

文章编号 1004-924X(2012)05-0979-09

超大视场头盔显示光学系统设计

卢海平^{1,2*}, 刘伟奇¹, 康玉思¹, 魏忠伦¹, 冯睿¹, 付瀚毅^{1,2}

(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 100039)

摘要: 设计了大视场头盔显示器的目视光学系统, 用于满足头盔显示器对大视场、小畸变、高分辨率以及轻量化的苛刻要求。采用 4×3 阵列式排列、视场角为 $33^\circ \times 24^\circ$ 的12组高质量成像目镜系统拼接成单眼目视光学系统来实现系统的大视场设计。为了使系统轻量化, 每个单元目镜只采用一片透镜; 透镜一面采用二元光学衍射面, 利用其特殊色散特性校正目镜系统色差; 另一面采用非球面, 用于校正目镜光学系统的初、高级单色像差。其图像源为高亮度、高分辨率的OLED微显示器。设计结果显示: 单目目视光学系统水平视场达到 120° , 垂直视场为 60° , 角分辨率为 $43 \text{ pixel}/(\circ)$; 单个目镜系统传递函数在 40 lp/mm 处, 轴上视场高于0.62, 全视场高于0.1; 系统畸变小于3%; 系统的双目视场为 $160^\circ \times 60^\circ$, 双目重叠视场为 $80^\circ \times 60^\circ$ 。该设计实现了超大视场, 满足头盔显示光学系统的成像要求。

关键词: 头盔显示器; 二元光学; 非球面; 视场拼接; 光学设计

中图分类号: TN141 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20122005.0979

Design of compact optical system in wide-angle head mounted display

LU Hai-ping^{1,2*}, LIU Wei-qi¹, KANG Yu-si¹, WEI Zhong-lun¹,
FENG Rui¹, FU Han-yi^{1,2}

(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: luhaiping21@yahoo.com.cn*

Abstract: An optical system for eyepieces was designed to meet the demand of a wide-angle head mounted display for the wide Field of View (FOV), high resolving power and compact, light-weight structure. Twelve groups of high quality eyepieces with a FOV of $33^\circ \times 24^\circ$ arranged in a 4×3 array were stitched in a single-eye optical system to realize the design with a wider FOV. The eyepiece was made up of a lens which contained a diffractive surface and an aspheric surface. The dispersion characteristics of binary optical elements were used to correct the chromatic aberration, and the aspheric surface was selected to correct the aberrations (spherical aberration, astigmatism, coma and distortion).

收稿日期: 2011-12-28; 修订日期: 2012-02-04.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA032701); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No. 61007009)

Furthermore, an OLED micro-displayer was used to achieve compact and light-weight structure, and the field-of-viewing stitch was used to implement the wide field of view. Experiments show that obtained optical system can offer the horizontal FOV of 120° and the vertical FOV of 60° . Moreover, the resolving power is 43 pixel/degree, the MTF is higher than 0.1 at a spatial frequency of 30 lp/mm across the entire visual field, and the maximum distortion is less than 3%. The optical system has perfect performance and can meet the domanical demands of virtual reality display and super-wide FOV.

Key words: Head Mounted Display (HMD); binary optics; aspheric surface; field-of-view stitching; optical design

1 引言

近几十年来,头盔显示技术的发展面临着技术上的挑战。已经市场化的头盔显示器的视场都在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 内,远远小于人眼的可视范围。人的单眼视场基本上是 $150^\circ\times 120^\circ$,但由于人的两眼有视场的重叠,因此人两眼总的视场是 $200^\circ\times 120^\circ$ 。其实人眼最敏感的视场只有 $6^\circ\sim 8^\circ$,在这区域外视觉灵敏度下降非常剧烈,但是,周边视场在虚拟现实系统中起着非常重要的作用。周边视场增强了沉浸感即对周围环境感知能力,而且大的周边视场可以减少头部运动要求和搜索时间^[1-3]。

