

非对称轻小型头盔显示器光学系统设计

黄颂超 冯云鹏 程灏波

Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system

HUANG Song-chao, FENG Yun-peng, CHENG Hao-bo

引用本文:

黄颂超, 冯云鹏, 程灏波. 非对称轻小型头盔显示器光学系统设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 832–841. doi: 10.37188/CO.2019–0193

HUANG Song-chao, FENG Yun-peng, CHENG Hao-bo. Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 832–841. doi: 10.37188/CO.2019-0193

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计

Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager

中国光学. 2018, 11(1): 92 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092>

光学自由曲面面形检测技术

Optical free-form surfaces testing technologies

中国光学. 2017, 10(3): 283 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0283>

多角度耦合分幅相机光学系统设计

Optical system design of multi-angle coupled framing camera

中国光学. 2018, 11(4): 615 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0615>

激光位移传感器传感探头微小型光学系统设计

Design of micro-optical system for laser displacement sensor sensing probe

中国光学. 2018, 11(6): 1001 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1001>

基于OLED微显示器和变形目镜的全景显示技术

Panoramic display technology based on OLED micro-display and anamorphic eyepiece

中国光学. 2018, 11(4): 684 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0684>

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学. 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

非对称轻小型头盔显示器光学系统设计

黄颂超¹, 冯云鹏^{1,2*}, 程灏波^{1,2}

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学深圳研究院, 深圳 518057)

摘要:针对非对称光学系统视场范围和出瞳直径较窄、光学结构复杂、制造成本昂贵、装配调整麻烦等问题,本文采用在系统中加入自由曲面反射镜的设计方法。首先,论述了双反射镜非对称光学系统的设计要求和工作原理。然后,分析了三反射镜非对称光学系统的离轴结构控制方法。最后,采用XY多项式自由曲面反射镜折叠光路、消除遮拦、扩大视场、校正离轴像差,设计出一款适用于头盔显示器的非对称光学系统。设计的双反射镜非对称光学系统的视场为 $60^\circ \times 30^\circ$,出瞳直径为8 mm。在截止频率52 lp/mm处,全视场的调制传递函数值大于0.25,系统畸变小于5%,单目系统重量约为190 g。设计结果表明,该非对称光学系统的视场大小和成像质量均有所提升,实现了小型轻量化,可应用于头盔显示器。
关键词:光学设计;非对称;头盔显示器;轻量化设计;自由曲面

中图分类号:TN141;O439 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2019-0193

Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system

HUANG Song-chao¹, FENG Yun-peng^{1,2*}, CHENG Hao-bo^{1,2}

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shenzhen Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen 518057, China)

* Corresponding author, E-mail: roc@bit.edu.cn

Abstract: In non-symmetric optical systems, the field of view is narrow, the diameter of their exit pupil is narrow, their optical structure is complicated, their cost of manufacturing is high, and assembly adjustment is troublesome. To address these problems, free-form mirror is applied in the system. The design requirements and working principle of the dual mirror non-symmetrical optical system are firstly discussed. Then, the off-axis structure control method of the three-mirror non-symmetric optical system is analyzed. Finally, the XY polynomial free-form mirror is used to fold the optical path, eliminating the obstruction, enlarging the field of view, correcting the off-axis aberration, and a non-symmetrical optical system is designed suitable for Helmet-Mounted Display(HMD). The designed dual mirror non-symmetrical optical system has a field of view of $60^\circ \times 30^\circ$ and a pupil diameter of 8 mm. At a cutoff frequency of 52 lp/mm, the full field of view Modula-

收稿日期:2019-09-25; 修订日期:2019-11-20

基金项目:深圳市科技创新项目 (No. JCYJ20170817115037194, No. JCYJ20180307123816647)

Shenzhen Science and Technology Innovation Project (No. JCYJ20170817115037194, No. JCYJ20180307123816647)

tion Transfer Function(MTF) value is greater than 0.25 and system distortion is less than 5%. This monocular system's weight is about 190 g. The design results show that the non-symmetrical optical system has an improved field of view and image quality, it is compact and lightweight, and can be applied to a HMD.

Key words: optical design; non-symmetrical; helmet-mounted display; lightweight design; free-form surface

1 引言

非对称光学系统因在军事航天、空间遥感、医学研究、游戏娱乐等各种复杂前沿领域有着无法取代的作用,其光学设计格外重要^[1]。头盔显示器(Helmet-Mounted Display, HMD)作为典型的非对称光学系统,其沉浸感决定了使用者对数字化环境的融入程度,视场范围越大,沉浸感越强,此外,分辨率和成像质量也是影响沉浸感的重要因素^[2]。为了适应发展需求,光学设计者们利用多种可行的技术方案不断对HMD光学系统进行改良,旨在研制出兼顾视场大小、成像质量、出瞳距离等关键技术指标^[3],同时保证HMD光学系统体积更小质量更轻。可行技术方案主要包括对光学结构及透镜材料的改良,如塑料透镜^[3]、全息波导^[4-6]、自由曲面棱镜^[3,7]、离轴非对称^[8]等。

