

# 基于磁场梯度脉冲涡流检测的航空结构亚表面腐蚀缺陷可视化方法

任淑廷<sup>1</sup>, 李勇<sup>1</sup>✉, 张曦郁<sup>1,2</sup>, 闫贝<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安, 710049;

2. 西安军代局, 西安, 710043)

**摘要** 恶劣复杂的服役环境致使航空金属结构极易出现亚表面腐蚀等缺陷,严重影响结构完整性。作为一种结合匀场激励的新型脉冲涡流检测方法,磁场梯度脉冲涡流检测已在结构腐蚀缺陷检测和评估方面体现了其优势性。针对所获取亚表面腐蚀缺陷图像信息不够丰富等不足,结合积分计算对所获图像进行进一步处理,提取图像新特征,研究其与亚表面腐蚀缺陷深度间的映射关系。研究表明:该图像新特征与亚表面腐蚀缺陷深度呈单调递增关系;综合由此建立的关联曲线和已获取的亚表面腐蚀缺陷图像,可对金属结构亚表面腐蚀缺陷的深度、形貌、开口尺寸等进行定量评估。

**关键词** 亚表面腐蚀缺陷;可视化;电磁无损检测;磁场梯度脉冲涡流检测;图像处理

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.014

**中图分类号** TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0084-06

## Visualization of Subsurface Corrosion in Aviation Structures Based on Gradient-Field Pulsed Eddy Current Testing

REN Shuting<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>✉, ZHANG Xiyu<sup>1,2</sup>, YAN Bei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Military

Representative Bureau, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Hostile and complex environment causes the subsurface corrosion for in-service aviation structures, posing a severe threat to the structural integrity. As for the integration of pulsed eddy current testing with uniform excitation yields Gradient-field Pulsed Eddy Current testing(GPEC), the gradient-field pulsed eddy current testing has reflected its advantages in detection and evaluation of corrosion in conductive structures. This paper focuses on experimental investigation of GPEC further. Aimed at the problems that the imaging information of subsurface corrosion obtained in aviation structures is not abundant, the paper further proposes the relevant imaging processing along with a new image feature proposed. The proposed imaging processing method is further discussed regarding superiority in subsurface corrosion visual-

**收稿日期:** 2017-10-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(51477127;51777149;E070104)

**作者简介:** 任淑廷(1994—),女,河南辉县人,硕士生,主要从事电磁无损检测方法研究。E-mail: renshuting1@stu.xjtu.edu.cn

**通讯作者:** 李勇(1978—),男,河北邯郸人,副教授,博士生导师,主要从事结构完整性和装备安全理论与技术研究。E-mail: yong.li@mail.xjtu.edu.cn

**引用格式:** 任淑廷,李勇,张曦郁,等. 基于磁场梯度脉冲涡流检测的航空结构亚表面腐蚀缺陷可视化方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 84-89. REN Shuting, LI Yong, ZHANG Xiyu, et al. Visualization of Subsurface Corrosion in Aviation Structures Based on Gradient-Field Pulsed Eddy Current Testing[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 84-89.

ization. The results show that the image feature extracted from the post-processing images has the linear correlation with the corrosion depth, which, in conjunction with acquired corrosion images, and benefits the quantitative evaluation of subsurface corrosion in aviation structures.

**Key words:** subsurface corrosion; visualization; electromagnetic nondestructive testing; gradient-field pulsed eddy current technique; image processing

目前,涡流检测<sup>[1-3]</sup>、红外热成像检测<sup>[4]</sup>、微波检测<sup>[5-6]</sup>以及超声检测<sup>[7]</sup>等传统无损检测技术难以满足亚表面腐蚀缺陷高灵敏度检测及高精度定量评估的相关需求。脉冲涡流检测<sup>[8-11]</sup>作为一种新型电磁无损检测技术之一,其激励信号频谱宽、检测信号信息量更为丰富,在非铁磁性金属亚表面腐蚀缺陷检测方面有独特的优势。鉴于此,国内外学者通过理论仿真和试验研究,对以脉冲涡流检测技术为代表的暂态涡流检测技术在典型金属构件(平面金属板、飞机机身多层铆接结构、金属管件等)宏观缺陷检测及定量评估中的应用进行了广泛深入探索,取得了大量研究成果<sup>[12]</sup>。

