

文章编号: 1007-2780(2012)03-0401-05

# 头盔显示器光学检测系统

王 健<sup>1,2</sup>, 李 淳<sup>1</sup>, 刘 英<sup>1</sup>, 郭帮辉<sup>1,2</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 卢振武<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 吉林 长春 130033, E-mail: mrwangj@yahoo.com.cn;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 为了对头盔显示器的目视系统做出整体性的评价, 提出了一种简单可行的头盔显示器检测方法, 设计了用于检测的光学系统。根据头盔显示器与检测系统光瞳匹配的需求, 在设计中采用目镜结构的成像镜头, 通过一片树脂非球面镜片实现了镜头的无畸变成像。检测系统的视场角为  $50^\circ$ , 入瞳大小为 4 mm, 畸变量  $< 0.1\%$ , 在  $-4\text{ D} \sim 3\text{ D}$  头盔目镜测试条件下都能保持很高的成像质量, 可以满足不同屈光度下头盔显示器目视系统的测试需要。

**关 键 词:** 头盔显示器; 检测系统; 目镜; 光学设计

**中图分类号:** O439      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3788/YJYXS20122703.0401

## Optical Evaluation System for Head Mounted Display

WANG Jian<sup>1,2</sup>, LI Chun<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, GUO Bang-hui<sup>1,2</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LU Zhen-wu<sup>1\*</sup>

(1. *Optic-Electronic Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: mrwangj@yahoo.com.cn;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to make a comprehensive evaluation on a head mounted display (HMD), a simple and feasible testing method is proposed and an optical system for the test is specially designed. According to the requirement of pupil engagement for the HMD and the testing system, a structure of eyepiece is adopted in the optical design, and a plastic aspheric lens is used to realize the distortion-free property. The designed optical system has a field of view of  $50^\circ$ , a pupil size of 4 mm and a distortion less than  $0.1\%$ . It can keep high performance when the testing HMD is with diopter from  $-4\text{ D}$  to  $3\text{ D}$ . The analyses on the design show that the evaluation system can satisfy the evaluation requirement of HMD with various diopters.

**Key words:** head mounted display; evaluation system; eyepiece; optical design

## 1 引 言

随着虚拟显示技术的发展, 头盔显示器 (HMD) 已经广泛应用于军事、虚拟制造、医疗、模拟训练、娱乐等领域<sup>[1]</sup>, 各种相关产品竞相问

世<sup>[2-5]</sup>。HMD 的基本原理是利用小型的 CRT、LCD、OLED 等显示器件作为图像源, 通过 HMD 目镜系统实现对图像源的光学放大, 从而实现对现实场景的模拟。HMD 的显示效果直接取决于微显示屏和目镜光学系统。

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-03-02

基金项目: 吉林省与中国科学院合作专项资金项目 (No. 2011CJT0004)

作者简介: 王健 (1980—), 男, 吉林辉南人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光学系统设计工作。

\* 通讯联系人, E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

尽管目前针对 HMD 设计和应用的研究已经开展得相当广泛<sup>[6]</sup>,但是在 HMD 测试方面却相对滞后,常见的测试还仅限于对 HMD 目镜、显示器件、定位系统等单元性部件的检测。比如,对于独立的 HMD 目镜单元,利用平行光管和读数显微镜测量其焦距,利用传递函数测试仪器评价其光学成像质量<sup>[7]</sup>。国外一些机构针对军用 HMD 开发了专用检测设备,主要是对 HMD 的字符线宽、瞄准精度、显示对比度等作战指标进行测试,且设备非常复杂<sup>[8-10]</sup>。在很多情况下希望能够对 HMD 显示系统的视场、像质等指标做出快速测试,因此开发简单、专用的测试装置对于 HMD 研究具有非常重要的意义。

本文根据 HMD 显示系统整体检测的需要,提出了一种用于 50° 以下中小视场 HMD 的测试系统,可对 HMD 的视场角、畸变和成像质量进行快速测试,并设计了检测系统光学镜头部分,对光学系统的性能指标进行了分析和评估。

