

光学识别系统小型化设计

王海燕, 苗 华, 陈 宇

(长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022)

摘 要:针对光学识别系统的技术指标,对其光学系统进行小型化设计。其中,傅里叶透镜与准直扩束系统均采用摄远型式结构,在满足其长焦距的前提下大大缩短了系统的光学筒长。为了使系统结构更精巧,引入了二元光学元件,利用 ZEMAX 辅助设计软件对光学系统结构进行优化;通过有效地折叠空间光路使系统布局更紧凑,最后研制出的小型化透射式光学识别系统,其总长为 130 mm,总宽为 90 mm,实现了小型化。经实验验证,该系统具有较好的相关探测性能,具有噪声小、探测精度高的优点。

关键词:光学识别系统;傅里叶变换透镜;准直扩束系统;光学系统设计;二元光学元件

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.012

Miniaturization design of optical recognition system

WANG Hai-yan, MIAO Hua, CHEN Yu

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A miniaturization design of optical system is accomplished according to the technical specification of an optical recognition system. Fourier transform lens and collimating & expanding system both adopt the telephoto structure, which decreases the optical tube length to a great extent while satisfies the precondition of long focal length. In order to shorten the system length, a binary optical element is introduced. The optical system structure is optimized with computer-aided design software ZEMAX. The beam path is folded effectively so that the structure of the system is more compact. The total length of the miniature optical recognition system is 130mm, and the width is 90mm. The experimental results demonstrate that the recognition system has a good correlative performance, and also has the virtues of low noise and high precision.

Key words: optical recognition system; Fourier transform lens; collimating and beam expanding system; optical system design; binary optical element

1 引 言

随着光电成像器件和计算机技术的飞速发展,光学相关探测器件由最初的纯光学的匹配滤波器发展到光电混合联合变换相关器,它以灵活性好、识别精度高等优点广泛地应用到军事、航空航天、智能化等领域。为了满足军用仪器设备体积小、质量轻、机动灵活的需要,光学识别系统向着高灵敏度、小型化的方向发展。目前我国已研制出的体积最小的反射式新型联合变换相关器^[1](230 mm × 160 mm),虽然体积减小了,但是因其分辨率低、噪声大而不能运

用到实战当中。针对其缺陷,本文设计的小型化光学识别系统选用了高性能的透射式电寻址液晶,从而改善了反射式结构噪声大的缺陷,增强了信噪比,提高了系统的探测精度。

随着超大规模集成电路制作工艺的发展,衍射光学元件因其具有轻型化、集成化、价格低廉、便于

基金项目:“十一五”预研基金项目资助。

作者简介:王海燕(1986-),女,硕士,主要从事光学设计及测试领域的研究。E-mail:winxincan5545@126.com

收稿日期:2011-05-16;修订日期:2011-07-07

压膜复制等优点^[2]广泛地应用于光学仪器领域。本文设计的小型化光学识别系统将二元衍射元件与传统光学元件相结合,改进后的装置结构紧凑、质量轻、体积较小(130 mm × 90 mm),推动了光学识别系统的小型化发展。

2 小型化透射式光学识别系统总体结构

在保证系统高性能的前提下,为了实现体积小、质量轻、布局合理的小型化系统。我们选用了体积较小的半导体泵浦 YAG 倍频激光器(15 mm × 45 mm × 35 mm, $\lambda = 532$ nm)作为光源,并且选用了分辨率高、噪声小的透射式电寻址液晶,整体结构如图1所示。

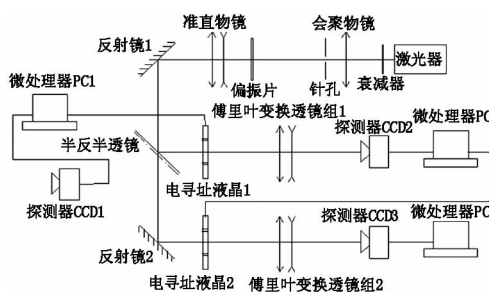


图1 小型化光学识别系统装置图

Fig.1 installation of miniaturization optical recognition system

准直物镜与会聚物镜及针孔构成准直扩束系统,激光器发出的光经准直扩束系统形成准直扩束平行光,平行光被反射镜1反射到半反半透镜后分成两路。其中一路用于获得联合变换功率谱;探测器CCD1实时摄取的目标图像与事先存贮在微处理器1中的参考图像一起输入到电寻址液晶1中,联合图像经傅里叶透镜组1后,由探测器CCD2进行探测得到联合变换功率谱。另一路用于获得相关峰图像,联合变换功率谱经微处理器2后输入到电寻址液晶2中,经傅里叶透镜组2进行傅里叶逆变换后,由探测器CCD3摄取目标图像与参考图像的联合变换相关点,实现了相关探测^[3]。