然而,目前脉冲涡流检测亚表面腐蚀缺陷成像技术尚存在对缺陷边缘识别灵敏度低,成像效果差、缺陷评估精度低等不足之处。李勇等在此基础上提出磁场梯度脉冲涡流检测(GPEC)技术,将已在核磁共振成像领域得到应用的磁场梯度测量技术引入到脉冲涡流检测技术中,以提升亚表面腐蚀缺陷检测灵敏度和成像精度<sup>[13-14]</sup>。磁场梯度测量技术以磁场梯度作为检测信号,对磁场空间扰动反应灵敏,对微观磁场变化提取灵敏度高。然而,GPEC技术采用传统盘式线圈,导致磁场梯度传感器采集的检测信号不仅反映因亚表面腐蚀缺陷扰动而产生的磁场梯度,还反映了探头本身所激发磁场的梯度。为消除探头本身激发磁场影响,Li等人使用环绕线圈在管道外表面产生均匀场,用于检测裂纹<sup>[15]</sup>。李勇等人将匀场激励与GPEC技术相结合,提出了匀场激励磁场梯度脉冲涡流检测方法<sup>[16]</sup>,并开发了相应匀场激励探头。匀强磁场在无缺陷扰动情况下,磁场均匀分布,磁场梯度为“0”;当结构存在缺陷时,由于材料不连续,涡流分布及磁场空间分布受到扰动,进而磁场存在梯度。结合磁场梯度测量技术的优点,可对亚表面腐蚀缺陷实施高灵敏度、高精度的检测及可视化定量评估。

为进一步量化分析缺陷参数,国内外研究学者不断探究检测信号的特征提取以及相关图像处理方法等,以提升缺陷检测灵敏度和定量评估精度。高印寒等人从信号采集处理电路方面,充分利用涡流传感器的灵敏性和数字化信息处理器高效快速的特点,有效实现了二维信号的提取,达到定量评估的目的<sup>[17]</sup>。Y. Nagaya等人提出了一种使用模板匹配方法识别裂纹数量和位置的图像处理方法,并采用非

线性缩放技术对裂纹长度进行了数值模拟验证,实现定量评估<sup>[18]</sup>。

本文在此基础上,针对非铁磁性金属亚表面腐蚀缺陷,通过试验研究,着力研究匀场激励磁场梯度脉冲涡流技术对亚表面腐蚀缺陷的检测及成像,探索相关图像处理算法、寻找图像特征值,并进一步探究图像特征与亚表面腐蚀缺陷参数之间的相关性规律,实现非铁磁性金属亚表面腐蚀缺陷的可视化定量评估。

