

# 象限探测器非均匀性的影响分析及软校正算法\*

党丽萍<sup>1,2</sup> 刘君华<sup>1</sup> 唐树刚<sup>3</sup>

(1 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

(2 驻西光集团军代室, 西安 710043)

(3 总参西安测绘研究所, 西安 710063)

**摘要** 定量分析了四象限探测器用于目标跟踪时,其光电响应不均匀性对输出特性线性度及跟踪定位准确度的影响,给出了不均匀性校正的下限.提出了一种综合补偿光分布、探测器暗电流、通道增益的多元软校正方法.该方法将非线性误差控制在 5%,跟踪定位准确度 2%.与补偿增益的硬件校正和不消除暗电流的软校正方法相比,非线性误差减小 2%,定位准确度提高了近 3%.

**关键词** 象限探测器;不均匀性;智能软校正

**中图分类号** TN209 **文献标识码** A

## 0 引言

非成像多元探测器敏感动态光斑的大小和位置信息,被广泛用于高准确度测角<sup>[1]</sup>、测振<sup>[2,3]</sup>、准直<sup>[4]</sup>、跟踪及光镊<sup>[5]</sup>等领域.其中四象限探测器应用最为普遍.目前,在各类应用研究中,虽把象限探测器作为控制系统中的线性元件,但没有考虑各象限光电响应不均匀性对系统线性特性的影响.通常假定探测器受到均匀光辐射时,各象限输出幅值相等的信号.实际上,由于材料品质和制作工艺水平的限制,象限及象限内各点的光电响应无法达到均匀一致<sup>[6]</sup>.

由于光电响应的不均匀性给探测器输入、输出之间的关系带来非线性偏差,影响测量和控制准确度,对探测器的不均匀性实时校正十分必要.目前,对光电成像器件的非均匀性校正研究较多,方法基本可分为:一点校正法、两点校正法<sup>[7]</sup>、多点校正法<sup>[8,9]</sup>(也称分段线性法).研究表明:通过校正不均匀性,可以改善图像质量,提高系统的探测灵敏度.与光电成像器件机理相近,象限探测器的不均匀性主要由暗电流和光电转换效率不一致引起.文中以四象限探测器用于目标跟踪时为例,通过比较象限输出信号的峰值电压,来度量探测器的不均匀性.分析了不均匀性对和差运算合成的控制信号线性度的影响,提出二维线性拟合的软校正方法,对象限间和象限内各点的不均匀性综合校正,降低器件的非线性误差.

## 1 四象限探测器的光电响应不均匀性

探测器的探测能力、带宽和响应均匀性对测量和控制系统的性能指标有重要影响.在探测器组件制作过程中,这几项指标需要综合权衡.如要增强探测能力,需要增大探测器的有效光敏面积,但在较大的光敏面积上保证较高的光电响应均匀性,对器件的材料和制作工艺要求苛刻.目前,已商品化的光伏型四象限探测器,如国内几家专业所、日本滨松公司、俄罗斯等独联体国家生产的器件,有效工作面积在 2~3 mm<sup>2</sup>,不均匀性可控制在 6%以内,如果有效探测孔径大于  $\varphi 3$  mm,批量生产的器件不均匀性是 10%~25%.不加前置放大的探测器,不均匀性的数值相对较小.

象限探测器的光电不均匀性指两个方面,象限内不同位置响应的不一致和象限之间的光电响应不一致.前者是由制作器件的半导体晶体生长缺陷、衬底掺杂组份的不均匀、掩膜误差引起的,后者除此之外,还受探测器各象限的前置放大增益不一致的影响.在本文中,考虑使用需求,以各象限受到相同辐射时输出峰值电压的差值度量探测器的响应不均匀性.