为了实现整体装置的小型化,设计思路是在保证系统总体性能要求的前提下减小光学系统的筒长、简化光学系统的结构。相对于传统折射透镜,二元衍射元件具有较大的设计自由度^[2],可通过改变环带的位置、槽宽和槽深最大程度地缩短系统的光学筒长;并且在材料选择上也具有更大的灵活性,可达到轻量化、简洁化、集成化和低成本的要求^[4]。因此,本文在合理选择光学系统的结构形式的基础上,将二元衍射面引入到传统的折射式光学元件中,最后设计出了一种折衍混合光学识别系统。与以往

反射式结构相比,长缩短了100 mm、宽缩短了70 mm,显然体积和质量减小了。并且由实验验证,系统的探测精度大大提高、噪声也大大减小。

3 小型化光学系统设计

光学识别系统的光学系统主要包括准直扩束系统和傅里叶变换系统,其中准直扩束系统主要由准直物镜与会聚物镜组成,下面我们主要探讨这几部分的小型化设计。

3.1 傅里叶变换透镜组设计

3.1.1 技术参数设计

联合图像进行傅里叶变换时,如果输入图像不在傅里叶透镜的前焦面上,只要平行光入射就不会影响傅里叶透镜后焦面接收的功率谱^[1]。因此,为了减小体积,将电寻址液晶置于傅里叶透镜前5 mm处,并且在傅里叶透镜的后焦面上用探测器CCD接收其功率谱,如图2所示。

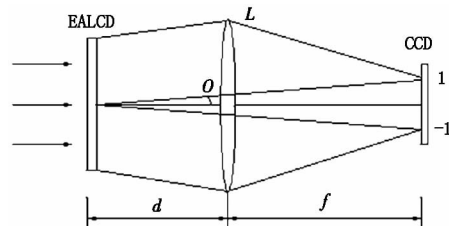


图2 物在CCD面上形成的0, ±1级谱

Fig.2 0, ±1 order power spectrum of the object on CCD

我们选用了1/2 in的探测器,与Lcx038型号的电寻址液晶(EALCD);根据衍射理论,将所选电寻址液晶的有效尺寸、激光器的波长代入以下公式^[1],计算出所需傅里叶透镜的焦距为 $f' = 200$ mm,通光孔径 $D = 30$ mm;根据傅里叶透镜的焦距和所选探测器的对角线长度计算出视场角 $2\omega = 2.3^\circ$ 。

$$a \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n) \quad (1)$$

$$D \geq N + 2d \tan \theta \quad (2)$$

其中, N 为电寻址液晶的有效尺寸; θ 为衍射角;由于 θ 很小,所以可取近似 $\theta = \sin \theta = \tan \theta$; d 为电寻址液晶与透镜之间的距离,即 $d = 5$ mm。

3.1.2 结构设计

根据上面计算得出的傅里叶透镜的技术参数,选择了一组正透镜在前、负透镜在后的摄远型物镜作为初始结构,该结构既可以在满足所需长焦距的基础上,大大缩短光学系统的筒长;又能使其满足正弦条件。固定该透镜组焦距为200 mm,利用计算机辅助软件ZEMAX进行优化,在保证成像质量的前

提下,逐渐缩短光学筒长,可达最短筒长为 128 mm。

为了进一步缩短透镜组的光学筒长,我们引入了二元衍射元件。ZEMAX 中旋转对称二元衍射面的位相分布函数为^[5]:

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum_m A_m r^{2m} = -2\pi n \quad (3)$$

式中, r 为归一化半径; A_m 为位相系数; n 为环带序号;二元光学面各衍射环带边界的位相函数值恰为 2π 的整数倍。利用 ZEMAX 可以得出二元位相系数 A_m 以及各环带的半径 r_k ,从而可以得出各环带宽度的大小,最小环带宽度是衡量二元衍射元件加工难度的一个重要参数。衡量二元衍射元件加工难度的另一个重要参数是刻蚀深度:

$$d = \frac{\lambda}{N(n_0 - 1)} \quad (4)$$

式中, N 为台阶数; n_0 为基底的折射率。

我们采用的波长为 $\lambda = 532$ nm,衍射级次为 $M=1$,ZEMAX 优化后的环数为 $n=68$,归一化半径为 2,衍射面的半径为 3.923245;采用刻蚀台阶数为 8 的衍射元件,制作后实际衍射效率接近 95%;因此可以得出台阶的刻蚀深度为 $3.61 \mu\text{m}$ 。由 ZEMAX 得到的二元衍射面的 phaseplot 和 2π 相位变化与对应环带半径的具体数据得出透镜的最大线频率为 11.8 periods/mm,对应最小周期线宽为 $84.7 \mu\text{m}$,因此相应最小环带宽度为 $10.59 \mu\text{m}$,现代刻蚀技术是可以实现的。

