

文章编号 1004-924X(2009)11-2750-07

混凝土结构裂缝宽度波前编码测量系统的设计

蔡怀宇, 王金玉, 方超, 黄战华, 张尹馨

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了克服基于传统光学成像技术设计的手持式混凝土裂缝宽度测量系统焦深小、准确调焦困难, 以及由于存在像差和混凝土表面凹凸过大致使视场内图像无法完全清晰等缺陷, 采用波前编码技术重新进行缝宽检测系统的设计, 以便有效地拓展景深(焦深)。讨论了波前编码立方型相位板规一化参数及其与实际系统相位板设计参数之间的关系, 利用 CODE V 光学设计软件完成了手持式裂缝宽度波前编码测量系统的设计, 加工制作了立方型相位板并进行了初步实验。实验表明, 采用基于单透镜的波前编码系统设计, 在满足分辨率为 $50 \mu\text{m}$, F 数为 6 的前提下, 可将景深拓展为 15 mm, 达到传统光学系统相同 F 数时景深理论值的 4.5 倍。该系统能够满足混凝土结构裂缝宽度测量中扩大景深和成像的基本要求。

关键词: 混凝土结构; 裂缝宽度; 景深; 波前编码; 立方型相位板

中图分类号: TP212.14; TU502.3 **文献标识码:** A

Design of wavefront coding system for measuring crack width in concrete structure

CAI Huai-yu, WANG Jin-yu, FANG Chao, HUANG Zhan-hua, ZHANG Yin-xin

(*Key Laboratory of Opto-electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: In order to remedy some defects in a traditional handy system for measuring the crack width in a concrete structure, such as the difficulty inaccuracy focusing and the blur image due to the small focus depth and aberrations, a new system based on a wave-front coding was designed to extend the focus depth. The normalized parameters of a cubic phase plate and the relationship between these parameters and their corresponding real design parameters were discussed. Then a handy measurement system based on the wavefront coding with CODE V was designed. Finally, the cubic phase plate was fabricated and a preliminary experiment was carried out. Experimental results indicate that the field depth of the wavefront coding system based on a single lens can be extended to 15 mm when the resolving power is $50 \mu\text{m}$ and the F number is 6, which is 4.5 times as deep as that of traditional optical systems in theory at the same F number. The system can satisfy the requirements of extending focus

收稿日期: 2008-10-14; 修订日期: 2008-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60677033); 天津市社会发展基金资助项目(No. 033112511)

depth and imaging in measuring the crack width of a concrete structure.

Key words: concrete structure; crack width; field depth; wavefront coding; cubic phase plate

1 引言

由于混凝土的组成材料、结构体系、受力状态和外界环境等诸多因素的影响,混凝土产生结构裂缝的原因十分复杂^[1]。测量裂缝的宽度、区分裂缝的性质对监测建筑结构的健康状态、避免混凝土结构损坏性缺陷、执行国家颁布的《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)要求、调解购房消费者的纷争都具有十分重要的意义^[2]。

目前大多数建筑设计、施工和监理部门所使用的裂缝宽度测量方法还比较落后,主要有目测法、检验规比对法和读数放大镜法。为克服靠人工读取和手动记录数据使测量结果人为影响因素较大,缺乏客观性和权威性,且效率低、劳动强度大等问题,作者曾与天津市建筑科学研究院联合立项开展测量系统的研究,设计研制了基于传统光学成像的混凝土结构裂缝宽度自动测量系统^[3]。但在装调和使用中发现,由于该系统的焦深小,通过机械调整实现准确调焦比较困难,且在对应小景深内,由于光学系统存在像差和混凝土表面凹凸过大等原因致使视场内图像无法完全清晰。

