

- [11] 吴自勤等,物理学报,33(1984),419.
- [12] G. F. Bastin and H. J. M. Heijligers, *J. Microsc. Spectr. Electron*, 11 (1986), 215.
- [13] J. L. Pouchou et al., *X-ray Optics and Microanalysis*, Academy of Mining and Metallurgy Printing House (Poland), (1990), 52.
- [14] G. F. Bastin and H. J. M. Heijligers, *Scanning*, 13 (1991), 325.
- [15] Xu Leying et al., *X-ray Optics and Microanalysis*, Academy of Mining and Metallurgy Printing House (Poland), (1990), 67.

## 相位测量技术的新进展及其应用<sup>1)</sup>

金观昌

(清华大学工程力学系,北京 100084)

叙述近两年来相位测量技术的新进展. 讨论了普遍采用的相移法的新算法及实现相移的多种方法, 包括液晶、光纤、电光调制等新技术. 文章还介绍了一些快速、简便的单条纹图处理的新途径以及误差分析的概况. 最后列举了作者近年来把相位技术应用于计算机辅助光学测量——变形、应力分析、无损检测以及三维形状测量中的结果.

### Abstract

Some of new the progress of phase-measuring techniques in nowadays are described. The phase-shifting algorithm, apparatuses (including liquid crystal cell, optic fiber), and electro-optic modulation techniques are introduced. Some fast but simple algorithm using single fringe pattern and error analysis are presented. Results of computeraided optic metrology employing the phase technique obtained by the author for determining deformation, stress analysis, and for nondestructive testing and 3D profilometry are illustrated in this paper.

相位测量技术是近十年来发展起来的一种用于光学干涉计量、计算机辅助光学测量中的重要技术. 相位测量技术的引入使以干涉条纹作为测量结果的光学干涉计量由原来计数条纹的级数发展成为计数条纹的相位(即1条纹=360°相位)从而使测量精度大大提高. 由于计算机图象系统的使用和相位技术的结合而使测量完全自动化,即由原来读条纹图而进展为计算机直接输出最后的结果(如所测量物体各处的位移、应变值、力的大小,物体的高度、粗糙度、以及缺陷的尺寸、深度等). 因而大大提高了使用性能和效率. 由于以上两大优点,相位技术得到了迅速的发展和应用. 1990年国际光

学工程学会(SPIE)年会把相位测量首次列为会议报告的专题,而在1991年年会上也列为会议报告专题,由此可见相位测量技术已成为光学干涉计量术一个不可缺少的部分,也已成为计算机辅助光学测量的一个重要内容. 在1989年第六届全国实验力学学术会议上,作者发表的文章“相位测量技术及其应用于光测力学”<sup>[1]</sup>已经对有关的技术原理及应用作了阐述. 本文将作为其续篇并着重于实现相位测量的方法、精度分析和新的应用方面.

1)国家自然科学基金资助项目.

## 一、相位测量技术中的相移法

相移(phase shifting),有时也称作(phase step)方法是使用较普遍的方法.它通过多次改变光波的已知相位来求解被测物体或其变形的相位.其一般公式如下:

$$\varphi = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^R I_i \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^R I_i \cos \alpha_i},$$

$$\alpha_i = (i-1) \frac{2\pi}{R}, R > 2 \quad (1)$$

测量物体变形的光学干涉计量.(如最普通的电子散斑干涉术)是一种和光学全息干涉术极类似的使用全电子记录(摄像机)替代传统的干版记录的新方法.图1是具有相位测量的电子散斑干涉仪的光路图.

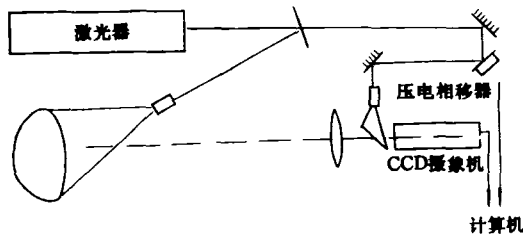


图1 具有相位测量的电子散斑干涉仪光路图

图1光路图中在参考光反射镜后粘有压电陶瓷位移器(PZT),可移动反射镜改变参考光相位,从而使干涉条纹相位后附加一已知相位,经采集和计算机处理后获得条纹的原相位.

