

文章编号:1002-2082(2018)06-0936-06

# 一种基于旋转 1/4 波片法的激光偏振度测量仪

古兆兵<sup>1</sup>,郝淑杰<sup>2</sup>,王雷<sup>3</sup>,许荣国<sup>3</sup>,阴万宏<sup>3</sup>

(1. 军事科学研究院 系统工程院,北京 100141;2. 中国兵器工业标准化研究所,北京 100089;  
3. 西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站,陕西 西安 710065)

**摘要:**为了满足光的偏振特性测量要求,设计了一套激光偏振度测量仪。该装置利用旋转 1/4 波片对光波进行调制,通过对调制信号进行傅里叶分析获得光源的偏振度。利用测量光功率的方式对激光偏振度测量仪的偏振度进行校准,实验结果表明,所研制的激光偏振度测量仪测量精度优于 0.5%,满足高精度激光偏振度测量需求。

**关键词:**激光;偏振度测量仪;1/4 波片法;嵌入式

中图分类号:TN247

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0607004

## Laser polarimeter based on rotary 1/4 waveplate

Gu Zhaobing<sup>1</sup>, Hao Shujie<sup>2</sup>, Wang Lei<sup>3</sup>, Xu Rongguo<sup>3</sup>, Yin WanHong<sup>3</sup>

(1. Systems Engineering Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China;  
2. China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100089, China;3. National Defense  
Technology Industrial Optical Primary Metering Station, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to meet the measurement requirements of optic polarization characteristics, a set of laser polarization degree measuring instrument was designed. The device modulated the light wave by using a rotating 1/4 waveplate, and the degree of polarization (DOP) of light source was obtained by Fourier analysis of the modulated signal. The DOP of polarimeter was calibrated by measuring the optical power. The experimental results show that the developed laser polarimeter has a measurement accuracy better than 0.5%, which can satisfy the needs of high-precision laser DOP measurement.

**Key words:** laser; polarimeter; 1/4 waveplate method; embedded

## 引言

偏振测量技术是将传统的目标探测、识别技术与偏振技术相结合,利用光波以及目标的偏振特性有效提高探测和识别精度。该技术有着传统技术所不具备的巨大优势,在众多军事领域得到广泛应用,比如利用地物反射光的偏振特性,远距离对目标进行非接触式测量的偏振遥感探测技术<sup>[1-3]</sup>;用偏振激光照射目标,根据不同材料下反射光的偏振图像进行识别的偏振军事目标识别技术;利用激光在大气中传输时光信号的偏振态几

乎不受大气扰动的影响,采用光信号偏振态调制以有效提高系统抗扰动能力的无线激光通信偏振调制技术;根据海洋水体中悬浮微粒的后向散射偏振度明显小于物体后向散射偏振度的特性,利用偏振差分图像处理手段,提高图像信噪比和探测距离的偏振水下目标探测技术<sup>[4-5]</sup>。

在偏振特性测量仪研究方面,美国 Thorlabs 推出基于偏振调制法的光偏振测量仪,采用旋转波片方法利用一个光电探测器依次获得光波的 4 个斯托克斯参数。General-Photonics 公司推出多款基于分

收稿日期:2018-09-03; 修回日期:2018-09-15

基金项目:国防科技工业技术基础科研项目;军用测试仪器型号项目

作者简介:古兆兵(1977—),男,河北深县人,硕士,助理研究员,主要从事军事计量量值溯源体系论证、计量测试技术研究和通用基础标准编研工作。E-mail:guzhaobing@sohu.com

振幅的光偏振测量仪,利用 4 个探测器同时测量光的 4 个分量。美国 Meadowlark 光学公司推出了基于液晶技术的偏振测量仪,基本原理与旋转波片法相同,不同之处在于利用电控液晶可变延迟器来替代旋转波片,避免了电机旋转造成的波片转动误差<sup>[6-7]</sup>。国内,浙江大学研制出了分振幅光度式偏振度测量系统样机,Stokes 测量误差平均为 4%;上海技术物理所采用旋转 1/4 波片法研制出分光偏振测量仪样机,既能测量线偏光,而且也能测量椭圆偏振光及部分偏振光,相对误差小于 2%。

