

用于光纤传像束的折—衍混合光学耦合器研究

李东源¹ 闫秀生² 张晓光² 侯蓝田¹ 周桂耀¹ 印 铁²

(1 燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

(2 东北电子技术研究所, 锦州 121000)

摘 要 在光学耦合器设计中引入衍射面, 根据衍射光学元件的三级像差理论, 分析了衍射面初始结构参数的求解规律, 通过理论计算和 ZEMAX 光学软件的优化, 给出工作波长 0.4~0.7 μm, 焦距 27.5 mm, 光学长度为 64 mm, 采用一个衍射面的耦合器设计实例. 该耦合器适用于单丝直径 16 μm, 截面直径为 6 mm 的光纤传像束. 对设计结果的分析表明, 折—衍混合耦合器不仅在光学性能方面优于传统的光学耦合器, 而且在尺寸和重量上有非常显著的减少.

关键词 二元光学; 光纤传像束; 光学耦合器; 折—衍混合

中图分类号 O438; O439 **文献标识码** A

0 引言

光纤传像束(简称传像束)是一种可任意弯曲的传输图像的无源器件. 它与传统的光学成像器件相比: 具有传像特性优良; 使用空间自由度大、重量轻、易实现复杂空间结构的图像传递; 在强电磁干扰、高温有腐蚀的场合工作; 能够优化光路设计, 使整机结构新颖, 技术性能大幅度提高. 由于其特有的不可替代的特性, 被广泛应用于医学、工业、科研、军事等众多领域^[1~4]. 典型的传像束光学系统主要包括工业或医用内窥镜, 一般由前置物镜, 传像束, 目镜(耦接镜)等组成. 通过光学物镜把目标成像于传像束的一个端面上, 该端面上的图像可以看作是由许多亮度不等的像元所组成. 每根光纤都有良好的光学绝缘, 在独立的传光过程中携带着一个像元, 像元的数目等于端面上光纤的根数. 传像束两端面的光纤呈一一对应的排列, 因此出射图像和入射图像基本一致, 出射图像通过目镜(耦接镜), 供人眼直接观察或者耦接 CCD 监视^[4].

随着 CCD 成像技术和大截面光纤传像束技术的发展, 在某些特殊的应用场合(例如对特定光信号进行观察和测量), 传像束光学系统得到了应用^[5,6]. 在此类应用中, 为了提高系统成像质量, 同时减小系统的体积和重量, 必须对其光学耦合系统进行优化设计. 衍射光学元件(二元光学位相透镜)具有不同于折射元件的色散特性, 可同时纠正球差和色差, 与传统的折射元件组成的折—衍混合光学系统, 增加了光学设计过程中的自由度, 在改善成像质量、减小系统的体积和重量以及降低成本等方面具有传统光学系统无法比拟的优势^[7,8]. 考虑到国内衍射透镜

加工工艺条件, 因此设计带有衍射面单透镜来代替双胶合透镜, 构成折衍混合光学系统.

1 折—衍混合光学耦合系统初始结构的设计原理

1.1 带有衍射面的单透镜结构形式的确定

带有衍射面的单透镜对应的三级像差系数(光阑密接透镜)可表示为

$$S_I = \frac{y^4 \Phi^3}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} B^2 + \frac{4(n+1)}{n(n-1)} BC + \frac{3n+2}{n} C^2 \right] \quad (1)$$

$$S_{II} = -\frac{y^2 \Phi^2 H}{2} \left[\frac{n+1}{n(n-1)} B + \frac{2n+1}{n} C \right] \quad (2)$$

$$S_{III} = H^2 \Phi \quad (3)$$

$$S_{IV} = H^2 \Phi / n \quad (4)$$

$$S_V = 0 \quad (5)$$

式中所有符号意义及正负号规定均遵循维尔福德(Welfud)的约定, H 为拉式不变量, C 为共轭系数, B 为弯曲系数. 由式(1)、式(2)可知, 当弯曲系数 $B=1$ 时, 像差系数 S_I 、 S_{II} 正负项相消, 具有较小的球差和彗差, 故选择平凸基底结构形式, 以使得初始的基底像差最小, 减小衍射面消像差的负担, 便于进行像差校正.

