

doi:10.3788/gzxb20154402.0209002

# 全息波导显示系统中输出光栅的优化

彭飞<sup>1,2</sup>, 张攀<sup>3</sup>, 杨德兴<sup>3</sup>, 康明武<sup>1,2</sup>, 马百恒<sup>1,2</sup>

(1 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

(2 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

(3 西北工业大学 理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072)

**摘要:**全息波导显示系统中输出光栅的衍射效率、位置和长度对整个显示系统的光强输出均匀性及能量利用率有重要的影响。通常输出光强均匀性由输出光栅的衍射效率决定,能量利用率受多重光栅的位置和长度影响。本文以中心视场光束的输出光强均匀为目的,对相应输出光栅衍射效率的位置分布进行优化与曲线拟合,得到输出光栅衍射效率随输出位置连续递增的分布曲线,并应用到所有视场光束。计算结果表明,相比于传统阶梯状衍射效率分布输出光栅,全息波导显示系统中采用具有连续衍射效率分布输出光栅时的光强输出均匀性得到明显提升。针对部分衍射光束未能进入出瞳的现象,提出错位优化法,按照出瞳大小和使用距离优化各重输出光栅的位置和尺寸,减小了光栅的无效衍射区域,提高了出瞳范围内的能量利用率。

**关键词:**导波光学;准直显示;光栅优化;全息波导;多重光栅;输出均匀性;输出效率

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0209002-6

## Optimization of Output Gratings in Holographic Waveguide Display System

PENG Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Pan<sup>3</sup>, YANG De-xing<sup>3</sup>, KANG Ming-wu<sup>1,2</sup>, MA Bai-heng<sup>1,2</sup>

(1 Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471000, China)

(2 Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471000, China)

(3 Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In a holographic waveguide display system, the diffraction efficiency, location, and length of each output grating make great impact on the uniformity of output intensity and ratio of energy utilization. Generally uniformity of output intensity is decided by the diffraction efficiency distribution of each output grating, and ratio of energy utilization rests with the location and length of each output grating. Firstly, aiming at the uniformity of central field of view, the diffraction efficiency distribution of corresponding output grating was optimized and curve fitting, and a continuous and increasing curve of efficiency distribution was obtained. Similar processing was carried out for other gratings corresponding to other FOV. Calculation results demonstrate that the uniformity of output intensity of HWDS will be improved notably when output gratings with optimized continuous and increasing diffraction efficiency distributions are used than that of traditional output gratings with step diffraction efficiency distributions. A shifting-optimization method was proposed to optimize the location of each grating according to the size of exit pupil and usage distance, so that the ratio of energy utilization of HWDS could be greatly increased resulted from the reduction of the invalid diffraction region.

**Key words:** Waveguide optics; Collimating display; Optimization of gratings; Holographic waveguide; Multiple gratings; Output uniformity; Output efficiency

**OCIS Codes:** 090.2820; 050.1950; 090.7330; 050.7330; 090.2870

基金项目:国家科技重大专项课题(No. 2011ZX05026-001-06)资助

第一作者:彭飞(1983—),男,工程师,博士,主要研究方向为全息显示和头戴显示技术. Email: eoci@vip.sina.com

收稿日期:2014-06-25;录用日期:2014-09-10

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

传统准直显示技术采用折返式光学系统,由于系统中使用了多个复杂的透镜组,结构复杂,整机重量和体积偏大,装配准确度要求苛刻,后期维护成本高,显示性能的提升以增大系统体积和系统重量为代价<sup>[1-7]</sup>。全息波导是新一代准直显示的关键核心部件<sup>[8]</sup>,其将全反射导波原理和多重体全息光栅衍射原理相结合<sup>[9-11]</sup>,在实现大视场、大出瞳图像输出的同时,减小了系统的体积和重量,是当代准直显示系统发展的必然趋势。全息波导显示系统主要依靠衍射光栅对光束传输方向进行“调制”和“解调”,以实现图像光的输入和输出。

