

文章编号 1004-924X(2010)03-0609-07

# 离轴反射式人眼视网膜成像自适应光学系统设计

程少园<sup>1,2</sup>, 曹召良<sup>1</sup>, 胡立发<sup>1</sup>, 穆全全<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1,2</sup>, 宣 丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了实现活体人眼视网膜的高分辨率成像, 设计了一套视网膜成像液晶自适应光学系统来校正人眼的动态变化像差。基于开环双波段模式, 分别采用夏克-哈特曼波前传感器 (SHWS) 和基于硅基板上的液晶空间光调制器 (LCOS-SLM) 来探测和校正人眼以及系统的波前像差; 且分别采用近红外波段 (790 nm) 的超发光二极管和可见光波段 (570 nm) 的激光器作为波前探测和校正成像光源。系统采用离轴反射式结构来提高光能利用率, 减小色差。用 ZEMAX 对系统性能进行了分析, 证明设计的系统能够达到衍射极限, MTF@30 lp/mm 为 0.4 (对应视网膜上 4  $\mu\text{m}$ ), MTF@50 lp/mm 为 0.16 (对应视网膜上 2.5  $\mu\text{m}$ )。和闭环折射式系统相比, 能量利用率提高 1 倍以上, 且杂光和色差干扰小, 成像对比度好。

**关键词:** 自适应光学; 视网膜成像; 液晶空间调制器; 开环

**中图分类号:** TH703; TH786 **文献标识码:** A

## Design of reflective off-axis adaptive optical system for human retinal imaging

CHENG Shao-yuan<sup>1,2</sup>, CAO Zhao-liang<sup>1</sup>, HU Li-fa<sup>1</sup>,

MU Quan-quan<sup>1</sup>, LI Peng-fei<sup>1,2</sup>, XUAN Li<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** In order to obtain the high resolution human retinal images in vivo, an adaptive optical (AO) system for retinal imaging was designed to correct the dynamic human eye wavefront aberrations, especially high order ones. On the basis of an open-loop and two-wavelength mode, the system adopted a Shark-Hartmann wavefront sensor (SHWS) and a liquid crystal spatial light modulator to detect and correct the wavefront aberrations respectively and used a 790 nm near infrared luminescent diode and a 570 nm visible laser for the wavefront detection and retinal imaging. Furthermore, a reflective off-axis system was adopted to enhance the energy-utilizing rate and to avoid the chromatic aberrations and stray light. The optical system was simulated and analyzed with ZEMAX and results show that the optical system can achieve the diffractive limit, and MTF@30 lp/mm is 0.4 (4  $\mu\text{m}$  at

**收稿日期:** 2009-04-10; **修订日期:** 2009-05-14.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 50703039); 国家自然科学基金重点基金资助项目 (No. 60736042, No. 60578035)

retina), MTF@50 lp/mm is 0.16(2.5  $\mu\text{m}$  at retina). Compared with the close-loop refractive AO system, the system has doubled the energy-utilizing rate at least, and shows its some merits in high energy-utilizing rate, low stray light and little disturbing effect caused by chromatic aberrations.

**Key words:** adaptive optics; retinal imaging; liquid crystal spatial light modulator; open-loop

## 1 引言

人体的多种疾病,如糖尿病,高血压等,都会使人眼视网膜产生病变<sup>[1]</sup>。传统的检眼镜虽然可以对人眼发生的病变进行检查和诊断,但是,由于受到人眼像差和瞳孔衍射的影响,不能观察到人眼视网膜的微细结构,因而不能对相关疾病进行早期诊断<sup>[2-3]</sup>。自适应光学技术可以弥补传统检眼镜的不足,该技术可通过实时校正人眼动态变化的各种低阶像差(如离焦、像散等)和高阶像差(彗差、球差、三角叶等)<sup>[4-7]</sup>,进而获得高分辨率的视网膜图像,使通过眼底检查来对相关疾病进行早期检查和诊断成为可能<sup>[8-9]</sup>。

