

轻量化头戴显示器光学系统设计

吕向博^{1,2} 王 振¹ 魏张帆^{1,2} 李 璟¹ 杨宝喜¹ 乔 亚³ 路 远³ 李登高³ 朱 菁^{1,2} 黄惠杰^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

³合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037

摘要 虚拟现实头戴显示器(HMD)的光学系统应具有较大的视场角和出瞳,同时应具有重量轻和厚度薄的特性,从而适应人体的佩戴需要。为了同时满足这些要求,详细描述了一种基于初级像差理论的头戴显示器光学系统设计方法。根据这个方法,用两种聚合物材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC),设计了双片式的头盔系统,其出瞳直径为8 mm,视场角为70°。系统总长小于70 mm,镜头的总质量小于30 g。全视场相对照度大于0.4,其轴上像差和轴外像差都得到了有效校正,边缘视场点列图光斑半径在70 μm左右,各个视场的调制传递函数(MTF)曲线分布较为均匀,同时中心视场和边缘视场的MTF值在8 cycle/mm处分别为0.6和0.4左右,最大畸变小于2%,实际加工的系统对标准分辨率板的成像像质能够满足使用要求。

关键词 光学设计; 初始结构; 头戴显示器; 光学系统; 光学加工与检测

中图分类号 TN27; TN202

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022007

Lightweight Design of a Helmet-Mounted Display Optical System

Lü Xiangbo^{1,2} Wang Zhen¹ Wei Zhangfan^{1,2} Li Jing¹ Yang Baoxi¹ Qiao Ya³ Lu Yuan³

Li Denggao³ Zhu Jing^{1,2} Huang Huijie^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract The head-mounted display used for virtual reality demands an optical system with large field of view and exit pupil diameter, which has the characteristics of less weight and small total length to satisfy these requirements. This article presents a design method of the head-mounted display (HMD) optical system based on the primary aberration theory. Through this method, a two-piece optical system by utilizing polymethyl methacrylate (PMMA) and polycarbonate (PC) is designed. The exit pupil diameter of the proposed system is 8 mm and its field of view is 70°. The total length is less than 70 mm, and the weight of the system is less than 30 g. The full-field relative illumination is greater than 0.4. Its axis and off-axis aberrations have been effectively corrected. The root mean square (RMS) radius of the marginal field is about 70 μm, modulation transfer function (MTF) curves have a uniform distribution, while the MTF values of the central field and the marginal field are about 0.6 and 0.4 at 8 cycle/mm, respectively. The maximum distortion of the system is less than 2%. The manufactured optical system has satisfactory image quantities according to the quantity inspection by the standard resolution panel.

Key words optical design; first-order optical structure; helmet-mounted display; optical system; optical fabricating and testing

OCIS codes 220.3620; 080.2468; 220.1250; 220.4610

收稿日期: 2015-04-07; 收到修改稿日期: 2015-05-12

基金项目: 上海市科技人才计划项目(14YF1406300)、国家国际科技合作专项(2011DFR10010)

作者简介: 吕向博(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: lxbsiom@siom.ac.cn

导师简介: 朱菁(1982—),男,博士,副研究员,主要从事高数值孔径光刻技术与光学系统设计方面的研究。

E-mail: zhuj@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

头戴式显示器(HMD)指的是将像源和目视光学系统集成于一个结构,然后借由头带、头盔或者眼镜佩戴于用户头部,使用户可以通过光学系统观察到像源的显示设备^[1]。经过几十年的发展,有关的报道与成果层出不穷^[2-4]。尤其是近年来随着高分辨率微显示器以及制造加工工业的长足发展,头戴显示器越发受到人们关注,各种新型的结构与设备逐渐涌现,其实用化与商业化的脚步也逐步加快。

