# 一种裂纹识别方法的研究及试验 验证



张文东\*,卓轶,董登科,陈先民 中国飞机强度研究所,陕西西安 710065

摘 要:本文基于数字图像相关法研究了裂纹识别技术。首先介绍了基于位移场的裂纹识别算法的基本原理,建立了对目标函数进行迭代优化的粗细搜索法,然后在模拟位移场数据上添加不同强度的噪声来验证该算法的鲁棒性,接着设计了 CCT试件并进行了裂纹扩展试验,在整个裂纹扩展过程中利用裂纹识别技术对裂纹进行了监测,得到了裂纹长度和应力强 度因子。结果表明,裂纹识别技术受噪声的影响很小,能够准确获得裂纹扩展试验的裂纹信息。该研究对飞机结构损伤容 限试验中的裂纹自动测量的实现具有较高的指导价值和参考意义。

关键词:数字图像相关法;位移场;粗细搜索法;裂纹识别;试验验证;应力强度因子

## 中图分类号: TP391.9

#### 文献标识码: A

飞机结构中大量的薄壁结构在频繁起降过程中容易产 生裂纹,随着裂纹的扩展会降低机体结构的剩余强度,从而 引发灾难性后果。在飞机的研制过程中,对机体结构的损 伤容限性能非常重视<sup>[1,2]</sup>。在结构损伤容限性能的研究中, 裂纹测量的准确性关系到损伤容限性能的定量描述,是一 项重要的试验任务,因此如何确保裂纹准确可靠地测量始 终是试验过程中重要的一步。目前常规的裂纹测量手段受 限于自身的特点,在测量精度或自动化水平上都存在明显 的不足<sup>[3]</sup>,如目视法受人为因素干扰大、无损检测法较难实 现自动化等。

随着数字图像处理技术的快速发展,基于数字图像处 理技术对裂纹进行测量是一种新的思路,采用 Sobel、 Prewitt&Robert 等边缘检测算法通过直接获取裂纹形态特 征,进而获得裂纹的几何信息。这种思路所需要的边缘检 测算法成熟,结果直观,缺点是受限于图像分辨率对裂纹尖 端识别不准确,得到的仅仅是裂纹的几何参数,信息不全 面。另一种思路是采用裂尖近域的位移场<sup>[3]</sup>来获得裂纹信 息,这种思路能够获得裂纹的力学参数测量结果,因此国内 外学者都进行了研究。Yoneyama等<sup>[4]</sup>采用非线性最小二乘

#### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.05.011

法对William位移场表达式建立的数学模型进行了研究;这种基于梯度的优化方法的收敛性对初始值估计非常敏感,结果可能收敛于局部最优解,为了得到全局最优解,Pacey等<sup>[5]</sup>将单纯形法和遗传算法综合运用以求解光弹应力场数据的裂纹尖端位置和对应的应力强度因子;Lopez-Crespo等<sup>[6]</sup>采用遗传算法对裂纹周围位移场数据分析确定了裂尖位置,位移场表达式采用了Muskhelishvili表达式导致分析效率低。M. Zanganeh等<sup>[7]</sup>通过模拟位移场和试验位移场研究Matlab优化工具箱中5种优化算法在确定裂尖位置问题上的收敛性、准确性和效率。张文东等<sup>[8]</sup>研究了基于位移场的裂纹尖端识别算法,该算法能够准确快速地获得裂尖位置。

本文首先介绍了裂纹识别算法的基本原理,然后在模 拟位移场数据上添加不同程度的噪声来验证该算法的鲁棒 性,接着设计了裂纹扩展试验,通过数字图像相关法获得的 位移场数据对该算法进行验证,结果表明裂纹识别算法受 噪声的影响很小,能够准确获得实际裂纹扩展试验的裂纹 信息。该研究对飞机结构损伤容限试验中的裂纹自动化测 量的实现具有较高的指导价值和参考意义。

收稿日期: 2019-12-30;退修日期: 2020-01-20;录用日期: 2020-02-15 基金项目:航空科学基金(20170923001)

\*通信作者. Tel.: 029-88267582 E-mail: dongzi.666@163.com

引用格式: Zhang Wendong, Zhuo Yi, Dong Dengke, et al. Research on the method of crack identification and experimental verfication [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31 (05): 81-88. 张文东, 卓轶, 董登科, 等. 一种裂纹识别方法的研究及试验验证[J]. 航空 科学技术, 2020, 31 (05): 81-88.