我们开展了激光偏振特性校准技术研究,并建立了校准装置,在实验室对光学镜头、激光光源、偏振测量仪的偏振特性进行校准。为此,主要针对激光光源,研究一款便携式、一体化的偏振特性测量仪。

## 1 基于旋转 1/4 波片法的偏振度测量原理

旋转 1/4 波片法是让待测光依次通过匀速旋转的 1/4 波片和 1 个固定偏振方向的线偏振片,波片的角速度为  $\omega_{QWP}$ ,用光电探测器连续采集并测量透过线偏振器的光信号,通过探测器输出信号进行傅里叶变换,分析获得待测光的 4 个斯托克斯参量,进而得到待测光的偏振特性<sup>[8]</sup>,工作原理如图 1 所示。

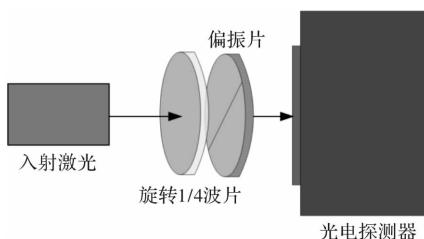
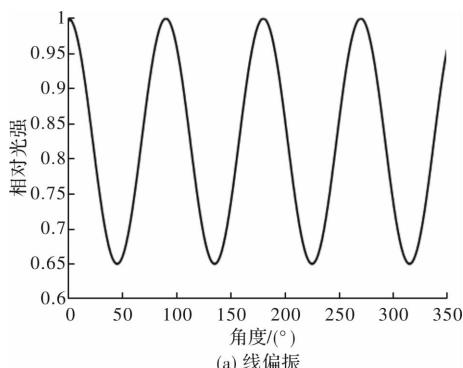


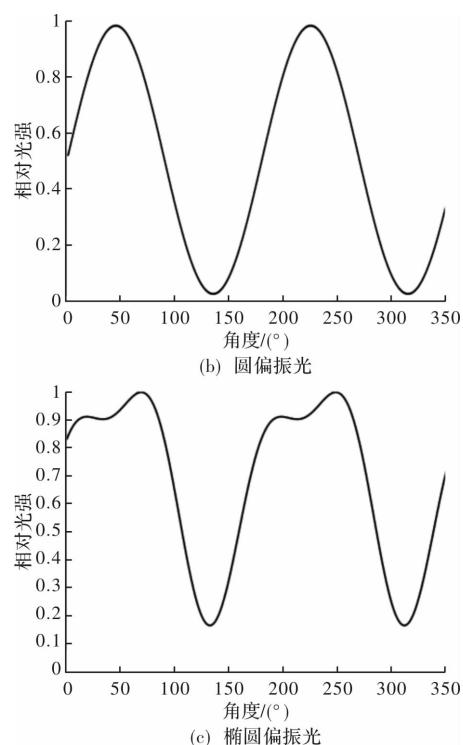
图 1 旋转 1/4 波片法激光偏振特性测量仪工作原理

Fig. 1 Working principle of polarization measuring system with rotating 1/4 waveplate technique

对于不同类型的偏振光,在 1/4 波片的一个旋转周期内,光电探测器输出的信号如图 2 所示。



(a) 线偏振



(b) 圆偏振光

(c) 椭圆偏振光

图 2 1/4 波片旋转 1 个周期内偏振光的输出光强

Fig. 2 Polarized light output intensity in one cycle of 1/4 wave plate rotation

光电探测器的光电流与波片旋转频率的 4 倍成正比,即

$$I(t) \approx I_4 \cos(4\omega_{QWP}t + \varphi_4) \quad (1)$$

对于圆偏振光,光电探测器的光电流与波片旋转频率的 2 倍成正比:

$$I(t) \approx I_2 \cos(2\omega_{QWP}t + \varphi_2) \quad (2)$$

对于椭圆偏振光,光电探测器的光电流既包括 2 倍频分量,也包含 4 倍频分量以及直流分量,光强  $I(t)$  与待测光的斯托克斯参数以及 1/4 波片调制频率之间满足<sup>[9]</sup>:

$$I(t) = \frac{1}{2} \left[ (S_0 + \frac{S_1}{2}) + \frac{S_1}{2} \cos(4\omega_{QWP}t) + \frac{S_2}{2} \sin(4\omega_{QWP}t) - S_3 \sin(2\omega_{QWP}t) \right] \quad (3)$$

用傅里叶变化进行分析,能获得 2 倍频、4 倍频以及直流各分量的振幅,通过下式可获得偏振度 DOP<sup>[10]</sup>:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \times 100\% \quad (4)$$

## 2 激光偏振度测量仪构成原理

激光偏振度测量仪主要包含探测器、控制器,原理如图 3 示。探测器是激光偏振度测量仪的核心,

由激光入射口、1/4 波片、偏振棱镜、信号处理单元、频率探测及驱动单元、数据输入/输出接口等构成。

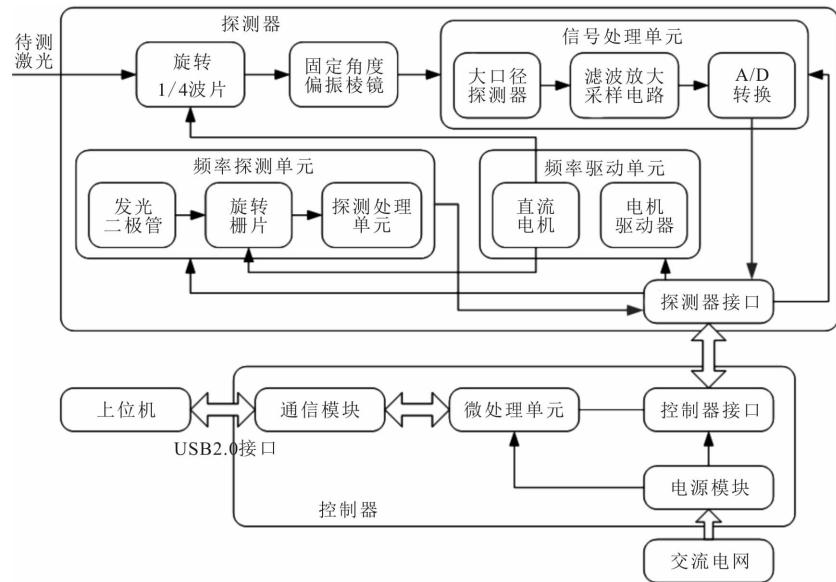


图 3 激光偏振度测量仪硬件组成原理

Fig. 3 Hardware constitution of laser DOP measuring system

1/4 波片对入射激光的偏振方向和椭偏率进行控制, 偏振棱镜仅透射与光轴方向相同的偏振光分量。由信号处理单元的大口径光电探测器对入射光信号进行测量, 之后, 再对电信号进行滤波、放大、A/D 转换等处理, 将信号传输给控制器, 同时保证不受外界杂散光、振动的干扰。1/4 波片由频率驱动单元(直流电机)带动实现旋转, 频率探测单元包含发光二极管、旋转栅片和探测处理单元, 旋转栅片上刻有等间隔的刻线。旋转栅片固定在直流电机的转轴上, 直流电机旋转时, 频率探测单元中的探测处理单元就会记录透射旋转栅片的脉冲数, 从而获得电机的旋转频率, 即波片的角速度  $\omega_{QWP}$ 。

1/4 波片选用  $0.35 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$  波段的消色差波片, 相位延迟精度高, 达到  $\lambda/300$ , 对温度、波长、入射角和准直性不敏感。选用格兰-泰勒偏振棱镜的波段为  $220 \text{ nm} \sim 2500 \text{ nm}$ , 高消光比  $>10^5 : 1$ , 高光束透过率  $>85\%$ 。由于是空气间隙, 且其入射光线在反射界面上的入射角接近布儒斯特角, 使得反射损失降到最低, 且具有较强的抗损伤能力。激光损伤阈值  $100 \text{ W/cm}^2$ (连续),  $200 \text{ MW/cm}^2$ (脉冲)。无刷直驱电机额定转速  $6000 \text{ r/m}$ , 运行稳定可靠、调速范围宽、寿命长、噪声小、不存在因电刷引起的火花和噪声。探测器选硅光电二极管以及 InGaAs 光电二极管, 响应波长范围  $350 \text{ nm} \sim 2200 \text{ nm}$ , 光敏面  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 动态范围

