

物体色度值的计算机模拟表征

周良成, 王一凡, 马世红
(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

摘 要: 本文以国际标准 CIE(国际照明委员会)所规定的 XYZ 空间体系为基础, 结合计算机计算的方法, 通过利用光栅光谱仪所测的透射光谱来计算出准确的颜色, 并可直接在计算机屏幕上将颜色表达出来, 最后结合例子给出实验结果和相应的理论分析, 结果表明: 实验结果和理论分析的符合是相当好的。

关键词: 色度值; CIE XYZ 色彩空间体系; 光栅光谱仪

中图分类号: O432.3; O4-39

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2005)02-0021-04

1 引 言

颜色的表征或测量是非常复杂的交叉性很强的边缘学科。它事实上牵涉了一些我们还无法确切了解的基本内容, 例如颜色的一些心理学效应、颜色的恒常性、夸大效应等。为了使用标准的光学仪器对颜色进行测量, 实际上需要首先消除因人而异且含混不清的颜色表达式, 将人类对颜色的感性认识通过科学量化的标准表示出来。这方面, 相应的工作已经做了不少, 并且有许多理论和应用体系。本文以国际标准 CIE 所规定的 XYZ 空间体系为基础, 结合计算机计算的方法, 利用光栅光谱仪测得的透射光谱来计算出准确的颜色色度, 同时可在计算机屏幕上直接将颜色表征出来, 最后结合具体例子给出其实验结果及其相应的理论分析。

2 理论与原理

光的颜色即是它的频率在人眼中的反映^[1]。人眼对于光束的颜色判断由视网膜下的 3 种不同的视锥体细胞, 对于光的 3 个“原色”RGB 的 3 个刺激值 R, G, B 决定^[2]。对于一个正常人来说, 人眼所感觉到的 3 个刺激值 R, G, B 是由照明光源的发光特性(即其强度的波长分布) $L(\lambda)$ 、物体的透射光谱(透射率的波长分布) $T(\lambda)$ 以及人眼的吸收率 l (即为 RGB 三种“原色”的吸收率 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$) 这 3 个因素共同决定的

$$R = \int L(\lambda) T(\lambda) r(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int L(\lambda) T(\lambda) g(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$B = \int L(\lambda) T(\lambda) b(\lambda) d\lambda$$

上式的 3 个积分是分别归一化的。只要我们测得物体的透射光谱 $T(\lambda)$, 就可以利用现有的人眼吸收率(这是个生理学数据), 即 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ 来计算出它对于标准观察眼的精确表达, 即 RGB 三刺激的比值。

在色度学系统中, 使用 RGB 三色作为颜色的基本配色, 并不能得到所有需要测量的颜色。在工业上, 虽然已经找到了数十种颜色空间体系, 但是最基本的还是 XYZ 空间体系, 因为它是其它颜色体系建立的基础, 所以仍使用 CIE 色度学系统 XYZ 坐标下的三刺激 X, Y, Z 来代替式(1)中的 R, G, B 值。相应的, 使用 CIE 的三刺激值 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ 来分别代替 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ 数值, 这样式(1)的积分形式依然不变, 结果如下

$$X = \int L(\lambda) T(\lambda) x(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int L(\lambda) T(\lambda) y(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \int L(\lambda) T(\lambda) z(\lambda) d\lambda$$

值得注意的是, 使用式(2)的计算还无法比较方便的在使用 RGB 配色的计算机屏幕上将颜色表达出来, 还要利用数学变换将 XYZ 坐标转换成

“第三届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2004-07-19

作者简介: 周良成(1982-), 男, 上海人, 复旦大学物理学系 2000 级本科生。

指导教师: 马世红(1963-), 男, 河南温县人, 复旦大学物理学系教授, 博士, 研究方向为功能超薄膜物理与器件、非线性光学、物理实验教学与研究。

RGB 坐标. 这里以 PAL 制式的 RGB 系统为例, 其与 XYZ 坐标的线性变换方式如下

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 X_r, X_g, \dots, Z_b 为转换系数. 在已知 XYZ 系统 RGB 坐标的情况下, 计算其转换系数是可行的. 这里, 需要将 XYZ 向 RGB 转换, 已知三原色 R, G, B 在 CIE-XYZ 系统下的坐标为

