

文章编号 1004-924X(2006)05-0781-05

基于线性神经网络的高速光偏振仪

杜西亮^{1,2}, 戴景民¹, 徐仲辉²

- (1. 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:提出了一种新型的高速光偏振仪。使用一个既能产生反射光衍射又能产生透射光衍射的特殊金属光栅作为分光器,将入射光分为多束。利用光电探测器将其中的四束 1 级衍射光的光强线性地转换为电信号,将它们作为神经网络的输入,入射光 Stokes 参数作为神经网络的输出,建立多层线性神经网络模型。通过网络训练,得到电信号与入射光 Stokes 参数之间的映射关系。测出电信号后,通过训练后的网络可以计算出入射光待测的 Stokes 参数。测试结果表明:工作波长为 632.8 nm 时,Stokes 参数测量值与理论值的平均偏差小于 2%。该仪器结构紧凑、易于安装,具有测量速度快、精度高和非破坏性等优点。

关键词:光偏振仪;神经网络;振幅分割;数据处理

中图分类号:TH744.2 **文献标识码:**A

High-speed photopolarimeter based on a linear neural network

DU Xi-liang^{1,2}, DAI Jing-min¹, XU Zhong-hui²

- (1. *Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*
2. *College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China*)

Abstract: A novel high-speed photopolarimeter is presented, in which a incident light is divided into multiple beams by a special metallic grating that can generate both reflective diffraction and transmission diffraction. The light fluxes of the four 1st order diffracted beams are linearly converted into four electrical signals by a photoelectric conversion circuit. A multilayer linear neural network model is set up whose inputs are the electrical signals, and outputs are the Stokes parameters of the incident light. The mapping relationship between the electrical signals and the Stokes parameters can be determined by training the neural network. After the electrical signals are measured, the unknown Stokes parameters of the incident light can be calculated via a trained neural network. The testing results show that the mean deviation of the measured and theoretical Stokes parameters is less than 2% at $\lambda = 632.8 \text{ nm}$. This instrument is compact, easy to install and characterized by fast response, high precision and damaging-free in working states.

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

1 引言

光波的偏振是一个丰富的信息源泉,在许多应用中对它的测量具有十分重要的意义。测量光偏振的方法很多^[1]。传统测量光偏振的方法由于普遍使用转动部件或调制器,影响了测量速度,使得它们无法满足光偏振态瞬变场合下的需求(如跟踪材料表面发生的快速物理化学反应)。1982年,Azzam 提出了一种基于振幅分割方法的高速测量光偏振的传感器-分振幅光偏振仪(DOAP)^[2],它没有使用任何转动部件或调制器,能够同时近似实时地测量出描述待测光偏振态的全部 Stokes 参数。到目前为止,国内外研究人员已经提出了十几种基于振幅分割原理的光偏振测量装置,并且将它们成功地应用于脉冲加热瞬态热物性测量和在线监控金属薄膜生长厚度等领域^[3-5]。

人工神经网络(ANN)具有信息的分布存储、并行处理以及自学习能力等优点,它的发展为传感器的信号处理提供了新的有效手段。本文基于振幅分割原理,利用一种既能产生反射光衍射又能产生透射光衍射的特殊金属光栅作为分光器,采用线性神经网络进行数据处理,研制出一种新型的光栅分振幅光偏振仪(G-DOAP)。介绍了它的工作原理,并通过仿真实验对它进行了测试和分析。

2 工作原理

利用金属光栅分光,采用神经网络进行数据处理的 G-DOAP 的结构如图 1 所示,它主要由光学系统、电路系统和人工神经网络组成^[6-9]。

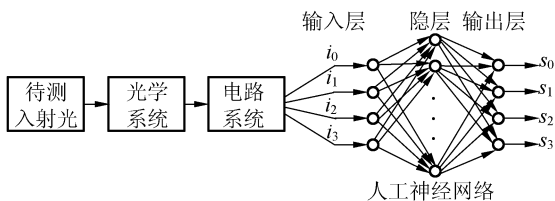


图 1 基于神经网络的分振幅光偏振仪的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of G-DOAP based on a neural network

