

目镜式头戴静脉显示光学系统的设计

姜来^{1,2}, 王肇圻^{1,2}, 刘永基^{1,2}

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071;

²南开大学光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

摘要 为提高静脉注射的成功率,设计了一款头戴静脉显示光学系统,该系统由红外成像系统与穿透型目镜式头戴显示器组成。近红外成像系统具有 $F/1.59$ 的大数值孔径,利于弱红外散射光的收集成像,设计中采用了旋转对称的二次曲面设计,系统的质量是相应球面系统的 77.8%。穿透型头戴显示器结构简单紧凑,采用了旋转对称的二次曲面设计,系统的质量是相应球面系统的 55.6%。设计结果显示,近红外成像系统成像质量优异,分辨率可达扩展图形阵列(XGA)(1024 pixel×768 pixel)。穿透型目镜式头戴显示器具有 10 mm 的出瞳直径,50 mm 的出瞳距离,0.068D 的最大场曲(D 为屈光度),0.372% 的最大相对畸变以及 XGA(1024 pixel×768 pixel)的显示模式分辨率。双目光学系统的总质量为 44 g。较之现有的静脉显示系统,本系统具有结构简单紧凑、数值孔径大、分辨率高、重量轻等特点。

关键词 成像系统; 静脉显示; 目镜式头戴显示器; 二次曲面

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.071103

Design of Head-Mounted Eyepiece Display for Vein Imaging Optical System

Jiang Lai^{1,2}, Wang Zhaoqi^{1,2}, Liu Yongji^{1,2}

¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;*

²*Key Laboratory of Optical Information Science & Technology, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China*

Abstract A head-mounted vein imaging optical system composed by the infrared imaging system and see-through head-mounted eyepiece displayer is designed to greatly improve the success rate of intravenous medication. The near infrared imaging system has large numerical aperture of $F/1.59$, which is beneficial to the collection of the weak infrared scattered light. We choose quadric surface design of rotational symmetry, the weight of the imaging system is 22.2% lighter than the corresponding spherical system. The structure of the see-through head-mounted eyepiece displayer is simple and compact, because of its quadric surface design of rotational symmetry, which is 44.4% lighter than the corresponding spherical system. The design results show that the imaging quality of the near-infrared imaging system is excellent, and its resolution can reach extended graphics array (XGA) (1024 pixel×768 pixel). The see-through head-mounted eyepiece display gets a 10 mm exit pupil, a 50 mm eye relief, a maximum field curvature of 0.068D (D is diopter), a maximum relative distortion of 0.372% and display model resolution of XGA (1024 pixel×768 pixel). The total weight of binocular system is about 44 g. Comparing with the current vein display system, it has the characteristics of simple and compact structure, large numerical aperture, high resolution and light weight, etc.

Key words imaging systems; vein imaging; head-mounted eyepiece display; quadric surface

OCIS codes 110.3080; 220.3620; 080.3620; 220.4830

收稿日期: 2017-03-12; 收到修改稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(11474172)、南开大学光学信息技术科学教育部重点实验室开放基金

作者简介: 姜来(1993—),男,硕士研究生,主要从事光学设计、视光学方面的研究。

E-mail: 2120150298@nankai.edu.cn

导师简介: 刘永基(1977—),女,博士,副研究员,主要从事眼视光学、光学设计等方面的研究。

E-mail: yjliu@nankai.edu.cn(通信联系人)

1 引言

随着医嘱给药形式的多样化,静脉注射已成为常用、有效的临床治疗手段^[1]。由于某些原因^[2-5],血管的准确位置难以判断,导致静脉注射的成功率降低,为患者带来了不必要的痛苦。此外,医护人员判断血管位置时,为了易于发现血管而经常使用止血带,这也给患者带来了不适。为此,利用人体对近红外光谱的吸收特性(皮肤和皮下脂肪对近红外光谱吸收较低,而血液却能够明显地吸收近红外光)^[6-7],多种静脉显像仪相继被提出。现有的静脉显像仪多为台式显像仪^[7-9]和手持式显像仪^[10-11]。台式显像仪不易携带,而手持显像仪为操作带来了不便,为此,一种结构简单的静脉显示眼镜应运而生(Evena Medical 公司的产品 Eyes-On-Glasses),该系统的总质量为 311.85 g。然而,无论是台式显像仪、手持式显像仪,还是静脉显示眼镜,在现有的相关文献与专利等报道中并未公布其光学系统的设计、结构以及光学性能等信息。

现代头戴显示器不仅具有优良的像质,而且正在向结构简单紧凑、重量轻以及体积小的发展方向^[12-15],若将头戴显示器用于静脉显示,可以弥补台式显像仪和手持显像仪的不足。但目前为止,只有 Zhai 等^[16]于 2014 年报道过一款头戴静脉显示系统的设计。为实现系统的轻量化与高像质,该设计采用投影式物镜作为显示系统。但是在投影物镜系统中,从图像源进入眼睛的光线要两次经过半透射和半反射镜,会造成较多的能量损失。若采用目镜系统,则光束只需要经过半透射和半反射镜一次,会减少能量损失。此外,利用二次曲面的非球面设计^[17],目镜系统也可以实现高成像质量与轻量化。

为此,本文设计了一款静脉显示光学系统,该光学系统由佩茨瓦耳结构的红外成像系统和目镜结构的显示系统构成。系统采用了二次曲面的非球面设计^[17],以优化像质、降低重量和提高成像系统的相对孔径。结果显示,目镜系统质量不超过 15 g,是相应球面系统的 55.6%。较之前文献[12]的投影式头戴显示系统,本系统中图像源的光线仅经过半透射和半反射镜一次而不是两次,提高了能量利用率。成像系统的 F 数为 1.59,有利于弱近红外散射光成像,质量仅为 7 g。操作者佩戴该系统可以同时观察到清晰的静脉图像与外界事物,能够获得更为真实的体验。

2 静脉显示眼镜光学系统的设计

2.1 系统结构

图 1 为静脉显示系统工作原理示意图,其主要组成为红外成像系统、计算机以及目镜式头戴显示器。其主要工作流程为:760 nm 的近红外光照射到皮肤表面的特定区域并且被皮肤反射;携带皮下静脉信息的红外光被成像系统收集,成像在该系统的电荷耦合器件(CCD)上;CCD 将收集的信息转化为数字信号传输到计算机,计算机将数字信号增强后传送到头戴目镜的液晶微显示器(LCD);LCD 通过头戴目镜将静脉图像投射到人眼的视野内,其位置及大小与红外光线照射的特定皮肤表面区域相同。

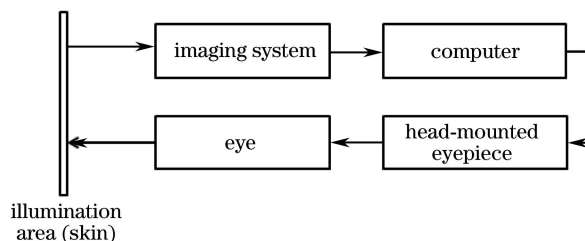


图 1 静脉显示系统工作原理示意图

Fig. 1 Working principle schematic diagram of the vein display system

2.2 近红外成像系统

近红外系统由物镜和 CCD 组成,物镜可将皮肤反射的带有皮下静脉信息的红外光成像于 CCD 上。所选 CCD 探测器的靶面有效面积为 $4.76 \text{ mm} \times 3.57 \text{ mm}$,分辨率为扩展图形阵列(XGA) ($1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$),像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。通过计算可知 CCD 的奈奎斯特采样频率(像面分辨率)为 $107 \text{ cycle} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。为充分利用 CCD 的分辨率,近红外系统物镜分辨率要达到 $107 \text{ cycle} \cdot \text{mm}^{-1}$,并且其相对畸变要小于 3%^[18]。考虑到静脉注射的实际需要,本系统选择的照射面积设定为 $64 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$,皮肤表

面距离物镜的距离设定为320 mm。为了充分利用 CCD 的有效靶面(4.76 mm×3.57 mm),物镜系统的放大率为 0.0744。近红外成像系统的设计目标如表 1 所示。

表 1 近红外成像系统的设计目标

Table 1 Design objectives of the near infrared imaging system

Parameter	Objective	Parameter	Objective
Wavelength	760 nm	Object plane	64 mm×48 mm
Relative distortion	<3%	Object distance	320 mm
Resolution	XGA (1024 pixel×768 pixel)	Magnification	0.0744
Target surface size of CCD	4.76 mm×3.57 mm		

为了避免对人体造成危害,照明光源的功率要尽量低,而皮肤对近红外光的反射率又低,这就要求成像系统具有较大的数值孔径。佩茨瓦尔物镜系统具有大数值孔径的特点。然而佩茨瓦尔物镜却存在较大的场曲。为了减小场曲,可采用在像面附近加入负场镜或减小佩茨瓦尔结构中正、负透镜的折射率之差并将胶合透镜改为双分离结构两种方案^[19-20]。由于负场镜在 CCD 附近不利于系统的装配,因此选择红外成像物镜为佩茨瓦尔的双分离结构,以实现大数值孔径和小的场曲。优化结果表明,选用此结构最后能够得到一个像质优异和相对畸变小的结构。

物镜的具体设计步骤如下:

1) 根据表 1 的要求,首先设计了一个 $F/1.62$,有效焦距为 21.9 mm,质量为 9 g 的佩茨瓦尔 4 片式的双分离球面镜组作为初始结构,在此基础上进行非球面优化。

2) 将系统的第一个面的二次项非球面系数与透镜的曲率半径设为变量,使用默认的波前评价函数进行优化,以提高系统的像质。

3) 减小透镜厚度与透镜间距,并将第一个面的二次项非球面系数与透镜的曲率半径设为变量,使用默认的波前评价函数进行优化,使得系统质量更轻、结构更紧凑。

4) 为平衡畸变以及调制传递函数(MTF),选用评价函数约束面直径(DMVA)、畸变最大值(DIMX)以及平均调制传递函数(MTFA)对以上参数进行控制,将系统第一个面的二次项非球面系数与透镜的曲率半径设为变量进行优化,使得它们满足设计目标。

通过上述优化最终得到了有效焦距为 21.429 mm、 $F/1.59$ 以及后工作距为 4.526 mm 的非球面成像物镜,其结构示意图如图 2 所示。

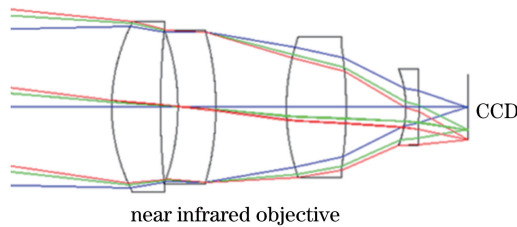


图 2 近红外成像系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the near infrared imaging system

2.3 穿透型目镜式头戴显示器系统

穿透型目镜式头戴显示器系统由 LCD 目镜以及分光镜(45°倾斜)组成,LCD 上的静脉图像通过头戴目镜进入人眼,佩戴者所观察到的静脉图像的位置及大小与近红外光照射的特定皮肤表面区域一致。特定皮肤表面区域对佩戴者的张角在 14°左右,因此设定目镜视场角的目标值为 14°。所选 LCD 有效区域为 9.83 mm×7.37 mm,分辨率为 XGA(1024 pixel×768 pixel),工作波长为 660 nm。系统的分辨率同样要达到 107 cycle·mm⁻¹,相对畸变也要小于 3%。作为医疗辅助的头戴目镜系统,设计时应考虑佩戴者的舒适度与人眼瞳孔直径的变化^[16],因此设定出瞳直径的目标值为 10 mm。由于佩戴者在观察分光镜反射的静脉图像的同时还需观察分光镜透射的外界信息,需要将光路转折,这需要充足的出瞳距离,因此设定出瞳距离的目标值为 50 mm。穿透型目镜式头戴显示器系统的设计目标如表 2 所示。

表 2 穿透型目镜式头戴显示器系统的设计目标

Table 2 Design objectives of the see-through head-mounted eyepiece display

Parameter	Objective	Parameter	Objective
Wavelength	660 nm	Distance of exit pupil	50 mm
Relative distortion	<3%	Exit pupil diameter	10 mm
Resolution	XGA (1024 pixel×768 pixel)	Field	14°
Image plane	9.38 mm×7.37 mm		

为了减小外界光能损失,确保不影响佩戴者观察外界事物,选取在 400~700 nm 波长范围内透射率为 80% 的分光镜。因此,外界光能利用率为 80%,图像源(LCD)光能利用率为 20%。借助于现代 LED 照明技术^[21],可确保图像源图像的感知不受影响。

目镜的设计步骤如下:

1) 首先设计最大视场为 14°、出瞳直径为 10 mm、出瞳距离为 50 mm 并满足物像放大关系的球面目镜系统,它由一片凸镜和一片双胶合镜组成,质量为 27 g。

2) 将系统的第一个面的二次项非球面系数与透镜的曲率半径设为变量,使用默认的波前评价函数进行优化,以提高系统的像质。

3) 减小透镜厚度与透镜间距,并将第一个面的二次项非球面系数与透镜的曲率半径设为变量,使用默认的波前评价函数进行优化,使得系统质量更轻、结构更紧凑。

4) 为平衡畸变以及 MTF,选用评价函数 DMVA、DIMX 以及 MTFA 对以上参数进行控制,将系统的第一个面的二次项非球面系数与透镜的曲率半径设为变量优化,使得它们都符合设计目标。

最终,通过优化得到了有效焦距为 49.778 mm、出瞳直径为 10 mm 以及出瞳距离为 50 mm 的非球面目镜系统,如图 3 所示。

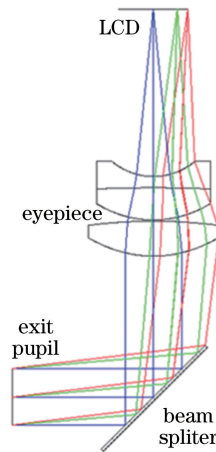


图 3 穿透型目镜式头戴显示器系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the see-through head-mounted eyepiece display

3 设计结果

3.1 近红外成像系统

设计完成后近红外成像系统的结构参数如表 3 所示, F 数由球面系统的 $F/1.62$ 降低到 $F/1.59$,提高了系统对近红外散射光的收集能力。本光学系统的质量为 7 g,而相应的球面系统的质量为 9 g,利用非球面设计的本系统的质量是相应球面系统的 77.8%。

图 4(a)~(c)分别为近红外成像系统的垂轴像差特性曲线、场曲与相对畸变曲线以及 MTF 曲线。从图 4(a)可以看出,系统在零视场、0.7 视场以及全视场的最大垂轴像差分别为 19.1, 20.9, 26.8 μm 。从图 4(b)可知,系统最大场曲为 0.023 mm,相对畸变最大值仅为 0.33%。图 4(c)为近红外成像系统在零视场、0.7 视场以及全视场下的 MTF 曲线(图中 OTF 表示光学传递函数),由图可知在空间频率 107 $\text{cycle}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处,三

个视场的 MTF 值介于 0.5~0.65 之间,而其球面系统三个视场的 MTF 值介于 0.36~0.44 之间,MTF 曲线得到很大的改善,近红外成像系统的成像质量优异。

表 3 近红外成像系统的结构参数

Table 3 Structure specifications of the near infrared imaging system

Surface	Objective	1	2	3	4	5	6	7	8	CCD
Radius /mm	Infinity	14.897	52.258	-24.593	-33.684	18.030	-43.069	-8.985	-55.060	Infinity
Thickness /mm	320	4	1.65	3	6.5	5	5.5	1.2	4.526	320
Conic		-0.422								
Glass		LAKN		SF8		LAKN12		SF54		

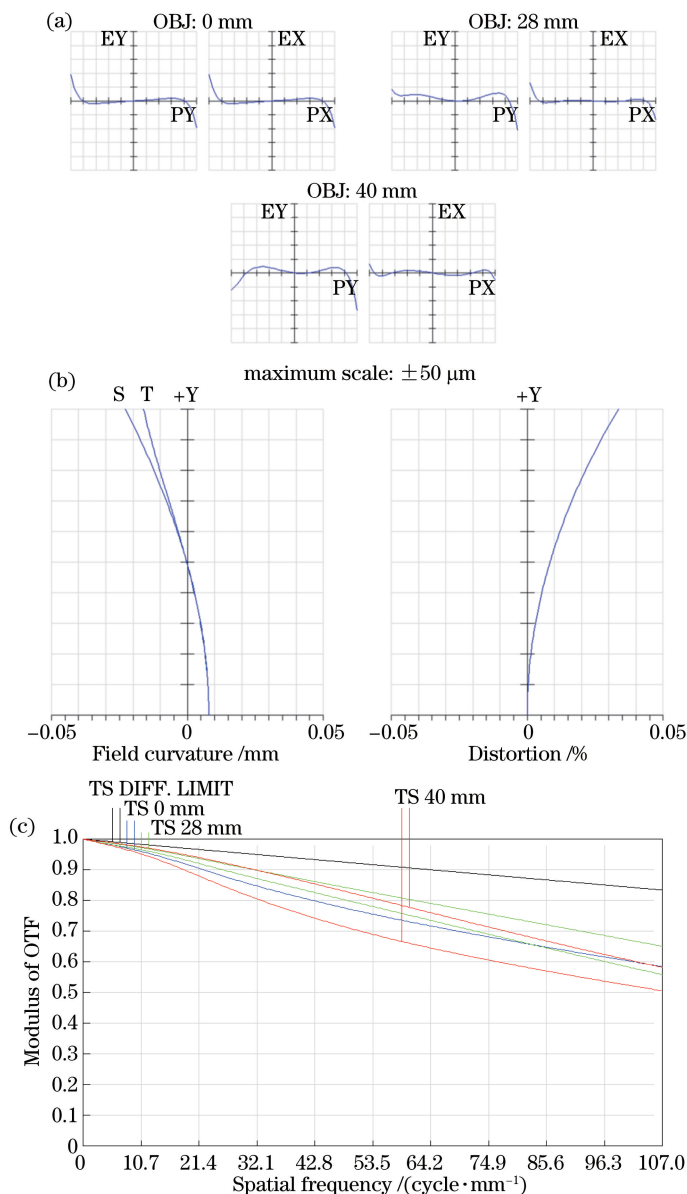


图 4 近红外成像系统的特性曲线。(a)垂轴像差;(b)场曲与相对畸变;(c) MTF

Fig. 4 Characteristic curves of the near infrared imaging system. (a) Lateral aberration;

(b) field curvature and relative distortion; (c) MTF

3.2 穿透型目镜式头戴显示系统

设计完成后的穿透型目镜式头戴显示器的结构参数如表 4 所示,目镜质量不足 15 g,而其相应的球面系统的质量为 27 g,非球面系统的质量是相应球面系统的 55.6%。因此,近红外成像系统和穿透型目镜式头戴

显示系统构成的单目系统质量不超过 22 g;若采用双目系统显像,则总质量不足 44 g,然而其相应的球面系统的双目系统的总质量为 72 g,前者较后者质量减轻了 44.4%。

表 4 穿透型目镜式头戴显示器的结构参数

Table 4 Specifications of the see-through head-mounted eyepiece display

Surface	Exit pupil	Beam splitter	1	2	3	4	5	LCD
Radius /mm	Infinity		20.795	-89.406	18.927	-236.768	11.323	Infinity
Thickness /mm	25	25	6.2	0.22	5.7	2	29.629	
Conic			-0.73					
Glass			SK5		PK2	SF1		

穿透型目镜式头戴显示系统是逆向设计的,图 5 给出了其 LCD 面上的特性曲线。图 5(a)~(c)分别为系统的垂轴像差特性曲线、场曲与相对畸变曲线以及 MTF 曲线。从图 5(a)可以看出,零视场、0.7 视场以及全视场的最大垂轴像差分别为 2.4,19.1,40.3 μm 。从图 5(b)可知,最大场曲值为 0.17 mm,对于头戴系统的

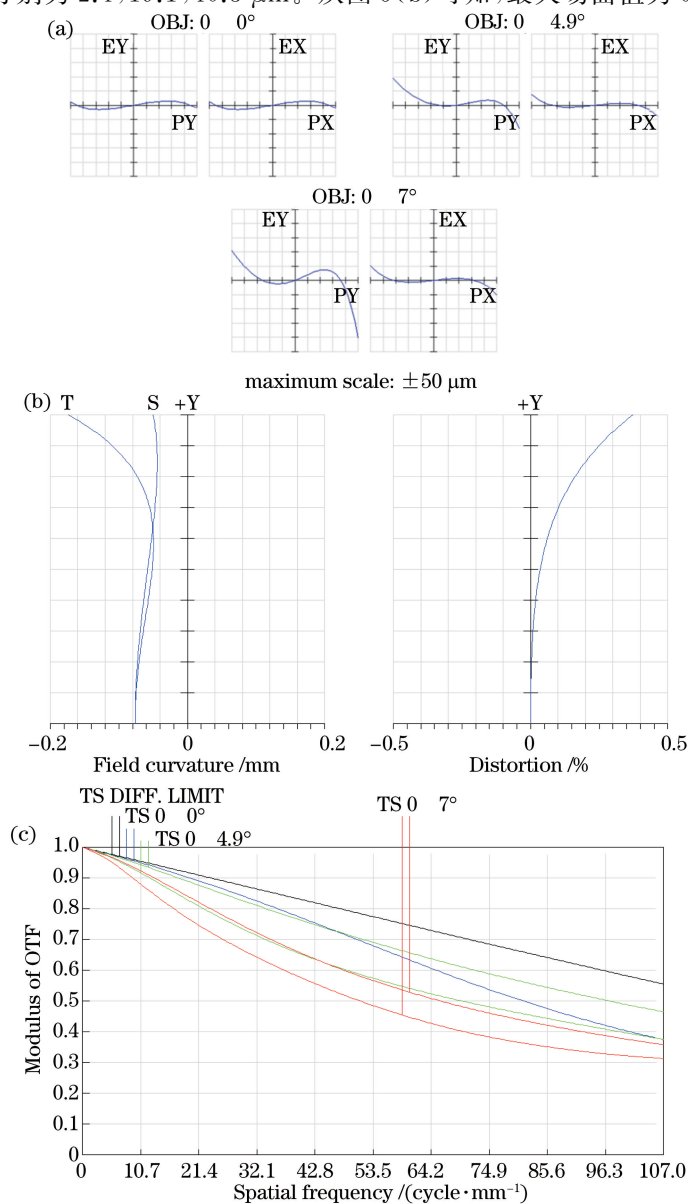


图 5 穿透型目镜式头戴显示系统的特性曲线。(a)垂轴像差;(b)场曲与相对畸变;(c) MTF

Fig. 5 Characteristic curves of the see-through head-mounted eyepiece display.

(a) Lateral aberration; (b) field curvature and relative distortion; (c) MTF

场曲,通常用人眼的离焦的屈光度(D)来衡量,根据牛顿公式,其换算关系^[22]为:

$$D = \frac{1000 \times x}{f'^2}, \quad (1)$$

式中 x 表示系统最大场曲值,单位为 mm, f' 为有效焦距,单位为 mm。代入相应数据,得到该系统的最大场曲为 $0.068D$ 。对于头戴系统来说,这是很小的^[23]。该系统的相对畸变最大值仅为 0.372% ,满足表 2 给出的设计要求。图 5(c)为穿透型目镜式头戴显示系统在零视场、 0.7 视场以及全视场下的 MTF 曲线,由图可知在空间频率 $107 \text{ cycle} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处,三个视场的 MTF 值均大于 0.31 ,满足 XGA 模式图像的显示要求。

4 结 论

设计了一款结构简单紧凑、质量轻且具有 XGA 分辨率的目镜式头戴静脉显像系统,其光学系统由采用二次曲面设计的近红外成像系统和穿透型目镜式头戴显示系统组成。近红外成像系统具有 $F/1.59$ 的大数值孔径,利于收集弱红外反射光成像;成像系统的垂轴像差小于 $26.8 \mu\text{m}$,场曲小于 0.023 mm ,相对畸变最大为 0.33% ,分辨率达到 XGA($1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$),成像质量优异。穿透型目镜式头戴显示系统结构简单紧凑,出瞳直径为 10 mm ,出瞳距离为 50 mm ,最大场曲为 $0.068D$,相对畸变最大值仅为 0.37% ,垂轴像差小于 $40.3 \mu\text{m}$,显示模式达到 XGA($1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$)分辨率。近红外成像系统和穿透型目镜式头戴显示系统构成的单目系统质量不超过 22 g ,双目显像系统的质量不超过 44 g 。综上,本研究设计的头戴静脉显示系统实现了高分辨率、小相对畸变要求下的轻小化目标,借助该系统佩戴者可观察到清晰的静脉图像,且不影响正常的医疗操作。

