

激光束远距离能量分布测量及危害概率分析

陈宗礼 王登龙 徐贵道 施良顺 张桂素 钱焕文 周淑英

(北京军事医学科学院放射医学研究所, 北京)

摘要: 本文从激光安全评价出发, 介绍一种远距离激光束光斑测试方法。参照实验室激光眼损伤生物效应研究结果, 对激光束发散角, 横断面能量分布及危害概率进行了计算和分析。

Measurement of energy distribution and analysis of hazard probability of laser long distance irradiation

Chen Zongli, Wang Denglong, Xu Guidao, Shi Langshun
Zhang Guisu, Qian Huanwen, Zhou Shuying

(Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Sciences)

Abstract: To appreciate the laser-safety, we introduce a beam spot measurement method of laser long distance irradiation. According to the data of ocular injurious effect measured in laboratory, the divergence of laser beam, the energy distribution of laser cross section and the hazard probability of laser beam are calculatively analyzed.

激光技术野外应用日趋广泛, 激光测距、激光通讯、激光雷达、激光目标指示器等装备日益增多, 使用安全是面临的重要问题之一, 特别是由于眼对激光的聚焦作用, 低剂量的照射便会引起眼的严重损伤。

野外激光束通过远距离大气传输主要产生两种效应: 一是大气中各种气体分子、气溶胶对光波的吸收、散射作用造成的能量衰减; 二是由于大气温度、湿度、压强和密度的不均匀性形成大气湍流, 大气折射率随机变化, 从而使光波参量振幅和相位随机起伏, 造成光束闪烁、分裂、漂移、弯曲、扩展、象点抖动以及引起光束偏振状态改变、空间相干性降低等大气湍流效应, 这样使野外远距离激光束特性变得很复杂, 其中激光束发散角、光斑大小及光束横断面能量分布是描述激光器输出特性的重要参数。可以想象, 研究野外远距离光束特性是一项复杂而困难的工作, 须花费相当大的人力物力。本文介绍一种野外远距离激光束光斑测量方法, 并从安全角度出发, 对激光束发散角、横断面能量分布、激光对眼的危害概率及范围进行了计算分析, 与野外兔眼损伤实验进行了比较, 方法简单、直观、影响误差因素少, 其内容对野外激光安全防护和军事应用是十分有价值的。

一、材料和方法

为记录远距离激光束光斑完整轮廓,描述光束横断面能量分布状态,基于照相原理,据不同波长激光,选取合适波长响应、合适灵敏度及合适尺寸胶片,并据所用胶片制做密封装置,以防胶片曝光。本文研究内容主要是用可见光敏感胶片对Nd:YAG倍频 $0.53\mu\text{m}$ 绿光的研究结果。实际上倍频后光束中仍含有 $1.06\mu\text{m}$ 激光成分,但胶片对 $1.06\mu\text{m}$ 红外激光不敏感。

测量在夜晚进行,通过多次实验用 $50\text{cm}\times 60\text{cm}$ 及 $100\text{cm}\times 120\text{cm}$ 大张胶片,对野外远距离光斑进行1:1地记录,可得到直观、真实的远距激光斑轮廓。测量时,在选定距离,放置一足够大的靶板,调整激光器,瞄准靶标,使光束轮廓位于靶板中心,然后把已准备好的胶片放在靶板相应位置,正对激光辐射方向,开动激光器,发射单脉冲,使胶片曝光。

将已曝光胶片进行显影处理,严格掌握显影条件,保证胶片处于特性曲线线性范围之内,为定量分析激光束特性,测量时需进行以下工作:(1)详细记录当时大气能见度、温度、湿度、风力等气象条件;(2)进行能量标定,一种方法是在胶片曝光后,用能量计在光束横断面内反复进行测量,找出光束热斑中辐照能量最强点,即测出光束中最强热点的激光辐照量。另一方法是用分束法测出取样光束分束比,然后一束光做监测,一束光用无镜头相机进行曝光,记下曝光辐照量 H_x 标,所用胶片与大张胶片特性相同,把用照相机拍摄的标准取样光斑同野外所测光斑轮廓一起进行显影处理;(3)测出激光输出总能量及倍频后光束中所含 $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 激光比例。

