

眼底相机的均匀照明及消杂光干扰设计

李 淳¹, 孙 强¹, 刘 英¹, 卢欣霁^{1,2}, 王 健¹, 孙金霞^{1,2}, 刘建卓^{1,2}, 曲 锋^{1,2}

(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 100049)

摘要:给出了一种新型眼底相机照明系统的设计方案。针对现行眼底相机照明系统复杂的问题,对经典的柯勒照明光路进行改良设计,得到了一个结构简单的眼底照明系统。结构中除网膜物镜外,只需用到4片透镜,且眼底照明区域直径连续可调,充分利用了光能。通过在照明光路中添加黑点板和环形光阑,屏蔽了系统99%以上的杂散光,使眼底相机成像画面的信噪比达到20 dB以上,提高了对比度。同时在Gullstrand_Le标准眼模型上,得到一个均匀度达95%以上的照明区域。

关键词:眼底照相机;柯勒照明;眼模型;信噪比(S/N);均匀度

中图分类号:TH773;TB853.9 文献标识码:A

Design of uniform illumination system of fundus camera and its stray light shield

LI Chun¹, SUN Qiang¹, LIU Ying¹, LU Xin-qi^{1,2}, WANG Jian¹,
SUN Jin-xia^{1,2}, LIU Jian-zhuo^{1,2}, QU Feng^{1,2}

(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 100049, China*)

Abstract: A new design of illuminating system used in fundus cameras was proposed. The design was a improved system based upon Kohler illumination, and it used the near infrared light which could not be felt by human eye to deal with the problem of iris shrinking effect when illuminating light flashed. The design had only four lenses and the illuminated area could be adjust continuously, meanwhile the energy of the illumination light could be used efficiently. By inserting black dot boards and a ring stop in the light, the design could shield almost 99% stray light, and the Ratio of Signal to Noise(S/N) of the system could be up to 20 dB. The Gullstrand_Le standard eye model was used in the system, and a uniform illuminated area with the uniformity of 95% could be achieved.

Key words: fundus camera; Kohler illumination; eye model; Ratio of Signal to Noise(S/N); uniformity

收稿日期:2010-03-11;修订日期:2010-05-18

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z110);国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

1 引言

人眼的视网膜上分布着大量的毛细血管,是人体内唯一能直接观测到的毛细血管。对这些血管进行观测,是早期诊断眼病乃至全身多种疾病的重要途径。视网膜检查已经是现代医疗诊断的重要组成部分,而眼底相机就是用来观察和记录视网膜病变的重要工具,它将视网膜成像在探测器上,医生通过对所探测的眼底图片进行观察分析,即可得到患者眼底的病变信息。因此,眼底相机已成为现代医学不可缺少的重要的眼科器材。1925年,第一台眼底相机诞生于德国的 Zeiss 公司。经过 70 多年的发展,眼底相机的研发工作有了相当程度的进展^[1]。

现行的眼底相机系统的基本结构主要包括两部分:照明系统和成像系统。照明系统完成对视网膜的照明,成像系统将视网膜成像在探测器上。相机系统多采用共轴照明方式^[2],即照明系统和成像系统通过一块半反半透板来共用一组网膜物镜。不仅成像系统的优劣对眼底相机的性能有重要影响,而且照明系统也是决定眼底相机性能的重要环节,尤其是照明区域亮度的均匀性直接影响到成像质量;其次还要考虑如何屏蔽掉角膜和网膜物镜所产生的杂散光,这些杂散光一旦进入成像系统将会严重降低成像画面的对比度。虽然在现行的眼底相机设计中充分考虑了以上因素,但是最终的设计结果均较为复杂。以 Visual Pathways 公司的产品为例^[3],该公司所生产的

底相机,其照明光路除网膜物镜外,还用了 6 片透镜。

本文给出眼底相机照明系统的一个新的设计,对经典的柯勒照明光路进行改良,加入了 Gullstrand_Le 标准眼模型,将柯勒照明光路和标准眼模型相结合,设计出一个结构相对简单的照明系统。该系统满足照明均匀度的要求,屏蔽了大部分的杂散光。同时,系统充分利用柯勒照明的特点,使眼底被照明区域的大小灵活可调,有效地利用了光能。

