

文章编号: 0258-7025(2009)03-0746-06

# 基于系统建模的四像限光电探测器对准 与微位移测量系统

汤晓君<sup>1</sup> 李玉军<sup>\*1, 2</sup> 刘君华<sup>1</sup> 梁 琨<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; <sup>2</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; <sup>3</sup>西安理工大学计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 通过对基于四像限光电探测器的对准系统的光路分析, 将系统的输入输出关系的确定转化为平面光照面积的计算, 并给出了探测器各像限光照面积的求取方法, 从而构建了该系统的数学模型。对该系统进行了仿真, 并给出了系统的实测结果。仿真结果表明, 通过设置不同的米字型标记参数, 系统的输入输出关系具有不同的线性度。证明的确存在一个最佳结构参数组合, 存在优化的可能。实测结果表明, 该系统的最大对准偏差小于  $2\ \mu\text{m}$ , 实测偏差小于  $2\ \mu\text{m}$ 。佐证了模型的正确性, 表明四像限光电探测器的对准应用可扩展到微量位移的测量。模型省去了繁杂的标定工作, 消除了标定引入的非线性误差, 提高了探测器的应用效率和准确度, 因此具有较高的实际意义。

**关键词** 光学器件; 四像限光电探测器; 对准; 微位移测量; 系统建模

**中图分类号** TB 96 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0746

## Alignment and Micro-Displace Measurement with Four-Quadrant Photo-Detector by System Modeling

Tang Xiaojun<sup>1</sup> Li Yujun<sup>1, 2</sup> Liu Junhua<sup>1</sup> Liang Kun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China

<sup>2</sup> School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

<sup>3</sup> School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China

**Abstract** Light path of an alignment system based on four-quadrant photo-detector is analyzed. The determination for input-output characteristics of the system is transformed as calculating the illumination area, and the calculation method for every quadrant is given. The mathematic model of the system is given. Simulation results show that the linearity of input-output of the system is different for different parameters of "m shape" sign. And there exists a set of parameters, with which the input-output characteristic of the system is linear. Measurement results show that both maximum align and measurement errors are less than  $2\ \mu\text{m}$ , which proves that the model is correct, and the alignment system can be extent to micro-displacement measurement from alignment. With this work, dull calibration work and nonlinear error can be avoided, and both efficiency and accuracy can be improved.

**Key words** optical devices; four-quadrant photo-detector; alignment; micro-displacement measurement; system modeling

## 1 引 言

光学探测是实现对准与微位移检测的重要手段<sup>[1~5]</sup>。基于四像限光电探测器的系统是实现微位

移测量、准直、对准、跟踪方法中的一种, 即用四像限光电探测器进行光刻机的掩膜板预对准。随着光电器件制造工艺的提高, 四像限光电探测器的应用范

收稿日期: 2008-02-21; 收到修改稿日期: 2008-06-26

基金项目: 国家 863 计划重大项目(200XAA4C3000)资助课题。

作者简介: 汤晓君(1973-), 男, 博士后, 讲师, 主要从事多传感器信息处理技术与智能控制等方面的研究。

E-mail: xiaojuntang@mail.xjtu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: leowho@163.com

围还将不断扩大<sup>[6]</sup>。

四像限光电探测器的工作原理很多情况下是基于几何光学的,它的应用与其他传感器相比有其特殊性。其他传感器<sup>[7]</sup>或预测系统<sup>[8]</sup>由于输入输出关系未知,机制也比较复杂,很难通过传感器的几何尺寸参数,得到一个确定的检测模型,以致于在应用前需要进行标定,通过参数建模法来确定其输入输出模型。而四像限光电探测器则不同,由于它的光电转化系数可以近似看作是线性的,因此其测量、准直或对准等系统的模型是通过理论建模得到的。例如,文献[9,10]即是通过建立光路模型来测量四像限光电探测器离焦量的,而文献[11]则通过光路模型校正了探测器四个区的光电转换系数。这避免了由于标定实验中的误差给最终测量、准直与对准结果带来的影响。本文简要描述了四像限光电探测器的测量、对准工作原理,给出了其常规四像限光电探测器对准系统的基本结构,建立了该系统的输出与输入、结构参数之间的数学模型。对该模型进行了仿真,并给出了对准与测试结果。

