

文章编号:1004-4213(2011)07-1051-4

大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计

杨波, 韦晓娜, 张薇, 庄松林

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: 头盔显示器系统由于自身对尺寸和重量有严格要求, 采用自由曲面器件可以起到减少透镜片数, 从而缩小系统尺寸、减轻重量等作用. 针对目前单片式自由曲面棱镜解决方案存在的出瞳直径小, 棱镜自由曲面光学面加工定位困难等问题, 介绍了一种大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计方法, 并给出了设计结果. 设计方案采用了自由曲面棱镜和薄透镜的双片式结构, 棱镜和薄透镜都各自含有一个平面光学面, 有效降低了加工难度, 同时薄透镜与显示器可以作为一个整体调整, 不增加装调难度, 采用 0.61 寸微型显示器, 对角视场 45° , 出瞳直径达到了 10 mm.

关键词: 自由曲面; 光学元件; 光学设计; 成像系统; 非对称结构

中图分类号: O43; TP39

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114007.1051

0 引言

随着科学技术的发展, 光电产业对光学系统的性能要求也越来越高. 现代光电系统正朝小型化、高性能方向发展, 因而要求相应的光学系统以较紧凑的结构实现较高的成像质量. 光学制造技术的进步也为批量生产具有复杂、不规则面形的光学元件提供了便利^[1]. 近年来自由曲面光学系统 CAD 已成为国内外光学设计领域的一个研究热点, 越来越多的新型高性能光学系统已经采用自由曲面光学元件作为其核心器件^[2-6].

自由曲面头盔显示器是一种典型的现代光电显示系统, 对头盔显示器的要求为佩戴舒适、结构紧凑、体积小、成像质量好和尽可能大的视场. 传统的共轴目镜结构形式无法解决系统对视场角、出瞳距离的要求与小型轻量化之间的矛盾. 为了适应系统需求, 采用自由曲面设计目视光学系统, 既能获得大视场角和大出瞳距离, 也能满足其他技术指标. 头盔显示器在多媒体娱乐、军事、工业、医疗等领域都具有巨大的应用价值和市场.

鉴于自由曲面在头戴式显示器的光学系统中带来的益处, 已有国内外很多研究机构及企业例如奥林巴斯、佳能等申请了关于自由曲面头戴式显示器的多项发明专利, 大都采用了单片式自由曲面棱镜结构^[7-10]. 这些方案共同的缺点是出瞳直径较小, F

数大, 采用的作为图像源的微型显示器尺寸较大. 对于双目头戴式显示器系统而言, 由于人眼的瞳距差异较大 ($54 \sim 70$ mm), 头戴式显示器出瞳直径如果太小, 对不同使用者可能需要调节瞳距, 否则可能看不到图像. 此外, 如果出瞳直径较小, 头盔佩戴时定位不准也会导致使用者看不到图像. 目前的单片自由曲面棱镜式方案大多使用 3 个或更多的自由曲面光学面, 并且每个面都具有偏心和倾斜, 在加工每个光学表面时, 由于基准很难确定, 加工准确度很难保证. 本文介绍了一种大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计方法, 并给出了设计结果. 设计方案采用了自由曲面棱镜和薄透镜的双片式结构, 棱镜和薄透镜都各自含有一个平面光学面, 极大降低了加工难度, 同时薄透镜与显示器可以作为一个整体调整, 不增加装调难度, 采用 0.61 寸微型显示器, 对角视场 45° , 出瞳直径达到了 10 mm.

1 自由曲面头盔显示器的设计方法

为了实现大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计, 首先选定系统结构形式. 采用由自由曲面棱镜和薄透镜构成的双片式结构, 系统结构如图 1. 附图中光学元件及表面序号从出瞳(眼瞳)开始为表面 1. 自由曲面棱镜有三个光学表面, 但其中只有两个面是自由曲面, 分别为附图中的面 2 和面 3, 棱镜的第三个光学表面顶面 4 为平面. 其中表面 2 相对于

基金项目: 上海市教委科研创新项目基金(No. 10YZ98)和上海市研究生创新基金(No. JWCXSL1022)资助

第一作者: 杨波(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计和 CAD. Email: yangbo@usst.edu.cn

通讯作者: 韦晓娜(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计. Email: alnawei@126.com

收稿日期: 2010-12-31; **修回日期:** 2011-02-28

观察者侧为凹面形状的透射面,表面3相对于观察者侧为凹面形状的反射面,外侧镀有反射膜层.自由曲面薄透镜有两个光学表面5和6,其中面5是自由曲面,面6为平面与微型显示器表面重合.系统采用反向光路设计,光线从人眼位置面1出发,经过自由曲面棱镜折反射后再经过自由曲面薄透镜最后在图像显示器所在平面成像.实际光路是微型显示器6发出光线,如图1,先经过薄透镜的后表面6透射,然后经过薄透镜前表面5出射后再经棱镜顶面4进入自由曲面棱镜,然后在表面2内侧发生全反射,再经过表面3反射,最后再次经过表面2出射后进入人眼.本文所采用的自由曲面方程以及边界条件的控制都与申请号为200810167800.7的发明专利类似,但不同点在于棱镜顶面为平面,同时增加了一片后表面为平面的自由曲面薄透镜,从而极大降低了加工难度.

