

文章编号 1004-924X(2012)03-0643-08

## 应用复 Morlet 小波变换分析条纹图相位

张明照<sup>1\*</sup>, 牟建华<sup>1</sup>, 刘 扬<sup>1</sup>, 彭晓军<sup>1</sup>, 王伯雄<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085; 2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:**针对在使用干涉、Moiré 偏折等方法进行流场高速动态测量时条纹图中大量无效数据对计算结果的影响, 提出了一种基于连续小波变换的条纹图相位分析方法。利用小波变换的瞬时条纹频率分析能力, 选用复 Morlet 小波及合适的小波参数, 使得条纹图的小波变换模极大值与其调制系数成正比, 将其作为加权最小二乘法相位展开算法的权值, 保证了相位有效展开。使用曲线拟合进行小波变换脊定位, 缩短了定位时间并消除了噪声干扰。仿真实验显示, 使用该方法得到的分析结果与实际相位值的相对误差小于 0.01%; 内波流场测量实验显示, 使用该方法进行条纹图分析, 密度梯度测量精度达到了  $5 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ 。结果表明, 用该方法进行条纹图相位分析可以有效消除无效数据对结果的不利影响, 相位展开有效可靠, 分析结果精度高。

**关键词:**条纹图; 相位提取; 相位展开; 小波变换; Morlet 小波

**中图分类号:** TP391.4; TB937 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0643

## Phase extraction for fringe patterns based on complex Morlet wavelet transform

ZHANG Ming-zhao<sup>1\*</sup>, MOU Jian-hua<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, PENG Xiao-jun<sup>1</sup>, WANG Bo-xiong<sup>2</sup>

(1. *Equipment Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100085, China;*

2. *Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zhangmingzhao@tsinghua.org.cn*

**Abstract:** To reduce the effect of large number of invalid data in fringe patterns on calculation results in the measurement of high dynamic flows using interferometry or Moiré deflectometry, an effective phase extraction method was proposed based on the wavelet transform using complex Morlet wavelet. Through choosing proper parameters for the wavelet, the maximum modulus of the wavelet transform of a pattern was proportional to its modulation factor, then it was used as a weighting factor of a phase unwrapping algorithm based on weighted least squares to guarantee reliable phase unwrapping. In the process of wavelet ridge routing, a simple algorithm based on curve fitting was proposed to substantially reduce the routing time and the precision deterioration due to image noise. In simulation experiment, the relative error between calculated phase and actual phase is less than 0.01%. In internal wave measurement experiment, the method is used to analyze the fringe patterns, and the density gra-

收稿日期: 2011-08-25; 修订日期: 2011-12-23.

基金项目: 科技部中德科技合作重点项目 (No. 2003DFB00028)

dient measurement precision has reached  $5 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^4$ . It shows that the method can reduce the effect of invalid data on analysis precision effectively and can obtain reliable unwrapped phases.

**Key words:** fringe pattern; phase extraction; phase unwrapping; wavelet transform; Morlet wavelet

## 1 引言

在流场测量、三维形貌测量等领域,常使用干涉、Moiré 偏折等方法得到条纹图,通过求解条纹图的相位分布得到待测信息<sup>[1-2]</sup>。在条纹图的自动分析中,有两类常用方法:相移法(Phase Shifting Method, PSM)<sup>[3-4]</sup>和 Fourier 变换法(Fourier Transform Method, FTM)<sup>[5]</sup>。在高速动态测量中,如果由于视场中存在遮挡物等原因造成条纹图中存在大量无效数据,则这两类方法都不是很有效。因为 PSM 需要用到移相器件采集多幅图像才能进行相位计算,无法实现高速动态测量,且 PSM 对噪声非常敏感,会使计算得到的相位分布存在大量虚假  $2\pi$  跳变,增加了相位展开的困难。使用 FTM 的前提条件是条纹图必须是频谱可分离的,即必须存在一个比较高的载波频率且该载波频率是平稳的;另外由于 FTM 的全场变换性质,大量无效数据点会引入较大计算误差;使用窗口 FTM 可部分解决无效数据干扰问题,但由于窗口固定,缺乏自适应性,不能从根本上较好解决无效数据对计算结果的影响。

