

文章编号: 0258-7025(2010)03-0809-06

大口径连续相位板波前检测

柴立群¹ 于瀛洁² 石琦凯¹ 许 乔¹ 温圣林¹ 侯 晶¹

(¹ 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041; ² 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要 在高功率激光系统中,大口径连续相位板(CPP)元件是用来进行光束整形的关键衍射光学器件,由于其毫米量级的空间周期、大相位梯度的波前特征,大口径干涉仪无法满足检测需求。提出采用小口径高分辨率干涉仪结合子孔径拼接实现相位板元件透射/反射波前的检测,采用了误差均化的拼接方法,设计了针对圆形孔径的数据融合新算法,研制了子孔径拼接检测装置,实现了一块 330 mm×330 mm 的连续相位板元件透射波前的检测。实验结果表明,针对其毫米量级的周期,最大可检测到的波前梯度接近 3 μm/cm,检测重复性精度优于 6 nm[均方根(RMS)],波前数据模拟焦斑计算结果与高功率激光系统中的远场焦斑特性检测结果获得了较好的一致性。

关键词 测量;大相位梯度波前检测;子孔径拼接;连续相位板

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0809

Wavefront Testing of Large-Aperture Continuous Phase Plate

Chai Liqun¹ Yu Yingjie² Shi Qikai¹ Xu Qiao¹ Wen Shenglin¹ Hou Jing¹

¹ Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China

² School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Continuous phase plate(CPP) is critical diffractive optical element used for beam shaping in high-power laser system. But the large-aperture interferometer is unsuitable for testing it for its spatial period with several millimeters and the large phase gradient. A sub-aperture stitching method by small-aperture and high lateral-resolution interferometer is proposed to realize wavefront testing of CPP. A novel interpolation algorithm is developed for circular aperture and the equipment is set up. It tests a CPP with size of 330 mm×330 mm. The experimental result shows that the maximum testable slope of this CPP reaches 3 μm/cm with millimeter period, while the testing repeatability is 6 nm(root mean square). The simulated spot diagram result of far field based on tested wavefront is in good agreement with tested result in high-power laser system.

Key words measurement; wavefront with large phase gradient testing; sub-aperture stitching; continuous phase plate

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)系统中,聚焦光斑形态直接关系到系统的成败^[1]。连续相位板(CPP)元件具有能量利用率高、焦斑形态易于控制等优点,是一种新型的超精密衍射光学元件,放置在终端聚焦元件前后用来调制入射激光波前。美国 LLNL 实验室早在 2001 年就开展了 CPP 元件的研制工作,并迅速应用到 NIF 和 OMEGA 等大型固体激光装置中^[2]。CPP 具有复杂的连续变化的表面形貌,其空间周期及表面峰谷值设计极限值分别接近 1 mm 及

20 μm。在高精度定量加工过程中通常需要对其透射波前进行检测,大口径干涉仪受系统传递函数及采样定律的限制,以国内现有 24"干涉仪为例,所能检测到的波前相位梯度不超过 0.8 μm/cm,不能满足大口径 CPP 元件透射波前检测需要。美国 NIF 装置所使用的大口径 CPP 元件采用的磁流变抛光^[3](MRF)是一种高确定性的抛光技术,由于其去除函数可以用干涉仪精密地标定,因而在 CPP 元件的制造过程中无需进行波前检测。法国 LMJ 装置中使用的 CPP 元件采用化学湿法刻蚀技术制造^[4],

收稿日期: 2009-04-10; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804214)资助课题。

作者简介: 柴立群(1973—),女,硕士,副研究员,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: chailiqun@163.com

