

引用格式:洪纯,吕国强,李军军.高温环境下液晶显示器件偏光特性的测试方法[J].电光与控制,2019,26(4):91-94,105. HONG C, LYU G Q, LI J J. A measurement method of LCD polarization characteristics in high-temperature environment[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):91-94, 105.

## 高温环境下液晶显示器件偏光特性的测试方法

洪纯<sup>a,b,c</sup>, 吕国强<sup>a,b,d</sup>, 李军军<sup>a,b,d</sup>

(合肥工业大学, a. 特种显示技术国家工程实验室; b. 现代显示技术省部共建国家重点实验室;  
c. 光电技术研究院; d. 仪器科学与光电技术研究院, 合肥 230009)

**摘要:** 温度会改变液晶材料偏光特性,液晶材料偏光特性的改变会直接影响液晶显示器件的显示性能,因此获得高温下液晶器件的偏光特性就可以预测其在高温环境中使用时显示特性的变化。提出一种适用于高温环境下液晶显示器件偏光特性的测试方法:首先将背光式LED和偏振片放入高低温试验箱中进行高温测试,利用面成像仪测量线偏光通过高低温试验箱玻璃门后的偏振态,以此获得玻璃门的偏振特性;然后将液晶器件放入高低温试验箱,测试得到通过玻璃门后的Stokes矢量,用玻璃门的温度-偏振特性进行补偿后,即可得到液晶显示器件在高温状态下的温度-偏光特性。

**关键词:** 液晶显示器; 偏振特性; 高温; 显示性能

中图分类号: TN873.93 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.018

## A Measurement Method of LCD Polarization Characteristics in High-Temperature Environment

HONG Chun<sup>a,b,c</sup>, LYU Guo-qiang<sup>a,b,d</sup>, LI Jun-jun<sup>a,b,d</sup>

(Hefei University of Technology, a. National Engineering Laboratory of Special Display Technology;  
b. National Key Laboratory of Advanced Display Technology; c. Academy of Photoelectric Technology;  
d. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Temperature can change the polarization characteristics of liquid crystal materials, and the change will directly affect the display performance of Liquid Crystal Display (LCD). Therefore, if we obtain the LCD polarization characteristics in high-temperature environment, the changes of its display characteristics when it works in such environment are predictable. A method is proposed for the measurement of LCD polarization characteristics in high-temperature environment. First, a backlight LED and a polarizing film are placed in a temperature test chamber to simulate a high-temperature environment. The polarization state of the linearly polarized beam after passing the glass door of the chamber is measured by using a surface imager, so as to obtain the polarizing characteristics of the glass door. Then, the LCD is placed in the test chamber. The temperature and polarization characteristics of the LCD in the high-temperature state are obtained via the Stokes vector that is compensated by the temperature and polarization characteristics of the glass door.

**Key words:** liquid crystal display; polarization characteristics; high temperature; display performance

### 0 引言

液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)是目前广泛使用的平板显示器,普遍应用于商业、工业、军工

和航天等信息显示终端领域。当用于机载显示时,液晶显示器需要在高低温、强烈振动与冲击、高空较强光照等复杂环境下可靠工作<sup>[1-2]</sup>。温度会改变液晶材料的双折射率从而改变液晶的偏光特性。液晶的偏光特性变化会直接影响液晶显示器的显示质量<sup>[3-4]</sup>。为了保证液晶显示器件在高温环境中仍能够正常工作,通常需要做高温环境测试。测试时将液晶器件放入高低温试验箱,将箱门关闭,形成一个相对封闭的高温环境。由于光学测试仪器无法放入高低温试验箱中,故

收稿日期:2018-04-20

修回日期:2018-05-28

基金项目:安徽省科技重大专项项目(17030901003, 17030901053, 16030901001)

作者简介:洪纯(1994—),男,安徽蚌埠人,硕士生,研究方向为液晶显示。

现有的高温环境测试都是通过人眼目测观察是否出现显示性能的变化,存在无法提供真实亮度值、个体差异引起误判/漏判等问题。当光学测试仪器放在高低温试验箱外面时,测量得到的数据就是液晶显示器件通过高低温试验箱箱门上的玻璃(简称玻璃门)的数据,必须进行修正补偿,才能得到液晶显示器件自身随温度的变化特性。本文就是针对高温环境下液晶显示器件的偏光特性,提出一种对液晶显示器件进行间接测量的测试方法,以便得到高温环境下液晶显示器件的偏光特性。

