

文章编号: 0253-2239(2007)01-0068-5

三维相位展开算法在精密运动测试中的应用*

胡春光 胡晓东 栗大超 郭彤 胡小唐

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 三维相位展开算法将基于空间的相位展开算法拓展到时间轴上, 包含了一维时间和二维空间信息, 适合于运动测试。通过建立一维时间相位展开算法的数学模型, 分析了该算法运动测试的基本原理, 讨论了在精密测试中的使用方法和适用范围, 并对微谐振器的微结构进行运动测试。实验表明, 算法在相位展开中引入时间信息, 不仅消除了形变测量中需选取静止点为相位参考点或参考平面的限制, 还可以同时测量物体表面某点纳米级的离面运动曲线和表面形变。

关键词: 光学测量; 运动测试; 相位展开算法; 三维形貌测量; 频闪成像

中图分类号: TN206 文献标识码: A

Application of Three-Dimensional Phase Unwrapping Algorithm in Precision Motion Measurement

Hu Chunguang Hu Xiaodong Li Dachao Guo Tong Hu Xiaotang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Three-dimensional phase unwrapping algorithm is an expansion of the spatial phase unwrapping algorithm in time, which contains one-dimensional temporal and two-dimensional spatial information and is very useful for motion measurement. Firstly, mathematic formula of one-dimensional temporal phase unwrapping algorithm is introduced in this paper. Then, the working principle, limitation conditions and the process of the new algorithm are discussed for precise measurement of micro-motion. In final, the micro-structure motion of micro-oscillators is measured. The results show that the new algorithm, due to time information taken into consideration, not only gets rid of the request for static reference point or reference plane for distortion measurement, but also achieves off-plane motion in the level of nanometer while surface distortion is measured at the same time.

Key words: optical measurement; motion measurement; phase unwrapping algorithm; three-dimensional profile measurement; stroboscopic imaging

1 引 言

随着微机电系统的深入发展, 作为实验研究和质量控制的重要环节, 测试技术越来越受重视, 特别是在动态测试领域, 人们希望获得微结构在运动过程中的运动状态和表面形貌信息, 这对于评判微结构设计的合理性和加工工艺的优劣来说, 是最直接的反馈数据。

在多种测试技术中, 光学干涉法因测量精度高、非接触测量和抗干扰能力强等优点, 广泛应用于微结构的静态形貌和薄膜的形变测试中。其采用的传统相位展开算法以一幅包裹相位分布图为研究对

象, 在二维空间做相位展开, 再经过相位到高度变换后获得物体的表面形貌。但是, 这种算法仅局限于解决一幅包裹相位分布图内不同空间位置的关系, 而无法获知不同包裹相位分布图之间的联系, 即使是形变测量, 也要求选择测试结构上静止不动的点作为形变测试的参考点^[1,2]。显然, 对于动态测试, 特别是物体运动过程的测试, 传统算法是不合适的。因为运动的物体表面很可能没有静止点, 若要测量不同运动时刻表面形貌的变形, 或者测量同一空间位置点的运动曲线, 则要探求多幅包裹相位分布图之间存在的某种联系, 以保证同一空间位置点在各

* 国家 863 计划重大专项(2004AA404042)和自然科学基金(50505031)资助课题。

作者简介: 胡春光(1981-), 男, 河南人, 研究生, 从事微纳测试技术研究。E-mail: cghu@hotmail.com

导师简介: 胡晓东(1974-), 男, 江西人, 副教授, 主要从事微纳测试与加工技术研究。E-mail: xdhu@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-01-04; 收到修改稿日期: 2006-06-20

幅相位展开图的相位值具有共同的参照点。

为解决传统算法在运动测试中遇到的问题,本文采用三维相位展开算法,在包裹相位中引入时间变量,建立基于一维时间和二维空间的三维参量组,在分析算法原理的基础上,详细讨论了该算法的适用范围和使用条件,并对微谐振器的运动结构进行了实验验证。

2 算法原理

在运动测试中,人们常通过高速摄影、频闪成像等方法对物体运动过程进行离散采样,经相位提取获得一套不同运动时刻的包裹相位分布图^[3~5]。三维相位展开算法首先进行一维时间相位展开,在不