液晶空间光调制器由于具有体积小,成本低,功耗小,校正能力大,无机械运动以及空间分辨率高等优点<sup>[10-11]</sup>,在活体人眼视网膜高分辨率成像上具有很大的潜力。早些时候,本课题组已经设计了一套视网膜成像液晶自适应光学系统,并获得了较为清晰的人眼视网膜高分辨率图片<sup>[12-13]</sup>。然而,原来的系统采用单波段模式,即波前探测和校正成像共用一个光源,一方面限制了成像波长(近红外);另一方面,限制了成像区域(受限于波前探测器的动态范围)。本文提出的新的设计方案采用双波段模式,即近红外波段(790 nm)用于波前探测,可见光波段(570 nm)用于校正成像。原系统采用的是折射系统,不仅光能损失大,杂散光较强,还存在较大色差(对于双波段模式),而采用离轴反射式结构可以有效地解决上述问题<sup>[14-15]</sup>,有效地提高探测校正效果和成像对比度。需要注意的是,双波段系统所产生的初级色差可以通过调整两个支路加以消除,但是高级色差却难以消除,需进一步研究解决。

## 2 主要的设计指标

该系统分照明光路,瞳孔监控光路和波前探测与校正成像光路等。照明光路和瞳孔监控光路在原系统中得到很好应用,本文从略<sup>[12]</sup>,这里将重点介绍主干光路,即波前探测与校正成像光路的设计。新系统的主要设计指标如下:

探测波长:790 nm

成像波长:570 nm

探测照明区域(视网膜上直径):50  $\mu\text{m}$

成像照明区域(视网膜上直径):600  $\mu\text{m}$

成像放大率:-8.64

视网膜上的分辨率:2.5  $\mu\text{m}$

成像 CCD 的像元尺寸:10.8  $\mu\text{m}$

SHWS 的子孔径数:17×17

SHWS 的子孔径直径:300  $\mu\text{m}$

SHWS 的微透镜焦距:4 mm

LCOS 的像素数:512×512

LCOS 的像素尺寸:15  $\mu\text{m}$

探测波长选 790 nm 的近红外光是因为该波段人眼视网膜的反射率比较高,而且对人眼的刺激比较小,可以实时探测。成像波长选 570 nm 可见光是因为该波段对血管的成像对比度比较好,而且可以得到比近红外波段更高的极限分辨率。探测照明区域主要是综合考虑波前探测器的动态范围和 CCD 面板上像元尺寸的基础上得出的。为了实现超像素级的探测灵敏度,每一个子孔径的小光斑应对应 4 个以上的像素;而为了保证较大的动态范围和较高的信噪比,小光斑应尽量小,所以一个小光斑对应 4 个像素比较合理。成像照明区域主要是因为人眼的等晕角大约是  $2^\circ$ ,对应视网膜上的区域直径约为 600  $\mu\text{m}$ 。视网膜上的分辨率是由人眼瞳孔的衍射极限分辨率决定的(经过自适应光学校正,可以达到接近衍射极限的效果)。SHWS 的参数需根据人眼像差(也包含一部分系统自身像差)的探测需求决定,既要

保证其动态范围,又要保证其探测灵敏度。

### 3 波前探测与校正成像系统的模拟与分析

波前探测与校正成像光路是该系统的主干光路,如图1(用ZEMAX模拟)。人眼眼底反射出来的光聚焦于人眼前250 mm附近处。选择250 mm的距离,是因为大多数人眼(包括低度近视和散光眼)都可以清晰地看到该位置,即可以通过人眼的自动调焦来减小离焦,有利于提高波前探测和校正成像的质量。对于高度近视、高度远视和高度散光的人眼,可以在人眼前加入补偿镜,来补偿过大的离焦和象散等低阶像差。人眼瞳孔位于抛物面1(Paraboloid 1)的2倍焦距处,并成像于小孔1(Hole 1)处。分色片(Dichroic)将790 nm探测光和570 nm成像光分别分给夏克-哈特曼波前探测器(SHWS)和基于硅基板上的液晶波前校正器(LCOS)。SHWS的微透镜阵列和LCOS的液晶面板需要同时与人眼瞳孔(或H1)保持共轭关系,否则会对波前探测和波前校正带来致命的影响。小孔Hole 2和Hole 3位于人眼视网膜的共轭处,和Hole 1一起消除人眼前表面的杂散光。这些杂散光会对波前探测和校正成像带来不利的影响。为了更好地消除人眼前表面和补偿透镜表面的杂散光,照明光路可以采用环形照明<sup>[16]</sup>。需要强调的是,激光会产生散斑,因而需要在照明光路中加入一个匀光器<sup>[16-17]</sup>;液晶空间光调制器只能对和液晶分子方向平行的线偏振光

