

电子散斑干涉技术在无损检测领域的应用研究

Study on Application of Electronic Speckle Pattern Interferometry in the Field of
Non-Destructive Testing

[卓力特光电仪器（苏州）有限公司](#)

<http://www.trustyiqi.com/>

trustyiqi@163.com

绪论：电子散斑干涉技术（Electronic Speckle Pattern Interferometry）由于其高精度、全场、实时测量等突出优点近年来获得了长足的发展，被广泛应用于无损检测领域，本文着重介绍电子散斑干涉技术的基本原理及其在无损检测领域的发展概况，并且与其他常规无损检测方法进行对比分析其在无损检测领域的应用优势，最后重点介绍 ESPI 无损检测技术在国内的发展现状以及目前国内在电子散斑无损检测技术的产品。

ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), which is widely used in the field of non-destructive testing, has had considerable development in recent years due to the outstanding merits of high precision, overall measurement and real-time measurement. This paper focuses on the basic principles of electronic speckle pattern interferometry and situation of the development in the field of non-destructive testing. What is more, the advantages of its application in the field of non-destructive testing are analyzed compared with the other conventional NDT methods. Finally, the current situation of development of ESPI nondestructive testing technology and the current domestic electronic speckle products in China are introduced.

关键词：电子散斑干涉技术；无损检测；光测力学实验室；ESPI
Electronic Speckle Pattern Interferometry；NDT；Lab of Optical
Measurement Mechanics；ESPI

1 概述

电子散斑干涉技术（Electronic Speckle Pattern Interferometry）是一种测量光学粗糙表面位移或变形等物理量的干涉测量技术，一直以来广受人们所重视，并且被应用在无损检测（NDT）中，具有高精度、全场、实时测量等特点，有着重要的理论研究和实用价值。

电子散斑干涉无损检测技术^[1]是基于物体结构损伤处的外表面在静载荷或动载荷的作用下会产生非均匀的表面位移或变形,在有规则的干涉条纹中会出现明显的异状,如不连续、突变的形状变化和间距变化等;通过测算这些微小的变化,便可查明物体内部缺陷及其位置。

2 ESPI 基本原理及发展概况

2.1 ESPI 基本原理

电子散斑干涉测量技术(简称 ESPI)作为一种高精度的光学测量技术被广泛应用于无损检测和微变形检测中,具有测量精度高、非接触测量、测量速度快等特点。电子散斑干涉法(ESPI)采用 CCD 或 TV 摄像机采集相干散斑干涉场的光强信息,电子信号经过电子或数字处理后就以条纹图像的形式显示在图像监视器上。条纹可代表物体表面的振动模式、离面位移、面内位移、位移导数及物体形状的等值线,它们的获得依赖不同的光路布置^[2]。

电子散斑干涉技术是以激光散斑作为被测物场变化信息的载体,利用被测物体在受激光照射后产生干涉散斑场的相关条纹来检测双光束波前后之间的相位变化。一束激光被透镜扩展并投射到被检测物体的表面上,反射光与从激光器直接投射到摄像机的参考光光束发生干涉,在被照射的表面产生散斑场及一系列散斑图像。当物体运动时,这些散斑会随之发生变化,这些变化表征出被测物体表面的位移场变化或形变信息。使用 CCD(电荷耦合器件)摄像机得到视频信号,由计算机软件处理分析后在监视器上显示出表征物场变化的散斑干涉条纹图,通过数值计算将这些条纹解析为人们所熟知的物理量。电子散斑干涉技术将全息干涉条纹图像转化为数字图像存储在计算机中进行运算和处理,处理过程实现了数字化、自动测量和对结果的直观解释。通过布置不同光路,电子散斑干涉技术可测量物体的离面位移和面内位移。图 2.1.1 是离面位移测量示意图,图中 M 表示反射棱镜,BS1 和 BS2 为分光棱镜。激光束经分光棱镜 BS1 后分成测量光束和参考光束,测量光束照射到被测物体上;扩束后与经反射棱镜后的参考光束在分光棱镜 BS2 中发生干涉,CCD 摄像机记录干涉条纹,将图像信息传送到计算机中处理,最后在显示器上实时显示测试结果。图 2.1.2 是卓力特光电仪器(苏州)有限公司生产的一维离面位移相移电子散斑干涉仪所采用的光路示意图。

