

自适应光学视网膜成像系统的激光安全分析

刘颖^{1,2,3}, 杨亚良^{1,2*}, 岳献^{1,2,3}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在研究自适应光学(AO)视网膜成像系统的光辐射安全时,通常未考虑成像光与信标光的光谱带宽和双光束叠加效应。根据 ICNIRP 标准提出了一种光辐射安全分析方法。首先确定宽光谱光束照射视网膜时的辐亮度计算方法,然后分析双光束照射视网膜时的最大允许照射量(MPE),最后根据视网膜辐亮度和 MPE 制定了激光安全分析流程。将满足各种人眼视网膜成像系统照明条件的 AO 扫频光学相干层析成像系统作为实例,分析辐亮度和辐亮度极限,并与其他方法相比较来检验所提方法的正确性。所提方法适用于结合和未结合 AO 技术的各种人眼视网膜成像系统,可为人眼激光安全分析计算提供参考。

关键词 激光光学; 人眼激光辐射安全; 视网膜光学成像系统; 宽带光谱; 双光束叠加效应; 视网膜热效应

中图分类号 Q631; R828.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1014003

Laser Exposure Safety Analysis for Adaptive Optics Retinal Imaging System

Liu Ying^{1,2,3}, Yang Yaliang^{1,2*}, Yue Xian^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Generally speaking, the optical radiation safety analysis of an adaptive optics (AO) retinal imaging system does not currently consider the spectral bandwidth and superposition effect of imaging and beacon lights. To solve these problems, we propose a radiation safety analysis method that conforms to the international commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP) standard. First, the radiance calculation method is determined when a broadband spectral beam irradiates retina. Then, the maximum permissible exposure (MPE) is analyzed when retina is irradiated by two beams. The exposure safety analysis process is finally developed from the obtained retinal radiance and MPE. An AO swept-source optical coherence tomography imaging system, which covers the illumination conditions of various human retinal imaging systems, is considered as an example to calculate the radiance as well as the maximum radiance. The validity of the proposed method is verified by comparing with other methods. The proposed method is suitable for various human retinal imaging systems with and without AO technology, and it can provide a reference for calculating the safety level of human eye exposure to radiation.

Key words laser optics; laser radiation safety for human eye; retinal optical imaging system; broadband spectrum; superposition effect of two beams; retinal thermal effect

OCIS codes 140.3360; 330.3350; 170.4460

1 引言

激光安全辐射量的计算是活体人眼视网膜光学

成像时的必要环节。低辐射量光束入射人眼能降低眼组织受到伤害的机率,但从眼底返回并用于探测的光信号也会相应减弱,导致获得的图像信噪比较

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2020-01-10; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61575205)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120080)、中国科学院光电技术研究所前沿部署项目

* E-mail: ylyang@ioe.ac.cn

低,甚至观察不到信息。高辐射量虽能获得高质量的图像,但极有可能造成人眼损伤。因此,为保证激光入射人眼的安全,同时获得较好质量的视网膜图像,准确的激光安全辐射量计算是必要的。

激光安全辐射量的计算标准主要由国际非电离辐射保护委员会(ICNIRP)和美国国家标准协会(ANSI)等组织制定。ANSI将最大允许照射量(MPE)用于激光安全分析,MPE被定义为活体组织在经激光照射后不发生重大伤害的光能大小,该标准虽给出了MPE的计算方法,但并未给出针对视网膜成像这一具体场合的计算方法和过程。现有视网膜成像系统^[1-3]中关于MPE的内容,通常只简单给出入射角膜的光功率值及其低于MPE的量级,鲜有相对详细的计算方法和过程。Li等^[4]于1993年提出了一种针对扫描激光检眼镜(SLO)的多波长MPE计算方法,用于计算热效应与化学效应对人眼带来的伤害。对于重复脉冲光束系统,Thomas等^[5]根据ANSI标准确定了入射人眼的MPE计算方法。但这两种方法仅适用于特定视网膜成像系统,不具备普适性。包括光学相干层析成像(OCT)、眼底相机及SLO等常用视网膜成像系统的照明光源,均具有一定的光谱带宽^[6],可减少散斑的干扰。而文献^[4-5]在计算MPE时,只采用中心波长进行计算,均未考虑光谱带宽的影响。近年来,结合自适应光学(AO)技术的视网膜成像系统得到快速发展,AO系统使用信标光进行波前探测,它与成像光同时入射人眼。依据不同谱段辐射对眼组织的叠加效应准则^[7]可知,处于可见光和近红外波段的成像光与信标光同时入射人眼将引起视网膜热效应的叠加。ANSI方法只分别计算两束光的MPE值,然后取二者中的最小值作为系统的MPE,并未考虑双光束的叠加效应,这保证了人眼安全,但牺牲了成像效果。可见目前的人眼视网膜成像系统的光功率安全计算方法,对于未结合AO技术的系统而言是忽略了宽光谱带宽的影响,而对于结合了AO技术的系统而言则是同时忽略了宽光谱带宽和多光束叠加的影响,使得结果并不准确。

