

自由曲面机载头盔显示器光学系统设计

李 华^{1,2} 张 新¹ 王 超^{1,2} 史广维¹ 付 强¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了解决传统头盔显示器大出瞳距、大视场与轻型化、小型化间的矛盾,采用径向基函数表征自由曲面设计了一款头盔显示器光学系统。详细论述了径向基函数表征自由曲面的原理,分析了光学系统像差校正方法。在设计中,尝试了一种方法来快速地确定优化起点,分析了该光学系统的成像质量。该光学系统的视场为 $45^\circ \times 32^\circ$, 出瞳大小为 15 mm, 出瞳距为 50 mm。在奈奎斯特频率处,全视场的调制传输函数(MTF)值大于 0.6。在 $(-22.5^\circ, 16^\circ)$ 视场处有最大畸变值 -1.54% 。系统尺寸 $56 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$, 重量 136 g。优化设计结果表明,该全息头盔显示器光学系统像差小,可以较好地为用户提供清晰的字符信息或者视频图像。该头盔显示光学系统成像质量好,体积小重量轻,可以应用于新一代机载头盔显示技术。

关键词 光学设计;自由曲面;径向基函数;头盔显示

中图分类号 TN141 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0322001

Optical Design of an Avionic Helmet-Mounted Displays Using Freeform Surface

Li Hua^{1,2} Zhang Xin¹ Wang Chao^{1,2} Shi Guangwei¹ Fu Qiang¹

(¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to resolve the contradictions between large exit pupil, wide field of view (FOV) and lightweight, small size, a helmet mounted displays (HMDs) system is designed, using freeform surface described by radial basis function. The principle that radial basis function describes freeform surface is introduced, and the approaches for aberration correction are analyzed. A new way is tried to determine a starting point of optimization quickly while designing. At last, the imaging quality of the optical system is analyzed. A HMD with $45^\circ \times 32^\circ$, 15 mm pupil, 50 mm eye relief is designed. The modulation transfer function (MTF) value is more than 0.6 within the entire FOV at the Nyquist frequency. The magnitude of maximum distortion occurs at $(-22.5^\circ, 16^\circ)$ in the field and it is measured in simulation to be -1.54% . The size of the system is $56 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$ and the weight is 136 g. The design results show that the optical system of HMDs has low aberration, and it can provide user clear symbol or video images. This HMDs system, which has good image quality, small volume, and light weight, can be applied to the next generation avionic HMD technology.

Key words optical design; freeform surface; radial basis function; helmet-mounted displays

OCIS codes 220.4830; 120.2040

1 引 言

头盔显示器(HMDs)是一种固定连接在头盔

上,通过其内部光学系统将符号或者视频信息呈现在使用者眼前的装置。早在 20 世纪 60 年代,美国

收稿日期: 2013-07-04; **收到修改稿日期**: 2013-09-10

作者简介: 李 华(1987—),男,博士研究生,主要从事光学设计和结构设计等方面的研究。E-mail: gdgxlh@163.com

导师简介: 张 新(1968—),男,博士,研究员,主要从事非常规复杂光学系统设计学等方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

高级研究计划局(ARPA)信息处理技术办公室主任 Ivan 开发出世界上第一个能显现二维图像的头盔显示器——“达摩克利斯之剑”。经过几十年的发展,如今的头盔显示器不仅在技术方面有了长足的发展,其应用范围也从最初的军事领域扩展到工业、医学和娱乐等领域。

作为头盔显示器重要组成部分的光学系统,其主要任务是为使用者提供一个清晰、明亮的符号或者视频图像,并能叠加在真实外景上;其主要要求有视场大、出瞳大、图像清晰、体积小、重量轻和重心偏移小等。因此头盔显示器光学系统设计的主要工作就是运用各种可行的技术,解决矛盾、寻求平衡。随着相关技术的迅速发展,不断有新兴技术和元件被应用到头盔显示器设计中,例如离轴非对称^[1-2]、自由曲面棱镜^[3]和全息光波导技术^[4]等。随着支持制造多边形和自由曲面光学表面的金刚石车削技术的出现,新的自由曲面数学描述方法开始被研究,例如 X-Y 多项式^[5],泽尼克多项式^[6]和 φ 多项式^[7]等。