2 眼底照明光学系统

2.1 屏蔽角膜反射光

照明光束入射人眼的第一层界面是角膜,角膜是位于眼层前壁的一层透明膜,它对入射人眼的光线有较强的反射作用,反射率达到 4%。在眼底图像的拍摄过程中,如果大量的角膜反射光进入成像光路,会使像面背景光增强,湮没眼底图像的某些细节;部分角膜反射光甚至会在探测器上聚焦,严重地影响成像质量。为避免角膜反射光的影响,采用照明光束从角膜边缘入射的方法,如图 1 所示。图 1(a)中,照明光线以一定的角度入射到角膜上一点,入射光线刚好原路返回,此时入射光线为临界状态;图 1(b)中,入射光线的入射点高于图 1(a),此时反射光线被反射出成像光路;图 1(c)中,入射光线的入射点低于(a),此时反射光线进入成像光路。

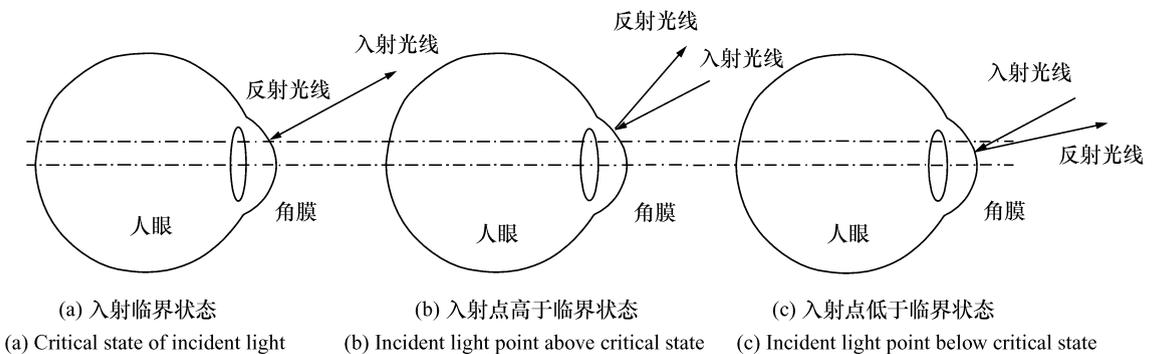


图 1 边缘入射人眼照明

Fig. 1 Illumination from the edge of human eye

为实现既能使光束从瞳孔边缘入射到人眼,又能充分利用光能,且保证眼底被拍摄区域亮度的均匀性,采用环形照明的方法。即在照明光源的位置上放置一环形光阑,照明系统首先将该环形光阑成像在人眼角膜上,该光阑像外径的大小等于人眼瞳孔的大小。这样,照明光束实际上是沿一环形从角膜边缘入射人眼,从而实现将角膜反射光逸出成像光路的目的。为了绝对排除角膜的反射光,环形光斑的内径必须严格大于图 1(a)所示的临界状态,即环形光斑要有较清晰的轮廓,这就对环形光阑的像质有较高的要求。

但在共轴照明系统设计中,还要兼顾已设计好的网膜物镜,因此照明系统的设计结果往往较为复杂。本研究采用一个改良的柯勒照明光路系统,既得到清晰的环形光斑,又能灵活地控制眼底照明区域的大小。

2.2 柯勒照明的改良设计

柯勒照明已经被广泛地应用于显微镜照明系统中。柯勒照明光路主要由集光镜、聚光镜、视场光阑和孔径光阑组成,是一个既能控制照明亮度又能控制照明区域形状的光学系统。将柯勒应用于眼底照明系统,可得图 2 所示光路。

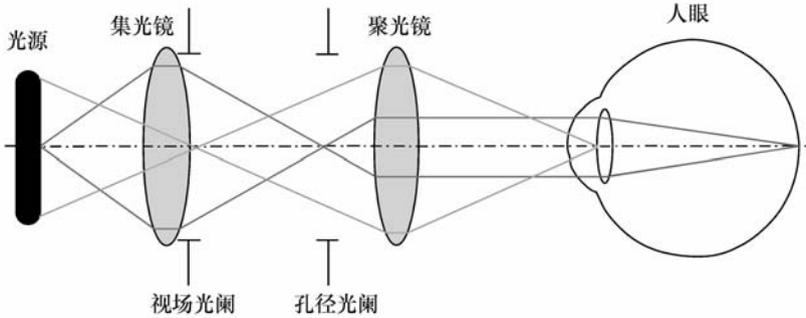


图2 柯勒照明应用于人眼照明系统
Fig. 2 Kohler system used in fundus illumination

从图 2 可以看出,该照明光路主要由集光镜、聚光镜、视场光阑和孔径光阑组成。光源通过集光镜成一实像,在该像面上安放一个可调的孔径光阑,可以控制照明区域的亮度;集光镜通过聚光镜成像于眼角膜,在集光镜附近位置放一视场光阑,可以用来控制入射人眼光斑的大小及形状。