在全息波导显示系统中,成像于无穷远的图像光波在波导中周期性传输,不同视场光线因角度不同其传输周期也不同。当传输周期大于光束宽度时,在输出扩展过程中相邻周期输出的光束之间存在间隙,人眼观察会出现图像的闪烁甚至是图像的不连续现象。在输出扩展过程中,波导中的光束经历多次反射和衍射完成多次输出,随着输出次数的增加,入射到光栅上的光强依次减弱。为获得均匀无间断的扩展输出,需要对波导结构和输出光栅的衍射效率分布进行优化研究<sup>[12-13]</sup>。

全息波导系统中采用的体全息光栅属于布喇格衍射,具有衍射级次少、衍射效率高等优点,但是存在衍射角带宽狭窄的缺点<sup>[14-16]</sup>,为了获得足够的视场,通常采用多重复合光栅结构对衍射角带宽进行拓展<sup>[17]</sup>。另外,如果多重体全息光栅的位置完全重叠,不同视场光束在输出时不能全部进入出瞳,从而造成很大一部分能量泄漏。因此需要对各重光栅的位置和长度进行优化研究。

本文在多重体全息光栅拓展角带宽的基础上,分析了改善光栅输出均匀性的方法,并提出了通过优化光栅位置和长度提高输出效率的错位优化法。

## 1 全息波导显示原理

用于显示的全息波导一维结构示意图如图1,包括输入耦合光栅区,输出耦合光栅区和吸收区。来自图像源的光束经过光学系统准直后照射在输入耦合体光栅H<sub>1</sub>上,经光栅高效衍射后在波导内以全反射方式沿+y方向传输。光束到达水平扩展光栅H<sub>2</sub>后,一部分能量通过光栅H<sub>2</sub>衍射输出波导,未衍射能量沿原路径继续在波导内向前传输一个周期后部分发生衍射,反复进行到光栅H<sub>2</sub>的末端为止,实现光瞳在水平方向的扩展。

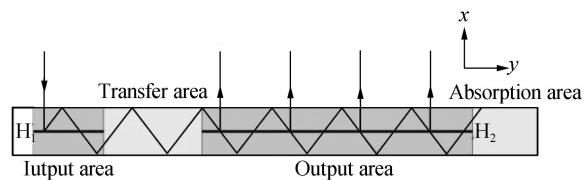


图1 全息波导扩展成像过程

Fig. 1 Process of extended imaging in HWDS

光束在输出区多次衍射的过程中,能量逐渐减小,为了在输出区域获得均匀的输出光强,输出光栅衍射效率须沿光束传输方向逐渐增加,衍射效率的分布函数需要进行优化。在出瞳范围内的每一点都应能够观察到全视场的光束。当输出区多重光栅位置完全重合时,只有在图2中白色箭头的区域才能观察到所有视场的光束,因此该区域为出瞳范围,出瞳范围之外的光束为无效光束。逆着光束传播方向回到输出光栅可以发现,光栅的a区域为中心视场的有效衍射区域,其它区域的衍射光束未能进入出瞳范围,为无效区域;同样,b和c区域分别为右边缘视场和左边缘视场的有效衍射区域。

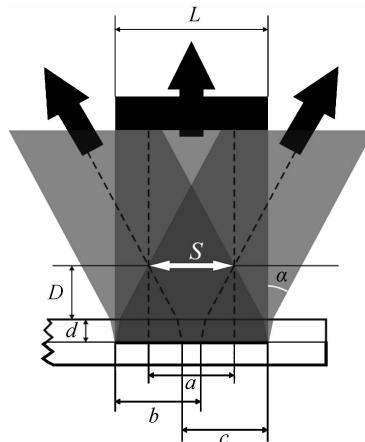


图2 输出光栅的有效区域

Fig. 2 Effective area of output grating

## 2 全息波导显示系统输出光栅优化

### 2.1 输出光栅衍射效率优化

为了在输出区获得均匀输出光强分布,输出光栅衍射效率须满足

$$I_{\text{dif}}^j = I_{\text{in}}^j \eta_j = I_{\text{in}}^{j-1} (1 - \eta_{j-1}) \eta_j = I_{\text{dif}}^{j-1} \frac{(1 - \eta_{j-1}) \eta_j}{\eta_{j-1}} \quad (1)$$

式中  $I_{\text{in}}^j$  和  $I_{\text{dif}}^j$  分别为第  $j$  次入射和衍射光强,  $\eta_j$  为光束第  $j$  次衍射位置的光栅衍射效率。为了保证输出均匀性,应使  $I_{\text{dif}}^j = I_{\text{dif}}^{j-1}$ , 从而有

$$\eta_j = \frac{\eta_{j-1}}{1 - \eta_{j-1}} = \frac{\eta_j}{1 - (j-1) \eta_j} \quad (2)$$

忽略波导的传输损耗,并假定波导末端光栅衍射效率为1,则

$$\eta = \frac{1}{J} \quad (3)$$

式中,  $J$  为该视场角光束在输出光栅上的总衍射次数.