用拼接干涉仪进行透射波前检测,所采用的干涉仪口径为 $\phi 300$ mm,可检测的空间周期为数厘米,最大可检测的波前梯度小于 $1 \mu\text{m}/\text{cm}$ 。国内 ICF 系统自 2001 年起陆续开展了束匀滑及整形器件的理论设计工作^[5-9],但受限于制造及检测技术的缺项,直到 2008 年才开始首块大口径 CPP 的研制工作。所设计的背光照明的 CPP 元件,目的是得到菱形焦斑,起到光束整形作用,设计波前峰谷值为 $2.085 \mu\text{m}$,最大波前梯度为 $2.9 \mu\text{m}/\text{cm}$,最小空间周期为 15 mm。目前采用数控化学湿法刻蚀技术加工,因而本文研制了子孔径拼接系统以检测 CPP 波前。

2 波前检测系统

波前检测系统由小口径高分辨率干涉仪、自动化拼接控制分析软件、大口径元件平移支撑机构组成。

2.1 高分辨率干涉仪系统传递函数检测

由于 CPP 元件空间周期小,波前梯度大,而且拼接检测时间长、系统重心高,要求干涉仪不但要有较高的光学分辨率,还必须对系统振动、气流扰动等

Measurement parameters	
file:	0#-1 no remove tilt-cut
wavelength	660.00 nm
wedge	0.50
x/y size	984×1003
pixel size	162.03 nm
date	07:21:08
Analysis results	
Ra	0.39 λ
Rms	0.045 λ
20 Pt. PV	0.220 λ
2 Pt. PV	0.26 λ
Analysis parameters	
terms	tilt
masks:	analysis mask
fittering	none
data restore	no
valid points	274341

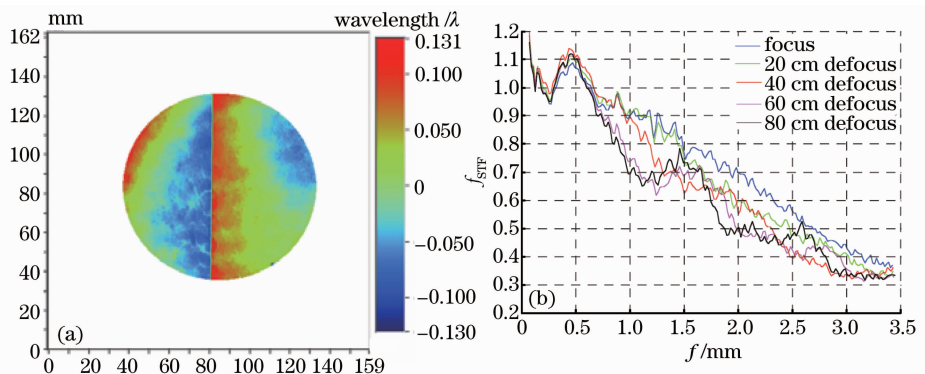


图 1 不同离焦状态下的实测系统传递函数。(a)台阶板透射波前图;(b)计算得到的 f_{STF}

Fig. 1 System transfer function of the interferometer at different defocus positions. (a) transmitted wavefront of step-height element; (b) computed f_{STF} of the system

由衍射效应分析可知,探测波前信息以正弦波形向前传输距离为一特定值 L (泰伯距离)时,正弦形变几乎消失,再过一段距离又重新出现,继续振荡传播。 L 与波前周期 p 之间的关系可表示为

$$L = \frac{2p^2}{\lambda}. \quad (2)$$

针对 CPP 元件,由于其空间周期小,为避免泰伯效应,测量光路中要求标准反射镜和 CCD 共轭,离焦量应小于所要求分辨的最大空间频率所对应泰伯距离的 $1/16$,如对空间周期为 1 mm 的波前检测,离焦量不得超过 189.4 mm,要求 CPP 元件与标

具有良好的抗干扰性。因而干涉仪选取了 4D 公司的动态干涉仪^[10] (FizCam 1500)以保证子孔径波前测试精度,测试波长为 660 nm,通光口径为 150 mm,采样间距为 0.165 mm,均方根 (RMS) 测试重复性优于 0.132 nm。