为了满足人眼对超大视场的需求,世界各国进行了大量的超大视场头盔显示器(HMD)的研究,主要结构形式有 3 种:(1)采用单一目镜设计,这种结构很难消除畸变,视场也受到透镜尺寸的限制,因此这种设计很难实现大视场,并且分辨率也非常低^[4-7]。(2)采用离轴折/反混合设计,图像从不同可视方向投影到凹面反射镜上,在该设计中必须采用一个中继光学系统来实现对图像源图像的放大并形成中间像,但这样做增加了系统的重量以及复杂性^[8]。(3)Nagahara 等人设计了一种独特的折反系统,使用了一组双曲面和椭球面反射镜,实现了 $180^\circ\times 60^\circ$ 的视场。微显示器的图像首先从外焦点投影到双曲面反射镜上,反射的光线向全方向扩散,最终传播到人眼的位置,也就是椭球面反射镜的一个焦点处。因为椭球反射镜的另一个焦点与双曲面的内焦点重合,这种设计结构虽然比较简单,但是由于出瞳很小,系统有严重的渐晕。当人眼转动时观察者看到的是一幅比较暗淡的图像^[9]。

为了解决现有技术存在的缺陷,本文采用视

场拼接技术来进行大视场头盔显示光学系统的设计。采用 4×3 阵列式排列的 12 组相同的视场角为 $33^\circ\times 24^\circ$ 的高成像质量的目镜系统拼接成单眼目视光学系统,实现系统的大视场设计。每个单元目镜只采用 1 片透镜来实现轻量化,而且一面采用二元光学衍射面,利用其特殊色散特性校正目镜系统色差,另一面采用非球面来校正目镜光学系统的初、高级单色像差,实现了很好的成像质量。由于有机发光二极管(Organic Light-emitting Diode, OLED)显示同时具备自发光,不需背光源、对比度高、厚度薄、重量轻、视角广、反应速度快、可用于挠曲性面板、使用温度范围广和构造及制作过程较简单等优良特性,现有头盔显示器基本选用 OLED 显示器作为微图像源^[10-14]。本文论述了视场拼接技术原理,给出了目镜光学系统的设计结果并且搭建了单眼目视光学系统的模型以及对其进行光线追迹的模拟。还对目镜光学系统中采用的非球面和衍射面的加工以及对系统的装调进行了分析。

2 视场拼接

2.1 视场拼接基本原理

单组光学系统设计难以满足全景三维立体显示器的视场宽、出瞳孔径大、出瞳距大、畸变小、分辨率高的要求,而采用视场拼接技术却很容易实现。因为视场拼接技术就是把大视场分配到多组单元透镜,使每一组单元透镜实现的视场变小,所以对于每组单元透镜的设计会比较简单,且拼接的光学系统的光学性能仍然可以保持单元透镜的光学性能。视场拼接如图 1 所示,每组单元透镜光轴以人眼的转动中心为轴,以一定角度排列在

一起,也就是每一组单元透镜的图像相互拼接在一起,形成一幅大视场的图像。单元透镜组光轴相对于人眼中心视轴偏角为 θ ,单元透镜组视场范围为 $\pm \omega'$ 。单元透镜组的任何一个视场相对于眼睛中心视轴形成的人眼视场为

$$\omega = \theta + \omega' \quad (1)$$

所以,根据单元透镜的视场以及要求相对于眼睛中心视轴的人眼视场,可以计算出单元透镜相对于中心视轴的偏角,为各单元透镜的拼接提供依据。

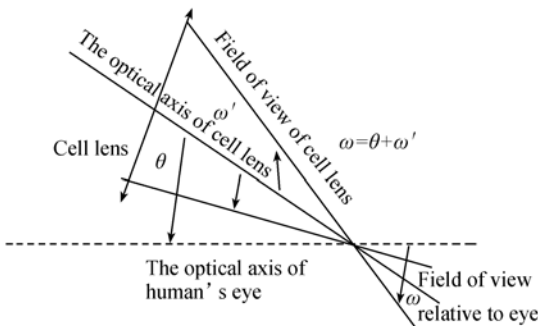


图 1 视场拼接

Fig. 1 Field of view stitch

2.2 单元目镜光轴偏角计算

要求设计的双目视场是 $160^\circ \times 60^\circ$, 双目视场重叠为 $80^\circ \times 60^\circ$, 因此单目视场为 $120^\circ \times 60^\circ$ 。如果采用 4×3 阵列式单元透镜拼接, 则要求每个单元透镜视场至少应该为 $30^\circ \times 20^\circ$, 为了实现来自不同图像源的图像间能够无缝拼接, 必须使每个单元透镜间有一定的视场重叠部分。采用单元透镜的视场为 $33^\circ \times 24^\circ$, 单元透镜间视场重叠为 $4^\circ \times 6^\circ$ 。光学系统拼接结构如图 2 所示, 图像的拼接及分割如图 3 所示。