在确定光栅衍射效率分布过程中, 以中心视场光线为特征光线, 当特征光线均匀输出时(每次输出光强相等), 由式(2)和(3)确定输出光栅衍射效率分布. 为定量描述输出均匀性, 可定义

$$\Gamma = 1 - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

式(4)为输出均匀度. 其中,  $I_{\max}$  为最大输出光强,  $I_{\min}$  为最小输出光强. 同时定义输出光栅对各视场光束的输出效率为该视场光束在光栅区衍射输出的总能量与输入的总能量之比. 光栅衍射效率分布优化工作的目标是, 找出一条最佳的衍射效率分布曲线, 使输出均匀度  $\Gamma$  达到最大, 即获得均匀的光强输出. 由于该成像模型的物理过程比较清晰, 效率分布曲线的函数形式较为自由, 所以本文采用物理分析的方法进行优化.

由于采用了多重体全息光栅技术拓展角带宽<sup>[4]</sup>, 整个视场角范围被分为多个子视场, 因此在光栅优化时每重光栅的特征光线为各自对应子视场的中心视场光线. 假如采用五重光栅, 设入射光束宽度为 10 mm, 输出光栅宽度为 45 mm, 某一子视场的中心视场光束在波导内的传输周期  $\Lambda = 15$  mm, 那么光束在整个输出范围内恰好完成 3 次衍射. 因为中心视场光束每次输出的光强相同, 所以光栅衍射效率沿  $+y$  方向依次

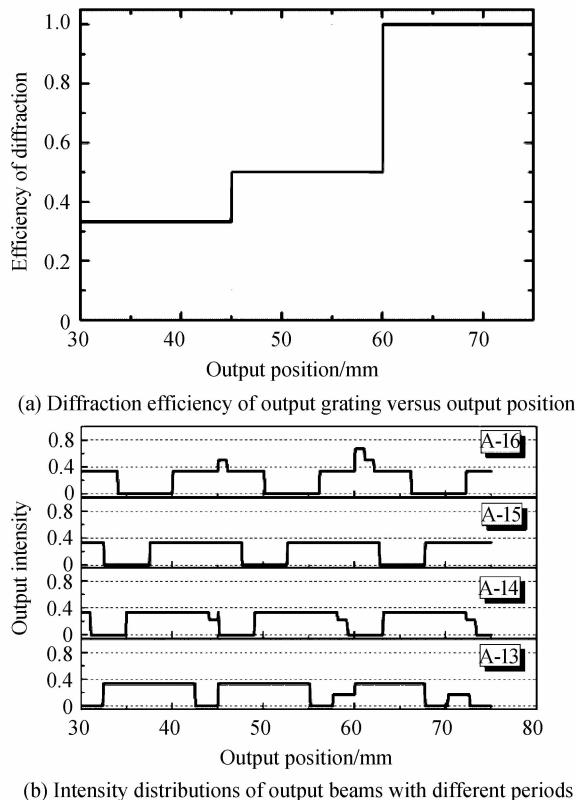


图 3 无分束膜时的光栅优化

Fig. 3 Optimization of gratings without beam splitting film

为  $1/3, 1/2, 1$ , 衍射效率分布如图 3(a)所示, 中心及其它几个视场光束的输出光强分布如图 3(b)所示. 部分区域的输出光强为 0, 存在暗区, 由均匀性定义可知, 整个视场范围内均匀度为 0.

