

文章编号: 0258-7025(2007)01-0089-05

# 基于神经网络的分振幅光偏振仪的数据处理

杜西亮<sup>1,2</sup>, 戴景民<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 分振幅光偏振仪(DOAP)是一种高速测量光波偏振态的传感器。提出了一种基于人工神经网络(ANN)的分振幅光偏振仪的数据处理方法,将分振幅光偏振仪中电路系统输出的电信号作为神经网络的输入,入射光的斯托克斯参数作为神经网络的输出,建立一个前向多层神经网络模型。通过网络训练,使该网络确立了电路系统输出电信号与入射光斯托克斯参数之间的映射关系。由测量时得到的电信号,利用训练后的神经网络可以计算出待测的入射光的斯托克斯参数。测试结果表明,在测量精度方面,该方法获得的斯托克斯参数的总均方根偏差为 1.9%,略优于基于矩阵运算的数据处理方法。

**关键词** 光电子学;数据处理;神经网络;分振幅光偏振仪

**中图分类号** TH 741 **文献标识码** A

## Data Processing Method for the Division-of-Amplitude Photopolarimeter Based on an Artificial Neural Network

DU Xi-liang<sup>1,2</sup>, DAI Jing-min<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)  
(<sup>2</sup> College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** The division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) is a sensor that can rapidly determine the polarization state of the incident light. A data processing method for the DOAP based on an artificial neural network (ANN) was presented. A multilayer feedforward neural network model was set up whose inputs are the electrical signals produced by an electronics system of the DOAP, and outputs are the Stokes parameters of the incident light. The mapping relationships between the electrical signals and the Stokes parameters can be determined by training the neural network. After the electrical signals were measured, the Stokes parameters of the incident light can be calculated via the neural network which has been trained. The total root-mean-square deviation of Stokes parameters is 1.9%. The testing results show that the data processing method based on the neural network is slightly better than that based on the matrix operation on the aspects of measuring precision.

**Key words** optoelectronics; data processing; neural network; division-of-amplitude photopolarimeter

## 1 引言

分振幅光偏振仪(DOAP)是一种高速测量光波偏振态的传感器<sup>[1]</sup>,它能够同时近似实时地测量出描述待测光波偏振态的全部斯托克斯参数。国内外研究人员已经设计出十多种基于振幅分割原理的测量光波偏振态的装置,矩阵运算是目前所有分振幅

光偏振仪中唯一使用的一种数据处理方法<sup>[2~5]</sup>。人工神经网络(ANN)的发展为传感器的信号处理提供了新的有效手段。为了减少背景光的影响,从新的角度探讨对分振幅光偏振仪性能的改善,将神经网络应用到分振幅光偏振测量技术,提出了基于神经网络的分振幅光偏振仪的数据处理方法。本文将以前我们研制的基于金属光栅分光的分振幅光偏振仪

收稿日期:2006-06-27;收到修改稿日期:2006-08-24

作者简介:杜西亮(1970—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士研究生,主要研究方向为精密测量技术。

E-mail:duxl2008@126.com

导师简介:戴景民(1963—),男,辽宁新民人,教授,博士生导师,主要研究方向为热物性测量、自动化测试与控制。

E-mail:djm@hit.edu.cn

(G-DOAP)为例介绍分振幅光偏振仪的工作原理,阐述基于神经网络的数据处理方法的基本思想,并通过仿真实验对这种方法进行测试和分析。

## 2 分振幅光偏振仪工作原理

利用金属光栅分光的分振幅光偏振仪的工作原理如图 1 所示<sup>[6]</sup>。图中的光栅是一种特殊的金属光栅,它既能产生反射光衍射又能产生透射光衍射,入射光线斜入射在它的表面,产生多束衍射光。我们使用其中的±1级反射光衍射和±1级透射光衍射实现入射光偏振态的高速测量。在这四束光的光路上分别放置一个方位角为 $A_m$ ( $m = 0, 1, 2, 3$ )的起偏器。为了提高光偏振仪对待测光波的左、右旋圆偏振分量的区分度,又在起偏器 $P_3$ 的前面放置一个 $\lambda/4$ 波片(QWR),它的快轴方向与 $P_3$ 透光轴的夹角为 $45^\circ$ 。通过由四个光电探测器 $D_0 \sim D_3$ 和相应的光电转换电路组成的电路系统将这四束光的光强线性地转换为电信号 $i_0, i_1, i_2$ 和 $i_3$ 。

