

# 国际照明协会1960年均匀色度标尺 图\*的均匀性<sup>1)</sup>

喻柏林 焦书兰 荆其诚 张增慧

中国科学院心理研究所

## 摘 要

本实验通过对CIE 1960均匀色度图黑体轨迹不同区域的色温点 $\infty$ K、8333K、4167K的视觉评价,探讨这一色度图的均匀性。

我们用了两个被试,分别对视觉色度计 $2^\circ$ 视野的两半视场进行颜色匹配。两位被试得到相同的结果(1)不同色温点的同一视觉等级图形的形状和大小各不相同,表明CIE1960均匀色度图的黑体轨迹区域不够均匀,(2) $\infty$ K和8333K色温点的相同视觉等级长度都不相等,而4167K色温相等。可以认为,1960年均匀色度图在4167K的较小范围内的均匀性较好。

## 前 言

视觉上颜色差别相等的两对色度点,在CIE1931( $x, y$ )色度图上的距离不相等,而对评定色差、利用黑体轨迹等温线确定光源的相关色温以及考查光源的显色性等带来不方便。为克服CIE1931( $x, y$ )色度图的视觉不均匀性,1937年麦克亚当(MacAdam)<sup>[6]</sup>提出简便的转换系数,将其投射转换为均匀色度标尺图(缩写为UCS图),使色空间尽可能均匀。莱特(Wright)<sup>[6],[10]</sup>、麦克亚当<sup>[7]</sup>和史太尔斯(Stiles)<sup>[8]</sup>提供的实验材料都说明,麦克亚当的UCS图比CIE1931( $x, y$ )色度图均匀。因而,CIE在1960年采用麦克亚当的UCS图作为标准的UCS图<sup>[9]</sup>。1971年CIE15号出版物推荐将这个图称为CIE1960UCS图<sup>[1]</sup>。但是,许多材料都表明CIE1960UCS图仍不理想。如莱特的“虚线”的长度在图上并不相同<sup>[6]</sup>。麦克亚当<sup>[7]</sup>和史太尔斯<sup>[8]</sup>的椭圆中心部位较圆,边缘部位更倾向椭圆,而且这些椭圆形在大小上也不是等大的,在图的中心部位面积较小,边缘部位面积较大。布鲁恩(Brown)和麦克亚当<sup>[4]</sup>、布鲁恩<sup>[3]</sup>以及韦泽斯基(Wyszecki)和非尔德(Fielder)<sup>[11]</sup>等人的色匹配实验也得到类似的结果。

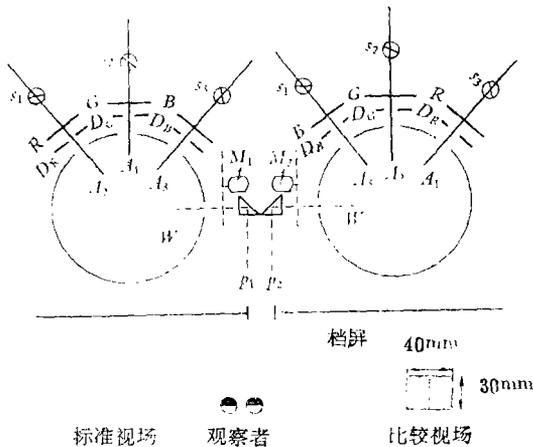
本文通过对CIE1960UCS图黑体轨迹不同区域的色温点的视觉评价,进一步探讨这一色度图的均匀性。

\* 缩写为CIE1960UCS图

1) 本文于1980年6月13日收到。

### 实 验 方 法

仪器：本实验使用的仪器是双积分球目视色度计\*，其结构如图 1。它利用带滤光片的



- A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>X 射光孔
- W 出射光孔
- R, G, B, 滤光片
- D<sub>R</sub>, D<sub>G</sub>, D<sub>B</sub> 光栏
- S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> 光源
- P<sub>1</sub>P<sub>2</sub> 视场
- M<sub>1</sub>M<sub>2</sub> 减光盘