同时刻的包裹相位分布图之间建立起联系,对于每幅图内的不同空间位置点的关系再由传统二维相位展开算法解得。这样不仅同一空间位置点在不同时刻的相位值,甚至不同空间位置点在不同时刻的相位信息都能联系起来,且不需要选择静止点作为相位展开的参考点。因此,如何获取不同运动时刻包裹相位分布图之间的联系是关键。

2.1 一维时间相位展开算法数学模型^[6]

假设一套包裹相位分布图中第 i 幅图的某一空间点的包裹相位值为 $\varphi_{\text{wrap}}(x_0, y_0, t_i)$, 其中 (x_0, y_0) 为该点在二维空间中的坐标, t_i 为时间轴上的坐标。

若将该点的包裹相位值看作是真实值 $\varphi(x_0, y_0, t_i)$ 进行包裹运算 W 的结果, 则有如下数学表示:

$$W[\varphi(x_0, y_0, t_i)] = \varphi_{\text{wrap}}(x_0, y_0, t_i), \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

上式可写为

$$W[\varphi(x_0, y_0, t_i)] = \varphi(x_0, y_0, t_i) + 2\pi k(x_0, y_0, t_i), \quad (2)$$

其中 $k(x_0, y_0, t_i)$ 是供选择的整数序列, 使得

$$-\pi < W[\varphi(x_0, y_0, t_i)] < \pi, \quad (3)$$

同样, 在第 $i-1$ 幅图中, 同一空间位置点 (x_0, y_0) 的包裹相位值可表示为

$$W[\varphi(x_0, y_0, t_{i-1})] = \varphi(x_0, y_0, t_{i-1}) + 2\pi k(x_0, y_0, t_{i-1}), \quad (4)$$

定义

$$\Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) = \varphi(x_0, y_0, t_i) - \varphi(x_0, y_0, t_{i-1}), \quad (5)$$

$$\Delta k(x_0, y_0, t_i) = k(x_0, y_0, t_i) - k(x_0, y_0, t_{i-1}), \quad (6)$$

Δ 为差值运算符, 则该点不同时刻的包裹相位差为(2)式减去(4)式

$$\Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)] = \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) + 2\pi\Delta k(x_0, y_0, t_i), \quad (7)$$

对此结果再次做包裹运算, 得

$$W'\{\Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)]\} = \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) + 2\pi[\Delta k(x_0, y_0, t_i) + k'(x_0, y_0, t_i)], \quad (8)$$

$k'(x_0, y_0, t_i)$ 是供选择的整数序列, 该结果为包裹相位差的包裹值。由于包裹运算 W' 产生的值在 $(-\pi, \pi)$ 之间, 所以, 若

$$-\pi < \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) < \pi, \quad (9)$$

则(8)式中 $2\pi[\Delta k(x_0, y_0, t_i) + k'(x_0, y_0, t_i)]$ 项应为 0, 因此有

$$\Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) = W'\{\Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)]\}, \quad (10)$$

从而可以得到如下公式(假设 t_0 时刻的相位值为初始值):

$$\varphi(x_0, y_0, t_m) = \varphi(x_0, y_0, t_0) + \sum_{i=1}^m W'\{\Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)]\} = \varphi(x_0, y_0, t_0) + \sum_{i=1}^m \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i). \quad (11)$$

(11) 式表明, 通过对包裹值差求和, 可实现不同包裹相位分布图中相同空间位置点的相位展开。但前提是相邻包裹相位的包裹值必须满足(9)式, 否则无法正确展开相位。

若包裹相位值位于 $-\pi$ 和 π 断点附近(即条纹间的黑白跳变), 应对 $\Delta\varphi(x_0, y_0, t_i)$ 进行修正:

$$\Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) = \begin{cases} \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) - 2\pi, & \Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)] > \pi \\ \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i), & |\Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)]| < \pi \\ \Delta\varphi(x_0, y_0, t_i) + 2\pi, & \Delta W[\varphi(x_0, y_0, t_i)] < -\pi \end{cases} \quad (12)$$

