超声散斑相关法测量转角的相关性研究^{*}

郑伟花^{1†} 朱鸿茂² 贾 虎¹

(1 南阳师范学院 南阳 473061) (2 华中科技大学 武汉 430074)

摘要 对于在用超声散斑相关法测量时,转角对不同强度散斑的影响及散斑场相关性和转角之间的 关系做了研究。为了分析界面位移前后,不同照射区域对散斑振幅是如何影响的,文中把超声照射 区域化为 M 个反射基元,利用大量反射基元的统计规律,推导出了散斑形貌误差和统计误差对散 斑场的影响关系,这个关系就是散斑的振幅越大,受转角大小的影响就越小;转角越大统计误差对 散斑强度的影响就越大。为了验证这个结论作者建立了实验系统,实验结果显示理论分析是正确的。 关键词 超声散斑,相关性,转角

Correlation of rotating angle measurement by the ultrasonic speckle correlation method

ZHENG Wei-Hua¹ ZHU Hong-Mao² JIA Hu¹ (1 Nnanyang normal university, Nanyang 473061) (2 Huazhong University of Science and technology, Wuhan 430074)

Abstract This paper studies the effect of rotating angle on speckle's intensity and the relationship between ultrasonic speckle correlation and the rotating angle by ultrasonic speckle correlation method. In order to make clear how the changed area influences the amplitude of the speckle, the irradiated area is divided into M reflecting element. From the statistical principle of large number reflecting element, it is studied that how the speckle profile error and the statistical error influence the speckle's field. It is found that: as the intensity of speckles increases, the influence of profile error on the speckle's field decreases; as the rotation angle increases, the influence of the statistical error on the speckle's intensity increases. An experimental system is established for verifying the above conclusion, the experimental results show the theoretical analysis is correct.

Key words Ultrasonic speckle, Correlation, Rotating angle

1 引言

超声束照射粗糙界面时,由于界面的漫

反射和超声的相干性,在空间形成了随机分 布的散斑,将散斑颗粒作为信息载体,利用 数字相关方法可以测量界面的位移及转角。

2009-03-23 收稿; 2009-07-22 定稿

朱鸿茂(1937-), 男, 硕士, 教授, 博士生导师。 贾虎(1980-), 讲师, 博士。

^{*}南阳师范学院专项项目(编号: ZX2009002)

作者简介:郑伟花(1978-), 女, 河南南阳市人, 博士, 讲师, 研究方向: 超声检测、力学等。

[·]通讯传承:题传苑, E-nail-zheneweihen 1230@163-fameElectronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.r

激光散斑相关测量是基于界面位移前后两幅 数字散斑灰度图像进行相关搜索运算,不少 学者已经做了很深入的研究^[1-2],并且也有学 者对激光散斑相关法测量的误差进行了分析 讨论,给出了界面位移与激光散斑相关性的 关系。关于使用超声散斑相关法进行界面位 移的测量,也有一些学者作出研究如文献^[3] 所描述,但是对于超声散斑相关法测量的误 差的研究一直是个空白,这也是超声散斑相 关法发展较慢的原因之一。为此本文将对超 声散斑相关法测量时的误差来源,及在测量 时转角对相关性和散斑形貌的影响进行分析 和讨论。

界面发生运动时, 整个散斑场也随之发 生运动,二者之间有确定关系,这个关系就 是散斑相关法测量界面变形的基础。激光散 斑相关法中对误差和相关性的推理和假设运 用到超声散斑相关法时是仍然成立的,可以 进而利用误差理论和统计光学的理论对超声 散斑相关法测量界面位移时的形貌误差和相 关性进行推导。我们在进行实验验证时,对 超声和激光采用不同的步骤:在接收散斑信 号时,不是采用 CCD 一次性接收全照射区域 的散斑信号输入微机形成光强矩阵, 而是采 用步进电机带动单个探头逐个像素点的接收 信号,每接收一个散斑信号就把信号存于微 机保存下来,将微机采集到的超声散斑信号 的数据经过合理的处理形成声强矩阵。虽然 增加了实验的繁琐但能保证超声散斑信号不 象激光那样容易受各种背景光的影响。

