

中华人民共和国国家标准

GB/T 7247.14—2012/IEC TR 60825-14:2004

激光产品的安全 第 14 部分：用户指南

Safety of laser products—Part 14: A user's guide

(IEC TR 60825-14:2004, IDT)

2012-12-31 发布

2013-06-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布



目 次

前言	III
1 范围	1
2 术语与定义	1
3 管理政策	9
3.1 安全职责	9
3.2 安全检查员	9
3.3 激光安全员	9
3.4 信息和培训	10
4 激光辐射危害(危险性)	10
4.1 激光产品	10
4.2 激光辐射照射	14
4.3 确定激光照射水平	14
5 最大允许照射量的确定	18
5.1 一般要求	18
5.2 重复脉冲激光器或调制激光器	18
5.3 多波长	19
5.4 扩展源的最大允许照射量(MPEs)	20
5.5 危害距离和危害区域	20
6 伴随危害	21
6.1 附加的健康危害	21
6.2 激光器产生的危害	21
6.3 环境产生的危害	22
6.4 伴随危害的控制	23
7 风险评估	23
7.1 危害和风险	23
7.2 风险评估:第1阶段——辨别潜在的伤害情况	24
7.3 风险评估:第2阶段——潜在伤害情况的风险评估	25
7.4 风险评估:第3阶段——选择控制措施	26
8 控制措施	26
8.1 一般要求	26
8.2 降低危害	27
8.3 密封危害	27
8.4 减少危害	28
8.5 设备的检修	32
9 安全操作的维护	33

10 事件报告和事故调查	33
11 医学监督	33
附录 A (资料性附录) 激光受控区联锁系统举例	38
附录 B (资料性附录) 计算举例	43
附录 C (资料性附录) 生物物理学原理	59
参考文献	66
图 1 激光危险符号	10
图 2 测量示意图	17
a) 使用透镜的测量示意图	17
b) 直接测量示意图	17
图 A.1 联锁系统的用途	40
图 A.2 非锁定联锁系统	41
图 A.3 锁定联锁系统	42
图 B.1 两行激光二极管	55
图 C.1 眼的解剖	64
图 C.2 激光辐射对生物组织损伤的示意图	64
表 1 激光产品的默认防护控制措施	12
表 2 适用于辐照度及辐照量测量的限制孔径直径(t 为照射时间)	16
表 3 低于持续时间 T_1 的脉冲群合并计算	19
表 4 在不同谱段的辐射对眼和皮肤的叠加效应	20
表 5 激光辐射直接照射条件下角膜的最大允许照射量(MPE)	34
表 6 波长范围在 400 nm~1 400 nm(视网膜危害区)的扩展源激光辐射直接照射条件下角膜的 最大允许照射量(MPE)	35
表 7 激光辐射对皮肤的最大允许照射量(MPE)	35
表 8 MPE 的修正因子	36
表 9 激光受控区	37
表 C.1 过量光照的病理效应一览表	60
表 C.2 适用于 MPEs 的测量孔径的说明	63

前 言

GB 7247《激光产品的安全》分为以下部分：

——第1部分：设备分类、要求；

——第14部分：用户指南。

本部分为GB 7247的第14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国际电工委员会发布的IEC TR 60825-14:2004《激光产品的安全 第14部分：用户指南》。

本部分做了下列编辑性修改：

——删除IEC TR 60825-14:2004的前言；

——删除IEC TR 60825-14:2004的引言。

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：深圳市大族激光科技股份有限公司、北京光电技术研究所、深圳市计量质量检测研究院、深圳市标准技术研究院、武汉华工激光工程有限责任公司、华南师范大学广东激光加工产学研结合示范基地、上海市激光技术研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所。

本部分主要起草人：高云峰、吴爱平、徐涛、温利峰、卢飞星、郭亮、王又良、杨桦、刘东华、卢永红、戚燕、林显仕、冯建国、曾丽霞。

激光产品的安全

第 14 部分:用户指南

1 范围

本部分给出了遵从 IEC 60825-1 标准的激光产品的安全使用最佳指南。本部分使用的术语“激光产品”和“激光设备”是涉及所有由受激发射过程而产生光辐射的装置、组件或系统。本部分不包括发光二极管(LEDs)。

1 类激光产品通常不产生危害,2 类激光产品只产生极小的危害。这些产品的安全使用通常遵守产品的警告标识和制造商的安全操作指南即可。本部分描述的进一步防护措施对于 1 类和 2 类激光产品不应是必需的。

本部分强调了对大功率激光器进行风险评估,小功率激光器的用户可从这些信息中受益。表 1 给出了这方面的概括性信息。

本部分适用于所有含有激光器产品的使用,不管其是否已售或待售。也适用于特殊构造的激光器(包括用于试验的系统和样机系统)。

本部分确立的条款,旨在帮助激光产品用户及其制造商了解安全管理总则(第 4 章)、识别可能产生的危害(第 5~7 章)、评估潜在危险的伤害性(第 8 章)、建立和给予适当的控制措施(第 9~12 章)。

激光控制措施差异很大,这取决于所使用的激光设备类型、所要执行的加工任务或过程、设备的使用环境和可能受到伤害的人员。某些激光应用的特殊要求在 IEC 60825 系列的其他文件中给出(具体请参阅这些文件的前言和参考书目)。

本部分中与某些特殊事件、情况和先决条件有关时,使用“合理可预见的”和“合理可预见地”专门用语来描述。采用本部分的人员有责任按照风险评估标准,确定和做出什么是“合理可预见的”判断,以及能够提供相应的防护措施。

本部分中引用了激光器“用户”一词,它除了包括那些实际使用激光设备的人员之外,还包括负有安全职责的人员。

2 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.1

管理控制 administrative control

非工程类安全措施,例如:钥匙监管、人员的安全培训、警告措施、倒计时程序及现场的安全控制。

2.2

α 最小值 alpha min

α_{\min}

见对向角(2.4)。

2.3

接收角 angle of acceptance

γ

探测器响应光辐射的平面角,一般以弧度测量。接收角的角度可以通过置于探测器前的孔径或光

学元件控制。

注 1: 接收角有时也称为视野。

注 2: 为评估光化学危害,规定一个极限测量接收角 γ_p 。从生物学角度, γ_p 角与眼睛的运动有关,与光源的对向角无关。如果光源的对向角小于极限接收角,实际测量的接收角不受限制。如果光源的对向角大于规定的极限接收角,接收角必须受限制,并且光源必须对热点扫描。如果测量的接收角不限制在规定的水平,危害会被高估。

2.4

对向角 angular subtense

α

表观光源(包括漫反射)在观察者眼睛或测量点所张的视角。

注 1: 在本部分中,为了便于分类,在距表观光源不小于 100 mm 的观察点上确定对向角(即,如果在出射孔径或透镜内部,表观光源位于大于 100 mm 的距离,就在产品的出射孔径或透镜处)。为了分析最大允许照射量,在距表观光源不小于 100 mm 的观察距离点确定对向角。在本部分中,表观光源的对向角仅适用于波长范围从 400 nm~1 400 nm 视网膜危害范围。

注 2: 表观光源对向角不应与光束发散角混淆。

2.5

窗口(孔径) aperture

激光产品防护罩或其他屏蔽物上的任一开孔,通过该孔发射的激光辐射允许人员接近。

2.5.1

孔径光阑 aperture stop

用来确定待测辐射通过面积的开孔。

2.6

表观光源 apparent source

在视网膜上可能形成最小影像的实际发光体或虚发光体。

注: 本定义用于确定 400 nm~1 400 nm 波长范围内的激光辐射表观发光源的位置,其中假定表观光源处于眼睛的可调节范围内(≥ 100 mm)。在发散度为零的极限,即理想的平行光束情况下,表观光源的位置为无穷远。表观光源这一概念的适用波长可扩展到 302.5 nm~4 000 nm 的波长范围,因为这一范围内的光波均可用普通透镜聚焦。

2.7

光束 beam

由方向、发散角、直径和扫描特性表征的激光辐射。

注: 对于非镜面反射产生的散射辐射不作为光束看待。

2.8

光束衰减器 beam attenuator

将激光辐射降低到(或低于)规定水平的装置。

2.9

光束直径 beam diameter

d_u

光束宽度 beam width

功率(或能量)为总激光功率(或能量)的 $u\%$ 的最小圆的直径。本部分采用 d_{63} 。

注: 对于高斯光束, d_{63} 对应于辐照度(辐照量)降低到它中心峰值的 $1/e$ 的点。

2.10

光束发散角 beam divergence

由光束直径限定的锥形远场平面角。

注 1: 如果间距为 γ 的两点的光束直径是 d_{63} 和 d'_{63} ,则光束的发散角为:

$$\Phi = 2\arctan\left[\frac{d_{63} - d'_{63}}{2r}\right]$$

注 2: SI 单位: 弧度。

2.11

光束终止器 beam stop

终止激光束路径的装置。

2.12

1 类激光产品 class 1 laser product

在相应波长和发射持续时间内, 人员接触激光辐射不允许超过 1 类可达发射极限的激光产品。

2.13

1M 类激光产品 class 1M laser product

波长在 302.5 nm~4 000 nm 范围内, 在相应的波长和发射持续时间上, 人员接触激光辐射不允许超过 1 类可达发射极限的激光产品。采用比 1 类激光产品更小的测量孔径, 或在距表观光源更远的距离评估辐射水平。

注: 在使用光学仪器观察时, 1 M 类激光产品的输出有潜在的危险。

2.14

2 类激光产品 class 2 laser product

在相应的波长和发射持续时间上, 人员接触激光辐射不允许超过 2 类可达发射极限的激光产品。

2.15

2M 类激光产品 class 2M laser product

波长在 400 nm~700 nm 范围内, 在相应的波长和发射持续时间上, 人员接触激光辐射不允许超过 2 类可达发射极限的激光产品。采用比 2 类激光产品更小的测量孔径, 或在距表观光源更远的距离评估辐射水平。

注: 在使用光学仪器观察时, 2M 类激光产品的输出有潜在的危险。

2.16

3R 和 3B 类激光产品 class 3R and class 3B laser products

在任何波长和发射持续时间上, 人员接触激光辐射允许超过 1 类和 2 类可达发射极限, 但不允许超过 3R 类和 3B 类各自可达发射极限的激光产品。

2.17

4 类激光产品 class 4 laser product

人员接触有可能超过 3B 类可达发射极限的激光产品。

2.18

伴随辐射 collateral radiation

激光器运行时所必然产生的, 或者因激光器运行而使激光产品发射的, 在波长 180 nm~1 mm 范围内激光辐射以外的电磁辐射。

2.19

准直光束 collimated beam

发散角或收敛角极小的“平行”辐射光束。

2.20

连续波 continuous wave**CW**

激光输出是连续的而不是脉冲的波形, 在本部分中, 把连续输出时间等于或大于 0.25 s 的激光视为连续激光。

2.21

规定光路 defined beam path

在激光产品内部激光光束的预定路径。

2.22

漫反射 diffuse reflection

辐射光束通过一个表面或介质发生多向散射而改变辐射光束空间分布。

注1:理想漫反射可破坏出射方向与入射方向的所有关系。

注2:本定义与IEV 845-04-47不同。

2.23

嵌入式激光产品 embedded laser product

由于工程设计限制了可达发射极限,因而所定类别低于所含激光器固有发射能力的激光产品。

注:作为嵌入式激光产品组成部分的激光器称为嵌入式激光器。

2.24

发射持续时间 emission duration

由于使用、维护或检修激光产品,可能出现人员接触激光辐射的单脉冲、脉冲串或系列脉冲的持续时间,或连续波激光的使用时间。对于脉冲串(或脉冲串的子段),这是前导脉冲的第一个功率峰值半高点和后续脉冲的最后一个功率峰值半高点之间的持续时间。

2.25

照射持续时间 exposure duration

见照射时间(2.26)。

2.26

照射时间 exposure time

单脉冲、系列脉冲、脉冲串或连续激光辐射照射到人体上的持续时间。对于脉冲串,这是前导脉冲的第一个半功率点和后续脉冲的最后一个半功率点之间的持续时间。

2.27

扩展光源观察 extended source viewing

在100 mm或更远处的表现光源对眼睛所成的张角大于最小对向角(α_{\min})的观察情况。

注:当考虑视网膜热损伤的危害时,本部分考虑两种扩展光源条件:中等光源和大光源。光源根据对向角 α 来划分,介于 α_{\min} 和 α_{\max} 之间的为中等光源,大于 α_{\max} 的为大光源。

例如:对某些漫反射和某些激光二极管阵列的观察。

2.28

失效保护 fail safe

当元件失效时不增加危害的保护设计。在系统失效时,使系统不工作或无危害。

2.29

人员接触 human access

- a) 人体受到由出射孔径发出的有害激光辐射的可能性;或者一个直径为12 mm,最长为80 mm的探头阻断2类,2M或3R激光辐射的可能性;或者
- b) 在防护罩内,有超过a)中激光辐射限值的激光辐射水平时,人体的任一部分受到由产品内任意伸进单个平面直接反射并通过防护罩的任何开孔射出的有害激光辐射的可能性。

2.30

总辐(射)亮度 integrated radiance

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,单位面积上的辐射能量(通常用单位 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 表示)。

2.31

光束内视 intrabeam viewing

相对观察漫反射而言,光束内视是指眼睛受到直接的或镜面反射的激光照射时观察激光束。

2.32

辐照度 irradiance

E

投射到表面一点处的面元上的辐射通量 $d\Phi$ 与该面元的面积 dA 之商。

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

注: SI 单位为瓦每平方米 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.33

激光器 laser

主要通过受控受激发射过程而产生或放大波长在 180 nm~1 mm 范围的电磁辐射装置。

注: 本定义与 IEC 845-04-39 不同。

2.34

激光受控区 laser controlled area

对滞留和活动进行控制和监视以免受辐射危害的区域。

2.35

激光能源 laser energy source

为激励电子、离子或分子等提供能量而与激光器联在一起的装置。

注: 不能认为一般能源(如供电电源或电池)是激光能源。

2.36

激光设备 laser equipment

激光产品的组合或包含激光器的激光产品。

2.37

激光产品 laser product

用于构成或准备用于构成一个激光器或一个激光系统的任何产品或部件的组合。作为一个部件(或代用件)而出售给其他制造者的电子产品元件不属于激光产品。

2.38

激光辐射 laser radiation

由激光产品的受控受激发射而产生的波长为 180 nm~1 mm 的所有电磁辐射。

2.39

激光安全员 laser safety officer

熟知激光危害评估与控制,并负责监督激光危害控制的人员。

2.40

激光系统 laser system

激光器与相应的带或不带附加元件的激光能源的组合。

2.41

限制孔径 limiting aperture

对辐射度和辐照量进行平均的圆域。

2.42

维护 maintenance

激光产品制造厂商在用户使用说明书中规定的调整方式或程序。为了保证激光产品的正常工作,用户要执行这些程序。维护不包括使用或检修。

2.43

最大对向角 maximum angular subtense

α_{\max}

表观光源对向角的值,当对向角高于该值时,其 MPE 不依赖光源的尺寸。

2.44

最大允许照射量 maximum permissible exposure

MPE

正常情况下人体受到激光照射不会产生不良后果的激光辐射水平。MPE 水平指眼或皮肤受到照射后即刻或长时间后无损伤发生的最大照射水平,它与辐射波长、脉宽或照射时间、处于危险状态的生物组织以及暴露在 400 nm~1400 nm 的可见和近红外辐射中的视网膜成像的大小等有关。

注 1: 本部分采用国际非电离辐射保护委员会推荐的 MPE 值。该值是由当前认知的激光损害极限确定的。

注 2: 附录 B 给出了计算 MPE 水平的示例。

2.45

最小对向角 minimum angular subtense

α_{\min}

表观光源对向角的值,对向角大于该值的光源被认为是扩展光源。

注: 光源的对向角(张角)小于 α_{\min} 时,其 MPE 不依赖于光源尺寸。

2.46

标称眼危害区 nominal ocular hazard area

NOHA

光束辐照度或辐照量超过相应角膜的最大允许照射量(MPE)的区域,其中包括可能出现的激光束意外指错方向的情况。

注: 如果 NOHA 包括通过光学辅助器观看激光束的可能性,则定义为“扩展 NOHA”。

2.47

标称眼危害距离 nominal ocular hazard distance

NOHD

光束辐照度或辐照量等于相应角膜的最大允许照射量(MPE)的距离。

注: 如果 NOHD 包括通过光学辅助器观看激光束的可能性,则定义为“扩展 NOHD”。

2.48

操作 operation

激光产品执行其所有预定功能。它不包括维护或检修。

2.49

光学密度 optical density

OD

透射比 τ 的倒数取以 10 为底的对数。

符号: D

$$D = -\log_{10} \tau$$

2.50

光化学危害极限 photochemical hazard limit

MPE 是基于保护人员不受光化学效应损害的极限值。

注: 由于波长范围在 400 nm~600 nm 的激光辐射的照射,使视网膜受到光化学损害,例如:光致盲。

2.51

防护围封 protective enclosure

防止人员受到激光辐射照射的一种物理装置,除非安装预定功能时才能进入。

2.52

防护罩 protective housing

为防止人员接触超过激光产品分类规定的激光辐射而设计安装在激光产品(包括安装嵌入式激光器的产品)上的那些防护部分(一般由制造厂商安装)。

2.53

脉宽 pulse duration

在脉冲前、后沿的半峰值功率点间测得的时间差。

2.54

脉冲激光器 pulsed laser

以单脉冲或脉冲串形式释放能量的激光器。在本部分中,一个脉冲的宽度要小于 0.25 s。

2.55

辐(射)亮度 radiance **L**

由下式定义的量:

$$L = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}$$

式中:

$d\Phi$ ——由光束元通过某一点在给定方向上的立体角元 $d\Omega$ 中传输的辐射通量;

dA ——给定点的光束横截面面积;

θ ——切面法线和光束方向的夹角。

注 1: SI 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

注 2: 本定义是 IEC 845-01-34 的简化形式,足够本部分使用。如难以确定,则应遵从 IEC 的定义。

2.56

辐射能量 radiant energy **Q**

辐射通量在给定持续时间 Δt 内对时间的积分。

$$Q = \int_{\Delta t} \Phi dt$$

注: SI 单位为焦耳(J)。

(IEC 845-01-27)

2.57

辐照量 radiant exposure **H**

照射到表面某处面元上的辐射能量除以该面元的面积。

$$H = \frac{d\Phi}{dA} = \int E dt$$

注: SI 单位:焦耳每平方米($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.58

辐射功率;辐射通量 radiant power; radiant flux **Φ, P**

以辐射形式发射、传播或接受的功率。

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

注: SI 单位:瓦(W)。

2.59

反射比 reflectance

ρ

在一定条件下反射的辐射功率与人射的辐射功率之比。

注：SI单位：1。

2.60

遥控联锁连接器 remote interlock connector

使外部控制器与分离的激光产品的其他部件相连的连接器。

2.61

安全联锁装置 safety interlock

当防护罩某部分移开时，为防止人员接触3类或4类激光辐射而设置的与防护罩相连的自动装置。

2.62

检修 service

执行制造厂商检修说明书中所描述的那些程序或调整，它可影响产品的性能。但检修不包括维护或使用。

2.63

单一故障条件 single fault condition

在产品中可能发生的单一故障和该故障直接引发的结果。

2.64

小光源 small source

对向角 α 小于或等于最小对向角 α_{\min} 的光源。

2.65

镜面反射 specular reflection

入射辐射光束与反射辐射光束之间保持镜反射角对应关系的一种面反射，如：平面镜反射。

2.66

热效应危害极限 thermal hazard limit

不同于光化学损伤，MPE是基于保护人员不受热效应损害的极限值。

2.67

时间基准 time base

激光产品分类所用的发射持续时间。

2.68

工具 tool

指可用于操作螺钉或进行类似安装操作的螺丝刀、硬币或其他物品。

2.69

透射比 transmittance

τ

在一定条件下透射的辐射通量与人射的辐射通量之比。

注：SI单位：1。

2.70

可见辐射(光) visible radiation (light)

能直接引起视觉的光学辐射。

注：在本部分中，取波长为400 nm~700 nm范围的电磁辐射为可见辐射。

3 管理政策

3.1 安全职责

应遵守由国家和地方法规已经明确的具体安全职责。在没有这些法规或规章制度时,请遵守以下激光安全使用职责通用指南。

制造商、员工和所有激光器件用户(包括学生)以及那些监理或监督者,都有责任维护工作场所的安全、确保他们的行为不会对自身和他人造成不可接受等级的危害。

在任何使用激光器的工作场所,制造商有责任确保正确评估在正常使用激光器而产生的健康风险,正确评估合理可预见的误用激光设备而产生的危害。制造商必须采取任何必要的措施以确保消除这些风险,或者在没有合理可行措施的情况下,应使风险降低到一个可允许的低等级。

只要使用具有潜在危害的激光器,制造商(或其他负有全面职责的人员)宜制定针对这些危害的安全管理总则,以确保具体的安全任务委托给其他人员执行。这一总则宜作为组织管理整体安全政策的主要部分,对使用中的激光器所有合理可预见的危害能够进行识别,并具有相应地控制危害的切实可行的步骤。评估的重要结果宜以文件的形式记录,并落实相应的防护措施,以达到降低对人体的健康和安全风险目的。对防护措施的有效性宜进行定期的审查。对于仅使用1类和2类激光产品的场所,通常不需要制定这些安全政策,对于使用1M类和2M类激光产品的场所,不一定必须制定这些安全政策。具体请参考表1和相关的防护控制措施,4.1.3关于嵌入式激光器以及4.2.2关于暂时视觉效应。

3.2 安全检查员

制造商或激光器用户在没有帮助的情况下不能够正确地确定必要的安全方案和保护措施,以消除或降低使用激光设备而带来的健康风险时,宜向安全检查员寻求建议。安全检查员宜具有足够的与激光安全相关的技能、知识和经验,宜向制造商(或制造商指定的代理人、或激光器的用户)提供危害识别、风险评估、防护控制措施和程序规定上的帮助。

安全检查员不必是所涉及的组织机构的员工,但可以是外部顾问。安全检查员给出的建议和帮助通常仅仅是临时性的,例如,初次建立适当的防护控制措施,或对程序或设备进行重大改变前的风险评估。

3.3 激光安全员

使用3B类或4类激光产品的组织机构宜任命一名激光安全员。对于1M类和2M类激光产品,如果输出光束具有良好的准直特性,用户在距激光器相当远的距离上用双筒望远镜或望远镜观看时可能造成危害,推荐任命一名激光安全员。(这可能包括对嵌入式激光器进行安装或检修的场合,这种情况下可能接触到高于激光产品类别所代表水平的激光辐射(见4.1.3);或者,即使在使用低于3B类和4类等级的激光器场所,由于未培训人员的参与,或许是由于伴随激光危害的存在,也可能带来重大风险(见第6章))。

激光安全员宜行使代表制造商的职责,管理日常的激光安全事务。制造商有责任确保被指定的激光安全员有充分的权限和执行能力去圆满地履行其职责。必要时应对激光安全员进行相应的培训。

激光安全员的职责宜与制造商(或制造商指定的代理人)的意愿达成一致并记录在案。这些职责的必要在于确保相关组织机构内的激光器持续安全使用,可能至少包括:

- a) 知道所有具有潜在危害性的激光产品(包括鉴定书、说明书、激光产品的分类和用途;激光产品的位置;与激光产品使用相关的任何特殊要求和限制)的信息。如有可能,保留其记录。
- b) 负责监管确保激光器安全使用的组织机构规程是否被遵守、保留适当的书面记录、在任何违反规程和明显不符合安全规程的情况下,立即制止和采取适当行动。

不管是已授权为激光安全员,还是仅为一个拥有激光安全员的权限者,都应许可其终止不安全的行为和采取纠正措施,并在职责文件中明确规定。

一般不需要任命全职的激光安全员,在组织机构已经指定了安全检查员(见 3.2),且此人是机构内部员工(通常对于激光用途广泛多样的组织机构来说值得这样做),则该安全检查员允许是激光安全员。

在广泛使用激光产品的大型组织机构内,允许指定合适的员工担当现场或者部门的激光安全代表协助激光安全员,并代表制造商确保整个组织机构内激光器的安全使用(可分别称为激光安全员和高级激光安全员)。在这种情况下,这些人员之间应该保持定期联络,以确保激光安全管理程序的整体管理的一致性和有效性。

3.4 信息和培训

所有相关的员工宜知道在激光设备使用过程中他们可能面临的任何危害(包括伴随危害,见第 6 章)和必要的防护措施。应该标记详尽的警告,这些警告应包括图 1 中的激光危险符号和相应的文字说明。宜对员工进行充分的指导和培训,让他们掌握必要的知识,以避免将自己和他人置于不允许的危险中。安全培训对那些从事 3B 类和 4 类激光产品工作的人尤为重要。

这些指导和培训应该与危害类型相适宜,并且符合相关员工的需求。它包括但不限于:

- a) 组织机构为了安全使用激光设备所制定的政策;
- b) 使用和合理可预见的误用激光设备所产生伤害的风险;
- c) 所显示的警告标志的含义;
- d) 正确的使用和操作激光设备以及与之相关的设备,包括个人防护装备(如适用,见 8.4.5);
- e) 工作程序和现场规则;
- f) 一旦发生实际的或可疑的事故或其他安全相关事件时采取的措施。

指导与培训应在操作和使用激光产品之前完成。为了确保一贯地遵守安全规程,反复经常的指导和培训是必要的。培训记录应当保存好。

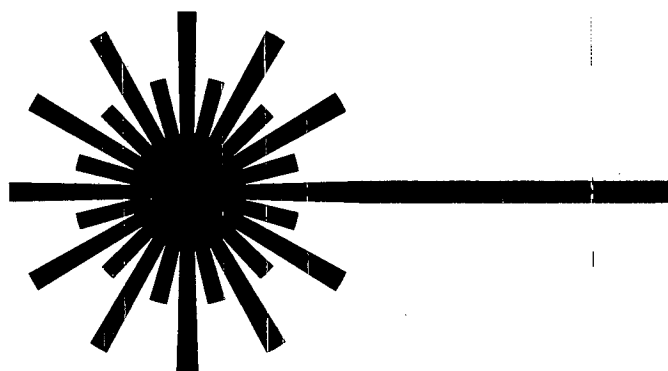


图 1 激光危险符号

4 激光辐射危害(危险性)

4.1 激光产品

4.1.1 激光产品分类

激光产品类别向用户表明有关可接触激光辐射导致的潜在损伤。所有激光产品,不论是否商用,都应依据 IEC 60825-1 的规定进行分类,并通过相应的标记告知用户其所属类别。激光产品分类通常由

激光产品制造商完成,但在除此之外的场合(例如,激光部件、试验系统或样机系统),则用户宜保证按照 IEC 60825-1 规定,根据它的可达发射水平有效地确定激光类别。

