

文章编号: 0253-2239(2008)01-0159-04

# 眼模型下的投影式头盔物镜设计及视空间评价

范海英<sup>1</sup> 王肇圻<sup>1</sup> 赵顺龙<sup>2</sup> 吴环宝<sup>1</sup> 张 梅<sup>1</sup> 范长江<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南开大学现代光学研究所, 天津 300071  
<sup>2</sup>华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003)

**摘要** 进一步完善了投影式头盔系统的视空间评价方法,应用接近实际情况的眼模型来模拟人眼对头盔物镜系统进行评价。由视空间的评价结果出发,从眼模型的成像效果反过来进一步指导头盔系统的设计工作。设计结果显示,轴上视场和大视场的调制传递函数特性良好,在轴上视场可以达到 1' 的人眼最小分辨角,在大视场可以达到微显示器单个像素确定的视锐度,表明此系统在视空间的分辨力满足实际需要。系统最大畸变小于 5%,色差不会对人眼分辨产生影响。

**关键词** 光学设计; 投影式头盔显示器; 视空间评价; 眼模型

**中图分类号** O439; TH74 **文献标识码** A

## Design of Projection Lens for Head-Mounted Displays under Eye Model and the Optical Assessment in Visual Space

Fan Haiying<sup>1</sup> Wang Zhaoqi<sup>1</sup> Zhao Shunlong<sup>2</sup> Wu Huanbao<sup>1</sup> Zhang Mei<sup>1</sup> Fan Changjiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*  
<sup>2</sup>*Department of Applied Physics, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China*)

**Abstract** The optical assessment of head-mounted projection displays in visual space was further consummated. An eye model which was closer to the actual situation was used to simulate the human eye in order to give a detailed assessment of the projection lens. A further guidance on the design of projection lens from the imaging results of eye model was also carried on. The results showed modulation transfer function both on the zero and full field of view was good; on zero field of view, the minimum angular resolution of human eye was 1', and on full field of view, the acuity determined by single-pixel of micro-display was achieved, so the system could completely satisfy the usability in head-mounted projective displays. Maximal distortion was less than 5%, and lateral color was unable to affect the angular resolution of human eye.

**Key words** optical design; head-mounted projective displays; optical assessment in visual space; eye model

## 1 引 言

投影式头盔显示系统具有在增强现实环境下给出真实物体和虚拟物体的正确“闭塞”、把虚拟的信息限制在特定空间和多用户环境下互不干扰的能力等,在军事、工业生产、医疗可视化培训、计算机娱乐、立体显示、模拟训练等领域展示出巨大应用价值<sup>[1,2]</sup>。该系统不但要求结构轻便紧凑、佩戴便利舒适,而且要求成像质量高。头盔显示系统的可视

性能和人因素的影响研究,对系统的设计有重要的指导作用。通常设计是从虚像到微显示器进行光线追迹,对设计结果的性能评价也是在微显示器空间(物空间)进行的,虽然可以通过理想系统的公式来估算视空间的像差,但这并不是实际光线追迹的结果,误差较大。在视空间用光线追迹的方法对头盔系统进行性能评价,一方面有助于在光学设计者和感知专家之间建立沟通的桥梁,使在头盔系统制作

收稿日期: 2007-03-09; 收到修改稿日期: 2007-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(60577015)资助课题。

作者简介: 范海英(1981—),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事光学设计和信息光学处理等方面的研究。

E-mail: fanhy@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 王肇圻(1944—),男,山东人,研究员,博士生导师,主要从事光学设计和信息光学处理等方面的研究。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

之前就能较精确地知道其性能;另一方面,评价结果反过来也可以进一步指导头盔系统的设计工作,使设计更注重“人的感受”。

Yonggang Ha 等<sup>[3]</sup>用理想透镜模拟人眼来进行视空间评价。赵顺龙等<sup>[1]</sup>对其评价方法进行了改进,但还是基于理想透镜的模型。人眼是由角膜、晶状体、玻璃体和视网膜等组成的光学系统,每一部分对系统成像均有贡献,用理想透镜来简单模拟人眼,与人眼的实际情况有很大的不相符,造成评价结果出现较大的误差。本文进一步完善了视空间的评价方法,引入更加接近实际情况的眼模型,采用 Hwey-Lan Liou 等<sup>[4]</sup>提出的眼模型来模拟人眼,使视空间的评价结果更加合理。并且应用视空间的评价结果,从眼模型的成像效果上反过来进一步指导头盔系统的设计工作,使头盔显示器更好地满足要求。

