

文章编号 1004-924X(2009)05-1187-09

# 航空发动机篦齿盘表面裂纹的视觉检测

孙慧贤, 张玉华, 罗飞路

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 基于内窥镜的视觉检测技术在现代航空发动机故障诊断中发挥着重要的作用。针对航空发动机篦齿盘均压孔上产生的表面裂纹, 采用基于工业视频内窥镜的孔探技术对其进行自动视觉检测。在对均压孔裂纹形成原因和裂纹形态进行分析的基础上, 提出一种基于定位-识别模型的盘孔表面裂纹检测方法。该方法采用一种新的模糊快速 Hough 算法检测均压孔的圆形边界, 对盘孔进行定位; 然后根据裂纹分布情况确定感兴趣区域, 并对该区域内的图像进行二值化和细化; 最后采用链码分析实现裂纹识别。在实验中, 对比了模糊快速 Hough 变换、标准 Hough 变换和随机 Hough 变换检测盘孔边界的效果, 结果表明模糊快速 Hough 变换可以快速准确地识别出圆形边界, 并对盘孔进行定位。采用上述方法对 80 幅均压孔图像进行裂纹检测试验, 结果表明检测的准确率可达 91.2%。

**关键词:** 视觉检测; 工业视频内窥镜; 篦齿盘均压孔; 模糊快速 Hough 变换; 裂纹识别

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A

## Visual inspection of surface crack on labyrinth disc in aeroengine

SUN Hui-xian, ZHANG Yu-hua, LUO Fei-lu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The visual inspection based on an endoscope has played an important role in modern fault diagnosis of aeronautic engines. An inspection approach to surface cracks of the aperture on an aero-engine labyrinth disc is studied based on the industrial videoscope in this paper. After analysis on the appearance reasons of the cracks and their characteristics, an automatic recognition method for surface cracks is proposed based on a localization-recognition model and a novel fuzzy fast Hough transform is presented to detect the circular contour to locate the aperture. Then, an interesting region is defined around the aperture, and the image in the interesting region is binarized by a threshold and the binary image is thinned by a morphological method. Moreover, the chain codes in the image are analyzed to recognize the crack. The results of circular contour detection by the proposed fuzzy fast Hough Transform are compared with those by the Standard Hough transform and randomized hough Transform, respectively. The results show that the fuzzy fast Hough transform can detect the contour and can locate the aperture quickly and accurately. A crack detection experiment is carried out for 80 aperture images, and the results indicate that the detecting accuracy is 91.2%.

**Key words:** visual inspection; industrial videoscope; aperture of labyrinth disc; fuzzy fast Hough transform; crack recognition

收稿日期: 2009-02-10; 修订日期: 2008-12-25.

基金项目: “十一五”国防预研项目 (No. 51317030106)

## 1 引言

航空发动机篦齿盘上的均压孔是主要受力部位,在使用过程中易产生沿孔周边分布的表面裂纹,对发动机的正常使用和飞机的安全飞行构成严重威胁。因而,如何实现在不拆卸发动机情况下,有效地对其进行无损检测就变得至关重要。由于待测部位处于飞机内部,检测探头必须经过飞机外壳、发动机外壳等夹层的狭小空间,使得超声、射线、渗透等无损检测方法难以实施对均压孔的原位检测。目前主要采用的检测方法是人工目视检测和涡流检测<sup>[1]</sup>。人工目视检测法工作效率比较低,而且故障诊断的准确性受到检查员操作的正确程度和判断力的限制,容易产生由于主观因素造成的误差。由于发动机的密封结构和篦齿盘位置的复杂性,在采用涡流检测时必须采用工业视频内窥镜配合,提供照明同时延伸视觉引导检测人员找到均压孔的位置,操作复杂、费时费力。

为了满足航空发动机检测的要求,提高检测的可靠性,对于篦齿盘的检测需要提出新的方法。近年来,由于各种检测需求的推动,工业视频内窥镜的性能得到了很大的提高,先进的视频内窥镜可以提供明亮、高分辨率图像,将检测图像显示在监视器上,同时进行存储和处理。因此,基于内窥镜的孔探技术已经成为监测发动机运行状态和诊断其内部表面损伤的有效手段之一。与此同时,随着数字图像处理技术和计算机视觉技术的推广应用,智能型发动机视觉检测技术已成为发动机原位无损检测研究的热点<sup>[2]</sup>。李长有等研究了基于孔探技术的发动机叶片损伤检测,依据损伤频谱能量检测并估计发动机叶片的损伤<sup>[3]</sup>。罗云林等研究了基于小波变换和立体视觉的发动机内窥检测,利用双目立体视觉技术,对某发动机腔体内表面的腐蚀进行三维重建<sup>[4]</sup>。但是,目前未见过关于篦齿盘表面裂纹的视觉检测方法研究的报道。