这种暗区的存在是由于光束在波导内的传输周期大于入射光束宽度时, 光束在输出光栅区出现缝隙所致. 这会导致观察时出现图像不连续或图像闪烁现象. 为了解决此问题, 在输入区和输出区之间增加采用一层或多层半透半反膜的分束区. 使光束的传输周期减小. 当传输周期小于光束宽度时, 相邻输出光束之间的缝隙消失, 暗区消失, 但这通常伴随着光束重叠的现象. 以单层分束膜为例, 由特征光线确定的输出光栅衍射效率分布如图 4(a)中的实线所示. 由此可计算视场范围内输出光强分布, 并由均匀性定义得到整个输出视场内的均匀度和输出效率如图 4(b)中的实心方点和空心方点所示. 根据前述规则, 每重光栅对应于视场的中心视场均匀度最高, 为 1, 由中心视场到边缘视场均匀度逐渐降低, 均匀度最低时仅为 13%, 输出效率在 80% 左右.

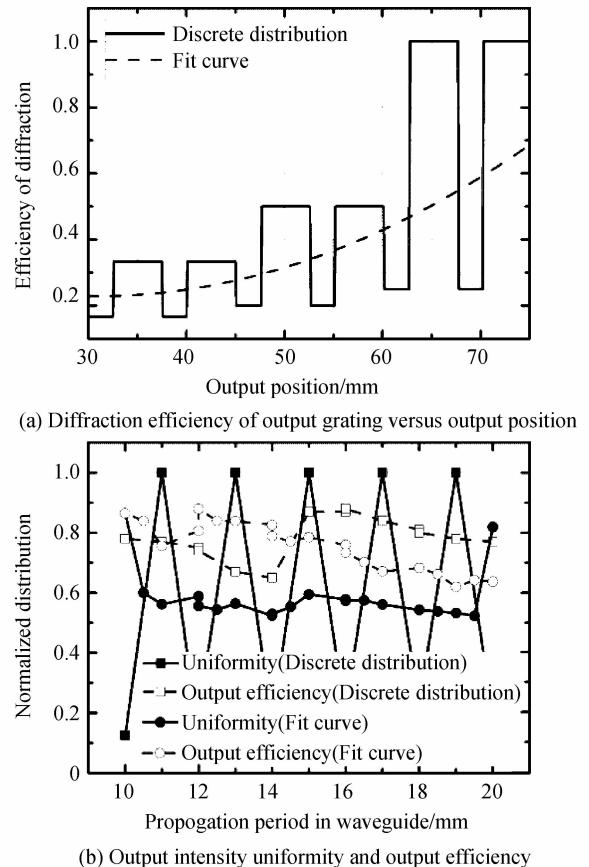


图 4 有分束膜时的光栅优化

Fig. 4 Optimization of gratings with beam splitting film

上述方法获得的均匀性有所提高, 但仍然处于较低的水平. 为了进一步提高输出光强均匀性, 需对输出光栅衍射效率分布进行优化. 具体方法是, 对离散型衍射效率分布曲线进行拟合, 得到连续递增的衍射效率

分布曲线,如图4(a)中的虚线所示.在此衍射效率分布下,计算得到输出光强分布,并进一步计算出整个视场内的输出光强均匀性和输出效率,结果分别如图4(b)中的实心圆点和空心圆点所示.

通过优化光栅衍射效率,在整个视场范围内最小均匀性提升到52.4%.与优化前相比短周期输出效率有所增加,长周期输出效率有所降低,整体水平相当.

实验中通常采用全息曝光的方法在重铬酸盐明胶板上制作光栅.影响光栅衍射效率的主要因素有曝光强度、曝光时间、曝光光束的条纹对比度以及后期的物理化学处理工艺参量等.实验中可针对明胶板的不同区域,进行不同强度的曝光或不同时间的曝光来实现衍射效率的控制.另外,后期的处理工艺中也可以通过调节处理参量来控制衍射效率.衍射效率的控制范围约为0到90%.

