

自由曲面棱镜应用

王云霞^{1,2}, 卢振武¹, 刘 华^{1,2}, 张红鑫^{1,2}

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 将自由曲面棱镜应用到非共轴系统中克服了该类系统因光学元件偏心和倾斜带来的大离轴像差, 从而扩大了系统的视场, 并解决了系统装调问题。利用光学设计软件 ZEMAX 设计了一个由自由曲面棱镜组成的摄影物镜, 它的相对孔径 $D/f = 1/2.7$; 总长 14.89 mm; 系统的 $MTF=0.5$ 所对应的空间频率是 45 lp/mm。该系统与传统摄影物镜相比具有结构简单、系统总长度小、元件易装调、像质高等优点。

关键词: 自由曲面; 非共轴光学系统; 离轴像差

中图分类号: O43 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2007)03-0319-03

Application of freeform surface prism

WANG Yun-xia^{1,2}, LU Zhen-wu¹, LIU Hua^{1,2}, ZHANG Hong-xin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The characteristic of imaging in off-axial optical system, and feature of freeform surface are analyzed. Freeform surface prism can efficiently correct off-axial aberration brought by eccentricity and tilt of optical element, to widen the system field and solve the installation problem. A object lens including a freeform surface prism is designed by using optical software ZEMAX. Its relative aperture is $D/f = 1/2.7$, total length is 14.89 mm, and spatial frequency is 45 lp/mm when $MTF=0.5$. This system has many merits, such as simple structure, short total length, easy installation, high resolution and so on.

Key words: Freeform surface; Off-axial optical system; Off-axial aberration

0 引 言

传统的折射光学系统一般是由球面或非球面透镜构成的共轴系统, 是关于光轴旋转对称的。但随着光电仪器使用范围的扩大, 性能要求的提高, 传统光学系统由于体积大, 已经无法满足光电设备小型化的需要。反射光学系统的出现解决了这一问题。但共轴反射系统中存在中心遮拦, 使能量的利用率降低, 于是发展出非共轴反射系统, 如三反系统等^[1]。非共轴

系统的离轴像差很大, 且不易校正, 使系统的视场受到限制。在非共轴系统中引入自由曲面, 能很好地校正离轴像差, 从而扩大视场。

文中通过利用自由曲面形成自由曲面棱镜, 并将其应用于非共轴系统, 弥补此类系统离轴像差不易校正和系统装调困难的缺陷来研究自由曲面的特点。最后设计了单片自由曲面棱镜的摄影物镜, 与传统共轴摄影物镜相比, 无论在结构复杂程度还是在成像效果方面, 含自由曲面棱镜的系统都具有不可比拟的优越性。

收稿日期: 2006-08-21; 修订日期: 2006-10-09

基金项目: 王宽诚教育基金会资助

作者简介: 王云霞(1978-), 女, 山东潍坊人, 硕士生, 现主要从事自由曲面及光学系统设计方面的研究。Email: wyx803@126.com

导师简介: 卢振武(1955-), 男, 吉林大安人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为衍射光学元件制作及其应用。

Email: luzw@ciomp.ac.cn

1 自由曲面的特点

自由曲面是一种复杂的无规则非对称的非球面,具有多重对称轴,深度 z 是 x, y 的函数。它在数学上不能用一个方程式,但可以用一系列的数据点描述。实际上,任意的自由曲面无法进行光线追迹,一般采用最简易的数学模式,即 x, y 的级数展开模式^[2]:

$$z=(r^2/R)/\left[1+\sqrt{1-(1+k)(r/R)^2}\right]+\sum_{ij}^R C_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \sum_{ij}^R C_{ij} x^i y^j = & C_{00} + C_{01}y + C_{10}x + C_{02}y^2 + C_{11}xy + C_{20}x^2 + C_{03}y^3 + \\ & C_{12}xy^2 + C_{21}x^2y + C_{30}x^3 + C_{04}y^4 + C_{13}xy^3 + \\ & C_{22}x^2y^2 + C_{31}x^3y + C_{40}x^4 + C_{05}y^5 + \dots \end{aligned}$$

公式(1)等号右端第一部分是球面部分, k 是曲面二次项系数;第二部分表示自由曲面, x, y 是各面局部坐标, C_{ij} 是自由曲面的归一化系数。若只考虑 $Y-Z$ 面内的偏心, X 方向不需要非对称,那么自由曲面关于 $Y-Z$ 面对称, x 的奇次幂系数为 0, 即 $C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{31}, \dots = 0$ 。同理可以简化关于 $X-Z$ 平面和 $X-Y$ 平面对称的自由曲面方程。旋转轴对称面是自由曲面的特殊情况,满足以下关系式: $C_{02}=C_{20}, C_{04}=C_{40}=C_{22}/2, C_{06}=C_{60}=C_{24}/3=C_{42}/3$ 。

