

实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素

杜祥琬

(中国工程物理研究院 北京 100088)

提要 提出了能量型应用的强激光光束质量的一种评价标准。光束质量的评价标准与实际的应用类型有关。影响实际强激光远场光束质量的因素十分复杂。将其主要因素分为系统内相位像差类、非相位像差类和大气传输影响等三类独立的因素,并探讨了在同一评价标准下,对它们进行解析表达的方法。

关键词 光束质量,强激光,远场,评价标准

1 引言

激光光束质量问题已有不少报道^[1~4]。

常用的光束质量的定义主要有:

- 1) M^2 因子 = $(d \cdot \theta)_{\text{实}} / (d \cdot \theta)_{\text{理}}$;
- 2) 远场发散角或衍射极限倍数 β ; 或焦斑大小;
- 3) $BQ = \sqrt{P_{\text{理}} / P_{\text{实}}}$ 靶上(或桶中)功率比,或环围能量比;
- 4) $\text{STREHL} = \frac{\text{实际轴上峰光强}}{\text{理想轴上峰光强}} = \exp\left[-\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\Delta\phi)^2\right]$ 。

式中 $\Delta\phi$ 是造成光束质量下降的像差。

这些定义各有优点和局限性^[4]。 STREHL 比只反映远场轴上的峰光强,不能给出能量型应用所关心的光强分布;发散角或焦斑大小可整体地反映光束质量,但不能反映光强的空间分布。 M^2 因子能较好地反映光束质量的实质,具有较强普适性,并且积分地反映了光强的空间分布,但也正因如此,其精确测定有赖于完整的光强空间分布信息,这影响了它的实用性;桶中功率(或能量)比适用于能量输送、耦合型的应用,但单一的桶对光强的空间分布的描述有所不足,而且必须明确理想光束的选取。本文提出一种适用于远距离能量应用的光束质量评价标准,并探讨在这一框架下影响光束质量的主要因素。

2 强激光远场光束质量的物理本质

2.1 远场光束质量评价标准与具体的应用目的有关

图 1(a),(b) 分别给出了两种激光阵列的近场振幅和远场光强剖面图^[3]。

图 1(a) 的远场光强分布有两个对称的双波瓣, 轴上光强很弱; 而图 1(b) 有一个强的轴上(中心)波瓣和弱的旁瓣。

按轴上峰功率作评价标准, 二者相去甚远; 若一个给定的应用只要求将激光能量传至远场一个特定的立体角或焦斑尺度之内, 并不关心其内、外的具体光强分布形状, 则环围能量比或 M^2 是衡量光束质量的一个标准。图 2 比较了二者远场积分功率随光斑半宽的变化。按 70% 以下的环围功率计算, a 的 BQ 比 b 相差很多, 而按 80% 的环围功率计算, 两者的 BQ 几乎是同一水平; 若按 90% 的环围功率计算, 则 b 的情况反而要计及更大的光斑尺寸(比 a 的情况几乎大一倍)。如果比较中心亮斑所含能量的数值, 则显然 b 多于 a 。换句话说, 若取不同的环围半径, 对二者光束质量的评价会得出十分不同的结论!

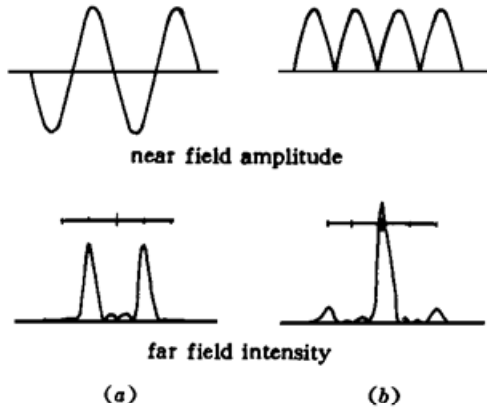


图 1 两种不同的激光阵列的近场振幅和远场光强分布图

Fig. 1 Near field amplitude and far field intensity of two different laser arrays

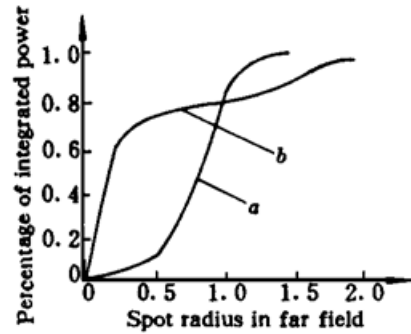


图 2 图 1 两种情况的积分功率份额随远场光斑半径的变化(相对坐标)

Fig. 2 Integrated power vs. spot radius in far field of the two cases in Fig. 1

由此可见, 对光束质量的好坏, 应视具体应用目的作分析评价。

2.2 远场光束质量的一种评价标准

对远距离能量输送类型的应用(如激光空间供能), 仅用轴上峰功率或仅用焦斑大小来描述光束质量是不够的。这时, 实际关心的是焦斑上的激光能量分布能否使尽量多的能量集中在应用所需的光“桶”(Bucket)尺度内。即这种情况下光束质量的本质是“远场焦斑上的能量集中度”。其基本含义是: 焦斑上的能量分布具有单一的强度峰(强度分布不出现多峰现象), 且在以此峰为中心的适当环围(桶)中包含尽量多的能量。由于强度分布的横向尺度受到衍射极限的限制, 用理想光束的“衍射极限桶”中的环围能量与实际光束在同一桶中的环围能量比值的开方作为这种应用目的下的光束质量的评价标准是适当的。即

$$BQ = \sqrt{E_{d.b.理想} / E_{d.b.实际}} \tag{1}$$

其中 $d.b.$ (diffraction-Limited bucket) 表示理想光束的“衍射极限桶”。下面我们将具体确定“理想光束”的选取。

当希望的光斑尺寸小于目标尺寸时, 为了更充分地反映目标上的激光能量分布, 作为对公式(1)的补充, 可用一个“桶系列”中的能量多少来衡量能量集中度。“桶系列”是具有规范尺寸的几个同心环围, “规范尺寸”可取为理想光束远场光斑上的几个特征尺寸(见下面的说明)。另一种等价的做法是, 用几个规范的能量百分比所相应的光斑尺寸评价远场光束的质量。

实际上,空域的能量集中度还有赖于时域的稳定性的,若桶中功率占总功率的份额随时间保持不变,则(1)式中的桶中能量比等价于相应的桶中功率比。

2.3 理想光束的选取

作为“理想光束”,它是取出射直径为 D 的满口径的均幅平面波,其远场焦斑上的光强分布为^[5]:

$$I(\theta) = I_0 \left| \frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta} \right|^2 \quad (2)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$, $a = D/2$, θ 为远场图中的角半径。对远场衍射图样积分可得 θ 之内的环围能量份额为:

$$F(\theta) = 1 - J_0^2(ka\theta) - J_1^2(ka\theta) \quad (3)$$

远场光强分布(2)和环围能量份额(3)绘于图3中。由图可见其远场分布中有几个特征角半径,它们所对应的物理量列于表1。

角坐标 θ_0 所环围的区域即是“衍射极限桶”。 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 就是用角坐标表示的“规范尺寸”,它们相应的环围区域即可作为“桶系列”;而 50%, 83.8%, 91% 和 93% 就是几个规范的能量百分比。顺便指出,相邻两暗环的间隔正好是 $\sim \lambda/D$ 。 θ_0 并不是暗环的位置,它是 $I_0(\theta)/I_0 = F(\theta) = 0.5$ 所相应的特征位置,当目标尺度比衍射极限桶的尺度还小时,这个规范桶是有用的。

表 1 理想光束远场分布中的特征量

Table 1 Characteristics of an ideal beam

θ	$I(\theta)$	$F(\theta) \%$	Notes
$\theta_0 = 0.52 \frac{\lambda}{D}$	$0.5I_0$	50	$\frac{I(\theta_0)}{I_0} = F(\theta_0)$
$\theta_1 = 1.22 \frac{\lambda}{D}$	0	83.8	1st dark ring
$\theta_2 = 2.232 \frac{\lambda}{D}$	0	91	2nd dark ring
$\theta_3 = 3.24 \frac{\lambda}{D}$	0	93.8	3rd dark ring

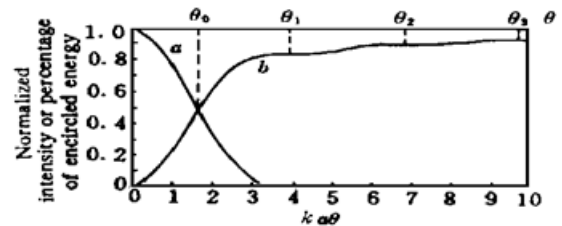


图 3 理想光束——圆口径实心均幅平面波的远场光强分布 a 和环围能量份额 b

Fig. 3 Normalized intensity a and encircled energy b in far field of an ideal beam

3 影响远场光束质量诸因素的表达

3.1 对于上节给定的光束质量定义(1)和选定的理想光束与桶的概念,实际强激光远场光斑上与角坐标 θ 相应的桶中的环围能量 $E_{桶,实际}$ 为

$$E_{桶,实际}(\theta) = \frac{E_{理想}}{BQ^2} [1 - J_0^2(ka\theta) - J_1^2(ka\theta)] \quad (4)$$

其中 $E_{理想}$ 为理想光束远场焦斑上的激光总能量。

影响近场光束质量的因素都会影响到远场;同时,在向远场传输的过程中又会增加一些影响 BQ 的因素。这些因素可以归结为三类:一类是光学系统(含激光器)内发生的与相位像差(波前误差)有关的因素;另一类是光学系统内发生的非相位的因素;第三类是大气传输对光束质量的影响。由于这三类因素是互相独立的,故可写:

$$BQ = BQ_{相位} \cdot BQ_{非相位} \cdot BQ_{大气} \quad (5)$$

3.2 关于光学系统内相位像差引起的 $BQ_{\text{相位}}$

波前误差 δ_{rms} (相位相差的均方根值) 带来的光束质量因子, 在小像差近似下可写为:

$$BQ_{\text{相位}} = \exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi\delta_{\text{rms}}}{\lambda}\right)^2\right] \quad (6)$$

如果相位像差不够小, 则对这样的光学系统需要作修正, 而不是作分析。但 δ_{rms} 是由全系统的多种因素造成的, 这些因素主要有:

- a) 承受强激光的光学镜的热畸变;
- b) 光学镜的失形: 加工误差、变形、倾斜等;
- c) 几何像差: 慧差、球差、像散等;
- d) 激光器增益介质不均匀性造成的像差。

光强 I 引起第 i 个光学镜的热畸变像差可表示为 $\delta_{ai} = 2\xi\alpha I \cos\theta_i$, ξ 是热畸变系数, α 是吸收系数; 该镜的加工误差等表面失形像差可表示为 $\delta_{ci} = 2\delta_i \cos\theta_i$, δ_i 是其表面形变; 增益介质不均匀性引起的像差可表示为(它实际上是一个随时间改变的量):

$$\delta_{\text{rms},e} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \int_a^b \frac{n-1}{\lambda} \frac{\Delta\rho}{\rho} dz \quad (7)$$

其中 $\Delta\rho/\rho$ 为密度起伏, n 为折射系数, L 为光程。光学窗口的表面失形、热畸变和折射率不均匀畸变项也有相应的解析表达式^[6]。

当利用各因素分别造成的波前误差给出总的 δ_{rms} 时, 需要注意它们之间是否时空相关。

至于几何像差和腔镜失调造成的光轴倾斜对远场光束质量的影响需作专门的计算估计不将其纳入 δ_{rms} 。

3.3 关于 $BQ_{\text{非相位}}$

非相位因素包括束形状因子(如遮拦)造成的远场衍射图样变差、系统光学部件的不稳定造成的束轴的(平行)飘移或抖动以及偏振等。

激光束形状因子影响光束质量的一个实际问题是遮拦, 如采用常规非稳腔时可能输出一个空心束; 或采用扩束装置时次镜的遮拦也会造成输出一个空心束。设遮拦比为 $\epsilon = a_i/a_o$ 是空心束的内/外径之比, 则被遮拦的面积与同外径的理想实心光束的面积之比为 ϵ^2 。若原理想光束总能量为 E , 则空心束的总能量相应为 $E(1 - \epsilon^2)$ 。空心束的远场光强空间分布有如下的形式:

$$I_{\text{空}}(\theta) = I_0 \frac{1}{(1 - \epsilon^2)} \left[\frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta} - \epsilon^2 \frac{2J_1(k\epsilon a\theta)}{k\epsilon a\theta} \right]^2 \quad (8)$$

其中, I_0 同(2) 式中理想束中心光强, 显然 $I_{\text{空}}(0) = I_0(1 - \epsilon^2)$ 。

不难计算该分布随 ϵ 的变化, 并可得出几点结论: 随 ϵ 增大, 远场光斑的中心峰功率按 $(1 - \epsilon^2)$ 律减小; 远场强度分布是同心的亮环状, 随 ϵ 增大, 中心亮斑相应的角半径减小, 且该环内包含的能量份额减少, 而外环中所含能量份额增加。即随 ϵ 增大, 远场能量集中度变差。相应的光束质量因子可表示为:

$$BQ_F = \sqrt{\frac{E_{\text{桶,理想}}}{E_{\text{桶,空心}}}} \quad (9)$$

由(3) 和(8) 式可得, 对 θ 角环围的桶:

$$BQ_F^2 = \frac{2[1 - J_0^2(ka\theta) - J_1^2(ka\theta)]}{F_{\text{空}}(\theta)} \quad (10)$$

其中,

$$F_{\text{空}}(\theta) = \frac{K^2 a^2}{(1 - \epsilon^2)^2} \int_0^{\theta} \left[\frac{2J_1(ka\theta')}{ka\theta'} - \epsilon^2 \frac{J_1(ka\epsilon\theta')}{ka\epsilon\theta'} \right]^2 \theta' d\theta'$$

在得到(10)式时,为了在同样的总激光能量下比较实际光束与理想光束的光束质量,在分母上除了因子 $(1 - \epsilon^2)$ 。

若取“理想光束衍射极限桶”作分析,则 $\theta = \theta_i$,这时,形状因子引起的光束质量因子为:

$$BQ_F^2 = \frac{2[1 - J_0^2(k\theta_i a)]}{F_{\text{空}}(\theta_i)} \quad (10')$$

至于部件抖动造成的束轴平行移动,与各部件的抖动量及其分布的性质有关,需作具体测量估算并尽量采取稳定措施予以避免。

3.4 大气传输中湍流及整束热晕对光束质量的影响,也可在公式(1)和(4)的框架下解析表达。我们是着眼于远场焦斑上能量集中度来研究光束质量的,故可将湍流和热晕的各种作用视为等效的光束扩展来处理。借助文献[7]对湍流、热晕综合研究的部分结果,在低于发生小尺度不稳定性阈值条件下,得到的大气传输光束质量因子 BQ_A 为:

认为桶中能量反比于束斑面积扩展,即相应的束散角的平方,则有 $BQ_A^2 = \frac{\theta_A^2}{\theta_i^2} = \frac{\theta_L^2 + \theta_B^2}{\theta_i^2}$, θ_i, θ_L 和 θ_B 分别为理想光束衍射极限角、由大气线性效应产生的扩束角和由非线性整束热晕造成的束散角,由此可推出

$$BQ_A^2 = N_T^2 [1 + 0.0143\Psi^{1.178}] \quad (11)$$

其中,

$$N_T = \begin{cases} \left[BQ_i^2 + 0.182 \left[\frac{D}{r_0} \right]^2 \right]^{1/2} & \frac{D}{r_0} < 3.0 \\ \left[BQ_i^2 + \left[\frac{D}{r_0} \right]^2 - 1.18 \left[\frac{D}{r_0} \right]^{5/3} \right]^{1/2} & \frac{D}{r_0} > 3.0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\Psi = \frac{N_B N_F}{N_T N_A} \exp \left[- \frac{1}{2} \int_0^L \alpha(z) dz \right] \ln \left[\frac{N_A + 1}{N_A N_c - N_c^2} \right] \quad (13)$$

BQ_i 为出射口径 D 处的起始光束质量, $N_F = \frac{\pi D^2}{2\lambda L}$, L 为传输距离, α 为大气消光系数, $N_A = \left[1 + 6.24 \frac{L^2}{D^2} N_T^2 \theta_i^2 \right]^{1/2}$, θ_i 为理想光束的衍射极限半角, $N_c = 2.5 \frac{L}{D} N_T \theta_i$, N_B 是热晕强度,它可以表示为:

$$N_B = 1.84 \times 10^{-8} \frac{PaL^2}{D^3 v} \quad (14)$$

其中, L 和 D 用m作单位, v 为风速(m/s), a 为吸收系数(m^{-1}), P 为激光总功率(单位为W)。由(11~13)式可见,在湍流和热晕的作用消失的极限下, $BQ_A \rightarrow BQ_i$ 。

4 结 语

对实际强激光远距离能量输送和耦合型的应用,目标上的能量集中度是远场光束质量的本质。可以用理想光束的“衍射极限桶”中的环围能量与实际光束在同一桶中的环围能量的比值的开方作为光束质量的评价标准。

有多种因素影响远场焦斑上的能量集中度。在这些因素中,有互相独立的,也有时空相关联的。系统内发生的各种引起波前误差的因素中,有些是独立的,也有相关联的。但这一类因素与非相位像差型的因素之间是独立的。同时,这两类因素与大气传输的湍流和整束热晕之间也是互相独立的,所以总的 BQ 可表示为这三类 BQ 因子乘积的形式。而对三个因子中的各具体因素,需逐一处理。

致谢 作者感谢范滇元、于敏和吕百达先生提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 1 吕百达. 激光光学(第二版). 四川大学出版社, 1992
- 2 A. E. Siegman. Handbook of laser beam propagation and beam quality formulas using the spatial-Frequency and intensity-moments analyses, 1991
- 3 A. E. Siegman. Defining and measuring laser beam quality. in book "Solid state laser", Edited by Massimo Inguscio, 1993
- 4 钱列加, 范滇元 等. 有关光束质量的若干基本问题及其新进展. 高功率激光及等离子体物理研究论文集, 1995
- 5 Max Born. Principles of Optics, Pergamon Press, 1964
- 6 D. A. Holmes, P. V. Avizonis. Approximate optical system model. *Appl. Opt.*, 1975, **15**(4) : 1075
- 7 H. Breaux *et al.*. Algebraic model for cw thermal-blooming effects. *App. Opt.*, 1979, **18** : 2638
- 8 Gary Golnik. chapter 5 in IR/EO Handbook V. 8, *SPIE Press*, 1993

Factors for Evaluating Beam Quality of a Real High Power Laser on the Target Surface in Far Field

Du Xiangwan

(China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088)

Abstract A definition of laser beam quality applicable to cases of laser energy use in far field is given. The impact of different factors on far field beam quality is analysed.

Key words beam quality, high power laser, far field, criterion