



中华人民共和国国家标准

GB/T 7247.9—2016/IEC/TR 60825-9:1999

激光产品的安全 第9部分：非相干光辐射最大允许照射量

Safety of laser products—
Part 9: Compilation of maximum permissible exposure to
incoherent optical radiation

(IEC/TR 60825-9:1999, IDT)

2016-08-29 发布

2017-03-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 最大允许照射量	9
4.1 概述	9
4.2 测量孔径	9
4.3 瞳孔直径	9
4.4 重复脉冲辐射、调制辐射或扫描辐射	10
4.5 光源的对向角	11
4.6 时间基准	12
4.7 辐射亮度和辐照度	12
4.8 眼睛的最大允许照射量	12
4.9 皮肤的最大允许照射量	17
4.10 光度量	18
5 测量	18
5.1 测量条件	18
5.2 测量方法	18
附录 A (规范性附录) ICNIRP 给出的蓝光危害光谱函数和视网膜热危害函数	22
附录 B (规范性附录) ICNIRP 给出的紫外照射限值和光谱加权函数	24
附录 C (规范性附录) CIE 给出的相对光谱光视效率	26
附录 D (资料性附录) 作用谱	28
参考文献	31
图 1 表观光源对向角的定义	2
图 2 辐射亮度的定义	6
图 3 立体角的定义	7
图 4 按照 Reeves, 瞳孔直径对视场亮度的关系曲线	10
图 5 相对光谱响应 $S(\lambda)$	13
图 6 视网膜热危害函数 $R(\lambda)$ 和视网膜蓝光危害函数 $B(\lambda)$	14
图 7 波长范围从 1 050 nm~1 150 nm, 分别采用 α_{\min} 和 α_{\max} 确定最大允许辐射亮度的时间相关性	15
图 8 测量(总)辐射亮度的测量条件	19
图 9 光源对向角的确定	20
图 10 光源对向角的确定	20

表 1	辐射度量和光度量的比较表	5
表 2	适用于测量辐照度、照度、辐射亮度和总辐亮度的最小孔径直径	9
表 3	眼睛的极值对向角	11
表 4	UV 辐射的最大允许照射	13
表 5	眼睛的最大允许照射量	17
表 A.1	蓝光危害光谱函数和视网膜热危害函数	22
表 B.1	紫外照射限值和光谱加权函数	24
表 C.1	相对光谱光视效率	26
表 D.1	红斑形成的相对作用谱	28
表 D.2	色素沉淀的相对作用谱	29

前 言

《激光产品的安全》分为以下部分：

- 第 1 部分：设备分类、要求；
- 第 3 部分：激光显示与表演指南；
- 第 4 部分：激光防护屏；
- 第 9 部分：非相干光辐射最大允许照射量；
- 第 13 部分：激光产品的分类测量；
- 第 14 部分：用户指南。

本部分为《激光产品的安全》的第 9 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 IEC/TR 60825-9:1999《激光产品的安全 第 9 部分：非相干光辐射最大允许照射量》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

GB/T 2900.65—2004 电工术语 照明(IEC 60050-845:1987,MOD)

GB 3100—1993 国际单位制及其应用(eqv ISO 1000:1992)

GB/T 15313—2008 激光术语(ISO 11145:2006,MOD)

本部分做了下列编辑性修改：

- 删除 IEC/TR 60825-9:1999 的前言。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国机械工业联合会提出。

本部分由全国光辐射安全和激光设备标准化技术委员会(SAC/TC 284)归口。

本部分起草单位：北京光电技术研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所、杭州浙大三色仪器有限公司、国家激光器件质量监督检验中心。

本部分主要起草人：卢永红、吴爱平、李嘉伦、戚燕、牟同升。

激光产品的安全

第 9 部分：非相干光辐射最大允许照射量

1 范围

《激光产品的安全》的本部分给出了通用的最大允许照射量(MPE)值,最终协调与照射极限相一致。适用于 180 nm~3 000 nm 波长范围的人造光源照射人眼和皮肤的非相干光辐射。波长在 3 000 nm~1 mm 之间的照射极限目前尚不确定。

这些数值的建立是以现有实验研究获得的最佳信息为基础,仅宜作为控制人造光源光辐射的指南,而不宜视为安全水平和危害水平之间的严格分界线。

注：本部分的数值适用于大多数个体。但是,某些个体可能是由于过敏,或遗传、年龄、个人习惯(烟,酒精,或其他麻醉品),药品或以前受过照射等因素,对光辐射会产生异常反应。光辐射等于或低于本部分给出的最大允许照射量值时,这些个体可能也得不到充分保护,使其免受光辐射对健康的影响。医学上建议,设法评估需要的附加保护。

这些数值主要用于人造光源的照射。也可用于日光照射下的评估。

MPE 值不适用于以医疗为目的,对患者的光照射。

激光光源辐射的最大允许照射量值应符合 IEC 60825-1 的规定。

注 1：本部分的基础文件是 IEC 60825-1(针对激光)和 IRPA/ICNIRP(针对非相干光源)。ACGIH 给出的极限在波长范围和极限值上与本部分的基础文件略有不同。

注 2：事实上,尽管 LED 主要发射非相干辐射,但目前仍符合 IEC 60825-1 的规定。

注 3：相干光源和非相干光源损伤机理的差异尚不明确。但是,在许多情况下,IEC 60825-1 给出的极限值比本部分给出的极限值更严格,因为最初制订 IEC 60825-1 时,还有未发现的激光波长区间。

注 4：照射值达到 MPE 水平时,眼睛或皮肤可能会感到不适。

注 5：在 UV-B 和 UV-C 光谱范围内,辐照量接近 MPE 值时,表层角膜细胞能产生最小的可探测到的生物变化。而实际引起危害的辐射水平比 MPE 值大 2 到 3 倍。

本部分的目的是给出 180 nm~1 mm 波长范围内,非相干光辐射的人员防护指南,所给出的光辐射安全水平被认为对大多数个体是安全的,对在等于或低于安全水平的照射量下,不会造成不利影响。由于所掌握的长期照射效果的知识是有限的,所以本部分大多数的 MPE 值仅适用于 8 h 工作日为基础的强光辐射。

为与最大允许照射量进行比较,本部分规定了如何测量和评估光辐射水平的程序和方法。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050(845):1987 国际电工词汇 第 845 章:照明(International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 845:Lighting)

IEC 60825-1:1993 and Amendment 1:1997¹⁾ 激光产品的安全 第 1 部分:设备分类、要求和使用者指南(Safety of laser products—Part 1:Equipment classification,requirements and user's guide)

1) 有一个合并版 1.1(1998)包含 IEC 60825-1(1993)和修订单 1(1997)。

ISO 1000:1992 国际单位制及其应用(SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units)

ISO 11145:1994 光学和光学仪器 激光和激光相关设备 词汇和符号(Optics and optical instruments—Lasers and laser-related equipment—Vocabulary and symbols)

ISO/IEC Guide 51:1997 安全方面 在标准中包含安全方面内容的指南(Safety aspects—Guidelines for their inclusion in standards)

3 术语和定义

ISO 1000:1992、ISO 11145:1994、IEC 60050(845):1987、IEC 60825-1 和 ISO/IEC 指南 51 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 IEC 60825-1、IEC 60050(845)和 ISO/IEC 指南 51 中的某些术语和定义。

3.1

角放大率 angular magnification

M

人眼通过光学仪器观察物体的视角(α_{instr})与直接观察物体的视角(α_{eye})之比。

$$M = \frac{\alpha_{instr}}{\alpha_{eye}}$$

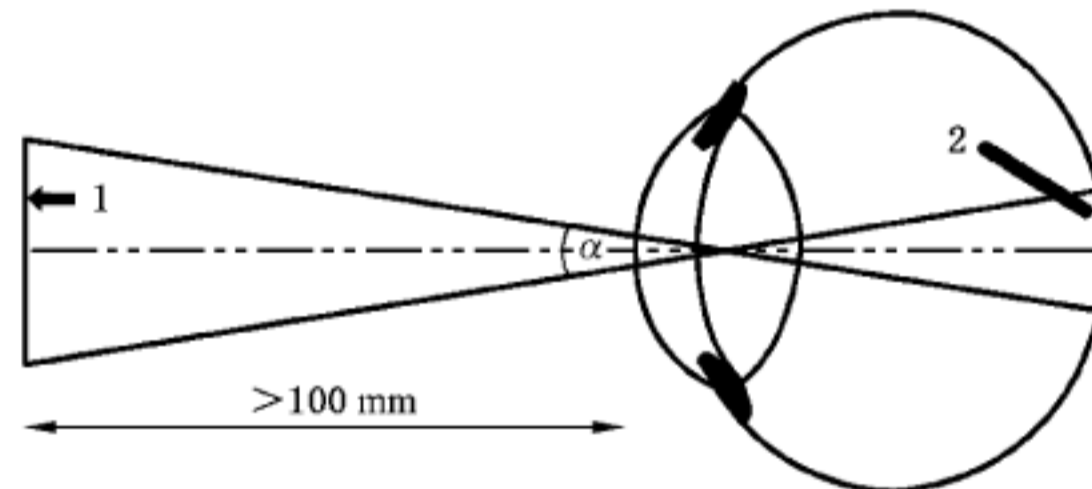
注:光学专业中,没有光学仪器时,视角通常以 25 cm 的舒适视距为基准。本部分中的最小观察距离规定为 10 cm。

3.2

对向角 angular subtense

α

观察者(见图 1)眼睛或测量点对表观光源所张的视角(也见最大对向角和最小对向角)。



说明:

- 1——表观光源;
- 2——视网膜成像。

图 1 表观光源对向角的定义

SI 单位:弧度。

3.3

孔径 aperture

孔径光阑 aperture stop

用来确定待测辐射通过面积的开孔(也见测量孔径)。

3.4

表观光源 apparent source

在视网膜上形成最小影像的实的或虚的物体(光辐射源)。

注：假定表观光源位于眼睛的调节范围内(通常 ≥ 100 mm),本定义用于测定 380 nm~1 400 nm 波长范围内的辐射表观光源的位置。

3.5

蓝光危害 blue light hazard

主要由波长在 380 nm~500 nm 之间的辐射照射引起的光化学作用导致视网膜的潜在损伤。

3.6

相干 coherence

电磁场两点之间在空间和时间上有恒定相位关系的特性。

3.7

相干长度 coherence length

在光束传播方向上能保持恒定相位关系的距离。

3.8

二极管发射器 diode emitter

通过激励半导体 p-n 结产生波长 180 nm~1 mm 范围内电磁辐射的半导体器件。

3.9

曝露距离 exposure distance

由辐射源到适于人员接近的最短距离。

3.10

照射持续时间 exposure duration

单脉冲、系列脉冲、脉冲串或连续光辐射照射到人体上的持续时间。

3.11

非相干 incoherent

如果相干长度小于 1 mm,则认为辐射是非相干的。

3.12

红外辐射 infrared radiation

在实际应用上,是指波长范围在 780 nm~1 mm 之内的电磁辐射。在光生物安全上,红外光谱被分成三个光谱波段:→红外 A、→红外 B 和→红外 C。

3.13

红外 A(IR-A) infrared A(IR-A)

波长在 780 nm~1 400 nm 范围内的光辐射。

3.14

红外 B(IR-B) infrared B(IR-B)

波长在 1 400 nm~3 000 nm 范围内的光辐射。

3.15

红外 C(IR-C) infrared C(IR-C)

