

中华人民共和国国家标准

GB/T 27666—2011

制造用激光器光束质量的评价和测试方法

Evaluation and test method for beam quality of manufacturing laser system

2011-12-30 发布

2012-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利,本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国光辐射安全和激光设备标准化技术委员会(SAC/TC 284)归口。

本标准起草单位:北京工业大学激光工程研究院、国家产学研激光技术中心、中国电子科技集团公司第十一研究所。

本标准主要起草人:左铁钊、陈虹、王旭葆、赵鸿。

制造用激光器光束质量的评价和测试方法

1 范围

本标准规定了工业制造用大功率激光器光束质量的评价参数计算和测试方法。
本标准适用于工业制造用各种连续激光器。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 7247.1 激光产品的安全 第1部分:设备分类、要求和用户指南

GB/T 15313—2008 激光术语

ISO 11146-1 激光和激光相关设备 激光束宽度、发散角和束扩散率的试验方法 第1部分:无象散和简单象散束(Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios—Part 1; Stigmatic and simple astigmatic beams)

3 术语和定义

GB/T 15313 确立的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 15313 的某些术语和定义。

3.1

光束直径 beam diameter

d_u

在垂直光束轴平面内,内含功率(或能量)占光束总功率(或能量)规定比例($u\%$)的最小孔径的直径。当 $u=86.5\%$ 时,下角标可省去。

注:为了明确,光束直径的标识要将符号及其适合的下标一起使用,即: d_u 或 d_r 。

[GB/T 15313—2008,定义 2.1.49.1]

3.2

束腰直径 beam waist diameter

$d_{0,u}$

束腰位置处的内含功率(或能量)定义的光束直径 d_u 。

注:为了明确,束腰直径的标识要将符号及其适合的下标一起使用,即: $d_{0,u}$ 或 $d_{0,r}$ 。

[GB/T 15313—2008,定义 2.1.53.1]

3.3

光束宽度 beam widths

$d_{x,u}$, $d_{y,u}$

分别在两所选的相互正交且垂直于光束轴的 x 和 y 方向上,内含功率(或能量)占总功率(或能量)规定比例($u\%$)的最小宽度。

注1:所选最小方向由最小束宽及其正交方向确定。

注2:对于圆形高斯光束, $d_{x,95.4} = d_{98.5}$ 。

注3:为了明确,光束宽度的标识要将符号及其适合的下标一起使用,即: $d_{x,u}$, $d_{y,u}$ 或 d_{α} , d_{β} 。

[GB/T 15313—2008, 定义 2.1.57.1]

3.4

束腰宽度 beam waist widths

$d_{x0,u}, d_{y0,u}$

在 x 和 y 方向上,束腰位置处基于内含功率(或能量)定义的光束宽度 $d_{x,u}$ 和 $d_{y,u}$ 。

注:为了明确,束腰宽度的标识要将符号及其适合的下标一起使用,即: $d_{x0,u}, d_{y0,u}$ 或 d_{x0}, d_{y0} 。

[GB/T 15313—2008, 定义 2.1.55.1]

3.5

束散角 divergence angle

$\Theta_u, \Theta_{ax}, \Theta_{ay}$

光束宽度[内含功率(或能量)定义的]在远场增大形成的渐进锥面所构成的全角度。

注1:对圆截面,光束宽度为光束直径 d_u 。对于非圆截面,束散角分别由相应的 x 方向和 y 方向的光束宽度 $d_{x,u}$ 和 $d_{y,u}$ 决定。

注2:当规定束散角时,应使用下标说明相关的光束宽度,如 $\Theta_{x,50}$ 说明光束宽度为 $d_{x,50}$ 。

注3:这里坐标系的定义和光束宽度的定义不包括一般像散情况。

注4:为了明确,束散角的表示要将符号及其适合的下标一起使用,即: $\Theta_x, \Theta_{ax}, \Theta_{ay}$ 或 $\Theta_u, \Theta_{x,u}, \Theta_{y,u}$ 。

[GB/T 15313—2008, 定义 2.1.65.1]

3.6

束散半角 half divergence angle

$\theta_u, \theta_{ax}, \theta_{ay}$

光束宽度[内含功率(或能量)定义的]在远场增大形成的渐进锥面所构成的半角度。

注1:对圆截面,光束宽度为光束直径 d_u 。对于非圆截面,束散半角分别由相应的 x 方向和 y 方向的光束宽度 $d_{x,u}$ 和 $d_{y,u}$ 决定。

