

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1150-03

# 用二元光学技术制作计算全息波面变换元件

张 良 史云飞

(洛阳电光设备研究所, 洛阳 471009)

摘要: 基于计算全息原理与二元光学技术设计制作了应用于机载平视显示器(HUD)中的计算全息波面变换元件。该元件具有较高的衍射效率, 一块二元相位型计算全息元件的衍射效率比一般计算全息图的衍射效率提高了四倍, 并能产生传统光学元件不能实现的光学波面, 如非球面、环状面和锥面等。制作工艺简单, 复制简便。

关键词: 二元光学技术; 计算全息; 平视显示器; 衍射效率

中图分类号: TH74 文献标识码: A

## 1 引 言

目前, 世界上最先进的第四代战斗机(美国的 F-22 和英国的 EF-2000)所装备的第二代衍射平显系统均应用了计算全息技术, 而我国最先进的衍射平显系统还未应用该项技术。平视显示器简称平显, 是一种为驾驶员显示飞行信息的光电装置, 飞行信息叠加在外景上, 当观察外景时即可看到飞行信息而无需在座舱内部再聚焦或下视。

在平显光学系统的加工过程中, 需要一块复合非球面反射镜。由于非球面反射镜的制作加工十分困难, 而且面型有限。计算全息是利用数字计算机来综合的全息图, 它不需要物体的实际存在, 而是把物波的数学描述输入计算机处理后, 控制绘图仪输出或阴极射线显像管显示而制成的全息图<sup>[1]</sup>。计算全息图在原理上可以生成任意波面, 因此, 可以用计算全息图来代替非球面反射镜生成所需的光学波面<sup>[2]</sup>。但是, 计算全息图的衍射效率很低, 理论值仅为 10.13%, 很难在实际中得到应用。本文提出了计算全息编码原理和二元光学制作技术相结合的方法, 使该计算全息元件不但能实现波面变换, 而且具有较高的衍射效率, 理论值为 40.5%。

## 2 二元光学技术原理

二元光学技术是指基于光波的衍射理论, 利用计算机辅助设计, 并利用超大规模集成(VLSI)电路制作工艺, 在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生两个或多个台阶深度的浮雕结构, 形成纯相位、同

轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件<sup>[3,4]</sup>。根据衍射理论, 其衍射效率为

$$\eta = |\sin(\pi/L) \cos(\pi/L)|^2,$$

式中  $L$  为相位阶数,  $L = 2^N$ ,  $N$  为掩模版个数。最简单的制作方法是刻蚀一次, 得到两个相位阶数。其衍射效率为 40.5%, 是一般振幅型计算全息元件衍射效率的 4 倍。这种二值型相位元件虽然制作工艺简单, 但由于同轴再现, 在使用时将在光轴上产生多个衍射级的焦点, 使所设计的波面受到其它衍射级的干扰。为解决这一难题, 本文采用了计算全息干涉图的编码方法。即用一离轴的平面光波作为载波, 将波面函数信息加载在载波上。再现时将离轴再现, 各级衍射光将沿不同方向传播, 一级衍射光(设计波面)不受其它级次衍射光的影响。

## 3 计算全息元件的设计

### 3.1 波函数的求取

用计算全息图产生所需要的波面, 首先必须求出波函数的数学表达式。

根据光线追迹的方法和反射定律, 可以求出从非球面反射镜出射光线的方向余弦和空间点坐标。

设波函数为  $\varphi(x, y, z)$ , 可以求得其上任意一点  $(x, y, z)$  处的法线方向即出射光线方向余弦  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , 利用方向余弦和波函数之间的关系式

$$\alpha = -\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial x},$$
$$\beta = -\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial y},$$

就可以用最小二乘法拟合出波函数。拟合出的  $z = 0$  平面上的波函数可以用如下多项式表示:

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^{60} C_k x^m y^n,$$

其中,  $k = \frac{[(m+n)^2 + m + 3n]}{2}$ ,  $C_k$  为多项式系数,  $m = 0, 1, 2, \dots, n = 0, 1, 2, \dots$

### 3.2 波函数的编码

本文采用计算全息干涉图原理进行编码,即用一离轴的平面光波作为载波,将波函数的信息加载在载波上。

根据计算全息干涉图的原理,所要记录的波函数即为多项式  $\varphi(x, y)$ ,与一沿  $y$  轴成  $\alpha$  角传播的平面光波干涉,其全息图透过率为<sup>[11]</sup>

$$h(x, y) = \left| \exp[i2\pi y(\sin\alpha/\lambda)] + \exp[i\varphi(x, y)] \right|^2 = 2\{1 + \cos[2\pi y(\sin\alpha/\lambda) + \varphi(x, y)]\}.$$

由上式可求出干涉条纹透过率最大值与最小值的位置分别为

$$2\pi y(\sin\alpha/\lambda) - \varphi(x, y) = 2\pi n,$$

$$2\pi y(\sin\alpha/\lambda) - \varphi(x, y) = 2\pi\left(n + \frac{1}{2}\right)$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