波长在 3 000 nm~1 mm 范围内的光辐射。

3.16

预期使用 intended use

按照供应商提供的说明书、规程和信息来使用产品、进行操作或享有服务。

3.17

中等光源 intermediate source

一般情况下,中等光源在视网膜上的影像尺寸足够大,以至于从影像中心沿着径向(垂直于光轴)传导到周围的生物组织的热流与轴向(平行于光轴)热流相差不大。

特定情况下,中等光源在视网膜上形成的影像,其尺寸大于基于最大允许照射量值的尺寸(介于小光源和大光源影像尺寸之间)。本部分 MPE 值列表考虑了在一定范围内的眼运动因素。

注:本部分,中等光源在视网膜上的对向角在 1.5 mrad 和 100 mrad 之间,即视网膜上的影像直径在 25 μm 和 1 700 μm 之间。这些尺寸适用于照射时间小于 0.7 s。

本部分,特定情况下的中等光源在视网膜上的对向角在 11 mrad 和 100 mrad 之间,即视网膜上的影像直径在 187 μm 和 1 700 μm 之间。这些尺寸适用于照射时间大于 10 s。

至于照射时间在 0.7 s 和 10 s 之间的情况,中等光源的对向角取决于照射时间(见表 3)。

3.18

辐照度 irradiance

E

投射到表面一点处的面元 dA 上的辐射功率 dP 除以该面元的面积。

$$E = dP/dA$$

SI 单位: W/m^2 。

3.19

大光源 large source

光源在视网膜上的影像尺寸足够大,以至于从影像中心沿着径向(垂直于光轴)传导到周围的生物组织的辐射热流与轴向(平行于光轴)辐射热流相比可以忽略不计。

注:本部分大光源在视网膜上的对向角大于 100 mrad,即视网膜上光源像的直径大于 1 700 μm 。

3.20

光 light

见可见辐射。

3.21

发光二极管 light emitting diode; LED

见发射二极管(LED 的光辐射主要由自发发射过程产生)。

3.22

最大对向角 maximum angular subtense

α_{max}

表观光源对向角的值,当对向角大于该值时,光源被认为是大光源(见表 3)。

3.23

最大允许照射量 maximum permissible exposure; MPE

正常情况下,眼睛或皮肤受到照射不会受损的辐射量值。MPE 值与辐射波长、照射持续时间、处于危险状态的生物组织以及照射部位的尺寸有关。对于 380 nm~1 400 nm 范围内的可见辐射和近红外辐射,光源的对向角决定视网膜上影像的尺寸。

3.24

测量孔径 measurement aperture

测量辐照度、辐照量、辐射亮度和总辐射亮度所用的圆域。为与 MPE 值比较,这个孔径界定了上述物理量测量时被平均的区域。

3.25

单色辐射 monochromatic radiation

辐射的特点在于以单一波长表征低压气体放电管的单一发射谱线。实际上,如果在一个很小的波长波段内,生物作用光谱没有明显变化,则用确定的单一波长表述该波长波段的辐射。

3.26

光辐射 optical radiation

波长在 100 nm~1 mm 之间的电磁辐射。波长范围低于 180 nm 的紫外辐射(称为真空 UV)被空

气中的氧强烈吸收。本部分中,光辐射的波长波段被限制为波长大于 180 nm。

注:就辐射安全而论,380 nm~1 400 nm 波长范围的辐射需要特殊考虑,因为该波长范围内的辐射经由眼睛直达视网膜,由于眼睛的聚焦作用,与角膜上相比,视网膜上的辐照度可增加几个数量级。

3.27

光度量 photometric quantities

所有辐射度量都与有关光视觉的光度量对应,对于波长为 λ 的单色辐射,光度量可由辐射度量分别乘以对应的光谱效率 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ (见附录 C),和最大光谱辐射效能 K_m 、 K'_m 算出。

明视觉辐射效能: $K_m = 683 \text{ lm/W}$

暗视觉辐射效能: $K'_m = 1\ 700 \text{ lm/W}$

表 1 可以获得辐射度量和光度量名称的对应关系,两者符号相同,如果需要,它们可以用下标 e(能量的)和 v(视觉的)来区分辐射度量和光度量。

表 1 辐射度量和光度量的比较表

辐射度量		符号	光度量	
名称	单位		名称	单位
辐射功率	W	P, Φ	光通量	lm
辐射能量	J	Q	光量	lm · s
辐照度	W/m ²	E	照度	lm/m ² = lx
辐照量	J/m ²	H	曝光量	lx · s
辐射亮度	W/(sr · m ²)	L	亮度	lm/(sr · m ²) = cd/m ²
辐射强度	W/sr	I	发光强度	lm/sr = cd
总辐亮度	J/(sr · m ²)	L_i	总亮度	lm · s/(sr · m ²)

3.28

脉冲宽度 pulse duration

在脉冲前、后沿的半峰值功率点间测得的时间差。

3.29

辐射亮度 radiance

$L; L_i$

经过给定点的光束源在包含方向的立体角 $d\Omega$ 内传播的辐射功率 dP 除以垂直于这个方向 ϵ 包含给定点的该光束的截面面积 $dA \cdot \cos\epsilon$ 和立体角 $d\Omega$ (见图 2),辐射亮度 L 见式(1):

$$L = \frac{dP}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\epsilon} \dots\dots\dots(1)$$

如果式(1)中辐射功率用辐射通量 dQ 代替,对于总辐亮度 L_i ,公式同样成立,见式(2):

$$L_i = \frac{dQ}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\epsilon} \dots\dots\dots(2)$$

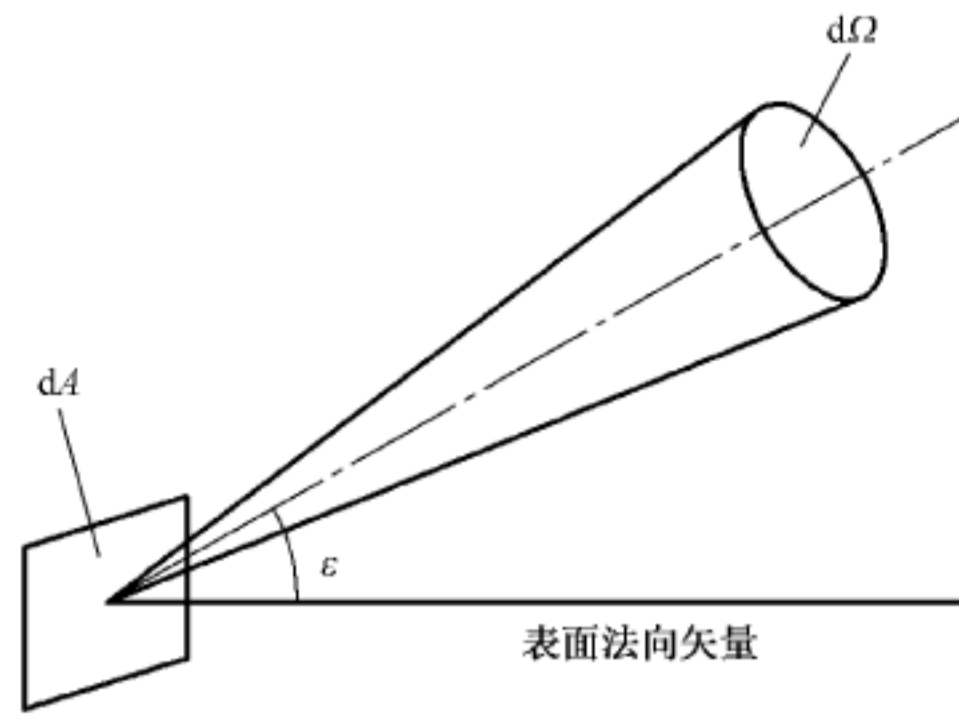


图 2 辐射亮度的定义

注 1: 本定义是 IEV 845-01-34 的简化式, 足够本部分使用。如难以确定, 则宜遵从 IEV 的定义。

注 2: 光学仪器不能改变辐射量度和总辐亮度。但是, 如果在折射率为 n_1 的材料下测量的辐射亮度是 L_1 , 要知道折射率为 n_2 的材料下的辐射亮度 L_2 , 则 L_1 必须乘以因子 $(n_1/n_2)^2$: $L_2/L_1 = (n_1/n_2)^2$ 。在空气 ($n_1=1$) 和眼睛 (因为含水和玻璃体, $n_2=1.336$) 的情况下, 这个因子等于 0.56。因为本报告的表格中已计入这一因子, 所以评估 MPE 时, 辐射亮度必须使用在空气中的测量值。

辐射亮度的 SI 单位: $W/(m^2 \cdot sr)$ 。

总辐亮度的 SI 单位: $J/(m^2 \cdot sr)$ 。

3.30

辐射能量 radiant energy

Q

辐射功率 P 在给定的持续时间 t 内对时间的积分, 见式(3):

$$Q = \int_0^t P \cdot dt \quad \dots\dots\dots(3)$$

SI 单位: 焦耳(J)。

3.31

辐照量 radiant exposure

H

辐照度在给定的照射时间内对时间的积分, 即照射到表面某处面元上的辐射能量 dQ 除以该面元 dA 的面积, 见式(4):

$$H = \frac{dQ}{dA} \quad \dots\dots\dots(4)$$

SI 单位: 焦耳每平方米 ($J \cdot m^{-2}$)。

3.32

辐射功率(通量) radiant power(flux)

$P, (\Phi)$

以辐射形式发射、传播或接收的功率。

[IEV 845-01-24]

SI 单位: 瓦(W)。

3.33

反射比 reflectance

ρ

在给定条件, 透射的辐射功率与入射的辐射功率之比。

[IEV 845-04-58]

SI 单位:1。

3.34

扫描辐射 scanned radiation

相对于固定参照系,随时间的变化而改变方向、原点或传播模式的辐射。

3.35

小光源 small source

一般情况下,小光源在视网膜上的成像足够小,以至于辐射热流很容易从影像中心沿着径向(垂直于光轴)传导到周围的生物组织。

特定情况下,小光源在视网膜上形成的影像,其尺寸远小于基于最大允许照射量值的尺寸。本部分表中所列的 MPE 中包含了眼睛的某些运动。(见 3.17 和 3.19)。

注:本部分,小光源在视网膜上的对向角小于 1.5 mrad。即视网膜上的影像直径小于 25 μm 。这些尺寸适用于照射时间小于 0.7 s。

特定情况下,小光源在视网膜上的对向角小于 11 mrad。即它的直径小于 187 μm ,这些尺寸适用于照射时间大于 10 s。

至于照射时间在 0.7 s 和 10 s 之间的情况,对向角取决于照射时间(见表 3)。

术语“点光源”不能被作为小光源,因为容易混淆:“点光源”可以远大于通常所谓的一个“点”。所以,本部分中的术语“小光源”按本定义。

3.36

立体角 solid angle

Ω

以半径为 r 的球的中心为顶点的角所截球表面的面积 A 除以半径的平方(见图 3):

