

# 色差分布测试仪技术研究

杨婷婷, 李炜宏, 边秋莞, 李昌立, 贾志强

(长春理工大学理学院, 长春 130022)

**摘要:** 针对纺织业、制造业等行业对产品色彩一致性的技术需求, 论文基于标准色度学原理, 以彩色工业相机为传感元件, 以白光 LED 为照明光源, 以 Python 设计了系统软件, 完成了成像式色差分布测试仪, 实现了传统的基于颜色传感器的色差仪无法实现的色差分布测试。实验结果表明, 样品 RGB 标准值与还原的 RGB 的相关性均在 93% 以上, 色差的平均误差值优于 2.89, 满足国家机械行业标准色差误差范围 (不大于 3)。

**关键词:** 色度学; 工业相机; 色差分布

**中图分类号:** O432.3

## Color Study on Technology of Color Difference Distribution Tester

Yang Tingting, Li Weihong, Bian Qiuwan, Li Changli, Jia Zhiqiang

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

**Abstract:** For industries such as textiles, manufacturing technical requirements for product color consistency, the paper based on the standard colorimetric principle, industrial camera for sensing element in color, with white LED as lighting source, with Python has designed the system software, completed the imaging type tester, color difference distribution based on color sensor is the traditional color difference meter cannot achieve the color distribution of test. The experimental results show that the correlation between the RGB standard value of the sample and the reduced RGB is more than 93%, the average error value of color difference is better than 2.89, which meets the standard range of color difference error of national machinery industry (no more than 3).

**Key words:** The colorimetric; industrial camera; the color distribution

## 0 引言

目视法是最古老的颜色测量方法<sup>[1-2]</sup>, 该方法常常带有主观性, 且无法实现颜色的量化。随着颜色科学的发展, 逐渐建立起了色度学理论体系, 颜色已然成为像温度、几何尺寸、质量等可精确标定的物理量。如今, 颜色信息, 特别是色差信息, 在许多领域, 如环境监测、食品分析、医疗美容、纺织印染等领域, 都扮演着非常重要的角色, 通过提取标准样本和待测样本的色差信息, 实现物质成分的识别和产品质量的把控。

对于色差检测的研究, 国外起步较早, 如德国 BYK, 美国爱色丽, 日本美能达<sup>[3]</sup>等公司, 都发展了各种色差仪, 日本的东芝公司, 还针对色差仪, 发展了专门颜色传感器。它们的产品占据了国内外测色仪器市场的主要份额。近年来, 国内对色差测量的研究也在不断进

**作者简介:** 杨婷婷 (1998-), 女, 大三, 光电信息科学与工程

**通信联系人:** 李昌立 (1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 光学测控技术. E-mail: lcl\_cust@126.com

行, 并且取得了一些成绩, 如三恩驰公司 NR110 手持式分光色差计、威福公司 WF18 便携式色差计也已被广泛应用, 对各行各业发展都起到了重要作用。但目前现有的色差测试仪, 都是基于日本东芝公司的颜色传感器, 对待测点进行单点色差测试, 而对于面分布情况, 需要逐点扫描测试, 费时费力, 同时对于颜色比较复杂的样品, 扫描对应点的选取对测试结果影响较大。基于上述问题, 针对印染、陶瓷、印刷等领域工业生产对色差分布测试的需求, 论文提出了一种基于彩色工业相机的非接触式色差分布测量方法, 可快速实现大面积样品色差分布的测试。

## 1 色度学理论基础

颜色的差异特性由色调、明度和饱和度表征, 色度学的基本原理是三基色, 其比例决定了混合色的色调和饱和度。根据格拉曼斯定律, 观察者对多束单色光混合颜色的感知可表示为<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} R &= \int_0^{\infty} I(\lambda)r(\lambda)d(\lambda) \\ G &= \int_0^{\infty} I(\lambda)g(\lambda)d(\lambda) \end{aligned} \quad (1)$$

用 CIE 标准色度学系统定量的描述颜色时, 考虑以下因素:

- (1) 照明光源: 选用 CIE 规定的标准照明体—标准 LED 白光作为光源。
- (2) 观测的几何条件: 选用 CIE 规定的标准照明条件—漫反射照射/垂直接收。

## 2 颜色测量原理

由于工业相机的光谱响应度是波长的函数, 不同波长的光将使光敏元产生不同的光电流。白光 LED 光源照射到待测物体上, 其反射光颜色的强度分布与物体本身的颜色相关, 将反射光的光谱强度分布与工业相机的光谱响应曲线之积进行积分, 可求得待测物体的三原色 RGB 光电流值, 即三刺激值 (X,Y,Z)<sup>[5]</sup>。

$$X = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\rho(\lambda)R(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda$$

式中  $S(\lambda)$  为光源的光谱强度分布;  $\rho(\lambda)$  为物体表面的反射系数(假设物体表面材质对反射性能无影响);  $R(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 、 $B(\lambda)$  为工业相机 RGB 的光谱响应度;  $\tau(\lambda)$  为滤波片的透光系数。

再通过 CIE1976LAB 系统标准公式, 换化为  $L^* a^* b^*$ , 进而实现色差分析<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500 \left[ \left( \frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \\ b^* &= 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 X、Y、Z 为物体的三刺激值,  $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $Z_0$  为 CIE 规定的标准照明体三刺激值。

根据式(3), 在笛卡尔直角坐标系中, 色坐标的心理颜色空间<sup>[7]</sup>可表示为图 1 形式。其中  $\Delta L$ 、 $\Delta a$  和  $\Delta b$  表示偏离程度,  $\Delta L+$ 表示偏白,  $\Delta L-$ 表示偏黑;  $\Delta a+$ 表示偏红,  $\Delta a-$ 表示偏绿;  $\Delta b+$

65

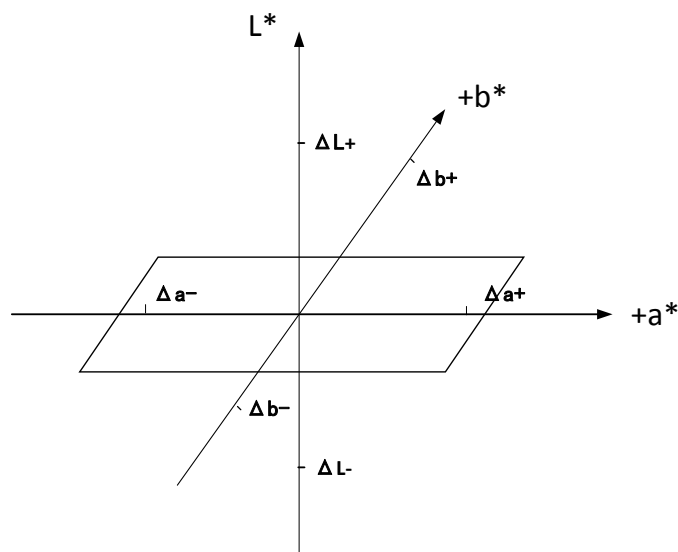
表示偏黄,  $\Delta b$ -表示偏蓝。

图1 笛卡尔直角坐标系

Fig.1 Cartesian coordinate system

根据 CIEDE2000 计算出总色差值<sup>[8]</sup>为:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}'}{K_S S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) + \left(\frac{\Delta H_{ab}'}{K_H S_H}\right)} \quad (4)$$

70

式中,  $S_L, S_C$  和  $S_H$  分别为:  $S_L = 1 + \frac{0.015 \times (\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}}$ ,  $S_C = 1 + 0.045 \bar{C}_{ab}^*$ ,  $S_H = 1 + 0.015 \bar{C}_{ab}^* T$ ,

其中  $\bar{L}$  和  $\bar{C}_{ab}^*$  分别为两样品之间的明度和彩度算数平均值,  $\Delta H_{ab}' = 2 \sqrt{C'_{ab,1} \cdot C'_{ab,2}} \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right)$ ,