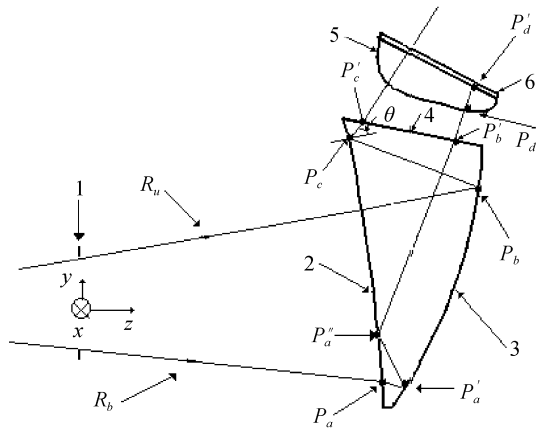


图1 光学系统结构控制示意图

Fig. 1 Structure control diagram of the optical system

由于自由曲面头盔显示器光学系统的各个光学面都具有倾斜以及离轴等特性,导致子午与弧矢两个方向的像差不同,在优化设计过程中将棱镜的两个光学面以及薄透镜的一个光学面设置为非旋转对称的自由曲面,用以分别校正子午以及弧矢方向的像差.在设计过程中,棱镜的两个自由曲面2和3以及自由曲面薄透镜的前表面5的面形满足曲面方程(1)~(3)中的任一个,并将每个曲面控制为平面对称曲面.自由曲面棱镜的三个光学表面之间应满足条件方程(4)~(6),以保证棱镜的结构合理,光线入射角应满足全反射条件方程(7).

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k_x)c_x x^2 - (1+k_y)c_y y^2}} + \sum_{i=1}^n A_i \{ (1-P_i)x^2 + (1+P_i)y^2 \}^{i+1} \quad (1)$$

式中 C_x 是曲面 xz 平面内 x 方向的曲率半径, C_y 是曲面在 yz 平面内 y 方向的曲率半径, K_x 是曲面 x 方向的二次曲线系数, K_y 是曲面 y 方向的二次曲线

系数, A_i 是 4, 6, 8, 10, \dots $2n$ 阶非球面系数, 关于 z 轴旋转对称, P_i 是 4, 6, 8, 10, \dots $2n$ 阶非旋转对称系数.

$$z(x, y) = \frac{C(x^2 + y^2)}{1 + [1 - (1+k)C^2(x^2 + y^2)]^{1/2}} + c_4 y^2 + c_6 x^2 + c_7 y^3 + c_9 y x^2 + c_{11} y^4 + c_{13} y^2 x^2 + c_{15} x^4 + c_{16} y^5 + c_{18} y^3 x^2 + c_{20} y x^4 + c_{22} y^6 + c_{24} y^4 x^2 + c_{26} y^2 x^4 + c_{28} x^6 + c_{29} y^7 + c_{31} y^5 x^2 + c_{33} y^3 x^4 + c_{35} y x^6 + \dots \quad (2)$$

式中 C 为曲面曲率半径, c_j 为多项式系数.

$$z = \frac{cx^2}{1 + [1 - (1+k)c^2 x^2]^{1/2}} + Ax^4 + Bx^6 + Cx^8 + Dx^{10} \quad (3)$$

式中 c 为曲率半径, k 为二次曲面系数, A 、 B 、 C 、 D 分别为 4、6、8、10 阶非球面系数.

棱镜的三个光学表面之间应满足条件方程(4)~(6)

$$\begin{cases} 0.5 < z_{Pa'} - z_{Pa} < 2 \\ y_{Pa'} - y_{Pa} < 0 \\ y_{Pa''} - y_{Pa} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} y_{Pb'} - y_{Pb} > 0 \\ -1.5 < z_{Pb'} - z_{Pb} < -0.2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} -2 < y_{Pc} - y_{Pc'} \leq 0 \\ 0 < z_{Pc} - z_{Pc'} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$-4 < y_{Pd} - y_{Pd'} \leq -2 \quad (7)$$

式(4)~(7)中 y 和 z 分别表示全局坐标系下的曲面上任意点的坐标值,下标表示光线与自由曲面棱镜与薄透镜的不同交点,如图1, R_u 是 Y 方向最大视场边缘光线, R_b 是 Y 方向最小视场下边缘光线; P_a 为 R_b 与第一表面2透射时的交点, P_a' 为 R_b 与第二表面3的交点, P_a'' 为 R_b 与第一表面2反射时的交点, P_b 为 R_u 与第二表面3的交点, P_b' 为 R_b 与第三表面4的交点; P_c 为 R_u 与第一表面2反射时的交点, P_c' 为 R_u 与第三表面4透射时的交点. P_d 为光线 R_b 在自由曲面薄透镜前表面的交点, P_d' 为光线 R_b 与自由曲面薄透镜后表面的交点.