协调好光学结构、设备重量、制造成本、装配调整、成像效果和视场范围等因素而设计出紧密实用、微小轻便、用户体验舒适、成像质量优良和视场尽可能大的HMD是未来的发展趋势。目前充分做到结构紧凑和装调简单的自由曲面棱镜和全息光波导HMD仍然无法将视场范围扩大至60°以上,出瞳直径和出瞳距离也普遍偏小,而大视场离轴非对称HMD虽然能够扩大视场范围,增加出瞳距离,避免光线遮拦,但是重量与装调仍然是亟需解决的难题^[9]。为了更好地对HMD的光学结构、制造成本、装配调整、视场范围、出瞳大小、像质提升等诸多因素进行综合考虑,非对称光学系统约束参量控制设计方法的研究便显得至关重要和不可或缺。

光学加工技术的发展为复杂自由曲面的批量生产提供了可能,高性能光学系统设计也逐渐将自由曲面作为核心光学元件,特别是在离轴光学系统中,自由曲面变得越来越重要^[10]。本文结合实际应用需求,介绍了在非对称光学系统设计中

加入自由曲面反射镜的设计方法。自由曲面不仅可以增加设计自由度,提高设计效率;还能改善空间布局,使结构更紧凑;减少透镜数量,使重量更轻;实现大视场并提高成像质量^[11]。本文详细阐述了离轴设计原理和结构控制方法,进一步提出了小型轻量化设计方案并分析方案的可行性。

2 设计原理

2.1 设计要求

光学系统设计需要考虑各项技术指标的合理性,不仅要满足特定的光学性能要求,还要保证使用者的佩戴舒适度。

2.1.1 出瞳直径

根据HMD光学系统的光路逆向设计原理,出瞳即眼球的瞳孔位置。HMD光学系统需要将出瞳直径设计得更大以缓解用眼压力,确保所观察视场范围的完整性。因而出瞳直径最好能超过7 mm。Tsou的研究^[12]表明:应用于军事飞机的HMD光学系统所需出瞳直径不应小于14 mm。考虑到过大的出瞳直径会使佩戴者看到的图像产生波动,且HMD光学系统设计中需要将尺寸、重量、成本、设计难度等众多因素考虑在内,所以HMD光学系统的出瞳直径最好控制在10 mm以内。

2.1.2 出瞳距离

由眼球内部构造可知,虹膜与角膜的间距为3 mm左右,再加上睫毛与眼睑所占长度大约为9 mm,没有视力矫正需求的佩戴者的适用出瞳距离至少是:3+9=12 mm。有视力矫正需求的佩戴者还需要将镜片厚度(3 mm左右)考虑在内,还要考虑镜片与角膜的间距(为15 mm左右),由此可推算出适用出瞳距离至少是:3+15+3=21 mm。应用于航天航空的HMD还需要考虑保护面罩和氧气面罩的厚度,因而所需的出瞳距离更大。

2.1.3 视场

HMD 视场的大小决定了沉浸感,是衡量 HMD 性能的关键指标。采用部分双目重叠的结构形式可以在保证目视角分辨率的前提下将单目水平视场扩大到 100° 以上,在此基础上将光学系统倾斜放置就可以使双目水平视场范围扩大到 120° 以上^[2]。小视场 HMD 在确保单目水平视场的前提下,也可以通过这种结构形式来扩大双目水平视场范围。此外,单目垂直视场最好能达到上下视场各占 35° 以上的水平。

2.1.4 调制传递函数

截止频率的数值是通过图像源的像素尺寸而得到的,具体计算方法之后会根据设计实例详细说明。中心视场传递函数值在截止频率处应该大于 0.25,边缘视场传递函数值在截止频率处应该大于 0.1。中心视场的 MTF 曲线要尽可能地靠近衍射极限。

2.1.5 瞳距

大部分人的双目间距在 $56 \sim 75 \text{ mm}$ 之间^[13],为了避免部分视场丢失而无法看到完整图像,瞳距应该在此范围内,且利用机械装置进行调节,以满足不同的佩戴者。

2.1.6 光学系统重量

系统重量受视场大小的影响最大,视场越大,系统重量越大。出于平衡系统结构与使用性能的设计考虑,单眼 HMD 的重量最好不要超过 0.6 kg ,这样就能将双目结构的的光学系统重量控制在 1.3 kg 之内^[13]。

2.1.7 畸变

可利用电子学畸变校正原理及使用预处理方法给图像加入一定的反畸变来校正畸变^[8-9]。需要注意的是,采用电子学校正畸变会降低图像分辨率。所以为了保证图像分辨率,同时降低光学设计难度。本文畸变校正分为两个步骤:首先利用光学系统设计将畸变校正至 10% 以内,然后利用图像处理校正剩余的畸变^[13]。