头戴显示器可以分为两种类型:一种是用于增强现实的穿透式显示器^[5],另一种是用于虚拟现实的非穿透式显示器^[6]。用于增强现实的头戴式显示器可以令使用者在观察到内部像源显示的图像的同时,还可以看到外部环境;增强现实显示器中的像源图像是对外部环境的补充与说明,能够大幅度提升用户的判断力。虚拟现实显示器只能令用户观察到内部像源显示的图像,外部场景光线不能够穿透设备进入人眼,故称其为“非穿透式显示器”;用于虚拟现实的头戴显示器可被认为是将普通显示设备佩戴在用户眼前,但是其特点在于视场角(FOV)很大,用户佩戴后眼前充满着内部像源显示的图像,对该图像加以严格的设定,可以在人眼前营造出具体的场景,使得用户有沉浸感。

虚拟现实在军事训练、消费电子、行为矫正和心理学等领域都有应用。1965年,Ivan Sutherland^[7]盛赞虚拟现实是“显示技术的终极”;1983年,Eric M Howlett^[8]第一次提出一种应用于虚拟现实的大角度的 non-pupil forming 光学系统;此后,有关虚拟现实的研究成果大量涌现,20世纪末,Frederick P Brooks^[9]在一篇专题报告中对虚拟现实的发展与现状进行了详尽的报道。此时的头戴显示器较多为军用设备,体积笨重,佩戴舒适度很差。进入21世纪以来,头盔显示器逐渐从军用领域走向消费电子市场,各种用于娱乐的设备不断出现,在2011年已经有了利用智能手机搭建虚拟现实平台的报道^[10];2013年,Oculus公司发布旗下第一款虚拟现实设备 Oculus Rift,其采用了单透镜光学系统,轴外像差没有得到有效校正,需要程序对显示图像进行预畸变的操作。

应用于虚拟现实技术的头戴显示通常应具有较大的视场角,以此获得更为真实的沉浸感和体验感,与此同时,为了配合虚拟现实的头部跟踪功能,头戴显示的出瞳应较大,以防出现视觉盲区。为了满足人体的舒适体验,头戴显示的重量和体积尽可能小,并符合人眼的佩戴习惯。目前,虚拟现实头戴式显示报道主要集中在整机集成、附加功能和应用领域等方向,但是针对虚拟现实头戴显示器的光学系统设计方法却少见报道^[11-13]。本文详细描述了一套轻量化虚拟现实头戴显示器光学系统的设计过程,轴上像差和轴外像差都得到了有效的校正,采用了最为普通的两种塑料材料,密度小,质量轻;并将其进行了加工与装调,对其光学性能做了测试,最终各项结果满足设计要求。

2 光学设计过程

2.1 设计参数

头戴式显示器的光学系统可以分为 pupil-forming 和 non-pupil forming 两类。提出的光学系统具有 non-pupil forming 的性质,即系统的光阑为使用者的瞳孔,系统内部没有和瞳孔共轭的光阑,系统的光阑大小随着瞳孔大小的变化而变化。其具体设计参数如表1所示。

表1 头戴显示器光学系统设计参数

Table 1 Specifications of the HND optical system

Parameter	Value	Parameter	Value
Wavelength	Visible light	Pupil diameter	8 mm
Field of view	70°	Half image height	38.1 mm
Pupil distance	15 mm	Total length	<70 mm
Relative illumination	>0.4	Maximum distortion	<5%
MTF of central FOV	>0.6 @ 8 lp/mm	MTF of marginal FOV	>0.4 @ 8 lp/mm
	>0.4 @ 12 lp/mm		>0.2 @ 12 lp/mm

人眼的瞳孔直径可以根据环境亮度的变化在约2~8 mm的范围内改变,一般条件下,其平均入瞳直径为4 mm^[14]。在头戴式显示器中,如果取光学系统出瞳为4 mm,人眼一旦转动其看到的像质就会变差,所以光学系统出瞳不能过小。但是出瞳也不能太大,一方面出瞳增大会大幅度提高设计难度;另一方面,人们在平常的日常生活中

如果想要观察其他视角的图像的话,第一选择往往是转动头部而并不是转动眼球;此外,出瞳过大使得系统杂散光增多,影响图像对比度,同时增大系统重量,不利于使用者佩戴。最终选定系统出瞳为 8 mm。

