

激光光束直接测量模型

李 强, 雷 旬, 黄民双, 左铁钊

(北京工业大学 激光工程院国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

摘 要: 针对空心探针方法, 对探针微孔孔径、测量点数对测量精度的影响进行了分析, 建立了光束直接测量的模型, 并进行了计算。当被测光束与探针微孔孔径比为 1% 时, 相对误差小于 2%; 每条扫描线的测量点数为 30 时, 误差小于 0.2%, 得到了满足测量精度要求的微孔的孔径、测量点数, 实现了对大功率激光功率分布的有效检测。此结果适于光束直接测量的应用。

关键词: 激光光束; 测量精度; 模型参数

中图分类号: TN 248.2

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2002)01-0077-03

在激光加工中, 激光加工的质量与激光功率、光束的模结构、聚焦光斑形态等参数密切相关, 需要对大功率激光光束的强度截面分布进行测量。而对大功率激光光束、聚焦光斑在线测量的有效手段是采用空心探针的方法^[1]。采用此测量方法, 一个关键的问题是如何选择测量参数以保证测量精度。

作者针对空心探针方法, 建立了探针微孔的孔径、测量点数对测量精度影响的模型, 并进行了计算, 得到了满足测量精度要求的微孔的孔径、测量点数的参数。

1 模型的建立及计算

1.1 测量的原理

空心探针方法的工作原理见图 1, 以固定在平动台上的高速旋转空心探针高速扫过光束横截面, 部分光束通过探针传到探测器, 对光束、光斑进行扫描, 测得扫描线上设定点的强度分布, 同时, 使平动台垂直于光束方向平动, 测得多条扫描线的强度分布(如图 2), 经计算处理, 得到整个光斑的功率密度分布。

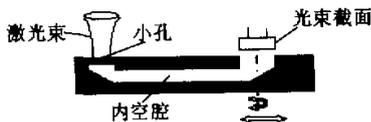


图1 空心探针扫描法原理



图2 测得强度分布扫描线示意图

1.2 微孔孔径对测量精度的影响

由测量原理, 每一测量点, 实际上是将经微孔的光的平均光强近似为测量点的光强。就微孔而言, 孔径越小, 测量精度越高, 但对加工用激光为 CO₂ 激光(波长为 10.6 μm)和 YAG 激光(波长为 1.06 μm)的测量, 为减小微孔的衍射, 其孔径不能小于被测光波长, 且在测量大尺寸光束时, 为保证测量信号的精度, 微孔孔径也不能太小。因此, 对不同尺寸的激光束, 需要确定微孔孔径。

设被测光束为高斯光束, 其光束横截面能量分布为拉盖尔-高斯分布(对圆形镜腔), 拉盖尔-高斯场结构为^[2]:

收稿日期: 2001-03-15。

基金项目: 国防科工委重点预研资助项目。

作者简介: 李强(1965-), 男, 副教授, 硕士。

$$U_{pl}(R, \theta, z) = G_{pl} \exp[-ikz - ik \frac{R^2}{2R(z)}] \exp[-i(2p+l+1)\varphi(z)] \quad (1)$$

$$G_{pl} = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+l)!}} \frac{1}{\omega_s(z)} \left(\frac{\sqrt{2}R}{\omega_s(z)}\right)^l L_p^l\left(\frac{2R^2}{\omega_s^2(z)}\right) \exp\left[-\frac{R^2}{\omega_s^2(z)} + i\theta\right] \quad (2)$$

混合模激光束的横截面光场强度分布为^[3]:

$$I(R) = \sum_{p,l} (\rho_{pl} G_{pl})^2 + \sum_{\substack{p,l,m \\ l \neq n}} \rho_{pl} \rho_{nm} G_{pl} G_{nm} \cos[(2(p-m) + (l-n)(\arctan(\frac{z}{Z_R}) + \varphi_0)] \quad (3)$$

在光束截面上,以被测光束中心为坐标原点,则距光束中心 R 的点用半径为 r 的微孔探测的平均光强为(如图3):

$$I(R, r_0) = \frac{A}{\pi \cdot r_0^2} \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} I(R, r) r dr d\varphi \quad (4)$$

为计算由于将微孔平均光强近似为测量点光强所引起的误差,定义

$$\varepsilon = [I_0(R) - I(R, r_0)] / I_0(R) \quad (5)$$

式中: $I_0(R)$ 为按式(2)、(3)定义的高斯分布截面不同半径的光强。

由于式(4)只能数值求解,为简化计算,取束腰处的光斑半径 R 为归一化半径 1, r_0 取任一半径,由式(4)、(5)可计算出 ε 的最大值 $\max \varepsilon(r_0)$, 改变 r_0 的值,则可得到探针孔径相对于被测激光束半径的关系,如图4。