当均匀照度为  $E$  的激光充满象限探测器的有效工作面积照射时,各象限输出的峰值信号为  $v_{01}$ ,  $v_{02}$ ,  $v_{03}$ ,  $v_{04}$ , 探测器光电响应不均匀性  $\eta$  定义为

$$\eta = \frac{4\max(v_{01}, v_{02}, v_{03}, v_{04}) - 4\min(v_{01}, v_{02}, v_{03}, v_{04})}{\sum_{i=1}^4 v_{0i}} \quad (1)$$

$$v_{0i} = \int_{s_i} E \lambda_i G_i(x, y) ds = E \lambda_i \int_{s_i} G_i(x, y) dx dy \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中  $G_i$  为象限的光电转换效率;  $\lambda_i$  为象限的增益

从式(1)、(2)看出,这样不均匀性测量和计算的结果是象限内各点光电相应的差异积分与象限前置

\*国家自然科学基金(60276037)和国防技术基础研究(ZLBOS145)资助

Tel: 029-88252650 Email: dang03272000@yahoo.com

收稿日期: 2005-08-17

放大电路的增益的综合反映. 考虑探测器用于目标跟踪过程中, 实际光斑直径大多是小于探测器探测直径的 0.5 倍, 对探测器的不均匀性实时校正, 相当于用整个象限不均匀性的积分结果来校正光斑所在位置的局部不均匀性.

## 2 不均匀性对控制信号线性度的影响

在目标跟踪过程中, 任意时刻探测器各象限合成信号大小与光斑偏离探测器中心的距离有关. 探测器合成信号乘以  $-1 \sim 0$  之间的比例系数, 作为修正运动物体姿态的误差控制信号, 使光斑在四象限探测器内运动, 直到光斑中心与探测器中心重合. 经典的信号合成算法是象限信号和差运算后归一化, 见式(3)

$$u_x = k \frac{v_2 + v_3 - v_1 - v_4}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4} \quad (3)$$

$v_i (i=1, 2, 3, 4)$  是各象限输出的峰值电压, 象限的序号排列见图 1. 文中设  $k = -1$ . 一般情况下, 认为控制信号与欲修正的位置偏差是线性关系. 下面的推导说明, 四象限探测器的不均匀性在误差控制信号中产生的非线性误差, 引起目标跟踪位置偏差.

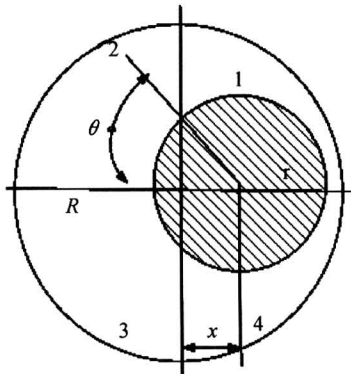


图 1 光斑被探测器象限分割  
Fig. 1 Laser spot was divided into four segments

设光斑落在各象限的面积  $s_i (i=1, 2, 3, 4)$ , 探测器各象限光电响应  $\rho_i (i=1, 2, 3, 4)$ ,  $\rho_i = \overline{G_i(x, y)} \lambda_i$ , 描述了含前置放大增益的探测器光电响应特性. 接收的光分布  $\overline{E_i(x, y)}$

$$v_i = \overline{E(x, y) G_i(x, y)} s_i \lambda_i = \overline{E_i(x, y)} s_i \rho_i \quad (4)$$

按图 1, 光斑落在各象限的面积分别用式(5)、(6)表示

$$s_1 = s_4 = \frac{r^2}{2} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \quad (5)$$

$$s_2 = s_3 = \frac{r^2}{2} (\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta) \quad (6)$$

式中,  $\theta = \arccos \frac{x}{r}$ ,  $x$  是光斑偏离探测器中心的距离.

