如下:
总平方和 S_t^2 为

$$S_t^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (8)$$

表 5 二次回归正交旋转实验设计表
Table 5 Design table of quadratic regression orthogonal rotation test

实验号	v	i	t	h	vi	vt	vh	it	ih	th	v^2	i^2	t^2	h^2	R
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_1z_2	z_1z_3	z_1z_4	z_2z_3	z_2z_4	z_3z_4	z'_1	z'_2	z'_3	z'_4	y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	32.10
2	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	35.30
3	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	27.40
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	35.30
5	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	27.29
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	30.20
7	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	25.71
8	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	28.60
9	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	27.70
10	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	30.57
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	23.28
12	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	26.14
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	24.54
14	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	27.50
15	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	0.333	0.333	0.333	0.333	23.60
16	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0.333	0.333	0.333	0.333	26.04
17	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.333	-0.667	-0.667	-0.667	32.02
18	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.333	-0.667	-0.667	-0.667	24.86
19	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	3.333	-0.667	-0.667	30.60
20	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	3.333	-0.667	-0.667	25.40
21	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	3.333	-0.667	29.30
22	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	3.333	-0.667	23.40
23	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	3.333	25.40
24	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	3.333	31.70
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.82
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.78
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.74
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.65
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.69
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.60
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.50
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.57
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.59
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.57
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.75
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	33.59

一次项偏回归平方和 S_j^2 为

$$S_j^2 = b_j^2 \sum_{i=1}^n z_{ji}^2, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

交互项偏回归平方和 S_{kj}^2 为

$$S_{kj}^2 = b_{kj}^2 \sum_{i=1}^n (z_k z_j)_i^2, \quad j > k, k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (10)$$

二次项偏回归平方和 S_{jj}^2 为

$$S_{jj}^2 = b_{jj}^2 \sum_{i=1}^n (z_{ji})^2 \quad (11)$$

回归平方和 S_r^2 为

$$S_r^2 = \sum S_j^2 + \sum S_{kj}^2 + \sum S_{jj}^2 \quad (12)$$

残差平方和 S_e^2 为

$$S_e^2 = S_t^2 - S_r^2 \quad (13)$$

其自由度为

$$f_e = f_t - f_r \quad (14)$$

其中 f_t 为

$$f_t = n - 1 \quad (15)$$

回归平方和的自由度为各偏回归平方和自由度之和

$$f_r = \sum f_j + \sum f_{kj} + \sum f_{jj} \quad (16)$$

回归系数的检验:

$$\begin{cases} F_j = \frac{\text{mean}(S_j)}{\text{mean}(S_e)} = \frac{S_j^2}{S_e^2/f_e} \\ F_{kj} = \frac{\text{mean}(S_{kj})}{\text{mean}(S_e)} = \frac{S_{kj}^2}{S_e^2/f_e} \\ F_{jj} = \frac{\text{mean}(S_{jj})}{\text{mean}(S_e)} = \frac{S_{jj}^2}{S_e^2/f_e} \end{cases} \quad (17)$$

失拟平方和 S_{lr}^2 表示了回归方程未能拟合的部分,包括未考虑的其他因素及各 x_j 的高次项等所引起的差异,表达式为

$$S_{lr}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 \quad (18)$$

对应的自由度为 f_{lr}

$$f_{lr} = f_e - f_{e1} \quad (19)$$

式中 f_{e1} 为一次残差平方和。

所以有

$$\begin{cases} S_t^2 = S_r^2 + S_e^2 = S_r^2 + S_{lr}^2 + S_{e1}^2 \\ f_t = f_r + f_e = f_r + f_{lr} + f_{e1} \end{cases} \quad (20)$$

此时

$$F_{lr} = \frac{S_{lr}^2/f_{lr}}{S_{e1}^2/f_{e1}} \quad (21)$$

服从自由度为 (f_{lr}, f_{e1}) 的 F 分布。对于给定的显著性水平 α (一般取 0.01),当 $F_{lr} < F_{\alpha}(f_{lr}, f_{e1})$ 时,就认为回归方程失拟不显著,失拟平方和 S_{lr}^2 是由随机误差造成的,否则说明所建立的回归方程拟合得不好,需要进一步改进回归模型,如引入别的因素或建立更高次的回归方程^[14-17]。只有当回归方程显著、失拟检验不显著时,才能说明所建立的回归方程拟合得比较好。

