

文章编号: 0258-7025(2004)05-0617-04

# 四象限光电探测器的逆光路模型

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** 讨论了探测器的观测空间转换问题。介绍了一种用神经网络建立的从电信号特征参数到光路参数的光路反模型的方法。根据四象限光电探测器的两路输出信号在过零点附近时间段的逼近直线的斜率和截距与光电探测器的三自由度安装位置, 以及探测器光敏面的离焦量的特殊关系, 建立了称之为模型 1 的四象限光电探测器光路逆模型。同时以探测器特定时刻输出电压作为观测量, 建立了称之为模型 2 的探测器光路逆模型。并以探测器光敏面的离焦量为例, 给出了两个模型的实测值和模型 1 的重复性测试值。重复性测试值表明, 模型 1 的最大重复测试误差只有 0.015 mm。实测结果证明, 模型 1 的检测精度可以达到微米级, 而用探测器特定时刻输出电压建立的逆模型的检测精度只能达到毫米级, 这证明用探测器输出信号过零点附近时间段的逼近直线参数作为观测信号优于用输出信号特定时刻电压作为观测信号。

**关键词** 光电子学; 光电探测器; 光路逆模型; 神经网络

**中图分类号** TP 73 **文献标识码** A

## Anti-Model of Ray-Path for Four Quadrant Photoelectric Detector

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

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

**Abstract** In this paper, the problem about observation space of detector is discussed. A method of modeling the anti-models of ray-path from electric signal to parameter of ray-path using neural network is introduced. Making use of the special relations between the parameters of fitting lines at the crossover points of outputs of four-quadrant photodetector and the three-dimensional free position, the distance between photosurface and focus of photodetector, the anti-model called model 1 of ray-path of four-quadrant photodetector is modeled. At the same time, a model called model 2 is modeled using the voltages of the output of photodetector at special time as observed quantities. Taking measuring for the distance between photosurface and focus of photodetector as an example, the measuring results are given, and the measuring results for repeatability of model 1 are also given. The measuring results for repeatability of model 1 show that the maximal measuring error is only 0.015 mm. And the measuring results show that the measuring accuracy of model 1 reaches micron level and that of model 2 reaches only millimeter level. Thus, that using the parameters of fitting lines at the crossover points of outputs of four-quadrant photodetector as observation quantities is ahead of that using the voltages of outputs of photodetector at special time as observation quantities

**Key words** optoelectronics; photoelectric detector; anti-model of ray-path; neural network (NN)

## 1 引 言

在检测技术中, 通常直接得到的是一些电信号, 称之为观测信号, 观测信号所构成的空间称之为观测空间。观测信号中包含着被测参量的信息, 这些被测参数称之为参量状态, 参量状态所构成的空间

称之为状态空间。如何从观测信号中获得被测参数的确定量, 首先要建立从观测空间到状态空间的映射关系, 这种映射关系称之为检测系统的反模型。这种反模型的建立, 有时可以直接求得; 有时需要对观测空间作进一步的空间转换, 才能建立; 有时直接

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

建立也可以,但作进一步转化则可能建立更为接近系统真实反模型的反模型。关于光电探测器的应用,目前国内相关文献还只涉及到单输入单输出信号的检测<sup>[1]</sup>,有关多个光路参数反模型的建立及其应用还未见报道。但实质上,整个光路的参数很难调节到其基准位置,因此需要考虑多参数建模。本文利用四象限探测器的三自由度安装位置和光敏面离焦量与探测器的两路输出信号的过零点的斜率与截长的关系,把电信号观测空间转换成由信号过零点切线的斜率与截长构成的观测空间,提高了光路参数的检测精度。

对于这种反模型的建立,其方法大体分为两大类<sup>[2]</sup>:一类是基于传统的多元统计理论,如常用的主成分分析法、聚类分析法、最小二乘及其扩展法等;另一类是事先通过一定的前期训练,得到一种具有自我学习功能的算法,最典型的就是人工神经网络。神经网络在检测技术中的应用主要是利用其对任意函数的逼近功能来实现从观测空间到状态空间的转换,或者说获得从观测信号到参数状态的数学模型。自从 20 世纪 80 年代中后期以来,人工神经网络的应用已经得到飞速发展,例如在多组份气体检测<sup>[3]</sup>、传感器建模<sup>[4]</sup>等方面的应用取得了良好的效果。本文利用人工神经网络很好地实现从由探测器输出电信号波形的斜率、截长构成的观测空间到由探测器三自由度安装位置和光敏面的离焦量构成的状态空间的转换。