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

SI 单位:球面度(sr)。

球体的立体角为 4π sr。

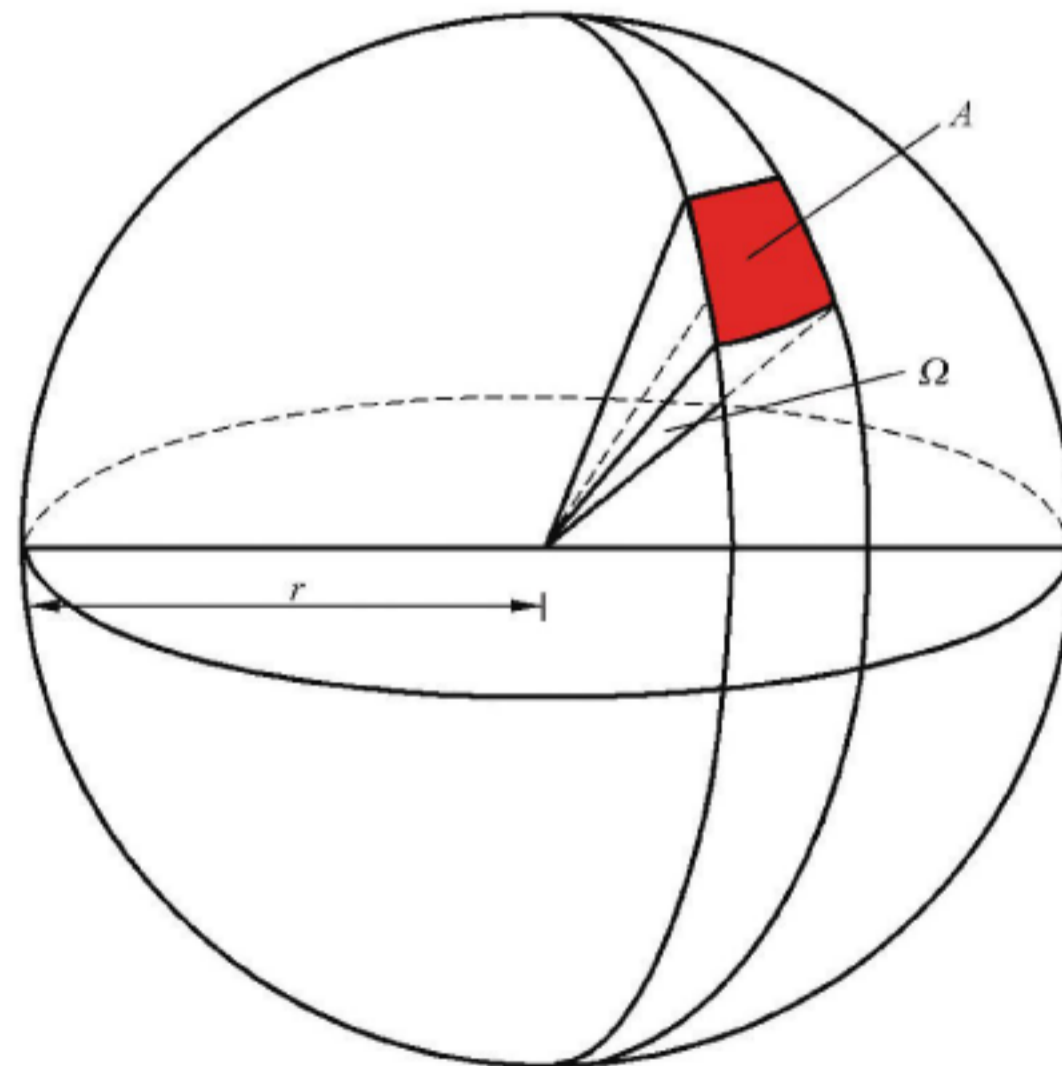


图 3 立体角的定义

3.37

光谱辐照度 spectral irradiance

E_λ

入射在一个表面面元上的一定波长间隔 $d\lambda$ 内发出的辐射功率 dP 与该面元的面积 dA 和波长间隔 $d\lambda$ 之比:

$$E_\lambda = \frac{dP}{(dA \cdot d\lambda)}$$

SI 单位: W/m^2 , 通常表示为 $W/(m^2 \cdot nm)$ 。

3.38

光谱辐亮度 spectral radiance

L_λ

通过给定点并沿给定方向 ϵ 立体角 $d\Omega$ 传播的辐射功率 dP 除以波长间隔 $d\lambda$ 、通过该点并垂直于该方向的光束截面积 $dA \cdot \cos\epsilon$ 以及立体角 $d\Omega$ (见图 2):

$$L_\lambda = \frac{dP}{d\Omega \cdot d\lambda \cdot dA \cdot \cos\epsilon}$$

SI 单位: $W/(m^2 \cdot sr)$, 通常表示为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$ 。

3.39

总辐亮度 time integrated radiance

L_i

辐射亮度在给定照射时间内的积分, 表示为单位发射立体角内, 单位辐射面积上的辐射能量。

SI 单位: $J/(m^2 \cdot sr)$ 。

3.40

紫外辐射 ultraviolet radiation

在实际应用上, 是指波长范围从 100 nm~400 nm 之内的辐射。在光生物安全上, 紫外光谱被分成三个波段: →紫外 A、→紫外 B 和 →紫外 C。波长小于 180 nm 的紫外辐射被称为真空紫外辐射。

注: 在许多标准中, 紫外光谱范围的长波极限确定在 380 nm。

3.41

紫外 A(UV-A) ultraviolet A (UV-A)

波长在 315 nm~400 nm 范围内的光辐射(见 3.40 的注)。

3.42

紫外 B(UV-B) ultraviolet B (UV-B)

波长在 280 nm~315 nm 范围内的光辐射。

3.43

紫外 C(UV-C) ultraviolet C (UV-C)

波长在 100 nm~280 nm 范围内的光辐射。

注: 波长低于 180 nm 的紫外辐射(称为真空 UV)被空气中的氧强烈吸收, 因此本部分限制 UV-C 波长范围的下限到 180 nm。

3.44

可见辐射(光) visible radiation (light)

任何能够直接引起视觉的光学辐射。

[IEV 845-01-03]。

注: 本部分是指单色分量的波长在 380 nm~780 nm 之间的电磁辐射。

3.45

视角 visual angle

物体或其部分对观测点所张的角(见 3.2)。通常以弧度、毫弧度、度或分来衡量。

4 最大允许照射量

4.1 概述

最大允许照射量(MPE)的值规定在已知危害水平以下,是以现有实验研究获得的最佳信息为基础,适用于 8 h 内的照射周期。MPE 值仅宜作为控制光辐射的指南,而不宜作为确定安全水平和危害水平之间的严格分界线。这些限值不适用于光过敏的个体或处于使用光敏剂状态的个体。

4.2 测量孔径

照射量值的所有测量和计算应选用一适当孔径。这个测量孔径为一个圆域的直径,辐照度或辐照量在该圆域上取平均。测量孔径在表 2 中给出。

如果辐照度在测量孔径上是均匀的,并且在探测系统灵敏度不足的情况下,可以采用比表中给出的孔径更大的测量孔径。但是,不能产生均匀光辐射模式的光源(即包含热点),可以按照表的孔径来评定热点的效应。

当测定皮肤的 MPE 时,推荐使用响应度正比于辐射入射角余弦的探测器。

波长范围从 380 nm~1 400 nm 辐射的眼睛照射值,宜在 7 mm 直径孔径上测量(眼瞳)。

表 2 适用于测量辐照度、照度、辐射亮度和总辐亮度的最小孔径直径

MPE _s 光谱范围	条款	照射持续时间	测量孔径直径	
			眼睛/mm	皮肤/mm
180 nm~400 nm	4.8.1	$t \leq 3$ s	1	1
180 nm~400 nm	4.8.1	$t > 3$ s	7	7
>380 nm~1 400 nm	4.8.2.1, 4.8.2.2	任意	7	3.5
>1 400 nm~3 000 nm	4.8.2.3	$t \leq 3$ s	1	1
>1 400 nm~3 000 nm	4.8.2.3	$t > 3$ s	3.5	3.5

4.3 瞳孔直径

基于标准瞳孔直径 d_s 为 7 mm、照射持续时间 < 0.5 s,和瞳孔直径为 3 mm、照射持续时间 > 0.5 s, 4.8.2 给出了波长范围从 380 nm~1 400 nm,适用于眼睛的 MPE 值。根据视场亮度,眼瞳直径约在小至 2 mm 和大到 7 mm 之间变化。瞳孔直径变化也随目视方式、年龄等因人而异。可从物体的平均亮度 L (以 cd/m^2 度量)计算瞳孔直径 d_p (以 mm 度量),见式(5):

$$d_p = 1.29 \text{ mm} + \frac{6.62 \text{ mm}}{1 + \left(\frac{L}{8.24 \text{ cd}/\text{m}^2}\right)^{0.32}} \dots\dots\dots(5)$$

瞳孔直径对亮度的关系曲线见图 4。

波长范围从 380 nm~1 400 mm、照射持续时间 < 0.5 s 时,MPE 值的修正与标准瞳孔直径 d_s (规定用于 MPE 的瞳孔直径)有关,和瞳孔面积成正比例,见式(6)、式(7)、式(8):

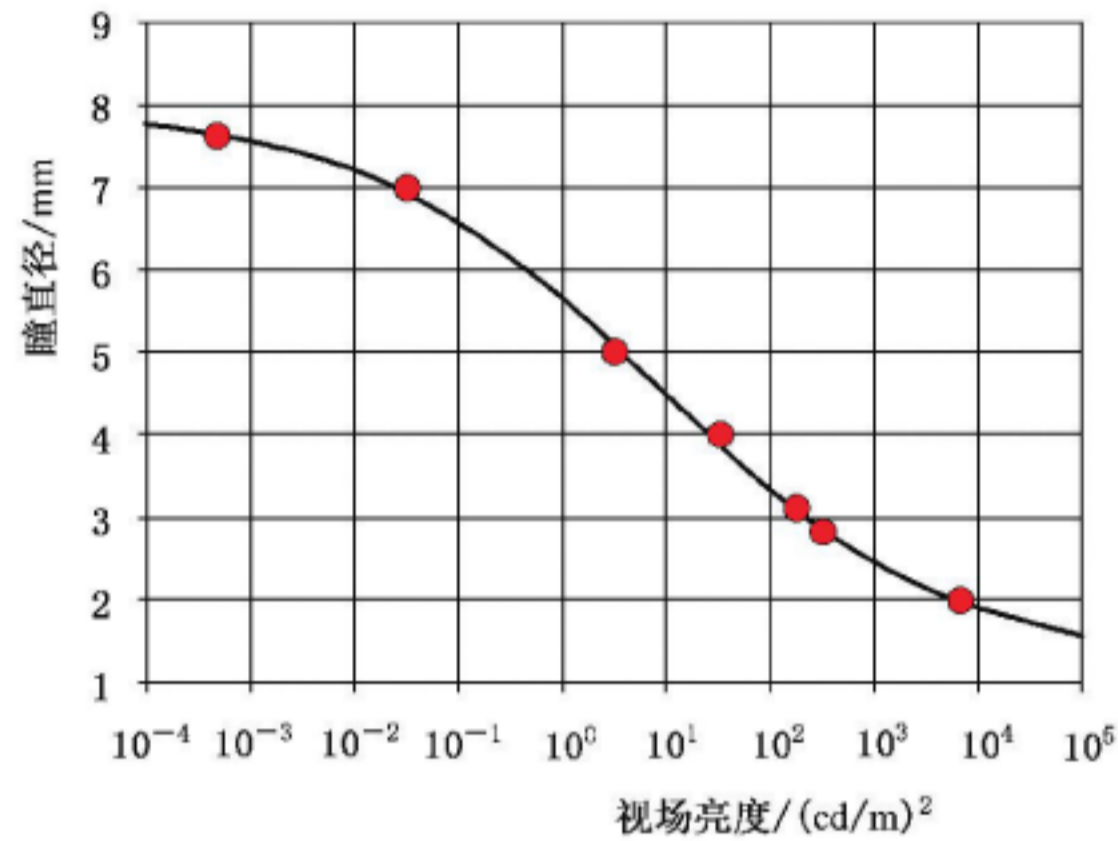
$$E_{MPE}(d_p) = E_{MPE}(d_s) \cdot \left(\frac{d_s}{d_p}\right)^2 \dots\dots\dots(6)$$