的投光器，将红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三原色光投入积分球，产生混合的颜色光，照亮一半视场。同样装置的另一组 (R)、(G)、(B) 三原色光射入另一积分球，混合出射后，照亮另一半视场。在实验中，我们仅对左积分球色度计进行定标，其三原色坐标见表 1，色域见图 2。

图 1 双积分球目视色度计示意图

为了在仪器色域内复现 CIE (X)、(Y)、(Z) 系统的颜色，特解出 (X) (Y) (Z) 原色向仪器 (R) (G) (B) 原色的转换方程：

$$\begin{aligned}
 R &= 2.4440X - 0.9261Y - 0.3639Z \\
 G &= -0.8185X + 1.7892Y - 0.0106Z \\
 B &= 0.0576X - 0.1264Y + 0.9850Z
 \end{aligned}$$

其亮度方程是：

$$Y = R + 3.0136G + 0.4021B$$

表 1 三原色色度坐标

坐标 \ 原色	(R)	(G)	(B)
x	0.5088	0.1005	0.1616
y	0.3491	0.3819	0.1187

仪器准确度的考查：用光谱光度法测量由仪器产生的从 ∞K—1515K 按 60 微倒度等间隔的 12 个色温点的色度坐标 (x', y')，将它们与相应绝对温度下普朗克 (Planckian) 黑体的 CIE1931 (x, y) 色度坐标作比较，两者之差的平均数为

$$\Delta x = 0.0033, \Delta y = 0.0034.$$

标准光与试验光：

标准光：在黑体轨迹上按 120 微倒度等间隔选取 0、120 和 240 微倒度 (对应 ∞8333 和 4167K) 的三个色温点作为标准光。三者的亮度都是 27cd/m<sup>2</sup>。

试验光：以每一个标准光为中心点，通过中心点作两对相互垂直的直线 (其中一条为等温线)，使其相邻两条直线间的夹角都等于 π/4，而共有八条射线。在每一条射线上取

\* 见“科学通报”，1980年第 1 期。本文选用的三原色与前文所用的稍有差别，见本文表 1。

4—8个点作为试验点。试验点之间在 $\nu$ 坐标上的增量一般为0.001—0.005。取这种间隔的目的在于使色度的渐变获得近似连续变化的视觉效果。各个试验光刺激的亮度也都是 $27\text{cd}/\text{m}^2$ 。全部试验光和标准光的CIE-(X)(Y)(Z)系统的坐标,输入TQ-16型计算机,通过本仪器的原色转换方程和Y式,换算为本仪器(R)(G)(B)系统的坐标。

观察者:

男女各一名,视力和颜色视觉正常。两人都是有经验的颜色辨别试验的观察者。年龄在40岁左右。

试验程序:

试验分为两步。首先,于仪器的左半视场上呈现标准光。要求观察者在右半视场上调配出与标准光在色调、饱和度和明度上都看不出差别的匹配光。这种调配操作是由观察者口述增减(R)、(G)、(B)三原色数量,由实验者控制三个投光器来实现的。观察者和实验者需要紧密合作、经过反复调配,直至观察者确认“看不出两半视场有差异”。此时,将右半视场的匹配光规定为“名义标准光”。在一条等温线的试验系列中,同一名观察者的“名义标准光”始终固定不变。

第二步:在右半视场获得“名义标准光”以后,实验者在左半视场分别地呈现试验光。每呈现一个试验光就通知观察者作成对目视比对。对于每一对光,要求观察者按下述三个视觉等级作出选择判断。

第一级:“匹配”。试验光与标准光在色调上看不出差别,或是两者仅在饱和度上没有差别或稍有差别。

第二级:“可接受”。试验光与标准光在饱和度上的差别较之“匹配级”有所增加;也能觉察出色调差别,但两者看来仍属同一个色调。这种差别在主观上还可接受。

第三级:“不可接受”。试验光已变化到与标准光不属同一个色调。

若观察者对每对光的判断十分肯定,则仅试验几次;若观察者认为介于两个等级之间而感到犹豫时,则试验十次。每次实验都需强迫作出一个等级的肯定判断。

本实验的每一个色温点为一个试验大系列,每一个大系列包括八个小系列,每一条射线上的全部试验点组成一个小系列。观察者对每一对光作出判断后,双眼即离开 $2^\circ$ 观察视场,转向大约有 $10\text{cd}/\text{m}^2$ 亮度的室内背景,稍作休息。此时实验者记录观察者的口头报告,并按计算机输出顺序呈现下一个试验光。三个试验大系列分两个半天时间做完。