## 2 人眼光学模型

人眼的光学成像系统包括角膜、前房、晶状体、玻璃体以及视网膜,其中角膜和晶状体是提供光焦度的主要部分,外界光束相继通过角膜、房水液、晶状体和玻璃液,成像于视网膜上<sup>[5]</sup>。最早的眼模型是近轴眼模型<sup>[6]</sup>,包括三个球折射面。最为广泛应用的眼光学模型是示意眼<sup>[6,7]</sup>,它用六个球折射面来表示人眼的光学系统,并将晶状体分成折射率分别为 1.386, 1.406 和 1.386 的三部分,进而改进为四个球折射面,被广泛用于计算人眼近轴光学成像的特性。该模型在用于轴外光学成像特性的计算时,结果同实验值出现较大的偏差。为使理论计算的结果能更好地同实验值相符合,在眼模型先后引入了非球面<sup>[8~10]</sup>和晶状体的梯度折射率。

到目前为止, Hwey-Lan Liou 等<sup>[4]</sup>提出的眼模型是比较接近实际的一种综合眼模型。该眼模型既含有晶状体的梯度折射率,也含有非球面。眼模型中引入的非球面均是二次曲面,轴对称的二次圆锥曲面可表示为

$$x^2 + y^2 + (1 + \alpha)z^2 - 2Rz = 0, \quad (1)$$

式中  $z$  为对称轴方向的距离,  $\alpha = -e^2$  为二次非球面的系数,  $e$  为偏心率,  $R$  为非球面在顶点处的曲率半径。在考虑晶状体的梯度折射率时,引入一个虚构的平面将晶状体分成前后两部分。晶状体的梯度折射率可表示为<sup>[4]</sup>

$$n(\omega, z) = n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + n_{10}\omega^2, \quad (2)$$

式中  $\omega$  为距光轴的垂直距离,  $\omega = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $n_{00}$ 、 $n_{01}$ 、 $n_{02}$  和  $n_{10}$  均为梯度折射率的折射率系数,而此梯度

折射率按抛物线形状分布。在晶状体的前半部分中,  $n_{00} = 1.368$ ,  $n_{01} = 0.049057$ ,  $n_{02} = -0.015427$ ,  $n_{10} = -0.001978$ ; 在 Grad P 中,  $n_{00} = 1.407$ ,  $n_{01} = 0.000000$ ,  $n_{02} = -0.006605$ ,  $n_{10} = -0.001978$ 。由以上数据构造出的眼模型结构示意图如图 1 所示。

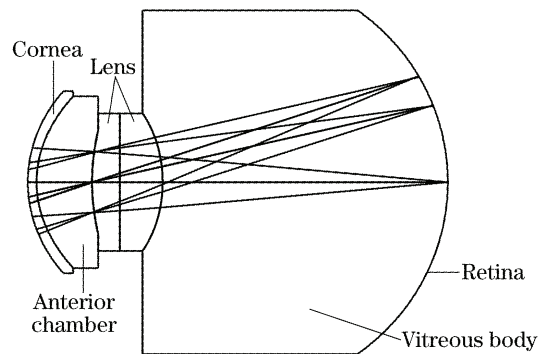


图 1 眼模型示意图

Fig. 1 Sketch map of eye model

## 3 原始系统结构及评价结果

图 2 是加入眼模型后的投影式头盔显示系统,由于比例关系,未画出返射型屏幕。其中物镜系统是文献<sup>[11]</sup>设计的系统,设计时没有引入眼模型。原系统中微显示器为对角 27.94 mm (1.1 in) 彩色液晶显示器(LCD),满足 SXGA 模式的显示要求,视场为 45°,工作波长为可见光波段。当用眼模型进行视空间评价时,投影物镜的出瞳与眼模型的入瞳应匹配,即将调焦后的眼模型放置在物镜系统的出瞳位置<sup>[12]</sup>。由于微显示器为 4:3 显示模式,因此水平方向最大为 0.80 视场(即 18.3°),本文给出人眼注视中心视场时在水平方向的视空间评价结果。本文从调制传递函数 (Modulation transfer function, MTF)、场曲和畸变以及色差来进行视空间评价,评价时设定眼模型的瞳孔直径为 4 mm,在像面(视网膜)上的成像性质如图 3 所示。