视场角是系统另一个重要指标。考虑到人眼的视场角大小,这里设定系统全视场角为 70°。智能手机促进了虚拟现实头戴显示器的进步,手机中自带像源、中央处理器以及图形处理器,是虚拟现实头戴显示器的一种重要载体^[10]。这里的光学系统的半像高的大小是由手机屏幕的大小来确定的。以常用的 5inch(1 inch=2.54 cm)屏幕手机为例,左右眼分屏后认为每个屏幕对角线 3 inch,即 76.2 mm,那么对角线半像高即为 38.1 mm。由半像高和视场角可以得出系统的焦距大小,即 54.4 mm。

出瞳距是透镜距离人眼眼球的距离。距离太小不安全,不利于使用者佩戴,并且睫毛容易污染透镜。太大的话不利于整个系统的小型化,也容易引入杂散光。考虑到人眼入瞳位于角膜后约 3 mm 处,将出瞳距设定为 15 mm 是比较合适的。调制传递函数(MTF)的要求可以根据显示屏的分辨率来计算,以目前常用的 5 inch 1920 pixel×1080 pixel 分辨率的显示屏为例,其单个像素大小为 57.68 μm,截止频率为 8.67 cycle/mm,因此要求中心视场处 MTF 值于 8 cycle/mm 处不小于 0.6,于 12 cycle/mm 处不小于 0.4,边缘视场于 8 cycle/mm 处不小于 0.4,于 12 cycle/mm 处不小于 0.2。总长是头戴式显示器光学系统的一个重要性能,要求系统的总长包括出瞳距在内要小于 70 mm。为了实现轻量化以及紧凑性,同时为了系统佩戴起来较为舒适,采用了两片透镜式的结构,同时为了降低加工成本,方便复现所提出的系统,系统所用材料为常见的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)。

值得一提的是,头戴显示器光学系统属于目视系统,在设计过程中一般需要将系统倒置,即视其为无限远共轭系统,系统原有的出瞳在设计过程中变为了入瞳。设计过程将遵循这一原则,倒置光学系统,光线从人眼瞳孔处出发,按照从左至右的顺序依次经过两片透镜并在像面处会聚。

2.2 初始结构的计算

光学系统初始结构的获取一般有两种方法^[15],一种是根据初级像差理论来计算初始结构,另外一种是根据已经公开发表的镜头设计专利,选用各项参数接近设计要求的镜头作为初始结构。头戴显示器光学系统因其对长度和重量的要求特殊,属于新型光学系统的一种,相关的公开发表的专利很少,需要利用像差理论来计算系统的初始结构。

由于系统佩戴在使用者头部,系统的重量不能太大,复杂度不能过高,为了达到这一目的,选定该系统由两个组元组成。设定两个组元光焦度分别为 φ_1 和 φ_2 ,两组元间距为 d_1 ,第二组元与像面间距为 d_2 ,第一近轴光线(入射角度为 0)在两个组元上的光高分别为 h_1 和 h_2 ,系统所使用的材料折射率分别为 n_1 和 n_2 ,阿贝常数 ν_1 和 ν_2 ,系统总的光焦度为 Φ 。那么有:

$$h_1\varphi_1 + h_2\varphi_2 = \Phi, \quad (1)$$

$$h_2 = h_1 - d_1\varphi_1. \quad (2)$$

根据薄透镜(理想组元)的初级像差公式,从消除场曲的角度考虑,有:

$$\frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} = 0. \quad (3)$$

采用场曲公式一方面是因为场曲不容易校正,另一方面也是考虑到场曲公式较为简洁,便于说明问题与计算。第一近轴光线出射角度是系统总的光焦度,根据几何关系又有:

$$\frac{h_2}{d_2} = -u_2 = \Phi. \quad (4)$$

令第一近轴光线入射高度为 1,即 $h_1 = 1$,将(1)~(4)式联立,得

$$n_2 d_1 \varphi_1^2 + (n_1 - n_2) \varphi_1 - n_1 \Phi = 0, \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{\Phi n_1}{\varphi_1^2 n_2} + \left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right) \frac{1}{\varphi_1} \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\varphi_1} \right)$$