## 1 液晶显示器件偏光特性的测量

液晶显示器件包括背光式发光二极管(Light Emitting Diode, LED)和液晶盒。液晶盒是偏光器件,具有上、下两个偏振片(后文简称上偏、下偏),分别起到起偏和检偏的作用。

LCD 的显示原理就是通过控制电压大小改变液晶分子的扭转程度,从而改变偏振光的偏转角度,进而影响光线通过上偏时的透光率。通过测量从液晶盒出射光线的偏振态即 Stokes 矢量,可以得到液晶对光线的调制效果以及预测 LCD 的显示性能。

为了获得透过液晶盒光线的 Stokes 矢量,需要将上偏去掉,直接测试经过液晶调制后的偏振光。

要得到高温下透过液晶盒光线的 Stokes 矢量,需要将去除上偏的液晶显示器件放入高低温试验箱内。直接测量得到的数据是液晶显示器件通过玻璃门的数据。

测试系统包括被测的液晶显示器件、定制的高低温试验箱和法国 ELDIM 公司的面成像亮度计 UMaster。UMaster 可以测量光线的偏振态,给出椭率角  $\varepsilon$ 、方位角  $\alpha$ 、偏振度  $\rho$  等偏振参数及 Stokes 矢量。测试系统如图 1 所示。

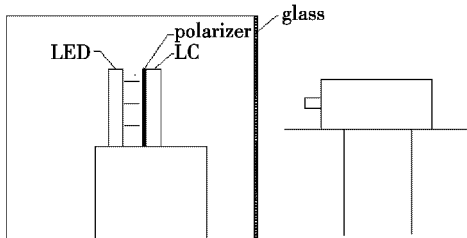


图 1 液晶盒出射光 Stokes 矢量测试

Fig. 1 Test for emergent light Stokes vector of liquid crystal cell

测试得到的 Stokes 可以表示为

$$\mathbf{S}_{\text{test1-T}} = K_T \mathbf{M}_{\text{glass-T}} \mathbf{M}_{\text{LC-T}} \mathbf{M}_{\text{POL-T}} \mathbf{S}_{\text{LED-T}} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{S}_{\text{test1-T}}$ 表示不同温度时测试得到的 Stokes 矢量； $K_T$ 表示不同温度时玻璃门的透过率； $\mathbf{M}_{\text{glass-T}}$ 表示不同

温度时玻璃的穆勒矩阵； $\mathbf{M}_{\text{LC-T}}$ 表示不同温度时液晶盒的穆勒矩阵； $\mathbf{M}_{\text{POL-T}}$ 表示不同温度时偏振片的穆勒矩阵； $\mathbf{S}_{\text{LED-T}}$ 表示不同温度时 LED 光 Stokes 矢量。

液晶盒出射光的 Stokes 矢量可以表示为

$$\mathbf{S}_{\text{LC-T}} = \mathbf{M}_{\text{LC-T}} \mathbf{M}_{\text{POL-T}} \mathbf{S}_{\text{LED-T}} \quad (2)$$

式中， $\mathbf{S}_{\text{LC-T}}$ 表示透过液晶盒光线的 Stokes 矢量。 $\mathbf{S}_{\text{test1-T}}$ 的值可由 UMaster 直接测量得到，要得到  $\mathbf{S}_{\text{LC-T}}$ 的值，需要对玻璃门的偏光特性和透过率进行标定。

## 2 高低温试验箱玻璃门偏光特性和透过率的标定

### 2.1 高低温试验箱玻璃门偏光特性的标定

常见的高低温试验箱的前门上有一块透明玻璃作为观察窗口。液晶显示器件做高低温环境测试时，需要将前门锁紧，以便维持箱体内部的环境温度，试验人员通过观察窗记录液晶显示器件高温环境下的显示画面是否出现异常。考虑到观察窗由前后两块玻璃组成并且尺寸较小，很难保证光学测试仪器透过玻璃窗测试时能够测试到全部显示面积，因此定制了高低温试验箱，在前门的里面加装了一个全玻璃门，以保证前门打开时，箱体内部仍能保持设定温度。

