

双四象限探测器弥散斑测量方法研究*

党丽萍 刘君华 汤晓君

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要 讨论一种利用双四象限探测器本身光机结构、输出电信号特性, 对其接收的微小光斑进行精确测量, 并可实时调整的方法. 所组建的测量系统利用测量测定可旋转反射镜在特定位置的偏转角来计算弥散斑的半径, 经实验, 弥散斑在 $0.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 测量范围内, 分辨率可达 0.0096 mm (角度分辨率为 $1'$).

关键词 双四象限探测器; 弥散斑; 离焦量

中图分类号 TP274+.5 **文献标识码** A

0 引言

双四象限探测器是一类新型的光电探测器件, 通常用于激光测角仪、目标跟踪、精确制导等方面^[1]. 四象限和双四象限探测器特性同硅光电二极管, 结构上是利用特殊的机械、半导体工艺将四个或八个反偏压光电二极管集成在一块高阻 P 型硅上^[2]. 因此各象限有一致性较好的光敏特性, 如量子效率、时间特性、内阻、结电容等.

根据探测器不同的用途, 接收光斑与探测器的光敏面大小有一个最佳匹配, 因此在组成仪器时要精确调试. 一般光电仪器的探测器接收光斑的半径是在带分划板的平行光管上测量. 这样只能在探测器未安装前确定其光斑位置及大小, 探测器安装后最终接收的实际光斑因为形不成光通路无法测量, 因而限制了光斑的调整精度.

文中提出一种利用四象限、双四象限探测器器件的结构特点、通过一定的算法对信号合成, 实现对接收光斑半径在线精确测量的方法.

1 测试系统构成及工作过程

相当于无穷远的激光光源通过光学系统会聚成象于安装在光学系统象方焦面附近的探测器光敏面上, 形成一定大小、光强按泊松分布的激光小光斑, 称其为弥散斑^[6]. 弥散斑的半径 R 与离焦量 Δ 有关. 离焦量是探测器偏离光学系统象方焦面的距离. 为了得到预期的弥散斑直径, 需对离焦量进行精确测量和调整, 如图 1 和图 2 是完成这一功能的测试系统的原理框图和系统光路图.

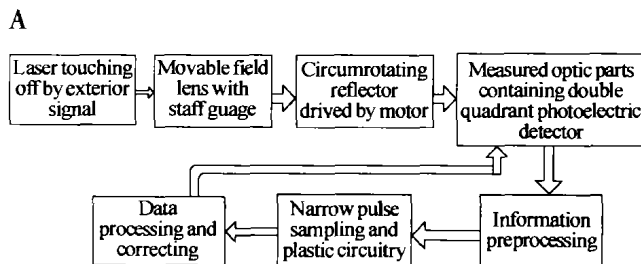


图1 测试系统原理
Fig. 1 Brief fig of measuring system composing

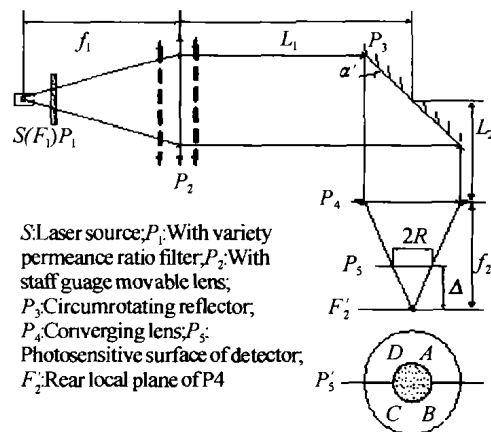


图2 系统光路图
Fig. 2 Optical system construction

系统的工作过程: 外触发激光源发出的激光脉冲经带标尺准直物镜后成为平行光, 随反射镜旋转改变入射方向, 进入含探测器的光学组件, 在双四象限探测器的光敏面上形成沿探测器光敏面的分划线移动的弥散斑. 此时准直物镜位于标尺零位, 探测器光敏面由一可调整垫片置于前离焦状态. 探测器各象限所接收的光能转化为弱的电信号, 通过窄脉冲取样、整形, 经 A/D 转换、合成, 提取输出信号的变化率, 计算弥散斑半径 R 并与预期值比较, 确定是否需要调整垫片厚度尺寸以达到理想的弥散斑.

如果偏离预期需要, 确定离焦量的修正量 δ_{Δ} . 离焦量的修正量 δ_{Δ} 的确定由两种方法分别给出 $\delta_{\Delta 1}$ 和 $\delta_{\Delta 2}$, 取其均值 $\delta_{\Delta} = (\delta_{\Delta 1} + \delta_{\Delta 2})/2$.

