

文章编号: 0258-7025(2002)06-0503-06

# 径向剪切干涉波前重建算法和不同倍数下重建精度的研究

李大海, 陈怀新, 陈祯培, 赵晓凤

陈波, 景峰

(四川大学电子信息学院光电系, 四川成都 610064) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

**提要** 提出一种新的基于循环式径向剪切干涉术的波前重建算法, 以此模拟计算了不同放大倍数下波前的还原结果与还原精度, 得出不同放大倍数下采用本算法都能还原出原始波前且还原精度相差不大的结论。同时在基于伽利略望远系统的循环式径向剪切干涉仪上测量了激光系统输出中存在台阶结构的畸变波前, 得出了与此基本一致的结论。

**关键词** 迭代算法, 径向剪切干涉, 放大倍数

**中图分类号** TH 744.3 **文献标识码** A

## Algorithm and Accuracy Study of Wavefront Reconstruction with Different Amplification ratio Based On the Cyclic Radial Shearing Interferometer

LI Da-hai, CHEN Huai-xin, CHEN Zhen-pei, ZHAO Xiao-feng

(Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

CHEN Bo, JING Feng

(ICF Center, Engineering Physics Academy of China, Mianyang 621900)

**Abstract** A new algorithm of wavefront reconstruction based on the cyclic radial shearing interferometer is given. This is a technique that the actual wavefront can be reconstructed directly and accurately from the distribution of phase difference which is obtained from the radial shearing pattern by Fourier transform profilometry. By the numerical calculation and experiments, it is concluded that the new algorithm is credible and the accuracy of wavefront reconstruction with different amplification ratio is basically same based on this interferometer. It shows that this algorithm can be used to reconstruct accurately the distorted wavefront of ICF. A example of test of step structure is presented with different amplification ratio with He-Ne laser.

**Key words** iterative algorithm, radial shearing interferometer, amplification ratio

## 1 引言

径向剪切干涉术<sup>[1]</sup>对惯性约束聚变(ICF)强激光系统输出畸变波前进行小量取样后进行在线检测将是很方便的。1999年P. J. Wegner等<sup>[2]</sup>采用了基于空间相位调制的循环式径向剪切干涉仪对美国国家点火计划(NIF)全尺寸原GAJF机Beamlet激光系统的近场与远场输出波前的位相分布分别进行

了检测, 剪切放大倍数在近场与远场分别为4倍和16倍; 1999年A. R. Barnes等<sup>[3]</sup>采用近10倍的同类型装置对HELEN 2TW Nd:glass强激光系统作了类似的检测, 我国正在研制的神光III激光系统原型装置的近场和远场输出波前的位相分布也需作类似的检测, 所以对循环式径向剪切干涉仪的研究是很重要的。

由于该干涉仪一般是通过望远系统实现对待测

收稿日期 2001-07-24; 收到修改稿日期 2001-10-30

作者简介 李大海(1968—), 男(苗族), 讲师, 在职博士生, 主要从事光学信息处理和波前控制研究。E-mail: dahai-li@

波前的放大和缩小,因此对缓变波前,当望远系统的放大倍数增大时,被放大的波前将接近于平面波,重叠区域内所形成的干涉条纹可用泰曼-格林(Twyman-Green)干涉很好地加以解释<sup>[4]</sup>,而且算法简单,增大放大倍数就能提高测量精度,放大倍数越高测量精度也越高<sup>[5]</sup>。但是当测对象是输出波前位相分布比较复杂(含有剧烈起伏等)的强激光系统,特别是有位相突变发生在待测波前的中心区域时,增大望远系统的放大倍数并不一定能获得优良的参考平面波,本质上条纹图反映的仍是重叠区域上的位相差分布。对于该种情况下的循环式径向剪切干涉图,P. J. Wegner等<sup>[2]</sup>和 A. R. Barnes等<sup>[3]</sup>对如何由它重建原始波前仅作了一般性描述或近似处理。据此,本文提出了一种新的波前重建算法,它克服了两者的缺陷,能由复杂或简单波前产生的径向剪切干涉图直接精确地恢复出原始波前,同时还讨论了放大倍数对复杂波前还原精度的影响的问题,得出不同的放大倍数下采用本算法的相同波前的还原精度相差不大的结论。计算机模拟和实验都证实了该算法的正确性。