## 2.2 输出光栅位置和尺寸优化

当多重光栅位置完全重合时,光栅长度 $L$ 与出瞳范围 $S$ 之间的几何关系如图2所示.由于使用距离 $D$ 远大于光栅至波导表面的距离 $d$ ,因此输出光栅长度可近似表示为

$$L = S + 2D \tan \alpha \quad (5)$$

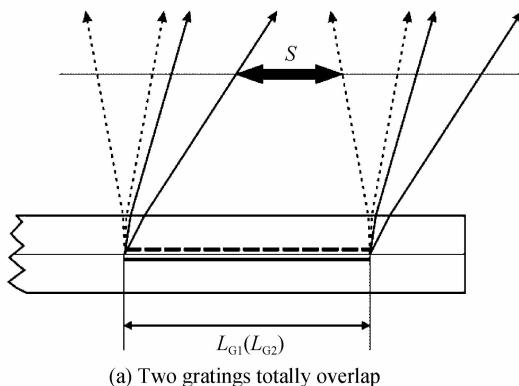
式中, $\alpha$ 为空气中的视场角.

衍射输出的光束只有进入到 $S$ 区域内才能成为有效衍射,其余光束无法进入该区域形成泄漏.能量泄漏率约为

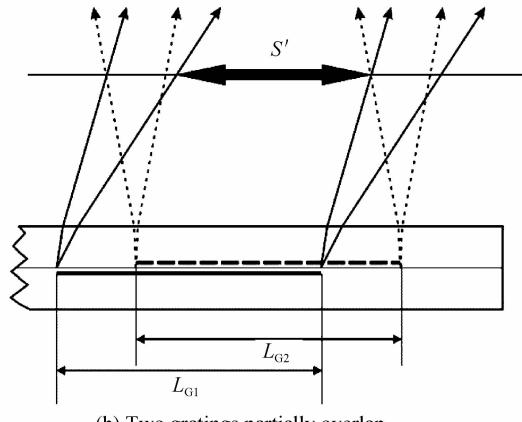
$$\eta = 1 - \frac{S}{L} = \frac{2D \tan \alpha}{S + 2D \tan \alpha} \quad (6)$$

当使用距离 $D=25$  mm,出瞳 $S=30$  mm,空气中视场角 $\alpha=15^\circ$ 时,计算得到光栅长度为43.4 mm,能量泄漏约为30%.

由于每一重光栅的衍射角带宽对应一个子视场范围,可以把每一重光栅的位置错开一定距离,使各自视场范围内光束经过衍射后尽量多地进入出瞳区域,以减少光栅的无效衍射,提高能量利用率.图5中虚线和实线所表示的光线分别表示中心子视场范围和左边边缘子视场范围,对应于不同子视场的输出光栅位置相互错开一定距离后(图5(b)),出瞳范围 $S'$ 明显比完全重叠时 $S$ (图5(a))增大了.



(a) Two gratings totally overlap



(b) Two gratings partially overlap

图5 多重光栅位置优化的输出效果

Fig. 5 Output effect of location optimization for multiplex gratings

为了获得最优输出效率,需要对光栅位置和尺寸进行优化,即找出一组表示多重光栅中每一重光栅位置和尺寸的数据,该组数据能够使输出效率达到最大值(或使能量泄漏率最小).仍然采用物理分析的方法进行优化.

为了计算每一重光栅需要错开的最佳距离,考虑第 $j$ 个子视场范围与相应输出光栅和出瞳位置的几何关系,如图6.该子视场范围为 $[\alpha_j, \alpha_j + \theta/m]$ , $m$ 为光栅

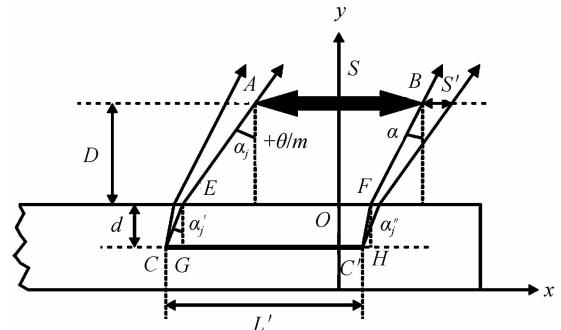


图6 在 $[\alpha_j, \alpha_j + \theta/m]$ 角带宽范围内的光栅位置

Fig. 6 Location of the grating with angle bandwidth in  $[\alpha_j, \alpha_j + \theta/m]$