本文采用波前编码技术重新设计了手持式裂缝宽度测量系统,利用波前编码能够在不降低系统分辨率和入射光能量的情况下扩大非相干光学成像系统焦深(景深)的优点^[4-5],克服上述缺陷以达到设计要求。在讨论了波前编码立方型相位板归一化参数及其与实际系统中相位板设计参数之间关系的基础上,采用 CODE V 光学设计软件,完成了手持式裂缝宽度波前编码测量系统的设计,加工制作了立方型相位板并进行了初步实验,为研制基于波前编码的混凝土结构裂缝宽度测量系统奠定基础。

2 波前编码缝宽测量系统设计

2.1 裂缝宽度的基本测量方法

该测量方法首先通过光学系统将被检测的混

凝土裂缝表面成像在图像传感器探测面,以图像传感器像素大小为标尺测得裂缝像的宽度,再根据已知光学系统的垂轴放大率,求得裂缝实际宽度。当成像系统焦深(景深)较大时,还需要在整体系统安装调试后(即共轭距确定后),通过定标得到系统的实际垂轴放大率,以保证测量的准确性。

2.2 测量系统的设计要求和总体结构

测量系统的主要设计参数为:测量范围不小于 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,裂缝宽度最小测量值达到 $50\text{ }\mu\text{m}$,适合现场手持使用,操作简单。

裂缝宽度测量系统总体结构如图 1 所示,包括光学成像、图像采集与处理和测量结果显示与交互接口 3 个部分,现场工作时采用电池供电。本文重点讨论光学成像部分的设计。

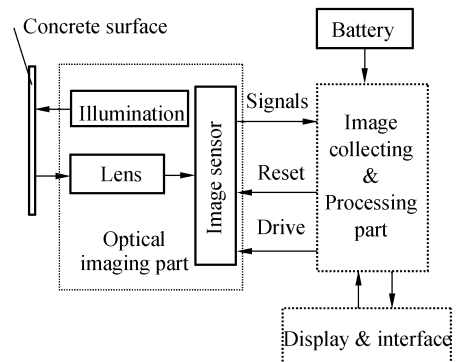


图 1 裂缝宽度测量系统总体结构

Fig. 1 Scheme of concrete crack width measurement system

2.3 基于波前编码技术的成像系统设计

2.3.1 系统光学结构参数设计

参照一般手持式仪器外形尺寸,初步设定物像共轭距为 130 mm 左右。选用 CCD 图像传感器作为图像接收器件,其参数为:等效像素大小为 $8\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$,分辨率为 $1\ 300 \times 1\ 024$,像面大小为 $1.7\text{ cm}(2/3\text{ in})(10.2\text{ mm} \times 8.1\text{ mm})$ 。

(1)在满足最小裂缝宽度测量值 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的前提下,垂轴放大率:

$$\beta = y'/y = l'/l = -8/50 = -0.16$$

(2) 选用 $f' = 15$ mm 焦距时, 由几何光学公式^[6] $\begin{cases} \beta = l'/l \\ 1/l' - 1/l = 1/f' \end{cases}$, 代入参数 $f' = 15$ mm 和 $\beta = -0.16$, 解得: $\begin{cases} l = -108.75 \text{ mm} \\ l' = 17.4 \text{ mm} \end{cases}$,

此时共轭距 $L = l' + (-l) = 126.15$ mm, 满足设计要求。

(3) 根据传感器像面大小, 推算出能够检测到的物面范围:

$\frac{10.2}{0.16} \text{ mm} \times \frac{8.1}{0.16} \text{ mm} \approx 63.75 \text{ mm} \times 50.625 \text{ mm}$, 大于设计要求的物面范围。

(4) 根据检测物面大小要求, 可计算出最小的物方视场角:

$$\omega = \arctan(y/l) = \arctan(12.5\sqrt{2}/108.75) = 9.23^\circ.$$

(5) 成像透镜的 F 数由系统的分辨率要求和照明情况共同确定。由于图像传感器分辨率为 $N_{\text{CCD}} = 1/(2 \times 8 \times 10^{-3}) = 62.5$ lp/mm, 是较低的, 故成像透镜 F 数主要与照明有关。