# 1 裂纹识别算法的基本原理

裂纹识别算法的分析数据基础是裂纹近域的变形场。 采用现代光测力学技术,将光学测量技术和图像处理技术 结合,可以对被测物表面的变形场进行非接触高精度全场 测量。近年来,数字图像相关法<sup>[9]</sup>、云纹干涉法<sup>[10-11]</sup>和光弹 贴片法<sup>[12]</sup>多用于全场变形的测量,其中数字图像相关法的 应用最广泛。数字图像相关法是一种基于计算机视觉和数 值计算的光学测量方法,利用变形前后数字图像灰度的变 化来测量被测物表面的位移和应变,具有光路简单、全场测 量和对测量环境要求低等优点,应用于多个领域的变形测 量,本文即采用数字图像相关法来获得位移场。

## 1.1 裂纹近场位移场的 Williams 表达

在二维线弹性断裂力学中,裂纹尖端附近的位移场(见图1)可以用Williams级数表达式<sup>[13]</sup>描述,I型裂纹近域的位移场是对称的,II型裂纹是反对称的,具体形式如下:

I型裂纹 
$$\begin{cases} u_{1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} a_{n} \{ [\kappa + \frac{n}{2} + (-1)^{n}] \cos \frac{n\theta}{2} - \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta}{2} \} \\ v_{1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} a_{n} \{ [\kappa - \frac{n}{2} - (-1)^{n}] \sin \frac{n\theta}{2} + \frac{n}{2} \sin \frac{(n-4)\theta}{2} \} \end{cases}$$
(1)

$$II _{\pi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^2}{2\mu} b_n \{ [\kappa + \frac{n}{2} - (-1)^n] \sin \frac{n\theta}{2} - \frac{n}{2} \sin \frac{(n-4)\theta}{2} \}$$

$$v_{II} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} b_n \{ [\kappa - \frac{n}{2} - (-1)^n] \cos \frac{n\theta}{2} + \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta}{2} \}$$

$$(2)$$

式中:μ为切变弹性模量,κ在平面应力状态下为(3-ν)/(1+ν), 在平面应变状态下为(3-4ν),ν为泊松比;r和θ为以裂纹尖 端为中心的极坐标(见图1)。



Fig.1 The displacement field around the crack tip

为了后续公式表达和推导方便,定义了下面的函数:

$$\begin{cases} f_{n,m}(r,\theta) = \frac{r_m^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \left\{ \left[ \kappa + \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \cos \frac{n\theta_m}{2} - \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta_m}{2} \right\} \\ g_{n,m}(r,\theta) = \frac{-r_m^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \left\{ \left[ \kappa + \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin \frac{n\theta_m}{2} - \frac{n}{2} \sin \frac{(n-4)\theta_m}{2} \right\} \\ h_{n,m}(r,\theta) = \frac{r_m^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \left\{ \left[ \kappa - \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin \frac{n\theta_m}{2} + \frac{n}{2} \sin \frac{(n-4)\theta_m}{2} \right\} \\ l_{n,m}(r,\theta) = \frac{r_m^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \left\{ \left[ \kappa - \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \cos \frac{n\theta_m}{2} + \frac{n}{2} \cos \frac{(n-4)\theta_m}{2} \right\} \end{cases}$$
(3)