二、远距离实测光斑及光束发散角估算

野外远距离光束能量分布与光束模式、束散角大小密切相关。由于光束本身能量分布不均匀以及大气传输、大气湍流影响,特别是大气闪烁引起明显的热斑效应,使远距离光斑变成网状,图1~图4是在 $0.8\text{km}\sim 2.5\text{km}$ 不同距离、不同气象条件下所测的典型光斑轮廓,图5是在 5.4km 处所测的局部光斑。

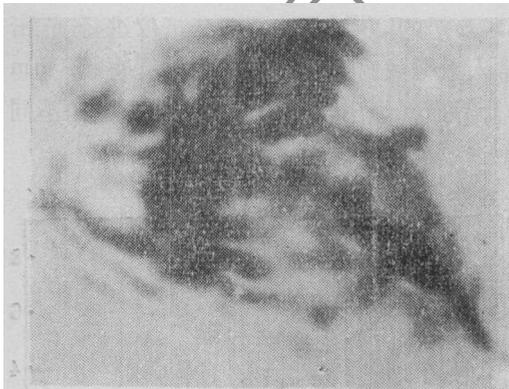


图1 My-I 激光器 0.8km 处光斑



图2 My-I 激光器 2.5km 处光斑

测量、计算发散角的方法有多种,本文由不同距离所测光斑尺寸,据能量相对集中部分可直观地用(1)式估算光束发散角 θ ,大致确定激光束的方向性及在不同距离的能量分布范围。

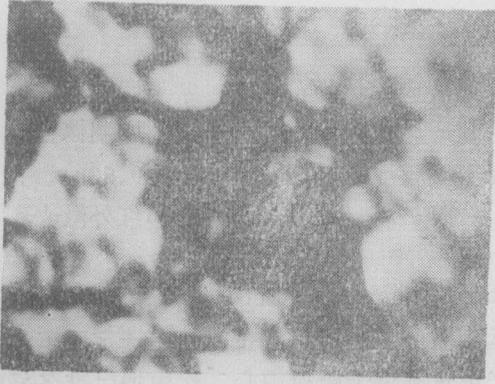


图3 MG-I 激光器1km处光斑

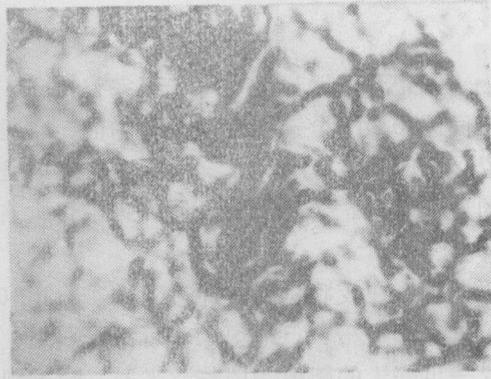


图4 MG-II 激光器2.15km处光斑

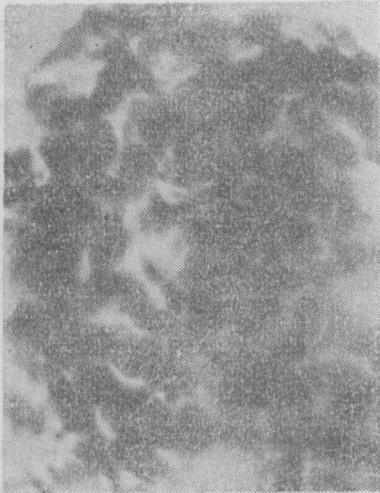


图5 MG-II 激光器5.4km处部分光斑

$$\theta = \frac{a_2 - a_1}{R_2 - R_1} \times 10^{-3} (\text{rad}) \quad (1)$$

式中, R_1, R_2 为激光束传输距离, a_1, a_2 分别为相应距离的光斑直径。

从安全角度出发, 光斑直径 a 应取辐照量为最大辐照量 $1/e$ 处所对应的直径, 实际上因远距光斑很不规则, 光斑真实尺寸很难确定, 所以只能估算, 但对安全评价, 对工程应用来说是很有意义的。由所测光斑得出实验所用激光器光束发散角小于 0.5 mrad 。

