

文章编号: 0258-7025(2004)04-0421-06

四象限光电探测器的光路数学模型

汤晓君, 刘君华, 陈 剑, 党丽萍

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 探测器数学模型是探测器实施精确探测的基础。通过分析探测器光路建立了一个较为完整的四象限光电探测器的光路数学模型, 考虑了探测器在安装过程中发生的偏移位置及其偏移量、光敏面的离焦量、探测器结构参数等对光信号到电信号的转换的影响。在建立俯仰偏移、横滚偏移和方位偏移三种特定情况下探测器模型的基础上, 给出了探测器的三自由度安装位置、光敏面的离焦量、光信号等与输出信号的一般关系式。比较在给定相同光路参数条件下探测器光路数学模型的理论输出信号波形与实测输出信号波形, 结果表明, 两者信号波形相似。比较模型输出与实际输出信号的两个特征参数, 即信号过零点的切线的斜率与截距, 可以发现, 特征参数的差别小于 0.01, 因此, 四象限光电探测器数学模型的输入输出关系与探测器实际输入输出关系是一致的, 可以用该模型实施探测器探测, 这为光电探测器进一步的研究与应用, 实现无实验样本探测提供了参考。

关键词 光电子学; 四象限光电探测器; 光路数学模型; 特征参数

中图分类号 TP 73 **文献标识码** A

Mathematic Model of Ray-Path of Four-Quadrant Photoelectric Detector

TANG Xiao-jun, LIU Jun-hua, CHEN Jian, DANG Li-ping

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract Mathematic model of detector is the basis of precise detection. A complete mathematical model of four-quadrant photodetector has been built by analyzing the ray-path of photodetector in this paper. In the model, the effects of the offset of fixed position of four-quadrant photodetector happened when photodetector was being installed, the distance between photosurface and focus of photodetector, and other architecture parameters of photodetector on the conversion from light to electricity are considered. On the basis of building the models of photodetector in three particular positions, viz. pitching departure position, orientation departure position, rolling departure position, the common relation expressions between light signals, the offset of mounted position of four-quadrant photodetector, the distance between photosurface and focus of photodetector, and the electricity signal, the output signal are given. Comparing the waveforms of the output signals of the mathematic model of the photodetector and that of practical output signals of detector, it is found that the waveforms of model resembled that of detector in appearance. Comparing the feature parameters of the output signals of model and that of practical output signals, viz. the slope and intercept of tangent on crossover point of outputs, it is found that the differences are less than 0.01. So the relation between the inputs and outputs of the mathematical model was consistent with that between the inputs and outputs of the detector, and the model can be used in practical detection. And a foundation for the profound research and application of photodetector, detection without experiment samples is founded.

Key words optoelectronics; four-quadrant photoelectric detector; mathematic model of ray-path; characteristic parameters

收稿日期: 2002-12-09; 收到修改稿日期: 2003-02-25

作者简介: 汤晓君(1973—), 男, 西安交通大学博士研究生, 主要从事多传感器信息融合、无损检测、多参量测控等方面的研究。E-mail: xiaojun_tang@263.net

1 引 言

光电探测器作为光信号的传感器已在烟雾火警监测^[1]、光电定向、光电准直、光电对准、光电自动跟踪、激光制导等各个技术领域得到了广泛的应用。随着半导体技术的发展进步,光电探测器件逐渐向多元化、集成化方向发展,不断有各种类型的新型探测器问世^[2]。新型器件的不断出现也不断对相关的信号提取和处理的软、硬件提出更新的要求^[3]。目前,国外有关光电探测器的文献很多,但有关光路分析的文献却很少。同发达国家相比,国内有关光电探测器的文献整体上要少得多,有关检测信号分析的文献则更少,在已有文献中,文献[3]对多像限的信号取法作了一定的探讨,文献[4]特别地阐述了在光电探测器用于测角时的信号分析。但所有的这些信号分析是探测器的安装制造在完全正确的基准位置条件下进行的。但实际情况并非如此,一方面,光电探测器在安装过程中不可避免地有一些偏差,另