应用连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)<sup>[6]</sup>进行条纹图相位分析是近些年发展起来的一种新方法,这种方法利用小波提取瞬时条纹频率。同其它方法一样,应用 CWT 进行条纹图相位分析也需要解决相位展开问题。相位展开是目前光测领域仍没有很好解决的问题之一,针对这一问题,人们提出了许多算法。这些算法大致可以分为路径跟踪算法(又称局部算法)和路径无关算法(又称全局算法)<sup>[7-8]</sup>。在路径跟踪算法中, Bone<sup>[9]</sup>最早提出采用质量图测量引导展开过程;文献[10]中将调制系数作为衡量展开可靠性的一个准则。在路径无关算法中,一种能够消除无效数据点影响的相位展开算法是加权最小二乘法,它也可使用调制系数对最小二乘法进行加权<sup>[11]</sup>。

本文通过选用复 Morlet 小波并选择合适的小波参数,使得条纹图的小波变换模极大值与其

调制系数成正比,从而可以将其用于对最小二乘法相位展开算法进行加权。本文推导了这种算法的基本原理并给出了具体算法。该方法是一种适于高速动态测量且对无效数据点不敏感的条纹图相位分析方法。

## 2 条纹图相位分析原理和算法

### 2.1 相位计算公式推导

CWT 对瞬时条纹频率的提取是通过确定小波变换脊实现的<sup>[12-14]</sup>。小波变换脊是小波变换各位置的最大小波变换模形成的路径。在确定了小波变换脊后,可计算待提取的相位。

载波条纹图可用如下的一般表达式表示:

$$I(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \times \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]\} + I_n(x, y), \quad (1)$$

其中,  $I_0(x, y)$  为背景光强,  $\gamma(x, y)$  为调制系数,  $I_n(x, y)$  为加性随机噪声,  $f_0$  为空间载波频率,  $\varphi(x, y)$  为待求相位场。

为计算方便,假定  $y$  值固定(即取离散化条纹图中某一行进行分析),将相位调制载波信号用下式表示:

$$I(x) = I_0(x) \{1 + \gamma(x) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x)]\}. \quad (2)$$

在基于 CWT 的条纹图相位分析方法中,选用不同的小波,其计算过程和求解条件不一样。例如,如果选用实数小波,如 Afifi<sup>[15]</sup>选用的 Paul 小波,则只能先求得相位梯度然后再积分求相位分布。为了能从小波变换脊直接计算相位,本文使用复 Morlet 小波作为母小波(基本小波),其表达式如下式所示:

$$M(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_B}} \exp \left[ j2\pi f_C x - \frac{x^2}{f_B} \right], \quad (3)$$

其中,  $f_B$  为带宽参数,  $f_C$  为小波中心频率参数,实际应用中可根据需要选择具体的参数值。复 Morlet 小波的频谱为

$$\hat{M}(\omega) = \exp \left[ -\frac{f_B}{4} (\omega - 2\pi f_C)^2 \right]. \quad (4)$$

为了得到小波变换模极大值与调制系数的

简单对应关系,这里按下式对母小波  $M(x)$  进行伸缩和平移得到分析小波:

$$M_{a,b}(x) = \frac{1}{a} M\left[\frac{x-b}{a}\right]. \quad (5)$$

对应的小波变换为:

$$W_I(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \overline{M_{a,b}(x)} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{I}(\omega) \overline{\hat{M}(a\omega)} e^{j b \omega} d\omega, \quad (6)$$

其中,  $\hat{I}(\omega)$  是  $I(x)$  的频谱。

将相位  $\varphi(x)$  在  $x=b$  附近进行 Taylor 级数展开:

$$\varphi(x) = \varphi(b) + \varphi'(b)(x-b) + \frac{\varphi''(b)}{2!}(x-b)^2 + \dots \quad (7)$$

