

一种海基应用大功率激光器目标功率密度计算方法

周海渊 徐如祥 仇晓静 李仁龙 赵李健
中国卫星海上测控部 江苏 江阴 214431

摘要: 目前激光照射功率密度计算方法都基于经典理论公式,该方法计算结果与实际情况存在一定误差,尤其对海基复杂环境应用大功率激光器功率密度的影响条件考虑不全面,导致计算结果更加不准确。针对上述问题,提出了一种海基应用大功率激光器目标功率密度计算方法。该方法结合光学系统离焦影响、大气湍流对光束扩展影响精确了理想模型激光光斑模型,在此基础上基于光束无抖动目标照射功率密度模型,融合光束抖动影响,计算光束抖动目标照射功率密度。

关键词: 激光器;目标功率密度;激光光斑模型;大气湍流

1 引言

目前激光目标照射功率密度计算方法都基于经典理论公式,其原理清晰、计算便捷,但是该方法主要存在以下缺陷:一是在假设理想条件下进行计算,结论过于理想化;二是忽略光学系统自身离焦特性影响,没有考虑光斑弥散效应;三是没有结合激光器应用环境,对特定应用环境下的大气湍流、大气抖动等因素考虑不细致,导致计算结果不够准确。

针对上述问题,综合考虑多方面因素完成功率密度计算,提出了一种海基应用大功率激光器目标功率密度计算方法。该方法能够较为准确的计算激光器目标功率密度,能够为激光器设计提供目标功率密度理论计算依据,具有较强的应用价值。

2 理想激光光束艾利斑直径

2.1 艾利斑直径

当光学系统出射的激光为理想光束时,会聚的光斑直径近似为艾利斑直径^[1],即:

$$d_{airy} = \frac{2.44\lambda L}{D} \quad (1)$$

式中:

λ ——激光波长;

D ——光学系统的口径;

L ——光学系统到作用位置的距离。

2.2 激光束散角

此外,出射激光光束存在一定大小的束散角,定义为:

$$\theta = \frac{4\lambda M^2}{\pi\omega_0} \quad (2)$$

式中:

M^2 ——激光光束传输因子;

ω_0 ——激光光束束腰直径;

λ ——激光波长;

θ ——激光光束远场束散角。

由光束束散角引起的弥散斑直径为:

$$d_\theta = \theta L \quad (3)$$

式中:

L ——光学系统到作用位置的距离;

θ ——激光光束远场发散角^[2]。

2.3 理想激光光束的光斑直径为:

$$d_0 = d_\theta + d_{airy} \quad (4)$$

3 理想激光光斑直径影响分析

3.1 光学离焦对光斑直径影响

离焦弥散斑由于目标测距误差、光学调焦误差等因素,作用在目标上的激光会聚光束通常的是处于离焦状态^[3]。离焦位置误差计算公式为:

$$\Delta x = \frac{\lambda f^2}{2D^2} \quad (5)$$

式中:

D ——光学系统的口径;

f ——焦距。

结合目标距离和光学系统焦深范围可以计算一倍焦深离焦弥散斑直径误差大小 d_1 。

$$d_1 = \frac{D^2 L \Delta x}{2f^2 \lambda} \quad (6)$$

Δx ——离焦位置误差;

f ——焦距;

λ ——激光波长;

D ——光学系统的口径。

作者简介: 周海渊(1982-),男,本科,高级工程师,从事光学测量设备应用研究。E-mail: 562798794@qq.com

3.2 大气湍流对光束扩展影响

大气中湍流涡旋会引起光束扩展, 经验计算公式为:

$$\theta_z = \theta_0^{1/3} C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L^{1/6} \quad (6)$$

式中:

θ_0 ——初始发散角;

C_n^2 ——大气湍流系数;

L ——光学系统到作用位置的距离;

λ ——激光波长。

结合大气湍流模型参数、目标距离, 可以计算光束扩散角和湍流引起的光斑直径误差大小 d_2 。

$$d_2 = 1.59 \cdot d_0^{1/3} C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L^{5/2} \quad (8)$$

d_0 ——理想激光光斑直径;

C_n^2 ——大气湍流系数;

L ——光学系统到作用位置的距离;

λ ——激光波长。

3.3 光斑总直径

综上光学系统衍射极限、激光束散角、光学系统离焦以及大气湍流光束扩展共同影响激光光束在目标上照射的光斑总直径 d_s 。

这些因素是直接叠加影响^[4], 即:

$$d_s = d_0 + d_1 + d_2 \quad (7)$$

4 激光目标照射功率密度计算过程

4.1 光束无抖动模型

光束没有抖动情形下, 激光辐射到目标上的功率密度, 定义为:

$$E_e = \frac{d\phi}{dA} \quad (8)$$

式中 $d\phi$ ——光束目标会聚处辐射功率;

dA ——光束目标会聚处面积^[5]。

目标上的会聚光束近似为高斯光束, 在上述计算的光斑直径范围内会聚的光束能量约为总能量86.5%, 即:

$$d\phi = 0.865 \times P_0 \times (1 - \tau_1) \times (1 - \tau_2) \times e^{-\alpha L} \quad (9)$$

式中: P_0 ——激光器光束出射功率;

τ_1 ——光学系统能量损耗;

τ_2 ——大气传播能量损耗;

L ——作用距离;

α ——大气衰减系数。

据此可计算无抖动情形下光斑直径范围内的光束对目标平均照射功率密度。

4.2 光束抖动模型

(1) 大气湍流中大尺度的湍流涡旋导致激光光束随

机晃动, 产生光束漂移。光束漂移均方根大小近似为:

$$\sigma_e = \sqrt{1.75 C_n^2 L D^{-1/3}} \quad (10)$$

式中:

L ——光学系统到作用位置的距离;

D ——光学系统的口径;

C_n^2 ——大气湍流系数。

(2) 跟踪抖动使得出射光束的指向点不是恒定点, 导致目标上的光束也同样在随机晃动, 晃动角均方根与跟踪误差均方根 σ_s 一致。

(3) 由于光束漂移与跟踪抖动相互独立且共同作用, 用它们方差和表示光束抖动角均方根, 即:

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_s^2} \quad (11)$$

式中:

σ_e ——光束漂移均方根;

σ_s ——跟踪误差均方根。

(4) 在目标处由光束抖动产生的光斑位移均方根为:

$$r_j = \sigma_j L \quad (12)$$

式中:

σ_j ——光束抖动角均方根;

L ——光学系统到作用位置的距离。

(5) 在统计意义下, 光束抖动造成的目标照射光斑直径增大, 此时光斑直径为:

$$d = 2\sqrt{d_s^2 / 4 + r_j^2} \quad (13)$$

式中:

d_s ——光斑总直径;

r_j ——光斑位移均方根。

由此可得到光束抖动引起的光斑直径。

按照上述无抖动目标照度计算公式, 计算光束抖动情形下光斑直径范围内目标平均照射功率密度。

5 对某型激光器仿真及功能验证

5.1 某型激光器设计参数

激光器光束出射功率: $P_0 = 20\text{kW}$; 激光光束传输因子: $M^2 = 2$; 光学系统到作用位置的距离:

$L = 300、500、800、1000、1500\text{m}$; 光学系统的口径 $D = 240\text{mm}$; 激光波长 $\lambda = 1080\text{nm}$;

光学系统能量损耗 $\tau_1 = 0.107$; 大气传播能量损耗 $\tau_2 = 0.1$; 跟踪误差均方根 $\sigma_s = 10\mu\text{rad}$;

激光光束束腰直径 ω_0 近似为光学系统口径240mm; 大气湍流系数 C_n^2 采用中湍流强度模型数据;

功率设计需求: 距离1000m, 大气湍流系数 $C_n^2 = 10^{-16}$, 标准大气条件下, 激光功率平均密度不小于 $1500\text{W}/\text{cm}^2$;

5.2 理想激光光束光斑大小

计算不同目标距离下艾利斑直径如表1所示，可以看出，艾利斑直径随着距离的增大而增大。

表1 不同目标距离下激光会聚光束的艾利斑直径

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
艾利斑直径(mm)	3.294	5.49	8.784	10.98	16.47

计算激光光束束散角为11.46 μ rad。

计算不同目标距离下理想激光光束的光斑直径如表2所示，光斑直径随着目标距离增大而增大。

表2 理想激光光束的光斑直径

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
光斑直径(mm)	6.732	11.22	17.95	22.44	33.66

5.3 光学离焦对光斑直径影响

不同距离下光学系统焦深范围和一倍焦深离焦时弥散斑直径误差大小 d_1 如表3所示^[6]。

表3 不同距离光学系统焦深范围及一倍焦深离焦光斑直径误差

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
一倍焦深范围(m)	3.375	9.375	24	37.5	84.375
一倍焦深处光斑直径误差(mm)	2.7	4.5	7.2	9	13.5

5.4 大气湍流对光束扩展影响

大气湍流强度可以分为弱湍流、中湍流和强湍流三类，对应的 C_n^2 值如表4所示。

表4 三类大气湍流强度

弱湍流	$C_n^2 < 10^{-16}$
中湍流	$10^{-16} < C_n^2 < 10^{-14}$
强湍流	$C_n^2 > 10^{-14}$

激光器在海上使用，用中湍流强度计算光束扩散角和湍流引起的光斑直径 d_2 如表5、表6所示。

表5 光束扩散角和光斑直径 ($C_n^2 = 10^{-16}$)

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
光束扩散角(μ rad)	0.48	0.658	0.872	0.997	1.271
弥散斑直径(mm)	0.145	0.3288	0.6975	0.9968	1.9071

表6 $C_n^2 = 10^{-14}$ 的光束扩散角和光斑直径 ($C_n^2 = 10^{-14}$)

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
光束扩散角(μ rad)	4.64	10.4	13.82	15.8	20.15
弥散斑直径(mm)	2.3	5.21	11.06	15.8	30.23

光学系统衍射极限、激光束散角、光学系统离焦以及大气湍流光束扩展共同影响激光光束在目标上照射的光斑直径 d_3 如表7所示。

表7 多种因素共同影响的照射光斑直径

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
$C_n^2 = 10^{-16}$ 光斑直径(mm)	9.577	16.048	25.85	32.44	49.07
$C_n^2 = 10^{-14}$ 光斑直径(mm)	11.73	20.93	36.21	47.24	77.38

5.5 光束无抖动目标照射功率密度

无抖动情形下光斑直径范围内的光束对目标平均照射功率密度如表8所示。

表8 光束无抖动时目标照射光斑直径范围平均照射功率密度

目标距离(m)	300	500	800	1000	1500
$C_n^2 = 10^{-16}$ 平均照(W/cm ²)	20779	7245.4	2705.9	1682.7	697.6
$C_n^2 = 10^{-14}$ 平均照(W/cm ²)	13843	4259.3	1379.2	793.36	280.46

综合考虑影响海基应用大功率激光器目标功率密度的影响因素，结合光学系统离焦和大气湍流对激光光斑直径的影响，精确了激光光斑经典理论公式模型，在此基础上基于光束无抖动目标照射功率密度模型，对光束抖动影响进行分析，推导出光束抖动目标照射功率密度计算方法。该方法能够较为准确的计算激光器目标功率密度，能够为激光器设计提供目标功率密度理论计算依据，具有较强的应用价值。

参考文献

- [1]施双双,戈延林,陈林根.不可逆Otto循环功率密度分析与多目标优化[J].中国科学:技术科学,2022,52(11):1716-1728.
- [2]贺锋涛,郭少辉,王瑞娜,等.背景光干扰下水下激光光斑中心定位方法研究[J].激光与光电子学进展, 2025, 62(05):46-54.
- [3]张可人,李夕雯,冯祥.基于视觉特性的激光光斑图像分割方法研究[J].激光杂志,2023,44(09):114-119. DOI:10.14016/j.cnki.jgzz.2023.09.114.
- [4]耿旭昭.基于改进四阶偏微分方程的激光光斑图像去噪模型[J].工业控制计算机,2022,35(05):96-98.
- [5]张皓洋,杨美霞,岳通,等.战术激光武器的发展与分析[J].激光杂志,2025,46(03):8-14.DOI:10.14016/j.cnki.jgzz.2025.03.008.
- [6]秦文钊,沈宇凯.激光器温度非线性自抗扰控制方法研究[J].激光杂志,2024,45(12):219-223.DOI:10.14016/j.cnki.jgzz.2024.12.219.
- [7]闫丽娟,梁冰.大气湍流下激光通信的波前还原研究[J].光学技术,2025,51(02):210-217.DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2025.02.018.