其中  $C'_{ab} = \sqrt{a'^2 + b'^2}$ ,  $h'_{ab} = \arcsin\left(\frac{b'}{a'}\right)$ ,  $L' = L^*$ ,  $a' = (1+G) \cdot a^*$ ,  $b' = b^*$ ,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  由式 (3) 表示, 参数  $K_L, K_C, K_H$  是与使用条件相关的校正系数。

### 3 数据采集与校正

75

#### 3.1 实验装置

色差分布仪由遮光壳体、白光 LED 光源、工业相机及其安装架组成, 相机通过 USB 连接计算机, 如图 2 所示。

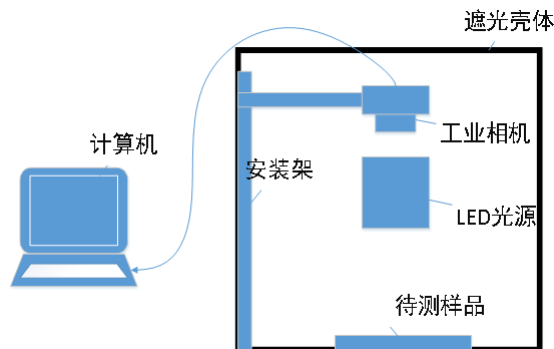
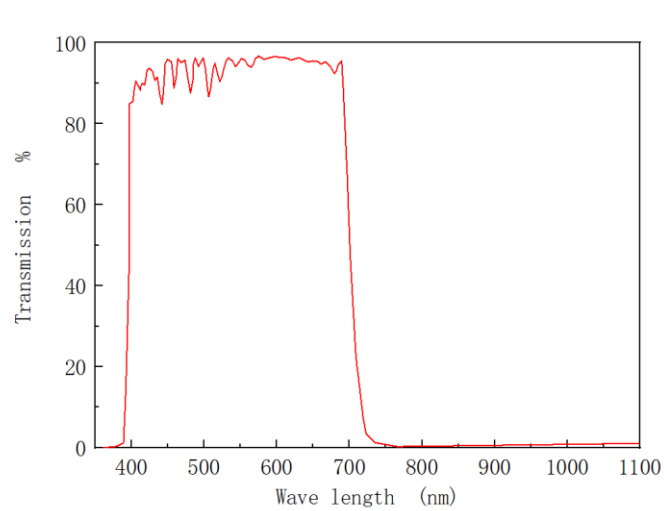


图2 色差分布仪结构示意图

80

Fig.2 Schematic diagram of color difference distributor structure

密闭的遮光壳体可以避免外界光源的干扰；白光 LED 光源，既保证了在可见光范围内有充足的光谱分布，又避免照明的不均匀，同时保证了测试的一致性；此外，为了减小紫外和近红外波段，这些与色度无关光谱对系统测试的影响，在相机镜头上置有滤光片，滤光片透过系数如图 3 所示。

