

文章编号: 0258-7025(2006)09-1210-04

传像光纤束的折-衍混合耦合器

李东源¹, 侯蓝田¹, 闫秀生², 张晓光², 周桂耀¹

(¹ 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004; ² 东北电子技术研究所, 辽宁 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, 通过理论计算和 ZEMAX 光学软件优化, 给出工作波长 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$, 焦距 $27\ \text{mm}$, 光学长度为 $62.9\ \text{mm}$, 采用一个衍射面的耦合器设计实例。该耦合器采用物方远心光路结构, 适用于单丝直径 $16\ \mu\text{m}$, 截面直径为 $6\ \text{mm}$ 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, 而且在尺寸和质量上有显著的减少。实际的室内外成像实验证明, 光学设计软件的仿真结果是正确的。

关键词 应用光学; 折-衍混合耦合器; 二元光学; 光纤传像束; 远心光路

中图分类号 O 439; O 436.1 **文献标识码** A

Hybrid Refractive-Diffractive Coupler for Image Fiber Bundle

LI Dong-yuan¹, HOU Lan-tian¹, YAN Xiu-sheng²,
ZHANG Xiao-guang², ZHOU Gui-yao¹

(¹ *Infrared Optical Fibers & Sensors Institute of Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)
² *The Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou, Liaoning 121000, China*)

Abstract According to the third order aberration theory of binary optical element, the optical coupler system with one diffractive surface, telecentric optical path structure in the object space is shown with calculation and optimization of optical design software ZEMAX, whose operating wavelength is $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$, focal length is $27\ \text{mm}$, and optical length is $62.9\ \text{mm}$. The result is available for the image fiber bundle, whose single core diameter is $16\ \mu\text{m}$ and section diameter is $6\ \text{mm}$. Compared with the conventional optical coupler, the hybrid refractive-diffractive system offers considerable reduction in the apparent size, weight, and improves the image quality. The simulation results of optical design software are proved well by the experiments on scenic imaging both indoors and outdoors.

Key words applied optics; hybrid refractive-diffractive coupler; binary optics; image fiber bundle; telecentric optical path

1 引言

光纤传像束(简称传像束)是将多根一定长度的光纤有规则地集合成束而达到传递图像目的的光学元件, 是一种可任意弯曲、传输图像的无源器件。传像束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, 出射图像和入射图像基本一致。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、质量轻、易实现复杂空间结构的图像传递, 能够优化光路设计, 可以在强电磁干扰、高温有腐蚀的场合工作等优点, 广泛应用于医学、工业、科研、军事等众多领域^[1~3]。

典型的传像束光学系统主要包括工业或医用内窥镜, 由前置物镜、传像束和目镜(耦合镜)等组成。

收稿日期: 2005-12-21; 收到修改稿日期: 2006-03-20

作者简介: 李东源(1971—), 男, 辽宁人, 燕山大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事光电探测系统、光学设计的研究工作。E-mail: ldy710527@sina.com

导师简介: 侯蓝田(1939—), 男, 吉林人, 燕山大学教授, 博士生导师, 主要从事红外系统设计和光纤技术应用的研究工作。E-mail: hlantian@heinfo.net

一般通过光学物镜把目标成像于传像束的一个端面上,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^[2,3]。随着 CCD 成像技术和大截面光纤传像束技术的发展,对传像束光学系统的成像质量、传光特性和体积质量提出了更高的要求,传统的设计已经不能满足要求,必须对光学系统进行优化设计^[2,4]。

2 理论设计与数值计算

2.1 设计原理

自 20 世纪 80 年代二元光学的概念提出后,衍射光学迅速发展,并且应用于光学成像领域^[5]。在成像系统中,衍射光学元件与传统的折射、反射元件混合使用,综合平衡,给系统的设计引入了新的自由度,为提高系统性能、简化系统结构、减轻系统质量提供了新的可能性^[6,7]。考虑到国内衍射透镜加工工艺的限制,可以采用带有衍射面的单透镜来代替双胶合透镜,构成折-衍混合耦接镜系统。

通常设旋转对称二元光学衍射面的相位函数为

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + \dots), \quad (1)$$

式中 r 为衍射面的径向坐标, λ 为波长, A_1, A_2, A_3, \dots 为衍射面相位系数。若对波长为 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

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

因 A_1 是与 λ 成正比的系数,可设计 A_1 值消色差。一般通过适当的光焦度分配来实现。

折衍混合器件消球差则可得^[8]

$$\Sigma S_1 = \frac{y^4 \Phi_{\text{ref}}^2}{4} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right] - 8mA_2 y^4 = 0, \quad (3)$$

由式(3)可以确定四次相位系数 A_2 的初始取值。式中所有符号意义均遵循维尔福德(Welford)的约定^[8]。

2.2 实例计算

需要设计的系统工作波段为 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$, 焦距 27 mm , 视场(物高)为 6 mm 。传像束实际上是利用单根光纤传光来传像。因此为了保证轴上物点和轴外物点的全部成像光都能进入传像束中传播,前置光学物镜一般设计成像方远心光路^[9]。为了保证

