



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2170—2024

## 激光光束分析仪校准规范

Calibration Specification for Laser Beam Analyzers



2024-10-19 发布

2025-04-19 实施

国家市场监督管理总局 发布

# 激光光束分析仪校准规范

Calibration Specification for  
Laser Beam Analyzers

JJF 2170—2024

归口单位：全国光学计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

深圳市计量质量检测研究院

参加起草单位：上海市计量测试技术研究院

中国科学院空天信息创新研究院

江苏省计量科学研究院

**本规范主要起草人：**

马 冲（中国计量科学研究院）

李向召（深圳市计量质量检测研究院）

邓玉强（中国计量科学研究院）

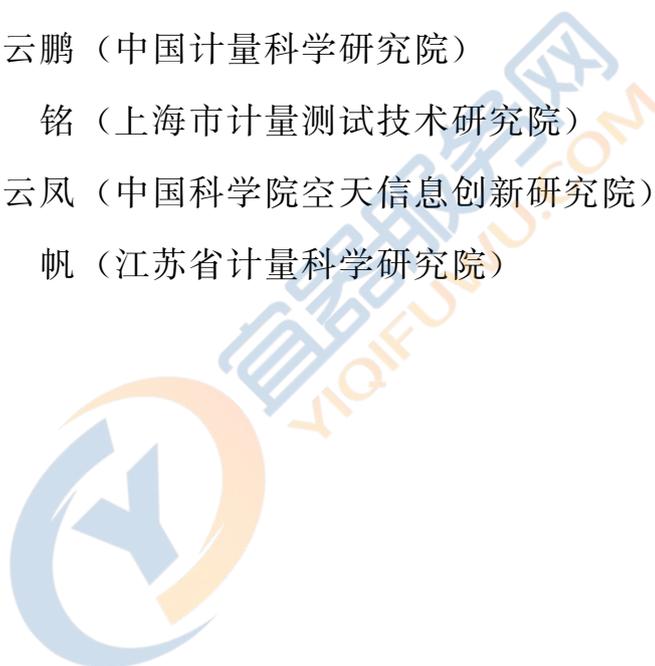
**参加起草人：**

张云鹏（中国计量科学研究院）

夏 铭（上海市计量测试技术研究院）

麻云凤（中国科学院空天信息创新研究院）

张 帆（江苏省计量科学研究院）



# 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 引言 .....                | ( II ) |
| 1 范围 .....              | ( 1 )  |
| 2 引用文件 .....            | ( 1 )  |
| 3 术语 .....              | ( 1 )  |
| 4 概述 .....              | ( 2 )  |
| 5 计量特性 .....            | ( 2 )  |
| 6 校准条件 .....            | ( 3 )  |
| 6.1 环境条件 .....          | ( 3 )  |
| 6.2 测量标准及其他设备 .....     | ( 3 )  |
| 7 校准项目和校准方法 .....       | ( 3 )  |
| 7.1 校准项目 .....          | ( 3 )  |
| 7.2 校准前准备 .....         | ( 3 )  |
| 7.3 校准方法 .....          | ( 3 )  |
| 8 校准结果表达 .....          | ( 6 )  |
| 9 复校时间间隔 .....          | ( 7 )  |
| 附录 A 校准原始记录参考格式 .....   | ( 8 )  |
| 附录 B 校准证书内页推荐格式 .....   | ( 9 )  |
| 附录 C 校准结果不确定度评定示例 ..... | ( 10 ) |
| 附录 D 光束空域参数部分术语 .....   | ( 12 ) |

## 引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》、JJF 1032—2005《光学辐射计量名词术语及定义》共同构成本规范制定的基础性系列规范。

本规范为首次发布。



## 激光光束分析仪校准规范

### 1 范围

本规范适用于光束宽度（0.2~10）mm 范围内激光光束分析仪的校准。其他光束宽度范围的激光光束分析仪校准可参照本规范执行。

### 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 13739—2011 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 15313—2008 激光术语

GB/T 26599.1—2011 激光和激光相关设备 激光光束宽度、发散角和光束传输比的试验方法 第1部分：无像散和简单像散光束

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

### 3 术语

GB/T 13739—2011、GB/T 15313—2008 和 GB/T 26599.1—2011 界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

#### 3.1 光束宽度 beam width

分别在两个所选的相互正交且垂直于光束轴的  $X'$  和  $Y'$  方向上，光束截面内含功率（或能量）占总功率（或能量）规定比例（ $u\%$ ）的区域的最小宽度。

注：

1 所选方向由最小宽度及其正交方向确定。

2 在  $X'$  和  $Y'$  方向上的光束宽度分别用符号  $d_{X',u}(z)$  和  $d_{Y',u}(z)$  表示。

3 对于圆形高斯光束， $d_{X',95.8} = d_{86.5}$ 。

4 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  $d_{X',u}$ ， $d_{Y',u}$ ， $d_{\sigma X'}$ ， $d_{\sigma Y'}$ ，其中  $d_{\sigma X'}$  和  $d_{\sigma Y'}$  分别是  $4\sigma$  法计算的  $X'$  和  $Y'$  方向上的光束宽度。

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.57.1，有修改]

#### 3.2 光束传输比 beam propagation ratio

沿着简单像散光束主轴的光束参数积或无像散光束的光束参数积与相同波长  $\lambda$  的衍射极限的理想高斯光束（TEM<sub>00</sub> 模）光束参数积之比。

