# CIE DE2000 在彩色扫描仪特征化色差评价中的应用

李 斌，张逸新
(江南大学，无锡 214122)

**摘要：** 采用支持向量回归机(SVR)建立了 RGB 色空间到 CIE Lab 色空间的转换模型，分别采用 CIE DE2000 与 CIE 1976L* a* b* 色差公式对模型精度进行色差计算。采用 CIE DE2000 色差公式得到的测试组色差平均值、最大和最小值分别为 2.659 7，5.219 4 和 0.206 5，采用 CIE 1976L* a* b* 色差公式得到的测试组色差平均值、最大和最小值分别为 2.865 6，5.879 1 和 0.376 9。实验结果表明，CIE DE2000 与 CIE 1976L* a* b* 色差公式计算的色差值基本一致，均符合彩色扫描仪特征化精度要求，可将 CIE DE2000 色差公式用于扫描仪特征化管理中。

**关键词：** 扫描仪；扫描仪特征化；支持向量回归机(SVR)；CIE DE2000
**中图分类号：** TS803.6；TS801.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2011)13-0082-04

## Application of CIE DE2000 in Evaluation of Color Difference in Color Scanner Characterization

*LI Bin*, *ZHANG Yi-xin*
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Transformation model of RGB color space to CIE LAB color space was established by using support vector regression (SVR). CIE DE2000 and CIE 1976L* a* b* color-difference formulas were used in calculation of accuracy of the model. Based on CIE DE2000 color-difference formula, the average, maximum and minimum color differences of text set are 2.659 7, 5.219 4 and 0.206 5. Based on CIE 1976L* a* b* color-difference formula, the corresponding results are 2.865 6, 5.879 1 and 0.376 9. The results showed that color differences are basically the same by using CIE DE2000 color-difference formula and CIE 1976L* a* b* color-difference formula which accord with the accuracy of the color scanner characterization. Therefore, CIE DE2000 color-difference formula can be used in the management of scanner characterization.

**Key words:** scanner; scanner characterization; support vector regression; CIE DE2000

彩色扫描仪特征化是色彩管理中较为重要的一个环节，其特征化处理精度的高低直接影响色彩再现的品质，目前，彩色扫描仪特征化多采取色度特征化[1]的方法，即建立扫描仪 RGB 色空间到与设备无关的 CIE Lab 色空间的转换模型，寻找 *RGB* 值与 CIE *Lab* 值之间的映射关系，并通过色差计算来评价模型精度，因此，色差公式的选择就显得尤为重要。随着色空间均匀性的研究，色差公式也在不断改进，CIE DE2000 色差公式被认为是目前理论上最好的色差公式，其应用越来越广泛，并对其进行的理论研究也在不断深入。

刘浩学[2-3]、黄敏[4-5]、郑元林[6-7]等已分别对 CIE DE2000 色差公式的均匀性、视觉一致性及与其他色差公式的比较做了大量的理论研究和主观评价实验。研究结果表明，CIE DE2000 色差公式符合人眼视觉特性，与实际视觉感觉更为一致。

目前，在彩色扫描仪特征化领域，已有的研究[8-12]都采用 CIE 1976L* a* b* 色差公式作为色差评价标准，对特征化模型精度进行色差计算。随着色差公式的改进，彩色扫描仪特征化处理应引入 CIE DE2000 色差公式。

由于彩色扫描仪特征化具有高度非线性的特点，

**收稿日期：** 2011-05-09
**作者简介：** 李斌(1987－)，男，山东枣庄人，江南大学硕士生，主攻印刷色彩管理。

并且支持向量机[12]在解决该类问题时具有精度和时间的优势，因此笔者采用支持向量回归机(SVR)建立色空间转换模型，采用 CIE DE2000 色差公式对模型精度进行评价，并且与采用 CIE 1976L* a* b* 色差公式的评价结果进行比较。