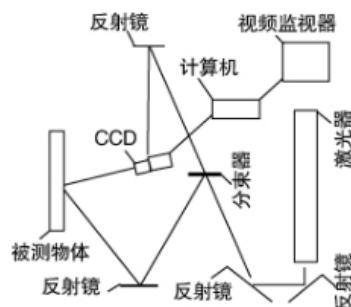
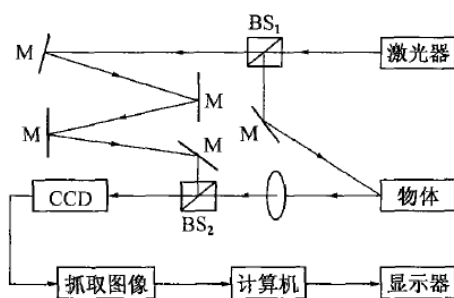


图2.1.1 电子散斑干涉离面位移测试示意图 图2.1.2 一维离面仪器光路示意图

2.2 ESPI 发展概况

早在 1914 年散斑现象就被人们所发现，但一直未予以重视。到了 1960 年，随着气体激光器诞生，实验力学界才利用了全息干涉技术。但由于散斑的存在，影响了全息图质量，散斑开始作为一种噪声得到了系统的研究。大量的工作是试图如何克服消除散斑效应。直到 1968 年，Archbold 等人首次将散斑技术应用在测量中。散斑干涉的基本原理是在 1970 年由 Leendert z 建立的。他提出散斑相关干涉术 (SPC)。1971 年 But ters 和 Leendert z 首先应用光电子器件 (摄像机) 代替了全息干板记录散斑场的光强信息，并存储在磁带上，由电视摄像机输入的物体变形后的散斑图通过电子处理的方法不断与磁带中的变形前的散斑图进行比较处理，从而在监视器上能观察到散斑干涉条纹，这种方法就称为电子散斑干涉法。同年，Macovski 也发表了类似的文章。1874 年 Pedersen 等把硅靶摄像管作为光电探测头应用在 ESPI 中，提高了 ESPI 系统对光的敏感度。1976 年 Lokberg 等把全息干涉术中的参考光位相调制技术引入电子散斑，使之能测量振动的位相分布；1977 年，Wykes 讨论了电子散斑干涉法中的消相关效应，并提出了相应的改进措施；1978 年，Jones 等利用双波长电子散斑干涉法测量了物体的轮廓；1981 年 Jones 等系统地对电子散斑干涉中各种参数的选取和优化作了详细报道。这样，几乎用了十年的时间，人们完成了对电子散斑技术的基本原理和它的性质的研究，提出了改善 ESPI 条纹质量的系统参数选取方法，为以后的研究和应用打下了基础，并研制了商品化的 ESPI 干涉仪。随后，Lokberg 把断续激光用于电子散斑，1987 年，Wykes 等使用小功率激光器和半导体激光器实现了电子散斑干涉术，从而使系统更加紧凑、实用。

3 无损检测技术的发展概况

无损检测是以不改变被检测对象的状态和使用性能为前提，应用物理和化学

等现象，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试，测定材料结构物理和机械性能或内在各种缺陷以及其它技术参数，借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性以及适用性的综合性应用的检测技术科学^[3-5]。由于现代工业和科学技术的进步与工业生产的发展，近一二十年来无损检测技术有了异常迅速的发展，形成了一门富有生命力的新兴学科。无损检测学科几乎涉及到了物理学中的光学、电磁学、声学、原子物理学以及计算机、数据通讯等学科，在冶金、机械、石油、化工、航空、航天各个领域有广泛的应用，涉及到科学技术的每个领域，已发展形成了数十种无损检测的方法，并且成为保证产品质量、仪器设备可靠、以及诸如核反应堆、宇宙飞船等工程安全运转的重要手段。表 3.1 列出了各种无损检测技术的适用性与局限性^[6]。