FizCam 1500 光学系统采用的是偏振光干涉体系,未使用破坏光学相干性的旋转散射板,保证了系统具有较高的光学分辨率。利用 $\phi 100$ mm,台阶高度为 127 nm 的台阶板对系统传递函数 (STF) 进行了测试,计算方法为

$$f_{\text{STF}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N P(n)_{\text{measured}}}{P_{\text{ideal}}}}, \quad (1)$$

式中 N 为水平或垂直方向的采样线数目, P_{measured} 为实测台阶板波前的功率谱密度 (PSD) 值, P_{ideal} 为理想台阶板的 PSD 值。

台阶板透射波前及相应的 f_{STF} 计算结果见图 1,由图可见,在一定的离焦距离范围内,干涉仪在 1 mm 处的 f_{STF} 优于 0.7 ,满足空间周期为 1 mm 的波前检测需要。

准反射镜之间的距离应小于 94.7 mm。

2.2 拼接算法

建立合适的拼接模型是实现拼接测量的关键。测量系统采用了误差均化的拼接方法^[11],要求所有拼接区中相位差值的平方和同时达到最小,即将全部重叠区匹配点的方程联立在一起求解,使计算误差由所有子孔径共同承担,从而减小误差,是目前一种比较好的平面拼接算法。

完成拼接计算后,重叠区元素如图 2(a) 所示, P_1 及 P_2 为两个相邻子孔径, P_3 为 P_1 与 P_2 的重叠区域, P_3 的数据可以取 P_1 区或 P_2 区拼接处理后的

数据,或二者的平均,但由于拼接误差的影响,在重叠区域边界处的数据往往会出现跳变问题。因而借鉴图像处理中图像融合技术的思想,提出了针对圆形孔径的数据融合新算法,计算重叠区的数据取值。该技术不仅可以用于圆形孔径的相互融合,而且也可以应用于其他不规则形状之间的融合。重叠区元素的权值分配示意图见图 2(b)。

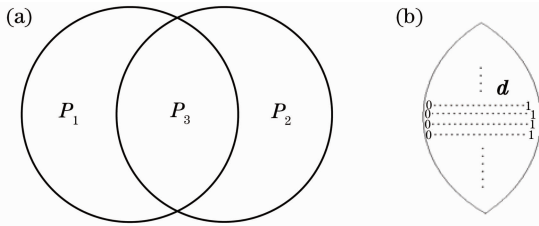


图 2 重叠区元素及权值示意图。(a)两个重叠的子孔径;(b)重叠区权值

Fig. 2 Schematic diagram of weight value of overlapping area. (a) two subapertures with overlapping; (b) weight in overlapping area

首先求出融合权值矩阵 \mathbf{d} , 按行循环, 得到 P_3 每行的像素个数, 对矩阵 \mathbf{d} 该行的每个元素依次从

左向右赋值为

$$\frac{i-1}{M-1}, i=1 \cdots M, \quad (3)$$

式中 M 为重叠区域某行的像素个数, i 表示权值矩阵 \mathbf{d} 中与重叠区域对应的第 i 个元素, 从而得到矩阵 \mathbf{d} 。 P_3 中每个元素对应的波前值 D_{P_3} 为

$$D_{P_3} = \mathbf{d} \times D_{P_2} + (1 - \mathbf{d}) \times D_{P_1}, \quad (4)$$

式中 D_{P_1}, D_{P_2} 为各子孔径在重叠区域中对应元素的波前值。

软件模拟结果如图 3 所示, 首先模拟产生了 4 幅 $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$ 大小的轮廓数据图(以灰度图表示), 幅值大小为 2, 相邻子孔径图之间的重叠区域为 200 pixel , 并在各子孔径数据上加入了适当的倾斜量。使用误差均化及数据融合算法将 4 幅子孔径数据拼接在一起, 经过模拟计算得出, 原模拟与拼接后的灰度图的误差在 10^{-16} 量级, 该误差远远小于模拟幅值的大小, 基本为计算机精度误差, 见图 3(c)。加入均方根误差为 0.02 的随机噪声后, 拼接结果与理想轮廓数据差值的均方根值为 0.017, 小于随机噪声误差, 基本为拼接误差及计算误差。

