

基于光谱叠加特性的液晶显示器颜色特征化方法研究

刘浩学 郑 岚 代 黎 黄 敏 武 兵

(北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600)

摘要 从色光加色混合的基本特性出发,对两台专业级液晶显示器(LCD)进行了光谱辐亮度测量。对测量结果进行计算表明,显示色与三原色光谱辐亮度函数之间存在线性叠加关系,不同数字驱动值下相同波长的三原色光谱辐亮度函数满足三次多项式的关系。利用这两个关系提出了一种根据数字驱动值和对应的三原色光谱辐亮度函数计算任意显示色的算法。实验验证结果表明,这种计算方法的准确度很高,可以作为 LCD 颜色特征化的方法。

关键词 颜色光学;液晶显示器;光谱叠加性;色光加色混合;颜色特征化;颜色计算

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1233002

Color Characterization of LCD Based on Spectral Additive Properties

Liu Haoxue Zheng Lan Dai Li Huang Min Wu Bing

(School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract For the color characterization of liquid crystal display (LCD), the spectral radiance curves are measured for EIZO CG 19 and NEC PA241 LCD monitors and the displayed colors are calculated based on spectral additive property. The results show that the spectral radiance curve of displayed color is the linear superposition of those of corresponding primaries, and there is a cubic polynomial relation between the digital driving value and the corresponding radiance of a single wavelength. A new color computation method is proposed. The computation accuracy of the proposed method is very high. It can be used for the color characterization of LCD.

Key words color optics; liquid crystal display; spectral additive property; color addition; color characterization; color computing

OCIS codes 330.1730; 330.1690; 330.1715; 330.1710

1 引 言

液晶显示器(LCD)以其体积小、幅面大、功耗低、辐射小和对比度高等特点得到越来越广泛的应用,在很多领域已经取代了阴极射线管(CRT)显示器,成为了显示器的主流类型。但是,LCD与CRT显示器的呈色原理不一样,呈色的规律也有差别,而且不同厂家生产的LCD面板遵循的呈色规律也可能不同,显示颜色的计算方法也与CRT显示器不同。目前尚未针对LCD显示器制定出新的颜色标准,仍然沿用sRGB标准,即Gain-offset-Gamma(GOG)的颜色计算方法^[1]。sRGB计算显示颜色的基础有两个:1)数字驱动值与红绿蓝(RGB)三原色

之间满足指数关系;2)RGB三个原色通道相互独立,没有交互作用^[2]。但是,一些研究结果表明,LCD各通道之间不完全独立,通道间有相互影响,用GOG模型计算的颜色具有较大的误差。因此,研究者们提出了一些新的算法,如原色交互作用模型(TPC)用多项式的交叉项来模拟各通道的交互作用^[3],分段模型(PP)将颜色空间分割为若干子空间以降低非线性影响^[4,5],S曲线模型用S函数代替GOG模型的指数函数来模拟LCD各通道的阶调复制曲线(TRC),以提高颜色计算准确性^[6]。这些方法都在一定程度上提高了计算精度,但也存在一些不足,最大的不足就是计算比GOG模型复杂,不能

收稿日期: 2011-06-03; **收到修改稿日期**: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61040066)资助课题。

作者简介: 刘浩学(1953—),男,教授,主要从事颜色科学与影像技术、印刷工程等方面的研究。

E-mail: liuhaoxue@bigc.edu.cn

用国际色彩联盟(ICC)基于矩阵的标准特性文件实现显示器的色彩管理^[7]。

无论是 GOG 模型还是新提出的各种改进算法都是通过国际照明委员会(CIE)规定的三刺激值的计算来实现显示颜色定量描述的,其基本的思路是 RGB 三个通道颜色值与 CIE 三刺激值 XYZ 的变换。如果 RGB 颜色值与 XYZ 三刺激值之间满足线性变换关系,就表明 RGB 三个原色通道相互独立,否则就需要建立非线性变换关系。本文从显示器原色的光谱特性出发,检验了显示颜色与三原色光谱辐亮度的线性叠加性,利用线性叠加特性建立显示器的颜色计算关系。用实际测量的数据检验表明,这种计算方法与实际显示颜色的测量值非常接近,可以作为显示器颜色特征化的方法。