## 2 四像限光电探测器探测系统

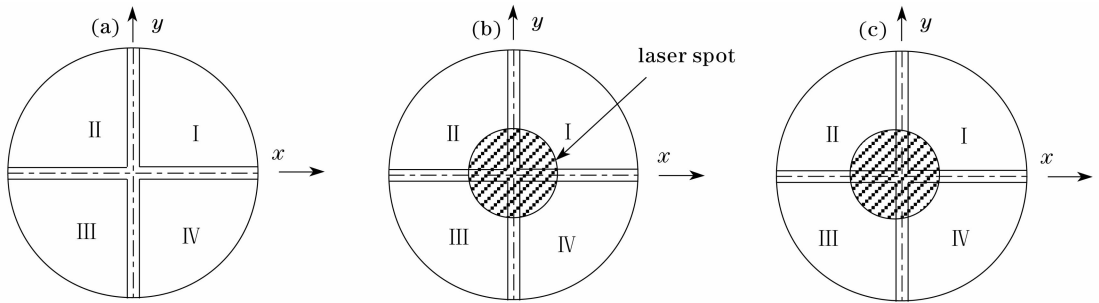


图1 四像限光电探测器光敏面俯视图(a),均匀分布光照图(b)和非均匀分布光照图(c)

Fig. 1 Vertical view (a), uniformity distribution illumination (b) and non-uniform distribution illumination (c) of the four quadrant optoelectronic detector photosurface

### 2.2 探测系统结构

2.1 节中的四像限光电探测器基本探测方法是基于光源发出的光的光照度完全均匀的这一基础的,而且光照面积必须在光敏面接收范围以内,也即激光器发出的光在光敏面上所形成的光斑必须完全在光敏面范围内。实质上,激光源发出的光的光照度分布一般是次高斯的,而且其分布往往很难获得确切的表达式。这样,采用2.1节中所述的基本探测方法往往会带来较大的偏差。为了克服这一缺点,通常采用如图2所示的方案<sup>[1]</sup>。激光源发射光的光照面积与光敏面的直径比在2:1以上,且基本

### 2.1 工作原理

四像限光电探测器是利用光电效应进行工作的器件,其光敏面分成I,II,III和IV四个区,其俯视图如图1(a)所示。假定每个区的光照面积分别为 $S_I, S_{II}, S_{III}$ 和 $S_{IV}$ ,四个区的光电转换系数 $\rho_I, \rho_{II}, \rho_{III}$ 和 $\rho_{IV}$ 近似相等,照射光的光照度为 $P$ 。在一定光照度范围内,每个区都会分别根据其所接收的光能量把光能转换成电流

$$i_I = \rho_I S_I P, \quad (1a)$$

$$i_{II} = \rho_{II} S_{II} P, \quad (1b)$$

$$i_{III} = \rho_{III} S_{III} P, \quad (1c)$$

$$i_{IV} = \rho_{IV} S_{IV} P. \quad (1d)$$

当光源发射出的一束均匀平行光照在四像限光电探测器上,在光敏面上形成一个光斑,如图1(b)所示。如果光斑均匀分布于四个区,那么四个区的输出电流相等,即 $i_I = i_{II} = i_{III} = i_{IV}$ 。若光斑并非均匀分布于四个区,那么由于各区接收的光能量不再对等,四个区输出的电流也不再相等。例如光斑偏向于左边,如图1(c)所示,则 $i_{II} = i_{III} > i_I = i_{IV}$ 。于是,设定光斑轴心与四像限光电探测器轴心重合时为基准点,那么在获得四个区的电流值之后,即可计算出探测器与光源的相对位置。