目前的激光安全计算^[5,8-9]主要针对入射角膜的光功率,其好处是该处的光功率可实测,但还没有从入射视网膜辐亮度的角度去分析。视网膜AO成像系统存在宽光谱入射和双波段叠加问题,该领域还无相对详细的光功率安全计算方法与过程,因此本文基于ICNIRP标准提出了一种光功率安全分析方法,该方法从入射视网膜辐亮度的角度进行分析。视网膜AO-OCT系统采用的成像光的光谱带宽最

宽且存在成像光和信标光的叠加问题,其照明条件满足了所有的人眼视网膜成像系统,因此本文以视网膜AO-OCT系统作为实例进行光功率安全分析计算,并通过与Lyon^[10]的方法相比较来检验所提方法的正确性。

2 视网膜安全分析方法

激光照射眼组织时会引起视网膜的热效应和化学效应,两个效应均与入射波长、照射时间、辐射源、眼组织的反射和吸收等因素^[11-12]相关。在相同的照射时间、波长、照射源大小的条件下,视网膜化学效应的伤害阈值是热效应伤害阈值的40倍左右^[7],因此本文主要分析视网膜的热效应。常被采用的人眼视网膜AO成像系统如图1所示,它同时使用处于400~1400 nm波段的信标光与成像光,二者入射视网膜时存在着热效应的叠加现象。

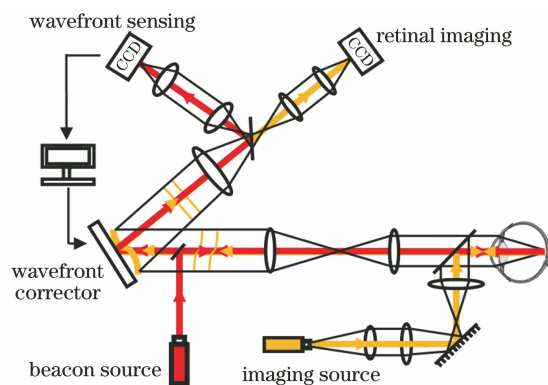


图1 人眼视网膜AO成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of human retinal AO imaging system

2.1 宽光谱光束的辐亮度分析

在ICNIRP标准中,用辐亮度 L_R 表示光入射人眼视网膜时引起的热效应^[13],它是波长范围 $\Delta\lambda$ 内光谱辐亮度的累加(积分),表达式为

$$L_R = \sum_{\lambda_n}^{\lambda_m} L_\lambda \times R(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (1)$$

式中: L_λ 和 $R(\lambda)$ 分别为入射视网膜上的光谱辐亮度和视网膜热吸收光谱系数; $\lambda_n \sim \lambda_m$ 为入射激光的光谱范围。视网膜上的辐亮度无法直接被测量,可引入眼屈光介质对光的吸收系数 C_c 并将其转换为可测量的入射人眼之前的辐亮度。表1为不同波段下 C_c 和 $R(\lambda)$ 的计算方法,于是 L_R 可表示为

$$L_R = \sum_{\lambda_n}^{\lambda_m} L_c(\lambda) \times C_c^{-1} \times R(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中: $L_c(\lambda)$ 为入射人眼之前的光谱辐亮度; $L_c(\lambda) \times C_c^{-1}$ 为入射视网膜上的光谱辐亮度 L_λ 。 $L_c(\lambda)$ 能够

表1 视网膜危害光谱权重函数和吸收系数^[13-14]
Table 1 Retinal hazard spectral weight function and absorption coefficient^[13-14]