式中:m为位移场中第m个位置,n为Williams级数中的当前级数项。

在实际中,含裂纹结构在受载后不可避免地存在面内微 小刚性平移和转动,而且裂纹近域的位移场很难单纯地表现 为I型或II型,往往以混合两种类型的形式呈现。Williams级 数表示的位移场为计算提供了方便,选取Williams级数的前 N项,则复合型裂纹的面内位移场可以表示为:

$$\begin{cases} u_{i} = \sum_{n=1}^{N} a_{n} f_{n,m}(r_{i},\theta_{i}) + \sum_{n=1}^{N} b_{n} g_{n,m}(r_{i},\theta_{i}) + T_{x} - Ry_{x} \\ v_{i} = \sum_{n=1}^{N} a_{n} h_{n,m}(r_{i},\theta_{i}) + \sum_{n=1}^{N} b_{n} l_{n,m}(r_{i},\theta_{i}) + T_{y} + Rx_{k} \end{cases}$$
(4)

式中: $T_x$ 和 $T_y$ 为x方向和y方向的刚体平移;R为刚体转动;N为位移场展开式的项数;下标i为位移场中的点( $x_i, y_i$ )的索引, $i=1,2,\cdots,M,M$ 为位移场数据总数。

根据式(4)对于位移场中*m*个点的位移表达式展开,可 以得到矩阵表达式为:

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{c}},\boldsymbol{y}_{\mathrm{c}})\boldsymbol{A}$$
(5)

式中:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_{1} \\ \vdots \\ a_{N} \\ b_{1} \\ \vdots \\ b_{N} \\ T_{x} \\ T_{y} \\ R \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}(x_{c}, y_{c}) = \begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,m} & h_{1,1} & \cdots & h_{1,m} \\ \vdots & & & \vdots \\ f_{N,1} & \cdots & f_{N,m} & h_{N,1} & \cdots & h_{N,m} \\ g_{1,1} & \cdots & g_{1,m} & l_{1,1} & \cdots & l_{1,m} \\ \vdots & & & & \vdots \\ g_{N,1} & \cdots & g_{N,m} & l_{N,1} & \cdots & l_{N,m} \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \\ -y_{1} & \cdots & -y_{m} & x_{1} & \cdots & x_{m} \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} u_{1} \\ \vdots \\ u_{m} \\ v_{1} \\ \vdots \\ v_{m} \end{bmatrix}$$

#### 1.2 裂纹识别算法的基本原理

在位移场U和裂纹尖端坐标(x<sub>e</sub>,y<sub>e</sub>)已知的情况下,可 以通过矩阵形式的最小二乘法得到系数矩阵A,则为了评 价矩阵需要建立目标函数,如下:

 $G = \frac{1}{2} \left( U_{\text{actual}} - F(x_{\text{e}}, y_{\text{c}}) A \right)^{\mathrm{T}} \left( U_{\text{actual}} - F(x_{\text{e}}, y_{\text{c}}) A \right)$ (6) 式中:  $U_{\text{actual}}$  为试验获得的位移场。

裂纹尖端坐标(x<sub>e</sub>,y<sub>e</sub>)作为未知参数使得目标函数为非 线性函数,在预设的裂尖位置基础上通过最小二乘法可以 得到系数矩阵和对应的目标函数值,优化过程可以表示为:

 $[A^*, x_c^*, y_c^*] = \arg \min[\min(G_{ij}), i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, n]$ (7)

图2更加形象地描述了粗细搜索法的优化过程。首先 在裂尖近域的范围内布置了n行m列的预设裂尖点,计算 得到对应目标函数值最小的裂尖点(如图2左侧的黑色 点);再以该裂尖点为中心上下左右两个间距的区域再次布 置n行m列的预设裂尖点,再次求解对应目标函数值最小 的裂尖点(如图2右侧的黑色点);循环迭代,直到前后两次 对应裂尖点的欧式距离满足某个精度时,则该点可作为测 量到的裂纹尖端位置。



Fig.2 The optimization procedure of coarse-fine method

## 2 裂纹识别方法的鲁棒性验证

本节通过裂纹识别方法在位移场中对不同强度噪声的 影响进行研究来验证该方法的鲁棒性。首先根据式(4)生 成模拟复合型裂纹近域的Williams位移场,然后应用粗细 搜索法对添加了不同强度噪声的位移场进行分析。