如果用户将激光器组合到其他设备中,则应将整套设备看作激光产品并进行相应分类(见 4.1.3)。此外还应认识到,激光器与其他设备组合的方式可能会导致其原有的、符合 IEC 60825-1 制造要求的、包括标记在内的部分或全部安全特性不可操作、不可使用或不可接近。在任何需要确保安全操作的场合,都宜对这些安全特性进行重复或替换。

4.1.2 产品类别

激光器的分类表明其潜在危害。激光产品分类是以正常运转条件下可能接触到的最大激光辐射水平为基础确定的。激光器使用过程中可能产生的伴随危害(参见第 6 章)不影响激光器分类。

下文给出的激光产品类别,同时概述了各产品类别宜满足的防护要求。除 2 类和 2M 类外,其他激光产品的发射辐射可以是可见光或不可见光。(更多详细完整分类建议参考 IEC 60825-1)。

a) 1 类

在合理可预见的使用条件下通常是安全的激光产品。这是由于激光器本身固有的低发射能力,或是由于在正常运转下完全封闭,人们不可能接触内部更高水平的激光辐射。

1 类防护要求:确保维持 1 类激光产品的运行条件(见 4.1.3)。如果发生可接触激光辐射水平超过 1 类极限的情况,例如,在检修嵌入式激光产品时,或利用外部光路减小扩展光束激光器的发射光束尺寸或发散角时,则采用适用的较高一类的防护要求。

b) 1M 类

超过 1 类允许可达发射极限的激光产品,但由于发射辐射的几何扩散,照射裸眼不能造成伤害(未达到导致损伤极限)。但是,如果使用放大观察仪器,可能超过眼的安全极限,并可能造成损伤。这样的仪器包括在大直径准直光束条件下使用的双筒望远镜和望远镜,或者在高发散光束情况下使用的放大透镜和显微镜。如果在光路中使用光学元件减小激光光束的尺寸(它的直径或发散角),危险的照射也会发生。

1M 类防护要求:避免使用放大观察辅助器具或仪器(诸如双筒望远镜,望远镜,显微镜和放大透镜,但不包括眼镜或隐形眼镜)。避免在发射光束中放置可导致激光辐射因会聚而增强的光学装置。如果有人使用望远镜或双筒望远镜直视光束,则不可将光束指向这些人员所在的区域。

c) 2 类

发射低水平的可见光辐射(即波长在 400 nm~700 nm 之间)的激光产品,该辐射对皮肤是安全的,对眼睛则本质上并非安全,但眼睛可通过对强光的自然回避反应而获得保护。因此,眼睛受到意外照射通常是安全的,但这种自然回避反应会在眼睛有意直视激光束的情况下失效,也会因饮酒或吃药受到影响。

2 类防护要求:避免直视激光束(即故意观察激光源)或将激光束指向他人。

d) 2M 类

发射的可见光辐射水平超过 2 类允许可达发射极限的激光产品。但由于发射辐射的几何扩散,裸眼可通过对强光的自然回避反应而得到保护。但如果使用放大观察仪器,自然回避反应并不能提供足够的保护,损伤仍可能发生。这样的仪器包括在大直径准直光束条件下使用的双筒望远镜和望远镜,或者在高发散光束情况下使用的放大透镜和显微镜。如果在光路中通过使用光学元件使激光光束的尺寸(它的直径或发散角)减小,则危险的辐射也会发生。

2M 类防护要求:避免使用放大观察辅助器具或仪器(诸如双筒望远镜,望远镜,显微镜和放大透镜,但不包括眼镜或隐形眼镜)。避免在出射光束中放置可导致激光辐射因会聚而增强的光学装置。避免直视激光束(即故意观察激光源)或将激光束指向他人。

e) 3R类

激光产品的可达发射水平是1类(非可见光)或2类(可见光)可达发射极限的5倍。可能超过最大容许照射量,但损伤风险较低。

3R类防护要求:防止眼睛直接受到光束的照射或将激光束指向他人。

f) 3B类

激光产品的可达发射水平,无论是否使用放大观察辅助器具,都可能对眼睛造成伤害。3B类激光产品当其输出水平接近此类产品上限时,也可以对皮肤造成损伤。

3B类防护要求:防止眼睛(及某些情况下防止皮肤)受到光束的照射。注意防止无意的反射光照射。

g) 4类

激光产品的可达发射水平对眼睛和皮肤都可能造成损伤。激光辐射的漫反射也是有危险的,该激光辐射甚至足以点燃被照射材料,同时通过与靶材相互作用产生有害辐射和有害烟尘。

4类防护要求:防止眼睛和皮肤受到激光束和漫反射(散射)光的照射。防止光束相互作用的危险,例如,失火和烟尘。

交付用户使用的2类、2M类、3R类、3B类和4类最终激光产品,按照IEC 60825-1标准要求,将会附带标示产品类别及必须遵从的基本预防措施警告标记。1类或1M类激光产品可以附带标志,也可以将要求文字包含在用户使用说明书中,由制造商自行决定。

建议那些无标记的激光产品(包括作为部件用的激光器或用户改装系统),在常规使用中应按照IEC 60825-1标准的标志要求予以合适地标记。

在许多应用场所,使用的激光产品不超过3R类(即1、1M、2、2M或3R类),用户可以根据最高类别激光产品采取控制措施,而不必进行详细的风险评估,或对人员可能受照水平进行评价。这些默认控制措施按照激光类别归纳在表1中。

表1 激光产品的默认防护控制措施

分类	防护控制措施 除非经过风险评估,证明所采取的替代的防护控制措施可以被接受,否则应按此执行
1	在正常操作条件下不需要采取防护控制措施(这不包括维护或检修情况)。对包含较高功率激光的嵌入式激光产品,遵照警告标记上的说明或者制造商提供的说明书进行操作。对嵌入式激光产品进行现场检修时可能需要特别的防范措施(见8.5)
1M	除非已采取足够的防护措施,否则防止通过放大观察仪器直接观看激光源,诸如双筒望远镜、望远镜、显微镜、光学瞄准器或放大透镜 ^a 。防止使用任何可以减小光束发散度或光束直径的外部光学系统
2	勿直视激光束。 勿将激光束指向他人或与激光作业无关人员有可能出现的区域
2M	勿直视激光束。 勿将激光束指向他人或与激光作业无关人员有可能出现的区域。 确保光束总是终止在一个合适的非镜反射面。 除非已采取足够的防护措施,否则防止通过放大观察仪器直接观看激光源,诸如双筒望远镜、望远镜、显微镜、光学瞄准器或放大透镜。防止使用任何可以减小光束发散度或光束直径的外部光学系统
3R	防止眼睛直接受到光束的照射。 勿将激光束指向他人或与激光作业无关人员可能出现的区域

表 1 (续)

分类	防护控制措施 除非经过风险评估,证明所采取的替代的防护控制措施可以被接受,否则应按此执行
3B 和 4	在没有进行初次风险评估以确保防护控制措施足以确保操作安全之前,不宜使用 3B 类和 4 类激光产品。在使用 3B 类和 4 类激光产品之前,应首先进行风险评估,以确保防护控制措施足以保证操作安全。在任何合理可行的情况下,都要采用 IEC 60825-1 规定的工程手段,使激光类别降低到 3B 类以下(这通常意味着完全封闭激光辐射,使其成为 1 类激光产品)
^a 可能造成危害的观察仪器的类型,可以在警告标记中或在制造商提供的用户信息中标出。	

但是,对于以下情况来讲,为了判断保护措施是否适当,通常必须进行更为详细的分析,包括以下情况:

- 所用激光产品均为 3B 类或 4 类;
- 使用防护眼镜;
- 依靠“最小安全距离”的概念进行防护;以及
- 与实际风险程度相比,表 1 所列的控制措施可能不恰当、不充分或过分严格的其他情况。

注:一些较老的激光产品是按以前的规定分类的,分为 1 类、2 类、3A 类、3B 类、4 类。应根据 IEC 60825-1 标准现行的分类方法对激光器产品进行分类。但绝大多数 1 类、2 类和 4 类激光产品不受影响。

4.1.3 嵌入式激光器

由于激光产品的分类是以正常操作过程中可能接触到的激光辐射水平为基础确定的,某一类别的激光产品可能包含一个高类别的嵌入式(即封闭式)激光器。最常见的情况是,一个嵌入式激光器按照满足 IEC 60825-1 制造要求的方式完全封闭在一个 1 类激光产品中。操作过程中打开(去除或移动)激光器围封装置中任何按设计不许打开(去除或移动)的部分,都有可能接触到危害性的激光辐射。嵌入式激光器的检修程序如 8.5 中所述。

包含嵌入式激光器,但在正常运转过程中不会接触到激光辐射的 1 类激光产品的例子,如便携式 CD 机,激光打印机和全封闭式的工业加工激光器。可接触到激光辐射的嵌入式激光器产品的例子,包括某些扫描激光器(例如条形码阅读器),其快速移动的光束使该产品类别明显低于固定光束,以及通过各种光学系统扩展或发散出射光束,从而使危害较小。

按照 IEC 60825-1 的规定,按设定功能运转激光器时,在最大可达发射水平下和所有合理可预见的单一故障条件下,激光产品的指定类别均适用。除 4 类以外的某些激光器产品,尽管激光器本身能够产生可使其列入更高类别的激光辐射,由于包含一台通过驱动电路设计或其他手段,使其可接触激光辐射局限于该类别的激光器。这类产品的用户宜清楚,在组合故障条件下或不按照制造商指定的方式运转时,就有可能接触到更高等级的激光辐射。用户宜参考制造商的操作指南以避免受到有潜在危害的激光辐射照射。

4.1.4 光纤

由光纤传输激光时,通常激光辐射是全封闭的,因而不可能接触到。然而,如果光纤发生断开或破裂,就会当场出现危害水平的激光照射。

IEC 60825-2 规定了专门适用于光纤通讯系统的安全要求。这些安全要求包括有必要评估来自于光纤的可接触激光辐射的潜在等级,即危害等级(例如危害等级 1、1M、2、2M、3R、3B 或 4),等同于产品类别。危害等级仅适用于光纤合理可预见的会发生断开的特定位置,而不适用于整个系统或整体安装

过程。因此,同一系统中可能出现可接触光纤发射的不同位置可能会被划定为不同的危害等级。对产品类别而言,不会有这种情况,因为它是基于一个完整的激光产品的最高可达发射水平而确定的。

4.1.5 激光演示和显示

在非监控区域内通常仅宜采用1类、2类或可见光3R类激光产品作为演示、显示或娱乐用途。其他类别的激光产品用于此目的,仅宜下述条件下允许使用:

- 1) 已对必要的防护控制措施进行了风险评估;
- 2) 激光产品的操作宜由有经验的、受过良好培训的操作者执行和(或)采取措施使现场人员免受超过相应最大允许照射量(MPE)水平的照射。

尽管许多国家有本国的指导方针,但IEC 60825-3中给出了激光显示和展示的具体指南。

4.2 激光辐射照射

4.2.1 最大允许照射量

激光安全方案最主要的目的之一是确保任何可能发生的激光辐射照射量在安全极限内,因此通常有必要对所有可预见条件下(如4.3中讨论的)可能出现的最大照射水平进行评估,并使之与最大允许照射量(MPE,概述如下,更详细的解释见第5章)联系起来。

注:确保激光辐射照射水平不超过MPE这一要求,不适用于在医学治疗中对病人的有意照射。

对于辐射发射具有潜在危害的任何激光器(通常指除1类和2类之外的任一类别激光器),都有必要采取防护措施,以确保人员受激光辐射照射的合理可预见水平不超过最大允许照射量(MPE)。在任何合理可行的情况下,都应通过完全封闭激光辐射并在源头处完全消除危害来达到这一要求。如果不可行,宜按照第7章中讨论的风险评估方法确定必要的防护措施。无论如何,应首先予以评估有可能出现的照射水平和能够发生危险水平照射的情况。

在表5、表6、表7中,眼和皮肤照射的MPE值以激光发射波长和照射持续时间的函数形式给出,更详细的讨论见第5章。这些量值由国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)建立,其值低于已知的损伤阈值,它们以现有的最佳资料为基础。MPE值宜作为控制照射量的指南,而不宜作为确定安全与危害水平的严格分界线。因为低于MPE的激光辐射照射量在某些环境下仍令人不舒服,并可能引起二次伤害(如下文解释),所以在任何情况下,照射量都宜保持合理可行的低的水平。

4.2.2 暂时视觉效应

可见的激光发射在照射水平明显低于最大容许照射量(见4.2.1)时,能引起干扰效应和潜在危险的眩目效应,并能引起非直接生理性损害。尤其是2类、2M类和3R类激光(包括激光指示器和低功率准直激光器),因此不宜将其有意或无意地指向人眼。否则会导致被照射人员受到惊吓、分散注意力和不专心,这对那些正在执行重要安全任务(例如驾驶或控制机器)的人员会造成特别严重的后果。如果人们相信他们可能由于照射受到损害,它也能造成干扰性视后像、产生恐惧感和导致诸如流泪和头痛等反应。感觉到眼睛受伤会不断的揉眼睛,又会导致痛苦的角膜擦伤。

4.3 确定激光照射水平

4.3.1 有效照射

为确定激光危害区域的边界,或者为明确必要的防护水平(例如,在使用激光防护镜或防护观察窗时),有必要对激光照射量进行评估。

激光产品对人员照射水平的确定,宜在合理可预见会有人出现且能造成最大照射水平的位置进行。评估时宜将所有合理可预见的光束直接发射和反射条件都考虑在内。

最大预期照射量和激光发射孔径附近出现的照射量水平未必相同,但对于相当靠近输出准直光束激光器的人员而言,结果是一样的。

对于 CW(连续波)激光器,照射量一般用入射辐照度来表示,其单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对于脉冲激光器,平均辐照度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)和单脉冲辐照量($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)通常都必须已知。在估算照射水平时,必须特别注意相关限制孔径(见 4.3.2)和有关大(扩展的)激光光源的处理程序(见 4.3.3 和 5.4)。这些注意事项意味着,用于与 MPE 做比较的适度照射量(所谓的有效照射量)有可能并不等于实际可能出现的照射量。

估算照射量可能需要的主要参数如下:

- 输出波长;
- 激光出口处的光束尺寸;
- 光束发散角和束腰位置;
- 光束剖面图(光束横截面上的功率或能量分布);
- 合理可预见的最大照射持续时间;
- 合理可预见的最小照射距离;
- 表观光源的张角(一般只用于(光束)漫反射即非镜面反射光和激光阵列进行评估,以便确定相关照射参数和计算校正因子 C_0 值。就单一激光源来说, C_0 值通常是 1);
- 扫描光束的扫描特征和扫描几何形状。

此外,对于连续波输出:

- 光束功率;

以及对于脉冲输出:

- 脉冲能量;
- 脉冲宽度;
- 脉冲重复频率;
- 脉冲形状和脉冲时间分布(若复合)。

照射水平可以通过物理测量确定,或根据制造商给出的激光输出参数通过计算来确定。

因为大多数激光光束的剖面图是非均匀的,所以横穿照射区域光束照射产生的辐照度或辐照量是变化的(大多数情况在光束的中心有一最大值)。当照射量(辐照度或辐照量)按 4.3.2 定义的相关限制孔径所规定的圆形区域取平均值时, MPE 与其取值相关。当照射量用于与 MPE 作比较时,其值等于限制孔径内的激光功率(用于辐照度)或能量(用于辐照量)除以限制孔径面积。

若照射面积明显大于限制孔径,则可采用辐照度或辐照量的最大值(通常在光轴上)。

注:对于近似高斯分布的圆形光束,光轴上的照射量等于光束总功率或总能量除以 $1/e$ 直径所确定的圆面积,(圆面积,该面积由 $1/e$ 直径确定)这个区域包含总光束功率或能量的 63%。 $1/e$ 直径是光束辐照度、辐照量或辐射强度下降到(光轴)峰值的 $1/e$ 处,或 0.37 处的直径。但许多情况下,制造商给出的是 $1/e^2$ 直径。 $1/e^2$ 直径等于 $1/e$ 直径乘以 1.4。

在其他情况下,需要更审慎地对相关限制孔径内的总功率或总能量进行评估。对于小于相关限制孔径的光束,有效照射量(当与 MPE 比较时)等于光束总功率或总能量除以限制孔径,而不是光束实际面积。

4.3.2 限制孔径

照射量值的所有测量和计算宜用一合适的平均孔径。这也称为限制孔径,其定义为一圆形区域的直径,辐照度或辐照量在该圆形区域上进行平均。表 2 中给出了限制孔径值。

对于光谱范围在 $1\ 400\ \text{nm} \sim 10^5\ \text{nm}$ 之间的重复脉冲激光照射,采用 $1\ \text{mm}$ 的孔径来估算脉冲宽度不大于 $0.35\ \text{s}$ 的单个脉冲对眼睛的危害,而 $3.5\ \text{mm}$ 的孔径则用于估算脉冲宽度大于 $10\ \text{s}$ 照射的 MPE。

注：波长在 400 nm~1 400 nm 范围内的激光辐射,对眼的照射量值是在 7 mm 直径的孔径(瞳孔)上测量的。对于更小的瞳孔直径,MPE 值将不修正。

表 2 适用于辐照度及辐照量测量的限制孔径直径(t 为照射时间)

光谱范围 nm	孔径直径	
	眼睛 mm	皮肤 mm
180~400	1	3.5
$\geq 400 \sim 1\ 400$	7	3.5
$\geq 1\ 400 \sim 10^5$	$1 \quad t \leq 0.35 \text{ s}$ $1.5t^{3/8} \quad 0.35 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$ $3.5 \quad t \geq 10 \text{ s}$	3.5
$\geq 10^5 \sim 10^6$	11	11

4.3.3 评估扩展源照射的接收角

大部分单个激光器均为“小”光源,因为该表观光源的对向角小于 α_{\min} (1.5 mrad)。若此类光源的辐射在视网膜危害区(即,在 400 nm~1 400 nm 之间)内,则会被眼睛聚焦,在视网膜上形成有效的点像。而对于大的表观光源(通常被称为“扩展光源”)则不可能形成点像。因此,在眼睛表面照射量给定的条件下,其危险性可能较小。当在足够近的距离上进行观察时,扩展光源照射条件可能适用于漫反射,激光阵列或采用了漫射屏的激光产品。

当确定来自于扩展激光源(即,在估算照射处对向角大于 1.5 mrad 的任何光源)的有效照射水平时,应采用下述接收角。任何接收角之外的光源辐射所导致的照射,都不应计算在有效照射量内。

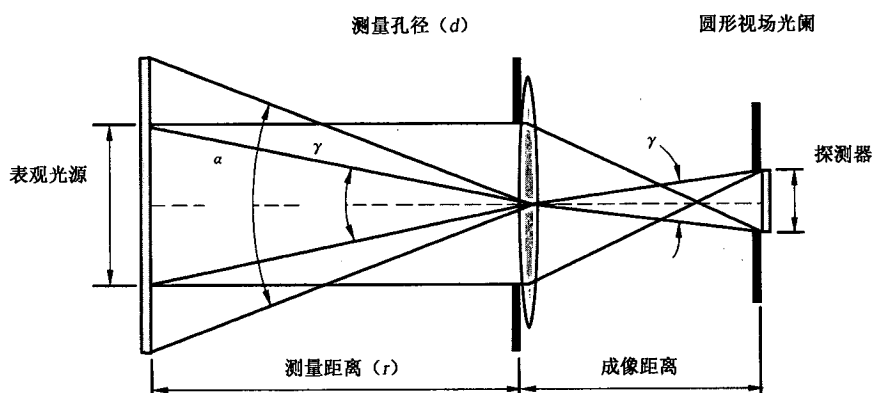
表观光源的对向角应在评估照射量的距离上测量,这个距离不能小于 100 mm。(该角度大小不应与光源的出射发散角相混淆。以太阳举例,从地球上观察它的角度只有 0.5°,但是它的发散角是 360°)。

a) 为了确定按表 6 光化学 MPEs(400 nm~600 nm)进行评价的照射水平,极限接收角 γ_p 为:

- $10 \text{ s} < t \leq 100 \text{ s}$ $\gamma_p = 11 \text{ mrad}$;
- $100 \text{ s} < t \leq 10^4 \text{ s}$ $\gamma_p = 1.1t^{0.5} \text{ mrad}$;
- $10^4 \text{ s} < t \leq 3 \times 10^4 \text{ s}$ $\gamma_p = 110 \text{ mrad}$ 。

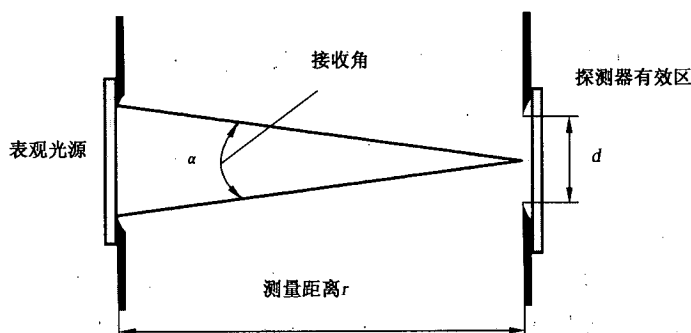
如果光源的对向角 α 大于规定的极限接收角 γ_p ,则接收角不应该大于规定的 γ_p 值。如果光源的对向角 α 小于规定的极限接收角 γ_p ,则接收角应完全覆盖该光源(所考虑的),但不必严格定义(即接收角不需要限制到 γ_p)。

注:对于 $\alpha < \gamma_p$ 的单个小光源进行测量时,没有必要测量一个特定的、严格定义的接收角。为了获得一个严格定义的接收角,可以通过将光源成像在视场光阑上,或者将光源遮蔽的方式来定义接收角,见图 2。



注：上面是一个通过用透镜把表观光源成像在探测器上且提供严格定义的接收角的测量结构图例。这个方案用于表观光源不能直接到达探测器的地方。

a) 使用透镜的测量示意图



注：用位于表观光源上的孔径定义探测器接收角的测量结构示意图。

b) 直接测量示意图

图 2 测量示意图

- b) 针对给出在表 6 中不同于视网膜光化学危险极限的所有 MPE, 确定被估算的照射水平。接收角应完全包围所考虑的光源(即, 接收角应至少像光源的张角 α 那么大)。但是, 如果 $\alpha > \alpha_{\max}$, 在波长范围 302.5 nm~4 000 nm 内, 对于热伤害极限, 极限接收角应该不大于 α_{\max} (0.1 rad)。在波长范围 400 nm~1 400 nm 内, 对于热伤害极限, 对于多点组成的表观光源的评估, 接收角应在 $\alpha_{\min} \leq \gamma \leq \alpha_{\max}$ 范围内。

确定非圆形光源的 MPE 时, 矩形或线光源的对角角取其两个角度方向上的算术平均值。在任一角度方向上, 当对角角大于最大对角角或小于最小对角角时, 都应在计算平均值之前将其分别限定为最大对角角或最小对角角。视网膜光化学 MPE 值不依赖光源的对角角, 因此照射值由上述 4.3.3a) 中指定的接收角来确定的。

4.3.4 双筒望远镜的使用

如果通过双筒望远镜观察激光光源, 眼睛表面的有效照射量将提高 M^2 或 $(D/d)^2$ 倍(取其较小者), 这里 M 是双筒望远镜的角放大倍数, D 是物镜直径(即外透镜), d 是相关限制孔径的直径。(双筒望远镜通常以 $M \times D$ 的形式标注, 例如 7×50)。如果知道双筒望远镜在相应激光波长上的传输损耗, 则可以将其考虑在内。下面给出双筒望远镜的典型透射百分比:

波长	透射率
0.18~0.302 μm	<2%
0.302~0.4 μm	70%
0.4~0.7 μm	90%
0.7~2.8 μm	70%
2.8~10 ³ μm	<2%

通过双筒望远镜观察的扩展源的对向角将通过因子 M 而增加。

5 最大允许照射量的确定

5.1 一般要求

以国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)提供的数据为基础,最大允许照射量的等级作为发射波长和照射持续时间的函数在表 5、表 6 及表 7 中给出。这些表宜与表 8 中给出的修正因子一起使用。

表 5 定义了单一激光束(以及表观对向角不超过 1.5 mrad 的任何其他激光束,见 4.3.3)直接照射条件下眼睛的最大允许照射量。对于波长在 400 nm~1 400 nm(视网膜危害区段)范围的激光辐射,当人眼受到与单一激光束(即,对多点或扩展源,在人眼处的对向角大于 1.5 mrad)直接照射条件相比更大的表观光源照射时,其最大允许照射量可放宽要求。这是因为眼睛不能将这样一个非点光源在视网膜上聚成一个小点,因此进入眼睛的最大安全功率和能量较大。表 6 中给出了这些放宽要求的 MPE 值。

表 7 规定了皮肤的 MPE 值。

表 5、表 6 及表 7 中用于确定 MPE 的照射时间宜以可合理预期发生的意外照射最大持续时间为基础,考虑激光发射的波长和激光器可能使用的条件。在意外照射的最坏情况条件下,对于波长大于 400 nm 的激光辐射,照射的最大持续时间可为 100 s;对于波长小于 400 nm 的激光辐射,照射的最大持续时间可为 30 000 s,从而引发较长期的光化学效应。这一较长的时间基准适用于重复或长时间的紫外辐射照射,而又不致于立即造成明显影响的情况,但显然不适用于受到高功率紫外激光束的直接意外照射,将能立即引起明显损伤的情况。对于可见激光辐射(400 nm~700 nm)的意外照射,不是有意或预期的凝视,可以使用 0.25 s 的眨眼回避反应时间。

7.3 的风险评估讨论中进一步描述照射持续时间。

5.2 重复脉冲激光器或调制激光器

由于现有的有关多脉冲激光照射的判据,数据有限,因此在评估重复脉冲辐射照射时必须慎重。在确定用于重复脉冲辐射照射的 MPE 时,宜采用下列方法。

波长为 400 nm~10⁶ nm 适于眼照射的 MPE 按下述 a)、b)和 c)中最严格的要求确定。其中要求 c)仅适用于热效应极限,而不适用于光化学极限。

波长小于 400 nm 适于眼照射的 MPE 以及皮肤照射的 MPE,按 a)和 b)中最严格的要求确定。

- 脉冲串中任一单脉冲的照射量不应超过单脉冲的 MPE;
- 照射持续时间为 T 的一脉冲串的平均照射度不得超过表 5、表 6 及表 7 中照射持续时间为 T 的单脉冲 MPE(T 是用于照射评价的持续时间,如 4.1 中所介绍的);
- 脉冲串中各脉冲的平均照射量不得超过单脉冲的 MPE 值与修正因子 C_0 之积。