在许多相移装置中常用  $R=4$ ,即  $\alpha_i = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  四幅光强求相位.近来有采用五幅图,每次相移还是  $90^\circ$ ,这种方法对减小误差有好处,其求相位公式为

$$\varphi = \arctan \frac{2(I_4 - I_2)}{I_1 - 2I_3 + I_5},$$

$$\alpha_i = (i-1) \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

为了减小误差,Schwider<sup>[2]</sup>等人提出了用两组相位数据平均的算法,即

平均三步(每步相移  $90^\circ$ ):

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2}$$

$$+ \frac{1}{2} \arctan \frac{I_4 - I_3}{I_2 - I_3}. \quad (3)$$

平均三步(每步相移  $120^\circ$ ):

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_3 - I_2 - I_1}$$

$$+ \frac{1}{2} \arctan \frac{\sqrt{3}(I_4 - I_3)}{2I_2 - I_3 - I_4}. \quad (4)$$

平均四步(每步相移  $90^\circ$ ):

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$$

$$+ \frac{1}{2} \arctan \frac{I_5 - I_3}{I_2 - I_4}. \quad (5)$$

在实现相移方面,除了图1光路所用压电陶瓷晶体(PZT)外,已采用许多新的方法,并得到了很好的效果,现介绍如下:

### 1. 偏振相移

在干涉计量中利用正交的二偏振光经四分之一波片和检偏镜可实现相移.每转动偏振片  $\pi/4$  即可实现  $\pi/2$  相移.这种方法已成功地用于电子散斑干涉术<sup>[3]</sup>和电子错位散斑干涉术<sup>[4]</sup>.我们已研制用计算机控制实现自动相移的装置用在干涉仪上,它具有精度高、相移快的优点.

### 2. 液晶相位调制器

向列液晶盒具有两种效应:扭转向列效应(TN)和电控双折射效应(ECB).作为液晶相位调制器使用其ECB效应,即通过改变电极上电压来变化液晶双折射.图2表示两种液晶相位调制器的电压-相位调制特性.所加电压的频率直至  $100\text{kHz}$  内将不影响相位调制特性.H. Kadono 等<sup>[5]</sup>已把液晶调制器用于电子错位散斑干涉术,其光路图示于图3.

液晶相位调制器较PZT相移器有以下优点:(1)液晶盒是透明的,比较容易放入光路中;(2)液晶盒十分薄;(3)液晶盒使用低电压(通常小于  $10\text{V}$ )比PZT低得多,便于实现和控制;(4)液晶盒在尺寸大小上有很大的自由度,可以制成各种空间相位调制器;(5)无滞后性质.

除此之外,我们已制成液晶栅相移器,用于变形分析和三维形状测量.