2.2 工作原理

根据反射镜的数目,离轴非对称式光学系统可以分为离轴单反、离轴双反、离轴三反等结构形式。它们的工作原理类似,进行光学设计时皆采用光路逆向设计原理,本文以离轴双反射式结构为例进行分析。

离轴双反射式 HMD 的单目光学系统的一般结构如图 1 所示。其工作原理是:图像源显示屏发出的光线经过两个反射镜的反射后进入人眼,使佩戴者与数字化环境产生交互作用,即沉浸型虚拟现实技术。根据实际应用需求,可通过在光学系统设计中加入透镜组来实现大视场和高性能的技术指标要求。两个反射镜作为离轴合成器,都镀有反射膜,如果将反射镜 1 设计为一半透射一半反射的透镜,就可以使外界物体发出的光与微显示屏图像发出的光同时进入人眼,虚实共存从而达到增强型现实的效果。

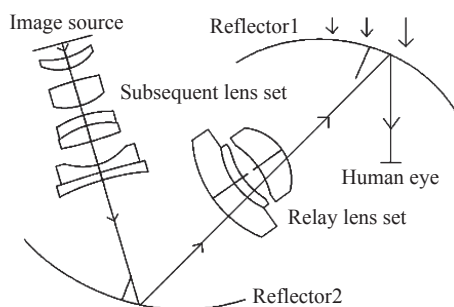


图 1 离轴双反射式非对称光学系统单目一般结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of monocular general structure of off-axis dual reflection non-symmetric optical system

非对称光学系统设计的光线轨迹分析、优化设计方法研究和成像质量评价研究都是利用光路逆向实现的。根据光路逆向原理,进行光学系统设计时,离轴双反射式 HMD 的出瞳成为光学系统的入瞳,每个视场的光线平行入射至反射镜 1,反射后的光线穿过中继透镜组抵达反射镜 2,反射后的光线穿过后继透镜组并最终会聚于微显示屏上。

2.3 光学结构

考虑到结构紧凑、小型轻量化、简单易制造等发展趋势,非对称光学系统的离轴量越小,越能满足需求;而考虑到减少挡光达到更好的成像质量和大视场的需求,离轴量又会随着口径的增大而增加。所以在非对称光学系统的设计过程中,需要设置合理的离轴量,不断调整结构,直到既能较好地消除遮拦,又能使整个系统达到高性能技术指标要求。本文以三反射镜非对称光学系统的光学结构为例进行分析,并总结非对称光学系统的离轴结构控制方法。

利用 CODE-V 构建初始结构时, 自带的离轴交点控制程序能够解决上述矛盾, 而利用 ZEMAX 构建初始结构时, 通过优化操作数平衡上述矛盾的方式较为冗长, 因而光学设计者可以通过 ZEMAX 附带的 ZPL 宏语言功能自行编写结构约束的宏指令来控制光线走向。离轴结构的控制方法有很多种, 这里只计算两种间距类型: ①第一类间距: 点-线间距; ②第二类间距: 线-交点间距。利用数字操作数组合来计算光线在不同面的坐标位置, 可得到任意两个面的间距。

为了说明利用宏语言 ZPL 进行三反射镜非对称光学系统的离轴结构控制过程, 利用现成的初始结构进行分析和研究, 如图 2 所示。图 2 中, 第二个反射镜 (M_2) 的反射光线与第一个反射镜 (M_1) 之间的 A 点, 入射光线与第二个反射镜 (M_2) 之间的 B 点, 第三个反射镜 (M_3) 的反射光线与第二个反射镜 (M_2) 之间的 C 点, 这 3 点都是光线产生遮拦的位置。因而编写宏语言时, 需要合理控制 A 、 B 、 C 3 点处的光束与 M_1 、 M_2 、 M_3 的光学元件边界之间的间隔大小, 确保消除遮拦的同时不影响反射镜的装配与调整。

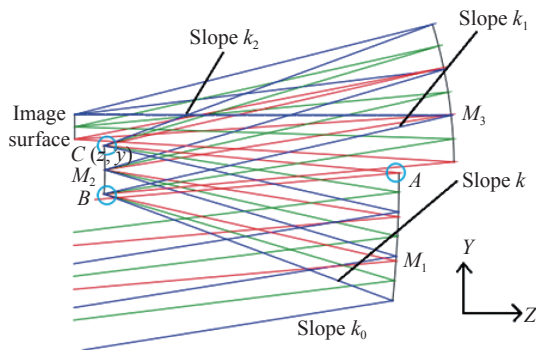


图 2 三反射镜非对称光学系统的结构控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure control of non-symmetrical optical system with three mirrors

ZPL 可以像优化操作数一样在评价函数表中进行调用, 前提是合理定义宏语言。宏语言的定义名称是 ZPLXX.zpl, 其中的 XX 是在 0 与 99 的范围内任意选取的整数, 比如之后所调用的 ZPL11、ZPL12、ZPL13。具体的宏语言编写内容与注解见表 1。