一方面,随着使用时间的推移,安装光电探测器的支架以及整个探测系统都可能发生形变,这都将给光电探测器的探测带来误差。要减小甚至消除这些影响因素对光电探测器检测的影响,就必须对检测结果进行修正,这就要求获得这些不定因素与探测器的输出信号之间的样本数据。然而,由于探测器的安装偏离本身有三个自由度,再加上探测器结构上的其他一些参数,这将导致样本数据非常庞大,要通过实验来获取非常困难^[5]。另一方面,这三个自由度的每一个自由度的检测要获得非常高的精度也比较困难。显然,如果能建立起所有的这些参数与探测器的输出的正向与反向关系式,则所有的问题将迎刃而解。本文以四像限光电探测器的光路分析为例,建立了四像限探测器本身的一些结构参数及其安装偏差参数与探测器输出信号在特殊情况下和一般情况下的关系式。本文假设探测器的四个像限的光电转换系数是相等的。

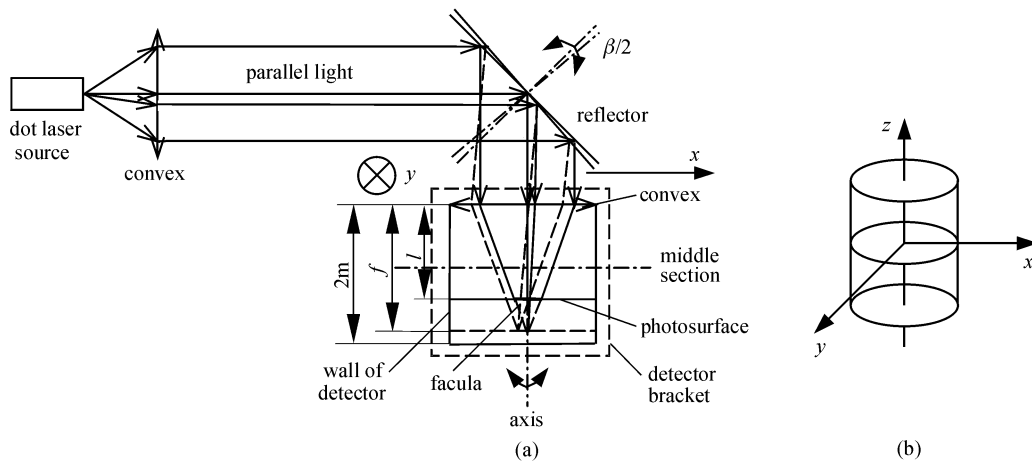


图 1 四像限光电探测器工作光路图

Fig. 1 Light path of four-quadrant photodetector in work

2 四像限光电探测器光路及信号分析

四像限光电探测器光路如图 1(a)所示,整个光路由点激光源、扩束凸透镜、反射镜、四像限光电探测器和探测器支架构成。光电探测器由凸透镜、探测器壁桶和光敏面构成,探测器的光敏面分成均匀的四个区间。探测器支架的轴线与电光源轴线垂直并在同一个平面内。探测器的空间坐标如图 1(b)所示,其中 z 轴为探测器的轴线, y 轴为竖直方向, x 轴为探测器在平行装载时与 z 轴垂直的另一个水平方向,即如图 2 所示光敏面中 I, IV 像限的分界线, y 轴为 I, II 像限的分界线。点激光源发射的激光

经扩束凸透镜扩束后形成平行光,平行光经反射镜进入四像限光电探测器,经凸透镜集束后会聚在光敏面上形成一个光斑。光路工作时,反射镜来回匀速摆动,但四像限光电探测器上的凸透镜总是完全处于光照范围内。这样,光斑在光敏面上形成一道光斑轨迹,如图 2 所示,其中 I, II, III 和 IV 分别表示光敏面的四个像限(区间)。四像限光电探测器的合成信号一般定义为四像限信号的和差形式^[3],即