## 1 匀场激励磁场梯度脉冲涡流检测的试验研究

### 1.1 试验系统及试件

图1为匀场激励磁场梯度脉冲涡流检测亚表面腐蚀缺陷试验系统,该系统包括检测探头、探头驱动模块、信号采集及处理模块、系统扫描控制模块(扫描平面X-Y为试件表面)。

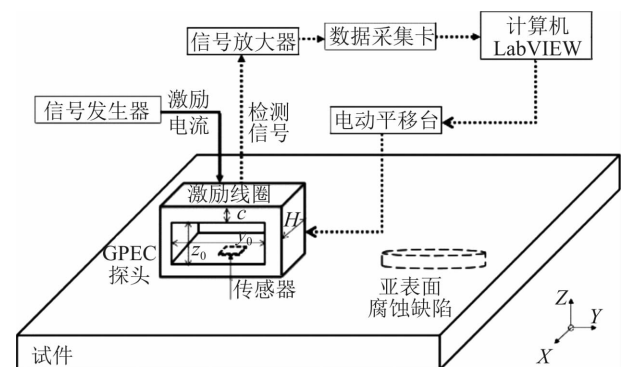


图1 匀场激励磁场梯度脉冲涡流检测系统示意图

其中,检测探头由矩形线圈(其中心轴平行于被测金属体表面)和磁场梯度传感器组成,矩形线圈参数为:内长 $y_0=24.1$  mm、内宽 $z_0=12.4$  mm、高 $H=20.3$  mm、线圈厚度 $c=1.2$  mm、匝数 $N=289$ 、设计提高 $z_c=1.0$  mm;磁场梯度传感器(TMR4002)位于矩形线圈底部中间位置,用于拾取暂态磁场梯度信号,其提高 $z_c$ 为1 mm。信号发生器(AFG3022)驱动该探头,产生幅值、基频、占空比依次为300 mV、100 Hz、50%的方波激励信号。探头所拾取的检测信号经信号采集及处理模块进行前处理后输入计算机,由LabVIEW程序进行后处理,最终在程序界面呈现时间-信号差分、时间-信号差分峰值以及时间-信号差分包络面积峰值3类曲线。

电动平移台由计算机控制,实现检测探头的自动步进式移动,扫查整个试件平面。

为模拟非铁磁性金属亚表面腐蚀缺陷,在铝合金试件上加工了12种不同尺寸的圆形亚表面腐蚀缺陷。铝合金试件的长、宽和厚度依次为210 mm、210 mm和4 mm,其电导率和相对磁导率分别为34.2 MS/m和1.0;亚表面腐蚀缺陷尺寸(直径×深度)见表1。

表1 亚表面腐蚀缺陷尺寸

缺陷编号	直径×深度/mm	缺陷编号	直径×深度/mm
#1	10×1	#7	15×3
#2	10×2	#8	15×4
#3	10×3	#9	20×1
#4	10×4	#10	20×2
#5	15×1	#11	20×3
#6	15×2	#12	20×4

## 1.2 亚表面腐蚀缺陷的扫查及成像结果

首先,将检测探头放置于金属构件无缺陷表面,保证其中心轴与扫查平面X轴方向平行(如图1所示),信号发生器驱动检测探头激发匀强磁场,同时,磁场梯度传感器拾取X方向磁场梯度信号,将此信号作为参考信号。继而对各个缺陷进行扫查,将各扫查点 $(x,y)$ 处的磁场梯度传感器输出信号与参考信号做差,获取磁场梯度差分信号,如图2所示,提取该信号峰值作为在该扫查点 $(x,y)$ 处的信号特征,用于亚表面腐蚀缺陷成像。

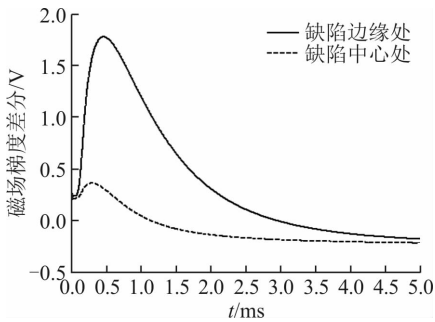


图2 磁场梯度差分信号

图2表明,在缺陷中心位置,材料对称,磁场空间分布均匀,磁场梯度峰值较小。在缺陷边缘处,缺陷的存在破坏了材料的对称性,磁场空间分布受到扰动,因而,磁场梯度峰值显著增大。

同理,依据上述检测方式,沿X轴方向移动探头扫查试件,获得缺陷#11的 $x-y$ 平面内缺陷二维扫查图像,随后探头水平旋转 $90^\circ$ ,再次进行缺陷扫查,获得在 $x-y$ 平面内的二次扫查图像并进行归一化,见图3。将2次扫查所得图像对应的二维矩阵在同坐标 $(x,y)$ 下进行叠加并归一化,最终获得图4的亚表面腐蚀缺陷图像。