采用白光 LED 照明方式, 将 4 个毛面 LED 均匀分布在一个圆周上, 并安装在一体化手持式裂缝系统物镜之前, 由于亮度和均匀性要求, 需要考虑适当增大透镜的相对孔径。经初步实验, F 数应小于或等于 6。

(6) 光学系统的焦深和景深

当 $F = 6$ 时, 由焦深公式: $\delta L' = \pm 2\lambda F^2$ 得到 $\delta L' = \pm 2 \times 587.56 \times 6^2 = \pm 42.3 \mu\text{m}$ (设中心波长 $\lambda = 587.56$ nm)。对应景深 $\delta L = \delta L'/\alpha = \delta L'/\beta^2 = \pm 42.3/0.16^2 = \pm 1.65$ mm。若相对孔径进一步增大, 则焦深(景深)会进一步减小, 通过机械调整实现准确调焦十分困难, 且在对应小景深内, 由于光学系统存在像差或混凝土表面凹凸过大, 会造成视场内部分图像不清晰。

2.3.2 波前编码成像系统的设计

波前编码技术将光学成像系统设计和现代数字图像处理技术相结合^[4], 通过传统成像系统的孔径光阑处加入特殊设计的立方型相位板对被摄物体编码, 使得系统的点扩散函数(PSF)和光学传递函数(OTF)在较大的焦深范围内对离焦不敏感, 这样就可以在较大焦深范围内获得相互差异极小的模糊中间像, 然后再用统一的图像恢

复算法对所得中间图像进行解码, 恢复出清晰图像, 从而达到扩大焦深(景深)的目的。

2.3.2.1 立方型相位板的设计

立方型相位板的设计是建立波前编码系统的关键, 其参数设定以追求成像系统的离焦不变为目标, 同时兼顾系统振幅传递函数(MTF)的取值。立方型相位板的一面为平面, 另一面是符合立方型函数分布的非对称面, 如图 2 所示。

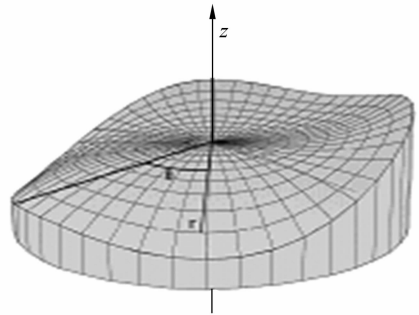


图 2 立方型相位板示意图

Fig. 2 Cubic phase plate

(1) 立方型相位板归一化参数的讨论

在已有文献报道中立方型相位板均用归一化方式表征^[5,7], 即:

$$P(x, y) = \exp[j\alpha(x^3 + y^3)], x^2 + y^2 \leq 1, \quad (1)$$

式中 (x, y) 为相位板横向坐标, $\alpha = 2\pi\xi/\lambda = k\xi$ 为归一化相位板系数, λ 为入射光波长, ξ 为归一化相位板的最大光程差。 α (或 ξ) 值越大, 相位板的面型变化越大, 即峰峰值(PV 值)越大。目前已有文献报道对于不同的应用系统, 所选取的相位板系数 α 值不同, 但没有明确的分析选择依据。

根据一维情况下加入三次相位板后系统的近似光学传递函数公式^[8]:

$$H(u, W_{20}) \approx \left(\frac{\pi}{12|\alpha u|}\right)^{1/2} \exp(j\frac{\alpha u^3}{4}) \exp(-j\frac{4\pi^2 W_{20}^2 u}{3\alpha\lambda^2}) \quad (2)$$

$u \neq 0, H(0, W_{20}) = 1,$

式中 W_{20} 代表离焦量, $u = f_x/f_{\text{max}}$ 为归一化空间频率, 其中 f_{max} 为系统的截止频率。分析表明, 相位板系数 α 的增大, 可以有效地抑制离焦量 W_{20} 的影响, 使点扩散函数在一定的离焦范围内趋于一致, 得到比较大的焦深扩展空间; 但同时 α 的增大会造成 MTF 的明显降低, 使信噪比降低。