G-DOAP 的光学系统如图 2 所示。图中的

金属光栅既能产生反射光衍射又能产生透射光衍射。入射光斜入射在它的表面,产生多束衍射光。利用其中的 ± 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 P_m ($m=0,1,2,3$)。为提高光偏振仪对左、右旋圆偏振分量的区分度,在起偏器 P_3 的前面又放置一个 $\lambda/4$ 波片(QWR),它的快轴方向与 P_3 透光轴的夹角为 45° 。电路系统的四个光电二极管 $D_0 \sim D_3$ 将这四束光的光强线性地转换为电信号,经过信号调理后,得到电信号 $i_0 \sim i_3$,然后由高速高分辨率 A/D 转换器将它们转换为数字量,通过 USB2.0 接口上传到 PC 机。为了提高光偏振仪测量的重复性,采用四象限硅光电池测量 0 级透射衍射的方法实现仪器与待测光的精确对准。(限于篇幅,这里没有给出电路系统的具体结构)

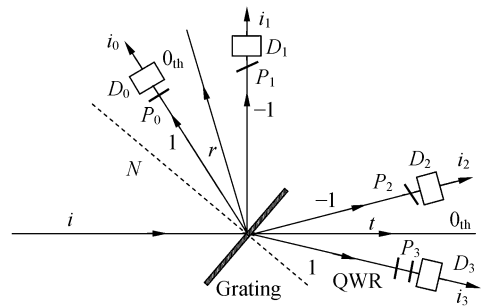


图 2 光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optics system of G-DOAP. P: Polarizer, D: Detector

将电路系统输出的电信号作为神经网络的输入,将描述入射光偏振态的 Stokes 参数作为神经网络的输出,在 PC 机上建立神经网络模型。然后,提供一系列的已知偏振态的偏振光对神经网络进行训练。将这些偏振光的 Stokes 参数作为网络的期望输出,它们入射到 DOAP 时,电路系统产生的相应输出作为网络的输入,通过调整神经网络中神经元的权值和阈值,使得由输入计算出的网络输出与期望输出的均方差最小或者小于一定值,这时,网络训练停止。网络训练结束后,网络内的权值和阈值分布存储了描述电路系统输出的电信号与入射光 Stokes 参数之间关系的信息。在测量入射光未知的偏振态时,只要将

电路系统输出的电信号作为训练后的网络输入,就可以由神经网络计算出描述入射光偏振态的 Stokes 参数。

3 数据处理

3.1 网络拓扑结构和构建

线性神经网络结构简单、易于实现,在用于线性模型预测时,具有零误差或很小的误差。经过分析,考虑计算精度和复杂程度,本文拟采用多层线性神经网络建模,网络拓扑结构如图 1 右侧所示。它含有一个隐层,输入层 4 个神经元,输出层 4 个神经元,隐层 20 个神经元。在 Matlab6.5 环境下,利用神经网络工具箱 NN Toolbox 4.0 建模。有关线性神经网络的基本原理和 Matlab 的使用方法请参见相关文献。

3.2 神经网络训练

进行神经网络训练,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广性。训练网络所用的样本数据由图 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(QWR)。起偏器和 QWR 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 QWR 后,出射光的归一化 Stokes 矢量为

$$S_{PSG} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2Q \cos (2Q-2\theta) \\ \sin 2Q \cos (2Q-2\theta) \\ \sin (2Q-2\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 S_{PSG} 为出射光的 Stokes 矢量; θ 为起偏器的方位角; Q 为 QWR 的方位角。由式(1)可知,通过分别旋转起偏器和 QWR,偏振态发生器可以产生任意的完全偏振态。

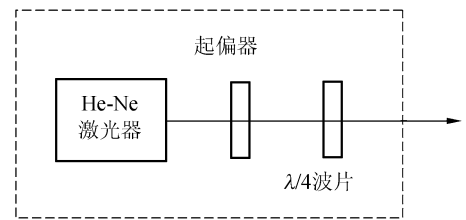


图 3 偏振态发生器

Fig. 3 Polarization state generator

表 1 标准样本数据的输入和期望输出

Tab. 1 Input and hopeful output of standard sample data

样本	$\theta(^{\circ})$	$Q(^{\circ})$	网络的输入/电路系统输出				期望输出/理论 Stokes 参数			
			$i_0(V)$	$i_1(V)$	$i_2(V)$	$i_3(V)$	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

训练网络所用到的样本数据如表 1 所示。其中, θ 、 Q 分别为起偏器和 QWR 的方位角; 8~11 列是由式(1)计算出的 PSG 输出光线的 Stokes 参数, 它们作为神经网络的期望输出; 相应的电路系统输出电信号为 3~6 列, 它们作为神经网络的输入。选择 Levenberg Marquardt 训练方法(训练函数 trainlm), 最大训练次数 50, 训练精度 10^{-5} , 其它参数为神经网络工具箱的缺省值。