2008 年期间,Cakmakci 等^[8]提出一种全新的自由曲面数学描述方法——径向基函数。作为一个设计实例^[9],一个具有 15 mm 出瞳距,3 mm 出瞳,24°对角视场的离轴放大器被成功研制,并且该系统具有高品质的成像性能,能满足使用者的需求。使用径向基函数表征自由曲面,这种理论的提升和应用的推广将促进光学工程的发展。因此,本文运用高斯径向基函数设计了一款大视场、大出瞳和长出瞳距的机载头盔显示器光学系统。

2 应用径向基函数表征光学自由曲面

径向基函数^[10]指某种沿径向对称的标量函数,通常定义为空间中任一点 x 到某一中心 C_i 之间欧氏距离的单调函数,其典型的函数表达式为

$$z(x) = \sum_{i=1}^N w_i \phi(\|x - C_i\|), \quad (1)$$

式中 x 和 C_i 为模式向量, $\{C_i\}_{i=1}^N \subset R^T$ 是基函数中心, w_i 是权系数, $\{\phi(\|x - C_i\|) | i=1, 2, \dots, N\}$ 是 N 个任意的函数的集合,即所谓选定的基函数, $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数。在某些情况下,能通过在(1)式中加入多项式,使其得到增强。使用径向基函数,将光学表面 Z 表示为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N w_i \phi(\|x - C_i\|). \quad (2)$$

径向基函数可以选取多种形式,如薄板样条函

数,高斯函数,多二次函数及逆多二次函数等。高斯函数具备如下优点:1)表示形式简单,即使对于多变量输入也不增加太多的复杂性;2)径向对称;3)光滑性好,任意阶导数均存在;4)由于该基函数表示简单且解析性好,因而便于进行理论分析。因此,本文使用高斯函数作为径向基函数进行头盔显示器光学系统的设计。

设有 N 个输入样本 C_i ,在输出空间相应目标为 d_N ,则有方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N w_1 \phi(\|x_1 - C_i\|) = d_1 \\ \sum_{i=1}^N w_2 \phi(\|x_2 - C_i\|) = d_2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N w_N \phi(\|x_N - C_i\|) = d_N \end{cases} \quad (3)$$

(3)式可改写为

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \cdots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中

$$\phi_{ji} = \phi(\|x_j - C_i\|), \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

令

$$\begin{cases} \mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T, \\ \mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T, \end{cases} \quad (6)$$

令 Φ 表示元素为 ϕ_{ji} 的 $N \times N$ 阶矩阵,即

$$\Phi = [\phi_{ji} | i, j = 1, 2, \dots, N]. \quad (7)$$

因此,(4)式可改写为

$$\Phi \mathbf{W} = \mathbf{d}. \quad (8)$$

用于表示自由曲面组合器的径向基函数网络具有三层网络结构,如图 1 所示。 μ 是从输入层到隐层的权重矢量, σ 是隐层内激活函数的归一化参数, \mathbf{W} 代表从隐层到输出层的权重矢量。第一层内的输入节点是沿着自由曲面组合器取的位置坐标 (x, y) ,第二层内的基函数对输入存在局部响应,将输入空间映射到一个新的空间,第三层内的输出节点则在该新的空间实现线性加权组合。第 i 个隐层节点 ϕ_i 为高斯核函数,其表达式如下:

$$\phi_i = \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^T (x - \mu_i)}{2\sigma_i^2}\right], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

式中 x 为输入矢量, μ_i 是输入权重矢量,也就是高

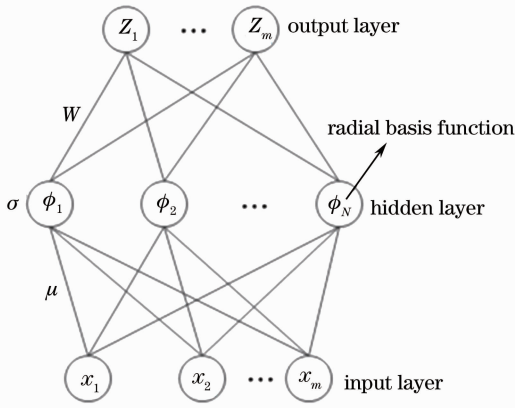


图 1 三层径向基函数网络示意图

Fig. 1 Three-layer radial basis function network

斯核函数中心, σ_i^2 是归一化参数; $0 \leq \phi_i \leq 1$ 。

根据图 1, 该网络结构能够表达为如下的矩阵形式:

$$\Phi W = Z, \quad (10)$$

式中 Φ 是 $m \times N$ 矩阵, W 为权重矢量, Z 是相应的自由曲面。

3 光学系统设计

3.1 系统设计参数

设计的大视场、大出瞳、长出瞳距自由曲面头盔显示器光学系统由图像源, 中继透镜组和用高斯径向基函数表征的半反射半透射组合器组成。选用对角线长度为 0.61" (1.55 cm), 分辨率为 800 pixel \times 600 pixel, 像元尺寸大小为 15 μ m 的有机发光二极管 (OLED) 作为该系统的图像源。为了防止头盔偏移飞行员头部

