

DOI: 10.7652/xjtuxb201910005

燃气轮机透平叶片数字射线检测分区 及透照参数确定方法

李兵^{1,2}, 李章兵^{1,2}, 陈磊^{1,2}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学微纳制造与测试技术国际合作联合实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统叶片数字检测方法中存在的分区不合理、检测效率低、容易漏检等问题,提出了一种新的叶片数字射线检测分区及透照参数确定方法。在叶片设计模型未知的情况下,采用近似算法获得叶片在平板探测器上的投影面积与转台转动角度的变化关系,以叶片投影面积最大时的方向作为透照方向,结合检测设备的几何参数以及焦距对透照图像质量的影响,确定了焦距。通过分析不同曝光量下平板探测器的响应情况,获取了平板探测器的线性响应灰度区间。以控制各分区透照图像的灰度值在平板探测器的线性响应灰度区间内为原则,实现了叶片的分区。所提方法可有效避免传统方法中存在的分区不合理、检测效率低、容易漏检等问题。通过实验对传统方法和所提方法进行了比较,结果表明:传统方法中分区 1 和分区 4 的部分区域灰度值过高,分区 4 和分区 5 的部分区域灰度值过低,可能造成缺陷的漏检,而所提方法不存在此问题;所提方法获得的透照图像中除分区 4 外,其他各分区的检测灵敏度均高于传统方法。

关键词: 透平叶片;数字射线;分区;透照参数

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)10-0031-09

Method for Determining Partition and Exposure Parameters of Gas Turbine Blades by Digital Radiography

LI Bing^{1,2}, LI Zhangbing^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. International Joint Research Laboratory for Micro/Nano Manufacturing and Measurement Technologies, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The traditional digital radiography methodology of defect detection has many shortcomings, such as inappropriate partition, low efficiency and missed detection. A method for determining partition and exposure parameters of gas turbine blades based on digital radiography is presented. The relationship between projection area of blades and turntable rotation under the condition that the design model is unknown is obtained by an approximation algorithm. According to the relationship, the direction of illumination for blade detection is determined to make sure that the projection area is biggest. Choosing the focal length by analyzing the effect of focus length on the quality of radiographic images and the geometric parameters of radiographic equipment, the gray scale interval of linear response through the analysis of the response of flat panel detectors on different exposure is found out for determining the partitions of blades to make

收稿日期: 2019-04-18。 作者简介: 李兵(1965—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家航空发动机及燃气轮机重大专项资助项目(2017-VII-0008);国家自然科学基金资助项目(51421004)。

网络出版时间: 2019-07-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190706.1116.006.html>

sure that the gray intervals of the radiographic images are in the gray scale interval of linear response, thus the inappropriate partition, low efficiency and the missed detection in the traditional method are avoided. The comparison experiments show that the gray value of partition 1 and 4 in the traditional method is too high and that of partition 4 and 5 is too low, which often leads to a missed detection, and the detection sensitivity of this method is higher than that of the traditional method except partition 4.

Keywords: turbine blades; digital radiography; partition; exposure parameters

燃气轮机是继蒸汽轮机和内燃机之后的新一代动力装置,是一个国家综合实力的体现,对保护国防与能源安全、改善能源结构和实现环境可持续发展具有重要意义^[1-4]。

燃气轮机主要由压气机、燃烧室和透平 3 大部分组成。其工作原理为压气机把空气压缩到高压状态,与喷入的燃料在燃烧室混合燃烧,形成高温高压燃气,推动燃气透平旋转而做功。在这个过程中,燃气轮机透平叶片(以下简称叶片)不仅承受着拉力、扭力、扭矩、气体压力和振动冲击等各种复杂的应力作用,还要承受着高温高压介质的腐蚀作用。叶片一般采用精密铸造的方法制成,在制造和服役过程中如果出现裂纹、孔洞等各种缺陷,会导致叶片的机械性能达不到要求,发生断裂事故^[5-6],给整个机组的安全运行带来重大安全隐患^[7]。据安联公司统计,叶片失效事故的发生率占燃气轮机总事故率的比重高达 42%^[8-9],故需要对叶片进行无损检测,及时发现存在缺陷的叶片。

常用的无损检测方法主要包括超声检测、渗透检测、涡流检测、磁粉检测、射线检测等^[9-11]。超声检测无法检测表面形状复杂的零件;渗透检测只能检测表面及近表面缺陷;涡流检测只能检测导电材料且不适用于形状复杂的材料;磁粉检测只适用于检测铁磁材料的表面缺陷;射线检测几乎适用于所有材料,且对零件几何形状无严格要求。

行业中通常采用射线检测的方法对叶片进行检测。射线检测主要包括射线照相检测、工业 CT (ICT)和数字射线检测(DR)。射线照相检测是利用穿透被检物体后的射线对胶片感光,然后将胶片进行暗室处理后,通过检测人员的肉眼对物体中的缺陷进行检测,容易误判和漏检^[12]。工业 CT 技术通过断层扫描和图像重建,可以直观地显示物体缺陷的三维信息,但是其检测效率低,检测成本过高,难以广泛用于叶片检测;数字射线检测利用平板探测器采集穿透被检物体后的射线,然后在计算机上显示被检物体的透照灰度图,通过计算机图像处理,