## 结果与讨论

1. 分别统计每一名观察者评判每一试验光的结果。凡100%肯定判断为某一等级的试验光,则定为该等级。对于同一条射线,在同属“匹”级或“可”级的几个试验点中,取其离标准光最远的那点作为“匹”级或“可”级的上限,订名为匹配点或可接受点。凡90—80%机率判断为“可接受”(或“不可接受”)级的试验光,则在100%机率评判为“匹配级”(或“可接受级”)的最后一点与此点之间内扞出一点,列为“匹”级(或“可”级)的点。两名观察者评判结果见表2和表3。以每一色温点为单位,将评判结果画在CIE1960UCS图上,然后按逆时针方向连接同一个视觉判断等级的各点,形成图2(观察者甲的结果)和图3(观察者乙的结果),共六张小图。从六张小图可以看到:

表 2 观 察 者

方 位 角 ( $\pi$ )			2		$\frac{1}{4}$		$\frac{1}{2}$		$\frac{3}{4}$	
视 觉 判 断 等 级			匹	可	匹	可	匹	可	匹	可
标 准 色 温	$\infty$	"	0.1822	0.1834	0.1744	0.1714	0.1714	0.1674	0.1774	0.1718
		v	0.2744	0.2810	0.2730	0.2780	0.2655	0.2665	0.2622	0.2596
	8333	"	0.1996	0.2026	0.1931	0.1924	0.1788	0.1750	0.1926	0.1912
		v	0.3099	0.3149	0.3099	0.3199	0.3079	0.3099	0.2994	0.2990
K	4167	"	0.2258	0.2310	0.2234	0.2258	0.2183	0.2161	0.2164	0.2140
		v	0.3353	0.3395	0.3360	0.3434	0.3373	0.3403	0.3332	0.3336

表 3 观 察 者

方 位 角 ( $\pi$ )			2		$\frac{1}{4}$		$\frac{1}{2}$		$\frac{3}{4}$	
视 觉 判 断 等 级			匹	可	匹	可	匹	可	匹	可
标 准 色 温	$\infty$	"	0.1816	0.1822	0.1744	0.1714	0.1756	0.1714	0.1788	0.1748
		v	0.2712	0.2744	0.2730	0.2780	0.2645	0.2655	0.2628	0.2610
	8333	"	0.1970	0.1996	0.1931	0.1928	0.1788	0.1750	0.1926	0.1912
		v	0.3049	0.3099	0.3099	0.3149	0.3079	0.3099	0.2994	0.2990
K	4167	"	0.2258	0.2310	0.2234	0.2268	0.2183	0.2161	0.2190	0.2140
		v	0.3353	0.3395	0.3360	0.3460	0.3373	0.3403	0.3328	0.3336

