

文章编号: 0258-7025(2004)02-0219-04

实时全息干涉计量中时间序列条纹位相的 测量方法

吕晓旭^{1,2}, 张以谟¹, 钟丽云^{1,2}, 熊秉衡²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; ² 昆明理工大学激光研究所, 云南 昆明 650051)

摘要 针对实时全息干涉计量的特点, 结合相移位相测量技术, 提出一种利用物体本身变化产生的位相变化来实现实时全息干涉计量中时间序列条纹位相的测量方法, 通过分析得到不同时刻位相变化及整个变化过程中位相累计变化的计算公式。

关键词 信息光学; 实时全息干涉计量; 位相测量; 时间序列; 干涉条纹; 相移技术

中图分类号 TP 391.41 文献标识码 A

A Novel Phase Measurement Method in Real-Time Holographic Interference Time-Sequence Fringes

LÜ Xiao-xu^{1,2}, ZHANG Yi-mo¹, ZHONG Li-yun^{1,2}, XIONG Bing-heng²

(¹ College of Precision Instrument and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(² Laser Research Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract In real-time holographic interferometry, the phase measurement of the time-sequence interference fringes is very important. On the theoretic analysis, this paper proposes a novel phase measurement method by use of the phase variation of the object light wave and the phase-shifting technique, and obtains the calculational formula of phase variation in whole process.

Key words information optics; real-time holographic interferometry; phase measurement; time-sequence; interference fringes; phase-shifting technique

1 引 言

实时全息干涉计量是一种可以对物体的变化过程进行无干预的三维全场可视化测量的光学检测方法, 具有全场、实时、非接触、条纹对比度好、测量精度高优点, 在对内燃机流场、燃烧场、飞行器流场、湍流相干结构、边界层流场、振动导致的流场以及在物体的不规则位移、形变等方面的研究中^[1~4], 具有其独特的优点和应用前景。实时全息干涉计量技术发展和应用中需要解决的一个关键问题, 是实现时间序列干涉条纹的采集及条纹位相的测量。

位相测量技术由于具有较高的测量精度, 容易

实现数字化, 因而被广泛地应用于干涉条纹的自动判读研究^[5]。目前普遍采用的求解位相主要方法有两类, 一类是傅里叶变换法^[6], 它是对干涉条纹图作傅里叶变换, 并取出一级谱作反变换, 从而求解出位相分布。它只需要一幅条纹就可算出位相, 但计算量较大, 而且不具有识别条纹增减的能力, 只能分析单调变化的条纹图, 在实时全息干涉计量的时间序列条纹位相测量中, 这种方法的数据处理量将很大; 另一类是相移技术^[7], 它是通过在参考光或物光中引入相移量, 人为改变两个相干波面的相对位相, 比较干涉场中同一点在不同相移量下的光强值来求解

收稿日期: 2002-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60277032)和云南省自然科学基金(编号: 2001F0026M)资助项目。

作者简介: 吕晓旭(1959, 2—), 男, 教授, 在职攻读天津大学光学工程博士学位, 主要从事全息技术和光电检测方面的研究工作。现通讯地址: 昆明理工大学激光研究所。E-mail: xiaoxulu@public.km.yn.cn

该点的位相。该方法运算速度快,而且具有识别条纹增减的能力,可以分析单调或非单调的条纹图,目前已被广泛用于各种干涉条纹的判读和分析,但它需要相移器和多幅相移图(至少 3 幅),使数据采集复杂化。

在我们进行的实时全息干涉计量研究中,由于物体的尺寸比较大,在测量过程中不仅物光场是动态变化的,而且干涉场中物光场和参考光场的分布都极不均匀^[8],用通常的方法难以实现动态过程的相移以及实时数据采集。为此,本文在分析实时全息干涉计量特点的基础上,提出一种先利用相移技术测量出物光和参考光光场以及物体变化前的位相,在物体变化过程的测量中,每一个状态只采集一幅数字图像,利用物体变化前的测量结果和物体本身变化引起的位相变化,在实时全息干涉计量中进行时间序列条纹位相测量的方法,分析了使用的条件和优点。

2 单曝光实时全息干涉计量

本方法是在单曝光实时全息干涉计量的基础上实现的,其原理如图 1 所示。被测物体在静止状态下完成全息图曝光,全息片在经过适当处理后严格复位,在原参考光与物光同时照明下,在再现光路中既有由原参考光再现产生的包含原物光再现像的再现光场,同时又有由物体直接透过全息图形成的实时光场,这两个光场之间具有很好的相干性,形成实时干涉条纹。如果物体发生变化,原参考光再现的原来的物光与变化后的物光叠加的结果,将引起干涉条纹的实时变化,通过对时间序列干涉条纹图的数据采集、判读和分析,就可以定量检测物体的变化。