进行位相调制<sup>[10-11]</sup>,因而需要在LCOS前放置一块偏振片,偏振方向和液晶分子方向平行(图1中未画出)。

人眼视网膜的有效反射率很低,约为 $10^{-4}$ 到 $10^{-5}$ <sup>[18]</sup>,而且人眼的安全照明光强很小,一般只有几百微瓦(这与照明波长、照明时间和照明面积有关)。为了保证受试者的绝对安全,一般最大照明光强应选为安全光强的1/20以下。因而,人眼视网膜反射出来的光非常弱,也非常宝贵,所以测试时必须努力提高系统的光能利用率和探测器的信噪比,进而提高波前探测精度和成像对比度。开环模式和离轴反射式结构,可以提高光能利用率(对于探测支路,单波段可以提高1倍以上;采用双波段模式,可以再提高1倍)。采用离轴反射系统的更重要原因是离轴反射系统不存在色差,可以有效避免折射系统所引入的色差。这些色差,尤其是高级色差,大大影响了波前探测和校正成像的效果。成像CCD前面的镜子采用透镜是为了方便进行调焦,它不会对波前探测和校正成像带来较大影响。

表1给出了5个抛物面的主要参数(5个面都是凹面镜,表1中的正负号是将坐标变换考虑在内了),它们一方面要保证系统的瞳孔共轭关系,另一方面要保证两束光以接近平行光入射到SHWS的微透镜阵列和LCOS的液晶面板上。同时,还要为各种仪器留下足够的摆放空间。

表1 结构参数

Tab. 1 Configuration parameters

Surface	Radius/mm	Decenter Y/mm	Tilt X/(°)
Paraboloid 1	-500	65.8	8
Paraboloid 2	400	-40	0
Paraboloid 3	-300	30	0
Paraboloid 4	-400	-40	0
Paraboloid 5	400	40	0

通过ZEMAX软件对系统的性能进行了分析。用焦距为16.01 mm和16.19 mm的理想透镜分别代替570 nm光和790 nm光调焦后的人眼有效焦距,当物距为17.1 mm(570 nm光未调焦时的人眼焦距)时,像距分别为250 mm(人眼明视距离)和302 mm。这里选择理想透镜是为了评价系统自身的像差,不计人眼的像差。实验

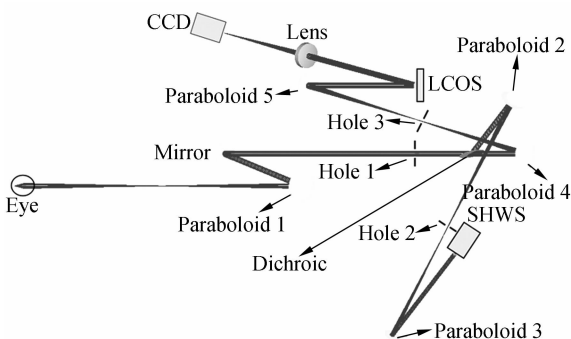


图1 自适应光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AO optical system

表明人眼的初级色差较大(对于 570 nm 和 790 nm,轴向色差约为  $0.7 \text{ m}^{-1}$ ),在装调光路时应该并可以加以消除;而人眼的高级色差很小,对校正成像的影响可以忽略。由图 2 可以看到系统在全视场都达到了衍射极限的水平。人眼视网膜的锥状视觉细胞一般为  $4 \text{ }\mu\text{m}$  左右,其对应像方调制传递函数  $\text{MTF}@30 \text{ lp/mm}$  为 0.4;而视网膜中心小凹处的锥状细胞非常小( $<2 \text{ }\mu\text{m}$ ),受到瞳孔衍射极限的限制,难以观察。为了使系统能够观察尽可能小的细胞(尽管图像可能不够清晰),设计的视网膜上的分辨率接近衍射极限,约为  $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,其对应的像方调制传递函数  $\text{MTF}@50 \text{ lp/mm}$  为 0.16(如图 3)。虽然人眼的像差、加工和装调误差会使成像质量降低,但是经过自适应光学技术校正后仍然可以达到或接近衍射极限的水平。