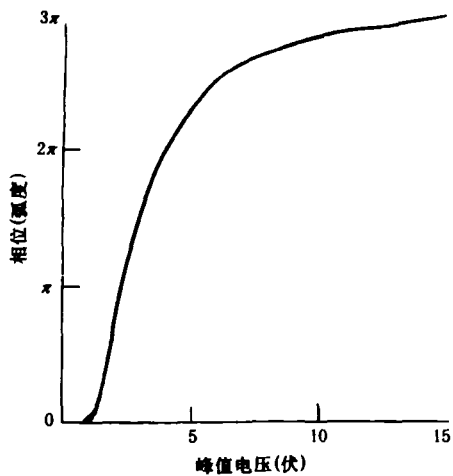


图2 液晶调制器的电压-相位特性

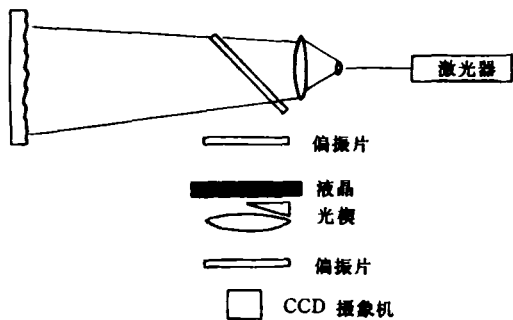


图3 液晶相位调制错位散斑干涉光路图

### 3. 光纤相移调制器

光纤以其方便性在许多干涉仪中得到应用,它的优点是便于安排光路,节省光学元件. Mercer<sup>[6]</sup>提出了把光纤相移调制器用于电子散斑干涉术(见图4).在一个柱形压电陶瓷上绕有6m长的光纤用作相移调制器.当改变压电

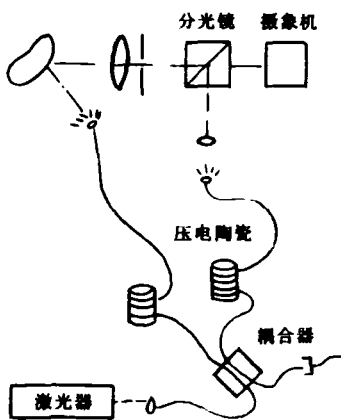


图4 光纤相移电子散斑干涉术

陶瓷上所加的电压使其变形,从而导致光纤伸长产生光相位变化,从而达到实现相移的目的.这个装置还采用闭环控制——通过接收物光、参考光的相对相位来控制调整参考光光纤,以达到精确相位控制的目的,其相位偏差为  $7.3\text{mrad}$ ,  $\lambda/300$  的测量准确度.

### 4. 电光相移调制器

电光调制器是一种晶体在加电压后改变偏振方向,因而可作为偏振光相移装置.作者曾考虑把它用在电子错位散斑偏振相移装置中. M. Halioua 等<sup>[7]</sup>已把它用在投影云纹三维形状测量系统中作为相移装置. L. Wizinowich<sup>[8]</sup>也把电光调制器用在其测量振动的相移干涉仪中.当然,电光相移调制器有快动作的优点,但也有需要高电压的缺点.

### 5. 同时相移干涉仪

美国 Phase Shift Technology 公司采用在偏振基础上的四个固定相移和四个摄像机系统,并配有  $10^{-4}\text{s}$  开关.这种方法对振动测量以及差的环境条件均能得到好的测量结果.

### 6. 其他相移装置

在许多文章中采用了步进驱动的平移装置用在精密移动光栅(投影云纹、影子云纹)<sup>[9]</sup>以及在电子错位散斑中移动光栅<sup>[10]</sup>.此外也有采用小角度转动实现相移<sup>[11]</sup>.

综上所述,相移方法是目前相位测量中用得最多的方法.实现相移的方法也是很多的,而且是不断发展的.

## 二、相位算法的一些进展

在参考文献[1]中,作者曾提出用一幅图的多采样法分两步求解相位.这种方法已用在散斑条纹以及投影云纹条纹中. Der-Shen Wan 等<sup>[12]</sup>提出了用于投影云纹系统相位单调增加时的一种简单算法——自动相位换算算法.这种算法是沿着条纹图每扫描行相继地找出光强的最大值和最小值,并对光强进行正则化(最大值为1,最小值为0),然后从左边开始,设初始相位为  $I\pi$ ,接着搜索接续的最大、最小光强.

当找到最大值时,则相位等于 $(2n-1)\pi$ ,其中 $n$ 为最大值的序数;在找到最小值时,相位值改变为 $(2m+1)\pi$ .其中 $m$ 是最小值的序数.图5为该算法的示意图.