由于复 Morlet 小波的局部化特性,并假设背景光强  $I_0(x)$  和调制度系数函数  $\gamma(x)$  变化缓慢,则可以忽略  $\varphi(x)$  的 Taylor 级数展开的高阶项,因而在  $x=b$  附近,有:

$$\begin{cases} \varphi(x) = \varphi(b) + \varphi'(b)(x-b) \\ I_0(x) = I_0(b) \\ \gamma(x) = \gamma(b) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)得:

$$I(x) \approx I_0(b) \{1 + \gamma(b) \cos[2\pi f_0 x + \varphi'(b)x + \varphi(b) - b\varphi'(b)]\}. \quad (9)$$

式(9)的 Fourier 变换为:

$$\begin{aligned} \hat{I}(\omega) &= 2\pi I_0(b) \delta(\omega) + \pi I_0(b) \gamma(b) \times \\ &\delta[\omega - 2\pi f_0 - \varphi'(b)] e^{-j[b\varphi'(b) - \varphi(b)]} + \\ &\pi I_0(b) \gamma(b) \delta[\omega + 2\pi f_0 + \varphi'(b)] e^{j[b\varphi'(b) - \varphi(b)]}. \end{aligned} \quad (10)$$

将式(4)和式(10)代入式(6)得到

$$\begin{aligned} W_I(a,b) &= 2\pi I_0(b) e^{f_B(\pi f_C)^2} + \\ &\pi I_0(b) \gamma(b) e^{j[\varphi(b) + 2\pi f_0 b]} e^{-\frac{f_B}{4} \{a[\varphi'(b) + 2\pi f_0] - 2\pi f_C\}^2} + \\ &\pi I_0(b) \gamma(b) e^{-j[\varphi(b) + 2\pi f_0 b]} e^{-\frac{f_B}{4} \{a[\varphi'(b) + 2\pi f_0] - 2\pi f_C\}^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

在位置  $b$  处的小波变换  $W_I(a,b)$  的模取极大值时,对应的尺度  $a_{\text{ridge}}$  满足

$$\left. \frac{\partial |W_I(a,b)|}{\partial a} \right|_{a=a_{\text{ridge}}} = 0. \quad (12)$$

给出式(12)的解析式解非常困难,这里通过选择合适的小波参数  $f_B$  和  $f_C$  来对  $W_I(a,b)$  的表达式进行简化,希望由此可以给出式(12)的近似解析式解。

在进行参数选择时,除了要满足上面提到的简化  $W_I(a,b)$  的表达式的目的,还应满足小波分析的基本原则。小波分析可以看作是一种相似性分析,即用不同尺度的分析小波去匹配局部信号。对于载波条纹图,其局部条纹频率在载波频率附近。为了取得较好的局部化性能,母小波的带宽  $f_B$  越小越好,而为了能分析条纹图的趋势项,又需要带宽  $f_B$  大一些。因此,  $f_B$  的理想值是条纹图中最小局部条纹频率。对于载波条纹图,  $f_B$  可取  $0.5 \sim 1.0$  倍载波条纹频率  $f_0$ 。对于参数  $f_C$  的选择问题,由于小波相当于一个带通滤波器,用它对信号进行滤波以“检视”相应局部频段内的信号分量,因此,母小波中心频率  $f_C$  的最佳取值应为  $f_0$ 。

当取  $f_C = f_0, f_B = 0.5 f_0$  且  $f_0 > 1$  时,因为

$$e^{-f_B(\pi f_C)^2} \approx 0, \quad (13)$$

$$e^{-\frac{f_B}{4} \{a[\varphi'(b) + 2\pi f_0] + 2\pi f_C\}^2} \approx 0. \quad (14)$$

由式(13)和式(14),有

$$\begin{aligned} W_I(a,b) &\approx \pi I_0(b) \gamma(b) \cdot \\ &e^{j[\varphi(b) + 2\pi f_0 b]} e^{-\frac{f_B}{4} \{a[\varphi'(b) + 2\pi f_0] - 2\pi f_C\}^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

