

折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜系统设计*

吴环宝 王肇圻 傅汝廉

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘 要 设计了一个折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜系统. 该系统由一片折射/衍射透镜和三片折射透镜组成. 入瞳位于系统前焦面, 整个系统满足像方远心. 与美国专利(专利号: 4,925,279)相比较, 垂轴色差由 2.40 mm 降到 0.23 mm, 降低了一个数量级; 对于 0° 、 14° 和 20° 视场, 最大垂轴像差分别由 $260\ \mu\text{m}$ 、 $1350\ \mu\text{m}$ 、 $2090\ \mu\text{m}$ 降低到 $5\ \mu\text{m}$ 、 $250\ \mu\text{m}$ 、 $318\ \mu\text{m}$, 最大场曲分别由 8 mm、10 mm、13 mm 降低到 0.5 mm、1 mm、6 mm. 该物镜不仅可用于彩色激光打印机、激光数码彩扩等多波长的扫描系统, 也可用于能量要求较高的扫描系统. 在高能量扫描系统中, 通过引用折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜, 可用小体积工作于多纵模状态的激光器代替大体积单波长的激光器, 使整个扫描系统小型化, 并且提高了扫描准确度.

关键词 $f-\theta$ 物镜; 远心; 折/衍混合系统; 光学设计

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

0 引言

自从 1988 年 Swanson 和 Veldkamp 等人^[1]利用衍射光学元件的色散特性校正单透镜的轴上色差研制了多阶相位透镜以来, 便开始了衍射光学在光学成像领域的应用研究^[2~6]. 随着激光技术的成熟, 激光在工业领域的应用越来越多, 如激光打印机、条形码扫描、图形传真、报警扫描、激光雕刻等等. 在这些应用中用到了工作于单波长的 $f-\theta$ 物镜^[7~10]. 而对于现在的新兴产业如彩色激光打印机、激光数码彩扩等系统中要用到消色差的 $f-\theta$ 物镜^[11]. 在另外一方面, 一个激光器工作于多波长时的输出能量要比单波长时高得多, 所以对于能量要求较高的扫描系统中, 可以用小体积的多波长激光器代替大体积的单波长激光器^[10], 这对于整个系统的小型化是非常重要的.

用于多波长的 $f-\theta$ 物镜需要校正的像差主要有色差、场曲、相对 $f-\theta$ 畸变、垂轴像差. 美国 1990 年专利(专利号 4,925,279)设计了一个用于激光扫描的远心消色差 $f-\theta$ 物镜, 其像差满足一般的激光扫描系统的要求^[12].

本文基于此专利, 引入折/衍混合透镜, 获得了更好的消色差效果, 并且减少了组成 $f-\theta$ 物镜的单透镜片数, 使整个激光扫描系统具有优良的光学扫描特性.

1 折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜设计

在普通光学系统中, 如果畸变和场曲得到了校正, 则像平面上的理想像高 $y=f\tan\theta$. $f-\theta$ 系统要求消场曲, 像面为平面, 同时光学系统产生一个负畸变, 使在扫描平面上的像高与入射扫描角成正比, 即 $y=f\cdot\theta$. 从而当扫描角保持一定的转速时, 像点在平面上保持线性的扫描. 产生负畸变的大小应为 $(f\cdot\tan\theta-f\cdot\theta)/f\cdot\theta\times 100\%$, 在软件 ZEMAX 中, 评价线性度用相对 $f-\theta$ 畸变, 定义如前文所述.

在激光扫描系统中, 被扫描平面应置于 $f-\theta$ 物镜的理想像面处, 因此扫描平面与 $f-\theta$ 物镜之间的距离应保持不变, 其扫描准确度在很大程度上取决于理想像面与扫描平面的重合程度. 由于在扫描过程中, 被扫描平面不可能与理想像面完全重合, 此时除了中心视场外, 其他视场的像高都会产生误差, 对于像高与扫描角度成正比的 $f-\theta$ 物镜来说, 这种线性误差是不允许存在的. 像方远心光路的光阑(即入瞳)位于系统的前焦面, 出射主光线都平行于光轴, 垂直于理想像面, 此条件保证当扫描平面沿光轴方向有偏移时, 像高并不会产生误差, 因此扫描时不会产生线性误差.