随着温度的升高，玻璃门会产生热膨胀，双折射率也会有变化，即玻璃门对光线偏振态的影响会随温度的变化而变化。为了确定温度对玻璃门偏光特性的影响，在不同温度下测试透过玻璃门的光线的偏振参数。需要将偏振态不随温度变化的偏振光放入高低温试验箱中进行高温测试，那么测得的光线偏振态的变化就是由玻璃偏光特性变化导致的，从而确定不同温度时玻璃门的偏光特性。

为了获得玻璃门对液晶显示器偏光特性的影响，选取 LED 背光和偏振方向为  $-45^\circ$  的线偏振片组成发光系统。测试系统如图 2 所示。由于线偏振片的偏振方向不会随着温度变化<sup>[5]</sup>，故认为开/关玻璃门前后测得的光线偏振参数的变化只是受到玻璃门的影响。常温下分别测得开/关玻璃门两种情况下的光线偏振参数，包括椭率角  $\varepsilon$ 、方位角  $\alpha$  以及偏振度  $\rho$ ，如表 1 所示。

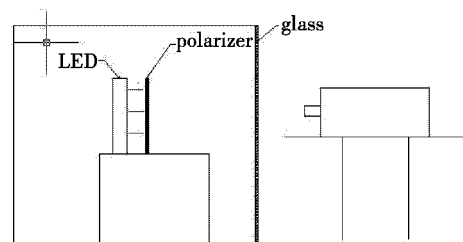


图 2 玻璃门穆勒矩阵测试

Fig. 2 Test of Mueller matrix for glass door

表1 常温时开/关玻璃门测得的背光光线偏振参数  
Table 1 Measured backlight polarization parameters with open/closed glass door at room temperature

偏振参数	开玻璃门	关玻璃门
$\varepsilon/(\circ)$	1.06	18.01
$\alpha/(\circ)$	-45.04	-45.73
$\rho$	0.990	0.964

可以看出玻璃门对出射光的方位角和偏振度影响不大,主要改变了出射光的椭率角。因此,可以将玻璃门作为波片看待。

波片的穆勒矩阵为<sup>[6]</sup>

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2^2 + S_2^2 \beta & C_2 S_2 (1 - \beta) & -S_2 \mu \\ 0 & C_2 S_2 (1 - \beta) & S_2^2 + C_2^2 \beta & C_2 \mu \\ 0 & S_2 \mu & -C_2 \mu & \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $C_2 = \cos 2\theta$ ； $S_2 = \sin 2\theta$ ； $\theta$ 是波片快轴相对于X轴的取向； $\beta = \cos \delta$ ； $\mu = \sin \delta$ ； $\delta$ 是波片的相位延迟量。

测试得到的 Stokes 矢量可以表示为

$$S_{\text{test}2-T} = K_T M_{\text{glass-T}} M_{\text{POL-T}} S_{\text{LED-T}} \quad (4)$$

高低温试验箱加温曲线如图3所示,偏振参数的测试设定为每个保温阶段的50 min后。

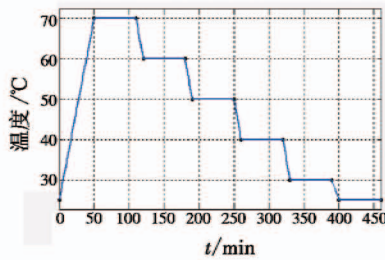


图3 高低温试验箱的温度加载曲线

Fig.3 Temperature loading curve of high-low temperature test chamber

不同温度下具体的偏振参数如表2所示。

表2 不同温度下测得的背光光线偏振参数  
Table 2 Backlight polarization parameters measured at different temperatures

偏振参数	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	30	40	50	60	70
$\varepsilon/(\circ)$	17.92	18.27	19.01	19.72	20.91
$\alpha/(\circ)$	-45.95	-45.60	-45.19	-44.90	-44.60
$\rho$	0.963	0.961	0.960	0.959	0.956