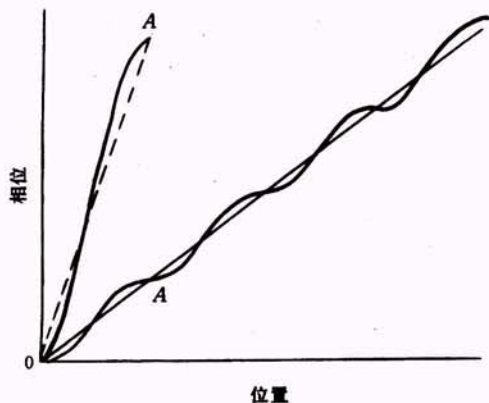


图5 相位换算法示意图

对于正弦形条纹,其最大误差为 $\pm 0.33\text{rad}$ ,  $1/20$  波长.对于非均匀的干涉条纹图,可以用具有随机相位差的几个条纹图按下面公式重新修正光强:

$$I(x,y) = \frac{I_0(x,y) + I_{\min}(x,y)}{I_{\max}(x,y) - I_{\min}(x,y)} \quad (6)$$

S. Tang<sup>[13]</sup>提出了一种用解调和卷积技术的快速相位算法,并用于三维物体的测量.其数据处理流程见图6.其工作原理为:对条纹图的光强 $g(x,y)$ 乘一系数 $\cos \frac{2\pi x}{p}$ (其中 $p$ 是栅线周期),展开后仅有低频项与 $\cos\varphi(x,y)$ 有关,因此用一种低通有限间隔脉冲响应(FIR)数字滤波器可以得到.同样,在另一通道乘 $\sin \frac{2\pi x}{p}$ 后经FIR滤波器得到 $\sin\varphi(x,y)$ ,再经反正切运算可以解得相位 $\varphi(x,y)$ .这种方法具有运算速度快和精确的优点.

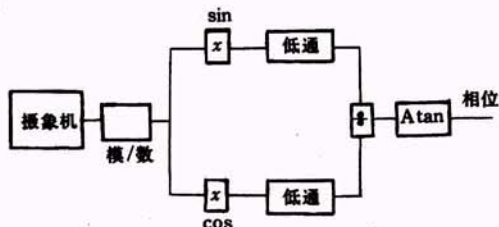


图6 快速相位算法流程图

除此之外,P. Wizinowich<sup>[8]</sup>发展了一种称为 $2+1$ 算法,用于振动测量,得到了清晰的相位图.作者还应用离散余弦变换测量云纹图的相位<sup>[14]</sup>.

### 三、应用

在干涉计量、计算机辅助光学测量中,相位技术的应用几乎是不可缺少的.早期的应用主要在电子散斑干涉术进行变形和无损检测的应用.近两年来,双光束电子散斑干涉用于面内变形、表面检测<sup>[15]</sup>、三维形状测量<sup>[16]</sup>已趋于成熟.我们已用双光束散斑测量孔、坑的应力集中系数,并得到了理想的结果.应力测量的一个重要实验手段——光弹性也已开始使用计算机辅助测量.1990年,G. M. Brown<sup>[17]</sup>等人提出了计算机辅助全息光弹性,将相位测量技术应用于光弹性应力分析.1991年,我们改进了Brown的方法,采用电子散斑干涉替代全息照相,得到全电子记录求等和线的计算机辅助光弹性应力分析.

由Y. Y. Hung提出的错位散斑技术也已采用相位测量技术.偏振相移对电子错位散斑是十分适合的方法,我们已把这一技术应用于变形板的曲率测量<sup>[4]</sup>和轮胎、碳纤维材料的无损检测中去<sup>[18]</sup>.图7为经相位技术处理得到的缺陷条纹.



图7 相位技术用于轮胎缺陷的无损检测

由于工业自动检测的需要,三维尺寸的自动测试十分热门,近年来各国的研究人员发表了大量有关各种相位测量技术的文章<sup>[7,13,16]</sup>.