2 弥散斑半径 R 的测量模型

如图 2, 当反射镜逆时针旋转引起偏角 α' 变化

* 国家科学技术基础研究项目子课题
Tel: 029-83281724 Email: dil0087@sina.com
收稿日期: 2003-12-03

时,弥散斑沿水平方向右移,A、B象限的光斑面积 $S_A、S_B$ 随之增大,C、D象限的光斑面积相应减少,当弥散斑中心的位移量 X 等于弥散斑的半径 R 时($X = R$),反射镜的旋转偏角 $|\alpha'|_{x=R} = \alpha$.同理反射镜顺时针旋转时,当弥散斑中心的位移量 X 等于弥散斑的半径 R 时($X = -R$),反射镜的旋转偏角 $|\alpha'|_{x=-R} = \alpha$,即 $\alpha = |\alpha'|_{x=\pm R}$.因此测量出 α 即可反映弥散斑半径大小.下面根据输出信号与 α' 的关系,求取 α ,并推导出 α 与 R 的关系.

2.1 输出信号与反射镜转角 α' 的关系

双四象限探测器是硅光二极管阵列集成在同一基底上,利用半导体和特殊机械工艺将其从中心对称分为内四和外四八个区域,我们讨论光斑在内四象限移动时形成的信号.光敏面各接收像限对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光波段的积分灵敏度相同,照射的激光能量保证各象限工作在其线性响应区.每个接收像限的输出信号^[3]与落在其区域光斑面积成正比.

$$u = E\eta s$$

u 为各象限的输出电压信号(不同的象限以下标区分); E 为光斑的平均照度; η 为探测器的光电子转换效率; s 为光斑落在探测器各象限的面积(不同的象限以下标区分).

对四个像限的信号按式(1)进行合成

$$D_x = \frac{(u_D + u_C) - (u_A + u_B)}{u_A + u_B + u_C + u_D} \tag{1}$$

$$D_y = \frac{(u_D + u_A) - (u_C + u_B)}{u_A + u_B + u_C + u_D}$$

通过对光斑落在各象限的面积及光斑中心偏移量计算,有

$$\begin{cases} D_x = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{f_2 - \Delta}{R} \tan 2\alpha' \right) - \frac{f_2 - \Delta}{R} \tan 2\alpha' \right. \\ \left. \sqrt{1 - \left(\tan \alpha \frac{f_2 - \Delta}{R} \right)^2} \right] - 1 \\ D_y = 0 \end{cases} \tag{2}$$

x 为弥散斑中心偏离探测器坐标中心位移量; α' 为反射镜的偏转角; f_2 为成象物镜的焦距; Δ 为双四象限探测器光敏面对成象物镜后焦面的离焦量.

根据图2知,当 $|\alpha'|_{x=R} = \alpha$ 时

$$\cot 2\alpha = (f_2 - \Delta) / R \tag{3}$$

α 为光斑中心偏移量等于弥散斑半径时的反射镜偏转角,即被测参量.因此,式(2)可表示为

$$D_x = \frac{2}{\pi} \left[\arccos (\cot 2\alpha \tan 2\alpha') - \cot 2\alpha \tan 2\alpha' \cdot \sqrt{1 - (\cot 2\alpha \tan 2\alpha')^2} \right] - 1 \tag{4}$$

对应式(4)可给出相应的 $D_x - \alpha'$ 理论关系曲

线,对 D_x 两倍放大后,如图3所示.

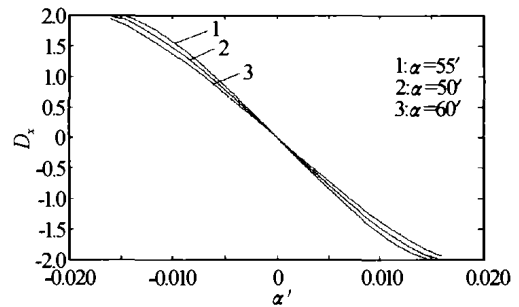


图3 $D_x - \alpha'$ 关系图

Fig. 3 $D_x - \alpha'$ relation chart

其中曲线1,2,3所对应的 α 取值分别为 $50'$ 、 $55'$ 、 $60'$.该关系曲线分为三个区间, $|\alpha'| < \alpha$, D_x 随 α' 接近线性规律变化; $|\alpha'| \geq \alpha$, D_x 趋近饱和,正向饱和值为2,负向为-2.