假设以复函数 $O(x, y), R(x, y)$ 分别表示物光

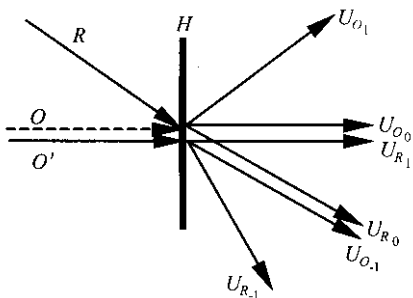


图 1 单曝光实时全息干涉计量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of single exposure

holographic interferometry

和参考光

$$O(x, y) = O_0 \exp[j\phi_0(x, y)]$$

$$R(x, y) = R_0 \exp[j\phi_R(x, y)] \quad (1)$$

其中 O_0 和 R_0 分别表示物光和参考光的振幅, ϕ_0 和 ϕ_R 分别表示物光和参考光的位相。在曝光时间 t 内,记录干版上的曝光量可表示为

$$\begin{aligned} E &= t(O+R)(O+R)^* = \\ &= t[O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos(\phi_0 - \phi_R)] = \\ &= I_0 t \{1 + [2B^{1/2}/(1+B)] \cos(\phi_0 - \phi_R)\} = \\ &= E_0 [1 + V \cos(\phi_0 - \phi_R)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $I_0 = O_0^2 + R_0^2$ 为平均光强, $E_0 = I_0 t$ 为平均曝光量, $B = R_0^2/O_0^2$ 为参、物光的光束比, $V = 2B^{1/2}/(1+B)$ 为干涉条纹对比度。

全息图 H 的复振幅透射率 T_a 为^[9]

$$T_a(x, y) = b_i \exp[j\phi(x, y)] \quad (3)$$

对于位相型全息图,在位相与曝光量成正比的情况下,相应的 $T_a(x, y)$ 为

$$T_a(x, y) = b_i \exp[j\alpha E] = K \exp[j\alpha \cos(\phi_0 - \phi_R)] \quad (4)$$

式中 $K = b_i \exp(j\gamma E_0)$, $\alpha = \gamma E_0 V$, 其中 b_i 和 γ 为与记录材料及化学处理工艺有关的系数。

应用贝塞尔函数展开式,并只考虑零级和一级衍射,(4)式可改写为

$$\begin{aligned} T_a(x, y) &= K[J_0(\alpha) + 2jJ_1(\alpha) \cos(\phi_0 - \phi_R)] = \\ &= K\{J_0(\alpha) + J_1(\alpha) \exp[j(\phi_0 - \phi_R + \pi/2)] + \\ &+ J_1(\alpha) \exp[j(-\phi_0 + \phi_R + \pi/2)]\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $J_0(\alpha)$ 和 $J_1(\alpha)$ 分别为零阶和一阶贝塞尔函数。

若用原参考光照明全息图 H , 则衍射光波为

$$\begin{aligned} RT_a(x, y) &= U_{R_0} + U_{R_1} + U_{R_{-1}} = \\ &= KJ_0(\alpha)R_0 \exp[j\phi_R(x, y)] + \\ &= KJ_1(\alpha)R_0 \exp[j(\phi_0 + \pi/2)] + \\ &= KJ_1(\alpha)R_0 \exp[j(-\phi_0 + 2\phi_R + \pi/2)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $U_{R_0}, U_{R_1}, U_{R_{-1}}$ 分别为参考光通过全息图后的零级、一级和负一级衍射像。

用 $O'(x, y, t)$ 表示变化了的物光波, 设它只在位相上发生 $\Delta\phi_0(x, y, t)$ 的变化, 在强度分布上的变化甚微, 可以忽略不计, 即

$$O'(x, y, t) = O_0 \exp[j(\phi_0 + \Delta\phi_0)] \quad (7)$$

用 O' 照明全息图 H , 则 O' 的衍射光波为

$$\begin{aligned} O'T_a(x, y) &= U_{O_0} + U_{O_{-1}} + U_{O_1} = \\ &= KJ_0(\alpha)O_0 \exp[j(\phi_0 + \Delta\phi_0)] + \\ &= KJ_1(\alpha)O_0 \exp[j(2\phi_0 - \phi_R + \Delta\phi_0 + \pi/2)] + \\ &= KJ_1(\alpha)R_0 \exp[j(\phi_R + \Delta\phi_0 + \pi/2)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $U_{O_0}, U_{O_1}, U_{O_{-1}}$ 分别为变化后的物光波通过全息图后的零级、一级和负一级衍射像。