从表2中的数据可以看出,随着温度的变化,经过偏振片和玻璃门的偏振光的椭率角随着温度的升高逐渐增大,而偏振光的方位角和偏振度基本保持不变。

LED背光发出的光线透过偏振片后,成为偏振方向 $-45^{\circ}$ 的线偏振光,即 $M_{\text{POL-T}} S_{\text{LED-T}}$ 可以简化为 $[1, 0, -1, 0]^T$ ,透过玻璃的偏振光是方位角为 $-45^{\circ}$ 的椭圆偏振光,即 $S_{\text{test}2-T} = [1, 0, -\cos 2\varepsilon, \sin 2\varepsilon]^T$ 。 $S_0 = 1$ 时不用考虑玻璃门透过率。

根据式(4)可以得到

$$S_{\text{test}2-T} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -\cos 2\varepsilon \\ \sin 2\varepsilon \end{bmatrix} = M_{\text{glass-T}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3)和式(5)得到玻璃门的穆勒矩阵为

$$M_{\text{glass-T}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos 2\varepsilon & \sin 2\varepsilon \\ 0 & 0 & -\sin 2\varepsilon & \cos 2\varepsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

由表2和式(6)能得到玻璃门在30~70 $^{\circ}\text{C}$ 时的穆勒矩阵 $M_{\text{glass}}$ 。穆勒矩阵元素在不同温度下的数值如表3所示。

表3 穆勒矩阵元素在不同温度下的数值  
Table 3 Elements in the Mueller matrix at different temperatures

矩阵元素	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	30	40	50	60	70
$\cos 2\varepsilon$	0.811	0.803	0.788	0.772	0.745
$\sin 2\varepsilon$	0.586	0.595	0.6116	0.635	0.667
$-\sin 2\varepsilon$	-0.586	-0.595	-0.6116	-0.635	-0.667

将表3中的数据代入式(6),就能得到不同温度下玻璃的穆勒矩阵 $M_{\text{glass-T}}$ 。

## 2.2 高低温试验箱玻璃门透过率的标定

实验采用法国ELDIM公司的视角仪和UMaster对玻璃门的透过率进行标定。ELDIM公司对视角仪的镜头模块进行改造,将原先的镜片更换为耐高低温的镜片,改造后的视角仪镜头部分可以伸入高低温试验箱内直接进行测试。视角仪只能进行亮度测试而不能进行偏光特性测试。为确定玻璃门在不同温度时的透过率,将LCD放入高低温试验箱内并进行加温,加温曲线如图3所示,在高低温试验箱侧面开孔可供视角仪镜头伸入试验箱。先用视角仪测量LCD的亮度,再用UMaster隔着玻璃门测量LCD亮度。视角仪测得的亮度值即为LCD的实际亮度值,UMaster测得的亮度值是隔着玻璃门测得的亮度值,两者的比值即为玻璃门的透过率,如表4所示。

表4 玻璃门在不同温度下的透过率

Table 4 Transmittance of glass door at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	UMaster测得的亮度/ ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	视角仪测得的亮度/ ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	透过率/%
30	220.9	241.5	91.5
40	208.1	230.5	90.3
50	197.5	217.6	90.8
60	185.1	207.4	89.2
70	171.8	189.2	90.8

通过计算,得到透过率的标准差 $\sigma = 0.0076$ ,可以认为玻璃门的透过率不随温度变化。

由于玻璃门上不同位置处的透过率存在差异,因此需要确定测量点处玻璃门的透过率。用 UMaster 分别在开门和关门状态下测量 Stokes 矢量,结果如表 5 所示。

表 5 常温下 LCD 偏振光的 Stokes 矢量  
Table 5 LCD polarized light Stokes vector at room temperature

状态	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
开门	0.00919	0.00224	-0.00858	0.00045
关门	0.00814	0.00177	-0.00608	0.00424

因为  $S_0$  表示光强,所以玻璃门的透过率表示为  $K_T = \frac{S_{0\text{close}}}{S_{0\text{open}}} = 0.886$ 。其中,  $S_{0\text{open}}$  和  $S_{0\text{close}}$  分别表示开门和关门状态下测得的  $S_0$  值。

