

一种简单实用的兆瓦级脉冲激光发散角测试方法

徐欢天, 窦飞飞, 陈南亦, 吴航, 冯硕, 裴杰

中国电子科技集团公司第二十七研究所光电系统部, 河南 郑州

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

针对工程应用领域对兆瓦级脉冲激光发散角快速调试、测试及验收的需求, 本文提出了一种兆瓦级脉冲激光发散角测试方法——打靶法, 并将打靶法得到的测试结果与目前广泛使用的套孔法进行了对比。相比于套孔法, 打靶法能够通过望远镜看到聚焦透镜焦平面处靶纸上记录的激光光斑分布, 并根据望远镜的内部刻度读出激光发散角, 不受光束质量、能量计以及光阑定位精度等因素的影响, 为工程应用领域兆瓦级脉冲激光的发散角测试提供了新的选择。

关键词

激光发散角, 兆瓦级脉冲激光, 打靶法, 套孔法

A Simple and Practical Method for Measuring the Divergence Angle of Megawatt-Level Pulsed Lasers

Huantian Xu, Feifei Dou, Nanyi Chen, Hang Wu, Shuo Feng, Jie Pei

Department of Optoelectronic Systems, The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Sep. 2nd, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

To meet the demands of rapid adjustment, testing, and acceptance of megawatt-level pulsed laser divergence angles in engineering applications, this paper proposes a testing method—the Far-Field

Target Method—and compares its results with the widely used Aperture Diaphragm Method. Unlike the Aperture Diaphragm Method, the Far-Field Target Method allows the observation of the laser spot distribution on the target paper at the focal plane of the focusing lens through a telescope. The divergence angle can then be directly read from the telescope’s internal scale, eliminating influences from beam quality, energy meter accuracy, and aperture positioning precision. This approach provides a new solution for measuring the divergence angle of megawatt-level pulsed lasers in engineering applications.

Keywords

Divergence Angle of Laser, Megawatt-Level Pulsed Laser, Far-Field Target Method, Aperture Diaphragm Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前,兆瓦级脉冲激光已经广泛应用于激光测距、激光照射、激光干扰等工程应用领域。而激光发散角作为兆瓦级脉冲激光的重要参数之一[1],能够直接影响激光测距、激光照射、激光干扰距离。由于在工程应用过程中经常会进行指标约束,这就意味着在调试和测试过程中,激光发散角需要进行多次、反复的测试。依据国家标准,激光发散角可以通过测量聚焦镜焦平面的光斑直径进行计算,而光斑直径通常用套孔法、刀口法、CCD 法等方法进行测量[2],这些测量方法操作复杂,且受光束质量、能量计以及光阑定位精度等因素的影响较大,极大地降低了激光发散角调试和测试效率,已经无法满足日益缩短的研制生产周期。

本文提出了一种简单实用的兆瓦级脉冲激光发散角测试方法——打靶法,该测试方法能够通过望远镜看到聚焦透镜焦平面处靶纸上记录的激光光斑分布,并根据望远镜的内部刻度读出激光发散角,操作简单,方便实用,能够极大地提高调试测试效率,进而缩短工程应用研制生产周期。将打靶法得到的测试结果与套孔法进行对比,进一步得到了打靶法的适用区间,证明该方法能够适用于工程应用领域。

2. 打靶法与套孔法测试原理与方法

2.1. 打靶法原理与方法

打靶法测试原理与方法如图 1 所示。

兆瓦级脉冲激光器发射的脉冲激光经过聚焦透镜的反射,聚焦到焦平面上的靶纸上;靶纸采用兆瓦级脉冲激光光斑记录纸,可以对接收到的兆瓦级脉冲激光光斑进行烧蚀显影;由于脉冲激光光束为高斯光束,光强主要集中在传播轴附近,呈中心强、四周弱的趋势,因此会在靶纸上烧蚀出深浅两种颜色(颜色深的我们称之为“实斑”,颜色浅的我们称之为“虚斑”);靶纸上显影的激光光斑经过聚焦透镜的反射,进入望远镜视场范围内;望远镜内部刻有刻度,以望远镜中心为零点,根据需要的测试精度将望远镜视场等分为若干份,并标明每一份所代表的视场大小;此时观察者通过望远镜观察靶纸上的激光光斑大小,读取相应的刻度值,并通过式(1)计算对应的激光发散角。

$$\theta = \frac{\theta_{上} + \theta_{下} + \theta_{左} + \theta_{右}}{2} \quad (1)$$