为将不均匀性对误差控制信号的影响分析简单

化, 不论光斑高斯分布的情况, 假定光分布是均匀的,  $\overline{E_i(x, y)} = e$ . 将式(4)、(5)、(6)分别代入式(3), 得到式(7)

$$u_x = \left[ (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) \left( \arccos \frac{x}{r} - \frac{x}{r} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{x}{r} \right)^2} \right) - (\rho_1 + \rho_2) \pi \right] / \left[ (\rho_1 + \rho_4 - \rho_2 - \rho_3) \cdot \left( \arccos \frac{x}{r} - \frac{x}{r} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{r} \right)^2} \right) + (\rho_1 + \rho_2) \pi \right] \quad (7)$$

用理论线性度来计算探测器不均匀性引起的输出特性的非线性误差  $\delta_L = \frac{|\Delta L_m|}{y_{FS}} \times 100\%$ .

通过对式(7)数学仿真知, 当探测器光电响应均匀时, 误差控制信号与光照度、探测器的象限增益、转换效率无关, 仅随光斑中心与探测器象限中心的距离近似线性变化. 在  $-r \leq x \leq r$  区间内, 误差控制信号  $u_x$  与光斑到探测器中心的距离  $x$  之间的线性相关度 0.9978.

当探测器各象限响应不一致, 用光斑面积计算合成信号,  $u_x$  显然是  $x$  的高阶函数. 见图 2, 随着象限光电响应不均匀性  $\eta$  增大,  $u_x$  与  $x$  的线性相关度减小, 非线性引用误差  $\delta_L$  增大, 零位漂移  $\delta_0$  增大; 图 3 中最下方直线是  $u_x$  的理论拟合直线,  $u_x$  与其在  $u_x$  轴上的偏差是理论非线性误差, 曲线由下向上随着  $\eta$  增大, 非线性误差增大, 最大值的点逐渐移向零位

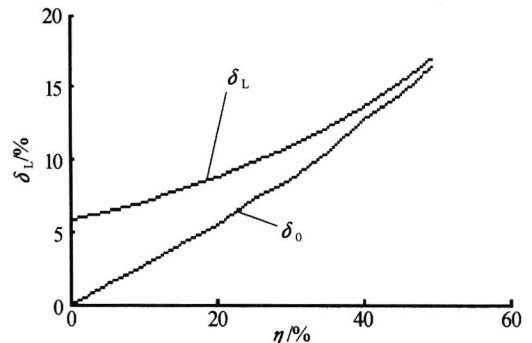


图 2 非线性误差  $\delta_L$  及误差控制信号不均匀性  $\eta$  增大而增大

Fig. 2  $\delta_L$  and  $\delta_0$  become bigger when  $\eta$  increasing

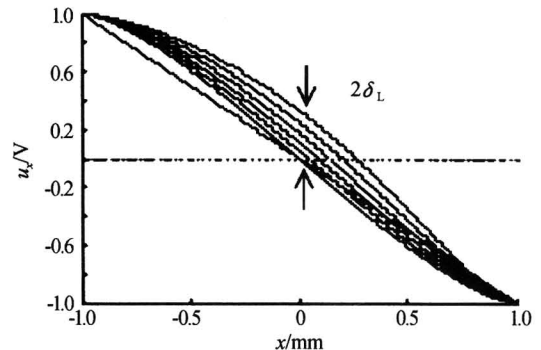


图 3  $u_x$  及随  $\eta$  增大非线性误差增大

Fig. 3  $u_x$  and the rule of  $\delta_L$  changing with  $\eta$

附近,零位附近  $\delta_L > 0$ ,如果光斑从2和3象限进入,要通过误差控制信号将光斑修正到零位时,由于存在非线性误差,给出的控制信号会将光斑引导到1和4象限,产生超调现象。

由图4可知非线性引用误差  $\delta_L$  和零位漂移  $\delta_0$  与光斑尺寸大小无关,只和光电响应不均匀性有关。因此在任意大小光斑下对探测器不均匀性校正后,当跟踪距离变化引起目标在探测器上像点大小变化时,控制准确度不受影响。