## 2 波前重建的迭代算法研究

图1即是所谓的循环式径向剪切干涉仪的原理光路。入射的待测波前经分束镜BS反射(虚线)和透射(实线)后,被 $L_1, L_2$ 组成的伽利略望远系统在相反方向上分别放大和缩小,再汇合于分束镜的表面并在它们相互重叠的区域内产生干涉。其中 $s = |f_2|/f_1 < 1$ 表示径向剪切比, $f_1, f_2$ 为望远系统两透镜的焦距, $s$ 的倒数的平方为放大倍数,即 $(1/s)^2 = R_1/R_2, R_1, R_2$ 分别为图2中所示的扩大光斑和缩小光斑的半径。

设图1中待测的原始畸变波前在极坐标系下表示为 $W(r, \phi)$ ,其对应的复振幅分布为 $E(r, \phi) = A(r, \phi) \exp\{ik[W(r, \phi)]\}$ ,故图1所示光路在重叠区域干涉图强度分布为

$$I\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = \left| A\left(\frac{r}{s}, \phi\right) \exp\{ik[W\left(\frac{r}{s}, \phi\right)]\} + A(rs, \phi) \exp\{ik[W(rs, \phi)]\} \right|^2 = \left| A\left(\frac{r}{s}, \phi\right) \right|^2 \left\{ 2 + 2\cos\left[kOPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)\right] \right\} \quad (1)$$

其中

$$OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = W\left(\frac{r}{s}, \phi\right) - W(rs, \phi) \quad (2)$$

这里振幅 $A(r, \phi)$ 被近似认为是缓变的,且分束镜的透反比为

$$T/R = (f_2/f_1)^2 \quad (3)$$

用(1)式表示的干涉条纹有最大的对比度,其中 $R, T$ 分别表示图1中分束镜BS的反射率和透过率。

(2)式中 $W\left(\frac{r}{s}, \phi\right), W(rs, \phi), OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 分别表示缩小波前(图2中半径为 $R_2$ 的区域),扩大波前(图2中半径为 $R_1$ 的区域)和它们在相互重叠区域上的位相差分布。

由(2)式容易看出,复杂波前的位相分布即使在放大倍数很大的情况下, $W(rs, \phi)$ 表示的扩大波前也不一定会变成一理想平面波,因此干涉条纹图反映的仅是位相差分布 $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 。为了检测该分布,首先将图1中的分束镜倾斜放置,得到一被位相差分布 $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 调制的载频条纹图,即

$$I\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = a\left(\frac{r}{s}, \phi\right) + b\left(\frac{r}{s}, \phi\right) \times \cos\left\{ 2\pi r(f_{0x}\cos\phi + f_{0y}\sin\phi) \right\} + OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right) \quad (4)$$

对该条纹图采用Takeda<sup>[6]</sup>提出的傅里叶分析方法容易求出 $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ ,它并非真实波前。

为了进一步由 $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 获得原始波前,我们采用了如下的处理方法:以 $s^2$ 乘以(2)式左右两边的径向变量 $r$ 得

$$OPD(sr, \phi) = W(sr, \phi) - W(rs^3, \phi) \quad (5)$$

重复以上步骤 $n$ 次,并且将得到的所有等式(包括(2)式)左右累加,得

$$W\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = \sum_i^n OPD(s^{2i-1}r, \phi) + W(s^{2n+1}r, \phi) \quad (6)$$

这里 $i = 0, 1, 2, \dots, m, m$ 为正整数。(6)式即是本文提出的由位相差分布 $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 重建原始波前的迭代算法。该式等号左边的缩小波前 $W\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 可以看成是定义在半径为 $R_0$ (图2)区域上的原始波前 $W(r, \phi)$ 被缩小之后转化为定义在半径为 $R_2$ 区域上的重新分布,这种变化并不会改变原函数的性质,即函数 $W\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 和 $W(r, \phi)$ 在形状上是一样的。当

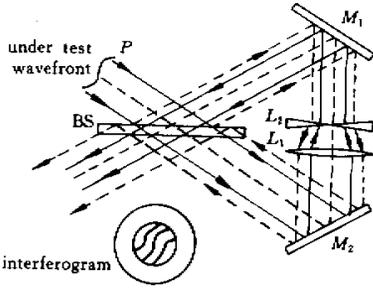


图 1 循环式径向剪切干涉仪

虚线表示扩大波前 实线表示缩小波前

Fig. 1 Cyclic radial shearing interferometer

The dash lines is the expanded wavefront , the real lines is the contracted wavefront