$$u_x = (u_I + u_{IV}) - (u_{II} + u_{III}) \quad (1)$$

$$u_y = (u_I + u_{II}) - (u_{III} + u_{IV}) \quad (2)$$

其中 u_I, u_{II}, u_{III} 和 u_{IV} 分别表示光敏面四个像限的输出电压, u_x 和 u_y 表示探测器的两路输出电信号,

四像限光电探测器的光路建模的目的就是找出 $u_x(\beta) = f(\varphi, \psi, \eta, l, R, f, m, \beta)$ 和 $u_y(\beta) = g(\varphi, \psi, \eta, l, R, f, m, \beta)$ 的确定表达式。其中 φ, η, ψ 表示探测器安装时发生偏离的三个参数； l 为探测器光敏面与探测器凸透镜之间的距离； R 为探测器透镜的半径， f 为透镜的焦距， β 为探测器入射光的倾角， m 为探测器装配长度的一半（探测器装在检测支架上的那部分的长度）（如图 1）。由于反射镜匀速旋转，因此 β 也可以看作是时间参量，因此 $u_x(t)$ 等同于 $u_x(\beta)$ 。为便于理解，这里从特殊情况到一般情况讨论模型的建立。

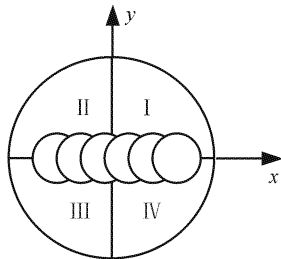


图 2 四像限光电探测器光敏面的四个像限
Fig. 2 Four-quadrant of photosurface

2.1 几种特定情况下四像限光电探测器的光电输入输出关系

对应于图 1(b)，定义探测器的支架三维空间坐标，当探测器的坐标轴与支架的坐标方向完全重合时，探测器处于基准位置；当探测器与支架 x 轴重合，而两者的 y, z 轴不重合，存在一个偏角 ψ, ψ 为 90° 或 270° ，此时，探测器处于俯仰偏离位置；当探测器与支架 y 轴重合，而两者的 x, z 轴不重合，存在一个偏角 ψ, ψ 为 0° 或 180° ，此时，探测器处于方位偏离位置；当探测器与支架 z 轴重合，而两者的 x, y 轴不重合，存在一个偏角 η ，此时，探测器处于横滚偏离位置。

2.1.1 基准情况

在基准情况下，因为探测器在安装时没有发生任何偏离，因此探测器的光敏面上形成的光斑在光敏面的 x 轴上下两侧均匀分布，由(1)式可知 u_y 恒为零值。光斑在各像限的分布将随 β 的变化而变化。由于对于一个给定的探测器，其参数 R, l 和 f 均为定值，因此 u_x 只随探测器入射光的倾角 β 变化而变化。令 r 为光敏面上的光斑半径，则由图 1 中光路应有

$$r = R \frac{f-l}{f} \tag{3}$$

令 s 为光斑中心离 y 轴的距离，显然有 $s = |l \tan \beta|$ 。当 $s < r$ 时，光斑分布在光敏面四个像限，如图 3 所示。此时有：

y 轴右边的光斑面积为

$$S_r = r^2 \arccos(s/r) - s \sqrt{r^2 - s^2} \tag{4}$$

y 轴左边的光斑面积为

$$S_l = \pi r^2 - S_r \tag{5}$$

于是，由光电转换可得输出电压

$$u_x = \tau \rho \sigma (S_r - S_l) \xi = \tau \rho \sigma [2r^2 \arccos(s/r) - 2s \sqrt{r^2 - s^2} - \pi r^2] \xi \tag{6}$$

$$u_y = 0 \tag{7}$$

其中 ρ 为光斑的光照度， σ 为光电转换系数， $\xi = \cos \beta$ 为光照系数，也就是透镜在其入射光的截面上的投影， τ 为信号的符号参数

$$\begin{cases} \tau = 1 & \text{光斑中心在光敏面右(上)侧} \\ \tau = -1 & \text{光斑中心在光敏面左(下)侧} \end{cases}$$

