

## 激光辐照量（或激光辐照度）的估算与测量

陈宗礼

（军事医学科学院放射医学研究所）

本文从安全评价出发，简要地叙述了激光远距离辐照量（辐照度）的理论估算方法，大气传输对光强分布的影响，并以测距机为例将理论计算与实测结果进行了比较。

由于激光技术应用日益广泛，激光伤人事故时有发生，激光安全要十分重视，尤其激光技术在军事上已成为战略、战术装备的基本工具，诸如测距、制导、通讯、雷达以及激光模拟等，这些装备在野外使用时，确定安全使用距离是很重要的，而确定安全距离必须知道激光束在不同距离的功率密度（或能量密度），即不同距离的激光辐照度（ $W/cm^2$ ）或辐照量（ $J/cm^2$ ），本文简述估算与测量该量值的基本方法。

### 一、理论计算公式

有关文献对高斯光束的近场和远场光束特征已有完整而确切的理论公式来描述，但那些公式用于安全卫生评价往往不适用，在实践中常用以下近似公式（如图1），假设激光器发射光束的初始直径为 $a$ ，发散角为 $\phi$ ，那么，在距离 $R$ 处截取的圆锥形光束，端面光束直径为 $D_L$ ，因激光束方向性强，束散角小（一般在毫弧度量级）角度的正弦和正切值近似等于角度的大小，（即 $\sin\beta \approx \tan\beta \approx \beta$ ），所以距离 $R$ 处的光束直径：

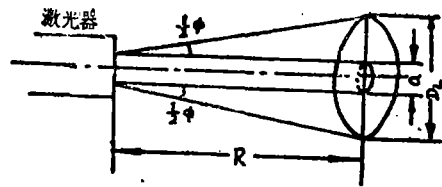


图1 发散激光束

$$D_L = a + R \frac{\phi}{2} + R \cdot \frac{\phi}{2} = a + R \phi \quad (1)$$

这样很容易导出不同距离 $R$ 时的辐照度（或辐照量）公式：

对圆光束：

收稿日期：1986年9月8日。

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\pi (a + R\phi)^2 / 4} = \frac{1.27\Phi}{(a + R\phi)^2} \quad (2)$$

同理

$$H = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi (a + R\phi)^2 / 4} = \frac{1.27Q}{(a + R\phi)^2} \quad (3)$$

式中，E和H分别为在距离R处光束截面的辐照度(单位是W/cm<sup>2</sup>)和辐照量(单位是J/cm<sup>2</sup>)，Φ、Q分别为激光器输出总功率(W)和总能量(J)，S为光束截面积。应指出的是：在一般情况下光束直径的大小是在峰值功率的1/e<sup>2</sup>点确定，而对安全使用则取峰值功率的1/e<sup>0</sup>点。另外考虑到激光束通过大气传输辐照度随距离呈指数衰减的因素(2)、(3)式应改为：

$$E_0 = 1.27\Phi e^{-\mu R} / (a + R\phi)^2 \quad (4)$$

$$H_0 = 1.27Q e^{-\mu R} / (a + R\phi)^2 \quad (5)$$

式中，μ为大气衰减系数，它是激光束通过介质传输的散射系数和吸收系数之和，在晴朗天气对0.6943μm红宝石及1.06μm Nd:YAG波长μ约为1.5×10<sup>-6</sup>cm<sup>-1</sup>，对氩离子0.488μm和0.514μm兰绿光，其特征衰减系数是2.5×10<sup>-6</sup>cm<sup>-1</sup>。

对具有长轴a<sub>1</sub>，短轴a<sub>2</sub>并且相应长轴和短轴发散角分别为φ<sub>1</sub>、φ<sub>2</sub>的椭圆激光束(4)、(5)式应改为：

$$E_{e1} = 1.27\Phi e^{-\mu R} / (a_1 + \phi_1 R)(a_2 + \phi_2 R) \quad (6)$$

$$H_{e1} = 1.27Q e^{-\mu R} / (a_1 + \phi_1 R)(a_2 + \phi_2 R) \quad (7)$$

对光束尺寸分别为A、B相应发散角为φ<sub>1</sub>、φ<sub>2</sub>的矩形或方形激光束轮廓，辐照度(或辐照量)公式为：

$$E = \Phi e^{-\mu R} / (A + R\phi_1)(B + R\phi_2) \quad (8)$$

$$H = Q e^{-\mu R} / (A + R\phi_1)(B + R\phi_2) \quad (9)$$

以上公式可供激光器设计、使用人员对远距激光辐照度(或辐照量)估算做参考，可根据安全标准的最大允许辐照量推算激光装置的安全使用范围。

## 二、野外激光束远场辐照度分布

实际上，上述各种规正的光束轮廓很难找到，一是大多数激光器为多模激光器，输出光



图2 远场激光束能量分布

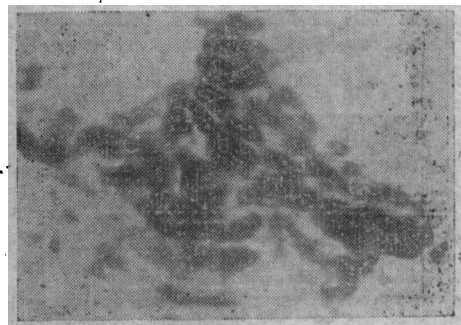


图3 远场激光束能量分布

束本身就不规则, 光束横截面能量分布很不均匀; 其次, 既是输出单横模高斯分布的圆光束在通过地面大气传输后, 由于空气温度、湿度、压强和密度的不均匀性形成大气湍流、大气折射率随机起伏, 激光束产生闪烁、扩展、漂移等现象, 在有风时, 风把空气混合, 使湍流区很快跨过光束, 闪烁斑随风起伏; 使光束轮廓不规则变化, 能量分布相差显著, 图2、3是对一台束散角约  $0.2\text{mrad}$  的近似单模激光器在远距实测光束轮廓。两光斑是同一激光器在同样距离上不同时间测试的, 由图知道大气湍流引起的热斑效应很明显, 从安全角度出发, 在确定安全距离时主要应考虑光束中热点的作用, 用照相法, 通过标定“子光束样品”, 把定标样品和远场光束轮廓一起冲洗, 严格控制显影条件就

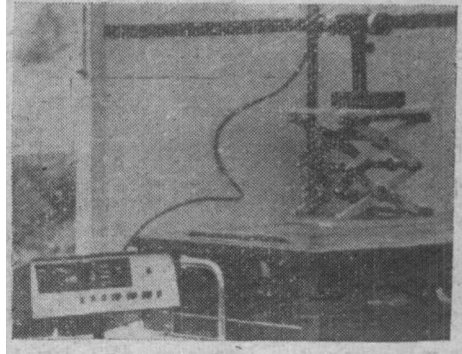


图4 远场辐照量测试

可从能量分布图分析光密度变化求出不同区域的光束辐照度(或辐照量)分布, 也可求出在超过平均辐照度某一值时的概率分布, 为确定安全距离提供依据。

### 三、不同距离激光辐照度(或辐照量)的测量

实践中为确定安全距离, 一般是在不同距离直接测量辐照度, 将中心标有十字线上下可调的靶标置于不同距离实验点, 用激光装置瞄准系统瞄准靶标十字中心, 选适当量程测试仪器置于相应位置进行能量测量, 因从激光安全角度出发应寻找光束中辐照量最强点, 即要在“热点”上测量辐照量, 测试时在激光器以某一重复频率发射激光情况下, 在光束截面内慢慢移动探测器, 反复测量, 根据显示值大小找出辐照量最强点, 以该处的剂量为所测距离辐照量, 为减少测量误差, 测量数据应足够多(图4)。把不同距离的测试结果对实测时的大气能见度进行归一化修正, 用计算机进行回归分析, 可给出随距离而变化的辐照量拟合方

表1

表2

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

距离 (m)	实测辐照量 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )	理论计算值 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )
5	$5.92 \times 10^{-3}$	$2.82 \times 10^{-3}$
9.85	$4.24 \times 10^{-3}$	$1.85 \times 10^{-3}$
50	$1.98 \times 10^{-3}$	$2.84 \times 10^{-4}$
70.5	$1.13 \times 10^{-3}$	$1.65 \times 10^{-4}$
100	$6.92 \times 10^{-4}$	$9.13 \times 10^{-5}$
130	$4.95 \times 10^{-4}$	$5.74 \times 10^{-5}$

程, 表1、表2为两台测距机实测和理论推算的比较, 表1数据的测距机输出能量  $105\text{mJ}$ ,

出口光束直径16mm, 发散角 2 mrad, 另一台输出能量9.79mJ, 发散角 1 mrad, 出口光束直径16mm, 测试和推算都是以能见度为23.5km标准晴朗天气为基础的。据表 1、表 2 绘出图 5、6 曲线, 可见实测辐照量一般要高于推算值, 理论计算只是近似估算, 因做的工作不多, 尚不能做更多的结论。

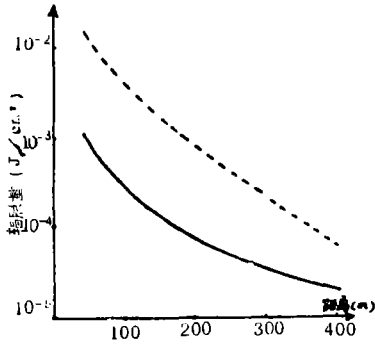


图 5 ...实测辐照量; ——理论计算值

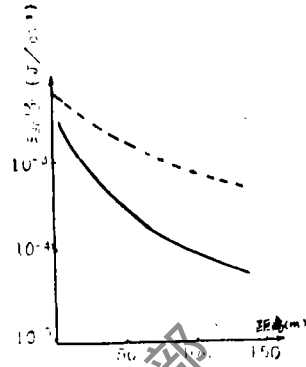


图 6 ...实测辐照量; ——理论计算值

### 参 考 文 献

- [1] American National Standard for the Safe Use of Lasers, Z-136,1-1980.
- [2] Sliney D et al., Safety with Lasers and other Optical Sources A Comprehensive Handbook, Plenum Press, N.Y., 1980.
- [3] 徐贵道等, 八四式激光测距仪安全实验, 1985年。
- [4] 陈宗礼等, W316工程激光测距机安全实验, 1985年。

## Computation and measurement of far distance laser radiant exposure (irradiance)

Chen Zongli

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

### Abstract

For the sake of safety evaluation, methods of computation and measurement of laser radiant exposure (irradiance), the effect of atmospheric propagation on beam intensity distribution were discussed briefly in this paper. Using laser rangefinders as examples, the calculation values of radiant exposure were compared with those measured.