## 1　支持向量回归机(SVR)非线性拟合原理[13]

给定训练样本：

$D=\{(x_1,y_1),\cdots,(x_i,y_i),\cdots(x_l,y_l)\}$

其中：$x_i\in R^n$，表示 $n$ 维实数空间；$y_i\in R$，表示实数域。

将输入数据映射到一个高维特征空间 $Z$，用线性函数 $f(x)$ 拟合训练样本，函数由下式给出：

$$f(x)=w\varphi(x)+b \tag{1}$$

式(1)中：$\varphi(x)$ 为 $x_i$ 到高维特征空间 $Z$ 的非线性映射。

假设所有样本数据在精度 $\varepsilon$ 下无误差地拟合，线性回归问题可以转化为求解下面的优化问题：

$$\Phi(\omega)=\min\frac{1}{2}\|\omega\|^2 \tag{2}$$

约束条件为：

$$|y_i-w\varphi(x_i)-b_i|\leqslant\varepsilon\quad(i=1,2,\cdots,l)$$

考虑到存在拟合误差，引入松弛变量 $\xi_i\geqslant0$ 和 $\xi_i^*\geqslant0$，则上述问题变为：

$$\Phi(\omega,\xi)=\min\left\{\frac{1}{2}\|\omega\|^2+C\sum_{i=1}^{l}(\xi_i+\xi_i^*)\right\} \tag{3}$$

约束条件为：

$$\begin{cases}y_i-w\varphi(x_i)-b\leqslant\xi_i+\varepsilon\\ w\varphi(x_i)+b-y_i\leqslant\xi_i+\varepsilon\\ \xi_i,\xi_i^*\geqslant0;\ i=1,2,\cdots,l\end{cases}$$

式(3)中 $C>0$，它控制了对超出误差限的样本的征罚程度。

按照最优化理论中凸二次规划的解法，引入 Largrange 函数可以将上述问题转化为其对偶问题：

$$\max_{\alpha,\alpha^*}W(\alpha,\alpha^*)=\max_{\alpha,\alpha^*}\left\{-\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{l}(\alpha_i-\alpha_i^*)(\alpha_j-\alpha_j^*)\cdot K(x_i,x_j)-\varepsilon\sum_{i=1}^{l}(\alpha_i-\alpha_i^*)+\sum_{i=1}^{l}y_i(\alpha_i-\alpha_i^*)\right\} \tag{4}$$

约束条件为：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{l}(\alpha_i-\alpha_i^*)=0\\ 0\leqslant\alpha_i,\alpha_i^*\leqslant C\end{cases}\quad(i=1,2,\cdots,l)$$

式(4)中：$\alpha_i,\alpha_i^*$ 为每个样本对应的拉格朗日乘子；$K(x_i,x_j)$ 为按照 Mercer 定理定义的核函数。

根据 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)[14]定理，有：

$$\alpha_i\cdot\alpha_i^*=0 \tag{5}$$

其中 $\alpha_i$ 和 $\alpha_i^*$ 的非零值对应的样本就是支持向量。

最终可得回归函数的表达式：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{l}(\alpha_i-\alpha_i^*)K(x_i,x_j)+b \tag{6}$$

## 2　CIE DE2000 色差评价公式

为了进一步改善色差评价的视觉一致性，国际照明委员会于 2001 年正式推荐了 CIE2000($\Delta L'$，$\Delta C'$，$\Delta H'$)色差公式，简称为 CIE DE2000。

CIE DE2000 色差公式的完整表述形式如下：

$$\Delta V=k_E^{-1}\Delta E_{00} \tag{7}$$

式中：$\Delta V$ 为被感知的色差；$\Delta E_{00}$ 为用 CIE DE2000 计算的总色差；$k_E^{-1}$ 为总色差的视觉敏感度。对于一般工业应用，可不考虑 $k_E^{-1}$，而直接使用 $\Delta E_{00}$ 来表示色差感觉。

$$\Delta E_{00}=\sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_LS_L}\right)^2+\left(\frac{\Delta C'}{k_CS_C}\right)^2+\left(\frac{\Delta H'}{k_HS_H}\right)^2+R_T\frac{\Delta C'}{k_CS_C}\cdot\frac{\Delta H'}{k_HS_H}} \tag{8}$$