载频  $1/T$  为

$$1/T = \sin\alpha/\lambda.$$

为避免一级衍射波和二级以上的衍射波发生重叠,应有

$$1/T \geq 1.5B_y,$$

$$B_y = 2\nu_y,$$

$$\nu_y = \frac{-1}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right|_{\max},$$

其中,  $B_y$  为沿  $y$  轴方向的带宽,  $\nu_y$  为最大空间频率。计算全息图一般记录成二值(0, 1)振幅型全息图,故其衍射效率很低,难以在工程中得到应用。采用二元光学元件的制作工艺,将其制成两台阶(两个相位等级  $0, \pi$ )相位型计算全息元件,其衍射效率可达到 40.5%,衍射效率是振幅型计算全息图的 4 倍,并解决了多级衍射波相混叠的现象。

### 3.3 掩模版的设计

本文制作二台阶相位型计算全息元件,因此,只需制作一块掩模版。掩模的设计就是根据掩模表面的图形方程,将对曝光区域的数学描述生成数据文件控制记录设备进行制作。由于掩模是二元振幅图形,只需给出曝光点(要刻蚀掉的区域)的数据即可。

根据条纹方程生成可被记录设备接受的数据文

件,控制制作设备进行制作。最终制得的二元相位型计算全息元件的各项技术指标如下所示:

尺寸	10 mm × 10 mm
空间带宽积	$8.8 \times 10^5$
最小条纹宽度	$3.8 \mu\text{m}$
最大条纹宽度	$4.1 \mu\text{m}$
衍射效率	40.5%
记录条纹数	130 l/mm

## 4 测试实验

本文是根据计算全息干涉图原理对波面进行的编码,因此,对元件的测试工作也将基于这一原理。测试光路如图 1 所示。

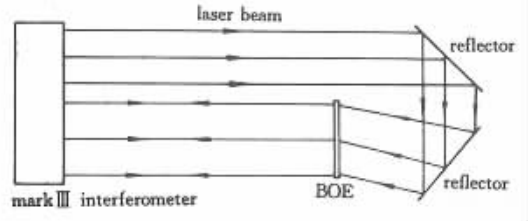


Fig.1 Experimental setup

利用迈克耳孙 III 型干涉仪拍摄得到的干涉图和计算机模拟得到的干涉图如图 2 所示。

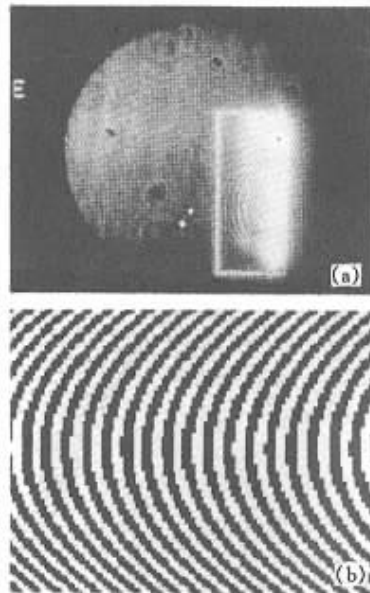


Fig.2 (a) Experimental results ;(b) Computer simulation results

实验结果表明,该二元相位型计算全息元件确实能起到复合非球面反射镜的作用,实现了预期的功能。实验中测得该元件的衍射效率为 31.9%。在现有工艺制作误差范围之内,与理论值一致,比振

幅型计算全息元件的衍射效率的理论值提高了 3 倍,较大地提高了激光光能的利用率。

结论 利用计算全息编码技术和二元光学制作技术相结合的方法制作的二元相位型计算全息元件,不仅解决了纯二元光学元件多级次衍射光相互干扰而使再现质量下降的问题,而且解决了纯计算全息元件一级衍射效率低不能有效地利用光能的问题。此外,计算全息元件制作工艺简单、复制方便,是一个替代复合非球面反射镜的理想元件。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 虞祖良,金国藩. 计算机制全息图. 北京:清华大学出版社,1984
- [ 2 ] Bartlett C T. A practical application of Computer-generated holography to head-up display design. *Displays*, 1994, 15 ( 2 ):124 ~ 130
- [ 3 ] 金国藩,严瑛白,鄢敏贤. 二元光学. 北京:国防工业出版社,1998
- [ 4 ] 辛企明,孙雨南,谢敬辉. 近代光学制造技术. 北京:国防工业出版社,1997

## Computer Generated Holography Wavefront-Transforming Element Fabrication by Binary Optical Technique

Zhang Liang Shi Yunfei

( *The Electro-Optical Equipment Research Institute of Luoyang*, Luoyang 471009 )

( Received 7 June 2000 ; revised 16 August 2000 )

**Abstract :** A computer generated holography ( CGH ) wavefront-transforming element is designed and fabricated based on computer generated hologram and binary optical technique and is applied in head-up display. Its diffraction efficiency is very high. The diffraction efficiency of a two-phase CGH is four times higher than that of a general CGH. It can generate special optical wavefront, such as aspheric surface, ring-shaped surface, cone-shaped surface and so on, which the traditional optical elements can not generate. Moreover, the fabrication and duplication techniques of CGH are simple and convenient.

**Key words :** binary optical technique ; computer generated hologram ; head-up display ; diffraction efficiency