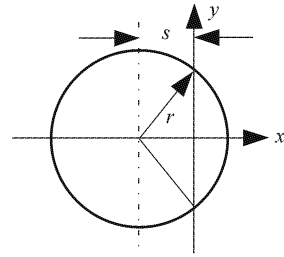


图 3 $s < r$ 时的光斑位置
Fig. 3 Position of facula when $s < r$

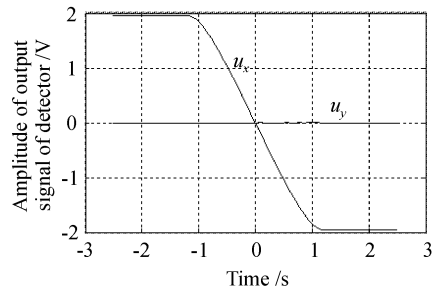


图 4 基准情况下探测器的输出
Fig. 4 Output of detector in fiducial position

当 $s \geq r$ 时，即光斑完全处于 y 轴的某一侧，因此有

$$u_x = \tau \rho \pi r^2 \sigma \cos \beta \tag{8}$$

探测器处于基准位置时，给定 $\rho \sigma = 0.00252$ ，其输出信号如图 4 所示。由于 β 始终比较小，因此 $\cos \beta \approx 1$ （为了使得公式更具有一般性，在后面的公式中依然考虑光照系数问题）， u_x 信号的两端近似为直线。特别地，由于 r 表达式中不包含参数 β ，由(6)式

对 β 求导可求得

$$a_x = \left. \frac{du_x}{d\beta} \right|_{\beta=0} = d \left. \frac{u_x}{ds} \frac{ds}{d\beta} \right|_{\beta=0} - \tau\rho\sigma(S_r - S_l)\sin\beta \Big|_{\beta=0} \quad (9)$$

由于 $\left. \frac{ds}{d\beta} \right|_{\beta=0} = l$, (9) 式右边第二项为 0, 因此把 (3) 式和 $s = |l\tan\beta|$ 代入 (9) 式中可得

$$a_x = \left. \frac{du_x}{d\beta} \right|_{\beta=0} = -\pi\tau\rho\sigma R^2(f-l)/f \quad (10)$$

由于 $f-l$ 为探测器光敏面的离焦量, 其他均为定值, 因此, 在基准情况下, u_x 信号在其过零点 ($\beta=0$) 处的斜率与光敏面离焦量 $f-l$ 成正比, 利用这一特性可以根据 u_x 过零点的斜率来检测探测器的离焦

量。

2.1.2 俯仰偏离情况

发生俯仰偏离时, 光斑的轨迹如图 5(a) 所示。此时, u_y 将不再为零, 光照系数也不再为 $\cos\beta$, 而是关于 β 与 ψ 的函数, 需要另行计算。

由立体几何学很容易由图 1 得到光斑偏离光敏面 x 轴的距离为

$$t = (l-m)\tan\phi \quad (11)$$

在探测器入射光偏移 β 角时, 由几何光学可求得此

时的光照系数为 $\xi = \frac{\sqrt{1-\tan^2\psi}}{\sec\beta}$, 于是

$$\begin{cases} u_y = \tau\rho\sigma[\pi r^2 - 2r^2 \arccos(t/r) + 2t\sqrt{r^2-t^2}]\xi & t < r \text{ 时} \\ u_y = \tau\rho\sigma\pi r^2 \xi & t \geq r \text{ 时} \end{cases} \quad (12)$$

$$u_x = \tau\rho\sigma[2r^2 \arccos(s/r) - 2s\sqrt{r^2-s^2} - \pi r^2]\xi \quad (13)$$

通常情况下, β 比较小, 因此 u_y 近似为一条直线。俯仰偏离情况下输出信号如图 5(d) 所示。由图 5(d) 和式 (12) 可知, 俯仰偏离情况下, 其输出信号变化主要反应在 u_y 的截距 b_y 上。