对被检物体中缺陷进行分析,检测效率高、精度高、成本低,故本文选择数字射线检测的方法对叶片进行无损检测,检测示意图见图 1。

由于叶片尺寸大于平板探测器尺寸,且叶片的厚度分布不均,无法一次透照获得整个叶片的有效透照图像,故需要对叶片的不同部位采用不同的透照参数进行分区透照。燃气轮机叶片尚未实现国产化,往往无法直接获得叶片的设计模型。实际工程中使用的传统的叶片分区检测方法是,基于人工经验通过多次试验后确定一组可行的分区检测方案,缺乏严格的理论依据,随意性较大。针对这一关键问题,本文依据射线衰减理论、叶片厚度分布以及平板探测器成像性能,提出了一种确定叶片分区以及各分区的透照参数的方法,可有效提高透照图像的质量,提高检测精度。

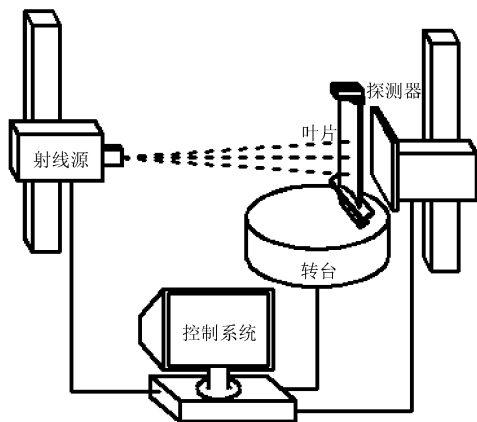


图 1 数字射线检测示意图

1 线性响应灰度区间的获取

平板探测器响应特性(即平板探测器的输出灰度值)随着输入的 X 射线强度变化的关系由响应不足区、线性响应区和过渡响应区 3 部分组成^[13]。为了便于后期对缺陷进行定量分析,必须控制叶片透照图像的灰度值在平板探测器的线性响应区间内,故需要获取平板探测器的线性响应灰度区间。

X 射线管通过高能电子流撞击靶材发射 X 射

线,其强度计算公式为

$$I = KZiV^2 \tag{1}$$

式中: K 为比例系数, $K=1.1\times 10^{-6}\sim 1.4\times 10^{-6}$; Z 为靶材的原子序数; i 为 X 射线管的管电流; V 为 X 射线管的管电压。

由式(1)可知,X 射线强度与管电流成正比,与管电压的平方成正比,调节管电流和管电压均可改变输入平板探测器的 X 射线强度。当管电压改变时,所产生的 X 射线的波长也会随之改变,从而改变 X 射线的穿透能力。当通过调节管电压大小制作平板探测器响应曲线时,会因为射线穿透能力的改变而引入误差,故本文选用调节管电流大小制作平板探测器的响应曲线。

本文所使用数字射线检测系统如图 2 所示,VIDISCO 平板探测器如图 3 所示。



图 2 数字射线检测系统



图 3 VIDISCO 平板探测器

X 射线管的管电压范围为 15~225 kV,本文所采用的焦点尺寸为 1 mm。平板探测器的成像区域尺寸为 222 mm×222 mm,其动态范围为 14 bit,像素尺寸为 0.143 mm。

由于平板探测器内部的电子元件表面存在漏电

流,使得在没有射线照射的情况下平板探测器仍然有一定大小的信号输出。由漏电流所引起的信号输出即为暗场噪声,此时平板探测器采集到的输出图像即为暗场图像。暗场噪声的大小与温度有关,随着平板探测器预热时间的增加,在温度趋于稳定的同时暗场噪声也将趋于稳定。由于暗场噪声对检测无意义,因此需要对获得的透照图像进行暗场校正。

将平板探测器预热 50 min 后,每隔 1 min 采集 1 幅暗场图像,将采集到的 10 幅暗场图像进行平均,获得暗场校正图像 f_d 。由于暗场噪声属于加性噪声,因此直接将所获得的透照图像减去暗场校正图像 f_d ,即可去除暗场噪声。

将焦距设为 1 200 mm,曝光时间为 1 s,管电压分别为 35、45、55 和 65 kV,管电流从 0.1 mA 增大至 7.9 mA,步距为 0.2 mA,对平板探测器进行透照。对所获透照图像进行暗场校正后,求取各幅透照图像的灰度均值,获得平板探测器的响应灰度值随管电流的变化关系如图 4 所示。

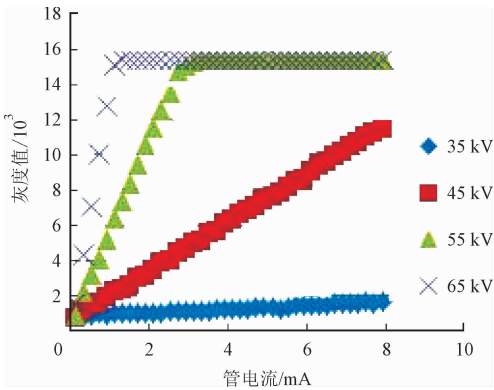


图 4 平板探测器响应灰度值随管电流的变化关系

在图 4 所示的不同灰度区间内进行线性拟合,获得暗场校正后,平板探测器的线性响应灰度区间约为 1 000~14 000。在 1 000~14 000 灰度区间内的线性拟合公式分别为如下。