$10^6$ 。光电二级管的入射光强度与输出电流的特性成线性关系, 受温度影响小、响应速度快。

控制器负责对探测器中直驱电机的控制及傅里叶信号处理等, 将最终数字信号通过 USB 接口与上位机之间进行传送。上位机对数据作分析处理, 计算出偏振度、椭偏方位角以及椭偏率等偏振特性参数, 并以邦加球及数值的显示方式在上位机上显示。

控制器采用嵌入式信号处理系统, 其总体框图如图 4 所示。嵌入式系统集成主控单元、信号放大处理单元、电机控制单元、CPLD 控制单元、电源模块和 USB 通信单元等。

主控单元由 DSP 芯片组成, 芯片内集成了大容量 FLASH 存储器、高速 SRAM 存储器、功能强大的事件管理器、高速 A/D 转换模块、增强型 CAN 总线通信模块、SCI 串行通信接口、多通道缓冲接口、PPL 时钟模块, 它通过对光电二极管处获取的数据进行处理, 最终通过接口输出得到所需要的测试结果。

激光偏振度测量仪软件主要包含嵌入式软件及计算机操控软件 2 大部分。嵌入式软件主要负责: 测量仪的启动预热自检; 光学和电路硬件的状态控制; 数据的采集记录; 激光偏振度、激光功率等参数的计算; 测试结果的保存传输等功能。嵌入式软件的流程如图 5 所示。