三、光密度测试

在野外记录的远距光斑尺寸很大, 从 $800 \text{ m} \sim 2500 \text{ m}$ 中心光斑约为 $180 \text{ mm} \sim 600 \text{ mm}$, 为计算整个光束横断面能量分布, 首先用英国剑桥仪器公司的 QTM-970 图象分析仪进行光密度测试^[1]。为便于危害分析, 测光密度时, 以正常人散瞳或暗适应情况下的瞳孔直径 7 mm 做为仪器扫描光束光斑直径, 对拍摄的大张胶片进行扫描, 给出与激光辐照量成正比的不同的

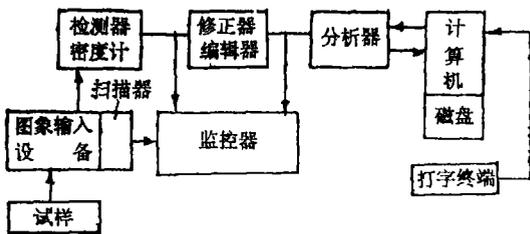


图6 QTM 图象分析仪方块图

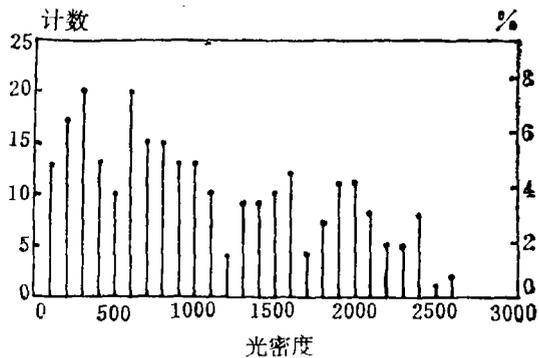


图7 图象分析直方图

等级光密度值,图6为图象分析仪工作方块图,图7是按不同等级光密度测试结果给出的直方图,图中所示是2.15km处1/4个光斑的测试结果。

四、激光束能量分布概率计算

由于大气闪烁引起明显的热斑效应,远距离光斑空间能量分布很不均匀,从安全角度考虑,湍流作用在确定激光安全距离方面是一个不确定的变量,一方面湍流存在各湍流区对自身局部光束起衍射作用,引起光束扩展,束散角增大,据文献报导,如传输距离增加R,则光束扩展量值约为 $R^{3/2}$,这样光束照射眼后,网膜象增大,网膜象能量密度减小,因而会降低眼危害,由图5看出在5.4km处热斑比近距离明显增大;相反,在有些情况下,光束通过湍流区会像使用光学仪器那样,使激光发散角减小,甚至减小到0.3mrad以内形成点光源,对眼的危害距离明显增加。

对初始直径为a,束散角为θ的高斯圆光束,在距激光器输出端为R处的激光辐照量H(J/cm²)或辐照度E(W/cm²)可用公式(2),(3)进行理论计算

$$H = 1.27Qe^{-\mu R} / (a + R\theta)^2 \quad (2)$$

$$E = 1.27\Phi e^{-\mu R} / (a + R\theta)^2 \quad (3)$$

式中,Q,Φ,μ分别为激光器输出总能量(J)、总功率(W)及大气衰减系数。大量野外测试表明远距热斑中的最强点辐照量(或辐照度)远大于理论值,表1是对一台输出约100mJ,发散角2mrad Nd:YAG激光测距机的理论和实测结果^[2]。

表1 测距机远距实测和理论计算辐照量比较

距离 (m)	实测辐照量 (J/cm ²)	理论计算辐照量 (J/cm ²)
50	1.27×10^{-2}	9.97×10^{-4}
100	4.11×10^{-3}	2.89×10^{-4}
150	2.46×10^{-3}	1.36×10^{-4}
220	5.59×10^{-4}	6.25×10^{-5}
300	2.20×10^{-4}	3.41×10^{-5}
400	6.31×10^{-5}	1.91×10^{-5}

为研究野外激光束不同距离对眼的危害,

本文用最经济的胶片记录法,据记录光斑时在相同距离、相同气象条件下标定的激光辐照量及用图象仪所测光密度值可算出相应距离光斑内不同辐照量水平的能量分布概率。计算能量分布的关键是保证记录光斑在显影处理时不能饱和,使所测光密度值都在胶片特性曲线线性范围内,即光密度值与激光辐照量成正比。由前所述,因标定方法不同能量分布计算方法亦有两种:一是测出标准取样光密度 $D_{\lambda标}$,

因 $D_{\lambda标}$ 所对应激光辐照量 $H_{\lambda标}$ 已知,则由图象仪所测各点光密度值用公式(4)可直接算出能量分布,称这种方法为绝对法;第二种方法是相对法,据野外相应距离所测光斑热点最大辐照量 $H_{\lambda max}$ 和所测光斑中最大光密度值 $D_{\lambda max}$ 及任意点光密度值 D_i 用公式(5)亦可算出能量分布:

$$\frac{D_{\lambda标}}{H_{\lambda标}} = \frac{D_i}{H_i} \quad H_i = \frac{H_{\lambda标}}{D_{\lambda标}} \cdot D_i = A_1 D_i \quad (4)$$

$$\frac{D_{\lambda max}}{H_{\lambda max}} = \frac{D_i}{H_i} \quad H_i = \frac{H_{\lambda max}}{D_{\lambda max}} \cdot D_i = A_2 D_i \quad (5)$$

表2、表3是用相对法对MG-I, MG-II(图3和图4)激光器在1km和2.15km处,束散角约0.3mrad相应光斑能量分布计算结果,

表2 MG-I 激光器1km处光斑能量分布

0.53μm激光辐照量 (μJ/cm ²)	辐照量分布比例 (%)	注
3.3~13.6	19.8	能见度
13.6~23.2	13.1	7km
23.2~33.1	11.8	
33.1~43.1	9.8	
43.1~53.1	10.2	
53.1~66.3	12.3	
66.3~76.3	7.5	
76.3~86.3	8.3	
86.3~92.6	3.5	
92.6~99.4	3.6	

表3 MG-II 激光器2.15km处光斑能量分布

0.53μm激光辐照量 (μJ/cm ²)	辐照量分布比例 (%)	注
1.82~7.27	8.9	能见度
7.27~12.71	8.4	20km
12.71~18.16	11.1	
18.16~23.61	9.4	
23.61~29.06	8.8	
29.06~34.51	8.7	
34.51~39.96	10.5	
39.96~45.40	10.6	
45.40~50.85	20.2	
50.85~54.48	3.3	

五、野外远距离激光束危害概率分析

这里所指危害概率,是根据野外远距光斑能量分布和激光阈值研究结果,在整个光斑内寻求眼损伤阈(或损伤辐照量)水平以上能量分布的百分比,评价激光束对人眼危害概率及危害范围,同样可根据激光安全标准研究远距激光束的安全概率和范围。

表4是实验室用0.53μm倍频光的阈值研究结果^[1],由该结果经加权回归取得眼损伤剂量 E_{D1} , E_{D50} 值,表5是据阈值和不同距离能量分布对远距光斑危害概率的推算,并与兔眼野外生物效应实验进行了比较。

表4 0.53μm激光眼损伤阈值

种属	分组	平均角膜辐照量 (J/cm ²)	眼损伤 (%)	注
	1	1.44×10^{-5}	0	$E_{D1} = 0.99$
	2	1.824×10^{-5}	15.9	$\times 10^{-5}$
	3	2.265×10^{-5}	14.6	(J/cm ²)
兔	4	2.826×10^{-5}	34.5	$E_{D50} =$
	5	3.592×10^{-5}	40.7	$3.92 \times$
	6	4.408×10^{-5}	58.8	10^{-5}
	7	5.551×10^{-5}	69.2	(J/cm ²)
	8	7.005×10^{-5}	86.2	

表5 野外激光束光斑危害概率

型号	距离 (km)	能见度 (km)	0.53μm激光 $\geq E_{D1} \geq E_{D50}$		
			光最大辐照量 (μJ/cm ²)	辐照量 (%)	E_{D50} 辐照量 (%)
MG-I	1.0	7.0	99.4	81	52.7
MG-II	2.15	20	54.4	82.6	40.2

据表5 MG-I 激光器在1km处光斑内,大于兔眼 E_{D1} 、 E_{D50} 辐照量比例分别为81%, 52.7%,在相应距离进行束内兔眼损伤实验,损伤发生率为54.5%,在2.15km处光斑能量

分布大于 E_{D1} 、 E_{D50} 辐照量分别为82.6%和40.2%,兔眼损伤实验损伤率25.4%,应说明的是生物实验未在整个光斑范围内进行,所提供损伤发生率是在局部热斑的照射结果,两者条件不同,但可看出,实验和计算结果不矛盾。

六、讨 论

1. 大气湍流在地面处影响严重, 湍流大小由大气折射率结构常数 C_N 确定, C_N 随时都在变化, 它主要与地面温度梯度有关, 其变化范围为 $5 \times 10^{-8} \text{m}^{-1/3} \sim 10^{-6} \text{m}^{-1/3}$, 在天气晴朗、太阳辐射强、地面热气上升时湍流最大, 而在冷天、云天及夜晚湍流减弱, 在风天, 风把空气混合, 可看到因风吹湍流区很快跨过光束, 使闪烁斑随风起伏, 引起能量分布不规则变化, 一般闪烁斑大小常用横向相关距离($\sqrt{\lambda R}$)来表示^[4], 即随着光束传输距离 R 增加, 热斑随 R 与波长 λ 乘积的平方根增大, 图5是在5.4km处所测部分光斑, 热斑效应比近距离更明显。另外在近距离, 在高度超过地面10m以上时, 湍流影响变小, 可见在空中或地对空发射激光时, 激光束湍流效应比地面小得多。

2. 提高结果可靠性的关键是胶片显影条件要严格控制, 使所测光密度值在胶片特性曲线线性范围内, 其次由于在野外影响激光器输出稳定性的因素较多, 标定时应仔细并反复进行测量, 以便适合工程应用。

3. 本文主要叙述了用可见光胶片记录光斑的方法, 对近红外、远红外波段记录更困难, 对 $1.06\mu\text{m}$, $10.6\mu\text{m}$ 激光, 在实验室曾进行初步研究并建立了相应方法, 但未在野外采用。

参 考 文 献

- [1] 张振声. 图象分析. 军事医学科学院仪器测试中心, 1985: 3
- [2] 陈宗礼. 激光技术, 1987; 11(2): 38
- [3] 徐碣敏, 周淑英, [胡富根] *et al.* 中国激光, 1985; 12(10): 618
- [4] Sliney D, Wolbarsht M. Safety with lasers and other optical sources - A comprehensive handbook, Plenum Press, N.Y. and London, 1980: 415

作者简介: 陈宗礼, 男, 1934年4月出生。高工。现从事激光测量及防护的研究工作。

收稿日期: 1991年12月17日。 收到修改稿日期: 1992年3月30日。

• 产品简介 •

圆对称高斯光束的激光二极管

Uniphase公司最近推出了具有气体激光那样高光束质量的激光二极管, 其特点是: 光束分布为高斯型, 圆对称, 并且无象散。该激光二极管经精密装调而得, 光束极稳定, 低噪声, 寿命长并且可直接进行高频TTL及模拟调制。

译自LF World, 1992, 28(6): 1 巩马理 译 卢中尧 校