由于所有光学材料的阿贝数均为正值, 消色差必须采用正负透镜组合, 这使得每块透镜的光焦度都较大, 而且要选用阿贝数相差较大的材料组成, 这不仅使光学系统的体积和重量增加, 材料选择有限制, 还给单色像差的校正带来困难.

衍射元件不同于传统的折射元件, 其等效阿贝数 v_d 与所用基底材料无关, 而只与使用波段有关

*国家自然科学基金(编号 60277021)资助项目

Tel: 022-23508332 Email: abao@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2004-10-11

$$v_d = \lambda_d / (\lambda_F - \lambda_C) \quad (1)$$

式中, λ_d 、 λ_F 、 λ_C 分别是 d、F、C 光的波长. 在可见光波段衍射元件的阿贝数很小, 且为负值, $v_d = -3.452$. 所以折/衍混合元件能够替代正负透镜组合取得很好的消色差效果, 同时二元光学元件除了可校正色差, 还可以校正透镜的单色像差.

美国专利库中的远心消色差 $f\theta$ 物镜由 5 片单透镜组成, 该系统的像差比较大. 在本文的设计中引入折/衍混合透镜, 保证系统有效焦距不变, 很好的校正了色差和各种单色象差, 并且减少了透镜片数. 系统由三片单透镜和一片折/衍混合透镜组成. 折/衍混合单透镜的衍射面基底面形为平面. 具体设计和优化步骤为:

1) 去掉原系统中的第三片透镜, 改变原第二片透镜向出瞳方向的面型为平面, 在优化函数中加入有效焦距、远心参数和 $f\theta$ 参数, 进行一级特征优化, 即保证有效焦距不变, 优化时考虑场曲等单色像差的变化, 达到一个暂时最佳的效果.

2) 将平凸透镜的平面设定为二元衍射面, 进行消色差优化. ZEMAX 中, 衍射面的相位分布函数为

$$\varphi_{\text{diff}}(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots \quad (2)$$

式中, r 为归一化半径坐标, A_1 为二次相位系数, 决定衍射面的傍轴光焦距, 实现光学系统的消色差; A_2 、 A_3 等为非球面相位系数, 用于校正系统的单色像差. 根据需要选取前三项. 删除优化函数中有效焦距等参数, 以衍射面系数的第一项作为变量, 对系统的色差进行校正.

3) 在优化函数中加入有效焦距、远心参数、 $f\theta$ 参数等, 让衍射面系数的第二、三项为变量, 调整系统的各个结构参数, 对系统进行整体优化, 实现系统场曲、垂轴像差、相对 $f\theta$ 畸变、色差的最佳校正. 进行优化时考虑像差之间的平衡以及衍射面的加工条件来设定优化函数的加权.

2 折/衍混合远心消色差 $f\theta$ 物镜设计结果

图 1(a) 给出了美国专利库中的远心消色差 $f\theta$ 物镜系统结构. 它由 5 片单透镜组成, 焦距为 100 mm、扫描角为 $\pm 20^\circ$ 、入瞳直径为 5 mm, 扫描范围为 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$, 图 1(b)~(d) 给出了其像差特性曲线.