2.1.3 方位偏离情况

探测器发生方位偏离时, 其光斑轨迹如图 5(b) 所示。光斑均匀分布在光敏面 x 轴的两侧, 因此 u_x

将恒为零。 u_x 因为在反射镜处于中间位置时, 就有一个预偏角 ψ 的存在, 因此不再左右对称, 其过零点将沿着时间轴发生偏移, 而光照系数由基准情况下的 $\cos\beta$ 变成了 $\cos(\beta+\psi)$, 对应于基准情况下的 $s = |l\tan\beta|$ 变成了 $s = |l\tan(\beta+\psi)|$, 于是对应于 (6), (7) 式有

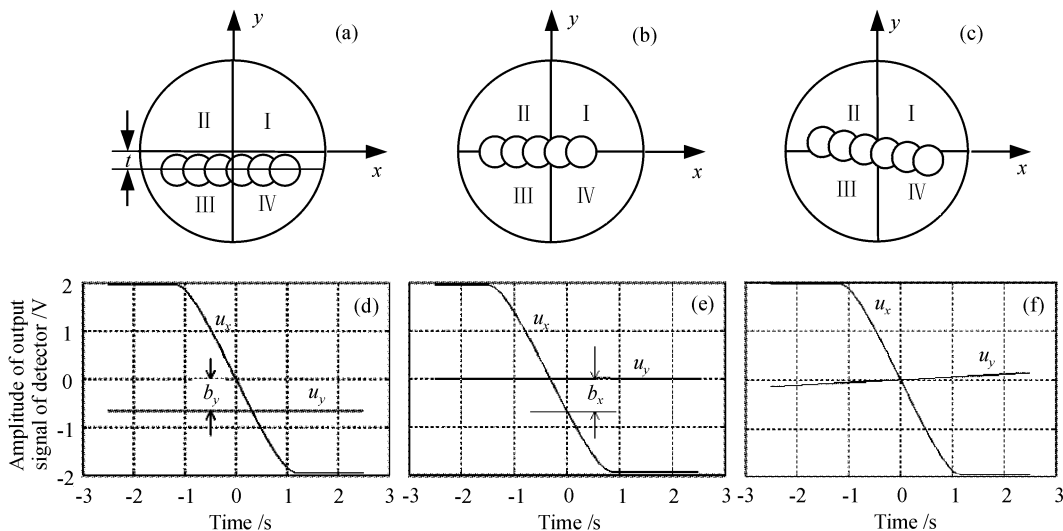


图 5 探测器处于特殊位置时光斑轨迹及其相应的输出波形

(a) 俯仰偏离, (b) 方位偏离和 (c) 横滚偏离时的光斑轨迹;

(d) 俯仰偏离, (e) 方位偏离和 (f) 横滚偏离时的输出信号波形

Fig. 5 Facula tracks and the corresponding output waveforms when detector in particular position

(a) facula track when detector in pitching departure position; (b) facula track when detector in orientation departure position;

(c) facula track when detector in rolling departure position; (d) output waveforms when detector in pitching departure position;

(e) output waveforms when detector in orientation departure position; (f) output waveforms when detector in rolling departure position

$$\begin{cases} u_x = \tau\rho\sigma[2r^2 \arccos(s/r) - 2s \sqrt{r^2 - s^2} - \pi r^2] \xi & s < r \text{ 时} \\ u_x = \tau\rho\sigma\pi r^2 \xi & s \geq r \text{ 时} \end{cases} \quad (14)$$

$$u_y = 0 \quad (15)$$

发生方位偏离时,探测器的输出信号如图 5(e) 所示。由图 5(e)和(14)式可知,方位偏离主要反应在 u_x 信号过零点切线的截距 b_y 上。

2.1.4 横滚偏离情况

当探测器处于横滚偏离位置时,探测器光敏面

上的 x 轴和 y 轴均与基准情况下光敏面的 x 轴和 y 轴存在一个夹角 η , 其光斑轨迹如图 5(c) 所示。当发生横滚偏离时,光斑的轨迹在光敏面坐标系中分成 x 方向和 y 方向两个分量。对应于(6),(13)和(14)式有