自由曲面的非轴对称性,非常适合于非共轴系统。传统的共轴光学系统已经形成完整的成像和像差分析理论,这些理论不能完全适用于非共轴系统。但非共轴光学系统具有与共轴系统类似的性质^[3],因此非共轴系统中可采用与共轴系统类似的成像理论。非共轴光学系统因光路发生折叠,系统结构紧凑;不存在中心遮拦问题,应用很广泛。但是由于光学元件的离心和倾斜,系统中的离轴像差很大,使得离轴系统的视场受到限制。用一般的球面和非球面都难以准确校正彗差、像散、畸变等轴外像差,为此可以引入自由曲面。由公式(1)可知,自由曲面的多自由度表现为各项归一化系数,及球面部分的曲率半径都是设计变量。通过调节自由曲面的归一化系数校正像差,同时不改变整体光路的结构,可以满足非共轴光学系统的成像要求以及像差校正需要。离轴光学系统用自由曲面校正轴外像差,可以扩大视场,但通常 $2\omega \leq 60^\circ$, 否则系统中的畸变很大,其他轴外像差也很难校正。

2 自由曲面棱镜实例^[4-5]

为了研究自由曲面对非共轴系统离轴像差的校正能力,用光学设计软件 ZEMAX 设计了一个由自由

曲面棱镜组成的摄影物镜,系统由四片自由曲面组成,如图 1 所示。系统参数如下:光学系统采用矩形视场 $(10.2^\circ; 13.5^\circ), (0, 13.5^\circ), (10.2^\circ; 0), (0, 0), (10.2^\circ; -13.5^\circ), (0, -13.5^\circ)$; 系统焦距 $f=10.8 \text{ mm}$; 系统的入瞳直径 $D=4 \text{ mm}$;

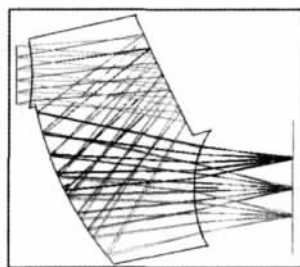


图 1 含自由曲面系统结构
Fig.1 System layout of FFS

波段范围 $0.4\sim 0.7 \mu\text{m}$ 。此类系统除了全局坐标 (X, Y, Z) 外,每个面都有其局部坐标系 (x, y, z) , 定义过光阑中心到达像面的光线为系统参考光线(类似于共轴系统的光轴)。表 1 中 D_i 为两面之间参考光线的距离; θ_i 是局部坐标 z 关于全局坐标 Z 轴的夹角,顺时针为负,逆时针为正; N_d 是材料的折射率, v_d 是材料的阿倍数。

表 1 系统结构参数

Tab.1 System parameters

Surface	D_i	θ_i	N_d	v_d
Stop	1.00	0.00	1	
Refract	8.50	0.00	1.772 5	49.60
Reflect	- 10.00	25.00	1.772 5	49.60
Reflect	8.50	- 25.00	1.772 5	49.60
Refract	6.34	0.00	1	

在 ZEMAX 中自由曲面可以用“扩展多项式”表面形式表示,自由曲面的各项归一化系数在“额外数据”表中定义。用 ZEMAX 软件多次试验,发现归一化系数与各个像差校正有密切的关系:一次项系数 C_{11} 、 C_{10} 可调节系统整体结构(偏心量和倾斜度);二次项系数 C_{20} 、 C_{22} 确定镜面 x 方向曲率;三次项系数 C_{31} 校正畸变, C_{33} 调节 y 轴上的倾斜;四次项系数可以调节高次倾斜。设计实例关于 $Y-Z$ 面对称,系统 y 方向有偏心,则各面中 y 次幂的系数对轴外像差影响大。将 C_{02} 、 C_{03} 、 C_{04} 、 C_{05} 、 C_{06} 设为变量,评价函数中以适当的比重控制减小像散、畸变、场曲等轴外像差。因为系统没有确定的对称轴,像差不能被对称调整,需要多视场分别校正,最终达到对全视场像散和畸变等轴外像差很好的校正目的。

摄像系统属于大像差系统,通常以 $MTF=0.5$ 所对应的空间频率作为评价像质指标,一般要求对应的空间频率大于等于 20 lp/mm ^[6]。由图2可知,各视场的垂轴像差都校正到小于5个波长;图3中,空间频率为 20 lp/mm 时,传递函数 $MTF=0.8$;由图4可知,光学系统的畸变

