

液晶显示器色度特征化的分空间补偿模型

官 睿¹ 徐海松¹ 张显斗² M. Ronnier Luo³

¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

² 杭州电子科技大学新媒体传播系, 浙江 杭州 310018

³ Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

摘要 由于液晶显示器不能完全满足通道独立性和色品恒定性而导致其色度特征化精度不高,故液晶显示器精确色度特征化模型的研究具有重要意义。将分空间处理的思想应用于对液晶显示器色度特征化精度较高的掩模(Masking)模型,提出了分空间补偿(SC)模型。该模型将 RGB 颜色空间分为 8 个子空间,基于不同子空间的相应训练样本,将掩模模型的预测三刺激值差值拟合成各通道驱动值的多项式函数,并对其三刺激值进行补偿。通过对四台液晶显示器色度特征化的实验测试表明,分空间补偿模型的最优平均预测色差分别为 0.2783、0.3199、0.7090 和 1.2216 CIELAB 单位,验证了其颜色预测精度优于现有的相关色度特征化模型,且可以适用于各类液晶显示器。

关键词 色度学;色度特征化;分空间补偿模型;掩模模型;液晶显示器

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0433001

Sub-Space Compensation Model for Accurate Colorimetric Characterization of Liquid Crystal Displays

Gong Rui¹ Xu Haisong¹ Zhang Xiandou² M. Ronnier Luo³

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Department of New Media and Communication, Hangzhou University of Electronic Technology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

³ Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

Abstract The accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays (LCDs) has many difficulties, such as channel interaction and non-constancy of channel chromaticity. Based on the well-performed masking model, a new colorimetric characterization method, namely, sub-space compensation model (SC model) concerning the advantages of the sub-space partition is proposed for LCDs. Firstly, the training data corresponding to different RGB subspaces should be measured, then the relationship between the prediction error of XYZ tristimulus values and the input drive data can be calculated using quadratic polynomial, so that the XYZ prediction error of masking model will be compensated. For the four tested LCDs, the experimental results show that the best mean prediction color differences of the SC model are 0.2783, 0.3199, 0.7090 and 1.2216 CIELAB unit, respectively, which verify that the prediction accuracy of SC model outperforms other conventional models, and that the new model can be applied to all kinds of LCDs.

Key words colorimetry; colorimetric characterization; sub-space compensation model; masking model; liquid crystal display (LCD)

OCIS codes 330.1730; 330.1690; 330.1710

收稿日期: 2010-10-22; **收到修改稿日期**: 2010-12-01

基金项目: 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题资助。

作者简介: 官 睿(1987—),女,硕士研究生,主要从事颜色科学与图像技术方面的研究。E-mail: gr2211@126.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学与影像技术、光度学与色度学及光辐射测量技术等方面的教学与研究工作。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

1 引 言

数字图像设备的色度特征化是其颜色管理^[1,2]的基础步骤和关键环节。近年来液晶显示器(LCD)由于具有功耗低、体积小、辐射少和显示图像质量高等优点,已逐渐取代传统的阴极射线管(CRT)显示器^[3,4],对液晶显示器的色度特征化研究也已成为重要的课题。由于液晶显示器不能很好地满足通道独立性和色品恒定性而导致色度特征化精度不高^[5,6],本文提出了一种适用于液晶显示器的色度特征化新模型即分空间补偿(SC)模型,能达到更高的预测精度,且可广泛适用于各类液晶显示器。

2 掩模模型

掩模(Masking)模型是 Nobuhiko Tamura 等^[7]提出的一种适用于液晶显示器的色度特征化模型。该模型的思想起源于印刷技术中的底色去除(UCR)方法,其颜色混合方式不是将混合颜色视为红、绿、蓝三个通道的混合相加,而是将其表示为三通道混合色(灰)与双通道混合色(黄、品、青)以及单通道色(红、绿、蓝)的混合相加,即

$$P_C = P_{Gr}(d_{Gr}) + [P_j(d_j) - P_j(d_{Gr})] + [P_i(d_i) - P_i(d_j)] + P_0, \quad (1)$$