式(8)中：$\Delta L'$，$\Delta C'$，$\Delta H'$ 分别表示明度差、彩度差和色调差，并按下列各式计算：

$$\Delta L'=L'_{\mathrm{b}}-L'_{\mathrm{s}} \tag{9}$$

$$\Delta C'=C'_{\mathrm{b}}-C'_{\mathrm{s}} \tag{10}$$

$$\Delta H'=2(C'_{\mathrm{b}}C'_{\mathrm{s}})^{1/2}\sin\frac{\Delta h'}{2} \tag{11}$$

式中：b 和 s 分别表示颜色样品和标准色样。其中 $\Delta h'$ 为色调角之差，即 $\Delta h'=h'_{\mathrm{b}}-h_{\mathrm{s}}'$；$L'=L^*$，$a'=a^*(1+G)$，$b'=b^*$，$L^*$，$a^*$，$b^*$ 分别为 CIE1976 L* a* b* 的明度值和色度值；$G$ 为红绿轴的调整因子：

$$G=\frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^*}^7}{\overline{C_{ab}^*}^7+25^7}}\right) \tag{12}$$

式(8)中，$S_L$，$S_C$，$S_H$ 为权重函数，用来校正颜色空间的均匀性，并按下列各式计算：

$$S_L=1+\frac{0.015(\overline{L'}-50)^2}{\sqrt{20+(\overline{L'}-50)^2}} \tag{13}$$

$$S_C=1+0.045\,\overline{C'} \tag{14}$$

$$S_H = 1 + 0.015\,\overline{C'}T \tag{15}$$

$$T = 1 - 0.17\cos(\overline{h'} - 30) + 0.24\cos(2\,\overline{h'}) + 0.32\cos(3\,\overline{h'} + 6) - 0.20\cos(4\,\overline{h'} - 63) \tag{16}$$

式(8)中，$R_T$ 为旋转函数，用来校正蓝色区域分辨椭圆主轴方向的偏转，并按下式计算：

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) \cdot R_C \tag{17}$$

式(17)中：$\Delta\theta$ 是由色调决定的旋转角度；$R_C$ 是根据彩度变化的旋转幅度，分别由下式计算：

$$\Delta\theta = 30\exp\left[-\left(\frac{\overline{h'} - 275}{25}\right)^2\right] \tag{18}$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\overline{C'}^7}{\overline{C'}^7 + 25^7}} \tag{19}$$

式(8)中，$k_L$，$k_C$，$k_H$ 为与使用条件相关的校正系数，在 CIE 给定的标准观测条件[15]下，$k_L = k_C = k_H = 1$。

## 3 特征化实验

### 3.1 设备和材料

选用 ANSI/ISOIT8.7/2[16]色卡作为色靶，并选用型号为 Microtek ScanMaker 3750i 的扫描仪，对其进行校准后，将扫描分辨率设置为 300 dpi(每英寸点数)，扫描得到每个色块的 *RGB* 值。选用 X-Rite eye-one，进行校准后，测得标准照明体 D65 下每个色块的 CIE *Lab* 值($L^*$，$a^*$，$b^*$)。

### 3.2 特征化模型

基于 SVR 非线性拟合原理，分别寻找 *RGB* 值与 $L^*$，$a^*$，$b^*$ 值之间的非线性映射关系，转换关系可由下式表示：

$$\begin{aligned} L_i &= F_L(A_i) \\ a_i &= F_a(A_i) \\ b_i &= F_b(A_i) \end{aligned} \tag{20}$$

式中：$A$ 为 *RGB* 值的列向量；$L$，$a$，$b$ 分别为 $L^*$，$a^*$，$b^*$ 值的标量；$i$ 代表色块编号；$F(\cdot)$为非线性映射关系。