从图 2 可以看出,实际上是光源成像于眼底,因此光源本身是否均匀直接影响了眼底照明的均匀程度。为均匀照明眼底,必须对此照明光路进行改良,本文用一匀光系统来代替原有光源,如图 3 所示。图 3 中,由光源和匀光镜组成匀光系统,取代图 2 中的光源。将视场光阑移至匀光镜的后表面

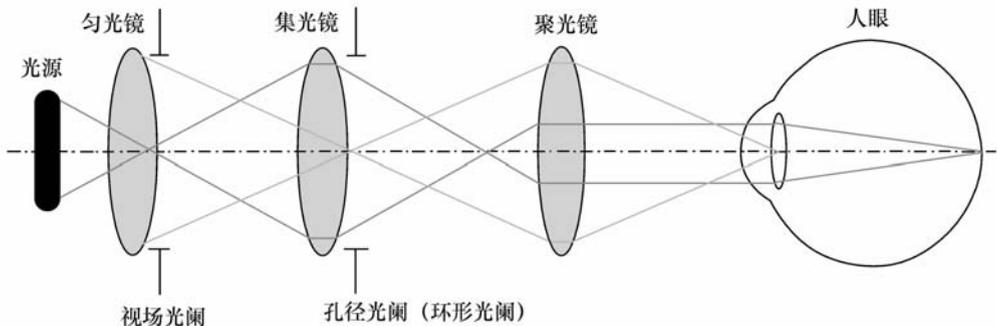


图3 改进后的人眼照明系统
Fig. 3 Improved illumination system

上,将孔径光阑移至集光镜的后表面上。这样,光源通过匀光镜、集光镜和聚光镜在角膜处成实像,集光镜位于一次像面处,在此处安放一环形光阑可以在角膜处得到环形照明光斑;视场光阑通过集光镜和聚光镜成像于眼底,视场光阑处于均光系统出口,为均匀光场,因而眼底被照明区域也为均匀光场。由于视场光阑和眼底的位置为物像共轭,在视场光阑处放一可调节的光阑,便可控制眼底被照明区域的大小和形状。

2.3 消除鬼像

探测器接收到的杂散光主要有两个来源:一个是角膜上的反射光,另一个是网膜物镜各表面的反射光。对于角膜的反射光,按照2.1所述的方法,采用环形光阑角膜边缘入射,从而使反射光逸出成像系统,避免其参与成像。网膜物镜的各个表面虽然已经镀减反射膜,但实际上仍会有一部分光线被反射回去,而由于系统设计采用共轴照明方式,成像系统和照明系统共用一组网膜物镜,网膜物镜各表面的反射光就会进入成像系统,并被探测器接收形成鬼像。鬼像的存在严重降低成像画面的对比度,降低成像质量,因此,要得到高质量的眼底画面,必须屏蔽掉所有鬼像。这里采用在照明光路中添加黑点板的方式来消除鬼像。以网膜物镜的各表面为反射镜面,以探测器表面为物面,反向追迹光线,在照明光路中找到与探测器表面共轭的位置,计算出在该位置探测器所成像的大小,在该位置加以相同大小的黑点板即可屏蔽掉参与形成鬼像的杂散光^[4]。

有时在探测器上会接受到一个点像或是一个环形影像,这实际上是光源或环形光阑被成像在探测器上,这时候如果在相应的鬼像位置加挡光措施,会大大减少甚至完全屏蔽掉照明光能量,因此,在设计网膜物镜的时候,应该避免使探测器面和照明光源对于网膜物镜的每个面处于共轭位置。