Wavelength /nm	$R(\lambda)$	C_c
700-1050	$10^{(700-\lambda)/500}$	1.0
1050-1150	0.2	1.0
1150-1200	$0.2 \times 10^{0.02 \times (1150-\lambda)}$	$10^{0.018(\lambda-1150)}$
1200-1400	0.02	$8 + 10^{0.04(\lambda-1250)}$

表2 视网膜辐亮度极限的计算^[13]

Table 2 Calculation of retinal radiance limits^[13]

Condition	α /rad	t /s	$E_L / (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$
Basic exposure limit	$\alpha_{\min} \leq \alpha < \alpha_{\max}$	$t < 10^{-6}$	
	$\alpha_{\min} \leq \alpha < \alpha_{\max}$	$10^{-6} \leq t < 0.25$	$2 \times 10^4 \times \alpha^{-1} \times t^{0.75}$
	$\alpha_{\min} \leq \alpha < \alpha_{\max}$	$t \geq 0.25$	$2.8 \times 10^4 \times \alpha^{-1}$
Large source	$\alpha \geq \alpha_{\max}$	$t < 10^{-6}$	
	$\alpha \geq \alpha_{\max}$	$10^{-6} \leq t < 625 \times 10^{-6}$	
	$\alpha \geq \alpha_{\max}$	$625 \times 10^{-6} \leq t < 0.25$	
	$\alpha \geq \alpha_{\max}$	$t \geq 0.25$	28×10^4
Small source	$\alpha < \alpha_{\min}$	$t < 10^{-6}$	
	$\alpha < \alpha_{\min}$	$10^{-6} \leq t < 0.25$	$1.3 \times 10^7 \times t^{0.75}$
	$\alpha < \alpha_{\min}$	$t \geq 0.25$	1.9×10^7

$\alpha_{\min} = 1.5$ mrad, 且 α_{\max} 与辐射时间有关: 当 $10^{-6} \text{ s} \leq t < 625 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时, $\alpha_{\max} = 0.005$ rad; 当 $625 \times 10^{-6} \text{ s} \leq t < 0.25 \text{ s}$ 时, $\alpha_{\max} = 0.2 \times t^{0.5}$, 单位为 rad。当 $\alpha < \alpha_{\min}$ 时, 规定 $\alpha = \alpha_{\min}$; 当 $\alpha \geq \alpha_{\max}$ 时, 规定 $\alpha = \alpha_{\max}$ 。当 $t < 10^{-6} \text{ s}$ 时, 规定 $t = 10^{-6} \text{ s}$; 当 $t \geq 0.25 \text{ s}$ 时, 规定 $t = 0.25 \text{ s}$ 。

中心波长分别为 λ_1 和 λ_2 的光束, 对应的辐亮度极限分别为 E_{L1} 和 E_{L2} , 辐亮度分别为 L_{R1} 和 L_{R2} 。单波段激光入射安全是双波段激光安全分析的前提, 即需同时满足 $L_{R1} \leq E_{L1}$ 和 $L_{R2} \leq E_{L2}$ 。在此条件下, 双波段光束同时入射人眼时, 视网膜免受热损伤的辐亮度应满足

$$L_{R1} + L_{R2} \leq E_L. \quad (4)$$

以 L_{R1} 为参考标准, 视网膜处于安全的极限状态时(两光束辐亮度叠加后, 视网膜处于不受伤害与将受伤害的临界态), E_L 可表示为

$$E_L = L_{MR2} + L_{R1}, \quad (5)$$

式中: L_{MR2} 为 λ_2 波段对应的最大辐亮度。 λ_1 波段光束入射人眼, 视网膜接受大小为 L_{R1} 的辐亮度, 其与视网膜辐亮度极限相差 $E_{L1} - L_{R1}$ 。该差值由 λ_2

直接被测量, 通过改变其大小来控制视网膜上热效应的强弱。

2.2 双波段光束的辐亮度极限分析

辐亮度极限 E_L 是人眼视网膜能够承受的最大辐射量, 计算方法^[13]为

$$E_L = 2 \times 10^4 \times \alpha^{-1} \times t^{-0.25}, \quad (3)$$

式中: α 和 t 分别为对向角和辐射时间。依据对向角和辐射时间的不同, E_L 有不同的计算准则, 具体如表 2^[13] 所示。

波段光束等效果的辐亮度补充, 即可达到视网膜的安全极限状态。因眼组织对 λ_1 和 λ_2 波段的热吸收系数不同, 需将 $E_{L1} - L_{R1}$ 等量转换为 L_{MR2} 。 E_{L1} 和 E_{L2} 反映了视网膜组织对 λ_1 和 λ_2 波段光束的吸收能力, 二者的比值即为辐亮度转换系数, 故 L_{MR2} 可表示为