对于简单像散光束，沿着光束主轴  $X'$  和  $Y'$  方向上的光束传输比分别用符号  $M_{X'}^2$  和  $M_{Y'}^2$  表示，见式（1）和式（2）。

$$M_{X'}^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{d_{\sigma X'0} \theta_{\sigma X'}}{4} \quad (1)$$

$$M_{Y'}^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{d_{\sigma Y'0} \theta_{\sigma Y'}}{4} \quad (2)$$

式中：

$\lambda$ ——激光波长；

$d_{\sigma X'0}$ —— $x$  方向的束腰光束宽度；

$\theta_{\sigma X'}$ —— $x$  方向的光束发散角；

$d_{\sigma Y'0}$ —— $y$  方向的束腰光束宽度；

$\theta_{\sigma Y'}$ —— $y$  方向的光束发散角。

对于无像散光束，光束传输比分别用符号  $M^2$  表示，见式 (3)。

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{d_{\sigma 0} \theta_{\sigma}}{4} \quad (3)$$

式中：

$d_{\sigma 0}$ ——无像散光束的束腰直径；

$\theta_{\sigma}$ ——无像散光束的光束发散角。

注：

1 光束参数积的定义见附录 D.22。

2 对于无像散光束和简单像散光束，只要相关光学元件不改变光束的无像散或简单像散特性，光束传输比是传输不变量。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.16；GB/T 13739—2011，3.7，有修改]

## 4 概述

激光光束分析仪是测量激光空域参数特性的仪器，用于激光光束截面的相对功率（或能量）空域分布、光束宽度、光束传输比等参数的测量。激光光束分析仪主要有两种类型：一种用于测量激光光束宽度或光束直径，叫激光光束轮廓仪，简称光束轮廓仪；另一种用于测量激光光束传输比，叫激光光束质量分析仪，简称光束质量分析仪。二者统称激光光束分析仪，简称光束分析仪。

光束轮廓仪由探测器和数据采集分析软件组成。探测器分为阵列式探测器、狭缝扫描式探测器和刀口扫描式探测器等，其中阵列式探测器较为常见，如 CCD。探测器主要用于测量激光束横截面内的功率密度分布。数据采集分析软件采集、存储、分析、显示测量数据，并使用不同算法计算光束宽度。光束宽度的计算方法主要有  $4\sigma$  法、移动刀口法或移动狭缝法等。

光束质量分析仪由阵列式探测器、狭缝扫描式探测器、刀口扫描式探测器等光束轮廓仪和导轨扫描系统构成，通过基于沿传播光束不同位置的光束宽度测量光束束腰宽度和远场发散角等信息，与基模束腰宽度与远场发散角乘积相比，测量光束传输比。

## 5 计量特性

光束宽度示值相对误差：不超过  $\pm 8\%$ ；

光束传输比示值相对误差：不超过  $\pm 10\%$ 。

注：以上指标不适用于符合性判定，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(23\pm 5)$  °C，校准期间内温度变化不大于 $\pm 2$  °C。

6.1.2 相对湿度： $\leq 75\%$ ，校准期间内相对湿度变化不大于 $\pm 3\%$ 。

6.1.3 背景辐射：在暗室操作，或对背景辐射采取屏蔽措施，如紧贴探测器加滤光器等。

6.1.4 其他：校准区域内无可感觉到的空气波动、热辐射，无影响测量数据的振动和电磁干扰。

### 6.2 测量标准及其他设备

#### 6.2.1 标准光束分析仪

a) 光束宽度测量范围： $(0.2\sim 10)$  mm；

b) 光束宽度测量不确定度： $U_{rel}\leq 3\%$  ( $k=2$ )；

c) 光束传输比测量不确定度： $U_{rel}\leq 3\%$  ( $k=2$ )。

#### 6.2.2 激光器

a) 横模模式： $TEM_{00}$ 基横模；

注：尽量选用无像散光束的激光器，例如光束质量良好的氦氖激光器；对于特殊校准波长，可选用简单像散光束的激光器。

b) 工作方式：连续波输出；

c) 光束宽度范围（可配扩束器或缩束器）： $(0.2\sim 10)$  mm；

d) 光束宽度不稳定性：优于 $\pm 1\%/h$ 。

#### 6.2.3 光学元件

校准使用的扩束器、缩束器、衰减器等光学元件本身，及其产生的透射、反射、衍射等效应，应对光束功率密度分布无明显影响，衰减器应对光束宽度测量结果无明显影响。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

光束宽度示值相对误差、光束传输比示值相对误差。

### 7.2 校准前准备

检查被校光束分析仪是否有影响测量的划痕、损伤以及其他缺陷；检查与计算机连接的信号线或图像卡，说明书及配套软件是否齐全；安装软件，连接被校光束分析仪和计算机，查看被校光束分析仪是否工作正常；确认被校光束分析仪光谱响应范围覆盖校准用激光波长。