1.2 衍射面相位系数的确定

通常设旋转对称二元光学衍射面的相位函数为

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + \dots) \quad (6)$$

若对于波长为 λ , 衍射级次为 m (不特别指明, 一般取 $m=1$) 设计衍射光学器件, 则相位函数中的二次相位系数 A_1 由傍轴光焦度 φ 决定

$$\varphi = -2mA_1 \quad (7)$$

式(1)中 $\Phi = \Phi_{ref} + \Phi_{dir}$, 因衍射面分担的光焦度占总

光焦距的比例很小,故第一项 Φ_{dif} 很小可略去. 折衍混合器件消球差则可得

$$\sum S_1 = \frac{y^4 \Phi_{ref}^3}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right] - 8mA_2y^4 = 0 \quad (8)$$

由式(8)可以确定四次相位系数 A_2 的初始取值. 衍射面的其它相位系数 A_3 、 A_4 、 A_5 等为光学设计提供了新的自由度,可以通过光线追迹,计算出对应不同孔径带的球差,然后可求出系统的波像差函数

$$W = \int_0^y -\Delta L \frac{y}{f^2} dy = B_1y^2 + B_2y^4 + B_3y^6 + B_4y^8 + B_5y^{10} + \dots \quad (9)$$

故取 $A_3 = -B_3$, $A_4 = -B_4$, $A_5 = -B_5$ 作为初始参量.

2 设计结果和衍射面光学参量的讨论

2.1 设计结果

一般要求传像束出射图像与 CCD 光敏面之间 1:1 耦合,因此耦接 CCD 的光学系统一般采用双高斯结构,图1是一种典型的双高斯光学耦接系统. 实验设计的系统,工作波段为 0.4~0.7 μm ,焦距 27.5 mm,视场(物高)为 6 mm. 首先将图 1 中的双胶合透镜由一个折一衍单透镜代替,一般设计折衍混合透镜时,只选一个面为衍射面,这样可以使系统具有较高的光能利用率,且杂散光较少,对于克服“鬼像”和提高像质十分有利. 根据相位系数的求解方法,确定 A_1 、 A_2 、 A_3 、...后,得到折衍单透镜的初始结构形式,然后在不改变系统的有效焦距情况下,采用 ZEMAX 光学设计软件进行优化,最终的设计结果如表 1. 图 2 是折一衍混合系统的结构示意图,光阑后第一个透镜的后表面是衍射光学面. 图 3、4 分别是传统的双高斯远心耦接光学系统和折一衍混

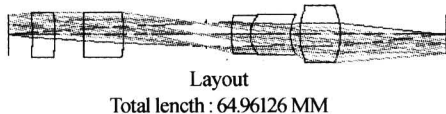


图 1 双高斯耦接光学系统
Fig. 1 Layout of gauss lens without diffractive surface

表 1 耦接器光学参量

焦距	27.5 mm
视场(物高)	6 mm
后工作距离	20 mm
光学长度	64 mm
物方数值孔径	0.1
玻璃总厚度	13.2 mm
光学外径	7.7 mm

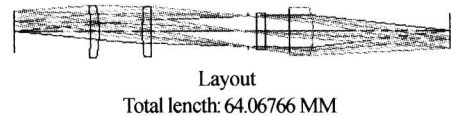


图 2 折一衍混合光学系统
Fig. 2 Layout of the hybrid refractive diffractive lens

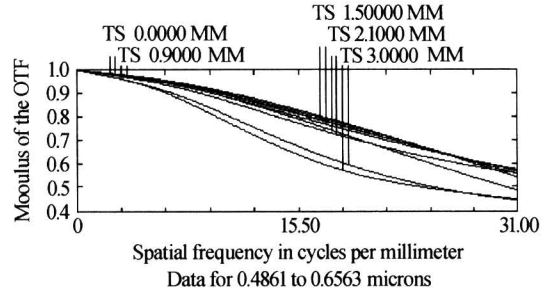


图 3 双高斯耦接光学系统的光学传递函数
Fig. 3 The modulation transfer function of gauss lens without diffractive surface