为进一步讨论系数 α 的有效取值范围, 以波

前编码系统在不同离焦量时的 MTF 曲线一致性作为评价标准,构造了评价函数:

$$S = \frac{1}{N^2} \sum (M_i - M_o)^2, \quad (3)$$

式中 M_i 表示离焦情况下的 MTF 值, M_o 表示未离焦情况下的 MTF 值, N 代表取样点数。不考虑噪声的影响,利用自相关方法求 MTF 值^[9],并计算 S 在不同离焦量情况下与系数 α 的关系,可以看出:当 α 取值相同时,随着离焦量增大,均方差 S 的值也增大,即离焦量越大,系统的离焦不变性越差;在相同的离焦量下并不是系数 α 越大,离焦不变性越好,当 $\alpha < 60\pi$ 再继续减小或 $\alpha > 90\pi$ 再继续增大时,均方差会迅速增大,只有当 α 在区间 $[60\pi, 80\pi]$ 时,均方差数值较小且基本不变,也即在这个范围内 MTF 的一致性较好。此外考虑系数 α 对 MTF 值的影响程度和系统空间带宽积,可确定规一化系数的下限, $\alpha \gg 20$ 。综合系统信噪比、图像恢复能力和扩大焦深能力,得到 α 取值的大致有效区间为 $[20\pi, 80\pi]$ ^[10]。

(2) 立方型相位板的表征与参数讨论

在 CODE V 软件中,采用多项式方法 (XY Polynomial) 表征立方型,参数有两个:一个是对应多项式 x^3 和 y^3 项的系数,一般选相同值,另一个是规化半径 (Normalizing Radius),单位均为 mm。立方相位板的 PV 值与项系数 β 成正比,与规化半径 R_m 的 3 次方成反比。

CODE V 中所表示的实际相位板可用下式求得等效规一化系数:

$$\alpha = 2\pi\xi/\lambda = 2\pi/\lambda \times (n\beta) \times (R/R_m)^3, \quad (4)$$

式中 n 为相位板材料的折射率, R 为相位板在成像系统中的实际通光口径。可把式(4)中的参数分为两类讨论,一类是制作参数 n 、 β 和 R_m ,它们可确定元件的材料和形状;另一类为使用参数 R ,它与系统的相对孔径、立方型面的朝向和轴向安装位置等使用因素有关。当面型的制作参数一定时,系统的相对孔径越小,立方型面朝向光瞳或相位板轴向安装位置越靠近系统光瞳, R 值就越小,引入系统的相位板规一化系数也会越小。因此将相同制作参数的相位板应用于不同系统中,所起到的实际编码作用有所不同。

依据立方型相位板中心厚度的不同,可以将

其看成是一块薄立方型相位板和一块不同厚度平行平板的组合(参照图 2),根据几何光学原理可知:平行平板只有在近轴区成像是完善的,在孔径和视场较大时会引入像差,因此这种影响越小越好,也即立方型相位板的中心厚度不应太厚。但最小厚度往往受到材料变形和加工手段的限制。

2.3.2.2 波前编码成像系统的设计

波前编码技术能够有效扩展焦深(景深),同时还可以通过减少系统光学面的方法降低系统成本^[11]、抑制除离焦外的其他像差^[12]。为了更充分地发挥波前编码技术的优势,本文根据上述光学系统结构参数,采用单透镜加立方型相位板的系统组合方式来实现裂缝宽度测量的基本要求。

(1) 选用市售焦距 $f' = 15$ mm 的双凸透镜,两个曲率半径分别为 15 mm 和 -15 mm,材料为 K9,实测厚度值为 2.793 5 mm。按设计参数 $F = 6$, $\beta = -0.16$,物面大小半物高 17 mm(考虑物面对角线)要求进行 CODE V 模拟。