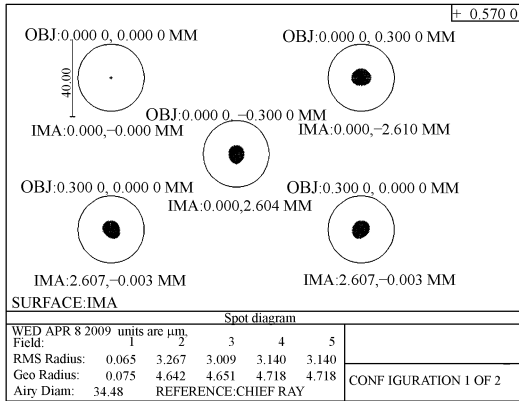


图 2 成像系统点列图

Fig. 2 Spot diagram of imaging system

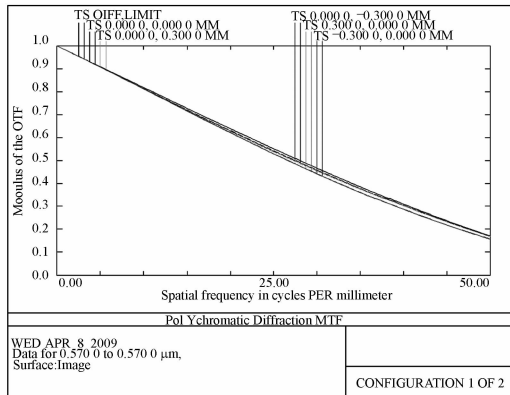


图 3 成像系统传递函数

Fig. 3 MTF of imaging system

像分为两个支路。波前探测器探测到的是人眼和系统的总像差,处理器对波前信息进行运算处理后向波前校正器发出控制信号,进行波前校正。开环和闭环模式的主要区别在于开环模式中探测器探测到的是人眼和系统的总像差,而闭环模式中探测器探测到的是上次校正后的残余像差;开环模式的一个校正周期为一次性校正,而闭环模式的一个校正周期需要多次反馈校正。因而,闭环校正精度往往较高,但不稳定(比如人眼的眨动等因素的影响);开环比较稳定,但是其一次性校正效果往往不是很理想。为了提高开环校正效果,需要保证波前探测的精度,同时要减小两个支路的非共光路像差。图 4 和图 5 分别是波前探测支路和校正成像支路中心视场的波前图,他们的 PV 值都小于  $0.005\lambda$ ,而二者之间的波前差更小。要保证波前探测器具有较大的波前像差探测能力,波前校正器具有较大的波前校正能力,应该使系统自身的像差尽可能小,所以图 4 和图 5 所示

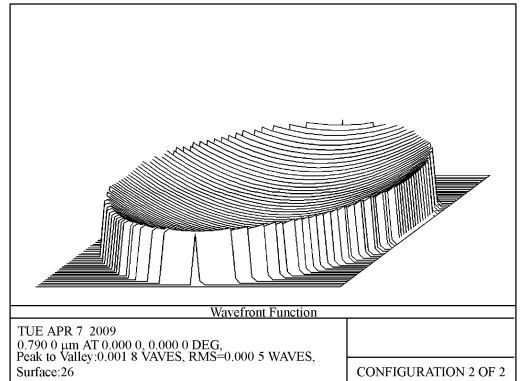


图 4 探测系统波前图

Fig. 4 Wavefront of detecting system

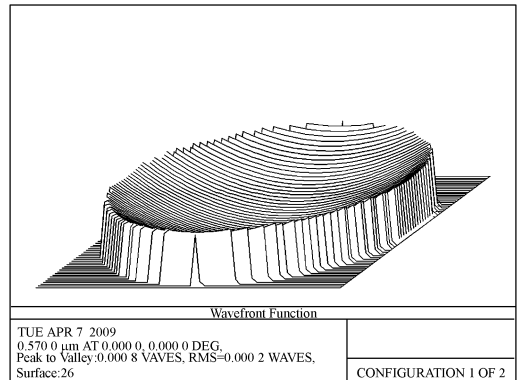


图 5 成像系统波前图

Fig. 5 Wavefront of imaging system

该系统采用开环模式,即波前探测和校正成

的波前像差都应该很小;为了提高自适应校正效果(尤其是对于开环校正模式),需要尽量减小探测支路和校正成像支路之间波前像差的差值,即所谓的非共光路波前像差,因而需要图4和图5所示的波前像差的差值尽量小(如果二者较大,则需要对波前探测器质心参考位置进行重新标定)。