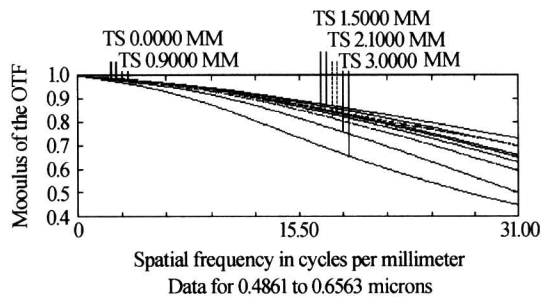


图 4 折一衍混合光学系统的光学传递函数
Fig. 4 The modulation transfer function of the hybrid refractive diffractive lens

合远心系统的光学传递函数. 最终得到的折一衍混合耦接系统,与传统的双高斯耦接光学系统比较,长度减小 2%,光学外径减小 11%,镜片重量减轻了 60%. 成像质量得到了很大程度的改善,轴上,0.3 视场、0.5 视场、0.7 视场的传递函数值提高了 10% 以上.

2.2 衍射面光学参量的讨论

由 ZEMAX 软件给出的衍射面的相位分布式,可以得到

$$-2\pi n = A_1 r^2 + A_2 r^4 \quad (10)$$

由式(10)可得,第 n 个环带的归一化半径 r_n ,最大的环带数 k_n . 每个刻蚀台阶的深度分别为

$$r_n = \sqrt{\frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 8\pi K A_2}}{2A_2}} \quad (11)$$

$$K_n = \text{int} \left| \frac{A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4}{2\pi} \right| \quad (12)$$

$$d = \frac{\lambda}{m(n-1)} \quad (13)$$

式中, r_0 为衍射面的归一化半径,即衍射面的半径与 ZEMAX 软件设计过程中归一化半径的比值. m 为刻蚀台阶数, n 为二元光学材料的折射率, λ 为系统应用波段的中心波长.

折一衍混合耦合系统中,设计时 ZEMAX 软件中归一化的半径为 3 mm,衍射面的实际半径为 2.66 mm,衍射面的归一化半径为 0.88. 最终优化得到衍射面的 A_1 和 A_2 分别为 -334.592 和 132.975, 图 5 是衍射面的面型曲线. 由图 5 可知,总的环带数为 28,衍射面的最高周期频率为 15 cycles/mm, 对应最小周期线宽为 $65 \mu\text{m}$,为获得 95% 以上的衍射效率,刻蚀台阶数为 8,对应最小特征尺寸为 $8.1 \mu\text{m}$, 现有的制作工艺可以制作这个衍射面.

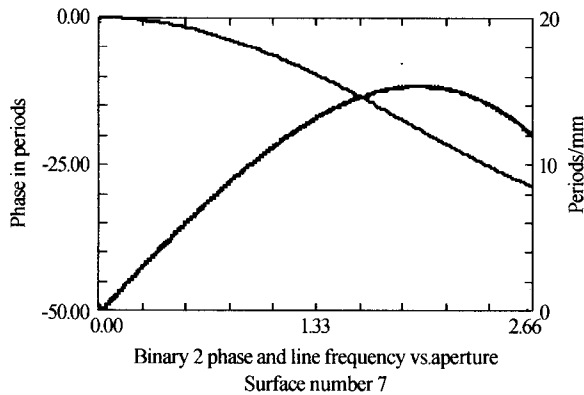


图 5 衍射光学面的线频率和周期径向坐标的变化
Fig. 5 Line frequency and phase vs. aperture of the binary surface

3 结论

利用衍射元件的负色散和可对波面进行任意整形的特点,在光纤传像束光学耦合器中引入衍射面,考虑到现有的工艺制作水平,设计了含有一个衍射面的折一衍混合光学耦合器. 与传统的双高斯光学耦合器进行的比较表明,衍射光学的引入使得光学耦合器显著地减少了外观尺寸和重量,并且提高了成像质量,为传像束光学系统在工业生产、医疗卫生、军事国防以及空间技术等方面的进一步应用提供了条件.