此时,解方程(12),得到小波变换脊处的尺度

$$a_{\text{ridge}} = \frac{2\pi f_0}{\varphi'(b) + 2\pi f_0}. \quad (16)$$

通过 Fourier 分析可知,信号频谱的峰值对应于信号的主要分量。同样,在载波条纹信号的小波分析中,小波变换模极大值处对应于载波的瞬时频率,根据式(15),该处小波变换的相位为  $\varphi(b) + 2\pi f_0 b$ ,因此有

$$\varphi(b) = \arctan \frac{\text{Im}[W_I(a_{\text{ridge}},b)]}{\text{Re}[W_I(a_{\text{ridge}},b)]} - 2\pi f_0 b, \quad (17)$$

式(17)为直接相位计算公式。但它是真实相位在  $(-\pi/2, \pi/2)$  区间内的主值,需要对其进行相位展开以得到真实的相位。

小波变换位置  $b$  处的小波变换模极大值

$$|W_I(a_{\text{ridge}},b)| \approx \pi I_0(b) \gamma(b). \quad (18)$$

当条纹图的背景照明比较均匀或已经消除了条纹图的背景噪声时,有  $I_0(b) \approx 1$ ,因此

$$|W_I(a_{\text{ridge}},b)| \approx \pi \gamma(b). \quad (19)$$

从式(19)可以看出,此时小波变换模的极大值  $|W_I(a_{\text{ridge}},b)|$  与调制度系数  $\gamma(b)$  存在简单的正比关系。因此,在相位展开算法中可以将小波变换模极大值作为判断条纹质量高低的依据。

## 2.2 小波变换脊的定位方法

从前面的分析可以看出,在基于小波变换的相位分析技术中,跟踪小波变换脊,或者说定位小波变换模极大值点是非常关键的一步,只有正确和精确地找到了各位置  $b$  的小波变换模极大值点  $a_{\text{ridge}}$ ,才能正确和精确地计算得到待求的相位。

实际计算中处理的对象是数字图像,因此位置  $b$  已经离散化了,而由于这里用的是 CWT,尺度  $a$  是连续的,所以需要对其进行离散化。虽然原理上可以计算条纹在任何尺度上的 CWT,但实际上这是不现实也是不必要的,所以在对  $a$  进行离散化之前,需要确定它的计算范围和计算间隔。因为小波尺度  $a$  对应于小波的频率,所以在确定  $a$  的范围时,可以先估计条纹的空间频率范围,由频率范围确定  $a$  的范围。当  $a > 0$  时,小波  $\Psi_{a,b}(x)$  的正频窗口中心为  $\left[b, \frac{\omega_0^+}{a}\right]$  (对于复 Morlet 小波,其  $\omega_0^+ = 2\pi f_c$ ),假设条纹的频率范围为  $[\omega_1, \omega_2]$ ,则  $a$  的计算范围应为:

$$[a_1, a_2] = \left[ \frac{\omega_1^+}{\omega_2}, \frac{\omega_0^+}{\omega_1} \right]. \quad (20)$$

确定了  $a$  的范围,就可以确定其计算间隔  $P$ 。计算间隔越小,对  $a_{\text{ridge}}$  的定位越精确,但由于受条纹信号长度(采样点数)的限制,计算间隔也不是越小越好。对于给定的离散条纹信号,当计算间隔小到一定程度后并不能进一步提高  $a_{\text{ridge}}$  的定位精度。设条纹信号长度为  $L$ ,则  $a$  的计算间隔  $P$  可取

$$P = \frac{a_2 - a_1}{L}, \quad (21)$$

其中,  $a_2, a_1$  为尺度计算范围的上、下界限。

当然,上面给出的是  $a$  的计算范围和间隔的理想值,实际上其计算范围可以取得稍微大一些,而其计算间隔可以取得稍微小一些。

接下来,计算离散网格点上条纹的 CWT,然后搜寻 CWT 模极大值点的路径。本文提出一种比较简单的小波变换脊定位算法,该算法基于曲线拟合方法,具体步骤如下:

(1) 对所有  $b_i$  点,找出条纹信号 CWT 模的最大值点  $[a_{\text{ridge}}(b_i), b_i]$ ,如果有多个  $a$  值使条纹信号 CWT 的模取最大值,则取所有这些  $a$  值的平均作为  $a_{\text{ridge}}(b_i)$ ;

(2) 这样得到一系列以  $b_i$  为变量的  $a_{\text{ridge}}(b_i)$ ,对其进行曲线拟合得到新的最大值点  $(a_{\text{ridge}}^*(b_i), b_i)$ ,注意到  $a_{\text{ridge}}(b_i)$  取的是  $[a_1, a_2]$  内间隔为  $P$  的

离散值,而  $a_{\text{ridge}}^*(b_i)$  可以是  $[a_1, a_2]$  内的任何值;

(3) 对所有  $b_i$ ,计算  $[a_{\text{ridge}}^*(b_i), b_i]$  处的复 Morlet 小波变换的相位;

(4) 根据式(17)可计算得到各  $\varphi(b_i)$ 。

本文的算法基于这样的假设:相位  $\varphi(x)$  是连续的或者说是“光滑”的(或是分段连续的,如果是分段连续的,则分段拟合),因而其局部频率也是连续的,即使条纹信号中存在噪声,由奇异信号在小波变换下的特性可知,噪声对这种“光滑”性也不会有太大的影响。

## 3 实验与结果

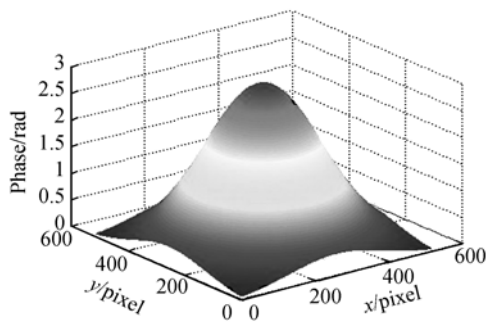
### 3.1 仿真实验

由于实际光学透镜的有效孔径为圆形,而记录图像的 CCD 面阵为矩形,因此图像边缘存在较大的无效数据区。另外,在一些光学测试方法(干涉法、光栅法等)中,视场中还存在遮挡物,也会形成无效区域。图 1 是仿真的具有无效数据区的载波条纹图,图 2(a)是调制相位分布,图 2(b)是图 1 的 CWT 的模极大值,从图中可以看出有效像素的模极大值比较大,而无效像素的模极大值比较小,因此根据模极大值可以分离出有效数据区,相位展开只在有效数据区进行,否则无法正确地对 CWT 法得到的包裹相位进行展开,因为无效数据区不存在相位信息。图 2(c)是展开后得到有效数据区的相位分布。图 2(d)是计算得到的相位与实际相位之差,从图中可以看出,计算误差只是在有效区域边缘稍微大一些,而在有效数据区域的误差非常小,CWT 法得到的结果与实际相位值的相对误差小于 0.01%。由于图 1 中存在大量无效数据,采用 FTM 时,甚至无法进行正常的相位展开。

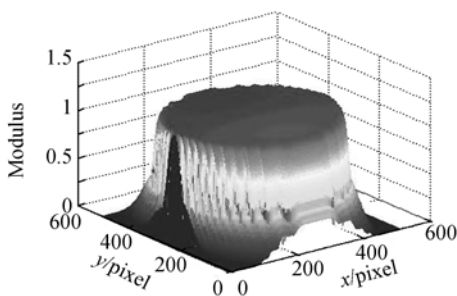


图 1 仿真条纹图

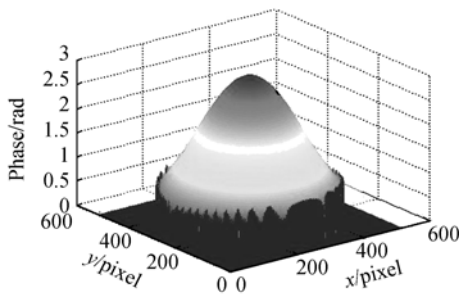
Fig. 1 Simulated fringe pattern



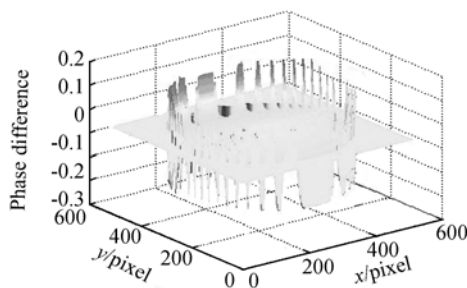
(a) 原始调制相位  
(a) Original modulating phase