### 7.3 校准方法

#### 7.3.1 校准装置框图

校准装置框图见图 1。

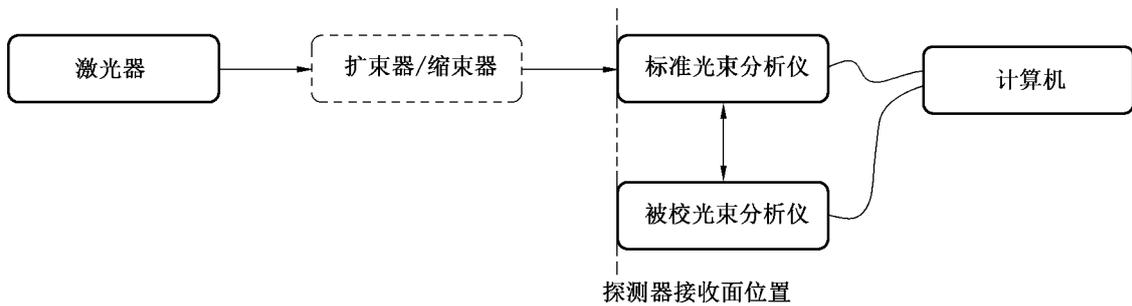


图1 校准装置框图

### 7.3.2 光束宽度校准方法

#### 7.3.2.1 校准步骤

a) 打开激光器，预热，使激光器进入稳定工作状态。

b) 当入射激光功率密度超过探测器损伤阈值或工作范围时，应使用衰减器降低入射激光功率。应保证探测器接收面足够大，可接收整个光束横截面，因接收面大小不足引起的未接收的功率应不超过总功率的1%，采用 $4\sigma$ 法时接收面直径应大于光束最大宽度的2倍。

c) 将标准光束分析仪放入光路，并调整使激光束垂直入射至探测器接收面，记录接收面在光束传输轴上的位置。

d) 用挡屏遮挡入射激光，采集背景图像。移去挡屏，连续采集图像。当图像信号过弱或饱和时，通过调整衰减器衰减量或探测器参数，至入射激光信号强度合适，信号峰值应不低于探测器动态范围的50%。采集一帧或多帧图像。选择光束宽度算法，测量光束宽度。

e) 用被校光束分析仪替换标准光束分析仪，保证被校光束分析仪接收面在传输轴上的位置与标准光束分析仪探测器接收面位置相同。对于阵列式探测器的光束分析仪，探测器接收面为阵列探测器敏感面；对于狭缝扫描式探测器和刀口扫描式探测器的光束分析仪，探测器接收面为刀口或狭缝所在平面。按照步骤c)，步骤d)调整探测器位置，采集图像数据，并选择与步骤d)中相同的算法测量光束宽度。

f) 重复步骤c)~步骤e)交替测量不少于3次，并记录每一次的测量结果。

g) 在图1所示的校准装置框图中加入扩束器/缩束器，改变光束宽度，重复步骤b)~步骤f)，在(0.2~10) mm光束宽度范围内选取合适的光束宽度对被校光束分析仪进行校准，校准时注意标准光束分析仪和被校光束分析仪探测器接收面位置相同。

注：对于简单像散光束，应对两个主轴方向分别进行校准，并保证标准光束分析仪和被校光束分析仪的光束宽度测量方向一致。

#### 7.3.2.2 数据处理

a) 标准光束分析仪测得的X轴方向和Y轴方向光束宽度平均值分别按式(4)和式(5)计算：

$$\bar{d}_{X,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{X,s,i} \quad (n \geq 3) \quad (4)$$

$$\bar{d}_{Y,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{Y,s,i} \quad (n \geq 3) \quad (5)$$

式中：

$d_{X,s,i}$ ——第  $i$  次测量的  $X$  轴方向光束宽度标准值；

$d_{Y,s,i}$ ——第  $i$  次测量的  $Y$  轴方向光束宽度标准值；

$n$ ——测量次数。

b) 被校光束分析仪测得的  $X$  轴方向和  $Y$  轴方向光束宽度平均值分别按式 (6) 和式 (7) 计算：

$$\bar{d}_{X,dut} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{X,dut,i} \quad (n \geq 3) \quad (6)$$

$$\bar{d}_{Y,dut} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{Y,dut,i} \quad (n \geq 3) \quad (7)$$

式中：

$d_{X,dut,i}$ ——第  $i$  次测量的  $X$  轴方向光束宽度被校示值；

$d_{Y,dut,i}$ ——第  $i$  次测量的  $Y$  轴方向光束宽度被校示值。

c) 被校光束分析仪  $X$  轴方向和  $Y$  轴方向光束宽度的示值相对误差分别按式 (8) 和式 (9) 计算：

$$\delta_{d,X} = \frac{\bar{d}_{X,dut} - \bar{d}_{X,s}}{\bar{d}_{X,s}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\delta_{d,Y} = \frac{\bar{d}_{Y,dut} - \bar{d}_{Y,s}}{\bar{d}_{Y,s}} \times 100\% \quad (9)$$

d) 被校光束分析仪  $X$  轴方向和  $Y$  轴方向光束宽度的修正因子分别按式 (10) 和式 (11) 计算：

$$C_{d,X} = \frac{\bar{d}_{X,s}}{\bar{d}_{X,dut}} \quad (10)$$

$$C_{d,Y} = \frac{\bar{d}_{Y,s}}{\bar{d}_{Y,dut}} \quad (11)$$

### 7.3.3 光束传输比较准方法

#### 7.3.3.1 校准步骤

a) 打开激光器，预热，使激光器进入稳定工作状态。

b) 当入射激光功率密度超过探测器损伤阈值或工作范围时，应使用衰减器降低入射激光功率。应保证探测器接收面足够大，可接收整个光束横截面，因接收面大小不足引起的未接收的功率应不超过总功率的 1%，采用  $4\sigma$  法时接收面直径应大于光束最大宽度的 2 倍。