引入二元衍射面并经辅助设计软件 ZEMAX 优化设计后傅里叶透镜组的光学筒长减小到 94 mm,其结构如图 3 所示。下面是由计算机辅助设计软件 ZEMAX 得出的傅里叶透镜的像质评价(如图 4 所示),由图可以看出,各个视场的调制传递函数 MTF 均达到衍射极限,各视场的点列图 RMS 均小于艾里斑直径,各视场的波像差均小于 $\lambda/4$,达到了设计要求。

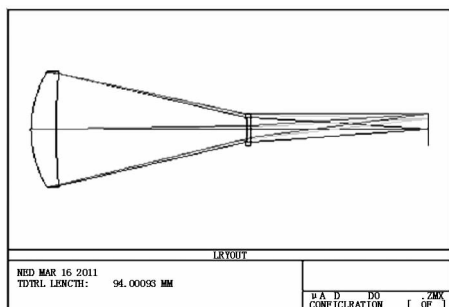
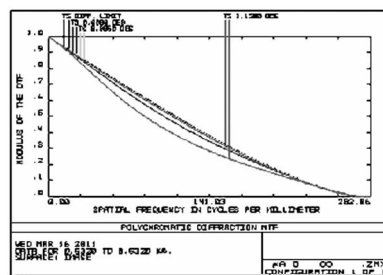


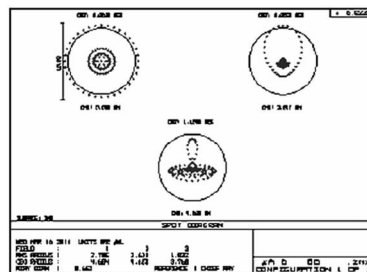
图 3 傅里叶透镜结构图

Fig. 3 structural diagram of fourier transform lens



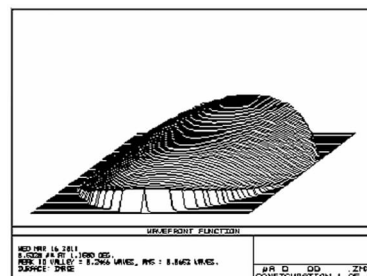
(a) 调制传递函数

(a) modulation transfer function



(b) 点列图

(b) spot diagram



(c) 最大视场的波像差

(c) wave aberration of maximum FOV

图 4 傅里叶透镜的像质评价

Fig. 4 image quality evaluation of Fourier transform lens

3.2 准直扩束系统设计

为使激光光束平行均匀地照射电寻址液晶,需要扩大激光器输出的高斯光束光斑尺寸,并使光束准直以进一步压缩发散角;同时,利用针孔空间滤波,使光能量分布更加均匀。采用了由会聚透镜与准直物镜构成的倒置望远系统的结构型式,如图 5 所示,这样既可以实现扩束又能进行空间滤波。

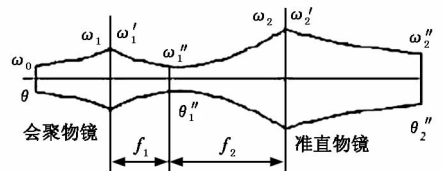


图 5 准直扩束示意图

Fig. 5 diagram of collimating and beam expanding

经薄透镜变换后入射光束在镜面处的波阵面半径和有效截面半径分别为^[6]:

$$R_i = s \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda s} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\omega_i = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda s}{\pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (6)$$

并且:

$$\omega_i = \omega'_i \frac{1}{R'_i} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{f_i} \quad (7)$$

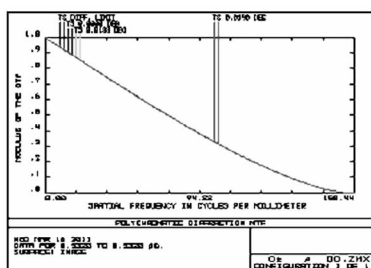
光束发散角^[6]:

$$\theta''_2 = \frac{\lambda}{\pi \omega''_2} \quad (8)$$

式中, f_i 透镜焦距 ($i=1,2$); ω_0, λ, s 为激光器参数; $R_i, R'_i, \omega_i, \omega'_i$ 分别为入射及出射光束在镜面处的波阵面半径和有效截面半径; ω''_i, θ''_i 为经薄透镜变换后的光束束腰和发散角。