(b) 小波变换模极大值  
(b) Maximum modulus of wavelet transform



(c) 计算得到的相位  
(c) Calculated phase



(d) 相位误差  
(d) Phase error

图 2 仿真计算过程及结果

Fig. 2 Process and results of simulation experiment

### 3.2 光栅纹影法内波流场测量实验

用于内波流场测量的光栅纹影系统如图 3 所示,它包括光源部分、透镜组合、光栅和成像系统。光源部分由卤素灯 LS、缩束透镜  $L_1$  (焦距 50.8 mm,孔径 25.4 mm)、小孔光阑 PH(孔径  $20 \mu\text{m}$ ) 和准直透镜  $L_2$  (焦距 1 000 mm,孔径 100 mm) 组成;成像部分由缩束透镜  $L_3$  (焦距 1 000 mm,孔径 100 mm)、光栅 G(栅线宽 0.5 mm,栅线间距 1 mm)、场镜  $L_4$  (焦距 76.2 mm,孔径 25.4 mm) 和 CCD 相机组成。图 3 中 TF 为被测流场。

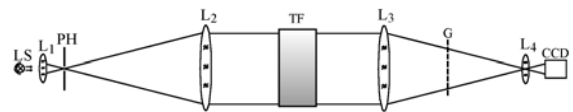


图 3 光栅纹影系统组成

Fig. 3 Setup of a grating schlieren system

系统中 CCD 摄像机选用 Mintron MTV-1881EX 型 CCD 黑白摄像机,其有关技术参数如下:

影像传感器:1/2 in(7.4 mm × 5.95 mm);

CCD 总像素:795 × 596;

最低照度:0.02 lx(F1.2,5600oK);

信噪比:优于 48 dB。

内波实验需要配制层化盐水,使用“双槽法”层化盐水配制方法配制的盐水的理想情况是密度从上到下逐渐增大的线性层化分布,且是一种二维流场。在内波射线实验中,使用电机驱动机构使直径为 1.9 cm 的圆柱体在层化盐水流场中沿水平方向作往复运动。根据文献[16]和上述测量系统元件参数可得调制相位与层化盐水密度梯度的关系式为:

$$\frac{\partial \rho(x, y)}{\partial y} \approx 1.136 2 \times 10^{-4} \cdot \varphi(x, y). \quad (22)$$

图 4(a) 和 (b) 是圆柱体振动频率分别为 0.313 9 rad/s 和 0.575 9 rad/s 时采集得到的光栅纹影图像,图 4(c) 和 (d) 用前述基于复 Morlet 小波变换的条纹图相位分析方法计算得到的内波流场的密度梯度变化图。从计算结果可看出,圆柱体振动频率越大时,射线与垂直方向的夹角越小,这与理论分析一致,测量精度达到了  $5 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^4$ 。