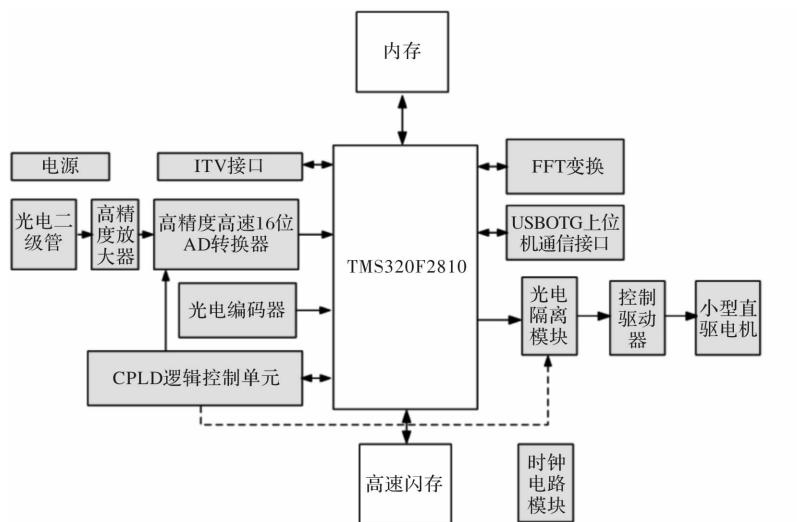


图 4 嵌入式信号处理系统总体框图

Fig. 4 Overall block diagram of embedded signal processing system

原理如图 6 所示。

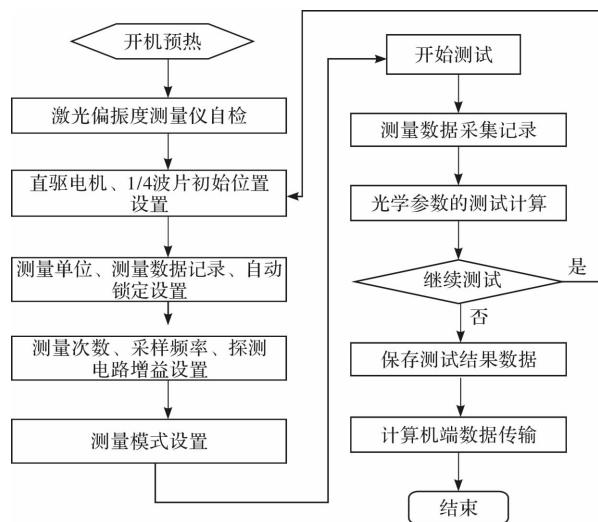


图 5 激光偏振度测量仪嵌入式软件流程图

Fig. 5 Embedded software flow chart of laser DOP measuring system

计算机操控软件功能：仪器连接；状态查询；数据传输与综合管理；偏振度、偏振方位角、椭偏率以及功率等参数分析；数据图表化（偏振度邦加球图形、椭偏率及椭偏方位角图形，数据曲线，测量参数、结果数据列表）；数据文件化（存档为专用数据格式文件，或导出为 Excel 格式文档）。

### 3 激光偏振度测量仪实验分析

为了验证本文构建的激光偏振度测量仪测量方法的有效性和测量精度，利用波长为  $0.633 \mu\text{m}$  的激光器搭建激光偏振度测量仪校准实验装置，

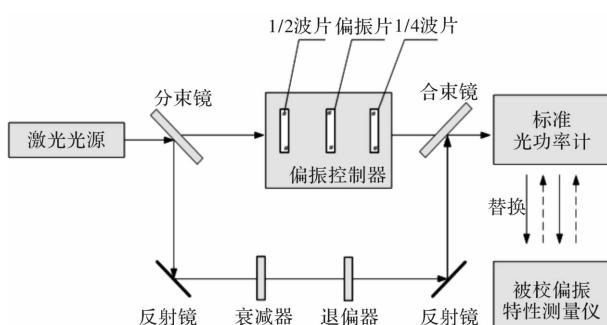


图 6 激光偏振度测量仪校准原理

Fig. 6 Calibration principle of laser DOP measuring system

激光偏振度校准实验装置由激光光源、偏振控制器、退偏器、标准功率计等组成。激光光源发出的光经过分光镜后分 2 路：一路进入偏振控制器；另一路进入退偏器。偏振控制器由消光比  $5 \times 10^{-5}$  的偏振棱镜以及相位延迟准确度为  $\lambda/200$  的 1/4 波片和 1/2 波片组成。调整 1/4 波片快轴方向、1/2 波片快轴方向和偏振棱镜偏振方向之间的相对位置，就可以输出任意偏振方位角和椭偏率的完全偏振光；退偏器的作用是将偏振光变为非偏振光。两束光经过合束镜合束后就能提供 1 束由完全偏振光和非偏振光组成任意偏振状态的偏振光。

将标准光电型光功率计移入光路，关闭参考光路，由标准光功率计测量主光路光功率  $P_1$ ；然后主光路与参考光路同时接通，由标准光功率计测量总光功率  $P_0$ 。依据公式(5)得到该实验装置输出光束偏振度的标准值：

$$DOP_s = \frac{|P_1|}{P_0} \quad (5)$$

用所研制的激光偏振度测量仪代替标准激光功率计,测量主光路与参考光路同时接通时的激光偏振度,二者之间进行比较就可以得到激光偏振度测量仪的测量误差。利用激光偏振度校准实验装置分别提供完全偏振光( $DOP=1$ ,包括线偏振和圆偏振光)、非偏振光( $DOP=0$ )以及偏振度为50%( $DOP=0.5$ )3种偏振光,然后利用激光偏振度测量仪对3种偏振光的偏振度分别进行测量,结果如表1和表2所示。

表1 线偏振及圆偏振光偏振度测量结果

Table 1 DOP measurement results of linear polarization and circular polarization light

测量次数	偏振度测量结果	
	线偏振	圆偏振
1	1.001	0.996
2	0.994	1.002
3	0.998	1.002
4	0.995	0.996
5	0.996	0.998
6	0.994	0.999
7	1.002	0.998
8	0.997	1.003
9	0.996	1.008
10	1.006	1.004
均值	0.998	1.001
标准差	0.004	0.004