超声不仅能在气体、液体,还能在固体 内部传播,所以它能够对固体内部进行测量, 它有激光所不能实现的优点,因此超声散斑 相关法将比激光散斑相关法更有广阔的前 景。对超声散斑相关法误差和相关性的研究, 也将有利于在运用超声散斑相关法测位移时 如何获得更准确的数据,和更适合的数据处 理方法作出贡献,使超声学向无损检测的实际应用跨了一步。

2 理论分析

如图1所示,设界面坐标系为 $o_0 - x_0, v_0$, 超声照射到区域 a+b 上, 此区域是距离 o₀ 点 为 r 的圆形照射区域。当界面以 oo 点逆时针 旋转了 θ 角度后,即界面在 x_0 和 y_0 方向产生 了 $(u(\mathbf{r}, \theta), v(\mathbf{r}, \theta))$ 的位移之后, 超声照射区域 变为 b+c, b 是两个散斑区域中相同的部分, 而 a 和 c 部分是界面上完全不同的区域。对 于界面反射超声散斑来说,如果界面位移后 的散斑颗粒的形貌没有发生变化,用相关法 进行搜索后, 位移前后两个散斑强度矩阵相 关系数的最大值 C_{max}=1; 如果散斑颗粒的形 貌发生了变化,则他们之间相关系数的最大 值 C_{max}<1。由于各种的原因,在实际相关搜 索中总有 C_{max}<1,影响了测量精度,其中最 主要的原因就是位移前后界面被照射的区域 发生了改变。这个改变是从界面上完全没有 联系的 a 部分变成了 c 部分, 由他们形成的 散斑场之间是没有联系的,而相同部分 b 部 分产生的散斑场不发生变化。所以当界面发 生转角时, 散斑颗粒的形貌将发生变化, 使 相关系数下降。



如何获得更准确的数据,和更适合的数据处。 如何获得更准确的数据,和更适合的数据处。Publishing Plouse 然前后超声照射区域。http://www.academic.journal Electronic Publishing Plouse 然前后超声照射区域。http://www.academic.journal.electronic Publishing Plouse Application Statements 为了分析 a 和 c 不同部分的超声照射区 域产生的散斑场对散斑的复振幅的具体影 响,现建立如图 2 的坐标系,其中物界面坐 标系仍为 $o_0 - x_0, y_0$,散斑接收面的坐标系为 o - x, y, P 点的复振幅 $A_p(x, y)$ 为界面上 a 和 b 两部分在 P 点的声波的复振幅 $A_a(x, y)$ 和 $A_b(x, y)$ 的相干叠加。根据文献^[4]可知,当 界面仅有面内位移,且超声垂直照射垂直接 收散斑场信号时,散斑将和界面有相同的位 移即

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$
(1)



图 2 超声入射和接收示意图

其中(U,V)为界面位移, (u,v)为散斑位移。 所以当界面有一个 θ 的转角后散斑也将会有 一个 θ 的转角,这样 P 点移动至 P'点。P'点 的复振幅 $A_{P'}(x-u(r,\theta), y-v(r,\theta))$ 为 b 和 c 两部分的复振幅的相干叠加,即

$$\begin{cases} A_{P}(x, y) = A_{a}(x, y) + A_{b}(x, y) \\ A_{P'}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) = A_{b}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) + A_{c}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) \end{cases}$$
(2)

(1) 假设反射界面的粗糙度均匀,有转角前被超声照射区域内反射基元总数为 M,b 部分 反射基元为 N,则 a 和 c 部分的基元都为 M-N,则式(2)可写成

$$\begin{cases} A_{P}(x, y) = A_{b}(x, y) + \sum_{i=1}^{M-N} A_{ai}(x, y) \exp[j\varphi_{ai}(x, y)] \\ A_{P'}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) = A_{b}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) \\ + \sum_{i=1}^{M-N} A_{ci}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) \exp[j\varphi_{ci}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta))] \end{cases}$$
(3)

