文章编号 1674-2915(2012)05-0505-07

用于检测设备标定的标准头盔瞄准具设计

李 灿[1,2],孙 强[1*],宋淑梅[1],李 淳[1],王 鹤[1]
(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 130049)

摘要:为标定和校准头盔瞄准具检测设备,提出一种新的光学结构,并设计了一款标准头盔显示系统(HMD)。该系统采用球面共轴设计,在有限体积的限制下满足了低畸变、高清晰的光学指标要求。利用对称性光学设计原则分步设计,设计的标准HMD系统出瞳清晰,可保证系统各种光学像差的综合校正。针对1.27 cm(1/2 in)微显示器设计了视场为30°、出瞳距离为75 mm的标准HMD光学系统,各视场在分辨率30 lp/mm处的MTF值均大于0.3,系统畸变小于0.9%。设计的标准HMD光学系统形式简单、结构紧凑,光学性能优良,可作为头盔瞄准具检测设备标准件。

关 键 词:头盔瞄准具;接目物镜;光学设计
中图分类号:TH703;TN873 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20120505.0505

Design of standard head-mounted display for test system calibration

LI Can[1,2], SUN Qiang[1*], SONG Shu-mei[1], LI Chun[1], WANG He[1]

(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* 130049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: sunq@ciomp.an.cn*

Abstract: To calibrate the test instrument of a Head-Mounted Display(HMD), a standard HMD optical system with a simple configuration and ascendant optical performance is proposed. In the limited space avoilable, the optical system is designed with only a spherical surface and an on-axial scheme to meet the requirements of low distortion and high resolution. By the symmetry principle of optical design, most aberrations of the standard HMD system can be corrected synthetically. The standard HMD system is used twice so that the system has a sharp exit pupil. The standard HMD system has a designed for a 0.5 inch Cathode Ray Tube(CRT) with a field of view 30° and an exit pupil distance of 75 mm. The MTF at 30 lp/mm resolution across the entire field of view is more than 0.3, and the maximum distortion is less than 0.9%. The designed standard HMD has a

收稿日期:2012-06-17;**修订日期**:2012-08-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60977001);吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项资金项目(No. 2011CJT0004)

simple layout and compact structure, and the obtained results confirm the feasibility of the new system.

Key words: head-mounted display; ophthalmic lens; optical design

1 引 言

头盔显示系统(HMD)是近几十年逐渐发展形成的一种新型瞄准具,已经投入了战场使用,如美国的F16战斗机、阿帕奇直升机等都装备了HMD[1]。随着HMD的不断发展,其检测方面的研究也是如火如荼,目前国内外多家科研单位和公司研发了相应的检测设备,包括英国Sira Electro-Optics公司、美军航空医学研究所、中国空军工程大学以及中科院长春光机所[2-3]。

该检测设备的主要功能包括HMD的出瞳距、出瞳直径、调制传递函数(MTF)、对比度、视场、亮度均匀性等多个光学指标测试。作为光学检测设备,其标定和校准至关重要,因此一个结构简单、性能优良的标准件是必不可少的。标准HMD系统要求具有清晰的出瞳,以便光瞳衔接完成其他光学性能的测试;系统要求低畸变、高清晰成像,以便MTF、视场等光学参数的测试。另外,考虑到头盔空间的制约,标准件要求形式简单、结构紧凑。现有的"穿透型"(See-through)光学结构,构造复杂,造价昂贵,系统的离轴和非球面无法避免;"直视型"(Direct-view)光学结构,形式虽简单,但不能满足出瞳清晰、低畸变等要求。

本文根据HMD检测设备标定和校准的特殊使用需要,针对1.27 cm(1/2 in)的微显示器设计了一款视场为30°、出瞳距离为75 mm的标准HMD光学系统,该系统仅采用球面共轴系统,形式简单,结构紧凑。

2 设计方案

根据HMD检测设备标定和校准的实际需要,标准HMD系统不仅要求光学性能高于传统HMD,而且需要更多地考虑到探测空间以及体积的限制。本文首先比较分析了头盔显示器的结构,然后结合上述需要确定了最终标准HMD的结构。

传统的"直视型"HMD为目镜光学结构,人眼瞳孔作为实际孔径光阑,所以自身不能提供清晰的出瞳。"穿透型"HMD光学结构多种多样,参与成像的护目镜多会引入离轴像差,系统需要相应的离轴倾斜和特殊面型来校正[4-10]。因此,本文提出一种共轴的光学系统,形式简单、结构紧凑,如图1所示。系统具有良好的对称性,有利于系统校正光学像差,特别是彗差、畸变等垂轴像差。该系统具有较大的出瞳距离,可以满足检测系统探测范围的要求。

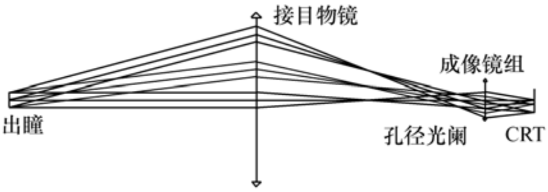


图1 共轴光学系统

Fig. 1 Coaxial optical system

3 设计指标要求

在HMD检测设备标定和校准的过程中,光瞳衔接是各项测试的前提要求,因此出瞳测试至关重要。由图2的几何关系,得到出瞳测试探测位置Z和光斑直径D的关系式(1),显然视场ω

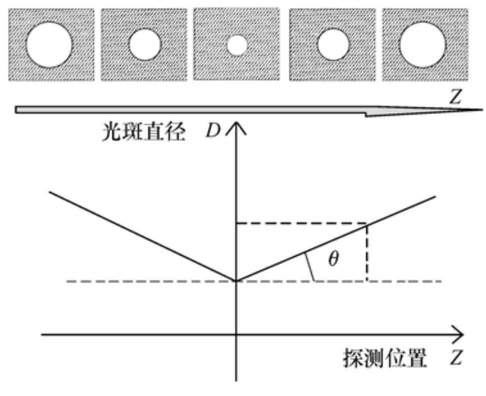


图2 出瞳测试原理

Fig. 2 Principle of exit pupil test system

越大出瞳距测试越精确。要求出瞳距测试精度 $\delta Z = 0.05$ mm，直径测试精度 $\delta D = 15$ μm，由式(2)可得圆形视场 $\omega > 17°$，因此要求对角线视场 $> 27°$[11]。

$$D = D_0 + 2 \times Z \times \tan(\omega/2)\ , \tag{1}$$

$$\delta D = 2 \times \tan(\omega/2) \times \delta Z\ . \tag{2}$$

表 1 给出设计的具体参量和成像特性要求。

表 1　光学系统设计参数

Tab. 1　Parameters of optical system

参数	目标值
微显示器	0.5″(12.7 mm) diagonally
分辨率/pixel	800×600
出瞳距离/mm	75
出瞳直径/mm	5
视场角/(°)	30
畸变	<1%
MTF	>0.35@30 lp/mm

4　光学系统设计

根据 HMD 检测设备出瞳测试的要求，标准 HMD 系统必须具有清晰的出瞳以完成与检测设备的光瞳衔接。因此，该光学系统分两步设计，即单独设计接目物镜子系统，在此基础上完成总体结构的设计。

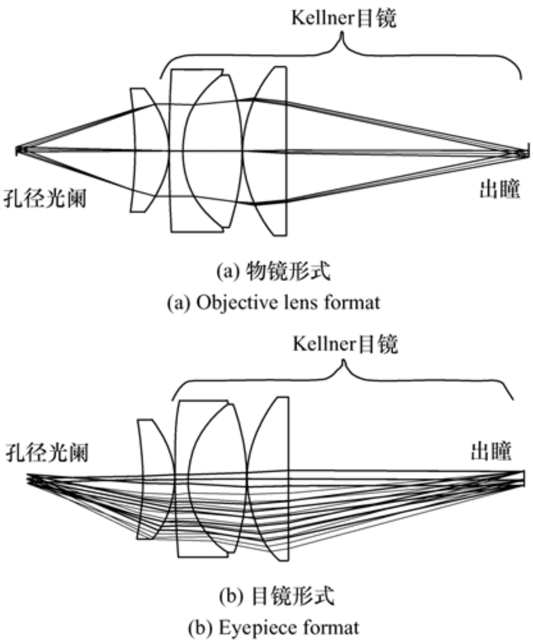
4.1　接目物镜设计

接目物镜设计以标准 HMD 系统的孔径光阑为物方，出瞳为像方，其中像方视场为 5 mm，像距为 75 mm。综合考虑系统的小型化和设计难度，垂轴放大率取 1.5，则物距约为 50 mm，物方视场约为 3.3 mm，$F/\#$在 3.1 左右[11]。

考虑到标准 HMD 系统大出瞳距的要求，接目物镜设计选择经典的 Kellner 目镜作为初始架构[12]。Kellner 目镜单-双结构朝向像方，即标准 HMD 系统的出瞳位置。为保证系统的对称性和光焦度分配，物方添加一个结构相同但光焦度稍大的单透镜最终获得需要的接目物镜。图 3(a)和(b)分别给出了标准 HMD 系统前组的物镜和目镜形式。

4.2　总体系统设计

接目物镜的设计保证了标准 HMD 系统孔径光阑与出瞳完善的共轭关系，在此基础上搭建总体结构。依据光学设计的对称性原则，系统后组依然选择单-双-单的光学结构。当然，该系统对无穷远成像，优化过程中后组又需要引入失对称



(a) 物镜形式
(a) Objective lens format

(b) 目镜形式
(b) Eyepiece format

图 3　接目物镜系统

Fig. 3　Optical system of ophthalmic lens

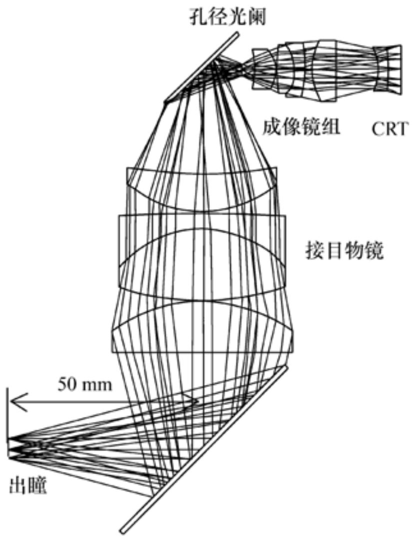


图 4　标准 HMD 光学系统

Fig. 4　Optical system of standard HMD

满足像差的校正和光焦度分配。系统像面前采用一负场镜校正系统大出瞳距离引起的场曲等

像差。

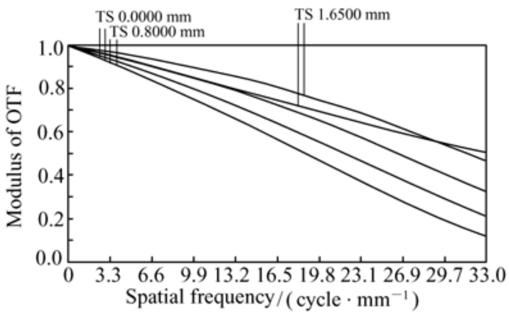
根据 HMD 检测设备的要求,标准件需要安装到头盔内部,本设计采用两个反射镜折叠光路以满足体积要求。标准 HMD 系统的最终结构如图4所示,出瞳探测范围为 50 mm,系统体积≤120 mm×120 mm×50 mm。

5　系统设计及实测结果

5.1　接目物镜

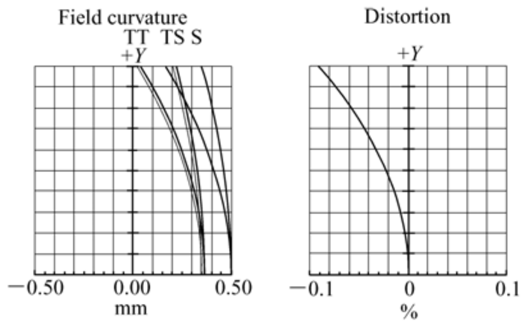
要求检测设备出瞳直径测试精度 δD = 15 μm,即标准 HMD 接目物镜的像方分辨率为 33 lp/mm。设备测试过程中,出瞳边缘的清晰度较中心更为重要,因此,接目物镜的设计相应地更加侧重边缘视场的成像质量。当然,接目物镜的畸变也影响着标准 HMD 的出瞳直径。

图5(a)给出了接目物镜的 MTF 曲线,分辨率为 33 lp/mm 处边缘视场的调制度在 0.45 以



(a) MTF曲线图

(a) Curves of MTF



(b) 场曲和畸变曲线图

(b) Curves of field curvature and distortion

图5　接目物镜成像像质评价

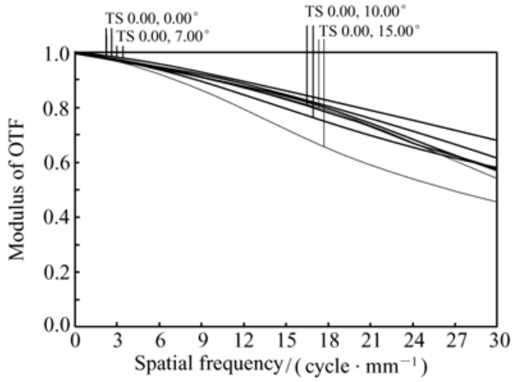
Fig. 5　Image quality evaluation of ophthalmic lens