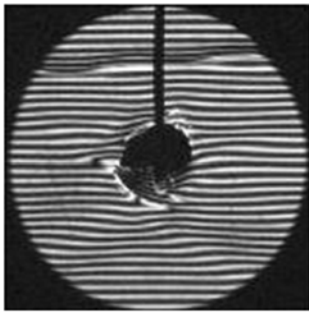
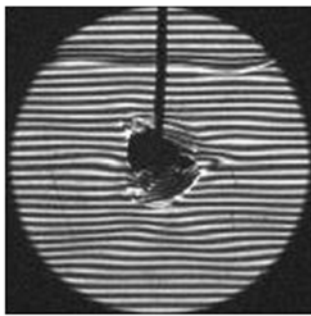
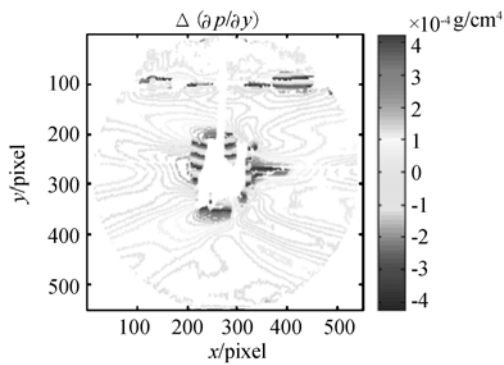
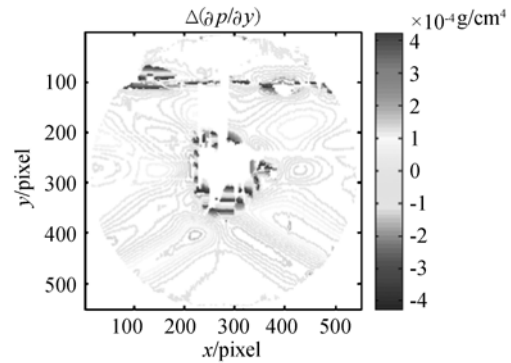
(a)  $\omega=0.3139$  rad/s 时的条纹图(a) Fringe pattern when  $\omega=0.3139$  rad/s(b)  $\omega=0.5759$  rad/s 时的条纹图(b) Fringe pattern when  $\omega=0.5759$  rad/s(c)  $\omega=0.3139$  rad/s 时的密度梯度(c) Density gradient when  $\omega=0.3139$  rad/s(d)  $\omega=0.5759$  rad/s 时的密度梯度(d) Density gradient when  $\omega=0.5759$  rad/s

图 4 内波流场测量条纹图分析结果

Fig. 4 Analysis results for fringe patterns in internal wave experiment by CWT method

## 4 结 论

在使用各种干涉方法进行高速动态测量的条纹图分析中,为有效消除无效数据对计算结果精度的影响,提出了一种基于 CWT 的条纹图相位分析方法。通过选用复 Morlet 小波并选择合适的小波参数,使得条纹图的小波变换模极大值与其调制度系数成正比,将其作为加权最小二乘法相位展开算法的权值,在相位展开时有效消除了无效数据的影响;使用曲线拟合进行小波变换脊定位,定位算法简单,缩短了定位时间且消除了噪声干扰。在仿真实验中,使用该方法分析的结果与实际相位值的相对误差小于 0.01%。在内波流场测量实验中,使用该方法进行条纹图分析,密度梯度测量精度达到了  $5 \times 10^{-6}$  g/cm<sup>4</sup>。结果表明,该方法进行条纹图相位分析时可以有效消除无效数据对结果的不利影响,相位展开有效可靠,分析结果精度高。

## 参考文献:

- [1] DALZIEL S B, HUGHES G O, SUTHERLAND B R. Whole-field density measurements by "synthetic schlieren"[J]. *Exp. Fluids*, 2000, 28:322-335.
- [2] 姜宏志,赵慧洁,李旭东,等. 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9):2002-2008.

- JIANG H Z, ZHAO H J, LI X D, *et al.*. Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):2002-2008. (in Chinese)
- [3] PFEIFER T, WANG B X, TUTSCH R. Phase-shifting moiré deflectometry[J]. *Optik*, 1995, 98: 158-163.
- [4] 单鹂娜,于晓洋,于双,等. 彩色梯度相移与格雷码