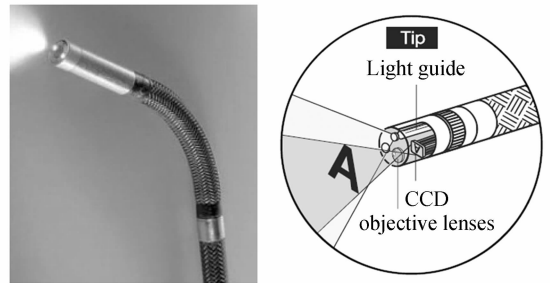
本文在分析均压孔裂纹形成原因和裂纹形态的基础上,提出一种基于工业视频内窥镜的盘孔表面裂纹的孔探检测方法。首先采用一种新的模糊快速 Hough 变换检测均压孔的圆形边界,实现盘孔定位。在此基础上,确定图像的感兴趣区域,

然后对二值化后的图像进行细化,对感兴趣区域内的图像进行链码分析,实现裂纹识别。本文工作对于航空发动机的原位无损检测具有一定的理论意义和工程实用价值。

## 2 孔探检测与裂纹特征

### 2.1 孔探检测

对篦齿盘均压孔进行原位检测时,探头需要经过飞机蒙皮、发动机外壳以及外涵道等预留的检测孔,空间狭小,难度较大,因此需要探头不仅能获得明亮、高分辨率的图像,同时要求探头能够灵活控制。在实际检测中,采用了韦林公司的 XL PRO Plus 型便携式工业视频内窥镜,图 1 所示为内窥镜整探头端部外貌图和构造图。探头直径为 6.1 mm,有效工作长度为 2.5 m。采用 1/6 inch SUPER HAD CCD 摄像头,采集到的图像的分辨率为  $768 \times 576$ 。探头视向为前视型,视野  $100^\circ$ ,焦距为  $5 \sim 120$  mm。探头可以  $360^\circ$  全方位连续导向,导向弯曲度  $< 120^\circ$ ,操作灵活、方便。照明采用 24 W 高强度弧光灯提供光源,输出强度为 1 850 lm,色温为 5 500 K。可以通过 PC 机控制内窥镜,对检测图像进行存储、管理、处理等。



(a) 探头端部外貌

(b) 探头端部结构

(a) Appearance of probe tip (b) Structure of probe tip

图 1 XL PRO Plus 型工业视频内窥镜探头端部

Fig. 1 Probe tip of XL PRO Plus industrial videoscope

### 2.2 裂纹特征

篦齿盘的主要作用是防止经过高压压气机后的空气泄漏到压气机的卸荷腔,是发动机的关键零件。该盘由多个螺栓拉紧,盘本身的径应力较高(900 kPa)。篦齿盘外圆周上有 32 个均压孔,孔径均为 5 mm。由于设计结构和在使用过程中振动应力导致盘均压孔处易产生裂纹。图 2 所示

为篦齿盘拆分后的端面图,图中黑色箭头所指位置为均压孔位置。

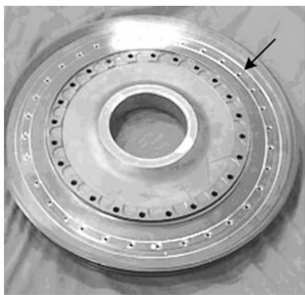
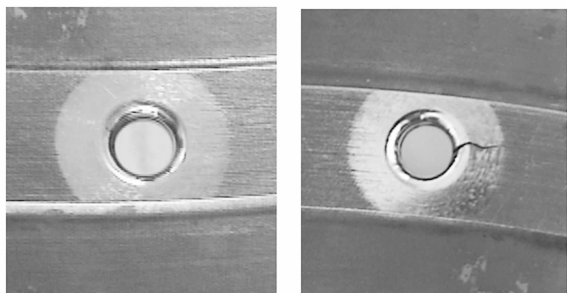


图2 篦齿盘实物图片  
Fig. 2 Labyrinth disc

在实际操作中,无法保证内窥镜与盘面完全垂直,因此内窥镜图像中的均压孔边界一般不是一个规则的圆。为了增强均压孔抗疲劳强度,孔的边缘被处理为光滑的圆弧形,而且在孔的周围进行镀铬处理,镀铬后的均压孔周围发亮,因此,在内窥镜图像中孔的周围易出现“反光”现象。图3所示为两幅典型的均压孔孔探图像,其中图3(a)中孔周没有缺陷,(b)中孔周存在裂纹。通过对篦齿盘均压孔裂纹的形貌特征及受力情况进行分析发现:裂纹都起始于均压孔,延伸方向与应力方向垂直,即裂纹走向垂直于孔周;裂纹的深度由浅逐渐加深至裂透,长度逐渐加长,裂纹长度一般在9~18 mm范围内。