注2:当规定束散角时,应使用下标说明相关的光束宽度,如 $\theta_{x,50}$ 说明光束宽度为 $d_{x,50}$ 。

注3:这里坐标系的定义和光束宽度的定义不包括一般像散情况。

注4:为了明确,束散角的表示要将符号及其适合的下标一起使用,即: $\theta_x, \theta_{ax}, \theta_{ay}$ 或 $\theta_u, \theta_{x,u}, \theta_{y,u}$ 。

3.7

光束聚焦特征参数值 beam focus characterizing parameter

K_f

光束束腰直径(或光束束腰宽度)与束散角的乘积的 1/4[见式(1)],即:

$$K_f = \frac{d_{0,u} \Theta_u}{4} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

K_f ——光束聚焦特征参数值,单位为毫米毫弧度(mm·mrad);

$d_{0,u}$ ——光束束腰直径,单位为毫米(mm);

Θ_u ——束散角,单位为毫弧度(mrad)。

4 光束质量评价

4.1 评价参数

用光束聚焦特征参数值 K_f 评价本标准适用的激光器的光束质量,相关信息参见附录 A。

4.2 光束参数的计算

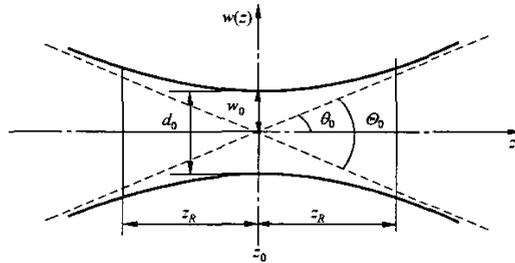
将沿光束传输路径上由测试所得的光束直径结果拟合出位置和光束直径二次双曲线,然后根据双

曲线系数来计算其他光束参数。二次双曲线形如图 1 所示,计算公式[参见式(2)],表示为:

$$d^2 = A + Bz + Cz^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- d —— 光束直径,单位为毫米(mm);
- $A、B、C$ —— 双曲线系数;
- z —— 拟测试位置与初始位置之间的距离,单位为毫米(mm)。



说明:

- d_0 —— 束腰直径;
- w_0 —— 束腰半径;
- Θ_0 —— 束散角;
- θ_0 —— 束散半角;
- z_R —— 瑞利长度;
- z_0 —— 束腰位置,光束束腰与初始测试点之间的相对距离。

图 1 位置(z)和光束直径(d)二次双曲线

根据拟合方程求出双曲线系数,光束参数的计算公式按照 ISO 11146-1 的表示[见式(3)~式(7)],表示如下:

$$\Theta = \sqrt{C} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$d_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$z_0 = -\frac{B}{2C} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$z_R = \sqrt{\frac{4A}{C} - \frac{B^2}{C^2}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$K_f = \frac{\sqrt{4AC - B^2}}{8} \quad \dots\dots\dots(7)$$

5 光束质量的测试条件及要求

5.1 测试条件

测试条件如下:

- a) 测试时的环境温度要求在测试对象的工作环境温度,相对湿度 45%~75%,气压 80 kPa~106 kPa;
- b) 测试设备应稳定可靠,量程适用,并防止外界条件对它们的影响;
- c) 测试系统的周围环境要求无明显的振动、气流、烟尘和杂散辐射的影响;
- d) 除非另有规定,被测激光器应在详细规范中规定的工作程序和工作条件下工作,并在稳定工作之后测试有关参数。

5.2 测试设备

除非另有规定,测试设备应采用基于空心探针测试原理的设备,光探测器的波长范围应与待测激光波长相匹配,其测试范围应能够满足待测激光的能量密度阈值。应注意光学器件的承受能力,允许在测试设备上采用保护装置,但不应该影响测试准确度。