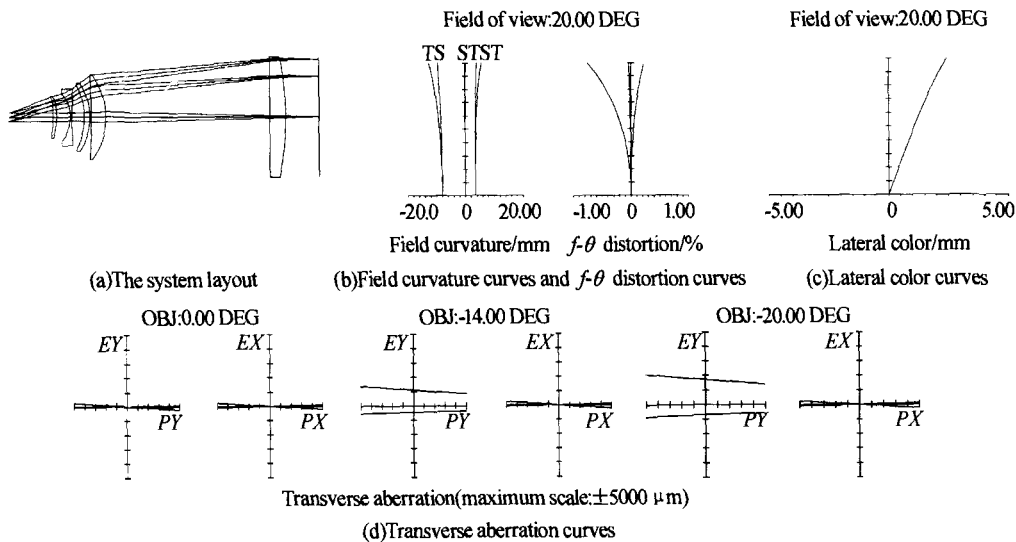
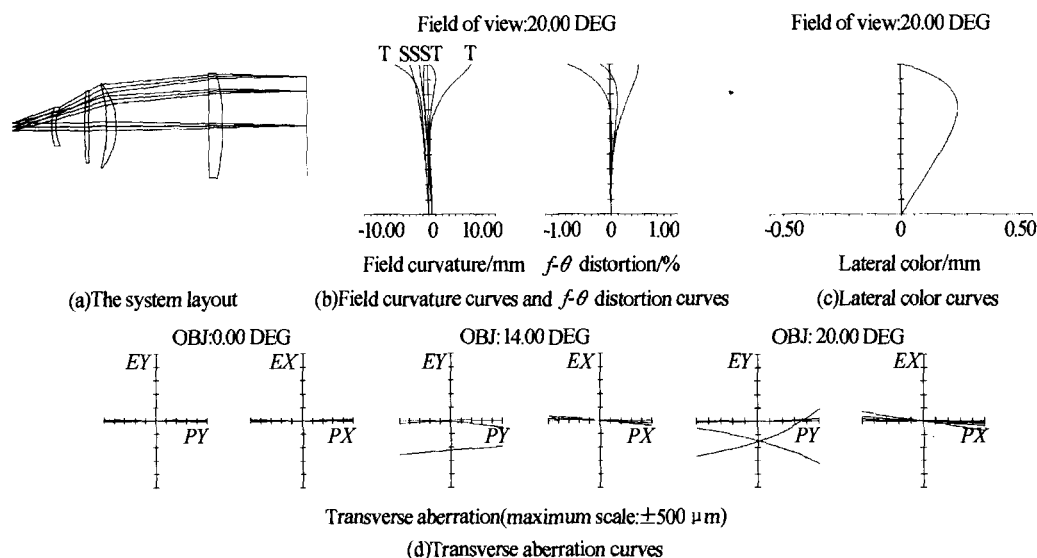


图 1 远心消色差 $f\theta$ 物镜

Fig. 1 Achromatized telecentric $f\theta$ lens

图 2(a) 给出了折/衍混合远心消色差 $f\theta$ 物镜系统结构图. 它由三片单透镜和一片折/衍混合透镜组成, 第二片为折/衍混合透镜, 衍射面向出瞳方向, 基底为平面. 图 2(b)~(d) 给出了其像差特性曲线. 两组透镜系统具有相同的焦距、扫描角、入瞳直径和扫描范围. 由像差曲线可以看出, 本文所设计物镜与专利所给的物镜的相对 $f\theta$ 畸变 (%) 相近, 都满足激光扫描系统 $f \cdot \theta$ 的要求; 但最大场曲

在整个视场内有很大的改善, 如 0° 视场为 0.5 mm, 14° 视场为 1 mm, 20° 视场为 6 mm, 而专利所给物镜的最大场曲在相应的 3 个视场内分别为 8 mm, 10 mm, 13 mm; 垂轴像差也得到了很好的校正, 0° 、 14° 、 20° 视场的最大垂轴像差分别由 $260 \mu\text{m}$ 、 $1350 \mu\text{m}$ 、 $2090 \mu\text{m}$ 降低为 $5 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $318 \mu\text{m}$; 同时色差也得到了很好的校正, 其最大垂轴色差为 0.23 mm, 较专利的 2.4 mm 降低了一个数量级.