注 1: 脉冲串中各单脉冲照射量求平均值时,其发射持续时间与确定 N 时所用的持续时间相同。每一平均脉冲照射量应与简化的 MPE_{av} 作比较,规定如下:

$$MPE_{\text{串}} = MPE_{\text{单}} \times C_5^{11}$$

式中:

$MPE_{\text{串}}$ ——脉冲串中任一单脉冲的最大允许照射量;

$MPE_{\text{单}}$ ——单个脉冲的最大允许辐照量;

$C_5 = N^{1/4}$;

N 是照射时间内所预期的脉冲总数。

在某些情况下,这个值可降到低于在相同峰值功率下用相同照射时间连续照射的 MPE,在这些条件下可用连续照射的 MPE 值。

表 3 低于持续时间 T_i 的脉冲群合并计算

波长	T_i
400 nm $\leq \lambda < 1\ 050$ nm	18×10^{-6} s
1 050 nm $\leq \lambda < 1\ 400$ nm	50×10^{-6} s
1 400 nm $\leq \lambda < 1\ 500$ nm	10^{-3} s
1 500 nm $\leq \lambda < 1\ 800$ nm	10 s
1 800 nm $\leq \lambda < 2\ 600$ nm	10^{-3} s
2 600 nm $\leq \lambda \leq 106$ nm	10^{-7} s

如果使用可变振幅的脉冲,则按 a) 的要求分别对每个振幅的脉冲进行评估,并对整个脉冲串进行评估。

要求 c) 中的最大照射持续时间,波长范围在 400 nm~1 400 nm 为 T_2 (定义见表 8),对更长的波长为 10 s。如果在 T_i 时段内出现多个脉冲(见表 3),在确定 N 时视其为单脉冲,并将其各脉冲辐照量相加,与时段 T_i 的 MPE 值比较,这里假设所有单个脉冲宽度大于 10^{-9} s。

注 2: C_5 仅适用于单个脉冲宽度小于 0.25 s。

注 3: 由任一脉冲群在给定时限内产生的照射量(或脉冲串的脉冲子群),不得超过该时间内的最大允许辐照量(MPE)。

注 4: 在变化的脉冲宽度或脉冲间隔的情况下,可用总持续时间脉冲(TOTP)法替代 c) 的要求。在这种情况下,由 TOTP 持续时间确定最大允许照射量。它是照射持续时间或 T_2 (以较小者为准)内所有脉冲持续时间的总和。脉冲持续时间小于 T_i 时按 T_i 计算。如果在时间段 T_i 的持续时间内出现两个或两个以上的脉冲,则这些脉冲群的脉冲持续时间按 T_i 计算。为了与相应持续时间的 MPE 比较,应对所有单个脉冲的辐照量相加。当脉冲的平均辐照量与单个脉冲的 MPE 和 C_5 之积进行比较时,这种方法等同于要求 c)。

5.3 多波长

若一台激光器同时发射波长相差很大的几种辐射,或连续波上叠加脉冲处,危害计算可能很复杂。

如果满足下述条件,则宜将几个不同波长的照射看作是按照表 5,表 6 及表 7 给出的 MPEs 值按光谱效应比例叠加的结果:

a) 脉冲宽度或照射持续时间在同一个数量级内;

b) 有叠加效应的光谱范围在表 4 中给出,其中符号(O)表示对眼照射,符号(S)表示对皮肤照射。

无叠加效应的辐射波长,其危害应分别计算。对于有叠加效应的波长,当其脉冲宽度或照射时间不在一个数量级内(例如:同时受到脉冲辐射和连续波辐射的照射)时,需格外小心。

1) C_5 仅适用于小于 0.25 s 的脉宽。

表4 在不同谱段的辐射对眼和皮肤的叠加效应

光谱范围 ^a	远紫外和中紫外 180 nm~315 nm	近紫外 315 nm~400 nm	可见光和近红外 400 nm~1 400 nm	中红外和远红外 1 400 nm~10 ⁶ nm
远紫外和中紫外 180 nm~315 nm	O S			
近紫外 315 nm~400 nm		O S	S	O S
可见光和近红外 400 nm~1 400 nm		S	O ^b S	S
中红外和远红外 1 400 nm~10 ⁶ nm		O S	S	O S

^a 光谱范围的定义见表 C.1。

^b 当裸眼最大允许照射量(MPEs)的估算时间基准或照射持续时间是 1 s 或更长时,叠加光化学效应(400 nm~600 nm)和叠加热效应(400 nm~1 400 nm)应分别估算并选用限制性最强的值。

5.4 扩展源的最大允许照射量(MPEs)

当眼睛受到在视网膜危害区段(即波长在 400 nm~1 400 nm 之间,见 4.3.3)的扩展激光源的辐射照射时,宜使用表 6 提供的最大允许照射量(MPEs)。应注意,通常光源的对向角(α)随距光源距离的增加而减小,相应的最大允许照射量可能增大。(对向角宜在评估照射量处的位置确定),这在确定扩展源的危害距离(即:NOHD)时尤为重要,因为最大允许照射量不可能是一个恒定值,而是随着距离的增加而增大,直到 $\alpha = \alpha_{\min}$ ($\alpha_{\min} = 1.5 \text{ mrad}$)。

表 6 中给出的眼睛热危害最大允许照射量是因子 C_6 的函数。当光源对向角大于 α_{\max} , $\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$ 时, C_6 是 66.7 常量(例如: $\alpha_{\max}/\alpha_{\min}$)。当光源对向角小于 α_{\min} 时, C_6 等于 1,此时可采用表 5 中给出的最大允许照射量(MPEs)。

修正因子 C_6 如下:

$$\begin{aligned}
 C_6 &= 1 & \alpha &\leq \alpha_{\min} \\
 C_6 &= \alpha / \alpha_{\min} & \alpha_{\min} &< \alpha \leq \alpha_{\max} \\
 C_6 &= \alpha_{\max} / \alpha_{\min} & \alpha &> \alpha_{\max}
 \end{aligned}$$

5.5 危害距离和危害区域

5.5.1 标称眼危害距离

在一些激光应用场合,尤其那些包含发散或扫描光束,长光程或漫反射光束的场合,了解激光危害可能到达的距离是非常有用的。

照射水平下降到最大允许照射量(眼睛)水平时,对应的距离称为标称眼危害距离(NOHD)。在此距离之外对裸眼不会造成危害,但若使用放大观察辅助器具时可能会有危害。

若考虑到可能使用放大辅助器具,这是合理可预见的,就要用到扩展标称眼危害距离。这个距离的确定是基于通过使用放大仪器所引起照射量(在眼表面,相应的限制孔径内)的增加。因此扩展标称眼危害距离(ENOHD)是安全使用放大仪器的最小距离(见 4.3.4)。

就发散光束激光器而言,危害距离的知识会特别有用,这种情形下的危害距离相对来说比较短,因此危害局限于紧邻激光出口处。对产生准直光束,在长距离范围里使用的激光器,危害距离的知识同样重要,例如在户外,危害距离可能是相当大的。户外使用 1M 和 2M 类准直光束激光产品时(即这种有

大光束直径的激光器超过了在 IEC 60825-1 的分类程序 1 中描述的 1 类激光发射极限)要特别的小心。尽管这些激光器对裸眼没有危害,但在使用放大观察辅助器具时可能有危害,且危害距离可能还很大。如果光束扩展到公共区域,则不可能假定没有人会使用诸如双筒望远镜之类的放大辅助器具。

NOHD 和 ENOHD 不但与激光的输出大小而且也与光束几何形状密切相关。例如,在距光源一定距离上放置一个光学元件对光束聚焦或准直,都会导致 NOHD 和 ENOHD 的增大。

在一些应用中,用与 NOHD 的类似方式来确定皮肤危害距离可能会有用。

5.5.2 标称眼危害区域(NOHA)

基于 NOHD 和 ENOHD、激光器的安放和固定,以及使用环境等方面因素的考虑,可以定义一个激光出口周围的,会产生辐射危害的区域或三维空间。这个危害区域,如果是基于 NOHD 判定的,就称为标称眼危害区域(NOHA);如果是基于 ENOHD 判定的,就称为扩展标称眼危害区域(ENOHA)。

因为与激光操作无关的人员有可能使用放大辅助器具,特别是在户外激光应用场合,更要认识到激光危害会延伸覆盖到整个 ENOHA 区域,而不仅局限于 NOHA 区域。在户外应用场合,如果光束被地表,树林或其他地形特征所阻断,那么 NOHD 不会超出这些障碍物的视距边界。

假如,能严格地限制和可靠地控制人员进入 ENOHA 区域,那么就不必要把危害区域封闭起来。

6 伴随危害

6.1 附加的健康危害

除了激光辐射直接照射眼睛和皮肤产生的危害外,激光器的使用过程中也能产生许多伴随危害。伴随危害不影响激光分类,因此,即使在 1 类激光产品中,这种伴随危害也可能出现。有些伴随危害,例如电击,能威胁到生命。

伴随危害的控制一般宜由制造商通过对设备的合理设计,以及提供给用户的安全使用说明书来实现。尽管如此,不能合理地通过工程设计彻底解除的危害(例如烟雾),或者未按照制造商指定的用途或方式使用激光器时,用户将承担起控制这些危害的责任。

下文是伴随危害的概要。用户宜采取所有合理的步骤去研究,并确保对自己在使用激光设备过程中引起的所有危害有足够的防护。使用激光器过程中的相关危害是多样化的,这里仅能给出有限的指导,用户宜参考本国或本地区现行的要求或规章。在非激光辐射安全方面有经验的安全检查员有权提出建议。

6.2 激光器产生的危害

6.2.1 触电

许多激光器利用高电压,即使设备和电源断开后,电容器仍维持储存的能量。激光电源的额定功率通常大大超过所发射激光辐射的额定功率。在正常操作情况下,针对电击的可能性,激光设备宜通过电气接头的全部密封予以完全防止。然而,在检修期间,当这些防护装置被移除和任一联锁装置失效时,可出现严重的危险情况。需要强调的是,采取防护措施以确保在检修工作之前消除储存的能量。

6.2.2 伴随辐射

潜在危害的辐射水平不同于激光辐射,可由激光设备引起,也可由激光束与被加工材料相互作用产生的等离子体产生。这类的辐射包括 X 射线、紫外线(UV)、可见光、红外辐射(IR)、微波辐射和射频(RF)辐射。以下扼要叙述了几种主要潜在的伴随辐射源。

X 射线能通过高功率激光束与重金属靶材相互作用产生,和通过激光电源内的高压热阴极电子管产生。

紫外线、可见和红外线的发射能通过气体激光器放电管、光泵浦激光器的光泵浦源和激光诱导等离子体产生。

射频激光器无适当防护时会产生微波辐射和射频辐射。

6.2.3 其他激光辐射

就某些激光器而言,激光辐射能在其他波长而非主发射波长处发射,尤其是对于某些使用光学频移技术(例如倍频技术)和光泵浦的激光器。

6.2.4 有害物质

在许多激光器中用作激活介质的材料(尤其是激光染料和准分子激光器中的气体)是有毒致癌的物质。许多染料激光器中使用的溶剂能携带溶质通过皮肤进入体内。这些有害物质也可能是高挥发性且不宜被人吸入。一些光学有源元件(例如调 Q 和倍频)中使用的液体、清洗液以及与激光器相关的其他材料(例如硒化锌透镜)也可能是有害的。对这些有害物宜采取适当的储存、处理和清除等防范措施。

6.2.5 烟尘

许多 4 类激光器的应用,尤其在工业材料加工和激光外科手术中,通过激光束和靶材之间的相互作用,能释放出有害的微粒和气态副产品到大气中。这些排放的烟尘可能是有毒有害的,而且即使是短期接触也能产生危险效果。烟尘的效果相当多变,并且主要依赖于材料的加工过程、暴露接触时间和烟尘浓度。

6.2.6 噪声

激光电源内电容组放电能产生足够引起耳损伤的噪音量。脉冲激光器的超声发射和重复噪音也是有害的。一些空气冷却激光器能产生很大的噪音量,当过量的噪音不能被消除时,宜戴上护耳器。

6.2.7 机械危害

大部分的激光设备自身都能产生机械危害,包括辅助器件,例如气泵,尤其是当激光设备缺乏适当地保护或手工移动时。拖曳的电缆和循环水管能产生绊倒危险。尖锐物体可能造成割伤,例如光纤。遥控运行的光束传输臂和机器人系统能引起严重的伤害。较大的加工件(例如金属片)能产生人工操作问题,例如刀伤、拉伤、挤压伤。

6.2.8 火灾、爆炸和热损害

高功率激光器(4 类)发射的激光能点燃靶材料。在一些富氧环境下的激光加工应用场所,该类激光器的使用会增强这种效果。

对于较低类别激光器的激光辐射,尤其当聚焦在非常小的区域时,能引起可燃气体或高密度气载尘埃的爆炸。在这种环境下,单模光纤产生的 35 mW 以上的功率水平就足以引起燃烧。

光泵浦激光器中使用的高压放电管和其他内部元件,例如电容(器)组,可能会爆炸。外部光束控制镜在不得不消耗其吸收的,来自于高功率入射激光束的大量能量时会发生破碎。

激光设备也会因其内部的易燃部件,如塑料零件等而引起火灾,这些易燃部件在激光设备内发生故障时会过热或起火。

6.2.9 冷和热

某些激光器的内部部件会变热,与高功率加工激光器一起使用的光束控制镜能达到很高的温度。另外,激光设备有时会用到或配合使用低温冷却设备。

6.3 环境产生的危害

6.3.1 温度和湿度

过高或过低的环境温度、或过高的环境湿度能影响激光设备及其内置安全装置的性能和危及安全

操作。光学部件上的冷凝液会影响系统中的光束传播。

6.3.2 机械震动和振动

机械震动和振动会影响激光系统的运行,能导致光路失准,产生危险的漂移光束。

6.3.3 大气影响

高功率激光器发出的光束可能点燃存在于环境中的、来自于邻近工作活动的以及其他来源的溶剂蒸气,粉尘和易燃气体。这种点燃也可能引起爆炸。

6.3.4 电磁和射频干扰

有辐射的电磁场、磁场或电场,以及沿着供电电缆或数据电缆传导的高压脉冲能干扰激光设备及其内置安全装置的性能,或干扰控制电路,使设备不能安全运行。

6.3.5 电源的中断或波动

电源的中断或波动会影响激光器安全系统的运行。

6.3.6 计算机软件问题

当激光器的运行及其防护系统部分或全部受软件控制时,计算机编程错误会引起毫无警告的严重的不可预测的危害。

6.3.7 人机功效和人性因素的考虑

激光器及其辅助设备布局不合理、缺少空间导致的环境杂乱、以及复杂或困难的操作程序都能增加发生事故的可能性。另外,个人与其工作环境相互作用产生的人性因素能对个人的安全相关行为产生很大的影响。这些因素包括:

- 个人方面:涵盖了个人的智力、心理和身体素质,且包括个人的工作能力,对工作场所风险的理解和对待安全的态度。
- 工作方面:它涉及必须执行的任务或功能,以及必须使用的设备的性能对人的影响。
- 组织方面:它与相关组织的“安全文化”相关,且包括个人所工作的组织架构、个人所受的影响和压力(现实的或想象的)。

人为因素在大多数与工作相关的事故中起一定作用,因此它与使用激光设备时可能产生更具体的实际危害一样,需要进行正确的应对和控制。

6.4 伴随危害的控制

宜对激光设备的安装、操作、维护、检修和处置过程中合理可预见的任何伴随危害进行识别和充分评估。然后应按照第7章所述的风险评估,并考虑适用的相关国家或地区的规范要求,确定必要的防护控制措施。

7 风险评估

7.1 危害和风险

激光设备安装、操作、维护、检修和处置过程中引发的危害控制应以风险评估为基础。危害是指能产生伤害的任何物理环境、化学和生物制剂。伤害通常理解为人身伤害的意思,但是它也包括财产损失(例如设备或资产的损坏、生产时间的丧失)。这些危害涉及所有的活动。就激光设备而言,激光辐射是

一种危害,但激光设备在使用过程中还有附加危害(例如,电击、烟尘、高压气体),其中有些已在第6章中叙述。

在风险评估中,风险是发生伤害的可能性和伤害所能造成的严重程度相结合。在可能受照射危害的任何时候,也存在受伤害的风险,但是,完全消除风险并不总是必要或可能的。真正需要的是在使用过程中(也包括合理可预见的故障或误用情况)将风险降低到一个可接受的水平。这个可接受水平是广泛多样的,它取决于使用的用途和环境,因此,可接受水平的设定要靠判断。在某些情况下,通过将所考虑活动的相关风险与其他活动的类似风险进行比较,设定可接受水平。

激光产品类别(见4.1.2)基于正常操作情况下人员所能接触到的最大辐射水平而确定。产品类别清楚地表明了其辐射危害,在表1中给出的默认防护控制措施也反映了这一点。但包括产品的误用和故障在内的一些更广义的问题也影响风险水平。风险评估所要求的关于伤害可能性及其严重程度的更详细的考虑,为用户选择恰当的组合控制措施留下了更大的判断空间。这在某些应用场合,即表1中概述的控制措施不当、不足或过分严格时尤其有用。

有可能的话,与某一特定激光加工有关的风险评估应该在激光器购买之前进行,这将保证未来的用户完全知道安全的含义,这关系到激光器将被摆放到什么位置和如何被使用。这样所有必要的准备工作在设备到达之前就能做好。

使风险降低到可接受的水平是一个不断反复的过程。风险评估方法可能多种多样,但都包括以下基本步骤。

7.2 风险评估:第1阶段——辨别潜在的伤害情况

风险评估最重要的部分是要考虑激光设备使用过程中,包括安装、正常操作、维护、检修和合理可预见的误用或故障,可能发生的每一个可合理可预见的伤害情况。宜考虑所有具体的检修、调整和制造商指定的其他操作。用“集体讨论”方式对所有活动进行系统或随机的考虑,可以列出一个关于“会出什么错”的清单。

在对潜在的伤害情况列清单时,用户应该关注的三个关键点在7.2.1、7.2.2、7.2.3中有描述。

7.2.1 相关危害

很重要的一点,是要仔细考虑所有可能的危害以及可能产生这些危害的情况,这要将激光设备的类型(包括设备类别、危险照射可能发生的条件,以及可能造成的伤害类型)及其执行的任务或工序考虑在内。尽管激光辐射照射会造成最显而易见的危害,但这通常并不是唯一的危害。第6章讨论了使用激光设备时可能会涉及到的多种相关危害。在进行风险评估时已经到位的任何控制措施,都会有效地将这些危害进行隔离(可能例外的情况是检修期间)。在拟订初始清单时,对这些控制措施的考虑程度(无论是由生产商纳入到激光产品中去,还是在激光器安装时已经实施)需要由用户自行判断。

7.2.2 激光环境

激光环境包括:

- 激光设备的位置:

例如:在室内一个封闭的、专用的激光工作区内,或者在一个可广泛接近的或开放的工作区内,或者在室外;

- 就设备的角度来说,工作区的状况:

例如:温度、湿度、振动、粉尘等对激光设备的影响,人员或者其他移动设备的碰撞对激光设备可能产生的干扰或者损坏等;

- 就人员的角度来说,工作区的状况:

例如:宽敞还是杂乱拥挤;干净还是脏;照明充足还是昏暗;激光器及其相关设备易于使用和操

作；作业简单还是复杂等；

- 可接近的程度：

例如：不许公众进入的局部有限区域；不许公众进入的自由区域；允许公众进入区域。

7.2.3 处于危险中人员

处于危险中人员的相关问题包括：处于危险状况人员的数量以及这些人员对危险的认识、防护和培训程度。处于危险状况的人员可能包括受过培训的熟练的操作员、检修人员，对危险并不知晓的职员，外包人员、参观人员、儿童和不能完全理解危险标志或者不能鉴别相关危险的其他公众。

7.3 风险评估：第2阶段——潜在伤害情况的风险评估

对于潜在伤害情况清单上的每一项，可以分别考虑构成风险的两个因素，即产生伤害的可能性和伤害的严重程度。

对这些因素进行量化可能是非常困难的，但通常并不需要这样做。事实上，有时在完成风险评估过程的第1阶段之后，所存在的不可接受的风险以及为消除或者降低该风险所需采取的措施就已经变得非常清晰了。

本指南主要是以激光光束作为例子进行说明。用户还必须考虑其他相关危害及其可能导致的风险。

尽管伤害的可能性和严重程度都是构成风险的因素，但鉴于可能造成的伤害程度的不确定性，通常更实用且更重要的是只关注大于MPE的照射发生的可能性（而不考虑实际结果）。这就是决定性风险评估，并且它是许多激光安全风险评估的基础。

通过强调对可能出现危险照射水平的环境、条件和事件进行评估，就可以更容易地将控制措施（见6.4）同下述必要性联系起来：即，确保可能导致伤害（不考虑伤害的严重程度）的环境、条件或事件不可能发生。

有时更正式的风险评估方法可能适用，具体见7.3.1、7.3.2和7.3.3。

7.3.1 频繁程度

考虑到照射危害的频繁程度、持续时间以及在照射时不可避免危害的概率，在此将每个已确定的危害可能导致伤害的可能性分为以下三类。

这三类分别为：

- 很可能：将会频繁地发生；
- 可能：有时/偶尔会发生；
- 不可能：不太可能会发生。

7.3.2 严重程度

伤害的严重程度分为三类。（可以将对工厂或环境的危害附加为第四类。）

建议分为下述三类：

- 轻微：轻微的不便。可能需要现场救助，但是很快就会完全恢复。
- 中等：较严重的影响。需要较长的恢复时间，可能需要医学治疗。
- 严重：严重的伤害。需要紧急医学干预，可能会导致永久伤残（包括失明）甚至死亡。

7.3.3 必然风险

考虑会必然产生的风险，并确定该风险是否在可接受范围内。

7.3.3.1、7.3.3.2和7.3.3.3描述了重要的考虑因素。

7.3.3.1 眼或皮肤

- a) 眼伤害后果通常比同等程度的皮肤伤害要严重的多；
- b) 在任何给定的照射下，大面积的皮肤灼伤将比小面积的灼伤严重的多；
- c) 极高功率的激光器可能会造成非常严重的身体伤害，甚者可能导致死亡。

7.3.3.2 激光波长

- a) 皮肤重复或长期暴露于紫外激光辐射，可能会产生累积伤害，甚至会致癌。
- b) 当暴露于足够高功率的激光辐射时，任何波长都会对眼造成伤害。（不存在“眼安全”波段。）
- c) 即使是局部视网膜伤害也会造成严重的视力下降。
- d) 角膜浅表损伤可被治愈；透入到角膜更深处的伤害则不可治愈。
- e) 眼睛突然和意外受到可见激光辐射照射，即在照射水平远在 MPE 之下，也可能引起注意力分散和眩晕。

7.3.3.3 激光辐射照射的持续时间

照射持续时间可能受对疼痛、强光或者热觉响应的动作速度限制；但光化学损伤一般不会被立即感觉到。

7.4 风险评估：第 3 阶段——选择控制措施

风险等级不可接受时，必须引入控制措施使风险降低到可接受的水平；这些控制措施见第 8 章。在选择合适的控制措施时，根据已建立的安全方针，工程控制应作为减少激光损伤风险的首要措施。个人防护装备只能被用作在工程控制和管理控制联用都不能提供足够的防护水平时的最后保护手段。

在确定了用于减少风险的控制措施后，应重复上述风险评估程序，如果有必要，应再次反复，直到来自潜在伤害情况的风险降低到一个可接受的水平为止。这些反复过程宜在执行提议的控制措施和使用激光设备之前进行，以确保控制措施一旦被采纳，残余风险就将是可接受的。

8 控制措施

8.1 一般要求

当风险评估（第 7 章）显示风险达到了不可接受的程度，宜引入保护控制措施。无论制造商对激光器如何分类，也不管激光器是否以未分类的形式而作为其他产品中的部件销售，或者此激光器是为特殊的用途、实验或评估目的而特别构建，都应采取相应的安全保护措施；尽管应该考虑到这样一种可能性，即不常见或特殊的环境可能需要采用特定控制措施，对于 1 类和 2 类激光产品来说，一般无需对其进行风险评估。

作为危害控制的首选，应总是考虑使用较低类别激光器的可行性。因此，在购买和使用前，需要判定是否一定要使用有危害的激光器。

激光产品以非制造商指定的目的或方式使用时，可能发生危害，需要采取制造商已详细说明了额外的防护控制措施。

控制措施宜考虑以下三个主题，包括工程控制、管理控制和个人防护装备；然而，在任何合理可行的情况下，都宜采用工程控制方法（例如，对光束完全密封）在源头处完全消除激光危害。

——工程控制包括由制造商或用户整合在激光设备中和激光束周围的工程措施，尤其是防护栅栏的固定设备和阻止人员接触激光辐射的防护屏。

——管理控制覆盖全面的管理方针、程序性问题（管理激光使用的“地方性法规”），以及危害警告标

志的使用和显示、培训和指导、工作职责和禁令。

——个人防护装备是个人穿戴的防护物,就激光安全而言,其主要指的是使用激光防护镜,但也包括用以保护皮肤的专用工作服(例如,手套和面罩),以及防护粉尘和烟雾的呼吸保护器具和防护过度噪音的耳塞。

依据所采用的激光应用管理总方针,宜主要考虑以工程控制作为减少激光相关伤害的手段。其次,宜考虑覆盖程序性问题和和工作安全体系的管理控制。个人防护装备只能被用作在工程和管理控制联用都不能提供足够的防护水平时的最后保护手段。使用个人防护装备时,宜有一个对控制其使用的足够水平的管理控制作为支持。

减少风险到可接受的水平是一个不断反复的过程,包括识别与激光设备的使用或合理可预见的误用(包括合理可预见的失效模式)有关的危害,评估因暴露于这些危害而带来的伤害风险,并重新检查可以减少风险的控制措施。

如果一个以上当事方是从事激光设备的设计、详细计划和安装(这可能包括,例如,激光器本身的制造商,委托供应和安装关联设备的独立公司,和买方机构的员工),那么清晰界定安全责任是非常重要的。事先达成一致并写明每一方承担的整个系统中的特定安全责任,并识别和澄清那些关系整体系统安全的问题和安全守则是有益的。

8.2 降低危害

在考虑激光器的推荐用法时与其风险水平相关联,或许意味着用较小程度危害(并随之发生的较低水平的风险)达到预期的目的是可能的。例如,通过减少激光发射,通过增加光束直径,或使用不同的波长。用户宜始终确保激光器的最小危害度与其预期应用相称。

8.3 密封危害

8.3.1 光路密封

宜将使用密封装置来完全包含激光束视为一种避免人员接触到危险等级激光辐射的方法,这种密封包括有意防止来自设备的激光辐射,以及有意防止人员接触到激光辐射可能存在的地方。

