

文章编号: 1005-5630(2015)04-0324-06

# 虚拟现实眼镜光学组件的设计与分析

李 政<sup>1</sup>, 来 颖<sup>2</sup>, 曹家勇<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 机电设计与知识工程研究所, 上海 200240;

2. 同济大学 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

**摘要:** 针对虚拟现实眼镜的光学镜片直径以及出瞳距离对视场角的敏感性做了分析, 选择了最优的镜片直径和出瞳距离, 采用 Zemax 软件设计了相应的球面和非球面镜片。对二者的弥散斑和轴外相差进行了对比, 发现非球面镜片可以显著提高镜片的成像效果, 并应用软件消除了由镜片导致的畸变。设计的非球面镜片视场大、畸变小, 达到了预期的效果。

**关键词:** 非球面镜片; 虚拟现实眼镜; 视场角

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.009

## Analysis and design of the virtual reality head-mounted display lens

LI Zheng, LAI Ying, CAO Jiayong

(1. Institute of Electromechanical Design and Knowledge Based Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The angle of view of virtual reality head-mounted display is analyzed, optimizing the diameter of the lens and the distance of exit pupil. The spherical and non-spherical lens are designed and their disc of confusion and off-axis aberration is compared by using Zemax. The conclusion is that the non-spherical lens can improve the image significantly. Distortion resulted from the lens is corrected by the software. Non-spherical lens have little distortion and large viewing angle, which can satisfy our needs.

**Keywords:** non-spherical lens; virtual reality head-mounted display; angle of view

## 引 言

与目前被广泛关注的 Google Glass 不同, 虚拟现实眼镜是一款虚拟现实的头戴式显示器, 带上它之后, 使用者将看到的是另一个虚拟的世界, 并且通过双眼视差, 使用者会有很强的立体感。此外, 由于虚拟眼镜当中配有陀螺仪、加速计等惯性传感器, 可以实时的感知使用者头部的位置, 并对应调整显示画面的视角, 使得用户仿佛完全融入到了这个虚拟世界当中。

头戴显示器的光学系统包括以下几类: 类似 Google Class 的通过光学系统可以实现增强现实<sup>[1]</sup>; 类似 Sony HMZ-T3 的光学系统, 采用光学镜片组, 实现畸变矫正、色差处理等<sup>[2]</sup>; 类似 Oculus Rift 的光学系统, 每个眼前只有一个光学目镜, 图形的畸变矫正、色差处理等部分交给图形处理软件完成<sup>[3]</sup>, 这一类系统, 结构简单, 视场角度大, 价格低廉, 迅速引起了关注。

收稿日期: 2014-12-08

作者简介: 李 政(1988—), 男, 硕士, 主要从事虚拟现实眼镜的研究。E-mail: zhesixing@163.com

通信作者: 曹家勇(1973—), 男, 副教授, 主要从事新型驱动与运动控制的研究。E-mail: caojy@sit.edu.cn

虽然目镜的视场角公式早已经存在,但是具体应用中,出瞳距离设计多少,视场角对目镜直径的敏感性等,却很少有分析。本文针对单个镜片的光学系统,分析了镜片大小以及出瞳距离对视场角的影响。然后,根据选定的视场角和镜片直径,采用 Zemax 软件,设计了球面镜片和非球面镜片,并对他们的成像效果进行了对比,发现采用非球面透镜可以大大的降低弥散斑和轴外像差的大小。

## 1 系统构成

### 1.1 系统构成及显示原理

产品的系统构成如图 1 所示,包括 LCD 或 LED 屏幕及其驱动模块、光学镜片、头部姿态检测模块。另外,系统需要连接到电脑上才能运行。

如图 2 所示为 5~7 in(1 in=2.54 cm)的显示器被分为左右两个部分,分别显示左右眼看到的图像。由于左右眼分别看图像,所以会有 3D 效果。光学镜片为凸透镜,将显示图像放大。由于通过光学系统,人眼看到的景象视角比较大,可以达到  $100^\circ$ ,所以极大的增强了人们体验的临场感。同时,姿态检测系统会将头部的姿态传给电脑,电脑会根据头部的姿态,调整看到的视场角,从而使人仿佛在现实中观看一样。我们把这种体验称为沉浸式体验。