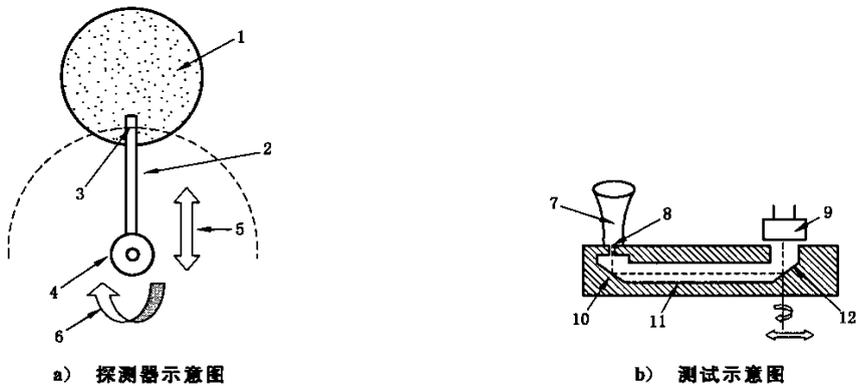
5.3 安全防护

为了保障工作人员的安全,对高压、激光辐射应有相应的防护措施,应按照 GB 7247.1 的要求采取安全防护措施。

6 光束质量的测试方法

6.1 测试原理

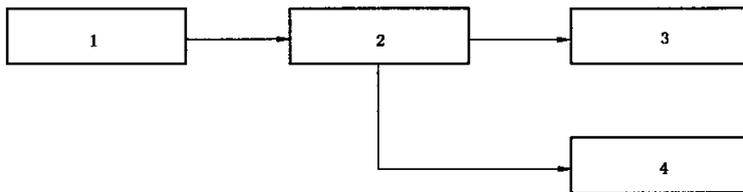
测试原理见图 2,测试系统见图 3,相关信息参见附录 A。



说明:

- | | | |
|----------|---------|------------|
| 1——光束截面; | 5——平动; | 9——探测器; |
| 2——探针; | 6——转动; | 10——第一反射面; |
| 3——扫描线; | 7——激光束; | 11——中空管; |
| 4——小孔; | 8——小孔; | 12——第二反射面。 |

图 2 空心探针扫描测试原理示意图



说明:

- | |
|---------------|
| 1——被测激光; |
| 2——光束光斑质量诊断仪; |
| 3——吸收体; |
| 4——计算机。 |

图 3 测试系统示意图

6.2 测试准备

除非另有规定,在测试前应按照详细规范的要求选取合适的测试仪器,并按下列要求做好准备:

- a) 符合第 5 章所规定的测试条件和要求;
- b) 按测试系统方框图组成测试系统;
- c) 根据被测激光器的波长及功率选择合适的探测器和探针;
- d) 确认冷却系统已经准备就绪。

6.3 测试步骤

测试步骤如下:

- a) 将氦氛指示光置于测试仪示意位置后关闭氦氛激光。启动光束光斑质量诊断仪,启动激光器。对测试点 Z 处光束横截面的能量(或功率)分布进行预测试,根据预测试结果选择合适的测试窗口和增益值;
- b) 在预测试基础上开始正式测试,记录计算机上显示的光束直径,每个位置测试次数 ≥ 5 次,取平均值作为该测试位置光束直径值;
- c) 每次改变光斑或者测试仪的位置,都要重复上两个步骤。至少要测试 10 个位置,接近一半的数据要在束腰一侧瑞利长度范围内采集,还要有接近一半的数据在束腰一侧 2 倍瑞利范围外采集。

6.4 测试结果

按 4.2 进行计算。

7 测试报告

测试报告应包括以下内容:

- a) 测试时间、地点、被测激光器的情况,包括被测激光器的生产商、型号、波长、功率;
- b) 测试所选用的探测器和探针的情况,包括探测器种类、探针类型及探针孔径;
- c) 初始测试输入条件,包括测试位置、窗口、增益值的选择;
- d) 测试数据按照 4.2 进行计算的结果。

附录 A
(资料性附录)

其他激光光束质量评价参数和测试方法

A.1 概述

本标准根据标准适用范围“工业制造用大功率激光器”提出了推荐性的评价参数。光束质量是激光制造系统和激光应用技术发展的关键参数。光束传输比 M^2 的物理意义和光束聚焦特征参数值(即光束参数积 BPP)的物理意义已经明确。

A.2 光束传输比

M^2 因子理论通过光束横截面上强度分布的二阶距表示光束束宽,用 M^2 因子表示光束质量。 M^2 因子公式[参见式(A.1)]表示为:

$$M^2 = \frac{d_0 \Theta_0}{d_{00} \Theta_{00}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- d_{00} ——基模高斯光束的束腰直径;
- Θ_{00} ——基模高斯光束的束散角;
- d_0 ——实际光束的束腰直径;
- Θ_0 ——实际光束的束散角。