根据式(8)~式(21)计算出分析结果如表 6 所示。模型的回归关系达到极显著(显著性值 $P < 0.01$), $F_{lr} = 2.05 < F_{0.01}(10, 11) = 4.539$,失拟检验不显著。方差分析显示, z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 、 $z_1 z_2$ 、 $z_2 z_3$ 、 z'_1 、 z'_2 、 z'_3 、 z'_4 对回归方程的影响较大(显著性值 $P < 0.01$), $z_1 z_3$ 对回归方程影响显著($P < 0.05$)。说明管电压、管电流、积分时间、等效厚度不仅单因素对信噪比值影响作用极为显著,且参数交互项管电压-管电流、管电流-积分时间对信噪比值也影响极为显著。另外管电压-积分时间对信噪比值影响较弱,这说明 4 种随机因素对信噪比的影响不是单独作用,而是存在着耦合影响关系。文献[18]的结论为,改变管电压、管电流、积分时间,图像的信噪比也会随之改变;同时提升管电流和单帧积分时间有利于提升图像信噪比,这一结论和本次实验结果相近。

通过上述说明可简化回归方程为: $y = 33.80 + 1.75z_1 + 1.25z_2 + 1.49z_3 - 1.47z_4 + 0.47z_1 z_2 + 0.0875z_1 z_3 + 0.7963z_2 z_3 - 1.33z'_1 - 1.44z'_2 - 1.85z'_3 - 1.30z'_4$ 。其中 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 、 $z_1 z_2$ 、 $z_1 z_3$ 、 $z_2 z_3$ 、 z'_1 、 z'_2 、 z'_3 、 z'_4 的相关系数和与总系数和之比为 99.7%,其他影响系数占 0.3%,简化方程仍有较好拟合性。

3.2 最优工艺点实验性验证

为了验证所得模型的实用性,以航空发动机涡轮叶片为实验对象,外形如图 4 所示。在叶片的的不同位置加工 8 个人工线槽缺陷,叶根下部榫头处加工编号为①、②的两根横槽,叶根上部加工编号为③的竖槽和编号为④的横槽,叶身处加工编号为⑤、⑥的横槽和编号为⑦、⑧的竖槽。

由于人工缺陷所在叶片位置的等效厚度均不相同,对各缺陷处最优工艺验证时最大程度上减少了偶然性,缺陷公称尺寸和所在位置等效厚度如表 7 所示。

按表 7 的线槽等效厚度可分为 4 组验证实验,

表 6 以信噪比为评价指标的回归模型方差分析

Table 6 Variance analysis of regression model with signal-to-noise ratio as the evaluation index

变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
z_1	73.780	1	73.780	4 904.929	$7.15 \times 10^{-18**}$
z_2	37.350	1	37.350	2 483.046	$5.87 \times 10^{-16**}$
z_3	53.103	1	53.103	3 530.350	$6.02 \times 10^{-17**}$
z_4	53.580	1	53.580	3 562.065	$5.68\text{e} \times 10^{-17**}$
z_1z_2	3.534	1	3.534	234.967	$1.92 \times 10^{-9**}$
z_1z_3	0.122	1	0.122	8.143	0.018*
z_1z_4	0.062	1	0.062	4.155	0.074
z_2z_3	10.144	1	10.144	674.390	$2.56 \times 10^{-12**}$
z_2z_4	0.046	1	0.046	3.073	0.118
z_3z_4	0.024 5	1	0.024	1.597	0.250
z'_1	42.773	1	42.773	3 549.306	$2.44 \times 10^{-16**}$
z'_2	50.112	1	50.112	4 179.574	$8.76 \times 10^{-17**}$
z'_3	82.807	1	82.807	7 001.594	$3.38 \times 10^{-18**}$
z'_4	41.029	1	41.029	3 399.783	$3.19 \times 10^{-16**}$
模型	504.47	14	36.03	2 395.50	$1.44 \times 10^{-18**}$
剩余	0.315 9	21	0.015 0		
失拟	0.205 6	10	0.020 6	2.05	0.127 3
误差	0.110 3	11	0.010 0		
总和	504.78	35			