而导致眼睛接收不到图像信息, 头盔显示器的出瞳直径应尽量大, 15 mm 被认为能够满足使用要求。系统出瞳距为 50 mm, 该距离足以满足使用者佩戴校正眼镜, 防毒面具和氧气面罩等需求。系统的视场为矩形视场, 其值为 $45^\circ \times 32^\circ$ 。具体设计参数如表 1 所示。

表 1 头盔显示器光学系统设计参数

Table 1 Design specification of HMDs

Parameter	Specification
Image source	
Microdisplay	OLED
Size	0.61" (1.55 cm) diagonal
Active area	12.7 mm \times 9.0 mm
Resolution	800 pixel \times 600 pixel
Relay lens	
Configuration	Off-axis configuration
Exit pupil diameter	15 mm
Effective focus length	21.31 mm
F-number	1.42
Eye relief	50 mm
Other system parameters	
Field of view	$45^\circ \times 32^\circ$
Wavelength range	656~486 nm
Vignetting	<10% over entire FOV

3.2 系统设计与优化

在设计该光学系统时, 采用“倒追光线”的方式, 即从出瞳到图像源进行优化设计。首先选用泽尼克多项式表征光学系统组合器面型, 根据表 1 的技术指标设计一个头盔显示器光学系统, 其二维结构如图 2(a) 所示。该光学系统由一个组合器, 两个折射透镜, 一个衍射光学透镜和一个光楔组成。

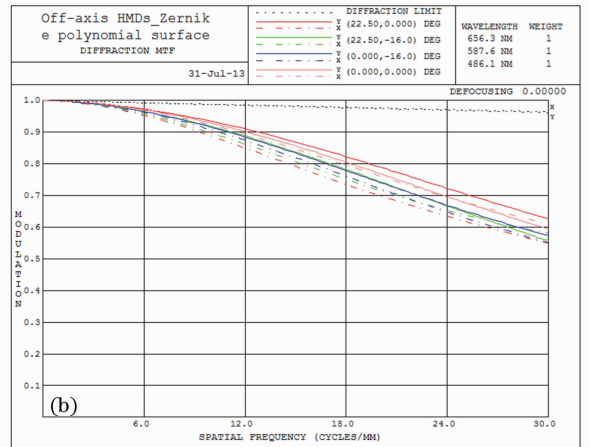
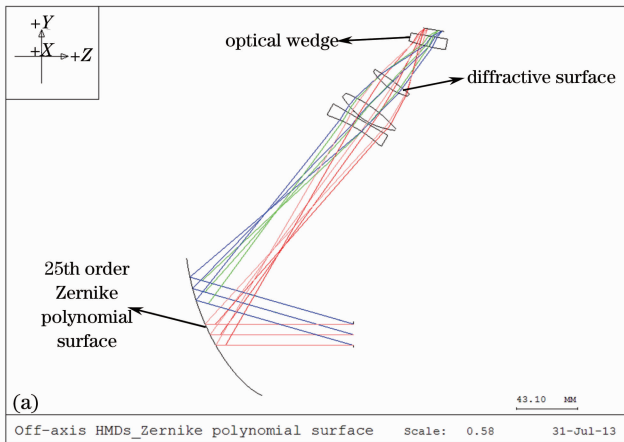


图 2 (a) 由泽尼克多项式表征组合器面型的头盔显示器光学系统结构图; (b) 该光学系统的调制传递函数曲线
Fig. 2 (a) Optical layout of the HMDs with a combiner described by Zernike polynomial; (b) polychromatic MTF plot of the off-axis HMDs

设计该头盔显示器光学系统时,像差校正的策略^[11]是:1)利用前 25 项泽尼克多项式表征组合器,减小小像轴向彗差和双节点像散等偏置像差;2)偏心和倾斜中继透镜组来减小畸变,线性像散和双节点像散;3)使用光楔减少由组合器倾斜带来的轴向彗差;4)使用衍射光学元件校正初级色差,二级光谱和高级像差。

在该光学系统中,组合器由泽尼克多项式表征,其表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i, \quad (10)$$

