

文章编号: 1001-3806(2012)03-0421-03

折衍混合紫外告警光学系统设计

于远航, 王文生*

(长春理工大学 现代光学测试研究室, 长春 130022)

摘要: 为了满足紫外告警系统在军事方面的应用, 采用二元衍射元件和非球面元件, 设计了一种日盲紫外告警的光学系统, 其工作波长范围为 240nm ~ 280nm, 视场角为 40°, 采用“负-正”型式的反摄远镜头结构, 仅由 5 块透镜构成, 此镜头结构简单、体积较小、能量集中度高。结果表明, 此设计方案能很好地解决紫外镜头轴外像差校正的问题, 使点列图能量集中, 小于紫外 CCD 的像素, 满足紫外告警设计要求。

关键词: 光学设计与制造; 紫外告警系统; 光学设计; 二元光学; 非球面

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.035

Optical design of diffractive refractive hybrid ultraviolet warning systems

YU Yuan-hang, WANG Wen-sheng

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

Abstract: In order to meet the application of the ultraviolet (UV) warning systems in military domain, an optical system of a solar-blind ultraviolet warning system was designed with binary diffractive elements and aspherical elements. Its working wavelength is 240nm ~ 280nm, full field of view is 40°. It is composed only of five lenses with “negative-positive” reverted-telephoto type. The lens has simple structure, small size, and high energy concentration. The results show that this design is a good solution to the UV-axis lens aberration correction, the spot is less than pixel size of UV-CCD, making point diagram with high energy concentration, and satisfying the design requirement of UV warning systems.

Key words: optical design and fabrication; UV warning system; optical design; binary optics; aspherical surface

引言

面对现代战争中日趋严重的地空导弹和空空导弹的威胁, 世界各国均加紧研制各种导弹逼近告警系统。导弹告警系统经历了雷达告警、红外告警和紫外告警 3 个阶段。其中紫外告警的应用比较晚, 但由于日盲紫外的低噪特点, 越来越受到各国军方的重视, 得到了充分的运用和长足的发展^[1-3]。

由于日盲紫外研究主要针对军用方面, 该项技术的研制情况和技术细目前都处于高度保密状态, 因此, 关于日盲紫外告警装置的光学系统研究的相关文献极少, 且均没有详细的论述。作者从学术出发, 探讨并设计了一种应用于日盲紫外导弹逼近告警的光学系统。

1 设计原理

设计导弹告警系统时常采用 6 组组合, 以增加视场角, 对目标空间进行搜索。每组镜头都采用反摄远型结构的紫外光学系统, 由于这种系统的球差、色差、慧差、像散等像差很大, 又因为本系统应用在 240nm ~ 280nm 的紫外波段, 该波段的光学材料极少, 通常采用熔石英、氟化钙, 但这两种材料的阿贝数差别不大, 给色差校正带来了一定的困难, 增加了设计的难度。本系统在设计中采用非球面元件和二元衍射元件来改善像质, 简化系统结构。

1.1 非球面

非球面可以看作是由球面和光楔组成, 加入非球面对球差的校正有显著作用, 对校正像散、场曲和色差无作用。非球面的引入增加了自变量的个数, 因此系统校正像差的能力得到了加强, 从而可以获得更好的成像质量, 或者在保持成像质量不变的情况下简化系统。在本系统中孔径光阑位于系统的第 4 个面和第 5 个面之间, 选取球差系数较大的第 3 个面为偶数次非球面。

由于共轴光学系统具有一条对称轴即光轴, 系统

基金项目: 总装备部预研局十二五基金资助项目

作者简介: 于远航(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wwsciom@163.com

收稿日期: 2011-07-19; 收到修改稿日期: 2011-08-25

中每一个曲面都是轴对称旋转曲面,它们的对称轴均与光轴重合,偶次非球面的公式表示为^[4-5]:

$$x = ch^2 / (1 + \sqrt{1 - kc^2h^2}) + a_4h^4 + a_6h^6 + a_8h^8 + a_{10}h^{10} + a_{12}h^{12} \quad (1)$$

式中 $h^2 = y^2 + z^2$, c 为曲面顶点的曲率, k 为二次曲面系数, a_4, a_6, a_8, a_{10} 和 a_{12} 为高次非曲面系数方程。

1.2 二级光谱

二级光谱是一种高级色差,它是位置色差的校正为前提的。二级光谱与焦距成正比,焦距越长,二级光谱越大;另外二级光谱与使用波段范围有关,波段越宽,二级光谱越大。经推导,可得二元光谱公式表示为^[6]:

$$\delta L_{FC}' = -\frac{L' p_2 - p_1}{f' v_2 - v_1} = f' \frac{p_2 - p_1}{v_2 - v_1} = 0.0005f' \quad (2)$$