该数学模型与传统的空间一维相位展开算法相似,区别在于将沿空间轴的展开变换到时间轴上。但新算法有以下几点需要注意,否则容易造成相位展开的失败:

1) 选择相同空间位置点做时间轴相位展开。这主要是保证包裹相位图之间联系的正确性,如果物体在离面运动(垂直于光轴方向)中还包含有二维平面运动,需首先获取所选择的空间点在不同的包裹相位分布图中的二维空间坐标。

2) 时间轴上相邻两点间的真实相位差应满足(9)式。这意味着该空间点在相邻两次采样时间间隔内,离面运动位移不能超过四分之一波长(设采用双光程差干涉仪,该波长为测量所用光源的波长)。若物体运动速度很快,应适当增加采样频率。

3) 采用噪声小、衬比度较好的干涉图。由于整个三维相位展开是基于某一空间点进行的,该点展开的成败直接影响最终的结果,为保证空间一维展开的成功,应对干涉图进行图像处理(去噪声、增强衬比度等),并采用较稳定的相位提取算法提取包裹相位分布图。

2.2 三维相位展开算法

根据一维空间相位展开算法,可以分析出不同时刻包裹相位分布图之间的联系,通过该联系,并在每幅包裹相位图内进行二维空间相位展开算法,不同时刻不同空间位置点可以获得一个基于同一参照点的展开相位值,这就是三维相位展开算法的基本思想。具体步骤如下:

1) 在物体表面上寻找用于一维时间相位展开的空间点。为满足(9)式的要求,可以选择物体上运动幅度相对较低的点。对于物体整体幅度很大的情况,需适当增加采样次数。

2) 对选择的空间点进行时间轴上的相位展开。展开后的相位曲线描述了该空间点的离面运动。若展开中出现错误,需重新选择空间点。

3) 选点的个数应根据测试表面的情况而定,点的数量将影响相位展开算法的速度。若物体表面存在多个互不联系的区域,应在每个区域内均选择各自的空间点。

4) 以该空间点的相位展开值为起始值,在每幅包裹相位分布图内进行二维空间相位展开。可根据图像质量和物体表面结构的复杂程度选择合适的传统相位展开算法。

3 实验分析

为验证三维相位展开算法,以美国北卡罗莱纳微电子中心(MCNC)制造的微谐振器^[7](micro-resonator,如图1所示)为测试器件。微谐振器包含三个电极 a、b、c,其中 a、c 极对应两端的固定梳齿, b 极是中间的运动梳齿,它由悬臂结构支撑,当在任一固定梳齿和运动梳齿间加上超过阈值的电压(驱动频率为 20 kHz 时,阈值电压为 50 V),运动梳齿克服悬臂的束缚,产生面内运动,同时伴随微小的离面位移。实验设备采用的是天津大学研制的微结构特性的光学测试平台^[8]。

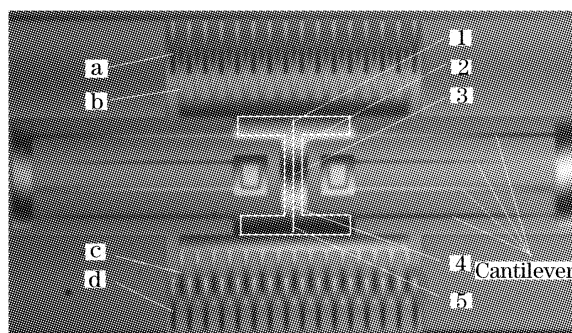


图 1 微谐振器

Fig. 1 Micro resonator

微谐振器由余弦电压驱动,峰-峰值 20 V,偏压 20 V,频率 20 kHz, a、b 极施加驱动电压,同时 b、c 两极接驱动电压的同一极,此时器件未产生超过像素级的面内运动。采用频闪成像法^[9]对微谐振器运动进行 16 次离散采样,并根据 Hariharan 五步定步长相移法提取包裹相位分布图。

3.1 三维相位展开算法验证

选择图 1 中点 1 作为一维时间相位展开的空间点,并将相位值转换为高度值,其包裹相位值如图 2 中带点虚线所示,采样点 3 与 4, 6 与 7, 9 与 10, 12