式中 c 为曲率(半径所对应的), r 是以透镜长度单位为单位的径向坐标, k 为圆锥常数, A_i 是第 i 个泽尼克多项式系数。在中继透镜组中,第二个双凸透镜且靠近光楔的那个表面为衍射面,该非对称二元衍射光学面的相位表达为

$$\begin{cases} \varphi(x, y) = k \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^m A_i x^j y^n, \\ i = \frac{1}{2} [(j+n)^2 + j + 3n], \end{cases} \quad (11)$$

式中 k 为衍射级次, A_i 是第 i 个多项式系数,根据给定的 i 值,可以根据下式求得 j 和 n 的值:

$$\begin{cases} l = \text{floor}\left(\frac{\sqrt{1+8i}-1}{2}\right), \\ n = i - l(l+1)/2, \\ j = l - n, \end{cases} \quad (12)$$

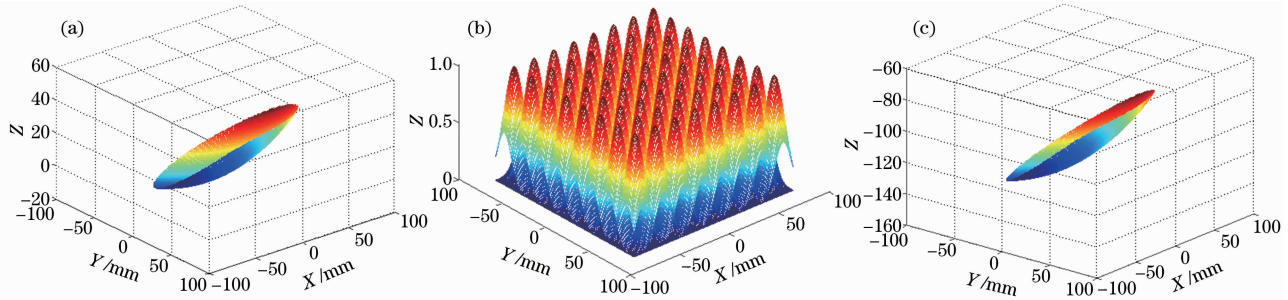


图 3 (a)由泽尼克多项式表征的组合器面型;(b) 8×8 个等间隔分布的二维高斯径向基函数;(c)由高斯径向基函数表征的组合器面型

Fig. 3 (a) Shape of the combiner described with Zernike polynomial surface; (b) 2D Gaussians are spaced uniformly with means centered on an 8×8 grid; (c) shape of the combiner described with the Gaussian radial basis functions

4 结果分析

运用高斯径向基函数表征自由曲面组合器,设计了一款头盔显示器光学系统,优化后的二维结构如图 4(a)所示。

图 4(b)显示了该光学系统的 MTF 曲线,从曲

式中 $\text{floor}()$ 为取整操作。在本文所设计的头盔显示器光学系统中,衍射元件采用了前 14 项。

在满足表 1 所示技术指标情况下,应用高斯径向基函数表征组合器的面型,设一个 HMDs 光学系统。以之前设计的由泽尼克多项式表征组合器面型的头盔显示器光学系统作为优化设计的初始结构。在这里,尝试一种选取径向基函数面型优化起始点的方法。第一步:将泽尼克多项式的前 25 项系数从 Code V 中抽取出来,在组合器口径内选取若干个 (x, y) 点,通过 Matlab 拟合得到其面型如图 3(a)所示;第二步:确定高斯函数,即确定(9)式中的输入权重矢量 μ_i 和归一化参数 σ_i^2 ;组合器的面型由 8×8 个等间隔分布二维的高斯函数表征,如图 3(b)所示;第三步:让高斯径向基函数无限逼近与上面确定的泽尼克多项式,通过最小二乘法求解径向基函数的前 64 项系数;第四步:利用 CODEV 所支持的 C 语言进行计算和程序编写,在 Visual C++ 下进行编译。使用 CODEV 的链接路径将程序链接成动态链接库文件(DLL),产生于 CODEV 应用程序所在目录的 CVUSER 子目录下;第五步:在 CODE V 中利用求解出的前 64 项系数和编写的径向基函数优化该 HMDs 光学系统。根据最终的优化结果,利用 MATLAB 进行面型拟合,由高斯径向基函数表征的组合器面型如图 3(c)所示。

线图可知,在全视场内,系统满足 33 lp/mm 空间频率处 MTF 值大于 0.6。图 2(b)展示了由泽尼克多项式表征组合器的头盔显示器光学系统 MTF 曲线图,比较图 2(b)和图 4(b)可以发现,由高斯径向基函数表征组合器的头盔显示器光学系统在奈奎斯特

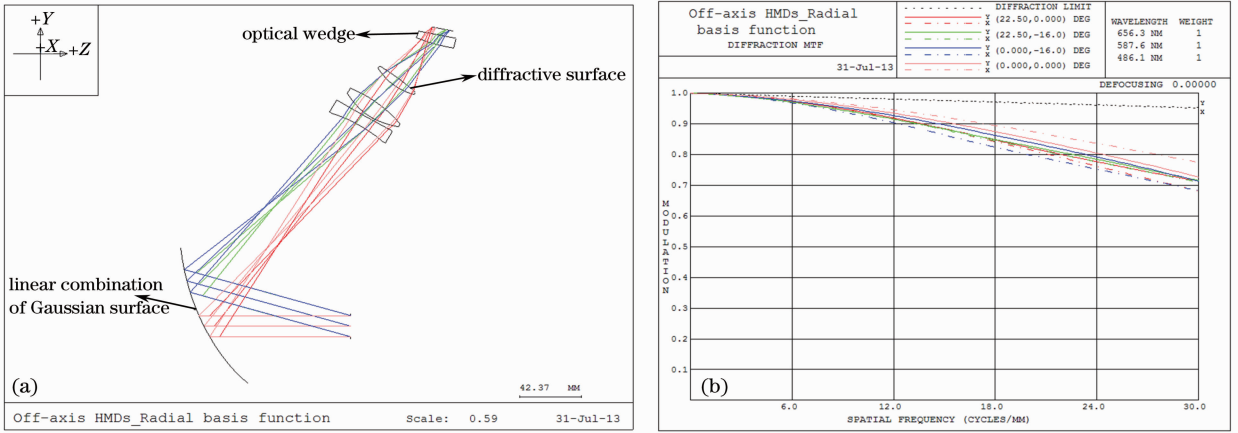


图 4 (a)由径向基函数表征组合器的头盔显示器光学系统结构图;(b)该光学系统的调制传递函数曲线

Fig. 4 (a) Optical layout of the HMDs with a combiner described by radial basis function; (b) polychromatic MTF plot of the off-axis HMDs

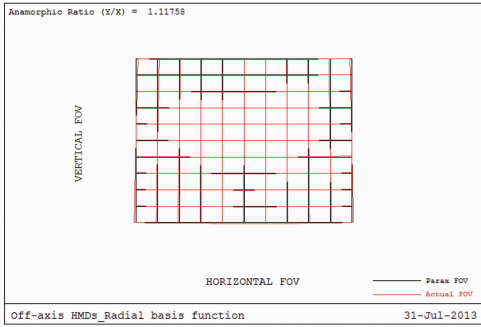


图 5 头盔显示器光学系统的网格畸变
Fig. 5 Distortion grid of HMDs

频率处的 MTF 值比由泽尼克多项式表征组合器的头盔显示器光学系统大 12.1%。

该光学系统的网格畸变如图 5 所示,在视场 $(-22.5^\circ, 16^\circ)$ 处有最大畸变 -1.54% 。与由泽尼克多项式表征组合器头盔显示光学系统相比,该系统畸变值减小了 3.29%。图 6 显示了由泽尼克多项式表征组合器和由高斯径向基函数表征组合器头盔显示器光学系统的像差曲线比较图。通过图 6(b)可以看出,使用高斯径向基函数能有效地减小各种高阶离轴像差。将自由曲面和二元光学元件引入该系统,解决了传统头盔显示器大出瞳距、大视场与轻型化、