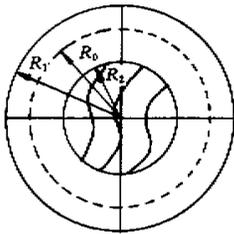


图 2 径向剪切干涉条纹图(白色区域)

$R_1, R_2, R_0$  分别为扩大、缩小和原始波前半径

Fig. 2 Radial shearing interferogram

The white area is interferogram ,  $R_1, R_2, R_0$  is the radii of the expanded , contracted and primal wavefront , respectively

$n$  很大时 (6) 式右边的第二项将展成一平面波 , 可略去不计。在对  $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$  由 (6) 式进行多次迭代运算后求出的  $W\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$  就是原始波前的位相分布。与文献 [2, 3] 比较 , 它给出了清晰的波前还原数学公式和消除了将位相差认为是畸变原始波前带来的不准确性 , 而文献 [7] 的方法则仅解释了马赫-曾德尔径向剪切干涉仪形成的干涉图 , 它与本文图 1 形成的条纹图略有不同 , 所以对图 1 形成的干涉图需用 (6) 式进行处理。

### 3 不同放大倍数下波前重建的数值模拟

为了说明 (6) 式所示算法的正确性和研究放大倍数对波前还原精度的影响 , 我们模拟了由图 3 所

示的较复杂波前产生的不同剪切放大倍数下被载频调制后的径向剪切干涉条纹图(图 5 中的 (a)~(d))。它们分别经过傅里叶变换、滤波、频谱移中再经过逆傅里叶变换并进行位相展开后得到如图 6 (a)~(d) 所示的位相差分布 , 即  $OPD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$  , 然后通过 (6) 分别对它们进行处理得到表 1 的结果 , 这里的放大倍数分别为  $16 \times, 9 \times, 4 \times$  和  $2 \times, \lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。

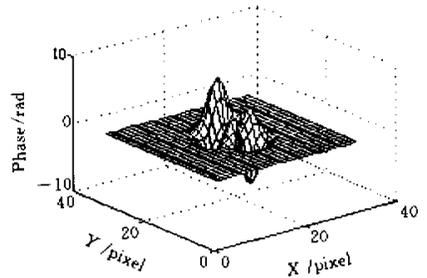


图 3 原始波前

Fig. 3 Primal wavefront (PV = 2.33 λ)

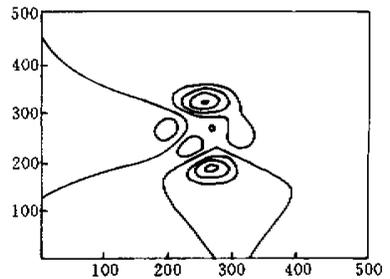


图 4 原始波前的等高线图

Fig. 4 Contour map of the Fig. 3

由于模拟的畸变波前变化比较剧烈 , 我们采用了较高的空间载频。图 5 中 (a)~(d) 的实际载频分别为 126 线 , 93 线 , 79 线和 73 线 , 图 5 仅是示意 , 但它与实际模拟的干涉图相差不大。若将图 6 (a)~(d) 分别与图 3 对比可以看出 , 它们与原始波前图 3 都不一样。即使对于  $16 \times$  这一很大的放大倍数 , 图 6 (a) 所示的位相差分布也仅是接近原始波前 , 这是由于扩大波前并未成为良好平面波的缘故。而 ICF 系统输出的波前完全有可能比图 3 更复杂且难以预测 , 所以 , 即使在很大的放大倍数下 , 认为得出的差值波前就是原始波前的做法也是不可靠的。而放大

倍数越小时,作为参考光的扩大波前此时本身就是一严重的畸变波前,这种近似就会产生更大的误差,将图 6(c)(d) PV 值分别为  $2.46\lambda$  和  $2.25\lambda$  分别与图 3 对比这一点就可看出。但是,当放大倍数由  $16\times$  依次减小到  $2\times$  后,尽管位相差分布与原始波前的差别在增大,由表 1 可以看出,它们经 (6) 处理

后都能还原出十分接近图 3 所示的原始波前(因不同倍数下的重建结果均与图 3 差别甚小未单独再作重建波前图)这说明 (6) 式是正确的,并且不同放大倍数的还原精度在同一数量级,它们间有差别但相差不很明显。

