

3.6 CIE 光源显色指数的计算方法

所有的光源都有色度坐标，但不是所有的光源都具有“有意义”的色温和显色指数，如果光源的色度坐标离开黑体轨迹太远，落在了“白区”以外的区域，那么，对该光源来说，计算它的色温和显色指数就很可能没有什么意义了。换言之，如果计算得到的显色指数是负值的话，在色度学上只能说明该光源不适合作为显色照明用的光源，但并不是说这种光源一无是处，它们同样可以用作指示或者其他用途。

1965 年 CIE 制定一种评价光源显色性的方法，简称“测验色”法，经 1974 年修订，正式推荐在国际上采用。这个方法是用一个显色指数值表示光源的显色性。光源的显色指数是待测光源下物体的颜色与参照光源下物体的颜色相符程度的度量。CIE 规定用普朗克辐射体或标准照明体 D 作为参照光源，并将其显色指数定为 100。CIE 规定若干测验用的标准颜色样品，以这些标准颜色样品在参照光源下和另一 3000 K 标准荧光灯下的颜色变化量(在两种光源下颜色样品的色差 ΔE)为尺度，约定标准荧光灯的显色指数为 50，结合上述显色指数的定量尺度，导出计算光源显色指数的公式。

下面我们将详细讨论光源 CIE 参数(包括色度坐标、色温、显色指数)的计算方法：

(1) 测出待测光源 k 的相对光谱功率分布 $\varphi_k(\lambda)$ ($\lambda=380\sim730\text{ nm}$)

(2) 计算待测光源 k 的色度坐标和相关色温

把待测光源 k 的相对光谱功率分布 $\varphi_k(\lambda)$ 分别乘以图 3-9 中 CIE1931 标准色度观察者三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ ， $\bar{y}(\lambda)$ ， $\bar{z}(\lambda)$ ，并求和

$$\begin{cases} X_k = k \sum_{380}^{730} \varphi_k(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y_k = k \sum_{380}^{730} \varphi_k(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z_k = k \sum_{380}^{730} \varphi_k(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases}$$

式中, X_k , Y_k , Z_k 是 CIE 1931 标准色度学系统的三刺激值; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$

是 CIE 1931 标准色度观察者三刺激值(图 3-9); 波长间隔 $d\lambda(\Delta\lambda)$ 用 1 nm。

通过下面的方程式算出待测光源的色度坐标(x_k , y_k):

$$\begin{cases} x_k = \frac{X_k}{X_k + Y_k + Z_k} \\ y_k = \frac{Y_k}{X_k + Y_k + Z_k} \\ z_k = \frac{Z_k}{X_k + Y_k + Z_k} \end{cases}$$

利用公式

$$T_c = 669A^4 - 779A^3 + 3660A^2 - 7047A + 5652$$

$$(2000K \leq T_c \leq 10000K)$$

$$A = \frac{(x_k - 0.3290)}{(y_k - 0.1870)}, \quad x_k, y_k \text{——待测光源色度坐标}$$

$$T_c = 669A^4 - 779A^3 + 3660A^2 - 7047A + 5210$$

$$(10000K \leq T_c \leq 15000K)$$

$$A = \frac{(x_k - 0.3316)}{(y_k - 0.1893)}, \quad x_k, y_k \text{——待测光源色度坐标}$$

算出待测光源 k 的相关色温 T_c 。

再利用公式

$$\begin{cases} u_k = \frac{4X_k}{X_k + 15Y_k + 3Z_k} \\ v_k = \frac{6Y_k}{X_k + 15Y_k + 3Z_k} \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} u_k = \frac{4x_k}{-2x_k + 12y_k + 3} \\ v_k = \frac{6y_k}{-2x_k + 12y_k + 3} \end{cases}$$