所有密封装置需要使用适合的材料,在预定使用的环境中和现场环境的影响下,这些材料都应结实、牢固和适用。金属普遍用于组成防护密封装置,在某些波长范围内,也可以用玻璃或塑料材料,密封材料的必备属性是足够的环境稳定性,(尤其在抗机械冲击、耐热和耐光性能)和在激光辐射波长下足够的光密度。如果不需要人员出现的激光环境中,一个房间的墙壁可以组成一个防护密封装置。

大功率4类激光器,例如用于切割,焊接和其他形式材料加工,由于这类激光器的光束能熔化、灼烧、气化和消融不透明材料,会造成一个额外的密封问题。对大功率激光器密封结构材料的适用性的评估指导,用户宜参考IEC 60825-4。一般而言,只要有必要,密封装置必须尽可能持久而完全地密封投射到其内表面的激光辐射。

对于所有的防护密封,非预定的或非授权的移动全部或部分密封会导致接触激光辐射,防止该类移动的方法需慎重考虑(参见8.3.3:联锁保护)。

8.3.2 观察窗口

在激光器运行过程中允许采用观察窗口检查激光器密封内部时,使用观察窗口并非理想方案,宜采用远观察(TV)系统作为一种替代方案。在使用观察窗的地方,需要由适宜的材料建造,以在不危及密封防护特性的情况下允许观察密封内部。

在密封的激光辐射的波长下,观测窗口材料所需要光密度的计算方法与激光防护眼镜光密度的计算方法是一致的(见8.4.5.2),但是最大可预见照射量的评估是不同的,特别是,由于观察窗口未被覆

盖,意外照射持续时间可能会比同等条件下对眼镜的照射持续时间更长久(见 IEC 60825-4)。

8.3.3 联锁保护

8.3.3.1 联锁保护的目

宜通过与风险等级(参见表 9)一致的措施来控制人员接近。由于粗心大意、意外的,或甚至恶意打开或移除部分密封导致存在合理可预见严重伤害风险时,推荐采用工程方法(例如,使用安全联锁装置)防止触及及终止激光发射来控制激光危害(见 8.4.2 和附录 A)。

在下述段落中的用户安装联锁装置的指导是一种推荐的好方法,但不应被解释为对制造商的要求(激光产品的制造要求详见 IEC 60825-1)。

8.3.3.2 联锁系统的设计

对于一个执行安全判定函数的联锁系统,建议应考虑以下标准:

- a) 机械开关宜设计为“常断”(参见 A.2.2)。其所具备的触点在联锁开关打开时触发分离,以预防电弧或间歇运行风险。
- b) 引发开关宜被编码(即要求两个匹配部分在一起)以防止不经意的人工操作。
- c) 联锁系统宜设计成在电路任何部分的单一故障都不能导致丧失保护功能。单一故障应在系统重置之前检测到(一个合理可预见的单一故障为继电器触点焊接)。
- d) 通过中断激光电源以终止激光辐射时,例如脉冲调制激光器,应同时释放电源残余能量以免引起后续激光脉冲。这通常通过制造商产品设计来满足。

8.3.3.3 重置联锁装置

联锁系统在运转后仅能通过人为操作进行重置的设计,是一个很好的方法(例如重置按钮)。

只有当所有防护功能和防护装置准备就绪且故障被消除之后,才允许联锁系统重新启动。

重置联锁系统不宜自动重启激光器,但是系统宜准备接受重启命令。

8.3.3.4 超驰控制联锁

联锁系统具有超驰装置时,允许接近设备进行检修或其他的调节工作,这种情况下,联锁系统应满足下列要求。

当密封恢复的时候,联锁不能保持在超驰控制状态,例如,可以通过限制超驰控制的持续时间或通过超驰装置的合理机械设计来满足该要求。

只要超驰控制联锁起作用,宜有清楚的视觉或听觉警告。

联锁能从激光受控区外面进行超驰控制时,宜只可能通过编码开关或钥匙开关开动,以防止未经授权人员启动超驰控制。

8.4 减少危害

8.4.1 防止触及

宜采取任何合理可行的工程手段来防止人员触及激光危害。当这种级别的保护没有达到时,可采用合理可行的方式,如隔离带、通光管、局部围封和只限相关人员进入,使人员触及的激光辐射危害和其他危害限制在一定的程度。

8.4.2 激光受控区

当激光设备的使用过程中会产生合理可预见的损害风险时,宜设定激光受控区。简而言之,激光受

控区是一个存在激光光束危害的区域,同时在这个区域内又存在某种程度的有效的危害控制。宜清楚地界定这种区域,只有经过充分安全培训的指定人员和本区域的受控人员可以进入。

一个激光受控区边界线应封闭所有合理可预见的使用条件下的与使用激光器有关的危害(包括激光器及其相关设备产生的合理可预见的故障的情况,以及合理可预见的偏离正确操作程序的情况)。

宜将警告标志清楚地显示在激光受控区的外面,这种标志应包括在图 1 里给出的激光危险符号,并应指出危害的类型、有效的进入限制,以及一旦进入时宜采取的防范措施。标志中包含该区域责任人的姓名同样有益于从其处获得补充信息。

激光器受控区完全的物理封闭常常是理想化的,但如果满足以下条件,就并非总是必须的。a)受控区严格限制进入;b)在受控区外没有对人不合理风险存在。只要是存在重大危害的、依靠行政措施不能充分控制进入的区域,尤其是在激光区域内要求使用个人防护装备时,应该考虑门或其他激光受控区入口通道的连锁控制。如果安装连锁装置在入口通道处,它可以与 3B 类和 4 类激光产品中包含的遥控连锁连接器连接,当打开入口通道时,连锁装置被激活,从而终止激光器的发射。可以用连锁装置的其他方法代替上述方法终止发射激光(例如,使之与激光器的电源相连,或使之与自动防故障装置的射束光闸相连)。表 9 中给出了与激光等级有关的激光受控区各种类型的要点。

在激光使用期间内,由于合理的工作原因有必要进出有连锁保护的激光受控区域时,应当安装人工控制连锁装置(见 8.3.3.4)。人工控制连锁装置易于被滥用,而且它允许保护系统的临时失效,这会危及到激光受控区的安全效力。因此,应当仔细考虑怎样使用和怎样可能变成滥用,否则,不应使用人工控制的连锁功能。

如果激光发射中断是不可接受的,并且超驰控制连锁不能提供一个满意的解决方法(例如在医学应用中),那么,使用有紧急出口释放钮的自动防故障装置的电磁门锁,去打开门锁是一种选择。

应该在激光受控区外使用照明警告标志去标示何时激光器正在使用中和何时门的连锁装置(安装的)是可使用的。这些标志宜清楚地标示何时进入此区域是安全的,何时进入此区域是不安全的(见 A.2.5)。

涉及到其他的风险,应当考虑在激光区域内安装常规的红色紧急按钮,以便在紧急状态下终止危害激光的发射。有关保持工作场所安全的专门国家法规应给予考虑。

8.4.3 地方性条例和程序

管理控制措施宜以书面的地方性法规和程序的形式来执行。这些条例和程序或许是为特定的组织机构、场所或有关的设备所专门起草的,或是基于适当的标准模型而起草的,宜包括:

- a) 设备和加工方法的说明与目的;
- b) 激光安全员和激光设备责任人员的名字和具体联系方式;
- c) 授权操作、维护、检修激光设备的人员姓名;
- d) 激光器操作、维护、检修应采用的程序(如果相关),并遵照所有的预防措施,在适用的情况下,包括个人防护物的使用和激光器控制键的使用和安全保管;
- e) 指定设备发生故障或发生其他紧急事件时采取的行动;
- f) 事件报告的程序和万一发生可疑事故应采取的行动;
- g) 授权进行危险操作要求的详细信息,如果有的话,例如,检修批准程序(允许进行工作)。

宜定期检查地方性条例以保证其持续满足要求。

8.4.4 降低局部风险

8.4.4.1 一般预防措施

在激光受控区内,宜采取步骤去降低被授权在此区域内工作人员的伤害风险,这些步骤宜包括:

- a) 对所有涉及员工的充分培训；
- b) 充足的房间照明度；
- c) 整洁的工作环境和条理良好的工作布局；
- d) 激光器操作钥匙的安全控制；
- e) 激光器和光路涉及到的所有元件的安全安装；
- f) 光束准直的安全方法；
- g) 如果适合,在有用的激光光束路径末端的放置光束终止器；
- h) 在短时间内不需要发射激光时,3B类和4类激光产品配备有光束衰减器或光束终止器用来临时终止发射激光。当长时间不需要激光发射时,应该关掉激光器；
- i) 应当尽可能多地封闭光束；
- j) 如可行,保持光束高度高于或低于眼睛所处的高度；
- k) 将激光束限制在明确的、尽可能小的区域内(例如,保持光束在一个光学平台的范围内;设置障碍阻止人员进入开放光束能穿过工作面的地方)；
- l) 使用屏幕、百叶窗或窗帘抑制激光辐射(见 IEC 60825-4 合适材料选择指南)；
- m) 在适当的地方,使用检查表。

8.4.4.2 镜反射

宜特别注意阻止激光辐射的非预期镜面反射。镜片、透镜和分束器应该严格的安装好,在激光发射时只能进行受控的移动。

1M类和2M类激光产品在可以聚光的表面发生的镜面反射能对肉眼产生危害。(来自于1M类和2M类激光产品发射激光的直接照射通常对肉眼是没有危险的。)

产生散射的反射表面实际上能镜面反射相当大一部分的辐射光束,特别是在红外光谱范围内。在大于预期发生纯粹(Lambertian)漫反射的情况,这种反射表面仍具有潜在的危害性。

有潜在危险的镜面反射发生在所有能传送光的元件上,例如透镜、棱镜、窗口和分光器。对3B类和4类激光器,应特别注意元件的选择和元件表面的清洁维护。

有潜在危险的辐射也能通过有反光的光学元件传播,例如镜片(举例,红外辐射通过可见光辐射反射器传播)。

当光线切线入射时,很多表面产生了镜面反射。

8.4.5 个人防护

8.4.5.1 个人防护装备(PPE)的使用

一般情况下,工作在激光受控区的人员为防止激光危害宜佩戴合适的个人防护装备(例如激光防护眼镜)。这种防护仅用在能确保充分防护的其他方法,如完全的激光辐射密封,并非合理可行时,并且已经能够确定个人的防护装备能提供足够防护时采用。

在个人防护装备被认为是一种适当降低风险的方法时,它的使用应该是强制性的,并且不作为是一种个人选择的事情。理想情况下,PPE应该人人都分配,并且出于卫生学的考虑,当PPE被另外一个人重新使用之前,宜用适当的方法正确的清洁干净。有些国家制定了涵盖PPE设计、规范和使用的附加的国家规范。

在欧洲适用的特殊要求涵盖了激光防护镜的技术要求、标记和测试方法,它使用了防护等级的概念(而非光密度概念),不同的防护等级表明能够承受一定范围的人射激光辐射,而起到对人眼的保护作用(参见EN 207和EN 208)。

8.4.5.2 指定眼防护装置

眼睛保护可以是镜架放在耳朵上的眼镜形式,也可以是将防护镜用带子固定在头上的形式。这种防护镜采用滤光片能降低进入眼睛的激光辐射,可在激光受控区内作为一种保护措施来采用。然而,对个人眼睛防护而言,光束的完全封闭与远距离观察(例如电视监视器)系统相结合,宜始终作为个人眼防护的首选。

8.4.5.2.1 只有满足以下所有的条件,才能只使用防护眼镜进行防护:

- a) 眼睛受到高于 MPE 激光等级的意外激光照射,产生严重的伤害风险;
- b) 激光照射未对皮肤损伤造成严重风险(反之参见 8.4.5.3),但对眼睛损害的风险有可能存在,必须采用光密度较高级别的滤光镜来保护眼睛;
- c) 完全通过使用工程控制措施和/或行政控制措施去确保足够的防护并非合理可行;
- d) 防护眼镜应具有以下必要的性能规格:
 - 1) 将合理可预见的最大激光辐射降低到安全等级;
 - 2) 眼镜能够足够长时间地承受合理可预见的最大激光照射,以便采取纠正措施终止照射;
 - 3) 佩戴者使用眼镜时不会有任何不适,并且不会造成佩戴者的视力显著下降。

8.4.5.2.2 当选择合适的眼镜时,宜考虑以下情况:

- a) 工作波长。激光防护眼镜利用滤光材料提供特定波段的激光防护。选用不正确的防护眼镜通常会意味着不能提供足够的防护。
- b) 合理可预见最坏情况下的有效照射量(依据第 3 章确定),用入射辐照度($W \cdot m^{-2}$)或辐照量表示($J \cdot m^{-2}$)。
- c) 适用的眼 MPE 值(根据第 4 章确定),表述单位与有效照射量相同。
- d) 实际照射量和光束直径(这些参数可衡量出防护眼镜承受入射激光辐射的能力)。
- e) 防护眼镜在特定激光波长上的光密度 D_λ 。该光密度应足以将透射辐射降低到适用于合理可预见的最大照射时间的 MPE 值之下。最低水平眼防护所需的 D_λ 值可按下述公式计算:

$$D_\lambda = \lg[\text{合理可预见的最大照射量}/\text{MPE}]$$

8.4.5.2.3 其他重要因素包括:

- a) 可见光透过率,以及透过滤光镜看到警示灯或其他指示器的能力。
- b) 总体设计、舒适度、通风性、周边视力、眼镜矫正装置(或者采用可配戴于普通眼镜上的护目镜样式的防护装置;或者直接采用适合于佩戴者本人的具有光学矫正功能的防护眼镜)。
- c) 滤光镜吸收材料的老化或改变,包括辐射导致的透明。
- d) 材料的机械强度和抗冲击性能。
- e) 任何相关的国家要求或规定。

8.4.5.2.4 防护眼镜宜永久标识下列内容:

- a) 工作波长;
- b) 与工作波长所对应的光密度。

8.4.5.2.5 其他防护眼镜相关的考虑因素包括:

- a) 应知道眼镜所能承受的关于最大照射水平的任何限制,(因为高照射水平下滤光材料可能损坏)。
- b) 若使用的防护眼镜有很多种,则用颜色编码或者其他方法将每一副眼镜与所对应的特定激光关联起来,对正确无误地使用是有利的。
- c) 对于可见激光发射,有时因为调光或者其他操作原因,可能需要能够看见激光束。在这种情况下,眼防护滤光镜宜这样来确定,即能将意外照射降低到与 2 类产品相当的水平,这种情况下可通过自然回避反应提供保护。这可以通过下述方法实现:即在上文关于 D_λ 的计算公式中,

用 0.25 s 的时间基准定义 MPE 值。

- d) 防护眼镜是用来防护激光辐射意外照射的,它不应用于故意暴露于或者有意观察激光束时的防护。宜定期检查防护眼镜是否有磨损或者损坏的迹象,并记录检查日期;必要时应更换新的防护眼镜。每次使用前,都应检查防护眼镜是否合适。
- e) 在高功率或能量入射下,滤光镜材料因吸收入射辐射会导致严重的应力集中和滤光镜的突然失效。鉴于此,对已遭受过一次高辐照量意外照射的防护眼镜宜予以更换。

8.4.5.3 防护服

某些情况下,需要提供其他防护服以供激光受控区内作业使用。最有可能采取面具或手套的形式,但有可能在极少数情况下会要求使用全身防护。

尽管在这种情况下,对危害进行完全封闭总是首选方案,这种防护形式在当危险评估表明存在严重伤害风险(眼危害除外)时宜予考虑(见第 7 章)。

8.5 设备的检修

8.5.1 激光设备检修期间风险的增加

激光产品是根据其工作期间的可接触的激光辐射水平进行分类的。而维护和检修可能需要将防护罩拆掉、使产品的保护特性失效,以及(或者)对产品的性能进行较大的变动,从而会增加受伤的风险,同时也可能会出现附加危害(例如:电气危险)。相对于常规操作来说,检修和维护操作可能需要更高级别的安全培训。

在进行检修操作之前,宜单独进行风险评估。宜对所有的检修操作以及由此造成的激光产品的性能变化进行记录。

嵌入式激光器的检修可能会大大增加激光辐射伤害的风险。检修包括光束校准和其他调节操作,并且产生漂移激光束(即,光束的指向不确定)的可能性也大大增加。为了安全地开展检修工作,通常有必要在激光设备周围建立一个临时的激光受控区(见 8.5.2),并且实施与已升高的风险等级相对应的操作规程和安全措施(例如:系统的光束校准方法等)。生产商应根据要求对检修期间的安全规程提供相应的建议。

8.5.2 临时激光受控区

在人体能临时接触到有害水平激光辐射(例如:检修期间)的任何时候,以及未经授权的、未意识到激光危害存在的以及(或者)未受过适当的安全规程培训或指导的人员能出现的地方,宜建立临时激光受控区。

临时激光受控区的指南总体上与激光受控区相同(见 8.4.2)。在只是临时性地限制接触的情况下,尽管人员接触的工程控制常规要求难以实现,但管理控制措施可以更加有效。若对该区域的安全接触不是通过工程手段进行控制的,则应在控制区的入口处张贴适当的警告和禁止入内标识。在某些情况下,另外安排人员现场加强临时接触控制是比较可取的。

8.5.3 检修期间控制措施

设备检修期间,若激光辐射损伤的风险增加,则建立控制措施时尤其要注意宜包括下述内容:

- a) 最大限度地降低发射水平。
- b) 限制光束控制元件的运动范围,以降低光束调校期间光束位置的不确定性。
- c) 首先检查激光器附近光束的准直状态,然后逐渐往远处检查,以使光束位置的不确定性降到最小。
- d) 光束调校(对准)期间,在目标屏幕后面放置大面积光束终止器,终止失去目标的激光光束。

- e) 提供光束目视调校(对准)仪器(例如,照像机,荧光的或热敏的屏幕和观察器)。在可见光的情况,此类仪器若有助于抵制为了清晰地看见激光束而摘掉防护镜的强烈诱惑,则也应被使用。
- f) 在用其他方式不能提供足够保护的地方,舒适的激光安全防护眼镜的预防措施适合超长时间使用。
- g) 在两人或多人检修的地方,特别是当一个远离激光器的人会叫另一个人开启激光器的情况下,应提供激光束传输控制的工程方法(例如,一个手持式开光控制器)。
- h) 在工具表面使用无反射涂层或漫反射表面,并且要求受控区内的人员摘掉或遮盖首饰、手表等物品,以使杂散反射降到最小。

8.5.4 访问检修工程师

如果一个外部的机构(例如,激光设备供应商)准备进行激光设备的检修,则应采用工作许可程序将设备移交给检修工程师,并在检修工作完成后收回设备并使其完全恢复到正常工作状态。应采用书面的程序实现。对安全联锁复位的确认应该是交付设备给用户工作的一部分。

即使检修工程师拥有对检修工作的完全控制权,也要求对检修操作进行风险评估。在检修工作开始之前,如果要求建立一个暂时的激光受控区,则可以通过合同的形式来明确建立激光受控区的相关责任;如果不存在这样的合同安排,则激光器用户有责任确保必要的检修控制措施已经就绪。

9 安全操作的维护

应对激光工作区域进行定期监控,对这些监控要做好记录,以确保所采取的控制程序持续有效,并且控制风险的条件始终满足。为了确保持续安全的使用,必要时应对防护程序进行修改。应将安全事件和疑似事故的调查结果(见第10章)用于对控制程序有效性和充分性的重新评价。

可能需要立即重新进行风险评估,且需要再次检查防护程序和防护控制措施的情况包括以下几点:

- a) 对激光设备的更改、移位或替换;
- b) 改变使用的条件;
- c) 改变使用激光设备的环境;
- d) 可能接触激光设备或可能受激光辐射照射的人员发生变更;
- e) 安全程序出现任何下降迹象。

10 事件报告和事故调查

一旦发生实际的或可疑的有害激光辐射照射或者其他激光危害(事故),或者发生可能导致事故的防护措施故障(事件),应立即终止激光发射。该事件应报告给发生事件的设备管理部门。

在事故发生或疑似发生的地方,应寻求必要的医学关注。一旦发生明显的或疑似的眼损伤,应该在事故发生24 h内,由有资质的眼科专家进行的医学检查。对事故相关的激光束特性进行总结并向眼科专家提供帮助是很有益的。在疑似有害照射的所有地方,应进行全面调查,以确定事故周围的环境和可能的照射量值,并书面记录好调查结论。发生事故时,应确定出可能的故障原因,且在激光器再次使用前,应对防护控制系统进行必要的改进。

11 医学监督

对激光设备作业人员进行健康体检中的常规眼科检查是没什么价值的。眼科检查有时是因其他原因(例如,医学法规原因)而进行的。一些在用的眼科检查本身具有危害性,只有当医学上认可时才会执

行,而不应用于常规筛查。

表 5 激光辐射直接照射条件下角膜的最大允许照射量(MPE)

波长/nm	照射时间 t/s										
	$10^{-13} \sim 10^{-11}$	$10^{-11} \sim 10^{-9}$	$10^{-9} \sim 10^{-7}$	$10^{-7} \sim 1.8 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3} \sim 10$	$10 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^4$	$10^4 \sim 3 \times 10^4$	
180~302.5	$30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$										
302.5~315	$3 \times 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} (t > T_1)$					$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			
315~400			$(t \leq T_1) C_1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$								
400~450 ^a	$1.5 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$2.7 \times 10^4 t^{0.75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$18 t^{0.75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$C_3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
450~500 ^a									$100 C_3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 ^b $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		
500~700 ^a									$10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		
700~1 050 ^a	$1.5 \times 10^{-4} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$2.7 \times 10^4 t^{0.75} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5 \times 10^{-3} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$18 t^{0.75} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$10 C_4 C_7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		
1 050~1 400 ^a											$1.5 \times 10^{-3} C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$
1 400~1 500	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				$5 600 t^{0.25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				$1 000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
1 500~1 800	$10^{13} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$								
1 800~2 600	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				$5 600 t^{0.25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				
2 600~ 10^6	$10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5 600 t^{0.25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$						

注 1: 修正因子和单位,见表 8。

注 2: 照射时间小于 10^{-9} s 且波长小于 400 nm 和大于 1 400 nm 的最大允许照射量,计算时取与 10^{-9} s 时的辐照量限值对等的辐照度值。在所有波长上,照射时间小于 10^{-13} s 的最大允许照射量设定为与 10^{-13} s 的最大允许照射量的辐照度相等。

^a 表中给出的波长范围在 400 nm~1 400 nm(视网膜危害区)的最大允许照射量适用于不大于 1.5 mrad 的表观光源。(这包括对大部分单个激光源的直视。)适用于较大光源(例如某些复合光源或者漫反射情况)的限值在表 6 中给出。

^b 在 450 nm~500 nm 波长范围内,双重限值适用于 10 s~100 s 的照射持续时间,且照射量不能超过任一适用限值。

表6 波长范围在400 nm~1 400 nm(视网膜危害区)的扩展源激光辐射直接照射条件下角膜的最大允许照射量(MPE)

波长/nm	照射时间 t/s							
	10 ⁻¹³ ~ 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ ~ 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ ~ 1.8×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻³ ~ 5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻³ ~ 10	10~10 ²	10 ² ~10 ⁴	10 ⁴ ~3×10 ⁴
400~700 ^a	1.5×10 ⁻⁴ C ₆ J·m ⁻²	2.7×10 ⁴ t ^{0.75} C ₆ J·m ⁻²	5×10 ⁻³ C ₆ J·m ⁻²	18 t ^{0.75} C ₆ J·m ⁻²	400~600 nm ^a	视网膜光化学危害		
						100 C ₃ J·m ⁻² 当 γ _p =11 mrad	1 C ₃ W·m ⁻² 当 γ _p =1.1 ^{t^{0.5}} mrad	1 C ₃ W·m ⁻² 当 γ _p =110 mrad
					400~700 nm ^a	和		
						视网膜热危害		
						18 C ₆ T ₂ ^{-0.25} W·m ⁻² (t>T ₂)		
						(t≤T ₂) 18 t ^{0.75} C ₆ J·m ⁻²		
700~1 050	1.5×10 ⁻⁴ C ₄ C ₆ J·m ⁻²	2.7×10 ⁴ t ^{0.75} C ₄ C ₆ J·m ⁻²	5×10 ⁻³ C ₄ C ₆ J·m ⁻²	18 t ^{0.75} C ₄ C ₆ J·m ⁻²		18 C ₄ C ₆ C ₇ T ₂ ^{-0.25} W·m ⁻² (t>T ₂)		
1 050~1 400	1.5×10 ⁻³ C ₆ C ₇ J·m ⁻²	2.7×10 ⁵ t ^{0.75} C ₆ C ₇ J·m ⁻²	5×10 ⁻² C ₆ C ₇ J·m ⁻²	90 t ^{0.75} C ₆ C ₇ J·m ⁻²		(t≤T ₂) 18 t ^{0.75} C ₄ C ₆ C ₇ J·m ⁻²		
注1: 修正因子和单位,见表8。								
注2: 角度 γ _p 是测量仪器接收限制角。								
^a 在450 nm~600 nm波长范围内,双重限值适用于10 s~100 s的照射持续时间,且照射量不能超过任一适用限值。通常光化学危害限制仅适用于照射持续时间大于10 s的情况;然而,在400 nm~484 nm波长范围内且表观光源大小在1.5 mrad~82 mrad之间时,100 C ₃ J·m ⁻² 的光化学危害限制应适用于大于或等于1 s的照射情况。								

表7 激光辐射对皮肤的最大允许照射量(MPE)

波长/nm	照射时间 t/s					
	<10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ~10 ⁻³	10 ⁻³ ~10	10~10 ³	10 ³ ~3×10 ⁴
180~302.5					30 J·m ⁻²	
302.5~315	3×10 ¹⁰ W·m ⁻²	C ₂ J·m ⁻² (t>T ₁)			C ₂ J·m ⁻²	
315~400		C ₁ J·m ⁻² (t>T ₁)			10 ⁴ J·m ⁻²	10 W·m ⁻²
400~700	2×10 ¹¹ W·m ⁻²	200 J·m ⁻²		1.1×10 ⁴ t ^{0.25} J·m ⁻²	2 000 J·m ⁻²	
700~1 400	2×10 ¹¹ C ₄ W·m ⁻²	200 C ₄ J·m ⁻²		1.1×10 ⁴ C ₄ t ^{0.25} J·m ⁻²	2 000 C ₄ J·m ⁻²	

表 7 (续)

波长/nm	照射时间 t/s					
	$<10^{-9}$	$10^{-9} \sim 10^{-7}$	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10$	$10 \sim 10^3$	$10^3 \sim 3 \times 10^4$
1 400~1 500	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5\,600 t^{0.25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ }^a$	
1 500~1 800	$10^{13} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				
1 800~2 600	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5\,600 t^{0.25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		
2 600~ 10^6	$10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$5\,600 t^{0.25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			
注 1: 修正因子和单位参见表 8。						
注 2: 照射时间小于 10^{-9} s 的效应的资料有限,该照射时间内的 MPE 值由适用于 10^{-9} s 的辐照度导出。						
^a 被照射皮肤面积大于 0.1 m^2 时,MPE 值降至 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。面积在 $0.01 \text{ m}^2 \sim 0.1 \text{ m}^2$ 之间时,MPE 值与被照射皮肤的面积成反比。						