式中 p_1 和 p_2 分别为胶合系统两透镜的部分相对色散; v_1 和 v_2 为两透镜的阿贝数; L' 为像距; f' 为像方焦距。由上式可知,要实现复消色差,必须满足 $p_1 = p_2$, 也就是两种玻璃的部分相对色散相同。而对于普通玻璃, $(p_2 - p_1) / (v_2 - v_1)$ 是一定值,约为 $1/1500 \sim 1/500$, 所以采用普通玻璃并不能消除二级光谱。选择适当的玻璃组合只能减小二级光谱,要想更好、更容易减小二级光谱实现复消色差,就要采用特种玻璃,以及引入二元光学器件等方法。

1.3 二元衍射元件

与普通玻璃的色散性质不同,衍射光学元件不遵循反射定律,它服从光栅公式。它的阿贝数可以是负值,用它可以矫正二级光谱^[7-8],从而可以显著减少弥散斑的尺寸,增加能量的会聚度。

衍射光学元件的光焦度:

$$\varphi = \alpha \lambda \quad (3)$$

$$\text{阿贝数: } v = \lambda_D / (\lambda_F - \lambda_C) = -3.5 \quad (4)$$

相对部分色散:

$$p = (\lambda_D - \lambda_C) / (\lambda_F - \lambda_C) = 0.6063 \quad (5)$$

式中 α 是一个与衍射级次和位相系数有关的常量, λ 是波长; λ_C, λ_D 和 λ_F 分别表示 C 光、D 光和 F 光的波长;根据以上公式可知,二元衍射元件的阿贝数很小且是负值,其相对部分色散只和波长有关;利用这些特点,可很好地校正二级光谱,减小弥散斑尺寸,衍射光学元件不会带来畸变和场曲。

2 光学系统设计

2.1 光学系统参量确定

根据紫外告警的性能要求,该镜头的技术参量为:焦距为 50mm,波长范围为 240nm ~ 280nm,视场角为

40°, 相对孔径为 1:3.5,接收器为选紫外 CCD,外形尺寸为 27.6mm × 27.6mm,像元尺寸为 14.5μm × 14.5μm。

2.2 光学系统的选型

常见的物镜一般为:折射式、反射式和折反射式。

反射式物镜使远处景物成像于主镜焦面上,对玻璃材料在光学性能上没有特殊的要求,光线不需要透过材料本身,重量轻,且可应用在非可见光成像上。但是反射式物镜对光程的影响是双倍的,所以对面形的加工精度要求很严。折反射式物镜是在反射式物镜中加入折射元件,用来校正像差。同反射式物镜一样,像差容易校正,而且因光路折叠,可以得到特别紧凑的结构,对于长焦距、大相对孔径的光学系统有独特的优势。但是这两种类型的物镜视场都不能够做得很大,否则像差难于校正,另外折反式存在遮光比问题。而折射式物镜可以设计成比较大的视场和比较大的相对孔径,故本文中选用折射式结构形式。

反摄远型的结构形式主要特点有以下两点:(1)反摄远物镜分前后两组,前组具有负的光焦度,后组具有正的光焦度,当平行光从负透镜前组入射,经发散后被后组成像在焦面上,系统主平面可移出物镜之外;(2)反摄远物镜轴上光线经前组发散后,在后组的入射高度较高,轴外光线经前组后变平,所以后组的相对孔径需求较大,而视场角需求较小,有利于扩大系统的视场。为增大视场其后工作距不能长,否则其像面尺寸过大,超出 CCD 约束范围,当然可以使用 CCD 并接来解决大视场问题,但系统复杂化。

选取国外紫外物镜专利^[9]为初始结构,该结构为反射远型。初始结构数据如表 1 所示。

Table 1 The initial structure of the data

	radius/mm	thickness/mm	material	diameter/mm
0	infinity	infinity	air	
1	1.81630	0.2688	CaF ₂	1.500
2	-9.70194	0.1363	air	1.500
3	-1.71562	0.1619	quartz	1.400
4	1.72652	0.3324	air	1.400
5	4.26856	0.3909	CaF ₂	1.500
6	-1.73853	0.0223	air	1.500
7	4.39230	0.4152	CaF ₂	1.500
8	-1.78979	0.3056	air	1.500
9	-1.70410	0.2496	quartz	1.200
10	5.60739	3.7241	air	1.200

3 设计过程分析与设计结果

在使用 ZEMAX 光学设计软件优化本系统时,为了满足系统的设计要求,经过反复试验,加入了二元衍射面和非球面对本系统进行优化。

由于旋转对称的二元衍射元件有 3 个自由度,并且二元衍射元件的位置远离光阑适当距离时可以校正球差、慧差、像散 3 种像差,且其不产生场曲;靠近光阑位置时可以校正高级像差。且二元衍射元件的等效阿贝数小于 0,产生的二级光谱一般为负,且在数值上大于普通透镜元件一个数量级以上。因此,利用这个原理采用折衍混合可以实现复消色^[10]。所以在第 1 个面和光阑后紧挨着光阑的第 6 个面加入二元衍射元件,实现对系统各个像差及二级光谱的校正。