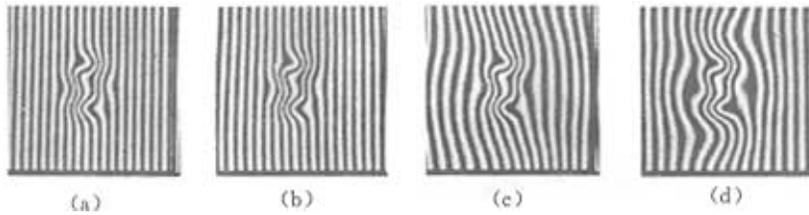


图 5 不同放大倍数下的空间载频调制干涉条纹图

Fig. 5 Interferogram based on spatial carrier frequency  
(a)  $16\times$ ; (b)  $9\times$ ; (c)  $4\times$ ; (d)  $2\times$

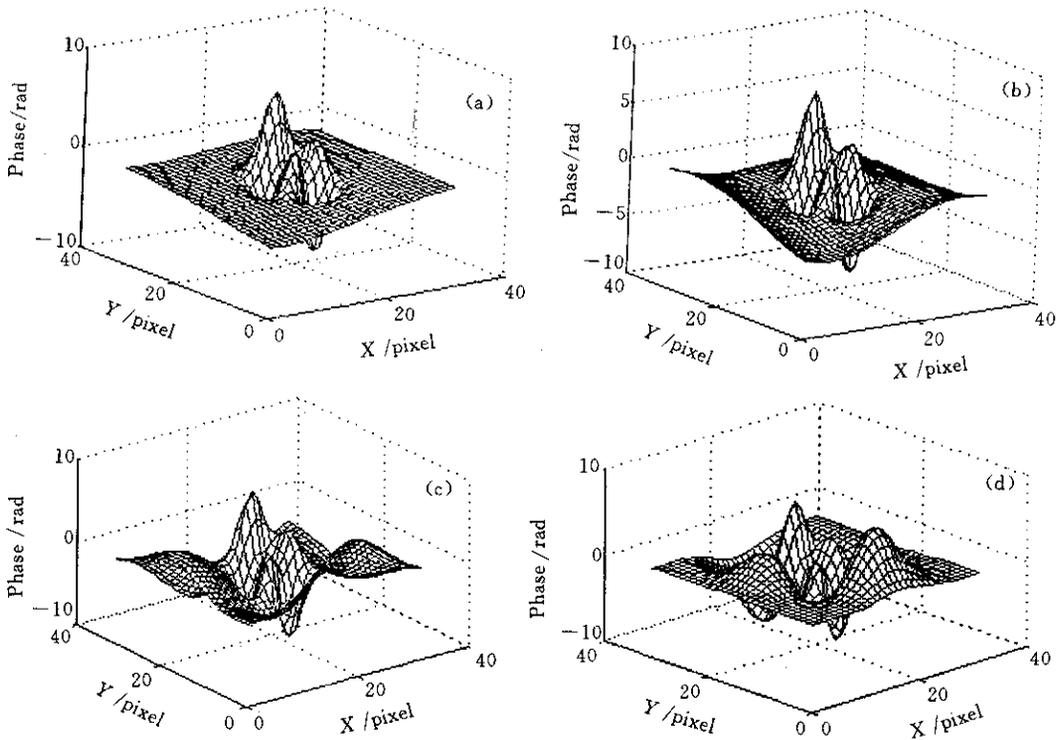


图 6 不同放大倍数时的位相差分布

Fig. 6 Phase difference of different amplification  
(a)  $16\times$ ; (b)  $9\times$ ; (c)  $4\times$ ; (d)  $2\times$

表 1 不同放大倍数下原始波前的重建精度

Table 1 Accuracy of the reconstructed wavefront with the different amplification ratio

Amplification	$16\times$	$9\times$	$4\times$	$2\times$
RMS	$\lambda/50$	$\lambda/35$	$\lambda/40$	$\lambda/20$

表 1 中的 RMS 值是位相差分布迭代过程中,在 (6) 式中左边的第二项忽略不计的条件下由下式求出的

$$RMS = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{512} \sum_{j=1}^{512} [W(i, j) - W'(i, j)]^2}{512 \times 512} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