将这四个电信号组合成一个列矢量 $\mathbf{I}$ ,即

$$\mathbf{I} = [i_0 \quad i_1 \quad i_2 \quad i_3]^T, \quad (1)$$

$\mathbf{T}$ 表示矩阵的转置。

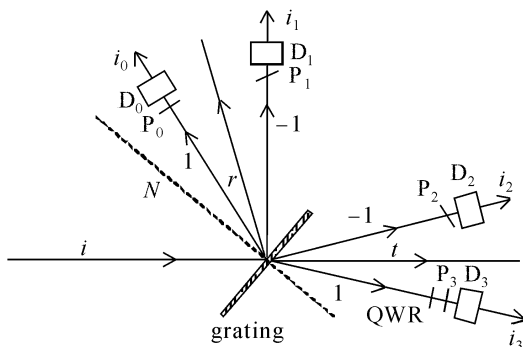


图 1 金属光栅分光的分振幅光偏振仪的原理示意图

$P_0 \sim P_3$ :起偏器; $D_0 \sim D_3$ :光电探测器

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of the

G-DOAP using a metallic grating

$P_0 \sim P_3$ : polarizer;  $D_0 \sim D_3$ : detector

忽略了背景光和系统中存在非线性等因素的影响,电信号矢量 $\mathbf{I}$ 与入射光斯托克斯矢量 $\mathbf{S}_i = [S_0 \quad S_1 \quad S_2 \quad S_3]^T$ 之间存在线性关系

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{S}_i, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A}$ 为一个 $4 \times 4$ 的矩阵,被称为仪器矩阵,它是工作波长的函数。如果该矩阵存在逆矩阵 $\mathbf{A}^{-1}$ ,那么入射光的斯托克斯矢量 $\mathbf{S}_i$ 可以表示为

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{I}. \quad (3)$$

通过定标过程,获得仪器矩阵 $\mathbf{A}$ 后,利用电路

系统输出的电信号矢量 $\mathbf{I}$ ,通过式(3)就可以计算出描述待测光偏振态的全部四个斯托克斯参数。常用的定标方法有:四点法和 Equator-Poles 法<sup>[7]</sup>。

由上述可知,分振幅光偏振仪的基本工作原理是采用振幅分割方式将入射光分割为四束或四束以上,使用电路系统将它们的光强线性地转换为电信号。然后,由标准样本数据获得电路系统输出电信号与入射光斯托克斯参数之间的映射关系。由测量时得到的电信号,通过这种已经确定的关系就可以计算出入射光的全部四个斯托克斯参数。

## 3 基于神经网络的数据处理方法

基于神经网络的分振幅光偏振仪的数据处理方法的基本思想是:不使用式(3)所示的线性表达式,而是使用神经网络来描述分振幅光偏振仪电路系统输出的电信号与入射光斯托克斯参数之间的关系。将电路系统输出的电信号作为神经网络的输入,描述入射光偏振的斯托克斯参数作为神经网络的输出,建立一个神经网络模型。然后,提供足够多的样本数据对网络进行训练,将网络的权值和阈值调整到合适的数值,使得由输入计算出的输出与期望输出的均方差(MSE)最小或者小于一定值。网络训练结束后,就可以用它来测量入射光的未知偏振态。将电路系统输出的电信号作为训练后的网络输入,通过网络计算得到描述入射光偏振态的斯托克斯参数。