c) 将标准光束分析仪放入光路，并调整使激光束垂直入射至探测器接收面。当图像信号过弱或饱和时，通过调整衰减器衰减量或探测器参数，至入射激光信号强度合适。用标准光束分析仪测量光束传输比标准值，测量时至少测量 10 个不同位置的光束宽度，且至少有 5 个测量位置处于其瑞利长度范围内，至少有 3 个测量位置处于其瑞利

长度范围外。

d) 用被校光束分析仪替换标准光束分析仪，并调整使激光束垂直入射至探测器接收面，当图像信号过弱或饱和时，通过调整衰减器衰减量或探测器参数，至入射激光信号强度合适。用被校光束分析仪测量光束传输比测量示值，测量时至少测量 10 个不同位置的光束宽度，且至少有 5 个测量位置处于其瑞利长度范围内，至少有 3 个测量位置处于其瑞利长度范围外。

e) 重复步骤 c)、步骤 d) 交替测量不少于 3 次，并记录每一次的测量结果。

注：对于简单像散光束，应对两个主轴方向分别进行校准，并保证标准光束分析仪和被校光束分析仪的光束宽度测量方向一致。

### 7.3.3.2 数据处理

a) 标准光束分析仪测得的光束传输比平均值按式 (12) 和式 (13) 计算：

$$\overline{M}_{X,s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{X,s,i}^2 \quad (n \geq 3) \quad (12)$$

$$\overline{M}_{Y,s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{Y,s,i}^2 \quad (n \geq 3) \quad (13)$$

式中：

$M_{X,s,i}^2$ ——第  $i$  次测量的 X 轴方向光束传输比标准值；

$M_{Y,s,i}^2$ ——第  $i$  次测量的 Y 轴方向光束传输比标准值。

b) 被校光束分析仪测得的光束传输比平均值按式 (14) 和式 (15) 计算：

$$\overline{M}_{X,dut}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{X,dut,i}^2 \quad (n \geq 3) \quad (14)$$

$$\overline{M}_{Y,dut}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{Y,dut,i}^2 \quad (n \geq 3) \quad (15)$$

式中：

$M_{X,dut,i}^2$ ——第  $i$  次测量的 X 轴方向光束传输比被校示值；

$M_{Y,dut,i}^2$ ——第  $i$  次测量的 Y 轴方向光束传输比被校示值。

c) 被校光束分析仪光束传输比的示值相对误差按式 (16) 和式 (17) 计算：

$$\delta_{M^2,X} = \frac{\overline{M}_{X,dut}^2 - \overline{M}_{X,s}^2}{\overline{M}_{X,s}^2} \times 100\% \quad (16)$$

$$\delta_{M^2,Y} = \frac{\overline{M}_{Y,dut}^2 - \overline{M}_{Y,s}^2}{\overline{M}_{Y,s}^2} \times 100\% \quad (17)$$

d) 被校光束分析仪光束传输比的修正因子按式 (18) 和式 (19) 计算：

$$C_{M^2,X} = \frac{\overline{M}_{X,s}^2}{\overline{M}_{X,dut}^2} \quad (18)$$

$$C_{M^2,Y} = \frac{\overline{M}_{Y,s}^2}{\overline{M}_{Y,dut}^2} \quad (19)$$

## 8 校准结果表达

校准结果应在证书中反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过1年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。更换重要部件、维修、重新安装或对仪器性能有怀疑时，应随时送校。