如果同时以原参考光 R 和物光 O' 照明 H 时, (6) 和 (8) 式中所表示的 6 项衍射光将同时出现。由于参考光再现的一级衍射光 U_{R_1} 和物光再现的直透光 U_{O_0} 具有相同的传播方向, 参考光再现的直透光 U_{R_0} 和物光再现的一级衍射光 U_{O_1} 也具有相同的传播方向, 它们将分别产生干涉, 形成两组可供测量用的实时全息干涉条纹。

只考虑 U_{R_1} 和 U_{O_0} 叠加后的光强分布, 则

$$I_{R_1, O_0} = |(U_{R_1} + U_{O_0})|^2 = K^2 \{ (R_0 J_1)^2 + (O_0 J_0)^2 + 2R_0 O_0 J_0 J_1 \cos[\Delta\phi_0(x, y, t) - \pi/2] \} \quad (9)$$

由 (9) 式可见, 在单曝光实时全息干涉计量过程中, 如果物光的强度近似保持不变, 同时保持再现参考光不变, 叠加干涉条纹强度的变化就只取决于物光的位相变化。如果能够测量出物光的位相变化, 就可以根据引起位相变化的物理量, 求出该物理量的变化。

3 实时全息干涉计量中的位相测量

从上面的分析可以看出, 在实时全息干涉计量中, 要实现物体变化过程的动态检测, 最基本的要求就是能够测量出反映物光场变化的干涉条纹在不同状态的位相分布。

从 (9) 式的推导过程中可以看出, 全息图拍摄好后, 其中的 K, J_0, J_1 均为固定值, 在实时全息干涉

计量的测量过程中, (9) 式要求保持参考光波不变, 物光波中强度变化甚微, 变化的仅仅是物光波中的位相。在测量过程中干涉条纹对比度变化不大的情况下, 可以认为这一条件是得到满足的, 尤其在测量透明物体时, (9) 式要求的条件非常容易得到满足。

由于相移位相测量技术是通过比较干涉场中同一点在不同相移量下的光强值来求解该点的位相, 因此其运算速度快, 具有识别条纹增减的能力, 可以分析单调或非单调的条纹图, 在干涉条纹的判读和分析中被广泛采用; 而且由于相移位相测量技术采用的是点运算, 光场分布、记录材料和探测器的不均匀性都不影响测量的结果。但直接实时全息干涉计量中应用相移位相测量技术, 将使数据采集量过大, 在实时相移的产生和实现技术上也面临大的困难, 是限制实时全息干涉计量方法发展和应用的重要原因。

在 (9) 式中, 设 $C = K^2, A = (R_0 J_1)^2 + (O_0 J_0)^2, B = 2R_0 O_0 J_0 J_1$, 可以看出, 如果 C, A, B 已知, 用 CCD 图像采集系统记录下任意时刻 t 的实时全息干涉图的强度, 就可以从 (9) 式求出物光的位相分布。

由于 C, A, B 在全息图上不同的 (x, y) 位置具有不同的值, 可以采用相移技术来测量。在参考光路中放入一个相移器, 当调节相移器控制电压使反射镜移动, 使参考光光程增加而其他条件不变, 则在参考光路上产生的附加光程差为 $\delta = (\lambda/2\pi)\Delta\Phi_R$, 其中 $\Delta\Phi_R$ 为相应的附加位相, 在相移中保持物光不变, 用与 (9) 式同样的推导方法可以得到相移后的干涉光场强度分布:

$$I(x, y, t) = C(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y, t) + \Delta\Phi_R - \pi/2] \} = C(x, y) \{ A(x, y) - B(x, y) \sin[\Phi(x, y, t) + \Delta\Phi_R] \} \quad (10)$$

式中 $\Phi(x, y, t)$ 为位相值。

假如在某一初始时刻 $t = t_0$, 控制相移器, 使相移 $\Delta\Phi_R$ 分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 四个值, 采集相应的四幅图像

$$\begin{aligned} I_1(x, y, t_0) &= C(x, y) [A(x, y) - B(x, y) \sin\Phi_0(x, y, t_0)] \\ I_2(x, y, t_0) &= C(x, y) [A(x, y) - B(x, y) \cos\Phi_0(x, y, t_0)] \\ I_3(x, y, t_0) &= C(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \sin\Phi_0(x, y, t_0)] \\ I_4(x, y, t_0) &= C(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \cos\Phi_0(x, y, t_0)] \end{aligned} \quad (11)$$