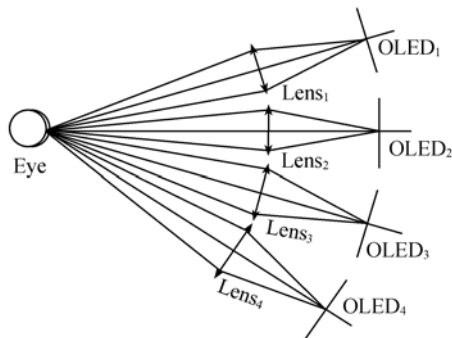


图 2 光学系统拼接

Fig. 2 Stitch of optical system

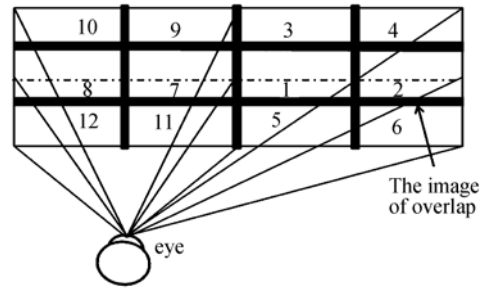


图 3 图像拼接

Fig. 3 Image stitch

根据视场拼接的原理以及单元目镜视场大小, 由公式(1)可以计算出各单元目镜的光轴偏转角度, 结果如表 1。

表 1 各单元目镜的光轴偏转角度

Tab. 1 Axial angle of every cell of optical system

单元	光轴水平偏角/(°)	光轴垂直偏角/(°)
1	0	0
2	25.5	0
3	0	18
4	25.5	18
5	0	-18
6	25.5	-18
7	-25.5	0
8	-50.95	0
9	-25.5	18
10	-50.95	18
11	-25.5	-18
12	-50.95	-18

3 光学系统设计

3.1 单元目镜光学指标

传统的 HMD 光学系统的特点是系统长、体积大、重量太重。因此, 不适合长时间戴在头部。本文根据 OLED 图像源的相关参量以及单目目视光学系统设计指标的要求设计了全塑料式 HMD 光学系统, 实现了系统的轻量化, 单元目镜光学系统的各项指标如表 2 所示。

表 2 单元透镜组的光学指标

Tab. 2 Specification of optical system of cell

全视场 (FOV)	水平全视场: 33° 竖直全视场: 24°
焦距/mm	$f=26.2$
波长	可见光
微显示器	OLED
像面/ mm^2	15.5×12.43
像元尺寸/ μm	15
分辨率/pixel	$1\ 292 \times 1\ 036$
入瞳/mm	8
入瞳距/mm	17
分辨力/(lp/mm)	$\text{MTF} \geq 0.1@40$
相对畸变/%	< 5
系统总长/mm	< 50

3.2 单元目镜光学系统设计

为了实现单元透镜组光学系统的指标并满足系统轻量化的要求,采用单片式目镜结构。由于单片透镜无法校正所有像差,所以在单片透镜中包含非球面以及二元衍射面,使得结构轻量化且成像质量高。

作为大视场拼接系统,照度均匀性对目视观察有较大影响,由于目视光学系统结构采用的是多个光学镜组的拼接实现大视场,所以总光学系统的照度均匀性取决于每个光学镜组的照度均匀性。在单元目镜设计中,各个视场的照度均匀性取决于 OLED 的亮度均匀性以及光学系统的结构。所选 OLED 的均匀性 $> 85\%$, 均匀性较好。光学系统的结构设计应尽量保证远心光路的设计,另外要注意在视场重叠处的照度均匀性,由于同一个视场来源于 2 片 OLED 发光,所以照度将会是其他视场的 2 倍,所以光学系统的设计时,在视场重叠部分加入了 50% 的渐晕,使得在视场重叠部分的照度与其他视场的照度一致。

单元透镜组光学系统设计步骤如下:首先,根据像差理论以及系统要求焦距计算出 2 个面的曲率半径,将结构参数输入到光学设计软件,保证焦距不变,然后进行优化。考虑到单元目镜拼接时透镜的尺寸要求、大视场成像质量要求,选择了全视场 50% 的渐晕。接着选择第一个面为非球面,设定高次项到第六次项为优化变量,以焦距不变、畸变小于 5% 和场曲为 0 作为约束条件,继续进行优