或

$$H_{MPE}(d_p) = H_{MPE}(d_s) \cdot \left(\frac{d_s}{d_p}\right)^2 \dots\dots\dots(7)$$

或

$$L_{MPE}(d_p) = L_{MPE}(d_s) \cdot \left(\frac{d_s}{d_p}\right)^2 \dots\dots\dots(8)$$



注：在不同的照明条件(如白天、夜晚等)下使用辐射源,采用 7 mm 瞳孔直径评定辐射安全是最可靠的。

图 4 按照 Reeves²⁾, 瞳孔直径对视场亮度的关系曲线

4.4 重复脉冲辐射、调制辐射或扫描辐射

由于现有的有关多脉冲照射的数据有限,因此在评估重复脉冲光辐射时必须慎重。大多数常用光源是连续辐射。但是,如果辐射输出的瞬时值重复降低低于其时间平均值的 10%,宜采用下列方法。

波长小于 380 nm, MPE 按下述 a) 和 b) 中最严格的要求确定。

波长大于 380 nm, MPE 按下述 b) 和 c) 中最严格的要求确定。

- a) 一脉冲串中持续时间为 t 的任一单脉冲的辐照量 H_{sp} (相应总辐亮度 L_{sp}), 不宜超过持续时间为 t 的一单脉冲的 MPE $H_{MPE}(L_{MPE})$, 见式(9)、式(10):

$$H_{sp} \leq H_{MPE}(t) \dots\dots\dots(9)$$

相应

$$L_{sp} \leq L_{MPE}(t) \dots\dots\dots(10)$$

- b) 持续时间为 T 的脉冲串, 其时间平均辐照度 E_m (相应辐射亮度 L_m) 不宜超过持续时间 T 内的单脉冲的 MPE E_{MPE} (相应 L_{MPE}), 见式(11)、式(12):

$$E_m \leq E_{MPE}(T) \dots\dots\dots(11)$$

相应

$$L_m \leq L_{MPE}(T) \dots\dots\dots(12)$$

照射持续时间为 T , 平均辐照度 E_m (相应辐射亮度 L_m) 通过式(13)、式(14)计算:

$$E_m = \frac{N \cdot H_{sp}}{T} \dots\dots\dots(13)$$

相应

$$L_m = \frac{N \cdot L_{sp}}{T} \dots\dots\dots(14)$$

2) 见 P.Reeves, JOSA4, 35-43(1920)。

式中:

N ——照射持续时间 T 内脉冲总个数。

- c) 一脉冲串中持续时间为 t 的任一单脉冲的辐照量 H_{sp} (相应总辐亮度 L_{sp}), 不宜超过持续时间为 t 的一单脉冲的 MPE $H_{MPE}(L_{MPE})$, 乘以修正因子 C_5 , 修正因子 C_5 仅适用于照射持续时间小于 0.25 s 的单脉冲, 通过式(15)、式(16)计算:

$$H_{sp} \leq H_{MPE}(t) \cdot C_5 \quad \dots\dots\dots(15)$$

相应

$$L_{sp} \leq L_{MPE}(t) \cdot C_5 \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:

C_5 —— $N^{-1/4}$;

N ——照射时间内所预设的脉冲总数。

两个公式等同于式(17)、式(18):

$$\frac{H_{sp}}{H_{MPE}(t) \cdot C_5} = \frac{H_{sp}}{H_{MPE}(t)} \cdot N^{1/4} \leq 1 \quad \dots\dots\dots(17)$$

相应

$$\frac{L_{sp}}{L_{MPE}(t) \cdot C_5} = \frac{L_{sp}}{L_{MPE}(t)} \cdot N^{1/4} \leq 1 \quad \dots\dots\dots(18)$$

对于由不同持续时间 t_i 的脉冲组成的一个脉冲串或者不同的单脉冲辐照量 H_{spi} (相应总辐亮度 L_{spi}) 组成时, 从式(17)和式(18)导出下式来代替式(15)和式(16), 见式(19)、式(20):

$$\sum N_i \cdot \left[\frac{H_{spi}}{H_{MPE}(t_i)} \right]^4 \leq 1 \quad \dots\dots\dots(19)$$

相应

$$\sum L_i \cdot \left[\frac{L_{spi}}{L_{MPE}(t_i)} \right]^4 \leq 1 \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中:

N_i ——持续时间为 t_i 的脉冲数;

$N = \sum N_i$ ——照射时间内所预设的脉冲总数。

某些情况下, 单脉冲的辐照量 H_{sp} 可降到低于在相同峰值功率下用相同总照射时间连续照射的 MPE, 在这些条件下可用连续照射的 MPE。

4.5 光源的对向角

表观光源对向角的极值概念适用于波长范围 380 nm~1 400 nm, 辐射可经眼睛屈光系统聚焦到视网膜上。

本部分采用两个极值对向角: 在小光源和中等光源之间确定最小对向角 α_{min} , 和在中等光源和大光源之间确定最大对向角 α_{max} 。

对向角小于 α_{min} 时, 其 MPE 与光源尺寸无关。 α_{min} 的值与照射持续时间 t (见表 3) 相关。

注: 最小对向角与照射持续时间有关, 而照射持续时间与眼睛运动有关。照射持续时间大于 10 s 时, 能量在视网膜上扩散的面积比时间小于 0.7 s 时要大得多, α_{min} 等于 11 mrad; 照射持续时间为 1 000 s 或更长, 眼睛持续运动时, α_{min} 大于 100 mrad。

表 3 眼睛的极值对向角

$\alpha_{min} = 1.5 \text{ mrad}$	$t < 0.7 \text{ s}$
$\alpha_{min} = 2 \cdot t^{3/4} \text{ mrad}$	$0.7 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$
$\alpha_{min} = 11 \text{ mrad}$	$t \geq 10 \text{ s}$
$\alpha_{max} = 100 \text{ mrad} = 0.1 \text{ rad}$	

对向角大于 α_{\max} 时,其 MPE 与光源尺寸无关, α_{\max} 值与照射持续时间 t (见表 3)无关,均为 100 mrad。在最小对向角(α_{\min})和最大对向角(α_{\max})之间,视网膜热损伤的 MPE 与光源尺寸有关。

用辐亮度或总辐亮度表示 MPE 值时,其与光源尺寸成反比。为了描述 MPE 与光源的相关性,采用修正因子 C_a :

$$\begin{aligned} C_a &= \alpha_{\min} && \alpha \leq \alpha_{\min} \\ C_a &= \alpha && \alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max} \\ C_a &= \alpha_{\max} && \alpha_{\max} < \alpha \end{aligned}$$

对向角的极值必须按照所用的照射持续时间选用,例如:短于 0.7 s 的单脉冲, $\alpha_{\min}=1.5$ mrad,长于 10 s 的照射持续时间, $\alpha_{\min}=11$ mrad。

椭圆和长方形光源的对向角由光源的最大角和最小角的算术平均值确定。确定均值前,大于 α_{\max} 或小于 1.5 mrad 的角,宜分别取为 α_{\max} 或 1.5 mrad。

光源对向角在预期照射距离上确定,人眼能够清晰聚焦的最近距离大约是 100 mm。距离再短,光源的像将离焦而模糊。因此本部分确定光源的对向角采用不少于 100 mm 的距离。

4.6 时间基准

任何基于 MPEs 的评估是建立在预期照射持续时间的基础上。当直视亮度大于 10^4 cd/m² 的光源时,本能的保护性反应极限照射时间为 0.25 s。以 J/m² 表示 MPE 并且预期照射超过 8 h,正常的扩展照射条件下,数据证明,超过 8 h 的所有紫外光谱的 MPE 适用于 8 h 的辐照度。

4.7 辐射亮度和辐照度

下面的章节中,一些 MPE 表示为辐射亮度(相应总辐亮度),一些表示为辐照度(相应辐照量)。

从辐射亮度 L 计算辐照度 E ,对于角 $\epsilon=0$ (见 3.29),必须乘以光源对眼睛所张的立体角 Ω ,由式(21)计算:

$$E = L \cdot \Omega \quad \dots\dots\dots(21)$$

这一关系适用于小的立体角 Ω ,更通用的表达式见式(22):

$$dE = L \cdot d\Omega \quad \dots\dots\dots(22)$$

对于小的圆形光源,平面角 α 和立体角 Ω 之间的关系见式(23):

$$\Omega = \frac{\alpha^2 \cdot \pi}{4} \quad \dots\dots\dots(23)$$

对于给定的对向角 α ,辐照度和辐射亮度之间的关系见式(24):

$$E = L \cdot \frac{\alpha^2 \cdot \pi}{4} \quad \dots\dots\dots(24)$$

总辐射亮度和辐照量之间的等效关系成立。

注 1: 测量辐射亮度的仪器通常借助一个给定孔径并在规定的接收角内测量辐射功率。本部分 MPE 表示为辐射亮度时采用上述关系式,应该用 α_{\min} 计算测量的立体角 Ω 。

注 2: 用测量的辐照度转换为辐射亮度来表示 MPEs 时,采用上述关系式。辐照度测量应使用的立体角 Ω 对应着最小为 α ,最大 $(\alpha_{\min}^2 \cdot \pi) / 4$ 的光源尺寸。

4.8 眼睛的最大允许照射量

4.8.1 紫外光谱范围

4.8.1.1 180 nm~400 nm 光谱范围

光谱范围在 180 nm~400 nm 之间,光源的有效辐照度和辐照量分别使用加权式(25)、式(26)计算:

$$E_{\text{eff}} = \sum_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \Delta\lambda \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$H_{\text{eff}} = \sum_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} H_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \Delta\lambda \quad \dots\dots\dots(26)$$

式中：

- $E_{\lambda}(\lambda)$ —— 光谱辐照度；
- $H_{\lambda}(\lambda)$ —— 光谱辐照量；
- $S(\lambda)$ —— 相对光谱响应(见附录 B 和图 5)；
- $\Delta\lambda$ —— 光谱带宽。

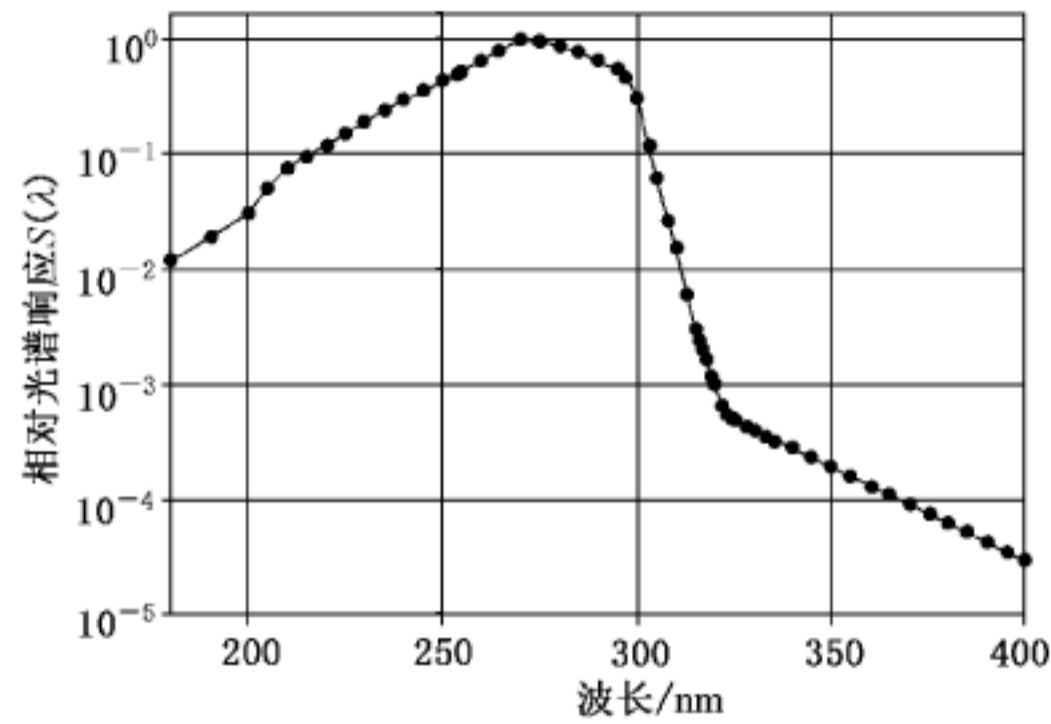


图 5 相对光谱响应 $S(\lambda)$

最大允许有效辐照量 H_{eff} 见式(27)：

$$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2 \quad \dots\dots\dots(27)$$