图2 折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜Fig. 2 Hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric $f-\theta$ lens

3 结论

本文设计了一个折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜, 满足现代彩色激光打印、激光数码彩扩等多波长的扫描系统的要求, 也可用于能量要求较高的扫描系统. 在能量要求较高的扫描系统中, 通过引用折/衍混合远心消色差 $f-\theta$ 物镜, 可用小体积工作于多纵模状态的激光器代替大体积的单波长激光器, 使整个系统变得简单和小型化. 和美国专利相比较, 物镜的色差和单色像差得到了显著改善, 提高了扫描准确度. 并且比原来系统的结构简单, 满足了现代化激光扫描系统的要求.

参考文献

- Swanson G I, Veldkamp W B. Infrared applications of diffractive optical elements. *Proc SPIE*, 1988, **883**: 155~158
- Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl Opt*, 1988, **27**(14): 2960~2971
- Buralli D A, Morris G M. Design of a wide field diffractive landscape lens. *Appl Opt*, 1989, **28**(18): 3950~3959
- Zhao Q L, Wang Z Q, *et al.* Hybrid refractive/diffractive eyepiece design for head-mounted display. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1495~1498
- 孙强, 刘宏波, 王肇圻, 等. 红外折射/衍射超常温光学系统. *光子学报*, 2003, **32**(4): 466~469
Sun Q, Liu H B, Wang Z Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 466~469
- 杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计. *光子学报*, 2005, **34**(4): 573~576
Yang X J, Wang Z Q, Sun Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica* 2005, **34**(4): 573~576
- Takesuke M, Takanori H, Yoshio A. A laser scanning optical system for high-resolution laser printer. *Proceeding of SPIE*, 1990, **1254**: 54~65
- Kazuo M, Yoshinobu S, Kazuo I, *et al.* Laser recording and image-quality evaluation. *Proceeding of SPIE*, 1990, **1254**: 24~32
- Faklis D, Peng S, Morris G, *et al.* Application of diffractive optics to laser scan lenses. *Proceedings of SPIE*, 1995, **2383**: 340~344
- Fuse K, Okada T, Ebata K. Diffractive/refractive hybrid F-theta lens for laser drilling of multilayer printed circuit boards. *Proceeding of SPIE*, 2002, **4830**: 95~100
- Meyers M M. Diffractive optics at eastman kodak Co. *Proceedings of SPIE*, 1996, **2689**: 228~254
- Hiroyuki S, Kyoto. Telecentric $f-\theta$ lens system. US Patent 4, 1990, 925, 279

Design of A Hybrid Diffractive/Refractive Achromatized Telecentric $F-\theta$ Lens System

Wu Huanbao, Wang Zhaoqi, Fu Rulian

*Nankai University the key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technique,
Ministry of Education, Tianjin 300071*

Received date: 2004-10-11

Abstract A hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric $f-\theta$ lens system had been designed with a hybrid diffractive/refractive lens and three refractive lenses. The entrance pupil was placed at the focal plane so that it was a telecentric system. Contrast to the US patent 4,925,279, the lateral color reduced by one-order in magnitude (from 2.40 mm to 0.23 mm), and the maximal transverse aberration reduced from 260 μm , 1350 μm , 2090 μm to 5 μm , 250 μm , 318 μm for 0° , 14° and 20° field of views, and the maximal field curvature reduced from 8 mm, 10 mm, 13 mm to 0.5 mm, 1 mm, 6 mm for the aforementioned field of views. The designed $f-\theta$ lens system could be applied in color scanning systems, such as color laser printers and color digital photo printers. It could also be applied in high energy scanning systems. When applying the designed hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric $f-\theta$ lens system to the high energy scanning system, a big laser machine operating in one longitudinal mode could be replaced by a small multi-mode operating laser machine, and the system could be simplified greatly and the accuracy could be proved.

Keywords $F-\theta$ lens; Telecentricity; Hybrid diffractive/refractive system; Optical



Wu Huanbao was born in 1979, and received her B. S. degree from Nankai University in 2000. She is currently pursuing her Ph. D. in the Institute of Modern Optics, Nankai University. Her research interests are binary optics, optical scanning and optical designs.