

利用泽尼克位相型光瞳滤波器实现景深延拓及超分辨

刘 江^{1,2} 苗二龙¹ 王学亮¹ 隋永新¹ 杨怀江¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了对显微光学系统实现景深延拓和超分辨,设计了一种基于泽尼克多项式的位相型光瞳滤波器,并分析了其对光学系统在焦点附近光强分布的改善。结果表明,与传统显微光学系统相比,加入泽尼克位相型光瞳滤波器后,系统景深延拓了4.15倍,分辨率提升了1.3倍。同时,与其他两种形式的光瞳滤波器进行了比较,进一步说明了泽尼克位相型光瞳滤波器的优势。设计的泽尼克位相型光瞳滤波器在疵病的显微检测中具有一定的实际意义和应用价值。

关键词 成像系统;光瞳滤波器;景深延拓;超分辨;泽尼克多项式

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1211002

Depth of Field Extending and Super-Resolving with Phase Pupil Filter of Zernike Polynomials

Liu Jiang^{1,2} Miao Erlong¹ Wang Xueliang¹ Sui Yongxin¹ Yang Huaijiang¹

¹Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to extend the depth of field and enhance the resolution of microscopy system, a phase pupil filter with Zernike polynomials is proposed. Through analysis of intensity distribution near the focus point, its improvement for optical imaging system is demonstrated. Results show that depth of field is extended 4.15 times as well as resolution is increased 1.3 times. In addition, the performance of Zernike phase pupil is compared with the other phase pupil filters manifesting its advantages. This new type phase pupil with Zernike polynomials has practicability and applied value in flaw detection with microscopy.

Key words imaging systems; phase pupil filter; depth of field extending; super-resolving; Zernike polynomials

OCIS codes 110.1220; 050.5080; 260.1960

1 引 言

显微扫描检测是目前光刻投影物镜的表面疵病主要检测手段^[1-2],通过使用机械结构控制的显微成像系统沿着待测表面轮廓进行扫描,同时配合相应的图像处理程序,实时分辨疵病和记录疵病位置。但是,投影物镜中光学表面口径不一(70~300 mm),存在多个非平面面形^[3-6],在检测过程中,由于机械结构的运动精度的限制,显微成像系统的景深与分辨率的互相制约,其检测效率和准确性都会受到影响。

光瞳滤波器是一种可以同时实现景深延拓和超分辨的光学器件,最早由 Francia^[7]提出,通过控制光束在焦点附近空间区域的分布形式,可以在尽量少地改变光学系统结构的前提下延拓景深和提高分辨率^[8-11]。从设计结构上,光瞳滤波器主要可以分为环带阶跃型,特殊阶跃型以及连续函数型。环带阶跃型是最为常见的结构形式,如 Wang 等^[12-13]提出的单环型, Ben-Eliezer 等^[14]提出的双环型,这种形式的设计加工较为简单,但是由于位

收稿日期: 2015-07-09; 收到修改稿日期: 2015-08-06

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)。

作者简介: 刘 江(1988—),男,博士研究生,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail:liujiang0521@gmail.com

导师简介: 杨怀江(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事高精度光学加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

相变化较单一,难以抑制旁瓣光强,从而使得光强分布次级大能量比例较高,在一定程度上影响分辨率。特殊阶跃型,如 Liu 等^[15]提出的轮辐型,这种形式多采用混合对称或者非对称结构,能够很好地延拓景深和提升分辨率,但是其复杂的结构在加工上具有相当的难度。而连续函数型光瞳滤波器,如周国尊等^[16]提出的多项式型,何毅等^[17]提出的超高斯型,相比于环带阶跃型,具有更多的可调节参数,能够更好的提高光学系统的性能,同时相对于特殊阶跃型,其旋转对称的结构也更加容易加工。

本文设计了一种基于泽尼克多项式的位相型光瞳滤波器,分析了加入滤波器后光学系统焦点附近横向与轴向的光强空间分布,说明了其景深延拓和超分辨能力,并与环带阶跃型和其他连续函数型滤波器进行了对比分析。