2 显示色光谱辐亮度的测量

为了检验显示颜色光谱的叠加特性,分别将 RGB 三个通道的数字驱动值划分为 0, 8, 16, ..., 248, 255 共 33 个等级,用这些等级组合成单色、双色和三色并进行光谱辐亮度的测量,其中双色和三色为等值的组合,如(128, 128, 0)和(64, 64, 64)等,因此实际的双色显示色是一系列的黄、品红和青色,三色的颜色是一系列灰色。

实际测量的显示器是 EIZO CG 19 和 NEC PA241 专业级显示器,分别采用 GretagMacbeth EyeOne 分光光度计(用 I1 表示)和 Photo Research PR650 光谱辐亮度计(用 P-表示)进行了测量。图 1 和图 2 所示的曲线为分别用两种仪器测量 RGB 三原色纯色的结果,图中数据为归一化后数据。测量结果显示,两种仪器测量的结果十分相似,具有相同的趋势,只不过 EyeOne 的采样间隔为 10 nm, PR650 为 4 nm,因此 PR650 的测量曲线出现了更

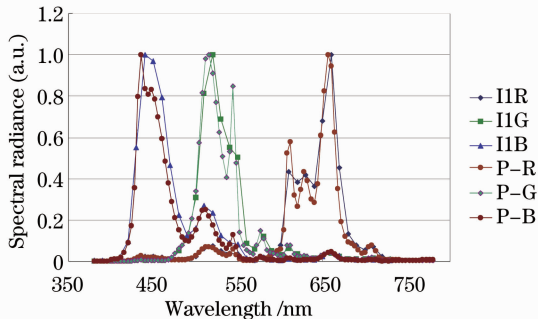


图 1 用 EyeOne 和 PR650 测量得到的 NEC 显示器三原色归一化光谱辐亮度曲线

Fig. 1 Normalized spectral radiation curves of NEC monitor measured by EyeOne and PR650

多的起伏,而 EyeOne 的比较光滑。从图 1, 2 可以看出,两个显示器的三原色光谱分布很不一样, NEC 的蓝原色光谱比 EIZO 的窄,而另两个原色的光谱 NEC 要相对宽很多。

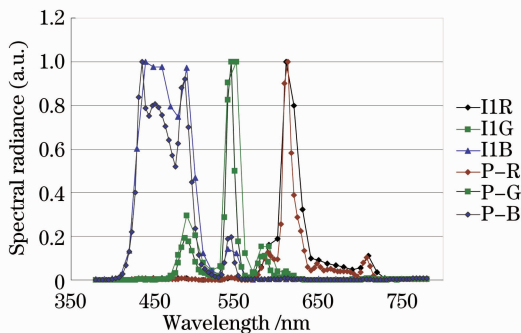


图 2 用 EyeOne 和 PR650 测量得到的 EIZO 显示器三原色归一化光谱辐亮度曲线

Fig. 2 Normalized spectral radiation curves of EIZO monitor measured by EyeOne and PR650

3 原色的光谱叠加性检验

理论上,当显示颜色的光谱辐亮度满足相加性关系时,显示颜色与三原色之间满足如下关系:

$$c_{\lambda}(d_r, d_g, d_b) = r_{\lambda}(d_r) + g_{\lambda}(d_g) + b_{\lambda}(d_b) + c_{0\lambda}, \quad (1)$$

式中 $c_{\lambda}(d_r, d_g, d_b)$ 是三原色数字驱动值分别为 d_r, d_g, d_b 时的显示颜色, $r_{\lambda}(d_r), g_{\lambda}(d_g)$ 和 $b_{\lambda}(d_b)$ 为相应数字驱动值时相对于黑场的三原色光谱分布(即暗场为绝对黑), $c_{0\lambda}$ 代表显示器暗场时的光谱分布,即 $c_{0\lambda} = c_{\lambda}(0, 0, 0)$ 。但实际上, $r_{\lambda}(d_r), g_{\lambda}(d_g)$ 和 $b_{\lambda}(d_b)$ 并不能真正得到,通过测量能够得到的只能是各原色与黑场叠加后的结果。因此(1)式实际上就变为