同轴,因此,光敏面范围内的光照度可近似为均匀的;米字型标记为透明体,在被测量、被跟踪或者对准物件上,激光通过米字型标记后照射到四像限光电探测器上。之所以采用米字型标记,其目的就是为了用来补偿十字型标记的非线性。米字型标记的位置偏移,将导致米字型标记投影到探测器上不同区域的面积不同,探测器各区输出的信号也不同,从而探测出米字型标记的偏移方向和偏移量大小。于是,当米字型标记与四像限光电探测器同轴心,且 $x$ 轴平行时,探测器四个区接收的光强相等,探测器的四个区的输出电流 $i_I = i_{II} = i_{III} = i_{IV}$ ;当米字型标记向

左方移动时,同样会有  $i_{II} = i_{III} > i_I = i_{IV}$ 。

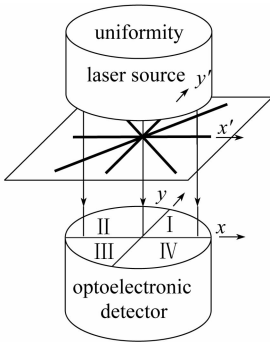


图2 四象限光电探测器应用基本结构图

Fig. 2 Fundamental structure diagram of the application of the four-quadrant optoelectronic detector

### 2.3 信号提取

一般地,  $i_I, i_{II}, i_{III}$  和  $i_{IV}$  幅值较小, 要经运算放大器转换为电压  $U_I, U_{II}, U_{III}$  和  $U_{IV}$ 。由于探测器与被探测对象的相对位移总是可以分解为如图1(b)所示的  $x$  和  $y$  两个正交方向的线性组合, 为了方便起见, 可以在电路中直接进行信号组合

$$U_x = U_I + U_{IV} - U_{II} - U_{III}, \quad (2)$$

$$U_y = U_I + U_{II} - U_{III} - U_{IV}. \quad (3)$$

显然,  $U_x$  的符号反映了偏移量的方向, 若  $U_x < 0$ , 表明米字型标记向左移动了, 若  $U_x > 0$ , 则表明米字型标记向右移动了, 而  $U_x$  的取值大小则表明米字型标记的偏移量大小,  $|U_x|$  越大, 表明偏移量越大, 反之越小;  $U_y$  则反应的是偏移量  $y$  方向的信息。由于光源发出的光的光照度可能不平稳, 不同光源个体发出的光的光照度不尽相同, 不同探测器光电转换系数也会不尽相同, 这都可能给探测结果带来影响。为了消除这些影响, 通常采用差分电压相对值  $U_x, U_y$  代表光斑中心偏移信息的  $\Delta x, \Delta y$

$$U_x = (U_I + U_{IV} - U_{II} - U_{III}) / (U_I + U_{IV} + U_{II} + U_{III}), \quad (4)$$

$$U_y = (U_I + U_{II} - U_{III} - U_{IV}) / (U_I + U_{IV} + U_{II} + U_{III}). \quad (5)$$

由于探测器所接收到的光的光照度近似均匀, 四个区的光电转换系数近似满足关系  $\rho_I = \rho_{II} = \rho_{III} = \rho_{IV}$ , 于是把式(1)代入式(4)和式(5)得

$$U_x = (S_I + S_{IV} - S_{II} - S_{III}) / (S_I + S_{IV} + S_{II} + S_{III}), \quad (6)$$

$$U_y = (S_I + S_{II} - S_{III} - S_{IV}) / (S_I + S_{IV} + S_{II} + S_{III}). \quad (7)$$

### 2.4 系统的模型建立

对于图2所示的四象限光电探测器探测结构

图, 均匀激光透过米字型标记后在探测器光敏面所在平面形成的投影图如图3所示。图中  $d_1$  表示米字型标记  $x$  方向和  $y$  方向的缝隙宽度,  $d_2$  表示探测器金属切割线的宽度,  $d_3$  表示米字型标记斜向缝隙的宽度, 探测器半径为  $R$ 。