### 3 液晶显示器件的偏光特性

去除上偏的 LCD 在不同温度下测得的 Stokes 矢量如表 6 所示。

表 6 关门状态下 LCD 偏振光的 Stokes 矢量  
Table 6 LCD polarized light Stokes vector with closed door

	温度/°C				
	30	40	50	60	70
$S_0$	0.00834	0.00802	0.00764	0.00729	0.00696
$S_1$	0.00184	0.00135	0.00081	0.00015	-0.00068
$S_2$	-0.00639	-0.00607	-0.00572	-0.00544	-0.00508
$S_3$	0.00403	0.00413	0.00421	0.00420	0.00419

根据式(1)和式(2)可以得到经过液晶盒后的偏振光的 Stokes 矢量为

$$S_{LC-T} = K_T^{-1} M_{\text{glass-T}}^{-1} S_{\text{test1-T}} \quad (7)$$

根据式(7)可以推算出高温下去上偏 LCD 出射光的实际 Stokes 矢量如表 7 所示。

表 7 去上偏 LCD 偏振光的 Stokes 矢量  
Table 7 LCD polarized light Stokes vector without upper polarizer

	温度/(°C)				
	30	40	50	60	70
$S_0$	0.00940	0.00910	0.00860	0.00820	0.00790
$S_1$	0.00210	0.00150	0.00090	0.00020	-0.00080
$S_2$	-0.00850	-0.00830	-0.00800	-0.00780	-0.00740
$S_3$	-0.00050	-0.00030	-0.00020	-0.00020	-0.00030

为去除背光的影响,将  $S_0$  的值归一化,结果如表 8 所示。

表 8 去上偏 LCD 偏振光 Stokes 矢量归一化  
Table 8 LCD polarized light Stokes vector normalization without upper polarizer

	温度/°C				
	30	40	50	60	70
$S_0$	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
$S_1$	0.22060	0.16830	0.10650	0.02000	-0.09710
$S_2$	-0.90400	-0.91470	-0.92920	-0.94230	-0.94540
$S_3$	-0.05690	-0.03690	-0.02700	-0.02910	-0.03800

液晶盒出射光经过上偏后才能显示出色彩,所以要得到 LCD 的显示性能,需要计算从液晶盒出射光线经过上偏的透过率。

透过液晶盒的偏振光的 Stokes 矢量与透过上偏后的 Stokes 矢量的关系可以表示为

$$S_T = M_{\text{POL-T}} S_{\text{LC-T}} \quad (8)$$

上偏的穆勒矩阵表示为  $M_{\text{POL-T}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

由表 8 和  $M_{\text{POL-T}}$  可以得到表 9。

表 9 光线透过上偏后的 Stokes 矢量  
Table 9 Polarized light Stokes vector through the upper polarizer

	温度/°C				
	30	40	50	60	70
$S_0$	0.9520	0.9573	0.9646	0.9712	0.9727
$S_1$	0	0	0	0	0
$S_2$	-0.9520	-0.9573	-0.9646	-0.9712	-0.9727
$S_3$	0	0	0	0	0

### 4 TN 型 LCD 高温下的显示性能

更换 UMaster 镜头依次测得 450 nm, 550 nm, 650 nm 3 种波长的光在不同温度时的 Stokes 矢量,根据上文对测得的 Stokes 矢量的处理方法,可以得到 3 种波长的光透过上偏后的 Stokes 矢量,它们的  $S_0$  值如表 10 所示。

表 10 光线透过上偏后 Stokes 矢量的  $S_0$   
Table 10  $S_0$  of Stokes vector for light through the upper polarizer

波长/ nm	温度/°C				
	30	40	50	60	70
450	0.94910	0.95860	0.96710	0.97570	0.97580
550	0.98270	0.97450	0.96080	0.94030	0.91450
650	0.86630	0.84680	0.82080	0.78540	0.74820

$S_0$  的值即为光线通过上偏的透过率,可以得到 3 种波长的光在不同温度时通过上偏的透过率,如表 11 所示。

表 11 光线在不同温度时的透过率  
Table 11 Transmittance at different temperatures %

波长/ nm	温度/°C				
	30	40	50	60	70
450	94.91	95.86	96.71	97.57	97.58
550	98.27	97.45	96.08	94.03	91.45
650	86.63	84.68	82.08	78.54	74.82

