

# 消除角膜前表面反射杂散光方法的比较

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>, 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:** 人眼角膜前表面反射的杂散光是视网膜有效反射率的10~100倍, 对人眼波前像差探测和视网膜高分辨率成像影响很大。为了有效消除角膜前表面反射杂散光, 本文介绍并对比了偏振分束法、共焦滤波法、细光束离轴照明法和环形照明法等消除角膜前表面反射杂散光的方法。分析表明, 这些方法虽然都可以在一定程度上消除杂散光, 但均不够理想, 而环形照明法和共焦滤波法相结合具有光能利用率高、消杂光效果好、简单易行等优点, 是消除人眼角膜前表面杂散光的有效方法。

**关键词:** 杂散光; 像差探测; 环形光阑; 共焦小孔

**中图分类号:** O435.1; TH786 **文献标识码:** A

## Elimination of stray light reflected from anterior surface of cornea

CHENG Shao-yuan<sup>1,2</sup>, CAO Zhao-liang<sup>1,2</sup>, HU Li-fa<sup>1</sup>, MU Quan-quan<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, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** The stray light reflected from the anterior surface of a cornea is about 10~100 times of the effective reflectivity of a retina, which can greatly reduce the precision of eye aberration detection and retinal imaging quality. Therefore, it is necessary to avoid the stray light. In this paper, some methods to eliminate the stray light reflected from the anterior surface of cornea are introduced and compared, such as the Polarization Beam Splitting (PBS), confocal hole, annular illumination, and the illumination with decentered thin beam. Analyzed results show that although the methods can remove the stray light reflected from the anterior surface of cornea in some degrees, they are not ideal. After analyzing, it is pointed out that the combination of annular illumination and confocal hole is the best, and the method not only has the high light-efficiency, but also is much more effective and handy than other methods.

**Key words:** stray light; aberration detection; annular diaphragm; confocal hole

## 1 引言

眼睛是人们获取外部信息的主要渠道,同时也是了解人体内部健康信息的重要途径。人眼动态高低阶像差的探测对了解人眼的像差特性和视觉分析具有重要意义;而活体人眼视网膜的高分辨率成像对黄斑退化、视网膜炎、视觉细胞坏死等眼科疾病以及糖尿病、高血压等可引起视网膜变化疾病的早期诊断、监控、治疗都具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。目前,已有各种各样检眼镜和人眼像差探测仪被开发并用于临床观察<sup>[4-7]</sup>。近年来,由于波前探测技术和自适应光学技术的快速发展,人眼动态高低阶像差的探测和活体人眼视网膜的高分辨率成像等研究得到了极大关注<sup>[8-11]</sup>。

然而,无论是人眼高阶像差的探测,还是活体人眼视网膜的高分辨率成像,都面临着一个棘手的问题,即消除人眼角膜前表面杂散光的问题<sup>[12-14]</sup>。这是由于当进行人眼像差探测和视网膜成像时,需要用光源照明人眼底;而人眼视网膜的反射率很低,加上瞳孔的光束切割作用,从人眼眼底反射出来的光只有入射光的 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ <sup>[15]</sup>,远小于人眼角膜前表面的反射率(约为0.02)。因此,为了提高人眼波前像差的探测精度和视网膜的成像对比度,需要有效地消除人眼前表面的杂散光。目前,常用的消除人眼角膜前表面杂散光方法有偏振分束法、共焦滤波法、环形照明法和细光束离轴照明法。这些方法都是利用人眼角膜前表面是凸面(曲率半径约为7.7 mm)的特点,将其反射的发散杂散光滤掉。虽然它们都能在一定程度上消除人眼前表面反射的杂散光,但是仍存在一些问题,具有一定的局限性。偏振分束法,光能损失比较大,往往需要专门定做高消光比的偏振分光棱镜;共焦滤波法,只能用于成像区域很小而且照明光束口径较大的情况,而且不能消除角膜中心区域的杂散光;环形照明法,可以较好地消除角膜中心区域的杂散光,但外围区域的杂散光依然可以进入后续光学系统中;细光束离轴照明法,对光源和光路装调要求都很高,而且可能对眼波的波前探测和成像对比度带来一些不利的影响。通过对比分析,本文认为将环形照

