

## 全息波导板构型优化

刘玉杰<sup>1,2</sup>, 李文强<sup>2</sup>, 丁全心<sup>2</sup>, 闫占军<sup>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)

**摘要:** 经过理论分析和计算, 结合加工难度, 提出了对全息波导显示系统中全息波导板的优化方法。对 28° 圆视场、30 mm × 30 mm 系统出瞳的全息波导显示系统中的全息波导板进行了优化。输入全息光栅尺寸、分束膜尺寸和输出全息光栅尺寸分别为 5 mm × 30 mm, 30 mm × 30 mm 和 30 mm × 30 mm, 波导板材料、波导板厚度、上波导板厚度和下波导板厚度分别为 BaK7, 3 mm, 0.75 mm 和 2.25 mm 时, 能够满足所要求的全息波导显示系统视场和出瞳性能要求。通过优化得到的系统构型可以应用于全息波导头盔显示器、全息波导平视显示器等。

**关键词:** 全息波导显示; 全息光栅; 分束膜; 头盔显示器; 平视显示器

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0069-04

## Optimization of a Holographic Waveguide Plate

LIU Yu-jie<sup>1,2</sup>, LI Wen-qiang<sup>2</sup>, DING Quan-xin<sup>2</sup>, YAN Zhan-jun<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

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

**Abstract:** A new method for optimization of the holographic waveguide plate in a holographic waveguide display is proposed according to theoretical analysis, calculations and manufacture difficulty level. A waveguide plate for a holographic waveguide display system, with 28° field of view and a large exit pupil about 30 mm × 30 mm, is optimized by this method. The performances of this holographic waveguide display system can be satisfied by an input holographic grating of 5 mm × 30 mm, an output holographic grating of 30 mm × 30 mm, together with a glass (BaK7) waveguide of 3 mm thickness, which is divided into two waveguides, one has 0.75 mm thickness and another 2.25 mm, by the beam splitter. This configuration can be applied to a Head-Mounted Display (HMD) or a Head-Up Display (HUD).

**Key words:** holographic waveguide display; holographic grating; beam splitter; HMD; HUD

### 0 引言

自 1970 年文献 [1] 提出采用从全息基板边缘入射并沿平板传播的导波光记录和再现全息的方法以来, 全息波导技术受到了学术界的广泛关注, 并取得了快速发展。全息波导技术在诸多领域得到实际应用, 如平板显示<sup>[2-4]</sup>、背光照明<sup>[5]</sup>、光通信及光互联<sup>[6]</sup>、眼跟踪<sup>[7]</sup>等领域。

全息波导显示技术将波导的全反射特性和体全息光栅的衍射特性相结合, 可实现大视场、大出瞳图像输出。另外, 全息波导技术被应用于新一代头盔显示系

统中, 与采用传统光学系统的头盔显示系统相比, 整体质量和体积明显减小, 显示性能大幅提高, 安装调试和维护难度大大降低<sup>[8-9]</sup>。在全息波导显示系统中, 图像光波各视场光线经过中继光学系统后成为具有不同角度信息的平行光, 平行光在波导中以全反射的方式周期性传输, 不同视场光线因角度不同其传输周期也不同。为了减小图像源能量的损失, 耦合输入光栅须不小于中继出瞳的尺寸, 而当输入光栅大于光线传输周期时, 光线会出现二次衍射现象。当光瞳尺寸小于光线传输周期时, 在输出扩展过程中相邻周期输出的光束将不连续, 导致人眼在系统出瞳范围内观察时出现图像不连续现象。

由于全息波导显示系统的特殊性, 现有的光学设计软件不能很好地满足其优化需求, 各个研究单位只能通过自助编程等方法来实现全息波导系统构型的设

收稿日期: 2014-10-29

修回日期: 2014-11-26

作者简介: 刘玉杰 (1989—), 男, 河南林州人, 硕士生, 研究方向为全息光学。

计。2011年,文献[10]通过优化波导板折射率、厚度的关系,使光束在波导内传输周期逐渐减小,保证光瞳的连续性;2014年,文献[11]在波导系统中引入分束膜来消除扩展输出时图像的不连续现象。本文综合优化输入光栅、输出光栅及分光膜的位置与尺寸,在保证光线能量充分利用的基础上,实现 $28^\circ$ 圆视场 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 系统出瞳内连续成像。

## 1 全息波导显示基本原理

全息波导显示技术原理如图1所示,整个显示系统包括像源、中继光学系统和全息波导板3个部分,而全息波导板由波导板、耦合输入光栅、耦合输出光栅和分束膜等部分组成。

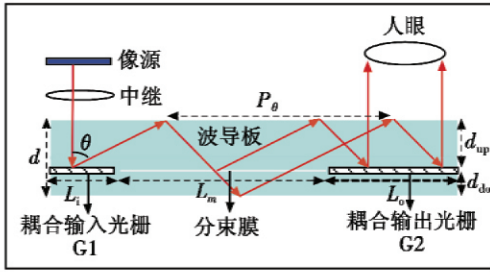


图1 全息波导显示技术原理图

Fig.1 The principle of holographic waveguide display technology

经过像源发出并携带图像信息的各个视场光线经过中继光学系统成为不同角度的平行光。耦合输入区域对平行光产生衍射作用,改变光束的传输方向,使其满足在波导中发生全反射的条件并在分束传输区域按照全反射方式向前传播。在分束传输区域,由于分束膜的分光作用,光束光瞳得到扩展。最后在耦合输出区域的衍射作用下,光线输出到人眼。

## 2 全息波导板构型优化

本文所要优化的全息波导显示系统视场定为 $28^\circ$ 圆,该视场是指自中继光学系统中发出的光线在空气中的发散角度。而具有一定角度的光线进入波导板后,其视场角度因折射作用会发生变化;光束经过光栅衍射后,其角度因衍射作用还会发生变化。本系统出瞳尺寸定为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ,根据全息波导显示原理,全息光栅对光束的衍射作用和分光膜、波导对各视场光瞳的扩展作用仅仅发生在水平方向,因此,根据系统出瞳的要求,可以直接给出耦合输入光栅和耦合输出光栅及分束膜竖直方向尺寸均为 $30\text{ mm}$ 。另外,由于中继光学系统属于比较简单的常规光学系统,可以由光学设计软件优化控制,因此,本文将着重研究全息波导板部分的优化。

如图2所示,假设耦合输入光栅、耦合输出光栅、

分束膜水平方向尺寸分别为 $L_i$ 、 $L_o$ 和 $L_m$ 。

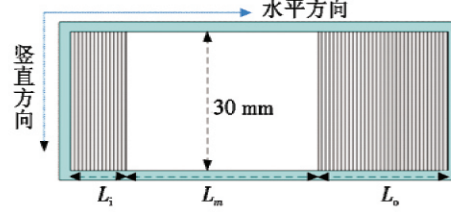


图2 全息波导板结构示意图

Fig.2 Schematic of a holographic waveguide structure

从图1中可以看到,波导板总厚度、上波导板厚度和下波导板厚度分别为 $d$ 、 $d_{up}$ 和 $d_{do}$ 。则在波导板中传播角为 $\theta$ 的光线分别对应于波导板、上波导板和下波导板的水平方向传播周期 $P_\theta$ 、 $P_{\theta_{up}}$ 和 $P_{\theta_{do}}$ ,分别为

$$P_{\theta_{up}} = 2d_{up} \tan \theta \quad (1)$$

$$P_{\theta_{do}} = 2d_{do} \tan \theta \quad (2)$$

$$P_\theta = 2d \tan \theta = 2(d_{up} + d_{do}) \tan \theta = P_{\theta_{up}} + P_{\theta_{do}} \quad (3)$$

为了方便优化,波导板厚度 $d$ 定为 $3\text{ mm}$ ,波导板使用折射率较高的BaK7( $n = 1.5689$ )玻璃,其全反射临界角为 $39.6^\circ$ 。由折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ,从中继光学系统发出的角度为 $\pm 14^\circ$ 的平行光线从空气中折射到玻璃波导板中,进入波导中角度变化为 $\pm 9.18^\circ$ 。经过折射后光束的发散角变小。折射进入波导中的光线受到耦合输入光栅的衍射作用,衍射光线角度遵守下式<sup>[12]</sup>,即

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{I} - \mathbf{C}) = m \frac{\lambda_c}{\lambda_o} (\mathbf{O} - \mathbf{R}) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为波导面法线向量; $\mathbf{I}$ 为衍射光单位矢量; $\mathbf{C}$ 为再现光单位矢量; $m$ 为衍射级次; $\lambda_c$ 为再现光波长; $\lambda_o$ 为物光波长; $\mathbf{O}$ 为物光单位矢量; $\mathbf{R}$ 为参考光单位矢量。耦合输入光栅记录时,选择物光入射角为 $0^\circ$ ,参考光入射角为 $127^\circ$ 。耦合输出光栅通常会采用与耦合输入光栅对称相反的方式记录,以补偿输入光栅对系统引入的色散<sup>[2]</sup>。根据衍射公式,角度范围为 $-9.18^\circ \sim +9.18^\circ$ 的入射光线被衍射后,角度范围变为 $39.7^\circ \sim 73.4^\circ$ ,大于波导中的全反射角,即中继发出的光线在波导中按照全反射的方式在水平方向上传播,传播的最大角度 $\theta_{\max} = 73.4^\circ$ ,最小角度 $\theta_{\min} = 39.7^\circ$ 。

### 2.1 耦合输入光栅

在全息波导显示系统的耦合输入区域,图像光线在耦合输入光栅上发生衍射,衍射光线在波导中按照全反射方式在水平方向传播。光线传播一个周期后,如果再次入射到耦合输入光栅上发生二次衍射,则衍射光线平行于相应的输入视场光线耦合输出。由于耦合输入光栅是高衍射效率光栅,这部分视场的图像光线能量几乎全部耦合输出。其结果会造成发生二次衍

射的相应视场的图像光线缺失,如图 3 所示,最终显示图像部分视场缺失,造成显示图像信息不完整。

为了避免各视场光线在耦合输入光栅上发生二次衍射现象,耦合输入光栅水平尺寸需要满足

$$L_i \leq \min \{ P_\theta \} = P_{\theta_{\min}} \approx 5 \text{ mm} \quad (5)$$

输入光栅水平尺寸代表着光束宽度,考虑到光线的连续性,选择  $L_i = 5 \text{ mm}$ 。

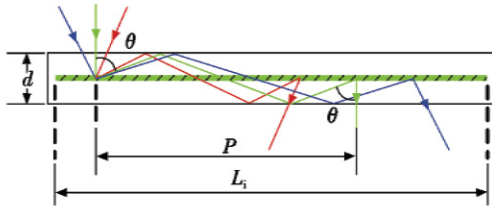


图 3 二次衍射现象示意图

Fig. 3 Schematic of double diffraction

### 2.2 分束膜

现在对分束膜的位置和尺寸进行优化,这也是研究的重点内容之一。如图 4a 所示,如果  $P_\theta \geq L_i$ ,则光线在波导中传输时会出现  $(P_\theta - L_i)$  的光瞳间隙,最后人眼观察时也必然会出现  $(P_\theta - L_i)$  的图像间隙。由式(5)可知,各个角度光线在波导中传输时必然会出现光瞳间隙。上述分析表明,如果不在波导中加入特殊元件,消除二次衍射现象和观察到连续的图像是不可协调的矛盾。为了消除各个视场光线光瞳之间的间隙,实现各离散光瞳之间的拼接,形成满足系统出瞳的扩展光瞳,需要  $P_\theta \leq L_\theta$ 。其中,  $L_\theta$  是传输角为  $\theta$  的光瞳尺寸,需要满足

$$L_i \leq P_{\theta_{\min}} \leq P_\theta \leq L_\theta \leq P_{\theta_{\max}} \leq L_{\theta_{\max}} \quad (6)$$

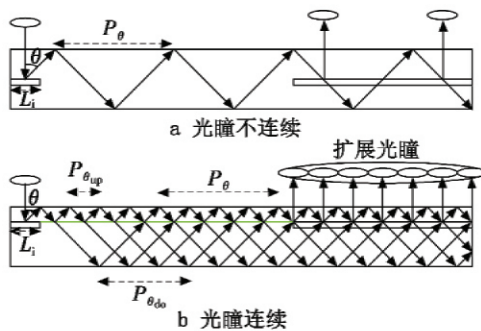


图 4 光瞳连续和不连续示意图

Fig. 4 Principles of continuous pupil and discontinuous pupil

如图 4b 所示,本文采用分束膜分割波导的方式实现光瞳的扩展,分束膜将厚度为  $d$  的波导分隔为  $d_{up}$  和  $d_{do}$  厚度的上波导板和下波导板,则传输角为  $\theta$  的光线在波导中传播时有效入射(被上表面反射后向下入射)到分束膜的水平位置如表 1 所示,其中,  $n$  和  $m$  分别为 0,1,2,3,4 等。事实上,只要将下表中位置按从小到大的顺序排列,每两个位置之间最大差值不大于

光束宽度  $L_i$  即可。

表 1 光线有效入射到分束膜的位置

Table 1 The effective locations of beam splitter covered by rays

$P_{\theta_{up}} + mP$	$2P_{\theta_{up}} + mP$	...	$nP_{\theta_{up}} + mP$
$P$	$2P$	...	$mP$
$P_{\theta_{do}} + (m+1)P$	$2P_{\theta_{do}} + (m+1)P$	...	$nP_{\theta_{do}} + (m+1)P$

$$\frac{L_{\theta_{\max}}}{L_i} \geq \frac{P_{\theta_{\max}}}{P_{\theta_{\min}}} = \frac{\tan \theta_{\max}}{\tan \theta_{\min}} = 4 \quad (7)$$

式(7)表明,传输角为  $\theta_{\max}$  的光线需要的光瞳最大,是光束宽度的 4 倍。如果能够保证消除传输角为  $\theta_{\max}$  的光线光瞳间隙,其他角度光线光瞳间隙也必然被覆盖。从表 1 中的第一行位置数据可知,令  $P_{\theta_{up}} \leq L_i$ ,即可实现表 1 中相邻两位置之间最大差值不大于  $L_i$ ,但是考虑到加工工艺,应当尽量选择上下波导板厚度差最小。综合上述要求,使用 Matlab 软件计算得出  $P_{\theta_{up}} = L_i = 5 \text{ mm}$ ,利用式(1)~(3),分束膜将厚度为 3 mm 的波导板分割为 0.75 mm 和 2.25 mm 的上波导板和下波导板。传输角为  $\theta_{\max}$  的光线能够实现光瞳连续时,根据式(1),其他较小传输角的光线自然满足  $P_{\theta_{up}} \leq L_i$ ,也就是说,此时分束膜的位置能够消除各个视场光线的光瞳间隙,实现光瞳的扩展。

### 2.3 耦合输出光栅

系统出瞳为 30 mm 的性能要求决定耦合输出光栅水平尺寸为 30 mm,进一步要求各个视场光线扩展光瞳不小于 30 mm。根据 2.2 节的分析,分束膜的水平尺寸决定了扩展光瞳的大小,因此分束膜水平尺寸选择 30 mm。

## 3 结论

本文经过理论分析和计算,结合加工难度,提出了全息波导显示系统中全息波导板的优化方法。使用该优化方法,针对 28°圆视场、30 mm × 30 mm 系统出瞳的全息波导显示系统,对全息波导板进行了优化。输入全息光栅尺寸、分束膜尺寸和输出全息光栅尺寸分别为 5 mm × 30 mm,30 mm × 30 mm 和 30 mm × 30 mm,波导板材料、波导板厚度、上波导板厚度和下波导板厚度分别为 BaK7,3 mm,0.75 mm 和 2.25 mm 时,能够满足所要求的全息波导显示系统视场和出瞳性能要求。本文通过优化得到的系统构型为高性能全息波导显示系统的实现提供了依据,为全息波导显示系统的工程化提供了理论指导。

### 参考文献

[1] LIN L H. Edge-illuminated hologram[J]. Journal of the

- Optical Society of America, 1970, 60:714.
- [2] EISEN L, MEYKLYAR M, GOLUB M, et al. Planar configuration for image projection[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17):4005-4011.
- [3] 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.
- [4] 王彦, 康明武, 闫占军, 等. 双次棱镜耦合输入全息波导显示系统设计[J]. *电光与控制*, 2014, 21(4):73-76. (WANG Y, KANG M W, YAN Z J, et al. Design of a holographic waveguide display system using twice prism coupled input[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(4):73-76.)
- [5] PUTILIN A N, BORODIN Y P, CHERNOPIATOV A V. Waveguide holograms in LCD illumination units [C]//SPIE, 2001, 4511:144-148.
- [6] WANG M R, SONEK G J, CHEN R T, et al. Large fanout optical interconnects using thick holographic gratings and substrate wave propagation [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(2):236-249.
- [7] 闫占军, 李文强, 周拥军, 等. 全息波导技术在眼跟踪系统中的应用研究[J]. *电光与控制*, 2011, 18(12):61-65. (YAN Z J, LI W Q, ZHOU Y J, et al. Application of waveguide holography in eye-tracking system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(12):61-65.)
- [8] CAMERON A. The application of holographic optical waveguide technology to Q-Sight™ family of helmet mounted displays [C]// SPIE, 2009, 7326: 73260H-1-73260H-11.
- [9] HOMAN M. The use of optical waveguides in Head Up Display (HUD) applications [C]//SPIE, 2013, 8736: 87360E-1-87360E-14.
- [10] BAKER I A, HANDEREK V A. Waveguides; United States, 20110026128A1 [P]. 2013-02-05.
- [11] 张攀, 杨德兴, 徐健, 等. 全息波导显示中输出扩展光栅的衍射效率分布分析[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(5):703-708. (ZHANG P, YANG D X, XU J, et al. Analysis on diffraction efficiency distribution of output extended grating in holographic waveguide display system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5):703-708.)
- [12] 周海宪, 程云芳. 全息光学——设计、制造和应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006:78-81. (ZHOU H X, CHENG Y F. *Holographic optics—design, manufacture and applications* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:78-81.)

(上接第 58 页)

### 参 考 文 献

- [1] 刘辉, 张复春, 姜斌, 等. 频率选择性衰落 MIMO 信道容量分析[J]. *电讯技术*, 2010, 50(1):15-20. (LIU H, ZHANG F C, JIANG B, et al. Analysis of MIMO channel capacity under frequency selective fading[J]. *Telecommunication Engineering*, 2010, 50(1):15-20.)
- [2] PANDE T, LOVE D J, KROGMEIER J V. Reduced feedback MIMO-OFDM precoding and antenna selection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5):2284-2293.
- [3] MA S D, NG T S. Time domain signal detection based on second order statistics for MIMO-OFDM systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(3):1150-1158.
- [4] SHIN C Y, HEATH R W, POWERS E J. Blind channel estimation for MIMO-OFDM systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(2):670-685.
- [5] GAO F F, NALLANATHAN A. Subspace-based blind channel estimation for SISO, MISO and MIMO OFDM systems [C]//IEEE Communications Society Subject Matter Experts for Publication in the IEEE ICC Proceedings, 2006:3025-3030.
- [6] GAO F F, NALLANATHAN A. A simple subspace-based blind channel estimation for OFDM systems [C]//IEEE Communications Society Subject Matter Experts for Publication in the WCNC Proceedings, 2006:1515-1518.
- [7] LI Y, SESHADRI N, ARIYAVISTAKUL S. Channel estimation for OFDM systems with transmitter diversity in mobile wireless channels[J]. *IEEE J Select Areas Communication*, 1999, 17(3):461-471.
- [8] LI Y. Simplified channel estimation for OFDM systems with multiple transmit antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(1):67-75.
- [9] CHEN R, LETAIEF K B. Channel estimation for space-time coded OFDM systems in non-sample-spaced multipath channels[C]//IEEE WCNC2002, 2002:61-66.
- [10] BARHUMI I, LEUS G, MOONEN M. Optimal training sequence for channel estimation in MIMO OFDM systems in mobile wireless channels[C]//International Zurich Seminar on Broad-Band Communications, Access, Transmission, Networking, 2002:270-275.
- [11] JEON W G, PAIK K H, CHO Y S. An efficient channel estimation technique for OFDM systems with transmitter diversity [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2001, 4:967-974.