$$L_{MR2} = (E_{L1} - L_{R1}) \times (E_{L2}/E_{L1}). \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式, 得到双波段光束系统的辐亮度极限为

$$E_L = (E_{L1} - L_{R1}) \times (E_{L2}/E_{L1}) + L_{R1}. \quad (7)$$

2.3 宽光谱双光束的安全分析

使用上述方法能够计算得到系统的辐亮度极限。当双波段光束辐亮度满足(4)式时, 认为入射激光是安全的。将(7)式代入(4)式并化简, 得到入射激光安全判断条件等价于

$$L_{R2} \leq L_{MR2}. \quad (8)$$

宽光谱双光束照射视网膜时的安全分析方法的具体步骤如下。

1) 利用(2)式分别计算中心波长为 λ_1 和 λ_2 的入射光在视网膜上引起热效应的辐亮度 L_{R1} 和 L_{R2} 。

2) 根据表 2 给出的方法,分别计算两光束对应的辐亮度极限 E_{L1} 和 E_{L2} 。若同时满足 $L_{R1} \leq E_{L1}$ 和 $L_{R2} \leq E_{L2}$,则继续步骤 3);若不满足,则通过降低激光入射人眼前的辐亮度以降低视网膜上的辐亮度,并返回步骤 1)重新计算 L_{R1} 和 L_{R2} ,直至满足步骤 2)中的条件。

3) 以其中某一波段光束的辐亮度(比如 L_{R1})为参考标准,利用(6)式计算不造成视网膜热损伤的另一光束的最大辐亮度 L_{MR2} 。

4) 将最大辐亮度 L_{MR2} 和辐亮度 L_{R2} 代入(8)式,若(8)式成立,则该系统的入射激光安全;若不成立,则需通过调节入射人眼前的辐亮度来降低视网膜上的辐亮度,然后返回步骤 1)继续按步骤计算,直至(8)式成立。

3 典型系统的激光安全分析

3.1 成像系统与计算条件

眼底相机常采用闪频调制方式来形成脉冲照明,以降低安全风险并提高组织光敏性。SLO 的逐点扫描成像方式等效为脉冲照明。在眼科被广泛使用的扫频(SS)OCT 系统,其使用的扫频光源输出随时间快速变化的瞬时窄线宽光信号,其也是一种脉

冲照明。因此,重复脉冲曝光也是人眼成像激光安全计算时常面临的问题。为验证本方法的可行性,并考虑脉冲曝光方式的影响,选取 AO-SS-OCT 这一典型视网膜成像系统作为实例进行分析。先按照上述步骤对入射光的安全性进行分析;再利用 Lyon^[10]提出的公式计算辐亮度和辐亮度极限,若本方法计算所得数值满足文献[10]的要求,则表明本方法正确。

AO-SS-OCT 系统的具体参数为:成像光源为扫频光源,其中心波长为 1060 nm,光谱范围为 1000~1100 nm;信标光源为超辐射发光二极管(SLD)光源,其中心波长为 795 nm,光谱范围为 780~810 nm;入瞳孔径 $\varphi=6$ mm。两光源的光谱功率密度分布分别如图 2 所示。成像光源的轴向扫描(A-scan)频率为 100 kHz,每一 A-scan 的曝光时间为 10^{-5} s。一幅纵截面(B-scan)图像包含 450 线 A-scan,则一帧 B-scan 图像的曝光时间为 0.0045 s。为提高图像信噪比,取相邻 5 线 A-scan 进行平均,则一帧 B-scan 图像的曝光时间为 0.0225 s,帧频为 45 Hz,总扫描次数为 2250。因此,成像光等效为中心波长为 1060 nm、频率为 45 Hz、脉宽为 10^{-5} s 的重复脉冲曝光系统。