表 8 MPE 的修正因子

参 数	光谱范围 nm
$C_1 = 5.6 \times 10^3 t^{0.25}$	302.5~400
$T_1 = 10^{0.8(\lambda-295)} \times 10^{-15} \text{ s}$	302.5~315
$C_2 = 10^{0.2(\lambda-295)}$	302.5~315
$T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha-\alpha_{\min})/98.5]} \text{ s}^a$	400~1 400
$C_3 = 1.0$	400~450
$C_3 = 10^{0.02(\lambda-450)}$	450~600
$C_4 = 10^{0.002(\lambda-700)}$	700~1 050
$C_4 = 5$	1 050~1 400
$C_5 = N^{-1/4} \text{ }^b$	$400 \sim 10^6$
$C_6 = 1 \quad \alpha \leq \alpha_{\min} \text{ }^c$	400~1 400
$C_6 = \alpha/\alpha_{\min} \quad \alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max}$	400~1 400
$C_6 = \alpha_{\max}/\alpha_{\min} = 66.7 \quad \alpha > \alpha_{\max} \text{ }^d$	400~1 400
$C_7 = 1$	700~1 150
$C_7 = 10^{0.018(\lambda-1\,150)}$	1 150~1 200
$C_7 = 8$	1 200~1 400
注 1: 关于小于 10^{-9} s 且波长小于 400 nm 和大于 1 400 nm 的效应资料有限。	
注 2: 修正因子 C_1 到 C_7 和表 5 到表 7 中使用的断点 T_1 及 T_2 在后续的公式中定义。	
注 3: 限制孔径见表 2。	
注 4: 表 5 到表 7 的公式和注解里面,波长用纳米表示,发射持续时间 t 用秒表示, α 用毫弧度表示。	
^a $\alpha < 1.5 \text{ mrad}$ 时 $T_2 = 10 \text{ s}$, $\alpha > 100 \text{ mrad}$ 时 $T_2 = 100 \text{ s}$ 。	
^b C_5 仅适用于持续时间小于 0.25 s 的脉冲。	
^c C_6 仅适用于脉冲激光器和热损伤为主的连续波激光器。	
^d 接收角 γ 的极限值应等于 α_{\max}	
$\alpha_{\min} = 1.5 \text{ mrad} \quad \alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$	
N 是包含在适用持续时间内的脉冲数(见 5.2)	

表9 激光受控区

激光分类	危害性质	受控区举例	防护控制措施概要
1类 2类	轻微的(注意:嵌入式激光器可导致相关危害)	无限制的 即,通常不需要指定激光区域	遵从标签上的警告和制造商的安全使用指南
1M类发散光束 2M类发散光束 (即,在条件2下,不符合1类和2类的产品)	使用光学观察仪器,例如眼用小型放大镜,会造成的局部眼危害	局部的 如果有效的程序控制措施控制了激光器周围的直接影响区,受控区可以是开放式的	推荐培训。 防止在激光器附近使用放大镜和其他放大器。 防止激光束的再聚焦或准直
1M类准直光束 2M类准直光束 (即,在条件1下,不符合1类和2类的产品)	使用光学观察仪器,例如双筒望远镜或望远镜,会造成的远程眼危害	密封的或开放式的。 由程序方法控制进入扩展取样标称眼危害区,也就是使用标志、操作指南和培训。在开放式的地方,必须阻止公众进入扩展取样标称眼危害区	要求培训。 推荐激光安全员。 防止使用望远镜和双筒望远镜。 防止激光束再聚焦
3R类	低水平的眼危害	无限制的 即安全依赖于负责的使用	推荐培训。 防止眼睛直接暴露在激光下
3B类	眼危害。 在较高类别等级下可能造成皮肤危害	封闭和联锁保护。 即用工程方法控制进入	要求有培训和激光安全员。 确保钥匙的安全性。 尽可能多地封闭光束,可行的话,采用完全封闭。 执行安全的工作体系。 当照射风险不可避免时,使用个人防护装备
4类	眼和皮肤危害 可能的火灾和烟雾危害	封闭和联锁保护。 即用工程方法控制进入	要求有培训和激光安全员。 确保钥匙的安全性。 尽可能多地封闭光束,可行的话,采用完全封闭。 执行安全的工作体系。 防护相关危害(如火灾、烟雾)
注:本表涵盖了常规的激光器操作(即不包括维护或检修)并且仅作为对激光受控区的指导。风险评估可能表明给定类别的激光器应该被安置在较高或较低类别的受控区内,或者为了充分降低风险,有必要采用不同于此的防护控制系统。			

附录 A

(资料性附录)

激光受控区联锁系统举例

注：本附录给出了使用联锁系统实现激光危害工程控制的适用范围。主要针对不熟悉使用联锁系统的人员，但不应妨碍能在特定的环境条件下，提供符合要求的防护等级可选择的解决方案。本附录图示的整套设施只是用于说明，对于特定的安装，无需全部采用。

A.1 简介

联锁系统可用于当激光受控区的门被打开时终止激光发射。

根据特殊的要求，配置一个联锁系统有多种方式，但是所有联锁系统都分成两个基本类型，即锁定联锁系统和非锁定联锁系统，见图 A.1 和图 A.3。图中完整地展示了所有要素，但是实际应用中并非所有的要素都是必须的。

A.2 一般要素

A.2.1 联锁控制系统

联锁控制系统应具有失效保护设计，一旦一个部件发生故障，该系统仍能保持其防护功能。（例如，继电器触点熔接）。联锁控制系统还应有一个复位按钮，以便万一联锁被切断（通过打开门），则需要一个预先设置的操作去重启激光发射（而不是通过简单的重新关上门来重启激光发射）。然而，值得注意的是，IEC 60825-1 规定对 3B 类和 4 类激光产品的遥控联锁连接器，可以连接门开关，复位机构不是必备部件，因此建议用户自行考虑安装。

A.2.2 门联锁开关

机械开关通常是最简单的开关，宜采用“触点中断”设计（即，通过打开门使触点弹簧分离）以防止触点粘着或熔接。对滑动门和卫生程度要求高的场合，采用磁性开关或其他接近式开关是有益的。这些开关宜采用编码方式（即，运转的两个部件对应一个配对编码），以防止意外触发超驰控制，并且在设计上应消除触点熔接的可能性。

A.2.3 超驰控制开关

联锁超驰控制装置，可以在授权人员的操作下实现联锁保护的暂时失效，该装置只在具备正当使用理由并且安全得到确保的情况下，才宜安装（见 8.4.2）。另外，在超驰控制实施过程中，还应确保打开的门通道不能出现激光发射。

当室内采用超驰控制系统时，则一般使用非加密的开关即可，例如按钮类型的开关；如果超驰控制开关用于室外控制（当激光器运行时，如果房间不能有人员在场，这是必须的基本要求），则应采用钥匙开关、键盘或密码磁卡。超驰控制本身应该是有失效保护和时间限制的，并且独立于开关，以便即使超驰控制开关在“开”的位置也不能继续使用。

A.2.4 光闸

当采用光闸而非关掉激光器电源来终止激光发射时，应采用失效保护设计，以便当光闸电源关掉时，光闸能一直处于关闭的位置，并且也能够承受住入射激光而不受损。

A.2.5 发光警告标志

发光警告标志是十分有用的管理控制措施,尤其是当使用非锁定类型的系统时,有助于避免不必要的激光发射中断。为使其有效,必须适当地连接标志,以便当激光器运转时它只能指示“开”的位置。手动操作的发光标志通常不能满足要求。

A.2.6 非锁定联锁系统(见图 A.2)

这些是最普通的联锁系统类型。如果有人打开门,非锁定联锁系统通过关闭激光发射实现安全功能,并应设计为当所有的门都关闭后才能重启激光发射。使用超驰控制可允许授权人员进出危险区域而不中断激光器的运行(见 A.2.3),此时发光警告标志在所有通道门处标示了激光器的运行状态。中断电源是终止激光发射的一种方式,尽管这样可能会影响激光器的性能(例如,影响它的稳定性和加速元器件失效),但是相对低功率的二极管激光器除外。因此,用中断电源去终止激光发射的方式常常因实用性的原因而被否定。(然而,如果实施了足够的程序上的控制措施,几乎不会有未经授权的人员进入造成联锁的不当运行)使用失效保护光闸来中断激光束是另外一种可选择的方法(见 A.2.4)。

A.2.7 急停开关

如果不能从房间中任何区域方便的操作急停按钮,那么应该在系统中安装一个或多个急停按钮。

A.2.8 锁定联锁系统(见图 A.3)

这些系统是阻止未经授权人员进入激光区域的实际装置,避免不必要地激光发射中断。然而,手动锁闭实验室门是不可取的,因为一旦发生事故,人员可能会困于实验室内。即使保持钥匙在室外也不能解决问题,因为在关键时刻可能会发生钥匙丢失或者在发生火灾时很难找到钥匙的情况。一个锁定系统必须具备失效保护,一旦电源故障或要求紧急进入激光区域时,它能关闭激光器并且允许进入房间。假如有一个醒目的允许紧急进入的超驰控制装置,并且该装置可由任何人通过用密码键盘或用磁卡操作的电子锁来实现操控,而不需要钥匙、现场输入密码或刷卡操作,则可以实现上述要求。也可以用具备失效保护功能的电锁锁门(见 A.2.9),它同样能在紧急情况下开门。当获准紧急进入激光区时,激光器仍宜通过使用光闸或电源联锁去终止激光发射。使用门联锁开关一直能确保门打开时,激光发射不会启动,并且当规定的超驰控制时间已过但门依旧未关时关闭激光发射。

A.2.9 电锁(电动门禁)

具有失效保护功能的电锁通电时,能控制门在关闭的位置,以阻止未经授权人员进入(不应使用传统钥匙操控锁)。安装在门框上的电锁,通电时锁门。(电锁不能与门把手相连,且不能用门把手操作)当电锁通电时,门只能关上,不能打开。当电锁断电时,可简单的推或拉开门。

当锁定系统用于在紧急情况下允许进入(控制区域)时,每个门的外侧均应安装急停开关。尽管在室内至少安装一个便于操作的急停开关,但是每个门的内侧安装一个可允许在任何情况下退出的按钮式超驰开关,被认为是十分恰当的。当按下紧急开关时,通过实时关闭激光束和使电锁断电来保证维护区域的安全,以允许安全退出。

联锁系统的用途:

在激光控制区内,墙壁和门可以限制激光辐射的危害。

连接到门上的联锁系统,且当危害出现时,它可实际运转实施进入限制,只允许受过培训、被授权的和有适当防护装备的人员进入。

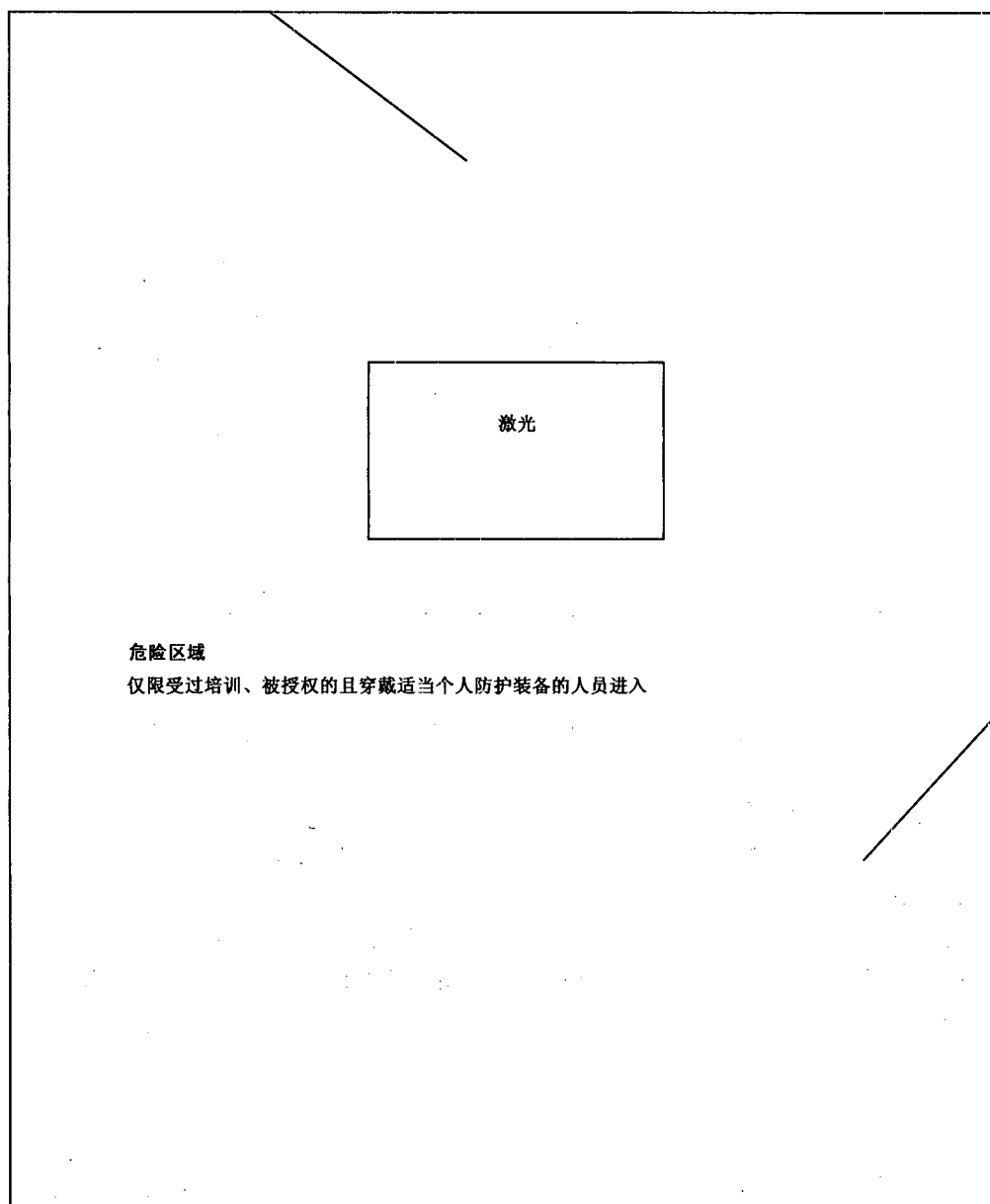
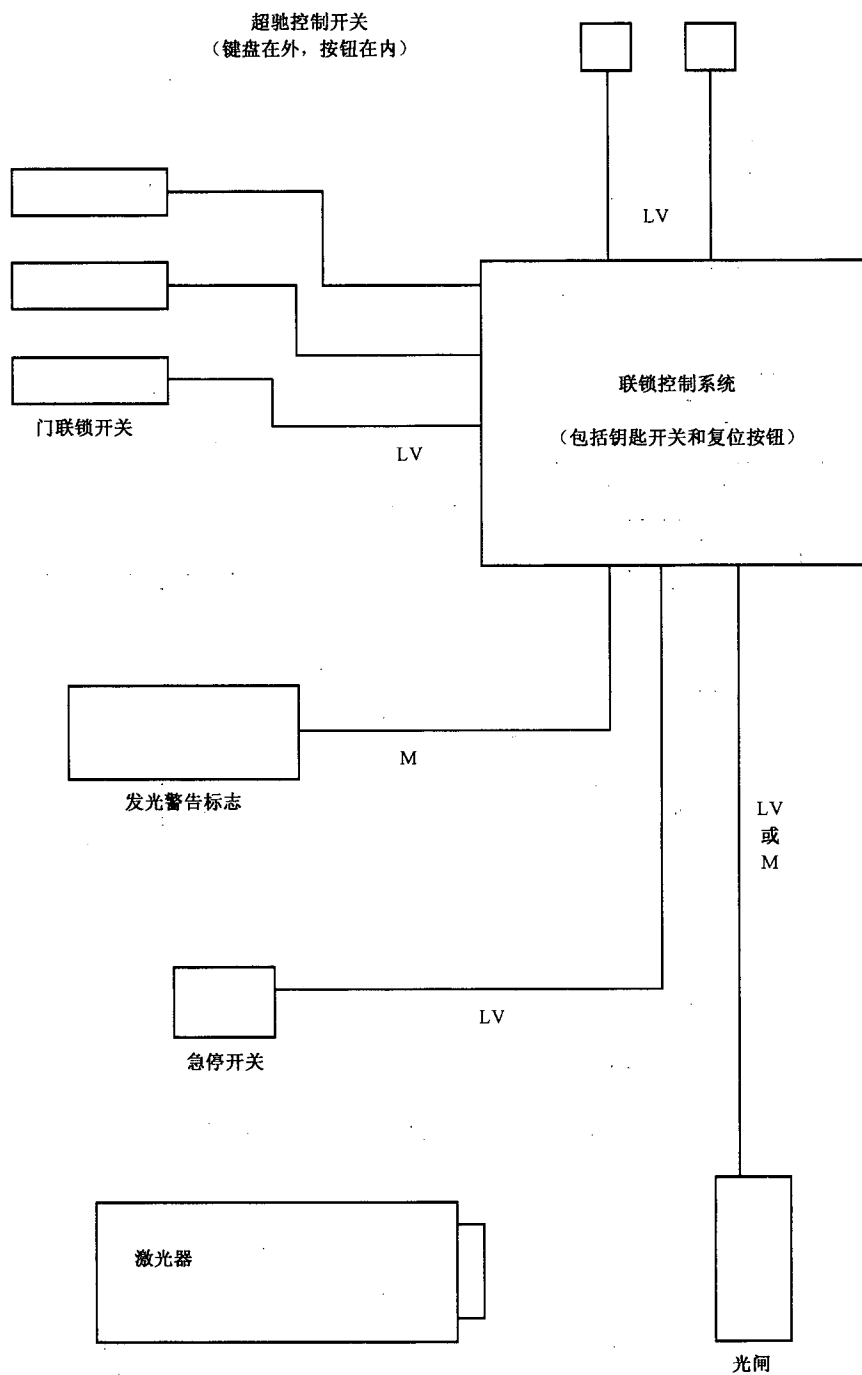


图 A.1 联锁系统的用途

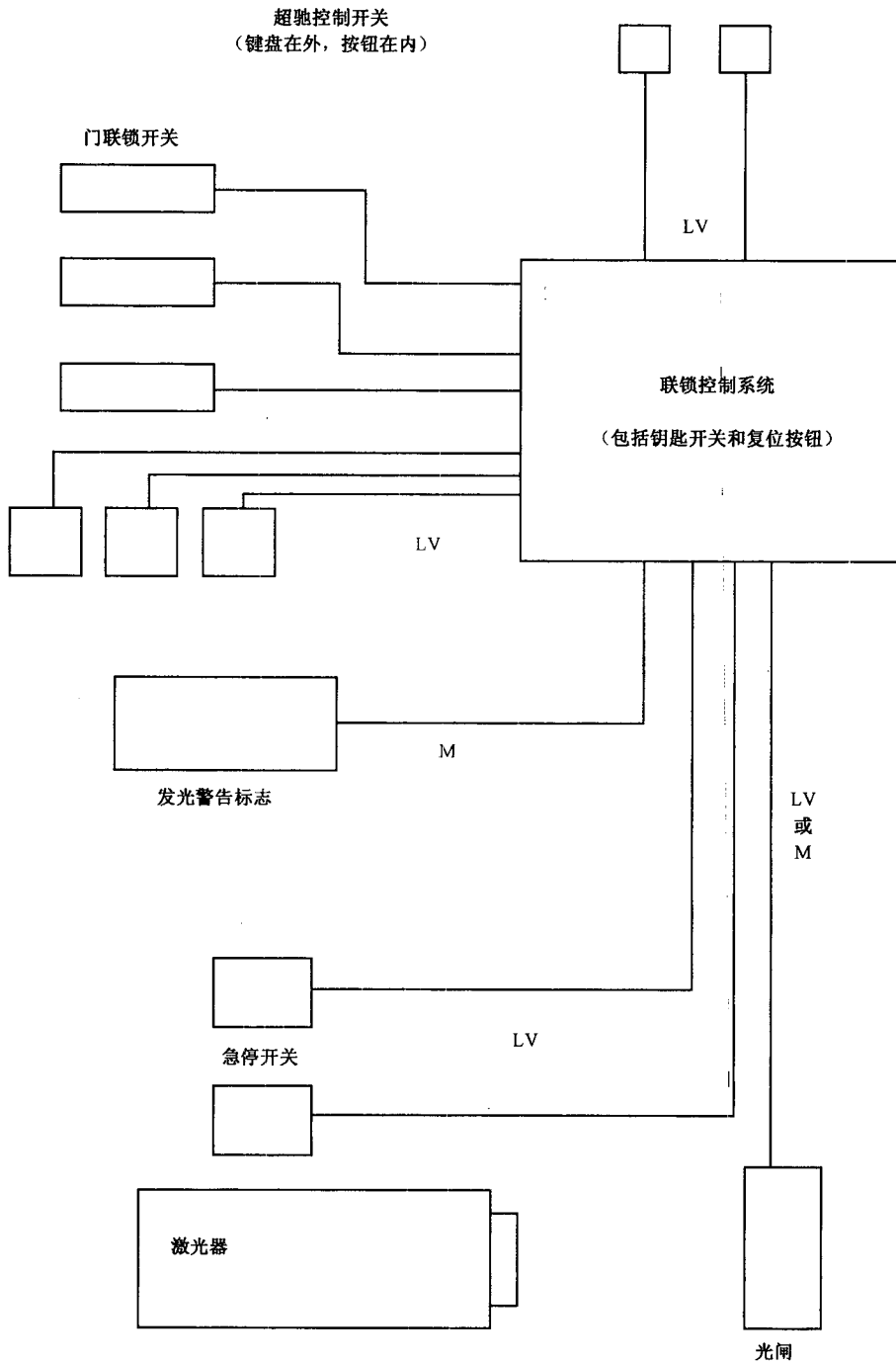
非锁定联锁系统



LV=低压
M=总电源

图 A.2 非锁定联锁系统

锁定联锁系统



LV=低压
M=总电源

图 A.3 锁定联锁系统

附录 B
(资料性附录)
计算举例

B.1 引言

本附录利用附加信息和 IEC TR 60825-10(IEC 60825-1 的应用指南和解释性注解)给出的公式,提供有选择的工作实例。B.3 介绍最大允许照射量(MPE)的确定;B.4 和 B.5 为计算实例;B.4 针对连续和单脉冲激光输出观察小光源,B.5 针对重复脉冲系统;B.6 和 B.7 分别确定小光源和扩展光源的标称眼危害距离(NOHD);B.8 提供激光眼防护装置的光密度计算;B.9 提供多个小光源的计算。

B.2 本附录例子中所用的符号:

符号	单位	定义
α	m	出射激光光束的直径。
α	rad	表观光源(或漫反射体)相对于空间某一观察点的对向角。
α_f	rad	表观辐射光源相对于距离 $r_f=100$ mm 处的眼睛的张角。
α_{\min}	rad	判定光源为扩展源的最小对向角。
α_{\max}	rad	表观光源的对向角超过该值时,MPEs 和光源尺寸无关($\alpha_{\max}=0.1$ rad)。
C_1, C_2, \dots, C_7	1	修正因子(见表 8)。
d_u	m	在距表观光源给定距离 r 处,包含激光总功率(或能量) $u\%$ 的最小圆直径,对于高斯光束, d_{63} 对应于辐照度(或辐照量)下降到中心峰值的 $1/e$ 的点。
D_c	m	光学系统出射光瞳的直径。
D_o	m	光学系统物镜的直径。
η	1	距表观光源规定距离 r 处,给定孔径接收的激光功率(或能量)占激光总功率(或能量)的百分数。
F	Hz	脉冲重复频率。
G	1	借助光学仪器时眼睛在视网膜接收的辐照度(或辐照量)与不借助光学仪器时视网膜接收的辐照度(或辐照量)之比的平方根。
H	$J \cdot m^{-2}$	距表观光源给定距离 r 处的辐照量。
E	$W \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离 r 处的辐照度。
H_0	$J \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离为 0 处的出射光束辐照量。
E_0	$W \cdot m^{-2}$	距表观光源规定距离为 0 处的出射光束辐照度。
k	1	模结构因子,其值的范围从高斯分布光束的 $k=1$ 到未知模结构光束的 $k=2.5$ 。
L_p	$J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	扩展源的总辐亮度。
λ	nm	激光辐射的波长。
M	1	光学仪器的放大率。
H_{MPE}	$J \cdot m^{-2}$	最大允许照射量。

或		
E_{MPE}	$W \cdot m^{-2}$	最大允许辐照度。
μ	m^{-1}	对特定波长的大气衰减系数。
N	1	包含在照射持续时间内的脉冲个数。
NA	1	激光光源的数值孔径。
NA_m	1	显微镜物镜的数值孔径。
$NOHD$	m	标称眼危害距离。
OD	1	光密度,定义为透射比倒数的以 10 为底的对数。 (也见 IEC 845-04-66;这里不采用符号 D ,以免与直径混淆。)
P_o	W	连续激光器的总辐射功率(辐射通量)或重复脉冲激光器的平均辐射功率。
P_p	W	脉冲激光器单个脉冲内的辐射功率。
Φ	rad	出射激光光束的发散角。
π	1	数学常数 3.142。
Q	J	脉冲激光器的总辐射能量。
r	m	表观光源到观察者、测量孔径或漫射靶标之间的距离。
r_1	m	激光靶标到观察者或测量孔径之间的距离。
$r_{1,max}$	m	在扩展源观察条件下,激光靶标到观察者之间的最大距离。
t	s	单个激光脉冲的持续时间。
T	s	脉冲串的总照射时间。
T_1, T_2	s	时间转效点(见表 8)。

B.3 最大允许照射量(MPE)——介绍

最大允许照射量在 2.47 的定义为活组织(人体)受照射后不会造成即刻或滞后损伤的激光辐射最大值。最大允许照射量的值低于已知的危害水平。但是, MPE 值应视为安全照射的指南,而不应作为安全照射值和非安全照射值之间的严格分界线。

MPE 值依赖于下列因素:

- 辐射波长;
- 照射时间或脉冲持续时间;
- 一种以上波长照射组织时的光谱组成;
- 受照射组织的性质;
- 在波长 400 nm~1 400 nm 范围内,光源的对向角(它决定视网膜上像的尺寸)。

本附录给出的例子阐释了对光束内视、漫反射和扩展源、脉冲和调制照射的计算过程。对于工作在 400 nm~700 nm 可见波长范围的单脉冲激光器、或连续激光器、或重复脉冲激光器,当 0.25 s 的回避反应(眨眼)适用于眼照射时,照射时间的选择是显而易见的。对于工作波长在可见范围以外的重复脉冲激光器或连续激光器,通常需要一个激光安全员对可能的照射时间做出判断。

注:表 5 和表 6 给出了眼睛照射的 MPE 值,而表 7 给出了皮肤照射的 MPE 值。

下述例子展示了对于典型波长和其他照射参数逐步计算过程,当需要计算 MPE 时,用户可针对具体情况运用这些步骤进行计算。

B.4 最大允许照射量(MPE)——单个小光源

当光源对向角 $\alpha \leq \alpha_{min}$ 时小光源观察条件成立,下面四个例子对连续或单脉冲激光输出说明了单个

小光源观察条件下的计算步骤。

例 B.4.1

一台氦-镉激光器, $\lambda=325\text{ nm}$, 发射持续时间为 0.1 s , 计算 MPE

解答:

在表 5 可以查到适用的 MPE, 即在波长范围从 $315\text{ nm}\sim 400\text{ nm}$ 一行和照射时间 $1\times 10^{-3}\text{ s}\sim 10\text{ s}$ 一系列的交叉点查到 MPE 等于: $C_1\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。 C_1 可由表 8 给出的公式计算。

$$C_1 = 5.6 \times 10^3 \times t^{0.25}$$

$$H_{\text{MPE}} = 5.6 \times 10^3 \times 0.1^{0.25} = 3.15 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

为了得到按辐照度表示的 MPE, 除以照射持续时间 t ,

$$E_{\text{MPE}} = H_{\text{MPE}}/t = 3.15 \times 10^3 / 0.1 = 3.15 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}。$$

例 B.4.2

确定一台脉冲红宝石激光器单脉冲最大允许照射量, $\lambda=694\text{ nm}$, 照射持续时间为 10^{-3} s 。

解答:

在表 5 中, 在波长范围从 $400\text{ nm}\sim 700\text{ nm}$ 的一行和照射时间 $t=5\times 10^{-5}\text{ s}\sim 10^{-3}\text{ s}$ 一系列的交叉点, 查到 MPE 为:

$$H_{\text{MPE}} = 18 \times t^{0.75} \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

于是

$$H_{\text{MPE}} = 18 \times (10^{-3})^{0.75} = 0.10 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}。$$

例 B.4.3

一台砷化镓激光器, $\lambda=905\text{ nm}$, 脉冲宽度为 100 ns 时, MPE 是多少?