式中 P_C 为混合颜色的三刺激值, P_0 为黑点的三刺激值, d_i, d_{Gr}, d_j 分别表示 d_R, d_G, d_B 三色通道驱动值中取值最大、最小和居中的驱动值,即 $d_{Gr} \leq d_j \leq d_i, P_i, P_j, P_{Gr}$ 分别为 i 通道, j 通道和 Gr(灰)通道的三刺激值,其中 $i \in \{R, G, B\}, j \in \{C, M, Y\}$ 。例如,驱动值为 d_R, d_G, d_B (设 $d_B \leq d_G \leq d_R$) 的颜色可表示为

$$P(d_R, d_G, d_B) = P_B(d_B) + [P_Y(d_G) - P_Y(d_B)] + [P_R(d_R) - P_R(d_G)] + P_0. \quad (2)$$

Masking 模型的颜色混合方式与其他常用色度特征化模型有所不同,该方式与液晶显示器的显色机制更为相符。Masking 模型通过替代相加的方式,在一定程度上能消除 LCD 通道互扰和色品变化的影响,因而能达到较高的精度。

虽然 Masking 模型的颜色混合方式可以在一定程度上减小通道相加性误差,但当 LCD 的通道驱动值较高时其通道独立性较差^[8],此时该混合方式也会有较大误差。当预测颜色的驱动值 d_i, d_j, d_{Gr} 取值较为接近时,(1)式中 $[P_j(d_j) - P_j(d_{Gr})]$ 与 $[P_i(d_i) - P_i(d_j)]$ 两项的值均较小,故其引起的相加性误差也较小;但当 d_i, d_j, d_{Gr} 的取值相差较大

时, $[P_j(d_j) - P_j(d_{Gr})]$ 与 $[P_i(d_i) - P_i(d_j)]$ 两项中至少有一项的值较大,从而会引起较大的相加性误差。因此,若能减小 Masking 模型在各驱动值相差较大情况下的误差,便可有效提高其模型的预测精度,而本文正是在此基础上提出了 SC 模型。

3 分空间补偿模型

3.1 模型原理

分空间补偿(SC)模型是将设备相关的 RGB 颜色空间分为 8 个子空间,在不同子空间内选取一定的训练样本,计算出样本的实测三刺激值与 Masking 模型的预测三刺激值之差,将此差值与各通道驱动值之间的函数关系采用二次多项式进行拟合,从而可以对每一个待测点得到其 Masking 模型的预测差值,而模型的最终预测三刺激值为 Masking 模型的预测三刺激值与预测差值之和。

基于 SC 模型进行色度特征化时,首先通过显示器的通道独立特性将单通道的驱动值分为两段,即以 N 为分界点,将 RGB 空间分为 8 个子空间。理论上也可以对 R, G, B 三色通道分别采用不同的分界点,但在研究中的先期测试结果表明其预测精度并无明显提高,故对三通道采用统一分界点 N 。然后,这 8 个子空间又可以分为:

- 1) 三色通道的驱动值都大于 N 或都小于 N , 共有 2 个子空间;
- 2) 三色通道的驱动值中只有一个大于 N , 共有 3 个子空间;
- 3) 三色通道的驱动值中有两个大于 N , 共有 3 个子空间。

对于第 1 类子空间,Masking 模型的颜色混合方式具有优势,预测精度较高,因此不需加入预测差值项,则模型的预测三刺激值为

$$P_1 = P_M, \quad (3)$$

式中 P_M 为 Masking 模型的预测三刺激值。

对于第 2 类子空间,模型预测的三刺激值是 Masking 模型预测值与预测差值之和,

$$P_2 = P_M + P_{\text{dif}}, \quad (4)$$

其中预测差值 P_{dif} 可以表示为各色通道驱动值的函数,即

$$P_{\text{dif}} = c_1 + c_2 \times d_R + c_3 \times d_G + c_4 \times d_B + c_5 \times d_i \times d_j, \quad (5)$$

式中 $c_1 \sim c_5$ 为拟合系数,其取值由训练样本拟合得到; d_R, d_G, d_B 为三色通道的驱动值,而 d_i 为其中大于 N 的通道对应的驱动值,考虑到驱动值较大的通