化。最后,在第二个面上加入衍射面,并选择为旋转对称型衍射面,设定高次项到第六次项为优化变量,约束条件不变,继续进行优化,再对衍射面加入约束条件限制周期数以保证加工,进行优化后得到最佳优化结果。光路及光学结构如图 4 所示。

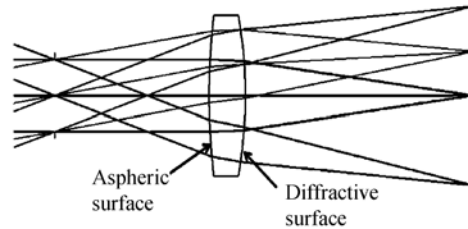
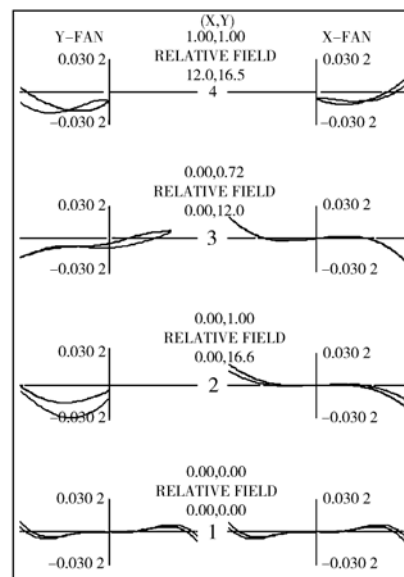


图 4 单元透镜光学系统最后结构

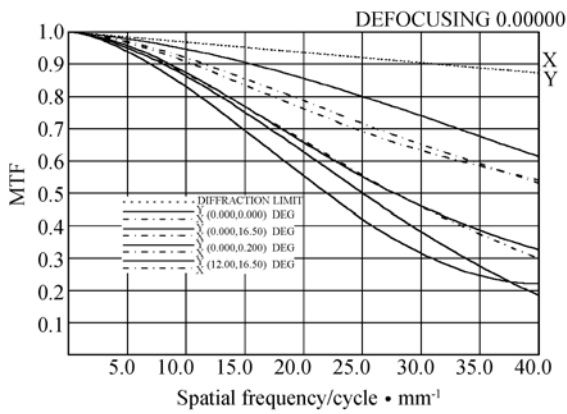
Fig. 4 Final structure of the cell of optical system

从图 4 可以看出,单元目镜接近远心光学系统,视场重叠部分也实现了 50% 的渐晕,各视场照度均匀性很好。优化结果如图 5 所示,从图 5 可以看出,该系统完全满足单元透镜光学系统的指标要求,重量仅为 1.3 g。传递函数轴上视场在 40 lp/mm 处达到 0.62,全视场达到 0.1 以上,在该空间频率下对应人眼的分辨率为 $1.7'$,接近于人眼极限分辨率 $1'$ 。光斑直径也小于 2 个像元尺寸。畸变校正得非常好,在 0.707 全视场处,畸变为 0,全视场也是小于 3%,远远高于人眼的分辨能力(人眼可以分辨 5% 的畸变),可避免眼睛的调节。