 $\left(\frac{|\Delta A|}{|A_P|} = \frac{|A_P - A_{P'}|}{|A_P|} \right)$ 为形貌误差对散斑场影响程度,由散斑空间运动规律可知,式(3) 中 $A_b(x, y) = A_b(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta))$,便于比较,由对 P 点振幅贡献较大的部分 $|A_b|$ 近似代替 $|A_p|$,所以

$$\frac{|\Delta A|}{|A_P|} = \frac{|A_P - A_{P'}|}{|A_P|} = \frac{\left|\sum_{i=1}^{M-N} A_{ai}(x, y) \exp[j\varphi_{ai}(x, y)] - \sum_{i=1}^{M-N} A_{ci}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta)) \exp[j\varphi_{ci}(x - u(r, \theta), y - v(r, \theta))]}{|A_b|}$$

$$(4)$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.r

若照明区域因转角有了一个微小区域的 变化时,式(4)中 $|A_b|$ 受转角大小的影响很 小可忽略,它仍然可近似代替 $|A_p|$,而分子 中转角 θ 对于 a和 c 对 P 点振幅贡献很小的 部分的影响不能忽略,由此可知, $|A_b|$ 越大 时即散斑本身的振幅越大,散斑的形貌误差 对散斑场的影响越小,同时也说明强散斑的 形貌受位移的影响比弱散斑小。

(2) 当超声照射区域足够大并为粗糙界 面时,超声照射区域内的复振幅分布符合高 斯分布,其概率密度分布函数为:

$$P(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp[-\frac{(A - A_0)^2}{2\sigma^2}]$$
 (5)

用 $\alpha = \frac{\sigma^2}{A_0^2}$ 来表示各点散斑强度在统计条件 下受影响的程度,其中 A_0 代表 b 区域散斑复 振幅模的统计平均。设第*i*个散射基元的振幅 随机变量为 $\frac{d_i}{\sqrt{M}}$,根据统计学知识可知其中 d_i 对于所有的*i*均有同分布。a、b、c 区域的 散斑的复振幅均为圆形复高斯随机变量,实 部和虚部方差相等,分别为:

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 = \frac{1}{2M} \sum_{i=N}^M \langle d_{ai}^2 \rangle = \frac{M-N}{2M} \langle d_{ai}^2 \rangle \qquad (6)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^N \langle d_{bi}^2 \rangle = \frac{N}{2M} \langle d_{bi}^2 \rangle \tag{7}$$

假设整个反射界面粗糙度均匀,各散射元对 P 点复振幅的贡献则相等,即

$$\langle d_{ai} \rangle = \langle d_{bi} \rangle \tag{8}$$

将式 (6)、(7) 和式 (8) 代入α

$$\alpha = \frac{\sigma^2}{A_0^2} = \frac{\sigma_a^2}{2\sigma_b^2} = \frac{M - N}{2N} \tag{9}$$

若令
$$L = M - N$$
,式(9)可写成

$$\alpha = \frac{L}{2(M_{de}L)}$$
(10)
(C)1994-2021 China Academic Journal Electron

式(10)表明当L越大,即转角越大对散斑 颗粒的强度影响就越大,同时因为界面位移 (*u*,*v*)也与*r*有关,所以旋转点的选取也对散 斑颗粒强度有影响,在实际测量中尽量选取 与照明区域较近的点为旋转点,误差也会相 对减少。

3 实验

为了验证式(4)和式(10)的结论,建 立如图 3 所示试验系统。长方体铝试件的表 面加工成粗糙界面,并放于水槽中,聚焦探 头 R(直径 20mm,频率 2.5MHZ,焦距 30mm) 垂直界面发射超声波并接收散斑信号,探头 R 与平移台控制器相连接,由步进电机驱动, 带动探头在不同位置发射和接收信号。水槽 的底部和旋转仪固定,由旋转仪带动水槽实 现界面的转角。



3.1 转角大小对散斑场相关系数的影响

在试件表面上选取 19×19 象素的区域进 行散斑信号的采集,每两个像素之间的实际 距离是步进电机行走三百步的距离,每三百 步步进电机行走的实际距离是 0.36mm,所以 19×19 像素测量的是试件上 6.48×6.48mm² 区 P城1:s根据散斑横向尺寸公式^[5]可知,杰实验ww.cnki.t