道引入的相加性误差较大,因此在拟合时对其加上二次项 $d_i \times d_i$,以增加其影响权重。同时,由于 P_{dif} 为三刺激值的差值,其取值范围很小,故不必要对每个通道驱动值都使用二次项,采用过多的项数会带来冗余的计算而对精度的提高作用不大。

对于第 3 类子空间,与第 2 类子空间相似,如(4)式所示,模型预测的三刺激值仍是 Masking 模型预测值与预测差值之和,但在 P_{dif} 的多项式函数中采用二次项 $d_i \times d_i$ 和 $d_j \times d_j$ 两项(其中 d_i 和 d_j 分别为三色通道中大于 N 的两个通道驱动值),即

$$P_{\text{dif}} = c_1 + c_2 \times d_R + c_3 \times d_G + c_4 \times d_B + c_5 \times d_i \times d_i + c_6 \times d_j \times d_j, \quad (6)$$

式中 c_6 也为拟合系数。

在 SC 模型中,要拟合的目标值在很大程度上受到驱动值较高通道的非线性影响,且在本文的研究中已通过实验证明通道交叉项对精度的提高并无明显作用,故在 P_{dif} 的表达式中未采用各通道驱动值的交叉项 $d_R \times d_G$ 及 $d_R \times d_G \times d_B$ 等项。

3.2 模型参数确定

对于第 2 类和第 3 类子空间,以驱动值 $0, S_1, S_2, L_1, L_2, 255$ (其中 $0 \leq S_1 < S_2 \leq N \leq L_1 < L_2 \leq 255$) 的组合形式产生相应子空间内的训练样本点。

对第 2 类子空间,以驱动值 S_1, S_2, T_1 (其中包括组合 $\{S_1, S_1, T_1\}$ 和 $\{S_2, S_2, T_1\}$,且有 $T_1 \in \{L_1, L_2, 255\}$) 按不同顺序组合形成分布于相应子空间内的颜色点,作为该类子空间的训练样本,其中每个子空间有 12 个样本点,共计 36 个训练样本点。对第 3 类子空间,与第 2 类子空间类似,以驱动值 L_1, L_2, T_2 (其中 $T_2 \in \{0, S_1, S_2\}$) 按不同顺序组合成分布于相应子空间内的颜色点,每个子空间产生 12 个样本点,该类子空间共有 36 个训练样本点。

利用这些分布在不同子空间内的训练样本,便可以拟合出预测差值多项式中的各项系数,即确定了预测差值 P_{dif} 的表达式。在实际应用中,对于任意输入的驱动值都可计算出其预测差值,从而进一步获得基于分空间补偿模型的预测三刺激值。

在 SC 模型中,子空间划分的分界点 N 的确定与液晶显示器的通道独立特性有关,通过对 LCD 通道独立性的测试和分析可获得 N 的优化取值。以一定的驱动值间隔,分别测量 LCD 的红、绿、蓝和灰色通道的三刺激值,在移除黑点后将红、绿和蓝色通道的三刺激值相加得到灰色通道的三刺激值,然后与测量得到的灰色通道三刺激值进行比较,其二者之差的绝对值大小反映了 LCD 的通道独立特性。

如图 1 所示为对本文实验中的一台 LCD 测试后得到的三刺激值之差的绝对值 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 与其对应通道驱动值之间的关系,而 N 值的确定可在 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 中某一项到达半峰值点处对应的通道驱动值附近进行优化选取。由于不同液晶显示器的通道独立特性受通道驱动值的影响情况有所不同,不同 LCD 的最优分界点 N 也不尽相同,故在使用 SC 模型对显示器特征化之前要先测试其通道独立特性,确定分界点 N 的大致取值范围,再相应选择子空间样本点,以获得最佳模型精度。

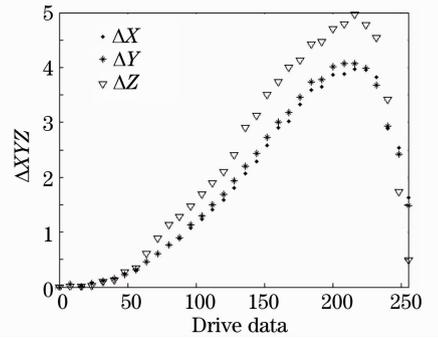


图 1 子空间分界点 N 的确定

Fig. 1 Determination of the boundary point N

根据通道相互干扰的强弱进行子空间划分后,通道驱动值相差较大的颜色点便被分到不同的子空间中,因而使这些通道干扰较大的颜色点可得到相应的补偿处理,最终提高模型的色度特征化精度。