当管电压为 35 kV 时,拟合公式为

$$y = 105.53x + 819, \quad R^2 = 0.997 \, 7 \tag{2}$$

45 kV 时,拟合公式为

$$y = 1368.3x + 652, \quad R^2 = 0.999 \, 5 \tag{3}$$

55 kV 时,拟合公式为

$$y = 5231.5x + 546, \quad R^2 = 0.999 \, 7 \tag{4}$$

65 kV 时,拟合公式为

$$y = 14103x + 99.5, \quad R^2 = 0.999 \, 8 \tag{5}$$

由式(2)~(5)可知,在 1 000~14 000 灰度区间内,平板探测器响应曲线的线性度良好。

2 焦距与透照方向的确定

在对叶片分区前应首先确定叶片在透照系统的摆放位置(焦距)以及摆放角度(透照方向),然后根据叶身在透照方向下的厚度分布,对其进行分区。

2.1 透照方向的确定

本文以叶身在平板探测器上的投影面积最大时的方向作为叶片的透照方向,从而减少透照图像中的特征重叠。由于无法获得叶片的设计模型,本文采用近似算法计算叶身在平板探测器上的投影面积。本文所使用的叶片如图5所示,选择过渡平台侧面与平板探测器的夹角作为透照方向的定位基准,叶身高度方向的尺寸如图6所示。

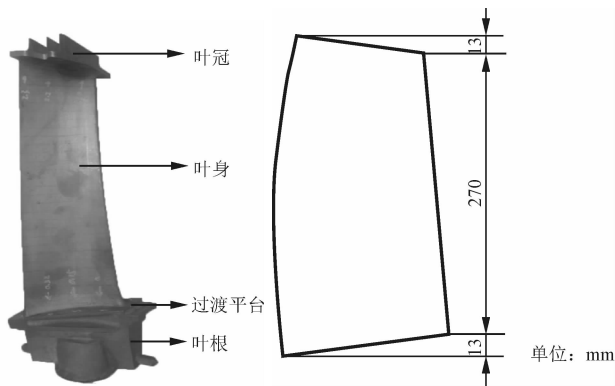


图5 燃气轮机透平叶片 图6 叶身高度方向尺寸

将叶片叶身沿垂直方向分为29个区域,其中最上和最下两个区域高度为13 mm,中间27个区域高度均为10 mm,如图7所示。图中 $l_1 \sim l_{28}$ 为29个分区的分界弦在平板探测器上的投影长度。

将上述29个区域在平板探测器上的投影近似看作三角形和梯形,则叶身在平板探测器上的投影面积 S 如下

$$S = \frac{1}{2}(13l_1 + 13l_{28}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{27} 10(l_i + l_{i+1}) \quad (6)$$

式中: l_i 为第 i 条分界弦在平板探测器上的投影长度。

将叶片置于转台上,测量初始位置过渡平台侧面与平板探测器的夹角为 171.1° ,各分界弦长为 L_i ,其与平板探测器的夹角为 θ_i ,则 $l_i = L_i \cos \theta_i$,将其代入式(6),可获得叶身在平板探测器上的投影面积如下

$$S = \frac{13}{2}(L_1 \cos \theta_1 + L_{28} \cos \theta_{28}) + 5 \sum_{i=1}^{27} (L_i \cos \theta_i + L_{i+1} \cos \theta_{i+1}) \quad (7)$$

当转台顺时针转过角度 α 时,平板探测器相对于转台的位置由 $A_1 B_1$ 变化到 $A_2 B_2$ 。转动前,叶片

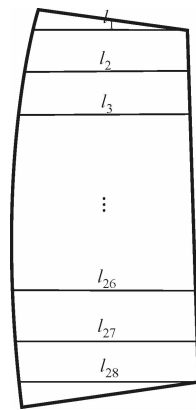


图7 叶身分割后在平板探测器上的投影

CD 与平板探测器 $A_1 B_1$ 所成角度为 $\angle B_1 O_1 D$;转动后,叶片 CD 与平板探测器 $A_2 B_2$ 所成角度为 $\angle B_2 O_2 D = \angle B'_2 O_1 D = \angle B'_2 O_1 B_1 + \angle B_1 O_1 D = \alpha + \angle B_1 O_1 D$,故叶片上任意两点连线与平板探测器的夹角也增加 α ,如图8所示。此时第 i 条分界弦与平板探测器的夹角为 $\theta_i + \alpha$ 。