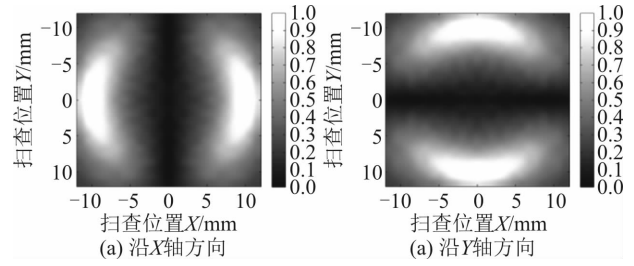


图3 缺陷#11的 $x-y$ 平面扫查图像

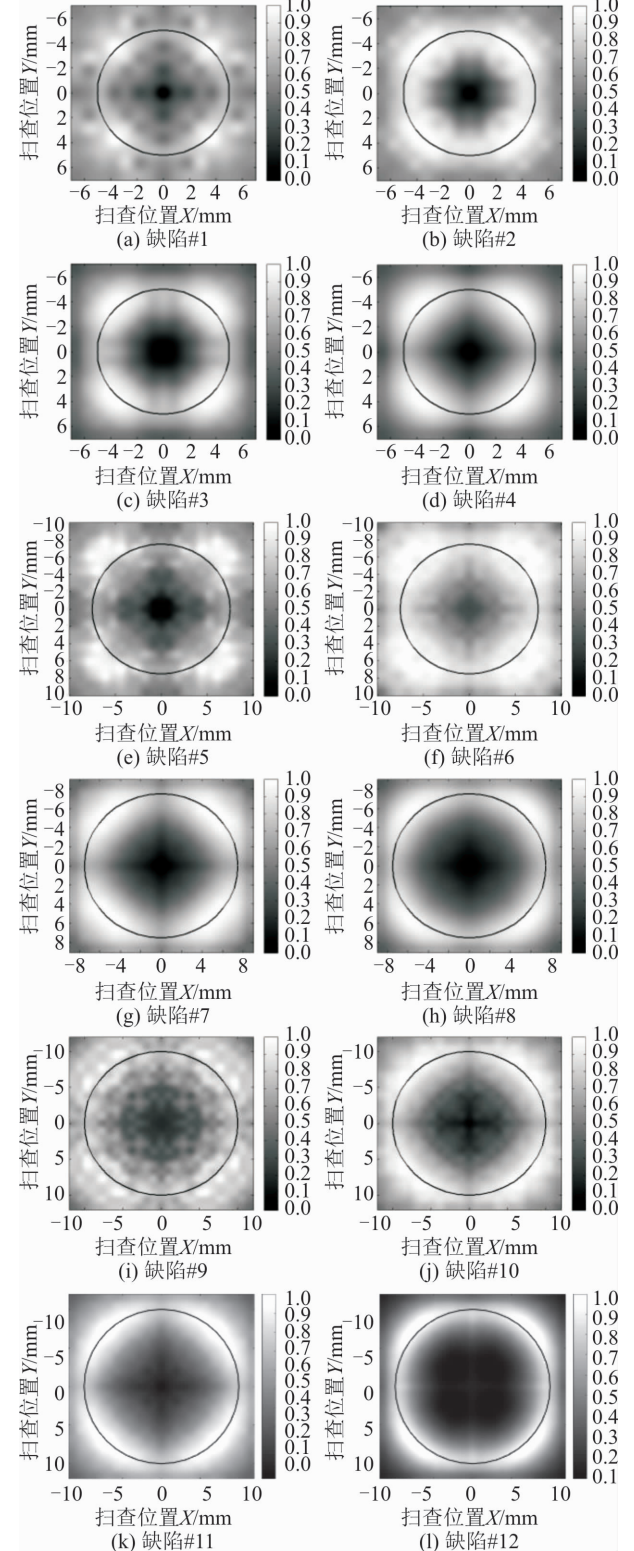


图4 亚表面腐蚀缺陷图像

由图3可见,检测探头中心轴与X(或Y)方向平行进行缺陷扫查,可获得未封闭圆形亚表面腐蚀缺陷图像,且过圆形中心的扫查曲线附近图像颜色最深、峰值最大;随扫查路径外移,峰值逐渐变小趋于零值。这是涡流沿Y(或X)方向流动,由于亚表面腐蚀缺陷致使Y(或X)方向涡流受到扰动,进而影响了X(或Y)方向磁场空间分布;随扫查路径的外移,亚表面腐蚀缺陷边缘对Y(或X)方向的涡流扰动逐渐减小,磁场梯度随之减小。由此分析可知,检测信号对于亚表面腐蚀缺陷轮廓具有较高灵敏度,可用于亚表面腐蚀缺陷形貌和开口面积的评估。如图4所示(圆形实线为实际亚表面腐蚀缺陷轮廓,白色部分为检测亚表面腐蚀缺陷轮廓),相比于其他缺陷,缺陷#1、#5和#9深度较小,仅有1 mm,缺陷对涡流的扰动相对较小,信噪比较低。其余缺陷图像光滑,检测轮廓与实际轮廓基本重合,检测精度较高。

值得注意的是,磁场梯度传感器输出的信号表征磁场在空间中的变化量(即磁场不均匀度),其对亚表面腐蚀缺陷存在所造成的材料不连续,尤其是缺陷边缘较为灵敏,可实现亚表面腐蚀缺陷边缘的可视化定量评估。但是,由图4可见,所获取缺陷图像未能有效反映亚表面腐蚀缺陷深度等信息。为此,本文进一步对缺陷图像进行处理,寻找图像新特征,探究该特征与亚表面腐蚀缺陷深度间的映射关系,以实现腐蚀缺陷深度等参数的可视化定量评估。

## 2 图像处理算法及结果讨论

### 2.1 基于积分计算的图像处理算法

GPEC技术所拾取的信号为总磁场 $\mathbf{B}$ 在空间中的梯度变化,如图1所示,在检测探头和试件之间的气隙中,总磁场为单方向场,在该气隙内任意位置 $(x, y, z_s)$ 处,磁场梯度表达式可写为:

$$X \text{ 轴扫查方向: } G(x) = \frac{\Delta B_x}{\Delta x} \quad (1)$$

$$Y \text{ 轴扫查方向: } G(y) = \frac{\Delta B_y}{\Delta y} \quad (2)$$

式中: $B_x$ 、 $B_y$ 、 $G(x)$ 和 $G(y)$ 分别为总磁场的 $x$ 、 $y$ 分量和磁场梯度; $x$ 和 $y$ 为传感器所处空间位置坐标。

为进一步实现亚表面腐蚀缺陷深度的可视化定量评估,基于式(1)和(2),进一步计算获取与亚表面腐蚀缺陷扰动直接相关的绝对场量 $H(x)$ 和 $H(y)$ ,为磁场梯度 $G(x)$ 和 $G(y)$ 分别在 $x$ 和 $y$ 上的积分:

$$H(x) = \int_{x_0}^x [G(x)] dx \quad (3)$$

$$H(y) = \int_{y_0}^y [G(y)] dy \quad (4)$$

式中: $x_0$ 、 $y_0$ 分别为传感器的初始空间坐标。采用式(3)和(4)计算得到2组与缺陷扰动相关的绝对场量数据(分别对应X、Y轴扫查方向),用于缺陷二次成像,所获取图像及其特征与缺陷深度等参数存在关联性。

### 2.2 图像处理结果及讨论

以缺陷#11为例,详细阐述本文提出的图像处理算法。首先,由图4可见,在无缺陷区域,磁场梯度并不严格为“0”,且12个不同尺寸的缺陷扫查面积不一。鉴于此,为减小计算误差,均提取单向缺陷图像最大值对应的位置并外延1 mm,将其对应的矩形范围作为图像处理范围。