4 实验

4.1 实验设备

为了评价色度特征化模型对于液晶显示器的颜色预测精度并讨论其适用性,本研究设计实施了相应的色度特征化实验对 4 台 LCD 进行了测试和比较。

1) 液晶显示器 4 台。高端专业液晶显示器 LCD-Eizo; EIZO ColorEdge241 W, 屏幕尺寸 24.1 inch (1inch=25.4 mm), 分辨率 1920 pixel×1200 pixel。中等商用液晶显示器 LCD-Benq; BENQ G900WAD, 屏幕尺寸 19 inch, 分辨率 1440 pixel×900 pixel。普通商用液晶显示器 LCD-SS19 和 LCD-SS17。LCD-SS19; SAMSUNG SyncMasterE1920NW, 屏幕尺寸 19 inch, 分辨率 1440 pixel×900 pixel; LCD-SS17; SAMSUNG SyncMaster740N+, 屏幕尺寸 17 inch, 分辨率 1280 pixel×1024 pixel。这 4 台 LCD 的最大白场亮度分别为 105, 135, 106 和 115 cd/m²。

2) 显卡: NVIDIA Quadro VX200, 显存数字化

位数为 8。

3) 测量仪器: Photo Research 公司的光谱辐射计 PR-650。

4.2 实验条件

按照 IEC 标准^[9], 所有的显示和测试工作均在暗室中进行, 其实验装置如图 2 所示。测量仪器 PR-650 的物镜光轴垂直于 LCD 屏幕的显示平面, 测量距离 d 为屏幕高度 h 的 4 倍, 待测色块显示在屏幕正中央, 其尺寸为屏幕高度的 $1/5$, 屏幕的其它区域设置为黑色。

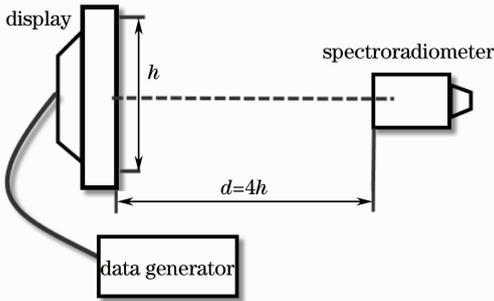


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

实验前, 先将液晶显示器和测量仪器分别预热 2 h。为了尽量减少液晶显示器和测量仪器的不稳定性可能对测量结果产生的影响, 每个测试色样都在稳定显示 5 s 后再进行测量, 且每次测色都采用连续测量 3 次取平均值作为一个样本点的颜色测试结果。

4.3 实验数据采集

已有研究表明^[5,6], 每个通道选择 17 个训练样本点即可得到较好的模型精度, 因此本研究以驱动值间隔 16 来选取训练样本。同时, 为了与本文提出的 SC 模型进行比较分析, 在本文的实验中还分别评估测试了 6 种常用的相关特征化模型, 其中包括增益-偏置-伽马模型^[5,10] (Gain-Offset-Gamma, GOG, 针对 CRT 特性提出的特征化模型)、假定色品恒定的分段线性插值 (PLCC)^[11]、假定色品变化的分段线性插值 (PLVC)^[12]、S-CurveI 和 S-CurveII^[13] (根据 LCD 的阶调特性曲线呈 S 型而提出的特征化模型, 并根据有无通道干扰项而分为 I 型和 II 型)、Masking 模型等。

实验数据的采集包括:

1) 训练样本: 以 16 为驱动值采样间隔, 分别测量 LCD 的红、绿、蓝、青、品、黄、灰等 7 个通道的三刺激值, 共计 119 个颜色点, 作为与分空间补偿模型比较的 6 种相关常用特征化模型的训练样本, 其中