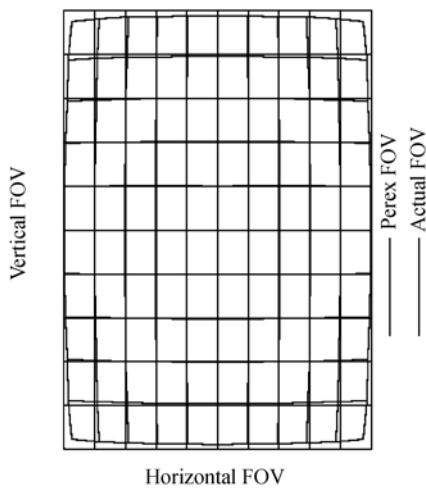
(a) 像差曲线

(a) Aberration curve



(b) 调制传递函数

(b) Modulation transfer function



Horizontal FOV

(c) 畸变栅格

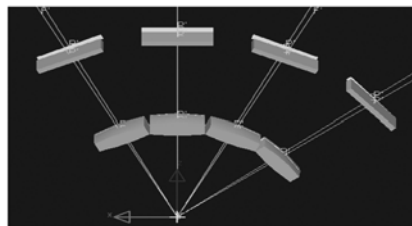
(c) Distortion grid

图 5 优化结果

Fig. 5 Results of optimization

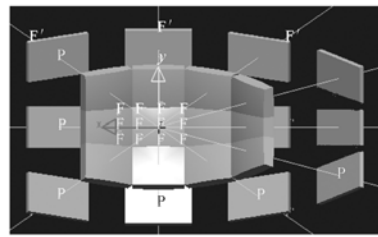
3.3 单眼目视光学系统模拟仿真

根据单元目镜的设计以及视场拼接中对各单元目镜的光轴偏转角度要求,用 LightTools 光学建模软件建立了单眼目视光学系统模型,模型如图 6 所示。



(a) 光学系统模型俯视图

(a) View of lookover of optical system models



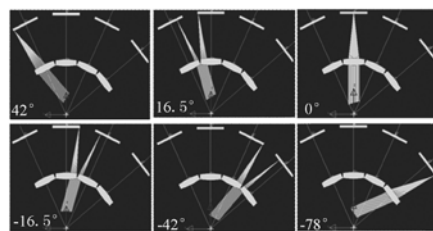
(b) 光学系统模型前视图

(b) Front view of optical system model

图 6 单眼光学系统模型

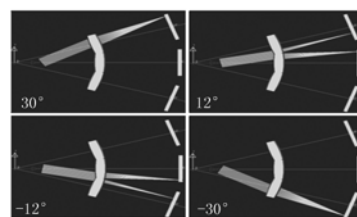
Fig. 6 Single-eye optical system models

从水平视场和竖直射场上的光线追迹和仿真中(如图 7 所示)可以知道系统的视场通过单个目镜光学系统间的视场重叠实现了无缝拼接和视场的连续变化。所以这种方法实现了一幅水平视场为 120° , 垂直视场为 60° 的全景图, 通过两组单眼目视光学系统相互间的视场重叠 $80^\circ \times 60^\circ$, 实现双目视场为 $160^\circ \times 60^\circ$ 。各个单元透镜的光轴都相交于人眼平均转轴位置, 实现了在人眼转动的过程中, 凝视任何一片 OLED 发出的图像, 人眼的视轴始终与单元透镜的光轴同在同一条直线, 不会出现视场的丢失以及渐晕, 因此, 在人眼转动的任何角度都可以实现高清、高分辨率以及亮度均匀的图像。组成的单眼目视光学系统重



(a) 水平视场光学追迹

(a) Ray-trace of horizontal FOV



(b) 竖直射场光线追迹

(b) Ray-trace of vertical FOV

图 7 系统光线追迹

Fig. 7 Ray-trace of the system

量只有 15.6 g, 双目目视光学系统也才 31.2 g, 实现了系统的轻量化, 使得长时间佩戴不会有不适应的感觉。

4 光学元件加工及系统装调公差分析

4.1 非球面加工分析

在大多数情况下, 光学系统均采用旋转对称型的非球面, 在子午面内确定其表面形式的关系如式 2 所示

$$z = \frac{y^2/r}{1 + \sqrt{1 - (k+1)\left(\frac{y}{r}\right)^2}} + A_4 y^4 + A_6 y^6 + A_8 y^8 + \dots, \quad (2)$$

其中 k 为二次曲面常数, r 为顶点相切球曲率半径, A_4, A_6, \dots 为各阶非球面系数。非球面的各项基本参数如表 3 所示。

表 3 非球面结构参数

Tab. 3 Specification of the asphere

参数	数据
顶点半径 R	-42.09
二次常数 k	-55.13
A_4	8.37×10^{-5}
A_6	-9.30×10^{-7}
A_8	0
有效孔径 φ/mm	12