解答:

在表 5 中, 在波长范围从 $700\text{ nm}\sim 1050\text{ nm}$ 的一行和照射时间 $t=10^{-7}\text{ s}\sim 1.8\times 10^{-5}\text{ s}$ 一系列的交叉点, 查到以辐照量表示的 MPE 为:

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-3} \times C_4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

系数 C_4 从表 8 给出的公式计算出:

$$C_4 = 10^{0.002(\lambda-700)} = 2.57$$

于是

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-3} \times 2.57 = 12.9 \times 10^{-3} \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}。$$

例 B.4.4

一台连续氦氖(He-Ne)激光器, $\lambda=633\text{ nm}$, 计算其 MPE。

解答:

由于激光器工作在可见光谱部分并且非有意观察, 宜采用由回避反应(眨眼)限定的照射持续时间 $T=0.25\text{ s}$ 。MPE 值可在表 5 中查找, 即在波长范围从 $400\text{ nm}\sim 700\text{ nm}$ 的一行和照射时间 $t=1\times 10^{-3}\text{ s}\sim 10\text{ s}$ 一系列的交叉点, 查到以辐照量表示的 MPE 为:

$$H_{\text{MPE}} = 18 \times t^{0.75} \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$H_{\text{MPE}} = 18 \times (0.25)^{0.75} = 6.36 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

为了得到按辐照度表示的 MPE, 除以照射持续时间 $t=0.25\text{ s}$, 所以

$$E_{\text{MPE}} = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}。$$

B.5 最大允许照射量(MPE)——重复脉冲系统

适用于重复脉冲激光产品(或扫描激光系统)的照射规则, 在 IEC TR 60825-10 的 4.2 中给出了关于重复脉冲激光器 MPE 详细计算步骤的流程图。

例 B.5.1

一台氩激光器($\lambda=488\text{ nm}$),以脉冲重复频率 $F=1\text{ MHz}$,脉宽 $t=10^{-8}\text{ s}$ 。确定眼睛意外受到该激光直接照射时适用的小光源 MPE。

解答:

由于激光器工作在可见光谱部分并且非有意观察,宜采用由回避反应(眨眼)限定的照射持续时间 $T=0.25\text{ s}$ 。如果,对波长范围从 $400\text{ nm}\sim 600\text{ nm}$ 的辐射,欲进行 1 s 或更长持续时间的有意观察,则除热效应限制外,还应评估光化学效应对眼照射的限制,并且以其中限制性最强的给出适用的 MPE。

5.2 包含了必须考虑的三个准则,且其中限制性最强的适用于这一评估。

根据 5.2a),任何单个脉冲的照射量不应超过单脉冲 MPE。于是,根据表 5 在 10^{-8} s 时间内的辐照量为:

$$H_{\text{单}}=5\times 10^{-3}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

根据 5.2b),照射持续时间为 T 的脉冲串的平均照射量不应超过照射持续时间为 T 的单脉冲 MPE。在 0.25 s 的总照射持续时间内,表 5 限制辐照量到:

$$H_{\text{T}}=18t^{0.75}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}=18\times(0.25)^{0.75}=6.36\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

因为在 0.25 s 时间内有 $N=2.5\times 10^5$ 个脉冲数,根据平均辐照度准则,单脉冲的辐照量为:

$$H_{\text{单,平均}}=H_{\text{T}}/N=6.36/(2.5\times 10^5)=2.55\times 10^{-5}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

根据 5.2c),脉冲串内各脉冲的平均照射量不应超过单个脉冲 MPE 与修正因子 C_5 之积(这里 $C_5=N^{-1/4}$)。在波长 $400\text{ nm}\sim 1400\text{ nm}$ 范围内,要求 c) 应使用的最大照射持续时间是 T_2 ,对于 $\alpha\leq\alpha_{\text{min}}$, $T_2=10\text{ s}$ 。

因为激光器在高重复频率下运转,适用 5.2c) 的注 3。这就要求,如果在时段 T_i (见表 3, $T_i=18\times 10^{-6}\text{ s}$) 内出现多个脉冲,则将其算作一个脉冲来确定 N ,并将各脉冲的辐照量相加后与 T_i 的 MPE 比较。因此,有效脉冲重复频率为:

$$F_{\text{E}}=1/T_i=1/(18\times 10^{-6})=55.56\text{ kHz}$$

表 5 给出的持续时间为 T_i 的脉冲的 MPE 为 $5\times 10^{-3}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

0.25 s 内有效脉冲个数是:

$$N_{\text{E}}=T\times F_{\text{E}}=0.25\times 55.56\times 10^3=1.39\times 10^4$$

在 0.25 s 的时间内,每个持续时间 T_i 的 $N_{\text{E}}=1.39\times 10^4$ 个脉冲,在这一准则下的辐照量将是:

$$H_{\text{单}}=H_{\text{单,有效}}\times(N_{\text{E}})^{-1/4}=5\times 10^3\times(1.39\times 10^4)^{-1/4}=4.6\times 10^{-4}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

条件 5.2a) 和 5.2b) 适用于能量为 Q 的脉冲,而条件 5.2c) 适用于能量为 $Q\times T_i\times F=18\times Q$ 的脉冲,因此, $H_{\text{单}}$ 要除以 18(结果为 $2.55\times 10^{-5}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$)。这样才能对按 5.2 计算的三个 MPE 进行比较。在这个例子中,准则 5.2b) 和 5.2c) 的结果相等,是最严格的。所以,这个系统的单脉冲 MPE 应是 $2.55\times 10^{-5}\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

例 B.5.2

工作频率 $F=20\text{ Hz}$,脉宽为 $t=1\text{ ms}$ 的 Nd:YAG 激光器($\lambda=1064\text{ nm}$),确定适用于该激光辐射直接照射眼睛的光束内视 MPE。

解答:

由于激光器并非工作在可见光谱区,不能由回避反应(眨眼)提供保护,意外伤害照射时间的合理估计值可取 10 s 。这一时间段的总脉冲数为:

$$N=T\times F=10\times 20=200$$

5.2 中包含三条必须考虑的准则,且其中限制性最强的适用于这一评估。

根据 5.2a),任何单个脉冲的照射量不应超过单脉冲的 MPE。因为光束从小光源发射,MPE 由表 5 确定,并且从表 8 在波长 1064 nm 上 $C_7=1$ 。于是,根据表 5 在 1 ms 时间段内得到辐照量为:

$$H_{\text{单}}=90t^{0.75}C_7\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}=90\times(0.001)^{0.75}\times 1=0.506\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$$

由 5.2b), 对于照射持续时间 T 的脉冲串, 其平均照射量不应超过照射持续时间为 T 的单脉冲的 MPE。在 10 s 的持续时间(总照射时间), 表 5 限制辐照量为:

$$H_T = 90t^{0.75} C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 90 \times (10)^{0.75} \times 1 = 506 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

因为在 10 s 时段内有 $N=200$ 个脉冲, 根据平均辐照度准则, 单脉冲的辐照量为:

$$H_{\text{单,平均}} = H_T / N = 506 / 200 = 2.53 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

根据 5.2c), 脉冲串内各脉冲的平均照射量不应超过单脉冲 MPE 与修正因子 C_5 之积(这里 $C_5 = N^{-1/4}$)。对于在 10 s 时段 $N=200$ 个脉冲, 在这一准则下辐照量应为:

$$H_{\text{单}} = H_{\text{单,平均}} \times N^{-0.25} = 0.506 \times (200)^{-0.25} = 0.135 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

因为来自 5.2c) 的重复脉冲准则的限制是最严格的, 该系统的单脉冲 MPE 应是 $0.135 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。MPE 也可用每个脉冲持续时间的辐照度表示为:

$$E_{\text{MPE}} = H_{\text{单}} / t = \frac{0.135 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{10^{-3} \text{ s}} = 135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

B.6 标称眼危害距离(NOHD)

如 5.5 所述, NOHD 表示理想条件下其辐照度和辐照量降到相应 MPE 之下的距离。

距激光光源为 r 距离处的辐照度由下式给出(见 IEC TR 60825-10):

$$E = \frac{4P_0 \exp(-\mu r)}{\pi(a + r\phi)^2} \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

注: 假定光束是高斯分布时, a 和 ϕ 是在光束剖面的 $1/e$ 点处测量的。实际上, 仅有气体激光器产生的光束为高斯分布。大多数固体激光器具有明显的不规则的多模光束结构, 在后一种情况下, 宜使用下式:

$$L = \frac{I \exp(-\mu r)}{r^2}$$

式中: I = 辐射强度 ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)

如果 I 是未知的且不能测量, 对于已知为多模光束结构的激光系统, 公式(B.1)里的 P_0 值要增加 2.5 倍。在 IEC TR 60825-10 中, 符号 k 用来说明未知模结构的光束, 并且 k 值的范围从高斯光束的 $k=1$ 到未知模结构光束的 $k=2.5$ 。

$e^{-\mu r}$ 项为大气衰减引起的损耗, 对于大多数用途来说可以忽略不计。简化(B.1)并计入 k 因子, 有:

$$E = \frac{4kP_0}{\pi(a + r\phi)^2} \quad \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

式中, 当用 E_{MPE} 替代 E 时, r 成为 NOHD, 并且可以对 NOHD 求解, 其表达式为:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4kP_0}{\pi E_{\text{MPE}}}} - \frac{a}{\phi} \quad \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

或者:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4kQ}{\pi H_{\text{MPE}}}} - \frac{a}{\phi} \quad \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中: Q 是每个脉冲的能量, H_{MPE} 是按辐照量表示的每个脉冲的 MPE。

如果考虑大气衰减的作用, 则无法对公式(B.1)中的 r 项简单求解。对大气衰减系数 μ 的可靠估计可以从下式获得:

$$\mu = 10^{-3} \times \frac{3.91}{V} \times \left(\frac{550}{\lambda}\right)^A \text{ m}^{-1} \quad \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

式中:

$A = 0.585V^{0.33}$;

V ——以公里(km)为单位的可视距离;

λ ——以纳米(nm)为单位的波长($400 \text{ nm} < \lambda < 2000 \text{ nm}$)。

使用光学观察辅助器具

在用观察辅助器具(望远镜、双筒望远镜等)观察激光辐射光源的场合,因进入眼睛的辐射量的增加,有必要计算出扩展 NOHD。

借助一副双筒望远镜观察激光,进入眼睛的辐射量按光学增益因子 G 增加。下述建议由 IEC TR 60825-10 提供。

a) 对于 $400 \text{ nm} \leq \lambda < 1400 \text{ nm}$, 光束充满瞳孔的情况:

$$G = \tau \cdot M^2 \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

或者,在输出光束小于瞳孔的情况:

$$G = \frac{\tau D_o^2}{49} \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

使用较小的那一个。

式中:

τ ——相应波长的透过系数(如果未知,令 $\tau=1$);

M ——观察辅助器具的放大倍率;

D_o ——以 mm 为单位的物镜的直径。

b) 对于 $320 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$ 和 $1400 \text{ nm} \leq \lambda < 4500 \text{ nm}$,

$$G = \tau \cdot M^2$$

在此光谱区域,辐射在到达视网膜前被吸收。

c) 对于 $\lambda < 320 \text{ nm}$ 和 $\lambda > 4500 \text{ nm}$,

在这一光谱区域,辐射不大可能透过观察辅助器具。

则扩展 NOHD 变为:

$$\text{ENOHD} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4 \times k \times G \times Q}{\pi \times H_{\text{MPE}}}} - \frac{a}{\phi} \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

除非装有专门的激光衰减滤光片或者观察光学器在激光波长处的透过率是已知的,观察光学器的透过损耗不予考虑,因为许多光学器件拥有的高透射比(>0.8)可一直扩展到 2000 nm 以上的红外光谱区。

注:只要满足裸眼观看扩展源的准则,并且辐射在 400 nm ~ 1400 nm 谱带内,就可以借助漫射屏或非镜面反射的靶标,用光学放大器观察 1 类、1M 类、2 类、2M 类和 3R 类激光产品的输出。

IEC TR 60825-10 提供了两个有用的流程图,有助于计算连续和重复脉冲激光产品(发射一个或多个波长)的 NOHD,和使用观察光学系统时的 ENOHD。

例 B.6.1

一台具有高斯分布光束($k=1$)的激光器,输出功率 4 W,发散角是 0.7 mrad,出射光束直径 1 mm。如果相应的 MPE 是 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,假定大气衰减忽略不计,试计算 NOHD。

解答:

代入公式(B.3)得到:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{0.7 \times 10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 4}{\pi \times 10}} - \frac{1 \times 10^{-3}}{0.7 \times 10^{-3}} = 1019 - 1.4 = 1018 \text{ m} = 1.02 \text{ km}$$

例 B.6.2

在上例中,用扩束器把激光光束发散角减小到 0.1 mrad,且出射光束直径增加到 7 mm,计算 NOHD。

解答:

新的 NOHD 是:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{0.1 \times 10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 4}{\pi \times 10}} - \frac{7 \times 10^{-3}}{0.1 \times 10^{-3}} = 7136 - 70 = 7066 \text{ m} = 7.07 \text{ km}$$

注意光束发散度对确定 NOHD 的重要性。

例 B. 6. 3

在上例 B. 4. 2 中的激光器工作在 $\lambda=550 \text{ nm}$, 假定视见距离是 10 km, 计算修正的 NOHD。

解答:

利用公式(B. 5)计算大气衰减系数 μ :

$$\mu = 10^{-3} \times \frac{3.91}{10} \times \left(\frac{550}{550}\right)^{1.25} = 3.91 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

现在, 考虑了大气衰减项后, 就可由公式(B. 3)求得修正的 NOHD:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4kP_0 \exp(-\mu r)}{\pi E_{\text{MPE}}}} - \frac{a}{\phi}$$

通过迭代求解(因为 $r=\text{NOHD}$)可得:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{0.1 \times 10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 4 \times \exp(-3.91 \times 10^{-4} r)}{\pi \times 10}} - \frac{7 \times 10^{-3}}{0.1 \times 10^{-3}} = 3.52 \text{ km}$$

例 B. 6. 4

一台测量用氦氖(He-Ne)激光器($\lambda=633 \text{ nm}$), 输出功率为 3 mW, 发射光束初始直径为 13 mm, 在距离激光器 50 m 处扩展到 18 mm:

a) 从距激光器 60 m 处直接观察激光, 多长时间是安全的?

b) 直接观察该激光 3 min, 最短安全距离是多少?

解答:

a) 输出功率 $P_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ W}$, 初始光束直径 $a = 0.013 \text{ m}$ 。因此光束发散角为:

$$\phi = \frac{0.018 - 0.013}{50} = 10^{-4} \text{ mrad}$$

假定激光束呈高斯分布($k=1$), 则距离 $r = 60 \text{ m}$ 处的辐照度可由公式(B. 2)确定, 即

$$E = \frac{4kP_0}{\pi(a + r\phi)^2}$$

于是

$$E = \frac{4 \times 3 \times 10^{-3}}{\pi(0.013 + 60 \times 10^{-4})^2} = 10.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

对于 10 s 和 $3 \times 10^4 \text{ s}$ 之间的照射持续时间, 表 5 给出相应的 MPE 为:

$$E_{\text{MPE}} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

因这一 MPE 值小于 60 m 处光束的辐照度, 故照射持续时间将小于 10 s。表 5 显示, 照射持续时间在 $1 \times 10^{-3} \text{ s} \sim 10 \text{ s}$ 范围时, 相应的 MPE 为:

$$H_{\text{MPE}} = 18t^{0.75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

这等同于

$$E_{\text{MPE}} = 18t^{-0.25} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

令该 E_{MPE} 值等于 $10.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 即可求得最大照射持续时间 t :

$$18t^{-0.25} = 10.58 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

于是

$$t = \left(\frac{10.58}{18}\right)^{-4} = 8.38 \text{ s}$$

b) 最短安全观察距离可通过求解标称眼危害距离(NOHD)公式(B. 3)获得。对于本例, 照射持续时间 $t=180 \text{ s}$ (3 min), 表 5 给出 $E_{\text{MPE}}=10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{0.1 \times 10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 3 \times 10^{-3}}{\pi \times 10}} - \frac{13 \times 10^{-3}}{0.1 \times 10^{-3}} = 65.4 \text{ m}$$

例 B.6.5

一台手持式红外激光测量仪具有如下特征：

——波长(λ)	903 nm
——脉冲重复频率(F)	300 Hz
——各脉冲峰值功率(P_p)	30 W
——各脉冲能量(Q)	600 nJ
——光束发散度(ϕ)	10 mrad
——有效出射孔径直径(a)	55 mm

假定激光束呈高斯分布,确定这台仪器的 NOHD。

- 裸眼观察；
- 使用 8×50 的双筒望远镜观察。

解答：

a) 裸眼观察条件

从激光器的技术指标得知,脉冲宽度为 $t_p = Q/P_p = (6 \times 10^{-7})/30 = 20$ ns。在本例中,假定对向角 α 小于 α_{\min} , 如果不存在有意观察,所用照射持续时间为 100 s,在这段时间内的脉冲个数是：

$$N = F \times t = 300 \text{ Hz} \times 100 \text{ s} = 3 \times 10^4$$

光束内视 MPE 的选取按 5.2 限制性最强的计算。

单脉冲评估(条件 5.2a))：

表 5 给出了该激光辐射在照射时间为 20 ns 时的单脉冲 MPE：

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-3} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中 $C_4 = 10^{0.002(903-700)} = 2.55$, 因此：

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-3} \times 2.55 = 1.275 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

平均辐照度评估(条件 5.2 b))：

由表 5 得到 100 s 照射时间对应的 MPE, 因为 $\alpha \leq 1.5$ mrad, $T_2 = 10$ s, 所以适合条件 $t > T_2$ ：

$$E_{\text{MPE}} = 10 C_4 C_7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中： $C_4 = 2.55$, $C_7 = 1$ 。因为脉冲重复频率是 300 Hz, 每个脉冲的平均 MPE 是

$$H_{\text{MPE,平均}} = \frac{E_{\text{MPE,平均}}}{F} = \frac{10 \times 2.55 \times 1}{300} = 8.5 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

多脉冲评估(条件 5.2c))：

脉冲串内各脉冲的平均照射量不应超过单脉冲 MPE 与修正因子 C_5 之积(这里 $C_5 = N^{-1/4}$)。在波长范围从 400 nm~1 400 nm 内, 要求 c) 宜使用的最大照射时间是 T_2 , 对于 $\alpha \leq \alpha_{\min}$, $T_2 = 10$ s。因此：

$$H_{\text{MPE,单}} = H_{\text{MPE}} = 50 \times 10^{-3} \times 2.55 = 1.275 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$H_{\text{MPE,串}} = H_{\text{MPE,单}} N^{-1/4} = 1.275 \times 10^{-2} \times (10 \times 300)^{-1/4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$H_{\text{MPE,串}} = 0.135 \times 1.275 \times 10^{-2} = 1.72 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

结论是条件 5.2c) 得出每个脉冲最严格的 MPE, 所以, 光束内视观察的最大容许辐照量 $H_{\text{MPE}} = 1.72 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。将该 MPE 值代入公式(B.4)得出：

$$\text{NOHD} = \frac{1}{0.01} \sqrt{\frac{4 \times 600 \times 10^{-9}}{\pi \times 1.72 \times 10^{-3}}} - \frac{0.055}{0.01} = 2.11 - 5.5 = -3.39 \text{ m}$$

由于结果是负值, 仪器在任何距离用裸眼观察都是安全的。因此, 当仅用裸眼观察时, 该激光产品相应的 NOHD 是零。

b) 双目镜观察条件

双筒望远镜的光学增益因子 G 由 (B.6) 和 (B.7) 所得两个值的较小者确定, 代入 (B.8) 给出 ENOHD。

假定经过光学系统没有衰减($\tau=1$),则公式(B.6)给出 $G=M^2=8^2=64$,公式(B.7)给出 $G=D_0^2/49=50^2/49=51$ 。于是,将 $G=51$ 代入公式(B.8),给出:

$$\text{ENOHD} = \frac{1}{0.01} \sqrt{\frac{4 \times 51 \times 600 \times 10^{-9}}{\pi \times 1.72 \times 10^{-3}}} - \frac{0.055}{0.01} = 9.6 \text{ m}$$

因此,通过 8×50 的双筒望远镜,在小于 9.6 m 的距离内光束内视观察该激光产品是危险的。

例 B.6.6

一台钕玻璃调 Q 激光测距仪有如下特性:

——波长(λ)	1 060 nm
——各脉冲峰值功率 P_p	1.5 MW
——各脉冲能量 Q_p	45 nJ
——脉冲重复频率(F)	12/min
——出射孔径光束直径(a)	10 mm
——光束发散度(ϕ)	10 mrad

确定:

- 裸眼的 NOHD;
- 透射率为 10% 的透射率为 10% 的,裸眼观察的 NOHD;
- 使用 50 mm 直径的光学系统时,光束内视观察的 NOHD。

忽略大气传输引起的光束衰减和折射聚焦作用。

解答:

- 由已知条件 P_p 计算脉冲宽度 $t_p = Q_p / P_p = \frac{45 \times 10^{-3} \text{ J}}{1.5 \times 10^6 \text{ W}} = 30 \text{ ns}$ (即 $10^{-9} \text{ s} < t_p < 5 \times 10^{-5} \text{ s}$),脉冲重复频率 $F = 12/60 = 0.2 \text{ Hz}$ 。

在这个例子中,假定 $\alpha \leq \alpha_{\min}$,如果不存在有意观察,所用照射持续时间为 100 s,这一时间内的脉冲个数是:

$$N = F \times t = 0.2 \text{ Hz} \times 100 \text{ s} = 20$$

光束内视 MPE 的选取按 5.2 限制性最强的计算。

单脉冲评估(条件 5.2a)):

从表 5 查出,这台激光器单脉冲照射的 MPE 是:

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-2} C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

由表 8 得知, $C_7 = 1$, 所以

$$H_{\text{MPE,单}} = 5 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

平均辐照度评估(条件 5.2b)):

从表 5 得到 100 s 照射时间对应的 MPE 是:

$$H_{\text{MPE}} = 90 t^{0.75} C_6 C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中: $C_7 = 1$, 在 100 s 内有 20 个脉冲,故每个脉冲的平均 MPE 是:

$$H_{\text{MPE,平均}} = \frac{90 \times (100)^{0.75}}{20} = 142 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

多脉冲评估(条件 5.2c)):

在波长范围从 400 nm ~ 1 400 nm 内,要求 c) 应使用的最大照射持续时间是 T_2 , 对于 $\alpha \leq \alpha_{\min}$, $T_2 = 10 \text{ s}$, 因此修正因子 $N^{-1/4} = (10 \times 0.2)^{-1/4} = 0.84$ 用于计算 $H_{\text{MPE,串}}$:

$$H_{\text{MPE,串}} = H_{\text{MPE,单}} N^{-1/4} = 5 \times 10^{-2} \times 0.84 = 4.2 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

结论由条件 5.2c) 得出每个脉冲最严格的 MPE, 所以, 光束内视观察的最大容许辐照量 $H_{\text{MPE}} = 4.2 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。将该 MPE 值代入公式(B.4), 且由于这台固体激光器的模结构没有说明, 脉冲能

量应该按因子 $k=2.5$ 增加,所以:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4 \times 2.5 \times Q}{\pi \times E_{\text{MPE}, \text{中}}}} - \frac{a}{\phi}$$

$$\text{NOHD} = \frac{1}{10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 2.5 \times 45 \times 10^{-9}}{\pi \times 4.2 \times 10^{-2}}} - \frac{10^{-2}}{10^{-3}} = 1.837 \text{ m}$$

所以,该测距仪的 NOHD 是 1.84 km。

- b) 如果透射率为 10% 滤光片装在测距仪的输出孔径,NOHD 就减小了。在这种情况下,考虑到 10% 滤光片的作用,上面公式的单个脉冲能量必须用因子 0.1 修正。修正后的 NOHD 为:

$$\text{NOHD} = \frac{1}{10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 2.5 \times 0.1 \times 45 \times 10^{-2}}{\pi \times 4.2 \times 10^{-2}}} - \frac{10^{-2}}{10^{-3}} = 574 \text{ m}$$

- c) 当通过直径 50 mm 的聚光器件光束内视这台激光器时,NOHD 会因光学观察器的增益因子 G (由公式(B.7)确定)而增加。将该因子值代入公式(B.8)可求得 ENOHD。由公式(B.7),假定 $\tau=1$,则 $G=D_0^2/49=50^2/49=51$,代入公式(B.8),得:

$$\text{ENOHD} = \frac{1}{10^{-3}} \sqrt{\frac{4 \times 2.5 \times 51 \times 45 \times 10^{-3}}{\pi \times 4.2 \times 10^{-2}}} - \frac{10^{-2}}{10^{-3}} = 13.18 \text{ km}$$

因此,由于这台激光器的脉冲持续时间很短,当使用望远镜系统时,即使眼睛受激光辐射最短时间照射,在距激光器小于 13.18 km 的地方也是有害的。

B.7 漫反射和扩展光源

扩展光源观察的例子为:

- a) 在波长从 400 nm~1 400 nm 范围内,从漫射表面反射时的激光辐射(表观光源)。
b) 漫反射辐射在眼睛视网膜上形成的像大于视网膜成像的某个最小值,该最小值由极限对向角 α_{\min} 确定,这里 $\alpha_{\min}=1.5 \text{ mrad}$,并且在距表观光源不小于 100 mm 处测量(见 5.4)。

IEC 60825-10 对观察漫反射划分了三个不同的区域。考虑光斑直径为 D 的漫反射源,则 α_{\min} 和距离 r_{\max} 有关($r_{\max}=D/\alpha_{\min}$),超过 r_{\max} 的区域小光源条件成立,这就定义了观察漫反射的三个区域之一。第二个区域存在于对向角 $\alpha \geq \alpha_{\max}=0.1 \text{ rad}$ (对应于距离 $r_{\min}(=D/\alpha_{\max})$) 的地方。在 r_{\min} 和 r_{\max} 之间是视网膜大成像条件和小光源观察条件之间的过渡带。TR 60825-10 提供了一个对于计算危害区域很有帮助流程图,但是,在流程图方框 2 之前,检验 $r_{\max} \geq 100 \text{ mm}$;如果不是,则到流程图方框 7A 或 7B (根据 MPE 的单位)处,类似地检验 $r_{\min} \geq 100 \text{ mm}$;如果不是,则到流程图方框 5A 或 5B (根据 MPE 的单位)处。

例 B.7.1

一台调 Q Nd:YAG 激光器($\lambda=1064 \text{ nm}$, $t=10^{-8} \text{ s}$)的辐射,在被理想的漫射器反射之前,经扩束形成 2 cm 直径的光束。

- a) 扩展光源观察条件成立的范围是什么?
b) 距漫射器 2.5 m 处的 MPE 是多少?