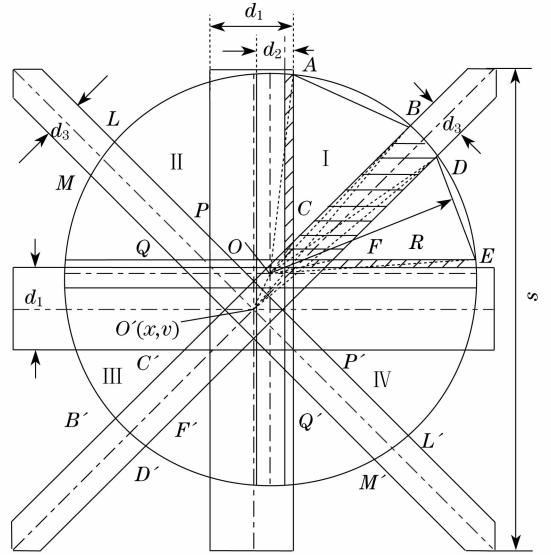


图3 投影图

Fig. 3 Projection

#### 2.4.1 系统假设条件

假定探测器和米字型标记的尺寸如图3中所示, 假设探测器在  $x$  方向和  $y$  方向的测量范围均为  $[-\Delta r, \Delta r]$ , 米字型标记是在边长为  $s$  的正方形内做成的。为了使探测器始终不会在米字型标记范围之外, 不妨设定  $s > 2R + 2\Delta r$ 。

#### 2.4.2 模型建立

由于  $U_x$  和  $U_y$  可以由探测器输出直接得到, 求得了  $S_I, S_{II}, S_{III}$  和  $S_{IV}$  的关于偏移量  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的表达式, 由(6)式和(7)式也就不难求得所要测量的偏移量  $\Delta x$  和  $\Delta y$ 。因此, 模型的确立实质上是要确定  $S_I, S_{II}, S_{III}$  和  $S_{IV}$  的关于偏移量  $\Delta x$  和  $\Delta y$  确切的表达式。

以探测器中心为圆点建立卡迪尔坐标系, 假定米字型标记中心在该坐标系中的位置为  $(x_0, y_0)$ , 明显地,  $x$  和  $y$  实质上就是  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 其取值范围满足:  $\Delta r \geq x_0 \geq -\Delta r, \Delta r \geq y_0 \geq -\Delta r$ 。  $S_I$  就是图3中第一象限内用实斜线标注部分的面积。由于该部分轮廓不规则, 求取较麻烦, 为方便起见, 不妨采用减去法。也就是首先求取探测器第一象限的总面积  $\pi R^2/4$ , 再求取扇形面积  $S_{ACB}$  和  $S_{DFE}$ , 以及探测器中各金属分割线在第一象限中所占的面积  $S_F$ , 最后得到

$$S_I = \pi R^2/4 - S_{ACB} - S_{DFE} - 2 \times S_F + (d_2/2)^2, \quad (8)$$

式中  $(d_2/2)^2$  是两条金属分隔线在探测器第一象限

中存在的公共面积,该面积包含在  $S_F$  中,因为减去了两次  $S_F$ ,所以需要加上  $(d_2/2)^2$ 。

### 3 仿真与实测

#### 3.1 仿真结果

为在图中绘出探测器输出信号与位置偏移量的关系,对于第 2 节中建立的模型,不妨设定  $R = 1500 \mu\text{m}, d_1 = 1200 \mu\text{m}, d_2 = 500 \mu\text{m}$ 。可以确定  $\Delta r = 500 \mu\text{m}$ ,即系统的测量范围为  $[-500 \mu\text{m}, 500 \mu\text{m}]$ 。设定  $s = 3500 \mu\text{m}$ ,这保证了在测量范围内探测器不会超出米字型标记的投影范围,设定  $d_3 = 0$ ,并让  $x$  和  $y$  分别从  $-500 \mu\text{m}$  递增到  $500 \mu\text{m}$ 。由于在仿真时,不存在探测器个体差异问题,这里不妨以  $S_x = S_I + S_{IV} - S_{II} - S_{III}, S_y = S_I - S_{IV} + S_{II} - S_{III}$  作为探测器输出,于是可以获得如图 4 所示的曲面。从图 4 中可以看出,两个曲面几近平面。但由图 5 可以看出,在  $d_3 = 0, y = 0$  时  $S_x$  与  $x$  的特性曲线与  $d_3 = 0, y = -500 \mu\text{m}$  时的  $S_x$  与  $x$  的特性曲线基本重合,这说明  $S_x$  几乎与  $y$  无关。但是,该特性是非线性的,在  $x = \pm 300 \mu\text{m}$  处的非线性偏差在  $500 \mu\text{m}^2$  左右,由于  $S_x$  输出范围约为  $[-1.5 \times 10^4 \mu\text{m}^2, 1.5 \times 10^4 \mu\text{m}^2]$ ,因此相对偏差约为  $500 / (3 \times 10^4) \times 100\% = 1.7\%$ 。图 6 是  $d_3 = 700 \mu\text{m}, y = 0$  及  $y = -500 \mu\text{m}$  时的  $S_x$  与  $x$  的特性曲线。由图中可以看出,此时两条特性曲线不重合,而且非线性更为严重,在  $x = \pm 300 \mu\text{m}$  的非线性偏差在  $350 \mu\text{m}^2$  左右。因此此时存在交叉敏感,  $S_x$  与  $y$  相关,由于此时  $S_x$  输出范围约为  $[-4800 \mu\text{m}^2, 4800 \mu\text{m}^2]$ ,因此非线性相对偏差约为  $350 / (2 \times 4800) \times 100\% = 3.7\%$ ,非线性度增大。若要获得较好的线性输出关系,以及小的交叉敏感度,需要搜索出合适的参数组合。

#### 3.2 仿真准确度分析

若用上述探测器模型,且采用 3.1 中的参数进行对准或微位移的测量,那么从光照面积到探测器最后输出的电压信号转换系数可以设定为  $\text{kV}/\mu\text{m}^2$ 。若探测器调理电路输出范围为  $0 \sim 5 \text{V}$ ,那么  $d_3 = 0$  时,  $k = 5 / (3 \times 10^4) = 1.667 \times 10^{-4}$ ;  $d_3 = 700 \mu\text{m}$  时,  $k = 5 / (1 \times 10^4) = 5 \times 10^{-4}$ 。由图 5 可知,此时  $S_x$  与  $x$  的特性近似为线性,因此,若采集卡分辨率为 10 位,量化误差约为:  $500/1024 \approx 1 \mu\text{m}$ ,归算到引用误差约为  $1/1000 \times 100\% = 0.1\%$ ,小于非线性误差。由图 6 可以看出,虽然  $S_x$  与  $x$  的特性的非线性较强,但整条曲线中,任何一

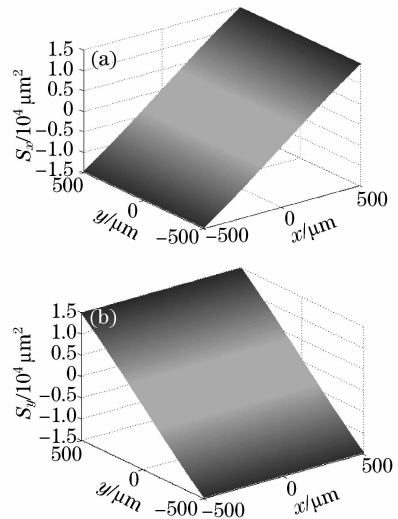


图 4  $x$  和  $y$  从  $-500 \mu\text{m}$  递增到  $500 \mu\text{m}$  时探测器的输出信号

Fig. 4 Output of the detector ( $x$  and  $y$  are increased from  $-500 \mu\text{m}$  to  $500 \mu\text{m}$ )