$$\begin{cases} c_{\lambda}(d_1) = r_{1\lambda}(d_1) \\ c_{\lambda}(d_1, d_2) = r_{1\lambda}(d_1) + r_{2\lambda}(d_2) - c_{0\lambda} \\ c_{\lambda}(d_1, d_2, d_3) = r_{1\lambda}(d_1) + r_{2\lambda}(d_2) + r_{3\lambda}(d_3) - 2c_{0\lambda} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $c_{\lambda}(d_1), c_{\lambda}(d_1, d_2)$ 和 $c_{\lambda}(d_1, d_2, d_3)$ 是三原色数字驱动值分别为 d_1, d_2, d_3 时的单色、双色和三色显示颜色测量值, $r_{1\lambda}(d_1), r_{2\lambda}(d_2)$ 和 $r_{3\lambda}(d_3)$ 分别为数字驱动值为 d_1, d_2, d_3 时的三原色单色光谱分布测量值, $c_{0\lambda}$ 与(1)式中的相同。由于每个测量值中都包含了黑场亮度,所以用两个测量值进行叠加计算时要减去一个黑场亮度,计算三色叠加时要减去两个黑场亮度^[8]。

为了检验显示器的三原色光谱叠加性,用不同

数字驱动值产生的三原色光谱测量数据进行计算,验证光谱叠加性的符合程度,并与实测值进行比较。图3是数字驱动值为128时对EIZO显示器计算值与测量值的比较结果,NEC显示器的计算结果与此类似。图中标记为“-M”的曲线为测量值,标记为“-C”的曲线为计算所得。例如“C-C”曲线是用数字驱动值为128的绿和蓝色原色计算得到青色,即 $g_{\lambda}(128) + b_{\lambda}(128) - c_{0\lambda}$ 的计算结果,“C-M”是对应的实测曲线,其他颜色的计算结果依此类推。对应其他数字驱动值的计算结果与此类似。对实验中所用各数字驱动值计算的双色混色(黄、品红、青)和三色混色的灰色与EyeOne实测结果进行比较,结果列在表1中,表中 Δ_{SMS} 表示所有样品的光谱均方误差, ΔE^* 代表所有样品的CIELAB色差, σ_s 表示标准方差。光谱均方误差的计算式为

$$\Delta_{SMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (rm_i - rc_i)^2}{n}}, \quad (3)$$

式中 rm_i 和 rc_i 分别是测量和计算的光谱分布曲线, $i = 1, 2, \dots, n$,其中 n 为光谱采样点数量,对于EyeOne, $n = 36$,对于PR650, $n = 101$ 。

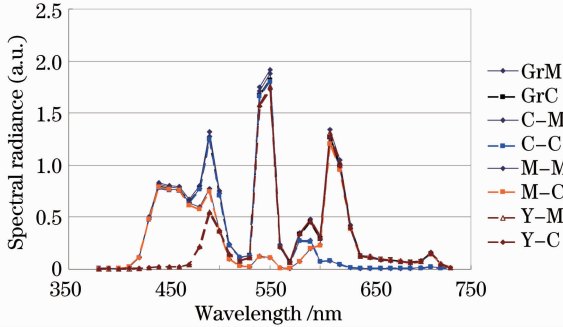


图3 EIZO CG 19显示器数字驱动值为128的黄、品红、青和灰色的计算值与实测值的比较

Fig. 3 Measured and computed spectra curves of yellow, magenta, cyan and gray for EIZO CG 19

表1 EyeOne测量与计算结果的比较

Table 1 Comparison between computing results and measurements of EyeOne

	EIZO		NEC	
	Δ_{SMS}	ΔE^*	Δ_{SMS}	ΔE^*
Mean	0.0138	0.18	0.0206	0.68
Maximum	0.0451	0.50	0.0839	1.71
σ_s	0.0111	0.13	0.0206	0.48

表1的数据显示,实验所用液晶显示器很好地满足了光谱叠加性的关系,计算结果与实测结果的

差别很小,完全可以满足实际使用的精度需要。因此,在已知给定数字驱动值下三原色光谱辐亮度曲线的前提下,就可以使用(1)式计算实际的显示颜色,而确定特定数字驱动值下的三原色光谱辐亮度曲线就成为计算显示颜色的关键。