### 3.1 网络拓扑结构

前向多层神经网络(MLFN)是目前应用最广、发展最迅速的人工神经网络之一。近十年来,前向多层神经网络的理论研究和实际应用都达到了很高的水平。采用线性函数两层前向神经网络来描述分振幅光偏振仪输出的电信号与入射光斯托克斯参数之间的映射关系,网络拓扑结构如图 2 所示<sup>[8~12]</sup>,输入层 4 个神经元,四路电信号作为输入;输出层 4 个神经元,描述入射光的四个斯托克斯参数作为输出;一个隐层,根据网络训练精度和收敛速度,隐层的神经元数为 20;隐层和输出层的神经元传递函数均为线性函数。在 Matblabe 6.5 环境下,利用神经网络工具箱 NN Toolbox 4.0 建模。

### 3.2 神经网络训练

在进行网络训练之前,需要提供足够多的样本数据。训练样本的选取应覆盖整个偏振态空间,并且样本之间的间隔不能太大,否则会影响网络的推

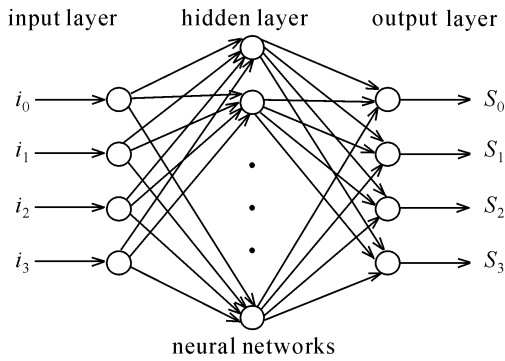


图 2 神经网络的拓扑结构

Fig. 2 Architecture of the neural network

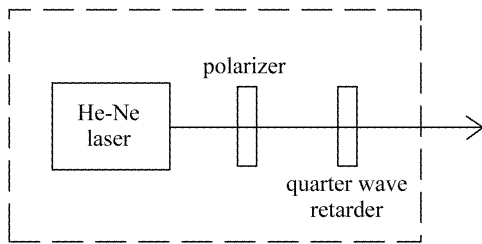


图 3 偏振态发生器

Fig. 3 Polarization state generator

广性。这里,训练所需要的样本数据由图 3 所示的偏振态发生器 (PSG) 产生。He-Ne 激光器 (632.8 nm) 发出的非偏振光依次经过起偏器和  $\lambda/4$

波片,其中,起偏器和  $\lambda/4$  波片固定在精密码盘上,由步进电机带动可以分别绕光轴旋转。

非偏振光经过理想的起偏器和  $\lambda/4$  波片后,出射光的归一化斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2Q \cos(2Q - 2\theta) \\ \sin 2Q \cos(2Q - 2\theta) \\ \sin(2Q - 2\theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\theta$  为起偏器的方位角;  $Q$  为  $\lambda/4$  波片的方位角。

由式(4)可知,通过分别旋转起偏器和  $\lambda/4$  波片,可以使偏振态发生器产生任意的完全偏振态。

旋转偏振态发生器中的起偏器和  $\lambda/4$  波片,产生训练网络所需要的样本数据。训练网络时用到的样本数据如表 1 所示,8~11 列是由式(4)计算出的偏振态发生器输出偏振光的斯托克斯参数,它们将作为网络的期望输出;3~6 列是对应的电路系统的输出,它们将作为网络的输入。我们选用 Levenberg Marquardt 训练方法,最大训练次数 50,训练精度  $10^{-6}$ ,其他参数为神经网络工具箱的缺省值。经过 4 个时间单位,误差平方和为  $5.6 \times 10^{-6}$ ,虽然没有达到精度要求,但是已经达到了设定的最小梯度  $10^{-6}$  (工具箱缺省值),网络训练结束。