## 2 检测系统的工作原理

HMD 检测系统的工作原理如图 1 所示。利用计算机在 HMD 微显示屏上生成测试图形并经由目镜投射,检测系统在 HMD 目镜出瞳处接收图像信息,通过所成图像的尺寸、坐标、灰度等数据信息就可以计算出 HMD 视场角、畸变、成像质量等参数,对 CCD 进行亮度标定后还可以进行 HMD 的亮度测试。

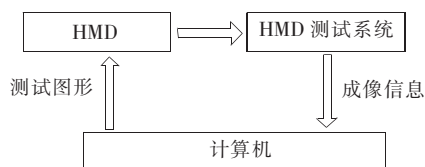


图 1 HMD 测试系统工作原理图

Fig. 1 Block diagram of HMD testing system

由于头盔显示器的出瞳是在 HMD 目镜镜头之外的,为了实现测试过程中的光瞳匹配,需要保证 HMD 检测系统的入瞳位于测试镜头的前端。这一光瞳特性与一般的成像镜头有显著区别,故而检测物镜需要专门研制。HMD 检测系统与被测 HMD 对接的光学原理如图 2 所示。

检测系统的视场角应该大于待测 HMD 的目镜视场。当检测系统与 HMD 完成中心对准后,

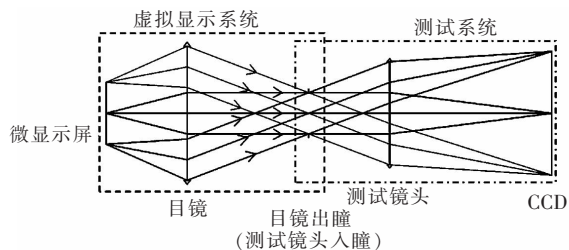


图 2 测试系统与 HMD 对接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical matching of testing system and HMD

可以通过检测系统的 CCD 探测器直接获得 HMD 所产生的全部图像信息,这种检测方式具有结构简单、不需扫描、数据处理方便的优点。

### 2.1 HMD 视场角测试

如图 2 所示, HMD 显示屏将最终成像到 CCD 上。根据理想镜头成像公式:

$$\frac{h}{2} = f \tan \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

其中  $h$  为像高,  $f$  为成像镜头焦距,  $\theta$  为目标对应全视场角。利用 HMD 显示屏经测试系统所成的像高及检测镜头的焦距即可以求出 HMD 系统的视场角:

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{h}{2f} \quad (2)$$

式(2)适用于检测镜头仅存在微量畸变的情况。当测试镜头畸变较大时,需要对镜头畸变进行标定,并对式(2)进行修正。

### 2.2 电视畸变

人眼对 HMD 目镜系统进行观察时,看到的通常是正畸变图形,即枕形畸变,如图 3 所示。该畸变是由目镜畸变与 HMD 图像源的电子学畸变共同作用的结果。人眼对畸变的感知情况通常利用电视畸变来描述。以垂直方向的电视畸变为例,其定义如式(3)所示:

$$D_{tv} = \frac{\Delta H}{H} \times 100\% \quad (3)$$

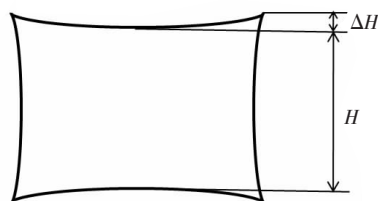


图 3 头盔显示器图像畸变示意图

Fig. 3 Schematic of HMD distortion

与视场角的测试方法类似,利用 HMD 显示屏生成均匀图形或网格图形,测试系统对显示屏成像,根据其变形程度,通过式(3)进行计算得到电视畸变量。

### 2.3 HMD 成像质量测试

利用 HMD 显示屏生成刀口靶图形,经 HMD 测试系统接收成像。对刀口靶图形像进行微分和傅里叶变换可以获得 HMD 和测试系统总体的调制传递函数(MTF)值。由于测试系统和 HMD 系统都是单独进行像差校正设计的,属于独立系统,因此这两部分的 MTF 与总体 MTF 之间满足<sup>[11]</sup>:

