

文章编号: 0253-2239(2004)09-1292-5

基于液晶体的大错位量散斑相移技术研究*

陈金龙¹ 洪友仁²

(¹ 天津大学力学系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)
(² 香港城市大学机械工程与工程管理系统, 香港)

摘要: 系统地分析了大错位量散斑干涉术测量离面位移的原理,并结合晶体光学理论详细分析液晶体的相移过程,同时从理论上剖析了沃拉斯顿棱镜的错位机理,从而构造出一种新的基于液晶体实现大错位量散斑相移技术的测试系统。采用该检测系统对结构实体混凝土在不同养护时间情况下的力学行为进行测试研究。实验结果揭示:随着养护时间的增加,混凝土结构的力学性能指标也相应增加,但在养护 21 天后,混凝土结构材料的弹性模量和结构强度都达到某一稳定值(即标准试样在同等养护条件下的实验室测量值)。并且也发现该技术使用方便,检测时受环境的影响小,可以实现现场在线原位实时无损检测,并能够得到非常真实的检测结果,从而可以实现更精确的定量计算。

关键词: 物理光学; 大错位量散斑干涉; 液晶; 相移技术; 离面位移

中图分类号: TB921 文献标识码: A

Large-Shear Digital Speckle Interferometry Based on Liquid Crystal Phase Modulator

Chen Jinlong¹ Hung Y Y²

(¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instruments,
Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072
² Department of Manufacturing Engineering and Engineering Management,
City University of Hong Kong, Hong Kong)

(Received 22 July 2003; revised 25 November 2003)

Abstract: The large-shear digital speckle interferometry are employed to measure the out-of-displacement of concrete structure. Based on the phase-modulation theory of liquid crystal variable retarder, a retarder is an optical device that resolves a light wave into two orthogonal linear polarization components and produces a phase shift between them. The liquid-crystal phase shifter is successfully incorporated into the large-shear digital speckle interferometry system to enhance the measuring sensitivity and accuracy. From the experiment used to measure the out-of-displacement of an object, the optimum performance of the method is confirmed. In the meantime, the new technique is provided to evaluate the mechanical behavior of concrete structure with different curing time with non-contact, high accuracy, full-field, real-time and in-situ. The experimental results show that the strength of concrete structure will be enhanced as its curing time goes on, and after 21 days the strength value will be approaching to the design value.

Key words: physical optics; large-shear digital speckle interferometry; liquid crystal; phase-shifting; out-of-displacement

* 香港政府研究基金(9380028)、教育部留学回国人员基金资助课题。

E-mail: jlchen@eyou.com

收稿日期: 2003-07-22; 收到修改稿日期: 2003-11-25

1 引 言

错位散斑干涉法自 20 世纪 80 年代在电子散斑干涉法基础上发展起来,经过国内外许多学者的潜心研究,从理论上得到不断的完善和丰富,并且也逐

步拓宽其应用领域^[1~3]。与全息测表面位移不同的是它可测量物体表面位移的导数。由于错位散斑干涉法去除参考光而采用共光路排列,因此对振动和空气扰动不敏感。错位散斑干涉法以其非接触、高精度、全场性、实时性等特点在无损检测领域备受青睐并得到快速的发展。

近十几年来,为了提高该方法的测试灵敏度,国内外许多学者^[4~7]相继提出了偏振相移法和压电(PZT)相移法,但大多数仅仅局限于实验室里的原理性研究,很难把他们推广到具体的在线测量。压电相移法需要有参考光路,同时他本身的线性特性和工作稳定性较差,而偏振相移法尽管相位控制简单易行,但机构较复杂,相移过程中由于是通过转动偏振片实现相位调制,引起光强变动较大,因此,前面两种方法势必产生误差较大。近年来,一些研究者通过对液晶体性能进行了大量的研究,发现了光学和光电特性,并且也具有光强和相位的调制作用。目前,光强调制技术发展较快并在液晶显示器上用得比较普及,而相位调制过程中又具有光强不改变特性。Kelly 等^[8]通过实验发现减小光波波长可提高液晶体的相位调制能力并扩大其调制范围, Totzeck 等^[9]利用液晶体的相位调制作补偿器来测量微结构中线条, Kadono^[10]和 Soden^[11]等则是把液晶体作为相移器用到迈克耳孙错位干涉光路,但无法把他推广到工程实际应用中。本文充分利用沃拉斯顿棱镜(Wollaston prism)作为错位镜的特点,率先提出把液晶体与沃拉斯顿棱镜结合并组成一体化相移错位系统,通过该无损检测系统对结构实体混凝土的质量进行检测评估,发现该技术使用方便,检测时受环境的影响小,可以实现现场在线原位实时检测,并能够得到非常真实的检测结果,从而可以实现更为精确的定量计算。