根据式(4)对裂尖近域 Williams 位移场的描述,系数 $a_1$ 与I型应力强度因子 $K_1$ 存在关系为 $K_1 = a_1 \sqrt{2\pi}$ ,系数 $b_1$ 与 II型应力强度因子 $K_{II}$ 存在关系为 $K_{II} = b_1 \sqrt{2\pi}$ ,在 $K_1$ 和 $K_{II}$ 均为10MPa $\sqrt{mm}$ 的情况下,取Williams表达式的首项生成 模拟的位移场,位移场中裂尖坐标为(4.17mm, 5.23mm)。 考虑到在实际环境中的位移场受光照和硬件采集设备 的影响存在噪声,因此对模拟位移场添加噪声,在位移场中 的噪声强度定量表达式参照参考文献[6]定义:

$$N_{L} = \sqrt{\frac{\left\| u_{\text{noisy}} \right\|}{\left\| u_{\text{noise - free}} \right\|} + \frac{\left\| v_{\text{noisy}} \right\|}{\left\| v_{\text{noise - free}} \right\|}} \times 100$$
(8)

式中: $\|\cdot\|$ 为欧式范数, $u_{noisy}$ 和 $v_{noisy}$ 为水平位移场和垂直位移场中的噪声, $u_{noise-free}$ 和 $v_{noise-free}$ 为不含噪声的水平位移场和垂直位移场。

按照式(8)对模拟位移场添加不同强度的噪声。图3表 示了噪声强度分别为4、6、10和23的位移场。由图中可见, 当噪声强度为4时,位移场虽然还光滑但表面已经有了微 小波动;随着噪声强度的增大,位移场变得越来越粗糙。当 噪声强度为23时,上下波动已经变得非常明显,通过数字 图像相关法获得的位移场也不会有这么大的噪声,添加高 强度噪声的目的是验证粗细搜索法对位移场中噪声的鲁 棒性。

采用粗细搜索法对不同噪声强度位移场中的裂尖位置 进行优化迭代,获得的分析结果(包括裂尖坐标、相对误差 和分析时间)在表1中均列出。由表1中可知,噪声强度不 大于22时,粗细搜索法能够以较小的相对误差获得裂尖坐 标位置;当噪声强度达到23时,会出现较大的相对误差,说 明此时噪声对结果存在显著的影响。实际试验中获得的位 移场中的噪声强度也远远低于23,所以粗细搜索法对在裂 纹识别分析中具有很强的鲁棒性,受噪声的影响很小。另 外在表1中还列出了不同噪声强度下的分析时间,只有在 噪声强度是6和22时,分析时间很小,其余噪声强度下保持 一个稳定的分析时间。总体来看,粗细搜索法的分析效率 比较高且鲁棒性好。

#### 表1 粗细搜索法对位移场噪声的鲁棒性

Table 1	Robustness of the coarse-fine method with respect
	to noise in displacement field

$N_L$	获得裂尖的坐标		相对误差/%		时间位
	x/mm	y/mm	x	у	н <b>л I</b> ¤1/8
4	4.1745	5.2277	1.1	-0.04	14.14
6	4.1750	5.2375	0.12	0.14	5.75
8	4.1553	5.2693	-0.35	0.75	13.86
10	4.1657	5.2300	-0.10	0	13.18
14	4.1912	5.2738	0.51	0.84	13.81
20	4.1143	5.4320	-1.34	3.86	13.61
22	4.1875	5.5625	0.42	6.36	3.53
23	4.7228	4.9994	13.26	-4.41	13.55



Fig.3 Displacement fields of different noise levels

## 3 裂纹扩展试验验证

为了验证粗细搜索法在实际裂纹扩展试验中的应用效 果,设计了中心裂纹拉伸(CCT)试件,试件厚2mm,材料为 2024-T351铝合金,具体尺寸如图4所示。试验开始时,用 哑光漆喷制了黑白散斑用于变形分析。试验在100kN Instron液压伺服试验机上进行,疲劳载荷的最大拉力为 12kN,应力比为0.1。试验过程中摄像所用的硬件设备是 2048×2560分辨率的CCD相机和Kowa LM25XC型低畸变 镜头。图5显示了试验过程中架设的摄像硬件系统,调节 镜头光轴垂直于试件表面;相机安装在云台上,可以调节相 机的拍摄角度;云台架设在水平放置的导轨上,可以调节相



