

·激光技术·

## 基于夫琅禾费衍射的激光束散角外场检测

李志国, 窦茂森, 高文静

(91404部队, 河北 秦皇岛 066001)

**摘要:** 基于圆孔衍射原理, 通过对菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射特性的对比分析, 综合圆孔夫琅禾费衍射光强艾里斑分布特征, 提出了一种基于夫琅禾费衍射的激光束散角检测方法, 通过布设激光靶对激光远场光斑进行采集、分析、处理, 得到激光器关键性能参数束散角的实测值。测量结果表明: 采用该方法可获得较高的检测精度, 并对影响测量精度的因素进行了分析, 该方法可为激光器束散角外场检测提供科学指导。

**关键词:** 束散角; 激光靶; 夫琅禾费衍射; 菲涅耳衍射; 圆孔

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)05-0027-05

## Outfield Measuring Method of Laser Beam Divergence Angle Based on Fraunhofer Diffraction

LI Zhi-guo, DOU Mao-sen, GAO Wen-jing

(91404 Army Unit, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Based on the principle of diffraction for circular aperture, a comparison of characteristic between Fresnel diffraction and Fraunhofer diffraction is made. Integrating with light-intensity Airy disc distributing characteristic of Fraunhofer diffraction, a measurement method of laser beam divergence angle based on Fraunhofer diffraction is proposed. By collecting, analyzing and disposing far-field laser facula on the basis of arranging laser target, the real test values of laser beam divergence angle are gained. The test result shows that more precision can be got with the method. And the factors influencing on measuring precision are analyzed. The method will afford a scientific guidance for laser parameter outfield measurement.

**Key words:** beam divergence angle; laser target; Fraunhofer diffraction; Fresnel diffraction; circle aperture

激光束散角定量检测的传统方法是套孔法, 通过控制小孔孔径, 使通过的能量占总能量比值的86%, 则认为此时小孔的直径是激光束的口径, 该方法需要激光能量计, 光路调整复杂, 适合室内检测。

提出一种基于夫琅禾费圆孔衍射理论的外场检测方法, 该方法充分考虑激光传输近场和远场不同特性, 通过在一定距离(该距离满足远场条件)布放激光靶(感光相纸), 对远场光斑进行探测接收, 最大限度提高激光束散角测量精度。

### 1 标量衍射理论的近似

一单色平行光垂直入射至图1所示孔径 $\Sigma$ 上, 在屏的后方垂直于 $z$ 轴的平面上观察孔径的衍射图样。在离孔径不远处的范围内所观察到的图像基本就是孔径的一个几何投影, 这一个范围叫几何投影区, 也称菲涅耳衍射深区。随着传播距离的增大, 原先可以辨明的明暗界限由模糊到消失。当观察距离足够远时, 衍射图样趋于稳定, 这一区域叫做夫琅禾

费衍射区。图1中几何投影区以外的区域即从P1开始向右的区域统称为菲涅耳衍射区,其中当然也包含了夫琅禾费衍射区<sup>[1-4]</sup>。

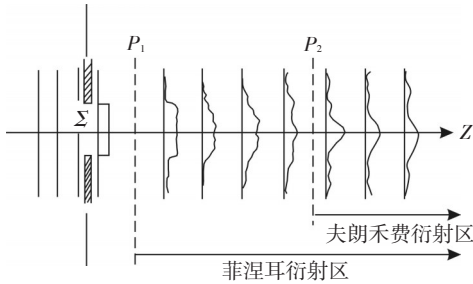


图1 衍射区的划分示意图

设激光出射口径平面Σ上的任一点P1坐标(ξ, η),距离z处观察平面上的任一点P0坐标为(x, y), P1P0之间距离为r01,其示意图如图2所示。

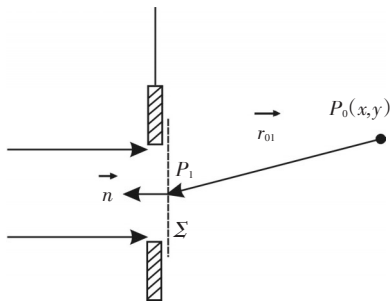


图2 激光发射平面与观察平面关系示意图

根据瑞利-索末菲理论和惠更斯-菲涅耳原理,观察平面上P0(x, y)点场的复振幅满足

$$U_0 = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U_1 \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos \theta \cdot ds \quad (1)$$