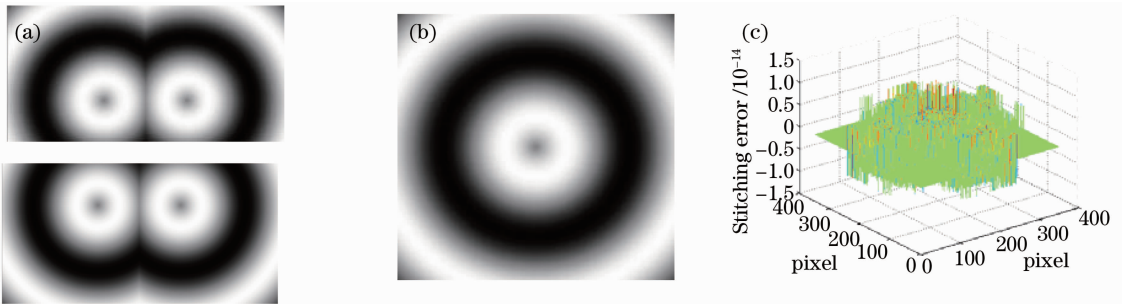


图 3 拼接算法模拟。(a)子孔径;(b)拼接结果;(c)拼接误差

Fig. 3 Simulation of stitching algorithm. (a) subapertures; (b) stitching result; (c) stitching error

2.3 大口径元件平移支撑台

由于待测参数为透射波前, 大口径元件的放置方向为垂直放置。为实现子孔径拼接功能, 元件平移支撑台必须能够实现水平及垂直方向精密平移, 且平移定位精度不大于数个采样间距。同时要求能够实现大口径元件的精密倾斜、俯仰调节。设计图如图 4 所示。

a) 在满足强度和稳定性的前提下, 尽量减轻重量, 机械结构的主体材料选用铝合金, 表面采用阳极氧化发黑处理;

b) 平移传动采用高精线性滑块导轨, 驱动采用高精滚珠丝杆实现, 行程为 400 mm 。设计了防丝杆松动和防轴窜结构, 有效地保证了重复定位精度和绝对定位精度优于 0.1 mm 。平移量由分度

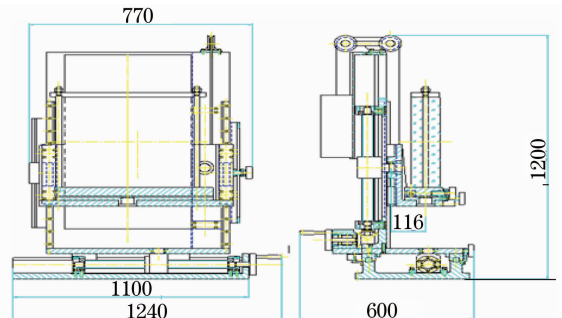


图 4 拼接支撑结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stitching mount

值为 0.001 mm 的光栅数显表读数;

c) 倾斜、俯仰调节的微动转台角度均为 1° ;

d) 元件升降平衡采用钢丝滑轮配重, 并配置零位和限位开关提高安全性。

2.4 测试精度考核

拼接检测装置如图 5 所示。

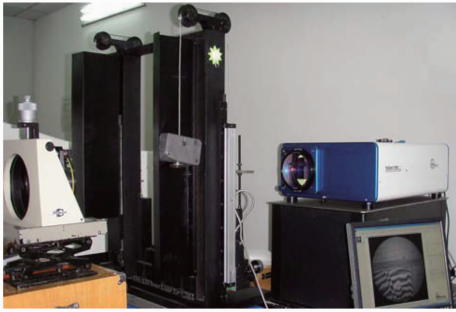


图 5 子孔径拼接检测系统

Fig. 5 Diagram of subaperture stitching system
为考核装置检测精度,采用对比实验法^[12],以

一块 330 mm×330 mm 透射光学平板作为比对板,比较拼接检测结果与 WYKO 24"干涉仪全场检测结果的差异,WYKO 24"干涉仪标称检测精度约为 63 nm(峰谷值),检测结果见图 6。