$$MTF_T = MTF_{M,geom} \cdot MTF_H \quad (4)$$

其中  $MTF_T$  为测试中得到的 HMD 和检测系统的总体 MTF 值,  $MTF_H$  为 HMD 的 MTF 值,  $MTF_{M,geom}$  为检测系统的几何 MTF 值,可通过检测系统的传递函数( $MTF_M$ )及其衍射极限相除获得。由式(4)可得 HMD 系统的 MTF 值:

$$MTF_H = \frac{MTF_T}{MTF_{M,geom}} \quad (5)$$

## 3 光学系统设计及性能分析

根据以上检测原理,可以对系统做出合理的指标要求。头盔显示器检测系统直接对 HMD 的全视场成像,视场指标不宜太小。由于光学系统入瞳在镜头之前,镜头的对称性很差,垂轴像差特别是畸变不易校正,因此在指标选择上需要做出视场角、入瞳直径、入瞳距之间的平衡。为了降低轴外主光线在镜片的入射高度、减小轴外像差,测试系统的入瞳应选择尽量靠近第一块镜片的位置,即减小入瞳距离。根据以上原则,确定 HMD 检测光学系统指标如表 1 所示。系统的探测器选用  $2/3''$  的 CCD,分辨率为  $2\,580 \times 1\,944$ ,像元大小  $3.4\ \mu\text{m} \times 3.4\ \mu\text{m}$ ,对应的截止频率为  $147\ \text{lp/mm}$ 。

表 1 HMD 检测系统技术指标

Table 1 Specifications of HMD testing system

参数	指标
工作波段	486~656 nm
入瞳距离	2 mm
入瞳直径	4 mm
视场角	$50^\circ$
焦距	11.8 mm
畸变	$<0.5\%$

有些 HMD 目镜具有屈光度调节功能,调焦范围一般在  $-4\ \text{D} \sim +3\ \text{D}$ <sup>[12]</sup>,以适应大部分人眼的需要。即使是非调焦的 HMD 目镜,屈光度通常也不为 0,而是在  $-0.5\ \text{D} \sim -1\ \text{D}$  之间。当 HMD 目镜的屈光度偏离 0 时,目镜输出的光线并不是平行光束,所以 HMD 检测镜头应具备调焦功能,以根据目镜的不同屈光度状态做出相应的调焦处理。

根据测试系统的入瞳在镜头之前的特点,可以选取目镜结构实现系统的设计。作为检测系统,其主要设计目标是实现较高的成像质量,同时希望畸变得到有效的控制。我们采用消畸变目镜作为镜头的初始结构形式,在镜头前加入一片弯月透镜,并使其弯向光阑,以降低主光线的偏角,调整透镜弯曲的程度以调整球差和彗差。在镜头后加入一片树脂材料(PMMA)的透镜,后表面使用非球面,用于校正系统畸变<sup>[13]</sup>。非球面透镜选用树脂材料是由于其具有良好的加工特性,可以通过金刚石车削或注塑的方式加工,对非球面面型几乎没有限制。

利用光学设计软件对镜头结构进行优化后得到的系统光路图如图 4 所示。得到的 PMMA 透镜非球面面型方程为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Br^6 \quad (6)$$

其中  $c=0.049$ ,  $k=5.67$ ,  $B=-4.64 \times 10^{-6}$ 。

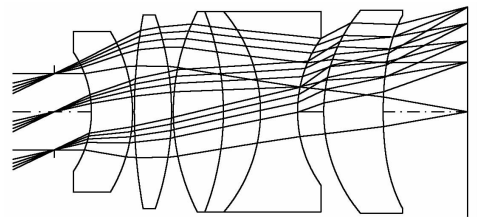


图 4 凝视型 HMD 测试系统光路图

Fig. 4 Layout of staring HMD testing system

图 5 给出了测试镜头在对无穷远成像时的畸变曲线。可以看出,由于非球面引入了高级畸变,与三级畸变互相补偿,起到了很好的消畸变效果。整个视场范围内镜头的畸变值  $< \pm 0.1\%$ ,在计算 HMD 视场角和电视畸变时可直接根据图像数据进行计算,不需要对式(2)和式(3)进行修正。