### 1.2 人眼睛的视觉原理

人眼睛通过左右眼关注到某点的直线交点确定空间中点的位置,如图 3 所示<sup>[4]</sup>。视野指头部、眼球固定不动时所能看到的空间范围,可分为动视野、静视野和注视视野。动视野是头部固定不动,自由转动眼球时的可见范围;静视野是头部固定不动,眼球静止不动状态下的自然可见范围;注视视野是头部固定不动,转动眼球而只盯视某中心时的可见范围。

正常人的视力范围比视野要小,因为视力范围是要求能迅速、清晰地看清目标细节的范围,只能是视野的一部分。例如,在垂直方向的视野中,立姿时视线方向在视轴以下  $10^\circ$ ;坐姿时视线方向在视轴以下  $15^\circ$ ;而当视角为  $30^\circ\sim 40^\circ$ 时,可以迅速而有效地扫视,称其为有效视力范围。所以,该范围是布置机器装置最适宜的范围<sup>[5]</sup>。人眼的水平视场角和垂直视场角如图 4、图 5 所示。

## 2 视场角的分析

如图 6 所示,将物象放在透镜的焦距附近时,人眼睛可以看到放大的像。放大倍数为<sup>[6]</sup>:

$$\Gamma = \frac{250}{f'} + 1 \quad (1)$$

式中  $f'$  为透镜的焦距。

人眼镜看到的视场角为:

$$\phi = 2\arctan\left(\frac{\gamma}{\rho} \times \frac{180}{\pi}\right) \quad (2)$$

式中: $\gamma$  为透镜的半径; $\rho$  为出瞳距离。

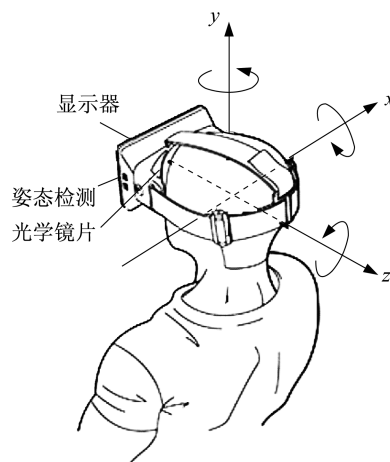


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structure of the system

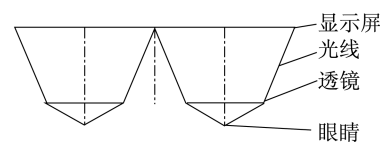


图 2 系统示意图

Fig. 2 Diagram of the system

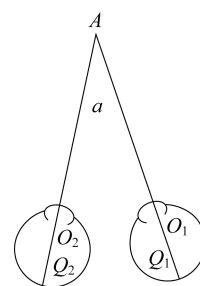


图 3 人眼睛的 3D 视觉原理

Fig. 3 Principles of 3D view of human eyes

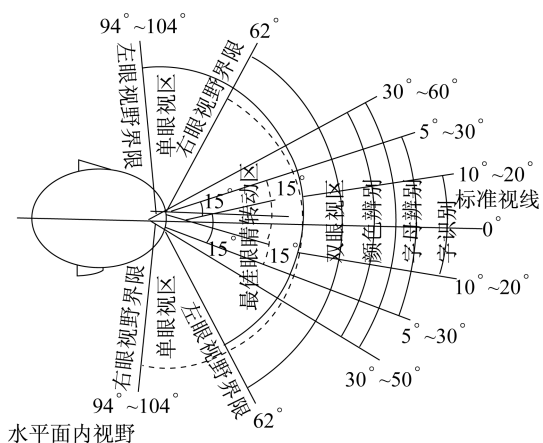


图 4 人眼镜的水平视场角图

Fig. 4 Horizontal angle of view

### 2.1 透镜半径与视场角

对于单独的双凸或平凸非球面镜片, 焦距  $f$  可以做到与透镜的通光口径  $D$  大小相近, 比通光口径略小。  $f/D$  的大小不可能无限小, 该值越小, 镜片越厚。以眼睛与镜片的距离为 8 mm 计算, 透镜半径与视场角的关系为:

$$\phi = 2\arctan\left(\frac{y}{8} \times \frac{180}{\pi}\right)$$

图形显示如图 7、图 8 所示

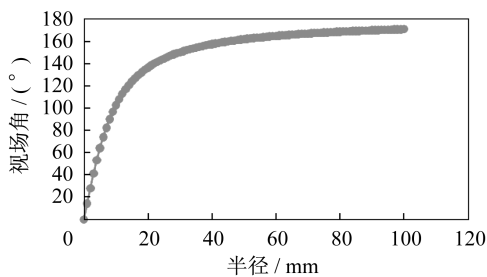


图 7 透镜半径与视场角的关系

Fig. 7 Relationship between the radius and viewing angle

我们定义单眼视场角对半径的敏感度为:

$$u = \frac{d\phi}{dr} = \frac{2880}{\pi(64 + r^2)} \quad (4)$$

由图可以看出, 对于单眼的视场角, 当镜片半径增大到 30 mm 之后, 视场角已经达到 75°, 再增加视场角需要增加的半径比较大。比如当镜片半径为 35 mm 时, 视场角为 77°, 只增加了 2°。

对于双眼视场角, 与单眼视场角的关系如下:

$$\alpha = \begin{cases} \phi, & \phi < 60 \\ \frac{\phi}{2} + 60, & \phi \geq 60 \end{cases} \quad (5)$$

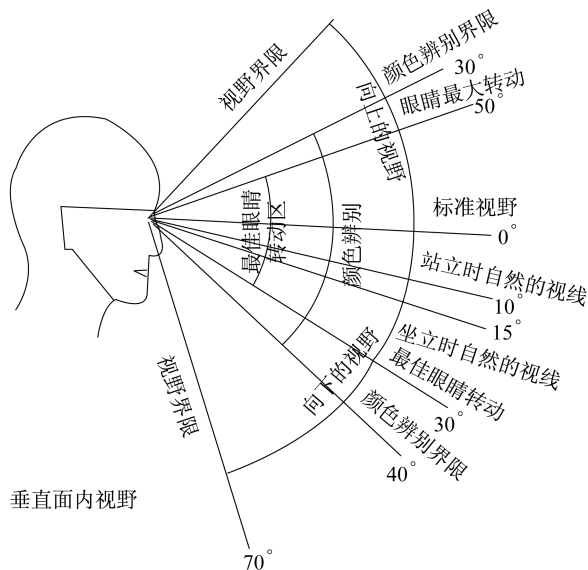


图 5 人眼睛的垂直视场角

Fig. 5 Vertical angle of view

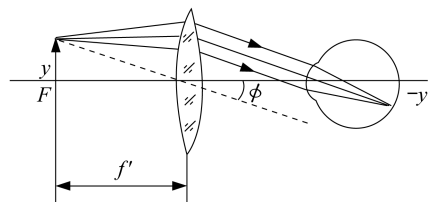


图 6 透镜视场角分析

Fig. 6 Analysis of the angle of view and lens

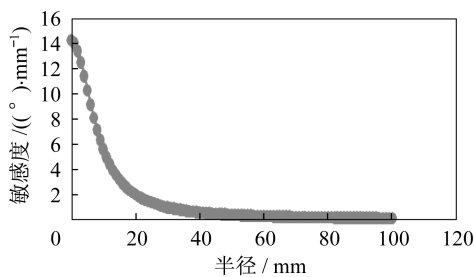


图 8 视场角对半径的敏感度

Fig. 8 Relationship of radius and sensitivity

对于上述图形,其对应的数值见表1。

表1 不同半径下的视场角

Tab. 1 The viewing angle with different radius

半径/mm	5	10	15	20	25	30	35
单眼视场角/(°)	64.010 77	102.680 4	123.855	136.397 2	144.510 7	150.137 2	154.25
双眼视场角/(°)	64.010 77	102.680 4	121.927 5	128.198 6	132.255 3	135.068 6	137.125