(7)式中的  $W(i, j), W(i, j)$  分别表示同一位置处给定原始波前与重建原始波前的位相值。

还模拟计算了其他形式波前的还原情况, 结果与表 1 所示略有不同。这是由于采用傅里叶变换方法处理干涉条纹时波前重建精度受多种因素影响造成的, 表 1 中结果间的关系尚需进一步加以研究。但由不同放大倍数形成的干涉图都能还原出原始波前, 且呈现出倍数越高还原精度越高的趋势是肯定的。

### 4 不同放大倍数下的实验研究

根据图 1 布置了空间相位调制(略微旋转分束镜 BS 使参考波前倾斜实现)的循环式径向剪切干涉仪。先使组成望远系统的透镜  $L_1, L_2$  的焦距分别为 280 mm, -200 mm, 因此放大倍数近似为  $2 \times$ , 入射光是波长为  $0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光, 采用这种光源的原因在于它有稳定的输出, 实验中便于光路的调整和验证本文算法。然后以直径为 30 mm 的平行光束垂直投射在位置 P 处的一整体高度差为  $0.48 \mu\text{m}$  的台阶位相板上(折射率  $n = 1.52$ ), 它将使入射的理想平面波变成一有台阶结构的畸变波前, 然后用 CCD(512 × 512 像素)采集两波前相互重叠的干涉区域得到载频调制的畸变波前径向剪切干涉条纹图(如图 7 所示(全场细密的直条纹)), 其中的条纹错位因波前中的台阶结构而引起。由于无干涉条纹的背景对分析无贡献, 因此只需记录有条纹的重叠区域。载频为 76 线, 附在其上的小衍射环和弧形条纹分别是透镜上的尘埃和 CCD 传递函数的影响而造成的, 它们经滤波后可被消除, 对测量结果几乎没有影响。条纹反差不理想的原因在于实验上采用的分束镜的透反比不完全满足(3)式, 但这并不影响数据的处理。

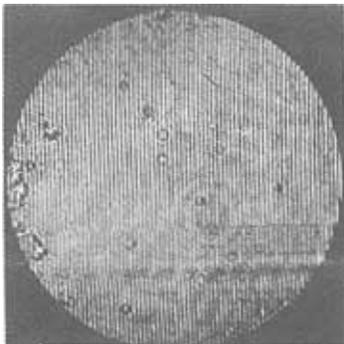


图 7 空间载频调制的径向剪切干涉条纹图  
Fig.7 Interferogram of spatial carrier frequency

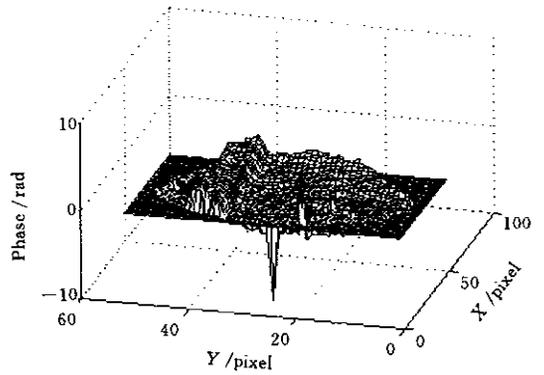


图 8 位相差分布

Fig.8 Distribution of phase difference

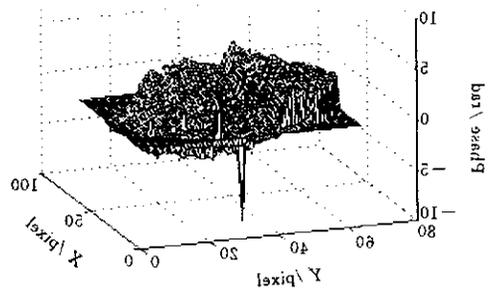


图 9 重建的真实台阶结构

Fig.9 Reconstructed actual ledge structure

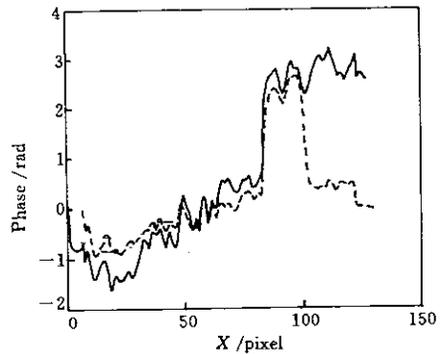


图 10 位相差分布(虚线)和重建的真实台阶结构截面(实线)图

Fig.10 Sections of the phase difference(dash lines) and the reconstructed actual ledge structure(real lines)