2 大错位量散斑干涉法相关条纹的形成机理

大错位量散斑干涉系统的原理如图 1 所示,当用经过扩束的激光照射具有漫反射面的物体时,从该面上反射的子波相互干涉,形成明暗相间随机分布的激光散斑场。通过错位镜在 CCD 的靶面上形成轴方向有一错位量 δy 的两个散斑场,他们的复振幅分别为

$$A(x, y) = A_{10} \exp[i\Phi_{10}(x, y)], \quad (1)$$

$$A'(x, y + \delta y) = A'_{10} \exp[i\Phi_{10}(x, y + \delta y)], \quad (2)$$

则 CCD 靶面上合成光场的光强为

$$I_1 = I_{10} + I'_{10} + 2A_{10}A'_{10} \cos(\Delta\Phi_1), \quad (3)$$

其中

$$I_{10} = A_{10}^2, \quad I'_{10} = (A'_{10})^2,$$

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_{10}(x, y + \delta y) - \Phi_{10}(x, y).$$

当物体产生变形后相应两个错位场在靶面上合成光场的光强为

$$I_2 = I_{20} + I'_{20} + 2A_{20}A'_{20} \cos(\Delta\Phi_2), \quad (4)$$

这里的 $\Delta\Phi_2 = \Phi_{20}(x, y + \delta y) - \Phi_{20}(x, y)$ 。

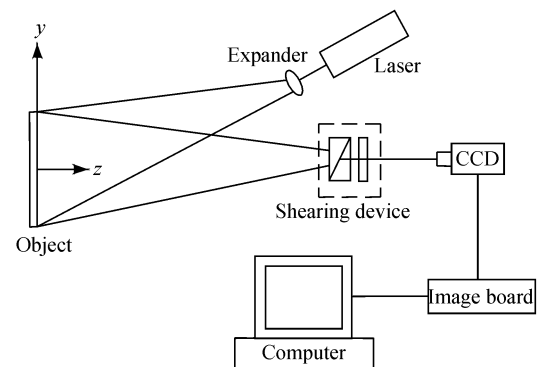


Fig. 1 Schematic diagram of digital shearography

尽管散斑场是随机独立的,但由沃拉斯顿错位镜的设计原理可知:两个错位场是等平均光强,所以有

$$\langle I_{10} \rangle = \langle I'_{10} \rangle = \langle I_{20} \rangle = \langle I'_{20} \rangle = \langle I_0 \rangle, \quad (5)$$

这里的 $\langle \dots \rangle$ 表示系综平均。

现在考虑由于变形导致两个散斑场存在解相关,引入相关系数 c ,我们得到

$$I(x, y) = 4(2 - |c|^2) \langle I_0 \rangle^2 - 4|c|^2 \langle I_0 \rangle^2 \cos(\Delta\Phi), \quad (6)$$

式中 $\Delta\Phi = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1$ 。

这样,在监视器屏幕上就可直接显现出明暗相间的散斑条纹图,同时计算机也可直接对条纹图进行处理和分析,直至提取出相位信息。当错位量(该实验中错位镜的错位角为 8°)足够大时,条纹代表被测点的离面位移信息^[12]。因此离面位移便可求出,即

$$w = \frac{\lambda \Delta\Phi}{2\pi(1 + \cos \alpha)}, \quad (7)$$

式中的 α 是入射光方向与被测点法线方向的夹角。

3 基于液晶体的相移原理

本实验采用 Meadowlark Optics 公司生产的液晶可变延迟器(D2040 型)作为相移器。液晶可变延迟器则用镀有能导电的钢锡氧化物的熔融石英光学

平板做成间隙几微米的盒子,在铟锡氧化物上覆盖薄薄介电层,在盒内注入具有双折射效应向列液晶材料。利用其电控双折射效应,即通过液晶电极上的电压来实时连续改变液晶体双折射率,这样寻常光(o光)和非寻常光(e光)在经过液晶体后产生相位的相应延迟(相位差) Δ ,即