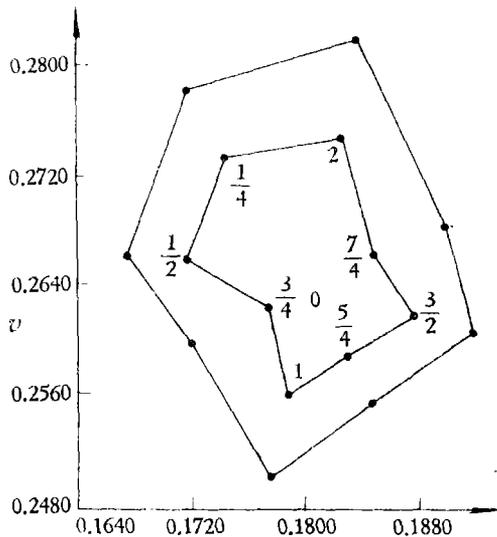


图 2-1 色温 =  $\infty$  K

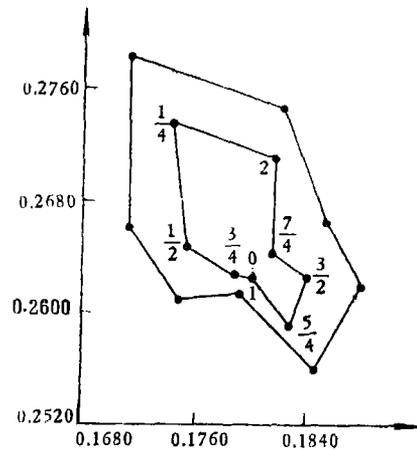


图 3-1 色温 =  $\infty$  K

甲 的 结 果

1		$\frac{5}{4}$		$\frac{3}{2}$		$\frac{7}{4}$	
匹	可	匹	可	匹	可	匹	可
0.1786	0.1774	0.1828	0.1848	0.1878	0.1920	0.1852	0.1900
0.2560	0.2500	0.2588	0.2556	0.2615	0.2605	0.2658	0.2680
0.1920	0.1908	0.1938	0.1944	0.1970	0.2024	0.2000	0.2068
0.2969	0.2949	0.2969	0.2849	0.2979	0.2949	0.3018	0.3040
0.2160	0.2130	0.2203	0.2196	0.2260	0.2282	0.2260	0.2330
0.3273	0.3250	0.3260	0.3236	0.3273	0.3243	0.3316	0.3306

乙 的 结 果

1		$\frac{5}{4}$		$\frac{3}{2}$		$\frac{7}{4}$	
匹	可	匹	可	匹	可	匹	可
0.1798	0.1796	0.1828	0.1848	0.1840	0.1878	0.1814	0.1852
0.2624	0.2612	0.2588	0.2556	0.2625	0.2615	0.2640	0.2658
0.1920	0.1908	0.1938	0.1942	0.1970	0.2024	0.1964	0.2000
0.2969	0.2949	0.2969	0.2899	0.2979	0.2949	0.3006	0.3018
0.2184	0.2130	0.2203	0.2196	0.2260	0.2282	0.2260	0.2330
0.3293	0.3260	0.3260	0.3236	0.3273	0.3243	0.3316	0.3306