我们采用激光干涉相移条纹以及白光投射条纹和步进马达控制光栅移动相位测量技术,对人体<sup>[19]</sup>头骨、叶片、汽车车身模型<sup>[20]</sup>做了测量,得到了精确的测量数据。

#### 四、测量误差讨论

有关相位测量误差的讨论已在许多文章中得到论述<sup>[10,21,22]</sup>。值得提出的是 J. V. Wingerden<sup>[22]</sup>对于相移方法做了比较详细的误差分析,该文讨论了相移器的系统误差以及光源、机械振动、检测器噪声、非线性等引起的误差。文章提出五步(90°)相移和平均四步(90°)相移具有较小的误差,在校正情况下,四步(90°)使用比较方便,对随机误差,三步(120°)将比三步(90°)好。根据文章所提供的公式推算,一个 0.5°的相移误差在四步(90°)相移时将产生 0.4°的相位误差,这在偏振相移装置(不大于 0.3°/步)将不难解决。

[1] 金观昌、唐寿鸿,第六届全国实验力学学术会议论文

集,北京大学出版社,(1989),1007.

- [2] J. Schwider *Appl. Opt.*, **22** (1983),3421.  
 [3] 金观昌,唐寿鸿,光学学报,**10**(1990),161.  
 [4] 金观昌、唐寿鸿,应用激光,**12**(1992),29.  
 [5] H. Kadono and S. Toyooka, *SPIE Proceedings*, **1554A** (1991),628.  
 [6] C. R. Mercer and G. Beheim, *Appl. Opt.*, **30** (1991), 729.  
 [7] M. aloua and H. Liu, *Optics and Laser in Engineering*, **11** (1989),185.  
 [8] P. Wizinowich, *Appl. Opt.*, **29** (1990),3271.  
 [9] J. J. J. Dirckx, *Appl. Opt.*, **27** (1988),1164.  
 [10] M. Owner-Peterson, *Appl. Opt.*, **30** (1991),2730.  
 [11] G. H. Kaufmann *Appl. Opt.*, **29** (1990),3570.  
 [12] Der-Shen Wan, *Appl. Opt.*, **29** (1990),3255.  
 [13] S. Tang and Y. Y. Hung, *Appl. Opt.*, **29** (1990),3012.  
 [14] 唐寿鸿、金观昌,中国激光,**18** (1991),405.  
 [15] C. Joenathan, *Appl. Opt.*, **29** (1990),1905.  
 [16] D. Shi et al., *SPIE processings*, **1554A** (1991),680.  
 [17] G. M. Brown, *Exp. Mech.*, **30** (1990),135.  
 [18] 金观昌,实验力学,**7** (1992),181.  
 [19] 金观昌、高柠,人类学学报,**9** (1990),164.  
 [20] G. C. Jin and S. Tang, *Opt. Eng.*, **28** (1989),1211.  
 [21] K. Greath, *SPIE Processings*, **680** (1986),19.  
 [22] J. V. Wingerden, *Appl. Opt.*, **30** (1991),2718.

## 凹形电介质测试腔新的刻度和测试方法

倪尔瑚

(浙江大学材料系,杭州 310027)

### 一、凹形谐振腔及其电介质测试系统

频率从 0.1GHz 至 1GHz 的电介质测量方法广泛采用凹形谐振腔构成的测试系统[图 1 (a)]. 它是国际电工委员会(IEC)和大部分国家作为固体电介质材料相对复介电常数  $\hat{\epsilon}_r = \epsilon_r(1 - j\tan\delta)$  标准测试方法。该凹形谐振腔是一段中心导体断开的、两端短路的同轴双凹结构。其上中心导体籍助于位于顶上的主测微器产生上下移动,形成可变间隙的平板电容  $C_1$ ,待测样

品就放在这个间隙之中。下中心导体上方开有一侧向圆孔,位于腔体侧面的微调测微器推动杆子在孔内运动,构成微调圆柱电容  $C_2$ ,用以测量谐振曲线的带宽。当间隙集中电容  $C_1$  远大于同轴线的分布电容时,可认为两个集中电容  $C_1$  和  $C_2$  与同轴线的分布电感形成谐振回路[图 1 (b)]. 材料的相对介电常数  $\epsilon_r$  和损耗角正切  $\tan\delta$  就从有、无样品时  $C_1$  和  $C_2$ (用频率刻度)的读数按有关公式计算得到。但仍然存在着如下问题,阻碍了它的商品化。

(1)由于引入腔体的样品电容很小,要求平