3 设计实例和模拟

3.1 设计实例

利用光学设计软件 ZEMAX 来对眼底相机照明系统进行优化设计,设计中加入 Gullstrand_Le

标准眼模型^[5],照明视场为 30° ,角膜处环形光斑尺寸为内径 $>4\text{ mm}$ 、外径 $<6\text{ mm}$,眼底均匀照明区域直径为 10 mm ,如图4所示。为缩短光路的长度,添加了一个场镜,它与网膜物镜共同组成柯勒光路的聚光镜;均光系统由两片透镜组成;环形光阑的尺寸为内径 7.2 mm 、外径 9.8 mm ;视场光阑的通光孔径为 25 mm ;系统插入3块黑点板,它们的位置是以探测器表面为物面,以网膜物镜的表面为反射镜面反向追迹光线得到的。网膜物镜共有5个表面,从左到右依次记为表面1、表面2、表面3、表面4、表面5,则3块黑点板依次对应表面2、表面3、表面5的反射,而表面1和表面4所对应的黑点板的位置在光源位置以下,可以不考虑。

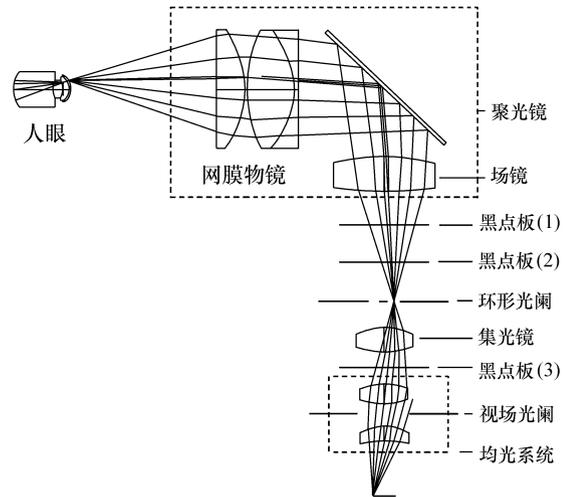


图4 照明系统

Fig. 4 Illumination system

3.2 眼底光能量的均匀性模拟^[6]

利用光机设计软件 LightTools 对所设计系统的照明效果进行分析。LightTools 中设置光源功率为 1 W ,追迹光线 $200\ 000$ 条,眼模型使用 Gullstrand_Le 标准眼模型。分别分析角膜处照明效果、眼底照明效果和眼底照明能量分布,仿真结果如图5所示。图5(a)为环形光阑在角膜处所成的环形像斑,可见该环形像斑具有清晰的轮廓,光斑内径为 4.2 mm ,外径为 5.8 mm 。图5(b)为眼底照明光斑,该光斑覆盖了眼底直径为 12 mm 范围的照明区域。在实际制作中将视场光阑换成通

光孔径可连续调节的光阑,即可实现眼底照明区域的灵活控制。图5(c)为眼底照明能量分布,由图可以看出,在照明视场中心10 mm的范围内,最大功率密度(P_{\max})为0.000 375 W/mm²,最低功率密度(P_{\min})为0.000 358 W/mm²,平均功率密度(P_{ave})为0.000 362 W/mm²。定义照明均匀

度为:

$$\left[1 - \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{ave}}}\right] \times 100\%$$