明法和共焦滤波法相结合,是消除人眼角膜前表面杂散光最有效的方法。

## 2 偏振分束法

偏振分束法是在人眼前放一片偏振分束镜(PBS),它将照明光束中s线偏振态分量反射进入人眼。由于人眼具有消偏振作用,因而从视网膜反射回来的光是自然光(严格说是部分偏振光),其中的s线偏振光被PBS截止,p线偏振光则透过PBS进入后续的光学系统中(如图1)。而入射的线偏振光在人眼角膜前表面处的反射是镜面反射,所以角膜前表面反射光的偏振状态几乎不发生改变(仍然是s光),因而不能进入后续的光学系统中,即被PBS截止掉。这种方法虽然消除杂光效果较好,但是会使视网膜反射出的光能损失掉一半以上,而且偏振分束法要求PBS具有良好消光比,往往需要针对使用的波段来专门定做。因为人眼可承受的光强较弱,而人眼视网膜的有效反射率很低(考虑瞳孔的光束切割作用)只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ (跟波长有关),所以人眼视网膜反射出来的光非常珍贵,其光能损失将对探测器等光学元件性能要求更高,导致系统成本大大提高。因此,偏振分束法在实际应用中具有较大的局限性。

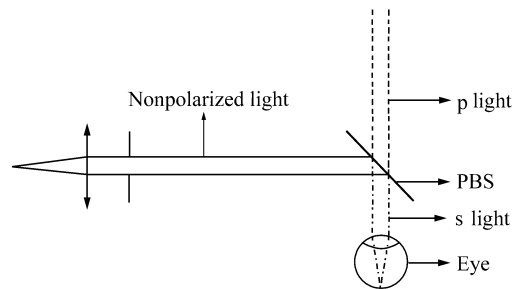


图1 偏振分束法的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PBS method

## 3 共焦滤波法

共焦滤波法就是在系统中人眼视网膜中间像的位置处放置一个小孔。由于人眼角膜前表面是凸面,其反射的杂散光是发散的光波,所以,共焦

小孔可以将角膜前表面反射的大部分杂散光滤掉(如图2)。然而角膜前表面中心区域反射的杂散光却不能消除。通过模拟可以知道,共焦小孔越小,消杂散光效果越好;照明光束在人眼瞳孔处的口径越大,消杂散光效果越好。图2(a)是共焦滤波消杂散光法的系统示意图。视网膜(retinal)反射出来的成像光束集中在中心区域,可以顺利地通过共焦小孔(confocal hole);而角膜(cornea)前表面反射的杂散光,其大部分被透镜框和共焦小

孔外面屏蔽掉了,只有中心区域的少量杂散光可以通过小孔。图2(b)表示视网膜中间像面处的横截图。可以看出经过透镜的杂散光(小点)绝大多数在中心共焦小孔(中心小圆)的外面,即只有小孔区域的杂散光未被消除掉。这种方法只能用于成像区域很小(即视网膜上的照明区域很小,因而共焦小孔可以做得很小)而且照明光束口径较大的情况。因此,共焦滤波法也具有一定的局限性。

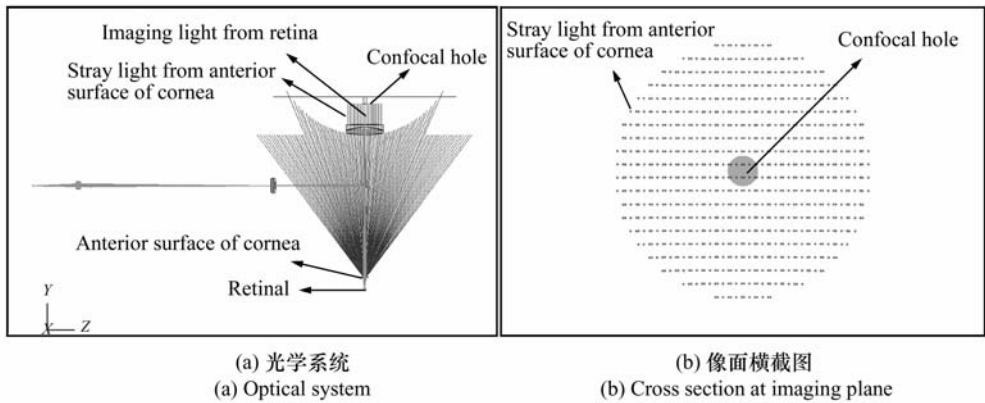


图2 共焦滤波法的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of confocal hole

### 4 环形照明法

环形照明法,是在照明光路中放置一个环形光阑(annular diaphragm),使其与人眼瞳孔共轭。这样,照明光束在人眼瞳孔处是环形光束,即人眼

瞳孔中心区域不被照明。由此,角膜前表面中心区域不会反射杂散光,而角膜前表面外围区域反射的杂散光会偏离光轴。研究表明,中心的非照明区域愈大,角膜前表面外围区域反射的杂散光偏离光轴程度越大,杂散光对后续系统的影响越小。然而,中心非照明区域越大,照明光的利用率