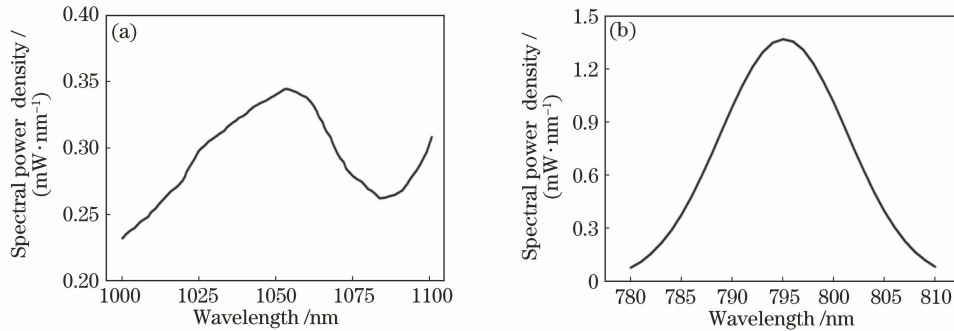


图 2 光谱功率密度分布。(a)成像光源;(b)信标光源

Fig. 2 Distribution of spectral power density. (a) Imaging light source; (b) beacon light source

成像光束经光学系统扩束后入射人眼,光源为非扩展光源(点光源, $\alpha \leq \alpha_{\min}$),取 $\alpha = \alpha_{\min}$ ^[14]。信标光也为非扩展光源,且 $\alpha = 1.5$ mrad,以连续曝光方式照射人眼。采集一幅 B-scan 图像的总时间为 0.0225 s。以成像光为参考标准,判断入射是否安全。

3.2 成像光和信标光辐亮度的计算

成像光入射人眼前的光谱辐亮度 L_{cl} 表示为

$$L_{cl}(\lambda) = P(\lambda) \times S_r^{-1} \times \Omega^{-1}, \quad (9)$$

式中: $P(\lambda)$ 为人眼前的光谱功率密度分布; S_r 为光束照射在视网膜上的面积; Ω 为辐射角。辐射角的计算方法为

$$\Omega = S_c / f_e^2, \quad (10)$$

式中: f_e 为人眼的有效焦距,通常取 16.7 mm; S_c 为光束入射角膜的辐射面积。成像光与信标光均为点光源,对应到视网膜上的辐射直径为 $25 \mu\text{m}$ ^[13],则 $S_r = 4.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。将 f_e 和入瞳孔径代入(10)式,得到 $\Omega = 0.1 \text{ sr}$ 。

采用光功率计测得光源输出端的光功率为 $P_{\text{source}} = \sum_{\lambda} P(\lambda) \Delta\lambda$,在人眼前测得的光功率为 $P_{\text{cornea}} = \sum_{\lambda} r P(\lambda) \Delta\lambda$,则光源与人眼之间光学系统的衰减系数 $r = P_{\text{cornea}} / P_{\text{source}}$,本系统的 $r = 10\%$ 。利用图 2(a)无法通过拟合得到人眼前的 $P(\lambda)$,因此以波长

采样间隔 0.1 nm 来计算 L_{c1} , 从而可得到成像光入射人眼前的光谱辐亮度为 $L_{c1}(\lambda) = 10\% \times P(\lambda) \times (4.9 \times 10^{-10})^{-1} \times 0.1^{-1}$ 。

利用(2)式得到成像光入射视网膜的辐亮度 L_{R1} 为

$$L_{R1} = \int_{1000}^{1050} L_{c1}(\lambda) \times 10^{(700-\lambda)/500} \times 1.0 \times d\lambda + \int_{1050}^{1100} L_{c1}(\lambda) \times 0.2 \times 1.0 \times d\lambda, \quad (11)$$

将 $L_{c1}(\lambda)$ 代入(11)式, 得到 $L_{R1} = 1.29 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

成像光与信标光均为点光源, 成像光在视网膜上的照射面积 S_r 与辐射角 Ω 与信标光相同。对图 2(b)中的数据点进行拟合, 得到信标光的 $P(\lambda) = 1.366 \times \exp\{-[(\lambda - 795.1)/8.878]^2\}$, 则入射人眼前的光谱辐亮度 $L_{c2}(\lambda)$ 为

$$L_{c2}(\lambda) = 10\% \times 1.366 \times \exp\{-[(\lambda - 795.1)/8.878]^2\} \times (4.9 \times 10^{-10})^{-1} \times 0.1^{-1}. \quad (12)$$

利用(2)式得到的信标光入射视网膜的辐亮度 L_{R2} 为

$$L_{R2} = \int_{780}^{810} L_{c2}(\lambda) \times 10^{(700-\lambda)/500} \times 1.0 \times d\lambda, \quad (13)$$