2 光瞳滤波器基本原理

现代光学理论中,光学成像系统可以有效地看做一个线性系统,其成像特性可以理想点源在焦面位置的光强分布来得出,即点扩展函数(PSF)。根据 Born 等^[18]的理论,在单色照明条件下,光学成像系统焦点附近的归一化复振幅分布 U 可以表示为:

$$U(v, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) \cdot J_0(v\rho) \exp(ju\rho^2/2) \rho d\rho, \quad (1)$$

其中, ρ 为归一化的光瞳半径, $P(\rho)$ 为光瞳函数, J_0 为零阶贝塞尔函数, v, u 为焦点区域的空间频率,对应焦面附近横向坐标 r 和轴向坐标 z , 关系如下:

$$\begin{cases} v = \frac{2\pi}{\lambda} NA \cdot r \\ u = \frac{2\pi}{\lambda} NA^2 \cdot z \end{cases}, \quad (2)$$

其中, λ 为波长, NA 为光学系统数值孔径,光学系统坐标,如图 1 所示。

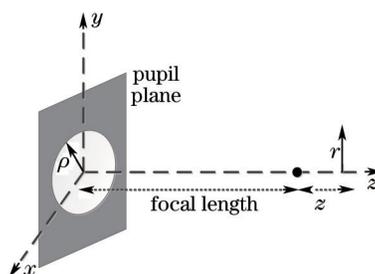


图 1 光学系统坐标示意图

Fig.1 Illustration of optical system coordinates

通过复振幅函数,可以计算出光学系统焦点附近的光强分布:

$$I(v, u) = U(v, u) \cdot U^*(v, u). \quad (3)$$

在光学系统中加入光瞳滤波器后,对光瞳函数的位相分布进行调制,改变光强分布形式,从而实现景深延拓和超分辨。这些能力的提升可以由以下 3 个参量进行评价:

- 1) 离焦斯特列尔比 $R_s(0, z_{\text{defocus}})$, 用以表征对光学系统的景深的延拓能力,一般大于 0.8 时,认为系统成像是完善的,也可以用有效离焦成像距离 $D_{s,R \geq 0.8}$ 来表征;
- 2) 光斑压缩比 G , 表征对光学系统的分辨能力的改善;小于 1 时,说明系统的分辨率得到了提高;
- 3) 次级大因子 M , 表征对光学系统分辨能力的干扰;一般大于 0.2 时,次级大会对主极大产生较强的干扰,影响系统分辨率。

这些参量分别可以表示为:

$$\begin{cases} R_s(0, z_{\text{defocus}}) = \frac{I_{\max}(0, z_{\text{defocus}})}{I_{\max}(0, 0)} \\ G = \frac{R_{\text{1st.side-lobe}}}{R_{\text{1st.side-lobe_clear.pupil}}} \\ M = \frac{I_{\max}(v_{\text{submaximal}}, 0)}{I_{\max}(0, 0)} \end{cases}, \quad (4)$$

其中 z_{defocus} 为离焦距离, $I_{\text{max}}(0, z_{\text{defocus}})$ 为离焦距离 z_{defocus} 时, 光强分布的主极大值 $I_{\text{max}}(0, 0)$ 为无离焦时, 光强分布的主极大值。 $R_{\text{1st,side-lobe}}$ 为光强分布第一极小值处的光斑半径。 $v_{\text{submaximal}}$ 为次级大光强位置的轴向坐标。

3 泽尼克位相型光瞳滤波器

当光学系统中加入位相型光瞳滤波器后, 光瞳函数可以表示为:

$$P(\rho) = \exp[i\Psi(\rho)], \quad (5)$$

其中 $\Psi(\rho)$ 为位相函数。

相较于传统的幂级数或者高斯函数, 采用泽尼克多项式作为位相函数的最大优势在于其与光学系统像差紧密相关, 可以在设计时更加具有针对性, 同时, 泽尼克多项式可以通过改变项数增加调节变量。泽尼克位相函数可以表示为

$$\Psi = K \sum_{i=1}^N 2\pi \cdot A_i Z_i(\rho, \phi), \quad (6)$$

其中 K 为衍射阶数, 这里取 1, $Z_i(\rho, \phi)$ 表示泽尼克多项式的第 i 项, A_i 为对应项的系数, 表 1 给出了泽尼克多项式的前 16 项。

