

文章编号 1004-924X(2012)07-1421-06

离轴回转对称棱镜式头戴显示器目镜的研制

王健^{1,2*}, 刘英¹, 郭帮辉^{1,2}, 孙强¹, 卢振武¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:针对大曲率自由曲面棱镜在加工中存在表面粗糙度差的问题,本文采用离轴非球面面型研制了棱镜式虚拟显示目镜。目镜的3个光学表面都采用了回转对称的非球面面型,其加工精度比自由曲面高且加工难度大大降低。通过控制棱镜各表面的曲率、倾斜角度来实现短焦距和大视场并通过优化高次非球面系数校正像差。实验结果显示:研制的目镜其光瞳大小为6 mm,视场大小为55°;在30 lp/mm处,轴上视场的调制传递函数(MTF)值高于0.2,轴外视场的MTF值高于0.1,目镜的最大畸变量为-5.37%。棱镜的检测和试验结果表明:与自由曲面棱镜相比,采用非球面面型能够显著降低棱镜表面的粗糙度,避免图像重影现象,成像更为清晰,虚拟成像的目视效果得到了明显改善。

关键词:离轴棱镜;回转对称;虚拟显示;头戴显示器;目镜

中图分类号:TN141 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1421

Development of HMD eyepiece with prism of decentered rotationally symmetrical surfaces

WANG Jian^{1,2*}, LIU Ying¹, GUO Bang-hui^{1,2}, SUN Qiang¹, LU Zhen-wu¹

(1. *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)*

** Corresponding author, E-mail: mrwangj@yahoo.com.cn*

Abstract: To solve the problem of poor roughnesses for heavy curved freeform surfaces in prism processing, a Head Mount Display (HMD) prism with decentered aspheric surfaces was developed. All the optical surfaces of the prism were rotationally symmetrical aspherics, which showed a better processing property as compared with freeform surfaces. A short focal length and a large field of view were obtained by controlling the surface curvatures and tilt angles, and the aberration was corrected by optimizing aspheric coefficients. Experiments show that the HMD prism has an exit pupil of 6 mm and a field of view of 55°. At the frequency of 30 lp/mm, the axial Modulation Transfer Function(MTF) is over 0.2, the off-axial MTF is over 0.1, and the maximum distortion is -5.37%. The test and experiment on the prism demonstrate that the surface roughness has been greatly improved to a lower level for the aspheric surfaces, which avoids the image blurring and improves the performance of visualization.

收稿日期:2011-12-15;修订日期:2012-02-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60977001)

Key words: decentered prism; rotational symmetry; virtual display; Head Mounted Display(HMD); eyepiece

1 引言

头戴显示器(Head-Mount Display, HMD)利用微显示器件作为图像源,通过光学系统对图像源进行放大,生成可目视的虚拟场景,目前已广泛应用于军事、娱乐、虚拟制造等领域^[1-2]。随着科学技术的发展,HMD正朝着大视场、轻量化的方向发展,特别是在娱乐领域,小型化的HMD受到了越来越多使用者的青睐^[3-4]。利用棱镜式结构,只需要一个塑料镜片就能实现较大的目镜视场,并且塑料镜片可以通过注塑成型的方式批量复制,加工成本及周期与常规光学系统相比具有明显的竞争优势。所以在Canon公司发明棱镜式目镜系统以后^[5],它便作为一种常用的HMD目镜形式被众多厂家所采用^[6-8]。

由于棱镜式目镜需要倾斜其表面以将光线引到棱镜之外,因此在迄今的棱镜式目镜设计中,都是引入2个或3个自由曲面进行像差校正。文献[9]利用0.61"的微显示屏获得了53.5°视场的虚拟目镜,在设计中棱镜的3个光学面全部使用了非旋转对称的自由曲面;文献[10]利用0.44"的微显示屏和3个自由曲面,获得了36°视场的目镜;文献[11]利用0.61"的微显示屏、2个自由曲面和1个衍射面,设计了55°大视场的HMD显示目镜。在其他公开的论文及专利中,棱镜式显示目镜的设计也无一例外地采用了自由曲面面型。2009年,本课题组采用3个自由曲面设计了对角线视场为55°的棱镜式目镜,并实现了该目镜的模具化和注塑加工。对该产品的检测表明,光学表面的粗糙度指标尚不满足要求,这是因为自由曲面具有非中心对称特性,在加工时刀头只能沿着一个方向采取逐行加工的方式。光线在垂直于加工刀纹的方向容易发生散射,导致图像产生重影,特别是对于大视场的棱镜式目镜,由于焦距较短,棱镜反射面的曲率很大,使得这种散射作用尤为明显。