## 2.2 瞳孔大小与视场角

考虑到瞳孔大小,透镜半径与半视场角的关系为:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\gamma+3}{8} \times \frac{180}{\pi}\right) \quad (6)$$

其余与式(2)中相同。

## 2.3 出瞳距离与视场角

出瞳距离对视场角的影响,取  $\gamma=20$  mm:

$$\phi = \arctan\left(\frac{20+8}{\rho} \times \frac{180}{\pi}\right) \quad (7)$$

则对应的曲线图如图9所示,由图中可以看出,视场角随着出瞳距离的减小而增大,出瞳距离减小1 mm,视场角大概增大2.1°。

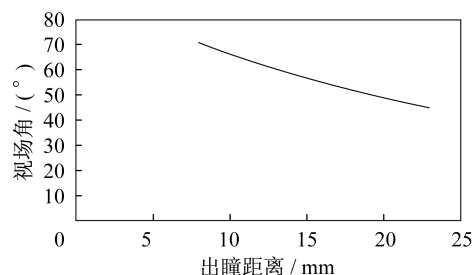


图9 不同出瞳距离下的视场角

Fig. 9 The viewing angle in different distance of exit pupil

## 3 透镜的设计

为了达到更好的沉浸式效果,视场越大越好。但是,视场角的选择也受限于以下因素:

(1) 出瞳距离。理论上出瞳距离最小可以达到6 mm。但是,实际上,由于部分用户要佩戴眼镜使用,因此设计的出瞳距离甚至可达20 mm,这会大大减小视场角。

(2) 系统的分辨率。系统的分辨率为通过透镜看到的任一方向上的像素数与视场角的比值。比如采用720 p(1 280 × 720)的屏幕,设计视场角为90°,则对应的系统分辨率为: $x = \frac{1\ 280\ \text{pixel}}{2 \times 90^\circ} = 7.11\ \text{pixel}/^\circ$ 。

据估计,人眼视觉分辨率为1',也就是60 pixel/(°)。实验发现7.11 pixel/(°)的系统分辨率,晶格效应非常严重。而取的视场角越大,系统分辨率会降低。因此,视场角的选择受限于系统的分辨率。

目前市场上的虚拟现实眼镜,主要有Google Cardboard和Oculus。Google Cardboard采用的显示器件是手机屏幕,将手机放到包含了镜片的盒子中,通过透镜观看手机屏幕的内容。但是它的显示镜片只有25 mm的直径,视场角大约为70°。Oculus公司发布的Oculus DK2设计的视场角达到了100°,采用的镜片直径达到了40 mm。综合考虑视场及晶格效应,3D显示头盔显示器视场取100°。为了方便近视的用户佩戴眼镜使用头戴显示器,采用17 mm的出瞳距离;为了达到100°的视场角,设计的镜片直径为40 mm。

3D显示器的外形尺寸及成本因素限制了透镜的复杂程度,镜片初步考虑用1片透镜实现。图10、图11为使用一片球面镜用光学设计软件优化后得出的镜头数据。由图11中可看出0°视场弥散斑超过300 μm,全视场弥散斑超过1 200 μm,轴上和轴外像差都比较严重。

图12、图13为使用了高次非球面透镜的镜头数据。从图13可以发现0°视场弥散斑为21 μm,全视场弥散斑为347 μm,可见无论是轴上还是轴外像差都优于球面镜。

目前3D显示头盔多使用手机屏,手机屏像元尺寸为67.5 μm

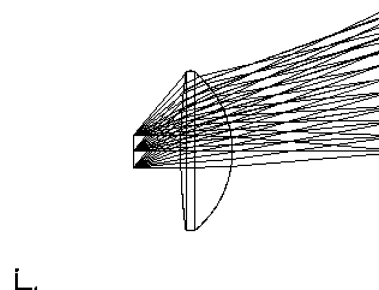


图10 球面镜视图

Fig. 10 Spherical lens

左右,可以看到球面镜轴外视场产生的弥散斑远大于屏幕像元尺寸,导致眼镜周围视场看起来很模糊,因此,使用非球面镜以提高轴外视场的像清晰度是有必要的。透镜面型采用偶次非球面,高次项越多加工越困难<sup>[7]</sup>,遂采用 4、6 次项。屏幕的虚像设置在距离眼镜 2 m 远处,视觉效果相当于在 2 m 处放置一对角线不小于 5 m 的屏幕。