表 1 三反射镜非对称光学系统的结构控制宏语言与注解

Tab. 1 Control macro language and annotation of non-symmetric optical system structure with three mirror

ZPL	annotation
!threemirror.zpl	ZPLXX.zpl
!	
nfield=NFLD ()	Number of fields
maxfield=MAXF ()	Maximum half angle of view
IF(Maxfield==0.0)	Avoid errors that divide by zero
THEN Maxfield=1.0;	
! 面的个数	
n==pvhx ()	Take the value of H_x to n
! field	
i=pvhy ()	Take the value of H_y to i
! 子午或弧矢	
j=pvpy ()	Take the value of P_y to j
$h_x=FLDX(i)/maxfield$	H_x = field of view (x direction) / maximum field of view
$h_y=FLDY(i)/Maxfield$	H_y = field of view (y direction) / maximum field of view
PRINT "Field number", i	
RAYTRACE $h_x, h_y, 0, j, PWAV ()$	Ray tracing
PRINT "X-field angle:", FLDX(i),	
"Y-field angle:", FLDY(i)	
PRINT "X-chief ray:", RAGX(n),	
"Y-chief ray:", RAGY(n),	Spherical coordinate position at the ray cutoff
"Z-chief ray:", RAGZ(n)	
PRINT	
OPTRETURN 0, RAGY(n)	
OPTRETURN 1, RAGZ(n)	Return value
PRINT "All Done!"	

ZEMAX 评价函数中调用结构约束宏语言所用的操作数是 ZPLM, 部分调用方式如表 2 所示。因为光学系统设计是一个反复迭代的过程, 进行非对称光学系统设计的过程也是如此, 除了利用 ZPL 宏语言控制好离轴结构, 避免光线遮拦以保证视场和成像质量的同时, 还需要反复调整 3 个反射镜的间距和非球面系数等参数, 直到最终达到技术指标要求。

表 2 三反射镜非对称光学系统的部分 ZPL 调用方式

Tab. 2 Partial ZPL calling method of three mirror asymmetric optical system

Oper#	Op_1	Op_2	H_x	H_y	P_x	P_y	Target	Weight	
1	BLNK		1 field of view meridian upper edge of the intersection of light and face 1						
2	ZPLM	11	0	1	1	0	1	0	
3	ZPLM	11	1						
4	BLNK		1 field of view meridian upper edge of the intersection of light and face 2						
5	ZPLM	12	0	3	1	0	1	0	
6	ZPLM	12	1						
7	BLNK		1 field of view meridian edge light and face 3 intersection						
8	ZPLM	12	0	6	1	0	-1	0	
9	ZPLM	12	1						
10	BLNK		Solving straight line						
11	DIFF	6	3						
12	DIFF	5	2						
13	BLNK		Solving slope k_0						
14	DIVI	12	11						
15	BLNK		The distance between the line and the light on the meridian of the field of view						
16	PROD	14	9						
17	PROD	14	3						
18	DIFF	16	17						
19	SUMM	2	18						
20	DIFF	8	19						
21	OPLT	20					250	0.1	
22	OPGT	20					25	0.1	

3 设计过程

3.1 基本参数

利用光学设计软件 ZEMAX 对初始结构进行仿真时,首先需要设置光学系统的 3 个基本参数:入射光参数、出瞳直径、视场范围。入射光参数选择可见光波长;根据光路逆向设计原理可知 HMD 的出瞳即光学系统的入瞳,又根据设计要求可知出瞳直径是 7~10 mm,可以将入瞳直径设置为 8 mm^[8];根据图像源尺寸可以知道水平视场范围和竖直视场范围,ZEMAX 光学软件最多可设置 12 个视场,不足以反映整个光学系统的成像质量,不过可以优先设置最具代表性的 12 个视场角,之后再增加其他视场节点进行分析。

3.2 离轴合成器

初始结构中的两个反射镜属于离轴合成器,它们作为反射光学元件对光学系统中的光路进行折叠,使光学系统的结构更加紧凑^[14]。自由曲面

的设计自由度大,而非旋转对称的自由曲面在非对称光学系统设计中更是具有卓越的像差校正能力^[8]。将自由曲面作为设计因素,能够有效改善因光学元件倾斜与偏移而产生的高阶复杂像差。因而,将两个反射镜设计成自由曲面,利用两个自由曲面反射镜曲率可以对大视场光束进行会聚,左右不对称的结构不仅能够有效避免中心遮拦,还可以调节各个视场在水平方向上的光程差,校正非对称光学系统由于倾斜和偏移而产生的离轴像差^[13]。采用两个自由曲面反射镜除了能校正非对称像差外,还起到平衡畸变的作用。