## 附录 A

## 校准原始记录参考格式

| 原始记录编号：_____  |                          |                               |                           |     |
|---|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----|
| 仪器名称：_____  |                          | 制造厂家：_____                    |                           |     |
| 仪器型号/出厂编号：_____   |                          | 分析软件名称：_____                  |                           |     |
| 送校单位名称：_____  |                          | 送校单位地址：_____                  |                           |     |
| 联系人：_____   |                          | 联系电话：_____                    |                           |     |
| 送校日期：_____  |                          | 校准日期：_____                    |                           |     |
| 1 外观及功能检查： <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 缺陷 备注：_____   |                          |                               |                           |     |
| 2 环境条件  |                          |                               |                           |     |
| 地点：_____ 温度：_____ °C 相对湿度：_____ %   |                          |                               |                           |     |
| 背景辐射屏蔽措施： <input type="checkbox"/> 暗室 <input type="checkbox"/> 探测器前加衰减器 <input type="checkbox"/> 其他说明：_____   |                          |                               |                           |     |
| 3 校准使用的计量标准及配套设备  |                          |                               |                           |     |
| 标准光束分析仪：型号/出厂编号：_____   |                          | 配套分析软件名称：_____                |                           |     |
| 证书编号：_____  |                          | 有效期至：_____                    |                           |     |
| 激光器：激光器类型：_____   |                          | 输出波长：_____                    |                           |     |
| 光束形状： <input type="checkbox"/> 圆光束  |                          | <input type="checkbox"/> 椭圆光束 |                           |     |
| 其他光学元件使用情况说明：_____  |                          |                               |                           |     |
| 4 校准数据记录  |                          |                               |                           |     |
| 光束宽度计算时，标准与被校光束分析仪使用的坐标系是否一致： <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否   |                          |                               |                           |     |
| 标准使用的束宽算法： <input type="checkbox"/> 4 $\sigma$ 法 <input type="checkbox"/> 90%~10%刀口法 <input type="checkbox"/> 86%~14%刀口法 <input type="checkbox"/> 狭缝法 |                          |                               |                           |     |
| 被测使用的束宽算法： <input type="checkbox"/> 4 $\sigma$ 法 <input type="checkbox"/> 90%~10%刀口法 <input type="checkbox"/> 86%~14%刀口法 <input type="checkbox"/> 狭缝法 |                          |                               |                           |     |
| <b>光束分析仪校准数据记录</b>  |                          |                               |                           |     |
| 测量次数  | 标准光束分析仪<br>光束宽度/光束传输比标准值 |                               | 被校光束分析仪<br>光束宽度/光束传输比测量示值 |     |
|   | X 轴                      | Y 轴                           | X 轴                       | Y 轴 |
| 1   |                          |                               |                           |     |
| 2   |                          |                               |                           |     |
| 3   |                          |                               |                           |     |
| 平均值   |                          |                               |                           |     |
| 示值相对误差  |                          |                               |                           |     |
| 修正因子  |                          |                               |                           |     |
| 测量不确定度  |                          |                               |                           |     |
| 校准员：_____ 核验员：_____   |                          |                               |                           |     |

## 附录 B

## 校准证书内页推荐格式

| 证书编号：_____            |   |      |        |      |      |
|-----------------------|---|------|--------|------|------|
| 共_____页 第_____页       |   |      |        |      |      |
| 校准波长：_____            |   |      |        |      |      |
| 参数                    | 标准值   | 被校示值 | 示值相对误差 | 修正因子 | 不确定度 |
| $d_x$                 |   |      |        |      |      |
| $d_y$                 |   |      |        |      |      |
| $M_x^2$               |   |      |        |      |      |
| $M_y^2$               |   |      |        |      |      |
| 备注                    | 1. 光束宽度算法：标准采用_____被测采用_____；<br>2. 光束宽度测量的方向： $d_x$ ， $d_y$ 分别指入射光束主轴方向的光束宽度；<br>3. 光束传输比测量的方向： $M_x^2$ ， $M_y^2$ 分别指入射光束主轴方向的光束传输比；<br>4. 示值相对误差 = 被校示值 - 标准值；<br>5. 修正因子 = 标准值 / 被校示值。 |      |        |      |      |
| 校准日期：_____年____月____日 |   |      |        |      |      |
| 检定员：_____ 核验员：_____   |   |      |        |      |      |

## 附录 C

## 校准结果不确定度评定示例

## C.1 测量模型

被校光束分析仪光束宽度示值相对误差表示见式 (C.1):

$$\delta = \frac{d_{\text{dut}} - d_s}{d_s} \cdot f \times 100\% \quad (\text{C.1})$$

被校光束分析仪光束宽度修正因子表示见式 (C.2):

$$C = \frac{d_s}{d_{\text{dut}}} \cdot f \quad (\text{C.2})$$

式中:

$d_s$ ——标准光束分析仪光束宽度测量标准值;

$d_{\text{dut}}$ ——被校光束分析仪光束宽度测量示值;

$f$ ——由于标准、被测探测器接收面放置位置、方向不同引入的修正因子。

## C.2 不确定度来源

## C.2.1 标准光束分析仪光束宽度测量标准值

标准光束分析仪光束宽度测量标准值不确定度由上级溯源证书给出。证书给出的相对扩展不确定度  $U_{\text{rel}} = 2.0\%$  ( $k=2$ )。标准光束分析仪光束宽度测量标准值引入的标准不确定度为:

$$u_s = \frac{U_{\text{rel}}}{k} = 1.0\%$$

## C.2.2 被校光束分析仪光束宽度测量重复性

用被校光束分析仪进行 6 次独立重复测量, 平均值为  $\bar{d}_{\text{dut}}$  输入量估计值, 其相对实验标准差  $s(\bar{d}_{\text{dut}})$  作为估计值引入的标准不确定度:

$$u_r = s(\bar{d}_{\text{dut}}) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{\text{dut},i} - \bar{d}_{\text{dut}})^2}{n(n-1)}}}{\bar{d}_{\text{dut}}} \quad (n=6)$$

被校光束分析仪 6 次测量数据的平均值  $\bar{d}_{\text{dut}} = 1.261 \text{ mm}$ ,  $u_r = 0.8\%$ 。

## C.2.3 标准与被校光束分析仪位置差异引入的不确定度

光束宽度测量过程中, 应尽量保持标准和被测探测器接收面处于光路相同位置, 但由于大多探测器接收面并非在探测器外表面, 检测人员对于标准和被测探测器接收面位置的判断会出现误差, 如果测量光束发散角较大, 该误差会对测量结果带来较大影响。校准中光束发散角为  $1.00 \text{ mrad}$ , 位置偏移的最大偏差为  $\pm 2.5 \text{ mm}$ , 计算可得出位置不同引入的光束宽度最大偏差为  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ , 最大相对偏差为  $\pm 0.2\%$ 。