## 2 观测空间的转换

光电探测的安装如图 1 所示,参数  $(\varphi, \psi, \eta)$  表征探测器三自由度安装位置,其中  $\varphi$  为探测器在安装过程中偏离其基准位置时,透镜实际位置与基准

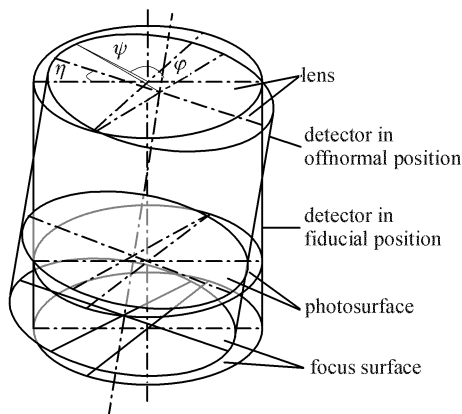


图 1 探测器安装偏移示意图

Fig. 1 Fixed figure of detector in offnormal position

位置的交点在探测器基准位置时透镜极坐标中的角度坐标,表征探测器发生方位和俯仰偏移的位置; $\psi$  为探测器实际轴心与基准轴心的夹角,表征发生偏移的程度; $\eta$  为探测器光敏面上下分界线( $x$  轴)在其基准光敏面平面内的投影与基准光敏面位置下光敏面  $x$  轴的夹角,表征探测器发生横滚偏移的程度。参数  $l$  为探测器光敏面的离焦量。探测器的输出信号如图 2 所示,“Z”型的波形为光敏面左右两侧的电位差构成的输出信号,用  $u_x(t)$  表示,比较平的波形为探测器上下两侧的电位差所构成的输出信号,用  $u_y(t)$  表示。显然,这两个信号是参数  $\varphi, \psi, \eta, l$  以及时间  $t$  的函数,可以用下式来表示

$$\begin{cases} u_x(t) = f(t, \varphi, \psi, \eta, l) \\ u_y(t) = g(t, \varphi, \psi, \eta, l) \end{cases} \quad (1)$$

对于一个安装好的探测器来说,参数  $\varphi, \psi, \eta$  和  $l$  是恒值,因此,若获得某两个特定时刻  $t_0$  和  $t_1$  的电信号的电压值  $u_x(t_0), u_x(t_1)$  和  $u_y(t_0), u_y(t_1)$ , 则可以由 (1) 式的逆函数

$$\begin{cases} \varphi = h[u_x(t_0), u_x(t_1), u_y(t_0), u_y(t_1)] \\ \psi = i[u_x(t_0), u_x(t_1), u_y(t_0), u_y(t_1)] \\ \eta = j[u_x(t_0), u_x(t_1), u_y(t_0), u_y(t_1)] \\ l = k[u_x(t_0), u_x(t_1), u_y(t_0), u_y(t_1)] \end{cases} \quad (2)$$

来求出未知参量  $\varphi, \psi, \eta$  和  $l$  的值。其中 (2) 式中的函数  $h, i, j, k$  可以由样本数据用前面所述的方法来逼近。这种方法理论上是完全可行的,但实际上,从图 2 可以看出,探测器输出信号噪声比较大,在某些局部区域甚至发生畸变,就算对信号进行滤波处理,也可能给检测引入比较大的误差。实质上,从图 2 可以看出,在探测器的输出信号  $u_x(t)$  的过零点附近一段较长的时间段内具有很好的线性度,因此可以用直线