非球面透镜镜像散及畸变曲线如图 14 所示。最大畸变量近 26%,但畸变可通过将屏幕显示图像做反向畸变处理来中和,使图像看起来无畸变。根据 Zemax 模拟得出的畸变数据,利用三次函数拟合畸变曲线,然后将其用在屏幕显示图像中。图 15、图 16 可表示屏幕图像经畸变处理前后的效果。

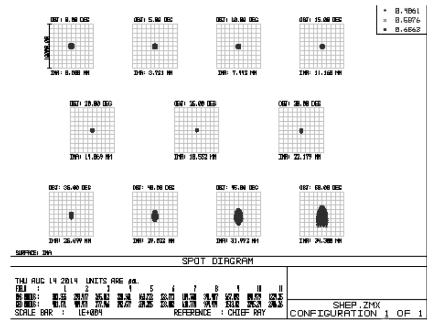


图 11 球面镜弥散斑

Fig. 11 Disc of confusion of the spherical lens

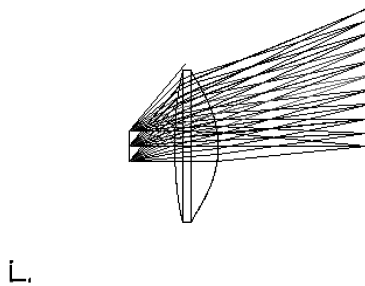


图 12 非球面视图  
Fig. 12 Aspheric lens

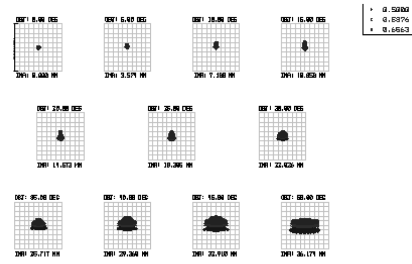


图 13 非球面透镜弥散斑

Fig. 13 Disc of confusion of aspheric lens

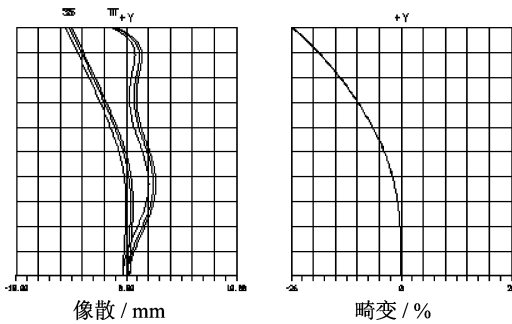


图 14 非球面镜像散及畸变曲线  
Fig. 14 Astigmatism and distortion of the aspheric lens

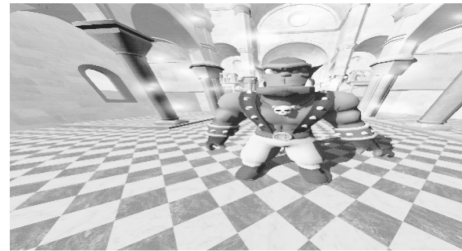


图 15 畸变矫正之前的图形

Fig. 15 The picture before anti-aberration

3D 头盔在实际工作时,可能会让试戴者产生视野边缘变暗的现象,产生这种现象的原因有两个:一是因为屏幕边缘像素点发出的光受到渐晕光阑(目镜边框)的遮拦,使边缘视场入射到瞳孔的光束逐渐变窄,称之为渐晕效应。关于非球面目镜的视场渐晕分析如图 17 所示,由 Zemax 分析得出,所设计非球面目镜产生渐晕的半视场为 47°~50°,渐晕视场范围非常小,这是因为目镜比瞳孔大得多,所以渐晕效应引起的边缘视野变暗现象几乎可以忽略不计。另外一个导致离轴视场变暗的原因就是余弦四次方定律,即斜光线成像的亮度与这个斜角的余弦四次方成正比,因此与画面中心部分相比,越向边缘,影像