式中,θ为孔径Σ上P1点处的法线n和r01之间的夹角

$$\cos \theta = \frac{z}{r_{01}} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得到

$$U_0(x, y) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U_1(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}^2} d\xi d\eta \quad (3)$$

式中,  $r_{01} = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$ 。

### 1.1 菲涅耳近似

在式(3)所表示的衍射积分中,被积函数的分母为r<sup>2</sup><sub>01</sub>,当考虑观察平面离Σ足够远时,且只考虑近轴区域时可用z<sup>2</sup>来代替,这样处理所产生的误差并不大,然而指数上的那个r<sub>01</sub>就不能简单地用z来代替,

因为k是一个很大的数,r<sub>01</sub>的微小变化也会引起表示相位的项kr<sub>01</sub>的可观变化<sup>[8-12]</sup>。

当|b|<1时,由二项式的展开式

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{b}{2} - \frac{b^2}{8} + \dots \quad (4)$$

将r<sub>01</sub>的表达式展开,只取展开式前两项

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \approx z \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x - \xi}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y - \eta}{z} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式(5)即菲涅耳近似。将式(5)代入式(3)得到

$$U_0(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \int \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(\xi, \eta) \exp \left\{ j \frac{k}{2z} \left[ (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right] \right\} d\xi d\eta \quad (6)$$

对比式(3)和式(6),近似所要求的精度大小对孔径、观察区域以及距离z的线度有所限制。由式(4),采用菲涅耳近似时,要求二项式展开中所有高阶项所贡献的相位变化远小于1 rad,即

$$kz b^2 / 8 \ll 1$$

即等于要求z满足条件

$$z^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} \left[ (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right]_{\max}^2 \quad (7)$$

### 1.2 夫琅禾费近似

由计算菲涅耳衍射的公式即式(6),观察区域场的复振幅

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)} F \left\{ U(\xi, \eta) e^{j \frac{k}{2z}(\xi^2 + \eta^2)} \right\} \quad (8)$$

由于被变换的函数中有一个二次相位因子,exp[j(k/2z)(ξ<sup>2</sup> + η<sup>2</sup>)],使得菲涅耳衍射区场分布的计算并不简单。在衍射区中若下述条件满足,即

$$z \gg \frac{k(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{2} \quad (9)$$

则在此区域中二次相位因子exp[j(k/2z)(ξ<sup>2</sup> + η<sup>2</sup>)]≈1,这就是夫琅禾费近似条件,根据夫琅禾费近似条件式(8)可简化为

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)} F \left\{ U(\xi, \eta) \right\}_{f_x = \frac{x}{\lambda z}, f_y = \frac{y}{\lambda z}} \quad (10)$$

### 1.3 圆孔的夫琅禾费衍射

衍射孔径是一个半径为W的圆,圆心与(ξ, η)平面的坐标原点重合,设孔径内任一点的径向坐标为

$q$ ,那么  $q = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ ,孔径函数为

$$t_A(q) = \text{circ}\left(\frac{q}{W}\right) \quad (11)$$

根据圆孔的对称性,选择极坐标下的傅里叶—贝塞耳变换式来表示。设单位振幅的平面波垂直照明孔径,则圆形孔径的夫琅禾费衍射的复场分布满足

$$U(r) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp\left(j\frac{kr^2}{2z}\right) B\{U(q)\}_{\rho = \frac{r}{\lambda z}} \quad (12)$$