图4 CCT试件的尺寸图(单位:mm) Fig. 4 Schematic drawing of CCT specimen design

在裂纹扩展过程中,对多个不同疲劳载荷循环数进行 取像,并用读数显微镜记录下当前的裂纹长度;载荷为0时 的图像记为该次的参考图像,载荷为12kN时的图像记为变 形图像。图6表示在172062循环数下的参考图像和变形图 像,图中标出了裂纹的扩展轨迹和变形分析区域。从散斑 图中可以看出,裂纹轨迹越靠近裂尖越不能辨识。通过



图5 试验现场图 Fig.5 Experimental site

NCORR软件<sup>[14]</sup>对172062循环数下的图像相关性分析得到 对应的位移场,如图7所示。从图7可以看出,在垂直方向 上的位移明显大于水平方向,位移场也不是沿裂纹面上下 对称。

采用粗细搜索法对图7所示的位移场进行裂纹尖端识别,通过对目标函数的分析得到最优解即裂尖位置,如图8 所示。图8中分别展示了目标函数最小值的位置和该点在 散斑图像上的对应位置。由图可见,虽然裂尖位置通过目 视识别较为困难,但是粗细搜索法却能够准确定位。

接着对不同循环数下的图像进行分析,对目标函数优 化从而获得裂尖在图像中的位置,最终获得了整个CCT试 件裂纹扩展过程中的扩展情况,分析结果如图9所示。图 中显示通过对目标函数的优化在各个循环数下都获得了裂



图6 172062循环数下参考图像和变形图像的散斑











图 8 粗细搜索法在散斑图像中找到的裂尖位置 Fig.8 The crack-tip position found in speckle image by coarse-fine method

尖在散斑图像中的位置。

获得裂尖位置后,根据距离和像素之间的比例关系,通 过线性变换能够获得不同循环数下粗细搜索法获得的裂纹 长度,并与采用读数显微镜的目视测量结果进行了对比,结 果见表2。表2列出了不同循环数下两种方法获得的裂纹 长度,并计算了两者之间的绝对误差和相对误差;相对误差 最大值为92062循环数下的6.2%,此时其绝对误差只有 0.272mm,造成相对误差大的原因是基数过小;最大的绝对 误差为232062循环数下的1.250mm,分析其原因是此时已 经接近断裂时刻,Williams位移场公式不能有效模拟此时 的位移分布,因而造成了较大的误差;尽管存在误差,但是 其精度仍然能够满足实际工程中的测量要求。

表2 粗细搜索法获得的裂纹长度与目测法的对比 Table 2 Comparison of crack length from between coarse\_fine method and optical method

任工業	裂纹长度/mm		体对起关/	·비고는 거 구 ///	
1月277安以	目视测量	本文方法分析值	把刈庆左/mm	相利 庆差/%	
72062	3.6	3.803	0.203	5.6	
92062	4.4	4.672	0.272	6.2	
112062	5.7	5.586	-0.114	-2.0	
132062	7.5	7.368	-0.132	-1.8	
152062	9.2	9.464	0.264	2.9	
172062	11.8	11.841	0.041	0.3	
192062	15.2	15.600	0.400	2.6	
212062	19.8	20.055	0.255	1.3	
232062	26.5	27.75	1.250	4.7	

