

多投影大屏幕拼接显示系统中投影仪颜色空间转换模型研究

刘真¹, 于明伟², 朱明³

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093; 3. 河南工程学院, 郑州 451191)

摘要: 为了更好地发挥投影仪在大屏幕拼接显示系统中的作用, 需要对投影仪的颜色系统进行深入研究, 使之达到颜色一致的效果。以 2 台投影仪组成的拼接显示系统为例, 比较了阶调曲线法、颜色主刺激值修正算法和 BP 神经网络在投影仪颜色空间转换过程中的特点, 得出了 BP 神经网络是投影仪颜色空间转换的最优模型, 可推广应用于同类型颜色空间转换模型的研究。

关键词: 多投影大屏幕拼接显示系统; ICC 色彩管理机制; 颜色一致性; 阶调曲线法; 颜色主刺激值修正算法; BP 神经网络

中图分类号: TS801.3; TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)03-0089-05

Research on Conversion Model for Large Format Tiled Multiple Projectors Display System

LIU Zhen¹, YU Ming-wei², ZHU Ming³

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 3. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: In order to play well in large format tiled multiple projectors display system, color uniformity should be calibrated. A two-projector tiled system was researched. The methods of tone curve, color principal component correction algorithm, and BP neural network were used in projectors' color space conversion. The result showed BP neural networks is an optimal model and it can promote a wide use of the same color space conversion modeling.

Key words: large format tiled multiple projectors display system; ICC color management system; color uniformity; tone curve method; color principal component correction algorithm; BP neural network

多投影仪拼接形成的大屏幕显示系统,借助于投影仪的可扩展性优势,在大屏幕显示系统领域日渐占据主导地位,已成功应用于图形图像显示、科学计算可视化、工业设计、虚拟仿真等众多领域,逐渐成为解决大屏幕显示问题的主流技术方案。

颜色调整是与几何校正、亮度融合并重的又一影响拼接显示系统质量的关键因素,拼接系统的颜色一致性研究成为备受关注的研究热点^[1-4]。

研究中采用基于矩阵/阶调复制曲线和基于查找表 2 种不同类型的方法来对影响 ICC 特性文件中的

关键因素进行修正。在基于矩阵/阶调复制曲线类型中,提出采用最小二乘法计算阶调曲线和基于颜色主刺激值的修正算法 2 种不同方法,分别对 ICC 特性文件进行修正;在基于查找表类型中提出采用 BP 神经网络的计算方法。通过对 3 种不同计算方法的比较,找出该类型颜色空间转换模型的最优化模型。

1 基于矩阵/阶调复制曲线类型的转换模型

投影仪属于 RGB 类型设备,最基本的颜色空间

收稿日期: 2011-08-30

基金项目: 上海市教委“085”工程建设项目; 2009 年江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX09B_180Z)

作者简介: 刘真(1953—),女,江西人,上海理工大学教授/博士生导师,主要研究方向为数字图文信息处理、色彩再现理论与研究、印刷数字化集成管理。

转换模型的建立是基于矩阵/阶调复制曲线的。

1.1 基于阶调曲线法的颜色调整方法

TRC 曲线的计算,其实质是寻找数据的最佳匹配函数关系,最小二乘法在最优化解中已被证明是一种非常有效的方法,因此研究投影仪特征化的过程中,首先采用最小二乘法求解最佳匹配函数,并借助编程工具,对制作的投影仪 ICC 特性文件进行优化。

对投影仪 ICC 特性文件进行 Gamma 曲线和转换矩阵的优化流程见图 1。

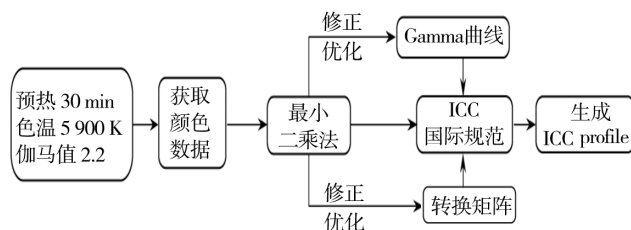


图 1 阶调曲线法颜色调整流程

Fig. 1 Flowchart of color calibration by tone curve method

图 1 中:将投影仪开机调整至初始默认设置,预热 30 min,然后利用 Eye-one 进行颜色数据的测量,利用最小二乘法计算生成特性文件查找表数据,并最终生成优化后的特性文件。