网络训练过程如图 4 所示。由训练曲线可以

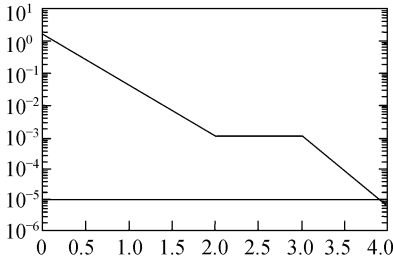


图 4 训练过程

Fig. 4 Learning curve of training process

看出, 经过 4 个时间单位, 误差平方和为 6.5×10^{-6} , 达到精度要求, 网络训练结束。可以通过修改训练参数, 进一步提高训练精度, 但要注意使用样本数据之外的测试数据对训练后的网络进行测试, 以免因训练过度而影响网络的推广性。

3.3 测试与分析

为了检验训练后的 G-DOAP 测量未知光偏振态的性能, 采取如下测试方法: 将 PSG 中起偏器的方位角固定为 10° , 以 10° 为步长从 2.5° 到 172.5° 旋转 QWR, 这将产生 18 个完全不同的偏振态(QWR 的方位角为 Q 和 $\pi + Q$ 时, 产生的偏振相同)。将它们作为测试光, 利用 G-DOAP 进行测试。

测试结果如表 2 所示。这里, θ 、 Q 分别为起偏器和 QWR 的方位角; 12~15 列是由 θ 、 Q 根据式(1)计算出的测试光 Stokes 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 Stokes 参数。

表 2 测试偏振光的理论 Stokes 参数和计算 Stokes 参数

Tab. 2 Theoretical Stokes parameters and computing Stokes parameters of the testing light

样本	$\theta(^{\circ})$	$Q(^{\circ})$	网络的输入/电路系统输出				网络输出/计算出的 Stokes 参数				理论 Stokes 参数			
			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	10	2.5	0.0653	0.0606	0.7196	0.3356	0.9993	0.9627	0.1049	-0.2746	1.0000	0.9623	0.0842	-0.2588
2	10	12.5	0.1155	0.0139	0.7171	0.5065	0.9996	0.8949	0.4417	0.0644	1.0000	0.9029	0.4210	0.0872
3	10	22.5	0.1706	0.0168	0.6330	0.6582	0.9999	0.6269	0.6535	0.4057	1.0000	0.6409	0.6409	0.4226
4	10	32.5	0.2077	0.0676	0.5077	0.7666	1.0001	0.2802	0.6461	0.6860	1.0000	0.2988	0.6409	0.7071
5	10	42.5	0.2096	0.1420	0.4004	0.8218	1.0002	0.0206	0.4169	0.8809	1.0000	0.0368	0.4210	0.9063
6	10	52.5	0.1768	0.2049	0.3595	0.8248	1.0002	-0.0349	0.0750	0.9691	1.0000	-0.0226	0.0842	0.9962
7	10	62.5	0.1245	0.2271	0.4038	0.7857	1.0001	0.1401	-0.2235	0.9412	1.0000	0.1485	-0.2120	0.9659
8	10	72.5	0.0771	0.1993	0.5123	0.7207	0.9999	0.4616	-0.3421	0.7997	1.0000	0.4699	-0.3290	0.8192
9	10	82.5	0.0547	0.1332	0.6395	0.6363	0.9997	0.7929	-0.2257	0.5472	1.0000	0.7912	-0.2120	0.5736
10	10	92.5	0.0678	0.0614	0.7207	0.5409	0.9996	0.9676	0.0722	0.2350	1.0000	0.9623	0.0842	0.2588
11	10	102.5	0.1077	0.0180	0.7203	0.4344	0.9995	0.9114	0.4082	-0.1024	1.0000	0.9029	0.4210	-0.0872
12	10	112.5	0.1550	0.0232	0.6389	0.3170	0.9995	0.6503	0.6321	-0.4331	1.0000	0.6409	0.6409	-0.4226
13	10	122.5	0.1860	0.0762	0.5134	0.1970	0.9994	0.3044	0.6365	-0.7167	1.0000	0.2988	0.6409	-0.7071
14	10	132.5	0.1842	0.1516	0.4046	0.0917	0.9993	0.0427	0.4199	-0.9127	1.0000	0.0368	0.4210	-0.9063
15	10	142.5	0.1504	0.2147	0.3623	0.0223	0.9992	-0.0163	0.0875	-1.0011	1.0000	-0.0226	0.0842	-0.9962
16	10	152.5	0.0999	0.2366	0.4060	0.0079	0.9991	0.1545	-0.2069	-0.9741	1.0000	0.1485	-0.2120	-0.9659
17	10	162.5	0.0566	0.2053	0.5178	0.0614	0.9991	0.4807	-0.3200	-0.8319	1.0000	0.4699	-0.3290	-0.8192
18	10	172.5	0.0427	0.1365	0.6406	0.1758	0.9992	0.7972	-0.1971	-0.5925	1.0000	0.7912	-0.2120	-0.5736