2.2 从输出信号中求取 α

由于反射镜由驱动机构带动匀速转动,因而实际输出信号是反射镜旋转时间(或采样时间)的函数.

$$\alpha' = \omega(t - t_0) \tag{5}$$

ω 为反射镜扫描角速度

在测量中,取任意时刻求取信号随时间的变化率,即 $\frac{dD_x(t)}{dt}$,可求得 α .例如求取 D_x 信号过零点的变化率 K_x ,即对应光斑在探测器中心位置 $\theta = \pi/2$, $\alpha' = 0$ 时

$$K_x = \left. \frac{dD_x}{dt} \right|_{\alpha'=0} = -\frac{2\omega}{\pi} \cot 2\alpha$$

因此有

$$\cot 2\alpha = (\pi/2\omega) K_x \tag{6}$$

$K_y = 0$ 时,通过输出 D_x 过零点附近信号的变化率,用式(6)可求得对应弥散斑半径的反射镜偏转角.

2.3 弥散斑半径 R 与反射镜旋转角 α 的关系

当反射镜逆时针旋转,弥散斑从左向右移动,弥散斑右、左边缘与探测器的像限分划相切($x = \pm R$)时,弥散半径 R 与所对应的反射镜转角 α 的关系可表示为

$$\cot 2\alpha = f_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{2}{D} \right) \tag{7}$$

D 为成象物镜的通光口径.

2.4 弥散圆的理论测量模型

根据上述推导可知,从输出信号 $D_x、D_y$ 提取出 K_x 或 K_y ,根据公式

$$\cot 2\alpha = (\pi/2\omega) K_x$$

求得对应弥散斑半径的反射镜偏转角 α .然后,用式

$$\cot 2\alpha = f_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{2}{D} \right)$$

求得弥散斑半径 R .

通常为了减小因光学组件的偏心、轴偏、像差对弥散斑直径测量准确性的影响,将光学组件旋转 90° 再测量,取得沿探测器垂直方向扫描的输出信号,同样原理求的 y 向弥散斑半径所对应的反射镜偏转角 α 的值,两个方向的测量数据取均值为最终测量结果.

在测量时,输出信号 D_x 、 D_y 结合判读可得到弥散光斑大小真实信息. 如果与扫描方向垂直的合成信号随时间线性变化,则说明反射镜扫描方向与四象限的分划线不平行,所测的弥散斑结果大于真值. 若要利用 K_x 提取 α 值,需调整探测器的安装位置使 $K_y \approx 0$; 反之利用 K_y 提取 α 值,需调整探测器的安装位置使 $K_x \approx 0$.

3 离焦量的修正方法

根据被测光学组件当时的弥散斑半径和期望值的差异,取得需调整量 δ_Δ ,通过修正被测组件 Δ ,改变弥散斑半径,使其满足预期要求或达到最佳状态. δ_Δ 由两种方法分别给出 $\delta_{\Delta 1}$ 和 $\delta_{\Delta 2}$,取其均值 $\delta_\Delta = (\delta_{\Delta 1} + \delta_{\Delta 2})/2$.

3.1 $\delta_{\Delta 1}$ 的取得

反射镜偏转角 α 与离焦量 Δ 的关系为

$$\Delta = \frac{2f_2^2 \tan 2\alpha}{2f_2 \tan 2\alpha + D} \quad (8)$$

对于被测光学组件,根据输出信号由式(6)得到此时的 $\alpha_{\text{实测}}$,利用式(8)得 $\Delta_{\text{实测}}$,同样利用式(8),根据 $\alpha_{\text{期望}}$ 可求得 $\Delta_{\text{期望}}$.

$$\delta_{\Delta 1} = \Delta_{\text{实测}} - \Delta_{\text{期望}}$$

3.2 $\delta_{\Delta 2}$ 的取得

不改变光学组件的状态,移动带标尺的准直物镜,模拟离焦量变化直到输出反映弥散斑达到期望值,读取准直物镜标尺读数 x_1 . x_1 与在成像物镜像方形成的离焦量变化量 $\delta_{\Delta 2}$ 的关系见式(10).

准直物镜移动偏离基准零位,造成激光的汇聚点(成像点)不再位于成像物镜的后焦面,向焦面内或外移动,见图4. 由于探测器光敏面相对于焦面位置不动,因而等效为探测器距光汇聚点距离增大或

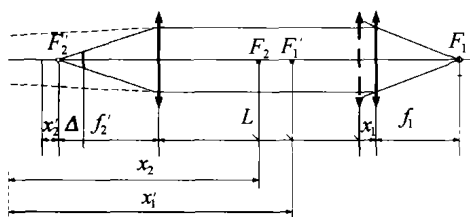


图4 准直物镜移动时各变量的关系
Fig. 4 Every correlation variable arose by collimation lens moving

减小,即离焦量增大或减小,弥散斑随之增大或减小.