为了解决大视场自由曲面棱镜在加工中存在的表面粗糙度差的问题,本文对棱镜式HMD目镜进行了重新设计和研制。采用具有回转对称特

性的非球面,配合0.61"的有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)显示器件,设计并加工了视场为55°的HMD目镜。理论分析和试验测试均表明,新型的曲面棱镜能够更好地适应虚拟显示设备的要求。

2 工作原理及面型分析

棱镜式HMD由3个光学面组成,其截面如图1所示。图像源发出的光线经过表面 s_1 折射后进入棱镜内,传输至表面 s_3 时发生全反射,再经过表面 s_2 被反射,最后再次经由表面 s_3 折射到棱镜之外。棱镜中具有反射作用的表面是 s_2 和 s_3 。其中 s_2 只起到反射作用,外表面镀金属反射膜即可实现其内反射的功能; s_3 既要起到反射作用(光线由 s_1 到 s_3 时),又要起到折射作用(光线由 s_2 到 s_3 时),所以不能镀反射膜,必须利用材料自身的全反射特性,通过控制光束的行进角度实现透射和全反射的双重功能。镜片的光焦度主要靠 s_2 和 s_3 提供,表面 s_1 距离像面很近,其光焦度对系统影响最小。

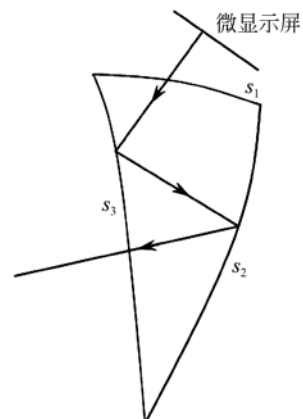


图1 棱镜式目镜工作原理图

Fig. 1 Fundamental layout of HMD prism

常规透射表面的光焦度为

$$\Phi = \frac{n-1}{R}, \quad (1)$$

其中: n 为材料的折射率, R 为镜面曲率半径。而

对于内反射表面,其光焦度

$$\Phi = \frac{2}{R}. \quad (2)$$

对比式(1)、(2)可以看出,与普通折射面相比,内反射面只需要较小的曲率就能获得相同的光焦度,因此具有更高的折光效率,并且反射面不会引入色差,因而棱镜式目镜容易实现大视场目镜的简化设计。但大的光焦度同时也意味着对光束角度的改变更加强烈,对表面面型误差就比普通透镜更为敏感。

假设一个光学表面的面型误差为 δ ,若其为空气中的折射面,则它引起的波像差为

$$\Delta W = \delta(n-1). \quad (3)$$

对于内反射面,由面型误差引起的波像差为

$$\Delta W = 2\delta n. \quad (4)$$

以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为例,其折射率约为1.49。由式(3)和(4)可知,对于内反射面,由加工面型误差引起的波像差约为 3δ ,是折射面的6倍。因此,提高曲面棱镜内反射面面型的加工精度非常重要。而目前国内外的加工情况是,非对称自由曲面的加工速度和精度都远不及回转对称曲面,因此对于本系统来说在反射面(s_2 和 s_3)上应尽可能采用具有回转对称特性的曲面。

3 HMD 目镜的设计及研制

根据对HMD的使用需要,制定目镜系统的指标如表1所示。

表1 目镜系统指标

Tab. 1 Specification of HMD system

参数	技术指标
视场角	55°
工作波段	486~656 nm
出瞳直径	6 mm
出瞳距离	18 mm
图像源显示屏大小	0.61"
显示屏像素大小	15 μ m
显示屏分辨率	800×600
所成虚像位置	2 m

目前,关于棱镜式HMD目镜的很多专利都公开了曲面棱镜的设计参数。这些专利中采用的自由曲面面型通常为X-Y多项式型或Zernike多项

式型。借鉴现有的专利和研究成果,本文采用PMMA作为镜片材料,利用此前的研究成果作为系统的初始结构^[11],其中表面 s_2, s_3 为自由曲面。

本文的研制目标是将自由曲面转化为高次非球面。首先,根据各个曲面的方程对每个表面进行离散化采样,以原来的坐标原点作为新的表面面型原点,利用高次非球面方程形式进行拟合。采用的非球面方程为:

$$z = \frac{cr^2}{\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6, \quad (5)$$