450 nm, 550 nm, 650 nm 波长的光分别为蓝光、绿光、红光。可以看出,蓝光的透过率增加了 2.67%,绿光的透过率降低了 6.82%,红光的透过率降低了 11.82%。

(下转第 105 页)

- operators for visual tracking[C]//European Conference on Computer Vision, 2016:472-488.
- [12] KUMAR B V K V, MAHALANOBIS A, JUDAY R D. Correlation pattern recognition[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [13] GALOOGAHI H K, SIM T, LUCEY S. Correlation filters with limited boundaries[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015:4630-4638.
- [14] GALOOGAHI H K, FAGG A, LUCEY S. Learning background-aware correlation filters for visual tracking[C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 1144-1152.
- [15] NAM H, HAN B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:4293-4302.
- [16] NAM H, BAEK M, HAN B. Modeling and propagating CNNs in a tree structure for visual tracking[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:1-10.
- [17] DEKEL T, ORON S, RUBINSTEIN M, et al. Best-buddies similarity for robust template matching[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015:2021-2029.
- [18] POSSEGGER H, MAUTHNER T, BISCHOF H. In defense of color-based model-free tracking[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015:2113-2120.
- [19] 徐福来,王鸿鹏,张普,等. 基于贝叶斯模型与最佳伙伴相似度量的目标跟踪[J]. 计算机应用研究, 2018(8):2498-2502, 2526.
- [20] WU Y, LIM J, YANG M H. Online object tracking: a benchmark[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013: 2411-2418.
- [21] WU Y, LIM J, YANG M H. Object tracking benchmark[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9):1834-1848.

(上接第94页)

可以预测 LCD 白场图像在高温时会偏蓝,与实际的显示效果相符,所以可以测量通过液晶盒后 450 nm, 550 nm, 650 nm 波长光线的偏振态来预测 LCD 在高温时的显示效果。

## 5 结论

为了研究液晶显示器件在高温下的显示性能,提出一种通过测试液晶显示器件在高温下的偏光特性的测试方法。本文详细介绍了该测试系统以及测试原理,通过测量高温环境下经过液晶盒出射光的偏振态,计算出红绿蓝 3 种波长的光通过上偏振片的透过率,从而预测 LCD 在高温时的显示效果。

## 参考文献

(上接第99页)

- [1] 朱骞,王竞,武汉,等. 军用液晶显示器抗振加固技术[J]. 现代显示, 2012, 23(5):13-15.
- [2] 姚慧慧. 加固液晶显示模块高温环境热力学分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- [3] 王元庆,董戴,洪光烈. 液晶显示屏温度特性的试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2001, 15(4):52-55.
- [4] 王伟. 液晶电控双折射率温度效应的研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2003.
- [5] 陆吕晨,冯奇斌,弓欣,等. 液晶显示偏光片温度特性分析[J]. 电光与控制, 2016, 23(3):92-94, 99.
- [6] 黄金苹. 偏振照明系统中偏振实现及检测方法研究[D]. 成都:中国科学院研究生院, 2014.
- [7] LOHITHASWA M H. Canny edge detection algorithm on FPGA[J]. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, 2015, 10(1):15-19.
- [8] 韩君君. 彩色图像边缘检测算法研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2009.
- [9] 陈小艳,王强,李柏林. 改进的 Hough 变换检测圆方法[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(8):197-201.
- [10] 朱桂英,张瑞林. 基于 Hough 变换的圆检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(6):1462-1464.
- [11] MOCHIZUKI Y, TORII A, IMIYA A. N-point Hough transform for line detection[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2009, 20(4):242-253.
- [12] SATZODA R K, SUCHITRA S, SRIKANTHAN T. Parallelizing the Hough transform computation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, 15(1):297-300.
- [13] 孙滔. 基于颜色空间的图像特征提取的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2006.
- [14] KAU L J, LEE T L. An HSV model-based approach for the sharpening of color images[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013:150-155.
- [15] 蒋东升. 基于数学形态学的边缘检测算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012.
- [16] 沈阳. 基于形态学的图像边缘检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.