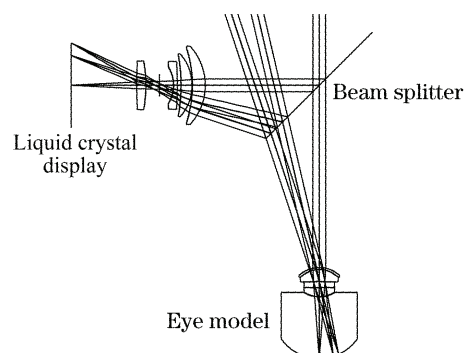


图 2 投影式头盔显示器示意图

Fig. 2 Sketch map of head-mounted projective display

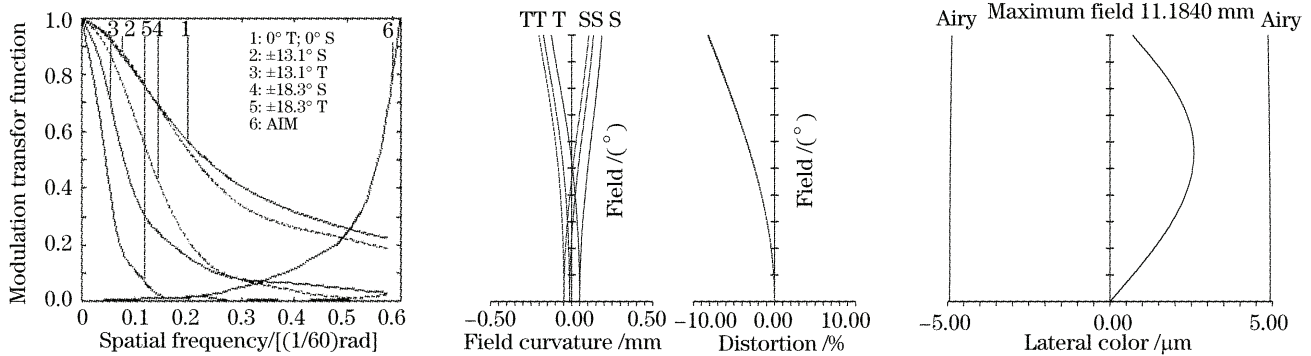


图3 原物镜系统在视网膜上的成像特性曲线。(a)调制传递函数,(b)场曲和畸变曲线,(c)垂轴色差曲线

Fig. 3 Imaging characteristic curve on retina of the original system of object lens. (a) Modulation transfer function, (b) curvature of field and distortion, (c) lateral color

图3(a)是像面上的调制传递函数曲线图,它已将像面上以线对每毫米(lp/mm)为单位转换成以线对每弧分 $[\text{lp}/(^\circ)]$ 为单位。引入视网膜分辨率所要求的空间像调制度(Aerial image modulation, AIM)曲线来作为判断标准<sup>[6]</sup>,只有当某一频率处视空间的调制传递函数高于空间像调制度曲线时,人眼才能分辨。目前只能给出人眼中心视场的空间像调制度曲线,此方法目前还只能对在人眼的中心视场处的分辨力进行判断。由图3(a)可见,中心视场的调制传递函数在 $0.50 \text{ lp}/(^\circ)$ [对应人眼的视角分辨力为 $0.50 \text{ lp}/(^\circ)$ ]处值为0.26,稍微高于空间像调制度曲线的值(0.24),说明该系统在中心视场刚好可以达到 $1'$ 的分辨力。另外, $13.1^\circ$ 和 $18.3^\circ$ 视场的调制传递函数(图中对应的正负视场曲线重合)在微显示器单个像素确定的视锐度 $[0.33 \text{ lp}/(^\circ)]$ 处分别为0.07、0.004,说明眼模型不能分辨单个像素。由此可见,轴上视场传递特性基本满足要求,但大视场时很差。图3(b)是场曲和畸变曲线,可以看出,最大场曲为 $0.20D$ ,这对于头盔系统是允许的,而最大畸变为 $8.24\%$ ,对于 $36.6^\circ$ 视场的目视系统是较大的。图3(c)是垂轴色差曲线,可以看出,最大垂轴色差为 $2.58 \mu\text{m}$ ,小于人眼的最小分辨距离 $4 \mu\text{m}$ ,不会对成像清晰度造成影响。