上,零视场也大于0.1。图5(b)给出场曲和畸变曲线,各视场的畸变均在 0.1% 以内,场曲不到 0.5 mm,可以忽略其对出瞳直径的影响。

5.2　总体系统

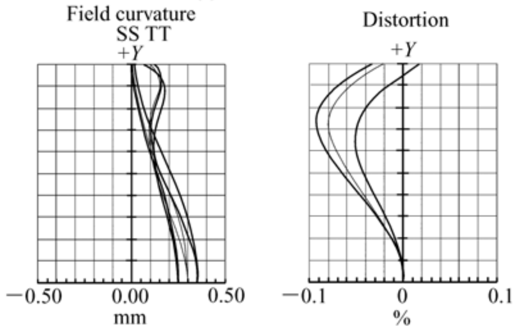
MTF 是目前公认的评价光学系统最为全面合理的一个指标,作为 HMD 检测设备的标准件,该标准 HMD 系统的 MTF 是重中之重。除此之外,标准 HMD 系统的场曲和畸变值也直接影响着 HMD 检测设备标定和校准的可靠性。

图6(a)给出了总体系统的MTF曲线,在分



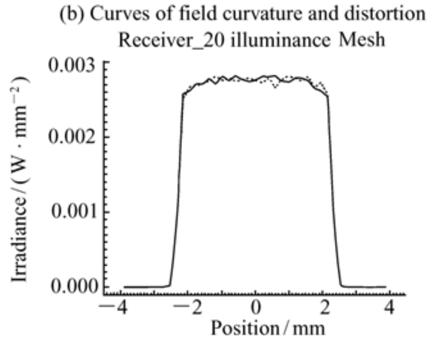
(a) MTF曲线图

(a) Curves of MTF



(b) 场曲和畸变曲线图

(b) Curves of field curvature and distortion



(c) 出瞳处照度分布

(c) Illumination distribution at exit pupil

图6　标准 HMD 系统最终的光学评价

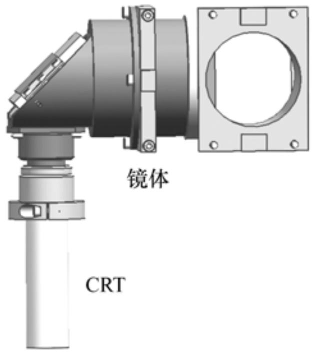
Fig. 6　Final evaluation of standard HMD optical system

辨率为30 lp/mm 处各个视场调制度相差不大,均在 0.45 以上。图6(b)给出场曲和畸变曲线,畸变在0.9%以内,系统的场曲为 0.36 mm,根据牛顿公式计算出对应的屈光度为 0.62 m^{-1},这些都

是传统头盔系统很难达到的[13]。除此之外,图 6(c)为 LightTools 光学软件对该标准 HMD 系统出瞳的仿真结果,可以看到光斑边缘清晰、锐利。

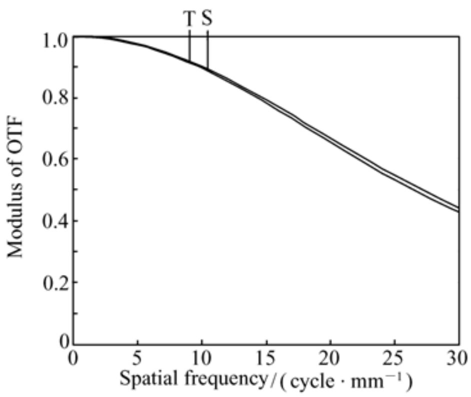
5.3　实验结果

图 7(a)为最终设计的标准 HMD 系统,在光学实验室条件下进行了出瞳探测范围以及 MTF 曲线的实际测试和测量。图 7(b)为系统实测的出瞳光斑,大小为 4.925 mm,位置为 50.15 mm。图 7(c)和(d)分别给出了系统实测的零视场和边缘视场的 MTF 曲线,其值均在 0.3 以上,相对于纸面设计值有所下降,归因于整个系统光学机械元件的加工、装配和校准误差。

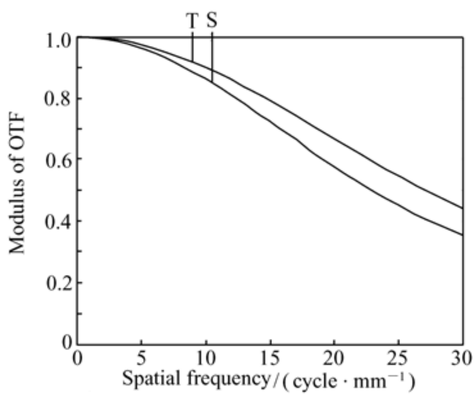


(a) 标准HMD系统最终结构
(a) Final scheme of standard HMD system

(b) 系统实测出瞳光斑图
(b) Test spot diagram of system exit pupil



(c) 系统实时中心视场 MTF 曲线
(c) Test MTF curvature at the center field of view



(d) 系统实测边缘视场 MTF 曲线
(d) Test MTF curvature at the edge field of view

图 7　标准 HMD 系统最终的实测结果

Fig. 7　Final test results of standard HMD optical system

6　结　论

根据 HMD 检测设备标定和校准的特殊使用需要,本文采用一种新的光学结构,设计了一款视场为 30°、出瞳距离为 75 mm 的标准 HMD 光学系统。该设计仅采用球面共轴系统,在有限体积的限制下,达到了低畸变、高清晰的光学指标要求。该系统利用对称性光学设计原则分步设计,既达到了标准 HMD 出瞳清晰的要求,又保证了各种光学像差的综合校正。最终通过专门的光学检测设备实验测量,验证了该系统作为 HMD 检测设备标准件的可行性。

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.
ZHANG X B,AN X W,LIU L,*et al.*. Development and application of helmet-mounted displays[J]. . *Electron Devices*, 2000,23(1):51-59.(in Chinese)

[2] 陈涛,袁东,吴衡.头盔显示器/瞄准系统仿真技术研究[J].系统仿真学报,2008,20(8):201-2017.
CHEN T,YUAN D,WU H. Helmet mounted display/targeting system simulation research[J]. *J. System Simulation*, 2008,20(8):201-2017.(in Chinese)

[3] 何景峰,周志刚,赖根,等.某型头盔瞄准具检测系统研究[J].空军工程大学学报,2001,2(6):19-22.
HE J F,ZHOU Z G,LAI G,*et al.*. The helmet mounted sight testing system research[J]. *J. Air Force Eng. University*, 2001,2(6):19-22.(in Chinese)

[4] OZAN C,JANNICK R. Head-worn displays:a review[J]. *J. Display Technol.*,2006,2(3):199-216.

[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.
SUN Q,LIU R,PIAO R G,*et al.*. Application of plastic aspherical elements in Head Mounted 3D display[J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13(1):47-52.(in Chinese)

[6] MISSIG M,MORRIS G. Diffractive optics applied to eyepiece design[J]. *Appl. Optics*,1995,34(14):2452-2461.

[7] FERGASON J. Optical system for a head mounted display using a retro-reflector and method of displaying an image:US, 5621572[P].1997-08-15.

[8] HIROAKI H,NAOSATO T,HIDEKI M,*et al.*. Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry[J]. *SPIE*,1996,3653:234-242.

[9] 杨新军,王肇圻,孙强,等.穿透型折/衍混合头盔显示器的光学系统[J].光电子·激光,2004,15(11):1301-1304.
YANG X J,WANG Z Q,SUN Q,*et al.*. Hybrid diffractve/refractive optical system of see-through head mounted display [J]. *J. Optoelectronics·Laser*,2004,15(11):1301-1304.(in Chinese)

[10] 程德文,王涌天,常军,等.轻型大视场自由曲面棱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 Eng.*,2007,36(3):309-311(in Chinese).

[11] 张以谟.应用光学[M].北京:电子工业出版社,2008.
ZHANG Y M. *Applied Optics*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2008.(in Chinese)

[12] 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.
ZHANG H J,WANG ZH Q,ZHANG CH SH,*et al.*. Design of refractive-diffractive eyepieces with 70° wide-angle field of view[J]. *J. Optoelectronics·Laser*,2002,13(9):913-919(in Chinese).

[13] 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 ultralight and compact hybrid refractive diffractive projection lens of head - mounted projective displays[J]. *Acta Optica Sinica*,2006,26(2):249-253.(in Chinese)

作者简介:李　灿(1985—),男,山东济宁人,博士研究生,主要从事光学系统设计等方面的研究。
E-mail:LC19851125@163.com

孙　强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。E-mail:sunq@ciomp.an.cn

宋淑梅(1963—),女,吉林人,研究员,硕士生导师,主要从事大口径非球面加工与检测技术方面的研究。
E-mail:smsong@ciomp.cn

李　淳(1982—),男,山东烟台人,硕士,助理研究员,主要从事光学设计、图像处理等方面的研究。
E-mail:xlfd-0830@163.com

王　鹤(1983—),男,吉林永吉人,硕士,研究实习员,主要从事网络控制技术,智能检测技术,嵌入式应用技术等方面的研究。E-mail:wanghe546@ yahoo. com. cn