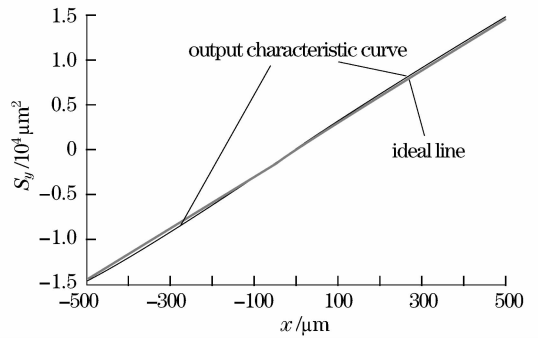


图 5  $d_3 = 0, y = 0$  时及  $d_3 = 0, y = -500 \mu\text{m}$  时,  $S_x = S_I + S_{IV} - S_{II} - S_{III}$  与  $x$  的输出曲线及理想直线  
Fig. 5 Output curves and ideal line of the characteristics between  $S_x$  and  $x$  when  $d_3 = 0, y = 0$  and  $d_3 = 0, y = -500 \mu\text{m}$

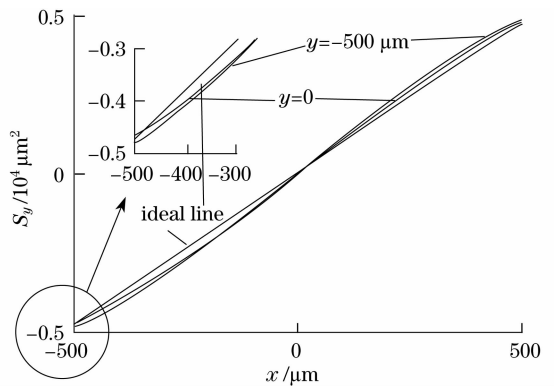


图 6  $d_3 = 700 \mu\text{m}, y = 0$ , 及  $y = -500 \mu\text{m}$  时,  $S_x = S_I + S_{IV} - S_{II} - S_{III}$  与  $x$  的输出特性曲线及理想直线  
Fig. 6 Output curve and ideal line of the characteristics between  $S_x$  and  $x$  when  $d_3 = 700 \mu\text{m}, y = 0$  and  $y = -500 \mu\text{m}$

处的斜率都不小于理想直线斜率的  $2/3$ , 因此量化误差也将小于  $1.5 \mu\text{m}$ , 归算成引用误差为  $1.5/1000 \times 100\% = 0.15\%$ , 远小于归算成引用误差的非线性偏差  $3.7\%$ 。采用模型进行计算得到的结果的偏差明显小于线性化模型计算的偏差。

### 3.3 实测结果与分析

虽然第 2 节所建立的是模型的正模型, 而用于实际探测时, 需要的是其逆模型, 但在获得探测系统正模型后, 可以制作任意多的样本数据, 从而用神经网络以任意精度来逼近其逆模型<sup>[10]</sup>。表 1 即为采用这种方法得到的对准结果。系统参数与仿真数据相同。数据获取方法是: 首先设定原点, 并获得初始位置数据, 然后随机将“米”字形标记移至某一位置, 按缩小位置偏差的方向移动该标记, 并记录测试数据。从表 1 可以看出, 在对准的过程中, 测试的偏移量与实际偏移量是一致的, 最大偏差只有  $0 - (-1.58) = 1.58 \mu\text{m}$ 。表 2 则为保持  $y$  方向不动, 只在  $x$  方向移动“米”字形标记, 进行微位移测试的结果。从表 2 可以看出, 最大偏差出现在第 6 组结果中, 只有  $1.96 \mu\text{m}$ , 实测结果与仿真分析结果较为吻合, 表明所建立的模型是正确的。而整个过程中,  $y$  方向的测试结果偏差小于  $2 \mu\text{m}$ , 则说明由正模型获取样本数据, 然后用神经网络建立逆模型可以很好地解决交叉敏感问题。

表 1 对准测试数据

Table 1 Measurement data for alignment  $\mu\text{m}$

Sequence number	Measurement result		Practical offset	
	$x$	$y$	$x$	$y$
1	0.71	0.09	0	0
2	-30.84	50.97	-30	50
3	-20.50	25.93	-20	25
4	-20.40	14.99	-20	15
5	-14.33	14.86	-15	15
6	-7.28	13.80	-8	15
7	-5.10	6.58	-4	6
8	-3.29	4.33	-4	4
9	0.85	4.92	0	4
10	1.10	2.99	0	2
11	0.71	-1.58	0	0