为了实现头戴显示器光学系统的轻量化以及紧凑性,该系统一方面采用了两片式的基本形式,另一方面需要着重考虑如何减小系统的总长。以 φ_1 为自变量建立系统总长的函数:

$$f(\varphi_1) = d_1 + d_2 + 15 = \frac{\Phi n_1}{\varphi_1^2 n_2} + \left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right) \frac{1}{\varphi_1} + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\varphi_1}\right) + 15 . \quad (7)$$

如果根据(7)式对 φ_1 求偏导得出系统总长极值,或者采用优化算法计算系统总长极值,都会使设计过程过于复杂。在(5)式中,以 d_1 作为自变量求出 φ_1 的表达式,然后代入(7)式求得系统的总长。由于 d_1 的变化范围不大,可以直接利用画图法求得系统的极值。因为(5)式是二次方程,故 φ_1 有两组解,分别画出两条曲线来显示系统总长随两组元间距变化的曲线。系统所采用的材料是 PMMA 与 PC,其折射率分别 1.492 与 1.587,令 d_1 在 2~40 mm 之间变化,最终变化曲线如图 1 所示。

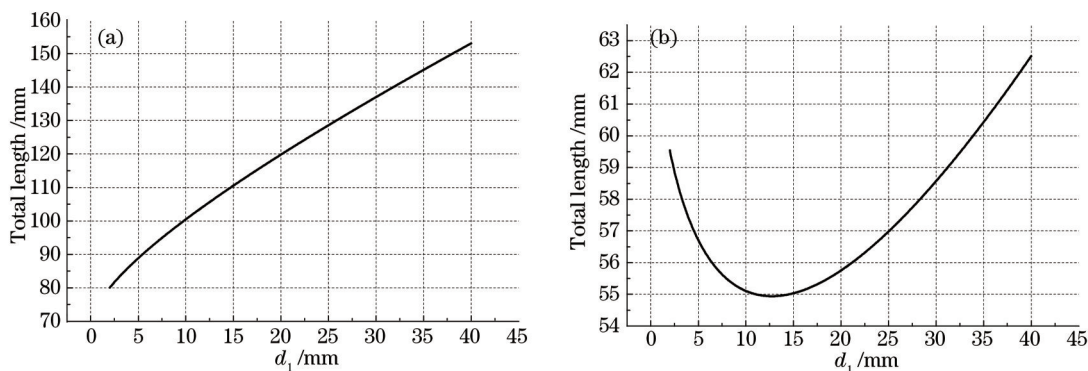


图 1 系统总长随两组元间距变化曲线。(a) 第一组元光焦度为负; (b) 第一组元光焦度为正

Fig.1 Relationship between total length and elements' optical power. (a) The first element's power is negative; (b) the first element's power is positive

当第一组元光焦度为负时,其变化范围为-0.079299~-0.020061,当其为正时,其变化范围为0.10902~0.021547。从图 1 可以看出,当第一组元光焦度为正时,系统总长较短,当两组元间距在 12.8 mm 左右时,即第一组元光焦度为 0.0354 时系统总长达到极小值。最终得到系统的一阶结构如表 2 所示,其光路图如图 2 所示。

表 2 计算得出的一阶结构

Table 2 First order structure of the system

Focus length of first element	Focus length of second element	Distance between two elements	Back intercept	Total length
25.54	-24.03	12.8	27.12	54.92

确定了一阶结构之后,需要将理想组元变为实际折射面或反射面,得到系统的初始结构。将一阶结构导入光学设计软件如 Zemax 或 CODE V,将组元的两个折射面设定为非球面,以其曲率半径、厚度圆锥系数及非球面各阶系数作为变量,控制各个组元的焦距与之前计算得出的数据一致,最终可以得到实际的初始结构,其光路图如图 3 所示。