$$\begin{cases} u_x = \tau\rho\sigma[2r^2 \arccos(s \cos \eta / r) - \pi r^2 - 2s \sqrt{r^2 - (s \cos \eta)^2}] \cos \beta & s \cos \eta < r \text{ 时} \\ u_x = \tau\rho\sigma\pi r^2 \cos \beta & s \cos \eta \geq r \text{ 时} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} u_y = \tau\rho\sigma[2r^2 \arcsin(s \sin \eta / r) - \pi r^2 - 2s \sqrt{r^2 - (s \cos \eta)^2}] \cos \beta & s \sin \eta < r \text{ 时} \\ u_y = \tau\rho\sigma\pi r^2 \cos \beta & s \sin \eta \geq r \text{ 时} \end{cases} \quad (17)$$

发生横滚偏离时,探测器输出信号如图 5(f) 所示。由于横滚偏离情况下,光斑在 x 和 y 方向均存在一个速度分量,因此其偏离程度主要反应在 u_x 和 u_y 信号过零点的斜率 a_x 和 a_y 上。这一点不难从(16),(17)式及图 5(f) 看出。

2.2 一般偏离情况

2.1 中所列出来的四种偏离情况是比较特殊的,每种情况只考虑一个自由度的偏离基准位置,但在一般情况下,更多的偏离是这三种偏离的综合,因此必须同时考虑三个自由度。按照上述四种特殊情况下的光路分析方法,由立体几何学可求得在一般情况下探测器的输出为

$$\begin{cases} u_x = \sigma\rho\pi R^2 \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \left(\arccos \frac{MO_2 \sin \angle KMO_2}{R} \left/ \frac{\pi}{2} - 1 \right. \right) \\ u_y = \sigma\rho\pi R^2 \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \left(\arccos \frac{O_2 N \sin \angle KNO_2}{R} \left/ \frac{\pi}{2} - 1 \right. \right) \end{cases} \quad (18)$$

其中

$$\cos^2 \phi = \{ \sin \beta - \cos[\beta + \arcsin(\sin \phi \sin \varphi) - \arccos(\sin \phi \sin \psi)] \}^2 + \cos^2[\arccos(\sin \phi \sin \psi) - \beta]$$

$$MO_2 = l \left\{ \tan \psi \sqrt{\sec^2 \psi \sec^2(\varphi + \eta) - \tan^2 \psi} - \frac{\sec \psi \sin \beta}{\sin\{\beta + \arccos[\sin \phi \cos(\pi - \varphi)]\}} \right\}$$

$$O_2 N = \frac{f}{f-l} \frac{O_3 R \sin(\angle RO_3 S + \pi - \varphi + \eta)}{\sin(\pi/2 + \eta)}$$

$$\angle RO_3 S = \arccos \frac{O_3 R^2 + O_3 S^2 - RS^2}{2O_3 R \cdot O_3 S}$$

$$O_3 R = \sqrt{O_3 S^2 + RS^2 - 2O_3 S \cdot RS \cos(\psi + \eta)}$$

$$RS = l \sec \psi \frac{\sin \beta}{\sin\{\pi - \beta - \arccos[\sin \phi \cos(\pi - \varphi)]\}}$$

$$O_3 S = l \tan \psi \quad \angle KNO_2 = \pi/2 + \eta \quad \angle KMO_2 = \pi/2 - \eta$$

参数 φ 表示发生偏离情况下,探测器透镜与基准情况下探测器透镜的交点的极坐标角。

3 实际测试信号与模型输出信号的对比

给定一个四像限光电探测器,其参数为 $m =$

4.09 mm, $f = 16.85$ mm, $R = 15.75$ mm, 根据基准情况下实际信号在过零点处的斜率与模型输出信号在过零点处斜率相等来选择 $\rho\sigma$, 取 $\rho\sigma = 0.00252$ 。于是可以获得如图 6 所示的模型的输出波形,其中图 6(a)为探测器在一般偏离情况下的输出信号,负脉冲为测试同步信号;图 6(b)为由模型

求得探测器在该偏离位置时参量 ψ, φ 和 η ($\psi = \pi/720, \varphi = 3\pi/4, \eta = \pi/720$), 再由这些参量由探测器模型绘制出来的探测器输出信号波形。