把(12)式代入(13)式, 经计算得 $L_{R2} = 2.78 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

3.3 最大辐亮度 L_{MR2} 的计算

成像光照射方式等效为重复脉冲曝光系统, 需考虑以下两个准则^[14]: 单个脉冲的辐射量必须低于对应于单一脉冲持续时间的曝光极限; 整个曝光时间内的曝光量必须低于对应于总曝光时间的曝光极限。整个成像过程中, 成像光对应的辐亮度极限 E_{LH1} 为

$$E_{LH1} = 1.3 \times 10^7 \times (0.0225)^{-0.25} \approx 3.36 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}. \quad (14)$$

同时还需考虑单个脉冲的辐亮度极限 E_{LS1} 。表 3 为重复脉冲曝光的视网膜辐亮度极限, 利用表 3 中给出的方法, 计算 E_{LS1} 得

$$E_{LS1} = 1.3 \times 10^7 \times (10^{-5})^{-0.25} \times 0.4 \approx 9.2 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}, \quad (15)$$

则要求 $E_{L1} = \min(E_{LH1}, E_{LS1}) = 3.36 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

根据表 2 中的辐亮度极限计算方法, 得到信标光对应的辐亮度极限 E_{L2} 为

表 3 重复脉冲曝光的视网膜辐亮度极限

Table 3 Retinal radiance limit for repeated pulse exposure

α / rad	Number of pulses n	Exposure limit / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
$\alpha \leq \alpha_{\max}$	$n < 40$	$E_L \times n^{-0.25}$
	$n \geq 40$	$0.4 \times E_L$
$\alpha_{\max} < \alpha \leq 0.1$	$n < 625$	$E_L \times n^{-0.25}$
	$n \geq 625$	$0.2 \times E_L$
$\alpha > 0.1$		E_L

$$E_{L2} = 1.3 \times 10^7 \times (0.0225)^{-0.25} \approx 3.36 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}, \quad (16)$$

满足关系 $L_{R1} \leq E_{L1}$ 和 $L_{R2} \leq E_{L2}$, 表明成像光与信标光的入射量均在二者对应的曝光量极限内, 均满足安全要求。以成像光辐亮度 L_{R1} 为参考标准, 使用(6)式得到信标光的最大辐亮度 L_{MR2} 为

$$L_{MR2} = (3.36 \times 10^7 - 1.29 \times 10^7) \times (3.36 \times 10^7 / 3.36 \times 10^7) = 2.07 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}. \quad (17)$$

比较(13)式和(17)式所得结果, 可知其不满足安全标准条件 $L_{R2} \leq L_{MR2}$, 故该系统的激光入射量不安全, 需通过调节人眼前的辐亮度来减小视网膜上的辐亮度。成像光可通过调整分光比(把更多光能分给参考臂), 或者成像光与信标光均可通过衰减的方式来减小入射人眼前的辐亮度 L_{R1} 和 L_{R2} 。从上述计算结果可知, 成像光与信标光的辐亮度均在各自辐亮度极限内, 但考虑二者的叠加效应后, 信标光的辐亮度超出了辐亮度极限, 因此只需调节信标光的辐亮度。使用衰减片把人眼前信标光的入射量降至 $5\% \times P_{c2}(\lambda)$, 重复 3.2 和 3.3 节的计算, 得到

$$L_{R2} = \int_{780}^{810} 5\% \times P_{c2}(\lambda) \times 10^{(700-\lambda)/500} d\lambda = 1.39 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}. \quad (18)$$

因未改变成像光的入射量, 故信标光对应的最大辐亮度仍为 $L_{MR2} = 2.07 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 此时 $L_{R2} < L_{MR2}$, 说明考虑了成像光和信标光的叠加效应后, 入射人眼的辐亮度仍安全。

3.4 正确性验证

通过与文献报道的其他方法相比较来验证本方法的正确性。Lyon^[10]提供了一种多光束入射人眼时曝光量是否安全的判断方法, 具体为

$$L_{R1}/E_{L1} + L_{R2}/E_{L2} \leq 1. \quad (19)$$

当入射光束满足(19)式时, 则认为是安全的。将利用本方法计算所得的两入射光的辐亮度和辐亮度极限代入(19)式, 得

$$\frac{L_{R1}}{E_{L1}} + \frac{L_{R2}}{E_{L2}} = \frac{1.29 \times 10^7}{3.36 \times 10^7} + \frac{1.39 \times 10^7}{3.36 \times 10^7} \approx 0.8 < 1, \quad (20)$$