散斑的横向平均尺寸为 1.1mm, 所以在本次 试验所测试的区域内散斑平均个数为25个。 将首次采集的信号输入微机,然后给界面 1° 的旋转角,对同一区域进行散斑信号的采集, 此后依次增加1°,这样在第11次采集数据后 界面的转角达到 10°, 此时得到 11 个散斑场, 对这11个散斑场进行相同的三次样条插值。 在第一个散斑场选取与旋转点有相同距离18 个像素的峰值强度分别为 1084.7 和 197.8 的 较高强度凸形散斑和较低强度凹形散斑区 域,将选取散斑区域在旋转后的10个散斑场 上进行相关搜索,分别找出最大相关系数, 做拟合曲线如图 4 所示,图中上线是峰值强 度为 1084.7 的凸形散斑区域在 10 个不同转 角的散斑场上进行相关搜索获得的最大相关 系数的拟合曲线,下线则是峰值强度为197.8 的凹形散斑区域在 10 个不同转交散斑场上 搜索出的最大相关系数拟合线。曲线附近的 黑色*标记是高强度散斑和低强度最大相关 系数的实际值,由图4可明显看出,所有曲 线都是呈下降趋势,即表示,不管高强度散 斑还是低强度散斑,转角越大,相关系数越 小,当相关系数下降到某一值,可以认为它 们不再具有相关性,相关法对测量转角就不 再实用。这也是超声散斑相关法测量转角有

一个最大值的原因。在实际测量时,人们总希望测量的范围越大越好,图4的结论提供了一个扩大测量范围的方法,就是尽量的使用较大能量的超声束照射测量区域。



图 4 不同转角时散斑最大相关系数关系曲线

3.2 转角大小对不同强度散斑形貌的影响

当界面发生转角时,散斑颗粒也发生位 移。仍在原散斑场选取和上面提到相同的两 个不同峰值的散斑区域进行跟踪,当界面发 生转角后,用坐标转换公式搜索到散斑应该 所在位置,然后比较搜索到的散斑形貌如图 5 和图 6 所示:



(1) 峰值强度为 1084.7 的散斑强度形貌变化图



(2) 峰值强度为 197.8 的散斑强度形貌变化图



图 6 低强度散斑形貌受转角大小影响的比较

纵向对比图 5 和图 6 中旋转相同角度的 散斑可知,由超声散斑照射界面其反射波在 空间形成的散斑,其强度形貌随转角变化, 转角大小对高强度散斑的形貌影响较小,而 对低强度散斑的形貌有较大影响,与前面理 论分析的结果相一致。

3.3 超声散斑测量转角范围的讨论

由图 4 中的曲线可知不论强散斑还是弱 散斑在有了转角后与原散斑的相关系数都呈 下降趋势,在相关系数低于 √2 7 可,一般就 不再认为这二者具有相关性,本实验中强散 斑在转角达到 10 度时,位移前后散斑的相关 系数仍然达到 0.859,可认为他们仍然相关, 而弱散斑在转角达到 9 度时,相关系数已经 是 0.643,此时认为他们不再相关。用散斑相 关法测量位移时,往往扫描的是含有多个散 斑的区域,而这些散斑有强有弱,强散斑受 弱散斑的影响,测量范围不能达到最强散斑 所能测量的范围,因此可以把某次试实验中 最强散斑所能测量的范围认为是本次试验所 有散斑区域能测量的范围的最大值。

4 结论

各种误差原因使得测量转角有一定的范围, 并且界面旋转前后散斑场的相关性也有所变 化。文中以散斑统计学为基础,推导出不同 强度超声散斑颗粒的形貌受转角大小的影响 也是不同的,较大强度的散斑颗粒形貌受影 响较小,较小强度的散斑颗粒的形貌受影响 较大;并推出超声散斑相关法在测量转角时, 其旋转前后散斑场的相关系数是随转角的增 大而减少。文中的试验验证了这些理论分析 的正确性。

参考文献

- 高建新,周辛庚.数字散斑相关方法原理和应用.力学 学报:1995,27(6):724-731.
- [2] Gao Jianxin, Zhou Xingeng. Principle and Applications of digital speckle correlation method. Acta Mechanica Sinica: 2005, 27(6): 724-731.
- [3] 孙一翎,李善祥,李景镇.数字散斑相关方法测量的研究和改进.光子学报:2001,30(1):54-57.
- [4] Sun Yiling, Li Shanxiang, Li Jingzhen.Investigation and Modification of the digital speckle correlation method. Acta Photonica Snica: 2001, 30(1): 54-57.
- [5] 朱鸿茂, 刘永辉, 胡鹏, 等. 界面反射超声散斑统计特性. 声学学报: 2002, 27(3): 213-217.
- [6] Zhu Hongmao, Liu Yonghui, Hu Peng, etc. Statistical properties of reflected ultrasonic speckles. Acta Acustica. 2002, 27(3): 213-217.
- [7] 朱鸿茂,郑伟花,黄忠文,等.运动界面上反射超声散斑

(C)1步超点数斑相关法在测量转角太小时电击nic Publis窑闸营动的硬落. 烟鸭常期i3004s 53408d 2614 t2629//www.cnki.r

- [8] Zhu Hongmao, Zheng Weihua, Huang Zhongwen, etc. Research on spatial motion of ultrasonic speckles back-scattered from an interface in motion. Acta Physica Sinica: 2004, 53(8): 2614-2620.
- [9] H.-M.-Zhu, Y.-Y.-Wu, Y.-Y.-W. Average longitudinal size of ultrasonic speckles back-scattered from an interface. Archive of Applied Mechanics: 2004, 73: 841-845.
- [10] 吴艳阳,朱鸿茂,王寅观.高斯界面背向散射超声散斑 复振幅统计特性,声学学报:2004,29(3):249-253.
- [11] Wu Yanyang, Zhu Hongmao, Wang Yanguan, etc. Statistical properties of complex amplitude of ultrasonic speckles back scattered from a Gaussian interface. Acta Acustica: 2004, 29(3): 249-253.
- [12] Zhu Hongmao, Zheng Weihua. Measurement of object spatial displacement by ultrasonic speckle correlation method. Proc. Of 16th World Conference on Nondestructive Testing, August 30-September 3, 2004, Montreal Canada.

2010 建筑未来・声学工程技术论坛 邀请函

声学工程技术论坛旨在总结与交流已经完成或在建工程的设计与施工经验,探讨建筑声学、扩声系统、 工程施工、声学材料及声学设备等一系列声学专题。

近年来,我国建筑声学在研究和设计方面已经有了一些长足的发展,取得了一系列优秀的工程成果,围绕 建筑声学的研究也进入了一个新的阶段,它的前景是广阔的,它的奥妙还值得去探索,市场更有待于去开发。 歌剧院、多功能剧场、音乐厅、电影厅等大量观演建筑的建设,均需要建筑声学参与。宾馆、车站、候机楼、 展览建筑等公共建筑也需要良好的声学环境。即使普通的住宅也有很多噪声控制的工作需做。面对社会对建 筑声学的大量需求,需要工程业主、建筑声学科研设计人员、建筑师、室内设计师、建筑声学材料生产和销 售商、设备供应商、工程承包商等共同参与。让建筑声学专业人员把在研究、实践中获得的知识和经验与同 行交流,让大家共享专家的知识和经验,提高建筑声学行业的整体技术水平,发展和壮大建筑声学产业。

本次论坛将邀请国内著名的行业专家学者及行业政策制定相关负责人,共同交流建筑声学技术、探讨建 筑声学发展之路,剖析声学产业生存之道,推进中国声学产业健康发展。

这将是一次启发思维和提升理念的盛会,我们诚挚邀请社会各界特别是赋有远见卓识的精英人士和相关 产业优秀企业莅临此次活动。为共同推进声学产业快速正规发展集思广益、献策荐言。

给十三亿人民以更多的听觉关怀!让我们一起共勉!

- 主办: 中国建筑学会建筑物理分会建筑声学专业委员会 建筑未来高峰论坛组委会 清华大学建筑学院建筑物理实验室
- 协办: 佰家丽声学科技材料(苏州)有限公司 深圳市中雅机电实业有限公司
- 承办: 清大华建(北京)科技有限公司
- 时间: 2010年5月7日~5月9日
- 地点: 中国·浙江大学(杭州)玉泉校区邵逸夫科学馆

论坛组委会联系方式

秘书处:北京清华大学中央主楼 101 室

联系人: 陈险峰

联系电话: 010-62797308/62784105/62782679

回执传真: 010-62782679

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n