$$\begin{cases} u_x = a_x t + b_x \\ u_y = a_y t + b_y \end{cases} \quad (3)$$

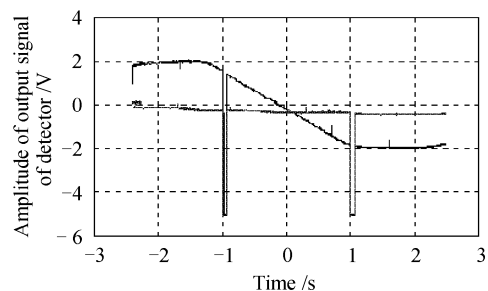


图 2 光电探测器的输出信号

Fig. 2 Waveforms of output signals of four quadrant photodetector

来替代。显然,对于信号  $u_x(t)$  和  $u_y(t)$  的替代直线参数  $(a_x, b_x)$  和  $(a_y, b_y)$  包含着该时间段内的信息。而直线参数则受信号的局部影响要小得多,因此抗干扰能力强。直线参数  $(a_x, b_x)$  和  $(a_y, b_y)$  可以由信号  $u_x(t)$  和  $u_y(t)$  的过零点附近时间段内的数据用最小二乘法来求得。

### 3 光路反模型

人工神经网络从理论的角度来说,可以以任意精度逼近任意一个函数。对于检测系统来说,其输入输出一般是连续的,因此常用 BP 网络、径向基网络或遗传神经网络来进行逼近从检测系统的输出到输入的对应关系,也就是建立检测系统的反模型。BP 网络可以用较少的神经元来实现函数逼近,但可能存在局部最小问题。径向基网络不存在局部最小问题,但神经元过多,在进行实测时计算量大,占用过多的系统资源,影响检测速度。遗传神经网络是遗传算法在神经网络的应用,它克服了 BP 神经网络的局部最小问题,可用较少的神经元很好地逼近一个函数,因此应用较广。所选网络的模型如图 3,

其中 IW 为隐层的输入权值矩阵,  $b_1$  为隐层阈值, LW 为输出层的输入权值矩阵,  $b_2$  为输出层阈值, 隐层神经元函数采用  $\text{tansig}$  函数,输出采用纯线性函数。每个探测器光路参数建立一个网络,即用四个网络分别逼近函数  $h, i, j$  和  $k$ 。例如,用  $l$  作为网络的输出,替代直线的参数  $(a_x, b_x)$  和  $(a_y, b_y)$  作为网络的输入,则由这些样本数据训练的网络即为关于探测器光敏面离焦量的光路反模型。

关于网络训练的样本可以通过建立四像限光电探测器从光到电的光路模型来获得。表 1 是由四像限光电探测器光路模型获得的部分样本。

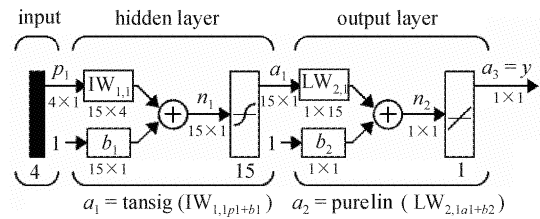


图 3 用于逼近四像限光电探测器反光路模型的神经网络结构

Fig. 3 Architecture of NN model used to fit the anti-ray-path model of four-quadrant photodetector

表 1 由四像限光电探测器光路模型获得的部分样本

Table 1 Segmental samples obtained from the ray-path model of four-quadrant photodetector

	$\varphi = 0$ $\psi = 0$ $\eta = 0$ $l = 2.8 \text{ mm}$	$\varphi = 60^\circ$ $\psi = 0.25^\circ$ $\eta = 1^\circ$ $l = 3.0 \text{ mm}$	$\varphi = 90^\circ$ $\psi = 0.5^\circ$ $\eta = -0.5^\circ$ $l = 2.7 \text{ mm}$	$\varphi = 180^\circ$ $\psi = 0.5^\circ$ $\eta = -0.5^\circ$ $l = 2.6 \text{ mm}$	$\varphi = 270^\circ$ $\psi = 0.25^\circ$ $\eta = 0.25^\circ$ $l = 2.7 \text{ mm}$	$\varphi = 135^\circ$ $\psi = 0.5^\circ$ $\eta = -0.25^\circ$ $l = 2.9 \text{ mm}$	$\varphi = 315^\circ$ $\psi = 0$ $\eta = -0.5^\circ$ $l = 3.1 \text{ mm}$
$a_x$	-2.08	-1.95	-2.15	-2.23	-2.15	-2.01	-1.89
$b_x$	0	0.53	-0.01	-1.39	-0.00	-0.89	0
$a_y$	0	-0.32	0.02	-0.02	-0.01	0.01	0.02
$b_y$	0	-0.30	-1.29	0.01	0.68	-0.88	0