解答:

由下式定义的对向角为:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d_{63}}{2r_1} = \frac{d_{63}}{r_1}$$

式中: d_{63} 是漫射靶上的激光光束直径。

- a) 在极限情况下, $\alpha=\alpha_{\min}$,因此,

$$r_{1, \max} = \frac{d_{63}}{\alpha_{\min}}$$

对于这个例子,有

$$r_{1,\max} = \frac{d_{63}}{\alpha_{\min}} = \frac{0.02 \text{ m}}{1.5 \times 10^{-3} \text{ rad}} = 13.3 \text{ m}$$

在距离大于 $r_{1,\max} = 13 \text{ m}$ 处,小光源观察条件成立。给定照射持续时间的小光源 MPE 由下式给出(见表 5):

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-2} \times C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中: $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 时, $C_7 = 1$ (见表 8)。

因此

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-2} \times 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 5 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

b) 在距离小于 $r_{1,\max} = 13 \text{ m}$ 处,扩展源观察条件成立。给定照射持续时间的小光源 MPE 由下式给出(见表 6):

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-2} \times C_6 \times C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中,和前面一样, $C_7 = 1$;对于 $\alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max}$ 时, $C_6 = \alpha / \alpha_{\min}$ (这里 $\alpha_{\max} = 0.1 \text{ rad}$)。在距漫射器 $r_1 = 2.5 \text{ m}$ 处,表观光源的对角角为:

$$\alpha = \frac{d_{63}}{r_1} = \frac{0.02 \text{ m}}{2.5 \text{ m}} = 8 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

且

$$C_6 = \frac{\alpha}{\alpha_{\min}} = \frac{8 \times 10^{-3} \text{ rad}}{1.5 \times 10^{-3} \text{ rad}} = 5.33$$

因此,在 2.5 m 处观察扩展光源的 MPE 是:

$$H_{\text{MPE}} = 5 \times 10^{-2} \times 5.33 \times 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 0.27 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

例 B.7.2

上例 B.7.1 中,在距观察者眼睛小于 0.2 m 的距离上,允许观察理想漫射器的反射输出而不造成危害,求激光器最大辐射能量。

解答:

在距离小于 0.2 m 处,观察条件是接收角 α 大于 $\alpha_{\max} = 0.1 \text{ rad}$:

$$\alpha = \frac{d_{63}}{r_1} = \frac{0.02 \text{ m}}{0.2 \text{ m}} = 0.1 \text{ rad}$$

为了获得在扩展源观察条件下,能产生有害漫反射的入射光束辐照量,首先要将漫反射 MPE 表示为总辐亮度,这可通过将以辐照量表示的漫反射 MPE 除以最大接收角形成的立体角来完成。这里最大接收角 α_{\max} 是 0.1 rad ,相应的立体角 $\Omega = \pi(\alpha_{\max}/2)^2 = 7.85 \times 10^{-3} \text{ sr}$,表示为总辐亮度的漫反射 MPE 是:

$$L_{\text{MPE}} = (C_6 / \Omega) \times H_{\text{MPE,小光源}} = \left(\frac{66.66}{7.85 \times 10^{-3}} \right) \times H_{\text{MPE,小光源}}$$

$$L_{\text{MPE}} = 8.5 \times 10^3 \times H_{\text{MPE,小光源}} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

将由例 B.5.2 得到的小光源 MPE 代入,得到这一问题的总辐亮度 MPE 为:

$$L_{\text{MPE}} = 8.5 \times 10^3 \times 5.0 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 425 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

漫反射的总辐亮度与靶标入射光束辐照量有关,表示为:

$$H = \pi \times L_p$$

因此,对于 100% 反射率的白色漫射靶标,足以产生有害反射的入射辐照量是:

$$H_{\text{MPE}} = \pi \text{sr} \times L_{\text{MPE}} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 1.34 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

最后,假定辐射能量均匀分布在靶标光斑面积 A 内,则足以产生有害反射的辐射能量为:

$$Q_{\text{MPE}} = H_{\text{MPE}} \times A = H_{\text{MPE}} \times \frac{\pi d_{63}^2}{4} = 1.34 \times 10^3 \times (\pi/4) \times (0.02)^2 = 0.42 \text{ J}.$$

例 B. 7. 3

如果 B. 5. 2 例中激光输出聚焦在理想的漫射屏上,计算屏法线方向上的最小安全观察距离。

解答:

在这种情况下,辐射从漫射朗伯靶标上的聚焦点向外呈半球形反射。所以小光源观察条件成立。在距朗伯光源距离 r_1 处,辐照量由下式给出:

$$H = \left(\frac{Q \cos \theta}{\pi r_1^2} \right)$$

式中: θ 是相对于表面法线的观察角。

朗伯源的标称眼危害距离 NOHD 可由小光源辐照量 MPE 按下式得出:

$$\text{NOHD} = \sqrt{\frac{Q \cos \theta}{\pi H_{\text{MPE,小光源}}}}$$

在前面例子中得到的激光器最大输出辐射能量为 0.42 J,且规定的观察角为 $\theta = 0$ rad。假定靶标同样是理想全反射,则最小安全观察距离是:

$$\text{NOHD} = \sqrt{\frac{0.42 \times \cos(0)}{\pi \times 0.05}} = 1.6 \text{ m}$$

B. 8 眼防护

防护眼镜在激光波长处的光密度 D_λ ,应该足以将透射辐射降低到适用于最大合理可预见照射时间的 MPE 之下(见 8. 4. 5. 2. 2)。提供必要水平眼防护所需的 D_λ 值,可以从公式(B. 9)或从(B. 10)计算出,

$$D_\lambda = \lg \left(\frac{E_0}{\text{MPE}} \right) \dots\dots\dots (\text{B. 9})$$

式中: E_0 是在未受防护的眼睛处的最大预期辐照度, MPE 以功率密度表示;或者

$$D_\lambda = \lg \left(\frac{H_0}{\text{MPE}} \right) \dots\dots\dots (\text{B. 10})$$

式中: H_0 是在未受防护的眼睛处的最大预期辐照量, MPE 以能量密度表示。

例 B. 8. 1

对于例 B. 6. 6 所述的激光测距仪的操作者,确定防护眼镜的光密度。

解答:

对于 100 s 照射时间内每个脉冲的 MPE,在 B. 6. 6 中已经计算得出为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。位于激光器正前方的人员接受的辐照量为:

$$H_0 = \left(\frac{4 \times k \times Q}{\pi \times d_{63}^2} \right)$$

式中: d_{63} 规定为 10 mm, $Q=45 \text{ mJ}$,因模结构未知, $k=2.5$ 。因此 $H_0=1432 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$,公式(B. 10)给出光密度为:

$$D_\lambda = \lg \left(\frac{1432}{4.2 \times 10^{-2}} \right) = 4.53$$

通常为了安全起见,应进位到下一整数,即应该规定光密度为 5。

例 B. 8. 2

对于例 B. 6. 1 所述的激光测距仪的操作者,确定防护眼镜的光密度。

解答:

规定 MPE 为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,位于激光器正前方的人员接受的辐照度为:

$$E_0 = \left(\frac{4 \times k \times P}{\pi \times d_{63}^2} \right)$$

式中： d_{63} 规定为1 mm， $P=4$ W，如例 B. 6. 1 中所述， $k=1$ 。因为1 mm 光束直径小于发射波长（在例 B. 6. 3 中规定为550 nm）上7 mm 的限制孔径（表 2），故计算辐照度时用限制孔径而不是实际光束直径。因此 $E_0=1.04 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，公式(B. 9)给出光密度为：

$$D_\lambda = \lg\left(\frac{1.04 \times 10^5}{10}\right) = 4.0$$

应该规定光密度为4。

B. 9 组合小光源

例 B. 9. 1: 复合激光二极管阵列光源

距复合 GaAs(905 nm)激光二极管阵列光源 1 m 处，照射时间 10 s，求出适用于光束内视观察的 MPE。该阵列光源由安装在准直光学系统后的两行（每行 10 只）二极管组成。光源的输出功率为 6 W，脉冲重复频率 F 为 12 kHz，脉冲宽度为 80 ns。出射孔径（准直透镜）直径为 5 cm，出射光束在 $1/e$ 峰值辐照度点的直径为 3.5 cm（即 3.5 cm 圆形测量孔径将收集 63% 的光束功率）。在 1 m 的距离，轴向光束辐照度（平均值）是 $3.6 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。光束发散度水平方向 25 mrad，垂直方向 3 mrad，且在距出射孔径 1 m 处，光束尺寸约为 3.0 cm × 3.8 cm。

距出射孔径 1 m 处（使用红外胶片）拍摄的光束内视照片显示，每个二极管对应一个 2.2 mrad 长，不足 0.5 mrad 宽的线形投影像；各二极管中心到中心彼此间隔 3.0 mrad 的角，两行二极管间隔 2.3 mrad 角（见图 B. 1）。使用一个带有光密度为 4 的滤光片的红外变像管减少眩光，可显示出在 10 cm 和 2 m 之间的所有观察距离上，这些间隔角是不变的。¹⁾

解答：

用于激光二极管阵列的 MPE 是在对每个独立光源和每个可能的二极管阵列组合进行评估后得到的最严格的 MPE。然而，保守地假定全部辐射功率均从单个点光源发出，这样可大大简化评估过程。这样总是会夸大危险，但只要不招致过分严格的控制措施，就不必对扩展光源进行更复杂的分析。

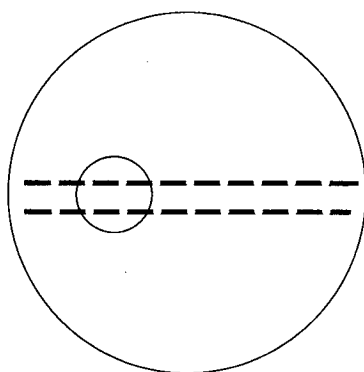


图 B. 1 两行激光二极管

确定适用（最严格）的 MPE 需要采取一种试错方法，因为必须计算单个二极管、两个相邻的二极管、三个或四个等为一组的二极管等等。以及整个二极管阵列的 MPE，要认识到在每一种情况下，都对功率或能量在适用于该组合的对向角 α 上求平均。通过对光源画图有助于研究二极管的不同组合（见图 B. 1）。在 10 s 照射时间内的脉冲总数 N 是 120 000。

1) 《激光器和其他光源的安全》(New York, Plenum Publishing Corp., 1980) 一书的第 15 章 Sliney and Wolbarsht 解释了这种行为。

多脉冲评估的单脉冲 MPE 由下式给出(使用表 6 中的 80 ns 脉冲):

$$\begin{aligned} H_{\text{MPE,串}} &= C_5 \times 5 \times 10^{-3} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 120\,000^{-0.25} \times 5 \times 10^{-3} \times 2.57 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 6.9 \times 10^{-4} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

为了将单脉冲 MPE 与光束的平均辐照度比较,宜将上述(用辐照量表示)的 MPE 表示为每秒 F 个脉冲上的平均辐照度如下:

$$\begin{aligned} H_{\text{MPE,串}} &= H_{\text{MPE,串}} \times F \\ &= 6.9 \times 10^{-4} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \times 1.2 \times 10^4 \text{ Hz} \\ &= 8.28 C_6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

对平均功率评估的单脉冲 MPE 由下式给出(利用表 6 的 10 s 照射时间):

$$\begin{aligned} H_{\text{MPE,平均}} &= 18 \times t^{0.75} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 18 \times (10)^{0.75} \times 2.57 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 260 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

上述以辐照量表示的 MPE,也可以 10 s 照射时间上的平均辐照度表示如下:

$$\begin{aligned} H_{\text{MPE,平均}} &= H_{\text{MPE,平均}} / t \\ &= 260 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} / (10 \text{ s}) \\ &= 26 C_6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

因为 C_6 只决定于二极管组合的对向角,在 $E_{\text{MPE,串,F}}$ 和 $E_{\text{MPE,平均}}$ 的公式中 C_6 有相同的值,因此,这个例子的 $E_{\text{MPE,串,F}}$ 始终是最严格的。

单二极管组

单个二极管的对向角为 0.5 mrad(垂直)和 2.2 mrad(水平)。矩形光源的 MPE 由两个对向角的算术平均值确定。如 4.3.3 所述,在确定平均值之前,任何小于 1.5 mrad 或大于 100 mrad 的对向角,应分别用 1.5 mrad 或 100 mrad 代替。所以,平均值为:

$$(1.5 + 2.2) / 2 \text{ mrad} = 1.85 \text{ mrad}$$

该值大于 1.5 mrad,故单个二极管被认为是扩展光源,且修正系数 $C_6 = 1.85 / 1.5 = 1.23$ 。适用的 MPE 为:

$$E_{\text{MPE,二极管}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 1.23 = 10.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

此 MPE 并不适用于总辐照度,而仅适用于单个二极管的辐照度。假定所有二极管均有相同的功率发射,该 MPE 必须与总辐照度与二极管个数(即 20)之商比较。

$$E_{\text{二极管}} = E_{\text{总}} / 20 = 3\,600 / 20 = 180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

该单个二极管的 MPE 在 1 m 距离处被超出 $180 / 10.2 = 17.6$ 倍。

水平双二极管组

应考虑的一种可能的阵列组合是水平相邻的两个二极管为一组,其对向角为 0.5 mrad(垂直) \times 5.2 mrad(水平)。如在 4.3.3 所述,用 1.5 mrad 代替 0.5 mrad,两个方向上对向角尺寸的算术平均值是: $(1.5 + 5.2) / 2 \text{ mrad} = 3.35 \text{ mrad}$,修正因子 $C_6 = 3.35 / 1.5 = 2.23$,适用的 MPE 如下:

$$E_{\text{MPE,水平双二极管}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 2.23 = 18.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

由于这一组合的辐照度是单个二极管辐照度的两倍,因此,该 MPE 必须与下述值相比较:

$$E_{\text{双}} = E_{\text{二极管}} \times 2 = 180 \times 2 = 360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

在 1 m 距离处,危险系数是 $360 / 18.5 = 19.5$ 。因此,这一双二极管组合产生的危险系数大于单二极管组(即更保守的 MPE)。

垂直双二极管组

需考虑的另一阵列子单元是垂直方向上的两个二极管,其对向角为 2.8 mrad(垂直) \times 2.2 mrad

(水平)。两个方向上对向角尺寸的算术平均值是 $(2.8+2.2)/2 \text{ mrad}=2.5 \text{ mrad}$

因此修正因子 $C_6=2.5/1.5=1.67$, 适用的 MPE 如下:

$$E_{\text{MPE,垂直二极管}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 1.67 = 13.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

这一组合的辐照度是单个二极管辐照度的两倍, 因此, 该 MPE 必须与下述值相比较:

$$E_{\text{双}} = E_{\text{二极管}} \times 2 = 180 \times 2 = 360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

在 1 m 距离处, 危险系数是 $360/13.8=26.1$ 。因此, 该组合产生的危险系数大于上一种组合。

4-二极管组

需考虑的另一种可能的阵列子单元是四个相邻的二极管 (2×2) , 其对向角为 2.8 mrad (垂直) \times 5.2 mrad (水平)。两个对向角尺寸的算术平均值是: $(2.8+5.2)/2 \text{ mrad}=4 \text{ mrad}$

因此修正因子 $C_6=4/1.5=2.67$, 合适的 MPE 如下:

$$E_{\text{MPE,4}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 2.67 = 22.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

因为这一组合的辐照度是单个二极管辐照度的四倍, 因此, 该 MPE 必须与下述值相比较:

$$E_4 = E_{\text{二极管}} \times 4 = 180 \times 4 = 720 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

在 1 m 距离处, 危险系数是 $720/22.1=32.5$ 。因此, 该组合产生的危险系数大于所有上述值。

一行 10 二极管组

须评估的另一有趣组合是一整行 10 只二极管, 其对向角为 0.5 mrad (垂直) 和 29.2 mrad (水平)。如在 4.3.3 所述, 用 1.5 mrad 代替 0.5 mrad , 两个对向角尺寸的算术平均值是: $(1.5+29.2)/2 \text{ mrad}=15.3 \text{ mrad}$ 。因此修正因子 $C_6=15.3/1.5=10.2$, 适用的 MPE 为:

$$E_{\text{MPE,10}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 10.2 = 84.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

因为这一组合包含 10 只二极管, 因此, 该 MPE 必须与下述值相比较:

$$E_{10} = E_{\text{二极管}} \times 10 = 180 \times 10 = 1800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

在 1 m 距离处, 危险系数是 $1800/84.5=21.3$ 。

20-二极管组

在这个例子中, 须考虑的最后一种组合是评估 20 只二极管的整个阵列, 由于这些二极管排成相邻两行, 所以垂直对向角与 4-二极管组相同, 即 2.8 mrad , 水平对向角为 29.2 mrad 。其平均值是 16 mrad 。修正因子 $C_6=16/1.5=10.7$, 适用的 MPE 如下:

$$E_{\text{MPE,20}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 10.7 = 88.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

在 1 m 距离处, 危险系数是 $3600/88.3=40.7$ 。这是本例中求得的最大危险系数。

通过计算可以证明, 诸如三只水平相邻二极管, 六只相邻二极管 (2×3) 等其他组合, 给出的危险系数都小于 40.7。因此, 用于评定该阵列危害程度的危险系数是 40.7。

附加说明

需重点指出的是, 在其他场合, 极限情况可能来自光源一部分的组合, 而不是整个光源。例如我们考虑另一个阵列结构, 它由 20 只二极管构成, 排列成 2 行, 每行 10 只。二极管的角尺寸和垂直距离与上述例子相同, 但水平方向上中心到中心的距离为 6 mrad 。

在这一新的情况下, 整个阵列所用的对向角是 $(2.8+56.2)/2 \text{ mrad}=29.5 \text{ mrad}$ 并且最严格的 MPE 由 $E_{\text{MPE,串,F}}$ 给出。因此修正因子 $C_6=29.5/1.5=19.7$, 适用的 MPE 如下:

$$E_{\text{MPE,20}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 19.7 = 163 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

整个阵列的危险系数是 $3600/163=22.1$ 。

因而, 修正因子 $C_6=11.5/1.5=7.67$, 该组合的对向角是 $(2.8+20.2)/2 \text{ mrad}=11.5 \text{ mrad}$ 。这样, 修正因子 $C_6=11.5/11=1.05$, 适用的 MPE 如下:

$$E_{\text{MPE,8}} = E_{\text{MPE,串,F}} = 8.28 \times 7.67 = 63.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

该值应与下述值相比较:

$$E_8 = E_{\text{二极管}} \times 8 = 180 \times 8 = 1440 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

这一组合的危险系数是 $1\ 440/63.5 = 22.7$ 。由于 22.7 是最大值,故认为它是这个阵列的危险系数。

整个阵列给出的危险系数比 8 只二极管组的危险系数小,这一事实并不意味着整个阵列即 20 只二极管组合的危险比 8 只二极管组合小。这种看起来奇怪的结果意味着,在这一特定情况下,把 20 只二极管当作一个对向角为 29.5 mrad 的均匀光源不能正确评定其危险,而通过对组成阵列自身各部分的分析则能获得正确评定。这是由于整个光源并非均匀这一事实造成的。

所需光密度

为了保护在 1 m 距离处的观察者,应该要求防护滤光片的衰减因子为 40.7。1.7 的光密度相当于 50 的衰减因子,并可在距激光器 1 m 处提供足够的保护。

一般而言,有必要确保滤光片能够承受得住辐射功率水平,因为,尽管滤光片可能具有足够的光密度,但可能会因辐射对其损坏而失去防护能力。

用点光源近似的简化处理方法代替二极管组计算,整个阵列的 MPE 应等于 $8.28\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这样,在 1 m 的距离,点光源近似导致辐照度超过 MPE 值 $3\ 600/8.28 = 435$ 倍,所需光密度为 $\lg 435 = 2.64$ 或更高。注意点光源近似法导致其估算的危险较更为准确的二极管组合近似法高于四倍以上。

光学装置的使用

普通的望远镜和双筒望远镜不能将 1 m 远的物体聚焦。但是,这个例子的目的是考虑使用 3 倍放大装置在 1 m 处观察激光器。这就要求下述附加分析。

这个装置的孔径是 21 mm,小于光束的尺寸。所以,功率按 $3^2 = 9$ 的倍率增加。由于装置的放大倍率是 3,故阵列的角尺寸按倍率 3 增加。因此必须进行前述那样的计算,但要考虑新的角尺寸值和每一组合的功率值。

因为测量方法要求以 $\alpha_{\max} = 100\text{ mrad}$ 的最大接收角收集辐射(见 4.3.3),当这一组合的两个角尺寸之一,如水平的一个(用 $\alpha_{\text{水平}}$ 表示)大于 α_{\max} 时,这一组合的功率应以因子 $\alpha_{\max}/\alpha_{\text{水平}}$ 减少,以排除接收角之外的那部分光源。此外,如 4.3.3 所述,在确定用于计算 C_6 的对向角算术平均值之前,任何对向角都应被限制为 α_{\max} ,然而,在这个特殊的例子中,所有对向角均小于 α_{\max} 。

考虑用该光学装置进行辅助观察,分析不同二极管组合表明,20 只二极管的整个阵列组合给出的危险系数值最大,为 122,要求的附加光密度为 $\lg(122) = 2.1$ 。

应该注意在其他情况下,当光源均匀,光束直径大于 3 倍放大光学装置的孔径,且有辅助观察和无辅助观察的每一组合(包括整个阵列)的对向角(张角)都在 α_{\min} 和 α_{\max} 之间时,评定将比较简单。事实上,在这种情况下,光学装置收集到多达九倍的功率,但光源看上去为原来的三倍大。这样,由于系数 C_6 也是原来的三倍大,使用光学器件产生的危险应为无辅助观察时的三倍。

在这种特定情况下,即使光源不均匀,其危险系数也大约是无辅助观察的 3 倍。但是,在其他情况下,结果会大不相同。

假定双筒望远镜在该波长上的透过率约为 70%,提供 0.15 的附加光密度,3 倍放大光学装置所需的光密度是: $OD = 2.1 - 0.15 = 1.95$ 。这样,距出射孔径 1 m 处,1.95 或更高的光密度将对有辅助和无辅助直接光束内视观察提供防护。

附录 C
(资料性附录)
生物物理学原理

C.1 眼的解剖

见图 C.1。

C.1.1 图 C.1(A)

图 C.1(A)为左眼的外部结构图。睑裂限制了眼的可见视场(FOV),使眼呈杏仁状。眼前部的主要结构被标出,虚线和箭头指出眼睛的各部位。

C.1.2 图 C.1(B)

图 C.1(B)为左眼的图示水平切面图。眼睛分为两部分,前部,即以角膜、虹膜、晶状体为界的前房;后部,即以视网膜为界并含有凝胶状玻璃体的眼杯。

C.1.3 图 C.1(C)

图 C.1(C)为检眼镜下所见的正常左眼眼底。检眼镜的光束通过瞳孔直接照亮眼的内部,所见到的图像是眼底。眼底是微红色,可清晰地看到较大的视网膜血管,其他突出的结构是白色的视盘和黄斑。黄斑是视网膜表面的一个小凹陷,色素较周围视网膜的多,是视觉最敏锐区。黄斑是视网膜中区的中心;视网膜中区是细微视觉区。

C.1.4 图 C.1(D)

图 C.1(D)是剖面图,图 C.1(B)中所见到的视网膜结构,但是它比活体放大了约 320 倍。视网膜由一组神经细胞层组成,最上面是感光的杆体和锥状细胞,即光射到视网膜表面,必须通过神经细胞层,才能到达感光细胞。锥状、杆体细胞层的下面是色素上皮层,它含有黑褐色的黑色素。色素上皮层下面是微细毛细血管层,即脉络膜毛细血管层。脉络膜是主要的吸收层,它既含有色素细胞,又含有血管。

C.1.5 图 C.1(E)

图 C.1(E)是放大约 150 倍的黄斑区结构,黄斑区仅有锥体细胞。神经细胞径向移动而远离视力最敏锐区。黄斑部的色素位于 Henle 纤维层内,它对 400 nm~500 nm 波长的光吸收力最强。

C.2 激光辐射对生物组织的影响

激光辐照引起损伤的机理,对于所有的生物系统来说都是相似的。可以包括热反应、热声瞬变、光化学相互作用的过程和非线性效应。上述任何一种机理引起损伤的程度均与辐照源的某些固有物理参数有关,其中最重要的参数是波长、脉宽、成像尺寸、辐照度和辐照量。