M^2 因子理论建立在空间域和空间频率域中束宽的二阶距定义基础上,激光束束腰宽度由束腰横截面上的光强分布来决定,远场发散角由相位分布决定, M^2 因子能够反映光场的强度分布和相位分布特性。 M^2 因子的重要性在于它表征了一个实际光束偏离极限衍射发散速度的程度, M^2 因子越大则光束衍射发散越快。 M^2 因子是一个比值,用基模高斯光束的束腰直径和远场发散角的乘积作为分母,当实际光束与基模高斯光束进行比值时,除了包含光束直径和发散角外,还包含了激光的波长。 M^2 因子相同但波长不同的激光器的加工质量可能有很大不同。

A.3 光束聚焦特征参数值与光束传输比的比较

光束聚焦特征参数值 K_f 是激光束空间横模特性的量化评价,它仅包含了光束直径和发散角,并不包含波长的因素,能更好地反映激光束的聚焦特性。两者之间的关系[参见式(A.2)]可以表示为:

$$K_f = \frac{\lambda}{\pi} M^2 \dots\dots\dots (A.2)$$

波长表征了光束的衍射极限。

本标准推荐用 K_f 值作为评价激光光束质量的参数。其中 K 代表光束传输因子,下标 f 表示“focus”,即聚焦。 K_f 值是根据在实际光束传输路径上不同位置处对光束束宽的值,用双曲线方法拟合计算的结果。比将其再与基模高斯光束进行比值计算的 M^2 因子(或 K 值)更有说服力。

A.4 其他光束质量测试方法

A.4.1 早期的测试方法

《激光辐射发散角测试方法》(GB/T 13740—1992)、《激光光束宽度、发散角的测试方法以及横模的

鉴别方法》(GB/T 13739—2011)中推荐了套孔法和小孔扫描测试方法。套孔法是通过测试有无光阑时的能量比,根据光阑透过率计算光斑半径;小孔扫描测试方法是用小孔探测到归一化的光强分布曲线,然后计算出该处的光束半径。这两种测试方法适用于中小功率激光器。

A.4.2 适用于中高功率的测试方法

适用于中高功率激光的测试方法主要包括 CCD 法、移动刀口法、移动狭缝法。

CCD 法是将 CCD 探头垂直置于光轴处,选择适当的衰减量,并充分利用 CCD 动态范围,测试光束横截面的能量(或功率)强度分布,然后按照光强分布的二阶矩计算光束直径。

移动刀口法和移动狭缝法是将刀口(或狭缝)放置于激光器及功率计(或能量计)之间的光轴上,刀口在一个机械平台上沿和光束垂直的 X 方向移动,逐渐遮挡住输出光斑,进入功率计(或能量计)的功率(或能量)逐渐减小,探测器测试出的透射激光功率为刀口位置的函数。记录功率计(或能量计)读数为原始功率(或能量)的 84% 及 16% 时的对应几何位置 X_1 及 X_2 ,按式(A.3)计算 X 方向的光束直径 d_x :

$$d_x = 2 |X_1 - X_2| \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

d_x —— 光束直径;

X_1 —— 读数为原始功率(或能量)的 84% 时的对应几何位置;

X_2 —— 读数为原始功率(或能量)的 16% 时的对应几何位置。

以上几种测试方法需要对激光束进行衰减。

A.4.3 适用于高功率的测试方法

适用于高功率的测试方法主要包括实心探针法、辐带轮法和空心探针法。

实心探针法是由电机带动一个抛光的实心探针,在垂直于激光光束的平面上转动,圆棒形实心探针在光束中的不同位置反射出部分光束,在空间一定位置放置两个探测器,分别接收探针不同面上反射出的光。在光束横截面上,两条相交弧线上的功率密度分布可以测得。如果移动测试系统,重复测试,使弧线扫过整个光斑,就可以测得整个光束截面功率密度分布。辐带轮测试原理与此相似,只是用多个探针的轮代替了一个探针,并加上一个聚焦镜和一个斩波器。

本标准推荐的空心探针测试方法是采用一根带小孔的空心探针扫描激光束,探针一边高速旋转,一边前后运动。在探针扫过光束截面的瞬时,由小孔进入的一小部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,同时,高速采样系统对热电探测器输出的信号采样后送入后续电路进行处理。当探针扫描完整个光束截面后就可以得到光斑直径和功率密度分布,空心探针测试方法可以测试的激光功率密度范围为: $10^2 \text{ W/cm}^2 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 。