根据表中数据得到该非球面与最佳比较球偏离量以及非球面与最佳拟合球面偏离量曲线切线的斜率如图 8、9 所示。由图 8 可知, 在口径 4.05

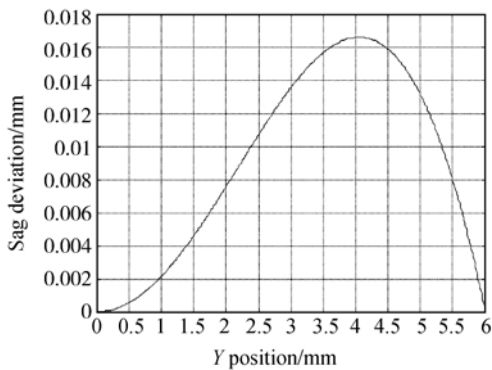


图 8 非球面与最佳比较球偏离量

Fig. 8 Aspheric surface's departure to its nearest sphere surface

mm 处偏离量达到最大, 接近 $16.6 \mu\text{m}$ 。由图 9 可知非球面陡度在全口径处最大, 达到 0.018, 这对于传统非球面加工和检测是一难点。但是对于采用注塑的方法加工非球面来说, 金刚石车削加工模具容易实现。

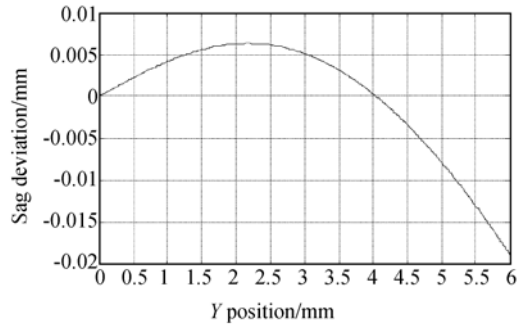


图 9 非球面与最佳拟合球面偏离量曲线切线的斜率

Fig. 9 Slope of the aspheric surface's departure to the best fitting sphere surface

4.2 衍射元件加工分析

旋转对称衍射面的相位分布为:

$$\varphi(r) = (A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 \dots), \quad (3)$$

式中: r 为归一化半径坐标; A 决定该面的光焦度, 一般用来校正系统的色差, 而后面的非球面项用来校正系统的高级像差。当刻蚀台阶数为 8 时衍射效率达 98%, 已能满足需要。当只取函数中前 4 项时, 上式可表达为:

$$-2\pi k = (A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6), \quad (4)$$

最大的环带数 k_{\max} 表示为:

$$K_{\max} = \text{int} |(A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4 + A_3 r_0^6)/2\pi|, \quad (5)$$

式中: r_0 为衍射面的归一化半径。当刻蚀台阶数为 8 时, 每个台阶的深度为:

$$d = \lambda_d / 8(n-1), \quad (6)$$

式中: n 为基底材料的折射率; λ_d 为工作波段的中心波长。本文设计中取可见波段, $\lambda_t = 435 \text{ nm}$, $\lambda_d = 546 \text{ nm}$, $\lambda_c = 656 \text{ nm}$ 。目镜的二元衍射面位于透镜的前表面, 其相位系数如表 4。

系统设计时衍射面的半径为 6 mm, 所以二元衍射面的归一化半径为 0.1213, 总的环带数为 75。刻蚀台阶数为 8 时可获得 95% 的衍射效率, 每个台阶的刻蚀深度为 $0.1183 \mu\text{m}$ 。图 10 所示为二元衍射面的特征参数曲线, 其中曲线 I 表示二元面上的相位随径向坐标的变化, 用周期数

表 4 衍射面系数

Tab. 4 Coefficients of diffractive surfaces

参数	数据
A_1	-0.001 4
A_3	$-2.438 7 \times 10^{-7}$
基底折射率 n	1.620 4
A_2	$1.523 9 \times 10^{-5}$
中心波长 λ_0/nm	546
有效孔径 φ/mm	12

(period)表示;曲线 II 表示二元面的线频率随实际径向坐标的变化,以周期/毫米(period/mm)来表示。由曲线 II 可知,随着径向坐标的增加,二元面的线频率逐渐增大。在镜头的边缘部分,线频率最大为 24 period/mm,对应最小周期线宽为 $41.67 \mu\text{m}$,此时对应的最小特征尺寸为 $5.208 3 \mu\text{m}$,以现在的加工工艺可以加工出这样的尺寸。