方法	种类	原理	检测主要缺陷	主要局限	声与振动	声学阻抗与频率的变化	大的气孔、分层、脱粘缺陷的检测，厚度测量	灵敏度较低，对一些特殊形式的缺陷检测有困难，手工操作。				
超声	超声回波	测定反射回波	气孔、疏松、分层、裂缝、夹杂、基体变化等检测	缺陷的取向是关键，但要求取向与声束垂直对层状结构多数的缺陷是适用的。 水浸法或喷水技术的应用会引起构件边缘进口处的损坏。	声与振动	测量阻抗和声速	气孔、分层和粘接的整体性	灵敏度低。				
	超声穿透	测定声速衰减	气孔、分层、夹杂缺陷检测，孔隙率测定			测量振幅和声速	近表面脱粘、分层、夹杂等缺陷的检测		精度随振动干扰严重下降，对防腐要求很高。			
	超声 C 扫描	C 扫描显示	气孔、分层、外来夹杂缺陷的快速检测		除上述限制外，主要还不能实时检测。	光学	激光全息	测量因加载引起的表面变形	测量与表面连通的分层、裂缝等缺陷	使用不方便，渗透剂可能导致材料变质。		
	超声背散射	测定反向散射	测定纵向裂缝、纤维及铺层质量			着色	利用渗透现象	增加与表面连通的分层、裂缝检测的灵敏度	温度测量	测量因缺陷引起的热性能变化	近表面气孔、分层、脱粘、夹杂缺陷的测量	适用于无体积裂缝与分层的测量
	超声频谱	分析反射频谱	能定量检测分层、脱粘、气孔、富脂与贫脂、固化不合格			射线不透明液体	增加缺陷部分的射线透度比	增加与表面连通的分层、裂缝检测的灵敏度	热成像技术	测量振动引起的热性能变化	动态监控或研究断裂机理	正在研究中的新技术，数据解释尚待解决
	超声成像	测声的干涉成像	能形象地显示气孔、分层等缺陷			需要浸入液体中。	声学检测	振动热图	测量声发射能量	测量应力波因子变化	损伤扩展监视	限于碳/环氧复合材料。
射线	X 射线	测量对射线的吸收	气孔、疏松、越层裂缝、富脂与贫脂缺陷检测，可有限制地测量纤维体积比和纤维质量，尤适用于测量金属夹杂	缺陷的取向是关键，要求与射线平行，不适用于分层等缺陷的检测，解释困难。	其它	涡流	测量涡流特性变化	测量导电纤维的缺陷及铺层	设备昂贵而且较复杂。			
	中子射线	测量对中子射线的吸收	纤维不正、夹杂检测，对纤维排列和体积比有较 X 射线高的灵敏度	除缺陷取向的限制外，中子源费用昂贵且对人体有害。	微波	测量对微波的吸收和反射	测气孔、分层、脱粘等缺陷					

4 ESPI 无损检测技术应用现状及优势分析

4.1 应用现状分析

近年来，电子散斑干涉技术（ESPI）有了很大发展，已成功应用于许多工程机械的无损检测中^[7]，例如飞行器部件、复合材料分离部位、蜂窝结构和火箭推进剂药柱中的裂纹、分层、开裂和气孔等缺陷检测。图 4.1.1 和 4.1.2 是电子散斑干涉测试系统检测到航天结构和蜂窝结构受到冲击之后的变形损伤情况。