设置两个自由曲面反射镜时,首先要选择合适的初始面形,再通过对两个反射镜设置 Tilt/Decenter 来调整离轴位置,确保整体结构的合理性。两个自由曲面反射镜为 XY 多项式曲面。该自由曲面的面形解析式由两部分组成:第一项与二次曲面的解析式一致,具有旋转对称性;第二项是多项式求和项,表示二次曲面上任意点 (x,y) 的

矢量高度变化, 具有旋转非对称性, 解析式如下^[8]:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (1)$$

式中 k 为二次曲面系数; $c = 1/R$, R 为中心曲率半径; $r^2 = x^2 + y^2$; N 为多项式的数目; A_i 为第 i 项多项式的系数; $E_i(x, y)$ 代表第 i 项多项式, 多项式为 x 与 y 大于等于零的整数次幂的乘积, 最高阶为 20。

由于两个自由曲面反射镜以水平方向的非对称像差校正为主, 为了简化设计, 降低制造成本, 可以将两个自由曲面反射镜设计为水平方向非对

称而垂直方向对称的面形结构, 即关于 YOZ 平面对称, 保留 x 偶次幂多项式即可。考虑到自由曲面的加工难度, 设计中将多项式数目控制在 14 项, 若只保留偶次幂多项式则仅有 8 项。虽然自由曲面的像差校正能力有所下降, 但较大幅度地降低了加工难度和制造成本。

自由曲面所采用的材料是铝, 厚度为 3 mm, 若使用密度更低的光学塑料, 则光学系统的整体重量将进一步降低。在 ZEMAX 光学设计软件中利用附加数据编辑窗口对两个反射镜的自由曲面参数进行设置, 如图 3 所示。

STO	Standard	Max Term #	Norm Radius	X1Y0	X0Y1	X2Y0
2	Coordinate B..					
3	Coordinate B..					
4*	Extended Pol..	14	100.000000	0.000000	-7.167104 V	-13.532123 V
5	Coordinate B..					
6	Coordinate B..					
7*	Extended Pol..	14	100.000000	0.000000	-11.787441 V	-3.549682 V
8	Coordinate B..					
9	Coordinate B..					

图 3 双反射镜非对称光学系统的自由曲面参数设置

Fig. 3 Free-form surface parameter setting of the dual mirror non-symmetric optical system

3.3 后继透镜组

初始结构中的像差校正透镜组, 即后继透镜组, 由鱼镜头头构成, 其中压缩视场角的前光组由两块塑料透镜 E48R 组成, 优点是重量轻, 两个表面能同时加工成非球面; 缺点是热膨胀系数大, 耐热性差。鱼镜头头的主要作用是对大视场的光线进行收束, 并对各视场的光线进行像差校正。各

个透镜的面形数据根据逆向光路设计原理在 ZEMAX 中依次输入, 并利用 Tilt/Decenter 调整透镜组的离轴位置, 如图 4 所示。为了降低制造成本, 光线准直透镜组和像差校正透镜组的所有光学元件的面形都是旋转对称布置的, 且将它们均设置成共轴光学系统, 以方便装调。

Surf-Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
9	Coordinate B..	S3 dec/ tilt	34.475440 V	-	0.000000	
10	Even Asphere	-121.765907 V	3.100000	E48R	13.145858	-8.998000 V
11	Standard	-44.651954 V	3.200000	E48R	12.968999	0.000000 V
12	Even Asphere	20.619358	9.500000 V		12.111376	0.000000 V
13	Standard	-59.086341 V	6.450000	H-ZF4	13.236633	0.000000 V
14	Standard	-20.296574 V	4.300000	H-BAK5	13.871220	0.000000 V
15	Standard	-46.649103	13.140000 V		15.294340	-2.424300 V
16	Standard	505.912921 V	5.200000	H-LAFS2	17.379014	0.000000 V
17	Standard	-35.255137	3.900000 V		17.396761	0.000000 V
18	Standard	19.717263 V	7.240000	H-K9L	12.097055	0.000000 V
19	Standard	-32.939699 V	3.000000	H-ZF62	11.726936	0.000000 V
20	Standard	75.176060	1.800000 V		11.069557	0.000000 V
21	Even Asphere	39.878665 V	6.600000	H-LAF1	10.881245	0.000000 V
22	Standard	1450.510687	5.300000 V		10.066905	0.000000 V
23	Standard	14.627285 V	4.400000	H-ZLAF1	8.003940	0.000000 V
24	Standard	37.920043	2.220000 V		6.869534	0.000000 V
25	Standard	7.829911 V	4.200000	H-ZBAF52	4.732459	0.000000 V
26	Even Asphere	32.200000	1.793704 M		2.816163	-2.118100 V
27	Coordinate B..	S3 dec/ tilt: return	-0.724553 V	-	0.000000	

图 4 双反射镜非对称光学系统的后继透镜组参数设置

Fig. 4 Parameter setting of the subsequent lens group of the dual mirror non-symmetric optical system