标准和被测探测器接收面位置不同的修正因子  $f$  服从矩形分布, 置信区间半宽为  $a = 0.2\%$ ,  $k = \sqrt{3}$ , 引入的标准不确定度为:

$$u_p = \frac{a}{k} = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} \approx 0.1\%$$

#### C.2.4 标准与被校光束分析仪方向差异引入的不确定度

光束宽度测量过程中，尽量保持标准和被测探测器接收面都垂直于入射光束进行测量。若标准或被测探测器接收面不垂直于入射光束，则测量的光束宽度会产生余弦误差。当标准或被测探测器接收面法线与入射光束夹角为 $2^\circ$ 时，余弦误差为 $0.06\%$ 。

标准或被测探测器接收面不垂直于入射光束的修正因子 $f$ 服从三角分布，置信区间半宽为 $a=0.06\%$ ， $k=\sqrt{6}$ ，引入的标准不确定度为：

$$u_a = \frac{a}{k} = \frac{0.06\%}{\sqrt{6}} \approx 0.03\%$$

#### C.2.5 不确定度汇总

以上各不确定度分类汇总表如表 C.1 所示。

表 C.1 不确定度汇总表

| 不确定度来源           | 评定方法 | 引入的不确定度分量 |
|------------------|------|-----------|
| 标准光束分析仪光束宽度测量标准值 | B    | 1.0%      |
| 被校光束分析仪光束宽度测量重复性 | A    | 0.8%      |
| 标准与被校光束分析仪位置差异   | B    | 0.1%      |
| 标准与被校光束分析仪方向差异   | B    | 0.03%     |

#### C.3 合成标准不确定度和扩展不确定度

表 C.1 中的各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 $u_c$ 为：

$$u_{c,rel} = \sqrt{u_s^2 + u_r^2 + u_p^2 + u_a^2} = 1.3\%$$

取包含因子 $k=2$ ，相对扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k \cdot u_{c,rel} = 2.6\%$$

## 附录 D

## 光束空域参数部分术语

## D.1 实验室坐标系 laboratory coordinate system

X, Y, Z 轴规定了实验室坐标轴系统的正交空间方向, 并应由用户指定。习惯上 Z 轴与光束轴重合, X 轴和 Y 轴是横截轴, 通常分别对应于水平方向和垂直方向。Z 轴的原点位于制造商定义的 X-Y 参考面, 例如激光器外壳的前端面。

[来源: GB/T 26599.1—2011, 4; GB/T 13739—2011, 3.1, 有修改]

## D.2 测量平面 measurement plane

在轴向位置进行光束功率 (或能量) 密度分布测量的 X-Y 平面。

[来源: GB/T 13739—2011, 3.2]

## D.3 功率密度分布的一阶矩 first order moments of power distribution

光束横截面功率密度分布的质心坐标。在测量平面内光束的功率 (或能量) 密度分布的一阶矩表示为:

$$\bar{x}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) x dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (\text{D. 1})$$

$$\bar{y}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) y dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (\text{D. 2})$$

式中:

$E(x, y, z)$ ——功率 (或能量) 密度分布。

注: 对于实际应用, 无限积分简化为有限积分。

[来源: GB/T 26599.1—2011, 3.1; GB/T 13739—2011, 3.4, 有修改]

## D.4 功率 (或能量) 密度分布的二阶矩 second order moments of power distribution

功率或能量密度分布上的归一化加权积分, 表示为:

$$\sigma_x^2(z) = \langle x^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) (x - \bar{x})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (\text{D. 3})$$

$$\sigma_y^2(z) = \langle y^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) (y - \bar{y})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (\text{D. 4})$$

$$\sigma_{xy}^2(z) = \langle xy \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) (x - \bar{x})(y - \bar{y}) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy} \quad (\text{D.5})$$

注：

- 1 对于实际应用，无限积分简化为有限积分。
- 2  $\sigma_{xy}^2(z)$  只是一种符号表示，并不是真正的平方。该量可以取正、负或零值。
- 3 角括号  $\langle \rangle$  是运算符号。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.2；GB/T 13739—2011，3.5，有修改]

#### D.5 功率密度分布的主轴 principal axes of a power density distribution

基于光束横截面上功率密度分布中心二阶矩的最大和最小光束范围的轴。

注：最大和最小光束范围的轴总是相互垂直的。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.3]

#### D.6 主轴坐标系 principal axes coordinate system

定义测量平面内光束功率密度分布的主轴坐标系的  $X'$ 、 $Y'$ 、 $Z$  轴规定空间三个正交方向，其  $X'$  轴是和实验室坐标系的  $X$  轴接近的光束宽度最大或最小的方向。如果  $X'$  和  $X$  轴的夹角为  $\pm 45^\circ$ ，则  $X'$  轴是最大光束宽度的方向。

[来源：GB/T 13739—2011，3.3]

#### D.7 功率密度分布的取向 orientation of a power density distribution

实验室坐标系的  $X$  轴和靠近  $X$  轴的功率密度分布的主轴之间的夹角，用符号  $\varphi$  表示。

注：若  $|\varphi| \neq \pi/4$ ，则  $-\pi/4 < \varphi < \pi/4$ ；若  $\varphi = \pm \pi/4$ ，则  $\varphi$  为  $X$  轴与功率密度分布主要主轴（最大光束范围对应的主轴）之间的夹角。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.4，有修改]

#### D.8 $4\sigma$ 法 $4\sigma$ method

光束宽度的一种计算方法。该计算方法定义光束宽度为沿着主轴坐标系的  $Z$  轴方向的横截面上，光束功率密度分布的中心二阶矩平方根的 4 倍。

$$d_{\sigma x'}(z) = 4\sigma_{x'}(z) \quad (\text{D.6})$$

式中：

$\sigma_{x'}$ ——功率（或能量）密度分布在主轴  $X$  方向的中心二阶矩平方根。

$$d_{\sigma y'}(z) = 4\sigma_{y'}(z) \quad (\text{D.7})$$

式中：

$\sigma_{y'}$ ——功率（或能量）密度分布在主轴  $Y$  方向的中心二阶矩平方根。

$\sigma_{x'}(z)$ 、 $\sigma_{y'}(z)$  积分方向为光束功率密度分布的主轴方向，若二阶矩积分方向为实验室坐标轴  $X$ 、 $Y$  方向，光束宽度  $d_{\sigma x'}(z)$ 、 $d_{\sigma y'}(z)$  用式 (D.8) 和式 (D.9) 计算：

$$d_{\sigma x'}(z) = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + \gamma \cdot \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4(\sigma_{xy}^2)^2}} \quad (\text{D.8})$$

$$d_{\sigma y'}(z) = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \gamma \cdot \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4(\sigma_{xy}^2)^2}} \quad (\text{D.9})$$

其中，

$$\gamma = \operatorname{sgn}(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{|\sigma_x^2 - \sigma_y^2|} \quad (\text{D. 10})$$

注： $d_{ax'}(z)$  为较大的光束宽度。

[来源：GB/T 13739—2011，3.6；GB/T 15313—2008，2.1.57.2，有修改]

#### D.9 移动刀口法 moving knife edge method

光束宽度的一种计算方法。对于高斯光束，通过移动刀口切割光束，记录未遮挡部分的光束功率分别下降到总功率的  $p\%$  和  $(1-p\%)$  时所对应的刀口位置  $x_1$ ， $x_2$ ，光束宽度  $d_k$  用式 (D.11) 计算：

$$d_k = A \cdot |x_2 - x_1| \quad (\text{D. 11})$$

式 (D.11) 中，高斯光束功率下降到总功率不同的  $p\% \sim (1-p\%)$  时所对应的系数  $A$  如表 D.1 所示。

表 D.1 高斯光束功率下降到不同的  $p\%$  和  $(1-p\%)$  时所对应的系数  $A$

| $p\% \sim (1-p\%)$ | 95%~<br>5% | 90%~<br>10% | 85%~<br>15% | 80%~<br>20% | 75%~<br>25% | 70%~<br>30% | 65%~<br>35% | 60%~<br>40% | 55%~<br>45% |
|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $A$                | 1.217      | 1.560       | 1.931       | 2.375       | 2.967       | 3.817       | 5.181       | 7.874       | 15.873      |

例如，90%~10%移动刀口法算法为  $d_k = 1.56 |x_2 - x_1|$ ，84%~16%移动刀口法算法为  $d_k = 2 |x_2 - x_1|$ 。

注：目前移动刀口法通常采用下降到总功率的 90%~10%的计算方法。

#### D.10 移动狭缝法 moving slit method

光束宽度的一种计算方法。对于高斯光束，通过移动狭缝扫描光束，记录透过狭缝功率为最大透过功率 13.5%时所对应的狭缝位置  $x_1$ ， $x_2$ 。光束宽度  $d_s$  用式 (D.12) 计算：

$$d_s = |x_2 - x_1| \quad (\text{D. 12})$$

#### D.11 功率密度分布的椭圆度 ellipticity of a power density distribution

最小光束宽度和最大光束宽度之比，用符号  $\epsilon$  表示。

$$\epsilon = \frac{d_{\sigma_s}}{d_{\sigma_l}} \quad (\text{D. 13})$$

式中：

$d_{\sigma_s}$ ——最小光束宽度；

$d_{\sigma_l}$ ——最大光束宽度。

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.58；GB/T 26599.1—2011，3.6；GB/T 13739—2011，3.6，有修改]

#### D.12 圆功率密度分布 circular power density distribution

椭圆度大于 0.87 时的功率密度分布。

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.59；GB/T 26599.1—2011，3.7，有修改]

#### D.13 光束直径 beam diameter

以二阶矩为基础的圆形功率密度分布的范围，直径表示为：

$$d_{\sigma}(z) = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{\sigma_{x'}^2 + \sigma_{y'}^2} \quad (\text{D.14})$$

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.8；GB/T 13739—2011，3.6，有修改]

#### D.14 无像散 stigmatism

光束在自由传输中的任一平面上具有圆形功率密度分布并且通过柱面透镜传输后功率密度分布保持不变或具有和透镜相同的方位取向的特性。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.9]

#### D.15 简单像散 simple astigmatism

像散光束在自由传输中方位角保持恒定取向的并且通过对称轴与一个光束主轴平行的圆柱光学元件后仍保持其原有取向的特性。

注：简单像散光束的功率密度分布的主轴称为该光束的主轴。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.10]

