

# 复合光视亮度效率的研究

朴大植 陈遐举 王 强 孙之旭

(中国计量科学研究院)

焦书兰 苗 毅

(中国科学院心理研究所)

**摘 要** 采用视亮度匹配法获得了21名中国人眼的平均明视觉等价亮度、视亮度与亮度之比 $B/L$ 值,并理出每个人的数据。视场角为 $10^\circ$ ,参考白光的网膜照度分别取为100、10、1、0.1和0.01Td。

## 一、引 言

关于 $2^\circ$ 和 $10^\circ$ 视场的光谱光效率函数,国际照明委员会(CIE)已收集了充分的数据,也有几种视觉模式。但在日常生活中,多数光源是非单色的复合光,因此,需要在复合光之下寻求光亮视觉模式。另外,CIE的TC1-21主席佐川贤博士于1988年10月发出通知,要求各研究所进行复合光视亮度效率的研究,并将所获得的数据报送CIE,以便推导最合理的数学模式。为此,我们开展了此项研究工作,根据CIE的技术要求,研究内容包括:

- (1) 采用直接视亮度匹配法;
- (2) 采用在CIE色度图上均匀分布并具有足够数据的试验色;
- (3) 获得复合光的相对光谱分布、色坐标、明视等价亮度和视亮度与亮度之比。

复合光的试验色采用为24种。观察者数为21名,其中男性11名、女性10名,年龄从20到43岁,大多数在20~30岁之间,具体年龄情况列于表1。

表1 观察者的年龄

姓名	性别	年龄	姓名	性别	年龄	名姓	性别	年龄
WW	女	20	WHM	女	31	MC	男	24
SDX	〃	22	LYN	〃	35	HZ	〃	25
JXM	〃	22	SCY	〃	38	LCP	〃	31
YH	〃	23	WHB	男	22	YL	〃	32
WH	〃	23	CC	〃	23	HC	〃	33
ZQ	〃	25	LTB	〃	23	CTY,	〃	35
CFY	〃	29	HJJ	〃	24	CXM	〃	43

本文于1991年6月27日收到。

## 二、测量方法

复合光的测量采用直接视亮度匹配法、 $10^\circ$  视场。参考白光采用恒定的 5 个网膜照度水平，它们分别为 100、10、1、0.1 和 0.01 Td。网膜照度水平的调整是通过改变中性光楔和中性滤光片来实现的。

试验光是具有不同光谱功率分布的 24 种颜色，它们是通去各种颜色滤光片的组合来实现的，使其色坐标点充分、均匀地分布在色度图上，如图 1 所示。另外，为了使试验光与在不同网膜照度水平下的参考光的视觉亮度相匹配，在试验光路中插入了不同减光倍数的中性滤光片。

为了求得试验光的明视亮度，用单色仪对试验光（未插入中性滤光片时）进行相对光谱功率分布  $L_{e,\lambda}$  的测定，波长范围为 380~780nm，每隔 5nm 间隔测一次。另外，用标准照度计测定试验光的网膜照度  $B(\text{Td})$ ，然后，根据网膜照度的定义，当瞳孔面积近似作为  $10\text{mm}^2$  时，计算试验光视场明视亮度  $L_0$ 。

$$L_0 = B(\text{Td})/10 \quad (1)$$

根据 CIE 光度学系统有

$$L_0 = k \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中， $k = KK_m$ ， $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。由于  $L_{e,\lambda}$  取为相对值，所以在光度量与辐射量之间存在着系数  $K$ 。通过校准亮度  $L_0$  和  $L_{e,\lambda}$  可求得  $k$ 。于是，在试验光路中插入适当的颜色滤光片（其光谱透射比为  $\tau_\lambda$ ）时，相应的明视亮度可按式求得：

$$L_{p0} = k \int L_{e,\lambda} \tau_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

表 2 示出 24 种试验光的色坐标，表中  $x_2, y_2, x_{10}, y_{10}$  分别是视场角为  $2^\circ$  和  $10^\circ$  时的色坐标。 $L_2$  和  $L_{10}$  为相应于上述视场角的明视亮度， $L'$  为暗视亮度。

对于不同的网膜照度水平，采用 UV-340 分光光度计测量所插入的中性滤光片的光谱透射比，然后计算出光密度  $D_n$ 。由于此种中性滤光片不是完全中性的，因而其积分透射比在不同光谱功率分布情况下是不一样的，故应对相应的试验光进行校准。

观察者在试验光与参考光进行视亮度匹配时，所需的中性光楔密度为  $D_n$ ：

$$D_n = a(R - R_0) \quad (4)$$

式中， $a$  为光楔相应于每种试验光的光密度斜率， $R$  为光楔相对读数， $R_0$  为光楔零点读数。

视亮度匹配所需的试验光的等价明视亮度  $L_p$ ，按下式计算：

$$\log L_p = \log L_{p0} - D_n - D_n \quad (5)$$

观察者在正式观察之前，应接受视亮度匹配方面的训练，并须掌握仪器的使用方法、观

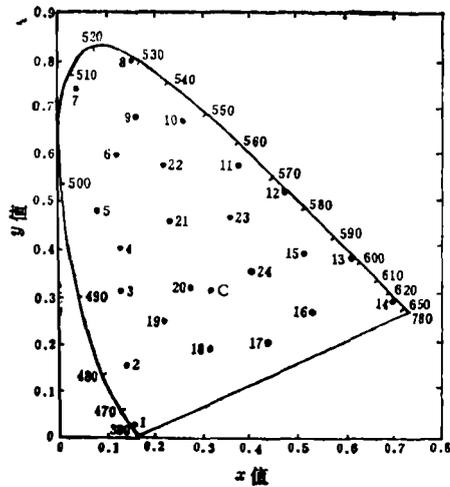


图 1 24 种试验光色坐标在色度图中的分布

表2

24种试验光的色坐标

试验光序号	$x_2$	$y_2$	$x_{10}$	$y_{10}$	$L_{10}/L_2$	$L'/L_2$
1	0.151	0.028	0.146	0.053	2.159	22.393
2	0.136	0.156	0.131	0.202	1.417	8.220
3	0.126	0.306	0.129	0.352	1.267	5.750
4	0.129	0.400	0.135	0.458	1.244	5.225
5	0.177	0.474	0.079	0.562	1.303	6.103
6	0.112	0.594	0.133	0.637	1.179	4.339
7	0.032	0.742	0.067	0.783	1.185	4.633
8	0.153	0.805	0.204	0.767	1.022	2.392
9	0.157	0.683	0.188	0.692	1.103	3.210
10	0.256	0.668	0.291	0.652	1.052	2.188
11	0.376	0.572	0.401	0.557	1.037	1.562
12	0.472	0.527	0.503	0.497	1.001	0.471
13	0.619	0.380	0.623	0.377	1.030	0.189
14	0.704	0.296	0.693	0.307	1.039	0.038
15	0.512	0.390	0.516	0.387	1.041	0.860
16	0.526	0.268	0.508	0.266	1.060	0.663
17	0.433	0.207	0.409	0.203	1.087	1.233
18	0.312	0.190	0.301	0.197	1.149	2.863
19	0.215	0.253	0.215	0.272	1.191	4.218
20	0.274	0.325	0.278	0.331	1.114	2.824
21	0.231	0.451	0.246	0.463	1.114	3.059
22	0.215	0.574	0.232	0.600	1.132	3.367
23	0.353	0.464	0.367	0.464	1.067	1.957
24	0.401	0.348	0.401	0.351	1.077	1.769

测方法及步骤。观察者首先在暗室里进行暗适应，暗适应时间主要根据参考光的网膜照度水平而定，一般为15~30分钟。采用牙印装置以固定人眼瞳孔的位置，使观察精度和稳定性大为提高。

每种试验光要进行5次视亮度匹配，共匹配5种试验光。参考光的网膜照度从100Td开始，按10、1、0.1、0.01Td顺序进行；试验光是按1、2、…、24顺序呈现，以上作为第1轮观察。然后按与上述相反的顺序进行第2轮观察，取两轮观察数据的平均值作为最后结果。

关于视亮度与亮度之比  $B/L$  的计算，是以第12种试验光的明视亮度为基准来求得的，因为它处于光谱轨迹的570nm附近，最接近白光，算式为：

$$B/L = L(12)/L(i) \quad (i=1\sim 24) \quad (6)$$

按对数计算，

$$\log(B/L) = \log L(12) - \log L(i) \quad (7)$$

根据由21名观察者所得观测数据进行平均，表3和表4列出等价明视亮度的对数值、 $B/L$ 和  $\log(B/L)$  值。

表3

等价明视亮度数据  $\log \bar{L}_p [\text{cd}/\text{m}^2]$ 

试验光	100 Td	10 Td	1 Td	0.1 Td	0.01 Td
1	0.574	-0.422	-1.463	-2.553	-3.581
2	0.806	-0.191	-1.222	-2.326	-3.387
3	0.953	-0.047	-1.050	-2.165	-3.194
4	0.910	-0.142	-1.099	-2.162	-3.181
5	0.829	-0.158	-1.147	-2.187	-3.174
6	0.830	-0.129	-1.137	-2.115	-3.146
7	0.823	-0.158	-1.118	-2.148	-3.135
8	0.799	-0.198	-1.117	-2.067	-3.067
9	0.891	-0.136	-1.072	-1.994	-3.002
10	0.879	-0.146	-1.002	-1.971	-2.949
11	0.984	-0.070	-0.916	-1.834	-2.817
12	0.908	-0.055	-0.858	-1.555	-2.372
13	0.829	-0.091	-0.828	-1.358	-2.009
14	0.638	-0.203	-0.870	-1.283	-1.800
15	1.008	-0.003	-0.874	-1.658	-2.571
16	0.848	-0.108	-0.948	-1.685	-2.582
17	0.741	-0.184	-1.022	-1.810	-2.718
18	0.814	-0.101	-1.034	-2.009	-3.086
19	0.882	-0.059	-1.088	-2.119	-3.170
20	0.886	-0.068	-1.055	-2.080	-3.123
21	0.941	-0.094	-1.043	-2.039	-3.062
22	0.889	-0.093	-1.021	-1.944	-2.905
23	0.955	-0.039	-0.982	-1.933	-2.974
24	0.972	-0.001	-0.948	-1.884	-2.924

### 三、测量结果的分析

从图2可以看出,蓝色试验光1和2、红色试验光13和14,在100Td网膜照度水平下的等价明视亮度  $\log L_p$  表现为较低,这说明在明视觉情况下,人眼对于高饱和度的蓝色和红色的视亮度效率较高。在10Td网膜照度水平下,蓝色试验光1和2的等价明视亮度仍有偏低的趋向,但红色试验光13和14的等价明视亮度偏低的程度开始不那么明显了。从1Td网膜照度水平开始,蓝色试验光1和2的等价明视亮度相对地下降得明显一些,且随着网膜照度的下降而更快地下降,这就是说,人眼对于蓝色试验光的视亮度效率在低网膜照度范围内明显地高于其他颜色的试验光。与此相反,红色试验光13和14的等价明视亮度却随着网膜照度水平的下降而升高,到了暗视觉领域的0.01Td时,升高得尤为突出。这说明,红色试验光13和14,其视亮度匹配所需的等价明视亮度随着网膜照度的下降而升高,人眼的视亮度效率在低网膜照度范围内明显低于其他颜色的试验光。

也可从表4中  $\log(B/L)$  的数据来分析一下人眼的视亮度效率。在100和10Td网膜照度的明视觉范围内,除了蓝色试验光1和2稍有上升、红色试验光13和14稍有下降外,其他颜

表 4

 $B/L$  和  $\log(B/L)$  的数据

试验光	$B/L$					$\log(B/L)$				
	100 Td	10 Td	1 Td	0.1 Td	0.01 Td	100 Td	10 Td	1 Td	0.1 Td	0.01 Td
1	2.158	2.328	4.027	9.954	16.181	0.334	0.367	0.605	0.998	1.209
2	1.265	1.377	2.312	5.902	10.351	0.102	0.139	0.364	0.771	1.015
3	0.902	0.982	1.556	4.074	6.637	-0.045	-0.608	0.192	0.610	0.822
4	0.995	1.222	1.742	4.046	6.442	-0.002	0.087	0.241	0.607	0.809
5	1.199	1.268	1.945	4.285	6.339	0.079	0.103	0.289	0.632	0.802
6	1.197	1.186	1.901	3.631	5.943	0.078	0.074	0.279	0.560	0.774
7	1.216	1.268	1.820	3.917	5.794	0.085	0.103	0.260	0.593	0.763
8	1.285	1.390	1.816	3.251	4.954	0.109	0.143	0.259	0.512	0.695
9	1.040	1.205	1.637	2.748	4.266	0.017	0.081	0.214	0.439	0.630
10	1.069	1.233	1.393	2.606	3.776	0.029	0.091	0.144	0.416	0.577
11	0.839	1.035	1.143	1.901	2.786	-0.076	0.015	0.058	0.279	0.445
12	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	1.199	1.086	0.501	0.635	0.434	0.079	0.036	-0.030	-0.197	-0.363
14	1.862	1.406	1.028	0.535	0.268	0.270	0.148	0.012	-0.272	-0.572
15	0.794	0.887	1.038	1.268	1.581	-0.100	-0.052	0.016	0.103	0.199
16	1.148	1.130	1.230	1.349	1.622	0.060	0.053	0.090	0.130	0.210
17	1.469	1.346	1.459	1.799	2.218	0.167	0.129	0.164	0.255	0.346
18	1.242	1.112	1.500	2.844	5.176	0.094	0.046	0.176	0.454	0.714
19	1.062	1.001	1.698	3.664	6.281	0.026	0.004	0.230	0.564	0.798
20	1.052	1.030	1.574	3.350	5.636	0.022	0.013	0.197	0.525	0.751
21	0.927	1.094	1.531	3.048	4.898	-0.033	0.039	0.185	0.484	0.690
22	1.045	1.091	1.455	2.449	3.412	0.019	0.038	0.163	0.389	0.533
23	0.897	0.964	1.330	2.388	3.999	-0.047	-0.016	0.124	0.378	0.602
24	0.863	0.879	1.230	2.133	3.565	-0.064	-0.055	0.090	0.329	0.552

色的试验光基本上都是均衡的,这说明用 CIE  $V(\lambda)$  来计算的亮度值是适合于明视觉范围的。但是,随着网膜照度的下降,蓝色光的上升和红色光的下降都是很明显的。也就是说,对于蓝色光,人眼视亮度效率随着网膜照度的下降而提高;红光却与此相反,人眼视亮度效率随着网膜照度的下降而降低。

另外,从试验结果还可以看出试验光的饱和度也影响着人眼的视亮度效率。例如,蓝色试验光 1 比 2 的饱和度要高,故其视亮度效率随网膜照度水平的下降而提高的幅度要比试验光 2 更明显。红色试验光 14 的饱和度高于试验光 13,故其视亮度效率随网膜照度水平的下降而降低的幅度要比试验光 13 更为明显。

根据各试验光的色坐标(参见表 2 和图 1)以及它们的  $B/L$  值,可在色度图上画出它们的等  $B/L$  曲线图。在 100Td 网膜照度下,画出的等  $B/L$  线呈现为以 570nm 附近试验光为中心的椭圆形状,其始端和末端都在 520~780nm 之间的光谱轨迹上,随着网膜照度水平的下降,其等  $B/L$  线的弯曲程度逐渐变小,并朝着短波方向转移。

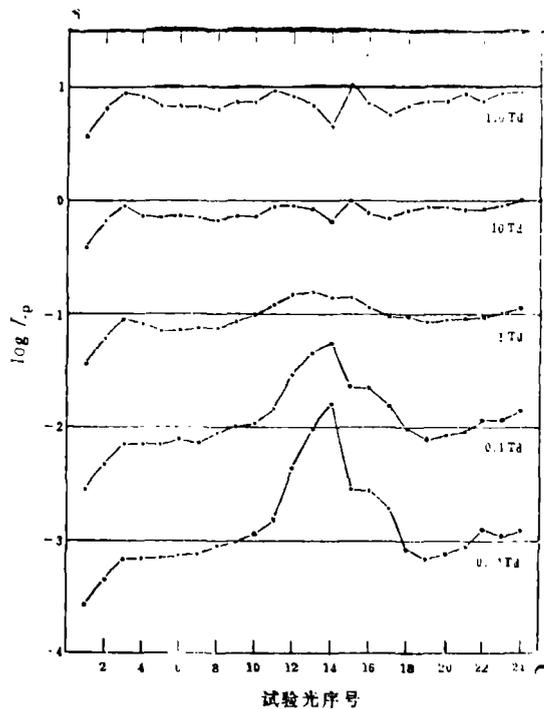


图2  $\text{Log} I_p$  (参看表3)

#### 四、结 束 语

本项研究工作采集了21名观察者的复合光视亮度效率数据,分析表明 Purkinje 效应是完全正确的。此数据已报送国际照明委员会1991年第22届大会,以期纳入国际平均值,为新的光度系统数学模式提供可靠的数据。

在研究过程中得到佐川贤和不破正宏先生支持,在此表示衷心的感谢。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] M. Ikeda and S. Ashizawa, Equivalent lightness of colored objects of equal Munsell chroma and of equal Munsell value at various illuminances, *Color Res. App.*, 16(1991), 72—80.
- [ 2 ] K. Sagawa and K. Takeichi, Mesopic spectral luminous efficiency functions, *J. Light Vis. Env.*, 11(1987), 22—29.
- [ 3 ] ——, Mesopic photometry system based on brightness perception, CIE Report (1987).
- [ 4 ] A. Yujiri, Brightness perception of surface colors at various illuminance levels, *J. Illum. Engng.*, 73(1989), 295—302.

(下转第183页)

行速度。显然在算法方面还可加以改进和完善，如果将其作为三坐标测量仪或其它动态量仪的数据处理软件包的一个组成部分，可有效地提高测试精度。

### 参 考 文 献

- 1 林洪桦. 动态测试误差的系统建模与混合谱分析法. 计量学报, 1986, 7(2):128.
- 2 Graupe D. Time Series Analysis, Identification and Adaptive Filtering. Krieger Publishing Co. 1984
- 3 Ljung L, Soderstrom T. Theory and Practice of Recursive Identification. MIT Press, 1983.
- 4 王晓岩. 应用自适应滤波抑制动态测试随机误差[硕士论文]. 北京: 北京工业学院, 1988.

## Applying Adaptive Filtering to Reduce the Random Error in Dynamic Measurement

Lin Honghua and Wang Xiaoyan

(Beijing Institute of Technology Beijing 100081)

**Abstract**—An adaptive filtering method is used in this paper, which combines the recursive prediction error identification with the Kalman filtering, to reduce the random error in dynamic measurement, so as to obtain more precise and reliable result of a measurement. In the meantime, in order to avoid the influence of the notable trend of data, the moving average method is used to predecompose the data. A series of simulating tests is also completed to get the suitable value of the model order and other parameters of algorithm in various cases. The results of many simulating tests and applied examples show that the variance of dynamic measurement random error can be cut down about 30%~50%. By this method only a little prior informations are needed and the calculation is rapid, so it can be used in real time process.

(上接第166页)

## Luminous Efficiencies Investigation of Non-spectral Colors

Piao Dazhi, Chen Xiaju, Wang Qiang and Sun Zhixu

(National Institute of Metrology)

Jiao Shulan and Miao Yi

(Institute of Psychology, Academia Sinica)

**Abstract**—A set of average photopic equivalent luminance for 24 non-spectral colors has been obtained by 21 Chinese observers using the heterochromatic brightness matching method in a 10° field. The retinal illuminance levels of the reference white light are 100, 10, 1, 0.1 and 0.01 Td, respectively.