

文章编号 1004-924X(2011)03-0508-07

折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计

姜洋^{1,2}, 孙强¹, 谷立山¹, 刘英¹, 李淳¹, 王健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 130039)

摘要:为解决传统头戴式显示器大视场、大出瞳距与小型、轻量化之间的矛盾,设计了折/衍混合自由曲面式头戴显示器的光学系统。利用衍射元件的特殊色散特性校正系统色差;选取最佳的自由曲面面型组合校正系统的像散、彗差和畸变;由光学塑料(PMMA)注塑成型的自由曲面棱镜形成离轴结构,使光学系统结构紧凑、便于装调。设计得到的光学系统出瞳距离为 17.4 mm,出瞳直径为 4 mm,对角线视场为 55°,光学系统的点斑 RMS 半径小于 30 μm ,各视场光学调制传递函数在 30 lp/mm 时大于 0.1,系统畸变小于 10%。实际分析结果表明,该系统具有良好的成像质量,系统像差特性满足目镜系统的成像要求,可以满足虚拟现实各领域的实际需求。

关键词:头戴式显示器;虚拟现实;自由曲面;折/衍混合系统;光学设计

中图分类号: TN141 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0508

Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces

JIANG Yang^{1,2}, SUN Qiang¹, GU Li-shan¹, LIU Ying¹, LI Chun¹, WANG Jian¹

(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 130039, China*)

Abstract: To resolve the contradictions between wide Field of View(FOV), large exit pupil and compact, lightweight, a hybrid refractive/diffractive optical system using Free Form Surfaces(FFSs) for a Head Mount Display(HMD) was designed. The dispersion characteristics of diffractive elements were used to correct the chromatic aberration, and the appropriate types of FFS were selected to correct the off-axial aberrations(astigmatism, coma and distortion). Furthermore, the FFS prism was made of plastic materials to form an optical structure without rotational symmetry to achieve compact and easy to align functions. Obtained optical system can offer the eye relief of 17.4 mm, exit pupil of 4 mm and the FOV of 55°. Moreover, the RMS diameters of spot diagram are less than 30 μm , the MTF are higher than 0.1 at the spatial frequency of 30 lp/mm across the entire visual field, and the maximum distortion is less than 10%. Experimental results indicate that the optical system has perfect performance

收稿日期:2010-08-03;修订日期:2010-09-16.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA122110);国家自然科学基金资助项目(No. 60977001)

and can meet the demands of eyepieces for aberration characteristics.

Key words: Head-mounted Displays(HMDs); Virtual reality; Free-form-Surface(FFS); hybrid refractive/diffractive system; optical design

1 引言

头盔显示器(Helmet Mounted Display, HMD)最早出现在军事领域,作为头盔的附属部分,可以实时显示战术信息,辅助目标瞄准识别,还可用于夜视系统。随着设计理念、制造水平和微显示技术的不断进步,HMD越来越小型化,已逐步发展到头戴式显示器(Head Mount Display, HMD),并逐渐进入人们的日常生活,现已广泛应用于娱乐、模拟仿真训练、外科手术等虚拟现实技术的各个领域^[1]。头盔显示器的光学系统是一个图像放大系统,微显示器所产生的影像藉由光学系统放大,在人眼前一定距离处呈现一个放大的虚像,使用户可以完全沉浸在虚拟的情境之中,不受外界信息的干扰。如果输入3D视频信号,无需其他辅助装置,即可直接实现3D立体显示^[2]。

在许多应用领域中,使用者为移动作业,这就要求光学系统在保证成像质量的基础上结构紧凑、重量轻,并且拥有较大的视场。传统的解决方案多为旋转对称的目镜结构^[3],虽然光学性能可以接近衍射极限并较好地校正畸变,但是多组透镜的结构复杂,装调和加工要求精度高,体积重量也很大,长时间佩戴会引起颈部疲劳。在其发展过程中,虽然陆续引入了非球面和二元光学技术,在一定程度上精简了系统^[4-5],但还是没能解决体积重量和大视场、大出瞳距离的矛盾。Ferguson另辟蹊径提出了投影式头盔系统的概念^[6],它是利用投影物镜把微显示器的图像投影到反射屏上,再经由屏上的逆反射材料回射进入人眼。虽然这样可以增大视场减小重量,但是屏幕的形状和位置要求都非常严格,图像的亮度也要受到微显示器亮度的限制,系统结构仍然复杂。

1996年,Canon公司率先提出自由曲面棱镜(Free Form Surfaces, FFS)棱镜结构^[7],但亦无法实现高质量的大视场成像。为了改善系统的成像性能,Olympus公司在单片棱镜的结构上加以改进,在棱镜与像面间或是在出瞳一侧增加一片透镜^[9-10]来对系统的色差及其他单色像差进行校

正。这虽然在一定程度上加大了视场,提高了像质,却使系统结构变得复杂也增加了装调难度。上述系统的普遍问题是视场较小,无法满足一些应用领域对大视场的需求。

本文利用衍射面的色散特性来解决单片透镜无法校正色差的问题,衍射面的非球面项还可以校正单色像差。单片棱镜的离轴结构使系统结构紧凑,重量也大大减轻。衍射结构结合自由曲面增加了设计的自由度,较好地校正了因偏心 and 倾斜带来的各种像差,同时可获得大视场,大出瞳距,并且降低了系统装调的要求。

2 设计目标

微显示器发出的光线最终进入人眼,在人眼前1 m处成放大虚像,设计时采用反向设计。光学系统的实际出瞳位置为人眼的瞳孔。在不同的光线环境下,通常人眼瞳孔的直径为2~6 mm,平均为4 mm^[2-3]。考虑到使用过程中由于运动或其他原因会使瞳孔偏离系统光轴而丢失视场或产生渐晕,头盔显示器的出瞳直径应大于人眼的瞳孔,为保证使用者始终能看到图像,出瞳直径应不小于4 mm。

系统选用的图像源为eMagin公司的0.61"(15.5 mm)OLED微显示器,分辨率为800×600,宽高比为4:3。由拉赫不变量^[2]:

$$n \cdot \theta \cdot y_{\text{pupil}} = n' \cdot \theta' \cdot y_{\text{pupil}'}, \quad (1)$$

(n 和 n' 分别为物方和像方折射率, y_{pupil} 与 $y_{\text{pupil}'}$ 分别为入瞳与出瞳大小, θ 与 θ' 为物方和像方视场角)可知,图像源的大小和相对位置确定后,系统的出瞳直径和视场角的大小成反比。

通常人的裸眼水平视场角为200°,垂直视场角为100°,但对中心20°的视场最敏感,而且在40°中心视场以外,立体视觉、双目叠加都会减弱或消失。因此,在设计光学系统时应保证头盔显示器有至少中心20°视场的双目叠加,且全视场不小于40°^[12]。在权衡了各项指标后,确定系统目标参数如下表。

表 1 HMD 光学系统设计参数

Tab. 1 Parameters of optical system

参数	目标值
OLED 微显示器	0.61" (15.5 mm) 对角线
分辨率/pixel	800×600
出瞳距离/mm	17.4
出瞳直径/mm	4
视场角/(°)	55
畸变	<10%
MTF	>0.1@30 lp/mm

3 系统结构及原理

系统结构如图 1 所示,光学系统包括两部分:图像源和自由曲面棱镜。光线由微显示器发出进入棱镜,当光线第一次到达面 2 时,入射光线满足全反射条件,入射角度大于临界角光线全反射,经面 3(镀反射膜)反射后的光线再次射向面 2,使此时入射角小于临界角,不再发生全发射,透过面 3 射入人眼。

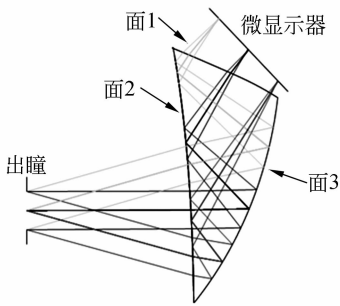


图 1 HMD 光学系统示意图

Fig. 1 Layout of FFS prism for HMD optical system

从图像源发出的光线第一次经过反射面 2 时,如果入射角小于全反射的临界角,则光线不能全部反射,部分光线会直接因透射而离开自由曲面棱镜,造成系统透过率降低甚至形成有害杂光。因此,必须控制光线在该反射面上的入射角度,使光线全部全反射^[11-15]。棱镜的材料选取光学塑料 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯),折射率为 1.49,在空气中这种介质的全反射临界角:

$$\theta_b = \arcsin(1/n) = 42.2^\circ. \quad (2)$$

光线入射角大于 42.2° 时发生全反射。如图 2 所示, L_1, L_2 分别为 Y 方向全视场上下边缘光

线, θ_1 为 L_1 第一次到达面 2 时的入射角, θ_2 为第二次经过面 2 时的入射角,只要使 $\theta_1 > 42.2^\circ, \theta_2 < 42.2^\circ$,即可保证成像条件。

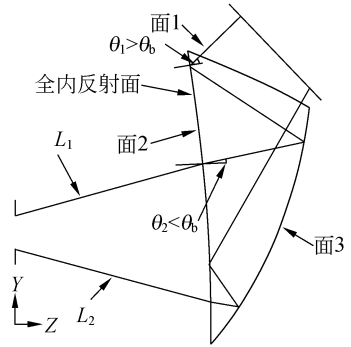


图 2 满足全反射条件的自由曲面棱镜示意图
Fig. 2 Condition for total internal of FFS prism

4 光学系统设计思想

设计的系统为离轴结构,并且视场较大,这样造成像散和畸变很大。球面和二次曲面均为旋转对称结构,子午和弧矢方向的曲率半径相同,因此光焦度也相同,从而不利于离轴像差的校正。自由曲面子午弧矢方向的曲率半径是不同的,这样就可以在两个不同的平面方向相对独立地校正像差。因此,面 2,3 均选用非旋转对称的自由曲面。其中,面 2 为变形非球面(Anamorphic Aspherical Surface-AAS),它沿正交方向各有两个不同曲率和圆锥曲线常数,描述方程如下:

$$Z = \frac{C_x x^2 + C_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) C_x^2 x^2 - (1 + k_y) C_y^2 y^2}} + \sum \alpha_i x^i + \sum \beta_j y^j, \quad (3)$$

式中, $C_x = 1/r_{x_0}, C_y = 1/r_{y_0}$,它们分别为 x, y 方向的基准球面曲率, k_x, k_y 分别为 x, y 方向的锥面度, α_i 为 x^i 多项式的系数, β_j 为 y^j 多项式的系数^[2]。面 2 既是全反射面又是透射面,必须合理控制 Y 方向的光焦度使光线在第一次到此面时满足全反射条件,否则会产生杂散光影响成像质量。

面 3 为扩展多项式曲面(Extended Polynomial),描述方程为:

$$Z = \frac{Cr^2}{\sqrt{1 - (1 + k)C^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (4)$$

其中 C 为曲面曲率半径, A_i 为第 i 项扩展多项式系数。本文合理选择多项式的幂次(仅保留 x 的偶次项),使其成为关于 yoz 平面对称的曲面。在面 3 上镀反射膜,提供主要的光焦度完成光线折射。

面 1 为旋转对称的超环面,描述方程为:

$$Z = \frac{Cx^2}{1 + [1 - (1+k)C^2x^2]^{1/2}} + Ax^4 + Bx^6 + Cx^8, \quad (5)$$

其中 C 为曲率半径, k 为二次曲面系数, A, B, C 分别为 4, 6, 8 阶非球面系数。本文在这个面上加入了衍射结构校正色差。

在传统折射光学元件中,为了消色差,常采用双胶合透镜,其光焦度与阿贝数满足下面的方程:

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi \\ \frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

其中, φ 是总光焦度, φ_1, φ_2 分别为两块透镜的光焦度; v_1, v_2 分别为两块透镜材料的阿贝数。绝大多数光学材料的阿贝数均为正值,必须采用正负透镜组合才能消色差。透镜是利用两种阿贝数相差较大的材料组成的,这使得透镜的光焦度较大,不利于单色像差的校正。双胶合透镜的结构还会增加光学系统的体积和质量^[16-18]。

衍射面的色差与波长有关,与基底材料无关,在可见波段的等效阿贝数为:

$$v = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C}, \quad (7)$$

其中 $\lambda_F < \lambda_C$, 可见在可见光波段,衍射元件的阿贝数 v 很小且为负值,其等效折射元件光焦度略小于总光焦度,而等效衍射元件光焦度非常小,这样有利于单色像差的校正。

衍射面的浮雕结构可以实现波前的位相调制,其相位分布函数为:

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + \dots, \quad (8)$$

式中, r 为归一化半径, $A_i (i=1, 2, 3, 4, \dots)$ 为衍射面的位相系数。其中 A_1 决定衍射面的光焦度用来校正色差, A_2, A_3 等非球面项用来校正系统的初、高级单色像差^[17]。

在非球面上加入衍射结构,这样单一面同时具有折射和衍射两种性质,增加了光学设计的自由度,改善了系统的成像质量,解决了单片透镜无法校正色差的问题。

在选取了合适的自由曲面面型后,通过合理分配各面的光焦度,在 Zemax 软件中搭建系统初始结构。利用操作数控制光线在面 2 的入射角度,使 $\theta_1 > 42.2^\circ$ (满足全发射条件);通过控制边缘光线与各面的交点位置控制光线行为,防止产生杂散光。然后以各面曲率半径、倾斜与离轴量及非球面相关系数为变量,对系统进行初步优化,优化过程中设定实际像高为视场大小。优化过程中发现系统点斑,色差,畸变都很大,传函不理想,因此又在变量中加入高次非球面系数与衍射结构参数,增加操作数控制畸变与各视场传函,适当地改变各优化函数的权重,继续优化,在优化的过程中平衡各视场的像差大小^[19]。

5 设计结果及分析

图 3 和图 4 分别为系统不同视场的 MTF 曲线图与点列图。从图中可以看出,系统传函在 30 lp/mm 处大于 0.1;点斑的 RMS 半径均小于 30 μm ,并且色差得到了良好的校正。图 5 所示为网格畸变图,系统最大畸变为 -9.3655% 。在实际应用中,可以预先处理输入图像信号,通过图像预变形的方法进一步减小畸变。用 Zemax 软件对图片模拟仿真成像,图 6 为原图,图 7 为仿真效果

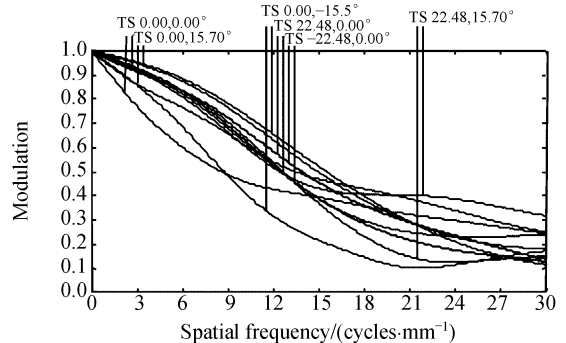


图 3 调制传递函数曲线

Fig. 3 Modulation transfer function curves

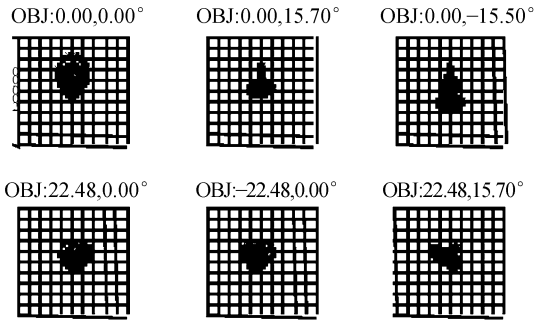
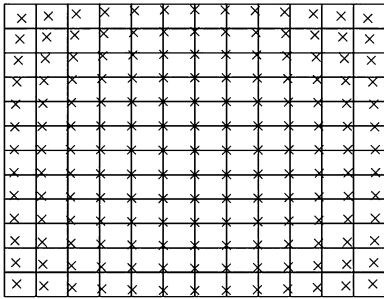


图 4 点列图

Fig. 4 Spot diagrams



Maximum distortion:-9.3655%

图 5 网格畸变

Fig. 5 Grid distortion



图 6 原始图片

Fig. 6 Original image



图 7 图像仿真结果

Fig. 7 Image simulation

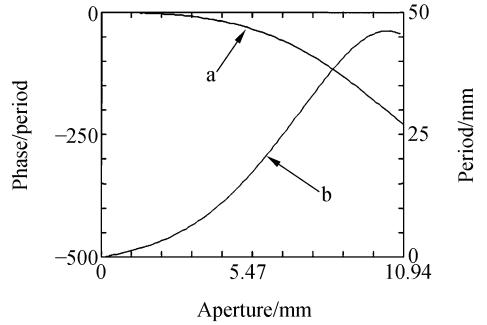


图 8 相位与环带频率曲线图

Fig. 8 Phase and line frequency vs. aperture

图。分析结果表明成像质量良好,可以满足 HMD 光学系统的使用需求。图 8 为最终优化后衍射面相位与环带频率曲线图,曲线 a 为相位函数曲线,曲线 b 为环带频率曲线。可以看出,衍射面总环带数约为 228 个,环带频率最高为 46 circle/mm,也就是说最小环带间隔为 22 μm ,完全可以利用数控单点金刚石车削技术对衍射面进行加工。

6 结 论

根据现代头戴式显示器在实际应用中小型轻量化与大视场的需求,采用加入衍射结构的自由曲面棱镜式结构,选用 1.55 cm (0.61 in) 的 OLED 微显示器作为图像源,设计了一种新型头戴式显示器的光学系统。解决了系统体积重量和大视场之间的矛盾。通过对系统的优化控制,使优化后系统出瞳距离为 17.4 mm,出瞳直径为 4 mm,对角线为视场 55°,系统传函在 30 lp/mm 处大于 0.1,点斑小于 30 μm ,并获得了良好的模拟仿真效果。该系统中自由曲面棱镜采用光学塑料注塑成型,重量轻、便携性好,单片棱镜结构易于装调。此外,对衍射结构设计参数的分析结果表明其符合现有加工条件,适合大批量生产,在虚拟现实领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

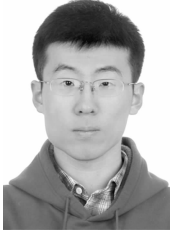
- [1] 张晓兵,安新伟,刘璐,等. 头盔显示器的发展与应用[J]. 电子器件,2000,23(1):51-59.
ZHANG X B, AN X W, LIU L, *et al.*. Development and application of helmet-mounted displays [J]. *Journal of Electron Devices*, 2000, 23(1):51-59. (in Chinese)
- [2] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [3] OZAN C, JANNICK R. Head-worn displays: a review[J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(3):199-216.
- [4] 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)
- [5] MISSIG M, MORRIS G. Diffractive optics applied to eyepiece design[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14):2452-2461.
- [6] FERGASON J. Optical system for a head mounted display using a retro-reflector and method of displaying an image: USA, 5621572[P]. 1997-8-15.
- [7] 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.
- [8] OKUYAMA A, TOKOROZAWA, YAMAZAKI S, *et al.*. Optical system, and image observing apparatus and image pickup apparatus using it: USA, 5706136[P]. 1998-1-6.
- [9] TAKAHASHI K. Head or face mounted image display apparatus: USA, 5875056[P]. 1999-2-23.
- [10] TOGINO T. Optical system and image display apparatus: USA, 6128136[P]. 2000-10-3.
- [11] 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]. *Infra-red and Laser Engineering*, 2007, 36(3):309-311. (in Chinese)
- [12] 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 diffractive/refractive optical system of see-through head mounted display[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(11):1301-1304. (in Chinese)
- [13] SHOICHI Y, KAZUTAKA I, YOSHIHIRO S, *et al.*. A thin, wide field-of-view HMD free-form-surface prism and applications [C]. *IS&T/SPIE Conference on The Engineering Reality of Virtual Reality 1999, San Jose California*, 1999, 3639:453-462.
- [14] 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]. *Applied Optics*, 2009, 48(14):2655-2668.
- [15] 赵清亮,郭兵,杨辉,等. 金刚石飞切加工微结构表面的表面粗糙度研究[J]. 光学精密工程,2009,17(10):2512-2519.
ZHAO Q L, GUO B, YANG H, *et al.*. Surfaces roughness study in diamond fly-cutting of microstructured surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2512-2519. (in Chinese)
- [16] 张慧,丁雪梅,谭久彬. 基于折/衍混合的长焦深成像物镜消色差方法[J]. 光学精密工程,2008,17(10):1810-1814.
ZHANG H, DING X M, TAN J B, *et al.*. An achromatic method based on hybrid refractive-diffractive principle for the optical imaging objective with long focal depth[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 17(10):1810-1814. (in Chinese)
- [17] 张慧娟,王肇圻,张春书,等. 广角视场折/衍混杂目镜设计[J]. 光电子·激光,2002,13(9):913-919.
ZHANG H J, WANG Z Q, ZHANG C SH, *et al.*. Design of refractive-diffractive eyepieces with wide-angle field of view[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(9):913-919. (in Chinese)
- [18] 孙金霞,刘建卓,孙强,等. 折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学精密工程,2010,18(4):792-797.
SUN J X, LIU J ZH, SUN Q, *et al.*. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal op-

tical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):792-797. (in Chinese)

- [19] 陈云亮, 李铁才, 邱祥辉. 头戴显示器中自由曲面棱镜的设计[J]. *应用光学*, 2009, 30(4):552-557.

CHEN Y L, LI T C, QIU X H. Design of free-form-surface prism in head mounted display[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(4):552-557. (in Chinese)

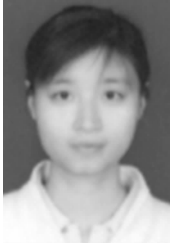
作者简介:



姜 洋(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: le_zhi@yeah.net



谷立山(1958—),男,吉林长春人,副研究员,1982年于长春光机学院获得学士学位,主要从事光学工程与检测技术的研究。E-mail: gulishan@163.com



刘 英(1980—),女,山东滨州人,博士,助理研究员,2005年于山东师范大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com



李 淳(1982—),男,山东烟台人,硕士,助理研究员,2005年于山东大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,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 健(1980—),男,吉林辉南人,博士研究生,助理研究员,2005年于南开大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: mrwangj@yahoo.com.cn

导师简介:



孙 强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心主任,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