#### D.16 广义像散（一般像散） general astigmatism

既不是无像散光束也不是简单像散光束的光束特性。

注：也叫一般像散。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.11，有修改]

#### D.17 束腰位置 beam waist location

光束宽度或光束直径沿传输轴达到最小值的位置距  $z=0$  参考平面的距离。对于简单像散光束，沿着光束主轴  $X'$  和  $Y'$  方向上的束腰位置分别用符号  $z_{0X'}$  和  $z_{0Y'}$  表示；对于无像散光束，束腰位置用符号  $z_0$  表示。

注：

1 对于广义像散光束，本定义不适用。

2 对于简单像散光束，对应于主轴的束腰位置  $z_{0x'}$  和  $z_{0y'}$  可能重合，也可能不重合。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.12，有修改]

#### D.18 束腰宽度 beam waist width

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  $d_{Y',u}$ 。在  $X'$  和  $Y'$  方向上的束腰宽度分别用符号  $d_{X'0,u}$  和  $d_{Y'0,u}$  表示。

注：

1 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  $d_{X'0,u}$ ， $d_{Y'0,u}$ ， $d_{\sigma X'0}$ ， $d_{\sigma Y'0}$ 。

2 用  $4\sigma$  法计算的束腰宽度用符号  $d_{\sigma X'0}$ ， $d_{\sigma Y'0}$  表示。

3  $d_{\sigma X'0}$  是位置  $z_{0X'}$  处的光束宽度  $d_{\sigma X'}$ ， $d_{\sigma Y'0}$  是位置  $z_{0Y'}$  处的光束宽度  $d_{\sigma Y'}$ 。

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.55.1、GB/T 15313—2008，2.1.55.2；GB/T 26599.1—2011，3.13，有修改]

#### D.19 束腰直径 beam waist diameter

无像散光束在束腰位置处的光束直径。

注：用符号  $d_{\sigma 0}$  表示。

[来源：GB/T 26599.1—2011，3.14，有修改]

#### D.20 瑞利长度 Rayleigh-length

自束腰位置处沿光束传播方向到光束直径或光束宽度增加到 $\sqrt{2}$ 束腰宽度的距离。对于简单像散光束，沿着光束主轴  $X'$  和  $Y'$  方向上的瑞利长度分别用符号  $ZR_{X'}$  和  $ZR_{Y'}$  表示；对于无像散光束，瑞利长度用符号  $ZR$  表示。

对于基模高斯光束：

$$ZR = \frac{\pi d_{\sigma_0}^2}{4\lambda} \quad (\text{D. 15})$$

一般情况：

$$ZR = \frac{d_{\sigma_0}}{\theta_{\sigma}} \quad (\text{D. 16})$$

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.61，有修改]

#### D.21 光束发散角（束散角） beam divergence angle

光束宽度在远场增大形成的渐近面锥所构成的全角度，也叫束散角。

注：

- 1 束散角用全角表示。
- 2 对圆横截面，光束宽度为光束直径  $d_u$ 。对非圆横截面，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  $d_{Y',u}$  确定；
- 3 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  $d_{X',50}$ ；
- 4 这里坐标系的定义和光束宽度的定义不包括广义像散（一般像散）情况；
- 5 为了明确，束散角的标识要将符号及其适合的下标一起使用，即  $\theta_{X',u}$ ， $\theta_{Y',u}$ ， $\theta_u$  或  $\theta_{\sigma X'}$ ， $\theta_{\sigma Y'}$ ， $\theta_{\sigma}$ 。

用  $4\sigma$  法计算的束散角用符号  $\theta_{\sigma X'}$ ， $\theta_{\sigma Y'}$ ， $\theta_{\sigma}$  表示。

对于简单像散光束：

$$\theta_{\sigma X'} = \lim_{(z-z_{0X'}) \rightarrow \infty} \frac{d_{\sigma X'}(z)}{z-z_{0X'}} \quad (\text{D. 17})$$

$$\theta_{\sigma Y'} = \lim_{(z-z_{0Y'}) \rightarrow \infty} \frac{d_{\sigma Y'}(z)}{z-z_{0Y'}} \quad (\text{D. 18})$$

对于无像散光束：

$$\theta_{\sigma} = \lim_{(z-z_0) \rightarrow \infty} \frac{d_{\sigma}(z)}{z-z_0} \quad (\text{D. 19})$$

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.65.1、GB/T 15313—2008，2.1.65.2；GB/T 26599.1—2011，3.15，有修改]

#### D.22 光束参数积 beam parameter product

束腰直径与束散角的乘积除以 4，即： $d_{\sigma_0} \cdot \theta_{\sigma}/4$ 。

注：椭圆光束的光束参数积分别由功率（或能量）分布的主轴给定。

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.67]

#### D.23 光束传输因子 beam propagation factor

光束传输比的倒数。对于简单像散光束，沿着光束主轴  $X'$  和  $Y'$  方向上的光束传输因子分别用符号  $K_{X'}$  和  $K_{Y'}$  表示；对于无像散光束，瑞利长度用符号  $K$  表示。

$$K = \frac{1}{M^2} \quad (\text{D. 20})$$

[来源：GB/T 15313—2008，2.1.71，有修改]

---