对于给定的有效辐照度,允许照射时间以秒为单位,紫外辐射无防护的条件下,眼睛的允许照射时间由式(28)确定：

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J/m}^2}{E_{\text{eff}}} \quad \dots\dots\dots(28)$$

照射时间也可从表 4 查到。表 4 规定了每日不同照射持续时间下的最大允许有效辐照度。

表 4 UV 辐射的最大允许照射

每日的照射持续时间	最大允许有效辐照度 E_{eff} W/m ²
8 h	0.001
4 h	0.002
2 h	0.004
1 h	0.008
30 min	0.017
15 min	0.033
10 min	0.05
5 min	0.1
30 s	1
10 s	3
1 s	30
0.5 s	60
0.1 s	300

4.8.1.2 315 nm~400 nm 光谱范围

光谱范围从 315 nm~400 nm,8 h 周期内的最大允许总辐照量见式(29):

$$H_{UV} = 10^4 \text{ J/m}^2 \dots\dots\dots(29)$$

注:从 315 nm 到 400 nm 的波长范围内,ACGIH 提供的辐照量极限是 1 000 s 为 10^4 J/m^2 ,更长的时间为 10 W/m^2 。

4.8.2 可见和红外光谱范围

评估下述三个危害:视网膜热危害、视网膜蓝光光化学危害以及影响角膜和晶状体的红外辐射危害,由光源引起风险等级最大的一个来确定。

4.8.2.1 和 4.8.2.2 中的最大允许照射量值在 4.3 规定的标准瞳孔直径上取平均。

4.8.2.1 视网膜热危害(380 nm~1 400 nm)

波长范围从 380 nm~1 400 nm 光源的有效辐射亮度 L_{RTH} ,采用下述加权式(30)计算:

$$L_{RTH} = \sum_{380 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \dots\dots\dots(30)$$

式中:

$L_{\lambda}(\lambda)$ ——光谱辐射亮度;

$R(\lambda)$ ——视网膜热危害加权函数(见附录 A 和图 6);

$\Delta\lambda$ ——光谱带宽。

为防护视网膜热损伤,照射持续时间 t 的最大允许有效辐射亮度 L_{RTH} 由式(31)、式(32)、式(33)确定:

$$10 \text{ s} < t \quad L_{RTH} = \frac{2.8 \cdot 10^4}{C_a} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(31)$$

$$18 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s} \quad L_{RTH} = \frac{5 \cdot 10^4}{C_a t^{1/4}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(32)$$

$$t < 18 \mu\text{s} \quad L_{RTH} = \frac{41.2}{C_a t^{0.9}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(33)$$

式中:

t ——以秒为单位的照射持续时间;

C_a ——按照 4.5 的规定,以弧度为单位的修正因子。

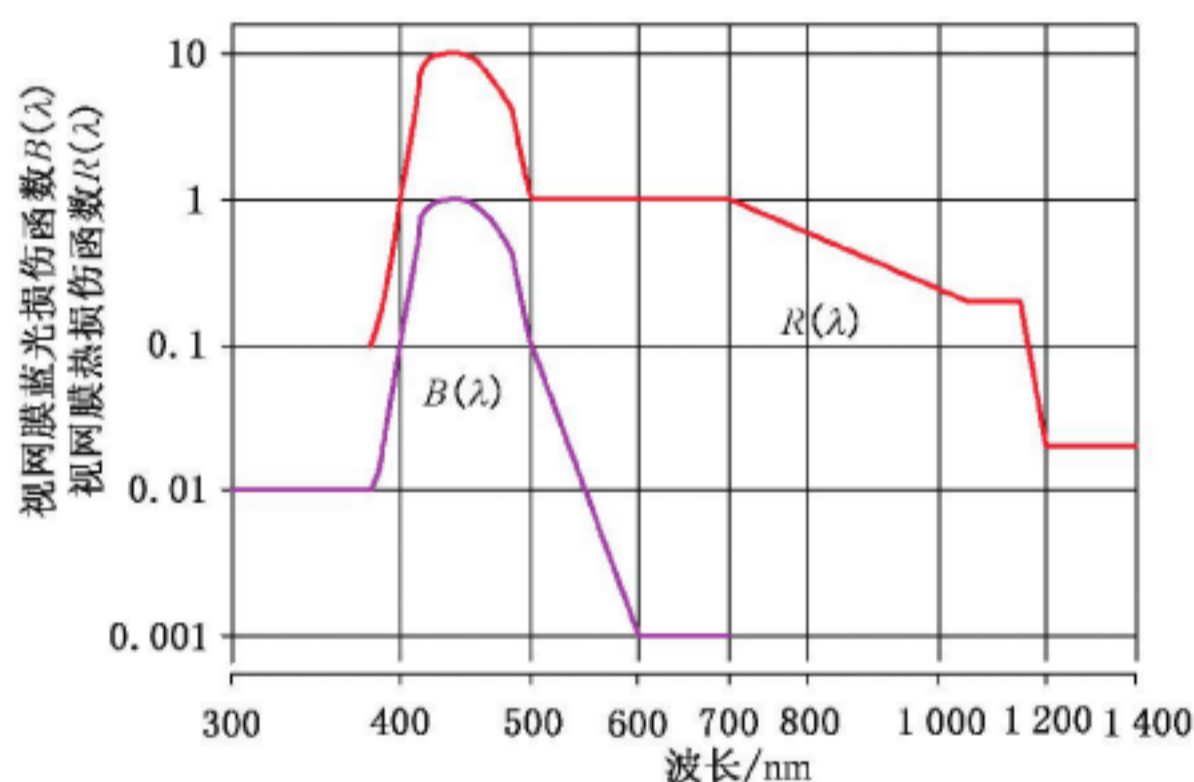


图 6 视网膜热危害函数 $R(\lambda)$ 和视网膜蓝光危害函数 $B(\lambda)$

图 7 中,波长在 1 050 nm~1 150 nm 之间的最大允许辐射亮度分别采用 α_{\min} 和 α_{\max} 的函数确定。对向角大于 0.1 rad 的光源,这些公式简化表示如下,[见式(34)、式(35)、式(36)]:

$$10 \text{ s} < t \quad L_{\text{RTH}} = 2.8 \cdot 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(34)$$

$$18 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s} \quad L_{\text{RTH}} = \frac{5 \cdot 10^5}{t^{1/4}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(35)$$

$$t < 18 \mu\text{s} \quad L_{\text{RTH}} = \frac{412}{t^{0.9}} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(36)$$

式中:

t ——以秒为单位的照射持续时间。

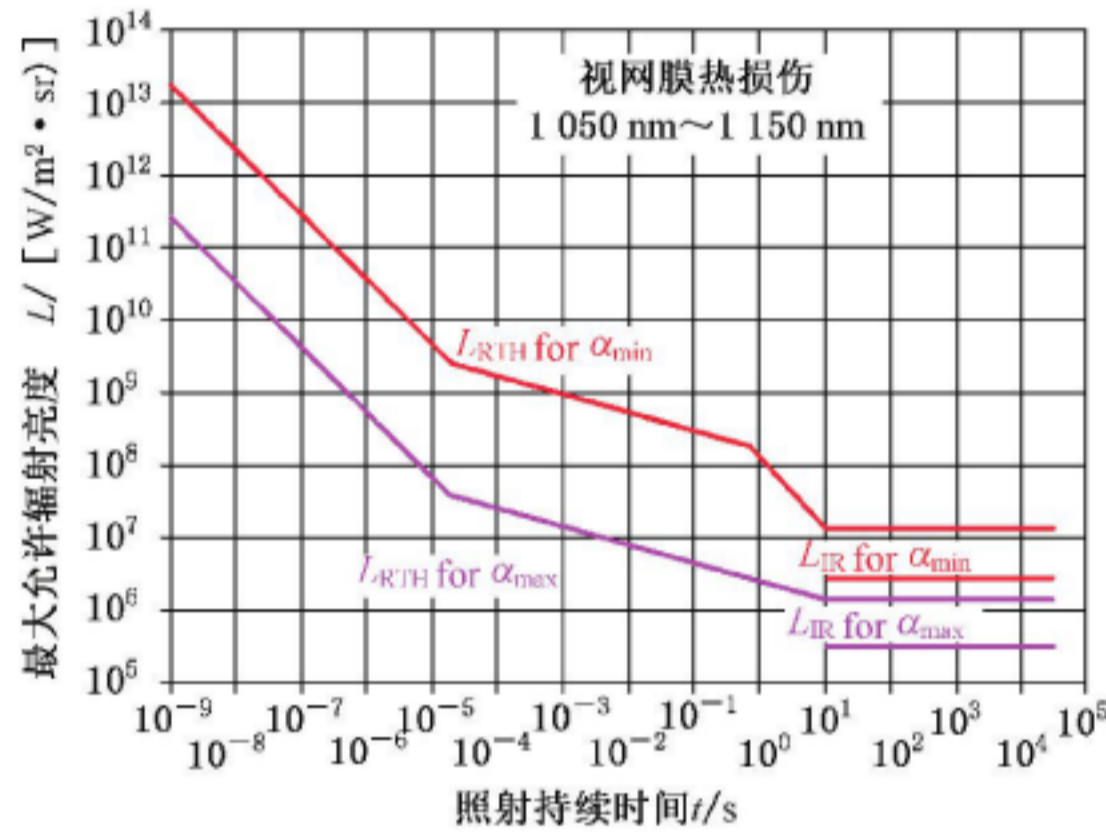


图 7 波长范围从 1 050 nm~1 150 nm,分别采用 α_{\min} 和 α_{\max} 确定最大允许辐射亮度的时间相关性

对于一个红外光源,它所产生弱的视觉刺激不足以引起不适反应。有效红外辐射亮度 L_{IR} 由式(37)确定(弱的视觉刺激在这里被定义为其在对向角为 0.011 rad 的圆形视场上平均的最大亮度小于 10 cd/m²):

$$L_{\text{IR}} = \sum_{780 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \Delta\lambda \dots\dots\dots(37)$$

式中:

$L_{\lambda}(\lambda)$ ——光谱辐射亮度;

$R(\lambda)$ ——视网膜热危害加权函数(见附录 A 和图 6)。

为防护视网膜热损伤,最大允许有效红外辐射亮度 L_{IR} ,由式(38)确定:

$$t \geq 10 \text{ s} \quad L_{\text{IR}} = \frac{6\,000}{C_a} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(38)$$

式中:

t ——以秒为单位的照射持续时间;

C_a ——以弧度为单位的修正因子。

图 7 分别图示了波长在 1 050 nm~1 150 nm 之间的 α_{\min} 函数和 α_{\max} 函数。

照射持续时间少于 10 s 的情形,式(32)和式(33)适用。

4.8.2.2 视网膜蓝光光化学危害(300 nm~700 nm)