其中 c 为曲面中心处的曲率, k 为圆锥系数, A 和 B 分别为高次非球面项系数。

通过拟合得到的新表面与原表面会有一定的偏差,可能导致表面 s_3 不再满足全反射条件,影响到部分光线的追迹。在光学设计软件中将表面 s_3 的反射类型由全内反射表面改为反射面,以实现全部光线的追迹。此时,系统的性能会有一定程度的下降,需要对系统进行优化。将各表面的曲率、非球面项、偏心和倾斜量设为变量,并在优化过程中控制以下参数:

- (1)光线在表面 s_3 的反射角度要满足全反射要求,大于临界角;
- (2)根据微显示屏的尺寸限定不同视场主光线与像面交点的坐标,即限定边缘视场的像高;
- (3)控制镜片的电视畸变量;
- (4)对棱镜的边角进行结构尺寸的限定。

优化后,去除表面 s_3 的反射角度约束去除,把表面类型由反射面改为全内反射面,这样可以提高系统的计算速度。另外,在优化函数中增加不同视场的MTF目标值,进行最后的优化。优化后得到了最终的设计结果,其光路图如图2所示。

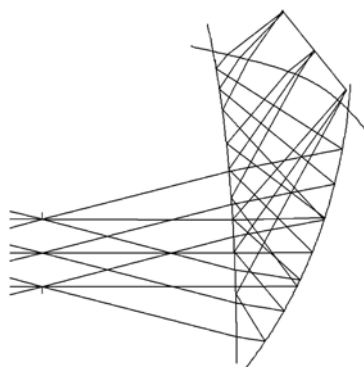


图2 曲面棱镜光路图

Fig. 2 Optical layout of curved-surface prism

描述棱镜成像质量的 MTF 曲线如图 3 所示。在 30 lp/mm 处,轴上视场的平均 MTF 高于 0.2;轴外各视场平均 MTF 高于 0.1。系统畸变如图 4 所示。棱镜式 HMD 目镜属于离轴结构,畸变不具有对称特性。从图中可以看出,畸变量在图像下方两个角达到最大值-5.37%。由于设计目镜时是从人眼向显示屏的方向追迹光线,在目镜实际应用时,光线传输方向相反,畸变的符号为反号,通过目镜观察到图形的畸变方向也将与设计相反。图 5 给出了目镜的横向光线像差曲线。由于单片棱镜式目镜不具备色差校正能力,系统中仍存在一定的色差。

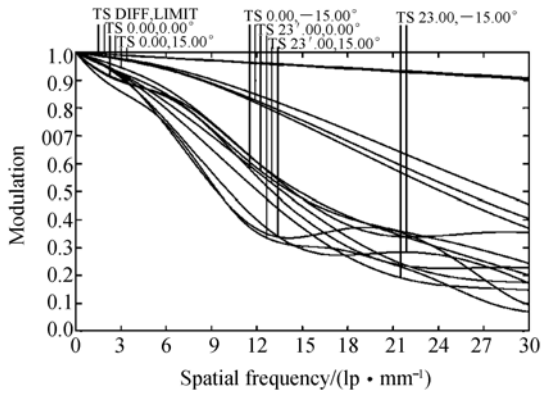


图 3 目镜 MTF 曲线
Fig. 3 MTF curves of HMD

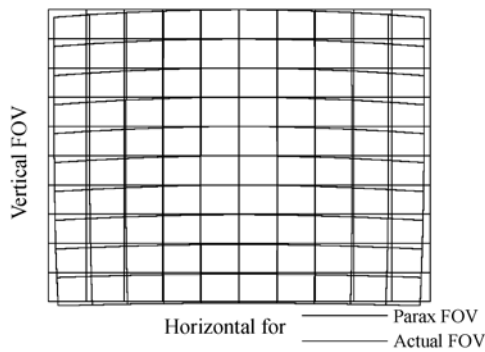


图 4 目镜畸变网格图
Fig. 4 Distortion grid of HMD

本文对设计的 HMD 目镜进行开模和注塑生产,得到的产品如图 6 所示。利用 FRT 光学轮廓仪对产品的表面粗糙度进行了测试,并与之前生产的自由曲面棱镜进行了比较,对比结果如表 2 所示,其中 R_a 为表面粗糙度的算术平均偏差, R_q 为轮廓均方根偏差。从表中可以看出,棱镜采用

