

# 国际照明委员会1960年均匀色度标尺图\*上等温线的有效长度的视觉研究<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

为确定CIE 1960 UCS图上位于普朗克(Planckian)轨迹上的等温线的适当长度,我们在普朗克轨迹上按 $60\mu\text{rd}$ 的等间隔,从 $0-360\mu\text{rd}$ 选取七种光源作为标准光。又在每条对应的等温线上选取10—12种光作为试验光。标准光与试验光同时呈现在目视色度计的两半视场上,以评价它们的色差。两名视察者给出类似的结果。通过对色差的三个视觉等级的评定,可以沿普朗克轨迹画出两个色差区域。位于这两个区域内的光分别与对应的普朗克辐射体有相同的或有相似的颜色。

## 一、前 言

标定发光体的颜色历来采用色温或相关色温概念。所谓色温就是取发光体的颜色与黑体加热到某一温度所发出的光色作比较,选取在颜色上最接近、最相匹配的黑体温度来标定发光体的颜色,此温度称为色温〔海德(Hyde)<sup>[1]</sup>, 1911; 普里斯特(Priest)<sup>[2,3]</sup>, 1923, 1933〕或相关色温〔戴维斯(Davis)<sup>[4]</sup>, 1931〕。例如,一个发光体的颜色与黑体加热到绝对温度3000K时发出的光色最接近,这个发光体的色温就是3000K。确定相关色温的方法,从贾德(Judd)<sup>[5]</sup>(1936)到凯莱(Kelly)<sup>[6]</sup>(1963)都遵循如下约定:在均匀色度图上作一组正交于普朗克轨迹的垂线,认为垂线上所有点的颜色都可用垂线与普朗克轨迹的交点,即黑体温度表示。这种垂线叫做等温线。确定等温线的该方法不是根据视觉判断,而是如贾德指出的几何等值法。为了使代表任一发光体的点与普朗克轨迹上的点有最近似的匹配,两点间的距离应是最短的,而这一最短的距离必定位于代表任一发光体的点垂直于普朗克轨迹的直线上,即在等温线上。问题在于,这些等温线能延长多远仍与黑体色相匹配或近似匹配,从而不失“等温”意义。显然,距离普朗克轨迹愈远,发光体的颜色与黑体颜色失匹配的程度(即色差)就愈大。戴维斯(1931)首次提出相关色温概念时,注意到待测发光体与某一温度下黑体失匹配的程度,即色差的大小,并作过一些理论推算,

1) 本文于1983年2月13日收到。

这是很有意义的。但戴维斯并未进行视觉实验。贾德(1936)也曾注意到这个问题, 认为“垂直线的延长线只在紧邻普朗克轨迹的区域”, 否则会超出匹配范围, 或可能被误认为“具有明显的非黑体颜色的光源在实验上能找到确定的、最接近的色温”。凯莱(1963)绘制CIE 1960 UCS图的等温线族时曾提到, 每一条垂直线的长度是任意的, 只要它们不超越可察觉的非黑体颜色的范围。麦克亚当(MacAdam)<sup>1)</sup>, (1977)也提出等温线“来自推测, 而不是视觉材料。”可见, 戴维斯、凯莱和麦克亚当都指出了问题, 但没有给出明确的解答。

本文尝试通过视觉判断实验, 在CIE1960 UCS图上探索等温线的视觉有效长度, 以期确定一个适宜范围。在此范围内, 具有某种相关色温的任一发光体都能与相应的黑体色有着最接近的颜色。从而使色度学能更有效地发挥作用。

## 二、实验方法

### 1. 仪器

本实验使用的仪器是双积分球目视色度计<sup>1)</sup>, 其结构如图1。它利用带滤光片的投光器, 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。为

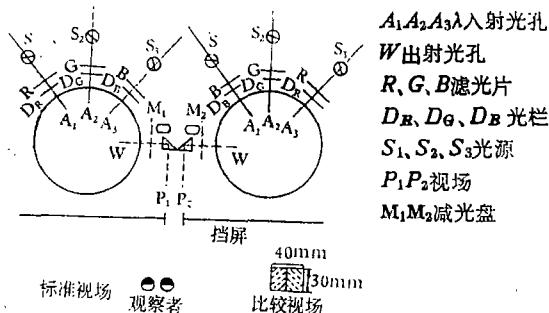


图1 双积分球目视色度计示意图

表1 三原色色度坐标

坐标 \ 原色	(R)	(G)	(B)
u	0.5088	0.1005	0.1616
v	0.3491	0.3819	0.1187

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:

$$R = 2.4440X - 0.9261Y - 0.3639Z$$

$$G = -0.8185X + 1.7892Y - 0.0106Z$$

$$B = 0.0576X - 0.1264Y + 0.9850Z$$

其亮度方程是:

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

1) 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。

仪器准确度的考查：用光谱光度法测量由仪器产生的从 $\infty$ K—1515K按 $60\mu\text{rd}$ 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黑体的CIE 1931 ( $x, y$ )色度坐标作比较，两者之差的平均数为 $\Delta x=0.0033$ ,  $\Delta y=0.0034$ 。

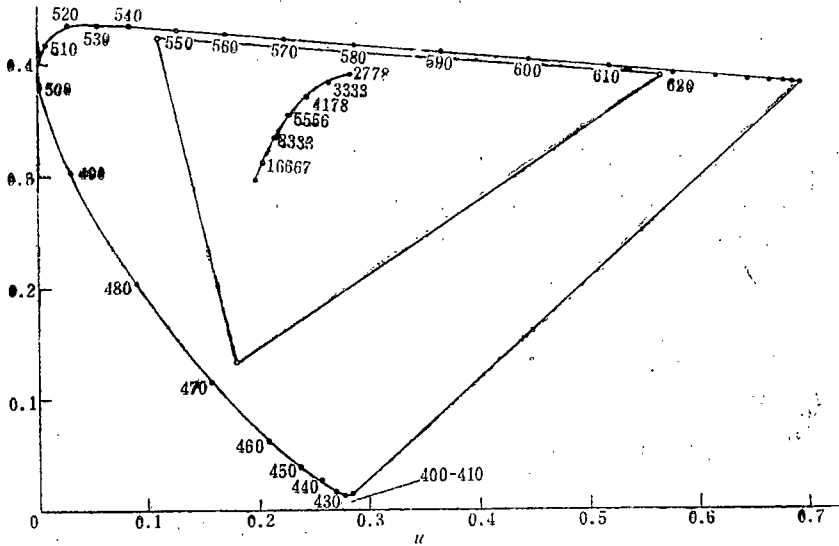


图 2 CIE1960UCS图

## 2. 标准光和试验光

在CIE 1960 UCS图上,取普朗克轨迹上的色温点作为标准光。它们是本仪器色域内从0— $360\mu\text{rd}$ (对应 $\infty$ K—2778K)、按 $60\mu\text{rd}$ 等间隔选取的七个色温点(见图2),其 $u, v$ 坐标见表2。

表 2 标准光色度坐标

色 温		色 度 坐 标	
$\mu\text{rd}$	K	$u$	$v$
0	$\infty$	0.1801	0.2635
60	16667	0.1849	0.2802
120	8333	0.1936	0.2999
180	5556	0.2064	0.3178
240	4178	0.2222	0.3323
300	3333	0.2400	0.3431
360	2778	0.2590	0.3505

在图2的普朗克轨迹上的标准光色温点的等温线上,以标准光色温点为起点,按不同数值的 $v$ 坐标增量( $\Delta v$ )在等温线上下方位上取5—6对对称点作为试验光。 $\Delta v$ 的间隔在0.001—0.005范围内变化。一般在邻近普朗克轨迹区域间隔较小,远离普朗克轨迹间隔较

大。全部标准光和试验光的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。全部颜色光的亮度都是 $27\text{cd}/\text{m}^2$ 。

### 3. 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观察者。年龄在40岁左右。

### 4. 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,由试验者控制三个投光器来实现的。观察者和试验者需要紧密合作、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”。在同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,试验者在左半视场上顺序地呈现试验光。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;观察者若认为介于两个等级之间而感到犹豫时,则试验十次。每次试验都需强迫作出一个等级的肯定判断。观察者对每对光作出判断后,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。此时试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。

每一条等温线组成一个试验大系列,它又包括位于普朗克轨迹上下方位的两个小系列。每一小系列约有十次观察:做完一小系列,再做另一个小系列。全部完成一个大系列后,再换另一个大系列。中间休息约十分钟。七个系列分两个半天时间完成。