表 1 训练用样本数据的输入和理想输出

Table 1 Input and hopeful output of the sample data for training

Sample	$\theta / (^{\circ})$	$Q / (^{\circ})$	Input				Hopeful output			
			$i_0 / V$	$i_1 / V$	$i_2 / V$	$i_3 / V$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
1	0	0	0.0534	0.0695	0.7279	0.4381	1	1.0000	0.0000	0
2	10	10	0.0988	0.0237	0.7273	0.4707	1	0.9397	0.3420	0
3	20	20	0.1505	0.0020	0.6828	0.4986	1	0.7660	0.6428	0
4	30	30	0.2029	0.0052	0.5998	0.5174	1	0.5000	0.8660	0
5	40	40	0.2487	0.0345	0.4885	0.5234	1	0.1737	0.9848	0
6	50	50	0.2833	0.0865	0.3630	0.5182	1	-0.1737	0.9848	0
7	60	60	0.3019	0.1536	0.2392	0.5021	1	-0.5000	0.8660	0
8	70	70	0.3028	0.2297	0.1292	0.4772	1	-0.7660	0.6428	0
9	80	80	0.2845	0.3037	0.0481	0.4456	1	-0.9397	0.3420	0
10	90	90	0.2508	0.3686	0.0053	0.4134	1	-1.0000	0.0000	0
11	100	100	0.2057	0.4147	0.0055	0.3825	1	-0.9397	-0.3420	0
12	110	110	0.1542	0.4379	0.0495	0.3556	1	-0.7660	-0.6428	0
13	120	120	0.1017	0.4338	0.1313	0.3374	1	-0.5000	-0.8660	0
14	130	130	0.0557	0.4048	0.2414	0.3300	1	-0.1737	-0.9848	0
15	140	140	0.0216	0.3531	0.3663	0.3334	1	0.1737	-0.9848	0
16	150	150	0.0028	0.2849	0.4910	0.3478	1	0.5000	-0.8660	0
17	160	160	0.0023	0.2089	0.6026	0.3731	1	0.7660	-0.6428	0
18	170	170	0.0195	0.1344	0.6850	0.4043	1	0.9397	-0.3420	0
19	0	45	0.1646	0.2113	0.3674	0.8251	1	0	0	1
20	45	0	0.1388	0.2269	0.3629	0.0122	1	0	0	-1

表 2 测试偏振光的计算输出和期望输出

Table 2 Computing and hopeful output of the testing polarization light

Sample	$\theta / (^{\circ})$	$Q / (^{\circ})$	Input				Computing output				Hopeful output			
			$i_0 / V$	$i_1 / V$	$i_2 / V$	$i_3 / V$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
1	0	32.5	0.1931	0.1265	0.4474	0.8265	1.000	0.155	0.388	0.894	1.000	0.179	0.383	0.906
2	10	32.5	0.2090	0.0686	0.5052	0.7749	1.000	0.272	0.647	0.703	1.000	0.299	0.641	0.707
3	20	32.5	0.2182	0.0285	0.5469	0.6783	1.000	0.357	0.831	0.418	1.000	0.383	0.821	0.423
4	30	32.5	0.2196	0.0121	0.5648	0.5527	1.000	0.395	0.913	0.089	1.000	0.421	0.903	0.087
5	40	32.5	0.2135	0.0204	0.5583	0.4084	1.000	0.383	0.889	-0.259	1.000	0.408	0.875	-0.259
6	50	32.5	0.1995	0.0536	0.5281	0.2644	1.000	0.324	0.754	-0.581	1.000	0.346	0.742	-0.574
7	60	32.5	0.1807	0.1059	0.4778	0.1412	1.000	0.225	0.533	-0.827	1.000	0.242	0.520	-0.819
8	70	32.5	0.1581	0.1728	0.4138	0.0509	1.000	0.098	0.245	-0.979	1.000	0.109	0.235	-0.966
9	80	32.5	0.1354	0.2448	0.3433	0.0064	1.000	-0.043	-0.069	-1.010	1.000	-0.037	-0.079	-0.996
10	90	32.5	0.1148	0.3143	0.2754	0.0110	1.000	-0.180	-0.376	-0.926	1.000	-0.179	-0.383	-0.906
11	100	32.5	0.0990	0.3724	0.2170	0.0652	1.000	-0.298	-0.636	-0.728	1.000	-0.299	-0.641	-0.707
12	110	32.5	0.0895	0.4117	0.1769	0.1613	1.000	-0.379	-0.819	-0.444	1.000	-0.383	-0.821	-0.423
13	120	32.5	0.0879	0.4281	0.1579	0.2888	1.000	-0.418	-0.902	-0.104	1.000	-0.421	-0.903	-0.087
14	130	32.5	0.0945	0.4202	0.1639	0.4335	1.000	-0.409	-0.877	0.241	1.000	-0.408	-0.875	0.259
15	140	32.5	0.1078	0.3876	0.1932	0.5729	1.000	-0.351	-0.745	0.556	1.000	-0.346	-0.742	0.574
16	150	32.5	0.1266	0.3351	0.2432	0.6962	1.000	-0.251	-0.525	0.807	1.000	-0.242	-0.520	0.819
17	160	32.5	0.1493	0.2675	0.3078	0.7856	1.000	-0.123	-0.233	0.957	1.000	-0.109	-0.235	0.966
18	170	32.5	0.1721	0.1955	0.3787	0.8309	1.000	0.019	0.081	0.988	1.000	0.037	0.079	0.996