GOG 模型仅需要灰通道样本, Masking 模型需 7 个通道样本, 其他模型则需红、绿、蓝 3 个通道样本。对于分空间补偿模型, 为了尽量均匀地在各子空间中选取合适的颜色点, 取 $S_1 = 40, S_2 = 80, L_1 = 170, L_2 = 210$, 共计 72 个训练样本点。

2) 采用 100 个随机分布在 RGB 设备颜色空间中的测试颜色点, 统一作为各色度特征化模型的检验样本。

5 实验结果及分析

为消除黑点对特征化精度的影响^[14], 本研究在基于各模型进行色度特征化时已对训练样本进行了黑点处理, 最后再加上黑点三刺激值而得到相应模型的预测结果。采用 100 个随机分布在 RGB 颜色空间中的测试点作为检验样本, 用 CIELAB 色差公式^[15,16] 计算各模型对检验样本的预测三刺激值与其对应实测值之间的色差, 并以此评价各特征化模型的精度。表 1 为分别采用 GOG, PLCC, PLVC, S-CurveI, S-CurveII, Masking 模型以及不同参数的 SC 模型对 4 台液晶显示器进行色度特征化实验而获得的平均预测色差和最大色差, 定义 ΔE_{ab}^* 为色差。表中分别列出了 SC 模型在分界点 N 不同取值情况下的模型精度, 并与其他常用特征化模型做了比较。

与其他模型相比, SC 模型对 4 台液晶显示器的色度特征化精度都有不同程度的提高。由表 1 可见, 对于高端专业液晶显示器 LCD-Eizo, 各个模型的平均预测色差都在 1.0 CIELAB 单位以下, 其中 SC 模型在 $130 \leq N \leq 160$ 时其预测精度均优于 Masking 模型, 最高精度达 0.2783 CIELAB 单位; 对于中等商用液晶显示器 LCD-Benq, GOG, S-CurveI, S-CurveII 和 PLCC 模型的平均预测色差都在 1.0 CIELAB 单位以上, PLVC 模型的预测精度较高, 其平均色差为 0.5316, Masking 模型的预测精度在已有常用模型中最高, 其平均色差达 0.3235 CIELAB 单位, 而 SC 模型在 $130 \leq N \leq 160$ 时仍达到了与之相当甚至略优的预测精度; 对于 LCD-SS19 和 LCD-SS17 两台普通商用液晶显示器, GOG, S-CurveI, S-CurveII, PLCC 和 PLVC 模型的平均色差和最大色差均明显较差, 通常不能很好地满足精确显示颜色的性能要求, Masking 模型的预测精度则相对优良, 而 SC 模型的最优平均预测色差分别从 Masking 模型的 1.0627 CIELAB 和 2.2163 CIELAB 降低至 0.7090 CIELAB 和 1.2216 CIELAB 单位, 其精度较

Masking 模型有显著提高,这种性能优势在颜色管理中有重要的应用意义。同时,由表 1 可知,对于所有 4 台 LCD 其 SC 模型的预测精度受 N 值局部变化的影响并不太敏感,即 N 在某个取值范围内均可得到满意的模型精度,但不同 LCD 达到最佳或满意预测精

度的 N 值或其范围是不同的,这是由于其通道独立性不同所致,故在特征化之前应首先测试和分析 LCD 的颜色特性。综上,SC 模型对于不同液晶显示器的色度特征化均表现出优于其他常用模型的预测性能。

表 1 SC 模型与其他常用模型特征化精度的比较

Table 1 Color difference comparison among sub-space compensation (SC) model and other conventional models