典型的头盔显示器分辨率都在  $25\ \text{pixels}/(^\circ)$  以下且以  $10 \sim 20\ \text{pixels}/(^\circ)$  居多。 $25\ \text{pixels}/(^\circ)$

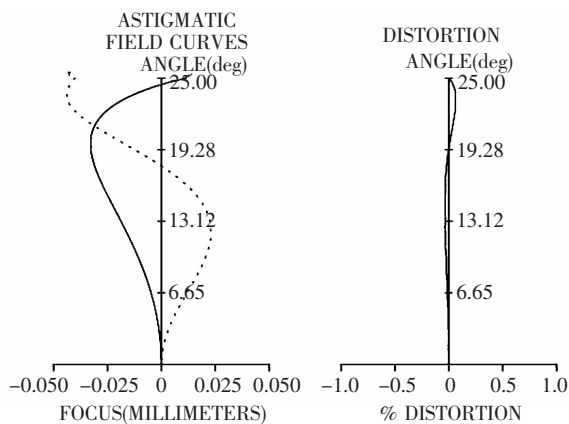


图 5 HMD 测试镜头场曲和畸变曲线

Fig. 5 Field curve and distortion of HMD testing lens

对应的空间频率为 0.72 lp/mrad。经过检测系统成像后,该频率对应 HMD 测试系统像面的空间频率为 61 lp/mm。图 6 给出了对无穷远成像时 HMD 检测光学系统的 MTF 曲线。在 60 lp/mm 处,镜头的轴上 MTF 值仍能达到衍射极限,轴外 MTF 也高于 0.5,能够保证测试的要求。

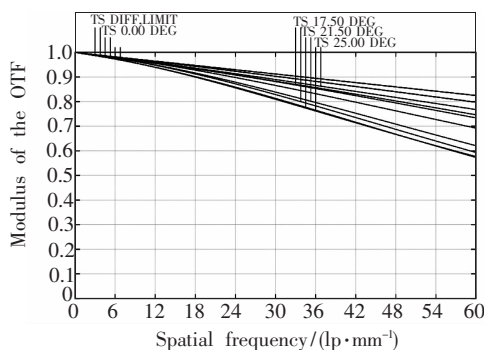


图 6 HMD 测试镜头 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves of HMD testing lens

图 7 中给出了对不同屈光度的 HMD 进行测试时,HMD 检测镜头所需的调焦量。其中正值表示镜头远离探测器方向,负值表示镜头靠近探测器方向。图 8 给出了检测镜头在不同调焦状态下的成像质量,包括轴上视场的 MTF 值,0.7 视场(17.5°)和轴外最大视场(25°)在子午和弧矢方向的平均 MTF 值,考察频率分别为 30 lp/mm 和

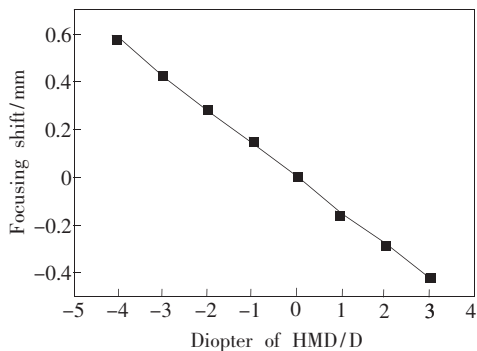


图 7 不同目镜屈光度下测试镜头的调焦量

Fig. 7 Focusing range of testing lens for different HMD eyepiece diopter

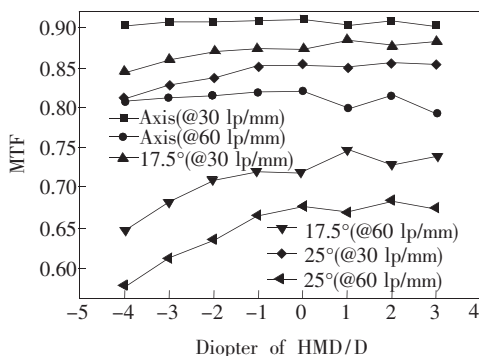


图 8 不同目镜屈光度下各视场的 MTF 值

Fig. 8 MTF values for different eyepiece diopter

60 lp/mm。从图中数据可以看出,检测系统在测试不同屈光度的 HMD 时,轴上视场的 MTF 能够保持在 0.8 以上,轴外视场的 MTF 值始终保持在 0.5 以上。检测镜头受 HMD 屈光度影响很小,能够用于各种 HMD 的检测。