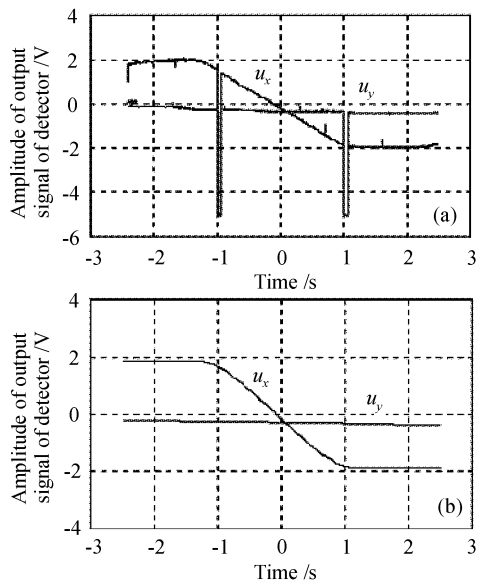


图 6 同时发生俯仰、横滚、方位偏移时(a)探测器实际输出信号与(b)模型输出信号

Fig. 6 Output waveforms of detector in generic departure position

- (a) practical output waveforms of detector in generic departure;
(b) output waveforms of detector model in the departure position as (a)

对照图 6(a), (b), 定性观察四象限光电探测器的实际输出波形和模型输出波形可知, 除了信号的两端有些差异之外, 在信号的过零点附近的线性段, 模型的理论输出同探测器实际输出从外观上看是一致的。进而由各个波形求其各自线性段过零点附近特征参量得: 图 6(a) 为: $a_x = -1.9865, b_x = 0.2027, a_y = -0.0134, b_y = 0.3924$; 图 6(b) 为: $a_x = -1.9839, b_x = 0.2087, a_y = -0.0128, b_y = 0.3910$ 。由比较可知, 二者的特征值非常接近, 因此模型的理论输出同实际输出是一致的。信号两端的

差异就是由于光敏面接收光的位置对系数 σ 的影响而引起的, 但这并不影响模型的适用性, 因为信号的线性段已经包含了足够的探测器位置与结构信息。

4 结 论

由上述分析及波形图可知, 探测器实际输出信号波形与模型输出信号波形相似, 其特征参量非常接近, 因此, 四象限光电探测器光路模型的理论输出信号同实际输出信号是一致的。(18)式给出了探测器输出信号与探测器安装三自由度偏离量以及探测器的一些参量的关系表达式, 因此可以由该关系式制作出任意多的探测器的输入输出样本数据, 根据这些样本数据与探测器的输出信号, 则可以求得光路模型中所涉及的众多参数, 以实现光电探测器产品质量的检测, 物体位置的三自由度偏移量的检测等, 这为四象限光电转换器应用的推广, 实现无标定实验样本探测奠定了基础。同时, 根据四象限光电探测器模型的建立思想, 还可以建立三象限、六象限等光电探测器的光路数学模型。

参 考 文 献

- 1 J. Bjorkman, D. Baroudi, R. Latva *et al.*. Determination of dynamic model parameters of smoke detectors [J]. *Fire Safety Journal*, 2002, **37**(4):395~407
- 2 E. Huseynov, N. Ismailov, S. R. Samedov *et al.*. IR-detectors based on In_2O_3 -anode oxide- $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, **23**(9):1337~1345
- 3 Feng Longling. Simple analysis of signal-processing skill for four-quadrant opto-electronic detective system [J]. *Optical Technique*, 1995, (3):12~17
冯龙龄. 浅析四象限光电探测系统中信号处理的技巧[J]. *光学技术*, 1995, (3):12~17
- 4 An Kai, Wang Hong-man, Ren Ge *et al.*. A new angle-measurement algorithm of the detector with four quadrants [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(6):328~329
安 凯, 汪红熯, 任 戈 等. 四象限探测器测角新算法[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(6):328~329
- 5 Guangjun Zhang, Zhenzhong Wei. A novel calibration to structured light 3D vision inspection [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**:373~380