求出待测光源的 CIE 1960 UCS 坐标 (u_k , v_k)。

表 3-4 计算参照照明体项目所用的系数

$$f = a + bm + cm^2, \quad m = 10^4/Tc$$

函数	CI E 颜色 样品	2500—5000 K			5000—10000 K			10000—25000 K		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c
u		0.1636 8	0.0203 7	0.0017	0.1768	0.0053 2	0.00543	0.17733	0.00364	0.00665
v		0.2567 3	0.0422 4	-0.0044 9	0.2543 5	0.0445 4	-0.0045 1	0.26305	0.02835	0.00313
U*	1	19.377	10.2	-1.277	21.751	6.965	-0.185	23.30143	4.17828	1.0864
	2	9.49	5.298	-0.897	8.029	6.077	-0.902	9.12937	4.00582	0.008737
	3	-4.765	-1.343	-0.398	-10.218	3.789	-1.614	-9.6842	2.64747	-1.00912
	4	-24.793	-6.118	0.412	-30.272	-0.094	-1.246	-30.3871 1	-0.01956	-1.2155455
	5	-14.35	-9.554	0.978	-18.351	-4.935	-0.382	-19.4074 8	-3.09689	-1.19104
	6	-6.279	-10.597	1.639	-8.466	-7.777	0.722	-10.3942 4	-4.31418	-0.8465
	7	6.098	1.499	0.466	10.848	-3.035	1.601	10.04137	-1.43281	0.79637
	8	11.843	11.494	-0.546	20.453	2.544	1.914	21.09061	1.6003	2.24569
	9	72.465	26.67	-3.033	77.119	19.233	-0.212	81.87	10.801	3.576
	10	22.831	6.474	-1.408	18.026	9.809	-1.859	19.537	6.884	-0.422
	11	-31.81	-8.476	0.867	-37.582	-1.986	-0.955	-38.077	-1.199	-1.265
	12	-6.44	-14.329	1.84	-13.613	-6.466	-0.312	-15.15	-3.804	-1.471
	13	18.147	9.694	-1.369	18.784	8.123	-0.687	20.44	5.095	0.719
	14	-3.195	-1.7	-0.123	-6.393	1.348	-0.86	-6.198	0.909	-0.618
V*	1	16.01	-4.996	0.316	12.034	-1.388	-0.601	11.2107	-0.00443	-1.18572
	2	45.134	-15.485	1.429	40.714	-11.35	0.229	37.42736	-5.47892	-2.42491
	3	67.177	-22.998	2.247	64.01	-19.76	1.143	59.02158 8	-10.7189 8	-3.00876
	4	36.027	-13.126	1.424	35.034	-12.258	1.043	32.09446	-6.88162	-1.45369
	5	-9.861	1.843	0.061	-6.613	-1.203	0.812	-6.51932	-1.25582	0.77525
	6	-47.506	12.466	-0.77	-37.315	2.943	1.673	-35.5708 8	0.14834	2.774892
	7	-47.784	14.954	-1.321	-38.941	6.753	0.844	-36.2576 8	2.21129 8	2.767745
	8	-29.76	10.104	-1.091	-25.931	6.314	0	-23.7507 1	2.48777 8	1.688152
	9	25.957	-10.114	0.675	18.714	-3.708	-0.92	17.347	-1.414	-1.882
	10	100.81 7	-35.614	3.433	96.245	-31.204	1.889	88.663	-17.39	-4.491
	11	30.527	-11.357	1.275	30.858	-11.503	1.166	28.391	-6.935	-0.983
	12	-51.097	6.597	0.322	-41.888	-2.813	2.666	-41.911	-2.44	2.328
	13	34.556	-11.598	0.981	29.094	-6.696	-0.337	26.77	-2.646	-2.118
	14	35.034	-11.752	1.135	32.651	-9.366	0.393	30.072	-4.731	-1.717
	1	58.759	1.2	0	58.729	1.158	0	59.01429 4	0.72230 4	0.1728074
	2	58.853	0.65	0	58.45	0.809	0	58.4463 1	0.72694 1	0.078703

W *	3	61.369	-0.086	0	60.5	0.341	0	60.11362	0.77921 3	-0.0942948
	4	62.051	-1.164	0	61.56	-0.877	0	61.17741	-0.34102 4	-0.189049
	5	63.138	-1.168	0	63.076	-1.091	0	62.84329	-0.73510 5	-0.136505
	6	61.875	-1.053	0	62.474	-1.288	0	62.49059	-1.18841	-0.0996442
	7	59.497	0.296	0	60.251	-0.057	0	60.62459	-0.50415 9	0.1118895
	8	59.89	1.142	0	60.678	0.757	0	61.31203	-0.09276 9	0.2704993
	9	33.122	3.888	0	33.314	3.729	0	34.926	1.437	0.797
	10	78.817	1.135	0	77.861	1.546	0	77.69	1.628	0.06
	11	53.827	-1.657	0	53.362	-1.355	0	52.971	-0.768	-0.22
	12	32.985	-2.528	0	34.005	-2.921	0	33.882	-2.519	-0.257
	13	77.732	1.095	0	77.519	1.138	0	77.682	0.869	0.109
	14	40.077	-0.121	0	39.509	0.163	0	39.221	0.503	-0.08

(3) 选择参照光源 r

由 T_c 选择参照光源。参照光源不用具体光源，而用参照照明体。所选用的参照照明体与待测光源的色度应相同或接近相同。

参照光源与待测光源的色度差 ΔC 应小于 15 麦勒德。

待测光源(色度坐标 u_k, v_k)和参照照明体(色度坐标 u_r, v_r)之间的色度差 ΔC 按下式计算：

$$\Delta C = \left[(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2 \right]^{1/2}$$

$\Delta C = 5.4 \times 10^{-3}$ 这一色度差在普朗克轨迹上大约相当于 15 麦勒德，因而 ΔC 应小于 5.4×10^{-3} 。若待测光源和参照照明体之间的色度差大于 5.4×10^{-3} ，显色指数的计算准确性便降低。

实际计算中，用 $f = a + bm + cm^2$ ($m = 10^4/T_c$) 来计算得参照照明体 r 的 $u_r, v_r, U_{r,i}^*, V_{r,i}^*, W_{r,i}^*$ 。表 3-4 列出了计算参照照明体 r 参数所用的系数。