式中, $r$ 是观察平面上观察点距离坐标原点的距离,圆对称情况下使用的空间频率  $\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 。设单位振幅的单色平面波垂直照明,孔径上的场分布为

$$U(q) = t_A(q) \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),得到圆孔夫琅禾费衍射的复场分布

$$U(r) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{kr^2}{2z}} B\left\{\text{circ}\left(\frac{q}{W}\right)\right\}_{\rho = \frac{r}{\lambda z}} = e^{jkz} e^{j\frac{kr^2}{2z}} \frac{A}{j\lambda z} \left(\frac{2J_1\left(\frac{kWr}{z}\right)}{\frac{kWr}{z}}\right) \quad (14)$$

式中, $A = \pi W^2$ 为圆形孔径的面积。

观察平面上衍射花样的光强分布有

$$I(r) = |U(r)|^2 = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \left(\frac{2J_1\left(\frac{kWr}{z}\right)}{\frac{kWr}{z}}\right)^2 \quad (15)$$

式(15)所表达的光强分布图样叫艾里斑图样。其图像如图3、图4所示。

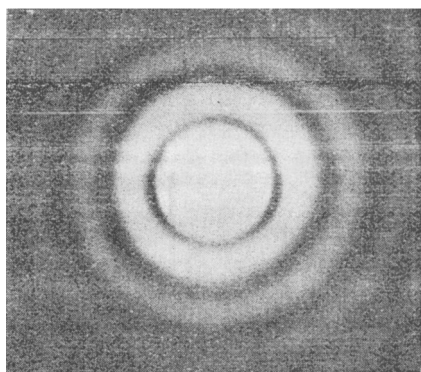


图3 夫琅禾费圆孔衍射——普通光源

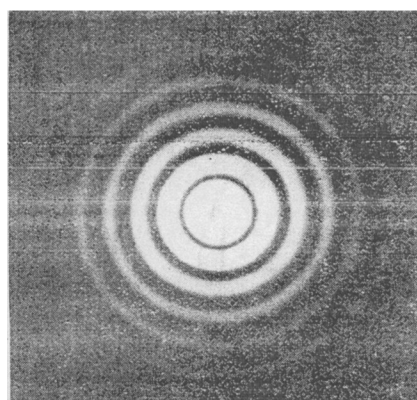


图4 夫琅禾费圆孔衍射——He-Ne光源

## 2 外场检测方法<sup>[5]</sup>

### 2.1 外场布站及测量方法

基于圆孔的夫琅禾费衍射原理,在距离 $z$ (距离 $z$ 满足远场条件)处布设激光感光靶,激光照射器以一定频率照射激光靶,采集出光孔径和距离 $z$ 处光斑(光斑直径分别为 $d_0$ 和 $d$ )进行束散角计算。其检测示意图如图5所示。

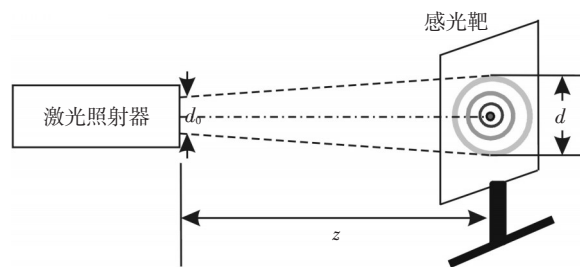


图5 激光束散角检测示意图

束散角计算关系满足

$$\theta = 2 \arctan\left(\frac{d - d_0}{2z}\right) \quad (16)$$

式中, $\theta$ 为激光束散角; $d$ 为靶面处光斑直径; $d_0$ 为激光发射孔径直径。

其测试流程图及测试步骤如图6所示。

(1)根据激光器设计参数对远场距离进行计算

根据激光器设计参数(激光波长、出光口径大小),依据式(9)进行远场距离计算,确定满足夫琅禾费衍射条件的最小距离 $z_{\min}$ ;

将设计参数 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ; 出射圆形孔径半径 $W = 5 \text{ mm}$ 代入式(9)得到满足夫琅禾费衍射条件的远场

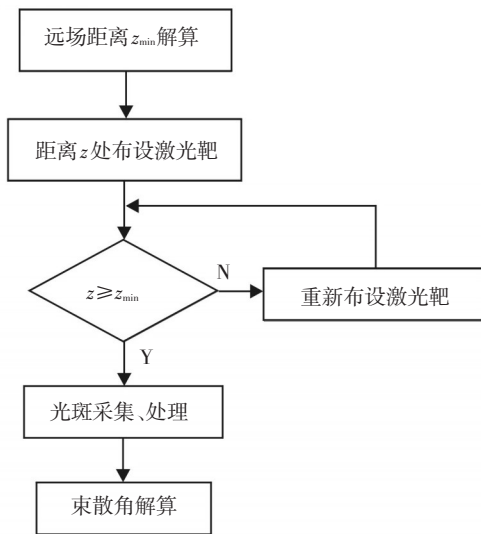


图6 外场测试流程图

距离满足： $z_{\min} \geq 74 \text{ m}$ 。

### (2) 试验布设

将激光照射器固定站布设,在距离激光照射器 ( $z \geq z_{\min}$ ) 距离处布设激光靶,使靶面正对激光器入射方向;

### (3) 光斑采集与处理

利用感光相纸对出光口径处和靶面照射光斑进行记录采集,利用千分尺对远近光斑直径进行精准测量;

### (4) 束散角计算

利用激光器远近距离测得的光斑直径和距离  $z$ , 利用式(16)计算得到激光束散角。

## 2.2 外场测量结果

分别在 90、107 m 处进行了实验测量,得到如图

图7 90 m 激光靶面处光斑 ( $d=35.6 \text{ mm}$ )图8 107 m 激光靶面处光斑 ( $d=40.5 \text{ mm}$ )

7、图8所示测量结果。实测结果表明,光斑具有明显的强度层次分布特征,满足远场光斑分布特性。

经计算,激光束散角分别为

$$\theta_1 = (35.6 - 10) \text{ mm} / 90 \text{ m} \approx 0.284 \text{ mrad}$$

$$\theta_2 = (40.5 - 10) \text{ mm} / 107 \text{ m} \approx 0.285 \text{ mrad}$$

结合 90、107 m 的测量数据计算得到束散角为

$$\theta = (40.5 - 35.6) \text{ mm} / (107 - 90) \text{ m} \approx 0.288 \text{ mrad}$$

设计指标为 0.3 mrad。

二者相对误差为

$$\Delta\theta = |(0.288 - 0.3)| / 0.3 \times 100\% = 4\%$$

## 2.3 影响测量精度的因素分析

(1) 布设时激光非正入射感光靶,存在一定角度偏差带来的误差;

当激光入射角度与激光靶所在平面法线存在微小角度偏差  $\Delta\varphi$  ( $|\Delta\varphi| \leq 0.5 \text{ mrad}$ ) 时,此时面积为  $S$  光斑在垂直于入射方向的靶面投影为  $S \cdot \cos(\Delta\varphi) \approx S \cdot \Delta\varphi \approx S$ , 此时的光斑仍为理想艾里斑分布;

若角度偏差继续增大,光斑将由圆形逐渐变为椭圆形,此时若单由某一个轴向去测量光斑大小,势必导致测量结果偏大或偏小,具体误差大小与角度偏差大小有关。

(2) 相纸感光度不同引入的测量误差;

相纸感光度不同必然导致对激光的照射反应有所不同,在相纸上表现为光强分布不均匀甚至出现光斑漏洞、边缘模糊等,从而给测量带来不可避免的误差,为提高测量精度,应选择相纸感光度均匀的相纸进行测量,避免使用长期存储感光度差的相纸。

(3) 光斑非均匀性带来的测量误差;



激光出光受出光模式等的影响并非严格意义上的圆形光斑,若发射光学镜头表面存在污渍或其他加工缺陷亦将引起光斑均匀性变差,从而带来测量误差,为避免以上误差,尽量选择基模光束进行测量,同时保证光学镜头的清洁。

(4)大气扰动的影响<sup>[6,7]</sup>;

光波在湍流大气中传播时由于折射率的起伏使其散射强度会发生起伏,即出现光强闪烁、到达角起伏(抖动)和光束漂移等现象,在近距离传输时,以上效应均不明显,只有在远距离传输( $L \geq 5$  km)时以上效应才更为明显,对于光强闪烁和光束抖动其机理较为复杂,结合光束漂移来对大气扰动的影响进行定量的描述。

大气折射率的随机起伏所引起的激光束位置的漂移方差,可由下述方程估计

$$\delta^2 = 1.7C_n^2 Z^2 (2a_0)^{-1/3} \quad (17)$$

式中, $a_0$ 为初始光斑半径(cm); $Z$ 为传输距离(m); $C_n^2$ 为大气折射率结构常数,海洋环境下, $C_n^2 = 1.5 \times 10^{-13}/h$  ( $m^{-2/3}$ ) ( $h < 5$  km)。

随机大气信道试验测量结果表明:当传输距离为2 km时,试验中大部分的光斑漂移为2~4 cm;依此类推,同等测试条件下,传输距离90 m时,漂移约为0.001~0.002 cm,相对于光斑尺度测量(cm量级)来说,近距离传输大气扰动所引起的影响可忽略不计。

(5)出光孔光斑大小用衍射孔径等效带来的测量误差。

当衍射孔径(圆孔直径 $D$ )大小与激光波长 $\lambda$ 可比拟时,此时光的衍射满足圆孔夫琅禾费衍射;当衍射孔径远大于激光波长时,此时衍射孔径附近为几何投影区,用衍射孔径大小等效出光口光斑大小虽然会带来一定的误差,但误差相对较小,随着距离出光口距离的增大,该误差会越来越大。

### 3 结 论

通过对菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射特性的对比分析,综合圆孔夫琅禾费衍射光强的爱里斑分布特征,提出了一种基于夫琅禾费衍射的激光束散角检测方法。在研究激光参数,合理布设测量距离,利用激光靶对激光远场光斑进行采集、分析和处理后,得到激光器关键性能参数一束散角的实测值且获得了较高的检测精度。在此基础上对影响测量精度的因素进行了初步的定性和定量分析,该方法可为激光器束散角外场检测提供科学指导。

### 参考文献

- [1] 吕乃光.傅立叶光学[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [2] 羊国光,宋菲军.高等物理光学[M].北京:中国科学技术大学出版社,1991.
- [3] M 波恩,E 沃尔夫.光学原理[M].杨霞荪.北京:科学出版社,1978.
- [4] 母国光,战元令.光学[M].北京:人民教育出版社,1979.
- [5] 激光辐射发散角测试方法[S]. GB/T 13740-92, 1-5.
- [6] 韩燕,强希文,许晓军,等.近地面湍流大气中激光传输的光强闪烁分析[J].红外与激光工程,2006(S1):415-421.
- [7] 刘维慧.激光在大气湍流中传播时光强起伏的初步分析[D].西安:电子科技大学,2004.
- [8] 常山,肖清武,何洁,等.高斯光束微圆孔衍射的整形变换[J].光电技术应用,2011,26(1):20-23.
- [9] 屈军,孟凯,汪六三,等.贝塞尔-高斯光束通过圆孔与圆环光阑的衍射[J].激光技术,2008(4):393-395.
- [10] 王青狮.圆孔夫琅禾费衍射光强分析[J].太原科技大学学报,2007(3):217-219.
- [11] 张世富.用傅里叶变换分析圆孔夫琅禾费衍射[J].电子科技大学学报,2006(6):123-125.
- [12] 张军勇,郑刚,杨晖.菲涅耳-夫琅禾费衍射区的过渡判据[J].光学仪器,2007(6):32-35.
- [13] 周国泉,赵道木,王绍民.平面波经微小圆孔衍射的传输特性[J].光子学报,2002(7):874-876.

(上接第12页)

- [5] 王乘,周均清,李利军. Creator 可视化仿真建模技术[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.
- [6] 周彦,戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [7] 刘忠.现代军用仿真技术基础[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [8] 王海波,康凤举,宋志明,等.基于HLA的分布式作战视景仿真系统开发[J].计算机仿真,2005,22(9):178-181.