表2 非偏振光以及50%偏振光偏振度测量结果

Table 2 DOP measurement results of non-polarization and 50% polarization light

测量次数	偏振度测量结果	
	DOP=0	DOP=50%
1	0.005	0.509
2	0.005	0.508
3	0.003	0.498
4	0.002	0.499
5	0.003	0.502
6	0.008	0.504
7	0.006	0.499
8	0.005	0.503
9	0.001	0.503
10	0.001	0.509
均值	0.004	0.504
标准差	0.002	0.004

实验验证,对于不同偏振度,所研制的激光偏

振度测量仪都能获得良好的实验结果,与标准值之间的误差小于0.4%;偏振度测量结果的实验标准偏差小于0.4%,满足设计要求;所研制的激光偏振度测量仪能够测量0~1范围内的激光偏振度。测量结果的误差来自于测量仪分辨力、偏振棱镜引入的误差,以及1/4波片与偏振器之间的夹角定位。

## 4 结论

本文研制的基于旋转1/4波片法的激光偏振度测量仪,利用傅里叶变换分析1/4波片调制后的激光信号获得待测激光的斯托克斯参量,再经过计算获得偏振度;激光偏振度测量仪采用直驱电机和光电编码器等硬件以及嵌入式信号处理技术,在很大程度上降低了仪器的体积和质量,提高了测量精度,符合商品化批量生产思想;利用偏振控制器、退偏器、标准功率计组成偏振度校准装置,对所研制的激光偏振度测量仪测量精度进行验证实验,实验验证其偏振度测量精度可达0.5%,能够满足高精度激光偏振特性测量需求。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Chaoyang, CHENG Haifeng, CHEN Zhao-hui, et al. Application of polarization remote sensing in camouflage detection and method of polarization stealth[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 553-556.
- 张朝阳,程海峰,陈朝辉,等. 偏振遥感在伪装目标识别上的应用及对抗措施[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 553-556.
- [2] LYU Xin, JIANG Zhuoqin, LI Yingchun. Design and implementation of polarization characteristic meter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(8): 52-54.
- 吕鑫,蒋卓勤,李迎春. 便携式偏振特性测量仪的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2011(8): 52-54.
- [3] HE Zijian, WANG Kewei, MA Lifang, et al. Design and application of spectral polarization imaging detection system[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2): 211-214.
- 何梓健,王科伟,马丽芳,等. 一种光谱偏振成像系统设计及应用[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 211-214.
- [4] LI Gaoping, WANG Lei, XIE Yi. Research on measurement technology for degree of polarization of optical lens[J]. Journal of Astronautic Metrology

- and Measurement, 2009, 29(5):55-57.
- 黎高平,王雷,谢毅.光学镜头偏振度测试技术研究[J].宇航计测技术,2009, 29(5):55-57.
- [5] YU Xun, YANG Ye, JIANG Xu, et al. Recognition of camouflage targets by polarization spectral imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 537-541.
- 于洵,杨烨,姜旭,等.基于偏振光谱成像的目标识别方法研究[J].应用光学, 2016, 37(4): 537-541.
- [6] CHEN Ligang, HONG Jin, QIAO Yanli, et al. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2384-2387.
- 陈立刚,洪津,乔延利,等.一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析[J].光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2384-2387.
- [7] LUO Yangjie. Research on solar incident angle of water body polarized remote sensing [J]. Optical Technique, 2014, 40(3): 225-229.
- 罗杨洁.水体多角度偏振遥感机理研究[J].光学技术, 2014, 40(3): 225-229.
- [8] BAI Sike, DUAN Jin, LU Yizhuo, et al. Experimental study on polarization imaging characteristics of various materials[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4):510-516.
- 白思克,段锦,鲁一倬,等.不同材质的偏振成像特性实验研究[J].应用光学, 2016, 37(4):510-516.
- [9] DU Xiliang, DAI Jingmin. Review of division-of-amplitude photopolarimeter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006,27(4):325-330.
- 杜西亮,戴景民.分振幅光偏振测量仪[J].计量学报, 2006, 27(4):325-330.
- [10] GAO Xianghua, HU Yadong, SUN Bin, et al. Data acquisition system design of high-precision linear-polarimeter[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5) : 730-737.
- 高翔华,胡亚东,孙斌,等.高精度线偏振辐射计数据采集系统设计[J].应用光学, 2016, 37(5):730-737.