(2) 设透镜第一面为孔径光阑,相位板置于其前,立方型面朝向光阑,选用 PMMA 为相位板材料,不断优化面型参数,在得到较好的 β 和 R_m 参数后,与“天津市微纳加工中心”协商制作,确定了相位板最小中心厚度,对原有设计进行了修正,得到系统的光学结构如图 3 所示,系统的光学参数如图 4 所示,系统的 MTF 曲线和点列图分别如图 5 和图 6 所示。

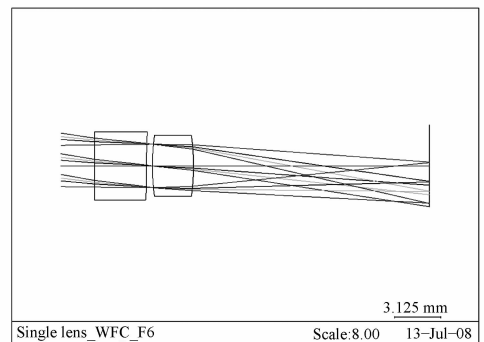


图 3 系统结构

Fig. 3 System structure

(3) 系统性能评价和改进

由图 4 数据可知:此时系统的垂轴放大率(-0.1604)和像面直径均满足设计要求,计算得到规一化系数 α 近似为 80π 。

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object	Sphere	Infinity	103.0000		Refract	
1	Sphere	Infinity	3.5400	491300.576	Refract	1.8470
2	XY Polynomi	Infinity	0.4000		Refract	1.4982
Stop	Sphere	15.0000	2.7935	K9_CHINA	Refract	1.4490
4	Sphere	-15.0000	15.9700		Refract	1.6349
Image	Sphere	Infinity	0.0740		Refract	2.7269
End Of Data						

图 4 系统光学参数表

Fig. 4 System parameters

图 5、图 6 表明:加入立方相位板后,系统总体 MTF 虽然不高,但满足基本成像阈值要求(0.1左右),同时能够在离焦的较大范围内(± 0.5 mm)保持 MTF 曲线平缓,点列图变化不大,即具有很好的离焦不变性,为选择相同的滤波函数恢复图像提供了可能。此时设计对应景深可达 ± 19.5 mm。

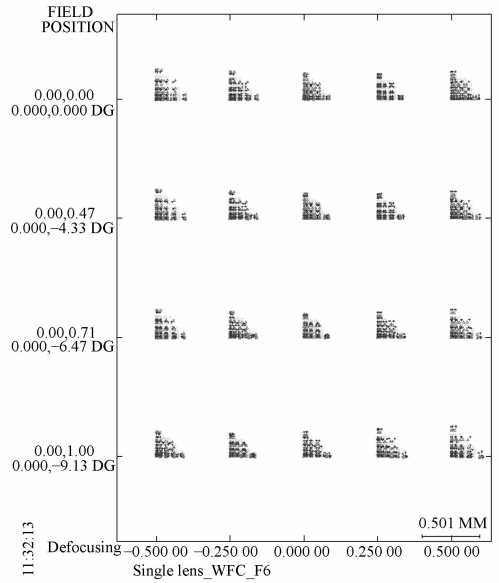
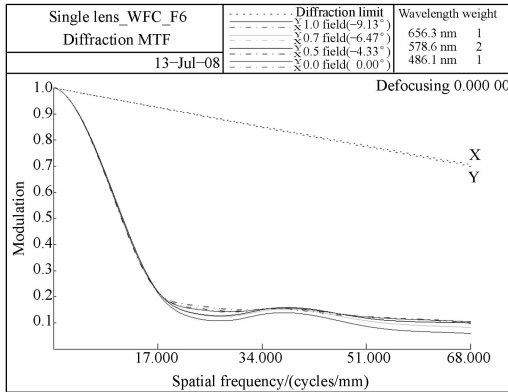