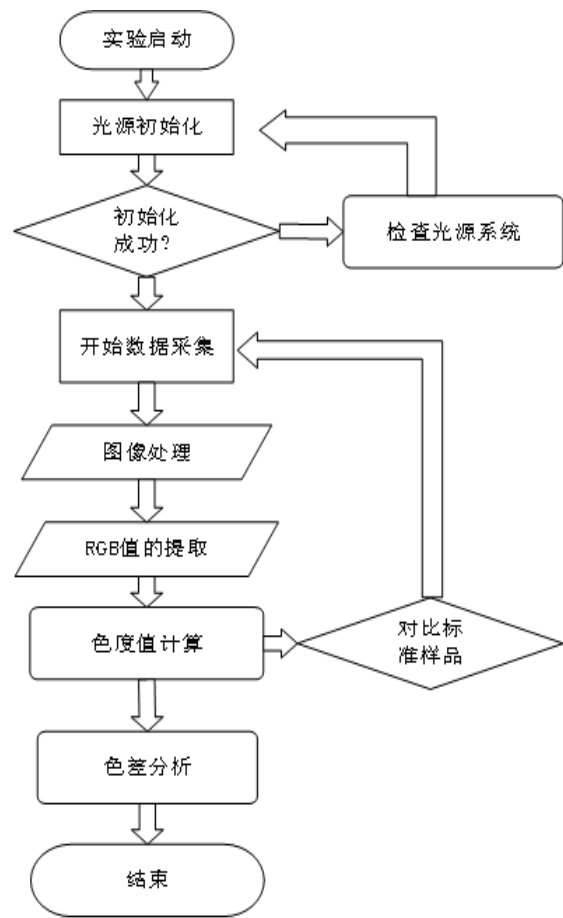


85

图 3 滤波片的透光曲线图

Fig.3 The transmission curve of the filter

采用 python 语言，编制系统程控软件，实现色度信息的采集、提取、色差分析和展示等功能，其流程如图 4 所示。



90

图 4 PC 端软件运行流程图

Fig.4 PC software flow chart

### 3.2 RGB 信号值的采集与处理

目标反射的色度信息与照明光源的光谱分布密切相关，为了保证系统的稳定性，采用密闭结构并用标准光源照明。

基于样品的色度真值  $R$ 、 $G$ 、 $B$  与色度分布测试仪的测试值  $r$ 、 $g$ 、 $b$ ，建立多元线性函数关系  $R(r,g,b)$ 、 $G(r,g,b)$ 、 $B(r,g,b)$ ，经过两次拟合，最终得到真值与测试值之间的关系。首先建立第一个函数的变量矩阵： $X=[r, g, b, r \cdot g, r \cdot b, g \cdot b, 1]$

由矩阵可知，变量设置为常数 1、变量  $r$ 、 $g$ 、 $b$  以及三者之间的乘积，这样更有利于体现其中一个变量的变化对 RGB 值的影响。经过多元回归，获得变量的回归系数分别是  $C(R)$ 、 $C(G)$ 、 $C(B)$ 。

$$C(R) = [-0.0002, 0.0033, 0.0057, 0.0031, 0.0043, -0.0109, 1.3309, -0.4423, -0.4569, 35.2079]'$$

$$C(G) = [0.0024, 0.0083, -0.0005, -0.0060, 0.0069, -0.0065, -0.5964, 1.2572, -0.2699, 46.1584]'$$

$$C(B) = [0.0040, -0.0123, -0.0054, -0.0056, 0.0006, 0.0250, -0.5630, -0.4003, 0.9376, 41.1212]'$$

由此得  $R'(r,g,b) = C(R) \cdot X$ ，同理  $G'(r,g,b) = C(G) \cdot X$ 、 $B'(r,g,b) = C(B) \cdot X$ ，以第一次拟合的函数带入数据库中的  $r$ 、 $g$ 、 $b$  值，反演回相应的  $R'$ 、 $G'$ 、 $B'$ ，与真实值  $R$ 、 $G$ 、 $B$  进行第二次高次多项式拟合，当最高次幂为四次方得到具有最佳拟合函数：

$$R(r, g, b) = -1.236 \times 10^{-7} x_1^4 + 5.987 \times 10^{-5} x_1^3 - 0.00907 x_1^2 + 1.448 x_1 - 4.617$$

$$G(r, g, b) = -1.834 \times 10^{-7} x_2^4 + 0.0001069 x_2^3 - 0.02093 x_2^2 + 2.55 x_2 - 33.56 \quad (5)$$

$$B(r, g, b) = 5.863 \times 10^{-8} x_3^4 - 2.341 \times 10^{-5} x_3^3 + 0.003252 x_3^2 + 0.7967 x_3 + 4.788$$

其中  $x_1 x_2 x_3$  分别代表第一次拟合得到的函数  $R'(r,g,b)$ 、 $G'(r,g,b)$ 、 $B'(r,g,b)$ 。最终函数可表示为一次线性回归拟合函数和一次高次多项式拟合函数复合的形式，它与  $r$ 、 $g$ 、 $b$  三个变量有关，记为  $R(r,g,b)$ 、 $G(r,g,b)$ 、 $B(r,g,b)$ 。