1.1.1 最小二乘法原理拟合 Gamma 曲线

实验中,将 0~255 的数字驱动值分成非均匀的 11 份(即 0, 16, 32, 64, 96, 128, 160, 192, 224, 240, 255,为了兼顾暗调和亮调信息,分别加入 16 和 240 的数字驱动值)。借助 Eye-one XT 和 Measure Tool 测量色块的色度值。部分测量数据见表 1(测量实验

表 1 测量数据(以 R 通道为例)

Tab 1 Measurement data (R channel as example)

R	G	B	X	Y	Z	驱动值	输出值
						R	Y
0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.0	0.3
16.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	16.0	0.3
32.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.4	32.0	0.3
64.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.5	64.0	0.6
96.0	0.0	0.0	1.7	1.2	0.6	96.0	1.2
128.0	0.0	0.0	3.0	2.0	0.7	128.0	2.0
160.0	0.0	0.0	4.7	3.2	1.0	160.0	3.2
192.0	0.0	0.0	7.0	4.6	1.2	192.0	4.6
224.0	0.0	0.0	9.7	6.4	1.5	224.0	6.4
240.0	0.0	0.0	11.2	7.4	1.7	240.0	7.4
255.0	0.0	0.0	12.9	8.5	1.9	255.0	8.5

都是在暗室环境中进行)。

选取单通道 11 个点的数字驱动值作为 x 值(R 通道数字驱动值)、输出值作为 y 值(取 Y 亮度值进行计算),采用最小二乘法拟合曲线,通过对拟合次数的比较发现,选择 2 次拟合得到的曲线的拟合程度最好,相关系数最高,均方差最小,拟合得到的曲线最符合测量数据点的分布形式。

1.1.2 计算转换矩阵

在基于矩阵的 ICC 特性文件中, 3×3 矩阵元素由设备三原色 XYZ 值组成,利用矩阵转换实现不同范围颜色空间信息的转换。矩阵元素是在两通道为零的情况下($R=255, G=0, B=0; R=0, G=255, B=0; R=0, G=0, B=255$),测量单通道最大数字驱动值驱动时获得的原色基色值。

根据 ICC 规范^[5]中对特性文件计算模型的规定,带入相应的公式可计算求得 3×3 矩阵为: $M = \begin{bmatrix} 0.931\ 79 & 0.566\ 31 & 0.176\ 93 \\ 0.509\ 23 & 0.957\ 13 & 0.082\ 886 \\ 0.160\ 76 & 0.103\ 68 & 0.910\ 23 \end{bmatrix}$,将生成的矩阵元素写入对应的标签,即完成转换矩阵的修正。

1.2 基于颜色主刺激值修正算法的颜色调整方法

三原色 R, G, B 驱动值与 X_r, Y_g, Z_b 的关系可以更好地反映 TRC 的曲线关系,而不是简单的 R, G, B 与 Y_r, Y_g, Y_b 的对应关系^[6],因此,提出采用基于颜色主刺激值(X_r, Y_g, Z_b 对每个通道的影响最大,称其为颜色主刺激值)修正算法的颜色调整方法,对 TRC 曲线和转换矩阵进行修正。优化流程见图 2。

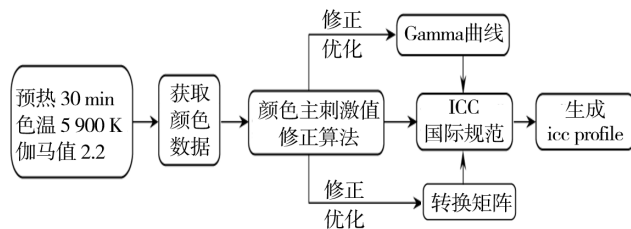


图 2 颜色主刺激值修正算法颜色调整流程

Fig. 2 Color calibration flowchart by color principal component correction algorithm