$$\Delta = \frac{2\pi d(n_e - n_o)}{\lambda} \sin^2 \theta, \quad (8)$$

式中 d 为液晶体的厚度, λ 为照射光波波长(本实验采用 532 nm), θ 为光的入射角, n_o 、 n_e 分别为寻常光和非寻常光的折射率。

由于液晶体本身是透明的,在相位调制过程中不改变光强,并具有尺寸大小、厚度等自由可设计性,在低电压(AC 0~20V)驱动时也无滞后现象,更适合于用沃拉斯顿棱镜作错位镜的错位散斑系统,但必须保证液晶体的快轴与错位镜(方解石)的第一块棱镜慢轴相对应。

错位镜是采用沃拉斯顿棱镜生成。该棱镜由两个材料为方解石的直角棱镜组成,当一束光垂直入射到棱镜的前表面时,在后表面将形成两束互相分开的、振动方向互相垂直的平面偏振光。图 2 右侧为沃拉斯顿棱镜的结构图,当光线入射到第一块棱镜(光轴与晶体表面平行)后,寻常光(o光)和非寻常光(e光)无折射地沿同一方向进行,但它们的速度不同,在进入第二个棱镜(光轴与晶体表面垂直)以后,由于第二个棱镜的光轴垂直于第一棱镜的光

轴,故第一棱镜中的寻常光变为非寻常光,非寻常光变为寻常光。这样,再经过一个 1/4 波片后,成两个等光强的错位像。那么,当一束光经过由液晶体和错位镜所构成的相移错位系统后会产生具有一定位相差的两个错位像,再通过改变液晶体的驱动电压,就会得到所需要的精确位相差(即 0° , 90° 和 180°)。

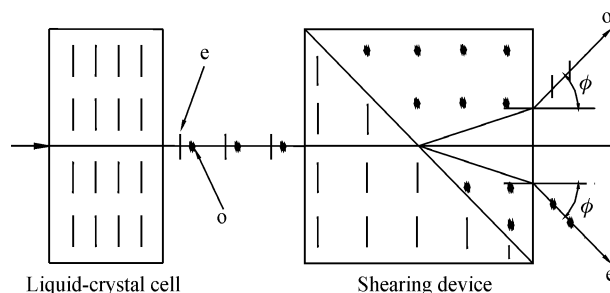


Fig. 2 Shearing device with liquid-crystal phase modulator

本实验采用对变形前、后的散斑场(如图 3、图 4)分别直接做三步相移(即 0° , 90° 和 180°),算得各自的相位后再进行相减,最后可得到变形的定量信息(如图 5)。变形前的相位

$$\Delta\Phi_1 = \arctan \frac{I_1^0 - 2I_1^{90} + I_1^{180}}{I_1^0 - I_1^{180}}, \quad (9)$$

同理,变形后的相位为

$$\Delta\Phi_2 = \arctan \frac{I_2^0 - 2I_2^{90} + I_2^{180}}{I_2^0 - I_2^{180}}, \quad (10)$$

那么,离面位移便可求出,即

$$w = \frac{\lambda}{2\pi(1 + \cos \alpha)} (\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1), \quad (11)$$