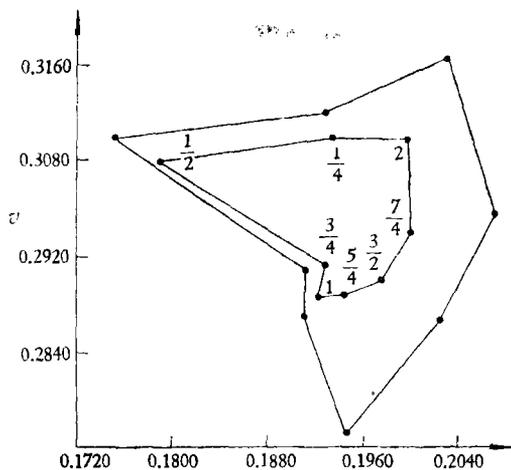


图 2-2 色温=8333K

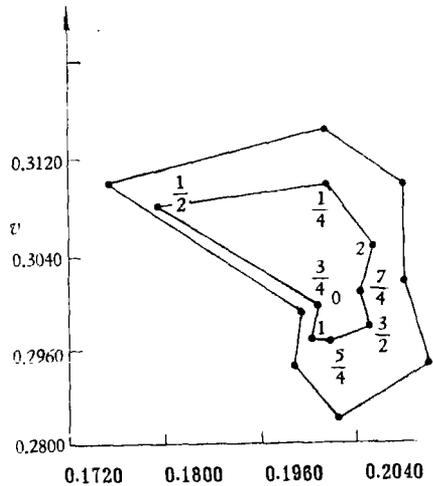


图 3-2 色温=8333K

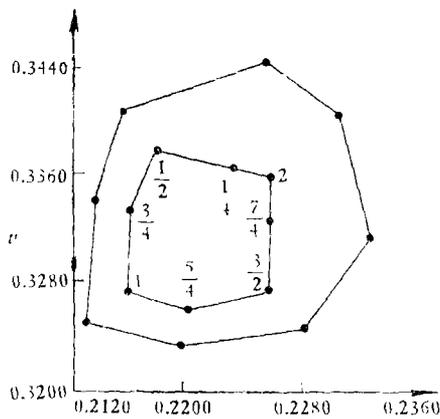


图 2-3 色温=4167K

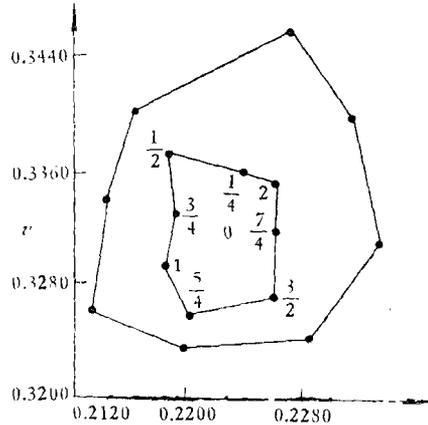


图 3-3 色温=4167K

1) 在同一张图中,可以区分出匹配级和可接受级,形成两个八边形面积,前者的色域小于后者的。同时,可认为两者基本上是相似图形。

2) 每一色温点的两名观察者的图形形状看来相似,见图2-1与图3-1,图2-2与图3-2,以及图2-3与图3-3三对图形。

3) 同一视觉判断等级的三张图形的形状和大小各不相同,见图2和图3。这表明CIE1960UCS图的黑体轨迹区域尚不够均匀。

4) 色温为4167K的一对图形比较接近正八边形。标准光比较接近位于图的中心位置,表明在视觉上属同一等级(即颜色差别相等)的两点,在图上的距离也大致相同,此范围内的均匀性较好。其余两对图形的标准光都不在图的中心位置上,表明此范围内的均匀性较差。由此可见,黑体轨迹区域内的均匀性在不同部位是有差别的。

2. 为了进一步比较同一标准光下各个匹配点(或可接受点)距离该标准光的距离,我们借用极坐标系的概念进行描述和分析。假设任一匹配点M的极坐标为 $M(\Delta E, \varphi)$ ,其中 $\varphi$ 为极角,它代表该点在 $(u, v)$ 图中的方位; $\Delta E$ 为极径,它代表该点与标准光在 $(u, v)$ 图上的平面距离。两名观察者的 $\Delta E$ 值见表4和表5。因为匹配级与可接受级类似相似图形,所以,我们在这里仅就匹配级数据作极角与极径函数关系图,见图4(观察者甲的结果)和图5(观察者乙的结果)。从图可知:

1) 三个色温点两名观察者的结果有大致相近趋势。尤其是8333K和4167K两点,甚至同一极角的 $\Delta E$ 数值也颇接近。

2) 图4-3和图5-3的4167K结果表明, $\Delta E$ 仅在0.004范围内波动,基本不受方位角 $\varphi$ 的影响,它再一次表明1960UCS图在此区域内较均匀,即视觉上感到颜色差别相等的两点,有大致相等的距离。高色温点如 $\infty$ K和8333K,随匹配点方位角 $\varphi$ 的变化, $\Delta E$ 值波动较大。此现象再一次表明,CIE1960UCS图在这些区域内不够均匀。由此可见,对CIE1960UCS图的均匀性不便作一肯定或否定的简单结论,似乎要“因区而异”,黑体轨迹的区域不同,其视觉均匀性也有所不同。本作者的另一项研究也有类似趋势\*。麦克亚当<sup>(7)</sup>和斯太尔斯<sup>(8)</sup>在CIE1960UCS图上的实验材料与本结果也有类似处。

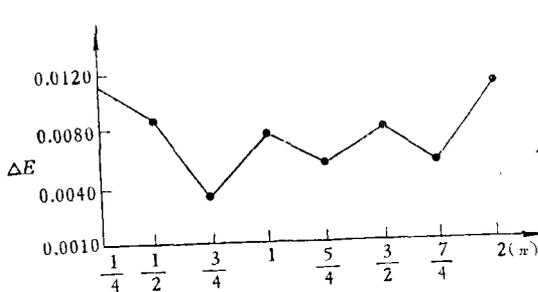
\* 待发表。

表 4 观察者甲的  $\Delta E$  值

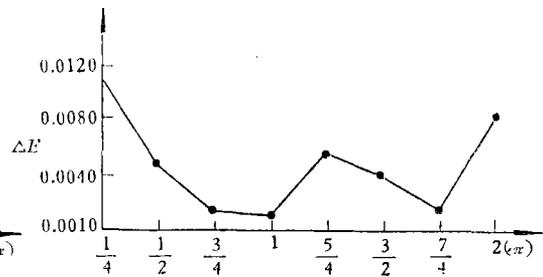
方位角( $\pi$ )		2	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{7}{4}$
匹配点 A	$\infty$	0.0111	0.0111	0.0089	0.0030	0.0076	0.0054	0.0079	0.0056
	8333	0.0117	0.0100	0.0168	0.0011	0.0034	0.0030	0.0039	0.0067
	4167	0.0047	0.0039	0.0063	0.0059	0.0080	0.0060	0.0063	0.0038
可接受点 A	$\infty$	0.0178	0.0169	0.0118	0.0092	0.0138	0.0092	0.0123	0.0109
	8333	0.0175	0.0200	0.0211	0.0025	0.0057	0.0150	0.0101	0.0138
	4167	0.0114	0.0117	0.0100	0.0083	0.0117	0.0092	0.0100	0.0102

表 5 观察者乙的  $\Delta E$  值

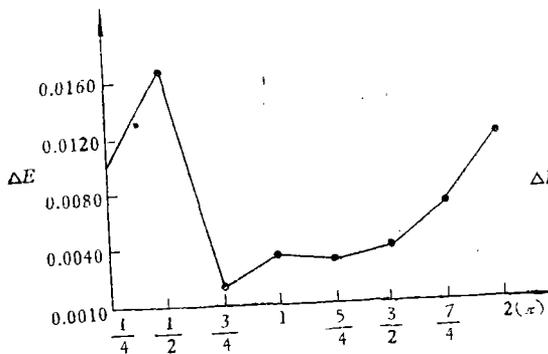
方位角( $\pi$ )		2	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{7}{4}$
匹配点 A	$\infty$	0.0078	0.0111	0.0046	0.0014	0.0011	0.0054	0.0040	0.0013
	8333	0.0060	0.0100	0.0168	0.0029	0.0034	0.0030	0.0039	0.0011
	4167	0.0047	0.0039	0.0063	0.0032	0.0048	0.0066	0.0063	0.0038
可接受点 A	$\infty$	0.0111	0.0169	0.0089	0.0058	0.0023	0.0092	0.0079	0.0056
	8333	0.0117	0.0150	0.0211	0.0067	0.0057	0.0100	0.0101	0.0025
	4167	0.0114	0.0144	0.0100	0.0083	0.0111	0.0092	0.0100	0.0109



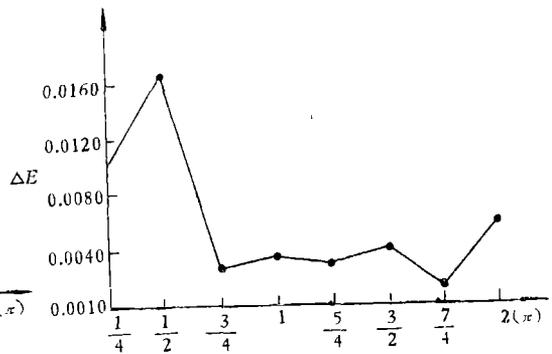
观察者甲： $\infty$ K 匹配点的方位角  $\varphi$   
图 4-1 色温 =  $\infty$ K



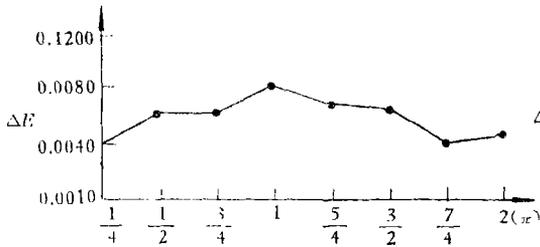
观察者乙： $\infty$ K 匹配点的方位角  $\varphi$   
图 5-1 色温 =  $\infty$ K



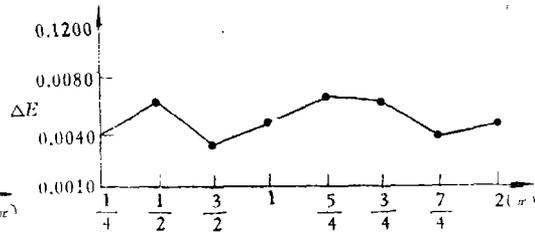
匹配点的方位角  $\varphi$   
图 4-2 色温 = 8333K



匹配点的方位角  $\varphi$   
图 5-2 色温 = 8333K



匹配点的方位角 $\varphi$   
图 4-3 色温=4167K



匹配点的方位角 $\varphi$   
图 5-3 色温=4167K

## 小 结

两名观察者对CIE1960UCS图黑体轨迹上的四个色温点进行目视颜色匹配宽容度实验,实验结果有大致相近的趋势:

1. 四个色温点的同一视觉等级图形的形状和大小各不相同,表明1960UCS图的黑体轨迹区域不够均匀。

2.  $\infty$ K和8333K色温点八个方位的相同视觉等级长度都不相等;4167K色温相等。可认为,1960UCS图在4167K的较小范围内的均匀性较好。

我们这个实验是初步的,总的看来,1960UCS图的不同部位的均匀性似有所不同,可以说是“因区而异”,尚可作进一步的改善。

## 参 考 文 献

- [1] CIE Colorimetry, Official Recommendations of the International Commission on Illumination, Publication CIE No. 15 (E-1.3.1)1971
- [2] CIE Proc. 14th Session, Brussels Vol. A. P. 91 (colorimetry Committee Report), 1959
- [3] Brown W. R. J.: Color discrimination of twelve observers, J. Opt. Soc. Am., 47, 137, 1957
- [4] Brown W. R. J.: and MacAdam D. L., Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance difference, J. Opt. Soc. Am., 39, 808, 1949
- [5] Judd D. B. and Wyszecki G.: Color in business, science and industry, third edition, 1975
- [6] MacAdam D. L.: Projective transformations of I. C. I color specifications, J. Opt. Soc. Am., 27, 249, 1937
- [7] MacAdam D. L.: Visual sensitivities to color difference in daylight, J. Opt. Soc. Am., 32, 247, 1942
- [8] Stiles W. S., A modified Helmholtz line element in brightness-color space, Proc. phys. Soc., 58, 41, 1946
- [9] Wright W. D.: The sensitivity of the eye to small colour differences, Proc. Phys. Soc., 53, 93, 1941
- [10] Wright W. D.: The graphical representation of small color differences, J. Opt. Soc. Am., 33, 632, 1943
- [11] Wyszecki G. and Fielder G. II.: New color-matching ellipses, J. Opt. Soc. Am., 61, 1135, 1971

## FURTHER DATA ON THE UNIFORMITY OF THE CIE 1960 UCS DIAGRAM

Yu Bo-lin, Jiao Shu-lan et al.  
(*Institute of Psychology, Academia Sinica*)

Color matching experiments were carried out with 2 observers on 3 color temperature points, i. e.  $\infty$ K, 8333K and 4167K, on the Planckian locus in the CIE 1960 Diagram. A 2° bi-partite field on a visual colorimeter was used for matching the above standard lights with test lights. The 2 observers gave similar results in that: 1) The size and shape of the tolerance areas for a match are different for the 3 color temperature points; 2) The high color temperature points of  $\infty$ K and 8333K are not situated at the center of the tolerance areas, which indicates that these areas on the Planckian locus of the CIE 1960 UCS Diagram may not be uniform. But the color temperature point of 4167K is at the center of the tolerance area which shows that the area around this point is more uniform.