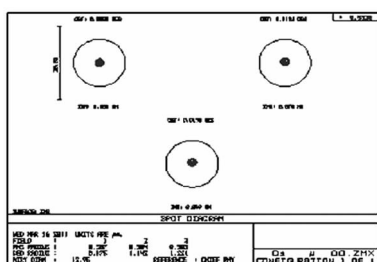
本文设计的装置要求准直扩束后光斑直径为 30 mm, 选用了焦距为 2 mm 的显微物镜作为会聚物镜(直接购买), 准直物镜的焦距为 300 mm, 由上述公式及所选激光器的固定参数, 可以计算出准直扩束后光束发散角 $\theta''_2 < 10^{-5}$ mard, 说明确定的参数满足了设计要求; 针孔直径定为 10 μm , 根据针孔的直径和准直物镜的焦距计算出视场角 $2\omega = 0.038^\circ$ 。准直物镜的结构型式及优化设计过程同傅里叶透镜(但不需引入二元衍射面即可达到预定目标), 最后得到准直物镜的光学筒长为 75 mm。

下面是由计算机设计软件 ZEMAX 得出的准直物镜的像质评价(如图 6 所示), 由图可以看出, 各视场的调制传递函数 MTF 均达到衍射极限, 各视场的点列图 RMS 均小于艾里斑直径, 各视场的波像差均小于 $\lambda/4$, 达到了设计要求。



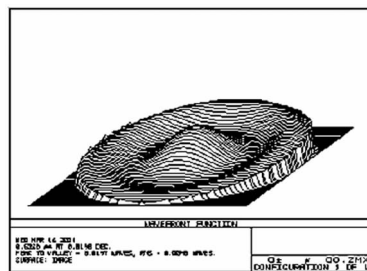
(a) 调制传递函数

(a) modulation transfer function



(b) 点列图

(b) spot diagram



(c) 最大视场的波像差

(c) wave aberration of maximum FOV

图6 准直物镜的像质评价

Fig.6 image quality evaluation of collimating lens

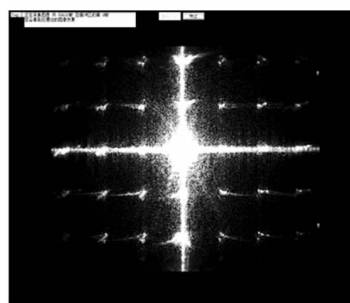
4 实验结果

将我们拍摄的图 7(a) 输入到本文所设计的小型化透射式光学识别系统中, 先后经两次傅里叶变换后实现了相关探测, 实验中得到的联合变换功率谱如图 7(b) 所示, 相关峰如图 7(c) 所示。



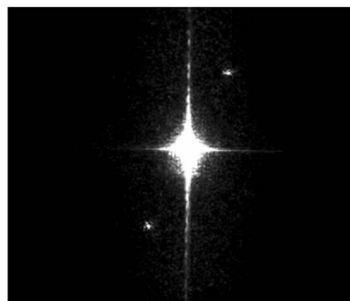
(a) 物面输入的联合图像

(a) image of object



(b) 联合变换功率谱

(b) joint transfer power spectrum



(c) 相关峰

(c) correlation peaks

图7 实验结果

Fig.7 test result

由实验结果可以看出,该系统具有较好的探测相关性能,并且信噪比高、探测精度高。

5 结 论

本文设计了一种小型化透射式光学识别系统。利用二元衍射元件有效地减小了系统的光学筒长;通过折叠光路充分利用空间,使系统布局更紧凑。最后研制出的整个光学系统的总长为 130 mm,总宽为 90 mm。经实验证明,该装置具有较高的识别效率。与以往的反射式结构相比,不但改进了反射式结构噪声大、探测精度低的缺陷;而且减小了体积、实现了装置的小型化。

参考文献:

- [1] Wang Jingjing, Wang Bo, Wang Mian, et al. Optical system design of new-type joint transform correlator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33 (4): 115 - 123. (in Chinese)
王晶晶,王波,王冕,等. 新型联合变换相关器光学系统设计[J]. 光电工程, 2006, 33 (4): 115 - 123.
- [2] Lü Naiguang. Fourier optics[M]. Beijing: Machine Press, 2008, 10: 266. (in Chinese)
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008, 10: 266.
- [3] Miao Hua, Zou Xin, Lang Qi, et al. Research on spectrum plane processing technology of target auto-recognition in cluttered scenes[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29 (2): 367. (in Chinese)
苗华,邹昕,郎琪,等. 复杂背景目标自动识别谱面处理技术研究[J]. 光学学报, 2009, 29 (2): 367.
- [4] Zhang Haobin. Study on reflective optical system with binary optical[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008, 6: 3. (in Chinese)
张浩斌. 具有二元光学校正元件的反射式光学系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008, 6: 3.
- [5] Deng Gangfeng. Study on the design of hybrid diffractive-refractive camera lens[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2009, 4: 48. (in Chinese)
邓冈峰. 折-衍混合照相镜头设计研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2009, 4: 48.
- [6] Li Jianxin. Collimated laser beam expander design and simulation[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009, 3: 28 - 31. (in Chinese)
李建新. 激光准直扩束设计和仿真[J]. 装备制造技术, 2009, 3: 28 - 31.