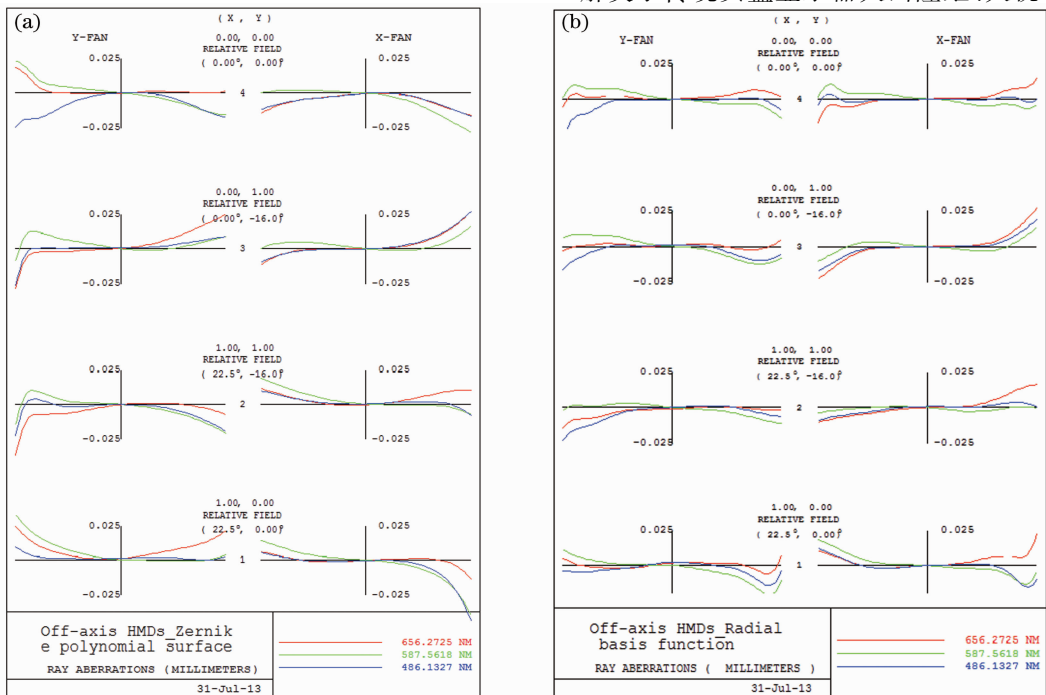


图 6 像差曲线比较。(a)泽尼克多项式面型;(b)高斯径向基函数

Fig. 6 Comparison of ray aberrations. (a) Zernike polynomial surface; (b) linear combination of Gaussians

小型化间的矛盾。该光学系统的系统尺寸为 56 mm×128 mm,重量为 136 g,满足了系统结构紧凑,重量轻的要求。

5 结 论

设计了一种大视场、大出瞳、长出瞳距、自由曲面机载头盔显示器光学系统。详细论述了利用径向基函数表征光学自由曲面的原理。根据满足用户需求的技术参数,首先运用泽尼克多项式表征自由曲面进行系统设计,然后以该系统为初始结构,利用高斯径向基函数表征自由曲面设计头盔显示器光学系统。在优化由高斯径向基函数表征自由曲面的头盔显示器光学系统时,尝试快速地确定优化起点,结果表明,该方法对于设计这类自定义面型的光学系统具有一定的帮助。

最后,对整个系统进行像质评价发现,设计出的自由曲面头盔显示器光学系统,系统重量轻、结构紧凑、像差小、成像质量好。可以预见,该种自由曲面机载头盔显示器光学系统将在军事等领域得到广泛的应用。

参 考 文 献

1 J P Rolland. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted

display [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(7): 1760–1767.

- 2 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi, *et al.*. Optical design of an off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(9): 2662–2667.
佟静波, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2662–2667.
- 3 S Yamazaki, K Inoguchi, Y Saito, *et al.*. Thin wide-field-of-view HMD with freeform-surface prism and applications [C]. *SPIE*, 1999, 3639: 453–462.
- 4 A Cameron. The application of holographic optical waveguide technology to the Q-Sight™ family of helmet-mounted displays [C]. *SPIE*, 2009, 7326: 73260H.
- 5 Z Zheng, X Liu, H Liu, *et al.*. Design and fabrication of an off-axis see-through head-mounted display with an x - y polynomial surface [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(19): 3661–3668.
- 6 I Kaya, K P Thompson, J P Rolland. Comparative assessment of freeform polynomials as optical surface descriptions [J]. *Opt Express*, 2012, 20(20): 22683–22691.
- 7 K Fuerschbach, J P Rolland, K P Thompson. A new family of optical systems employing φ -polynomial surfaces [J]. *Opt Express*, 2011, 19(22): 21919–21928.
- 8 O Cakmakci, B Moore, H Foroosh, *et al.*. Optimal local shape description for rotationally non-symmetric optical surface design and analysis [J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1583–1589.
- 9 O Cakmakci, S Vo, H Foroosh, *et al.*. Application of radial basis functions to shape description in a dual-element off-axis magnifier [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(11): 1237–1239.
- 10 M D Buhmann. *Radial Basis Functions: Theory and Implementations* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- 11 K P Thompson. *Aberration Fields in Tilted and Decentered Optical Systems* [D]. Cambridge: University of Arizona, 1980.

栏目编辑: 张 腾