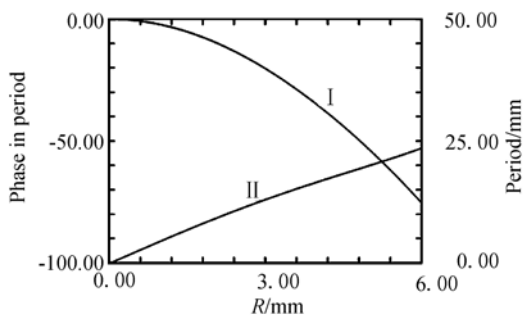


图 10 二元衍射面特征参数曲线

Fig. 10 Characteristic curves of binary diffraction plane

选好模具的坯料经过锻造,根据各个面的参数利用超精密光学加工技术在车床上切削、车削成型得到所需模具,利用注射成型就可以批量生产含有非球面及二元衍射面的塑料透镜,现有的制作工艺能够满足上述非球面和二元衍射面的加工制作。

4.3 系统的装调公差分析

由于单眼目视光学系统是由 4×3 阵列式排列的 12 组相同的视场角的目镜系统拼接成,每一个单元目镜成像质量的变化都会影响到整个光学系统的成像质量,因此单元目镜的装调需要进一步的考虑。利用光学设计软件对单元目镜光学系统中的透镜的厚度、楔角、倾斜及偏心进行了公差

分析,各公差的允许值如表 5 所示。

表 5 目镜的装调公差

Tab. 5 Assemblage tolerance of eyepiece

序号	类型	起始面	结束面	公差值
1	楔角	2	3	$2.9'$
2	倾斜	2	3	$1.7'$
3	X 偏心	2	3	0.07 mm
4	Y 偏心	2	3	0.07 mm
5	厚度	Stop	2	0.02 mm
6	厚度	2	3	0.05 mm

由表 5 可知,楔角公差为 $2.9'$,透镜倾斜公差为 $1.7'$,偏心差为 0.07 mm,厚度公差为 0.05 mm。分析公差对光学系统 4 个视场 [$F_1 = (0^\circ, 0^\circ)$; $F_2 = (0^\circ, 16.5^\circ)$; $F_3 = (12^\circ, 0^\circ)$; $F_4 = (12^\circ, 16.5^\circ)$] 的传递函数 MTF 在 40 lp/mm 处的影响,结果如图 11 所示。从图中可知轴上视场 F_1 和 F_2, F_3 在 40 lp/mm 的 MTF 值变化小,对角线视场 F_4 在 40 lp/mm 的 MTF 值还能够保持大于 0.1。所以单元目镜光学系统的装调变得很容易,没有苛刻的装调要求。

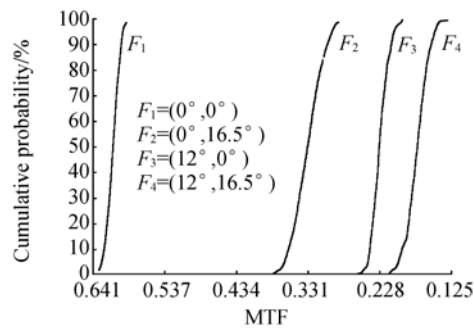


图 11 传递函数变化图

Fig. 11 Change of MTF

单元目镜组的装调误差如旋转,倾斜将会对图像的拼接产生一定的影响,不能很好地实现完美拼接,都将导致一定的图像错位,画面不连续,所以系统在一定精度装调完成后,还需要眼睛配合观察以及调整每个 OLED 中图像的位置,从而实现图像的无缝、连续拼接。单元透镜间视场重叠为 $4^\circ \times 6^\circ$,图像位置微调余量充足,因此,对于单元目镜组的装调误差没有严格要求。所以单眼目视光学系统装调简单、容易。

5 结 论

采用 4×3 阵列式排列的 12 组视场角同为 $33^\circ \times 24^\circ$ 的目镜系统拼接成单眼目视光学系统, 实现了系统的大视场设计。论述了视场拼接技术原理, 给出了目镜光学系统的设计结果, 建立单眼目视光学系统的模型并对其进行了光线追迹的模拟。对目镜光学系统中采用的非球面和衍射面的加工以及系统的装调进行了分析, 结果显示其均