Models	ΔE_{ab}^* for LCD-Eizo		ΔE_{ab}^* for LCD-Benq		ΔE_{ab}^* for LCD-SS19		ΔE_{ab}^* for LCD-SS17	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
GOG	0.6778	2.5010	2.4703	8.7256	3.5669	12.0777	6.8438	25.8069
S-Curve I	0.8435	3.1517	2.3056	5.8653	4.4773	11.1517	5.0423	13.2441
S-Curve II	0.5942	2.4470	1.3053	3.2420	3.7672	7.6301	4.5875	12.7255
PLCC	0.8458	3.4607	1.8022	4.3177	3.3251	9.5896	4.3895	12.8609
PLVC	0.5362	0.9800	0.5316	1.4266	1.5388	2.5783	2.7242	4.5343
Masking	0.3251	0.8432	0.3235	0.9530	1.0627	2.2652	2.2163	4.6648
SC ($N=110$)	0.3452	1.7436	0.4319	2.0000	0.9546	4.3069	2.8154	19.6165
SC ($N=120$)	0.3296	1.7436	0.3694	1.9587	0.7930	3.6226	2.0438	14.0481
SC ($N=130$)	0.3089	1.7436	0.3199	0.9143	0.7110	2.1019	1.4167	8.0286
SC ($N=140$)	0.2894	0.8423	0.3236	0.8836	0.7090	2.1019	1.2216	3.9438
SC ($N=150$)	0.2783	0.8423	0.3210	0.8579	0.7561	2.0101	1.2727	3.9438
SC ($N=160$)	0.2816	0.8423	0.3624	1.8533	1.1610	4.9953	1.4074	3.9438

6 结 论

提出了一种针对液晶显示器色度特征化的新模型即 SC 模型,对掩模模型预测精度较低的颜色点进行分空间处理,提高了 Masking 模型的整体性能。通过对 4 台液晶显示器的测试结果表明,SC 模型有效提高了液晶显示器的色度特征化精度,与其他常用色度特征化模型相比其颜色预测性能最优。对于已有常用模型特征化精度较高的 LCD,分空间补偿模型仍能进一步改善其显色性能,而对于现有常用模型表现不佳的 LCD,SC 模型则能显著提高其色度特征化精度。因此,SC 模型不仅适用于不同液晶显示器的色度特征化,并且均具有满意的颜色预测优势。

参 考 文 献

- Han Weijun, Shi Junsheng, He Ping *et al.*. Color reproduction from desktop display to projector based on visual matching[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 748~752
- Ma Jian, Xu Haisong, M. Ronnier Luo *et al.*. Color appearance and visual measurements for color samples with gloss effect[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 869~872
- Zhang Xiandou, Xu Haisong. An adaptively spatial color gamut mapping algorithm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 873~877

- Huang Min, Liao Ningfang, Liu Haoxue *et al.*. Cathode-ray tube color perceptible color difference threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 599~603
- 黄敏, 廖宁放, 刘浩学等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 599~603
- D. L. Post, C. S. Calhoun. An evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors[J]. *Color Research and Application*, 1989, **14**(4): 172~186
- D. L. Post, C. S. Calhoun. Further evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors[J]. *Color Research and Application*, 2000, **25**(2): 90~104
- Nobuhiko Tamura, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake. Masking model for accurate colorimetric characterization of LCD[J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2003, **11**(2): 1~7
- Zhang Xiandou, Xu Haisong. Piecewise partition model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1719~1723
- 张显斗, 徐海松. 液晶显示器色度特征化的分段分空间模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1719~1723
- Multimedia systems and equipment Colour measurement and management. Part 4: equipment using liquid crystal display panels[S]. IEC61966-4, 2000, 7~8
- R. S. Berns, R. J. Motta, M. E. Gorzynski. CRT colorimetry, part I: theory and practice[J]. *Color Research and Application*, 1993, **18**(5): 299~314
- R. S. Berns. Methods for characterizing CRT displays[J]. *Displays*, 1996, **16**(4): 173~182
- Jean-Baptiste Thomas, Jon Y. Hardeberg, Irene Foucherot *et al.*. The PLVC display color characterization model revisited[J]. *Color Research and Application*, 2008, **33**(6): 449~460

- 13 Youngshin Kwak, Lindsay W. Macdonald. Method for characterizing an LCD projection display[C]. *SPIE*, 2001, **4294**: 110~118
- 14 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
- 15 Wang Zhehong, Xu Haisong. Evaluation of color difference formulae based on the correlation between visual tolerances and hue angles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1838~1841
汪哲弘, 徐海松. 基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1838~1841
- 16 Huang Min, Wang Lili, Liu Haoxue. Study on the influence of gloss on printed samples medium-small color difference with the psychophysical method of comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3359~3366
黄 敏, 王丽丽, 刘浩学. 用比较法研究光泽度对印刷样品的中小色差影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3359~3366