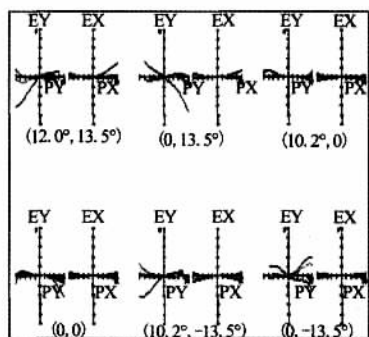


图2 像差曲线

Fig.2 Aberration curve

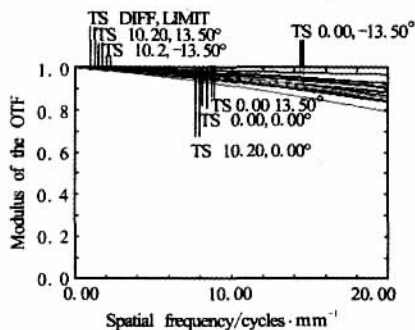


图3 MTF 曲线

Fig.3 MTF curve

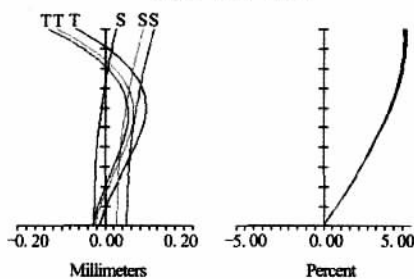


图4 场曲畸变图

Fig.4 Curvature and distort layouts

和场曲也比较小,因此,在成像允许范围内,光学系统在各视场成像质量都较好。设计实例与传统同类摄影物镜相比,光路缩短,总长仅为 14.86 mm ;视场相对扩大;系统传递函数得到提高, $MTF=0.5$ 时,对应的空间频率为 45 lp/mm 。此类系统一般焦距较短,系统紧凑,结构简单,适用于小型光电设备。如手机摄像镜头、数码相机等要求镜头体积非常小、质量轻、成像效果好,

而应用自由曲面棱镜可以满足以上要求。自由曲面棱镜一般采用模压成型技术^[7],不但可以减小系统的装调误差,而且模具成型,可以降低批量生产的成本。因此,自由曲面棱镜具有广泛的应用前景。

3 结 论

自由曲面的非轴对称性和多设计自由度,在非共轴系统中能校正系统的离轴像差,提高成像质量。设计实例仅有四面自由曲面组成,有效焦距 10.8 mm ,相对口径 $1/2.7$,水平半视场 10.2° ;垂直半视场 13.5° 。镜头视场中心分辨率高于 20 lp/mm ,这样的成像质量能满足现代摄影和光电摄像的要求。同样成像效果下,与共轴摄影物镜相比,实例结构简单、体积小、质量轻;与离轴摄影物镜相比,实例中系统不用镜面装调,可减少费用、扩大成像视场。

参考文献:

- [1] YANG Jian -feng, An Bao -qing, XUE Ming -qiu. Study on uncoaxial all -reflective system with large field of view[J]. Acta Photonica Sinica(杨建峰,安葆青,薛鸣球.大视场三反射面非球面共轴光学系统研究.光子学报),1997,26(3):277- 81.
- [2] NORIHIRO Nanba, KEISUKE Araki. Small -Sized Variable Magnification Optical System:US, 6459530 B2[P].2002- 10.
- [3] GENG Su -jie, MA Hong. The investigation of construction of non -coaxial optical system [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics(耿素杰,马宏.非共轴光学系统结构的研究.长春光学精密机械学报),1997, 20(3): 65- 68.
- [4] SEKITA Makoto. Phototaking Ptical System And Optical Device:US,5917662[P].1991- 01.
- [5] SEKITA Makoto, TAKESHI Akiyama. Observation Optical System And Optical Device Having the Same:US, 6529330 B1 [P].2003- 04.
- [6] HU Yu -xi, ZHOU Shao -xiang, WANG Ke -yi. Camera lens with ultra-large aperture[J]. Optical Technology(胡玉禧,周绍祥,王克逸.超大孔径摄像镜头设计.光学技术),2002, 28(3):226- 227.
- [7] KITAGAWA Seiichiro, SUZUKI Takatoshi, IIZUKA Youichi, et al. Design and fabrication of injection molded plastic optics with nano -cadcam [C]//Proceedings of SPIE, Optical Scanning Systems: Design and Applications, 1997,3131:280- 289.