## 三、结 果

首先,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。对于同一条等温线,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个点作为“匹”级或“可”级的上限,订名为匹配点或可接受点。凡90—80%机率评判为“匹配级”(或“可接受级”)的最后一点与此点之间内插出一点,列为“匹”级(或“可”级)的点。两名观察者评判结果见表3。匹配点或可接受点距离标准光的长度 $\angle E$ ,即1960 UCS图上的UCS坐标线段值,我们称之为等温线的视觉有效长度。根据表2和表3,我们分别计算了本实验等温线的有效长度 $\angle E$ ,其结果见表4。可见,

表3-1 观察者甲匹配

色温 K	$\infty$				16667				8333			
	上方		下方		上方		下方		上方		下方	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
匹配点	0.1714	0.2655	0.1878	0.2615	0.1790	0.2822	0.1900	0.2782	0.1842	0.3049	0.1970	0.2979
可接受点	0.1674	0.2665	0.1920	0.2605	0.1670	0.2862	0.1960	0.2762	0.1820	0.3060	0.2024	0.2949

表3-2 观察者乙匹配点

色温 (K)	$\infty$				16667				8333			
	上方		下方		上方		下方		上方		下方	
	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
匹配点	0.1714	0.2655	0.1840	0.2625	0.1790	0.2822	0.1900	0.2782	0.1842	0.3049	0.2024	0.2949
可接受点	0.1674	0.2665	0.1960	0.2595	0.1670	0.2862	0.2018	0.2742	0.1788	0.3079	0.2080	0.2919

表4-1 观察者甲的  $\Delta E$  值

色温(K)	$\infty$		16667		8333		5556		4167		3333		2778	
	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方
匹配点	0.0089	0.0079	0.0062	0.0055	0.0106	0.0039	0.0077	0.0075	0.0063	0.0063	0.0055	0.0089	0.0052	0.0084
可接受点	0.0130	0.0123	0.0189	0.0118	0.0131	0.0101	0.0098	0.0120	0.0101	0.0100	0.0099	0.0111	0.0068	0.0104

表4-2 观察者乙的  $\Delta E$  值

色温(K)	$\infty$		16667		8333		5556		4167		3333		2778	
	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方	上方	下方
匹配点	0.0089	0.0040	0.0062	0.0055	0.0106	0.0101	0.0077	0.0075	0.0088	0.0063	0.0110	0.0089	0.0071	0.0094
可接受点	0.0130	0.0164	0.0189	0.0179	0.0168	0.0165	0.0122	0.0152	0.0126	0.0124	0.0188	0.0166	0.0105	0.0209

点和可接受点的色度坐标

5556				4167				3333				2778			
上方		下方		上方		下方		上方		下方		上方		下方	
u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
0.2005	0.3228	0.2120	0.3128	0.2183	0.3373	0.2260	0.3273	0.2378	0.3481	0.2440	0.3351	0.2574	0.3555	0.2616	0.3425
0.1990	0.3240	0.2154	0.3098	0.2146	0.3423	0.2282	0.3243	0.2358	0.3521	0.2448	0.3331	0.2570	0.3570	0.2620	0.3405

和可接受点的色度坐标

5556				4167				3333				2778			
上方		下方		上方		下方		上方		下方		上方		下方	
u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
0.2005	0.3228	0.2120	0.3128	0.2168	0.3393	0.2183	0.3373	0.2353	0.3531	0.2440	0.3351	0.2574	0.3555	0.2618	0.3415
0.1972	0.3258	0.2176	0.3078	0.2146	0.3423	0.2296	0.3223	0.2320	0.3601	0.2470	0.3281	0.2558	0.3605	0.2652	0.3305