因此两光束的入射量是安全的,说明本方法所得结果正确。

4 结 论

在 ICNIRP 标准的基础上,提出了一种人眼视网膜成像系统的激光安全分析方法,该方法从视网膜辐亮度的角度来分析光入射引起的视网膜热效应。通过在光谱范围内对入射光的光谱功率密度分布进行积分及对不同波段双光束在视网膜上的辐亮度进行等比例转换,分别解决了宽光谱入射和双波段光束叠加的问题。利用所提方法对 AO-SS-OCT 这一典型的人眼视网膜成像系统进行了激光安全分析,提供了一种详细的分析计算过程。利用文献报道的其他方法对所提方法得到的结果进行了验证,所得结果在安全范围内,表明所提方法计算得到的辐亮度极限与辐亮度满足安全要求。为各种人眼视网膜成像系统提供了一种可供参考的激光安全分析的方法和详细过程,弥补了宽光谱入射和双波段光束叠加时,辐亮度与辐亮度极限计算不准确的缺陷。但所提方法也存在一些不足,比如只考虑了入射光引起的视网膜热损伤,未考虑化学损伤,这对短时间照射系统是可行的,但对长时间照射人眼的系统不可行。需强调的是,这里只是提供一种更符合人眼成像实际情况的光功率安全分析计算方法,其不能作为人眼曝光是否安全的标准。后续还需大量的理论,尤其是实验的检验,这需要各行业的共同努力才能完成。

参 考 文 献

- [1] Kong N N, Li D Y, Xia M L, et al. Liquid crystal adaptive optics system for retinal imaging operated on open-loop and double-pulse mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0111002.
孔宁宁, 李大禹, 夏明亮, 等. 开环双脉冲液晶自适应光学视网膜成像系统 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0111002.
- [2] Zhou H, Guan C L, Dai Y. Bimorph deformable mirrors for adaptive optics of human retinal imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0211001.
周虹, 官春林, 戴云. 用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0211001.
- [3] Liu X Y, Yu X J, Tang H Y, et al. Spectrally encoded extended source optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6803-6806.
- [4] Li L, Rosenshein J S. Safety considerations for simultaneous multiple wavelength exposure in scanning laser ophthalmoscopes [J]. *Health Physics*, 1993, 64(2): 170-177.
- [5] Thomas R J, Rockwell B A, Marshall W J, et al. A procedure for multiple-pulse maximum permissible exposure determination under the Z136. 1—2000 American national standard for safe use of lasers [J]. *Journal of Laser Applications*, 2001, 13(4): 134-140.
- [6] Kramoreva L I, Rozhko Y I. Optical coherence tomography (Review) [J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, 77(4): 449-467.
- [7] General administration of quality supervision, inspection and quarantine, PRC. Safety of laser products—part 1: equipment classification, requirements and user's guide: GB 7247. 1—2001 [S]. Beijing: China Standard Press, 2001.
国家质量监督检验检疫总局. 激光产品的安全第 1 部分: 设备分类、要求和用户指南: GB 7247. 1—2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [8] Schulmeister K, Seiser B, Edthofer F, et al. Criteria for the determination of the 'thermal' retinal spot diameter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 48(11): 458-468.
- [9] Thomas R J, Rockwell B A, Marshall W J, et al. Procedure for the computation of hazards from diffusely scattering surfaces under the Z136. 1—2000 American national standard for safe use of lasers [J]. *Journal of Laser Applications*, 2007, 19(1): 46-54.
- [10] Lyon T L. Hazard analysis technique for multiple wavelength lasers [J]. *Health Physics*, 1985, 49(2): 221-226.
- [11] Frederiksen A, Fieß R, Stork W, et al. Eye safety for scanning laser projection systems [J]. *Biomedizinische Technik*, 2012, 57(3): 175-184.
- [12] American national standard for safe use of lasers: Z136. 1—2007 [S]. Orlando: Laser Institute of America, 2007.
- [13] Ziegelberger G. ICNIRP guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation [J]. *Health Physics*, 2014, 105(1): 74-96.
- [14] Ziegelberger G. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1, 000 μm [J]. *Health Physics*, 2013, 105(3): 271-295.