概括地讲,在超阈值照射中,主要的损伤机理与照射的持续时间有关。随着脉冲持续时间的逐渐延长,在如下的时间范围内,起主要作用的损伤机理是:照射时间为纳秒和亚纳秒时,主要是声瞬变效应和非线性效应;照射时间为 1 ms 至数秒时,为热效应;照射时间超过 10 s 时,为光化学效应。

激光辐照,以其光束准直性区别于许多其他已知类型的辐照,加之光辐照原本含有高能量,使得过

多的能量传导到生物组织中。各种激光辐照时对生物器官的损伤主要是由于该器官对辐照的吸收所致。吸收发生在原子与分子水平上,是一种波长特有的过程。因此,波长决定了一台特定的激光器引起那种组织的损伤。

热效应。当一个系统吸收了足够的辐照能量时,其组成分子的振动增加,这是一种热量的增加。多数激光损伤是由于吸收的组织或多个组织受热所致。这种热损伤通常局限在激光能量吸收部位的边缘区与辐照光束内,此区域内的细胞明显地烧伤。组织的损伤主要是由于蛋白质变性引起。以上所述表明,激光二次损伤的发生可能与组织受热反应的时间有关,反应的时间又直接地与激光的脉宽(图 C. 2)和冷却时间有关。在受热和冷却两个时段都会发生热化学反应,引起依赖光斑尺寸的热损伤。如果一台连续波或长脉冲激光装置直接照射组织,由于传导而使受照射生物组织区的温度逐渐增高。当越来越多细胞的温升超过他们所耐受的温度时,这种热扩散就可导致损伤面积的增加。由于传导是光斑聚焦大小的函数,它决定了周边扩散的程度及最初组织受热区的温度,因此,对于损伤来说,光斑大小也是非常重要的。这种类型的热损伤在连续照射和长脉冲激光照射中常常可以见到,但是对短脉冲也会发生。对于 1 mm~2 mm 或更小级别尺寸的照射光斑,径向热流导致的损伤取决于光斑尺寸。

光化学效应。另一方面,损伤效应也可能是特殊分子吸收了所给定光的直接结果。这一过程是由于吸收给定光能产生的,而不是释放能量。然而,这种反应是分子激发态的一种独特的化学反应,此反应是低剂量照射损伤的主要原因。同一机制,中等剂量的紫外辐射和短波长光长时间照射,可引起某些生物组织,如皮肤、眼的晶状体,尤其是视网膜的不可逆改变。如果辐照时间太长,或者,虽是短时间照射,但重复照射的时间太长,那么这种光化学导致的变化就可引起器官组织的损伤。有些由激光照射引发的光化学反应可能是异常的,或超出正常过程的。光化学反应通常遵循 Bunsen 和 Roscoe 定律,并且对于 1 h~3 h 或更短的持续时间(这里修复机理开始起作用),辐照量表示的阈值在很宽的照射持续时间上是不变的。与热扩散引起的热效应不同,光化学效应不存在对光斑尺寸的依赖性。

非线性效应。短脉冲、高峰值功率(即调 Q 或锁模)激光器,通过不同损伤机理的联合作用,可加重组织损伤。能量在极短的时间内释放到生物靶标上,受照射部位产生很高的辐照度。靶标组织受到如此快的温度升高,致使组织细胞由液态变为汽态。在多数情况下,这些相变极快,可使组织爆裂,细胞崩解。由此产生的压力瞬变,在烧伤中心的外周缘产生一个环状的爆破带。相似的压力瞬变亦可由热膨胀引起,以上两种压力瞬变均可由于部分组织的移位,而导致远隔吸收层部位的组织出现切割状损伤。在亚毫微秒的照射中,眼睛介质的自聚焦进一步集中准直光束的激光能量,在约 10 ps~1 ns 之间进一步降低阈值。此外,其他非线性光学机理在亚毫微秒范围的视网膜损伤中也起作用。

激光作用于视网膜时,上述的所有损伤机理均已被见到,并反映在本部分描述的安全照射量的转效点或斜率的变化上。

表 C. 1 过量光照的病理效应一览表

CIE 光谱范围 ^a	眼 睛	皮 肤	
紫外辐射 C (180 nm~280 nm)	光致角膜炎	红斑(阳光灼伤)	
紫外辐射 B (280 nm~315 nm)		加速皮肤的老化过程 色素沉着	
紫外辐射 A (315 nm~400 nm)	光化学白内障	光敏感作用	皮肤灼伤
可见光 (400 nm~780 nm)	光化学和热效应所致的视网膜损伤		

表 C.1 (续)

CIE 光谱范围 ^a	眼 睛	皮 肤	
红外辐射 A (780 nm~1 400 nm)	白内障、视网膜灼伤		皮肤灼伤
红外辐射 B (1.4 μm~3.0 μm)	白内障、水分蒸发、角膜灼伤		
红外辐射 C (3.0 μm~1 mm)	仅为角膜灼伤		
^a CIE 中定义的光谱范围是简化符号,用于描绘生物效应,可能与 MPE 表 A.1 到 A.3 中光谱波段的划分有所不同。			

C.2.1 对眼的伤害

在 C.1 中,简要叙述了眼的解剖。眼特别适合于接收和传导光辐射。眼对于不同波长辐照光的吸收特性见图 C.2,因过量照射引起的有关病理学变化概括于表 C.1 中。紫外和远红外激光辐射致使角膜损伤,然而可见光与近红外辐射将被透射到视网膜上。

可见光和近红外激光对眼的损伤是特殊的。因为,眼球能有效地透射光辐射,这一特性使得含色素较多的组织受到较强的辐照。从角膜到视网膜辐照度的增大近似地为瞳孔面积与其在视网膜的像面积之比。辐照度增大的原因,是因为进入瞳孔的光在视网膜上聚焦成一个“点”。瞳孔是一个可变的孔径,对年青人的眼睛而言,其直径最大可扩张至 7 mm,对应于这样一个瞳孔的视网膜影像,直径可在 10 μm~20 μm 之间。考虑到眼内散射和角膜像差,角膜与视网膜之间的辐照度增加了 2×10^5 倍。假如增加了 5×10^5 ,那么在角膜上为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光束到视网膜上将变为 $1 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在本部分中,认为 7 mm 的瞳孔是最坏条件下的限制孔径,此值是对年青人最坏情况下的瞳孔直径进行测量而得到的。在测定观察可见光范围的(400 nm~700 nm)激光源,观察时间超过 10 s 时,防止光致视网膜损伤所导出的照射极限不采用 7 mm 瞳孔限制孔径假设。在这种情况下,假设 3 mm 的瞳孔是最坏条件。但是,因为瞳孔在空间做生理学运动,所以在 7 mm 平均孔径上测量辐照度仍然认为是合适的。因此,持续时间大于 10 s 的 AEL 仍然用 7 mm 的孔径导出。

如果一束强激光聚焦到视网膜上,仅有一小部分光(约 5%)被视杆和视锥细胞中的视色素所吸收。而绝大部分光将被色素上皮中的黑色素所吸收。(在黄斑区,波长为 400 nm~500 nm 范围内的部分能量将被黄斑色素吸收。)能量的吸收导致局部发热,并灼伤色素上皮层和邻近的对光敏感的视杆细胞和视锥细胞。这种灼伤或损伤可能导致视力下降。此外,还会导致局限于色素上皮层的非热效应的光化学损伤。

这种视力损失是否是永久性的,取决于照射的强度。视力的下降通常不能发现,只有当黄斑中央部或中心凹区损伤时,受到照射的人才会感觉到视力减退。中心凹区是黄斑中央的一个小凹陷,它是视网膜最重要的部分,是视觉最敏锐区。它是视网膜上感受光(看光照下的物体)的部分。中心凹区所对的视角大约等于月亮所张的角。倘若此区受到损伤,可出现视野缺损,早期在视觉中央区域出现一个模糊的白点,两周内或更长的时间,白点变为黑斑。最后,患者可能在正常视觉中不会再查觉到这个盲点(暗点)。然而,当在注视像一张空白纸样的视场时,盲点就可立即显露出来。视网膜的周边只有在发生严重损伤时,病人才会有主观感觉。小的周边损伤不会引人注意,甚至可能在系统的眼科检查中也未必会发现。

在 400 nm~1 400 nm 波长范围内,最大的危害是视网膜损伤。该波长范围内的辐射可以透过角

膜、房水、晶状体和玻璃体。对于良好的平行光束,因为假设其视网膜像是个直径约为 $10\ \mu\text{m}\sim 20\ \mu\text{m}$ 的衍射极限光斑,所以其危害实际上与辐射源和眼之间的距离无关。在这种情况下,假定达到热平衡,则对视网膜的危害决定于最小对向角 α_{\min} ,它通常对应大约 $25\ \mu\text{m}$ 直径的视网膜光斑。

对于扩展光源,因为瞬时视网膜的辐照度只依赖于该光源的辐射亮度及眼球晶状体的特性,所以其危害随辐射源和眼之间的观察距离而变化。视网膜上较大的像的能量热扩散作用不大,导致视网膜上的热效应损伤取决于光斑尺寸,而光化学损伤(仅在 $400\ \text{nm}\sim 600\ \text{nm}$ 光谱区域起主要作用)与光斑尺寸无关。此外,对于连续波激光照射,眼睛运动进一步扩散了吸收的能量,导致对不同的视网膜像尺寸有不同的损伤依赖性。

在推导视网膜损伤区域的眼照射量的极限值时,眼运动的修正因子仅适用于观察持续时间大于 $10\ \text{s}$ 的情况。虽然在 $0.1\ \text{s}\sim 10\ \text{s}$ 的时间范围内称之为眼跳(眼急动)的生理学眼运动只在视网膜的最小像($0.25\ \mu\text{m}$ 或更小)内扩散了吸收的能量,但在这种观察条件,极限值给出了一个附加安全因子。在 $0.25\ \text{s}$,视网膜上受光照的斑点平均约为 $50\ \mu\text{m}$ 。在 $10\ \text{s}$,视网膜上受光照的区域约为 $75\ \mu\text{m}$,相对固定的眼睛,考虑到光斑尺寸的依赖性,最小成像条件下的附加安全因子变为 1.7 。在 $100\ \text{s}$,光照区域(半功率点)一般都不会小于 $135\ \mu\text{m}$,导致最小成像条件的附加安全因子为 $2\sim 3$ 或更大。

把眼运动研究和视网膜热损伤研究的数据结合在一起,推导出观察时间 T_2 的转效点,在这点上,眼运动补偿了在眼睛固定不动时,由于视网膜照射持续时间增加而增强的热效应损伤的理论风险。因为进入眼睛的热效应损伤阈值(用辐射功率表示)随着照射持续时间 t 的增加而降低到 -0.25 次方(即持续时间每增加 10 倍,减少仅 44%),所以仅适度增大被照射视网膜区域就能够补偿在长时间观察下引起的风险增加。随着观察时间增加,眼运动明显加强,引起视网膜上被辐照区域增大,补偿在较大的扩展光源下,热扩散减少的影响。这样,对于增加的对向角 α ,转效点 T_2 从 $10\ \text{s}$ (对小光源)增加到 $100\ \text{s}$ (对大光源)。超过 $100\ \text{s}$,对于小的和中等大小的像,热效应损伤的风险不再增加。极限值的规定和测量条件,力求简化处理这些变量,导致确定的风险比较保守。依据保守假设:在大约 $25\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ (相当于角度为 $1.5\ \text{mrad}\sim 59\ \text{mrad}$)之间,视网膜热效应损伤阈值的变化与视网膜上像的尺寸(稳定的)成反比,超过 $1.7\ \text{mm}$ (相当角度大于 $100\ \text{mrad}$),与光斑尺寸无关。

对于稳定的像,光化学引起的视网膜损伤与光斑尺寸无关。与热效应损伤的机理不同,光化学损伤的阈值具有很强的波长依赖性和照射剂量依赖性,即,随着照射持续时间的增加,阈值反而减小。研究对向角为 $1\ \text{mrad}\sim 1.5\ \text{mrad}$ 的焊弧引起的光化学视网膜损伤显示,典型损害尺寸为 $185\ \mu\text{m}\sim 200\ \mu\text{m}$ (相当于视角 $11\ \text{mrad}\sim 12\ \text{mrad}$),同时清楚地显示了在注视期间眼睛运动的影响。这些研究和其他注视期间眼运动的研究,求解出为防止光化学视网膜损伤的 MPEs。这些研究结果也给出:MPE 辐照度被规定为 $11\ \text{mrad}$ 上,持续时间为 $10\ \text{s}\sim 100\ \text{s}$ 之间的照射量的平均。因此,对向角 α 小于 $11\ \text{mrad}$ 的光源被认为等同“点型”光源, α_{\min} 的概念被延伸到观察连续波激光器。这个方法并不十分严格正确,因为一个 $11\ \text{mrad}$ 光源的辐照度测量并不等同于在 $11\ \text{mrad}$ 视场(γ)上平均的辐照度,除非光源属平顶辐射分布。因此,本部分中,区分了光源对向角和光化学 MPE 值的平均辐照度。当观察时间超过约 $30\ \text{s}\sim 60\ \text{s}$ 时,在注视期间眼跳(眼急动)的眼运动一般由视觉作业确定的行为运动所支配,没有理由假设光源单独在黄斑上成像持续时间大于 $100\ \text{s}$ 。由于这个原因,接收角 γ_{ph} 随着 t 的平方根线性增加。对所有照射持续时间,最小对向角 α_{\min} 合理地保持在 $1.5\ \text{mrad}$ 的参考角上(用于视网膜热损伤的评估)。但是,对于光化学视网膜损伤评估,概念是不同的,因为角 γ_{ph} 是测量辐照度的接收角的线性角,重要的是,仅适用于大于约 $11\ \text{mrad}$ 的扩展光源。

观察距离。对于“点状”的发散光束光源,其危害随着激光束束腰与眼睛之间距离的减少而增加。原因是,随着距离减小,其收集的功率增加,对于真实的激光源,距离下降到如 $100\ \text{mm}$ (由于眼的调节能力)近时,视网膜上像的尺寸可假定保持在几乎衍射极限量级。最大的危害出现在最短的调节距离上。随着距离的进一步减小,对裸眼的危害也减少,这是由于视网膜上的像迅速变大而辐照度相应减小,即使收集到更大的功率也是如此。根据清楚观察最近距离的基础,设定用 $50\ \text{mm}$ 孔径在最近距离

为 2 m 处,使用双筒望远镜或望远镜,以模拟借助光学仪器观察准直激光束的危害。

对本部分来说,在 400 nm~1 400 nm 范围内的所有波长上,人眼调节的最短距离定为 100 mm。选择这样一个折衷方案是因为除少数年轻人和极少近视眼之外,其他人员不能把眼的近距离调节到 100 mm 以下。这个距离可以用来测量光束内视情况下的辐照度。

对于小于 400 nm 或大于 1 400 nm 的波长,最大的危害是眼球晶状体或角膜的损伤。光辐射被角膜或晶状体优先吸收或者是全部吸收,取决于光辐射的波长(见表 C.1)。对于这些波长的发散光束的光源(扩展源或点源),应该避免使光源和眼的距离太短。

在 1 500 nm~2 600 nm 的波长范围内,激光辐射透入水房(水状体)。加热效应扩散到眼睛的更大体积内,并且对于小于 10 s 的照射,MPEs 增加。在很短的脉冲宽度,出现 MPEs 的最大增加,并且在波长 1 500 nm~1 800 nm 范围内吸收体积最大。当时间长于 10 s 时,热传导重新分配热能量,透射深度的作用不再明显。

C.2.2 皮肤损伤

一般说来,皮肤比眼更能耐受大量的激光照射。由可见光(400 nm~700 nm)和红外(大于700 nm)光谱范围的激光辐射,皮肤辐照的生物效应,可使皮肤出现轻度红斑,继而发展成严重的水疱。在极短脉冲、高峰值功率激光辐射持续照射后,表面吸收力较强的组织可出现灰白色碳化,而不出现红斑。

极强的辐照可造成皮肤的色素沉着、溃疡、瘢痕形成和皮下组织的损伤。但激光辐射的潜在效应或累积效应还未被普遍地发现。但是,一些有限的研究表明,在特殊条件下,人体组织的小区域可能对反复的局部照射敏感,从而改变了最轻反应的照射剂量,因此在这样低剂量照射时组织的反应非常严重。

在 1 500 nm~2 600 nm 的波长范围内,生物学阈值研究表明,皮肤损伤的危险与眼睛损伤有类似的模式。对于高达 10 s 的照射,在这个光谱范围内 MPE 增加。

C.3 MPEs 和辐照度平均

在本部分中,已采用由非电离化辐射防护国际委员会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection:ICNIRP)推荐的最大允许照射量(MPE)的值。已采用 ICNIRP 推荐的辐照度平均孔径(测量孔径),或者被 IEC TC 76 采用的一个附加安全因子。

表 C.2 适用于 MPEs 的测量孔径的说明

光谱段 λ	照射持续时间 t	孔径直径	孔径直径的说明和原理
180 nm~400 nm	$t < 3 \times 10^4$ s	1 mm	在角膜上皮层和角质层散射导致 1 mm;IEC 使用以下假设:在连续照射条件下被照射的组织没有运动。但是,对于过长照射,由于眼运动,ICNIRP 推荐 3.5 mm
400 nm~600 nm 光化学效应	$t > 10$ s	推导 MPE 时用 3 mm,测量 时用 7 mm	对于光化学损伤机理,3 mm 直径的瞳孔在空间横向运动导致对连续波照射适用 7 mm 平均孔径
400 nm~1 400 nm 热效应	所有 t	7 mm	在连续波照射下,扩大了瞳孔的直径和横向运动
$\lambda > 1 400$ nm	$t < 0.35$ s	1 mm	在角质层和上皮组织的热扩散
$\lambda > 1 400$ nm	$0.35 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$ $t > 10 \text{ s}$	$1.5 \times t^{3/8}$ mm 3.5 mm	在 0.35 s 后目标组织的更大热扩散和相对激光束的运动
$10^5 \text{ nm} \leq \lambda \leq 10^8 \text{ nm}$	所有 t	11 mm	为了精确测量,大于衍射极限的孔径(即约 $10 \times$)

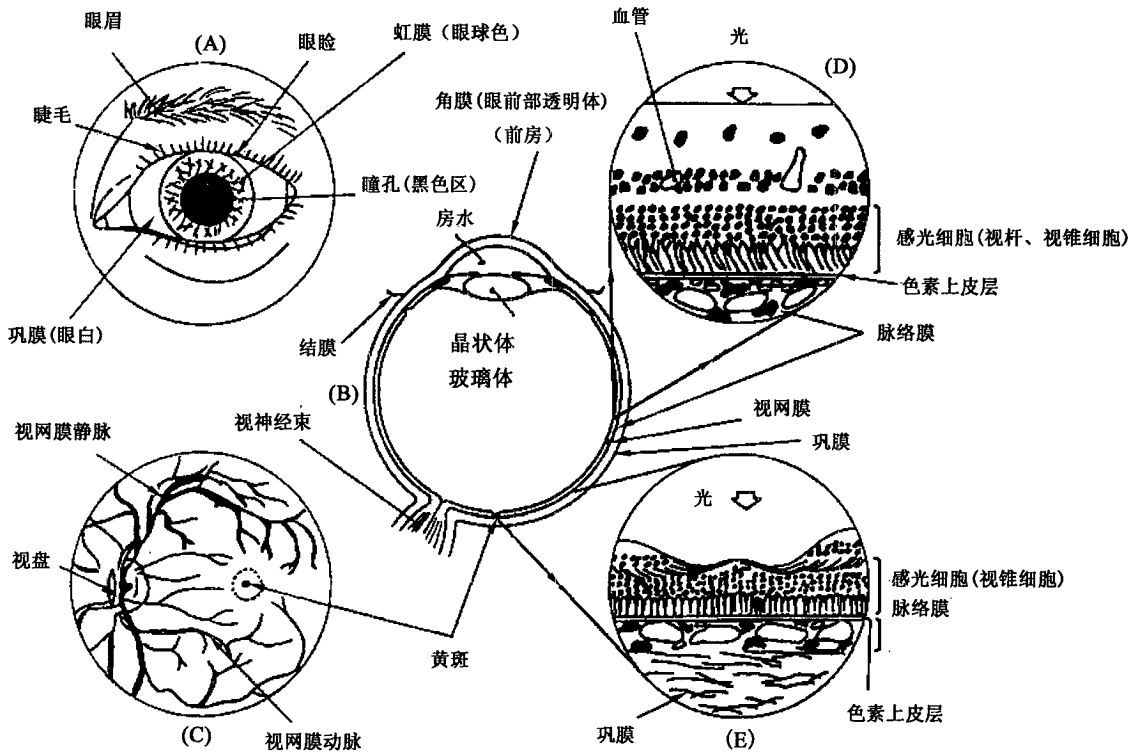
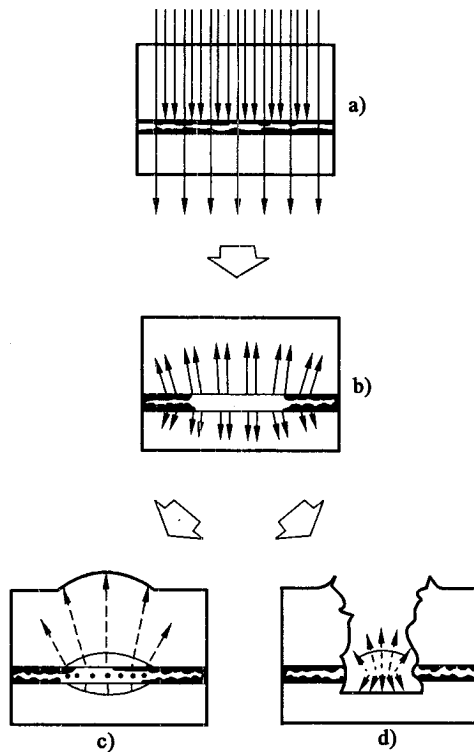


图 C.1 眼的解剖



- a) 组织吸收激光能量。
- b) 所吸收能量传导到周围的组织上使其受热。
- c) 长脉冲或连续激光所导致的热界面的扩大使损伤区域逐渐扩大。
- d) 短脉冲高峰值功率激光导致细胞崩解、组织爆裂的损伤。

图 C.2 激光辐射对生物组织损伤的示意图

C.4 参考文献

[1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm . Health Phys. 1996,71(5),804-819.

[2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Revision of guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1,4 μm . Health Phys. 79(4),431-440.

[3] NESS,J. ,ZWICK,H. A. ,STUCK,B. A. ,LUND,D. J. ,MOLCHANY,J. A. and SLINEY, D. H. Retinal image motion during deliberate fixation: implications to laser safety for long duration viewing. Health Phys. 78(2),131-142.

[4] ROACH,W. P. ,JOHNSON,P. E. and ROCKWELL,B. A. Proposed maximum permissible exposure limits for ultrashort laser pulses,Health Phys. 76(4),349-354.

[5] SLINEY,D. H. and WOLBARSHT,M. L. Safety with Lasers and Other Optical Sources, New York,Plenum Publishing Corp. ,1980.

[6] United Nations Environment Programme (UNEP); World Health Organization (WHO). International Radiation Protection Association (IRPA). Environmental Health Criteria No. 23:Lasers and Optical Radiation, Geneva, WHO,1982.

参 考 文 献

- [1] IEC 60027-1:1992, Letter symbols to be used in electrical technology—Part 1: General
- [2] IEC 60050-845:1987, International Electrotechnical Vocabulary(IEV)—Chapter 845: Lighting
- [3] IEC 60300-3-9:1995, Dependability management—Part 3: Application guide—Section 9: Risk analysis of technological systems
- [4] IEC 60601-2-22:1995, Medical electrical equipment—Part 2: Particular requirements for the safety of diagnostic and therapeutic laser equipment
- [5] IEC 60825-1 Safety of laser products—Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide
- [6] IEC 60825-2 Safety of laser products—Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)
- [7] IEC 60825-3 Safety of laser products—Part 3: Guidance for laser displays and shows
- [8] IEC 60825-4 Safety of laser products—Part 4: Laser guards
- [9] IEC 60825-5 Safety of laser products—Part 5: Manufacturer's checklist for IEC 60825-1
- [10] IEC 60825-6 Safety of laser products—Part 6: Safety of products with optical sources, exclusively used for visible information transmission to the human eye
- [11] IEC 60825-7 Safety of laser products—Part 7: Safety of products emitting infrared optical radiation, exclusively used for wireless 'free air' data transmission and surveillance
- [12] IEC 60825-8 Safety of laser products—Part 8: Guidelines for the safe use of medical laser equipment
- [13] IEC 60825-9 Safety of laser products—Part 9: Compilation of maximum permissible exposure to incoherent optical radiation
- [14] IEC 60825-10 Safety of laser products—Part 10: Application guidelines and explanatory notes to IEC 60825-1
- [15] IEC 61010-1:2001, Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use—Part 1: General requirements
- [16] IEC 61040:1990 Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation
- [17] ISO/IEC Guide 2, Standardization and related activities. General vocabulary
- [18] ISO/IEC Guide 51:1999, Safety aspects—Guidelines for their inclusion in standards
- [19] ISO 1000:1992, SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units
- [20] EN 207: Personal eye-protection. Filters and eye-protectors against laser radiation (laser eye-protectors)
- [21] EN 208: Personal eye-protection. Eye-protectors for adjustment work on lasers and laser systems (laser adjustment eye-protectors)
- [22] 1999/519/EC, Council Recommendation of 12 July 1999: On the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)
- [23] Guidelines for Limiting Exposure to Time—Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics, 1998, Vol. 74, No 4, pp 494-522

[24] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm . Health Phys. , 1996,71(5),804-819

中 华 人 民 共 和 国

国 家 标 准

激 光 产 品 的 安 全

第 14 部 分：用 户 指 南

GB/T 7247.14—2012/IEC TR 60825-14:2004

*

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 (100013)

北 京 市 西 城 区 三 里 河 北 街 16 号 (100045)

网 址 www.spc.net.cn

总 编 室：(010)64275323 发 行 中 心：(010)51780235

读 者 服 务 部：(010)68523946

中 国 标 准 出 版 社 秦 皇 岛 印 刷 厂 印 刷

各 地 新 华 书 店 经 销

*

开 本 880×1230 1/16 印 张 4.75 字 数 137 千 字

2013 年 4 月 第 一 版 2013 年 4 月 第 一 次 印 刷

*

书 号：155066·1-46888 定 价 63.00 元

如 有 印 装 差 错 由 本 社 发 行 中 心 调 换

版 权 专 有 侵 权 必 究

举 报 电 话：(010)68510107



GB/T 7247.14-2012