## 4 误差分析

### 4.1 RGB 测试的误差分析

工业相机所获得的 RGB 值与目标的散射特性、光源光谱分布、相机的光谱响应函数、滤波片等参数相关，所以测试值与实际值存在差异。论文基于标准比色卡，根据比色卡给出的标准 RGB 值和研制的色差分布测试仪测试的  $rgb$  值，计算分析了 RGB 值的计算误差。表 1 为标准比色卡的标准 RGB 值和  $rgb$  测试值的部分数据。

表 1 部分测量值与标准值  
Tab.1 Partial measured values and standard values

标准值			测试值		
R	G	B	r	g	b
74	89	61	75	75	74
84	30	46	54	4	20
148	122	109	104	82	87

将上述数据代入拟合的相关函数 (5) 中，用决定系数  $r^2$  表征测试值与标准值的相关程度，值越接近 1，该函数相关性越高，相关性如表 2 所示。

表 2 RGB 拟合函数相关性

Tab.2 RGB fitting function correlation		
色度	r^2	误差
R	0.9596	0.0404
G	0.9411	0.0589
B	0.9389	0.0611

于是得到拟合的色差分布仪测量 RGB 值与真实值之间的函数相关性高达 93% 以上。

#### 4.2 测试色差值与标准色差值的函数相关性

为了得到研制的色差分布测试仪的测量误差,随机选取多张标准比色卡,每两张为一组,每组色度值分别用 R1、G1、B1 和 R2、G2、B2 表示,先用色差分布测试仪测量这两张标准比色卡的色差值,再经计算得到该组比色卡的色差真实值,拟合色差测量值和色差真实值之间的多项式函数关系,该函数的最高次幂阶数为 4,色差测量值与真实值的决定系数 r^2 值为 0.9753。前五组数据如表 3 所示:

表 3 色差分布仪测量色差值与真实色差值  
Tab.3 The chrominance distributor measures the chrominance and the true chrominance

组号	R1	G1	B1	R2	G2	B2	测量值 ΔE	真实值 ΔE'
1	226	176	61	249	191	69	53	50.80
2	209	152	38	255	177	27	98	94.35
3	255	177	27	74	89	91	353	356.64
4	67	67	67	112	124	116	157	155.27
5	45	40	30	74	89	61	121	118.90

于是得到ΔE 的统计误差为 0.0247, 平均误差约为 2.89, 满足国家机械行业标准<sup>[10]</sup>色差误差不大于 3。

### 5 结论

论文提出以彩色工业相机为传感元件,搭建了色差分布测试仪,建立了色度标准值与测试值间的映射函数,设计了具有去噪、对齐、还原等图像处理过程的软件,实现了图像色差值的识别,以标准比色卡为测试样品,完成了色差分布测试。结果表明,标准比色卡的 RGB 的测试值与真值的相关性达到 93% 以上,总色差值的平均误差ΔE 为 2.89,满足国家机械行业标准色差误差范围。

#### [参考文献] (References)

[1] 李全臣.FS 系列光电色度计的设计研究.光学仪器.1999, 21 (3): 29-32  
[2] 于文铮.小型光纤色度计的研究[硕士论文].天津大学.2005  
[3] Katherine LeOn,Domingo Mery,Franco Pedreschi,etal.Color measurement in units from RGB digital images[J].Food Research International,2006,39(10):1084-1091  
[4] 陆佳辉.基于数码相机的光谱颜色定量化和显示器复现.[硕士论文],杭州电子科技大学.2015  
[5] 邱雪维.基于数码相机的光谱反射比重建问题研究.[硕士论文].沈阳建筑大学.2015  
[6] 张芙蓉,汤泽军.基于 TCS3414CS 的高精度色差计.仪表技术与传感器.2012(2):28-30  
[7] 吴琼.便携式色差计的设计和研究.[硕士论文].浙江师范大学.2007  
[8] 汤泽军.应用于色差计的两种典型色差公式的对比.长沙航空职业技术学院学报.2015.15 (2): 52-55  
[9] 中华人民共和国机械行业标 JB/T 5595-91-测色色差计,机械电子工业部,2002