则本设计中眼底照明的均匀度为95.3%,满足清晰成像要求。

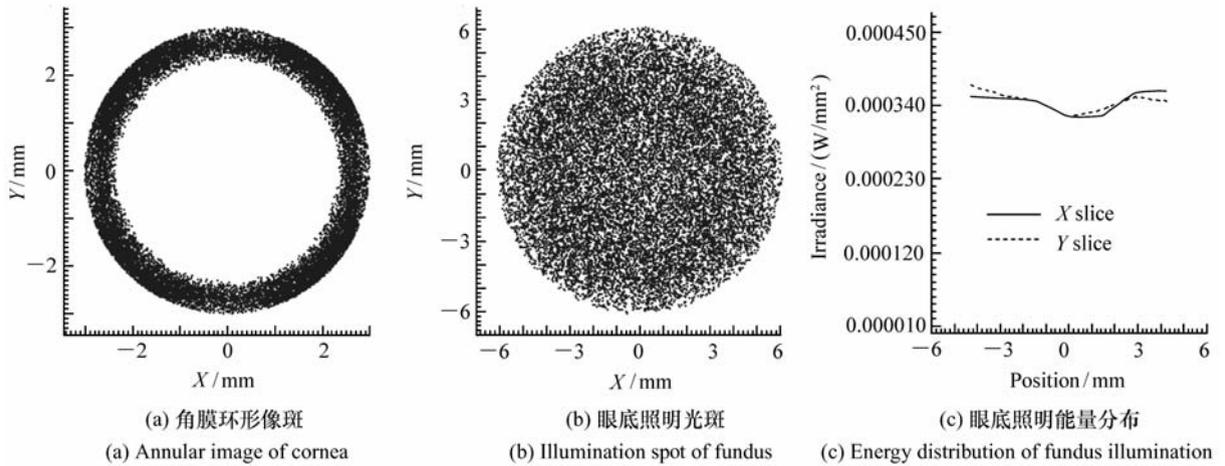


图5 眼底光能量均匀性的仿真结果

Fig.5 Simulation results of fundus uniformity

3.3 杂散光的控制

设置 LightTools 光源功率为 100 W,探测器面积为 50 mm²,角膜的反射率取 4%,网膜物镜胶合

面的反射率取 4%,其余表面的反射率取 1%,在 LightTools 中分析角膜反射光和网膜物镜反射光的屏蔽情况,分析结果如表 1 所示。

表 1 不同情况下像面功率密度与总功率表

Tab.1 Power density and total power in different conditions

	像面功率密度 (W/mm ²)	像面总功率/W
各表面均不反射光的理想情况	0.018 02	0.901
使用环形光阑和黑点板	0.018 16	0.908
使用黑点板、不使用环形光阑	0.031 28	1.564
使用环形光阑、不使用黑点板	0.032 76	1.638
黑点板和环形光阑均不使用	0.045 88	2.294

从表 1 可以看出,在理想情况下,即假设角膜表面和网膜物镜各表面均不反射光的时候,探测器接收到的完全是来自眼底的光,功率为 0.901 W。而实际情况下,若不使用黑点板和环形光阑,探测器除接收到来自眼底的信号能量外,还有来自角膜表面和网膜物镜各表面的杂散光,像面总功率为 2.294 W,即杂散光功率为 1.393 W。杂散光的功率高于信号光功率,如此

高功率的杂散光完全屏蔽了来自眼底的信号光。当只使用黑点板而不使用环形光阑的时候,探测器同时也接收了来自角膜反射的光共 1.564 W;当只使用环形光阑而不使用黑点板的时候,探测器同时接收了来自网膜物镜各反射面的光共 1.638 W;当同时使用环形光阑和黑点板进行消杂处理的时候,眼底所探测到的光功率为 0.908 W,非常接近理想情况下的 0.901 W,此时

系统剩余杂散光为0.007 W。由此可见,黑点板和环形光阑屏蔽掉了系统 99.4% 的杂散光,使成像画面的信噪比达到21.1 dB,极大地提高了对比度。

4 结 论

本文在眼底相机照明系统的设计中,保证了

眼底照明的均匀性,并通过对经典的柯勒照明光路的改良,得到了一个结构简单的眼底照明系统。结构中除网膜物镜外,只需用到4片透镜,同时设计中充分利用了柯勒照明光路的特点,通过在一次像面处加可变光阑,使得眼底照明区域直径连续可调。最后通过在光路中添加黑点板和环形光阑的方式,屏蔽了系统99%以上的杂散光,使眼底相机成像画面的信噪比在20 dB以上。

参考文献:

- [1] 崔桂华. 眼底照相机光学系统中杂光和鬼像的控制[J]. 光电技术,2006,(26):139-141.
CUI G H. Control of ghost and scatter light in retinal camera[J]. *Opt. Technique*,2006,(26):139-141. (in Chinese)
- [2] 萧泽新. 眼底电视光学系统的设计[J]. 光电技术,2005,(31):170-172.
XIAO Z X. Optics system design of eyeground television[J]. *Opt. Technique*,2005,(31):170-172. (in Chinese)
- [3] OCULAR FUNDUS AUTO ZMAGER;US,7025459 B2[P]. 2006-04-11.
- [4] BOROVYTSKYI V. Comparison analysis of illumination systems for digital light microscope according to uniformity of irradiance distribution[J]. *SPIE*,5942;59420Z-59428Z.
- [5] FINK W, MICOL D. SimEye: computer-based simulation of visual perception under various eye defects using Zernike polynomials[J]. *J. Biomed. Opt.*,2006,11(5):054011/1-054011/12.
- [6] SHAPIRO L. New ANSI/IEC standard for projectors[J]. *SPIE*,1996,2650:209-216.

作者简介:李 淳(1982—),男,山东招远人,硕士研究生,主要从事光学系统设计与研究。E-mail:xlfd-0830@163.com