Stokes 参数测量值与理论值之间的平均偏差为

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

式中 S_{ij} 为 Stokes 参数的测量值, S_{ij}' 为 Stokes 参数的理论值。根据表 2 中的数据,利用式(2)计算出四个 Stokes 参数的平均偏差分别为 0、0.008、0.010 和 0.017。由此可知,在工作波长为 632.8 nm 时(网络训练和测试使用的激光器是 632.8 nm 的 He-Ne 激光器),该光偏振仪的 Stokes 参数测量的平均偏差均小于 2%。这同文献[10]中所使用的分振幅光偏振仪的测量精度相当。

产生以上测量偏差的主要原因为:(1)PSG 中光学元件的方位角偏差;(2)PSG 中光学元件的缺陷;(3)光电探测器和信号调理电路的非线性;(4)光束偏离产生的误差。为了减小这些因素产生的影响,进一步提高测量精度,可考虑采取如下措施:(1)利用常规的高精度光偏振仪对 PSG 进行标定;(2)采用非线性神经网络进行数据处理;(3)使用轴角编码器对 PSG 中光学元件的方

位角进行测量;(4)用零级波片替换目前使用的低级波片;(5)改进光路设计,减少光束偏离产生的影响。

4 结 论

基于分振幅光偏振仪的工作原理,利用特殊金属光栅作为分光器,采用线性神经网络进行数据处理,研制出一种新型的光栅分振幅光偏振仪。它没有使用任何转动部件或调制器,能够同时近实时地测量出描述待测光波偏振态的全部 Stokes 参数,测量时间仅由光电探测器的响应时间和相关电路的处理速度决定。该仪器结构紧凑、操作方便,具有测量速度快、精度高和非破坏性等优点,在线偏振测量术和椭圆偏测量术中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 阿查姆 R M A, 巴夏拉 N M 著, 梁民基, 等译. 椭圆偏振测量术和偏振光[M]. 北京:科学出版社,1986.
AZZAM R M A, BASHARA N M, Translated by LIANG M J, et al. *Ellipsometry and polarized light*[M]. Beijing: Science Press,1986. (in Chinese)
- [2] AZZAM R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter(DOAP) for the simultaneous measurement of all four Stokes parameters of light[J]. *Opt. Acta.*, 1982,29(5):685-689.
- [3] SEIFTER A, SACHSENHOFER F, POTTLACHER G. A fast laser polarimeter improving a microsecond pulse heating system[J]. *Int. J. Thermophysics*, 2002,23(5):1267-1280.
- [4] SCHWIECKER H, DANG D B, THANH H P T, et al. High-speed ellipsometry for the production of thin metal layers[J]. *SPIE*, 1992,1746:222-230.
- [5] 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.
DU X L, DAI J M. New grating-based division-of-amplitude photopolarimeter[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2006,33(7): 57-62. (in Chinese)
- [6] 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.
YANG X J, ZHEN J L. *Artificial neural networks and blind signal processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003. (in Chinese)
- [7] 魏强,张玉林,于欣蕾,等. 扫描隧道显微镜微位移工作台的神经网络 PID 控制方法研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3): 422-427.
WEI Q, ZHANG Y L, YU X L, et al. Study on neural network PID control for micro-displacement stage of scanning tunneling microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006,14(3):422-427. (in Chinese)
- [8] 刘丙萍,李燕,张琳等. 人工神经网络对 VOCs 的自动识别[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(1),51-53.
LI B P, LI Y, ZHANG L, et al. Automated recognition of VOCs using artificial neural networks[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006,26(1),51-53. (in Chinese)
- [9] 楼文高,匡罗平,王晓红. 建立 CRT 色度变换的神经网络模型[J]. 光电工程,2006,33(5):118-121.
LOU W G, KUANG L P, WANG X H. Feasible model for CRT color conversion using neural networks[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2006,33(5):118-121. (in Chinese)
- [10] BOBORIDIS D K. *Application of single wavelength radiation thermometry and high-speed laser polarimetry to thermophysical property measurements on pulse-heated metals*[D]. Austria: TU-Graz,2001.

作者简介:杜西亮(1970—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,哈尔滨工业大学博士研究生,现在主要从事精密测量技术的研究。