#### 4 眼模型指导下的物镜系统设计及视空间评价

针对头盔系统在眼模型中的成像特性,从眼模型的成像效果出发,反过来进一步指导物镜系统的设计工作。表1给出了详细的设计参量要求和成像特性要求。

具体的设计步骤如下:

1)将微显示器经过原始物镜系统成的像作为眼模型的物,调节晶状体的曲率使之满足物像关系。

由于晶状体的前表面对人眼调节起主要作用<sup>[7]</sup>,因此调节过程只是优化晶状体前表面曲率半径。

表1 设计参量和成像特性要求

Table 1 Design parameters and imaging characteristic demands

Parameters	Specification
Miniature display	27.94 mm diagonal LCD
Display mode	SXGA
Effective focal length/mm	40
Exit pupil diameter/mm	9
Eye relief/mm	$>25$
Wavelength range	Visible
	$45^\circ$
Maximum distortion	$<5\%$
Curvature of field	$<0.5D$
MTF [at $0.5 \text{ lp}/(^\circ)$ ]	$>0.24$ (on-axis)

2)将调节后的眼模型放置在头盔系统的出瞳位置,优化投影物镜。在优化函数中加入有效焦距、畸变、色差和调制传递函数优化函数,优化时保持眼模型的人瞳与头盔物镜系统的出瞳相匹配,注意控制透镜间距,避免出现不合理的结构。

经过以上的优化设计,最终得到的物镜系统结构如图4(a)所示。微显示器在视网膜上成像,像差特性曲线如图4(b)~图4(d)所示。由图4(b)可见, $0^\circ$ 视场的调制传递函数在 $0.50 \text{ lp}/(^\circ)$ 处的值为0.47,远大于空间像调制度曲线的值0.24,说明该系统 $0^\circ$ 视场能很好地达到 $1'$ 的分辨力。在 $\pm 13.1^\circ$ 和 $\pm 18.3^\circ$ 视场的调制传递函数(图中对应的正负视场曲线重合)在微显示器单个像素确定的空间频率 $[0.33 \text{ lp}/(^\circ)]$ 处分别为0.34和0.20,可见轴上视场和大视场的传递特性均良好,在视空间的分辨力满足使用需要,是场曲和畸变曲线。从图4(c)的场曲和畸变曲线可以看到,像面上的最大场曲为 $0.10D$ ,对于头盔系统来说是很满意的<sup>[7]</sup>。最大畸变为 $4.69\%$ ,满足设计要求。从图4(d)的垂轴色差



