

文章编号: 1002-3806(2004)06-06672-03

激光光斑重心测试精度理论分析

孙爱鲜, 王 晶, 何衡湘, 陈亦庆
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了分析激光光斑监测系统在测试激光光斑重心时的测试精度, 着重从大气传输, 光学系统的像差, 近红外 CCD 光敏面元的大小以及测量的相对位置等几个方面进行了探讨, 并给出分析数据, 为该系统的进一步优化提供了理论参考。

关键词: 测试精度; 激光光斑; 大气传输; 光学系统; 近红外 CCD

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Testing precision analysis of centrobaric of laser facula

SUN Ai2xian, WANG Jing, HE Heng2xiang, CHEN Yi2qing
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to analyse testing precision of centrobaric of laser facula, atmosphere transmission, image error of optical system, size of infrared CCD photosensitive cell and relative measuring position are studied. The analytical results provide academic reference for optimization of the testing system.

Key words: testing precision; laser facula; atmosphere transmission; optical system; infrared CCD

引 言

在科学技术高度发展的今天, 尖端技术和现代化的工农业生产都离不开精密和准确的测试, 测试是验证新理论、发现新问题的重要手段, 其中测试误差是衡量测试准确度的一个标准。在激光光斑参数测试中, 激光光斑监测系统(后简称监测系统)在试验时实时记录、显示激光光斑图像, 然后通过对激光光斑图像的处理得出激光光斑重心位置, 借此来评定、分析激光光斑的质量。所以, 在系统的设计过程中对激光光斑重心测试精度进行理论分析计算是非常必要的。

1 监测系统原理及影响测试精度的因素

监测系统的工作原理是使用近红外 CCD 摄像机摄取目标靶上的激光光斑图像, 通过分析 CCD 摄像机光敏面上激光光斑图像, 经计算处理得到激光光斑的重心。通常采用的激光光斑的重心计算式是:

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j) x_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j)} \\ Y = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j) y_j}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P(x_i, y_j)$ 是位置 (x_i, y_j) 处的图像幅度。因此, 计算激光光斑的重心实际上是计算激光图像的加权平均值。

激光光斑测试系统工作原理示意图见图 1。

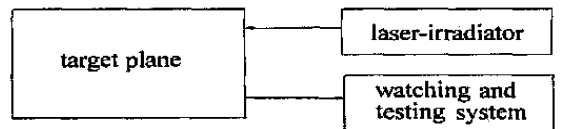


Fig. 1 The principle diagram of working

激光发射装置远距离发射激光到靶板上, 设置在 1km 处的监测系统采用 CCD 摄像头摄取靶板上的激光光斑图像, 并对图像进行计算处理, 得到光斑的重心等参数。

根据监测系统的测试工作原理图可以看出, 影响此系统测试精度的因素主要包括: 大气传输扰动(靶面到监测光学系统); 红外成像系统(光学系统、近红外 CCD)的成像质量; 测量位置(监测系统与目标靶之间的相对位置)偏差。下面就这几方面的因素对监测系统的测试精度加以分析。

作者简介: 孙爱鲜(1972), 女, 硕士, 主要从事图像处理
和激光光斑测试技术研究。

E2mail: chsunaixian@sina.com

收稿日期: 2002 10 30; 收到修改稿日期: 2004 03 31

2 测试精度分析

2.1 激光大气传输扰动对测量精度的影响^[1,2]

激光在大气中传输主要受大气衰减和大气湍流的影响。大气中存在各种气体分子和微粒,使部分光辐射能量被吸收而转变为其它形式的能量,部分能量被散射而偏离原来的传输方向,吸收和散射的总效果使传输激光辐射的强度衰减。此外,大气始终处于一种湍流状态,即大气的折射率随空间和时间做无规则的变化,大气的湍流将使激光束发生强度起伏、光束分裂、光束偏折等。不考虑大气的衰减对测量的影响,是因为这种衰减对计算激光光斑的重心没有影响,所以主要考虑大气湍流对激光光斑的影响。

激光束是一种有限扩展的光束,大气湍流对光束传输的影响与光束直径 d_b 和湍流尺度 L 之比密切相关。当 $d_b \gg L$ 时,湍流的主要作用是使光束随机偏折,在远处接收平面上光束中心的投射点(即光斑位置)以某个统计平均位置为中心,发生快速的随机性跳动,此现象称为光束漂移,在数值上可以用漂移量或漂移角来表示。当 $d_b \ll L$ 时,湍流使光束波前发生随机偏折,使接收透镜的焦平面上产生像点抖动;当 $d_b \sim L$ 时,光束截面内包含有多个湍流旋涡,造成光束强度分布在时间和空间上随机起伏,光强忽大忽小,即所谓光束强度闪烁。同时,还产生光束扩展和分裂,即使在湍流很弱而大气稳定时,仍可观察到光斑形状及内部花纹结构发生畸变、扭曲等变化。

激光在大气传输过程中,大气衰减和各种湍流效应同时发生,这种特征常常用大气折射结构常数 $C_n^2(m^{-2/3})$ 来表征。图 2 所示为 24h 内每 15min 平

$m^{-2/3}$, 在中等湍流状态, $C_n^2 \sim 10^{-14} m^{-2/3}$, 在弱湍流状态, $C_n^2 [10^{-16} m^{-2/3}]$ 。在许多文献中,对大气折射结构常数 C_n^2 有多种计算模型。为简单计算,其高度相关性可用下面的模型表示为^[1]:

$$C_n^2 = \begin{cases} \frac{1.5 @ 10^{-13}}{h(m)} (m^{-2/3}) & h < 20km \\ 0 & h > 20km \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 为高度。由图 2 及(1)式可知,白天,光学湍流在靠近地面处最强,一般 $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$ 。由大气扰动引起的角位移为^[1]:

$$DH_x^2 = DH_y^2 \sim 0.975 \left[\frac{1}{k} \right]^2 \frac{[Du(2a)]^2}{4a^2} \quad (3)$$

式中, DH_x, DH_y 为大气扰动引起图像在 x 和 y 方向的角位移; $k = 2P/Ka$ 为光学系统孔径半径。

相位结构函数 $Du(2a)$ 的表达式为^[1]:

$$Du(2a) = 2.91k^2(2a)^{5/3} \int_0^L C_n^2(z) dz \quad (4)$$

式中, L 为传输路径长度。

以近地面为例, $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$, $K = 1.06Lm$, $D/fc = 1/5$, $fc = 600mm$, 根据(2)式、(3)式可计算出 $1km$ 路由大气扰动引起的均方根角位移误差。

$$Du(2a) = 2.91 \left[\frac{2P}{1.06 @ 10^{-6}} \right]^2 (0.12)^{5/3} @ 10^{-13} @ 10^3 = 298.4991, DH_x^2 = DH_y^2 = 0.975 @ \left[\frac{1.06 @ 10^{-6}}{2P} \right]^2 \left[\frac{298.4991}{(0.12)^2} \right]^2 = 5.75224 @ 10^{-10},$$

均方根角位移误差 $DH_x = DH_y = 23.984Lrad$ 。故大气扰动引起的角位移误差为: $DH = \sqrt{DH_x^2 + DH_y^2} = 0.033918mrad$ 。

光束抖动和光束漂移具有随机性质,理论和实验证实其概率分布呈正态分布,上面的计算也证实一般情况下光束到达角起伏在 $50Lrad$ 以内。

2.2 成像系统

2.2.1 光学系统像质对测量精度的影响 光学系统随应用场合和使用条件的不同,必须达到相应的像质,像质与像差相关的。作者所使用的是双胶合物镜光学系统,其像差主要是球差、彗差和畸变(因应用于激光,所以无色差),下面分析像差对计算激光光斑重心的影响。

如图 3 所示,轴上 A 点的理想像为 A_c ,由 A 点发出的过入瞳边缘的光线 AP (称边缘光线)从系统出射后,交光轴于 A_c 。由于球差, A_c 和 A_c 不重合。若它们的像方截距分别为 L_c 和 l_c , 则 $DL_c = L_c - l_c$ 为

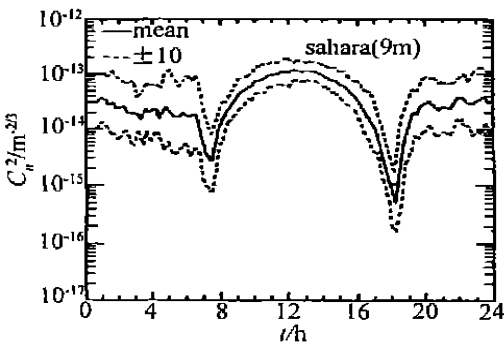


Fig 2 Configuration constant of atmosphere refraction

均测量 C_n^2 结果,测量是在无云条件下沙漠地面上高 $9m$ 塔台上进行的^[2]。另外, C_n^2 是风、太阳负载及地形的复杂函数。在强湍流状态, $C_n^2 \sim 10^{-12}$

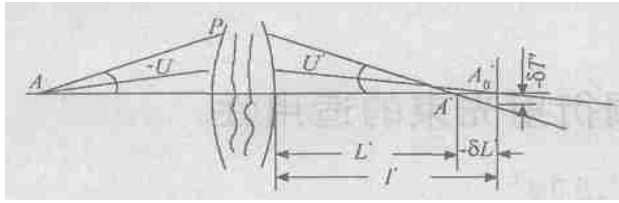


Fig. 3 Sphere difference

轴向球差, $DF_c = DL \tan U$ 为垂轴球差。

慧差是轴外点成像时产生的一种宽光束像差, 与视场和孔径均有关系。

另外, 畸变也影响测量精度。对于实际光学系统, 当视场较大时, 像的放大率就要随视场而异, 这会使像相对于物失去相似性。设实际主光线与高斯像面的交点高度 y_{PC} , 理想像高为 y_C , 则畸变为^[3]:

$$q(y_{PC} - y_C) / y_C @ 100\% \quad (5)$$

根据该双胶合物镜光学系统设计参数: 焦距 $f_c = 600\text{mm}$, 视场角 $2X = 0.75^\circ$, $D/f_c = 1/5$, 双胶合透镜曲面半径分别为 $r_1 = 357.3\text{mm}$, $r_2 = -264.2\text{mm}$, $r_3 = -835.0\text{mm}$, 厚度分别为 $d_1 = 16.8\text{mm}$, $d_2 = 8.0\text{mm}$, 材料分别为 K9 和 ZF₂。通过软件 Zemax 计算得: 垂轴球差 $DF_c = 0.0336$; 慧差 $Dk_c = 0.00105$; 畸变 $q = 0.00007498\%$ 。

计算说明畸变很小, 这里不再考虑, 主要考虑球差和慧差的影响。对于光学系统来说, 球差使像点不再形成边沿清晰的像, 而是边沿模糊扩散的像点。这种边沿模糊扩散的现象在光轴中心点最小, 在光学透镜的边沿最大。当像点从光轴中心沿着光学半径向外移动时, 像点边沿模糊扩散的现象逐渐增加。对于激光光斑图像来说, 由于球差的影响将使激光光斑的边沿产生模糊扩散。当激光光斑的重心与光轴重合时, 由于球差的影响的对称性, 球差对计算重心的影响可以忽略。当激光光斑的重心与光轴不重合, 将产生计算误差。球差产生的图像最大角位移误差为: $DH_{xc} = DF_c / f_c = 0.0036 / 600 = 0.006\text{mrad}$ 。

当一个光点在光学系统中成像, 慧差将使光点的像有一个像彗星拖尾一样的尾巴。但是这个尾巴的方向是沿着径向向外, 并且是在整个视场内对称。因此, 激光光斑图像由于慧差的影响也将产生边沿向外扩散。当激光光斑的重心与光轴重合时, 由于慧差影响的对称性, 慧差对计算重心的影响可以忽略。当激光光斑的重心与光轴不重合, 将产生计算误差。慧差产生的图像最大角位移误差为: $DH_{xd} = Dk_c / f_c = 0.00105 / 600 = 0.00175\text{mrad}$, 则该双胶合物镜光学系统像差在 x 方向图像最大角位移误差为: $DH_x = DH_{xc} + DH_{xd} = 0.00775\text{mrad}$ 。同理, 在 y 方向

图像角最大位移误差为: $DH_y = DH_{yc} + DH_{yd} = 0.00775\text{mrad}$ 。因此, 光学系统像差引起的图像角最大位移误差为: $DH = \sqrt{DH_x^2 + DH_y^2} = 0.01103\text{mrad}$ 。

2.2.2 近红外 CCD 器件的影响 近红外 CCD 摄取靶面激光光斑图像时, 影响激光光斑重心测试精度的因素主要是 CCD 成像器的不均匀性。CCD 成像器的不均匀性包括光敏元对激光响应或灵敏度的不均匀性与 CCD 光电转换的不均匀性^[4,5], 光敏元响应的不均匀度是以光响应的均方根偏差值与响应的平均值的比值来表示, 而一般认为 CCD 光电转换是近似均匀的, 即每次转移的效率是一样的。通常在使用 CCD 摄像机时, 厂家会给出 CCD 器件的响应不均匀参数值, 一般该数值为 5%。

使用 CCD 器件测定激光光斑的重心时, 系统配置使激光光斑在像面上尽可能大, 系统进行激光光斑重心计算才能够得到较高的精度。CCD 面元的激光响应不均匀性将使不同位置的信号幅度与实际的激光强度有差异。对于大量 CCD 面元来说, 这种响应的不均匀性是随机分布的, 相当于对激光光斑信号加上了一个随机分布的幅度不到 5% 的噪声信号。因此, 只要激光光斑面积足够大, 这种噪声对于激光光斑重心测定没有明显影响。

此外, 对激光光斑重心位置定位精度影响最大的是光敏面元大小与光学系统焦距决定的瞬时视场。图 4 是一个实际的激光光斑的三维图形, 从该图可以看到, 由于图像数字化后得到的激光光斑的 / 马赛克 0 方块, 每一个小方块与图像像元对应。在计算激光光斑重心时, 除去计算误差, 应当加上数字化量化误差, 即一个小方块对应的位置误差。

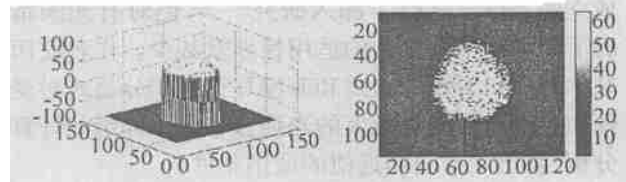


Fig. 4 3D distribution of a practical laser beam

根据数字 CCD 的技术参数, 光敏单元的尺寸 $a @ b = 6.5\text{Lm} @ 6.25\text{Lm}$, 占空比 $r = 0.75$, 焦距 $f_c = 600\text{mm}$, 在 x 和 y 方向可得角位移误差: $DH_{xc} = (a/r) / f_c = 0.014444\text{mrad}$; $DH_{yc} = (b/r) / f_c = 0.013889\text{mrad}$ 。故 CCD 引起的角位移误差误差为: $DH_c = \sqrt{DH_{xc}^2 + DH_{yc}^2} = 0.020038\text{mrad}$ 。综上所述, 大气扰动和成像系统引起的激光光斑图像角位移导致的重心计算误差为: $DH = \sqrt{DH_c^2 + DH_x^2 + DH_y^2} = 0.064179\text{mrad}$ 。 (下转第 672 页)

出的轴上光强 I_F , 实线表示基尔霍夫公式计算出的轴上光强 I_K 。由图 2a 可知, 当 $D > 2$ 时, 两曲线重合, 菲涅耳衍射公式是适用的, 随着 D 的减小, 见图 2b, 特别对 $D = 0.5$, 见图 2c, 在菲涅耳数较大(即离光阑较近)区域, 菲涅耳衍射公式会出现较大误差。为定量研究两者在不同位置处光强分布的差别大小, 定义轴上光强相对误差 R

$$R = |I_K(F) - I_F(F)| / I_K(F) \quad (9)$$

图 3 为相对误差取值($R = 4\%$)时, 方孔衍射高斯光束 F 数随 D 变化的曲线图。计算参数 $w_0 = 20K$ 。在图中曲线下方的区域内, 菲涅耳衍射公式是有效的, 与用基尔霍夫公式计算的结果相符。例如, 当 $D = 1$ 时, $F < 5.1$, 菲涅耳衍射公式适用, 而对 $D = 0.5$, 则应有 $F < 2.1$, 与图 2b 和图 2c 一致。利用图 3, 就可以在高斯光束束宽和相对误差 R 给

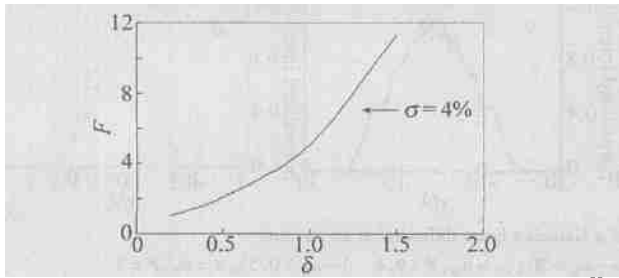


Fig. 3 Dependence of Fresnel number F on the truncation parameter D for $R = 4\%$

(上接第 669 页)

2.3 监测系统相对位置的影响

在实际测试过程中, 监测系统的视轴与目标靶的法线是不重合的, 目标靶与监测系统的视轴方向有一个夹角 A 见图 5, CCD 靶面上实际成像面积为

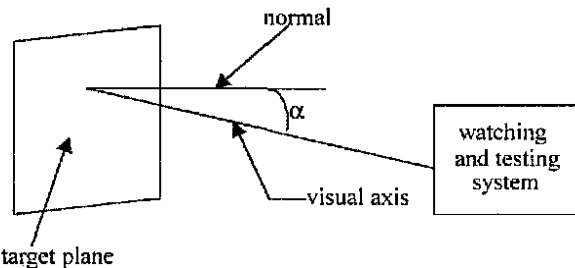


Fig. 5 Relative position of target plane and system

激光光斑面积与 $\cos A$ 的乘积的图像面积。在系统设置时, 尽可能使系统正对靶板, 由于视场光轴与靶板法线夹角造成了在图像 y 轴方向压缩, 使图像在 y 轴方向的分辨率降低, 故测试精度有所变化。在系统设置时, 夹角 A 一般在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 范围。则由此引起的最大角偏差为:

$$DH_0 = DH \cos A \quad (6)$$

当夹角 $A = 15^\circ$, $DH_0 = 0.09388 \text{ mrad}$ 。

定时, 确定对应某一截断参数 D 菲涅耳衍射积分公式适用的 F 数的范围。或者反之, 确定 F 数给定时 D 的取值范围。一般而言, D 越大, F 数也越大, 反之亦然。

3 结论

对高斯光束通过方孔光阑衍射作了详细计算和比较。分析表明, 当有硬边光阑时, 光强分布与束腰宽度 w_0 , 截断参数 D 和菲涅耳数 F 有关。对某一给定 w_0 ($w_0 \text{ mK}$) 值, 菲涅耳衍射积分公式有效的菲涅耳数 F 随截断参数 D 的增大而增加, 反之亦然。而当 $w_0 \gg K$ 或 $w_0 < K$ 时, 菲涅耳近似失效, 应当使用基尔霍夫公式。该研究结果对有光阑衍射的光传输计算模拟中衍射积分公式的正确选择有应用意义。

参考文献

- [1] 吕百达. 激光光学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 53.
- [2] NEMOTO S. Nonparaxial Gaussian beams [J]. Appl Opt, 1990, 29: 1940~1946.
- [3] AGRAWAL G P, PATTANAYAK D N. Gaussian beam propagation beyond the paraxial approximation [J]. J O S A, 1979, 69: 575~578.
- [4] DUAN K L, LA B D. Nonparaxial analysis of farfield properties of Gaussian beams diffracted by an aperture [J]. Opt Expr, 2003 (11): 1474~1479.
- [5] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed, Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 478.

3 结束语

通过以上分析及计算可知, 测试精度与大气传输、光学系统的设计及 CCD 都有关系, 且光学系统对其影响较大, 而 CCD 对其影响相对较小。另外, 测试精度随着测试地点和测试相对位置的不同将发生变化, 考虑到可能出现的位置, 测试精度一般不超过 0.1 mrad 。由于实际测试时受诸多因素影响, 所以, 实际值与理论值可能存在一定差异, 但这一结果为系统的进一步优化提供了理论参考。

参考文献

- [1] 孙再龙. 红外光电系统手册(第 5 卷))) 被动光电系统 [M]. 天津: 八三五八所翻译出版社, 1997. 142~199.
- [2] 安毓英, 刘继芳. 光电技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 168~203.
- [3] 孙再龙. 红外与光电技术手册(第 2 卷))) 辐射的大气传输 [M]. 天津: 八三五八所翻译出版社, 1993. 118~154.
- [4] 李晓彤. 几何光学和光学设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997. 94~128.
- [5] 吕海宝, 颜树华. 激光光电检测 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000. 183~189.