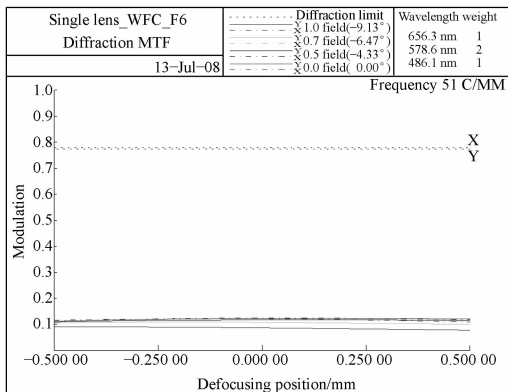
图 6 点列图(焦面附近 0.5 mm, 51 lp/mm)

Fig. 6 Spot diagram(Defocusing 0.5 mm, 51 lp/mm)



(a) 焦面上

(a) Focusing



(b) 焦面附近(0.5 mm, 51 lp/mm)

(b) Defocusing(0.5 mm, 51 lp/mm)

图 5 WFC 系统的光学传递函数

Fig. 5 MTFs of WFC system

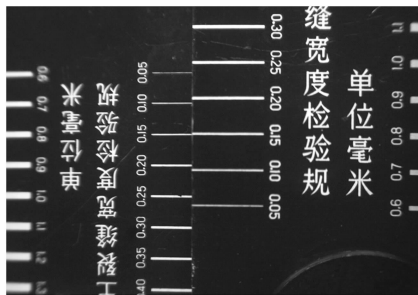
设计过程中发现系统相对孔径对波前编码性能影响很大,若将本系统中的 F 数增大到 8 时,MTF 值能够明显提高,一致性也明显增强;但设 $F \leq 5$ 时,无论怎样优化相位板参数,系统的编码性能也无法达到要求,这就需要选择更好的光学初始结构进行波前编码系统的设计。

3 实验结果与分析

按照上述设计搭建实验系统,选用两个混凝土检验规作为被摄对象,一个检验规置于清晰调焦位置,另一个与其相距 15 mm,实验结果如图 7 所示。由于存在离焦,未加相位板时,图(a)中左半部分图像明显不清晰,特别是靠近视场边缘处;加入立方型相位板后,整个图像(图(b))都变得模糊了,但其模糊程度几乎相同;采用盲解卷积处理后的恢复图像(图(c))基本清晰,未受离焦因素的影响,50 μ m 线条可分辨。

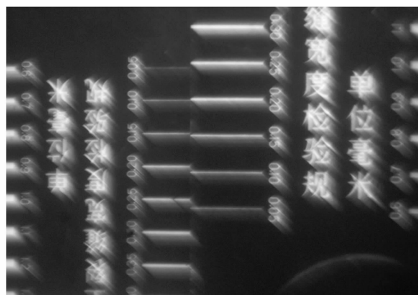
虽然恢复图像基本能够满足设计要求,但其效果还不够理想,主要原因是系统为搭建完成的,其条件无法完全再现设计结果;图像恢复仅采用了最简单的盲解卷积算法;MTF 值比较低,系统信噪比低等。今后须完成机械结构,实际测试

PSF,研究更有效的图像恢复算法,以提高系统的实用性。



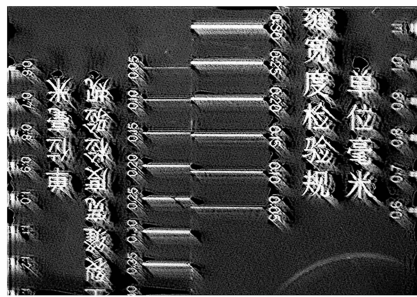
(a)未加相位板

(a) without phase plate



(b)加入相位板

(b) with phase plate



(c)恢复图像

(c) reconstructed image

图 7 实验结果

Fig. 7 Experiment results

4 结 论

在讨论了波前编码相位板规一化参数与实际系统中相位板设计参数之间关系的基础上,采用 CODE V 光学设计软件,完成了手持式裂缝宽度波前编码测量系统的设计,加工制作了立方型相位板并进行了初步实验。研究表明,采用基于单透镜的波前编码系统设计,在满足分辨率为 $50\ \mu\text{m}$ 、 F 数为 6 的前提下,可将景深拓展为 15 mm,达到传统光学系统相同 F 数时景深理论值的 4.5 倍。该系统设计能够满足混凝土结构裂缝宽度测量中扩大景深和成像的基本要求。