为了更好地了解各个公差参数对成像质量的影响大小,本文对成像系统进行了公差分析,主要的公差参数如表2所示。

表2 主要公差参数

Tab.2 Main tolerance parameters

Type	Tilt X/(°)	Tilt Y/(°)	Decenter X/mm	Decenter Y/mm	Thickness /mm
Value	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

采用灵敏度的模式进行公差分析,标准选均方根波前差( $\lambda$ )。数据表明三个抛物面(Paraboloid 1,4和5)的倾斜,尤其是绕X轴的倾斜,对像质的影响较大。在加工和装调时应特别注意。统计结果表明,在该公差容限下,系统的均方根波前差:90% $\leq 0.029\ 98\lambda$ ;50% $\leq 0.018\ 71\lambda$ ;10%

$\leq 0.007\ 35\lambda$ 。系统的均方根波前误差设计值为 $0.000\ 51\lambda$ ,最差值为 $0.071\ 00\lambda$ ,平均值为 $0.020\ 93\lambda$ ,说明该光学系统在该公差条件下可以获得接近衍射极限的成像质量。该公差条件比较宽松,加工和装调比较容易实现。

## 4 结 论

本文设计了开环双波段模式离轴反射式人眼视网膜成像自适应光学系统。采用近790 nm红外光进行波前探测,可以减小照明光对人眼的刺激,实现了实时探测;采用570 nm可见光进行成像观察,提高极限分辨率,获得了更细微的视网膜结构信息,提高了毛细血管的对比度;采用离轴反射式结构,提高了能量利用率(1倍以上),消除了系统自身色差对波前探测和校正的不利影响。最后,用ZEMAX软件对波前探测和校正系统进行模拟分析,证明系统可以接近衍射极限水平,达到衍射极限的效果,MTF@30 lp/mm为0.4(对应视网膜上4  $\mu\text{m}$ ),MTF@50 lp/mm为0.16(对应视网膜上2.5  $\mu\text{m}$ );而且公差较为宽松,满足设计要求。

## 参考文献:

- [1] 王肇圻,许妍.基于眼模型的数字眼底相机设计[J].光学精密工程,2008,16(9):1567-1571.  
WANG Z Q, XU Y. Design of digital retina camera based on eye model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1567-1571. (in Chinese)
- [2] IROSHNIKOV N G, ANDREY V. Larichev Adaptive optics in ophthalmology[J]. *SPIE*, 2006,6284, 62840B-1-62840B-10.
- [3] LIANG J Z, WILLIAMS D R, MILLER D T. Super-normal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997,14(11):2884-2892.
- [4] 叶寒,廖文和,沈建新.波前像差引导的角膜切削模型及实现技术的研究[J].光学精密工程,2004,12(1):31-36.  
YE H, LIAO W H, SHEN J X. Wave-front guided ablation on cornea[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):31-36. (in Chinese)
- [5] 周传清,余雷,陆培华,等.准分子屈光手术中非球

面系数对球差以及切削深度的影响[J].光学精密工程,2007,15(2):167-172.

ZHOU C L, YU L, LU P H, *et al.*. Effect of asphericity parameter on Seidel aberration and ablation depth in laser refractive surgery[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):167-172. (in Chinese)

- [6] HOFER H, ARTAL P, SINGER B, *et al.*. Dynamics of the eye's wave aberration[J]. *J. Opt. Soc. Am.* 2001, A18, 497-506.
- [7] 全薇,宋贵才,王肇圻,等.人眼大视场波前像差特性研[J].光子学报,2007,36(6):1102-110.  
QUAN W, SONG G C, WANG Z Q, *et al.*. Aberrations of the Human Eye as in the Horizontal Visual Field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 1102-1105. (in Chinese)
- [8] LING N, ZHANG Y, RAO X, *et al.*. Small table top adaptive optical systems for human retinal imaging [J]. *SPIE*, 2002,4825:99-108.
- [9] 曹正林,廖文和. Zernike多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J].光学精密工程,2006,14(2):308-315.  
CAO Z L, LIAO W H. A new algorithm for human