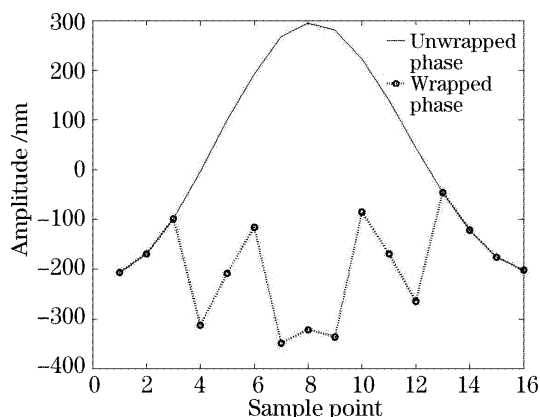


图 2 点 1 运动位置的包裹相位与解包裹相位

Fig. 2 Wrapped phase and unwrapped phase of motion position of point 1

与 13 等点之间包裹相位值出现跳变,根据一维时间相位展开算法,得到图 2 中实线描绘的曲线。由于出现多次跳变,无法确定这几处跳变位置的包裹相位差值是否满足 2.1 节的条件,即无法确定该曲线是否为点 1 的运动曲线。

为此,再选择图 1 中点 3 作为一维时间相位展开的空间点,其包裹相位曲线如图 3 中带点虚线所示,不难看出,除采样点 6 与 7,9 与 10 两处因位于 $-\pi$ 和 π 断点附近产生正常跳变^[10]之外,点 3 包裹相位值之间的差值均满足算法适用要求。用一维时间相位展开算法完成包裹相位的展开,其离面运动曲线近似余弦波形,与驱动电压的波形相近(图 3 中实线)。

若以图 1 中点 3 为每幅包裹相位分布图的参照点,在每幅包裹相位分布图内进行二维相位展开(文中采用传统的路径选择算法),可获得不同时刻的空间位置点可基于同一参考值的相对相位展开值。然后,提取点 1 在不同时刻的相位展开图中的相位展开值,经相位高度转换,得到与图 2 相同的连续曲线,说明点 1 的几处跳变位置的包裹相位差满足算法条件,一维时间相位展开正确。比较点 1 与点 3 的运动曲线,形状近似,只是点 1 的运动幅度大于点 3。

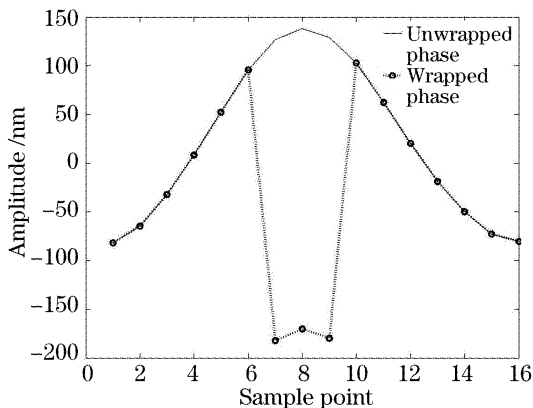


图 3 点 3 运动位置的包裹相位与解包裹相位
Fig. 3 Wrapped phase and unwrapped phase of motion position of point 3

然后,以图 1 中点 3 为每幅包裹相位分布图的起始点,在每幅包裹相位分布图内进行二维相位展开(文中采用传统的路径选择算法),获得不同时刻的空间位置点可基于同一参考值的真实相位展开值。将图 1 中点 1 在不同时刻的相位展开图中的展开相位值,经相位高度转换,描绘成图 2 中的连续曲线,可见点 1 与点 3 的运动曲线形状近似,只是点 1 的运动幅度大于点 3。虽然一维时间相位展开算法没能解开点 1 的包裹相位,但通过三维相位展开算