表 1 泽尼克多项式前 16 项

Table 1 First 16 terms of Zernike polynomial

No.	Expressions	No.	Expressions
1	1	9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$
2	$\rho \cos \phi$	10	$\rho^3 \cos 3\phi$
3	$\rho \sin \phi$	11	$\rho^3 \sin 3\phi$
4	$2\rho^2 - 1$	12	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\phi$
5	$\rho^2 \cos 2\phi$	13	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\phi$
6	$\rho^2 \sin 2\phi$	14	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \phi$
7	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \phi$	15	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \phi$
8	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \phi$	16	$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$

为了不使光强分布的中央极大值在焦面产生横向的偏移, 同时兼顾后期光瞳滤波器的加工难度, 选取前 16 项中的中心对称项(1, 4, 5, 9, 12, 16)构造光瞳函数。

结合泽尼克函数与赛德尔像差的关系, 其中第一项常数 1, 为光瞳滤波器的基底厚度, 通常光瞳滤波器的基底厚度与口径比不应小于 0.2; 第 4, 9, 16 项为离焦和初、高级球差项, 这三项用来调节光瞳函数的主瓣尺寸, 以及消除离焦的影响; 第 5, 12 项为初、高级象散项, 这两项可以控制光强分布的次级大强度。

这样, 通过对泽尼克项的系数设置取值范围, 数值计算不同系数下光学系统的光强分布, 结合光瞳滤波器评价参量作为边界条件, 利用全局优化搜索算法, 最终得到泽尼克位相型光瞳滤波器的位相函数系数为: $A_1 = 0.250$, $A_4 = -0.233$, $A_5 = -0.126$, $A_9 = 0.317$, $A_{12} = -0.071$, $A_{16} = 0.042$ 。

4 设计结果分析

在一个光学系统中加入设计的泽尼克位相型滤波器, 通过数值计算光强分布来分析其对系统成像能力的提升。轴向光强分布如图 2 所示, 从图中可以看出, 加入滤波器后光斑的轴向尺寸得到了延展, 说明光学系统在较长的轴向焦深范围, 都能保持较高的斯特列尔比。

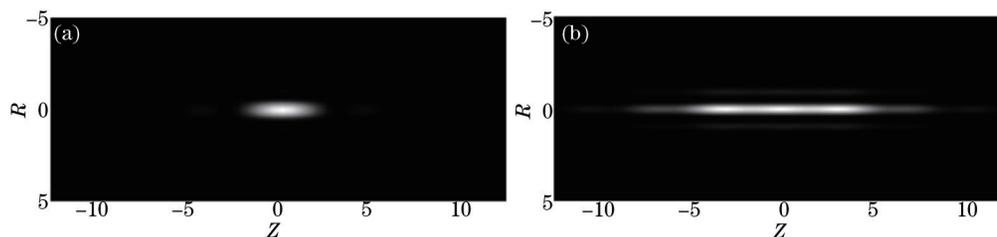


图 2 (a) 不加入和(b)加入光瞳滤波器时光强的轴向分布

Fig.2 Axial distribution of intensity (a) without and (b) with phase pupil filter

同样,通过横向光强分布如图3所示,可以看出加入光瞳滤波器后,光强分布中心亮斑尺寸更小,说明系统分辨率得到了提升。

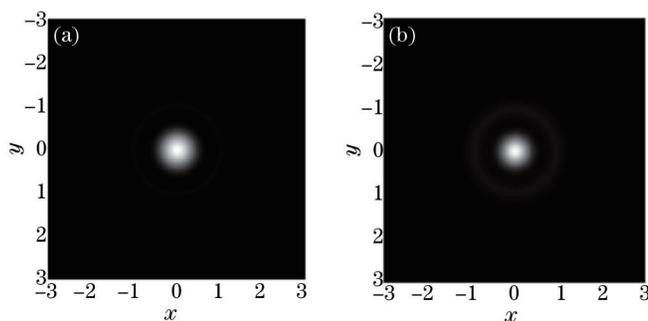


图3 (a)不加入和(b)加入光瞳滤波器时光强的横向分布

Fig.3 Radial distribution of intensity (a) without and (b) with phase pupil filter