曲线可以看出,最大垂轴色差为  $3.44 \mu\text{m}$ ,虽然较优化前垂轴色差有所增大,但是仍然小于人眼的最小

分辨距离,不会对人眼分辨产生影响。

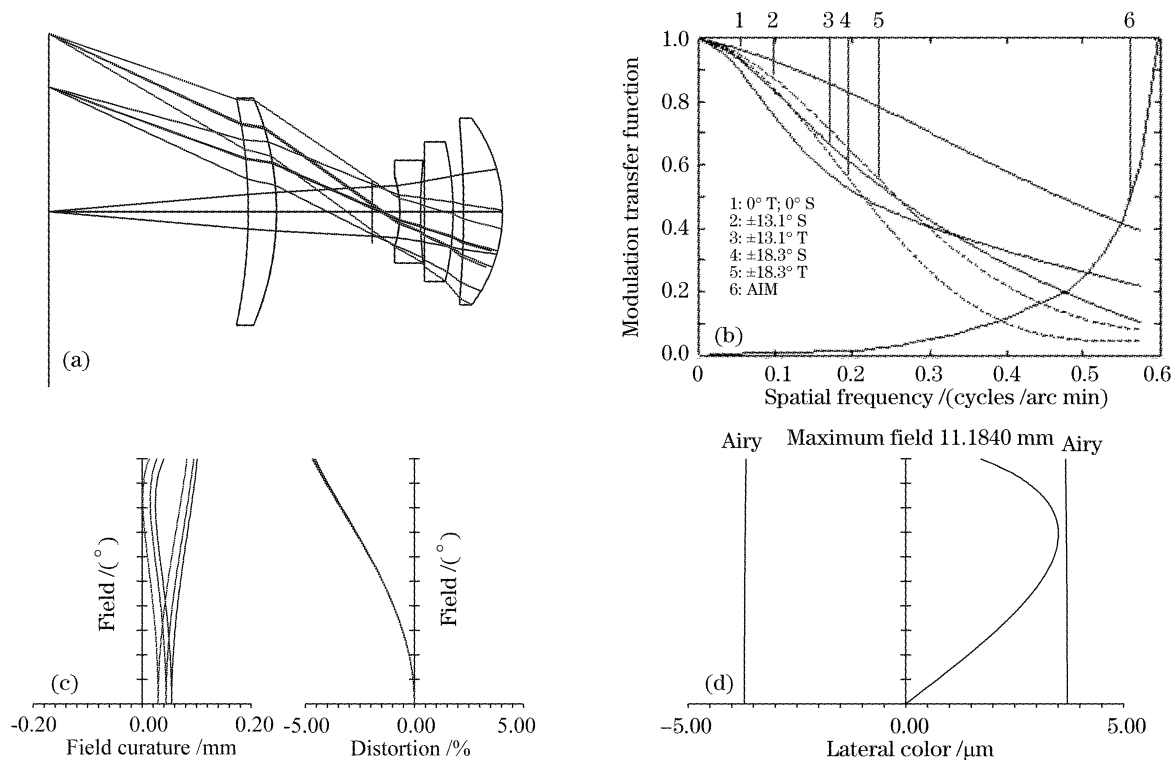


图4 优化后的物镜系统及视网膜上的成像特性曲线。(a)优化后的物镜系统,(b)调制传递函数曲线,(c)场曲和畸变曲线,(d)垂轴色差曲线

Fig. 4 Objective system and its imaging characteristic curve on retina after optimization. (a) Objective system after optimization, (b) modulation transfer function, (c) curvature of field and distortion, (d) lateral color

## 5 结 论

在投影式头盔物镜系统的设计中引入接近实际的眼模型,由眼模型视网膜上的成像特性来指导头盔物镜系统的设计工作。设计结果显示,系统的调制传递函数和畸变都远优于传统设计结果,调制传递函数的评价结果显示,轴上视场可以达到  $1'$  的人眼最小分辨角,大视场可以达到微显示器单个像素确定的空间频率,最大畸变小于  $5\%$ ,对系统的色差分析表明,色差不会对人眼分辨产生影响。该系统能很好地满足人因素的要求。

## 参 考 文 献

- Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Optical assessment of a projection lens design for head-mounted projective displays in visual space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 730~735  
赵顺龙,王肇圻. 投影式头盔物镜系统在视空间的性能评价[J]. *光学学报*, 2006, **6**(5): 730~735
- J. P. Rolland. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(7): 1760~1767
- Yonggang Ha, Jannick Rolland. Optical assessment of head-mounted displays in visual space[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(25): 5282~5289
- Hwey-Lan Liou, N. A. Brennan. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1684~1695 (in Chinese)
- Zhao Qiuling, Wang Zhaoqi, Zhang Chunshu. The actions of aspheric surfaces and gradient-index on optical image of the eye[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1409~1412  
赵秋玲,王肇圻,张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用[J]. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1409~1412
- M. Pantazis. *Visual Instrumentation* [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1999. 106~111
- J. W. Blaker. Toward an adaptive model of the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(2): 220~223
- W. Lotmar. Theoretical eye model with aspherics[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(11): 1522~1529
- A. C. Kooijman. Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(11): 1544~1550
- R. Navarro, J. Santamaria, J. Bescos. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(8): 1273~1281
- Fan Haiying, Wang Zhaoqi, Zhao Shunlong. A projection lens design for head-mounted projective displays of virtual reality and its optical assessment in visual space [J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2006, **20**(supp.): 1364~1367  
范海英,王肇圻,赵顺龙. 虚拟现实投影式头盔光学系统设计和视空间评价[J]. *电子测量与仪器学报*, 2006, **20**(增刊): 1364~1367
- 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