注：*表示 $P < 0.05$ ，影响显著；**表示 $P < 0.01$ ，影响极显著。

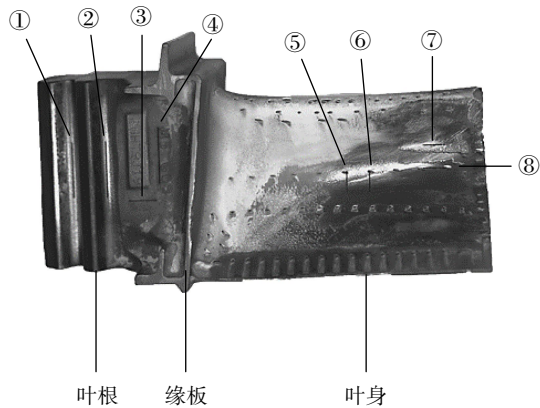


图 4 航空发动机涡轮叶片刻槽示意图

Fig. 4 Schematic diagram of notching grooves in aero-engine turbine blades

为了获得最佳信噪比值的清晰检测图像，首先根据 NB/T47013.11-2015 标准中 AB 等级的最佳灰

度值控制在满量程的 20%~80% 之间，设定工艺参数约束水平范围，满足图像质量评定需求。然后以图像信噪比为响应值，利用上述回归模型获取最优工艺参数。每组验证实验根据预设实验参数值调整好工艺参数，获得 DR 检测图像后在对应线槽部位选取 5 次感兴趣区域计算信噪比值。验证实验分组及根据实际情况调整后的计算结果如表 8 所示。

由表 8 实验参数水平约束范围，将最佳信噪比的求解归结于约束最优化方程求解，利用 MATLAB 编写四元二次方程约束程序，得到表 8 所示最优水平。预测信噪比值与实际信噪比值对比结果如图 5 所示，误差范围为 1.4%~5.5%。根据实验结果判断，叶片 DR 图像实际信噪比值与回归模型预测最佳信噪比值基本一致。实际航空

表 7 航空发动机涡轮叶片刻槽设计尺寸

Table 7 Designed dimensions of grooves in aero-engine turbine blades

参数	编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
公称尺寸/mm	10×0.2×1	10×0.2×1	5×0.2×1	10×0.2×1	4×0.2×1	4×0.2×1	4×0.2×1	4×0.2×1
等效厚度/mm	10.5	13	13	10.5	3.5	3.5	2.5	2.5

表 8 验证实验参数计算结果
Table 8 Verification of test parameter calculation results

实验参数水平	1、4 号线槽	2、3 号线槽	5、6 号线槽	7、8 号线槽
厚度换算水平	0.833	1.667	-1.5	-1.833
管电压水平约束范围	0~1	1~2	-2~-1	-2~-1.5
管电流水平约束范围	0~1	1~2	-2~-1	-2~-1.5
积分时间水平约束范围	0~1	1~2	-2~-1	-2~-1.5
最优管电压水平, 实际值/kV	0.783, 148	1, 150	-1, 130	-1.5, 125
最优管电流水平, 实际值/ μ A	0.702, 1 311	1, 1 400	-1, 800	-1.5, 650
最优积分时间水平, 实际值/ms	0.563, 2 282	1, 2 500	-1, 1 500	-1.5, 1 250

发动机涡轮叶片 DR 透照结果如图 6 所示, 像质计的可见丝号满足 NB/T47013.11-2015 标准要求。4 组验证实验证明了在选取非实验设计水平点参数情况下此回归模型的可靠性。