粗细搜索法在识别裂尖时还得到了式(5)中的系数矩 阵A,按照各系数与裂纹力学参量K<sub>1</sub>和K<sub>n</sub>的关系,可以得到 各循环数对应下的I型应力强度因子和II型应力强度因子。 为了对比应力强度因子的准确性,按照不同循环数下的裂 纹长度建立有限元模型(见图10)计算应力强度因子,有限 元计算结果与粗细搜索法进行了对比,结果显示在表3中。 从表中可见,粗细搜索法获得的K<sub>1</sub>与有限元结果非常接近, 最大相对误差均在10%以内。分析误差产生的原因是,一 部分来自于裂纹长度不精确,另一部分原因是裂纹在局部 发生转折。裂纹由于材料缺陷或环境原因,在实际试验过 程中不能像理论分析那样沿直线扩展,会在局部波折朝前 扩展,整体上呈现直线扩展的趋势,因此导致分析结果中也 会得到K<sub>n</sub>值。表3中显示相对于K<sub>1</sub>值偏小,这是由于裂纹 主要沿水平方向扩展引起的。

该方法在元件级裂纹扩展试件上得到了很好的试验验 证,本文的裂纹识别方法能够得到裂纹的长度、K<sub>1</sub>和K<sub>11</sub>值, 表明了该方法能够在元件级裂纹扩展试件试验过程中进行 裂纹识别,具有很高的工程应用价值。



图 9 不同循环数下裂尖识别结果 Fig.9 The crack tips located in different cycles



国 10 円成10次時12位/J強度凶子 Fig.10 Mode I stress intensity factor by finite element method

## 4 结论

本文对基于数字图像相关法的裂纹识别技术进行了研究。首先介绍了裂纹识别算法的基本原理,并建立了针对 目标函数进行迭代优化的粗细搜索法,分别通过模拟位移 场和真实试验对该方法进行了验证,得到以下结论:

(1)粗细搜索法在处理强噪声的位移场时,具有很高的 鲁棒性,求解结果的准确性不会明显受到噪声的影响,并且

表3 粗细搜索法获得的 K<sub>I</sub>与有限元法的对比

Table 3 Comparison of  $K_{I}$  values between coarse–fine method and FEM

循环粉	$K_{\rm I}/({\rm MPa}\cdot\sqrt{{ m mm}})$		相对于5月关/0/		
1/日プレダズ	有限元	本文方法分析值	伯内庆左//0	$\mathbf{X}_{\Pi} / (\mathbf{MPa} \vee \mathbf{mm})$	
72062	254.90	244.645	-4.02	51.286	
92062	273.04	277.443	1.61	32.447	
112062	300.55	297.508	-1.01	37.561	
132062	335.78	325.673	-3.01	50.470	
152062	367.07	339.048	-7.63	28.563	
172062	413.02	385.527	-6.66	29.424	
192062	468.60	425.078	-9.29	31.146	
212062	559.83	573.228	2.39	36.828	
232062	716.38	748.186	4.44	43.751	

能够保持较高的计算效率。

(2)裂纹识别技术在对真实 CCT 试件的裂纹扩展过程 能够实现对裂纹尖端位置的定位,获得的裂纹长度与目视 法结果对比,最大相对误差仅为5.6%;获得的I型应力强度 因子与有限元结果对比,相对误差均小于10%,说明裂纹识 别技术能够在真实裂纹扩展试验上应用,并能取得准确可 靠的结果。

(3)本文介绍的裂纹识别技术在元件级裂纹扩展试件 中得到了很好的应用效果,能够解决元件级裂纹扩展试验 件的裂纹识别问题,具有很高的应用前景。

## 参考文献

 [1] 熊俊,刘嘉,曾锐.飞机发动机铰链结构裂纹扩展分析与试验 验证[J]. 航空科学技术,2018,29(8):28-32.

Xiong Jun, Liu Jia, Zeng Rui. Hinge structure crack propagation analysis and test verifcation of aircraft engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(8): 28-32. (in Chinese)