然而,对实测光谱数据的分析也表明,(1)式中三原色的光谱辐亮度曲线与数字驱动值之间呈复杂的非线性关系,光谱辐亮度曲线不随数字驱动值成比例改变,并且不同波段的非线性关系也不同,所以要建立任意显示色的计算关系必须首先确定光谱辐亮度与数字驱动值变化的关系。

4 三原色光谱辐亮度函数的确定

为了方便计算,首先将显示器的数字驱动值 d_r, d_g, d_b 进行归一化,将取值范围从 $[0, 255]$ 归一化为 $[0, 1]$ 。

将单色测量数据按波长和数字驱动值排列为矩阵形式:

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} r(\lambda_1, d_1) & r(\lambda_1, d_2) & \cdots & r(\lambda_1, d_m) \\ r(\lambda_2, d_1) & r(\lambda_2, d_2) & \cdots & r(\lambda_2, d_m) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r(\lambda_n, d_1) & r(\lambda_n, d_2) & \cdots & r(\lambda_n, d_m) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中下标 $i = R, G, B$,对应不同的原色。矩阵中每个列矢量就是给定数字驱动值时的光谱测量值 \mathbf{R}_i :

$$\mathbf{R}_i = [r(\lambda_1, d), r(\lambda_2, d), \dots, r(\lambda_n, d)]^T. \quad (5)$$

矩阵 \mathbf{X} 中同一行的元素对应相同波长不同数字驱动值的测量值。因此,每个矩阵元素都是波长和数字驱动值的函数,矩阵 \mathbf{X} 对应一个二维曲面。如果有 n 个测量波长, m 个数字驱动值,则 \mathbf{X} 为一个 $n \times m$ 矩阵。

矩阵的列矢量 \mathbf{R}_i 是光谱辐亮度函数,是不规则的曲线,不能用解析函数表示。但实际计算表明,矩阵的每个行矢量,即同一波长的辐亮度随数字驱动值的变化却非常有规律,可以用一个三次多项式非常精确地表示。图4是NEC显示器对应RGB三原色峰值波长的几条拟合曲线及相应的曲线方程,其拟合曲线的相关系数 R^2 几乎等于1,说明拟合曲线与测量数据的相关性非常好。

图4中曲线是特定波长辐亮度值随数字驱动值变化的曲线,其意义与GOG模型中的伽马曲线相同,而GOG模型中伽马曲线是指数函数,这里是三次多项式函数。由图中曲线可以看出,曲线随波长

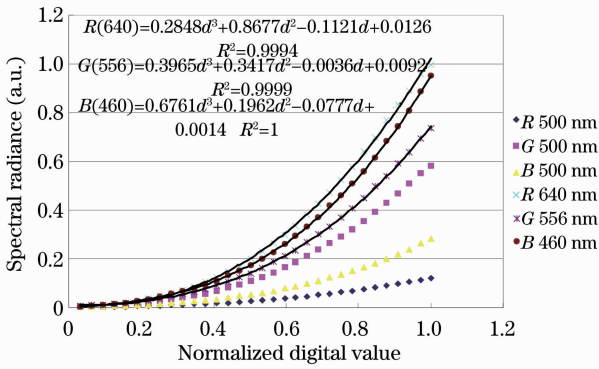


图 4 NEC 显示器拟合曲线的示例

Fig. 4 Example of fitting lines of NEC

的变化不是固定的,所以 GOG 模型相当于使用了所有波长伽马曲线的平均值。

如果将各波长拟合多项式的系数用矩阵表示,则对应 $n \times m$ 阶的 \mathbf{X} 矩阵,多项式系数可表示为 $n \times 4$ 阶的系数矩阵

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_0(\lambda_1) & a_1(\lambda_1) & a_2(\lambda_1) & a_3(\lambda_1) \\ a_0(\lambda_2) & a_1(\lambda_2) & a_2(\lambda_2) & a_3(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_0(\lambda_n) & a_1(\lambda_n) & a_2(\lambda_n) & a_3(\lambda_n) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