提取探头沿X轴方向进行扫查时获取的扫查信号数据绘制曲线,如图5(a)所示。图5(a)表明,由于材料不连续引起的涡流扰动致使扫查信号在亚表面缺陷边缘处峰值增大;经过缺陷边缘处后,由于涡流扰动减小,扫查信号峰值逐渐回归零值附近。将该数据以中部最小值为中心进行分割,保留左侧数据并求取右侧数据的负值,所有数据形成处理后的扫查信号,并根据式(3)对其进行积分处理得到与缺陷直接相关的 $H(x)$ 曲线,如图5(b)所示。同理,可由式(4)得到 $H(y)$ 曲线。最后,对 $H(x)$ 和 $H(y)$ 进行求和,得到空间位置 $(x, y, z_s)$ 处总绝对场量 $H(x, y)$ 。

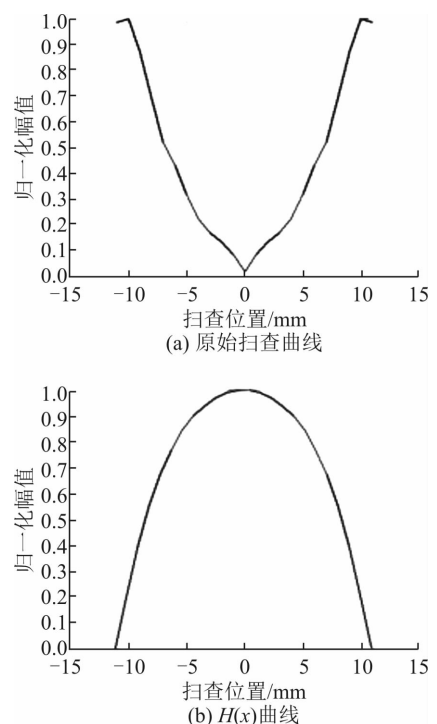


图5 X轴扫查曲线

采用上述处理方法,逐一对本研究中的亚表面

腐蚀缺陷扫描曲线进行处理,结合求得的最大绝对场量  $H_{\max}(x, y)$ ,对处理后的  $H(x, y)$  图像进行归一化,并提取最大值作为图像新特征。进一步探究该特征与亚表面腐蚀缺陷深度之间的相关性。图6为对每个原始缺陷图像进行处理后得到的结果。所有图像均为数据归一化后的结果,并采用相同归一化峰值范围进行成像,以直观反映图像特征与亚表面腐蚀缺陷深度之间的映射关系。