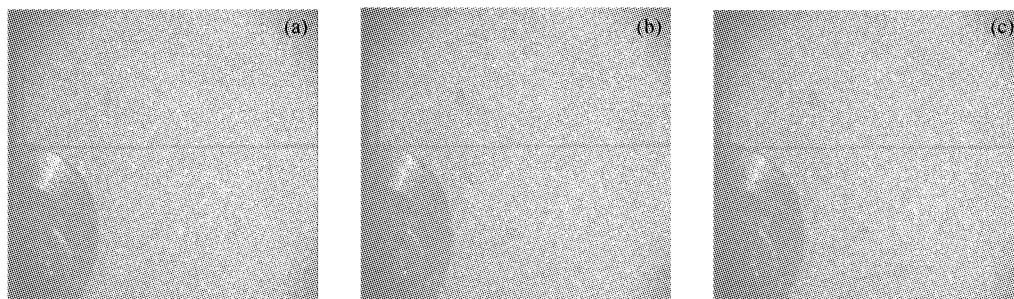


Fig. 3 Speckle image of undeformed object. (a) 0° , (b) 90° , (c) 180°

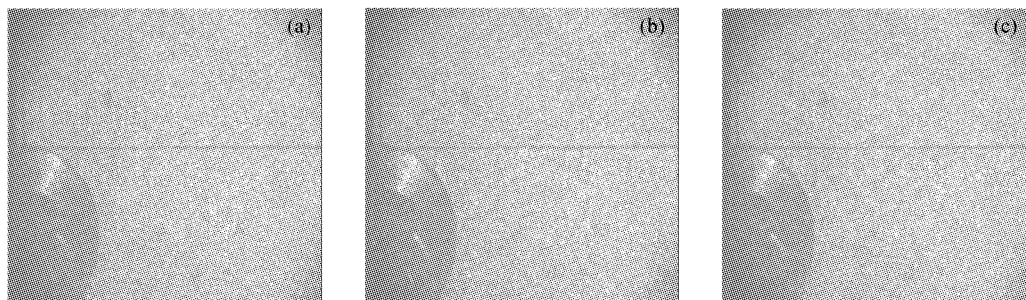


Fig. 4 Speckle image of deformed object. (a) 0° , (b) 90° , (c) 180°

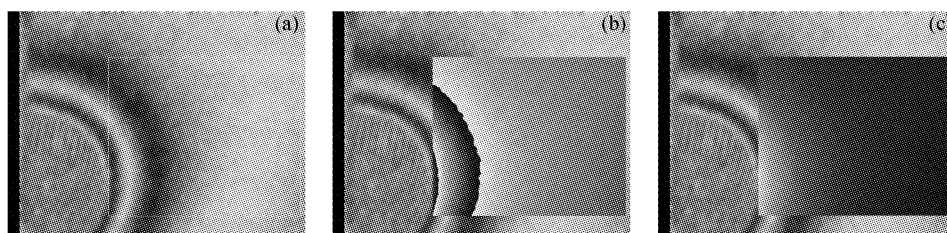


Fig. 5 Image relevant to deformation under central load. (a) Fringe pattern, (b) Wrapped phase map, (c) Unwrapped phase map

在测试系统确定情况下, α 和 λ 为定值, 那么离面位移精度直接取决于反映变形信息的相位角的测量精度。从图 5(c)中可以看出, 利用液晶体做相移器所求得的相位值是具有比较理想的精度。

4 结构实体混凝土养护质量评估验证实验

结构实体混凝土强度与混凝土养护密切相关, 混凝土在连续不间断地湿润养护下, 随着养护时间的增减, 其力学性能指标也产生相应变化。目前, 工

程实际中一般采用同等条件下制作一定量标准试样, 经同样的养护时间后再回实验室测试, 这样不仅实验周期长, 而且所得到的结果只反映材料的力学性能, 并与结构实体的力学性能差异较大。本实验采用的系统是共光路大错位量散斑干涉法, 并且相移器与错位镜易于形成一体化设备, 抗干扰能力强, 只需对被测物采用集中力原位加载, 测取离面位移的影响区来判定该结构的力学性能的变化, 从而可对混凝土结构进行现场原位实时质量评估。实验结果如图 6 所示。