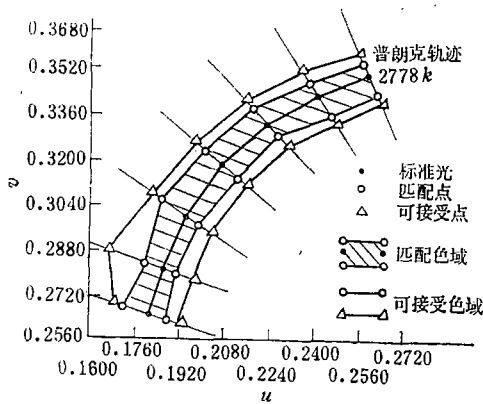


图3-1 观察者甲的结果

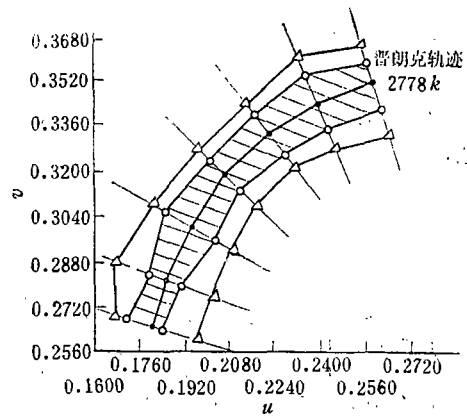


图3-2 观察者乙的结果

两名观察者有大致相同的结果。

然后，将表3结果标在1960 UCS图上，每条等温线的上下方位各有一个视觉判断等级的点。按色温分布连接同一个视觉等级的七个点，于是，在朗普克轨迹的上下方位形成四条大致平行于普朗克轨迹的线，见图3。连接同一个视觉等级的两条线所包围的面积，我们称之为相关色温的有效色域。图3表示两个有效色域。可见，两名观察者有着形状和面积大致相同的两个有效色域，并且，“可接受”色域都要大于“匹配”色域。

## 四、讨 论

1. 本仪器没有附加自动计算系统,不便呈现接近连续改变的特定色光;同时,右积分球目视色度计没有定标,不便产生特定的颜色。因而我们采取过渡标准光的方法,对每一名观察者,名义标准光与左半球视场的标准光的色差都被控制在1个或小于1个刚可觉察差( $j, n, d$ )之内,即“匹配点”与标准色小于一个色差单位。一条等温线的大系列实验光都与同一个名义标准光作比较,所以大系列的各试验光的结果可相互比较,它们之间的相对关系也是不变的。但是,由于是用名义标准光替代标准光,这就使得每一名观察者的标准不是同一个正好落在普朗克轨迹上的点。因而,根据本实验的结果不便作出有效长度的准确数量规定,也不便对各条等温线之间的结果作出精确的比较。这是本实验的不足之处。

2. 本实验的两名观察者都能对普朗克轨迹两侧等温线的长度给出大致相同的视觉评定。实验结果提出了确定等温线的视觉有效长度或相关色温的视觉有效色域的可能性,并给出了初步范围。

## 五、小 结

本实验试图对CIE 1960 UCS图普朗克轨迹等温线划定出视觉上“等温”的长度范围,即视觉有效长度。参加实验的两名观察者获得大致相同的结果,这就表明,我们有可能定出黑体各个色温点的“等温”范围。超出这个范围的色度点,色差就太大,尽管它们也是位于等温线上。按颜色匹配和失匹配的程度,又可对等温线的视觉有效长度作进一步的规定,如本实验所确定的匹配等级和可接受等级。但是,就每一条等温线的有效长度的准确量值而言,还有待进一步试验。

## 参 考 文 献

- (1) Hyde, E. P. Phys. Rev., 32, p. 632, 1911.
- (2) Priest, I. G. J. Opt. Soc. Am., & Rev. Sci. Inst., 7, 12, 1175--1209, 1923.
- (3) Priest, I. G. J. Opt. Soc. Am., 23, 2, 1933.
- (4) Davis, R. J. Rev. Nat. Bur. Stand., 7, 1931.
- (5) Judd, D. B. J. Opt. Soc. Am., 26, 1936.
- (6) Kelly, K. L. J. Opt. Soc. Am., 53, 8, 1963.
- (7) MacAdam, D. L. J. Opt. Soc. Am., 67, 6, 1977.

## EFFECTIVE LENGTH OF ISOTHERMATURE LINES ON THE CIE 1960 UCS DIAGRAM

Yu Bo-lin Jiao Shu-lan Jing Qi-cheng Zhang Zeng-huei  
(*Institute of Psychology, Academia Sinica*)

### Abstract

To determine the appropriate length of the isothermature lines on the Planckian locus in the CIE 1960 UCS Diagram, 7 lights from 0—360 $\mu$ rd in equal intervals of 60  $\mu$ rd in the Planckian locus were used as standards, with each standard light a set of 10—12 lights on each corresponding isothermature line was used as test lights. The standard and test lights were matched on a 2° bi-partite field in a visual colorimeter to evaluate their color difference. The 2 observers gave similar results. By determining 3 levels of color difference from the Planckian locus along each isothermature line, it was possible to draw 2 zones along the Planckian locus. Lights falling within these zones are either of the same color or of similar color as the correlated Planckian radiator.