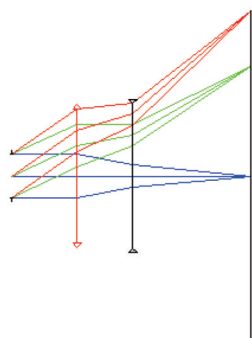


图 2 计算得出的一阶结构光路图

Fig.2 First-order structure's ray trace diagram of the system

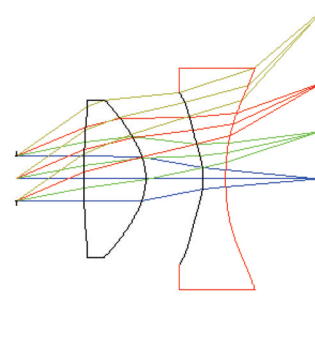


图 3 优化得出的初始结构光路图

Fig.3 Initial structure's ray trace diagram of the system

2.3 优化过程与结果

得到初始结构之后,进行透镜优化,最终得到参数如表3所示的系统结构,其光路图如图4所示。在优化此镜头的时候需要注意以下几点:

1) 系统采用了四面非球面,需要注意的是各个面的有效非球面系数不宜过高,一般到8阶即可。这是由于高阶非球面的引入会使得其面型过于复杂,虽然可以加工,但是由于此光学系统的口径较大,加工完成后高于8阶的非球面系数不能准确检测,使得其面型质量不能得到准确评价。

2) 由于非球面的引入尤其四个面都是非球面,只控制系统焦距是不够的,同样的焦距下,不同的结构半像高却不同,不能满足要求。在优化过程中,只控制半像高是比较好的选择,可以采用REAY操作数进行控制。

3) 系统总长越大,像质就越好,所以在优化过程中系统总长总是趋向变大,要对其进行严格约束,但是随之而来的问题是系统边缘视场的照度下降,在优化过程中要注意对其加以控制。在Zemax中有RELI这样具有针对性的用于控制相对照度的操作数,但是这里相对照度和总的像质水平在一定程度上是相互矛盾的,盲目使用RELI不利于像差的平衡,可以采用控制边缘视场光线在第一片透镜第二面的出射角大于 10° ,同时控制其在第二片透镜第一面的出射角大于 5° 的方法来控制在控制相对照度的大小。

4) 非球面的引入使得畸变的校正相对容易,但由于非球面的高度灵活性,不宜对畸变大小做过于严格的约束。在初步优化过程中不适宜将畸变大小作为目标,在优化后期可以使用DIMX操作数配合较小的权重来控制畸变的大小。

5) 为了使系统佩戴起来更加舒适,需要使系统的中心更加靠近瞳孔的位置,即更加靠近物方,这就要求在系统总质量较小的前提下,第一片透镜的重量要更大一些。在优化过程中要放松对第一片透镜厚度的控制,同时限制第二片透镜的边缘厚度和中心厚度,使其在能够加工的前提下尽可能得小。采用中心厚度操作数(CTVA)和边缘厚度操作数(ETVA)配合以较大的权重可以控制系统各个透镜的厚度。

6) 该系统是一个大像差系统,在整个优化过程中不宜采用Zemax软件提供的波像差默认评价函数,但是在优化后期需要加入对某些视场MTF值的控制。在控制MTF值的时候,使用MTFA操作数并给定其预设值,这样的方法优化效果不是很好,应该采用MTFA与OPGT相配合的方法来控制在控制视场MTF值的大小。此外,已经说明此系统的目标分辨率为8 lp/mm,但在使用MTFA操作数的时候以8 lp/mm作为目标是不妥的,应该以4 lp/mm或6 lp/mm作为目标来进行优化。

表3 最终系统结构参数

Table 3 Structure parameters of the ultimate system

	Curvature	Thickness	Conic	4 th order	6 th order	8 th order
Stop	Inf	15	0	0	0	0
2	-3.59805×10^{-4}	12.65	3.2697×10^4	-1.619×10^{-5}	3.020×10^{-9}	-6.338×10^{-11}
3	-9.89465×10^{-2}	4.85	-3.28	-6.628×10^{-5}	1.404×10^{-7}	-3.002×10^{-10}
4	2.227347×10^{-2}	2.62	2.99	-7.298×10^{-5}	1.788×10^{-7}	-1.881×10^{-10}
5	1.021916×10^{-1}	34.86	-3.94	-2.551×10^{-5}	7.688×10^{-8}	-6.771×10^{-11}
Image	Inf	--	0	0	0	0