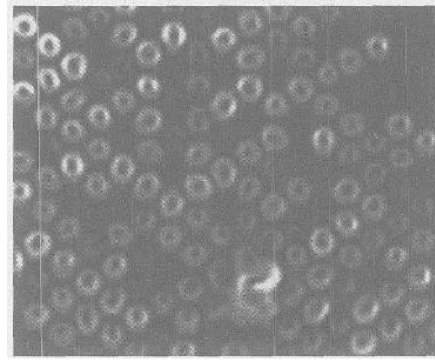
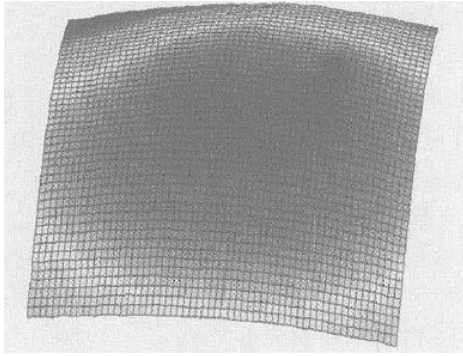


图4.1.1 航天结构热冲击变形损伤

图4.1.2 蜂窝结构的内部损伤位置

电子散斑干涉无损检测的应用领域也在不断扩大,不仅应用于对微机电系统(MEMS)的质量检测^[8],也成功应用于文物保护。意大利科学家^[9]应用电子散斑干涉技术成功测量了古壁画和古建筑等文物变形损伤情况。2001年由Gred 等^[10]发表了使用改进后的电子散斑干涉技术检测中国秦始皇兵马俑陶器腐化过程的文章,为保存这些珍贵的文物积累了丰富的经验。

4.2 优势分析

与常规无损检测手段如射线、超声波、电磁、渗透和磁粉检测技术等相比,电子散斑干涉技术主要有以下优点:①测量信息丰富,可实现实时处理,测量精度高,能达到激光的波长级别。②能进行全场检验,使用方便,检测效率高,适用于形状比较复杂的物体。③检测结果易于保存,电子散斑条纹图可以数字形式保存在存储介质中,便于后续处理分析。④采用相减模式处理干涉散斑条纹,消除了一般杂散光的影响,测试仪器可在较强的光照条件下工作,即使在太阳光下也可测量高温物体的损伤。

由于电子散斑干涉方法具有上面的优点,它广泛应用于微变形测量、无损检测、应力应变分析,以及振动测量等领域,在科研、工业生产、国防建设等领域都有着广泛的应用前景。

4.3 国内发展现状

我国在20世纪80年代中后期开始电子散斑干涉技术仪器化和工程实用化的研究。朱晨等^[11]对飞机发动机活塞杆进行了疲劳检测,可检测出几百纳米的异常形变;梁明刚等^[12]则对车灯配光镜表面由于热应力而造成的变形以及细微裂纹缺陷进行了研究,得到了配光镜表面连续热变形的量化分布;阎正航等^[13]使用激光全息技术测量出平板试件振动,根据模态频率和振型的变化规律来识别裂纹存在的区域。任雅萍等^[14]将常规DSPI、相移技术、图像处理技术和计算机系统结合起来,已在90年代初研制成功了TVH-30型ESPI系统,并投入了

实际工程测量中。

电子散斑干涉技术仪器化研究的进展也很快,目前已出现商品化的电子散斑干涉检测系统。例如挪威Optor AS 公司的VibroMap 1000 检测系统^[15]可用于静力、动态、远距离和高温等不同条件下的测量,应用范围十分广泛。德国Ettemeyer 公司^[16]针对不同的机器设备开发出了一系列的测试系统,已广泛用于航空、航天及汽车制造等领域。

卓力特光电仪器(苏州)有限公司于2012年推出的由一维面内电子散斑干涉仪、一维离面电子散斑干涉仪、剪切散斑电子散斑干涉仪、三维相移电子散斑干涉仪等基于电子散斑干涉技术研发的光学测量仪器组成的光测力学实验室是国内在光测力学方面、电子散斑干涉技术的应用方面的一大突破,成功应用在无损检测领域对于微应变应力、三维全场的测量方面。