确定光源的有效蓝光辐射亮度 L_{B} 时,采用下述加权式(39)计算:

$$L_{\text{B}} = \sum_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \Delta\lambda \dots\dots\dots(39)$$

式中:

$L_{\lambda}(\lambda)$ ——光谱辐射亮度;

$B(\lambda)$ ——视网膜蓝光危害加权函数(见附录 A 和图 6)。

为防护视网膜蓝光损伤,最大允许有效辐射亮度 L_B ,由式(40)、式(41)确定:

$$t \leq 10\,000\text{ s} \quad L_B = \frac{1 \cdot 10^6}{t} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(40)$$

$$t > 10\,000\text{ s} \quad L_{\text{RTH}} = 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}) \dots\dots\dots(41)$$

式中:

t ——以秒为单位的照射持续时间。

注:照射持续时间少于 10 s,视网膜热危害的极限值 L_{RTH} 通常小于蓝光危害的极限值。

当不满足式(32)时,直视的最大持续时间 t_{max} 由式(42)确定:

$$t_{\text{max}} = \frac{1 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})}{L_B} \dots\dots\dots(42)$$

确定光源的有效蓝光辐照度 E_B 时,采用加权式(43)计算:

$$E_B = \sum_{300\text{ nm}}^{700\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \Delta\lambda \dots\dots\dots(43)$$

式中:

$E_{\lambda}(\lambda)$ ——光谱辐照度;

$B(\lambda)$ ——视网膜蓝光危害加权函数(见附录 A 和图 6)。

在光源对向角 $\alpha < 0.011\text{ rad}$ 时,为防护视网膜蓝光危害,最大允许有效蓝光辐照度 E_B ,由式(44)、式(45)确定:

$$t \leq 10\,000\text{ s} \quad E_B = \frac{100 \text{ J}/\text{m}^2}{t} \dots\dots\dots(44)$$

$$t > 10\,000\text{ s} \quad E_B = 0.01 \text{ W}/\text{m}^2 \dots\dots\dots(45)$$

式中:

t ——照射持续时间。

当计算直视的最大持续时间,式(44)不适用时, t_{max} 见式(46):

$$t_{\text{max}} = \frac{100 \text{ J}/\text{m}^2}{E_B} \dots\dots\dots(46)$$

4.8.2.3 角膜和晶状体的红外辐射危害(780 nm~3 000 nm)

为避免角膜的热危害以及尽可能延迟热危害对眼睛晶状体的影响(白内障),在 780 nm~3 000 nm 的光谱范围内,总辐照度 E_{IR} ,由式(47)、式(48)限制:

$$t \geq 1\,000\text{ s} \quad E_{\text{IR}} = 100 \text{ W}/\text{m}^2 \dots\dots\dots(47)$$

$$t < 1\,000\text{ s} \quad E_{\text{IR}} = \frac{1.8 \cdot 10^4}{t^{3/4}} \text{ W}/\text{m}^2 \dots\dots\dots(48)$$

式中:

t ——以秒为单位的照射持续时间。

在冷的环境条件下,用红外光源加热时,这些极限值可以增加,在 0 °C 时为 400 W/m²,在 10 °C 时为 300 W/m²。

本条的最大允许辐照度值是在 4.3 规定的标准瞳孔直径上取平均,但是测量光阑的直径按照表 2 选用。

4.8.3 眼睛最大允许照射量的汇总

表 5 给出了眼睛的最大允许照射量值的汇总。

表 5 眼睛的最大允许照射量

量和加权函数	波长 λ/nm	照射持续时间 t/s				
		10 ⁻⁹ ~1.8×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁵ ~10	10~10 ³	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁴ ~3×10 ⁴
$H_{\text{eff}} = \sum_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} H_{\lambda}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda$	180~400	30 J/m ²				
$H_{\text{UV}} = \sum_{315 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} H_{\lambda}(\lambda) \Delta\lambda$	315~400	10 ⁴ J/m ²				
$L_{\text{B}} = \sum_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) B(\lambda) \Delta\lambda$	300~700	$(1 \cdot 10^6 / t) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$			$100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$	
$L_{\text{RTH}} = \sum_{380 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda$	380~1400			$\frac{2.8 \cdot 10^4}{C_a} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$		
$L_{\text{IR}} = \sum_{780 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) B(\lambda) \Delta\lambda$	780~1400 光源亮度 <10 cd/m ²	$\frac{41.2}{C_a t^{0.9}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$	$\frac{5 \cdot 10^4}{C_a t^{1/4}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$	$\frac{6000}{C_a} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$		
$E_{\text{IR}} = \sum_{780 \text{ nm}}^{3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \Delta\lambda$	780~3000	$\frac{1.8 \cdot 10^4}{t^{3/4}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$			$100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	

4.9 皮肤的最大允许照射量

4.9.1 紫外光谱范围(180 nm~400 nm)

在 180 nm~400 nm 之光谱范围内,光源的有效辐照度 E_{eff} 和有效辐照量 H_{eff} 分别由加权式(49)、式(50)计算:

$$E_{\text{eff}} = \sum_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \Delta\lambda \quad \dots\dots\dots(49)$$

$$H_{\text{eff}} = \sum_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} H_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \Delta\lambda \quad \dots\dots\dots(50)$$

式中:

$E_{\lambda}(\lambda)$ —— 光谱辐照度;

$H_{\lambda}(\lambda)$ —— 光谱辐照量;

$S(\lambda)$ —— 相对光谱响应(见附录 B);

$\Delta\lambda$ —— 光谱带宽。

最大允许有效辐照量,见式(51):

$$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2 \quad \dots\dots\dots(51)$$

对于特定的有效辐照度,允许照射时间以秒为单位,紫外辐射无防护的条件下,皮肤的允许照射时间 t_{max} 由式(52)确定:

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J/m}^2}{E_{\text{eff}}} \quad \dots\dots\dots(52)$$

照射时间也可从表 4 查到。表 4 规定了对应不同有效辐照度所采用的照射持续时间。

4.9.2 可见和红外光谱范围 (380 nm~3 000 nm)

为防护皮肤热损伤,380 nm~3 000 nm 光谱范围内,照射持续时间 $t < 10$ s 时,最大允许辐照量 H 由式(53)给出:

$$H = 2 \cdot 10^4 \cdot t^{1/4} \text{ J/m}^2 \quad \dots\dots\dots(53)$$

式中:

t ——以秒为单位的照射持续时间。这个极限将避免皮肤的热损伤。

因为正常的免除行为将对照射持续时间加以限制,所以未给出大于 10 s 照射持续时间时的极限。长得多的照射持续时间的极限值受制于热应力的影响。

4.10 光度量

用光度量(通常对明亮视觉)表征辐射源的发射特征。如果发射是单色的,用光度量除以相对光谱效率 $V(\lambda)$ (见附录 C)和最大光谱辐射效能 K_m (见 3.27),可以计算相应的辐射度量。

5 测量

5.1 测量条件

5.1.1 在合理可预见的照射条件下,人员接触的空间位置由风险评估确定。

评估眼睛的照射情形,在波长 380 nm~1 400 nm 时,测量光阑离表观光源的最小距离要符合预定用途的最小距离。但是,不小于 100 mm。在离表观光源相同距离处确定对向角 α 。

5.1.2 采用测量仪器的探测器进行定位和定向的方法获取最大辐射,并按照表 2 规定的测量孔径在圆形光阑上取平均。

5.1.3 表观光源对向角 α 大于 α_{\min} 时评估 L_{RTH} 和 L_{IR} ,采用直径为 7 mm 的圆形测量孔径(见 4.2 和 4.3)和等于 α_{\min} 的有效接收角评估眼睛的 MPEs。通过扫描光源的方式探测到热的光点。

5.1.4 表观光源对向角 α 小于 α_{\min} 时评估 L_{RTH} 和 L_{IR} ,采用直径为 7 mm 的圆形测量孔径和等于 α_{\min} 的有效接收角评估眼睛的 MPEs。

5.1.5 α_{\min} 与时间的关系仅需考虑 0.7 s~10 s 之间的照射时间。多数情况下,评估光源有如下两个接收角 1.5 mrad 和 11 mrad 就足够了。

5.1.6 视网膜蓝光危害在接收角等于 α_{\min} 下估算,因为视网膜蓝光危害受较长照射时间(多于 10 s)的制约,大多数情况在 11 mrad 的接收角下估算光源是足够的。

5.1.7 表观光源由多个点组成、或者是线性光源或者是辐射亮度不均匀的光源时,其对向角大于 α_{\min} ,波长从 380 nm~1 400 nm,对每个光点或光点的组合进行视网膜热危害的测量或评估,必须确保对于每个局部区域的每个可能的对向角 α 照射不超过 MPE,这里不仅 $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$,而且整个光源所采用的接收角不大于 α_{\max} 。

5.1.8 为了评估 MPE,一个线光源的对向角的值由光源的最小尺寸和最大尺寸的平均值确定。为了计算平均值,最小尺寸取值不小于 α_{\min} ,最大尺寸取值不大于 α_{\max} 。

5.1.9 波长范围在 380 nm~1 400 nm 之外的,适合皮肤的 MPE,在其响应正比于辐射入射角的余弦的探测器下评估。

5.2 测量方法

5.2.1 概述

下面叙述的测量方法只是简单方法的实例,也可以采用任一个别的等同方法,采用已知测量不确定

度的测量仪器进行测量。

5.2.2 (总)辐射亮度的测量

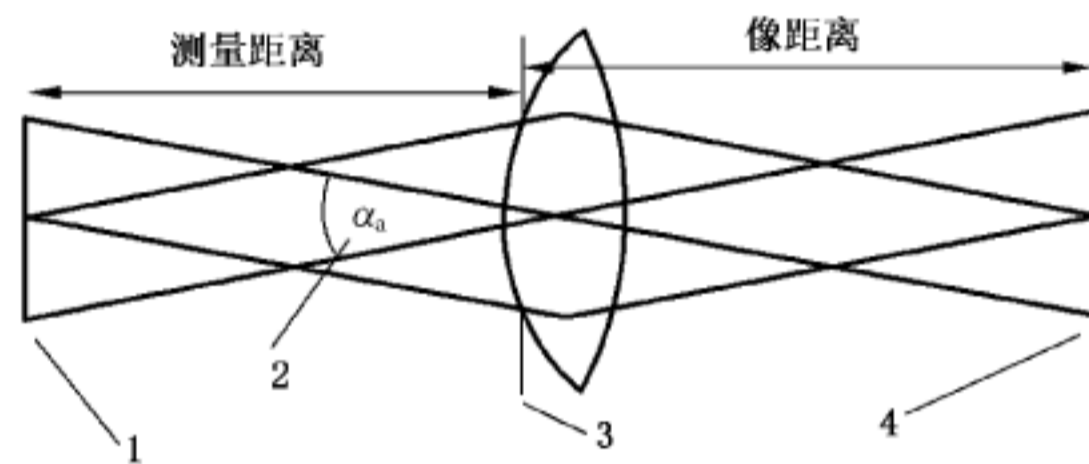
(总)辐射亮度 $L(L_i)$ (见图 8) 是在给定的测量距离处放置一给定的测量孔径光阑, 通过该孔径光阑的表面面积为 A 的辐射功率 P 来确定。辐射光源的辐射亮度在对应的平面接收角上取平均得到。这个平面接收角 α_a 决定了测量装置的接收立体角 Ω 。对于小的圆形光源, 可以使用平面角 α 和立体角 Ω 之间的关系式(23)。