### 3.3 仿真测试

为了检验训练后的网络推广性,采用的测试方法为:将偏振态发生器中的 $\lambda/4$ 波片方位角固定为 $32.5^{\circ}$ ,以 $10^{\circ}$ 步长从 $0^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 旋转起偏器,这将产生18个不同的偏振态(起偏器的方位角为 $\theta$ 和 $\pi+\theta$ 时,产生的偏振态相同)。将这些偏振光作为测试光,利用分振幅光偏振仪进行测试。

采用神经网络法进行数据处理,测量结果如表2所示,12~15列是由 $\theta, Q$ 根据式(4)计算出的测试光的斯托克斯参数的理论值;4~7列是电路系统输出的四路电信号;8~11列是由4~7列通过训练后的神经网络计算出的测试光的斯托克斯参数。

## 4 对比和分析

作为对比,采用矩阵运算法对同组数据进行处理。利用表1中的数据,采用Equator-Poles法进行定标,获得仪器矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.1523 & -0.0990 & 0.1155 & 0.0129 \\ 0.2194 & -0.1491 & -0.1616 & -0.0078 \\ 0.3658 & 0.3612 & 0.0622 & 0.0023 \\ 0.4260 & 0.01259 & 0.0961 & 0.4065 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过式(3),(5)对表2中的样本数据进行计算,得到测试光的斯托克斯参数如表3所示。斯托克斯参数测量值与理论值之间的平均偏差为

表 3 使用矩阵法得到的测试光波的斯托克斯参数

Table 3 Computing output of the Stokes parameters of the testing light by using matrix method

Sample	Computing output			
	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
1	0.999	0.155	0.388	0.890
2	0.999	0.271	0.647	0.698
3	0.999	0.357	0.831	0.414
4	0.999	0.395	0.913	0.085
5	0.999	0.383	0.889	-0.264
6	0.999	0.324	0.754	-0.585
7	0.999	0.225	0.533	-0.833
8	0.999	0.098	0.245	-0.983
9	0.999	-0.043	-0.069	-1.014
10	1.000	-0.180	-0.376	-0.927
11	1.000	-0.298	-0.636	-0.728
12	1.000	-0.379	-0.819	-0.446
13	0.999	-0.418	-0.902	-0.110
14	1.000	-0.409	-0.877	0.239
15	0.998	-0.351	-0.746	0.550
16	0.998	-0.252	-0.525	0.799
17	0.997	-0.123	-0.234	0.947
18	0.998	0.018	0.081	0.979

$$\Delta S_i = \frac{1}{18} \sum_{j=1}^{18} |S_{ij} - S'_{ij}|, \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中 $S_{ij}$ 为斯托克斯参数的测量值, $S'_{ij}$ 为斯托克斯参数的理论值。定义斯托克斯参数的总均方根偏差

为

$$\Delta S = \sqrt{\Delta S_0^2 + \Delta S_1^2 + \Delta S_2^2 + \Delta S_3^2}, \quad (7)$$

由式(7),表2和表3计算得出,采用神经网络法进行数据处理时,斯托克斯参数的总均方根偏差为1.9%;而采用矩阵运算法进行数据处理时,斯托克斯参数的总均方根偏差为2.2%。可见,基于神经网络的数据处理法略优于基于矩阵运算的数据处理法。