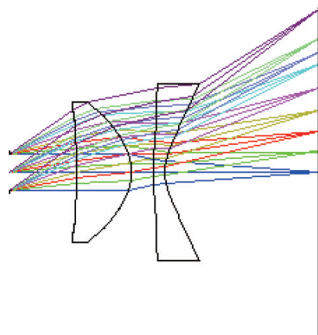


图4 最终结构光路图

Fig.4 Ultimate structure's ray trace diagram

3 系统像质评价与实测结果

倒置系统光路后,系统的出瞳变为入瞳,那么其入瞳距为 15 mm,入瞳大小 8 mm,视场角为 70°,系统总长小于 70 mm,全视场相对照度大于 0.4。如图 5(a)所示为系统点列图,由图中可以看出,边缘视场点列图平均半径在 70 μm 左右,中心视场点列图半径在 30 μm 左右,考虑到系统对应显示器单个像素大小为 57.68 μm ,人眼通过此系统观察显示器时,边缘视场的图像不会模糊,同时中心视场的颗粒感不会十分严重。系统 MTF 曲线分布如图 5(b)所示,各个视场的 MTF 曲线分布较为均匀,同时中心视场处 MTF 值于 8 cycle/mm 处大小为 0.6 左右,于 12 cycle/mm 处为 0.4 左右,边缘视场于 8 cycle/mm 处为 0.4 左右,于 12 cycle/mm 处为 0.2 左右。各项指标满足设计要求。如图 5(c)所示为系统场曲与畸变分布,从图中可以看出系统的场曲较大,用以平衡系统高阶像差。系统的像散得到了校正,同时最大畸变不大于 2%,满足设计要求。

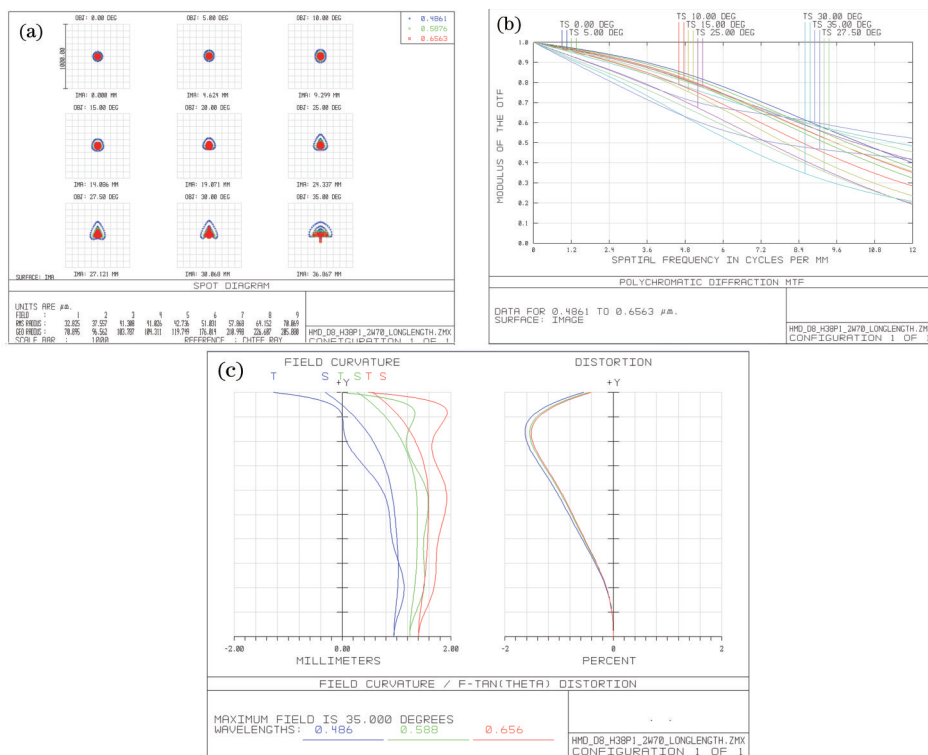


图 5 头戴显示器光学系统像质评价。(a) 点列图; (b) MTF 曲线; (c) 场曲与畸变

Fig.5 Image quantity of the optical system. (a) Spot diagram; (b) MTF curve; (c) field curvature and distortion