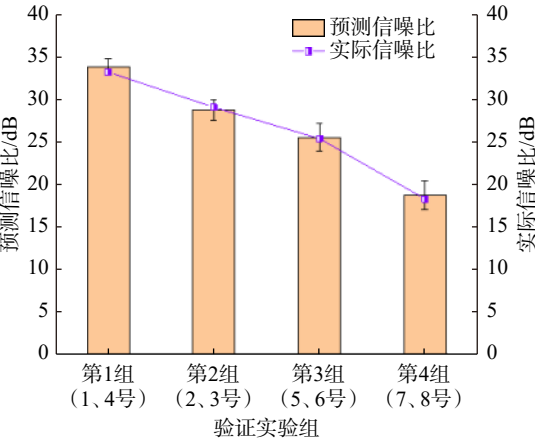


图 5 回归模型实际工件验证

Fig. 5 Regression model actual workpiece verification

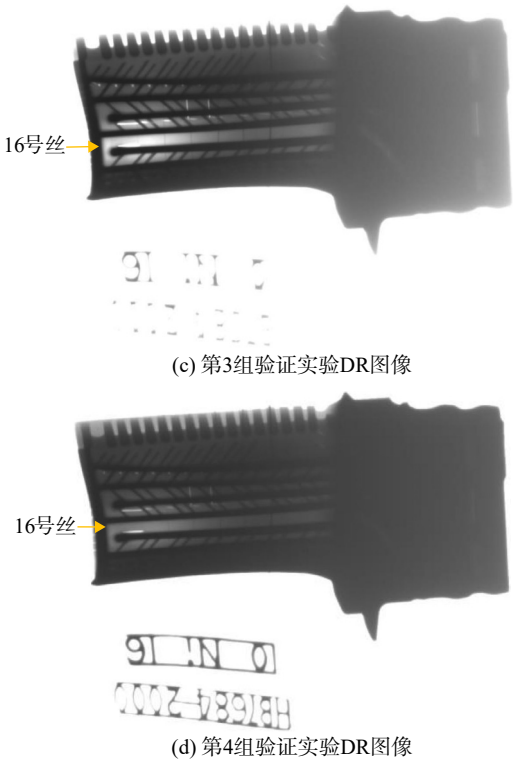
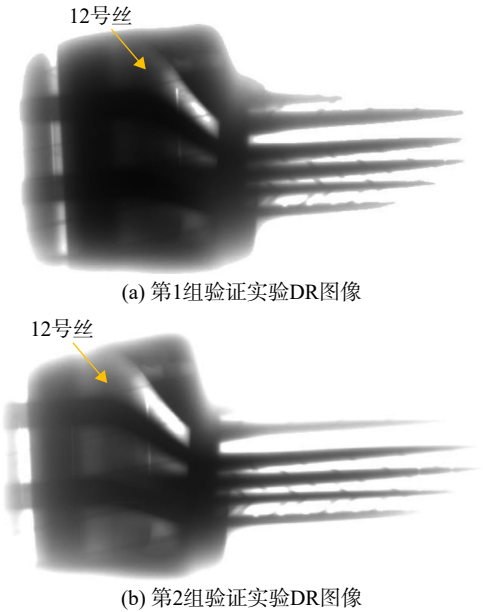


图 6 航空发动机涡轮叶片 DR 图像

Fig. 6 DR image of aero-engine turbine blades

4 结 论

1) 运用二次回归正交旋转组合实验方法对 DR 系统检测航空发动机涡轮叶片进行优化设计, 剔除不显著项后得到简化后的回归方程为 $y = 33.65 + 1.75z_1 + 1.25z_2 + 1.49z_3 - 1.47z_4 + 0.47z_1z_2 + 0.0875z_1z_3 + 0.7963z_2z_3 - 1.29z_1' - 1.40z_2' - 1.81z_3' - 1.26z_4'$, 失拟项检验不显著, 拟合效果好, 并通过显著性检验判断各因素及交互项的重要程度。

2) 通过设计航空发动机涡轮叶片人工线槽缺陷进行最优工艺参数实验验证, 第 1 组验证实验在等效厚度为 10 mm 处时, 经约束最优化解

的参数为管电压 148 kV, 管电流 1 311 μ A, 积分时间 2 282 ms; 第 2 组验证实验在等效厚度为 13 mm 处时, 最优参数为管电压 150 kV, 管电流 1 400 μ A, 积分时间 2 500 ms; 第 3 组验证实验在等效厚度为 3.5 mm 处时, 最优参数为管电压 130 kV, 管电流 800 μ A, 积分时间 1 500 ms; 第 4 组验证实验在等效厚度为 2.5 mm 处时, 最优参数为管电压 125 kV, 管电流 650 μ A, 积分时间 1 250 ms。上述 4 组实验结果与回归方程预测最佳信噪比值基本一致, 误差范围为 1.4%~5.5%, 验证了模型的准确性。