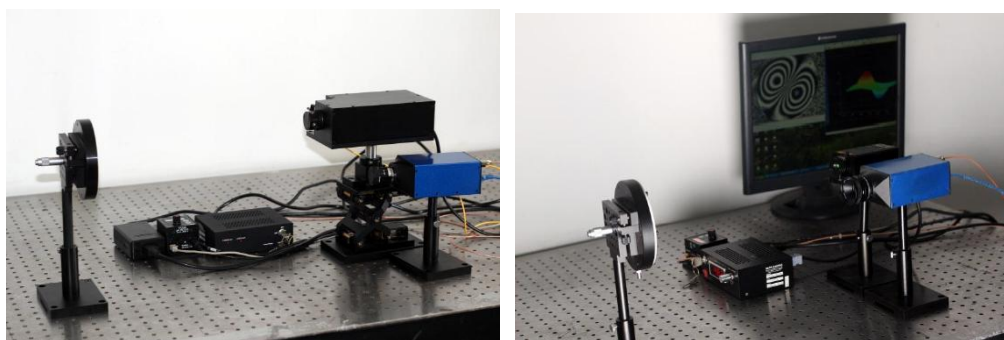


图4.3.1 一维离面电子散斑干涉仪 图4.3.2 相移剪切电子散斑干涉仪



图4.3.3 三维相移电子散斑干涉仪

参考文献

- [1]刘龙, 孟光.电子散斑干涉无损检测技术的应用现状.无损检测, 2006, 28 (1): 28~30.
- [2]秦玉文,戴嘉彬,陈金龙.电子散斑技术的发展.实验力学, 1996, ,1 (4): 410-416.
- [3]戴蓉, 激光技术在无损检测领域的应用与发展, 激光与光电子学进展, 2000,

414 (6) : 1~4

- [4]丁子明, 无损检测技术的应用与发展动向, 计测, 1991, 3: 52~56
- [5]吴天茂, 无损检测技术及其应用, 东方电机, 2002, 30 (3) : 267~270
- [6]陈积懋, 复合材料无损评定技术, 无损检测, 1991, 13 (3) : 74~77
- [7]Chen F, Luo WD , Daleb M , et al. High-speed ESPI and related techniques: overview and its application in the automotive industry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 40:459-485.
- [8] Petra Aswendt, Claus-Dieter Schmidta , Dirk Zielke ,et al. ESPI solution for non-contacting MEMS-on-wafer testing [J] . Optics and Lasers in Engineering , 2003 , 40:501 - 515.
- [9] Thomas Fricke-Begemann, Gerd Gulker , Klaus DHinsch, et al. Mural inspection by vibration measurements with TV-holography[J] . Optics and Lasers in Engineering , 2000 , 32 :537 - 548.
- [10]Gerd Gulker , Klaus D Hinsch , Arne Kraft. Deformation monitoring on ancient terracotta warriors by microscopic TV-holography[J] . Optics and Lasers in Engineering , 2001 ,(36):501 - 513.
- [11] Robers M , Scottini R. Pulsed eddy current in corrosion detection[A] . Proceedings of 8th ECNDT[C] .Barcelona :2002.
- [12]沈功田, 周裕峰, 段庆儒, 等. 现场压力容器检验的声发射源[J].无损检测, 1999 , 21(7):321 - 325.
- [13]杜波夫. 金属磁记忆法诊断管路、设备和结构[A] . 北京:2002.
- [14]任吉林, 等. 金属磁记忆检测技术[M] . 北京:中国电力出版社, 2000.
- [15] Optonor VibroMap 1000 TV-holography System Operating Manual[Z] . Norway :Optor AS, 2002.
- [16]Yang L, Schubach H , Wegner R, et al. 3D-Microscope-ESPI :Potential for Displacement Analysis on Small Areas[R]. Germany: Ettemeyer GmbH&co, 2000.