法,依然可以获得其较大幅度的离面运动曲线。

3.2 微谐振器表面形变测试实验

按上述方法,依次对图 1 中点 1~5 进行处理,各点运动曲线的对比图如图 4 所示。各点运动幅度从点 1~5 逐渐变小,表明微谐振器在离面方向产生运动的同时,还发生了偏转。微谐振器的运动梳齿在较小的电压驱动下,产生了离面方向的周期偏转运动,施加驱动电压的 a、b 两极的一端运动幅度最大,峰峰值超过 500 nm,随着远离施压端,运动幅度呈近似线性减小,在电势相同的 b、c 两极的一端达到最小,峰峰值仅为 30 nm。这说明 a、b 两极间施加电压所产生的作用力虽然没能使运动梳齿克服悬臂结构进行面内运动,但它已经足够驱动运动梳齿发生微小的离面方向的偏转。从各点运动幅度变化来看,离面的偏转运动还可能受到悬臂结构的“阻挠”。

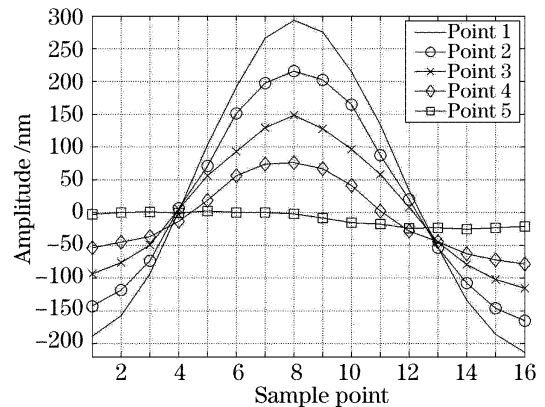


图 4 图 1 所示各点离面运动曲线

Fig. 4 Off-plane motion of points in Fig. 1

为验证微谐振器在运动中受到悬臂结构阻挠的情况,将图 1 中结构中心位置白色直线所示截面进行三维相位展开,其在不同时刻的形貌(共 16 个采样)集中于图 5。不难发现,在该截面的下方端点附近,随着偏转幅度的增大,有明显的弯曲形变。该处恰好位于支撑悬臂梁结构附近,印证了悬臂结构阻

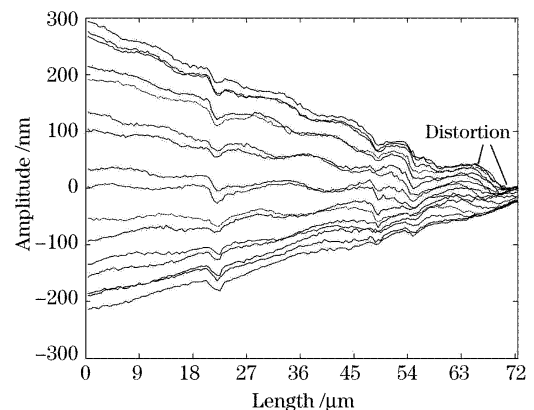


图 5 微谐振器表面形貌在运动中的变形

Fig. 5 Surface distortion in micro resonator motion

止了微谐振器大幅度偏转的猜测。随着运动梳齿偏转角的变大,无电压施加端(b、c极)且靠近悬臂结构处的表面形貌逐渐产生弯曲(见图5中所指位置),这使得无电压施加端的点5的运动曲线,与其余点的运动曲线都不相同,并且运动幅度很小。