光源的辐射亮度是通过一测量孔径, 其表面面积为 A 的辐射功率 P 和立体角 Ω 来计算的, 见式(54):

$$L = \frac{P}{\Omega \cdot A} \dots\dots\dots(54)$$

总辐亮度 L_i 以同样方式测量, 但由测量的辐射能量 Q 代替测量的光功率 P , 见式(55):

$$L_i = \frac{Q}{\Omega \cdot A} \dots\dots\dots(55)$$



说明:

- 1 —— 表光光源;
- 2 —— 有效接收角;
- 3 —— 孔径光阑;
- 4 —— 探测器;
- α_a —— 一个孔径光阑的 α 角。

图 8 测量(总)辐射亮度的测量条件

5.2.3 表观光源尺寸的测量

5.2.3.1 裸光源

许多情况下, 辐射光源的物理尺寸是已知的。在这种情况下, 表观光源的尺寸等于光源的尺寸。

在光源尺寸未知, 并且不易直接测量的情况下, 光源须通过透镜成像来测定。例如, 图 9 给出的方法, 焦距 f 的透镜有足够大的直径以拦截光源的全部辐射。不可行的条件下, 则透镜的最小直径 d_1 由式(56)给出:

$$d_1 = 7 \text{ mm} \cdot \frac{g}{100 \text{ mm}} \dots\dots\dots(56)$$

式中:

g —— 从透镜(的第一主面)到光源的距离。

这些尺寸在图 9 中给出了标示。

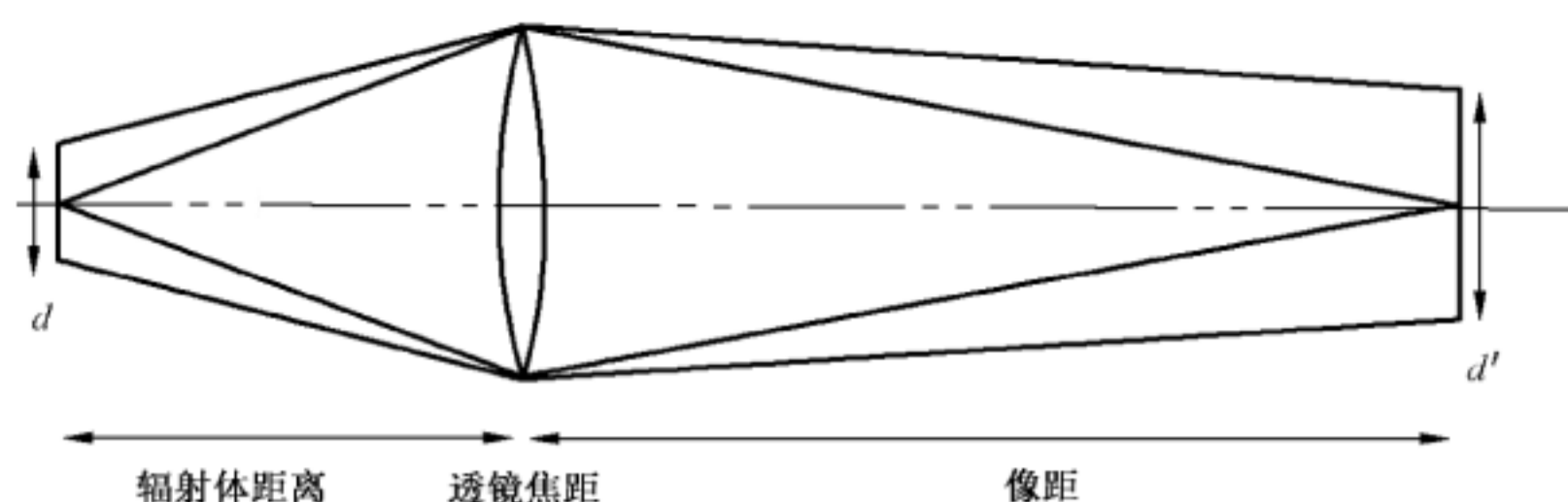


图 9 光源对向角的确定

如果 b 是从透镜(的第二主面)到像的距离,则光源的直径 d 由式(57)给出:

$$d = d' \cdot \frac{g}{b} \dots\dots\dots (57)$$

式中:

d' ——像平面内像的直径。

按 5.2.3.3 和 5.2.3.4 规定的方法确定 d' 。

5.2.3.2 光源/透镜组合

如果辐射体由光源和光学元件(如透镜和/或镜子)装配而成,从透镜到光源的距离、光学元件的焦距和光学元件的主面通常是未知的。这种情况下,类似图 10 的装置,可以确定光源的对向角。第二透镜的直径必须大于辐射体组件的直径。宜按 5.2.3.3 和 5.2.3.4 规定的方法确定 d' 。

光源的放大率 M 由

$$M = 1 - \frac{a}{f_0} - \frac{b}{f} \left(1 - \frac{a}{f_0} \right) - \frac{b}{f_0}$$

给出。式中 f_0 是辐射体组件透镜的焦距, a 是两个透镜的右、左主平面之间的距离。在不同焦距 f 的透镜组和两个透镜间不同距离 a 下确定像尺寸 d' , 两个未知量 f_0 和 d 可以计算。如果 a 足够大, 将无需分别确定, 因为未知透镜主平面的精确位置对测量误差几乎没影响。

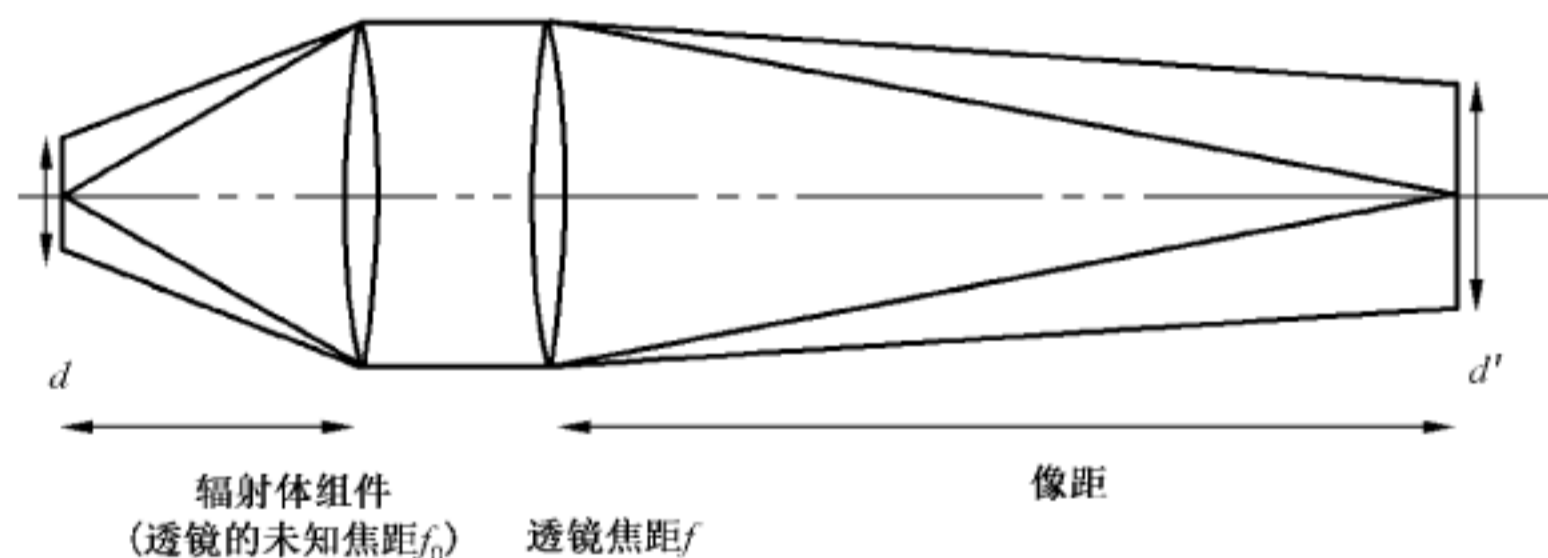


图 10 光源对向角的确定

5.2.3.3 圆对称光源

必须将一个圆形孔径放置在探测器系统前, 探测器和孔径必须大于被测量的光源的像。探测器和光阑构成的组件放在光源的像平面, 对中传播光束的光轴, 测量总功率。

减小孔径, 直到通过孔径的功率等于总功率的 63% 为止。此时的孔径直径就是这一平面的光束的直径。只有将孔径放置在光源的像平面, 才能测量到最小的像直径。建议在接近假想像平面的几个地方重复测量几次光束直径。

5.2.3.4 椭圆形和矩形光源

在矩形或其他非圆形光源的情形下,确定光束尺寸的方法相当于圆形光源的方法。但是,用矩形狭缝来代替圆形孔径,以确定通过总功率 63% 时尽可能小的矩形。这样的非圆形光源通常有两个选择方向,矩形的边必须平行,选择的方向是最小光束宽度方向和正交方向。必须首先确定选择的方向,这可以通过在垂直于光束传播的平面内转动一个狭缝做到。

为确定通过总功率 63% 时尽可能小的矩形,建议用迭代方法。为测量总功率,放置在探测器前的矩形狭缝必须足够大,使其在任一方向都不限制功率通过。探测器和矩形必须对中辐射光束传播的光轴。

矩形宽度在一维方向减小,直到通过总功率的 $\sqrt{63\%} = 79\%$ 为止,为检查非均匀辐射光源情形下,矩形狭缝和光束的对中,矩形宜在其宽度变化的方向前后运动。这一步骤不断重复直到找到尽可能小的矩形宽度为止。

对矩形的另一个方向,重复同样的步骤。两个步骤不断重复直到光源(矩形)像的宽度和长度不变而获得最终结果。

5.2.4 对向角的确定

在预期用途距离上确定来自表观光源照射时的对向角,这个距离不宜小于 100 mm。

光源的对向角由光源直径 d 除以观察距离的比值给出。观察距离的最小值由可调节距离的最小假定值给出,它等于 100 mm。在非圆形光源的情形下,存在两个对向角的值,一个对应最短的尺寸,另一个对应最长尺寸。

在图 9 给出的情形下,透镜上像的对向角由式(58)给出:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d'}{b}\right) \quad \dots\dots\dots(58)$$

如果观察距离是 g ,这也可以是在眼睛处的对向角。在不同观察距离 g' ,对向角见式(59):

$$\alpha = \frac{d'}{b} \cdot \frac{g}{g'} \quad \dots\dots\dots(59)$$

在图 9 给出的情形下,在图 10 给出的情形下,透镜上像的对向角可以由 $\alpha = d'/b$ 得到。

附录 A
(规范性附录)

ICNIRP 给出的蓝光危害光谱函数和视网膜热危害函数

表 A.1 蓝光危害光谱函数和视网膜热危害函数

波长 nm	蓝光危害函数 $B(\lambda)$	视网膜热危害函数 $R(\lambda)$
300~380	0.01	
380	0.01	0.1
385	0.013	0.13
390	0.025	0.25
395	0.05	0.5
400	0.1	1.0
405	0.2	2.0
410	0.4	4.0
415	0.8	8.0
420	0.9	9.0
425	0.95	9.5
430	0.98	9.8
435	1.0	10.0
440	1.0	10.9
445	0.97	9.7
450	0.94	9.4
455	0.9	9.0
460	0.8	8.0
465	0.7	7.0
470	0.62	6.2
475	0.55	5.5
480	0.45	4.5
485	0.4	4.0
490	0.22	2.2
495	0.16	1.6

表 A.1 (续)

波长 nm	蓝光危害函数 $B(\lambda)$	视网膜热危害函数 $R(\lambda)$
500	0.1	1.0
>500~600	$10^{0.02 \times (150 - \lambda/\text{nm})}$	1
>600~700	0.001	1
>700~1 050		$10^{0.002 \times (700 - \lambda/\text{nm})}$
>1 050~1 150		0.2
>1 150~1 200		$0.2 \times 10^{0.02 \times (1 150 - \lambda/\text{nm})}$
>1 200~1 400		0.02