重数, $\theta$ 为全视场角,光栅的左边缘位置 $C$ 由视场角 $\alpha_j + \theta/m$ 确定,光栅的右边缘位置 $C'$ 由视场角 $\alpha_j$ 确定.根据图中的几何关系,计算光栅左边缘 $C$ 处横坐标 $x$ ,即

$$|x| = |OE| + |CG| = \frac{S}{2} + D \tan(\alpha_j + \theta/m) + d \tan \alpha_j' \quad (7)$$

右边缘 $C'$ 处横坐标 $x'$ 为

$$|x'| = |OF| - |C'H| = \frac{S}{2} - D \tan \alpha_j - d \tan \alpha_j'' \quad (8)$$

对于右视场,其与左视场对称,对于视场角范围为 $[-\alpha_j, -\alpha_j - \theta/m]$ 的左视场,其光栅的右边缘位置与式(7)中得到 $x$ 的大小相同,符号相反.左边缘位置与式(8)中得到的 $x'$ 的大小相同,符号相反.

第  $j$  重光栅长度  $L'_j$  为

$$L'_j = S + D[\tan(\alpha_j + \theta/m) - \tan \alpha_j] \quad (9)$$

第  $j$  重光栅对应子视场未进入出瞳的部分为

$$S'_j = D[\tan(\alpha_j + \theta/m) - \tan \alpha_j] \quad (10)$$

则能量泄漏率为

$$\eta' = \frac{S'_j}{L'_j} = \frac{[\tan(\alpha_j + \theta/m) - \tan \alpha_j]}{[\tan(\alpha_j + \theta/m) - \tan \alpha_j] + S/D} \quad (11)$$

当光栅重数  $m$  为奇数时,中心视场衍射光栅的角带宽为  $[-\theta/(2m), \theta/(2m)]$ ,其位置的计算方法和能量泄漏与其它角带宽略有不同,中心视场衍射情况如图 7. 为了能在出瞳边缘  $A$  和  $B$  处观察到所有视场,光栅的左边缘和右边缘分别位于  $C$  和  $C'$  处. 由图 7 中可以看到,  $C$  和  $C'$  关于  $y$  轴对称,因此只计算  $C$  点位置.

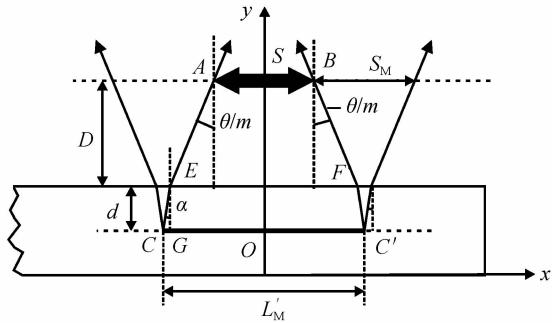


图 7 光栅为奇数重时,中心光栅的位置

Fig. 7 Location of center grating with odd number gratings

由图 7 的几何关系,可以得到光栅左边缘位置为

$$|x| = |OE| + |CG| = \frac{S}{2} + D \tan\left(\frac{\theta}{2m}\right) + d \tan \alpha \quad (12)$$

右边缘位置坐标与左边缘位置坐标大小相等,符号相反.

对应光栅长度为

$$L_M = S + 2D \tan \frac{\theta}{2m} \quad (13)$$

中心子视场范围内未进入出瞳部分为

$$S_M = 2D \tan \frac{\theta}{2m} \quad (14)$$

则能量泄漏率为

$$\eta_M = \frac{S'_M}{L_M} = \frac{\tan \theta/2m}{\tan \theta/2m + S/2D} \quad (15)$$

当使用距离  $D=25$  mm, 出瞳  $S=30$  mm, 光栅距波导上表面  $d=4$  mm, 介质折射率  $n=1.52$ , 分别计算了五重和六重光栅的光栅位置和能量泄漏率, 结果如图 8. 可以看出, 五重和六重光栅经过位置优化后, 能量泄漏率从优化前的 30% 下降到 8% 和 7% 左右. 随着光栅重数的增多, 能量泄漏率进一步下降.

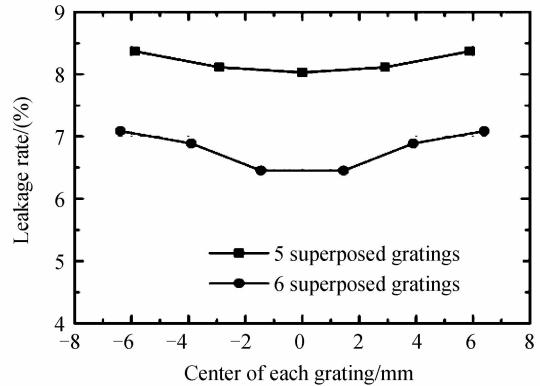


图 8 五重和六重光栅的能量泄漏率

Fig. 8 Leakage rate of 5 and 6 superposed gratings

### 3 结论

全息波导显示系统在扩展成像过程中,由于光束在输出光栅上经历多次衍射,输出光强逐渐减弱,降低了系统的输出均匀性. 来自无效衍射区域的光束没有进入出瞳,降低了系统的能量利用率. 本文以特征光线的均匀输出为基准,通过对全息波导结构和输出光栅衍射效率的位置分布进行优化,输出光强的均匀性得到显著提高,最小均匀性由 13% 提升到 53.4%. 另外本文分析了出瞳尺寸和使用距离与输出光栅利用率之间的关系,通过对多重光栅的尺寸和位置进行错位优化配置,有效减小了无效衍射区尺寸,提高了输出能量的利用率. 当采用错位优化的六重光栅用于图像输出时,能量泄漏率大约是未采用错位优化时的四分之一.

#### 参考文献

- [1] KRESS B, STARNER T. A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics [C]. SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2013: 87200A-87200A-13.
- [2] ZHANG Hui-juan. Optical system design of binocular head-mounted projective display with wide-field-of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1264-1267.  
张慧娟. 大视场双目头盔投影光学系统设计[J]. 光子学报, 2007, **36**(7): 1264-1267.
- [3] YANG Bo, WEI Xiao-na, ZHANG Wei, et al. Design method of a free-form HMD system with large pupil size [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1051-1054.  
杨波, 韦晓娜, 张薇, 等. 大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1051-1054.
- [4] WU Hai-qing, WANG Xue-jin, SUN Qiang, et al. Design of refractive/diffractive plastic optical system in head mounted display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2243-2246.  
吴海清, 王学进, 孙强, 等. 头盔显示器中折射/衍射塑料光学系统设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2243-2246.
- [5] WANG Q, CHENG D, WANG Y, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(7): C88-C99.

- [6] TANUMA K, SATO T, NOMURA M, *et al.* Comfortable design of task-related information displayed using optical see-through head-mounted display[C]. Human Interface and the Management of Information. Interacting with Information. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 419-429.
- [7] ZHENG Z, LIU X, LI H, *et al.* Design and fabrication of an off-axis see-through head-mounted display with an x-y polynomial surface[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(19): 3661-3668.
- [8] ROBERTS D C, SNARSKI S, SHERRILL T, *et al.* Soldier-worn augmented reality system for tactical icon visualization [C]. SPIE, 2012, **8383**: 838305 1-12.
- [9] HUANG Q, GILBERT J A. Diffraction properties of substrate guided-wave holograms[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(10): 2891-2899.
- [10] CAMERON A. Optical waveguide technology and its application in head mounted displays[C]. SPIE, 2012, **8383**: 83830E1-11.
- [11] CAMERON A. The application of holographic optical waveguide technology to the Q-Sight family of helmet-mounted displays [C]. SPIE, 2009, **7326**: OH1-OH11.
- [12] GURWICH I, WEISS V, EISEN L, *et al.* Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays[C]. SPIE, 2003, **5182**: 212-221.
- [13] EISEN L, MEYKLYAR M, GOLUB M, *et al.* Planar configuration for image projection [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(17): 4005-4011.
- [14] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909-2947
- [15] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.
- [16] 周海宪、程云芳. 全息光学[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [17] PENG Fei, YANG De-xing, ZHANG Pan, *et al.* Broaden the diffraction angular bandwidth of volume holographic grating by multiplex structures[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(9): 46-50.
- 彭飞, 杨德兴, 张攀, 等. 多重结构对体全息光栅衍射角带宽的拓展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, **50**(9): 46-50.