光线在第一次经过自由曲面棱镜的第一个表面2时发生透射,经过棱镜第二个表面反射后再次到达表面2时发生全反射,因此 Y 方向最大视场上边缘光线与自由曲面棱镜表面2两次相交时入射角应满足关系式(8).

$$\theta > \arcsin(1/n) \quad (8)$$

式中 θ 为 Y 方向最大视场上边缘光线第二次入射到棱镜表面2时的入射角,式中 n 为棱镜透明材料的折射率.

2 设计实例

根据第 1 节所述的自由曲面头盔显示器光学系统的光路布置方案以及结构控制方法,采用 CODE V 优化设计得到了双片式自由曲面头戴显示器光学系统的实例.设计实例系统剖面图如图 2.设计实例采用了对角线长度为 0.61 英寸的 OLED 微型显示器作为图像源,分辨率为 800×600 ,像素尺寸 $15 \mu\text{m}$,光学系统成像于无穷远时,对角视场为 45° ,光学系统焦距为 18 mm,出瞳直径 10 mm.微型显示器与自由曲面薄透镜固定为一个整体,自由曲面棱镜出射表面 2 到出瞳 1 之间的距离为 30 mm,以满足戴有近视眼镜的使用者的需求.自由曲面棱镜的实际尺寸约为 $30 \times 30 \times 15 \text{ mm}^3$,重量小于 12 g,自由曲面薄透镜厚度约为 $13 \times 11 \times 4 \text{ mm}^3$,重量小于 1.5 g.为了使用户看到清晰没有明显变形的画面,需要对像差和畸变进行控制,设计结果使得光学系统最大视场畸变不超过 5%.光学系统中心视场的传递函数值在 30 lp/mm 处大于 0.3,边缘视场传递函数值在 30 lp/mm 处大于 0.1,调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线以及畸变曲线分别如图 3(a)和(b).

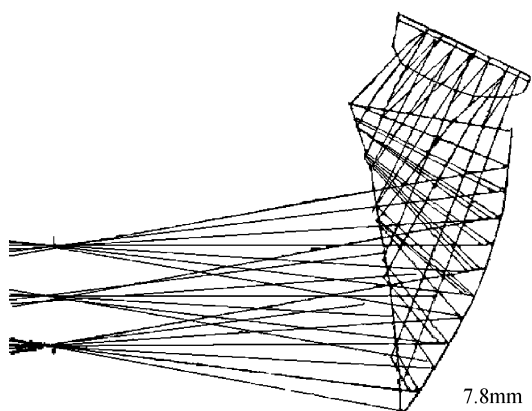


图 2 光学系统设计实例结构示意图
Fig. 2 Design example of the optical system of free-form HM

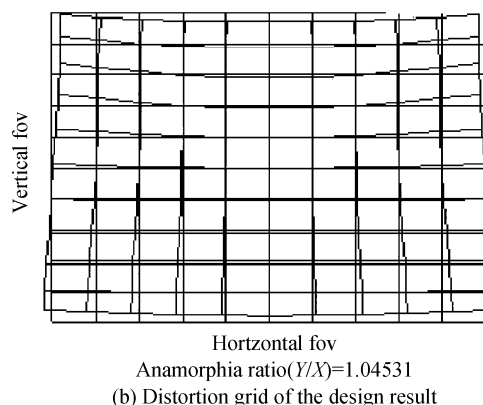
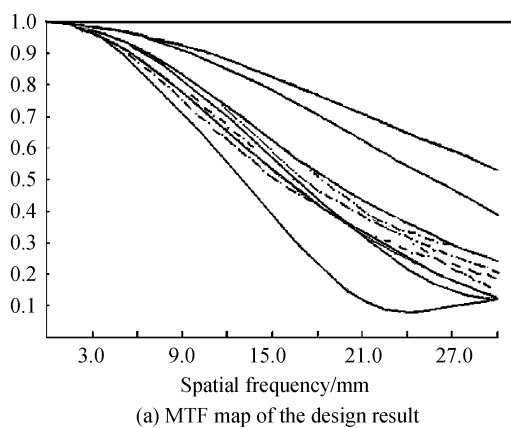


图 3 自由曲面 HMD 光学系统设计实例光学性能评价图
Fig. 3 Optical performance of the design example of free-form HMD system

与目前常见单片式结构显示系统所能达到指标进行对比有明显的改进,如表 1.