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.64 & 0.29 & 0.15 \\ 0.33 & 0.60 & 0.11 \\ 0.15 & 0.06 & 0.79 \end{pmatrix} \quad (4)$$

比较式(3)和式(4)可知: 转换系数与坐标 x_r, x_g, \dots, z_b 仅差一个常数. 令其为 C_r, C_g, C_b , 则

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = C_r \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{pmatrix}$$

同理, 常数 C_g, C_b , 也应具有上述关系. 计算可得

$$C_r = 0.672, \quad C_g = 1.178, \quad C_b = 1.188$$

需要说明是: 计算中用到了“标准参考白”在 XYZ 下的坐标值 0.950, 1 和 1.089 (计算方法可参见文献[3]).

由此可以得到 RGB 系统与 XYZ 系统转换系数的矩阵为

$$\begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.430 & 0.342 & 0.178 \\ 0.222 & 0.707 & 0.071 \\ 0.020 & 0.130 & 0.939 \end{pmatrix} \quad (5)$$

求得其逆阵, 即可得到 XYZ 向 RGB 转换的线性方程

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.069 & -1.397 & -0.476 \\ -0.970 & 1.876 & 0.042 \\ 0.069 & -0.230 & 1.069 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中矩阵元随计算机显示屏的设置不同而不同.

3 实验与计算

测量颜色所用光栅光谱仪在测量精度上有一定的标准^[4], 本实验室选用的 WGD-3 型光栅光谱仪是完全满足精确测色要求的. 其主要测量参

量为: 波长范围 200 ~ 800 nm; 相对孔径 $D/f = 1/7$; 光栅常量 1 200 线/mm; 狭缝宽度可在 0 ~ 2 mm 之间连续变化 (精度为 0.01 mm/div); 波长精度 ± 0.2 nm; 波长重复性 ± 0.1 nm. 图 1 给出了所用透射波长在 405 nm 的滤色片的透射率曲线.

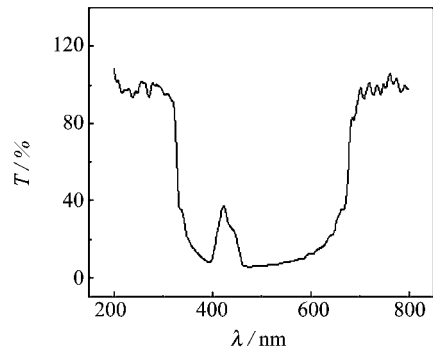


图 1 405 nm 滤色片的透射光谱

透射光谱(图 1)两边曲线的抖动是光栅光谱仪中的光电倍增管的响应曲线(率)所致, 但是, 由于人眼的可视范围约为 380 ~ 720 nm, 所以这些抖动对计算结果的影响可以忽略不计. 将此曲线与已知的标准人眼对不同光波长的三刺激值(见图 2)曲线 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ 分别相乘, 然后将乘出来的结果对 \int 积分[式(2)]. 积分后的结果即为 X, Y, Z , 将这 3 个结果归一化

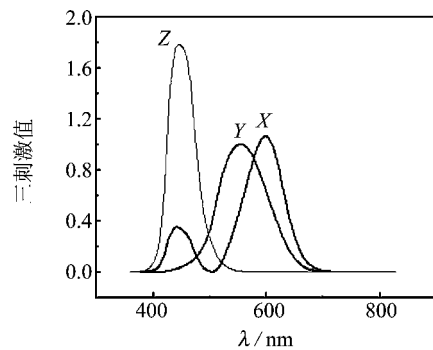


图 2 CIE 标准三刺激值曲线

$$X = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$Y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$Z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

则其 X, Y, Z 的比值即为样品在 XYZ 上的色度坐标. 由式(6)将 X, Y, Z 转换成 RGB 比值.

4 软件的制作

为了简化上述计算积分的过程,利用 Visual C++ 编制了计算程序 colormatch. 这个程序可实现上述的计算积分过程,并且可以较为方便地控制一些参量(如 XYZ-RGB 的转换矩阵元数值)来调整其输出的计算结果. 通过以下的演示来说明此软件所做的计算积分.

1) 运行程序 colormatch. exe 后,首先要在 setting 中导入三刺激值 $x()$, $y()$, $z()$, 如图 3 所示. 可以看出,这一功能并不仅仅局限于某一计算的某种色度学坐标下的表达式,其它任何表达式都可以导入,只要在下面的 Transform Matrix 中,更改相应的坐标对于 RGB 坐标的转换矩阵元就可以了. 因为最后在计算机屏幕上显示出的是使用 RGB 坐标来表达的色度(图 4).

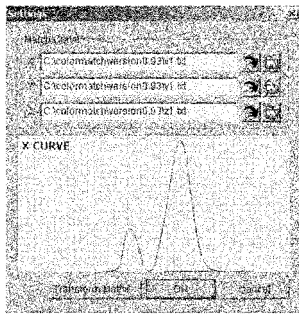


图 3 导入 $x()$, $y()$, $z()$ 的界面

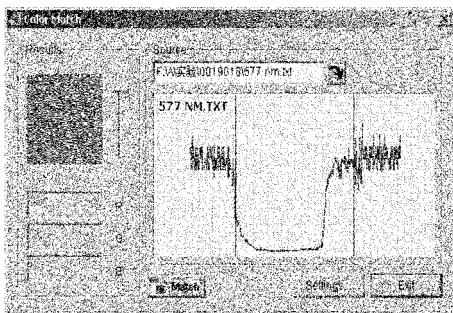


图 4 主界面显示的实验结果(577 nm 的滤色片看起来是红色的)

2) 在 Transform Matrix 中输入相应的转换矩阵元,例如 PAL 制式下的转换矩阵元已在式(6)中得到了. 输入完矩阵元后,在 source 中导入所测得的透射光谱的实验数据,此软件目前仅仅支持扩展名为 txt, gd3, 和 dat 数据文件,其格式要求为:

```
360
830
1. 1
360 0. 0001299
361 0. 000145847
362 0. 000163802
.....
```

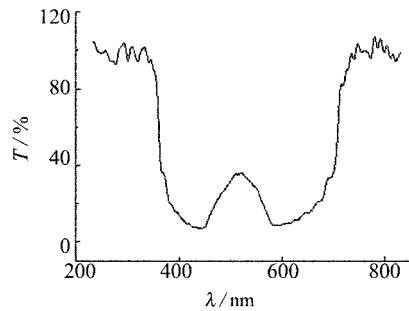
即前 3 行是实验所测透射光谱的波长范围及其最大值,下面的数据格式按照[波长][数据]排列.

3) 导入数据后,即可看到分光谱图线,使用鼠标左键来设定分光谱上需要积分的下限,右键来设定积分的上限. 点击 match,即得到样品的颜色和它的 RGB 值(在这里需要手工调节亮度,因为实验所测的数据不包含亮度的量,并且亮度感觉是与颜色的色相有关系的).

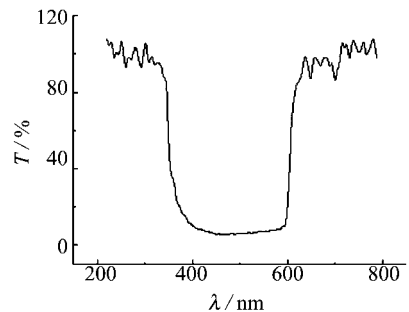
5 结果与讨论

基于计算机和光栅光谱仪的测色方法,通过计算积分,可方便地得到样品的色度值. 由于不使用分光光度仪的标准板^[5],进而从根本上避免了利用标准板测量色度值所带来的误差. 此外,也完全避免利用测光积分球等仪器及由于积分球内壁涂料的反射及均匀性的影响所带来的误差.

图 5 给出了 609 nm(红色)和 492 nm(绿色)



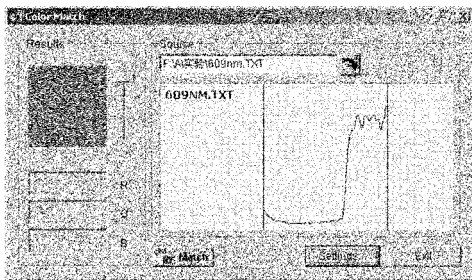
(a) 492 nm



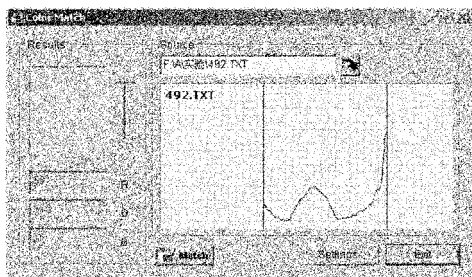
(b) 609 nm

图 5 492 nm 和 609 nm 滤色片的透射光谱

滤色片的透射光谱曲线,而图 6 则为利用计算积分(程序)所得这一对常见补色的计算结果的表示.由图 6 可知:计算结果基本上令人满意.从比较上来看,这 2 个补色的关系符合的相当好(例如,尝试着长时间盯着一个表达出来的颜色看,然后再看别处,接着将眼中由于大脑补偿而“看”到这一颜色的补色,与我们计算出来的颜色相比较).需要说明的是,所用滤色片的半峰宽度比较宽(即滤光薄膜单色性不是很好),故在配比白色时偏差比较明显(一个简单的方法即将计算出的



(a)



(b)

图 6 计算所得结果的颜色——红色和绿色

RGB 值分别相加,看一看相加结果的 RGB 比值是不是接近 1 1 1)。

6 结束语

利用本文所提供的计算机计算方法,从根本上避免了一些老方法无法避免的误差,且直观的演示了光在人眼中形成颜色的原理.本实验所使用的设备都是一般光学实验室所具有的:1 台符合测色要求的光栅光度计和 1 台计算机.通过测量样品的透射光谱,利用计算机处理数据,并且结合所开发的应用程序,在计算机屏幕上就可将颜色表征出来.另外,对于一些应用行业,如印刷工业等,由于应用程序的参量可调,此软件基本上提供了一个通过比较来校正屏幕颜色与印刷结果的初步方法.

参考文献:

- [1] 焦书兰,等.人类的视觉[M].北京:科学出版社,1987.45~46.
- [2] 道林J.E.视网膜[M].杨雄里,等译.上海:上海医科大学出版社,1989.117~125.
- [3] 荆其诚,等.色度学[M].北京:科学出版社,1979.282~287.
- [4] 李亨.颜色技术原理及其应用[M].北京:科学出版社,1994.110~115.
- [5] 国家技术监督局.物体色的测量方法(国家标准 GB/T 3979-1997) [S].北京:中国标准出版社,1997.

Chromaticity simulation using software program

ZHOU Liang-cheng, WANG Yi-fan, MA Shi-hong

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Chromaticity measurement is an interdisciplinary subject and is very complex. Color of objects could be measured accurately by using computer software with the transmission spectra of grating spectrometer on the basis of the international standard, CIE-XYZ system. The colors can display directly on the computer screen. The experimental results and theoretical analysis are presented in agreement also in this paper.

Key words: chromaticity value; CIE-XYZ system; grating spectrometer