非球面具有很好的光学性能,对于球面单透镜近轴光线和远轴光线不会汇聚在一个点,而非球面透镜则会汇聚于一点,即可实现无球差。非球面常用在光学系统尺寸受限、结构相对简单、像质要求高的场合。在光阑附近加入非球面可以校正高级像差,在远离光阑位置加入非球面可以校正像散和畸变。基于系统需要接收到目标的能量集中度高,且像面照度均匀,所以在系统第 3 个面加入非球面。使系统具有更强的校正球差、像散和畸变的能力。当系统的球差很小时,其它的像差相应的也会变小,因此,采用非球面有利于系统像面的能量集中,且照度均匀。

由于日盲紫外导弹告警系统接收导弹尾焰发射的紫外光,接收的信号没有目标的尺寸、大小和纹理,只有紫外信号的强弱,故日盲紫外告警系统不是成像系统而是能量系统,评价该系统的成像质量不用传统的光学成像系统的光学传递函数(modulation transfer function, MTF),而是用点列图和能量分布曲线去评价能量集中程度,以及用点扩散函数图和相对照度图进行评价光强的分布。

设计结果如图 1~图 6 所示。由图 1 可知光学系统整体外形结构合理;由图 2 可知,系统的最大均方根半径为 $6.520\mu\text{m}$,小于探测器像元半径 $7.25\mu\text{m}$;由图 3 可以看出,距离光斑中心 $6.75\mu\text{m}$ 的区域内集中了 90% 左右的能量,能量集中度高;由图 4 的点扩散函数表明,经光学系统的衍射像的光强分布集中程度很高;由图 5 可以看出,三色光曲线在 0.6 倍口径附近相交,实现了复消色差,从而减小了弥散斑尺寸;由图 6 可以

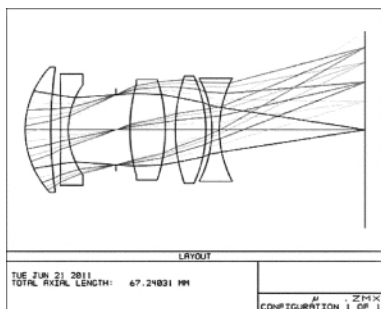


Fig. 1 Optical system structure

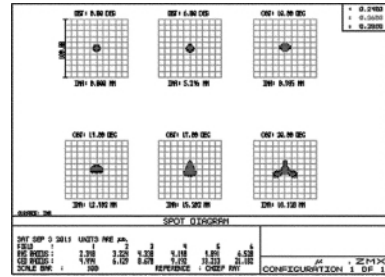


Fig. 2 Spot diagram of the system

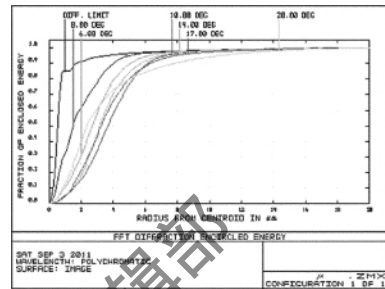


Fig. 3 Radial energy distribution of the system

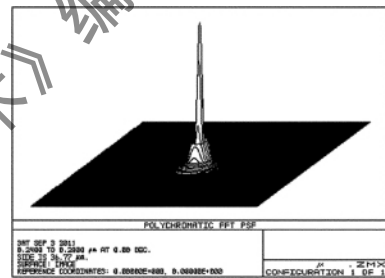


Fig. 4 Point spread function of the system

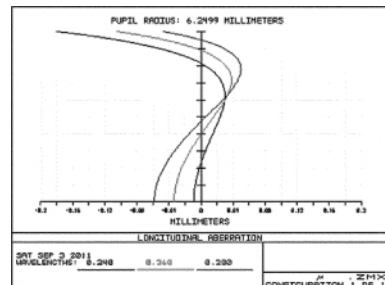


Fig. 5 Longitudinal aberration map

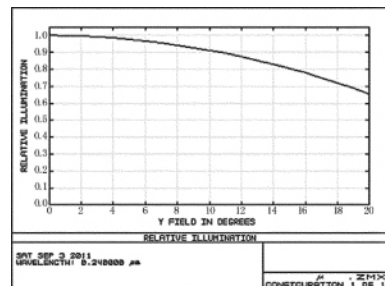


Fig. 6 Relative illumination map

看出像面照度较均匀;系统总长 65mm。以上设计结果表明,该系统满足使用要求。

4 结论

在紫外光学系统的设计过程中采用了反摄远的结 (下转第 427 页)