光束衔接的匹配,耦接器也应设计成物方远心光路。根据使用要求,传像束出射图像与 CCD 光敏面之间一般要求接近 $1:1$ 耦合,因此耦接 CCD 的光学系统一般采用双高斯结构,图 1 是一种典型的采用物方远心设计的双高斯光学耦接系统。设计时首先将图 1 中的双胶合透镜用一个折-衍单透镜代替,单透镜选择平凸基底结构形式,以使得初始的基底像差最小^[8,10]。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”和提高成像质量十分有利^[11]。



图 1 双高斯耦接光学系统示意图

Fig. 1 Layout of double-Gauss lens without diffractive surface

根据设计原理,可以确定衍射面初始相位系数 A_1, A_2 的值,从而得到折-衍单透镜的初始结构形式。采用 ZEMAX 光学设计软件进行优化,得到了最终的设计结果。图 2 是折-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。折-衍混合耦接系统中,设计时 ZEMAX 软件中归一化半径为 3 mm , 衍射面实际的半径为 2.4 mm 。最终优化得到衍射面的 A_1 和 A_2 分别为 -345.418 和 166.383 。图 3 是衍射面的面型曲线。由图 3 可知,总的环带数为 24 , 衍射面的最高周期频率为 14 cycles/mm , 对应最小周期线宽为 $70 \mu\text{m}$, 为获得



图 2 折-衍混合耦接光学系统

Fig. 2 Layout of hybrid refractive-diffractive lens

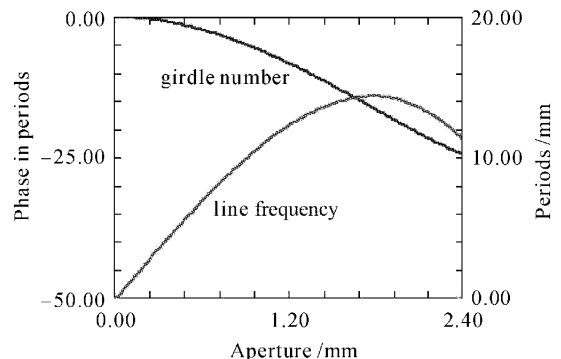


图 3 衍射光学面的线频率和周期径向坐标的变化
Fig. 3 Line frequency and phase versus aperture of the binary surface

接近 95% 的衍射效率,刻蚀台阶数为 8,对应最小特征尺寸为 $8.8 \mu\text{m}$,现有的制作工艺可以制作这个衍射面。最终得到的折-衍混合耦合系统,与传统的双高斯耦合光学系统比较,长度减小 3%,光学外径减小 11%,镜片质量减轻了 69%,具体的数据见表 1。轴上,0.5 视场,边缘视场的弥散斑半径分别减小了

57%,39%,23%;轴上视场光学传递函数提高了 47%,0.5 视场的子午、弧矢传递函数分别提高了 48%和 41%,0.7 视场的子午、弧矢传递函数分别提高了 53%和 13%,边缘视场的子午传递函数提高了 24%,因此成像质量得到了很大提高。具体的数据如表 2 所示。

表 1 传统双高斯耦合系统、折-衍混合系统在体积和质量方面的比较

Table 1 Comparison of traditional double-Gauss lens and hybrid refractive-diffractive lens on apparent parameters

	Length /mm	Weight /g	Diameter /mm
Coupling lens without diffractive surface	64.96	3.1	8.55
Hybrid refractive-diffractive lens	62.9	0.96	7.6

表 2 传统双高斯耦合系统、折-衍混合光学系统在成像质量方面的比较

Table 2 Comparison of traditional double-Gauss lens and hybrid refractive-diffractive lens on image quality

	Modulation transform function in 34 lp/mm				Spot diagram (RMS radius / μm)		
	Point on the axis	0.5 Field	0.7 Field	1 Field	Point on the axis	0.7 Field	1 Field
Coupling lens without diffractive surface	0.51(T)	0.48(T)	0.43(T)	0.42(T)	10.5	11.4	16.3
	0.51(S)	0.54(S)	0.53(S)	0.41(S)			
Hybrid refractive-diffractive lens	0.75(T)	0.71(T)	0.66(T)	0.52(T)	4.5	7	12.5
	0.75(S)	0.76(S)	0.60(S)	0.10(S)			

3 实验和分析

实验装置示意图如图 4 所示。成像物镜选择了一个“反远距”结构的镜头,由于这种结构镜头的前组为负组,因此轴外光束通过前组发散透镜后,与光轴的倾斜角大大减小,可以认为满足像方远心要求。大截面光纤传像束单丝直径为 $16 \mu\text{m}$,采用六角形序排列,根据奈奎斯特定理,其极限分辨率为 34 lp/mm。物镜焦距 5 mm,入瞳口径 1.3 mm,视场角为 60° 。在 34 lp/mm 空间频率处,各个视场的调制传递函数值均大于 0.8,成像质量优良。耦合镜分别采用了本文设计的折-衍混合光学耦合器和传统的双高斯耦合器。