由于所测得的波前数据采样不一致,干涉仪系统的 f_{STF} 不一致,因而采用波前均方根值比对相对于波前峰谷值更为合理。由图 6 的测试结果可知,WYKO 干涉仪及拼接装置测得元件波前均方根值分别为 75.81 及 64.61 nm,均方根值差异仅为 11.2 nm。若干次不同平板元件的测试结果也表明了均方根差值典型值小于 10 nm,以峰谷值的理论比例为 5 计算,峰谷值的差异约为 50 nm。

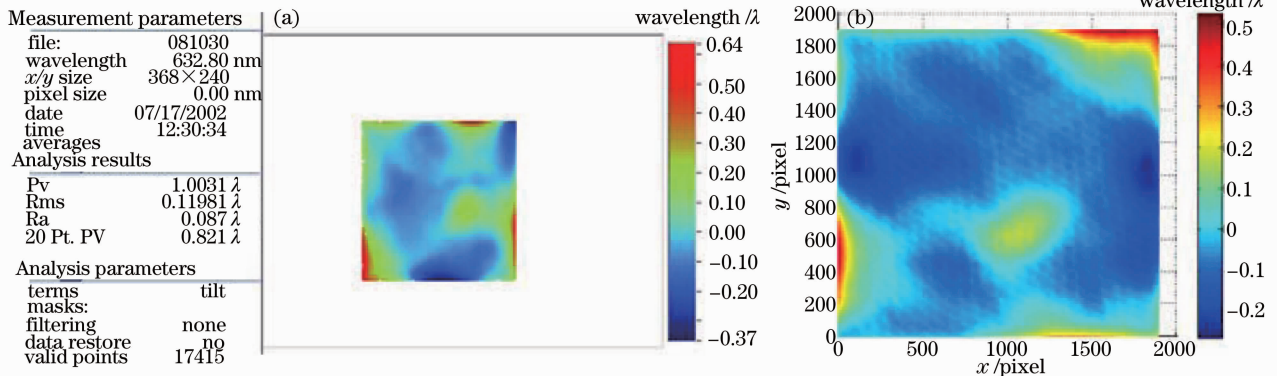


图 6 330 mm×330 mm 透射光学平板波前测试比对。(a)WYKO 24"干涉仪检测结果;(b)子孔径拼接检测结果

Fig. 6 Result of wavefront testing of 330 mm×330 mm flat by different equipments. (a)result of WYKO 24" interferometer; (b)result of sub-aperture stitching system

3 实验

3.1 CPP 波前检测实验

待测 CPP 元件尺寸为 330 mm×330 mm×10 mm,拼接路径采用图 7(a)所示的 4×4 的直线拼接,考虑到测量精度及测量时间的折中,横向与纵向平移量均设置为 100 mm(重叠因子约为 33%),16 个

子孔径波前图见图 7(b),拼接完成后的波前及对应波前梯度图分别见图 7(c),(d),波前峰谷值为 2.988 μm ,均方根值为 0.386 μm 。为避免畸变数据点的影响,波前梯度的计算方法采用五点法^[13],计算得到最大值为 3.109 $\mu\text{m}/\text{cm}$,均方根值为 0.402 $\mu\text{m}/\text{cm}$ 。