3.4 图像源

图像源的尺寸与光学系统的视场、焦距、直

径和出瞳距离等参数有关。选择较大的显示屏可以使倍率数值变小, 从而降低设计难度, 然而光学

元件的口径会随图像源所选显示屏尺寸的增大而增大,且非对称光学系统的透镜数量较多,无形中增加了整体重量。显示屏尺寸还影响着光学系统的 F 数,尺寸太小会导致 F 数降低,而 F 数降低会使光学系统的像差校正能力大打折扣。综合考虑,最合适的图像源是 1 英寸左右的微显示器^[15]。

图像源的分辨率是 HMD 光学系统中的重要设计参数。HMD 光学系统的目视角分辨率与微显示器的分辨率和 HMD 的视场范围存在以下关系^[14]:

$$\theta = \min \left\{ \frac{2 \tan(\omega/2)}{h}, \frac{2 \tan(\nu/2)}{p} \right\}, \quad (2)$$

式中, ω 和 ν 分别为 HMD 的水平视场角和垂直视场角; h 和 p 分别为微显示器的水平分辨率和垂直分辨率。

目视角分辨率需要满足人眼的分辨率要求,由式(2)可知:随着视场范围的扩大,微显示器的分辨率也应随之增大,否则 HMD 的目视角分辨率会降低,无法满足人眼的分辨率要求。设计中采用 eMagin 公司生产制造的 WUXGA,即有源矩阵 OLED(AMOLED)^[16],具体参数见表 3。

表 3 eMagin 公司的 AMOLED 规格参数

Tab. 3 Specifications of AMOLED produced by eMagin

Item	Parameter
Pixel size/ μm	9.6×9.6
Resolution ratio	1 920×1 200
Visible area/mm	18.7×11.75 (0.856 inch)
The white light brightness/($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	>150
Contrast	>1 000:1
Refresh rate/Hz	30~85
Power consumption	<350 mW(150 cd/m^2)
Weight/g	<3

4 系统优化与加工

4.1 优化与性能分析

进行离轴非对称光学系统设计时,需要确保整体结构不变形,因此要严格控制好边界条件,在此基础上,才能进一步对像差进行校正,逐步提升光学系统的性能,使其满足技术指标要求。设计

过程中,视场数目应该由少至多逐渐增加并且控制好光线走向,可利用 GLCX、GLCY、GLCZ 操作数确定各个表面的离轴顶点坐标。

大致调整好离轴结构以后,设置优化函数对光学系统进行进一步的优化。主要优化操作数包括:用于确定光线坐标位置的 RAGX、RAGY、RAGZ;用于确定实际光线夹角的 RAID、RAEN;用于控制光学元件和空气的最小中心厚度的 MNCG、MNCA、CTLT、CTGT;用于控制光学元件和空气最小边缘厚度的 MNEG、MNEA、ETLT、ETGT;用于数学运算的 OPLT、OPGT、DIFF、ABSO;用于像差控制的 DISG、DIST、ASTI、FCGS、FCGT 等;TMAS 用以确保光学系统的整体重量保持在合理范围内。

利用 ZEMAX 进行局部优化和全局优化,并在设计过程中根据实际情况添加合适的结构、畸变、单色像差等控制操作数,最终设计出的双反射镜非对称光学系统如图 5(彩图见期刊电子版)所示。该光学系统相比于图 1 所示的离轴双反射式 HMD 光学系统而言缺少了中继透镜组。这是因为图 1 所示光学系统更多地应用于大视场机载头盔,中继透镜组更有利于扩大单目视场,而重量与体积也会因此增加,为了平衡视场、重量、成本等因素,摒弃中继透镜组更易达到小型轻量化的设计需求。

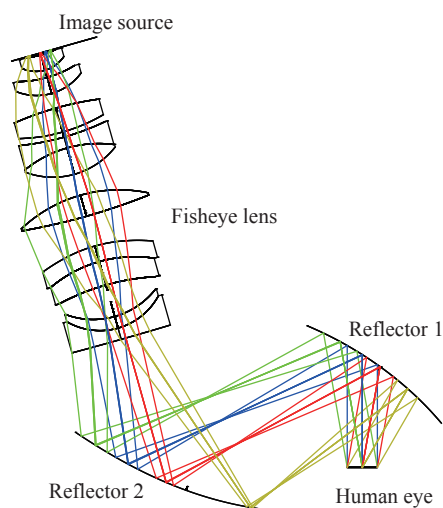


图 5 双反射镜非对称光学系统的光路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optical path of dual mirror non-symmetric optical system

MTF 曲线如图 6(彩图见期刊电子版)所示, 根据图像源微显示屏的像素尺寸可计算出该光学系统的截止频率是 52 lp/mm, 大部分视场在该截止频率处的调制度数值达 0.25 以上, 具有良好的成像质量, 且光学元件中并没有出现“W”或“M”形的非球面。畸变如图 7(彩图见期刊电子版)所示, 由图 7 可知畸变控制在 5% 以内, 符合设计指标要求。根据点列图, 即图 8(彩图见期刊电子版)所示, 可知弥散斑的最大均方根半径较大, 存在较大的彗差和像散, 需要进一步优化。