定义准直物镜焦距 f_1 、成像物镜焦距 f_2 ,两透镜主面间距离 L ,探测器光敏面实际位置离焦 Δ ,激光通过两透镜像点对物、象方焦面的坐标分别为 x_1 、 x_1' 、 x_2 、 x_2' (从焦面向右为正).

激光经成像物镜后汇聚点 x_2'

$$x_2' = -\frac{x_1 f_2^2}{(L - f_1 - f_2)x_1 + f_1^2} \quad (9)$$

由于

$$(L - f_1 - f_2)x \ll f_1^2$$

$$x_2' \approx -(f_2/f_1)^2 x_1$$

$$\delta_{\Delta 2} = x_2' = -(f_2/f_1)^2 x_1 \quad (10)$$

3.3 δ_Δ 的确定

$\delta_{\Delta 1}$ 的准确性受两种因素的影响,一是重复安装、测试造成的组件装调误差和测量时的装夹误差;二是理论计算误差,由于测量模型中是用各系统参量的理论值计算,而对于工业化批量生产来讲,光学组件的焦距、轴偏等偏差以及测量系统构成参数在使用中的变化会在测量结果中引入理论误差.

$\delta_{\Delta 2}$ 是由移动准直物镜模拟离焦取得的调整修正量,通过物象关系真实反映了被测件的光机参数状态以及测量系统的实时状态. 但近似将 x_1 与 x_2 以线性关系处理,随标尺读数增大,误差逐渐增大.

为了提高 δ_Δ 准确度,减少测量、调试次数,通过实验,对 $\delta_{\Delta 1}$ 和 $\delta_{\Delta 2}$ 取相同权值合成 δ_Δ ,即 $\delta_\Delta = (\delta_{\Delta 1} + \delta_{\Delta 2})/2$

4 实验结果

4.1 实测输出信号与理论模型对比

实验中取一个试件分别将 Δ 设置为 0.186 mm、0.246 mm、0.296 mm,试件的实测输出曲线见图5的曲线1,2,3. 与图3的 $D_x - \alpha'$ 理论关系曲线对比,两者呈现相同规律:1)均呈现了线性区与饱和区的组合;2)随弥散斑半径依次增大,输出曲线变化率平缓,随离焦量增大,输出曲线变化率减小,离焦量与弥散斑半径成正比关系,因此输出信号与计算公

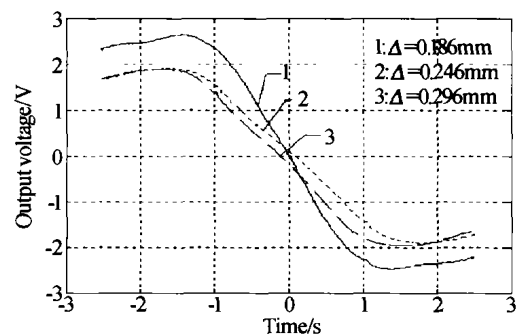


图5 $D_x - \Delta$ 实测曲线
Fig. 5 $D_x - \Delta$ measure result

式吻合。

两者差异:1)实测曲线过零点不稳定.原因是测量时的重复安装误差、双四像限探测器的像限划分区域光敏特性的影响、光斑处于狭缝时各像限之间的信号串扰等,这些因素影响四路信号的输出,最终导致过零点偏移;2)饱和值变化.经过归一化处理输出结果的饱和值应不受光斑平均照度变化的影响,换句话说,式(1)采用归一化算法,是为了消除激光器能量不稳定及调整衰减对输出的影响.但实际测量中,由于各像限光电转化效率不同以及象限内的量子效率的不均匀,造成照射能量变化时, D_x 、 D_y 饱和值有小的变化.

4.2 对测量结果的验证

4.2.1 离焦量的测量

对被测样本装定已知的 Δ (或 δ_Δ),利用输出信号根据式(6)、(7)求取 Δ (或 δ_Δ),计算测量结果与装定值的偏差. $\delta_{\Delta 1}$ 结果见表 1.

表 1 离焦量测量值与装定值比照表(单位 mm)

试件编号	1	2	3	4	5
实际装定值	0.08	-0.02	0.033	0	0.12
测量结果	0.088	-0.022	0.025	-0.002	0.13

为了避免重复拆装组件及重复安装引起测量误差,移动准直物镜模拟离焦变化 $\delta_{\Delta 2}$,与输出信号变化测量值 Δ 比较.