附录 B
(规范性附录)

ICNIRP 给出的紫外照射限值和光谱加权函数

表 B.1 紫外照射限值和光谱加权函数

波长 nm	最大允许照射量 J/m ²	相对光谱响应 S(λ)
180	2 500	0.012
190	1 600	0.019
200	1 000	0.030
205	590	0.051
210	400	0.075
215	320	0.095
220	250	0.120
225	200	0.150
230	160	0.190
235	130	0.240
240	100	0.300
245	83	0.360
250	70	0.430
254	60	0.500
255	58	0.520
260	46	0.650
265	37	0.810
270	30	1.000
275	31	0.960
280	34	0.880
285	39	0.770
290	47	0.640
295	56	0.540
297	65	0.46
300	100	0.300
303	250	0.120
305	500	0.060
308	1 200	0.026
310	2 000	0.015

表 B.1 (续)

波长 nm	最大允许照射量 J/m ²	相对光谱响应 S(λ)
313	5 000	0.006 0
315	10 000	0.003 0
316	13 000	0.002 4
317	15 000	0.002 0
318	19 000	0.001 6
319	25 000	0.001 2
320	29 000	0.001 0
322	45 000	0.000 67
323	56 000	0.000 54
325	60 000	0.000 50
328	68 000	0.000 44
330	73 000	0.000 41
333	81 000	0.000 37
335	88 000	0.000 28
340	110 000	0.000 28
345	130 000	0.000 24
350	150 000	0.000 20
355	190 000	0.000 16
360	230 000	0.000 13
365	270 000	0.000 11
370	320 000	0.000 093
375	390 000	0.000 077
380	470 000	0.000 064
385	570 000	0.000 053
390	680 000	0.000 044
395	830 000	0.000 036
400	1 000 000	0.000 030

附 录 C
(规范性附录)
CIE 给出的相对光谱光视效率

表 C.1 相对光谱光视效率

波长 nm	明亮视觉的相对光谱光视效率 $V(\lambda)$
380	0.000 0
390	0.000 1
400	0.000 4
410	0.001 2
420	0.004 0
430	0.011 6
440	0.023
450	0.038
460	0.060
470	0.091
480	0.139
490	0.208
500	0.323
510	0.503
520	0.710
530	0.862
540	0.954
550	0.995
560	0.995
570	0.952
580	0.870
590	0.757
600	0.631
610	0.503
620	0.381
630	0.265
640	0.175
650	0.107
660	0.061

表 C.1 (续)

波长 nm	明亮视觉的相对光谱光视效率 $V(\lambda)$
670	0.032
680	0.017
690	0.008 2
700	0.004 1
710	0.002 1
720	0.001 05
730	0.000 52
740	0.000 25
750	0.000 12
760	0.000 06
770	0.000 03
780	0.000 015

附录 D
(资料性附录)
作用谱

D.1 概述

UV 和红外辐射作用于眼睛和皮肤,所观察到的生物效应的临界值,明显地随波长变化。已经研究了各种各样的“作用谱”,建立了量效关系。光生物学里,术语“作用谱”是指不同波长所引起生物效应的相对光谱响应。本部分给出的 MPE 值是覆盖几个作用谱的“包络线”。UV 范围内,作用谱曲线数据包络线,例如,在相互作用剧烈反应的光谱区,单次照射剂量(辐照量)的临界值从研究最小的红斑和角膜结膜炎获得。相互作用意味着辐照度 E 和照射持续时间 t 有反比关系, E 和 t 乘积为常数(即辐照量 H)引起的生物效应相同。依据不同作用谱的生物效应需要分别评估,来选择适用的作用谱。下面给出特定波段一些重要的生物效应。

除大多数过敏的人以外,包络线指南对所有人的防护是安全区域。不能给出这一区域的精确值,但对轻微色素沉积的人,这个边界大约为 3~20,取决于辐射的光谱成分。

D.2 红斑(皮肤)

红斑的临界值(例如,晒伤使皮肤变红)随组织的部位、波长、照射到评估的时间间隔而变化。此外,临床上的差异、最小红斑的判断以及辐射测量技术也会引起临界值的变化。红斑是皮肤的光化学反应,一般是 UV-C 和 UV-B 过量照射造成的。在 UV-B 照射前先进行 UV-A 照射,两个光谱带的协同效应使红斑反应稍微增强。

不同等级红斑的作用谱不同。最重等级的红斑,最敏感范围发生在 290 nm~300 nm 之间,脚注)^{3),4),5)}给出的是最小红斑剂量(MED)的原始报告,导致皮肤稍有色素沉积的剂量为 60 J/m²~300 J/m²。这些 MED 数据建议,对于这一类皮肤,照射极限值比 MED 值约小 1.3~6.5 倍。皮肤色素沉淀和“条件作用”(角质层加厚和阳光日晒)导致 MED 至少增加一个数量级。

不同类型皮肤与作用谱的关系可从表 D.1 获得。与作用谱相关加权的临界剂量,对于红斑可以是 250 J/m²。本部分最大允许照射量值基于敏感皮肤的类型。

表 D.1 红斑形成的相对作用谱

波长范围	与敏感皮肤有关的作用谱	与敏感适中皮肤有关的作用谱
250 nm~298 nm	1	1
>298 nm~328 nm	$10^{0.094 \times (298 - \lambda / \text{nm})}$	$10^{0.094 \times (298 - \lambda / \text{nm})}$
>328 nm~380 nm	$10^{0.015 \times (110 - \lambda / \text{nm})}$	$10^{0.029 \times (230 - \lambda / \text{nm})}$

3) M.A.Everett,R.L.Olson,R.M.Sayer;Ultraviolet erythema,Arch.Dermatol.92(1965),713-729

4) R.G.Freeman,D.W.Owens,J.M.knox,H.T.Hudson;Relative energy requirements for an erythema response of the skin to monochromatic wavelengths for ultraviolet present in the solar spectrum,J. Invest. Dermatol. 47(1966),586-592

5) J.A.Parrish,K.F.Jaenicke,R.R.Anderson;Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin,Photochem.Photobiol.36(1982),187-191

D.3 色素沉淀(皮肤)

UV 辐射通常造成皮肤的色素沉淀(晒黑),因皮肤色素吸收辐射,色素沉淀降低皮肤对 UV 的敏感度。

不同类型的皮肤的试用性作用谱可以从表 D.2 获得。当用相对作用谱加权时,红斑的阈值剂量应该是 450 J/m^2 。

表 D.2 色素沉淀的相对作用谱

波长范围	易感光皮肤的相对作用谱	感光适中皮肤的相对作用谱
250 nm~298 nm	1	1
>298 nm~325 nm	$10^{0.094 \times (298 - \lambda/\text{nm})}$	$10^{0.094 \times (298 - \lambda/\text{nm})}$
>325 nm~380 nm	$10^{0.015 \times (155 - \lambda/\text{nm})}$	$10^{-0.0077 \times (4 + \lambda/\text{nm})}$

D.4 皮肤过早老化和皮肤癌

来自太阳或 UV 辐射光源的过量反复照射,可导致皮肤过早老化,也增加发生皮肤肿瘤的风险。不同波长引起皮肤过早老化和皮肤肿瘤的对应关系现在尚不知道。但是,动物研究表明,对于非黑素瘤类的皮肤癌,其作用谱类似于红斑的作用谱。鼠类皮肤的实验研究表明,UV-B 和 UV-A 是鳞片皮肤癌的直接致癌物,UV-B 区的效率最高。近几年的研究表明,成人期尤其是童年时代,晒黑增加了皮肤发生恶性黑素瘤的风险。恶性黑素瘤是皮肤癌中最致命的。对于各种形式的皮肤癌,尚未确立准确的量效关系,存在个体差异,能确信的是白皙皮肤类型,其发展成色素沉淀的可能性小,更倾向于发展成皮肤癌。

D.5 光致角质结膜炎(眼睛)

光化学 UV 辐射(UV-B 和 UV-C)被角膜和结膜强烈吸收,这些组织的过量照射造成光致角质结膜炎,俗称焊工的闪光、电弧眼等。结膜炎的发展缓慢,可能伴随眼睛周围面部皮肤的红斑。眼内有异物或沙磨的感觉,可能有畏光、流泪和眼痉挛的情形。急性症状在 6 h~74 h 后出现,不舒适感通常在 48 h 内出现。在 180 nm~305 nm 之间,照射极限的指南比最小变化的极限值约小 1.3 到 4.6 倍⁶⁾。

人眼的最敏感波长在 270 nm。在 220 nm~310 nm 之间,波长响应(与作用谱有关)变化不大,不像红斑临界值在 $4 \text{ J/m}^2 \sim 140 \text{ J/m}^2$ 之间变化巨大。UV-A 波长造成角膜损伤的级别需要超过 100 J/m^2 。

D.6 白内障(眼睛)

295 nm 以上的波长,能透过角膜,被晶状体吸收。兔子和猴子,被波长 295 nm~320 nm 的 UV 照射,晶状体发生瞬时或永久性浑浊(白内障)。脚注 7) 给出了瞬时浑浊的临界值,其随波长从 1.5 J/m^2 到 126 J/m^2 急剧变化⁷⁾。典型的,永久性浑浊的临界值是瞬时浑浊临界值的两倍。

高强度红外辐射长时间照射也可造成白内障(玻璃体白内障)。为避免眼睛晶状体上可能的延时效

6) D.G.Pitts, T.J.Tredici; The effects of ultraviolet on the eye, Am. Ind. Hyg. Ass. J. 32(1971), 235-246

7) D.G.Pitts, A.P.Cullen, P.D.Hacker; Ocular ultraviolet effects from 295 nm to 400 nm in the rabbit eye, Nat. Inst. Occ. Safety and Health, Cincinnati, OH contract CDC-99-74-12, DHEW(NIOSH) Publ. No. 77-175

应,比 780 nm 更长波长的红外辐射的漫长($>1\ 000\ \text{s}$)照射,其总辐照度应该限制为 $100\ \text{W}/\text{m}^2$,眼睛内温度上升是红外辐射引起白内障的主要原因。角膜、虹膜和水晶体吸收的能量使得温度上升。限制温度小于 1 K。可从本部分获得上面提及的临界值和 MPE。

D.7 视网膜光化学损伤(眼睛)

已经知道,主要是波长在 500 nm 以下的蓝光照射引起的视网膜的光化学损伤。这一效应由蓝光危害函数描述(见附录 A)。

参 考 文 献

[1] ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) 1997 TLVs and BEIs; Threshold limit values for chemical substances and physical agents; Biological Exposure Indices, Cincinnati, ACGIH 1997 ACGIH

[2] Duchêne A. S. e. a. IRPA (International Radiation Protection Association) Guidelines on protection against non-ionising radiation, Pergamon Press, New York 1991 Duchene A.S.e.a. IRPA

[3] ICNIRP (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection): Guidelines of limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3 μm), Health Physics 73 (1997), 539-554 ICNIRP

[4] IRPA/INIRC (International Non-Ionising Radiation Committee): Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (Incoherent optical radiation), Health Physics Vol.49 (1985), 331-340 and 56(1989), 971-972 IRPI/INIRC

中华人民共和国
国家标准
激光产品的安全

第9部分：非相干光辐射最大允许照射量

GB/T 7247.9—2016/IEC/TR 60825-9:1999

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2016年11月第一版

*

书号: 155066 · 1-56138

版权专有 侵权必究



GB/T 7247.9-2016