其中既有压电陶瓷微位移器的色散效应,又有其本身的非线性效应。而基于消色差相移装置的全息图像重建得到的振幅分布亮度均匀,细节部分分辨率较好,后者的质量较前者得到了很大提高。这证实了消色差相移装置在LED光源数字全息中的可行性。

4 结论

由于LED光源的非单色性,在相移数字全息中使用压电陶瓷微位移器作为相移装置会不可避免地引入系统的色散误差。本文中研究了基于旋转半波片的消色差相移技术,并将其应用于LED光源数字全息中。实验结果表明,采用消色差相移数字全息的重建结果较采用压电陶瓷相移器的重建质量有明显提升。

参考文献

- [1] ZHANG Q Sh, LÜ X X, YU Q T *et al.* Method of aperture synthesizing in digital holography based on gray correlation algorithm [J]. *Laser Technology* 2009, 33(3): 276-278 (in Chinese).
- [2] YU Q T, LÜ X X, ZHANG Q Sh *et al.* A new method of four step phase-shining digital holography based on arbitrary phase shifts [J]. *Laser Technology* 2009, 33(4): 409-412 (in Chinese).
- [3] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P, *et al.* The analysis of off-axis digital holographic recording conditions [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 482-484 (in Chinese).
- [4] WANG H Y, WANG G J, XIE J J, *et al.* Reconstruction with collimating reference wave in digital holography microscopy [J]. *Laser Technology* 2008, 32(2): 131-136 (in Chinese).
- [5] ZHANG T, ICHIROU Y. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(15): 1221-1222.
- [6] KEMPER B, STÜRWARD S, REMMERSMANN C, *et al.* Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(7): 499-507.
- [7] WARNASOORIYA N, KIM M K. LED-based multi-wavelength phase imaging interference microscopy [J]. *Optics Express* 2007, 15(5): 9239-9247.
- [8] SUJA H S, KOTHIYAL M P, SIROHI R S. White-light interferometry with polarization phase-shifter at the input of the interferometer [J]. *Journal of Modern Optics*, 2000, 47(6): 1137-1145.
- [9] ZVYAGIN A Z, SAMPSON D D. Achromatic optical phase shifter modulator [J]. *Optics Letters* 2001, 26(4): 187-189.
- [10] HARIHARAN P, MAITREYEE R. Achromatic phase-shifting for two-wavelength phase-stepping interferometry [J]. *Optics Communications*, 1996, 126(1/6): 220-222.
- [11] SUJA H S, KOTHIYAL M P, SIROHI R S. Achromatic phase shifting by a rotating polarizer [J]. *Optics Communications*, 1998, 154(5/6): 249-254.
- [12] WATANABE Y, HAYASAKA Y, SATO M, *et al.* Full-field optical coherence tomography by achromatic phase shifting with a rotating polarizer [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(8): 1387-1392.
- [13] LIANG Q T. Jones matrix of the polarizing device [J]. *Optics Instrument*, 1988, 4(10): 1-7 (in Chinese).

(上接第423页)

构形式,体积较小。在系统优化时应用了二元光学元件和非球面,实现了复消色差,使系统的能量集度高、像面照度均匀,弥散斑尺寸小于紫外CCD的像素,使紫外告警系统既满足视场大的要求(40°),又满足光斑小的要求(6.52μm)。

参考文献

- [1] HU Sh H, LENG F, LU F. Summarization of ultraviolet warning technology [J]. *Shipboard Electronic Counter Measure*, 2005, 28(1): 12-15 (in Chinese).
- [2] LI B J, LIANG Y H. Development of ultraviolet warning technology [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(10): 1031-1035 (in Chinese).
- [3] HAN S N, YU T H, KANG W M. Research on alarm distance of UV imaging MAWS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 250-253 (in Chinese).
- [4] LI L. Method for modern optical design [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press 2009: 201-208 (in Chinese).
- [5] TIAN J Y, GONG M L, YAN P, *et al.* The design of bi-spherical single objective lens with numerical aperture of 0.85 [J]. *Laser Technology* 2005, 29(2): 116-118 (in Chinese).
- [6] XU Y, YAN Sh H, ZHOU Ch L, *et al.* Design of secondary spectrum by binary optical element [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(3): 190-191 (in Chinese).
- [7] JIN G F, YAN Y B, WU M X, *et al.* Binary optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 188-195 (in Chinese).
- [8] YIN G J, XUE M Q. Wavefront aberration analysis of diffractive lenses [J]. *Laser Technology*, 1997, 21(1): 38-43 (in Chinese).
- [9] BRAIN J. Thompson lens design [M]. New York: New York University of Rochester Rochester, 2001: 176-187.
- [10] ZHANG X. Imaging properties & the methods of design for optical system with binary optics elements [J]. *Optical and Precision Engineering*, 1994, 2(4): 1-7 (in Chinese).