图 2 中:该方法与图 1 相似,将计算方法改成颜色主刺激值修正算法。

首先,通过计算确定每个颜色通道的颜色三刺激值中任意 2 个颜色刺激值与颜色主刺激值之间的关系。对于每个颜色通道,如果三刺激值中以任意一个

为基准,则其它 2 个是其固定的倍数关系^[6-8]。对于红、绿、蓝色光,三刺激值分别为 X_r, Y_g, Z_b , 相对最大,因此可分别将另外 2 个颜色刺激值表示为颜色主刺激值的倍数关系,即:

$$\begin{aligned} X_r &= a_{21} X_r, Z_r = a_{31} X_r \\ X_g &= a_{12} Y_g, Z_g = a_{32} Y_g \\ X_b &= a_{13} Z_b, Y_b = a_{23} Z_b \end{aligned} \quad (1)$$

投影仪三原色颜色主刺激值与非主刺激值之间的关系见图 3。

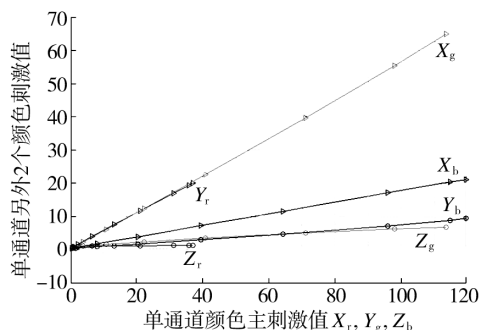


图 3 颜色主刺激值与非主刺激值的关系

Fig. 3 Relation between color principal and non-principal component

可以看到,颜色主刺激值与非主刺激值之间呈线性关系,但并非严格的式(1),而是存在常数项,即图中直线的截距,截距表示的三刺激值是暗场的光辐射形成的。因此,在计算的过程中需要将暗场的三刺激值进行适当的处理。根据色度相加特性和式(1)求得混合色的三刺激值为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 1 & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_r \\ Y_g \\ Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} X_r \\ Y_g \\ Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为比例系数,通过式(1)计算得出; X_0, Y_0, Z_0 为图 3 线性关系的截距所体现的暗场三刺激值。

对每个颜色通道,颜色主刺激值与其数字控制值,即 X_r 与 R, Y_g 与 G, Z_b 与 B 之间为一维的非线性关系,见图 4。该关系可用一维查找表表示。

该方法首先将颜色三刺激值 X, Y, Z 与其颜色主刺激值 X_r, Y_g, Z_b 建立线性关系,再将颜色主刺激值 X_r, Y_g, Z_b 分别与 R, G, B 建立各自一维的非线性关系。将 R, G, B 通过该一维非线性关系计算得到对应

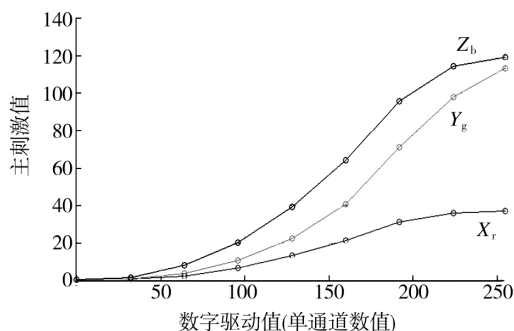


图 4 颜色主刺激值与数字驱动值的关系

Fig. 4 Relation between color principal component and digital driving value

的 X_r, Y_g, Z_b 值,带入式(2)便可计算得到对应的三刺激值。

2 基于查找表类型的转换模型

利用 BP 神经网络建立输入、输出数据的对应关系,获取查找表类型的数据组合^[9-10]。BP 神经网络实现 RGB-XYZ 颜色空间转换的流程见图 5。

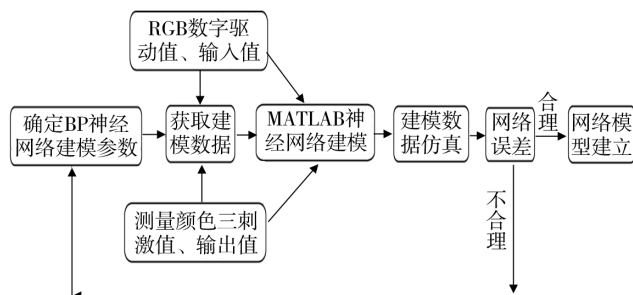


图 5 BP 神经网络建模流程

Fig. 5 Color calibration flowchart by BP neural network

2.1 BP 神经网络建模参数的选定

2.1.1 输入层和输出层节点数

以颜色空间的 RGB 值和 XYZ 值为网络的建模数据,输入、输出向量均为三维向量,可确定网络的输入层和输出层神经元个数均为 3。

2.1.2 隐层层数

1998 年 Robert Hecht-Nielson 证明了对任何闭区间内的连续函数,都可以用一个隐层的 BP 神经网络来逼近,因此,一个 3 层的 BP 神经网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映射。