表 1 HMD 光学系统性能指标
Table 1 Characteristics of HMD

Dual channel HMD	Single HMD
Users can see the outside world and computer-generated virtual images	Users can only see the computer generated images
As you can see the outside world, so difficult to produce vertigo	User immersion in the virtual world, is not prone to mental
Field of view (FOV) without too much	To get a sense of immersion, requiring larger field of view display
LCD display with the outside world (brightness, color, movement)	LCD display with the outside world (brightness, color, movement) has nothing to do
Requirements of the external world objects and virtual scene precise alignment position. For tracking, up high precision	Relatively low requirements on the tracking system

3 装调准确度误差分析

由于仪器内存在着间隙、摩擦、死区,以及机械与电气材料和器件在尺寸、形状、相互位置以及其他参量等方面的制造及装调的不完善所以起得误差和非对称特性的缘故,都会影响仪器准确度调节.为此,本文采用 3 种方法减小误差:

- 1) 采用可调中心距,降低或者消除由于光学元件中间距不在一条直线上的回程误差;减小各器件的摩擦力;选用适当的材料、减小正压力等.
- 2) 正确应用仪器设计原理和设计原则;合理的确定仪器的结构参量;合理的结构工艺;设置适当的调整环节和补偿环节.
- 3) 增加机构的刚度.

4 结论

现代光电系统正朝小型化、高性能方向发展,自由曲面器件的应用,有利于成像光学系统以较紧凑的结构实现较高的成像质量. 本文介绍了采用自由曲面头盔显示器光学系统的设计方法,并根据此方法给出了设计实例,结果表明本文所述方法的可行性. 本文所提设计方法对其他具有非共轴光学系统也具有一定指导意义.

参考文献

- [1] YANG Bo, WANG Yong-tian, LIU Yue, *et al.* Efficient ray-tracing for free-form reflectors[J]. *Optik*, 2009, **120**(1): 40-44.
- [2] 程德文, 王涌天, 刘越, 等. 轻小型大视场自由曲面棱镜头盔显示器光学系统: 中国, 200810167800. 7 [P]. 2008-10-16.
- [3] WANG Hong, ZHOU Ya, LIU Yue, *et al.* Research on the real-virtual occlusion in an optical see-through AR system[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, **13**(8): 1565-1569.
- 王红, 周雅, 刘越, 等. 光学透视式增强现实显示系统虚拟遮挡问题研究[J]. 中国图像图形学报, 2008, **13**(8): 1565-1569.
- [4] DU Xue, WANG Er-qi, LI Rong-bin, *et al.* Investigation on error factor of injection molding plastic for freeform optics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(6): 684-688.
- 杜雪, 王尔祺, 李荣彬, 张志辉. 自由曲面光学透镜注射成型误差因素研究[J]. 应用光学, 2007, **28**(6): 0684-688.
- [5] ZHAO Xing, FANG Zhi-liang, CUI Ji-cheng, *et al.* Study on the optical engine of the mini-projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 913-918.
- 赵星, 方志良, 崔继承, 等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 913-918.
- [6] HICKS R A. Direct methods for freeform surface design[C]. *SPIE*, 2007, **6668**: 666802.
- [7] CHANG S. Off-axis reflecting telescope with axially-symmetric optical property and its applications[C]. *SPIE*, 2006, **6265**: 626548.
- [8] JEONG H S, YOO H S, LEE S H, *et al.* Low profile optic design for mobile camera using dual freeform reflective lenses [C]. *SPIE*, 2006, **6288**: 628808.
- [9] TOGINO T. De-centered optical system and optical apparatus equipped therewith; US, 6646812[P]. 2003-11-11.
- [10] TAKAHASHI J. Image display apparatus; US, 6028709 [P]. 2000-02-22.

Design Method of a Free-form HMD System with Large Pupil Size

YANG Bo, WEI Xiao-na, ZHANG Wei, ZHUANG Song-lin

(Optical and Electronic Information Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 00093, China)

Abstract: Usually, free-form optical surfaces do not have rotational symmetry compared with traditional spherical and aspheric elements, so they have more freedom for system design. In some optical systems which have strict package requirements, such as overall length, weight and volume etc., free-form optical elements can help to satisfy these requirements through reducing lens number of the system. In this paper, the design method of free-form optical elements was introduced, and proposed several design examples of the optical system were proposed which adopted free-form optical elements. From these design examples, the advantages of using free-form optical elements could be proved. The size of the micro-display used is 0.61 inch and FOV is 45°. The exit pupil diameter is 10 mm.

Key words: Free-form; Optical elements; Optical design; Imaging system; Non-symmetric structure