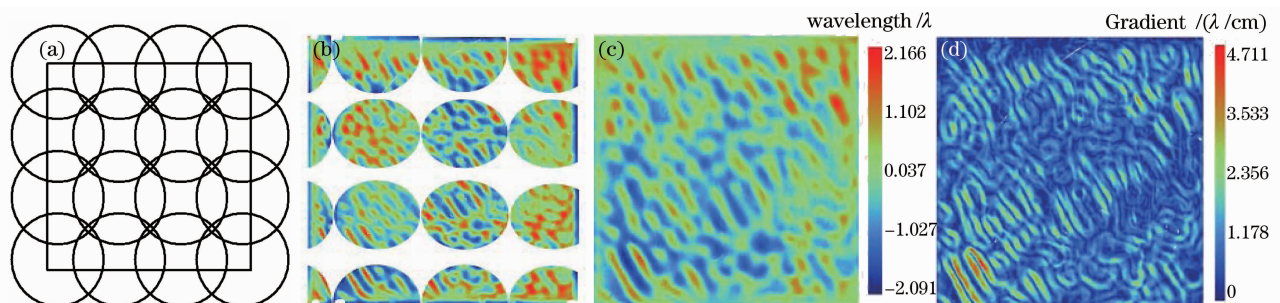


图 7 4×4 子孔径拼接检测。(a)子孔径布局图;(b)子孔径波前图;(c)有效通光口径内波前图;(d)(c)的波前梯度图

Fig. 7 Illustration of stitching interferometry showing a sixteen-aperture configuration. (a)arrangement for all measuring positions;(b)subaperture wavefront;(c) stitched wavefront in effective clear aperture(310 mm×310 mm); (d) slope of (c)

测试重复性检测结果见表 1,由表 1 计算得到: RMS 的重复性方差为 5.882 nm。

表 1 拼接重复性测试结果

Table 1 Repeatability of stitching testing

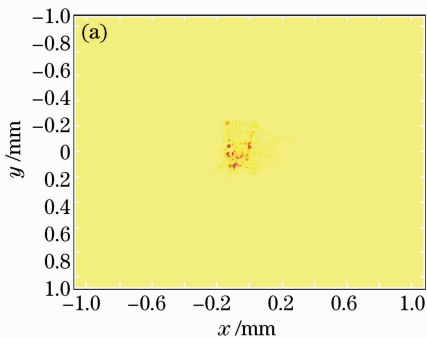
No.	RMS /nm
1	386.1
2	395.3
3	377.5
4	381.5
5	392.7
6	376.9
7	386.1
8	384.8
9	384.1
10	388.1

3.2 CPP 元件焦斑特性模拟

对图 7(c)所检测到的波前,根据菲涅耳衍射原理,输入光束经 CPP 元件,并经过聚焦透镜后,远场焦斑的光强分布^[14]为

$$I_0 = |\mathcal{F}[\sqrt{I_i} \exp(i\Phi_{\text{cpp}})]|^2, \quad (5)$$

式中输入光强 I_i 设为 12 阶超高斯分布, Φ_{cpp} 为 CPP 透射波前相位分布,计算结果见图 8。由图可以看



出,由于加工误差的影响,菱形焦斑的轮廓变得不够锐利,但焦斑的大小和形状基本保持一致, x 及 y 方向 $1/e$ 宽度分别为 0.347 和 0.282 mm,能量利用率为 79.6%。

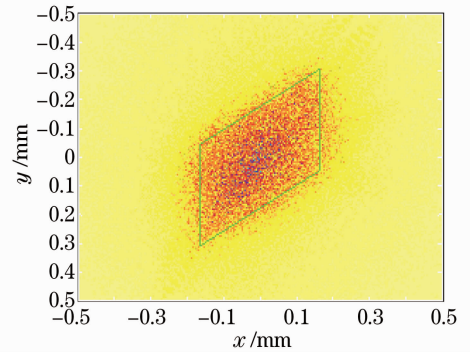


图 8 CPP 在理想输入光下的焦斑

Fig. 8 Focal spot of CPP with ideal input

在高功率激光装置中,在相同的条件下比较了引入 CPP 前后的焦斑形态,见图 9。由图可见,由于近场光束畸变的影响,引入 CPP 之前焦斑成不规则的形状,引入 CPP 之后焦斑具有设计的菱形轮廓,达到了整形效果,这说明引入 CPP 对焦斑轮廓整形的有效性。

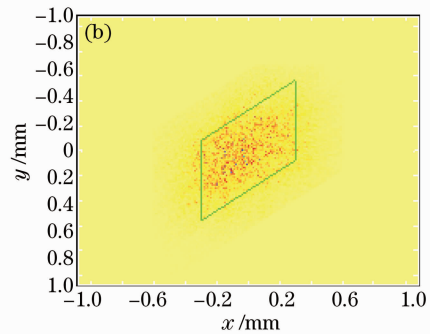


图 9 引入 CPP 前后三倍频光的远场焦斑。(a)无 CPP 元件;(b)有 CPP 元件

Fig. 9 Spot diagram of 3ω laser without and with CPP. (a)without CPP; (b)with CPP

4 结 论

针对大口径连续相位板元件小空间周期、大相位梯度的波前特征,提出采用小口径高分辨率干涉仪结合子孔径拼接技术实现透射波前检测。建立了台阶板相位比较法,测试了干涉仪的系统传递函数,提高了中频波前检测准确度。采用了误差均化的拼接算法,设计了针对圆形孔径的数据融合新算法,解决了子孔径重叠区数据跳变的问题。研制完成了检测装置,实验结果表明最大可检测到的波前梯度约为 $3 \mu\text{m}/\text{cm}$,RMS 检测重复性优于 6 nm,实现了一块 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$ 的连续相位板元件透射波前

的检测。该装置可应用于其他平板类元件的工程检测,特别适用于波前空间周期小、相位梯度大的光学元件检测。

参 考 文 献

- 1 J. Lindl. Development of the indirect-drive approach to internal confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(11): 3933~4024
- 2 J. Neauport, X. Ribeyre, J. Daurios *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser megajoule facilities[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2377~2382
- 3 J. A. Menapace, S. Dixit, F. Y. Genin *et al.*. Magnetorheological finishing for imprinting continuous phase structure onto optical surfaces[C]. *SPIE*, 2003, **5273**: 220~230

- 4 M. C. Rushford, J. A. Britten, S. N. Dixit *et al.*. Wet-etch figuring for precision optical contouring[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(28): 5706~5713
- 5 Chen Bo, Wang Hanzhi, Wei Hui *et al.*. Design of fully continuous phase plates for beam smoothing in ICF[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 480~484
陈波, 王菡子, 韦辉等. 用于惯性约束聚变束匀滑的完全连续相位板设计方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 480~484
- 6 Yang Chunlin, Xu Qiao, Wen Shenglin. Phase plates for beam smoothing based on the random input[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 382~386
杨春林, 许乔, 温圣林. 基于随机输入的束匀滑相位板研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 382~386
- 7 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Autocorrelation coefficient and performance parameter of diffractive optical element for beam smoothing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 200~203
谭峭峰, 严瑛白, 金国藩. 衍射光学束匀滑器件的自相关系数与性能参数[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 200~203
- 8 Zhang Wei, Shu Fangjie, Zhang Xiaobo *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive optical elements in uniform illumination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1388~1392
张巍, 舒方杰, 张晓波等. 均匀照明用衍射光学器件的空间频域优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 9 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Optimization of diffractive optical element used with smoothing by spectral dispersion technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 781~785
谭峭峰, 严瑛白, 金国藩. 与光谱色散匀滑技术联用的衍射光学器件的优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 781~785
- 10 B. T. Kimbrough. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4554~4562
- 11 M. Otsubo, K. Okada, J. Tsujiuchi. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(2): 608~613
- 12 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 883~888
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 883~888
- 13 Chai Liqun, Xu Qiao, Shi Qikai. Study of numerical computation of wavefront gradient of optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 841~844
柴立群, 许乔, 石琦凯. 光学元件波前梯度的数值计算方法[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 841~844
- 14 Zhang Wei. Design and applications of large aperture diffractive optical elements in "Shenguang" device[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. 15~17
张巍. "神光"装置大尺寸衍射光学元件设计及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007. 15~17