光学系统的公差分析证明系统对公差不敏感,对加工以及装调误差的容忍度较高,系统可以加工。需要指出的是,在机械设计的过程中,需要将镜筒和压圈的体积尽可能地小以进一步削减系统的总质量。利用金刚石车床将两片透镜加工了出来,如图 6(a)所示,同时采用三维(3D)打印的方法加工了镜筒,将系统进行了装配后如图 6(b)所示。材料 PMMA 和 PC 的密度差别不大,都在 1.2 g/cm^3 左右,镜筒采用的材料为合成树脂(ABS),密度为 1.05 g/cm^3 ,装配后系统的总质量小于 30 g,实现了轻量化的设计要求。

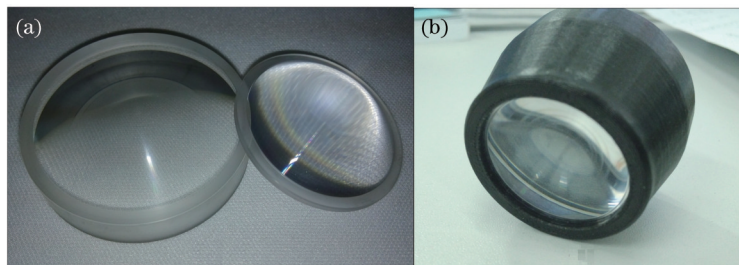


图 6 头戴显示器光学系统原型。(a) 加工后的两片透镜; (b) 装配后的光学系统

Fig.6 Prototype of the HMD's optical system. (a) Lens after manufacture; (b) optical system after assembly

将这样的系统装配两套,分别供左右眼使用,如图7所示,光学系统前方是对角线尺寸各为3英寸的显示器。在显示器的左右屏显示同一场景的左右眼带有视差的图像,人眼观察到该图像后就能产生三维显示的效果。如图8所示为系统对标准分辨率板进行成像后的效果,由图中可以看出图像没有明显畸变与色差,其能分辨的最小间隔为0.06 mm,则该系统能够分辨的空间频率即线对数为8.3 cycle/mm,由此可见该系统的成像效果良好,满足设计要求。

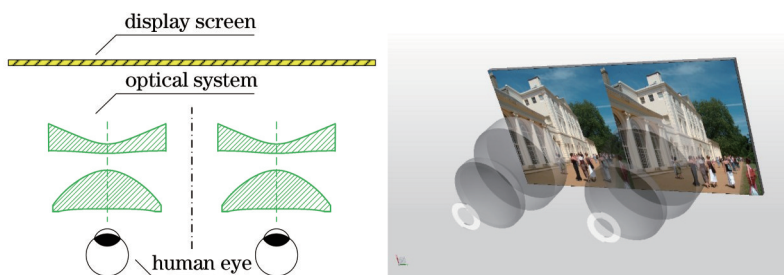


图7 头戴显示器光学系统的应用

Fig.7 Usage of the optical system for HMD

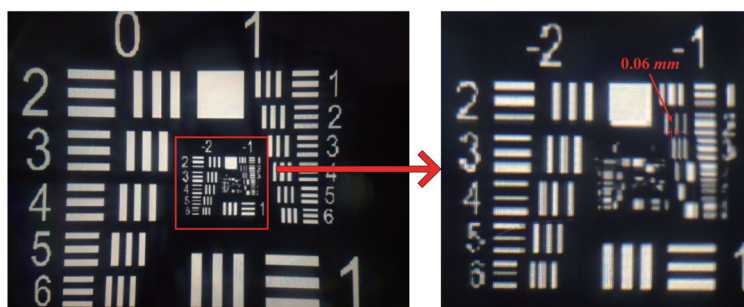


图8 头戴显示器光学系统标准分辨率板成像测试

Fig.8 Quantity inspection result of the HMD's optical system by the standard resolution panel