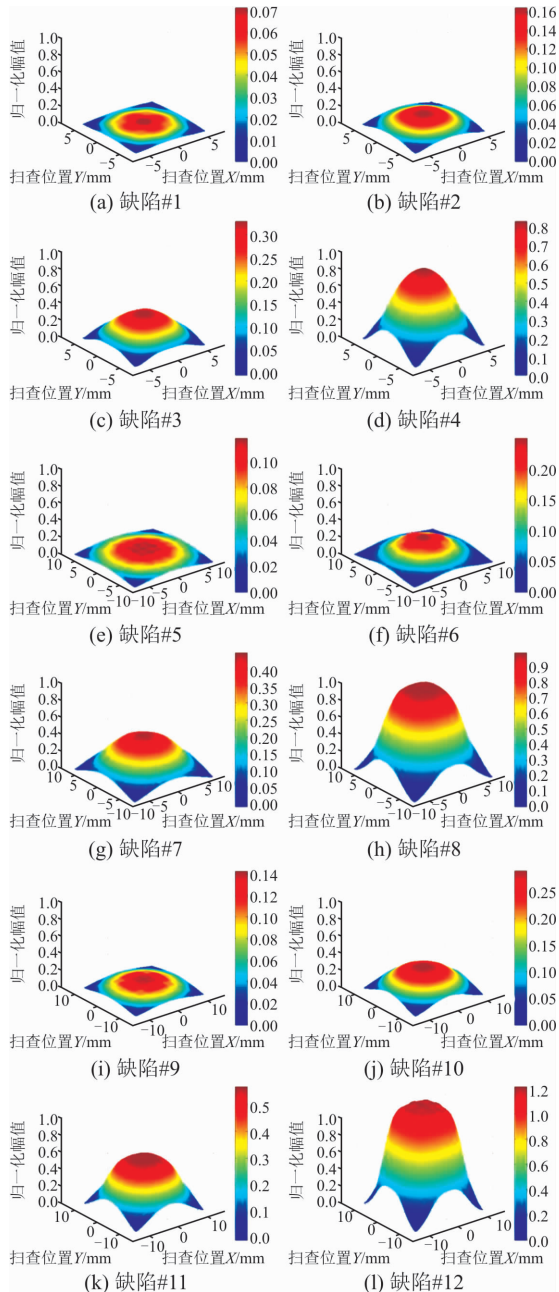


图6 不同腐蚀缺陷的绝对场量图像

提取图6所示各缺陷图像最大值作为图像特征,建立图像特征值-亚表面腐蚀缺陷深度参数曲线,并采用3次样条插值法对所得曲线进行数值拟合,拟合曲线见图7。由图7可见:图像特征值随缺陷直径的增加而增加;且图像特征与亚表面腐蚀缺

陷深度呈单调递增关系,可用于亚表面腐蚀缺陷深度的高精度量化。

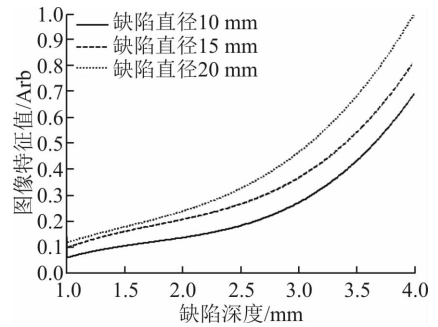


图7 绝对场量峰值与亚表面腐蚀缺陷深度的关联曲线

### 3 结语

本文着重对匀场激励磁场梯度脉冲涡流检测方法进行了试验研究,搭建了检测系统,对不同尺寸的亚表面腐蚀缺陷进行了成像及图像处理等方面的研究。研究发现,检测图像对亚表面腐蚀缺陷轮廓的识别灵敏度较高,可被用于亚表面腐蚀缺陷开口面积的定量评估。结合积分计算,对所获取缺陷图像进行进一步图像处理,并提取图像新特征,建立图像特征值与亚表面腐蚀缺陷深度之间的关系式。结果表明:进行图像处理,与亚表面腐蚀缺陷扰动直接相关的绝对场量图像峰值与缺陷深度呈单调递增关系,由此建立关联曲线并结合已获取的缺陷图像,可有效实现航空结构亚表面腐蚀缺陷深度、形貌、开口面积等参数的可视化定量评估。

### 参考文献(References):

- [1] KIM D, UDPA L, UDPA S. Remote Field Eddy Current Testing for Detection of Stress Corrosion Cracks in Gas Transmission Pipelines[J]. Materials Letters, 2004, 58(15):2102-2104.
- [2] 杨宾峰,张辉,荆毅飞,等.基于脉冲激励的远场涡流检测机理及缺陷定量评估技术[J].空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(6):45-49.  
YANG B F, ZHANG H, JING Y F, et al. Far-Field Eddy Current Detection Mechanism and Quantitative Evaluation of Defect Based on Pulse Excitation[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012, 13(6):45-49. (in Chinese)
- [3] LI Y, LIU X B, CHEN Z M, et al. A Fast Forward Model of Pulsed Eddy Current Inspection of Multilayered Tubular Structures[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45

- (1): 417-423.
- [4] LIU Z, KLEINER Y. State of the Art Review of Inspection Technologies for Condition Assessment of Water Pipes[J]. Measurement, 2013, 46(1): 1-15.
- [5] 侯哲,李为民,段滋华. 复合材料内部缺陷微波无损检测技术的研究[J]. 现代化工, 2014(2): 167-169.  
HOU Z, LI W M, DUAN Z H. Microwave Technology for Nondestructive Detection of Internal Defect in Composite Material[J]. Modern Chemical Industry, 2014(2): 167-169. (in Chinese)
- [6] 白纯,杨健,张丽丽. 微波无损检测中定向耦合器的设计及仿真[J]. 技术与科教创新, 2012(18): 37.  
BAI C, YANG J, ZHANG L L. Design and Simulation of Directional Coupler in Microwave Nondestructive Testing[J]. Technology and Science Education Innovation, 2012(18): 37. (in Chinese)
- [7] 黄晶, 阚沛文. 小波分析在管道缺陷超声检测中的应用[J]. 传感技术学报, 2003, 16(3): 263-266.  
HUANG J, QUE P W. The Application of Wavelet Analysis in Ultrasonic Testing of Pipeline Defect[J]. Journal of Sensing Technology, 2003, 16(3): 263-266. (in Chinese)
- [8] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等. 基于新兴脉冲涡流传感器的裂缝缺陷定量检测技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(1): 73-77.  
YANG B F, ZHANG H, ZHAO Y F, et al. Quantification of Crack Defect Using a New Pulsed Eddy Current Sensor[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2011, 12(1): 73-77. (in Chinese)
- [9] 齐勇,李勇,陈振茂,等. 一种新型脉冲涡流提高交汇点的实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(6): 80-84.  
QI Y, LI Y, CHEN Z M, et al. Experimental Investigation on a New Lift-off Intersection Point of Pulsed Eddy Current Testing[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012, 13(6): 80-84. (in Chinese)
- [10] 张辉,杨宾峰,王晓锋,等. 脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(1): 52-57.  
ZHANG H, YANG B F, WANG X F, et al. Simulation Analysis and Experimental Research on Parameter Influence in Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technique[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012, 13(1): 52-57. (in Chinese)
- [11] LI Y, CHEN Z M, QI Y. Generalized Analytical Expressions of Liftoff Intersection in PEC and a Liftoff-Intersection-Based Fast Inverse Model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 2931-2933.
- [12] 周德强,李勇,张秋菊,等. 脉冲涡流金属厚度检测信号及其特征提取[J]. 中国机械工程, 2012, 23(15): 1771-1773, 1778.  
ZHOU D Q, LI Y, ZHANG Q J, et al. Feature Extraction of Pulsed Eddy Current Signals on Metal Thickness Measurement [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(15): 1771-1773, 1778. (in Chinese)
- [13] 齐勇,刘相彪,李勇,等. 基于磁场梯度测量的脉冲涡流检测关键技术研究[J]. 中国机械工程, 2014, 15(8): 1108-1112.  
QI Y, LIU X B, LI Y, et al. Pulsed Eddy Current Testing Based on Gradient Magnetic Field Measurement [J]. Mechanical Engineering, 2014, 15(8): 1108-1112. (in Chinese)
- [14] LI Y, YAN B, LI D, et al. Gradient-Field Pulsed Eddy Current Probes for Imaging of Hidden Corrosion in Conductive Structures[J]. Sensors & Actuators: A, Physical, 2016(238): 251-265.
- [15] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. A Feed-through ACFM Probe with Sensor Array for Pipe String Cracks Inspection[J]. NDT E Int, 2014, 67, 17-23.
- [16] LI Y, REN S T, YAN B, et al. Imaging of Subsurface Corrosion Using Gradient-Field Pulsed Eddy Current Probes with Uniform Field Excitation[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1747-1760.
- [17] 高印寒,吴定超,李春光,等. 涡流实时成像技术的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2003(4): 44-47.  
GAO Y H, WU D C, LI C G, et al. Study of Eddy Real-Time Imaging Technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2003(4): 44-47. (in Chinese)
- [18] NAGAYA Y, TAKAGI T, UCHIMOTO T, et al. Identification of Multiple Cracks from Eddy-Current Testing Signals with Noise Sources by Image Processing and Inverse Analysis[J]. IEEE, 2004, 40(2): 1112-1115.

(编辑:徐敏)