式中：

θ ：激光发散角，mrad；

$\theta_{上}$ 、 $\theta_{下}$ 、 $\theta_{左}$ 、 $\theta_{右}$ ：靶纸实斑上、下、左、右边缘对应的刻度值，mrad。

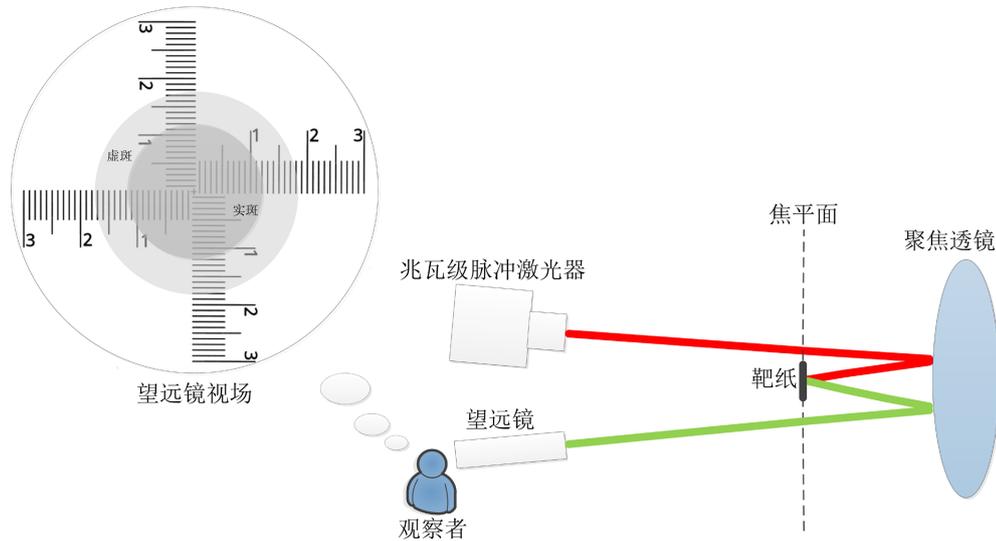


Figure 1. Testing principle and methodology by the Far-Field Target Method
图 1. 打靶法测试原理与方法图

2.2. 套孔法原理与方法

套孔法测试原理如图 2 所示[3]。

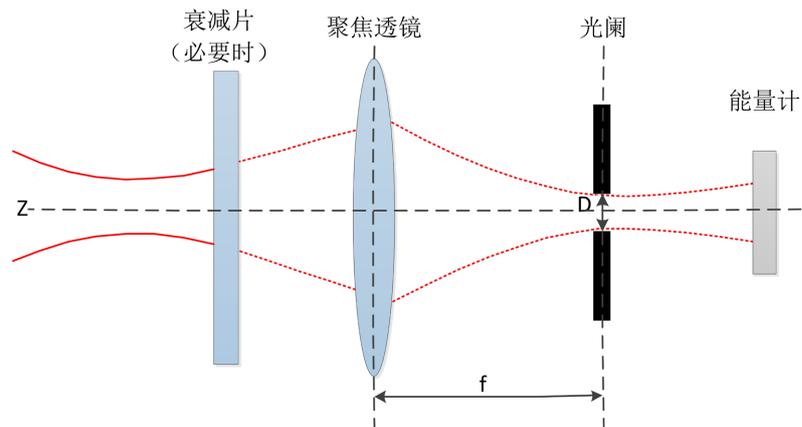


Figure 2. Testing principle and methodology by the Aperture Diaphragm Method
图 2. 套孔法测试原理与方法图

兆瓦级脉冲激光器发射的脉冲激光照射到聚焦透镜上，被聚焦透镜聚焦。在聚焦透镜焦平面后合适位置放置激光能量计，测量该位置的激光能量 Q 后，将较小直径的光阑置于聚焦透镜焦点位置，沿垂直于光轴 Z 的 X 、 Y 方向反复调整光阑位置，使能量计接收的能量最大，并记录此时的激光能量 Q' ，再通过式(2)计算对应的激光透过率。

$$T = \frac{Q'}{Q} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

T: 光阑透过率;

Q': 加光阑时的能量, mJ;