2.1.3 隐层节点数

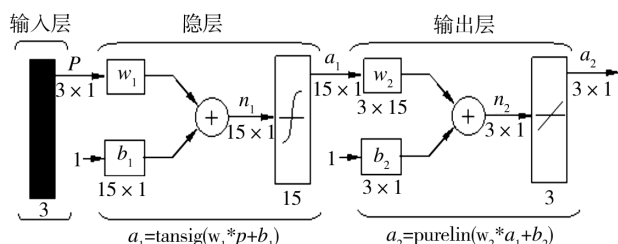
根据经验公式 $m = \sqrt{n+l} + a$ (式中 m 为隐层神

经元个数, n 为输入层节点数, l 为输出节点数, a 为 1~10 之间的常数), 其中: $n=3, l=3, 1 \leq a \leq 10$, 可以确定 m 的取值区间为 $3 \leq m \leq 13$ 。

2.1.4 传递函数

BP 网络通常有一个或多个隐层, 隐层中的神经元均采用 sigmoid 型传递函数, 输出层的神经元则采用线性传递函数 purelin, 这样就可以保证整个网络的输出可以取任意值。

最终确立的 BP 神经网络结构示意图见图 6。



其中: R —输入层节点数; S_1 —隐层节点数; S_2 —输出层节点数

图 6 3 层 BP 神经网络的结构

Fig. 6 Structure of a three-layer BP neural network

2.2 BP 神经网络建模数据的获取

实验采用单通道 9 等分组合的方式(单通道的划分为 0, 32, 64, 96, 128, 160, 192, 224, 255), 设计了共计 $9 \times 9 \times 9 = 729$ 组色块, 并利用 Java 编写测量软件实现对常用测色设备 Eye-one Pro 的驱动, 采用自动测量的方式完成 BP 神经网络建模数据的获取。测量软件界面见图 7。



图 7 测量软件界面

Fig. 7 Interface of measurement software

研究中共测量获取 729 组数据, 在建模过程中, 以 100 组数据为一组进行测试, 按 100 的步长逐步增加样本数据量。通过大量比较分析, 综合训练误差、测试误差和相关系数等因素, 最终确定样本个数, 这样的选取具有普遍意义。

3 实验数据比较分析

从转换色差的角度进行分析, 比较不同方法的优

劣, 验证 BP 神经网络模型在颜色空间转换中的优势。

1) 基于阶调曲线法的颜色调整方法转换数据色差分布见表 2。

表 2 基于阶调曲线法的颜色调整方法转换数据色差分布

Tab. 2 distribution of tone curve color calibration method

ΔE	数量	比例/%
0~1	4	0.55
1~2	16	2.19
2~3	23	3.16
3~4	28	3.84
4~5	43	5.90
5~6	55	7.54
6~7	69	9.47
7~8	56	7.68
8~9	91	12.48
9~10	72	9.88
10~11	68	9.33
11~12	68	9.33
12~13	43	5.90
13~14	34	4.66
14~15	36	4.94
15~16	17	2.33
16~17	3	0.41
>17	3	0.41
ΔE 平均	ΔE 最大	ΔE 最小
8.79	29.34	0.56

该颜色调整方法转换得到的平均色差为 8.79, 最小色差 0.56, 最大色差为 29.34, 色差主要集中在 5~12, 占 65.71%, 色差在 15 以下的占 96.85%, 色差超过 15 的占 3.15%。

2) 基于颜色主刺激值修正算法的颜色调整方法转换数据计算色差见表 3。

该颜色调整方法转换得到的平均色差为 4.58, 最小色差为 0.25, 最大色差为 15.35, 色差主要集中在 1~8, 占 91.92%, 色差在 9 以下的占 99.3%, 色差超过 9 的占 0.69%。较基于阶调曲线法的颜色调整方法的转换计算结果平均色差降低了 4.21 个单位, 从整体的色差分布情况来看, 主要分布区域色差降低了 4 个单位。