满足国内现有的加工和装调条件。单眼光学系统设计结果为: 水平视场 160° , 垂直视场 60° , 分辨率 $43 \text{ pixel}/(\circ)$, 畸变小于 3% , 轴上视场传递函数在 40 lp/mm 处达到 0.62 , 周边视场达到 0.1 以上。另外, 双目系统的视场为 $160^\circ \times 60^\circ$, 双目重叠视场为 $80^\circ \times 60^\circ$, 系统重量约为 31.2 g , 满足了超大视场头盔显示器要求的轻型, 大视场和高分辨率。这种超大视场头盔显示器在教育与娱乐, 虚拟设计, 培训与模拟等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴卫玲. 头盔显示器的技术发展综述[J]. 科技信息, 2010, 33, 50-52.
WU W L. The development of HMD[J]. *Science & Technology Information*, 2010(33): 50-52. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] ZHAO L, WANG Z Q, GUO H Q, *et al.*. Head-mounted display with LCOS using diffractive optical element [J]. *Optic*, 2004, 115(1): 11-14.
- [4] 张慧娟, 王肇圻, 赵秋玲, 等. 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 121-124.
ZHANG H J, WANG ZH Q, ZHAO Q L, *et al.*. H-ybrid diffractive /refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 121-124. (in Chinese)
- [5] 杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 折/衍混合透视型头盔显示器光学系统设计[J]. 光电工程, 2005, 32(1): 9-12.
YANG X J, WANG ZH Q, SUN Q. *et al.*. Design of the optical system for a see-through refractive/diffractive hybrid helmet mounted display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(1): 9-12. (in Chinese)
- [6] 孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 792-797.
SUN J X, LIU J ZH, SUN Q, *et al.*. A thermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 792-797. (in Chinese)
- [7] SEOS L, EDWARD W, BURGESS H. Wide FOV head mounted display using hybrid optics [J]. SPIE, 2004, 5249: 230-237.
- [8] JANNICK P R. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(7): 1760-1767.
- [9] NAGAHARA, YACHID. Super wide field of view head mounted display using catadioptrical optics[J]. *Presence*, 2006, 15(5): 588-598.
- [10] 赵顺龙, 王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折/衍混合物镜设计[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 249-253.
ZHAO SH L, WANG ZH Q. Design of an ultra-light and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-mounted projective displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 249-253. (in Chinese)
- [11] 范海英, 张宝颖, 杨嘉, 等. 折/衍混合超轻小型投影式头盔光学系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 13-18.
FAN H Y, ZHANG B Y, YANG J, *et al.*. Design of compact diffractive-refractive hybrid optical system in ultra-light projective helmets system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 13-18. (in Chinese)
- [12] 张慧, 丁雪梅, 谭久彬. 基于折/衍混合的长焦深成像物镜消色差方法[J]. 光学精密工程, 2008, 17(10): 1810-1814.

ZHANG H, DING X M, TAN J B, *et al.*. An achromatic method based on hybrid refractive / diffractive principle for the optical imaging objective with long focal depth [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 17(10) : 1810-1814. (in Chinese)

[13] 曾吉勇, 全国藩, 王氏强, 等. 含衍射光学元件的薄

透镜系统初级像差的 PWC 表示[J]. *光学学报*, 2006, 26(1):96-100.

ZENG J Y, JIN G F, WANG M Q, *et al.*. PWC primary aberration expression of thin lens system including diffractive optical elements[J]. *Acta optica Sinica*, 2006, 26(1):96-100. (in Chinese)

作者简介:



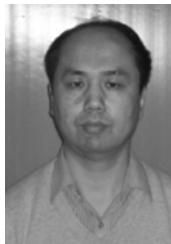
卢海平(1984-),男,江西赣州人,博士研究生,主要从事光学设计,虚拟环境模拟技术以及空间光学等方面的研究。E-mail: luhaiping21@yahoo.com.cn



康玉思(1977-),男,黑龙江密山人,博士,副研究员,主要从事光学设计及光学检测工作。E-mail: kyshdl@163.com



魏忠伦(1977-),男,黑龙江嫩江人,硕士,工程师,主要从事光学设计以及空间光学等方面的研究。E-mail: wzl-0@126.com



冯睿(1968-),男,吉林长春人,工程师,主要从事机械结构设计工作。E-mail: musang3017@tom.com



付瀚毅(1985-),男,吉林长春人,博士研究生。主要从事光学设计,光学检测等方面的研究。E-mail: fu_hanyi@163.com

导师简介:



刘伟奇(1958-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事激光显示技术,空间成像与瞄准技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn