

# 投影式头戴静脉显像光学系统的设计

翟奕<sup>1,2\*</sup>, 刘永基<sup>1,2</sup>, 何远清<sup>1,2</sup>

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071;  
2. 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要:** 为了辅助静脉穿刺及相关的医疗操作, 设计了一款基于投影式头戴显示器(HMPD)的静脉显像系统, 其光学系统由近红外成像系统和穿透型HMPD构成。利用光学设计软件ZEMAX优化设计近红外成像系统, 使其具有 $F/2.6$ 的大数值孔径, 有利于弱反射红外光的收集成像。穿透型HMPD采用与近红外成像系统相同的光学结构, 有利于简化系统的加工装调。设计结果表明, 近红外成像系统成像质量优异, 分辨率达到QXGA( $2048 \times 1536$ )。穿透型HMPD具有18 mm的大出瞳直径及25 mm的大出瞳距离, 场曲小于0.03 D, 畸变小于0.32%, 达到QXGA分辨率显示模式。与现行的静脉显像系统相比, 本显像系统结构简单紧凑、佩戴舒适, 且具有超高分辨率, 是一款适用于辅助医疗的目视系统。

**关键词:** 静脉显像; 投影式头戴显示器; 光学设计

**中图分类号:** TN873.8; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150801.0114

## Optical system design of the head-mounted projective display for vein imaging

ZHAI Yi<sup>1,2\*</sup>, LIU Yong-ji<sup>1,2</sup>, HE Yuan-qing<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Optical Information Science and Technology,  
Ministry of Education, Tianjin 300071, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhaiyi@mail.nankai.edu.cn

**Abstract:** In order to assist venipuncture and related medical operations, a novel vein imaging device based on head-mounted projective display(HMPD) is designed. The correspondent optical system consists of near-infrared imaging system and see-through HMPD. With the help of optical design software ZEMAX, the near-infrared imaging system has a large numerical aperture with  $F$  number of 2.6, which is extremely conducive to receive and to image the weak reflected near-infrared light. The structure of the optical system of HMPD is same as that of near-infrared imaging part, which is conducive to simplify the processing and assembly. The results indicate that the performance of imaging system is excellent and the resolution is up to QXGA( $2048 \times 1536$ ). The see-through HMPD possesses an 18 mm exit pupil and a 25 mm eye relief, with the field curvature less than 0.03 D, the distortion less than 0.32% and the resolution up to QXGA. Compared with the current vein imaging device, the proposed system is characterized by compact structure, comfort wearing and ul-

收稿日期:2014-10-21; 修订日期:2014-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 81170873, No. 11104149)

trahigh resolution, which is suitable for assistant tools in venipuncture techniques.

**Key words:** vein imaging; head-mounted projective display; optical design

## 1 引 言

静脉穿刺是一种常见的医疗手段,广泛地应用于临床治疗。医护人员通常采用的目视和触摸法,虽然方便快捷,却存在一定的局限性,例如患者血管较细、肤色较深或脂肪层较厚,导致穿刺成功率明显下降<sup>[14]</sup>。根据静脉血中脱氧血红蛋白明显吸收近红外光这一特性<sup>[5]</sup>,静脉显像仪是近些年发展起来的皮下静脉显示设备。目前报道的静脉显像仪多数为台式或手持式,台式显像仪<sup>[6-8]</sup>体积普遍较大,便携性差;手持式显像仪<sup>[9, 10]</sup>虽较为便携,但增加了使用者穿刺的操作难度。2013 年底,Evena Medical 公司推出了一款名为“Eyes-On-Glasses”的静脉显像眼镜。该眼镜目前尚未面向市场,且有关其光学系统的信息均未有报道。

现代头戴式显示器(Head-Mounted Display, HMD)要求其光学系统不仅具有优良的光学性能,并且要求系统结构简单紧凑、体积小、重量轻<sup>[11]</sup>。目前大多数头戴式显示器采用传统的共轴目镜结构<sup>[12-14]</sup>,然而该结构已无法解决系统对高成像质量的要求与小型轻量化之间的矛盾。为克服上述缺点,Ferguson 首次提出了投影式头盔系统(Head-Mounted Projective Display, HMPD)的概念<sup>[15]</sup>。利用投影物镜的对称性和返射屏将入射光线沿原路返回的作用,HMPD 相比于以目镜为基础的 HMD 可获得更小的体积和质量、更大的视场以及更小的光学畸变。

本文设计了一款新型的头戴式静脉显像系统,其光学系统由近红外成像系统和穿透型投影式头戴显示器组成。佩戴者可直接于皮肤表面观察到清晰的静脉图像,且不影响观看外界事物。相比于现有的静脉显像系统,本系统具有结构简单紧凑、佩戴舒适、高分辨率以及易于加工装调的特点。

## 2 系统设计

### 2.1 系统结构及设计原理

图 1 为头戴式静脉显像系统的原理图。它主要由分光镜、近红外成像系统、穿透型 HMPD 和计算机等组成。采用波长 760 nm 的近红外光为照明光源照射需显像的皮肤区域。光线经皮肤表面反射后,携带着皮下静脉分布信息,经分光镜反射由成像系统成像于 CCD 探测器,并转化为数字图像信号。经计算机实时增强后,输送至 HMPD 的微显示器。采用波长 660 nm 的 LED 阵列为投射光源,图像经 HMPD 投射回原照明区域,使该区域的静脉分布图像清晰地显示于皮肤表面。

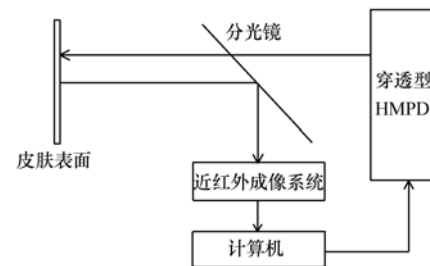


图 1 头戴式静脉显像系统示意图

Fig. 1 Layout of head-mounted vein imaging system

### 2.2 近红外成像系统

投影式头戴静脉显像光学系统的设计是在 Zemax 环境下完成的。近红外成像系统由成像物镜和 CCD 探测器组成,用于成像包含静脉信息的反射近红外光。为满足临床需求,成像系统应具备高分辨率和低畸变,其相对畸变要求小于 3%<sup>[16]</sup>。选取 CCD 探测器为黑白型,靶面有效区域为 8.8 mm × 6.6 mm,分辨率为 QXGA(2 048 × 1 536),像元尺寸为 4.297 μm × 4.297 μm。因此,计算得到 CCD 的奈奎斯特频率即像面分辨率为 116 cycles/mm。考虑到静脉穿刺等医疗操作的实际需要,照明区域设定为 64 mm × 48 mm,系统距皮肤表面的垂直高度为 320 mm。为充分利

用 CCD 靶面成像,因其靶面半宽为 5.5 mm,则成像系统的物像放大率应为 0.137。表 1 给出了近红外成像系统的具体设计参数。

表 1 近红外成像系统设计参数

Tab. 1 Specific parameters of near-infrared imaging system

参数	设计指标
工作波长	760 nm
畸变	< 3%
分辨率	QXGA, 2 048 × 1 536
CCD 靶面有效区域	8.8 mm × 6.6 mm
物面宽度	64 mm × 48 mm
物距	320 mm
物像放大率	0.137

为避免造成人体伤害,照明光源的功率较低,反射近红外光的能量较弱,因而成像系统需具备较大的数值孔径。双高斯系统为对称结构,具有大数值孔径、高分辨率、低畸变的特点<sup>[17-18]</sup>。根据表 1 给出的设计要求,选取一个  $F/2.5$ ,有效焦距为 100 mm 的双高斯型六片式镜组(USP 4390252)为初始结构。为与穿透型 HMPD 相一致,成像系统应满足双波长 760 和 660 nm 下均能够清晰成像。以此为起点进行优化设计,具体的设计步骤如下:

(1) 设定工作波长为 760 和 660 nm,权重均为 1,粗略地缩小镜头尺寸,以各透镜各曲面的曲率半径为变量进行优化。

(2) 逐步地减小物面与第一片镜的距离,每进行一步,首先以后工作距为变量进行优化,再以各透镜各曲面的曲率半径为变量进行优化,直至物面距离第一片镜为 320 mm,同时满足所需的物像放大率。

(3) 最后再以各透镜各面的曲率半径为变量,优化系统的场曲、畸变和调制传递函数( Modulation Transfer Function, MTF)。适当调整各优化函数权重,使得系统在双波长 760 和 660 nm 下均满足成像要求。

图 2 为近红外成像系统的结构示意图。该成像系统的有效焦距为 43 mm,  $F$  数为 2.6,后工作

距为 26 mm。成像物镜直径为 21 mm,质量仅为 8.4 g。

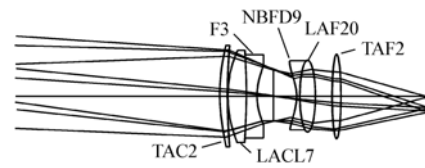


图 2 近红外成像系统示意图

Fig. 2 Layout of near-infrared imaging system

### 2.3 穿透型投影式头戴显示系统

穿透型 HMPD 由微显示器、投影物镜、分光镜和返射型材料屏幕构成,其结构示意图由图 3 给出。微显示器上的静脉图像经投影物镜成像,光线透过与光轴成  $45^\circ$  放置的分光镜,入射至返射屏。由于返射型材料的特殊作用<sup>[15]</sup>,光线沿入射方向原路返回至分光镜,并经分光镜反射进入位于系统出瞳处的人眼。为了在被照明皮肤区域真实再现静脉图像,HMPD 所成投影像的大小应与照明区域相同,即近红外成像系统的物面。同时考虑到 HMPD 和成像系统距皮肤表面的高度近似,因此设计两个系统具有相同的物像关系。投影物镜采用与近红外成像系统的成像物镜相同的光学结构,如图 2 所示,工作波长为 660 nm,这有利于保持 HMPD 和成像系统的一致性,并且有利于简化总体系统的加工、装调。同样地,要求 HMPD 的相对畸变也应小于 3%。微显示器采用与 CCD 探测器相匹配的对角为  $0.7''$ ,显示模式为 QXGA 的液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)。

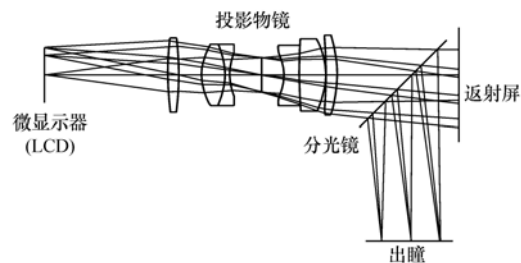


图 3 穿透型 HMPD 示意图

Fig. 3 Layout of see-through HMPD

作为辅助医疗操作的头戴目视系统,HMPD

的设计应充分考虑人的生理因素影响和佩戴舒适度。对于投影式头戴显示系统,系统出瞳是投影物镜出瞳经分光镜所成的像,其大小由投影物镜决定,出瞳距离则由分光镜与投影物镜出瞳的间距决定。设计的HMPD出瞳直径为18 mm,足以匹配于人眼瞳孔。将分光镜置于投影物镜后24 mm处,系统的出瞳距离为25 mm,适当调整分光镜相对于投影物镜的位置,则可获得满足特定需求的大出瞳距离。投影像的大小和位置与反射屏的位置和形状无关<sup>[19]</sup>。本设计中,反射屏置于分光镜后12 mm处,直径为28 mm,适用于微小型头戴显示系统。单目HMPD的质量(包括投影物镜、分光镜和反射屏在内)小于15 g,则包含近红外成像系统在内的单目显像系统的质量小于24 g,双目显像系统的总质量不超过48 g。

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波长范围内透过率为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16%。借助于现代LED照明技术<sup>[20]</sup>,可确保图像源图像的感知不受影响。

综上所述,表2给出了穿透型HMPD的具体设计参数。

表2 穿透型HMPD设计参数

Tab.1 Specific parameters of see-through HMPD

参数	设计指标
工作波长	660 nm
微显示器	LCD, 对角0.7"
显示模式	QXGA, 2 048 × 1 536
相对畸变	< 3%
出瞳直径	18 mm
出瞳距离	> 25 mm
外界光能利用率	80%

### 3 设计结果

#### 3.1 近红外成像系统

图4(a)~(c)分别给出了近红外成像系统的垂轴像差曲线、场曲与畸变曲线以及调制传递函数(MTF)曲线。可以看出,零视场、0.7视场及全

视场的最大垂轴像差分别为6.2, 17.4和17.7 μm。最大场曲值为0.08 mm,相对畸变很小,最大值仅为0.31%。在空间频率116 cycles/mm处,3个视场的MTF值均大于0.5。近红外成像系统的成像质量优异。

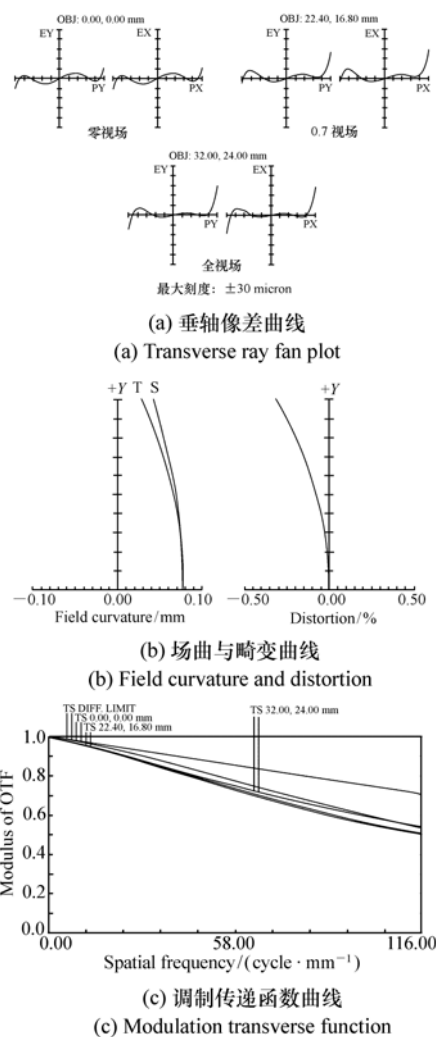


图4 近红外成像系统的特性曲线

Fig.4 Characteristic curves of near-infrared imaging system

#### 3.2 穿透型投影式头戴显示系统

穿透型HMPD的设计是逆向设计,图5给出了其LCD面上的特性曲线。图5(a)是零视场、0.7视场和全视场下,HMPD的垂轴像差曲线。从中可以看出,3个视场下的最大垂轴像差分别为7.5, 17和22 μm。场曲与畸变曲线由图5(b)给出,可以看出最大场曲为0.05 mm。对于头盔

系统的场曲,通常用人眼离焦的屈光度(D)来衡量,根据牛顿公式,其换算关系为<sup>[21]</sup>:

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

式中, $x$ 为以 mm 表示的系统最大场曲值, $f'$ 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 0.03 D。对于头盔系统来说,这是

很令人满意的<sup>[22]</sup>。穿透型 HMPD 的最大畸变仅为 0.32%,满足表 2 给出的设计要求。

图 5(c)给出了零视场、0.7 视场以及全视场下 HMPD 的 MTF 曲线。可以看出,在空间频率 116 cycles/mm 处,3 个视场的 MTF 值均大于 0.5,满足 QXGA 模式图像的显示要求。

## 4 结 论

本文设计了一款结构简单紧凑、佩戴舒适、具有超高分辨率的投影式头戴静脉显示系统,其光学系统由近红外成像系统和穿透型 HMPD 构成。近红外成像系统具有  $F$  数为 2.6 的大孔径,特别有利于弱红外反射光的收集成像。成像质量优异,垂轴像差小于 18  $\mu\text{m}$ ,场曲小于 0.08 mm,最大畸变仅为 0.31%,分辨率达到 QXGA(2 048  $\times$  1 536)。穿透型 HMPD 采用与近红外成像系统相同光学结构,有利于总系统的加工、装配。同时,HMPD 具备 18 mm 的大出瞳直径以及 25 mm 的大出瞳距离,像质质量高,垂轴像差小于 22  $\mu\text{m}$ ,场曲小于 0.03 D,最大畸变为 0.32%,并且达到 QXGA 超高分辨显示模式。外界光能利用率为 80%,足以确保佩戴者观察外界事物不受影响。包含近红外成像系统和 HMPD 在内的单目显像系统质量仅为 24 g,双目显像系统的质量也仅为 48 g。综上,本文所设计的投影式头戴静脉显示系统实现了超高分辨率、小畸变要求下的轻小型化,佩戴者透过该系统可于皮肤表面直接观察到清晰的静脉图像,且不影响正常的医疗操作,是一款适用于辅助医疗的高性能目视系统。

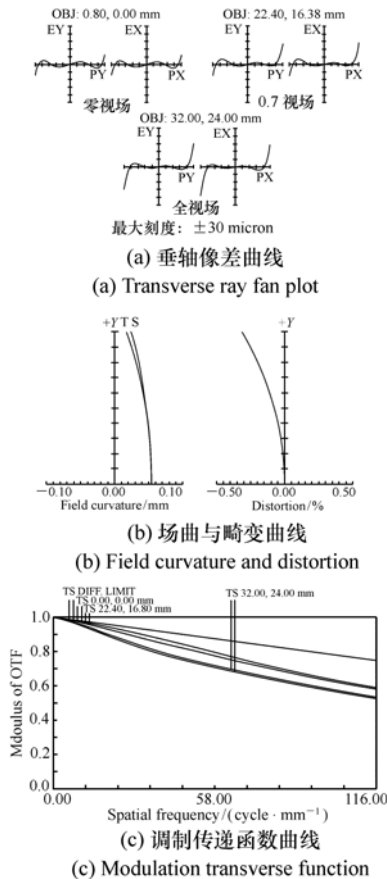


图 5 穿透型 HMPD 的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curves of see-through HMPD

## 参考文献:

- [1] ZEMAN H D, LOVHOIDEN G, VRANCKEN C, *et al.*. Prototype vein contrast enhancer[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8):086401.
- [2] LILLIS K A, JAFFE D M. Prehospital intravenous access in children[J]. *Ann. Emerg. Med.*, 1992, 21(12):1430-1434.
- [3] BRUNETTE D D, FISCHER R. Intravascular access in pediatric cardiac arrest[J]. *Am. J. Emerg. Med.*, 1988, 6(6):577-579.
- [4] DALE J C, NOVIS D A. Outpatient phlebotomy success and reasons for specimen rejection[J]. *Arch. Pathol. Lab. Med.*, Shenyang, 2002, 126(4):416-419.
- [5] MIYAKE R K, ZEMAN H D, DUARTE 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]. *Dermatol Surg.*, 2006, 32(8):1031-

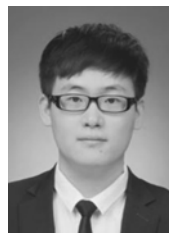
1038.

- [6] ESPARZA J, SMITH R S. Infrared aided method and apparatus for venous examination [P]. US Patent, 1996, No. 5519208.
- [7] DAWSON JR. F O, ESPARZA J. Apparatus for enhanced visual venous examination [P]. US Patent, 1999, No. 5947906.
- [8] ZHAROV V P, FERGUSON S, EIDT J F, *et al.*. Infrared imaging of subcutaneous veins [J]. *Laser in Surgery and Medicine*, 2004, 34(1):56-61.
- [9] THIEMAN J S. Compact feature location and display system [P]. US Patent, 2009, No. 20090076380.
- [10] GOLDMAN R, HUNT D, MOCK M, *et al.*. Micro vein enhancer [P]. US Patent, 2012, No. 8255040.
- [11] 王涌天. 自由曲面光学系统设计及其应用 [J]. *光学与光电技术*, 2012, 10(3):13-16.  
WANG Y T. Design and application of free-curved surface optical system [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2012, 10(3):13-16. (in Chinese)
- [12] OZAN C, JANNICK R. Head-worn displays; a review [J]. *J. Display Technology*, 2006, 2(3):199-216.
- [13] 赵秋玲, 王肇圻, 母国光, 等. 用于头盔显示器的折/衍混合目镜设计 [J]. *光子学报*, 2003, 32(12):1495-1498.  
ZHAO Q L, WANG ZH Q, MU G G, *et al.*. Hybrid refractive/diffractive eyepiece design for head-mounted display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12):1495-1498. (in Chinese)
- [14] 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.  
JIANG Y, SUN Q, GU L SH, *et al.*. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):508-514. (in Chinese)
- [15] FERGASON J. Optical system for head mounted display using retro-reflector and method of display an image [P]. US Patent, 2000, No. 5625572.
- [16] MA T, SHEN Y B. Distortion detect of large field projection lithography lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1):46-49.
- [17] 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)
- [18] HE Y Q, WANG Y, WANG ZH Q, *et al.*. Design of imaging keratometer with annular object and charge-coupled device detector [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(35):8532-8539.
- [19] HUA H, GIRARDOT A, GAO C, *et al.*. Engineering of head-mounted projective displays [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(22):3814-3824.
- [20] 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.  
ZHAO Z Q, WANG R G, ZHENG X F, *et al.*. Color gamut correction of LED displays [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1):92-98. (in Chinese)
- [21] 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.  
YANG X J. Study on hybrid refractive/diffractive optical system design for head-mounted display [D]. Tianjin: Nankai University, 2005. (in Chinese)
- [22] MOUROULIS P. *Visual Instrumentation* [M]. New York: McGraw-Hill, 1999.

## 作者简介:



翟 奕(1989—),女,天津人,硕士研究生,2008年于青岛大学获得学士学位,主要从事光学设计、眼视光学方面的研究。E-mail:zhaiyi@mail.nankai.edu.cn



何远清(1988—),男,山西太原人,硕士研究生,2014年于南开大学获得硕士学位,主要从事光学设计和视觉光学方面的研究。E-mail:yuanqing590@126.com



刘永基(1977—),女,河北秦皇岛人,博士,讲师,2002年于华中科技大学获得硕士学位,2005年于南开大学获得博士学位,主要从事光学设计和视觉光学方面的研究。E-mail:yjliu@nankai.edu.cn

---

## 《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国出版政府奖期刊提名奖
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊
- \* 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所  
中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:<http://www.eope.net>

定价:100.00 元/册