3.3 微谐振器三维运动形貌

利用相位展开后的数据,恢复微谐振器的三维运动形貌,观察微谐振器在运动中的形貌及状态。

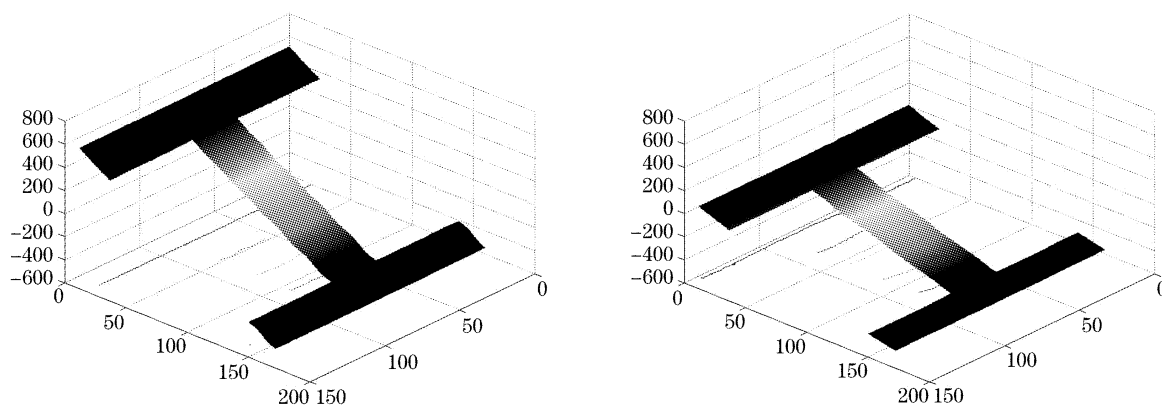


图6 图1所选区域的运动形貌图。(a)为第8采样点,(b)为第16采样点

Fig. 6 Motion profile of zone shown in Fig. 1, (a) for sample point 8, (b) for sample point 16

4 结 论

通过对微谐振器的测试,三维相位展开算法在满足一定测试要求的前提下,将时间和二维空间信息作为包裹相位的三个变量,不仅可以以运动点作为相位展开的参考点进行基于一维时间和二维空间的三维相位展开,还可对物体表面任意空间点的微小运动曲线和表面形变进行精确测量,具有测试信息丰富、算法简单、适应能力强等优点,弥补了传统相位展开算法在运动测试中的不足,也增强了光学干涉法在微机电系统动态测试中的作用。

参 考 文 献

- 1 Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998
- 2 Hui Mei. *Algorithm and Experimental Research on Phase Shifting Interferometry for Surface Micro Profile Measurement* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, 2001. 64~85 (in Chinese)
- 3 Matthew R. Hart, Robert A. Conant, Kam Y. Lau *et al.*. Stroboscopic interferometer system for dynamic MEMS characterization[J]. *J. Microelectromech. System*, 2000, **9**(4): 409~418

图6是图1白色闭合曲线所示工字形区域经三维相位展开后的运动形貌。微谐振器在激励电压的驱动下,由静止状态开始,偏转度逐渐增大,在第8个采样点处达到最大偏转[图6(a)],随后又逐渐减小,在第16个采样点恢复到静止状态的形貌[图6(b)]。该区域在运动中表面形貌基本无变形存在,仅在区域底部(图6中深色部分)沿倾斜度方向有微小形变,与3.2中的分析相一致。

- 4 Zhang Qican, Su Xianyu, Cao Yipin *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 207~211 (in Chinese)
- 张启灿,苏显渝,曹益平等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维形貌[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 207~211
- 5 Christian Rembe, Richard S. Muller. Measurement system for full three-dimensional motion characterization of MEMS[J]. *J. Microelectromech. System*, 2002, **11**(5): 479~488
- 6 K. Itoh. Analysis of the phase unwrapping algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(14): 2470~2473
- 7 William C. Tang, Tu-Cuong Nguyen, Michael W. Judy *et al.*. Electrostatic-comb drive for lateral polysilicon resonators [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, **A21~A23**: 328~331
- 8 Hu Xiaodong, Li Dachao, Guo Tong *et al.*. Optical measurement platform for micro-structures characterization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 803~808 (in Chinese)
- 胡晓东,栗大超,郭彤等. 微结构特性的光学测试平台[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 803~808
- 9 Hu Chunguang, Hu Xiaodong, Jin cuiyun *et al.*. Research on stroboscopic synchronous control system in MEMS dynamic testing[J]. *J. Tianjin University*, 2005, **38**(1): 47~51 (in Chinese)
- 胡春光,胡晓东,金翠云等. MEMS动态测试中频闪同步控制系统[J]. *天津大学学报*, 2005, **38**(1): 47~51
- 10 Peng Zhenjun, Qian Feng, Zhong Xianghong *et al.*. Phase-unwrapping algorithm based on segmenting regions containing phase jumps[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 910~915 (in Chinese)
- 彭震君,钱锋,钟向红等. 基于相位跳变区划分的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 910~915