- eyes's wavefront aberration fitting with Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 308-315. (in Chinese)
- [10] HU L H, XUAN L, LIU Y, *et al.*. Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. *Opt. Exps.*, 26(12): 6403-6409.
- [11] 刘伯晗, 张健, 吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 213-217.  
LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 213-217.
- [12] 程少园, 胡立发, 曹召良, 等. 人眼视网膜成像自适应光学系统的初步试验和改进设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1491-1493.  
CHENG S Y, HU L F, CAO Z L, *et al.*. Primary experiment and improvement design of adaptive optics system for human retinal imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1491-1493. (in Chinese)
- [13] 姜宝光, 曹召良, 穆全全, 等. 激光为光源的液晶自适应眼底成像系统[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1805-1809.  
JIANG B G, CAO Z L, MU Q Q, *et al.*. Liquid crystal based retina adaptive optical imaging system with laser source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1805-1809. (in Chinese)
- [14] 吴国栋. 离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2127-2131.  
WU G D. Calibration of distortion for three-mirror off-axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2127-2131. (in Chinese)
- [15] 李华强, 宋贺伦, 饶长辉, 等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1203-1207.  
LI H Q, SONG H L, RAO C H, *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1203-1207. (in Chinese)
- [16] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 人眼视网膜成像液晶自适应光学系统的优化设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(12): 3150-3153.  
CHENG S Y, CAO Z L, HU L F, *et al.*. Optimizing design of LC adaptive optics system for human retinal imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3150-3153. (in Chinese)
- [17] 田志辉, 刘伟奇, 李霞, 等. 激光显示中散斑的减弱[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1366-1370.  
TIAN Z H, LIU W Q, LI X, *et al.*. Speckle contrast reduction in laser display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1366-1370.
- [18] VAN N D, TIEMEIJER L F. Spectral reflectance of the human eye[J]. *Vision Res*, 1986, 26: 313-320.

#### 作者简介:



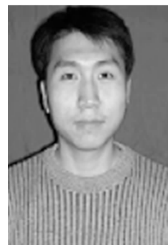
程少园(1982—)男,吉林白山人,博士研究生,2005年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学系统设计、视觉光学和自适应光学等方面的研究。E-mail: csycf@163.com



曹召良(1974—),男,河南济源人,博士,副研究员,1998年于河南师范大学获学士学位,2003、2008年中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,主要从事液晶自适应光学、光学设计和衍射光学等方面的研究。E-mail: caozlok@163.com



胡立发(1974—)男,湖北武汉人,博士,副研究员,1997年、2003年于东北大学分别获学士、博士学位,主要从事液晶自适应光学系统控制、液晶大气湍流模拟等方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn



穆全全(1980—)男,山西吕梁人,博士研究生,助理研究员,2003年于南开大学获学士学位,主要从事自适应光学技术及其应用、液晶光学器件等方面的研究。E-mail: muquanchuan@ciomp.ac.cn



李鹏飞(1981-)男,辽宁辽阳人,博士研究生,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事视觉光学和自适应光学等方面的研究。E-mail: lpfly211@163.com

#### 导师简介:



宣丽(1957-),女,江苏常州人,博士,研究员,博士生导师,1983年于吉林大学获学士学位,1986年于中科院长春物理所获硕士学位,1998于日本东北大学获得博士学位,主要从事液晶自适应光学、液晶器件物理、液晶材料等方面的研究。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:严寒)

#### ●下期预告

## 水下声信号的激光干涉测量

张晓琳,唐文彦,孙和义

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

为准确测量水下目标的发声频率,在光学暗室下建立了一套激光干涉法探测水下目标的实验系统。当水下声源引起水表面波动时,用激光照射水面,携带声波信息的水面散射光与参考光干涉,利用精密光学测量装置探测光程差的改变,通过数据采集和处理系统从干涉信号的频谱分析图中解调出水下声信号的频率信息。干涉信号的频谱分析图中存在以水下声信号频率为中心的频带,频带宽度与自然水表面波引起的多普勒频移有关。实验结果表明:水下发声目标引起水表面波动的振幅在纳米级。系统可以实时探测出4~15 kHz的水下声信号,且测量标准偏差 $<7$  Hz。该系统满足水下目标识别技术的实时性、准确性等要求,为航空遥测水下目标奠定技术基础。