图 6 下为离焦量 Δ 随准直物镜移动量($-x_1$)的理论曲线.图 6 上是三个试件离焦量变化与物镜移动 x_1 的对应图.

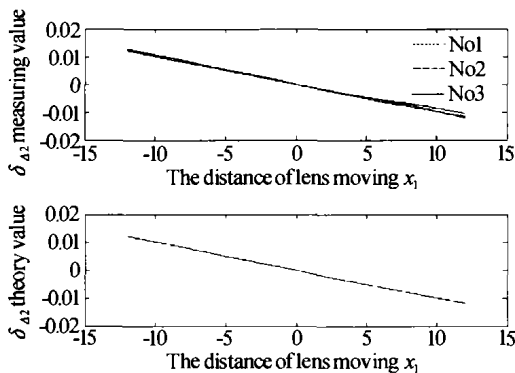


图 6 $X_1 - \delta_\Delta$ 实测曲线与理论曲线

Fig.6 $X_1 - \delta_\Delta$ measure result and thory chart

$x_1 = 15$ mm 接近准直物镜移动的最大行程,三个试件测试的三组数据中与理论值偏差最大值为 0.003 mm.

4.2.2 反射镜偏转角 α 测量

根据预置的离焦量用式(8)计算,计算结果与

测量值比较见表 2.

表 2 反射镜偏转角测量值与理论值对照表(单位 mrad)

试件号	1	2	3	4	5
$\alpha_{理论}$	2.008	2.041	1.9404	1.9663	1.9473
$\alpha_{实测}$	1.87	1.97	1.91	1.82	1.92

试件 1 测量结果偏差较大,误差主要来源于反射镜的旋转角速度 ω 的稳定性、试件光学参数如 f_2 与理论值的偏差、信号采集偏差等.

4.3 测量重复性

用引用误差表征系统的静态特性不一致性.对 12 个样本,每组进行 10 个测回的测量,用标准偏差计算对应同一输入量多次测量同向行程输出量的绝对误差,置信度取 95% 情况下,引用误差 0.9% ~ 2.7%.

5 结论

利用双四像限探测其本身的结构特点和光电输出信号特性,对其所接收的微小光斑进行精确测量和调整,突破了传统的光机调校的繁琐、实验调试条件严格等的限制,而且实现了工序中在线测量,测量结果与产品的最终状态最接近,系统相关指标更有确定性.所组建的系统可对 0.5 mm 左右的弥散斑进行分辨率为 0.0096 mm 的精确测量(对应反射角分辨率为 1').

参考文献

- Guo X H. Precision Control and Guide Technique. Beijing: Defence Industry Publishing Company, 1999. 161 ~ 168, 216 ~ 239
- Lu C S. Photoelectricity Inspect Technique. Beijing: Instrument Industry Publishing Company, 1992. 212 ~ 223
- Fen L L. Simple analysis of signal-processing skill for four-quadrant photo-electronic detective system. *Optical Technique*, 1995, (3): 12 ~ 16
- An K, Wang H M, Ren G. et al. A new angle-measurement algorithm of the detector with four quadrants (In Chinese). *Laser & Infrared*, 2001, 31(6): 328 ~ 329
- Qian J Q, Hui M, Wang D S. Research of dual axis small angleMeasurement based on high sensitivity quadrant detector. *Instrument & Apparatus Transaction Supplement*, 2002, 23(3): 538 ~ 539, 544
- 贺锋涛,白永林,冯晓强,等.像散法对微位移和微振动的实时测量. *光子学报*, 2003, 32(10): 1208 ~ 1211
He F T, Bai Y L, Fen X Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10): 1208 ~ 1211

Research on Measuring and Adjusting Method of Dispersion Spot at Double Quadrant photoelectric Detector

Dang Liping, Liu Junhua, Tang Xiaojun

School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2003-12-03

Abstract Being a new style position detector, double quadrant photoelectric detector has been widely used in measure, track, control and guide. The size of laser dispersion spot is closely related with the system's behavior and characteristic. Begin with a discussion about measurement model, followed a method of small light spot precise measuring and adjusting on-line, making use of detector's optics and construction and characteristic of outputting signals is given, along with result of experiment that the resolution is 0.0096mm in 0.5mm \pm 0.1mm measure scope.

Keywords Double quadrant photoelectric detector; Dispersion spot; The distance between detector; Photosensitive surface of rear focal plane



Dang Liping acquired a master's degree from Ordnance Engineering College in 1991. She has been working towards the Ph. D. degree in measuring & testing technology at Xi'an Jiaotong University. As a senior engineer of photoelectricity and military technique, she has been engaged in non-contacting measure and guide technology.