从上述这四个方程中, 可以确定 t_0 时刻的初位相函数

$$\Phi_0(x, y, t_0) = \arctan \frac{I_3(x, y, t_0) - I_1(x, y, t_0)}{I_4(x, y, t_0) - I_2(x, y, t_0)} \quad (12)$$

以及 (11) 式中的全息图曝光和再现光场参数

$$\begin{aligned} C(x, y)A(x, y) &= [I_4(x, y, t_0) + I_2(x, y, t_0)]/2 = [I_3(x, y, t_0) + I_1(x, y, t_0)]/2 \\ C(x, y)B(x, y) &= \{ [I_4(x, y, t_0) - I_2(x, y, t_0)]^2 + [I_3(x, y, t_0) - I_1(x, y, t_0)]^2 \}^{1/2} / 2 \end{aligned} \quad (13)$$

对于动态变化的物光场,由(12)和(13)两式获得初始时刻的位相分布 $\Phi_0(x, y, t_1)$, 以及 $C(x, y)A(x, y)$ 和 $C(x, y)B(x, y)$ 后,通过拍摄帧速足够快的 CCD 进行动态物光场的数字图像数据采集,只要在采集过程中使时间间隔 Δt 足够小,保证两帧之间的位相差小于 π ,就可以依次求出相邻的两帧变形条纹之间的帧间位相差 $\Delta\Phi_i(x, y, t_i)$

$$\Delta\Phi_i(x, y, t_i) = \Phi_i(x, y, t_i) - \Phi_{i-1}(x, y, t_{i-1}) \quad (14)$$

其中 $\Phi_i(x, y, t_i)$ 可以通过初始时刻 t_0 确定的 $C(x, y)A(x, y), C(x, y)B(x, y)$, 以及 CCD 采集的干涉条纹强度分布 $I_i(x, y, t_i)$, 直接从(10)式求出。

至于 t 时刻相对于初始时刻 t_0 的位相差,可以通过将每个 t 时刻以前的所有帧间位相差相加得到

$$\sum_{i=1}^{N_t} \Delta\Phi_i(x, y, t_i) = \Delta\Phi(x, y, t) \quad (15)$$

利用初始时刻 t_0 的位相分布函数 $\Phi_0(x, y, t_0)$, 再加上 $\Delta\Phi(x, y, t)$, 就可以得到任一时刻的位相分布

$$\Phi(x, y, t) = \Phi_0(x, y, t_0) + \sum_{i=1}^{N_t} \Delta\Phi_i(x, y, t_i) \quad (16)$$

从以上分析可以看出,通过相移技术可以测量实时全息干涉计量干涉条纹初始时刻的曝光参数、再现光场参数和位相分布,此后,仅需利用物体本身产生的位相变化,对每一个状态实时采集一幅数字图像,即可直接计算出其位相分布。这种方法克服了傅里叶变换方法、单纯相移方法在实时测量中的不足,对光场分布没有特殊要求。在现有技术条件

下,只要动态变化过程足够缓慢,在足够短的时间间隔内,其两帧之间的位相差很容易满足小于 π 的条件,则实时全息干涉计量中的位相测量可以比较方便地实现。

参 考 文 献

- 1 C. M. Vist. Holographic Interferometry [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1984. 118~124
C. M. 维斯特. 全息干涉度量学[M]. 北京:机械工业出版社, 1984. 118~124
- 2 S. Nakadate, M. Isshiki. Real-time vibration measurement by a spatial phase-shifting technique with tilted holographic interferogram [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1):281~284
- 3 W. Pankin. Forced convection heat transfer in the transition from laminar to turbulent flow in closely space circular tube bundless [C]. Proceedings of Fifth International Heat Transfer Conference (Sept. 3~7, 1994, Tokyo). Vol. 2, Japanese Society of Mechanical Engineers, 325~329
- 4 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Lü Xiaoxu *et al.*. Application of real-time holographic method to the micro-crack nucleation process study [C]. *SPIE*, 2000, **4221**:326~330
- 5 T. R. Judge, P. J. Bryyanston. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 1994, **21**(4):199~239
- 6 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1):156~160
- 7 K. Creath. Phase-shifting speckle interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18):3053~3058
- 8 Xiong Bingheng, Wang Zhengrong, Lü Xiaoxu *et al.*. A novel optical system created for experimental earthquake simulation research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):376~380
熊秉衡,王正荣,吕晓旭等. 一种新型的实验地震学光学模拟系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):376~380
- 9 Yu Meiwen. Optical Holograph and Optical Information Processing [M]. Beijing: National Defence Press, 1984. 6
于美文. 光学全息及光信息处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1984. 6