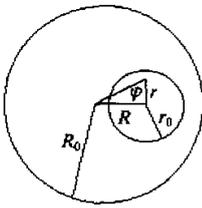


图3 微孔平均光强计算示意图

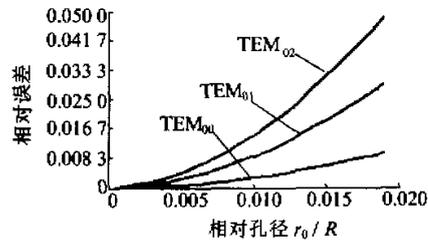


图4 探针孔径相对于被测高斯光束半径与测量误差的关系

从图4可以看出,对不同的模式,用经微孔的平均光强代替测量点的光强,误差是不同的。考虑误差较大的 TEM_{02} 模,同时考虑典型大功率激光的实际参数,当 $r_0/R \leq 0.01$ 时,即取被测光束半径为 10 mm,则测量探针微孔的半径应小于 100 μm ,相对误差小于 0.015。

1.3 测量点数对测量精度的影响

测量的结果要求拟合出被测光束的强度分布,测量的点数越多,拟合出的曲线越接近真实情况。事实上,测量的点数不必太多,因测量的点数达到一定值后,再增加测量的点数对精度的提高已无太大作用,因此需要确定满足测量精度要求的测量的点数。

用 1.2 中确定的探针微孔的半径,由式(4)所得的平均光强为测量点的光强 $I(R, r_0)$, 设每条扫描线的测量点数为 n , 将被测激光束截面划分为 n 个小方块, 则每一小方块的平均光强 $I(x, y, j, n, r_0)$ 满足如下式:

$$I(x, y, j, n, r_0) = \frac{A}{\pi \cdot r_0^2} \int_{-w/2n}^{w/2n} \int_{j/n - 1/n}^{j/n + 1/n} I(R) dx dy \quad (6)$$

为计算由 n 个测量点平均光强的拟合曲线表示扫描线的强度分布所引起的误差,定义

$$\delta(n) = \max((I_0(R) - I(x, y, j, n, r_0)) / I_0(R)) \quad (7)$$

式中: $I_0(R)$ 为按式(3)、(2)定义的激光分布截面不同半径的光强。

为简化计算,取束腰处的光斑半径 R 为归一化半径 1, $r_0 = 100 \mu\text{m}$, 当 n 取一定值,由式(5)可算出 δ 的最大值 $\max \delta(n)$; 改变 n 的值,则可得到 n 个测量点平均光强表示扫描线的强度分布最大误差关系,如图 5。最大误差 $\max \delta$, 是考虑了微孔的平均光强近似为测量点的光强引起的误差,是系统模型的整体误差。

从图5可以看出,当 $n > 30$ 时,每条扫描线的测量点数为 30 时,用微孔的平均光强表示扫描线各点的

强度分布, 相对误差小于 0.001.

2 模型参数的实际测量

为了简化, 以上的模型和计算, 假设被测光束为 3 种高阶高斯分布. 事实上, 加工用大功率激光器, 无论 CO₂ 还是 YAG 激光, 许多都是混合模式, 相应的测量点数和微孔的孔径应做相应的调整.

为检验由上述模型和计算参数构成的测量仪测量大功率激光的功率密度分布的真实性, 对已知模式的大功率 CO₂ 激光器进行测量, 测试用激光器是 RS1000 型快速轴流 CO₂ 激光器; 其光束横截面的能量分布为准高斯分布, 测试时功率为 1 000 W, 探针孔径 $r_0 = 100 \mu\text{m}$, 测量点数 $n \times n = 81 \times 41$ (每条扫描线的测量点数为 81, 共 41 条扫描线) 测量结果如图 6, 形状基本为高斯型. 可见上述模型和计算参数构成的测量仪基本复原了光束的真实分布, 满足了大功率激光的功率密度分布测量的要求. 此计算结果可用于光束直接测量的应用, 如实心探针的方法、阵列热电探测器对激光光束的测量.

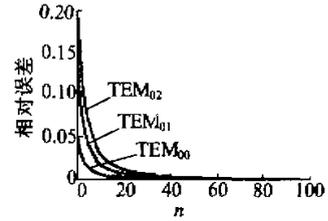
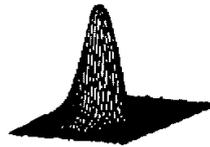
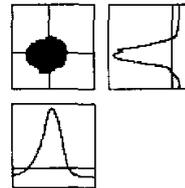


图5 用微孔的平均光强表示扫描线各点的强度分布与测量误差的关系



(a) 光束的强度分布包络



(b) 光束的强度截面分布

图6 测量结果

参考文献:

[1] GILSE J V, KOCZERA S, GREBY D. Direct laser beam diagnostics[J]. SPIE Laser Beam Diagnostics, 1991, 1414: 45-54.

[2] 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[3] 王智勇. 大功率 CO₂ 激光光束的传输与聚焦及其对加工质量的影响 [D]. 北京: 北京工业大学, 1997.

Direct Measurement Model of Laser Beams

LI Qiang, LEI Hong, HUANG Min-shuang, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract: According to the method of rotating pinhole needle, the effect of pinhole size and measure dot number on measurement accuracy is analyzed, and the direct measurement model of laser beams is founded. As the aperture ratio of measured beam and pinhole is 1%, the relative error is less than 2%. As the measure dot number of every scanning line is 30, the relative error is less than 0.2% so that the calculation results of satisfying measurement precision are obtained, which can be employed for the effective measurement of power distribution of large power laser, particularly suitable for the direct measurement of laser beams.

Key word: laser beam; measurement precision; model parameter