图 16 经过逆畸变处理的图形

Fig. 16 The picture after anti-aberration

越暗。综合原因导致的像面相对照度曲线变化如图 18 所示。然而,在实际工作中,人眼是可以转动的,也就是说孔径光阑(人眼瞳孔)可以和边缘光线垂直,这导致余弦四次方降到了余弦三次方,实际效果就是人眼所感受到的屏幕边缘变暗的现象要比图 18 所模拟的情况好的多。

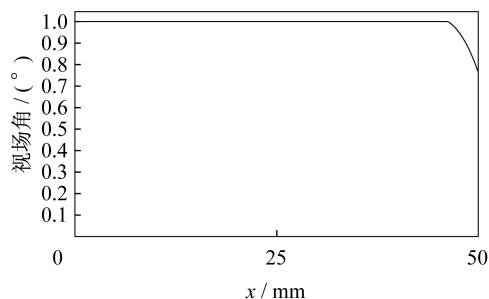


图 17 非球面镜视场渐晕曲线

Fig. 17 Vignetting diagram of the aspheric lens

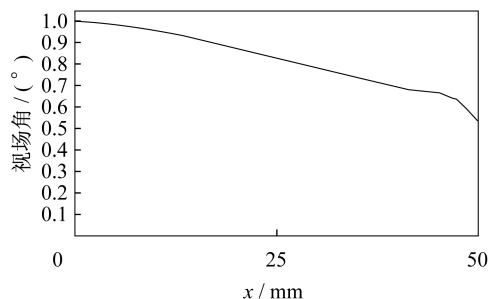


图 18 非球面镜像面相对照度曲线

Fig. 18 Relative illumination of the aspheric lens

玻璃与光学塑料都可进行非球面加工,但玻璃非球面加工比较昂贵,光学塑料可用注塑法成型,模具较贵,但开模后单片生产价格低廉,适用于大批量生产,并且,光学塑料的密度比玻璃小很多,减少了头盔的重量。光学透镜可用的光学塑料除了透光率、折射率、阿贝数、双折射、耐热性、耐溶剂腐蚀及加工工艺以外,对表面耐磨性、抗冲击强度都有要求。故目前可用的光学塑料品种<sup>[8]</sup>不多,主要有:PMMA、PC、CR-39、PS、NAS、SAN,综合考虑透光率、折射率、色散、硬度、价格等因素,最终选取 PMMA 作为 3D 头盔批量生产的透镜材料。

#### 4 结论

本文从透镜半径、出瞳距离等方面对虚拟现实眼镜的光学透镜与视场角的关系做了分析,分析了瞳孔对视场角大小的影响,并建立了透镜半径与视场角的敏感度函数。最后,选取了半径为 20 mm 的透镜,设计并对比了球面和非球面透镜,说明非球面透镜在减小弥散斑和轴外像差方面有比较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] Google glass. Glass Explorer Edition [EB/OL]. [2014-12-26]. <http://www.google.com/glass/start/>.
- [2] 邵勇,周海宪,赵志敏. 头盔显示器光学系统的研究[J]. 电光与控制,2002,9(3):37-40.
- [3] OCULUS V R,LLC. Development Kit 2[EB/OL]. [2014-12-26]. <https://www.oculus.com/>.
- [4] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2008.
- [5] 童时钟. 人机工程设计与应用手册[M]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [6] 李林,林家明,王平,等. 工程光学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2003.
- [7] 杨相利. 塑料光学元件制造[J]. 光学仪器,2000,22(4):27-34.
- [8] 陈洪谬,孙之海. 精密塑料成型[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

(编辑:张磊)