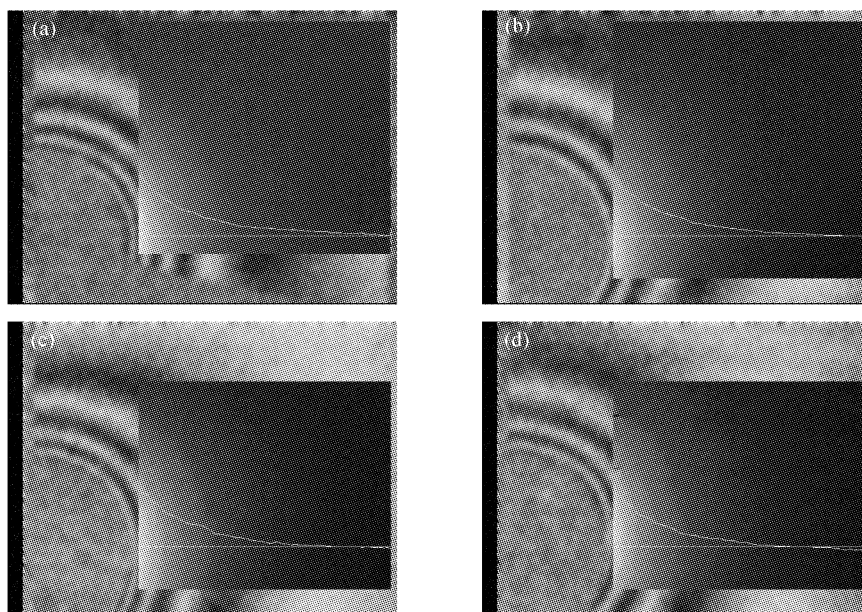


Fig. 6 Evaluation of the mechanical behavior of concrete structure. (a) 3 days curing, Extended length 49.6 mm, (b) 7 days curing, extended length 45.6 mm, (c) 21 days curing, extended length 42.4 mm, (d) 28 days curing, extended length 40.8 mm

从上述的检测结果我们可以看出: 随着养护时间的增加, 混凝土结构受力处离面位移影响区域逐步缩小, 说明其力学性能指标在增加。但在养护 21 天后, 影响区域基本趋于稳定, 这说明混凝土结构材料的弹性模量和结构强度已达到某一稳定值(即标准试样在同等养护条件下的实验室测量值)。

结论 本文结合大错位量散斑干涉法提出了一种新的相移器——液晶相移器, 并从理论上剖析了该相移器的相移原理及其实现过程。利用液晶相移器不仅提高了大错位量散斑干涉法测量离面位移的灵敏度, 同时也拓宽了该方法的应用领域, 为工程实际中结构实体混凝土质量检验提供了非接触、高精度和全场实时原位无损检测的方法。通过对不同养护时

间的结构实体混凝土力学性能进行检测,验证了该系统可以实现现场在线原位实时检测,并能够得到非常真实的检测结果,从而可以实现更为精确的定量计算。

致谢 感谢天津大学秦玉文教授、东南大学何小元教授和上海 711 研究所张熹教授对本研究工作所提供的建议和指导。

参 考 文 献

- Hung Y Y. Applications of digital shearography for testing of composite structures. *Composites Part B: Engineering*, 1997, **30**(3~4): 765~773
- Liu C, Jiang J H, Xiao J B *et al.*. Phase modulation technique of digital speckle pattern interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(6): 741~744 (in Chinese)
- Chen J L, Qin Y W, Ji H W *et al.*. Novel quantitative non-destructive testing method for composite structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, **30**(3~4): 299~304
- Jin G C. *Computer-Aided Optical Metrology* (计算机辅助光学计量). Beijing: Tsinghua University Press, 1997
- Qian K M, Miao H, Wu X P. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1): 64~67 (in Chinese)
- Chen J L, Qin Y W, Ji X H. Phase-shifting shearing speckle for quantitative NDT of bimaterials interface. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2001, **18**(1): 128~130 (in Chinese)
- Sun Ping, Wang Haifeng, Zhang Xi *et al.*. Study on three-dimensional ESPI and its application. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 840~844 (in Chinese)
- Kelly T L, Munch J. Wavelength dependence of twisted nematic liquid crystal phase modulator. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(4~6): 252~258
- Totzeck M, Tiziani H J. Phase-shifting polarization interferometry for microstructure linewidth measurement. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5): 294~296
- Kadono H, Toyooka S, Iwasaki Y. Speckle-shearing interferometry using a liquid-crystal cell as a phase modulator. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1991, **8**(12): 2001~2008
- Soden R A J, Dewhurst R J. An integrated liquid crystal phase modulator for speckle shearing interferometry. *Optics and Laser in Engng.*, 1999, **31**(2~3): 123~134
- Wu S Y, Qin Y W. Determination of residual stress using large shearing speckle interferometry and the hole dring method. *Optics and Lasers in Engng.*, 1995, **23**(3~4): 233~244

征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16 开, 1541 页, 定价: 100.00 元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800