3) 基于 BP 神经网络的颜色空间转换模型计算数据色差见表 4。

表 3 基于颜色主刺激值修正算法的

颜色调整方法转换数据色差分布

Tab.3 Distribution of color calibration
by principal color component

ΔE	数量	比例/%
0~1	18	2.47
1~2	68	9.33
2~3	92	12.62
3~4	125	17.15
4~5	125	17.15
5~6	121	16.60
6~7	76	10.43
7~8	63	8.64
8~9	36	4.94
9~10	3	0.41
13~14	1	0.14
15~16	1	0.14
ΔE 平均	ΔE 最大	ΔE 最小
4.58	15.35	0.25

表 4 BP 网络模型的色差分布情况

Tab.4 distribution of color calibration by BP neural network

ΔE	数量	比例/%
0~1	70	9.60
1~2	150	20.58
2~3	291	39.92
3~4	177	24.28
4~5	34	4.66
5~6	2	0.27
7~8	1	0.14
12~13	2	0.27
13~14	2	0.27
ΔE 平均	ΔE 最大	ΔE 最小
2.49	13.73	0.077

该颜色调整方法转换得到的平均色差为 2.49,最小色差 0.077,最大色差为 13.73,色差主要集中在 0~5,占 99.04%,色差在 5 以下的占 99.04%,色差超过 5 的有 7 个,占 0.96%。较基于阶调曲线法的颜色调整方法的计算结果和基于颜色主刺激值修正算法的计算结果有大幅度的优化。

3 种颜色调整方法的色差分布情况见图 8。从图 8 可以明显看出,BP 神经网络模型在进行颜色转换中的优势,色差主要分布在色差值较小的区间,相对另外 2 种方法,BP 神经网络转换色差明显降低。

一般印刷品的色彩评价标准都是以≤3 个色差

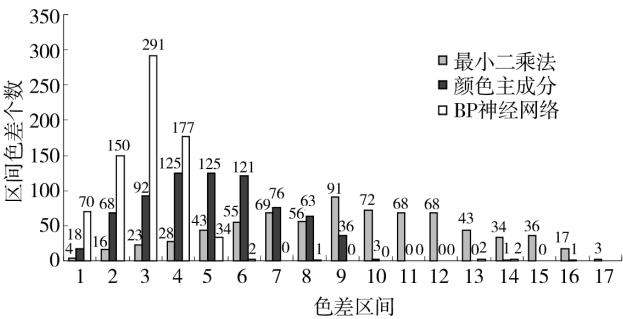


图 8 3 种颜色调整方法色差分布的对比

Fig. 8 Distribution of the three color calibration methods

单位为最佳效果,但是由于投影仪实验环境的特殊性(观察环境暗、观察距离远、光线干扰、投射过程的损失、测量设备的安放位置以及人眼在暗室环境中的敏感性等因素),研究认为在≤10 个色差单位的效果都是可以接受的,也是合理的(这一数字是通过大量的实验确立的,没有固定的标准和规范)。

4 结论

研究分析了投影仪色彩特征化常用的阶调曲线法、颜色主刺激值修正算法和 BP 神经网络色空间转换的 3 种优化方法的特点,并通过主客观评价方案的设计得出,BP 神经网络在此 3 种方法中是最优的,颜色主刺激值修正算法次之。

参考文献:

[1] KURTENBACH G, FITZMAURICE G. Applications of Large Displays[J]. IEEE Computer Graphics and Application, 2005, 25(4): 22-23.

[2] FUNKHOUSER T, LI K. Large-format Displays[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, 20(4): 20-21.

[3] 李斌. 低成本多投影仪拼接方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2005. LI Bin. Study on Low-Cost Multi-Projector Mosaic[D]. Jinan: Shandong University, 2005.

[4] 张军, 王邦平, 易成, 等. 一种实用的多投影仪显示墙色彩校正方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 982-986. ZHANG Jun, WANG Bang-ping, YI Cheng, et al. Practical Color Calibration Method for Multi-Projectors Display[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 982-986.