- [2] 李宝珠, 王慧梅, 何彧. 增压载荷下机身蒙皮细节应力分布计 算方法研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(9): 16-19.
  Li Baozhu, Wang Huimei, He Yu. The detailed stress distribution analysis of skin under the pressure load[J].
  Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(9): 16-19. (in Chinese)
- [3] Yates J R, Zanganeh M T. Quantifying crack tip displacement fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77 (11): 2063-2076.
- [4] Yoneyama S, Morimoto Y, Takashi M. Automatic evaluation of mixed-mode stress intensity factors utilizing digital image correlation[J]. Strain, 2006, 42(1):21-29.
- [5] Pacey M N, James M N, Patterson E A. A new photoelastic model for studying fatigue crack closure[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(1): 42-52.
- [6] Lopez-Crespo P, Burguete R L, Patterson E A, et al. Study of a crack at a fastener hole by digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2009, 49(4): 551-559.
- Zanganeh M, Lopez-Crespo P, Tai Y H, et al. Locating the crack tip using displacement field data: a comparative study[J].
   Strain, 2013, 49(2):102-115.
- [8] 张文东,李三元,董登科,等.基于位移场的裂纹尖端识别算法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9):2198-2204.
  Zhang Wendong, Li Sanyuan, Dong Dengke, et al. Locating the crack tip algorithm based on displacement field[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9):2198-2204. (in Chinese)
- [9] Bing Pan. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and

future goals[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8):1-32.

- [10] 米红林,方如华,朱启荣,等. 云纹干涉系统及其在金瓷双材 料中的应用[J]. 光子学报,2007, 36(5): 894-898.
  Mi Honglin, Fang Ruhua, Zhu Qirong, et al. Moiré interferometry system and its application in bi-material of metal-porcelain[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5): 894-898. (in Chinese)
- [11] 朱江平,苏显渝,向立群. 抽样莫尔在材料变形分析中的应用[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 47-55.
  Zhu Jiangping, Su Xianyu, Xiang Liqun. The application of sampling moiré method in material deformation analysis[J].
  Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(10): 47-55. (in Chinese)
- [12] 董伟,何化南,吴智敏,等. 光弹贴片法研究混凝土I-II复合型裂缝扩展过程[J]. 工程力学,2010, 27(9): 41-48.
  Dong Wei, He Huanan, Wu Zhimin, et al. Experimental investigation on double-K fracture parameters for small size specimens in concrete[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 41-48. (in Chinese)
- [13] Williams J G, Ewing P D. Fracture under complex stress the angled crack problem[J]. International Journal of Fracture, 1972,8(4):441-446.
- [14] Blaber J, Adair B, Antoniou A. Ncorr: open-source 2d digital image correlation matlab software[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6):1105-1122. (责任编辑 王昕)

#### 作者简介

张文东(1987-)男,硕士,工程师。主要研究方向:金属结构的耐久性/损伤容限分析方法。
Tel: 029-88267582 E-mail: dongzi.666@163.com
卓轶(1982-)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:结构
强度试验技术。
Tel: 029-88267582
E-mail: zhuoyid@163.com
董登科(1963-)男,博士,研究员。主要研究方向:飞机结构疲劳/损伤容限研究。
E-mail: dengke623@sina.com
陈先民(1982-)男,博士,高级工程师。主要研究方向:金属疲劳可靠性研究。

E-mail:vitochan@163.com

# Research on the Method of Crack Identification and Experimental Verfication

Zhang Wendong\*, Zhuo Yi, Dong Dengke, Chen Xianmin AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi' an 710065, China

**Abstract:** This paper focuses on a method of crack identification based on digital image correlation method. Firstly, the basic principles of crack identification method are introduced and a coarse-fine search method which is used for optimizing the objective function iteratively is established. Then different intensity noises are added on simulated displacement field to verity the robustness of this method. Then center cracked tension specimen and crack propagation test are designed. Crack identification method is used to monitor the crack throughout the test process. Crack length and stress intensity factor are obtained. The results show that this method has little effect by the noise and can exactly get the crack information during crack propagation process. This study has a high engineering value for the realization of automatic crack measurement in the aircraft structure damage tolerance experiment.

**Key Words:** digital image correlation method; displacement field; coarse-fine search method; crack identification; experimental verification; stress intensity factor

Received: 2019-12-30; Revised: 2020-01-20; Accepted: 2020-02-15 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20170923001) \*Corresponding author.Tel.: 029-88267582 E-mail: dongzi.666@163.com