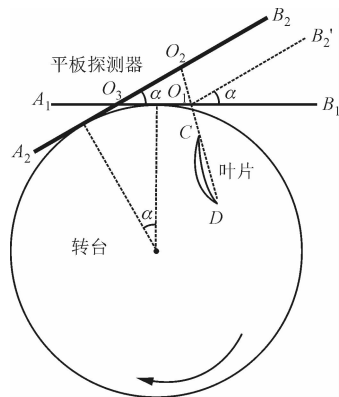


图8 转台转动示意图

此时叶身在平板探测器上的投影面积如下

$$S(\alpha) = \frac{13}{2}[L_1 \cos(\theta_1 + \alpha) + L_{28} \cos(\theta_{28} + \alpha)] +$$

$$5 \sum_{i=1}^{27} [L_i \cos(\theta_i + \alpha) + L_{i+1} \cos(\theta_{i+1} + \alpha)] \quad (8)$$

绘制函数 $S(\alpha)$ 如图9所示,其中正值表示叶背面向平板探测器,负值表示叶盆面向平板探测器。

由图9可知:当转台转过角度 133.5° 时,叶身投影面积取最大负值,此时过渡平台侧面与平板探测器夹角为 304.6° ;当转台转过角度 313.5° 时,叶身投影面积取最大正值,此时过渡平台侧面与平板探测器夹角为 124.6° 。为减小叶片到平板探测器的距离,从而减小透照图像中的几何不清晰度,选择叶身投影面积取最大正值时的方向作为叶片的透照方向。

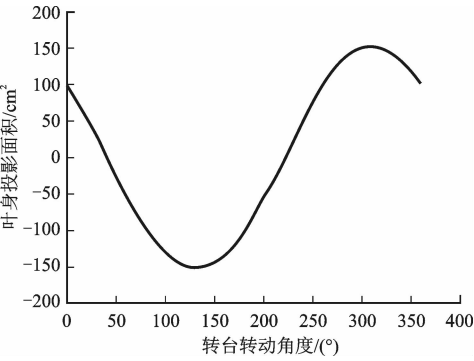


图 9 叶身投影面积随转台转动角度变化曲线

2.2 焦距的确定

由于焦点几何尺寸的原因,被透照工件轮廓或内部缺陷边缘在透照图像上的影像边界部分会有一些的半影区,这个半影区的宽度即几何不清晰度 U_g ,如图 10 所示。几何不清晰度越大,所获透照图像的清晰度越低,图像质量越差^[14]。

几何不清晰度 U_g 的计算公式如下

$$U_g = \frac{db}{F-b}$$
 (9)

式中: d 为射线源焦点直径; F 为焦距; b 为缺陷到平板探测器的距离。

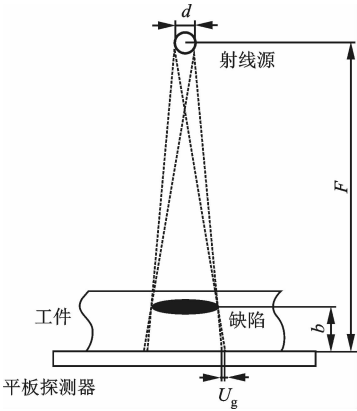


图 10 几何不清晰度示意图

增大焦距可以有效减小数字射线检测的几何不清晰度,从而提高所获得透照灰度图像的质量。当几何不清晰度减小到平板探测器的分辨率(像素尺寸)时,几何不清晰度将不再对透照灰度图像的质量产生影响,故选择几何不清晰度等于平板探测器像素尺寸 a 时的焦距为最小焦距,即

$$F_{\min} = \frac{db_{\max}}{a} + b_{\max}$$
 (10)

测得叶身最远点与平板探测器距离为 103 mm,即 $b_{\max}=103\text{ mm}$;平板探测器的像素尺寸为 $143\text{ }\mu\text{m}\times 143\text{ }\mu\text{m}$,即 $a=0.143\text{ mm}$;射线源焦点直径为 1 mm,即 $d=1\text{ mm}$;最终可求得 $F_{\min}=824\text{ mm}$ 。

平板探测器成像区域为 $222\text{ mm}\times 222\text{ mm}$,其对角线长度 $c=314\text{ mm}$ 。X 射线需要覆盖平板探测器成像区域,X 射线管的入射角 β 为 20° ,发射出的 X 射线应覆盖整个平板探测器成像区域,即

$$F\tan\frac{\beta}{2}\geqslant\frac{\sqrt{222^2+222^2}}{2}=157$$
 (11)

考虑到在透照过程中,X 射线管与平板探测器存在位置误差,故取

$$F\tan\frac{\beta}{2}\geqslant 200$$
 (12)

由式(12)求得

$$F\geqslant 1\,135\text{ mm}$$
 (13)

当焦距增加时,射线的穿透能力会随之降低,从而需要增加管电压,而管电压的增加会导致透照图像的对比度降低^[15]。因此,在满足条件的情况下,应尽量选择较小的焦距,故选择焦距为 1 200 mm。

3 叶片分区

由于叶片尺寸大于平板探测器尺寸,且叶片的厚度分布不均,无法一次透照获得整个叶片的有效透照图像,故需要对叶片的不同部位采用不同的透照参数进行分区透照。本文通过分析叶片厚度分布规律,以控制不同厚度分区的透照图像灰度区间在平板探测器线性响应灰度区间内,以便于后续对缺陷进行定量分析为原则,对叶片进行分区。由于暗场校正后平板探测器的线性响应灰度区间为 1 000~14 000,考虑缺陷的灰度值可能高于或者低于背景^[16],控制暗场校正后各分区的灰度值范围为 3 000~12 000。

将叶片置于转台,使过渡平台基准面与平板探测器夹角为 55.4° ,焦距设为 1 200 mm。由于 X 射线的穿透能力取决于管电压,因此保持管电流为 0.6 mA,透照时间为 1 s,以 5 kV 为步距调节管电压,使其从 15 kV 逐步增加至 225 kV 对叶片进行透照。透照时叶片两侧需放置铅板以减少散射线的干扰。

以 95 kV 透照图像为例,对图像进行暗场校正后,检测铅板位置以及叶片角点坐标,提取各幅透照图像中的叶身区域,如图 11 所示,然后提取叶身图像中灰度值在 3 000~12 000 的有效区域,如图 12 所示。

由于管电压越高,透照图像的对比度越低,因此在满足条件的情况下,应尽量选择较低的管电压,故按照叶片厚度从小到大对叶片进行分区。

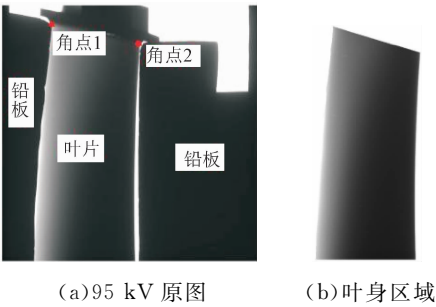


图 11 提取叶身区域透照图像

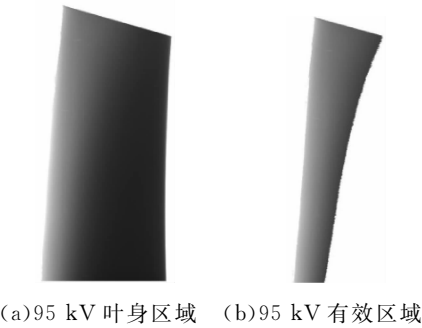


图 12 提取叶身图像中的有效区域

选择有效区域包含叶身左侧边界(厚度最小)且面积最大时的情况作为叶片的分区 1,通过分析比较,确定 95 kV 透照图像所对应的有效区域为分区 1。选择有效区域无缝衔接分区 1 且面积最大的情况,作为分区 2,通过分析比较,确定 125 kV 透照图像所对应的有效区域为分区 2。同理,可获得 150 kV 透照图像所对应的有效区域为分区 3,最终获得叶片上半部分区如图 13a 所示。

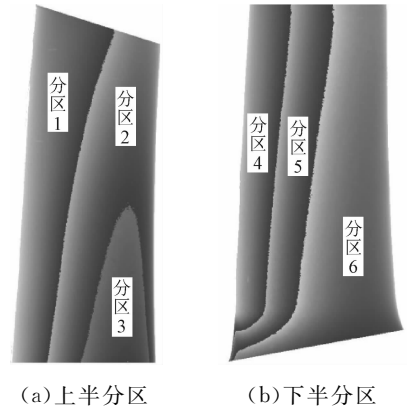


图 13 叶片上、下部分区分区情况

将 X 射线机和平板探测器同步下移 134.8 mm,对叶片下半部进行透照,同理可获得叶片下半部的分区如图 13b 所示。其中分区 4 所对应的管电压为 90 kV,分区 5 所对应的管电压为 120 kV,分区 6 所对应的管电压为 180 kV。

由于对叶片下半部进行透照时,X 射线机与平板探测器同步向下移动了 134.8 mm,即 943 像素尺寸,则上半部透照图像与下半部透照图像在高度方向上相差 943 像素,可实现叶片上下半部的拼接,从而获得叶片的完整分区如图 14 所示。其透照参数如表 1 所示。

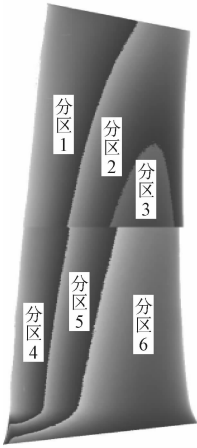


图 14 获得叶片的完整分区情况

表 1 叶片分区时的透照参数

焦距 /mm	透照角度 /(°)	透照时间 /s	管电流 /mA	分区	管电压 /kV
1 200	55.4	1	0.6	1	95
				2	125
				3	150
				4	90
				5	120
				6	180

4 图像质量对比

传统叶片分区检测方法所获得的叶片分区方案如图 15 所示,其采用铅丝,按照水平和竖直方向,将叶片分为 6 个区域。传统方法中各分区的透照参数如表 2 所示^[17-18],通过两次透照,对所获得的两幅透照图像求平均,获得最终透照图像。由于传统方法中未对焦距及透照方向作规定,在后续实验中,对传统方法同样采用本文所确定的焦距及透照方向。

传统方法具有如下缺点:

- (1)利用铅丝作为叶片分区的标记,在透照图像时造成了遮挡,会导致被遮挡区域缺陷的漏检;
- (2)每次检测前均需布置铅丝,降低了检测效率;
- (3)铅丝为水平或垂直方向,都不符合叶身的厚度变化,分区不合理。

本文方法可有效避免上述问题。

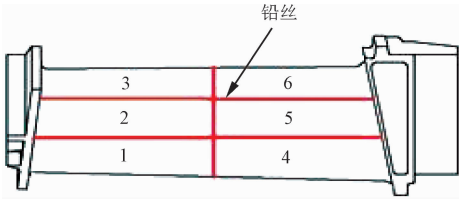


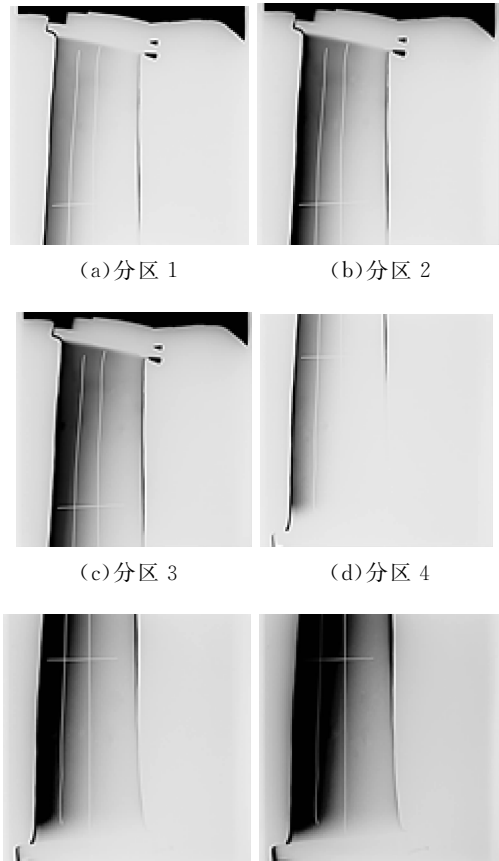
图 15 传统叶片分区方案

表 2 传统方法中叶片各分区透照参数

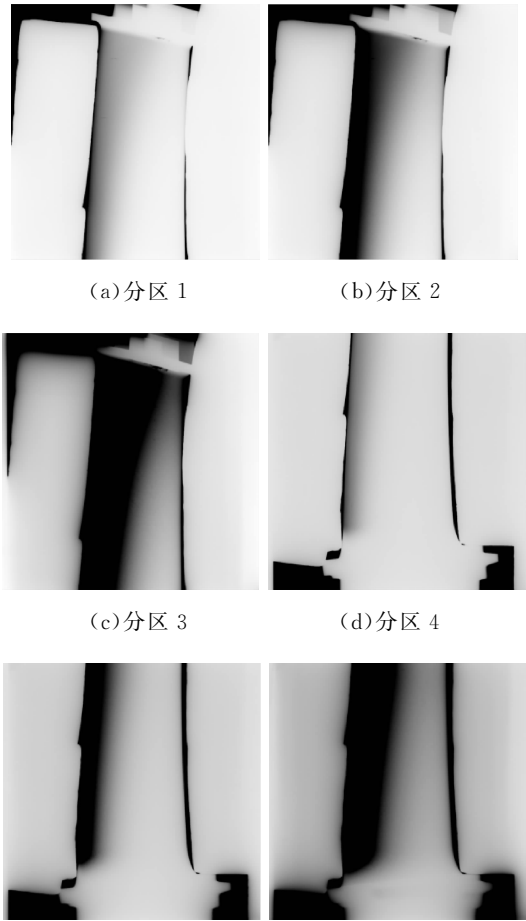
分区	管电压/kV	管电流/mA	透照时间/s
1	100	0.6	1, 4
2	125	0.5	1, 4
3	150	0.3	1, 2
4	100	0.6	1, 1
5	180	0.4	2, 6
6	200	0.6	1, 3

注:每个分区均透照两次取平均,获得最终透照图像。

传统方法所获得的叶片各分区透照图像如图 16 所示。为更加清晰地看到图像中的铅丝(高亮部分),对图像进行了灰度反转(对图像灰度区间进行线性取反)。本文方法所获得的叶片各分区透照图像(灰度反转后)如图 17 所示。



(e)分区 5 (f)分区 6
图 16 传统方法所获的透照图像



(e)分区 5 (f)分区 6
图 17 本文方法所获的透照图像

分析暗场校正后传统方法和本文方法所获得透照图像中各个分区的灰度区间如表 3 所示。

表 3 两种方法所获得透照图像各分区的灰度值区间

分区	灰度值区间	
	本文方法	传统方法
1	3 000~12 000	4 543~15 268
2	3 000~12 000	2 837~10 426
3	3 000~6 648	3 693~7 706
4	3 000~12 000	1 478~15 383
5	3 000~12 000	1 893~12 521
6	3 000~11 541	5 886~13 785

由表 3 可知,传统方法所获得的透照图像中部分区域的灰度值过高,如分区 1 和分区 4 的最高灰度值分别达到了 15 268 和 15 383,部分区域灰度值过低,分区 4 和分区 5 的最低灰度值为 1 478 和 1 893。当上述灰度异常区域出现缺陷时,缺陷的灰度值将超出平板探测的线性响应灰度区间,甚至超出平板探测器的响应范围,导致无法对缺陷进行定

量分析,甚至漏检缺陷。本文方法所获得的透照图像灰度值均在 3 000~12 000 范围内,可有效避免上述问题。

射线检测能够检测出细小缺陷或者细节的能力称为射线检测灵敏度,射线检测灵敏度通常用像质计来评测。透照图像中可识别金属丝的线号越小,透照图像的检测灵敏度越高;当可识别的线号相同时,可识别的金属丝长度越长,透照图像的检测灵敏度越高。在透照图像中能够清晰地看到长度大于 10 mm 的连续金属丝影像时,认为该金属丝是可识别的^[19]。

本文所使用的 ASTM 1A 和 ASTM 1B 像质计分别各有 6 根金属丝,其线号和线径如表 4 所示。

表 4 本文所使用像质计的线号和线径

ASTM 1A		ASTM 1B	
线号	线径/mm	线号	线径/mm
1	0.08	6	0.25
2	0.10	7	0.33
3	0.13	8	0.41
4	0.16	9	0.51
5	0.20	10	0.64
6	0.25	11	0.81

在传统方法获得的叶片 1、2、4、5 分区和 3、6 分区上分别放置 ASTM 1A 和 ASTM 1B 像质计,同时采用传统方法和本文方法确定透照参数进行透照,获得透照图像中的像质计部分如图 18 和 19 所示。

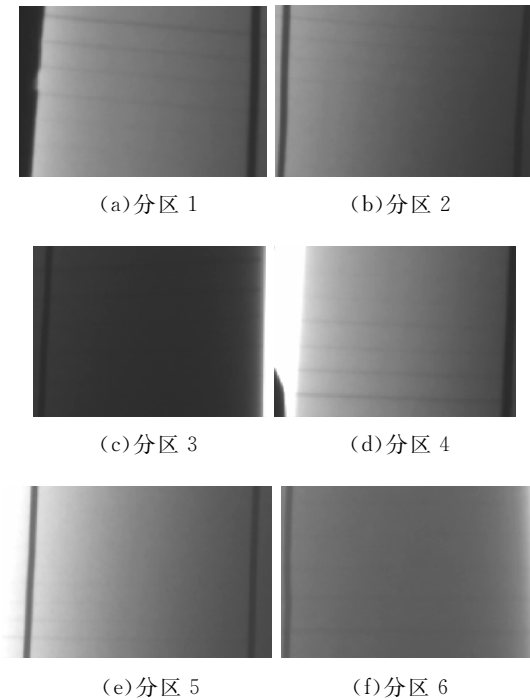


图 18 传统方法各分区中像质计部分的透照图像

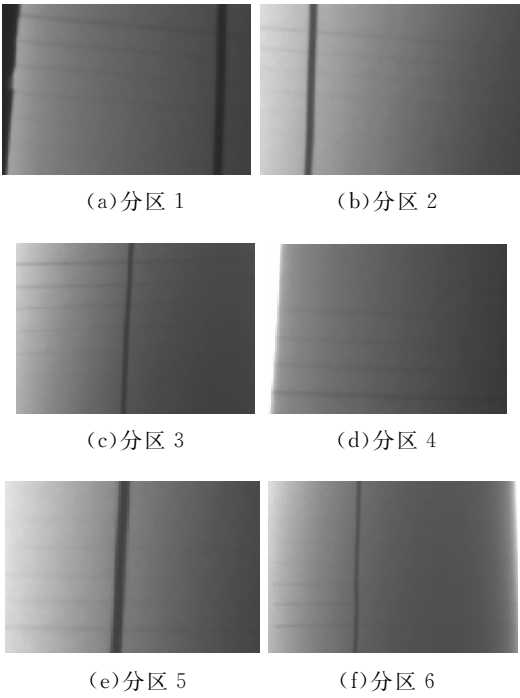


图 19 本文方法各分区中像质计部分的透照图像

观察获得传统方法和本文方法在各个分区中可识别的金属丝的线号及长度如表 5 所示。

表 5 检测时可看清的像质计线号及长度

分区	传统方法		本文方法	
	线号	长度/mm	线号	长度/mm
1	3	14.4	3	18.1
2	3	10.4	3	14.8
3	7	11.6	7	15.9
4	3	13.0	3	12.4
5	5	13.0	3	13.6
6	10	13.9	9	15.0

由表 5 可知,本文方法所获透照图像中除分区 4 的检测灵敏度略低于传统方法外,其他分区的检测灵敏度均高于传统方法,其中分区 5 和分区 6 的检测灵敏度得到明显提高,可识别的像质计线号分别从 5 号和 10 号提高到了 3 号和 9 号。

综上所述,相较于传统方法,本文方法所确定的分区更加合理,检测效率更高,所获透照图像的质量更高,可有效避免传统方法中的缺陷漏检问题。

5 结 论

本文针对燃气轮机透平叶片检测中所存在的分区及参数选择不规范的问题,依据射线衰减理论、叶片厚度分布以及平板探测器成像性能,系统地制定了一套确定叶片分区以及各分区透照参数的方法。

首先采用近似算法,在没有设计模型的情况下,确定了叶片的透照方向,避免了因叶片随意摆放而引起的各个分区透照厚度的改变;然后通过分析焦距对透照图像质量的影响,并结合 X 射线机和平板探测器的几何参数,确定了焦距;最后依据平板探测器的成像性能以及叶片的厚度分布,通过分析不同透照参数下,叶片透照图像中的有效区域,确定了叶片的分区以及各个分区的透照参数。该方法有效避免了传统方法中使用铅丝或者铅点对各分区标记而发生的漏检问题,且叶片的分区更加符合叶片的厚度分布,所获得的透照图像的质量更高。

参考文献:

- [1] 李孝堂. 燃气轮机的发展及中国的困局 [J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 1-7.
LI Xiaotang. Development of gas turbine and dilemma in China [J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 1-7.
- [2] 尹喜庆. 试论燃气轮机的发展及应用 [J]. 工程技术, 2016(11): 00302-00302.
YI Xiqing. Discuss of development and applications of gas turbine [J]. Engineering Technology, 2016(11): 00302-00302.
- [3] 刘华强, 汪晨晖. 燃气轮机在我国应用情况分析 [J]. 中国新技术新产品, 2012(6): 149-149.
LIU Huaqiang, WANG Chenhui. Analysis of gas turbine application in China [J]. China New Technologies and Products, 2012(6): 149-149.
- [4] 范学领, 李定骏, 吕伯文, 等. 国之重器, 十载砥砺: 重型燃气轮机制造基础研究进展 [J]. 中国基础科学, 2018, 20(2): 32-40.
FAN Xueling, LI Dingjun, LÜ Bowen, et al. Advances in the fundamentals of the manufacture of industrial gas turbine [J]. China Basic Science, 2018, 20(2): 32-40.
- [5] 李永君, 肖俊峰. 燃气轮机透平叶片射线 CR 检测技术研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(9): 985-987.
LI Yongjun, XIAO Junfeng. Inspection of gas turbine blade by computer radiography [J]. Special-Cast and Non-Ferrous Alloys, 2018, 38(9): 985-987.
- [6] 朱鸥. 航空发动机用单晶叶片铸造缺陷解读 [J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 986-989.
ZHU Ou. Interpretation of casting defects in single-crystal blades for aeroengines [J]. Foundry Technol-
- gy, 2017, 38(5): 986-989.
- [7] 李世涛, 汪毅, 蔡红生, 等. 一种汽轮机叶片超声导波检测方法: CN104535648A [P]. 2015-04-22.
- [8] MISHRA R K, THOMAS J, SRINIVASAN K, et al. Fatigue failure of LP compressor blade in an aero gas turbine engine [J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2014, 14(3): 296-302.
- [9] BORGUET S, LÉONARD O. Comparison of adaptive filters for gas turbine performance monitoring [J]. Journal of Computational & Applied Mathematics, 2010, 234(7): 2202-2212.
- [10] VILAR R, ZAPATA J, RAMÓN R. An automatic system of classification of weld defects in radiographic images [J]. NDT&E International, 2009, 42(5): 467-476.
- [11] DANG C, GAO J, WANG Z, et al. A novel method for detecting weld defects accurately and reliably in radiographic images [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2016, 58(1): 28-34.
- [12] 钱蓉晖. 自动识别 X 射线底片缺陷的图象处理技术 [J]. 无损检测, 1999, 21(6): 251-253, 262.
QIAN Ronghui. Image processing technique for automatic discrimination of defects on films [J]. Nondestructive Testing, 1999, 21(6): 251-253, 262.
- [13] 曾亚斌. 平板探测器数据采集及成像性能测试方法研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015: 50-51.
- [14] 陶亮, 李振华, 左凯, 等. X 射线数字成像最优透照参数的研究 [C]//2011 International Conference on Future Computer Science and Application. 北京: 智能信息技术应用学会, 2011: 40-44.
- [15] 夏纪真. 工业无损检测技术 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2014: 214.
- [16] 吴清, 赵歆波. 基于阈值分割的叶片缺陷检测技术 [J]. 机床与液压, 2006(9): 178-180.
WU Qing, ZHAO Xinbo. Detection of vane defects based on Otsu threshold [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(9): 178-180.
- [17] 王曰根, 李兵. 燃气轮机高温叶片内部缺陷的数字射线检测关键技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2016: 14-16.
- [18] 周浩. 基于数字射线的燃气轮机叶片内部缺陷 3D 检测技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018: 14-15.
- [19] 国家能源局. 承压设备无损检测: NB/T 47013—2015 [S]. 北京: 新华出版社, 2015.

(编辑 杜秀杰)