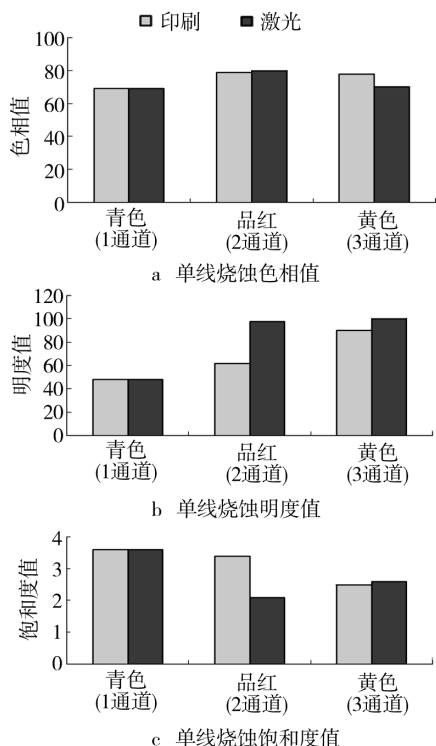


图8 激光烧蚀区域与未处理区域的颜色对比

Fig. 8 Color comparison between laser-ablation tracks and untreated prints

且由于热效应后续的扫描要降低功率。通过激光扫描暴露出来的颜色要比单一印刷的油墨颜色浅。颜色分析表明颜料的基本结构是不变的,因为它仍然反射相同的光波长(也就是拥有一样的色相值),然而每层中的颜料量会有改变。

(上接第93页)

- [5] Specification ICC. 1:2004-10, International Color Consortium.
- [6] 徐艳芳,黄敏,金杨. 基于色度比特性的显示器色度特性化[J]. 液晶与显示,2008,23(6):771-777.
XU Yan-fang, HUANG Min, JIN Yang. Characterization of Monitors Based on Colorimetric Ratios[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2008, 23(6): 771-777.
- [7] KATOH N G, DEGUCHI T, BENS R. An Accurate Characterization of CRT Monitor (I) Verifications of Past Studies and Clarification of Gamma[J]. Optical Review, 2001, 8(5): 305-314.
- [8] KATOH N G, DEGUCHI T, BENS R. An Accurate Characterization of CRT Monitor (II) Proposal for an

参考文献:

- [1] 龚晔,张逸新,王凯. 微结构加网防伪应用[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 62-63.
GONG Ye, ZHANG Yi-xin, WANG Kai. Anti-counterfeiting of Microstructure Screens[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 62-63.
- [2] SIANO S. Cleaning Processes of Encrusted Marbles by Nd: YAG Lasers Operating in Free-running and Q-switching Regimes[J]. Appl Opt, 1997, 36(27): 7073-7082.
- [3] LIU K, GARMIRE E. Paint Removal Using Lasers[J]. Appl Opt 1995; 34(21): 532-538.
- [4] PHILLIPS R W, BLEIKOLM A F. Optical Coatings for Document Security[J]. Appl Opt, 1996, 33(28): 5529-5534.
- [5] DOBROWOLSKI J A. Research on Thin Film Anti-counterfeiting Coatings at the National Research Council of Canada[J]. Appl Opt, 1989, 28(14): 2702-2718.
- [6] CARSLAW, JAEGER. Conduction of Heat in Solids[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [7] 刘振,张逸新. 塑料包装印刷品色彩再现规律研究[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 18-20.
LIU Zhen, ZHANG Yi-xin. Research on Color Reproduction Performance of Printed Plastic Package[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 18-20.
- [8] 刘武辉,胡更生,王琦. 印刷色彩学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
LIU Wu-hui, HU Geng-sheng, WANG Qi. Printing Color Science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- Extension to CIE Method and Its Verification[J]. Optical Review, 2001, 8(5): 397-408.
- [9] 陈路,李小东. 基于BP神经网络的CMY到XYZ颜色空间转换算法研究[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 63-64.
CHEN Lu, LI Xiao-dong. Research of Algorithm Transforming CMY to XYZ Color Space Based on BP Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 63-64.
- [10] 戴仲义,钱军浩. 虚拟打样的BP神经网络[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 84-86.
DAI Zhong-yi, QIAN Jun-hao. A BP Neural Network Model of Virtual Proofing[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 84-86.