背景光作用在分振幅光偏振仪上,使电路系统产生输出,它们线性地叠加在有用的信号上。假设它们变化不大,通过网络训练,这些信息被存储在神经元的权值和阈值中。测量时,利用存储的信息可以部分地减少背景光对测量结果产生的影响,提高了测量精度。考虑到分振幅光偏振仪的输入(入射光的斯托克斯参数)与输出(电信号)之间可能存在非线性因素,为了进一步提高测量精度,可以考虑采用传递函数为非线性函数(Sigmoid函数或高斯函数等)的前向多层神经网络对分振幅光偏振仪的数据进行处理。

## 5 结 论

提出了一种基于人工神经网络的分振幅光偏振仪的数据处理方法,并通过仿真实验对这种方法进行测试和分析。结果表明,采用线性函数多层前向神经网络对分振幅光偏振仪进行数据处理是完全可行的,它为分振幅光偏振仪的数据处理和数据分析提供了一个新的思路。它减少了背景光对测量结果产生的影响,提高了测量精度,使斯托克斯参数的总均方根偏差为1.9%,略优于基于矩阵运算的数据处理方法获得的总均方根偏差2.2%。该方法也可以推广到分振幅偏振光谱仪的数据处理。

## 参 考 文 献

- 1 R. M. A. Azzam. Division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) for the simultaneous measurement of all four Stokes parameters of light [J]. *Opt. Acta*, 1982, **29**(5):685~689
- 2 G. Pottlacher, A. Seifert. Microsecond laser polarimetry for

- emissivity measurements on liquid metals at high temperatures on liquid metals at high temperature—application to tantalum [J]. *Internat. J. Thermophysics*, 2002, **23**(5):1281~1291
- 3 H. Schwiecker, D. B. Dang, H. P. T. Thanh *et al.*. High-speed ellipsometry for the production of thin metal layers [C]. *SPIE*, 1992, **1746**:222~230
- 4 S. Krishnan. Calibration, properties, and applications of the division-of-amplitude photopolarimeter at 632.8 and 1523 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(9):1615~1622
- 5 R. M. A. Azzam. Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(7):309~311
- 6 Du Xiliang, Dai Jingmin. New grating-based division-of-amplitude photopolarimeter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7):57~62  
杜西亮,戴景民. 光栅分振幅光偏振测量系统的研制[J]. *光电工程*, 2006, **33**(7):57~62
- 7 R. M. A. Azzam, A. G. Lopez. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(10):1513~1521
- 8 Yang Xinjun, Zhen Junli. *Artificial Neural Networks and Blind Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 23~106  
杨行峻,郑君里. *人工神经网络与盲信号处理*[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 23~106
- 9 Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Zhang Dongqing *et al.*. Calculating method of image quality correction sensitive matrix of lithographic projection system based on weight-optimizing of an artificial neural network [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):516~520  
施伟杰,王向朝,张冬青等. 基于人工神经网络权值优化的投影光刻机像质校正灵敏矩阵的计算方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):516~520
- 10 Mo Changtao, Chen Changzheng, Zhang Lili *et al.*. Study on background light compensation of photo-electric position sensitive detector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):427~431  
莫长涛,陈长征,张黎丽等. 光电位置敏感器件背景光补偿的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):427~431
- 11 Qi Feng, Liu Wenqing, Zhou Bin *et al.*. Improving DOAS system measurement precision with artificial neural network method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1345~1349  
齐锋,刘文清,周斌等. 利用人工神经网络方法提高差分光学吸收光谱系统测量精度研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11):1345~1349
- 12 Bai Yingkui, Shen Xuanguo, Feng Yi *et al.*. A new linear neural network multi-component analysis method and its application in the analysis of VC Yinqiao tablets quantitative analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(6):898~901  
白英奎,申铨国,冯毅等. 一种新的线性神经网络多组分分析法及其在VC银翘片NIR定量分析中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(6):898~901