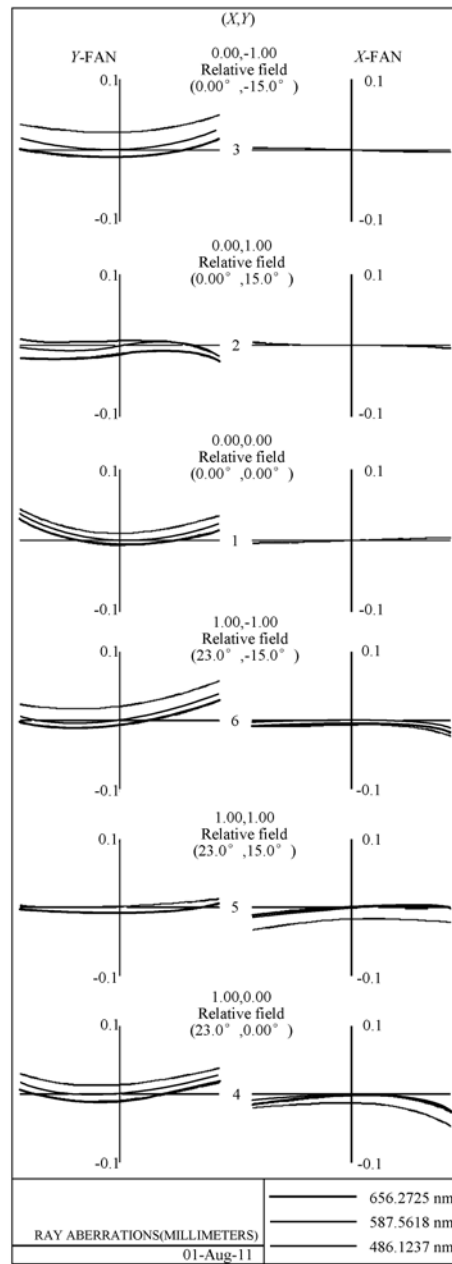


图 5 横向光线像差曲线
Fig. 5 Curves of transverse ray aberrations



图 6 采用回转对称的非球面面型的曲面棱镜
Fig. 6 Photo of prism with aspheric surfaces

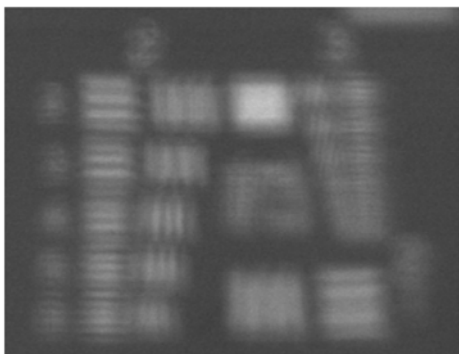
回转对称的非球面面型后,表面粗糙度有了明显改善。特别是曲率较大的 s_1 面,表面粗糙度的轮廓均方根偏差由 29.4 nm 下降至 5.5 nm。

表 2 自由曲面与非球面表面粗糙度对比

Tab. 2 Surface roughnesses of freeform and aspheric surfaces (nm)

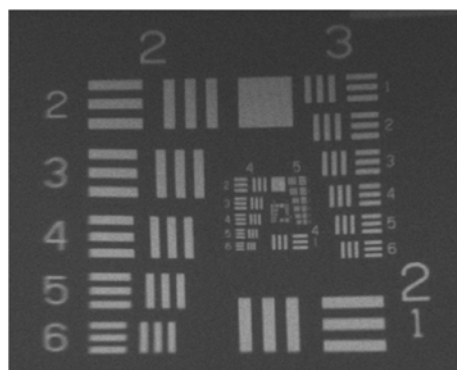
棱镜面	自由曲面面型		非球面面型	
	R_a	R_q	R_a	R_q
s_1	23.3	29.4	4.2	5.5
s_2	16.3	21.1	5.1	7.6
s_3	8.5	11.5	4.9	7.3

