

Colorimetric Measurement System and Its Algorithm Based on Linear Array CCD

Zili Zou¹, Chenghua Sui^{1*}, Xiaoming Chen²

¹Department of Applied Physics, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou

²Shanghai Keming Instrument Co., Shanghai

Email: zlzhou@brolight.cn, zouzili8017839@qq.com, *suich@zjut.edu.cn

Received: Jul. 10th, 2013; revised: Jul. 19th, 2013; accepted: Jul. 24th, 2013

Copyright © 2013 Zili Zou et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: We propose a method of colorimetric measurement system construction based on linear array CCD. It can be used to measure the color information of illumination light source that commonly used. At the same time, we also have given the algorithm ideas of chromatic parameters in details which have been used to develop the rapid PC calculation software. By using this measurement system, we have a colorimetric experiment on LED light source, and the measurement results are basically consistent with the standard LED spectrum tester.

Keywords: Linear Array CCD; Colorimetry; Calculation Software

基于线阵 CCD 的色度学测量系统的构建及其算法

邹自立¹, 隋成华^{1*}, 陈晓明²

¹浙江工业大学理学院应用物理系, 浙江, 杭州

²上海科铭仪器有限公司, 上海

Email: zlzhou@brolight.cn, zouzili8017839@qq.com, *suich@zjut.edu.cn

收稿日期: 2013 年 7 月 10 日; 修回日期: 2013 年 7 月 19 日; 录用日期: 2013 年 7 月 24 日

摘要: 提出了一种基于线阵 CCD 的色度学测量系统的构建方法, 利用该系统可完成照明光源常用颜色信息的测量。同时整理出了各种色度学参数算法较为详细的计算思路, 并利用此算法开发了配套的上位机快速计算软件。利用本测量系统, 对 LED 光源进行色度实验测试, 测试结果与某标准 LED 光谱测试仪测量结果基本一致。

关键词: 线阵 CCD; 色度学; 计算软件

1. 引言

色度学是一门研究人的颜色视觉规律、颜色测量理论与技术的科学, 是 20 世纪发展起来的以物理光学、视觉生理、视觉心理、心理物理等学科领域为基础的综合性学科^[1,2]。无论是实际应用方面, 如 LED 照明产业, 还是高校物理实验室对色度学实验的实际需求, 都对光源颜色特性参数如色坐标、主波长、色

*通讯作者。

纯度、色温、显色指数、色度容差、黄色度、变黄度、红色比等的评价与计量提出了更高的要求。

本文提出了一款基于线阵 CCD 的可用于高校实验室进行快速光源色度特性参数测量的实验系统的构建设想, 依据国家标准和国际照明委员会(CIE)提出有关色度学标准^[3-8], 整理出了相关色度参数算法较为详细的计算步骤, 可以作为上位机计算软件的开发中色度计算的算法思路。

2. 基于线阵 CCD 的色度学实验系统结构

获得照明光源 380~780 nm 范围内的光谱功率分布, 是计算其他色度参数的首要条件。测量光源的光谱功率分布也是本系统的功能核心。本系统原理框架图如图 1, 待测光源与积分球组成光源部分, 光线由光纤导入光学系统(主要由反射镜与光栅组成), 经过光学系统之后将不同波长的光分散投射到 CCD 探测器上的不同位置, 经过数据采集模块, 将光信号转化为电信号, 在通信模块中, 把电信号经过放大等处理后进入 AD 转换模块, 将模拟的电信号转换为数字信号, 之后在 CPLD 和微控制器的配合工作下存入到静态 RAM 中, 再把数据通过 USB 口上传到 PC 上位机, 接着在上位机进行波长定标和能量校准, 就可得到待测光源的相对光谱功率分布数据信息, 也就可以开始进行其他色度学参数的计算了, 图 2 为本系统的结构示意图。

3. 色度学各参数的计算方法

3.1. 相对光谱功率分布 $P_x(\lambda)$, 峰值波长, 谱线宽度的计算

要计算待测光源的相对光谱功率分布, 首先要得到该线阵 CCD 探测器各波长的仪器响应系数 K_i , 我们常用标准 A 光源(色温 2856 K)通过对比得到该响应系数 K_i 。图 3 为 $P_x(\lambda)$ 简易的计算流程,

具体对比计算为公式(1):

$$K_i = \frac{P_{r,i}(\lambda)}{P_{A,i}(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $P_{r,i}(\lambda)$ 为标准 A 光源已知 $T = 2856 \text{ K}$ 色温下, 利用普朗克公式(2)得到的能量曲线数据, $P_{A,i}(\lambda)$ 为标准 A 光源在该 CCD 探测器上实际采样的能量分布值。

$$P_{r,i}(\lambda) = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为第一辐射常数, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数, λ 为波长。

则任意待测光源的光谱功率分布由公式(3)计算得到

$$P_{x,i}(l) = K_i S_i(l) \quad (3)$$

式中, $S_i(\lambda)$ 为待测光源在 CCD 探测器上的实际采样能量分布值。

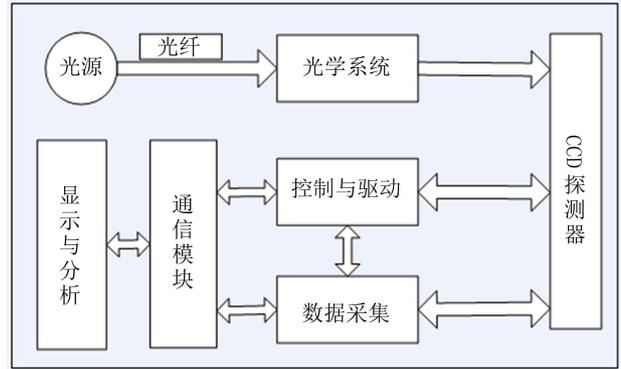


Figure 1. System block diagram
图 1. 系统原理框图

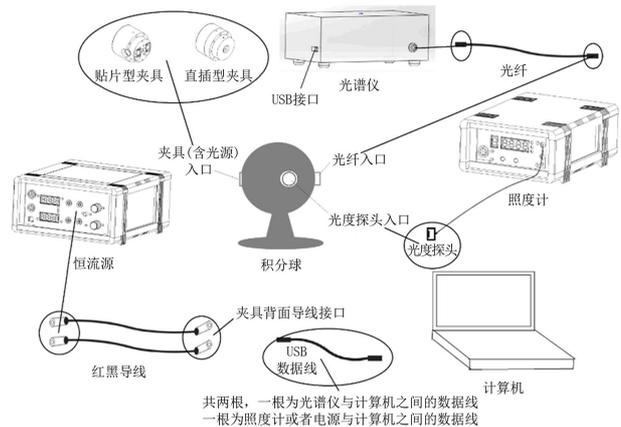


Figure 2. System structure diagram
图 2. 系统结构示意图

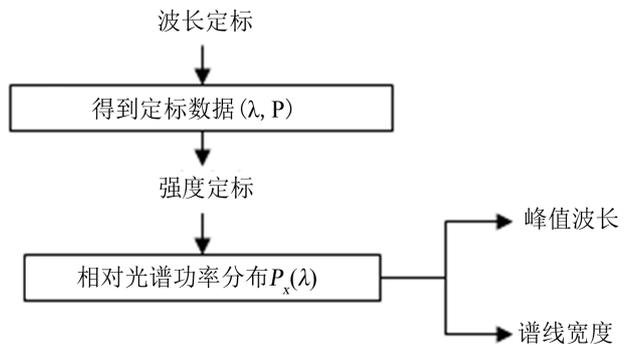


Figure 3. The calculation process of $P_x(\lambda)$
图 3. 相对光谱功率分布计算流程

峰值波长 λ_m 为 $P_{x,i}(\lambda)$ 中最大值所对应的波长, 谱线宽度 $\Delta\lambda$ 为 $P_{x,i}(\lambda)$ 中最大值一半处所对应的两个波长之差。

3.2. 色度坐标的计算

在 $1^\circ \sim 4^\circ$ 视场角时, 我们常用 CIE1931 标准色度系统的三刺激值 X, Y, Z 和色品坐标 x, y, z 表示颜色。图

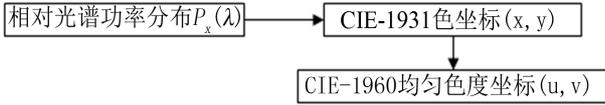


Figure 4. The calculation process of chromaticity coordinates
图 4. 色品坐标计算流程

4 为色坐标计算流程。

其中三刺激值 X, Y, Z 的计算如公式(3):

$$X = K_m \int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3a)$$

$$Y = K_m \int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3b)$$

$$Z = K_m \int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3c)$$

其中: $K_m = 683 \text{ lm/W}$, 为辐射量和光度量之间的比例系数。 $P_x(\lambda)$ 为待测光源的相对光谱功率分布, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 为 CIE-1931 标准色度观察者光谱三刺激值, 可在国标^[7]中直接查到。

色品坐标 x, y, z 的计算如公式(4):

$$x = X / (X + Y + Z) \quad (4a)$$

$$y = Y / (X + Y + Z) \quad (4b)$$

$$z = Z / (X + Y + Z) \quad (4c)$$

CIE-1960 均匀色度标尺图 $u-v$ 上的色坐标 u, v 计算方法如公式(5):

$$u = 4X / (X + 15Y + 3Z) = 4x / (-2x + 12y + 3) \quad (5a)$$

$$v = 6Y / (X + 15Y + 3Z) = 6y / (-2x + 12y + 3) \quad (5b)$$

3.3. 主波长 λ_D 计算

用某一光谱色, 按一定比例与一个确定的标准照明体(如 CIE 标准照明体 A, B, C, 等能光源 E 或 D65) 相混合而匹配出样品色, 该光谱色的波长就是样品色的主波长。计算主波长, 我们一般采用等能白光 E 光源作为参考光源, 其色品坐标

$$W_E(x_E, y_E: 0.3333, 0.3333)。$$

图 5 为主波长计算流程,

具体计算步骤如下:

1) 计算 $W_E(x_E, y_E)$ 与 CIE1931 色品图各单色辐射轨迹坐标的斜率值, 其中单色辐射轨迹坐标可直接在国标^[9]中查到。在实际上位机计算软件的开发时,

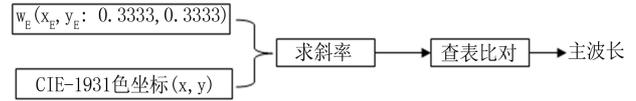


Figure 5. The calculation process of dominant wavelength
图 5. 主波长计算流程

一般直接查询^[1,2]光谱色相应于 CIE 标准照明体 A, B, C, E 的主波长斜率。

2) 计算 $W_E(x_E, y_E)$ 与待测光源色品坐标的斜率值。

3) 根据 2) 中计算得到的斜率值, 在 1) 中查找与之最接近的斜率值所对应的单色辐射轨迹坐标, 该坐标所对应的波长即为该待测光源的主波长 λ_D 。

3.4. 色纯度 P_e 的计算

色纯度表征光源光谱色接近光谱轨迹线的程度, 纯度越高, 即越接近色品图光谱轨迹线, 单色性就越好。其值为待测件色度坐标与 E 光源之色度坐标直线距离与 E 光源至该待测件主波长之光谱轨迹(Spectral Locus)色度坐标距离的百分比。图 6 为主波长计算流程。

具体计算如公式(6):

$$p_e = \frac{y - y_E}{y_d - y_E} = \frac{x - x_E}{x_d - x_E} \quad (6)$$

其中 (x_E, y_E) 为等能白光 E 光源色坐标, (x_d, y_d) 是以上所求主波长对应的坐标, (x, y) 是待测光源坐标值。

3.5. 相关色温 T_c 的计算

如果一个光源发射光的颜色(即光色)与某一温度下的黑体发射光的颜色(即色品)相同, 那么, 此时黑体的绝对温度值就叫做该光源的颜色温度, 简称色温。

当光源发射光的颜色和黑体不不同时, 我们用“相关色温”的概念来描述光源的颜色。相关色温的定义是: 在某一确定的均匀色度图中, 如果一个光源与某一温度下的黑体具有最接近的色品, 此时黑体的绝对温度值就叫做光源的相关色温。图 7 为 T_c 计算流程。

相关色温的计算^[9]具体如下:

1) 将黑体温度为 T 时的颜色在 1960 UCS 坐标系

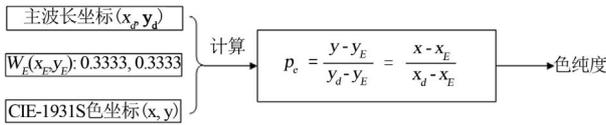


Figure 6. The calculation process of P_c
图 6. 色纯度 P_c 计算流程

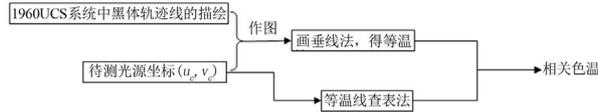


Figure 7. The calculation process of T_c
图 7. 相关色温 T_c 计算流程

中表示出来, 如公式(7):

其中: $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 分别为 CIE 1931 标准观察者光谱三刺激值函数, 其中 C_1 为第一辐射常数, C_2 为第二辐射常数。

2) 改变温度 T , 描出色坐标 $u(T), v(T)$, 则形成一条黑体轨迹线。任一实际光源的色坐标 (u_c, v_c) 常常不在黑体轨迹上, 而是有一定的距离。过 (u_c, v_c) 有一条直线将与黑体轨迹垂直相交于 (u_o, v_o) , 显然该直线上任何一点与 (u_o, v_o) 最接近, 因而 (u_o, v_o) 色坐标点对应的黑体温度 T 表征所述直线上色坐标点的相关色温, 这条直线称为等温线。通过黑体轨迹可作出相关色温从小到大的系列等温线。色坐标 (u_c, v_c) 的相关色温可由对应的等温线查得。

3.6. 显色指数 R_a 的计算

不同光源的光谱功率分布不同, 用其去照明其他

物体, 产生的颜色感觉也将是不同的, 光源的这种决定被照物体颜色感觉的性质称为显色性, 在实际应用场合中, 是评价光源适用性很重要的性质, 一般用显色指数来度量。国标^[8]中也给出了人工照明光源的显色性评价方法, 规定了以检验色样在参照光源和待测光源照明下总的色位移为基础定量评价光源显色性的方法。图 8 为显色指数计算流程。

具体计算过程如下:

1) 按第 3.1 节方法测的光源的光谱功率分布, 计算光源 CIE1931-XYZ 系统色品坐标 x_k, y_k 及 CIE-1960 均匀色度标尺图色坐标 u_k, v_k 。

2) 按照 3.5 节内容测得待测光源的相关色温 T_c 。

3) 根据 T_c 来选定与待测光源色温相同或相近的参照光源, 并计算选定参照光源的光谱功率分布, 也可直接查询黑体轨迹数据表格^[1]选取与 T_c 最接近的参照照明体。具体选择与计算方法, 如下:

当 $T_c \leq 5000$ K 时, 以普朗克辐射体作为参照光源, 用普朗克公式计算其光谱功率分布, 计算如公式(8):

$$P(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (8)$$

其中 λ 为波长, C_1, C_2 分别为第一第二辐射常数, T 为温度分布。

当 $T_c > 5000$ K 时, 以组合昼光作为参照光源, 在待测光源相关色温已知时, 参照光源的光谱功率分布 $P(\lambda, T)$ 按公式(9)计算:

$$P(\lambda, T) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (9)$$

$$u(T) = \frac{4 \int_0^\infty \bar{x}(\lambda) \lambda^{-5} \{ \exp[C_2/\lambda T] - 1 \}^{-1} d\lambda}{\int_0^\infty [\bar{x}(\lambda) + 15\bar{y}(\lambda) + 3\bar{z}(\lambda)] \lambda^{-5} \{ \exp[C_2/\lambda T] - 1 \}^{-1} d\lambda} \quad (7a)$$

$$v(T) = \frac{6 \int_0^\infty \bar{y}(\lambda) \lambda^{-5} \{ \exp[C_2/\lambda T] - 1 \}^{-1} d\lambda}{\int_0^\infty [\bar{x}(\lambda) + 15\bar{y}(\lambda) + 3\bar{z}(\lambda)] \lambda^{-5} \{ \exp[C_2/\lambda T] - 1 \}^{-1} d\lambda} \quad (7b)$$

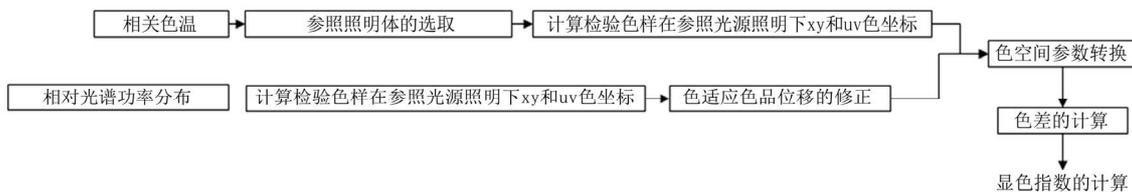


Figure 8. The calculation process of R_a
图 8. 显色指数 R_a 计算流程

其中 $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ 为计算昼光光谱功率分布用的系数, 其数值由国标^[6]直接查出。 M_1 , M_2 为与光源色坐标相关的量, 其量值由公式(10)和公式(11)计算给出。

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_d + 5.9114y_d}{0.0241 + 0.2562x_d - 0.7341y_d} \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{-0.0300 - 31.4424x_d + 30.0717y_d}{0.0241 + 0.2562x_d - 0.7341y_d} \quad (11)$$

其中, x_d, y_d 为参照光源的 CIE-1931xy 色品坐标值, 其量值计算由公式(12)和公式(13)计算

$$x_d = -4.6070 \left(\frac{10^9}{T_c^3} \right) + 2.9678 \left(\frac{10^6}{T_c^2} \right) + 0.09911 \left(\frac{10^3}{T_c} \right) + 0.244063 \quad (4000 \text{ K} \leq T_c \leq 7000 \text{ K}) \quad (12a)$$

$$x_d = -2.0064 \left(\frac{10^9}{T_c^3} \right) + 1.9018 \left(\frac{10^6}{T_c^2} \right) + 0.24748 \left(\frac{10^3}{T_c} \right) + 0.237040 \quad (7000 \text{ K} \leq T_c \leq 25000 \text{ K}) \quad (12b)$$

$$y_d = -3.000x_d^2 + 2.870x_d - 0.2750 \quad (13)$$

4) 计算待测光源在检验色样下照明时的 x_i , y_i 和 u_i , v_i , 及其亮度因数 L_i 。

其中三刺激值 X_i , Y_i , Z_i 具体计算如公式(14)和亮度系数 L_i 的计算如公式(15),

$$X_i = K_m \int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{x}(\lambda) \alpha_i(\lambda) d(\lambda) \quad (14a)$$

$$Y_i = K_m \int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{y}(\lambda) \alpha_i(\lambda) d(\lambda) \quad (14b)$$

$$Z_i = K_m \int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{z}(\lambda) \alpha_i(\lambda) d(\lambda) \quad (14c)$$

$$L_i = \frac{\int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{y}(\lambda) \alpha_i(\lambda) d(\lambda)}{\int_{380}^{780} P_x(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)} \times 100 \quad (15)$$

其中, $\alpha_i(\lambda)$ 为标准检验色的光谱亮度系数, 其数值可以在国标^[6]中查到。

紧接着, 利用如上计算结果可计算出 x_i , y_i 和 u_i , v_i 。

5) 由于待测光源与参照光源照明条件下色适应状态不同, 因此必须对待测光源在各种检验色下进行色品位移修正。 引用国标^[6]中的修正公式如(16)和

(17),

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \left(\frac{C_r}{C_k} \right) C_{k,i} - 4 \left(\frac{d_r}{d_k} \right) d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \left(\frac{C_r}{C_k} \right) C_{k,i} - \left(\frac{d_r}{d_k} \right) d_{k,i}} \quad (16)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \left(\frac{C_r}{C_k} \right) C_{k,i} - \left(\frac{d_r}{d_k} \right) d_{k,i}} \quad (17)$$

式中: $u'_{k,i}$, $v'_{k,i}$ 为做色适应色品位移修正后待测光源照射下第 i 块检验色样的 uv 坐标值; C , d 为色适应色品位移修正值, 由公式(18)、(19)计算得出; r 表示参照光源的下标, k 表示待测光源的下标, i 表示检验色样序号的下标。

$$C = \frac{1}{v} (4 - u - 10v) \quad (18)$$

$$d = \frac{1}{v} (1.708v + 0.404 - 1.481u) \quad (19)$$

6) 色差的计算, 即计算在待测光源照射下和在参照光源照射下第 i 个检验色样的色差 ΔE 。计算如公式(20):

$$\Delta E = \left((W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2 + (U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 \right)^{1/2} = \left((\Delta W_i^*)^2 + (\Delta U_i^*)^2 + (\Delta V_i^*)^2 \right)^{1/2} \quad (20)$$

式中, W^* , U^* , V^* 为 $W^*U^*V^*$ 均匀色空间坐标值, 可由公式(21)、(22)、(23)给出:

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (21)$$

$$U^* = 13W^* (u - u_0) \quad (22)$$

$$V^* = 13W^* (v - v_0) \quad (23)$$

式中 Y 为在待测光源和参照光源照射下检验色样 CIE 1931 XYZ 三刺激值中的 Y 刺激值; u , v 为在待测光源和参照光源照射下检验色样的 uv 坐标值; u_0 , v_0 为照明光源的 uv 坐标值。

7) 特殊显色指数计算公式如(24):

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (24)$$

一般显色指数是由 8 个特殊显色指数 ($i = 1, \dots, 8$) 取算术平均值求得, 计算公式如(25)

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (25)$$

3.7. 色度容差的计算

如何评价待测光源与基准光源之间的差距，目前一般用色度容差来度量。可用如(26)计算公式得到，单位为 SDCM:

$$\text{色度容差} = g_{11}\Delta x^2 + 2g_{12}\Delta x\Delta y + g_{22}\Delta y^2 \quad (26)$$

其中 $\Delta x = (x_1 - x_2)$, $\Delta y = (y_1 - y_2)$; x_1, y_1 为待测光源色坐标, x_2, y_2 为基准光源的色坐标; g_{11}, g_{12}, g_{22} 为基准光源的颜色系数, 可在国标^[5]中直接查到。

通常, 认为人眼感觉不出颜色变化的最大范围称为颜色的宽容差, 国标^[5]中确定了 6 种标准颜色灯, 规定待测光源与其中之一的基准光源色度容差为 5 SDCM, 与目标值正好 5 SDCM 的色点由 $g_{11}\Delta x^2 + 2g_{12}\Delta x\Delta y + g_{22}\Delta y^2 = 25$ 的椭圆来确定, 椭圆之外的则认为待测光源与基准光源的色度容差大于 5 SDCM, 国标^[5]中认定不合格。

3.8. 黄色度 YI , 变黄度 ΔYI , 红色比 R

1) 黄色度 YI

$$YI = \frac{100(1.28X - 1.06Z)}{Y} \quad (27)$$

式中, X, Y, Z 为样品的三刺激值。

2) 变黄度 ΔYI

$$\Delta YI = YI - YI_0 \quad (28)$$

式中 YI_0 为样品初期的黄色度, YI 为经过一定时期后的黄色度。

3) 红色比 R (red ration)

红色比为光源所发射的光谱红色部分(600~780 nm)占可见光部分(380~780 nm)的百分比。

$$r\% = \frac{K \int_{600}^{780} P(\lambda)\nu(\lambda)d\lambda}{\Phi_{\text{总}}} \quad (29)$$

其中 K 为明视觉的光谱光视效率值 683 lm/W; $P(\lambda)$ 被测光源的能量值, $\nu(\lambda)$ 明视觉的视觉函数。

4. 实验结果与分析

根据以上各色度参数的计算方法, 本套色度参数测量系统, 如图 2 为本系统结构示意图, 参考实际需

求, 选择了相对光谱功率分布、峰值波长、峰值带宽、主波长、色度坐标、色温、显色指数、色纯度、黄色度、红色比等参数作为本测试系统的研究重点, 开发了配套的快速色谱计算的上位机软件。这里选购无锡成田科技有限公司的白、红、绿、蓝四种小功率草帽 LED 作为本次测试光源, 其主要色度标称信息如表 1, 本系统对白、红、绿、蓝四种光源各色度参数测试结果软件界面截图如图 9, 使用杭州某知名光电公司标准 LED 光谱测试仪, 在同一背景环境下, 对待测灯进行测量作为本系统测试结果对比, 主要参数测量结果见表 2。

分析白、红、绿、蓝色度参数测量结果可知, 用本测试系统测量计算的色度参数值都在商家给定标称值范围之内。本快速光谱测试系统各色度参数测量结果相较标准 LED 光谱测试仪, 各色度参数测量结果差异范围都在 5%以内, 若考虑系统误差和测量条件不能保证完全一致等因素, 可认为两者测试结果基本一致。

5. 结论

本文整理的各色度参数的算法思路, 过程详细并结合测试原理, 可以更加高效服务于上位机开发者的编程计算, 即使是非本专业的软件工程师也能较为清晰的了解整个计算过程与测试原理的关系, 提高开发效率。

本套色度学实验系统, 主要针对可见光 LED 光源的色度信息在实验教学上的测量分析, 故主要选取色彩三要素中色调和饱和度二要素基础概念相关的参数, 除红色比、黄色度等偏向于工业应用参数外, 其余均为重要的教学参数。本文所列各色度参数, 较

Table 1. The nominal values of main colorimetric parameters for pending test LEDs
表 1. 待测 LED 主要色度参数标称值

参数	主波长/nm	色温/K	显色指数 R_a	色纯度 P_e
光源				
5 mm草帽白光LED	475~485	13,500~14,000	>80	<0.5
5 mm草帽红光LED	620~630	<2000	≤0.1	0.5 < P_e ≤ 1
5 mm草帽绿光LED	520~530	8000~8500	≤0.1	0.5 < P_e ≤ 1
5 mm草帽蓝光LED	465~475	>20000	≤0.1	0.5 < P_e ≤ 1

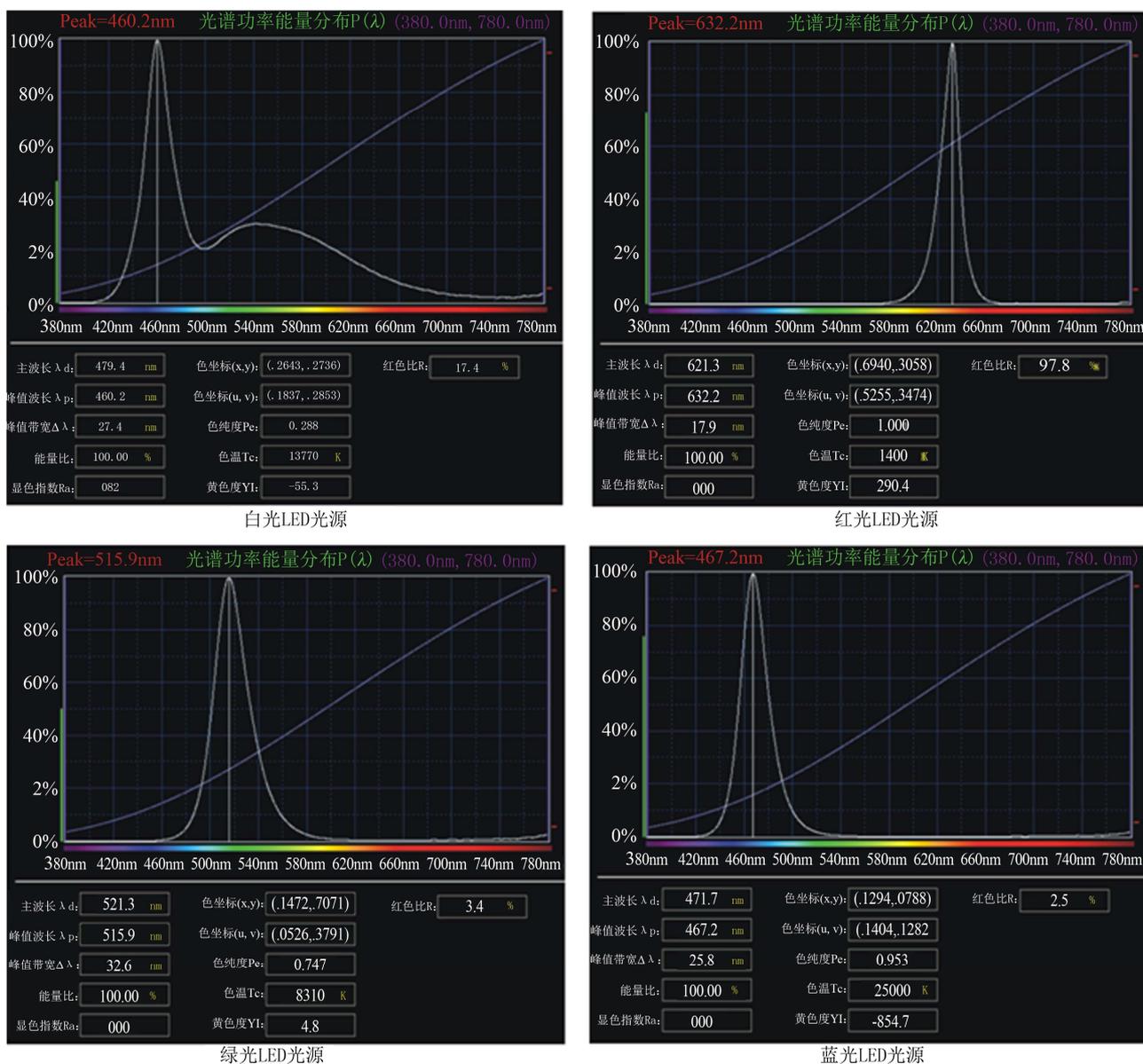


Figure 9. The result of main colorimetric parameters tested by our measurement system

图 9. 本测量系统主要色度参数测试结果

为全面，具体选择，可根据实际需要适当取舍。

本套色度学实验系统是基于线阵 CCD 探测器的测试系统，以光栅为分光元件，分光光谱直接分布到线阵 CCD 的光谱探测方法，相比光谱扫描式等方法，光源光谱探测速度更快，且光路和光谱探测模块可以做的更小；经过优化的光路系统，配合精密加工的狭缝和光栅，分辨率可以得到更好的优化，本系统光谱分辨率可达到 1.5 nm；本文色度计算方法源自于标准化测量方法，如国际照明委员会(CIE)、国标和国内颜色信息工程权威书籍^[1-10]等介绍的计算方法，使得测

Table 2. The result of main colorimetric parameters tested by Standard LED spectrum tester

表 2. 标准 LED 光谱测试仪主要色度参数测试结果

参数	主波长 /nm	色温 /K	显色指数 R_a	色纯度 P_e	黄色度 YI	红色比 R
光源						
5 mm草帽白光LED	477.9	13789	85	0.279	-53.9	17.9%
5 mm草帽红光LED	620.2	1420	0	0.998	291.7	98.1%
5 mm草帽绿光LED	519.7	8325	0	0.769	5.0	3.3%
5 mm草帽蓝光LED	473.2	25150	0	0.948	-851.6	2.5%

量结果更加一致、可信。由光路盒、光纤、积分球(含光纤、夹具、光度头入口),光源盒、光源夹具、光源驱动电源、计算机及其人性化配套实验软件等分立模块,组成整套色度学实验系统,若配以照度计,如图9,可完成色度与光度双路实验,只需一点上灯,各个色度、光度学参数就能实时的计算并显示,不仅方便单灯的色度、光度参数的实时测量分析,也方便不同光源的色度参数的对比分析,如不同 LED 颜色光源的色度对比实验,让学生比较直观的了解不同颜色 LED 灯的各项颜色信息。

6. 致谢

感谢隋成华教授和陈晓明经理的指导,以及杭州博源光电科技有限公司和杭州星谱光电有限公司的帮助和支持,还要感谢杭州博源光电科技有限公司软件工程师赵文仓对本人工作的肯定。

参考文献 (References)

- [1] 宇霄,徐海松.颜色信息工程[M].杭州:浙江大学出版社,2005.
- [2] 金伟其,胡威捷,辐射度.光度与色度及其测量[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
- [3] 国际照明委员会(CIE).CIE15-2004: Colorimetry, 3rd Edition, 2004.
- [4] 国际照明委员会(CIE).CIE13.3-1995: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. 1995.
- [5] GB/T 17262-2011,单端荧光灯性能要求[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [6] GB/T 5702-2003,光源显色性评价方法[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [7] GB/T 3977-2008,颜色的表示方法[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [8] GB/T 7922-2008,照明光源颜色的测量[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [9] 代彩红.光源相关色温计算方法的讨论[J].计量学报,21(3): 183-188.
- [10] 熊利民,霍超,陈为群.光源颜色特性的测量及计算方法[J].计量技术,2005,4: 23-25