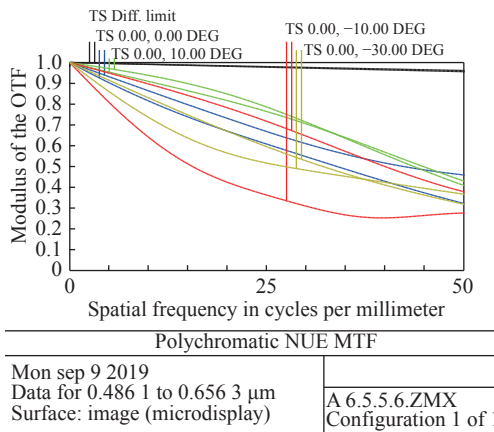


图 6 双反射镜非对称光学系统的 MTF 曲线图

Fig. 6 MTF graphs of dual mirror non-symmetric optical system

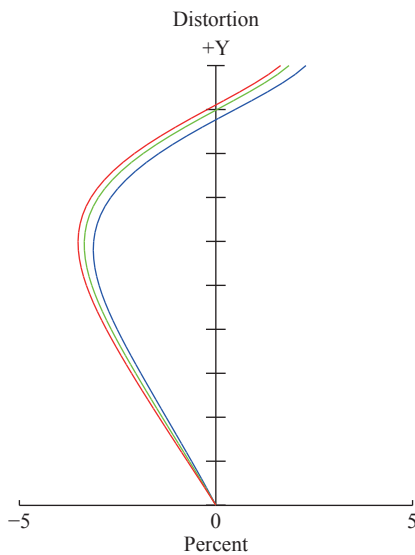


图 7 双反射镜非对称光学系统的畸变图

Fig. 7 Distortion diagram of dual mirror non-symmetric optical system

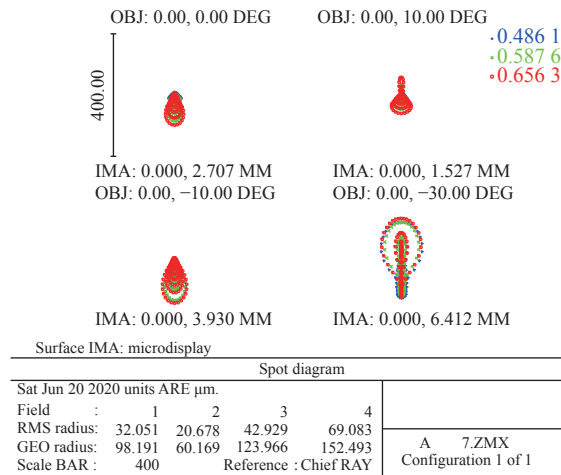


图 8 双反射镜非对称光学系统的点列图

Fig. 8 Spot diagram of a double mirror non-symmetric optical system

4.2 公差标准与加工

该非对称光学系统进行实际加工前应该考虑加工公差和装配公差, 因此需要给出公差分析的具体评价标准。所设计的光学系统属于目视光学系统, 加入公差之后的 MTF 评价标准是在截止频率处达到 0.1 以上, 并且分别考察公差对各个视场子午与弧矢 MTF 数值的影响。

该光学系统所涉及的非球面光学元件以光圈数表示的面形精度作为评价标准, HMD 光学系统属于中等精度光学系统, 因而折射非球面所对应的光圈数精度为 3~4, 计算面形偏差时的波长为 0.546 μm, 根据光圈数与表面矢高偏差公式计算可得非球面的表面矢高偏差公差范围是 0.82~1.09 μm, 以该公差范围作为参考并进一步计算 RMS 数值, 根据 RMS 进行综合评价。

未考虑机械加工时, 该非对称 HMD 光学系统的单目结构重量约为 190 g, 具体包含了 OLED 微显示屏(<3 g), 10 个光学元件组成的后继透镜组(62.7 g 左右), 离轴合成器里的 2 个反射镜厚度均为 3 mm, 且由铝材料制成, 重量约为 124 g。考虑机械加工时, 如果采用密度为 2.71 kg/m³ 的铝合金作为结构材料, 结构重量约为 214 g(根据光学系统大小估算), 如果利用注塑成型技术, 塑料密度为 1.2 kg/m³, 重量还可以再降低 120 g 左右。

5 结 论

有效平衡结构、重量、成本、装配、成像质量和视场大小之间的关系而设计出紧密实用、微小轻便、用户体验舒适、成像质量优良和视场尽可能大的 HMD 是未来的发展趋势。将自由曲面反射镜应用于非对称光学系统设计中具有增加设计自由度、校正离轴像差、扩大视场大小、改善空间布局、使结构更紧凑、减少透镜数量、使重量更轻