### 3.3 方案与结果分析

将 IT8.7/2 标准色卡中的 288 个色块按其在色卡上的排列顺序均匀分为 2 组，其中 144 个色块作为训练样本，另外 144 个色块作为测试样本。采用 matlabR2009a 调用 libsvm 工具箱，选用 SVM 类型为 epsilon－SVR，$c$ 值与 $g$ 值设置为默认，$p = 0.01$，对特征化模型进行数值模拟，并采用 CIE DE2000 和 CIE 1976L* a* b* 色差公式进行色差计算来评价模型精度。

测试组 $\Delta E_{00}$，$\Delta E^*_{ab}$ 色差图分别见图 1 和 2。

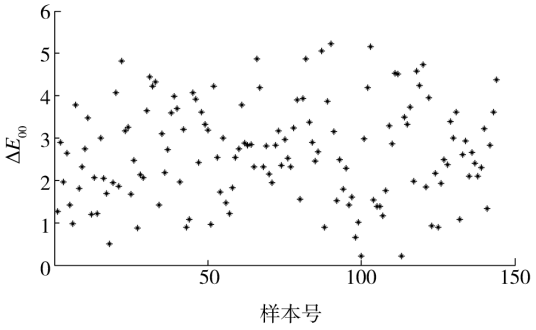


图 1 测试组 $\Delta E_{00}$ 误差

Fig. 1 The error graph of test set $\Delta E_{00}$

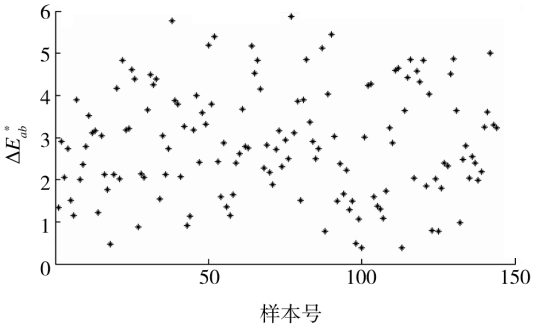


图 2 测试组 $\Delta E^*_{ab}$ 误差

Fig. 2 The error graph of text set $\Delta E^*_{ab}$

$\Delta E_{00}$，$\Delta E^*_{ab}$ 计算的色差平均值、最大值和最小值比较见表 1。

**表 1 $\Delta E_{00}$ 和 $\Delta E^*_{ab}$ 色差的平均值、最大值和最小值**

**Tab. 1 The mean, max and min color differences of $\Delta E_{00}$ and $\Delta E^*_{ab}$**

| | 平均值 | 最大值 | 最小值 |
|---|---|---|---|
| $\Delta E_{00}$ | 2.659 7 | 5.219 4 | 0.206 5 |
| $\Delta E^*_{ab}$ | 2.865 6 | 5.879 1 | 0.376 9 |

从图 1 和 2 可以看出，CIE DE2000 和 CIE 1976L* a* b* 色差公式计算得到的色差基本一致，从表 1 可以看出，CIE DE2000 色差公式计算得到的色差平均值、最大值和最小值略小于 CIE 1976L* a* b* 色差公式，两者的色差平均值及最大值都小于 6，符合色彩管理要求[17]，因此，CIE DE2000 色差公式可作为色差评价标准引入扫描仪特征化管理。

## 4　结论

采用支持向量回归机(SVR)进行了扫描仪特征化处理,并采用 CIE DE2000 色差公式对特征化模型精度进行了色差计算。研究表明,CIE DE2000 色差公式可用于扫描仪特征化模型的精度评价。随着 CIE DE2000 色差公式应用的不断扩大,应将其应用于扫描仪特征化管理中。

**参考文献:**


[1]　王勇,徐海松.基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J].光学学报,2007,27(6):1135－1138.

[2]　刘浩学.CIE 均匀颜色空间与色差公式的应用[J].北京印刷学院学报,2003,11(3):3－8.