参考文献:

- [1] 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): 101-110.
- [2] KUSK M W, JENSEN J M, GRAM E H, et al. Anode heel effect: does it impact image quality in digital radiography? a systematic literature review[J]. *Radiography*, 2021, 27(3): 976-981.
- [3] 王琦, 高党忠, 马小军, 等. 惯性约束聚变靶丸高精度 X 射线数字成像[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 69-78.
WANG Qi, GAO Dangzhong, MA Xiaojun, et al. High precision X-ray digital imaging of inertial confinement fusion target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 69-78. (in Chinese)
- [4] 张军辉, 赖传理, 陈小明. X 射线数字成像检测 (DR) 系统曝光曲线制作讨论[R]. 西安: 2017 远东无损检测新技术论坛, 2017.
- [5] 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.
GUO Wenming, CHENG Yuliang. Quantitative relationship between X-ray image gray value and transillumination thickness[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(2): 14-17. (in Chinese)
- [6] 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): 222-227.
HU Jingdong, LIANG Lihong, LIU Xuemei, et al. Study on transmission thickness and gray model of X-ray digital imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 222-227. (in Chinese)
- [7] 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 Wengang, LU Yunpeng, GUO Shixiong, et al. Defect detection of aluminum alloy weld based on DR digital radiographic technology[J]. *Welding and Joining*, 2021(2): 46-51, 64. (in Chinese)
- [8] 张佳祥. 钢制管道缺陷 X 射线数字成像检测技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
ZHANG Jiaxiang. Research on X-ray digital imaging detection technology of steel pipeline defects[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 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 Peijun, WANG Juntao, YAN Min, et al. Theoretical research progress of digital radiographic testing technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 13-18. (in Chinese)
- [10] 郭增, 李彦红. 基于回归正交试验的赤泥基固化剂改良粉质粘土水稳定性研究[J]. *数学的实践与认识*, 2019, 49(5): 315-320.
GUO Zeng, LI Yanhong. Study on the stability of silty clay water stabilized by red mud base curing agent based on regression orthogonal test[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2019, 49(5): 315-320. (in Chinese)
- [11] 魏慧荣, 李晓东. 搅拌机颗粒导热系数的测定[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(2): 179-183.
WEI Huirong, LI Xiaodong. Determination of thermal conductivity of mixer particles[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(2): 179-183. (in Chinese)
- [12] 孙明社, 郭小红, 王梦恕, 等. 基于二次正交试验的隧道非概率可靠度方法研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(增刊2): 105-111.
SUN Mingshe, GUO Xiaohong, WANG Mengshu, et al. Study on non probabilistic reliability method of tunnel based on quadratic orthogonal test[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(Suppl.2): 105-111. (in Chinese)
- [13] 葛宜元. 试验设计与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [14] 郭芳, 原霞, 吉梦雯, 等. 基于二次回归正交试验的连杆衬套成形质量分析[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(5): 159-163.
GUO Fang, YUAN Xia, JI Mengwen, et al. Forming quality analysis of connecting rod bushing based on quadratic regression orthogonal test[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25(5): 159-163. (in Chinese)
- [15] 刘艳, 尤齐荣, 朱红梅, 等. 电极感应气雾化法制备新型高硬度马氏体铁基合金粉末[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(6): 537-544.
LIU Yan, YOU Qishen, ZHU Hongmei, et al. Preparation of new high hardness martensite iron-based alloy powder by electrode induction gas atomization[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(6): 537-544. (in Chinese)
- [16] 马同玲, 张扬军, 王正, 等. 基于正交试验的柔性联轴器设计灵敏度分析与优化研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(2): 237-245.
MA Tonglin, ZHANG Yangjun, WANG Zheng, et al. Sensitivity analysis and optimization of flexible coupling design based on orthogonal test[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(2): 237-245. (in Chinese)
- [17] MA X, RAO Q H. Property optimization of inorganic silicon aluminum polymer based on quadratic regression and orthogonal design[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 629/630: 510-517.
- [18] 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 Kai, WANG Xiaoyong, YUAN Mengchun. Image quality control of digital ray DR imaging detection of carbon fiber wound engine shell[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2020, 50(5): 76-82. (in Chinese)

(编辑: 陈越)