表 2  $x$  方向微移动测试数据

Table 2 Measurement data move in  $x$  direction  $\mu\text{m}$

Sequence number	Measurement result		Practical offset in $x$ direction	Measurement error $x$ direction
	$x$	$y$		
1	1.54	28.74	2	-0.46
2	4.55	28.62	4	0.55
3	5.92	30.06	6	-0.08
4	7.42	28.69	8	-0.58
5	8.85	27.15	10	-1.15
6	10.04	28.97	12	-1.96
7	13.49	29.22	14	-0.51
8	14.37	28.77	16	-1.63
9	17.16	30.48	18	-0.84
10	19.09	30.56	20	-0.91

## 4 结 论

建立了四像限光电探测器的对准/测量系统的模型, 然后对该系统进行了仿真, 并给出了实测结果。模型的仿真分析结果表明, 若采用 10 位采集卡, 从理论上来说, 该系统对准精确度可以达到  $1.5 \mu\text{m}$  以上。实测结果表明, 对准与微位移检测的最大偏差小于  $2 \mu\text{m}$ , 这与理论分析一致, 表明本文所建立的模型是正确的。同时, 表明, 在四像限光电探测器的应用越来越广泛的今天, 通过建立其探测系统的几何光路模型, 并对其进行系统优化, 有助于进一步提高探测准确度, 节省人力、物力, 提高探测效率。

## 参 考 文 献

- Xiang Jinsong, Hu Yu. Influence of pointing error on laser satellite communication system with an optical preamplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):225~229  
向劲松, 胡 渝. 对准误差对前置光放大卫星激光通信系统性能的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):225~229
- Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Zhang Dongqing *et al.*. In-situ measurement method of dense-line depth of focus of a lithographic projection system[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2006, **33**(1):85~90  
施伟杰, 王向朝, 张冬青 等. 基于光学对准的光刻机投影物镜密集线焦深原位检测技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):85~90
- Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Zhang Dongqing *et al.*. An in-situ method for measuring the overlay performance of a lithographic system with mirror-symmetry FOCAL marks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):398~402  
施伟杰, 王向朝, 张冬青 等. 基于镜像焦面检测对准标记的套刻性能原位测量技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):398~402
- Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):845~850  
郭冬梅, 谈苏庆, 王 鸣. 正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):845~850

- 5 Wang Xiuqing, Xu De, Tan Min *et al.*. A novel alignment method based on the four-quadrant photo electric detector[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(7):11~14  
王秀青, 徐德, 谭民等. 一种基于四像限光电探测器的对准新方法[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(7):11~14
- 6 Yin Xianhua, Zhu Jianqiang, Zu Jifeng *et al.*. Calculation of induced refraction index in heat capacity slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):225~230  
尹宪华, 朱健强, 祖继锋等. 热容型板条激光器的感应折射率计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2):225~230
- 7 L. Costa, I. Figueiredo, R. Leal. Modeling and numerical study of actuator and sensor effects for a laminated piezoelectric plate [J]. *Computers and Structures*, 2007, **85**:385~403
- 8 Zou Haofei, Xia Guoping, Yang Fangting. A neural network model based on the multi-stage optimization approach for short-term food price forecasting in China[J]. *Expert Systems with Applications*, 2007, **33**:347~356
- 9 Tang Xiaojun, Liu Junhua, Dang Liping *et al.*. Mathematic model of ray-path of four-quadrant photoelectric detector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):421~426  
汤晓君, 刘君华, 党丽萍等. 四像限光电探测器光路数学模型[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):421~426
- 10 Tang Xiaojun, Liu Junhua, Dang Liping *et al.*. Anti-model of ray-path for four quadrant photoelectric detector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):617~620  
汤晓君, 刘君华, 党丽萍等. 四像限光电探测器逆光路模型[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):617~620
- 11 Xiaojun Tang, Junhua Liu. Method of auto-revising the conversion coefficients of four-quadrant photodetector [J]. *WSEAS Transaction on Elctronics*, 2004, **1**(1):17~22