参 考 文 献

- [1] 朱建英, 张玲玲, 韩文军, 等. 静脉输液安全管理的方法及效果[J]. 中华护理杂志, 2008, 43(2): 153-155.
- [2] Zeman H D, Lovhoiden G, Vrancken C, *et al.* Prototype vein contrast enhancer[J]. Optical Engineering, 2005, 44(8): 086401.
- [3] Lillis K A, Jaffe D M. Prehospital intravenous access in children[J]. Annals of Emergency Medicine, 1992, 21(12): 1430-1434.
- [4] Brunette D D, Fischer R. Intravascular access in pediatric cardiac arrest[J]. The American Journal of Emergency Medicine, 1988, 6(6): 577-579.
- [5] Dale J C, Novis D A. Outpatient phlebotomy success and reasons for specimen rejection: a Q-probes study[J]. Archives of Pathology & Laboratory Medicine, 2002, 126(4): 416-419.
- [6] Zhang Qishen, Zhou Ya, Hu Xiaoming, *et al.* Hand vein recognition based on three dimensional point clouds matching[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0115005.
张祺深, 周 雅, 胡晓明, 等. 基于三维点云匹配的手掌静脉识别[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0115005.
- [7] Miyake R K, Zeman H D, Duarte F H, *et al.* Vein imaging: a new method of near infrared imaging, where a processed image is projected onto the skin for the enhancement of vein treatment[J]. Dermatologic Surgery, 2006, 32(8): 1031-1038.
- [8] Brafford J M, Lovhoiden G, Darty M, *et al.* Vein imaging apparatus: US D566283[P]. 2008-4-8.
- [9] Esparza J, Smith R S. Infrared aided method and apparatus for venous examination: US 5519208[P]. 1996-5-21.
- [10] Wood F, Luciano V, Goldman R. Vein scanner with user interface: US 9061109[P]. 2015-6-23.
- [11] Goldman R, Hunt D, Mock M, *et al.* Micro vein enhancer: US 8255040[P]. 2012-8-28.
- [12] Feng Qibin, Li Yani, Li Qigong, *et al.* Lens array with double freeform surface for LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1123003.
冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 等. 用于头显液晶像源 LED 背光的双自由曲面透镜阵列设计[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1123003.
- [13] Hu Xinrong, Liu Ying, Wang Jian, *et al.* Optical system design of head-mounted display based on planar waveguide of semi-transparent film[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922001.
呼新荣, 刘 英, 王 健, 等. 半透膜阵列平板波导式头戴显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9):

- 0922001.
- [14] Jiang Yang, Sun Qiang, Gu Lishan, *et al.* Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 508-514.
姜 洋, 孙 强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(3): 508-514.
- [15] Lü Xiangbo, Wang Zhen, Wei Zhangfan, *et al.* Lightweight design of a helmet-mounted display optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 43(3): 1022007.
吕向博, 王 振, 魏张帆, 等. 轻量化头戴显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022007.
- [16] Zhai Y, Wang Z Q, Liu Y J, *et al.* Optical design of head-mounted projective display for vein imaging[C]. 2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications, 2014: 791-795.
- [17] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical optics, aberrations and optical design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003, 283-284.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 283-284.
- [18] Ma Tao, Shen Yibing. Distortion detect of large field projection lithography lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 46-49.
马 韬, 沈亦兵. 大视场投影光刻物镜的畸变特性检测[J]. *光子学报*, 2005, 34(1): 46-49.
- [19] Laikin M. Lens design[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006: 68-71.
- [20] Zhang Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 438-439.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 438-439.
- [21] Zhao Ziquan, Wang Ruiguang, Zheng Xifeng, *et al.* Color gamut correction of LED displays[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 92-98.
赵梓权, 王瑞光, 郑喜凤, 等. LED显示屏的色域矫正[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(1): 92-98.
- [22] Yang Xinjun. Study on hybrid refractive/diffractive optical system design for head-mounted display[D]. Tianjin: Nankai University, 2005.
杨新军. 折/衍混合头盔显示光学系统设计研究[D]. 天津: 南开大学, 2005.
- [23] Zhao Shunlong. Study on optical system design for head-mounted projective display and optical assessment in visual space[D]. Tianjin: Nankai University, 2006.
赵顺龙. 投影式头盔光学系统设计及视空间的性能评价研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.