如果将数字驱动值也写成列矩阵形式:

$$\mathbf{D} = [1, d, d_2, d_3]^T, \quad (7)$$

式中 $d \in [0, 1]$, 则(5)式或(4)式中的列矢量可以由下式计算得到

$$\mathbf{R}_i(\lambda, d) = \mathbf{A}_i \mathbf{D}. \quad (8)$$

5 计算精度的检验

由第 3 节的讨论和表 1 的数据可知,用各数字驱动值下的三原色单色可以精确地混合出各显示颜色,因此只要检验本文所提出的计算方法是否能够准确计算出各三原色单色即可验证本方法的计算精度。为此,用各单色测量值计算三次多项式的系数矩阵 \mathbf{A} , 然后用(8)式计算各单色的光谱辐亮度函数,与实测数据进行比较,检验计算误差。

本实验将每个原色分为 33 个等级,3 个原色共有 99 个颜色。表 2 列出了对两台显示器 99 个样品实际计算结果与用 EyeOne 测量值之间的误差统计。从表中数据可以看出,两台显示器计算得到的三原色颜色与实测值的色差均小于 0.1,考虑到实际测量的精度范围,这个计算结果的精度是非常高的,以此计算任意显示颜色也不会造成很大的传递误差,可以满足实际使用的精度要求。

表 2 三原色计算值与测量值的比较

Table 2 Comparison of computed primaries with measured data

	measured data			
	EIZO		NEC	
	Δ_{SMS}	ΔE^*	Δ_{SMS}	ΔE^*
Mean	0.0021	0.04	0.0030	0.09
Maximum	0.0152	0.29	0.0242	0.38
σ_s	0.0019	0.04	0.0041	0.08

6 讨 论

提出的计算显示颜色的方法建立在显示颜色的光谱叠加性基础之上,其关键是计算出各原色的光谱辐亮度函数。该方法的实质是对波段的分段计算,而一般的计算方法基本都是对数字驱动值区间的分段^[5,9]。

本实验是通过每个原色取 33 个采样点计算三次多项式系数实现的,也就是说,实际计算中共使用了 99 个测量点。而从第 4 节可知,各波长单色光随数字驱动值的变化是非常光滑的,对三次多项式的拟合相关系数几乎等于 1,所以对应三次多项式在理论上只要有 4 个以上采样点即可计算出多项式系数矩阵 \mathbf{A} , 即矩阵 \mathbf{X} 阶数只要不小于 $n \times 4$, 即可实现本方法的计算。

为了验证上述论点,采用一种极端的做法,从所有测量数据中仅挑选出数字驱动值为 0, 8, 80, 168, 255 的 5 个测量数据构建数据矩阵 \mathbf{X} , 由此求出多项式系数矩阵 \mathbf{A} , 并比较此时各系数与 33 个采样点结果的差别。表 3 是对比 33 个测量值和仅用 5 个测量值计算系数矩阵所产生的误差,对应各个 a 值的列是各系数相对偏差的平均值。从表中计算结果可以看出,采样点数从 33 个减少为 5 个所产生的系数差别并不大,平均相对偏差不大于 3%。

表 3 不同采样数导致的拟合系数的相对偏差

Table 3 Relative deviations of the fitting factors caused by sampling amount

	EIZO			
	a_3	a_2	a_1	a_0
Mean	0.57	0.81	1.72	0.44
Maximum	5.42	11.83	35.61	25.69
σ_s	0.90	1.71	4.37	2.48
	EIZO			
	a_3	a_2	a_1	a_0
Mean	1.98	1.30	2.70	0.20
Maximum	43.81	50.00	44.07	1.74
σ_s	5.37	5.64	7.08	0.23

由 5 个采样点计算得到的多项式系数表现如何必须用预测的颜色差别来衡量,为此将这个系数矩阵 \mathbf{A} 代入(8)式进行计算。表 4 是计算得到的颜色与实测颜色的比较,表中数据的意义与表 1 和表 2 相同。

表 4 仅用 5 个测量点计算的精度统计

Table 4 Statistics of calculation deviation with 5 and 33 samples

	EIZO		NEC	
	Δ_{SMS}	ΔE^*	Δ_{SMS}	ΔE^*
Mean	0.0030	0.06	0.0038	0.11
Maximum	0.0173	0.35	0.0399	0.56
σ_s	0.0036	0.07	0.0064	0.10