Q: 不加光阑时的能量, mJ。

通过改变光阑孔径, 使透过率 $T = 86.5\%$, 此时的光阑直径 d' 即为光斑直径 d ; 当光阑的透过率 T 接近 86.5% 时, 通过式(3)计算得到光斑直径 d 。

$$d = d' \times \sqrt{-\frac{2}{\ln(1-T)}} \quad (3)$$

式中:

d: 光斑直径, mm;

d' : 光阑的透过率接近 86.5% 时的光阑直径, mm。

测得光斑直径后, 通过式(4)计算激光发散角 θ 。

$$\theta = \frac{d}{f} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

θ : 激光发散角, mrad;

f: 聚焦透镜焦距, m。

3. 打靶法与套孔法测试

3.1. 测试环境搭建

为了验证打靶法测试结果的准确性, 我们搭建了测试环境, 对打靶法和套孔法的测试结果进行了对比。测试环境如图 3 所示。

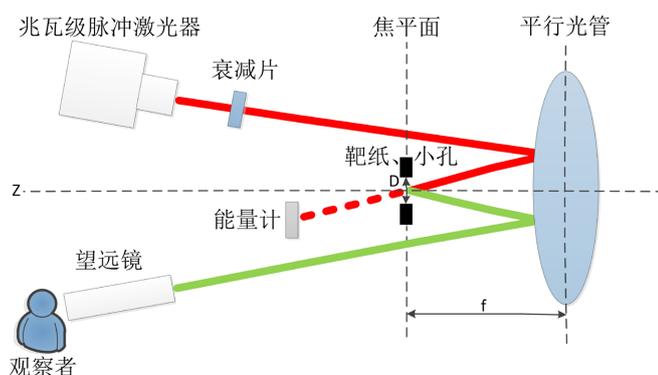


Figure 3. Testing environment
图 3. 测试环境图

测试环境中, 所用到的兆瓦级脉冲激光器为某款折叠腔激光器。该激光器采用精准温控的二极管泵浦 ND: YAG 晶体棒, 调 Q 晶体采用 RTP 电光开关, 谐振腔外安装 8 倍扩束镜对激光器发射光束进行扩束并调节激光发散角, 可实现兆瓦级的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光脉冲输出, 详细参数见表 1。

Table 1. Megawatt-level pulsed laser parameters**表 1.** 兆瓦级脉冲激光器参数表

参数	范围	单位
能量	50、100、160 三档	mJ
稳定性	±5%	/
脉冲宽度	15.5@50 mJ、15@100 mJ、11@160 mJ	ns
峰值功率	3.23、6.67、14.55 三档	MW
重复频率	1~30 可调	Hz
激光发散角	0.3~3 可调	mrad

测试环境中,所用到的 1.064 μm 衰减片共 9 片,衰减片分别为 0.58 dB、1.03 dB、1.5 dB、2.15 dB、3.21 dB、4.35 dB、5.2 dB、7.22 dB、9.97 dB,可将激光能量进行 10%~90% 等间隔衰减;聚焦透镜采用平行光管,焦距 $f = 2.5 \text{ m}$;平行光管焦点处可放置靶纸或光阑,靶纸为兆瓦级脉冲激光光斑记录纸,光阑为可调光阑;能量计为美国相干公司生产的 FieldMxaII-TOP;望远镜采用 6 倍直管望远镜,内部视场有刻度分布。

3.2. 测试结果

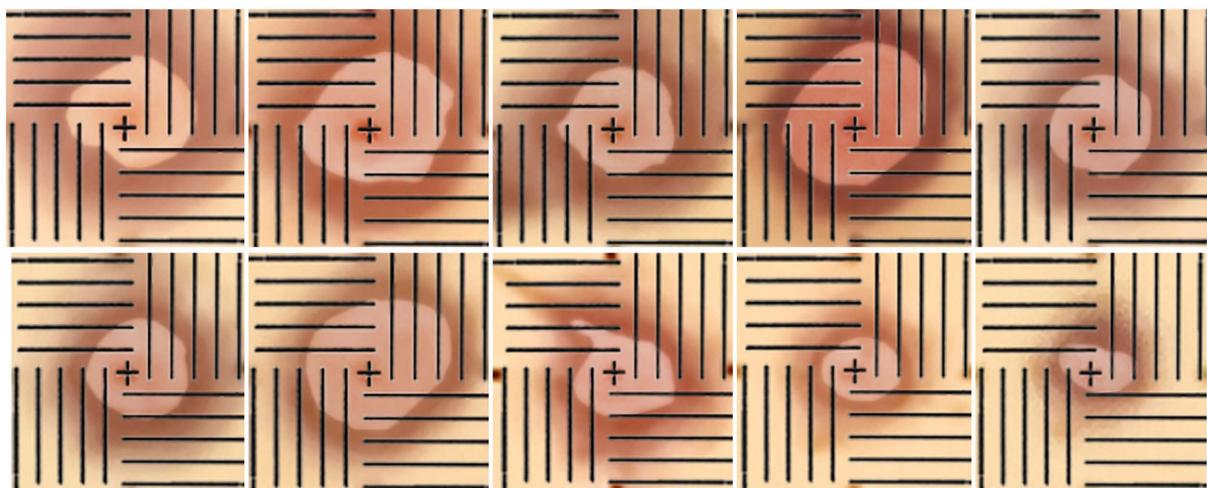
打靶法测试时,按以下步骤进行:

- 1) 在焦平面处放置靶纸,该款折叠腔激光器能量挡位设置为 160 mJ,以 1 Hz 的频率发射激光,激光经过平行光管反射,在焦平面处的靶纸上留下一个激光光斑后,停止发射激光,通过 6 倍直管望远镜观看靶纸上的激光光斑,记录实斑上、下、左、右边缘处的刻度值 $\theta_{\text{上}}$ 、 $\theta_{\text{下}}$ 、 $\theta_{\text{左}}$ 、 $\theta_{\text{右}}$;
- 2) 在激光器扩束镜前放置衰减片,分别将激光能量衰减至 10%~90%,重复步骤 1);
- 3) 激光器能量挡位分别设置为 100 mJ、50 mJ,重复步骤 1)、2)。

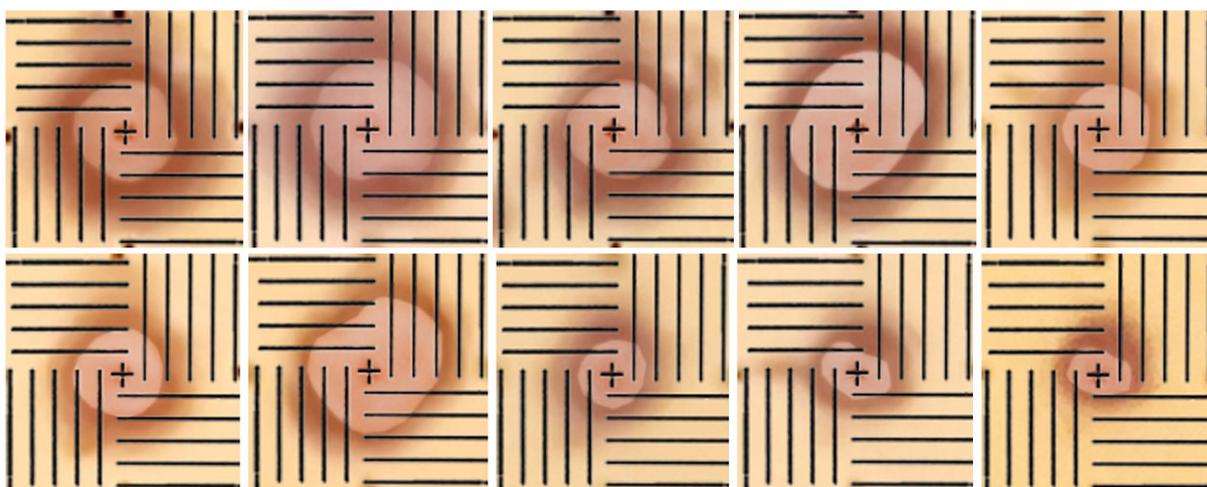
通过望远镜观察到的靶纸上记录的激光光斑如图 4 所示,图中每一个小刻度为 0.1 mrad。打靶法测试读取的激光发散角与激光峰值功率的对应关系如表 2 所示。

Table 2. Divergence angle of lasers vs. pulsed peak power—Far-Field Target Method**表 2.** 激光发散角与对应的激光峰值功率——打靶法

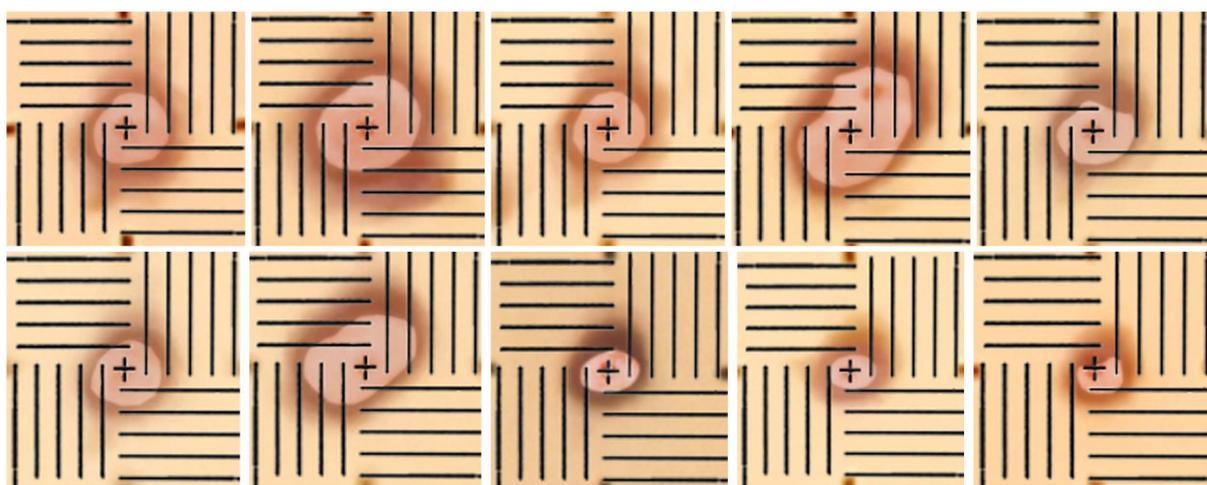
激光峰值功率 (MW)	激光发散角 (mrad)	激光峰值功率 (MW)	激光发散角 (mrad)	激光峰值功率 (MW)	激光发散角 (mrad)
14.55	0.55	6.67	0.45	3.23	0.36
13.10	0.62	6.00	0.55	2.91	0.44
11.64	0.51	5.34	0.45	2.58	0.35
10.19	0.64	4.67	0.61	2.26	0.53
8.73	0.44	4.00	0.40	1.94	0.33
7.28	0.45	3.34	0.40	1.62	0.32
5.82	0.59	2.67	0.60	1.29	0.46
4.37	0.43	2.00	0.32	0.97	0.24
2.91	0.32	1.33	0.29	0.65	0.20
1.46	0.29	0.67	0.25	0.32	0.18



1) 160 mJ 档(从左上到右下衰减率分别为 100%~10%，图中光斑颜色较深区域为“虚斑”，颜色较浅区域为“实斑”)



2) 100 mJ 档(从左上到右下衰减率分别为 100%~10%，图中光斑颜色较深区域为“虚斑”，颜色较浅区域为“实斑”)



3) 50 mJ 档(从左上到右下衰减率分别为 100%~10%，图中光斑颜色较深区域为“虚斑”，颜色较浅区域为“实斑”)

Figure 4. Laser spot image—Far-Field Target Method
图 4. 激光光斑图——打靶法

套孔法测试时,按以下步骤进行:

1) 该款折叠腔激光器能量挡位设置为 160 mJ,发射激光,经过平行光管反射后,照射到焦平面后的激光能量计上,记录能量值 Q ;

2) 在焦平面处放置光阑,调整光阑在焦平面上的位置,使通过光阑的能量最大,记录通过光阑的最大能量值 Q' ;

3) 调整光阑大小,使激光能量通过光阑的透过率 $T = Q'/Q$ 接近 86.5%;

4) 在激光器扩束镜前放置衰减片,分别将激光能量衰减至 10%~90%,重复步骤 1)、2)、3);

5) 激光器能量挡位分别设置为 100 mJ、50 mJ,重复步骤 1)、2)、3)、4)。

套孔法测试得到的数据,经过式(2)、(3)、(4)计算得到的激光发散角与激光峰值功率的对应关系如表 3 所示。

Table 3. Divergence angle of lasers vs. pulsed peak power—Aperture Diaphragm Method

表 3. 激光发散角与对应的激光峰值功率——套孔法

激光峰值功率 (MW)	激光发散角 (mrad)	激光峰值功率 (MW)	激光发散角 (mrad)	激光峰值功率 (MW)	激光发散角 (mrad)
14.55	0.38	6.67	0.45	3.23	0.36
13.10	0.49	6.00	0.50	2.91	0.42
11.64	0.44	5.34	0.42	2.58	0.31
10.19	0.69	4.67	0.59	2.26	0.48
8.73	0.44	4.00	0.39	1.94	0.34
7.28	0.43	3.34	0.39	1.62	0.29
5.82	0.66	2.67	0.58	1.29	0.51
4.37	0.38	2.00	0.35	0.97	0.29
2.91	0.36	1.33	0.31	0.65	0.30
1.46	0.32	0.67	0.30	0.32	0.34

3.3. 测试结果分析

根据表 2 和表 3 的数据,可以得到打靶法与套孔法所测得的激光发散角与激光峰值功率的对应关系,如图 5 所示。

通过图 5 可以看出:

1) 当激光峰值功率在 1 MW~12 MW 区间内时,打靶法得到的激光发散角与套孔法得到的激光发散角比较吻合,最大误差为 0.07 mrad,最大误差比例为 15.9%;

2) 当激光峰值功率在 1 MW 以下时,打靶法得到的激光发散角小于套孔法得到的激光发散角,最大误差为 0.16 mrad,最大误差比例为 47.1%;

3) 当激光峰值功率在 12 MW 以上时,打靶法得到的激光发散角大于套孔法得到的激光发散角,最大误差为 0.17 mrad,最大误差比例为 44.7%。

对以上现象产生的原因进行分析,已知激光的能量分布分为基模和高阶模两种模式,其中基模为高斯光束。脉冲激光作为典型的高斯光束,能量强度主要集中在传播轴附近[4],光强振幅分布 $I(r)$ 可以用式(5)进行表示[5]。

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega(z)^2}\right) \quad (5)$$

式中:

r : 距离光束中心的径向距离;

ω_z : 光束半径;

z : 沿传播方向的轴向距离;

I_0 : 光束中心的最大光强。

从式(5)可以看出, 高斯光束振幅的变化符合高斯正态分布, 如图 6(a)所示。而兆瓦级脉冲激光光斑记录纸造成“实斑”的损伤阈值为固定值, 理论上只有当激光峰值功率为某一固定值时, 打靶法和套孔法得到的激光发散角才相同, 达到理论发散角值。而随着激光峰值功率偏离这一固定值, 打靶法和套孔法得到的激光发散角偏离量越来越大, 向下偏离测得的发散角变小, 向上偏离测得的发散角变大, 如图 6(b)所示。

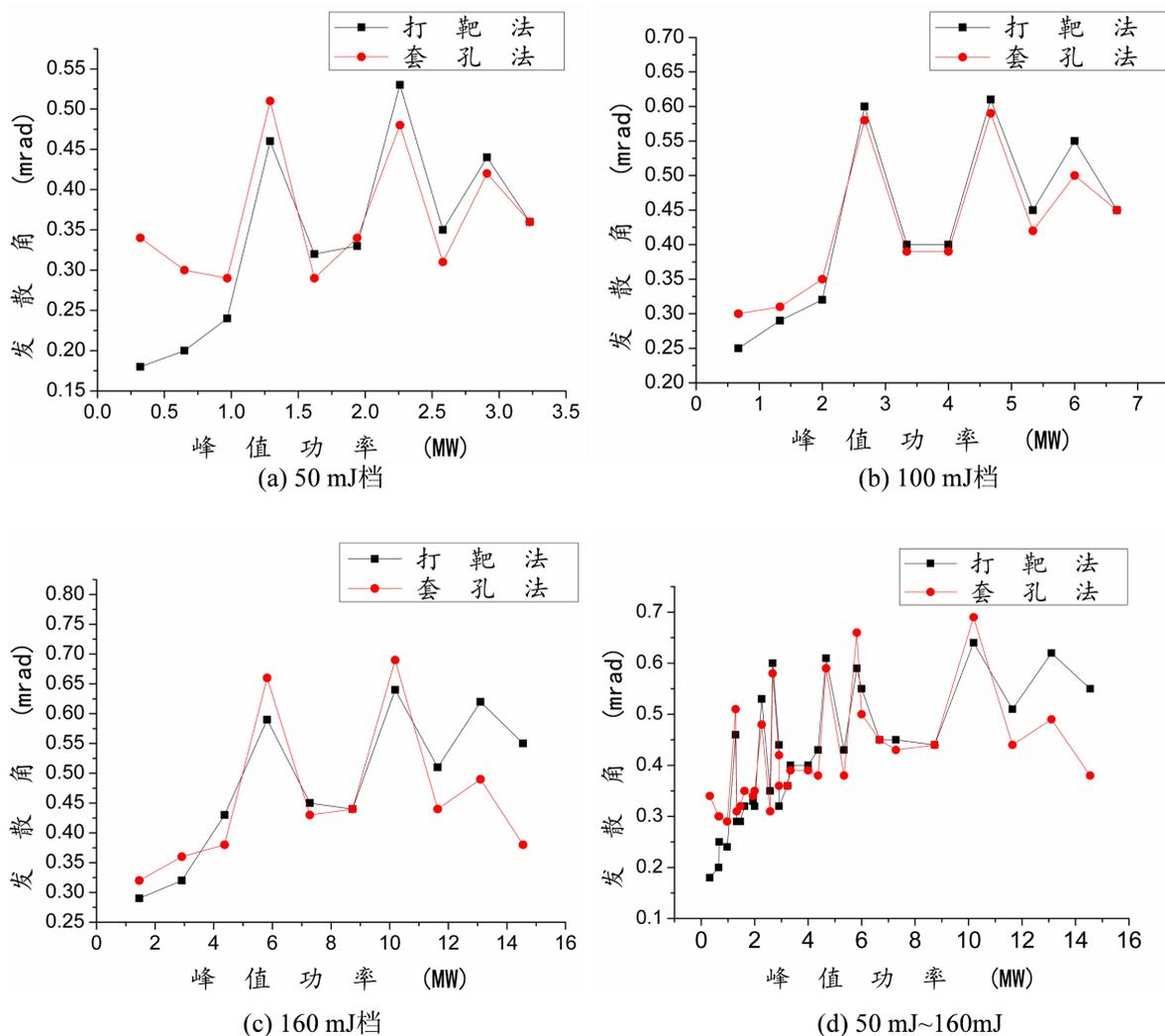


Figure 5. Divergence angle of lasers vs. pulsed peak power
图 5. 激光发散角与激光峰值功率对应关系图

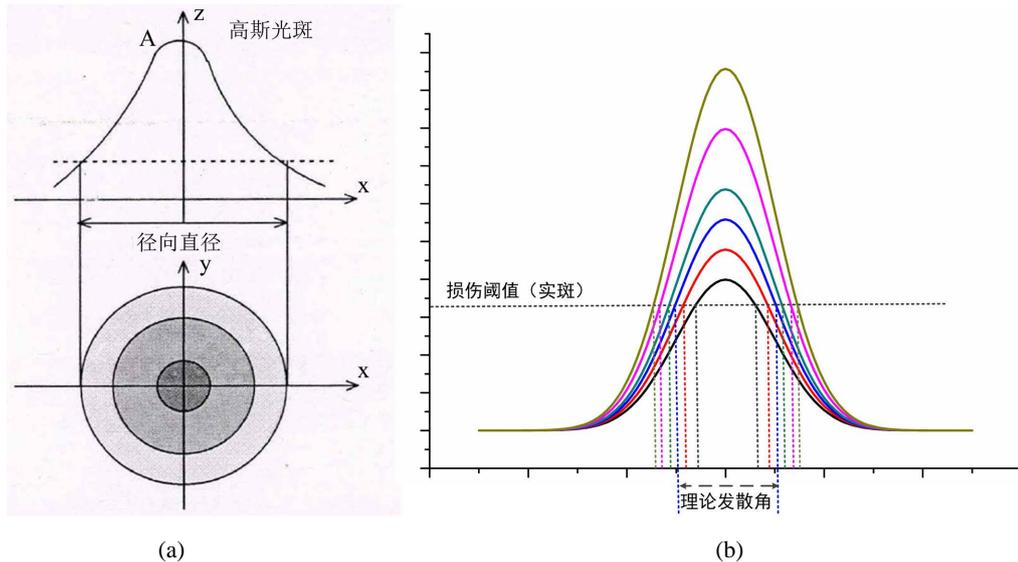


Figure 6. Energy distribution map of pulse laser beam cross-section
图 6. 脉冲激光光束截面能量分布图

然而在打靶法和套孔法实际测试过程中,均存在随机误差、测量误差和读数误差,这些误差叠加理论值,便增加了在工程应用领域的适用性,表现为当激光峰值功率在 1 MW~12 MW 区间内时,采用打靶法和套孔法测得的结果基本一致,误差在可接受范围内。而当激光峰值功率低于 1 MW 或高于 12 MW 时,相比套孔法测得的结果,打靶法的误差逐渐变大,激光峰值功率低于 1 MW 或高于 12 MW 越多,误差越大。

4. 普适性分析

4.1. 靶纸更换校准

鉴于兆瓦级脉冲激光峰值功率较高,可以在多种材料上进行烧蚀显影,当所用的兆瓦级脉冲激光光斑记录纸不同时,烧蚀显影的效果也不同,本文所得到的结论便不再适用,需按以下方法对新靶纸进行校准:

- 1) 对新靶纸的烧蚀显影效果进行实验摸底,得到“实斑”和“虚斑”显影的激光峰值功率边界;
- 2) 在保证实验激光峰值功率大于“虚斑”显影的激光峰值功率的前提下,改变激光峰值功率,通过打靶法与套孔法测试,得到激光峰值功率与激光发散角的对应关系;
- 3) 通过对比激光峰值功率与激光发散角的对应关系,寻找激光发散角测试误差较小的区间,从而得到该区间对应的激光峰值功率;
- 4) 在该激光峰值功率区间内,新靶纸即可适用。

4.2. 高阶模激光光束发散角预测

随着激光技术的发展,高阶模激光也逐渐开始得到应用。由于高阶模激光的光强分布不再遵循高斯分布,本文所得到的结论也不再适用,以下对打靶法用于高阶模激光光束的发散角测试进行预测。

在直角坐标系中,模(m, n)的强度分布可以由式(6)表示[6]:

$$I_{mn}(x, y, z) = I_0 \left[H_m \left(\frac{x(2)^{\frac{1}{2}}}{\omega(z)} \right) \exp \left(\frac{-x^2}{\omega(z)^2} \right) \right]^2 \times \left[H_n \left(\frac{y(2)^{\frac{1}{2}}}{\omega(z)} \right) \exp \left(\frac{-y^2}{\omega(z)^2} \right) \right]^2 \quad (6)$$

式中:

r : 距离光束中心的径向距离;

$\omega(z)$: 最低阶模横向强度降到峰值强度的 $1/e^2$ 时的光斑尺寸;

$H_m \left(\frac{x(2)^{\frac{1}{2}}}{\omega(z)} \right)$: 第 m 阶厄米多项式;

$H_n \left(\frac{y(2)^{\frac{1}{2}}}{\omega(z)} \right)$: 第 n 阶厄米多项式;

I_0 : 最低阶模光强。

根据式(6)可以得到不同阶厄米高斯模的强度分布图, 如图 7 所示[7]。

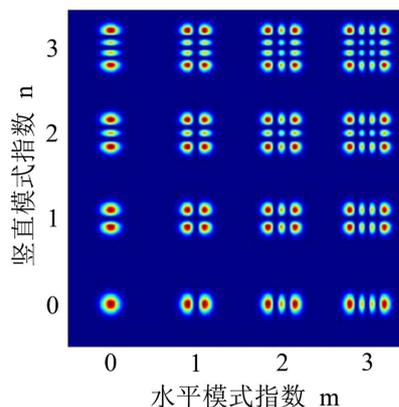


Figure 7. Intensity distribution of Hermite-Gaussian modes of different order
图 7. 不同阶厄米高斯模的强度分布图

对于高阶模而言, 通常用最外层波瓣的 $1/e^2$ 强度点来定义半径和发散角。因此, 在使用打靶法对高阶模激光光束进行发散角测试时, 理论上光斑边界应选择最外层的“实斑”边界, 同时采用 4.1 节所述的校准法, 根据套孔法测得的结果进行校准, 从而得到某一靶纸下高阶模激光适用的峰值功率区间。

5. 结论

本文基于工程应用实践, 提出了一种简单实用的兆瓦级脉冲激光发散角测试方法——打靶法, 该测试方法, 操作简单, 方便实用, 能够极大地提高调试测试效率, 进而缩短工程应用研制生产周期。将打靶法得到的测试结果与套孔法进行对比, 结果表明, 当激光峰值功率在 1 MW~12 MW 区间内时, 打靶法测得的误差在可接受范围内, 能够适用于工程应用领域; 而当激光峰值功率低于 1 MW 或高于 12 MW 时, 打靶法测得的误差逐渐变大, 在工程应用领域便不再适用。

参考文献

- [1] 秦晓科. 光电观瞄系统激光照射距离分析[J]. 电光与控制, 2019, 26(6): 92-96.
- [2] 中国人民解放军总装备部. GJB 5441-2005 固体激光器测试方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005.
- [3] 井晨睿. 套孔法激光发散角测量误差分析[J]. 电光与控制, 2020, 27(12): 101-104.
- [4] 王家乐. 基于光斑图像的激光能量密度分布测量技术[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2013.

-
- [5] Wit, E. and McClure, J. (2004) *Statistics for Microarrays: Design, Analysis, and Inference*. 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd., 5-18. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(16\)30245-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(16)30245-3)
 - [6] 孙文. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 173-174.
 - [7] 郭辉. 连续变量高维多模纠缠的产生[D]: [博士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023.