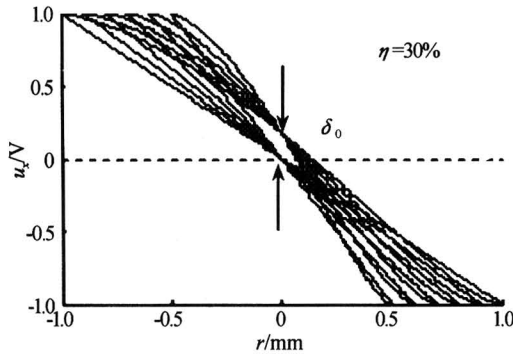


图4 存在光电响应不均匀性时非线性误差和零位漂移与光斑大小的关系

Fig. 4 Relation between  $\delta_L$  and  $\delta_0$  and facular radius when non-uniformity exists

此外,由于采用的归一化信号合成算法,所以光强的变化不影响控制准确度。

### 3 象限探测器光电响应不均匀的校正

校正探测器各象限输出信号有两种方法:硬件校正和软件智能自校正。

硬件校正:在探测器的各路前置放大电路后串联可变负载电阻,用均匀光同时全视场照射四个象限,调节各路的输出电压相等。这种校正方法主要补偿了增益的不均匀性,可用于实验及静态测试,无法实时校正。

#### 3.1 四象限探测器不均匀性的软校正

智能自校正的方法是通过软件计算,得到各象限的非线性反校正系数。根据定义不同,也有两种方法。

##### 3.1.1 增益法校正

为计算和标定方便,各象限的光电响应特性参量  $\rho_i$  用比值来定义。均匀光照射下,标定探测器各象限输出电压  $v_{0i}$  ( $i=1,2,3,4$ ),计算

$$\rho_i = \frac{v_{0i}}{\max(v_{0i})|_{i=1,2,3,4}} \quad (8)$$

得到各象限的非线性反校正系数  $\rho'_i = \rho_i^{-1}$ 。在实际应用中,式(3)的各项对应乘以非线性反校正系数  $\rho'_i$

$$u_x = -\frac{\rho'_2 v_2 + \rho'_3 v_3 - \rho'_1 v_1 - \rho'_4 v_4}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \rho_3 v_3 + \rho_4 v_4} \quad (9)$$

#### 3.1.2 光电响应特性 $\rho_i$ 和暗电流校正参量 $v_m$ 二维混合校正

光斑的不均匀性对象限的光电不均匀性标定有明显的影响,光斑质量由激光器自身性能决定,采取扩束、毛玻璃散射等方式均匀化后的激光仍不会是理想的均匀光斑,实验中的首先对光斑的均匀性进行四个方向标定,得到光斑不均匀的影响系数  $k_1, k_2, k_3, k_4$ ,在探测器的  $0^\circ$  和  $90^\circ$  安装位置对各象限光电响应进行交叉标定。

考虑暗电流  $v_m$  的存在,探测器的象限输出电压的测量值表示为

$$\hat{v}_i = \rho_i s e_i + v_m = \rho_i k_i v_{i0} + v_m \quad (10)$$

$v_{i0}$  对应象限的理想输出电压,由于是全视场照射,所以各象限的理想输出相同。分别对  $0^\circ$  和  $90^\circ$  位置计算,可得到该象限的暗电流(暗噪)

$$v_m = \frac{k_{i+1} \hat{v}_{i0} - k_i \hat{v}_{i90}}{i_{i+1} - i_i} \quad (i=4 \text{ 时}, i+1 \text{ 取 } 1) \quad (11)$$

非线性修正系数

$$\rho'_i = \frac{\max(\hat{v}_i)|_{i=1,2,3,4} - v_m}{\hat{v}_i - v_m} \quad (12)$$