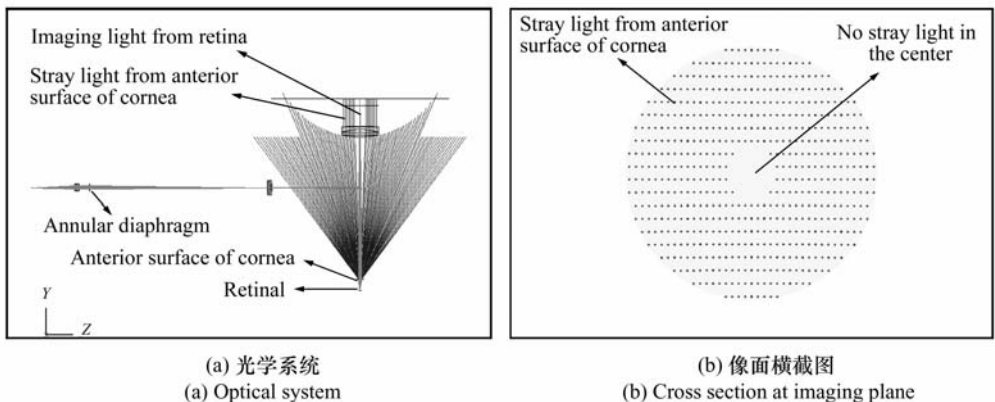


图3 环形照明法的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of annular illumination

越低,对光源的要求也就越高。如果后续的光学元件孔径较大,或离角膜较近,则可能使部分角膜前表面外围区域反射的杂散光进入后续的光学系统中,影响系统的成像质量或探测精度。图3(a)是用环形照明消杂散光法的系统示意图,图3(b)是视网膜中间像面处的横截图。可以看出,透镜后的中心区域没有杂散光(小点),但外围区域的杂散光可能进入后续光学系统中。因而,单纯的环形照明法也有一定的局限性。

## 5 细光束离轴照射法

细光束离轴照射法是选用很细的光束来照明人眼,并使该光束相对探测或成像系统的光轴有

一定的离轴,这样,角膜前表面反射的光就会被反射到一边去,不会进入后续的光学系统中去(如图4)。这种方法要求照明光束必须很细,不能采用宽光束照明,而且要求人眼瞳孔处的照明光束具有较大的离轴量。图4(a)是用细光束离轴照射消杂散光法的系统示意图,图4(b)是视网膜中间像面处的横截图。可以看出,透镜后的杂散光(小点)偏离到光轴的一侧。然而,如果人眼瞳孔处的照明光束离轴量较小,那么杂散光偏离的程度也会较弱,即会有部分杂散光进入后续光学系统中。为了保证细光束光能,对光源的要求也较高。另外,离轴照明可能对人眼的波前探测和成像对比度带来一些不利的影响。因此,也不是理想的选择。

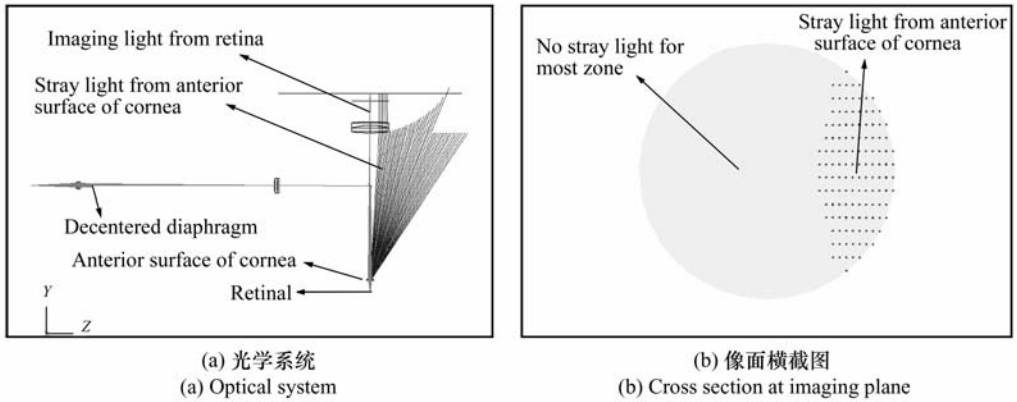


图4 细光束离轴照射法的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of illumination with decentered thin beam

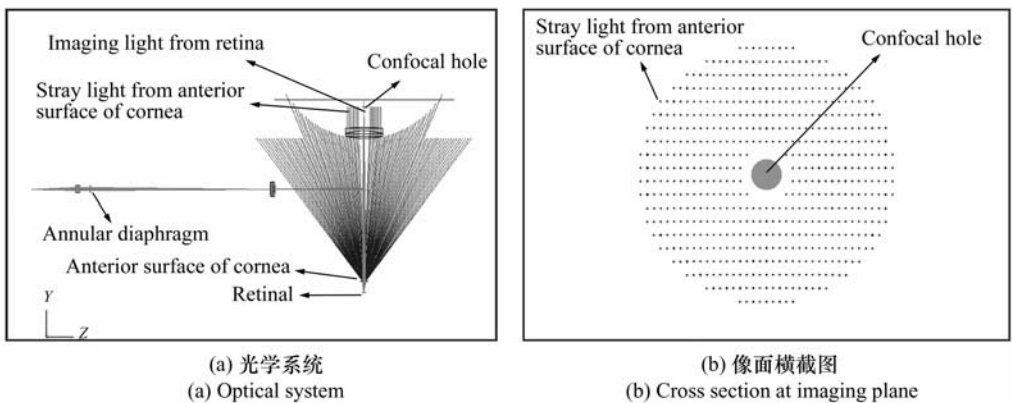


图5 环形照明与共焦滤波结合法的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of combination of annular illumination and confocal hole