[3]　刘浩学.用 Munsell 颜色检验色差公式[C]//母国光.中国光学学会 2004 年学术大会论文集.杭州:中国光学学会,2004.

[4]　黄敏,刘浩学,徐艳芳,等.CIE94 CIEDE2000 色差公式均匀性分析[J].包装工程,2006,27(6):153－156.

[5]　黄敏,廖宁放,徐艳芳.基于中国颜色体系的色差公式分析[J].光学技术,2007,33(增刊):46－48.

[6]　郑元林,杨淑蕙,周世生,等.色差公式 CMC(1: c)、CIE94 和 CIEDE2000 的对比研究[J].包装工程,2006,27(5):127－128.

[7]　郑元林,周世生,张林林,等.基于印刷数据集 CIELAB 系列色差公式的评价研究[J].中国印刷与包装研究,2010(2):60－64.

[8]　KANG H R, ANDERSON Peter G. Neural Network Application to the Color Scanner and Printer Calibrations[J]. Electronic Imaging ,1992,1(2):125－135.

[9]　KANG H R. Color Scanner Calibration[J]. J Imaging Science and Technology,1992,36(2):162－170 .

[10]　徐艳芳,刘文耀,左坤隆,等.彩色扫描仪的特征化[J].光学精密工程,2003,12(1):15－20.

[11]　王勇,徐海松.基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J].光学学报,2007,27(6):1135－1138.

[12]　李斌,张扬,张逸新. 基于 SVM 的彩色扫描仪特征化[J].包装工程,2011,32(3):81－83.

[13]　VAPNIC V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York:Springer,1995.

[14]　FLETCHER R. Practical Methods of Optimization: Volume 2 Constrained Optimization[M]. Wiley,New York,1981.

[15]　LUO M R,CUI G,RIGG B. The Development of the CIE 2000 Colour～diference Formula: CIEDE2000[J]. Col Res Appl,2001,26:340－350.

[16]　MACDONALD L W. Developments in Color Management Systems[J]. Displays,1996,16(4):203－211.

[17]　胡成发.印刷色彩与色度学[M].北京:印刷工业出版社,1993.


(上接第 81 页)

度也会更好,从而油墨的转移量增大;而印刷速度的提高,油墨转移的时间减少,直接导致油墨转移量的减少。

从上述分析也可得知:网穴的深度也影响油墨的转移性能,深度小,则容易释墨,网穴深,则释墨性差,网穴的释墨性能对油墨的粘度更为敏感。

## 3　结论

(1)凹版印刷油墨转移率随着油墨粘度的增加而减少;(2)凹版印刷油墨转移率受承印材料表面性能影响,平滑度高的承印物有利于油墨的转移;(3)凹版印刷油墨转移率随着印刷压力的增加而增加,随着印刷速度的增加而下降;(4)凹版印刷油墨转移率与印版网穴有关,网穴的形状、深度、内壁质量等都对油墨转移产生直接的影响。

**参考文献:**


[1]　胡更生.凹版印刷故障处理[M].北京:化学工业出版社,2009.

[2]　吕新广,赵美京.网穴形状对凹版印刷特性的影响[J].包装工程,2008,29(10):112－113.

[3]　黄灵阁,王雪,陈惠兰,等.凹版印刷中刀线和套印不准的分析[J].包装工程,2010,31(19):77－79.

[4]　冯瑞乾.印刷原理与工艺[M].北京:印刷工业出版社,1999.

[5]　胡更生,张正修,唐少炎,等.凹版印刷原理及工艺[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.

[6]　张琳,张美云,杨旭.凹版印刷中油墨温度影响的研究[J].包装工程,2009,30(2):85－86.

[7]　向阳,王捷先,齐晓堃.印刷材料及适性[M].北京:印刷工业出版社,2000.

[8]　卑江艳.凹版印刷[M].北京:化学工业出版社,2002.