$m$  对应输出电压最大值象限的序号。

将式(11)代入式(9),得到校正光电响应不均匀性后的误差控制信号。

该方法在消除光斑不均匀带来的校正误差基础上,同时考虑增益和暗电流引起的非线性,并予校正。

### 4 实验及分析

实验和计算仿真说明,探测器的光电响应不均匀性带来控制信号的非线性误差,进而导致位置修正误差,对于小视场跟踪器,探测器的不均匀性需控制在15%以内。

控制信号的零位误差  $\delta_0$  对光电响应的不均匀性最为敏感,当探测器的不均匀性从5~30%逐步增大时,引起的误差控制信号的非线性误差从-5%~12%,相应地零位误差的绝对值线性增加,如图5。对于用光电响应不均匀性达20%~30%器件的产品,当目标接近探测器中心时,误差控制信号的超调引起飞行体姿态的  $0.7^\circ \sim 1.2^\circ$  振荡(光斑半径为1 mm,探测器半径2 mm,探测器前成像物镜  $f=17.65$  mm 情况下)。

对于同一器件,由于不均匀性引起的光斑定位误差与光斑到探测器中心的距离和象限增益有关。图6中,象限光电响应特性参量  $\rho_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 分别为1,0.7,0.7,1,最下方的曲线是未校正前的定位误差曲线,可以明显看到,光斑的定位误差在1,4和2,3象限不对称,在2,3象限的定位误差较大,尤

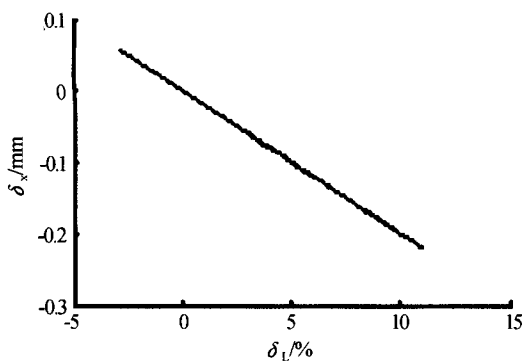


图5  $\eta=30\%$ 非线性误差引起的位置修正误差  
Fig. 5 Position locating error caused by  $\delta_L$  when  $\eta$  is 30%

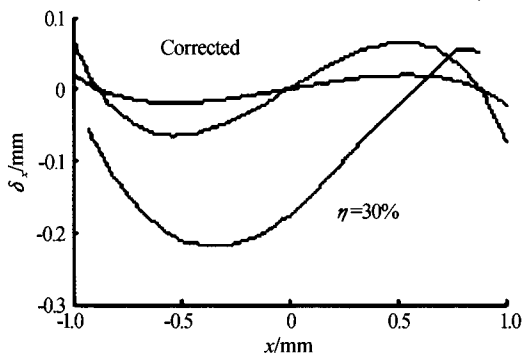


图6 校正前、后,光斑在不同位置对应的定位误差  
Fig. 6 Position locating error curve of all moving area when non-uniformity was corrected and retained

其是接近探测器中心时,定位误差趋向整个区域最大值. 所以跟踪时,光斑从光电效率低的象限进入,跟踪误差大.

中间的曲线是采用增益法校正后的光斑定位误差曲线,曲线对称,说明四个象限的光电响应校正到一致,全程非线性误差最大值 7.9%;上方是消除暗噪声后光电响应不均匀性得到补偿的光斑误差定位曲线,在整个跟踪视场,定位误差比较平,约占光斑总行程的 2%,非线性误差控制在 5%以内.

## 5 结论

四象限探测器跟踪测控系统的非线性误差主要由探测器的不均匀性产生,为了减小非线性误差,在整个测量范围内灵敏度是一个常量,需要采取校正措施.

文中定量分析了光电响应不均匀性对象限探测器输出特性线性度的影响,在此基础上计算了非线性误差产生的光斑定位误差,并提出了一种光电响应特性  $\rho_i$  和暗电流  $v_0$  混合软校正的新方法. 通过仿真实验得到以下结论:

1) 探测器象限的不均匀性破坏了其输出信号的对称特性,引入了零位漂移,降低了光斑定位准确度. 随着不均匀性  $\eta$  增大,非线性误差和零位漂移近似二次函数增长,对跟踪的稳定性和跟踪准确度影响

明显. 当光电不均匀性  $>15\%$  时,跟踪定位误差 10%,对不均匀性必须进行校正.