参考文献:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
WANG T M. *Control of Cracking in Engineering Structure* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,1997. (in Chinese)
- [2] 潘立. 关于混凝土结构裂缝问题的思考[J]. 工业建筑,2000,30(5):62-65.
PAN L. Consideration about the crack problems of concrete structure [J]. *Industrial Construction*. 2000,30(5):62-65. (in Chinese)
- [3] 蔡怀宇,于文铮,黄战华,等. 混凝土结构裂缝宽度测量系统的研究[J]. 光电工程,2006,33(4):128-131.
CAI H Y, YU W ZH, HUANG ZH H, *et al.*. Measuring system for crack width in concrete struc-

- ture [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33 (4):128-131. (in Chinese)
- [4] DOWSKI E R, JOHNSON G E. Wavefront Coding: a modern method of achieving high performance and/or low cost imaging systems [J]. *SPIE*, 1999,3779:137-145.
- [5] DOWSKI E R, CATHEY W T, Extended depth of field through wavefront coding [J]. *Applied Optics*, 1995,34(11):1859-1866.
- [6] 郝道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,1999:16-26,39-40.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing:China Machine Press,1999:16-26,39-40 (in Chinese)
- [7] 杨皓明,张新,方志良,等. 含三次位相元件照相物镜的设计[J]. 光学精密工程,2007,15(7):1026-1031.
YANG H M, ZHANG X, FANG ZH L, *et al.*.

Design of a photographic objective using cubic phase plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1026-1031. (in Chinese)

- [8] 惠彬, 刘新平, 汶德胜, 等. 扩大光学系统焦深范围的光学成像新技术研究[J]. *光子学报*, 2001, 30(5):594-599.

H B, LIU X P, WEN D SH, *et al.*. A new technology of large depth of focus of incoherent optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 594-599 (in Chinese)

- [9] 庄松林, 钱振邦. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981:238-258.

ZHUANG S L, QIAN ZH B. *Optical Transfer Function* [M]. Beijing: China Machine Press, 1981;

238-258. (in Chinese)

- [10] 吁乐峰. 波前编码系统中奇对称型相位板的研究 [D]. 天津: 天津大学硕士论文, 2008:21-27.

XU L F. *Study on odd-symmetrical phase plate in wavefront coding imaging system* [D]. Tianjin: Tianjin University Dissertation. 2008:21-27. (in Chinese)

- [11] KUBALA K, DOWSKI E, CATHEY W T. Reducing complexity in computational imaging system [J]. *Optical Express*, 2003, 11(8): 2102-2108.

- [12] DOWSKI E R, CATHEY W T, BRADBUM S C. Aberration invariant optical/digital incoherent systems [J]. *Optical Review*, 1996, 3(6A):429-432.

作者简介:



蔡怀宇(1965—), 女, 湖南涟源人, 博士, 副教授, 1988年, 1991年和2000年分别在天津大学获得学士、硕士和博士学位, 主要从事信息光学、光电技术及仪器 and 图像处理等方面的教学和科研工作。E-mail: hycail@tju.edu.cn



王金玉(1980—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 2004年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事信息光学、光学成像方面的研究。E-mail: yugi0501@163.com



方超(1985—), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 2007年于天津大学获得学士学位, 主要从事信息光学和光学成像方面的研究。E-mail: fangchaofc@gmail.com



黄战华(1965—), 男, 湖北孝感人, 博士, 教授, 博士生导师, 1986年于华中科技大学获学士学位, 1989年和1992年在天津大学分别获得硕士和博士学位, 主要从事光电信息技术、图像传感及其应用等方面的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn



张尹馨(1978—), 女, 湖南人, 博士研究生, 讲师, 2001年、2004年于天津大学分别获得学士和硕士学位, 主要从事信息光学以及光谱图像超分辨的研究。E-mail: yinxin@tju.edu.cn