角膜前表面杂散光的方法。

## 6 环形照明与共焦滤波结合法

环形照明与共焦滤波结合法是在照明光路中放置一个与人眼瞳孔共轭的环形光阑(如环形照明法),在成像或探测光路中的中间像面处放置一个共焦小孔(如共焦滤波法)。这样的设置可以将环形照明法与共焦滤波法的优点结合起来,有效地消除角膜前表面反射的杂散光(包括中心区域和外围区域)。图5(a)是用环形照明与共焦滤波相结合的消杂散光法的系统示意图,图5(b)是视网膜中间像面处的横截图。可以看出,这时,无论是中心区域的杂散光,还是外围区域的杂散光,都不能进入后续的光学系统中,其消杂散光(小点)效果非常好,而且对照明光束的孔径和照明光源的要求都比较低,是一种理想的消除人眼

## 7 结 论

有效地消除角膜前表面反射的杂散光对人眼像差探测和视网膜成像非常重要。本文对几种消杂散光方法分别进行了分析,结果表明,偏振分束法、共焦滤波法,环形照明法和细光束离轴照射法等方法虽然在某种特殊条件下可以在一定程度上消除人眼前表面反射的杂光,但是它们或者不能彻底地消除角膜前表面反射的杂散光,或者光能损失较大、操作复杂。通过对比分析,认为环形照明与共焦滤波结合法具有简单易行、光能利用率高、对光源要求低、消杂散光效果好等优点,是一种最有效的消除人眼角膜前表面反射的杂散光的方法。

### 参考文献:

- [1] 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 CH Q, 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)
- [2] 薛丽霞,饶学军,王成,等.人眼高阶像差校正和视觉分析系统[J].光学学报,2007,27(5):893-897.  
XUE L X, RAO X J, WANG C, *et al.*. Higher-order aberrations correction and vision analysis system for human eye[J]. *Acta Opt. Sinica*, 2007, 27(5):893-897. (in Chinese)
- [3] 程少园,宣丽,胡立发,等.人眼视网膜成像的自适应光学系统设计[J].光子学报,2009,38(5):1132-1135.  
CHENG SH Y, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design of adaptive optics system for human retinal imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5):1132-1135. (in Chinese)
- [4] WEBB R H, PENNEY C M, THOMPSON K P. Measurement of ocular local wave-front distortion with a spatially resolved refractometer[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31:3678-3686.
- [5] PALLIKARIS I G, PANAGOPOULOU S I, SIGANOS C S, *et al.*. Objective measurement of wavefront aberrations with and without accommodation[J]. *J. Refract. Surg.*, 2001, 17:S602-S607.
- [6] 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 ZH Q, XU Y. Design of digital retina camera based on eye model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1567-1571. (in Chinese)
- [7] LIANG J, WILLIAMS D R, MILLER D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, 14:2884-2892.
- [8] LING N, ZHANG Y D, RAO X J, *et al.*. Small table-top adaptive optical systems for human retinal imaging[J]. *SPIE*, 2002, 4825:99-108.
- [9] 全薇,凌宁,王肇圻,等.高级像差对人眼成像质量和视觉的影响[J].光电工程,2007,34(3):5-9.  
QUAN W, LING N, WANG ZH Q, *et al.*. Effect of high-order aberrations in human eye on retinal imaging quality and vision[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2007, 34(3):5-9. (in Chinese)
- [10] 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 ZH 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)
- [11] 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 CH 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)
- [12] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 人眼视网膜成像自适应光学系统的初步试验和改进[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1491-1493.
- CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, *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] 徐高平, 余翔, 薛丽霞, 等. 人眼不同瞳孔直径波前像差特性分析[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 38-41.
- XU G P, YU X, XUE L X, *et al.* . Property analysis of wavefront aberration of different human eye's pupils[J]. *Opto-Electronic Eng.* ,2005,32(7):38-41. (in Chinese)
- [14] 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 ZH 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)
- [15] DELORI FC, PFLIBSEN K P. Spectral reflectance of the human ocular fundus[J]. *Appl. Opt.* ,1989,28:1061-1077.

作者简介:程少园(1982—),男,吉林白山人,博士,主要从事液晶自适应光学、光学设计方法的研究。

E-mail:csycf@163.com