把表 4 的数据与表 2 进行对比就可以更清楚地看出,仅用 5 个采样点计算出的三原色光谱曲线与实测曲线非常接近,而且与实测颜色的色差几乎与用 33 个点计算的一样,平均色差仅增加了 0.02,而且也没有明显增加最大色差的数值,说明单色辐亮度随数字驱动值的变化关系确实非常光滑,相关性非常好,可以用很少的采样点得到非常精确的拟合结果。

本方法可以得到较高计算精度的原因在于使用了光谱分段的算法,用三次多项式拟合函数得到每个波长段光谱辐亮度值随数字驱动值的变化关系,使整个可见光范围的光谱辐亮度计算值都比较准确(最小二乘误差最小)。而采用 RGB 到 XYZ 计算方法时,由于 RGB 与 XYZ 都是光谱辐亮度函数在可见光范围内的积分结果,不能针对各个波长段进行计算,相当于用可见光范围内的平均值进行计算,有可能在某个波段有较大计算偏差。

7 结 论

提出了一种利用光谱叠加性计算 LCD 颜色的方法,并用实际测量数据对该方法的精度进行了检验,证明计算结果与实测颜色的偏差小于 0.1 CIELAB 色差单位。实验结果证明,每个波长的光谱辐亮度随数字驱动值的变化符合三次多项式的关系,并且二者的相关性非常高,接近确定性关系。

因此,本方法的关键在于用测量数据拟合光谱辐亮度三次多项式系数矩阵 \mathbf{A} ,然后用(8)式计算三原色的光谱辐亮度曲线。理论上,求解具有确定性关系的三次多项式只需要 4 个已知条件。因此,使用不少于 4 个数字驱动值下的测量值就可以得到本方法的光谱辐亮度三次多项式系数矩阵 \mathbf{A} ,然后利用光谱叠加性关系预测任意数字驱动值下的显示颜色,大大简化了计算的过程。本实验仅对 EIZO CG 19 和 NEC PA241 两个专业级显示器进行了测量,该方法是否适合其他类型的 LCD 以及计算的精度如何还需要进一步的实验验证。

参 考 文 献

- 1 Michael Stokes, Matthew Anderson, Srinivasan Chandrasekar *et al.*. A Standard Default Color Space for the Internet-sRGB [EB/OL]. [1996-11-05]. Version 1. 10, <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>
- 2 R. S. Berns. Methods for characterizing CRT displays [J]. *Displays*, 1996, **16**(4): 173~181
- 3 S. Wen, R. Wu. Two-primary crosstalk model for characterizing liquid crystal displays [J]. *Col. Res. Appl.*, 2006, **31**(2): 102~108
- 4 Yong Wang, Haisong Xu. Colorimetric characterization of liquid crystal display using an improved two-stage model [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 432~434
- 5 Zhang Xiandou, Xu Haisong. Piecewise partition model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1719~1724
张显斗, 徐海松. 液晶显示器颜色特征化的分段分空间模型 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1719~1724
- 6 Wang Yong, Xu Haisong. The S shaped model for LCD colorimetric characterization [J]. *J. Image and Graphics*, 2007, **12**(3): 491~494
王 勇, 徐海松. 液晶显示器颜色特征化的 S 模型算 [J]. *中国图象图形学报*, 2007, **12**(3): 491~494
- 7 ISO. ISO 15076-1:2005, Image Technology Colour Management — Architecture, Profile Format and Data Structure — Part 1: Based on ICC.1:2004-10[S]. Geneva: ISO, 2005
- 8 Shi Junsheng, Yun Lijun, Yang Jian *et al.*. Accuracy of colorimetric characterization and effect of black point for CRT monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 371~376
石俊生, 云利军, 杨 健等. 阴极射线管显示器特性化精度及黑点的影响 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 371~376
- 9 Gong Rui, Xu Haisong, Zhang Xiandou. Sub-space compensation model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0433001
宫 睿, 徐海松, 张显斗等. 液晶显示器色度特征化的分空间补偿模型 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0433001