- 相结合的三维测量方法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11):2497-2504.
- SHAN L N, YU X Y, YU SH, *et al.*. Three dimensional measurement method combining color trapezoidal phase-shifting with color gray code[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11):2497-2504. (in Chinese)
- [5] PANDIT S M, CHAN D P. Comparison of Fourier transform and data-dependent system profilometry by use of interferometric regeneration[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(19):4095-4102.
- [6] QIAN K. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43:2695-2702.
- [7] FORMARO G, FRANCESCHETTI G, LANARI R, *et al.*. Global and local phase-unwrapping techniques: a comparison[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, 14(10):2702-2708.
- [8] BALDI A, BERTOLINO F, GINESU F. On the performance of some unwrapping algorithms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 37:313-330.
- [9] BONEE D J. Fourier fringe analysis: the two dimensional phase unwrapping problem[J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30(25):3627-3632.
- [10] XU Y, AI C. Simple and effective phase unwrapping technique[J]. *SPIE*, 1993, 2003:254-263.
- [11] KAUFMANN G H, GALIZI G E. Evaluation of a preconditioned conjugated gradient algorithm for weighted least-squares unwrapping of digital speckles pattern interferometry phase maps[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(14):3076-3084.
- [12] WATKINS L R, TAN S M, BARNES T H. Determination of interferometer phase distributions by use of wavelets[J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24:905-907.
- [13] TOMASSINI P, GIULIETTI A, GIZZI L, *et al.*. Analyzing laser plasma interferograms with a continuous wavelet transform ridge extraction technique: the method[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(35):6561-6568.
- [14] LIU H, CARTWRIGHT A, BASARAN C. Moiré interferogram phase extraction: a ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(4):850-857.
- [15] AFIFI M, FASSI-FIHRI A, MARJANE M, *et al.*. Paul wavelet-based algorithm for optical phase distribution evaluation[J]. *Optics Communications*, 2002, 211:47-51.
- [16] 孟涛, 张明照, 王克军, 等. 光栅纹影偏折法测量二维层化流体密度梯度[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6):973-977.
- MENG T, ZHANG M ZH, WANG K J, *et al.*. Measurement of density gradient for 2D flow fields using grating Schlieren deflectometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):973-977. (in Chinese)

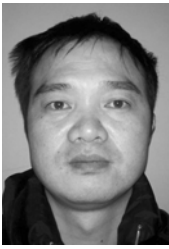
#### 作者简介:



张明照(1973—),男,安徽太湖人,博士,助理研究员,1999年于第二炮兵工程大学获得硕士学位,2007年于清华大学获得博士学位,主要从事精密仪器与测试、流场显示测量和图像处理技术方面的研究。E-mail: zhangmingzhao@tsinghua.org.cn



牟建华(1963—),男,山东青州人,博士,研究员,1988年于第二炮兵工程大学获得硕士学位,1993年于西安交通大学获得博士学位,主要从事飞行器精确制导与控制技术方面的研究。E-mail: nanmuok@126.com



刘 扬(1970—),男,湖南益阳人,硕士,副研究员,1992年于第二炮兵工程大学获得学士学位,1998年于国防科学技术大学获得硕士学位,主要从事飞行器导航、制导与控制技术方面的研究。E-mail: liuyangepss@sohu.com



王伯雄(1947—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,清华大学精密仪器与测试技术实验室主任,主要从事精密仪器与测试技术、MEMS技术、光学测量技术和生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@mail.tsinghua.edu.cn



彭晓军(1973—),男,江西赣州人,博士,高级工程师,1998年于第二炮兵工程大学获得硕士学位,2004年于清华大学获得博士学位,主要从事精确制导技术方面的研究。E-mail: pengxiaojun@139.com

#### ● 下期预告

## 分体式激光扩束系统平行度测量装置设计

张 磊<sup>1,2</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为实现强激光发射系统中高功率激光经分体式扩束系统后的光束传输方向的精确测量,从而为扩束系统的装调及应用提供可靠依据,设计了一种新型分体式扩束系统输出光平行度测量装置。首先,根据高功率激光分体式扩束系统及红外激光的特点,采用高分辨率红外 CCD 作为监测成像设备。而后,对装置的机械结构进行了设计,结构采用轻质高刚度的优质铝合金,切换部件搭载在高精度线性位移平台上。试验测试结果表明,分体式扩束系统输出光平行度测量装置工作稳定、可靠,测量精度优于 $2.0''$ 。装置设计合理、结构简单,满足工作要求。