等显著优势。本文分析了双反射镜非对称光学系统的设计指标要求和基本工作原理,总结了三反射镜非对称光学系统的离轴结构控制原理与方法。设计了一个适用于 HMD 的双反射镜非对称光学系统,视场范围为 $60^\circ \times 30^\circ$,出瞳直径为 8 mm。在截止频率为 52 lp/mm 处,全视场的调制传递函数数值大于 0.25,系统畸变小于 5%。未考虑机械结构的单目结构重量约为 190 g。该设计兼顾了视场大小、出瞳直径、成像质量与系统重量,较好地实现了小型轻量的设计目的。

参考文献:

- [1] 夏振平, 胡伏原, 程成, 等. 基于视觉空间定向理论的虚拟现实空间重构[J]. 液晶与显示, 2019, 34(2): 215-219.
XIA ZH P, HU F P, CHENG CH, *et al.* Virtual reality space reconstruction based on visual space orientation theory[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(2): 215-219. (in Chinese)
- [2] 王士铭, 程德文, 黄一帆, 等. 大视场高分辨率光学拼接头盔显示器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 364-369.
WANG SH M, CHENG D W, HUANG Y F, *et al.* Design of wide FOV optical-tiled head-mounted display with high-resolution[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 364-369. (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盔显示器的设计[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] 徐越, 范君柳, 孙文卿, 等. 基于全息波导的增强现实头盔显示器研究进展[J]. 激光杂志, 2019, 40(1): 11-17.
XU Y, FAN J L, SUN W Q, *et al.* Research progress of augmented reality head-mounted display based on holographic waveguide[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(1): 11-17. (in Chinese)
- [5] 刘晔, 张宇宁, 沈忠文, 等. 全息波导显示系统的实现与优化[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0523003.
LIU A, ZHANG Y N, SHEN ZH W, *et al.* Realization and optimization of holographic waveguide display system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0523003. (in Chinese)
- [6] 相广鑫, 郭岩, 李文强, 等. L型全息波导构型设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 89-92.
XIANG G X, GUO Y, LI W Q, *et al.* Design of a holographic waveguide with L configuration[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(3): 89-92. (in Chinese)
- [7] 何丽鹏, 曾振煌, 林峰. 折/反射式离轴头盔显示器光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122201.
HE L P, ZENG ZH H, LIN F. Optical design of catadioptric off-axis helmet-mounted display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122201. (in Chinese)
- [8] 刘军, 黄玮. 反射式自由曲面头盔显示器光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018001.
LIU J, HUANG W. Optical system design of reflective head mounted display using freeform surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018001. (in Chinese)
- [9] 何子清, 葛超, 王春阳. 基于最小二乘配置的光学镜头畸变校正方法[J]. 液晶与显示, 2019, 34(3): 302-308.
HE Z Q, GE CH, WANG CH Y. Optical lens distortion correction method based on least square configuration[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(3): 302-308. (in Chinese)
- [10] 周鑫, 肖锡晟, 孙胜利. 自由曲面在离轴光学系统中的应用[J]. 红外, 2017, 38(3): 6-11, 16.
ZHOU X, XIAO X SH, SUN SH L. Application of free-form surface in off-axis optical systems[J]. *Infrared*, 2017, 38(3): 6-11, 16. (in Chinese)
- [11] 庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 自由曲面校正光学系统像差的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522001.
PANG ZH H, FAN X W, MA ZH, *et al.* Free-form optical elements corrected aberrations of optical system[J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522001. (in Chinese)
- [12] TSOU B H. System design considerations for a visually coupled system[J]. *The Infrared and Electro-Optics Systems Handbook*, 1993, 8: 515-540.
- [13] 孟祥翔, 刘伟奇, 张大亮, 等. 双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0418004.
MENG X X, LIU W Q, ZHANG D L, *et al.*. Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0418004. (in Chinese)
- [14] 李华. 头盔显示器光学系统关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
LI H. Research on key technologies of optical system of helmet-mounted display[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [15] 张春燕, 陈文栋, 季渊, 等. 基于OLED微显示器的原子扫描控制器设计[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(4): 395-401.
ZHANG CH Y, CHEN W D, JI Y, *et al.* Design of atomic scan controller based on OLED microdisplay[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(4): 395-401. (in Chinese)
- [16] 解红军, 张小宝. 一种针对AMOLED器件劣化的电学补偿技术[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(4): 335-341.
XIE H J, ZHANG X B. Electronic-compensation technique for improving the degradation of AMOLED Devices[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(4): 335-341. (in Chinese)

作者简介:



黄颂超(1994—), 男, 福建泉州人, 硕士, 助理工程师, 主要从事成像光学设计方面的研究。E-mail: 478886527@qq.com



冯云鹏(1981—), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 2011年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事新型光学系统先进光学制造与检测方面的研究。E-mail: roc@bit.edu.cn