参考文献

1 黄天智,薛晋生. 传像束光纤在望远瞄准镜中角分辨率的计算方法. 光学技术,2004,30(1):101~103

Huang T Z, Xue J S. *Optical Technique*, 2004, 30(1): 101~103

2 Guerra, David J, Barry, *et al.* Optical fiber system with sealed fiber bundle. U S Patent,319963,2004.06.17

3 Francesco Lanza di scalea, T P Bernat, J B Spicer. Remote laser generation of narrow-band surfacewaves through optical fibers. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999, 46(6):1555~1557

4 徐明泉. 光纤传像束的传光特性表征. 光纤与电缆及其应用技术,1997,(5):22~23

Xu M Q. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1997,(5):22~23

5 Kobayashi, Katsuhiko, Takenaga, *et al.* Image fiber imaging apparatus. U. S. Patent:6744957,2004.06.01

6 Hiroshi Suto. Chalcogenide fiber bundle for 3D Spectroscopy. *Infrared Phys Tech*, 1997, 38(5):22~23

7 张慧娟,王肇圻,赵秋玲,等. 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计. 光学学报,2004,24(1):121~124

Zhang H J, Wang Z Q, Zhao Q L, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1):121~124

8 张慧娟,王肇圻,傅汝廉,等. 折衍混合超广角视场目镜系统的设计. 光学学报,2003,23(1):85~88

Zhang H J, Wang Z Q, Fu R L, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1):85~88

9 沈为民,薛鸣球,余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜. 光子学报,2004,33(3):460~462

Shen W M, Xue M Q, Yu J J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3):460~462

10 丁琴,王惠南. 采用 GRIN 透镜的微胶囊内窥成像技术. 光子学报,2004,33(7):889~891

Ding Q, Wang H N. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7):889~891

11 Milton Laikin. *Lens Design*. Third edition. New York: Marcel Dekker Inc,2001. 121~132

12 沈为民,薛鸣球,余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计. 光学精密工程,2002,10(2):329~332

Shen W M, Xue M Q, Yu J J. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2):329~332

The Hybrid Refractive-Diffractive Optical Coupler for Image Guide Fiber Bundle

Li Dongyuan¹, Yan Xiusheng², Zhang Xiaoguang², Hou Lantian¹, Zhou Guiyao¹, Yin Tie²

¹ *Infrared Optical Fibers & Sensors Institute of Yanshan University, Qinhuangdao 066004*

² *The Northeast Research Institute of Electronic technology, Jinzhou 121000*

Received date: 2005-04-05

Abstract Optical coupler is designed with diffractive surface. According to the third order aberration theory of binary optical element, the method to calculate the initial structure parameter of binary surface was presented. The result of design with one diffractive surface is shown with calculation and optimization of optical design software ZEMAX, whose operating wavelength, focal length, optical length respectively is 0.4~0.7 μm , 27.5 mm, 64 mm. The result is available for image guide fiber bundle, whose single core diameter is 16 μm and section diameter is 6 mm. Compared with the conventional optical coupler, the hybrid refractive-diffractive systems offer considerable reduction in the apparent size, weight, and improve the imaging quality.

Keywords Binary optics; Image guide fiber bundle; Optical coupler; Hybrid refractive-diffractive



Li Dongyuan was born in 1971, in Liaoning province. As a senior engineer and a PhD student of Yanshan University, he is pursuing the study mainly of electro-optical detection system design and optical system design.