接下来通过与其他形式滤波器的对比,说明泽尼克位相型光瞳滤波器所具有的优势。首先给出两种不同形式的光瞳滤波器,单环阶跃型^[11]和超高斯函数型^[14],两者的位相函数可以分别表示为,

单环阶跃型:

$$\Psi_{\text{single-ring}}(\rho) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq \rho < \rho_1 \\ \pi & , \rho_1 \leq \rho < \rho_2 \\ 0 & , \rho_2 \leq \rho < 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, ρ_1, ρ_2 为环带内外径,这里 $\rho_1=0.64, \rho_2=0.82$ 。

超高斯函数型:

$$\Psi_{\text{Gaussian}}(\rho) = \exp\left[-\left(\frac{\rho-0.5}{w/2}\right)^n\right], \quad (8)$$

其中, w 为高斯函数半高宽度, n 为阶数,这里, $w=0.12, n=8$ 。

图4给出这几种光瞳滤波器在焦点位置轴向光强分布对比。从图中可以看出,由于泽尼克型在设计参数中具有离焦和球差的控制项,在斯特列尔比大于0.8处,其光强分布的轴向宽度大于其他两种滤波器,说明其能更好的延拓系统景深。

图5给出这几种光瞳滤波器在焦面处横向光强分布对比。从图中可以看出,泽尼克型和单环阶跃型在光斑尺寸压缩上都优于高斯型,但是在次级大强度的控制上,高斯型则更为优秀。

最后,表2给出了这几种光瞳滤波器评价参量的结果对比。其中, $D_{s,R \geq 0.8}$ 用以表征相对传统显微光学系统,加入光瞳滤波器后系统景深的延拓倍数, G 为主瓣压缩比,其倒数表征分辨率的提升倍数, M 为旁瓣因子,表示加入光瞳滤波器后,旁瓣因子所占据的能量比例,值越小表征主瓣能量越集中。

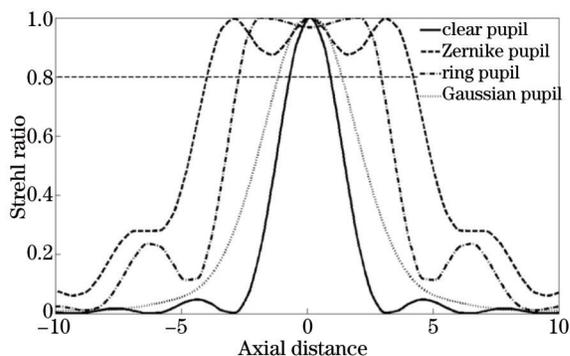


图4 加入不同滤波器时焦点位置的轴向归一化光强对比
Fig.4 Comparison of normalized axial intensity distribution at focus point for different phase pupil filters and clear pupil

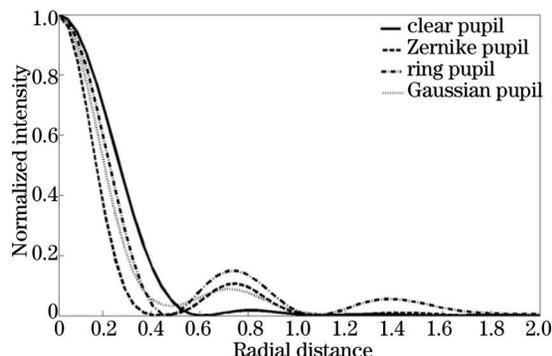


图5 加入不同滤波器时焦面的横向归一化光强对比
Fig.5 Comparison of normalized radial intensity distribution at focus plane for different phase pupil filters and clear pupil

表2 不同形式光瞳滤波器评价参量对比

Table 2 Comparison of criterion parameters for different phase pupil filters

	Clear pupil	Zernike	Single-ring	Gaussian
$D_{S,M \geq 0.8}$	1	4.15	3.03	1.62
G	1	0.76	0.79	0.84
M	1	0.10	0.15	0.09