在完成目镜与微显示屏的组合装配后,利用 OLED 微显示屏生成鉴别率靶图形,进行新老产品的对比观察测试。新研制的棱镜消除了加工波纹导致的图像重影现象,分辨率和对比度都比此前加工的自由曲面棱镜有所改善,测试结果如图 7 所示。



(a)自由曲面棱镜

(a)Free-form-surface prism



(b)回转对称曲面棱镜

(b)Rotationally-symmetric-surface prism

图 7 新老产品对比测试结果

Fig. 7 Results of comparison test between old and new products

4 结 论

为了改善大视场自由曲面棱镜式 HMD 目镜加工中存在的粗糙度差的缺点,采用具有回转特性的面型形式,研制了离轴非球面曲面棱镜。该棱镜目镜在 30 lp/mm 处的轴上视场平均 MTF 高于 0.2;轴外各视场平均 MTF 高于 0.1,最大畸变量为 -5.37%。对该目镜的表面粗糙度进行了测试,结果表明,采用回转对称的非球面面型后,棱镜的表面粗糙度有了十分明显的改善。镜片装配后的试用结果表明,与此前加工的自由曲面棱镜相比,离轴非球面曲面棱镜消除了图像重影现象,成像更为清晰,能够达到虚拟显示成像的使用要求。

参考文献:

- [1] CAKMAKCI O, ROLLAND J. Head-worn displays: a review[J]. *J. Display Technol.*, 2006, 2(3):199-216.
- [2] 张晓兵,安新伟,刘璐,等.头盔显示器的发展与应用[J]. *电子器件*, 2000, 23(1):51-59.
ZHANG X B, AN X W, LIU L, *et al.*. Development and application of helmet-mounted displays [J]. *Journal of Electron Devices*, 2000, 23(1):51-59. (in Chinese)
- [3] 程德文,王涌天,常军,等.轻型大视场自由曲面棱镜镜头显示器设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36

(3):309-311.

CHENG D W, WANG Y T, CHANG J, *et al.*. Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 309-311 (in Chinese).

- [4] 孙强,柳荣,朴仁官,等.塑料非球面透镜在头盔 3D 显示中的应用[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):47-52.

SUN Q, LIU R, PIAO R G, *et al.*. Application of plastic aspherical elements in head mounted 3D display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):47-52. (in Chinese)

- [5] HIROAKI H, NAOSATO T, HIDEKI M, *et al.*. Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry[J]. *SPIE*, 1996, 3653: 234-242.
- [6] OKUYAMA A, TOKOROZAWA, YAMAZAKI S, *et al.*. Optical system, and image observing apparatus and image pickup apparatus using it: USA, 5706136[P]. 1998-1-6.
- [7] SHOICHI Y, KAZUTAKA I, YOSHIHIRO S, *et al.*. A thin, wide-field-of-view HMD with free-form-surface prism and applications [J]. *SPIE*, 1999, 3639: 453-462.
- [8] TOGINO T. Optical system and image display apparatus: USA, 6128136[P]. 2000-10-3.
- [9] CHENG D W, WANG Y T, HUA H, *et al.*. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism [J]. *Applied Optics*, 2009, 48 (14): 2655-2668.
- [10] 陈云亮, 李铁才, 邱祥辉. 头戴显示器中自由曲面棱镜的设计[J]. *应用光学*, 2009, 30(4): 552-557. CHEN Y L, Li T C, QIU X H. Design of free-form-surface prism in head mounted display [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(4): 552-557. (in Chinese)
- [11] 姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 508-514. JIANG Y, SUN Q, GU L SH, *et al.*. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 508-514. (in Chinese)

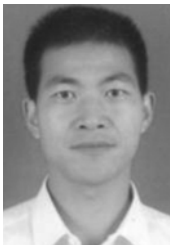
作者简介:



王 健(1980—),男,吉林辉南人,博士研究生,助理研究员,2002年,2005年于南开大学分别获得学士和硕士学位,主要研究领域为光学设计,红外光学系统。E-mail: mrwangj@yahoo.com.cn



刘 英(1980—),女,山东滨州人,博士,助理研究员,2005年于山东师范大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com



郭帮辉(1983—),男,湖北鄂州人,博士研究生,研究实习员,2006年,2008年于华中科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事红外光学系统的研究。E-mail: gbhyxl@163.com



孙 强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

导师简介:



卢振武(1955—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1982年于东北师范大学获得学士学位,1985年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn