

# 大功率激光光束参数的测量方法<sup>①</sup>

雷 旬, 李 强, 左铁钊

(北京工业大学, 国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

**摘要:**利用我们正在研制的新型大功率激光光束光斑质量诊断仪,实现了大功率激光光束横截面的功率密度分布测量,并给出了计算光束位置、束宽、焦点位置、焦斑大小、发散角、焦深和光束质量因子等相关光束参数的数学处理方法。

**关键词:**大功率激光; 光束质量诊断仪; 光束参数

**中图分类号:**TN247      **文献标识码:**A

## Measurement Method of High-power Laser Beam Parameters

LEI Hong, LI Qiang, ZUO Tie-chuan

(Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract:** By using the high-power laser beam analyzer we are developing, the high-power laser beam intensity distribution can be measured. And the laser beam parameters also can be acquired, including beam position, beam width, focus position, focus width, beam divergence, focal depth and the beam quality factor  $M^2$ .

**Key words:** high-power laser; laser beam quality analyzer; laser beam parameters

## 1 引言

随着大功率激光加工技术成功地应用于机械、电子、航空、汽车和造船等各行各业,许多科研机构积极开展大功率激光束的光束参数测量的研究,现有商品化的测量仪器,但由于其特殊的光束特性和很高的功率密度,许多测量系统在使用上都有一定的局限性。我们正在研制的大功率激光光束光斑质量诊断系统,目标是能够对聚焦光斑进行测量,并作出光束、光斑质量的评估。

## 2 诊断仪工作原理

此诊断系统是基于空心探针对大功率激光光束光斑进行直接的测量,其结构如图1所示。该方法借助一个转动的、能传输激光束的空心针而起作用,空心针一端的侧表面上开有一小孔,由小孔进入的激光束通过内空腔被引导至转轴上,由此处的探测器进行

检测<sup>[1]</sup>。当探针垂直于光束转动时,小孔就划出一条剖面线,随着整个探针支架的平移,就能划出一系列剖面线来,从而探测到光束横截面上的光强分布,如图2所示。

探针的主要作用是在探测处进行能量采样,并由内部通道把它引导至与转轴中心相对静止的探测器上。探针按照一定的要求进行设计和制作,可使得探针的传输性能和光束的偏振、入射方向等特性无关,即  $T = P_0/P_i$  为常量。其中  $P_i$  为在采样点处的入射功率;  $P_0$  为出射功率。对不同探针,传输率是不同的,但这不影响对光束参数的测量,因为测得的是相对值。探测器所得信号再经增益调节、高速 A/D 转换及数据缓存,通过在采样系统和计算机间建立的双向实时通讯,计算机快速的计算和处理,最后给出相关光束参数的数值结果和横截面功率密度分布的直观图形显示。

① 收稿日期:1999-07-24 修订日期:1999-10-20

\* 基金项目:国防科工委重点予研资助项目

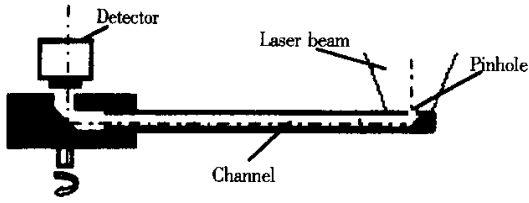


图 1 探针结构示意图

Fig. 1 Diagram of the measuring needle structure

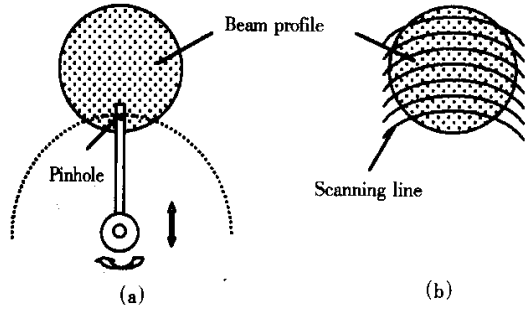


图 2 探针扫描光束横截面

Fig. 2 Beam profile scanned by the measuring needle

### 3 光束参数的计算

对测得的数据采用相应的数学处理方法可以计算出相关的光束参数,如功率密度分布、光束位置、光束半径等;通过光轴上的多点测量,可得到焦点位置和焦斑大小、发散角、焦深及光束质量因子;根据功率密度分布,可以得到光斑形状,进一步分析出大致的模结构;通过光束位置的确定和重复多次测量,可检测激光器的稳定性。

#### 3.1 功率密度分布

由于探针的传输性能和光束特性无关,探测器在工作波段范围内输入输出是线形关系,故功率密度值为

$$I(i, j) = K_1 \times M(i, j) + K_2 \quad (1)$$

其中,  $M(i, j)$  为在  $(i, j)$  处的测试仪测得值;  $K_1, K_2$  为定标系数。

#### 3.2 光束位置

光束的位置可用光束强度分布的一阶矩表示,即

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\iint x I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \\ \bar{y} &= \frac{\iint y I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \end{aligned} \quad (2)$$

在实际测量过程中,由于测量点是离散的点,所以(2)式可转换为

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum I(i, j) \times x}{\sum I(i, j)} \\ \bar{y} &= \frac{\sum I(i, j) \times y}{\sum I(i, j)} \end{aligned} \quad (3)$$

测出光束的位置后就可以判断激光源的光束位置稳定性,以及相应地调整运动的光学传输系统。

#### 3.3 光束半径

对光束半径有多种定义,如  $1/e^2$  定义、功率密度分布转折点的定义及功率密度分布的标准离差定义等,目前较通用且较严格的是国际标准化组织(ISO)的定义<sup>[2,3]</sup>。 $x$  和  $y$  方向上的束宽分别为

$$\begin{aligned} d_x &= 4\sigma_x \\ d_y &= 4\sigma_y \end{aligned} \quad (4)$$

光束横截面上的强度分布的二阶矩为

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{\iint I(x, y) (x - \bar{x})^2 dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \\ \sigma_y^2 &= \frac{\iint I(x, y) (y - \bar{y})^2 dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \end{aligned} \quad (5)$$

在实际测量中,可表示为

$$\begin{aligned} d_x &= 4 \sqrt{\frac{\sum I(i, j) \times (x - \bar{x})^2}{\sum I(i, j)}} \\ d_y &= 4 \sqrt{\frac{\sum I(i, j) \times (y - \bar{y})^2}{\sum I(i, j)}} \end{aligned} \quad (6)$$

对高斯基模  $TEM_{00}$ , 二阶矩定义的束宽与采用强度降为最大强度的  $1/e^2$  定义的束宽是一致的。采用该方法定义的束宽对高空间频率的干扰很敏感,实际的测量过程总存在一定的基底噪音,所以对测量窗口大小的选取及基底噪音的去除要认真研究。

另一种实用的方法是选取合适的等强线来分割功率密度分布曲面,切割平面选择应使切割的光束区内包含有总功率的 86.5%。此时,计算切割平面的定义方程为

$$P_{r_c} = (1 - e^{-2})P = 0.865P \quad (7)$$

式中,  $P_{r_c}$  为光束半径内的功率;  $P$  为总功率。

光束的位置可用该光束面的重心来表示,重心的位置  $(x_c, y_c)$  由此光束面上的所有测量点的值按下式确定:

$$x_c = \frac{\sum x_n I_n}{\sum I_n}$$

$$y_c = \frac{\sum y_n I_n}{\sum I_n} \tag{8}$$

式中  $x_n, y_n$  和  $I_n$  分别表示在 86.5% 功率面上第  $n$  个测量点的坐标和强度测量值。

光束的半径(圆形分布)为

$$r_c = \sqrt{\frac{2 \sum I_n \times [(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2]}{\sum I_n}} \tag{9}$$

平均功率密度的计算采用圆柱形分布来近似,强度在光束截面上不变,这时

$$\bar{I} = \frac{0.865P}{\pi r_c^2} \tag{10}$$

此种方法也适用于高斯基模。另外,此方法在圆形、椭圆形和方形的功率密度分布情况时均可应用,并且用该方法定义的半径直接与加工过程有关,因为加工结果与半径内所包含的功率是直接相关的。

### 3.4 焦点位置和焦斑大小

在激光加工过程中,尤其是对飞行光束的加工系统,由于热透镜效应的影响,经常出现焦点位置漂移的现象,给实际的加工质量带来很大的影响,所以在激光加工过程中必须能够确定经过聚焦系统后聚焦光斑的实际位置。由于该光束光斑质量诊断仪可对聚焦光斑的能量密度分布进行测量,因此可以实现这个目的。通过在光轴不同位置处测量,这时每处都将得到一个束宽值,然后采用双曲线拟合的方法就可确定焦点位置和焦斑大小。双曲线拟合公式为

$$d^2(z) = A + Bz + Cz^2 \tag{11}$$

确定双曲线的系数  $A, B$  和  $C$  后,焦点的位置  $z_0$  和焦斑宽度  $d_0$  为

$$z_0 = -\frac{B}{2C}$$

$$d_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \tag{12}$$

### 3.5 远场发散角

这里的远场发散角是指经过聚焦后光束的远场发散角。在近轴条件下,光束的传播方程为

$$d^2(z) = d_0^2 + \theta_0^2(z - z_0)^2 \tag{13}$$

式中  $\theta_0$  为远场发散角。结合(11)式可得到

$$\theta_0 = \sqrt{C} \tag{14}$$

### 3.6 焦 深

焦深通常有基于光斑尺寸变化和基于光束中心光

强变化的定义方法。根据激光加工的特性,采用平均功率密度定义方法。当光束横截面的平均功率密度降为腰斑的平均功率密度的一半时,该横截面和焦平面之间的距离的两倍定义为焦深,此时光束的截面积是焦斑面积的两倍。根据(11)、(12)和(13)式,可确定焦深为

$$Z_f = \sqrt{\frac{4A}{C} - \frac{B^2}{C^2}} \tag{15}$$

### 3.7 光束质量因子

自从 Siegman 对光束质量因子( $M^2$ ,也称衍射极限倍数因子)给出较为完整的理论后, $M^2$ 就成为通常情况下评价激光光束质量的重要参数。 $M^2$ 定义为实际光束束腰宽度和远场发散角之积与基模高斯光束束腰宽度和远场发散角之积的比值,可以证明  $M^2 \geq 1$ ,对基模高斯光束  $M^2 = 1$ 。 $M^2$ 值越大,则光束质量越差。光束通过理想无象差和无穷大孔径光学系统时  $M^2$  是一个不变量,即经过聚焦之后光束的束腰宽度和远场发散角乘积是不变的,而基模高斯光束的束腰宽度和远场发散角之积为  $4\lambda/\pi$ ,所以被测光束的  $M^2$  为  $M^2 = \frac{d_0 \theta_0}{4\lambda/\pi} = \frac{\sqrt{AC - B^2/4}}{4\lambda/\pi}$  (16)

## 4 结 束 语

利用大功率激光光束光斑质量诊断仪,实现了大功率激光光束横截面的功率密度分布的测量,并进一步得到了相关的光束参数。通过对光束特性的了解,反过来对激光器、传输系统及聚焦系统等的研制水平的进一步提高也会起到积极的促进作用。

### 参 考 文 献:

[1] A Rose, Y X Nie, R Gupta. Laser beam profile measurement by photothermal deflection technique [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(11): 1738-1740.

[2] A E Siegman. 王世孝,译.应用空间频率和强度矩量分析激光光束传播与光束质量公式[J]. *激光集刊*. 1992, **2**(2): 36-43, **2**(4): 34-44.

[3] 陆治国. 激光束空间质量评价[J]. *激光杂志*, 1995, **16**(2): 53-58.

[4] 陈 哲,等. 高功率激光束光束质量的数值评价方法 [J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(5): 377-380.

作者简介:

雷 旬 讲师,现为北京工业大学激光加工专业博士研究生,主要从事大功率激光光束质量分析的研究。