### 4 反模型实测结果

这里以探测器光敏面离焦量的检测为例,其实测结果如表 2 所示。关于离焦量的光路逆模型网络是用 1000 组相同于表 1 所示的数据来训练的。表 2 中的实测数据均是随意把探测器装配到光电探测器扫描装置上,测得探测器的输出电信号,再求得  $u_x(t)$  信号过零点附近替代直线的参数  $(a_x, b_x)$  和  $(a_y, b_y)$ ,然后把把这些参数代入关于探测器光敏面离焦量的训练好的网络中求得的。表 2 中的实测值 1 是用替代直线参数作为神经网络的输入所建立的光路反模型的实测值,实测值 2 是用  $u_x(-0.25)$ ,

表 2 应用光电探测器反模型的实测值

Table 2 Measuring values taken with ray-path anti-model of photodetector

Expected value /mm	2.600	2.600	2.700	2.700
Tested value 1 /mm	2.606	2.595	2.693	2.701
Tested value 2 /mm	2.624	2.610	2.599	2.700
Expected value /mm	2.800	2.800	2.900	2.900
Tested value 1 /mm	2.810	2.799	2.901	2.908
Tested value 2 /mm	2.769	2.792	3.003	2.902

$u_x(-0.25)$  和  $u_y(0.25), u_y(0.25)$  作为神经网络的输入所建立起来的光路反模型所测得的实测值。由

表 1 可以看出,测试值 1 的最大偏差为 0.01 mm,测试值 2 的最大偏差为 0.103 mm,因此用基于替代直线参数的神经网络光路反模型所测得的结果,其精度比基于固定时刻点的神经网络光路反模型所测得的结果的精度高了一个数量级。

表 3 为四像限光电探测器光敏面离焦量重复性测试结果。所用模型为替代直线参数作为网络输入

建立的光路反模型。从表 3 可以看出,对于同一个四像限光电探测器,经过随机安装多次检测,其结果只在小数点后第 3 位有变化,其中变化最大的探测器是编号为 5090 的光电探测器,小数点后第 3 位的变化范围是从 5 到 8,若取其均值为真值,则最大偏差为 0.015 mm,因此可以说该模型的检测精度可达微米级。

表 3 四像限光电探测器光敏面离焦量重复性测试结果(单位:mm)

Table 3 Measuring results for repeatability about distance between the photosurface and the focus of photodetector (unit: mm)

Number of testing Number of detector	Number of testing									Mean variance
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1235	2.907	2.914	2.912	2.924	2.926	2.920	2.906	2.913	2.911	0.00045
4402	2.830	2.827	2.825	2.840	2.841	2.843	2.841	2.838	2.839	0.00041
5909	2.866	2.871	2.875	2.880	2.876	2.870	2.853	2.858	2.862	0.00071

## 5 结 论

基于替代直线参数的神经网络光路反模型考虑了光路中的四个参数,以及探测器输出信号的噪声干扰与畸变问题,这使得模型的适用范围广,可以同时检测上述光路中的四个参数;抗干扰能力强,检测精度高,实测结果表明,这种模型的检测精度可以到达微米级;由于无需考虑探测器的安装问题,因此使用方便,从而为光电探测器的推广应用奠定了基础。

### 参 考 文 献

1 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,汪红曼,任 戈等. 四象限探测仪测角新算法[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(6):328~329

2 G. Chryssolouris, M. Domroese. Sensor synthesis for control of manufacturing process [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1992, (5):144

3 Zhang Y., Liu J. H., Zhang Y. H. *et al.*. Cross sensitivity reduction of gas sensor using genetic neural network [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(3):615~625

4 Xu Kejun, Yin Ming. A dynamic modeling method based on FLANN for wrist force sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instruments*, 2002, **21**(1):92~94

徐科军,殷 铭. 基于 FLANN 的腕力传感器动态建模方法[J]. *仪器仪表学报*, 2002, **21**(1):92~94