## 4 结 论

为了对头盔显示器目视系统做出客观、准确的检测,提出了简单可行的 HMD 检测方法,并设计了测试所需的光学系统。头盔显示器检测系统的视场角为 50°,入瞳大小为 4 mm,可用于中小视场 HMD 的快速检测。对光学系统在调焦状态下的性能进行了分析,结果表明,该检测系统适用于 -4 D~3 D 屈光度下的 HMD 目镜测试。

## 参 考 文 献:

[1] 张晓兵,安新伟,刘璐,等. 头盔显示器的发展与应用 [J]. 电子器件,2000,23(1):51-59.

[2] 张慧娟,王肇圻,张春书,等. 广角 70°视场折/衍混杂目镜设计 [J]. 光电子·激光,2002,13(9):913-919.

- [ 3 ] Hiroaki H, Naosato T, Hideki M, *et al.* Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry [J]. *SPIE*, 1996,2653:234-242.
- [ 4 ] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, *et al.* Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [ 5 ] 孙强,柳荣,朴仁官,等. 塑料非球面透镜在头盔 3D 显示中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2005,13(1):47-52.
- [ 6 ] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review [J]. *J. Display Technol*, 2006, 2(3):199-216.
- [ 7 ] 杨志文. 光学测量 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1995: 305-325.
- [ 8 ] Steven H C. Automated techniques for characterizing and testing helmet mounted display [J]. *SPIE*, 2002,4711: 81-92.
- [ 9 ] Howard H, Thomas H, John S, *et al.* Laboratory system for the evaluation of helmet-mounted displays [J]. *SPIE*, 2004,5442: 204-212.
- [10] Williams T L, Wood T A, Bates N P, *et al.* A comprehensive test facility for helmet mounted displays [J]. *SPIE*, 1998,3362: 174-182.
- [11] Glenn D B. *Modulation transfer function in optical and electro-optical systems* [M]. Washington: SPIE Press, 2001: 85-88.
- [12] Bruce H W. *Optical Design for Visual Systems* [M]. Washington: SPIE Press, 2000: 60-62.
- [13] 郝沛明. 非球面目镜 [J]. *光学学报*,1997,17(10): 1389-1393.

## 国际单位制 (SI)

在科技期刊和科技论文中,要求物理量和单位使用国际单位制(SI)和法定计量单位。国际单位制的构成是:

$$\text{国际单位制(SI)} \begin{cases} \text{SI 基本单位} \\ \text{SI 单位} \begin{cases} \text{SI 导出单位} \begin{cases} \text{包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位} \\ \text{组合形式 SI 导出单位} \end{cases} \\ \text{SI 单位的倍数单位} \end{cases} \end{cases}$$

## 公差表示法

1. 参量与其公差单位相同时,单位可以只写 1 次。例如:“12.5 mm±0.2 mm”可写为“(12.5±0.2)mm”,但不得写作“12.5±0.2 mm”。公差用百分数表示时,例如:“λ=550 nm±2 %”这种表示是错误的,应为“λ=550×(1±0.02)nm”。

2. 参量的上、下公差相等但单位相同时,公差分别写在参量的右上、右下角,且单位只写一次,例如:10<sup>+0.1</sup><sub>-0.2</sub>g;当参量与公差单位不同时要分别写出,例:30 cm<sup>+5</sup><sub>-3</sub> mm。

3. 参量上、下公差的有效数字应全部写出。例如:18<sup>+0.200</sup><sub>-0.255</sub> mg。

4. 参量的上或下公差为“0”时,“0”前面的符号应省略。例如:273<sub>0</sub><sup>+1</sup> K。

5. 表示 2 个绝对值相等、公差相同的量值范围时,范围号不能省略。例如:(-7.0±0.5)~(7.0±0.5)℃。

6. 表示带百分数公差的中心值时,百分号只需写 1 次,且“%”前的中心值与公差应用括号括起来。例如:(65±0.5)%。