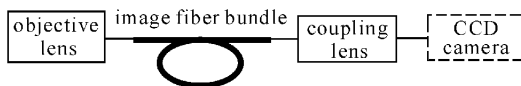


图 4 成像实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of imaging experiment

通过 WAT-535EX 型工业用黑白摄像头和图像采集卡,进行了室内外成像实验,摄像头上的 CCD 有效光敏面尺寸为 $4.9 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ (对角线 6 mm),像元尺寸为 $6.50 \mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$ 。通过折-衍混合光学耦合器获得的成像效果如图 5,图 6 所示。

传像束的网格虽然依稀可见,但图像总体比较清晰,无论是轴上点,还是视场边缘,都有比较好的成像质量,像面照度均匀,没有发现拦光现象。



图 5 室内景物成像

Fig. 5 Indoors scene imaging

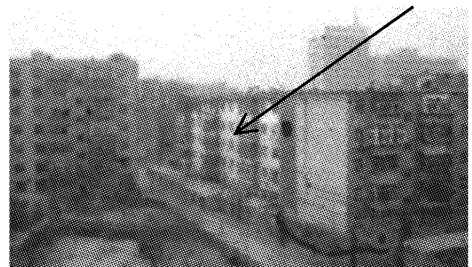


图 6 室外景物成像

Fig. 6 Outdoor scene imaging

为了对比不同耦合系统的成像质量,我们对拍摄的照片进行了局部放大处理。图 7 是根据图 6 进行的局部放大,图 8 是根据传统的双高斯耦合系统拍摄的图片进行的局部放大。图 7 和图 8 拍摄的是同样场景,通过对比可以看出,折-衍混合耦合系统的成像质量比传统的双高斯耦合系统提高了很多。



图 7 折-衍混合耦合光学系统的成像效果图

Fig. 7 Imaging effect by hybrid refractive-diffractive lens

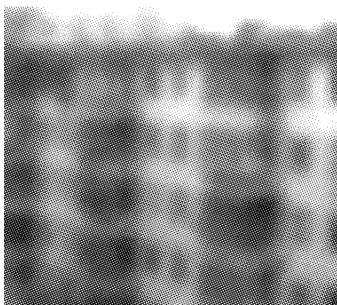


图 8 双高斯耦合光学系统的成像效果图

Fig. 8 Imaging effect by double-Gauss lens

4 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-衍混合光学耦合器。与传统的双高斯光学耦合器进行比较表明,衍射光学的引入显著减少了光学耦合器的外观尺寸和质量,并且提高了成像质量。实际景物成像实验结果表明,实验结果与仿真计算结果基本吻合。

参 考 文 献

- Huang Tianzhi, Xue Jinsheng. Calculate method of angular resolving power of image fiber bundles in the telescopic sight [J]. *Opt. Technol.*, 2004, **30**(1):101~103
黄天智,薛晋生. 传像束光纤在望远镜准镜中角分辨率的计算方法[J]. *光学技术*, 2004, **30**(1):101~103
- Katsuhiko Kobayashi, Yuichi Takenaga. Image fiber imaging apparatus [P]. U. S. Patent: 6744957, 2004. 06. 01
- Xu Mingquan. Characterization of transmission property of optical fiber image bundle [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1997, (5):22~23
徐明泉. 光纤传像束的传光特性表征[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 1997, (5):22~23
- Chen Liang, KungBin Sung, Rebecca R. Richards-Kortum *et al.*. Design of a high-numerical-aperture miniature microscope objective for an endoscopic fiber confocal reflectance microscope [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22):4603~4610
- Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid diffractive refractive ultra-wide-angle eyepieces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):85~88
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[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):85~88
- Ma Jing, Chen Yunliang, Tan Liying *et al.*. Angular dispersion analysis of DOE-WDM [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):532~536
马晶,陈云亮,谭立英等. 衍射光学元件——波分复用角色散特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):532~536
- Sarah L. Dobson, Pang-chen Sun, Yeshayahu Fainman. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20):4744~4748
- Zhao Liping, Wu Minxian. Study on the design of the hybrid singlet to replace the refractive doublet [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2):223~227
赵丽萍,邬敏贤. 折-衍混合单透镜替代双胶合望远物镜的设计研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(2):223~227
- Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 156~160
郁道银,谈恒英. *工程光学*[M]. 北京:机械工业出版社, 2004. 156~160
- Zhang Yinan, Wang Zhaoqi, Sun Qiang. Athermalized design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive diffractive objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):311~314
张轶楠,王肇圻,孙强. 折-衍混合红外物镜的超宽温消热差设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):311~314
- Zhang Huijuan. Plastic hybrid refractive diffractive eyepiece for head-mounted display [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):856~859
张慧娟. 用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):856~859