5 结 论

结合泽尼克多项式与像差之间的关系,设计了一种泽尼克位相型光瞳滤波器,并对其焦点附近的横向和轴向光强分布进行了分析。结果表明,相较于单环阶跃型和高斯型光瞳滤波器,应用泽尼克多项式设计的位相型光瞳滤波器在景深延拓和分辨率提升上都有了一定的提升。此外,在实际的显微疵病检测中,可以针对显微系统本身具有的像差以及疵病的特征,进一步分析和选择更合适的泽尼克项,构造更加有效的位相函数。

参 考 文 献

- 1 Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao, *et al.*. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1032-1038.
杨雨英, 陆春华, 梁 蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. *光学学报*, 2007, 27(6): 1032-1038.
- 2 Dai Mingkui, Xu Deyan. The present situation of imperfection testing and research on the optical component[J]. *Optical Instrument*, 1996, 18(3): 33-39.
戴明奎, 徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状[J]. *光学仪器*, 1996, 18(3): 33-39.
- 3 Gong Yan, Zhang Wei. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 25-34.
巩 岩, 张 巍. 193 nm 光刻曝光系统的现状和发展[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1): 25-34.
- 4 M Tomoyuki, O Yasuhiro, M David, *et al.*. The lithographic lens: its history and evolution[C]. *SPIE*, 2006, 6154: 6154093.
- 5 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Optical design of lithography projective lens with variable total track[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0416003.
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 共轭距可变的光刻投影物镜光学设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0416003.
- 6 RuiDawei, Shi Zhengguang, Yuan Wenquan, *et al.*. Pupil non-balance calibration for lithographic lens[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0916002.
芮大为, 史振广, 袁文泉, 等. 光刻物镜光瞳极平衡性标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0916002.
- 7 T di Francia. Super-gain antennas and optical resolving power[J]. *Nuovo Cimento Suppl*, 1952, 9(3): 426-435.
- 8 Y K Zha, J S Wei, F X Gan. Performance improvement of super-resolving pupil filters via combination with nonlinear saturable absorption films[J]. *Opt Comm*, 2013, 293: 139-148.
- 9 C J R Sheppard. Pupil filters for generation of light sheets[J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 6339-6345.
- 10 Zhu Huafeng, Liu Weisen, HengKeyin, *et al.*. Non-sandwich-structured tunable transverse superresolving pupil filters based on birefringent crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1016002.
朱化凤, 刘为森, 衡科尹, 等. 基于晶体的非三明治结构可调横向超分辨光瞳滤波器设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1016002.
- 11 X J Yu, X Y Liu, J Gu, *et al.*. Depth extension and sidelobe suppression in optical coherence tomography using pupil filters[J]. *Opt Express*, 2014, 22(22): 26956-26966.
- 12 Wang Mei, Yun Maojin, Liu Liren, *et al.*. Design of the super-resolution pupil filter in the confocal system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0618001.
王 美, 云茂金, 刘立人, 等. 共焦显微系统中光学超分辨光瞳滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0618001.
- 13 E Ronzitti, G Vicidomini, V Caorsi, *et al.*. Annular pupil filter under shot-noise condition for linear and nonlinear microscopy[J]. *Opt Express*, 2009, 17(8): 6867-6879.
- 14 E Ben-Eliezer, N Konforti, B Milgrom, *et al.*. An optimal binary amplitude-phase mask for hybrid imaging systems that exhibit high resolution and extended depth of field[J]. *Opt Express*, 2008, 16(25): 20540-20561.

- 15 T Liu, J Tan, J Liu, *et al.*. Spoke wheel filtering strategy for on-axis flattop shaping[J]. Opt Express, 2010, 18(3): 2822-2835.
- 16 Zhou Guozun, Tian Weijian, Chen Huifang. Three-dimensional super-resolving phase optical pupil filter with polynomial function[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1211002.
周国尊, 田维坚, 陈慧芳. 多项式型相位光瞳滤波器实现三维超分辨[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1211002.
- 17 He Yi, Zhang Yudong, Li Guojin, *et al.*. Axial super-resolution effects of super-gaussian phase filter[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2568-2572.
何 毅, 张雨东, 李国俊, 等. 超高斯相位型光瞳滤波器轴向超分辨性能[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2568-2572.
- 18 M Born, E Wolf. Principles of Optics[M]. Oxford City: Cambridge University Press, 1999, 484-494.

栏目编辑: 韩 峰