4 结 论

详细描述了一种用于虚拟现实头戴显示器光学系统的设计过程。在提出系统各项指标的基础上,对该系统的初始结构的设计进行了讨论,列出了在透镜优化过程中需要着重注意的几点要领,然后对该系统进行了像质评价并对其进行加工与装配。提出的系统出瞳大小为8 mm,视场角为70°,系统总长小于70 mm,且镜头的总质量小于30 g。全视场相对照度大于0.4,其轴上像差和轴外像差都得到了有效的校正,边缘视场点列图光斑半径在70 μm左右,各个视场的MTF曲线分布较为均匀,同时中心视场处MTF值于8 cycle/mm处大小为0.6左右,于12 cycle/mm处为0.4左右,边缘视场于8 cycle/mm处为0.4左右,于12 cycle/mm处为0.2左右,最大畸变不大于2%,系统对标准分辨率板进行成像后的效果良好,各项指标满足设计要求。

参 考 文 献

- 1 Zhou Haixian. The development on helmet-mounted display technique[J]. Infrared Technology, 2002, 24(06): 1-7.
周海宪. 头盔显示技术的发展[J]. 红外技术, 2002, 24(6): 1-7.
- 2 Zhang Huijuan. Plastic hybrid diffractive-refractive eyepiece for head-mounted display[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 856-859.
张慧娟. 用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 856-859.
- 3 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Lu Zhenwu. Hybrid diffractive-refractive optical system design of head-mounted display for lightweight night vision[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 24(10): 1393-1396.
张慧娟, 王肇圻, 卢振武. 折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2005, 24(10): 1393-1396.
- 4 Chen Yunliang, Li Tiejai, Qiu Xianghui. Design of free-form-surface prism in head mounted display[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 552-557.
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.
- 5 Hu Xinrong, Liu Ying, Wang Jian, et al.. Optical system design of head-mounted display based on planar waveguide of semi-transparent

- film array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0922001.
- 呼新荣, 刘 英, 王 健, 等. 半透膜阵列平板波导式头戴显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0922001.
- 6 Lu Haiping, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0522002.
- 卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0522002.
- 7 Ivan E, Sutherland. *The ultimate display*[J]. *Multimedia: From Wagner to Virtual Reality*, 1965.
- 8 Eric M, Howlett. *Wide Angle Color Photography Method and System: US, 4406532*[P]. 1983.
- 9 Frederick P Brooks r. What's real about virtual reality?[J]. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 1999, 19(6): 16-27.
- 10 Olson J L, Krum D M, Suma E A, *et al.*. A Design for a Smartphone-Based Head Mounted Display[C]. *Virtual Reality Conference (VR), IEEE*, 2011: 233-234.
- 11 Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Design of an ultralight and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-mounted projective displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 249-253.
- 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.
- 12 Lu Haiping, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of compact optical system in wide-angle head mounted display[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 979-987.
- 卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 超大视场头盔显示光学系统设计[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(5): 979-987.
- 13 Jianming Yang, Weiqi Liu, Weizhen Lv, *et al.*. Method of achieving a wide field-of-view head-mounted display with small distortion[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2035-2037.
- 14 Wang Qionghua, Pan Dongdong, Li Xiaofang, *et al.*. Relation between viewer's pupil diameter and visual fatigue in autostereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 350-353.
- 王琼华, 潘冬冬, 李小方, 等. 自由立体显示器观看者瞳孔直径与视疲劳关系[J]. *光子学报*, 2011, 40(3): 350-353.
- 15 Zhang Yimo. *Applied Optics 3rd ed*[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 602-658.
- 张以谟. *应用光学(第三版)*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 602-658.

栏目编辑: 韩 峰