(a)中孔周无缺陷 (b)中孔周有裂纹  
(a) Without crack (b) With crack

图3 典型均压孔孔探图像

Fig. 3 Typical images of disc aperture

### 3 表面裂纹检测算法

采用数字图像处理技术对盘孔表面裂纹进

行检测,算法分为盘孔定位和裂纹识别两部分,首先对待测盘孔进行定位,然后根据裂纹分布及形态特征确定感兴趣区域,对裂纹进行识别。

#### 3.1 盘孔定位

通过孔探获取的图像中,盘孔的位置是不确定的,因此准确定位盘孔位置是均压孔裂纹检测的关键。通过检测均压孔圆形轮廓可以实现盘孔定位,但是由于均压孔的形态较为复杂,且受表面纹理、工作环境、光照等多种干扰影响,因此检测均压孔圆形轮廓的难度较大。

Hough变换是一种非常有效的从图像中提取特定几何图形(如直线、圆、椭圆等)及其特征的方法,具有对噪声不敏感、受边缘间断影响小等优点,在机器视觉领域被广泛应用<sup>[5-9]</sup>。经典的Hough变换用于圆检测需要在3D参数空间进行累积,使得该方法因计算量和内存需求量大而难以实用。而利用边缘像素的局部梯度方向信息可以适当降低计算量,并提供较高的圆心位置检测精度,该方法已成为目前用于圆检测的标准Hough变换(Standard Hough Transform, SHT)。但是SHT仍需在3D参数空间上进行投票累积,运算量仍然较大。随机Hough变换<sup>[10]</sup>(Randomized Hough Transform, RHT),将经典Hough变换中的“一对多”映射采用“多对一”映射代替,同时采用动态链表结构进行参数累积,有效降低了Hough变换的运算量。RHT算法在处理简单图像时具有出色的性能,但是在强噪声或背景复杂情况下,RHT算法易产生不确定性和定位错误。在实验中发现,对孔探图像中均压孔圆形轮廓进行检测时,RHT算法受到干扰影响,很难找准孔的边缘。

为了能够快速准确定位均压孔,本文提出一种模糊快速Hough变换算法(Fuzzy Fast Hough Transform, FFHT)进行盘孔边界的检测。该算法的主要思想是利用局部梯度信息将检测圆所需的3D Hough变换转化为一个2D Hough变换检测圆心位置和一个1D Hough变换检测圆的直径;在检测圆心位置时对2D参数空间进行多分辨率分级,通过迭代计算由粗到精逐步细化参数空间;采用模糊投票方法来处理边缘像素位置和梯度方向的不确定性。

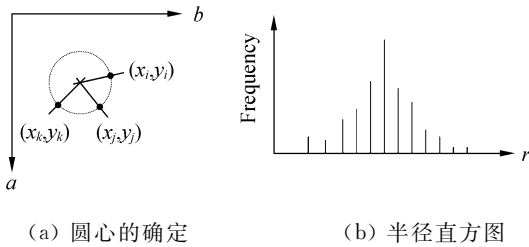
##### 3.1.1 利用局部梯度信息检测圆

利用梯度方向信息可以降低Hough变换检

测圆时参数空间的维数。在边缘点的方向信息已知的情况下,可将圆的检测分为两个阶段,首先利用 2D Hough 变换检测圆心位置,然后利用半径直方图确定圆的半径。因为,一个圆的圆心必定位于圆周上每个边缘点的梯度方向上,这些点的梯度方向的交点就是圆心。图 4 所示为该方法的原理图,其中(a)为圆心确定的原理示意图。在图像空间中,定义边缘点 $(x_p, y_p)$ 延其梯度方向的直线为该点的梯度直线,其表达式为:

$$y = k(x - x_p) + y_p, \quad (1)$$

其中, $k = g_y(x_p, y_p) / g_x(x_p, y_p)$ ,是该直线的斜率。



(a) 圆心的确定 (b) 半径直方图

(a) Determination of circle center (b) Radius histogram

图 4 利用梯度方向信息检测圆

Fig. 4 Circle detection with edge direction information

在确定圆心位置过程中,需要计算经过参数空间中某一单元的直线的数量,对投票数量大于阈值  $T_c$  的单元进行划分,继续迭代计算。此时,阈值  $T_c$  的确定相对于边缘点的数量  $P$ ,可通过计算单元中心距离直线的距离判断其是否穿过该单元。在图像空间中,式(1)所示直线可改写为:

$$M_2 y + M_1 x + M_0 = 0. \quad (2)$$

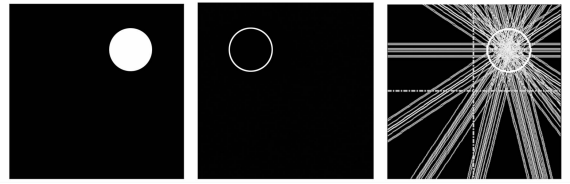
则直线到单元中心  $C = (c_x, c_y)$  的距离为:

$$d = |M_2 c_y + M_1 c_x + M_0|, \quad (3)$$

其中,  $M_0 = \frac{y_p - kx_p}{\sqrt{1+k^2}}$ ,  $M_1 = \frac{k}{\sqrt{1+k^2}}$ ,  $M_2 = -\frac{1}{\sqrt{1+k^2}}$ 。

图 5 所示为在一幅简单合成图像中每一边缘点梯度直线的分布情况,图像大小为  $128 \times 128$ ,共有 91 个边缘点。其中,(a)为原图,(b)为图像的边缘,(c)为梯度直线的分布情况。如果将描述圆心位置的 2D 参数空间粗划分为 4 个子区域,则可以采用式(3)计算得到经过每一子区域的梯度直线数量。

如果圆心位置已知,可计算出圆心点到图像



(a) 原图 (b) 边缘图 (c) 分布  
(a) Original image (b) Edge image (c) Distribution

图 5 梯度直线的分布情况

Fig. 5 Distribution of gradient line

中每一边缘点的距离,将距离值采用投票方式映射到 1D 参数空间中,就可以得到半径直方图,如图 4(b)所示,对半径直方图采用检测峰值可得到圆的半径。如果对每个圆心都计算所有的边缘点,会增加算法的运算量,本文采用对属于同一圆心位置的边缘点进行标记的方法来减少参与半径直方图计算的点数。具体做法是:在判断圆心位置参数空间分辨率达到要求后的最后一次 2D Hough 变换中,对投票属于不同单元的边缘点进行标记,这样在计算半径直方图时,对于每个可能的圆心位置只需计算相应的标记的点。半径直方图局部峰值最终确定圆的存在,在这过程中,需要考虑半径对的圆周上的像素点的影响,因此,通过比较投票到半径为  $r_n$  上的像素点数  $P_n$  与  $r_n$  的比值来判断圆存在的可能性。

### 3.1.2 参数空间多分辨率分级

在检测圆心位置时对二维参数空间进行多分辨率分级,通过迭代计算由粗到精逐步细化参数空间。首先将参数空间进行粗略划分,在一次投票累积之后确定目标存在的子区域。对子区域进行细分之后再进行一次投票累积确定目标存在的子区域。如此类推,直至参数空间分辨率达到要求,迭代停止。本文采用塔式表达方法对参数空间进行多分辨率分级,图 6 所示为二维参数空间中塔式表达的图解示意。

采用原图像像素位置坐标确定塔式分解中各级子区域的位置,如第  $n$  级中第  $j$  个单元  $H_j^n$  可表示如下:

$$H_j^n = (A_{\text{start}}^{(n,j)}, A_{\text{end}}^{(n,j)}, B_{\text{start}}^{(n,j)}, B_{\text{end}}^{(n,j)}), \quad (4)$$

其中, $A_{\text{start}}^{(n,j)}, A_{\text{end}}^{(n,j)}, B_{\text{start}}^{(n,j)}, B_{\text{end}}^{(n,j)}$  为两个坐标轴方向上的坐标,如图 6(c)所示。

各单元中心点  $C_1, C_2, C_3, C_4$  的位置可以通过像素位置坐标计算得到。塔式分级表达在确定

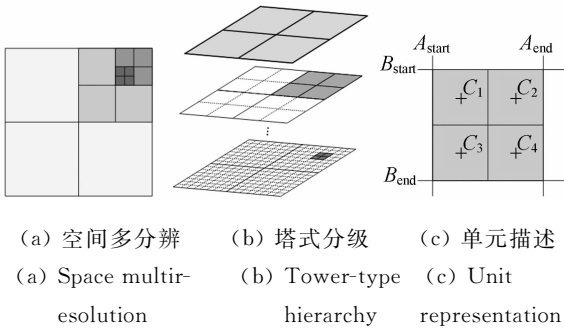


图 6 二维参数空间塔式表达

Fig. 6 Tower-type representation of 2D parameter space

子区域的隶属关系的同时还可以确定其在参数空间的位置和分辨率。参数空间多分辨率分级方法可以有效降低 Hough 变换的运算量,同时采用由粗到精的证据累积,可以很好地控制参数空间的精度。

2.1.3 模糊投票

实际检测中边缘像素位置和梯度方向都可能存在误差,各种噪声的干扰也使圆周上各点的梯度直线不能精确地相交于一点。本文采用模糊投票的方法来处理这种实际中存在的不确定性。

模糊点变换后的隶属度函数可以依据消解原理来重建,可以用一个以参数  $\varphi$  描述的圆来表示模糊点的  $\alpha$  截集,如下:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \cos \varphi \\ y &= y_0 + r \sin \varphi \end{aligned} \quad (5)$$

将上式代入式(1)可得到该模糊点对应的梯度直线表达式,如下:

$$y_0 = k(x_0 - x_p) + y_p + k r \cos \varphi - r \sin \varphi \quad (6)$$

由式(2)、(3)、(6)可推得参数空间点  $C = (c_x, c_y)$  到模糊梯度直线之间的距离可以计算,如下:

$$d' = |M_2 c_y + M_1 c_x + M_0 \pm \Delta d| \quad (7)$$

其中,  $\Delta d$  为点到直线距离的模糊程度,且有  $0 \leq \Delta d \leq r$ 。

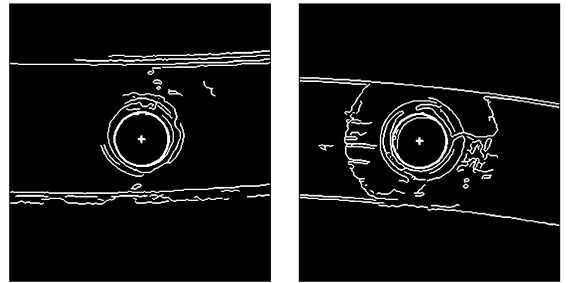
根据实际应用要求和图像的特点来确定模糊分布函数,本文选用 Zadeh 提出的  $\pi$  函数<sup>[11]</sup> 计算模糊投票值  $g(d')$ 。

$$g(d') = \begin{cases} 1 - 2(d'/r)^2 & 0 \leq d' < r/2 \\ 2(1 - d'/r)^2 & r/2 \leq d' < r \\ 0 & d' \geq r \end{cases} \quad (8)$$

从上面的介绍和分析可以看出,FFHT 算法检测圆时,采用梯度方向使参数空间维数减 1,同

时由于采用多分辨率分级的参数空间搜索算法,减少了无用的积累矩阵,使参数空间的分辨率可控。采用模糊投票的主要目的是减少边缘像素位置误差和梯度方向误差对检测的干扰,增强算法的可靠性。

图 7 给出了图 3 所示两幅典型均压孔图像的边缘检测结果和 FFHT 进行盘孔定位的结果。在众多的边缘检测算法中,Canny 算法是性能比较出色,特别是在边缘定位精度、对噪声的鲁棒性和单一响应等方面。因此采用 Canny 算法进行边缘检测,得到图像的梯度幅值和方向,然后利用 FFHT 算法检测均压孔的圆形轮廓实现定位。从图 7 中边缘检测的结果可以看出在孔的周围存在大量干扰,采用 FFHT 算法可以较准确地对盘孔定位。关于该算法性能的进一步分析将在第 4 节中给出。



(a) 图 3(a)的定位结果 (b) 图 3(b)的定位结果  
(a) Locating result of Fig. 3(a) (b) Locating result of Fig. 3(b)

图 7 盘孔定位

Fig. 7 Localization of aperture

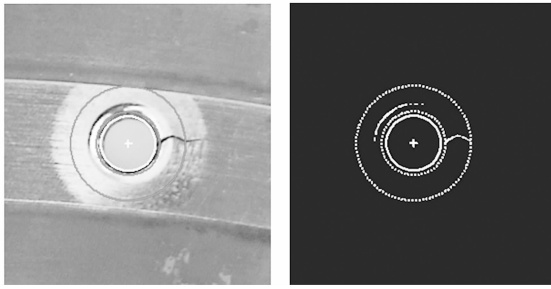
3.2 裂纹识别

3.2.1 感兴趣区域确定

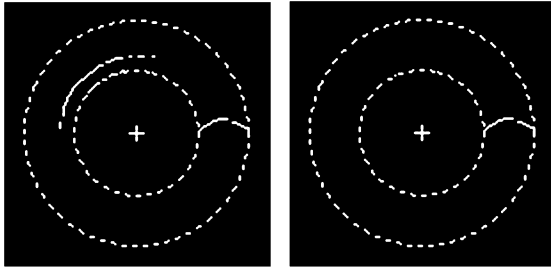
从上文对裂纹特征的分析得知,裂纹均分布在盘孔周围,且起始于孔边缘。为了更有效地对裂纹进行识别,在盘孔周围确定与均压孔同心的圆环为感兴趣区域,圆环参数由裂纹的分布特征和盘孔周围形貌决定。如图 8(a)所示圆环部分为感兴趣区域,其中,盘孔半径为  $r$ ,圆环内径为  $r + 4$ ,外径为  $2.2r$ 。

3.2.2 图像二值化

采用最大类间方差法(Ostu 法)对感兴趣区域的图像进行阈值分割。实际情况表明阈值为 0.8~0.9 倍 Ostu 阈值后得到的图像二值化结果较好。因此,实验中取 0.85 倍的 Ostu 阈值,得到的二值化后的图像如图 8(b)所示。



(a) 感兴趣区域 (a) Interesting region  
(b) 二值化 (b) Binarization



(c) 细化 (c) Thinning  
(d) 识别结果 (d) Result of recognition

图 8 裂纹识别

Fig. 8 Crack recognition

### 3.2.3 细化并去除孤立点

图像细化的目的是便于用链码的形式描述裂纹的形态,并进行识别,并图像细化算法有很多,本文采用数学形态法对二值图像进行细化<sup>[12]</sup>,对感兴趣区域内的图像进行不断的腐蚀,并保留内部点,直到剩下的骨架。图 8(c)所示为细化后的图像,为了减少噪声的干扰,在细化的同时去除图像中的孤立点。

### 3.2.4 链码分析

对细化后的图像进行链码分析,根据裂纹的形态特征对其进行识别。主要分析链码长度、位置、走向及相邻链码之间的关系。感兴趣区域中的链码如果满足如下条件则判断为裂纹:(1)链码位置应当靠近感兴趣区域中的内边缘,距离不得超过 3 个像素;(2)链码的走向应当与均压孔圆形边界(即感兴趣区域内边缘)垂直或近似垂直;(3)链码长度 $>10$ 个像素。对满足前两个条件的链码,继续分析它们扩展方向上的其他链码。如果一条链码在另一条链码的扩展方向上,即它们的扩展方向相近,且这两条链码首尾点距离较近,则

认为它们在同一条裂纹上,在确定链码长度和走向时要综合考虑这些因素,图 8(d)为采用链码分析得到的裂纹识别结果。

选择 Freeman 链码对图像进行描述,图 9 所示为 Freeman 链码表示方法及对应的方向角度。链码的位置可以通过分析链码中首尾像素距离均压孔中心距离确定。判断链码的走向时首先计算链码中角度之和  $\Sigma a$ (即旋转过的角度),然后通过计算  $\cos(\Sigma a)$  和  $\sin(\Sigma a)$  对角度进行测量。链码的长度可以通过其起始点和终止点的位置计算得出。

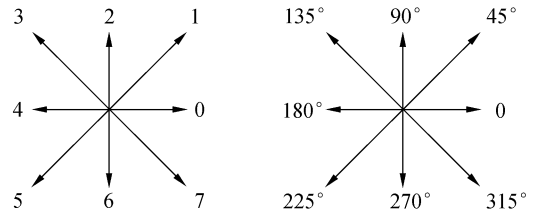


图 9 Freeman 链码

Fig. 9 Freeman chain code

因为均压孔的孔径是已知的,采用 FFHT 算法检测出均压孔的边界后,便可计算出孔的图像相对其实际尺寸的放大倍数,进而可以估算出裂纹的长度。

## 4 实验结果与分析

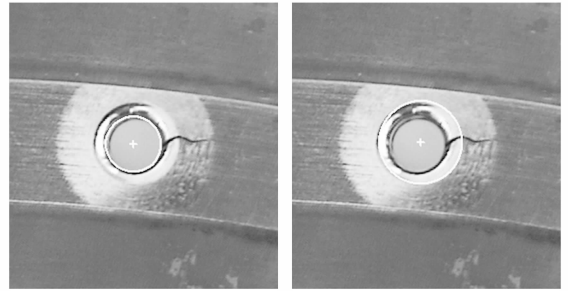
### 4.1 盘孔定位实验

采用通过 XL PRO Plus 型工业视频内窥镜获取的均压孔图像进行盘孔定位实验。为了验证 FFHT 算法在盘孔定位时的性能,将其检测结果与 SHT、RHT 算法的结果进行比较,Hough 变换所需的边缘及梯度方向均由 Canny 边缘检测算法得到。采用 Canny 算法进行边缘检测时双阈值设定为 0.28 和 0.7,Gauss 滤波器的标准差设为 1。在 SHT 算法定位实验中,设定圆的半径步长为 1,角度变化步长为 0.1(弧度),最小圆半径为 20,最大圆半径为 60,以累加器阵列中投票数最多的单元作为盘孔边界参数。在 RHT 算法中,设定最大试验次数为 20000 次,采样点最小间距为 10,以链表结构中最大值对应的圆的参数作为盘孔边界参数。在 FFHT 算法中,设定圆心检测参数空间分辨率为 1,投票阈值  $T_c = \lambda P / 2^j$ ,  $\lambda =$

0.25,  $j$  为参数空间分辨率级数。

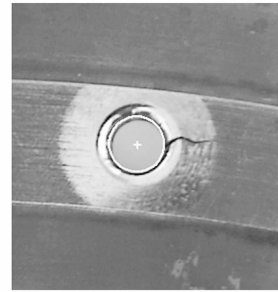
采用 3 种 Hough 变换算法对图 3 中两幅典型均压孔图像进行盘孔定位的实验结果如图 10、图 11 所示。两幅图像的大小均为  $293 \times 312$ 。算法由 Visual C++ 6.0 编程实现,在主频为 2.6 GHz、内存为 1 GB 的 PC 机上运行,操作系统为 Windows XP。表 1 中给出了 3 种 Hough 变换算法盘孔定位参数的比较。因为实际孔探检测中,内窥镜是人工操作的,探头与盘面之间的距离和位置难以精确控制,所以对均压孔的孔探图像无法给出精确的圆心位置及半径参数。在实验中发现,SHT 算法可以较准确地检测出均压孔的边界,可以满足裂纹识别的需要。因此在实验中比较不同算法对圆心位置和半径的检测结果时,以 SHT 算法的结果作为参照。从图 7 所示的边缘图中可看出,在孔周围存在大量的近似同心的圆弧干扰。在这种情况下,RHT 算法难以准确定位盘孔,而且在实验中发现,RHT 算法的随机性较大,对同一图像的检测结果不尽相同。FFHT 算法检测准确性与 SHT 的结果相近,且性能稳定。从计算时间上看,SHT 算法计算量最大,

RHT 需要的计算时间最小,而 FFHT 算法在计算时间上比 RHT 稍长,但相比 SHT 算法,其计算量小很多。



(a) SHT

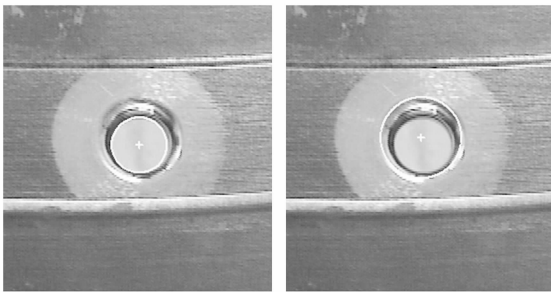
(b) RHT



(c) FFHT

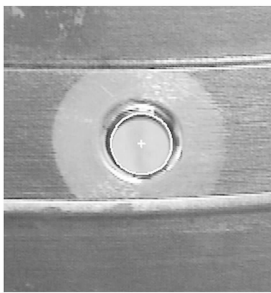
图 11 Hough 变换检测图 3(b) 的盘孔边界

Fig. 11 Detection of contour of aperture in Fig. 3(b) by Hough transform



(a) SHT

(b) RHT



(c) FFHT

图 10 用 Hough 变换检测图 3(a) 的盘孔边界

Fig. 10 Detection of the contour of aperture in Fig. 3 (a) by Hough transform

表 1 3 种 Hough 变换算法比较

Tab. 1 Results of three kinds of Hough transform algorithms

	图 3(a)			图 3(b)		
	圆心坐标	半径	时间(s)	圆心坐标	半径	时间(s)
SHT	(153, 149)	30	2.97	(155, 136)	30	2.82
RHT	(148, 145)	44	0.95	(152, 141)	45	0.71
FFHT	(151, 150)	32	1.04	(154, 137)	30	0.86

#### 4.2 裂纹检测实验

为了验证裂纹检测算法的性能,利用上述方法对 50 幅没有裂纹的均压孔图像和 30 幅有裂纹的均压孔图像进行实验,统计了正确检测出有无裂纹的准确率。统计结果如表 2 所示。

表 2 裂纹检测结果

Tab. 2 Results of crack detection

类别	实际数量	检测结果		总准确率 (%)
		准确数	准确率 (%)	
无裂纹	50	46	92	91.2
有裂纹	30	27	90	

由表 2 可见,对 50 幅无裂纹均压孔图像检测的准确率达 92%,对 30 幅有裂纹的均压孔图像检测的准确率达 90%,整个 80 幅图像检测的准确率达 91.2%。

分析影响裂纹检测准确性的原因主要是实际检测中,内窥镜探头是人工操作的,探头与盘面相对位置不易控制,所以光照条件和孔探图像质量难以保证。各种干扰的存在使得盘孔定位不准确,而造成误检和漏检。在实际的检测中,操作人员应当尽量保持内窥镜探头位于均压孔上方,并使其与盘面接近垂直,以保证盘孔定位的准确性和裂纹检测的可靠性。

## 5 结 论

航空发动机密封式的结构特点决定了孔探技术在其故障诊断中的重要地位。传统发动机孔

探检测中依靠人工观察进行故障判断,为了提高孔探检测的准确性和可靠性,本文利用工业视频内窥镜采集篦齿盘均压孔图像,采用数字图像处理技术对盘孔表面裂纹进行检测。在检测中,采用一种基于定位-识别模型的方法,即首先对待测盘孔进行定位,然后根据裂纹分布及形态特征确定感兴趣区域,对裂纹进行识别。实验结果表明,FFHT 算法可以快速准确地定位盘孔,裂纹识别算法可以有效地识别出盘孔周围的裂纹,裂纹检测的准确率达 91.2%。为了满足航空发动机检测的严格性和高可靠性的要求,考虑采用多种无损检测技术融合的方法来进一步降低篦齿盘均压孔裂纹检测的漏检率,其中,视觉检测方法和涡流检测方法的融合是下一步重点研究的方向。综上所述,本文的研究内容对航空发动机原位无损检测具有一定的理论意义和工程实用价值。

## 参考文献:

- [1] 张玉华,孙慧贤,罗飞路,等.一种用于盘孔裂纹检测的差动式涡流探头的设计与实现[J].传感技术学报,2008,21(6):1079-1083.  
ZHANG Y H, SUN H X, LUO F L, *et al.*. A novel differential eddy current probe applicable for detecting the crack around aperture[J]. *Journal of Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21 (6):1079-1083. (in Chinese)
- [2] 于辉,左洪福,陈果,等.基于立体视觉的孔探分析系统及其应用[J].南京航空航天大学学报,2002,34(3):293-297.  
YU H, ZUO H F, CHEN G, *et al.*. Analytical system of borescopy based on stereo vision and its application[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 34 (3): 293-297. (in Chinese)
- [3] 丁鹏,李长有,马齐爽,等.基于小波的航空发动机叶片孔探损伤检测[J].北京航空航天大学学报,2006,32(12):435-438.  
DING P, LI CH Y, MA Q SH, *et al.*. Wavelet based fault detection of aeronautic engine vanes by borescope[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(12): 435-438. (in Chinese)
- [4] 罗云林,孟娇茹.基于小波变换和立体视觉的发动
- 机内窥研究[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(4):573-576.
- LUO Y L, MENG J R. Study of engine endoscopic system based on wavelet transformation and stereo vision[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2005, 24(4): 573-576. (in Chinese)
- [5] CHEN T CH, CHUNG K L. An efficient randomized algorithm for detecting circles[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 83 (2): 172-191.
- [6] 李粉兰,徐可欣.一种应用于人脸正面图像的眼睛自动定位算法[J].光学精密工程,2006,14(2):320-326.  
LI F L, XU K X. An algorithm applied in frontal-view face images for automatically localizing eyes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (2): 320-326. (in Chinese)
- [7] 崔继文,谭久彬,教磊,等.约束抽样 Hough 变换的光纤端面精确定位[J].光学精密工程,2007,15(1):9-15.  
CUI J W, TAN J B, AO L, *et al.*. Precise location for optical fiber surface with sampling restraint Hough transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (1):9-15. (in Chinese)
- [8] 张少军,苟中魁,李庆利,等.利用数字图像处理技术测量直齿圆柱齿轮几何尺寸[J].光学精密工程,2004,12(6):619-625.

ZHANG SH J, GOU ZH K, LI Q L, *et al.*. Digital image processing technology for spur gear measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12 (6): 619-625. (in Chinese)

- [9] STRAUSS O. Use the Fuzzy Hough transform towards reduction of the precision-uncertainty duality [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32 (12): 1911-1922.
- [10] KIRYATI N, KALVIAINEN H, ALAOUTINEN S. Randomized or probabilistic Hough transform: unified performance evaluation [J]. *Pattern Rec-*

*ognition Letters*, 2000, 21(11):1157-1164.

- [11] BASAK J, PAL S K. Theoretical quantification of shape distortion in fuzzy Hough transform [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 154(24):227-250.
- [12] 盛业华, 唐宏, 杜培军, 等. 一种保形的快速图像形态细化算法[J]. *中国图象图形学报*, 2000, 5(2): 89-93.
- SHENG Y H, TANG H, DU P J, *et al.*. One fast shape preserving morphological thinning algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(2):89-93. (in Chinese)

#### 作者简介:



孙慧贤(1980—),男,内蒙古临河人,博士研究生,分别于2002年、2004年于国防科技大学获学士、硕士学位,主要从事图像处理、计算机视觉检测、武器装备无损检测等方面的研究。E-mail: Saber\_sun@163.com



张玉华(1978—),女,湖北松滋人,博士研究生,2001年于湖北工业大学获学士学位,2003年于国防科技大学获硕士学位,主要从事电磁无损检测、数字化测试技术等方面的研究。E-mail: zyh\_legend@163.com

#### 导师简介:



罗飞路(1946—),男,教授,博士生导师,1983年于清华大学获博士学位,主要从事武器装备无损检测和数字化测试技术及系统等方面的研究工作。E-mail: fluo@nudt.edu.cn

#### ● 下期预告

## 硅基 MEMS 渐变式缝隙天线

侯芳,朱健,郁元卫,陈辰

(南京电子器件研究所 单片集成电路与模块国家重点级重点实验室,江苏 南京 210016)

为了增加天线带宽,提高天线机械稳定性,改善天线性能,提出并设计制作了一种工作在 35 GHz 的硅基 MEMS 渐变式缝隙天线。针对渐变式缝隙天线在毫米波频段高介电常数衬底极薄、易碎、不易制作等问题,文中利用 ICP 深刻蚀工艺在衬底上形成周期性通孔阵列减小了衬底有效介电常数,增加了衬底厚度,同时利用共面波导-槽线对该天线进行馈电。经仿真该天线带宽为 28.2%,增益为 8.7 dB。采用微机械工艺对该天线进行加工,测得其带宽为 13.2%。与传统天线相比,该天线进一步提高了天线衬底的机械稳定性,增加了天线带宽,改善了天线性能,且易于集成。