2) 以探测器象限输出的最大值作为校正的基准值,校正系数取前者与象限的实际测量值的比值,采用硬件和软件两种方法校正,输出信号的的非线性误差可控制在 7%左右,信号的对称性恢复.

3) 标定入射光分布的不均匀性,采用  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两个方向消除暗电流的光电效应特性校正方法,非线性误差校正准确度更高,在整个跟踪区间任意位置,光斑的定位误差不大于 2%.

4) 不均匀性智能软校正方法便捷、经济,对某象限探测器静态标定后,将校正系数存储在产品程序中,既可在任意大小光斑、任意光照强度下,对探测器的非线性误差进行实时修正.

## 参考文献

- 党丽萍,刘君华,汤晓君. 双四象限探测器弥散斑的测量研究. 光子学报, 2004, **33**(8): 989~993  
Dang L P, Liu J H, Tang X J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 989~993
- Vladimir V N, Mounir B, Victor A S. Model of an acousto-optic laser beam steering system intended for satellite communication. *Optical Engineering*, 2001, **40**(1): 2208~2214
- 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, Feng X Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1208~1211
- 匡萃方,冯其波,冯俊艳,等. 四象限探测器用作激光准直的特性分析. 光学技术, 2004, **30**(4): 387~389  
Kung C F, Fen Q B, Feng J Y, et al. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 387~389
- 刘春香,郭红莲,降雨强,等. 光镊系统中光放大倍数对测量结果的影响. 物理学报, 2005, **54**(3): 1162~1165  
Liu C X, Guo H L, Jiang Y Q, et al. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(3): 1162~1165
- 庄继胜,魏建华. CO<sub>2</sub> 激光制导用光伏碲镉汞四象限探测器组件. 红外技术, 1996, **28**(7): 12~16  
Zhuang J S, Wei S H. *Infrared Technology*, 1996, **28**(7): 12~16
- 童央群,郭继昌. 一种改进的红外焦平面非均匀性校正算法. 光电工程, 2005, **32**(5): 35~37  
Tong Y Q, Guo J C. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(5): 35~37
- 殷世民,刘上乾. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法. 光子学报, 2002, **31**(16): 715~718  
Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(16): 715~718
- 徐田华,赵升工. 基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法. 光子学报, 2006, **35**(2): 261~264  
Xu T H, Zhao S G. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 261~264

## Analysis of the Non-uniformity Effect and Soft Correction Algorithm for Four-quadrant Detector

Dang Liping<sup>1,2</sup>, Liu Junhua<sup>1</sup>, Tang Shuguang<sup>3</sup>

*1 School Of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*

*2 Army Representation Office Be Stationed In Xiguang Group, Xi'an 710043*

*3 Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710063*

Received date: 2005-08-17

**Abstract** The non-uniformity effect of the four-quadrant detector on the output signal linearity and accuracy of trace were analyzed and position locating when the detector was used in the target trace, and the bottom limit to the non-uniformity was also given. Based on this, a multi-correction method, which used comprehensive compensation intensity distribution, dead current, and channel of amplifier coefficient was presented for the first time. By using this method, the non-linear error was limited to 5% and the accuracy of trace and position locating was 2%. Compared with the methods using the hardware correction of compensation channel of amplifier coefficient and the soft correction with dead current retained, the non-linear error was reduced to 2% and the accuracy of position locating was improved nearly 3% by the multi-correction method.

**Keywords** Quadrant detector; Non-uniformity; Soft-correction



**Dang Liping** holds a master's degree from Ordnance Engineering College 1991. She has been working towards the Ph. D. Degree in measuring & testing technology at Xi'an Jiaotong University. As a senior engineer in photo-electricity measurement, control and guide technique, she has been engaged in non-contacting measure and guide technology for ten years.