由图 7 可以看出台阶位相板的载频调制径向剪切干涉条纹图呈现出与一般双光束干涉仪不同的“几”字形, 该干涉条纹图通过 Takeda<sup>[6]</sup>提出的傅里叶变换处理方法得出如图 8 的位相差分布, 对该数据再用(6)式进行迭代运算得到台阶位相, 如图 9 所示(为清楚显示, 经 512 × 512 点像素图抽样画出; 图 10 同理, 二者抽样间隔不同)。根据给定的台阶位

相板折算成 He-Ne 光后它的位相变化应为 2.48 rad, 而从图 10 中的表示重建台阶截面的实线曲线(虚线曲线表示位相差截面)可以看出, 测试得到的台阶高度与实际高度基本吻合, 按(7)式得到其重建精度在  $\lambda/10$  左右。图中的微小起伏由基片的面形误差引起。条纹图的“几”字形是由于放大波前和缩小波前都是台阶位相分布, 但突变位置不再重合, 它们间的差值便呈现该形状的位相分布, 而且这种形状的宽度与光束中位相突变的位置和采用的放大倍数有关(从实验中也观察到了这一现象), 可以推测当这种突变若发生在 ICF 输出波前的中心区域, 扩大波前在很大的放大倍数下将仍不会变成一平面波, 因此采用放大倍数大的径向剪切干涉仪仍然需要用迭代算法求真实波前, 否则会得出错误的结论。

然后我们又将该台阶位相板在  $4 \times (f_1 = 280 \text{ mm}, f_2 = -140 \text{ mm})$  的径向剪切干涉仪上进行了测试, 根据(3)式分束镜的最合适透反比应为  $T/R = 0.2/0.8$ , 在此基础上得出的结果与放大倍数为  $2 \times$  的径向剪切干涉仪的情况基本一致。

## 5 结 论

本文提出了一种新的基于循环式径向剪切干涉仪的波前重建算法, 计算机模拟和 He-Ne 光实验都证实了该算法的正确性, 说明循环式径向剪切干涉仪不仅可用于本身有剧烈畸变波前输出的激光系统的在线检测, 而且结合本文提出的迭代算法完全可以理想地重建原始波前, 使这种干涉仪在复杂波前检测中的应用成为可能。通过采用适当的光束取样方式和适合于 ICF 系统波段的光学元件来组成该干涉仪原则上可实现对 ICF 强激光系统的输出畸变波前的检测, 由于与 He-Ne 激光波长不同, 条纹

的疏密会产生差异, 且待检波前的斜率、峰谷值范围将受调制载频大小, CCD 的分辨率等多种因素影响。另外实验和模拟计算波前的还原结果表明, 不同的放大倍数下都能还原出原始波前且还原精度在同一数量级, 这一结论对缓变波前同样适用。但是不同形式的波前结构会有不一样的还原精度, 而总体趋势是倍数越高还原精度也越高, 对于其他简单波前的还原精度, 数值模拟结果可达  $\lambda/100$ 。因此, 囿于实验条件的限制和测量精度要求不高或待检波前的结构相对简单的情况下, 循环式径向剪切干涉仪可采用小放大倍数的望远系统, 会对干涉仪的制作带来方便。

致谢 本研究在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的资助下完成。

## 参 考 文 献

- 1 D. Malacara. Optical Shop Testing [M]. New York/Chichester/Brisbane/Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1978
- 2 P. J. Wegner, M. A. Henesian, J. T. Salmon *et al.*. Wavefront and divergence of the beamlet prototype laser [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:1019~1030
- 3 A. R. Barnes, L. C. Smith. A combined phase, near and far field diagnostic for large aperture laser system [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:564~672
- 4 J. D. Briers. Interferometric testing of optical systems and components: a review [J]. *Opt. and Laser Technol.*, 1972, **4**(2):28~41
- 5 P. Hariharan, D. Sen. Radial shearing interferometer [J]. *J. Sci. Instr.*, 1961, **38**(11):428~432
- 6 Takeda Mitsuo, Hideki Ina, Seiji 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 Tsuguo Kohno, Daiji Matsumoto, Takanori Yazawa. Radial shearing interferometer for in-progress measurement of diamond turning [C]. *SPIE*, 1997, **3173**:280~285