(4) 孟塞尔颜色样品

表 3-5 孟塞尔颜色样品

号数	孟塞尔标号	日光下的颜色
1	7.5R 6/4	淡灰红色
2	5Y 6/4	暗灰黄色
3	5GY 6/8	饱和黄绿色
4	2.5G 6/6	中等黄绿色

5	10BG 6/4	淡蓝绿色
6	5PB 6/8	淡蓝色
7	2,5P 6/8	淡紫蓝色
8	10P 6/8	淡红紫色
9	4,5R 4/13	饱和红色
10	5Y 8/10	饱和黄色
11	4,5G 5/8	饱和绿色
12	3PB 3/11	饱和蓝色
13	5YR 8/4	淡黄粉色(人的肤色)
14	5GY 4/4	中等绿色(树叶)

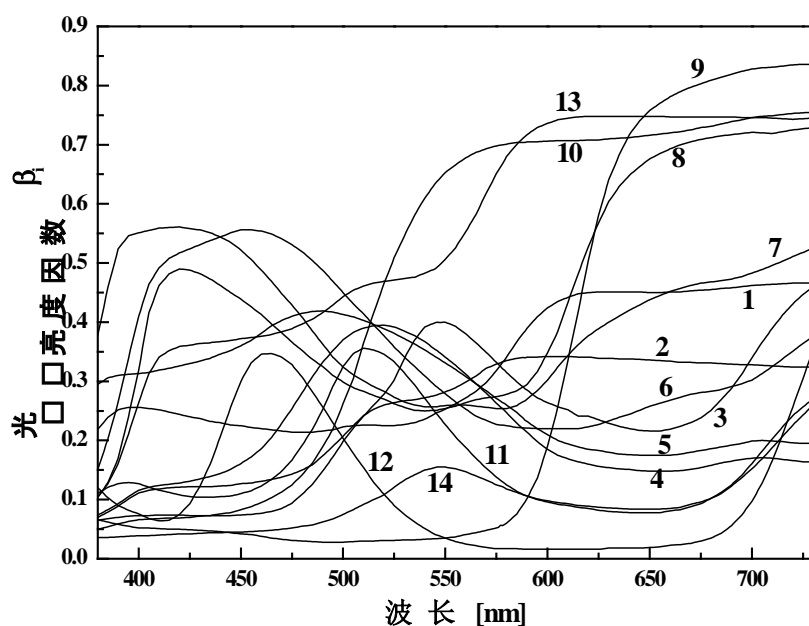


图 3-18 孟塞尔 1-14 号标准颜色样品的光谱辐亮度因数

表 3-5 列出了计算光源显色指数用的 14 块孟塞尔标准颜色样品。图 3-18 是孟塞尔 1-14 号标准颜色样品的光谱辐亮度因数 β_i 。这些样品包括彩度较高的红、黄、蓝及欧美人的皮肤色和树叶绿色。特殊显色指数可用任何一种颜色样品来计算，但一般显色指数只能用 1-8 号样品来计算。

光源的显色指数是测量 14 块孟塞尔标准颜色样品在待测光源 k 和参照光源

r 下的颜色差异求得的。

由

$$\begin{cases} X_{k,i} = k \sum_{380}^{730} \beta_i(\lambda) \varphi_k(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y_{k,i} = k \sum_{380}^{730} \beta_i(\lambda) \varphi_k(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z_{k,i} = k \sum_{380}^{730} \beta_i(\lambda) \varphi_k(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases}$$

和

$$\begin{cases} x_{k,i} = \frac{X_{k,i}}{X_{k,i} + Y_{k,i} + Z_{k,i}} \\ y_{k,i} = \frac{Y_{k,i}}{X_{k,i} + Y_{k,i} + Z_{k,i}} \\ z_{k,i} = \frac{Z_{k,i}}{X_{k,i} + Y_{k,i} + Z_{k,i}} \end{cases}$$

计算孟塞尔颜色样品 i 在待测光源下的色度坐标($x_{k,i}$, $y_{k,i}$)。

再利用公式

$$\begin{cases} u_{k,i} = \frac{4X_{k,i}}{X_{k,i} + 15Y_{k,i} + 3Z_{k,i}} \\ v_{k,i} = \frac{6Y_{k,i}}{X_{k,i} + 15Y_{k,i} + 3Z_{k,i}} \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} u_{k,i} = \frac{4x_{k,i}}{-2x_{k,i} + 12y_{k,i} + 3} \\ v_{k,i} = \frac{6y_{k,i}}{-2x_{k,i} + 12y_{k,i} + 3} \end{cases}$$

计算孟塞尔颜色样品 i 在待测光源下的 CIE 1960 UCS 坐标 ($u_{k,i}$, $v_{k,i}$)。

(5) 适应性色位移

由于待测光源 k 和所选用的参照照明体 r 的色度不完全相同,而使视觉在不同照明下受到颜色适应的影响。为了处理两种照明下的色适应,必须将待测光源

的色度坐标 u_k, v_k 调整为参照照明体的色度坐标 u_r, v_r , 即 $u'_k = u_r, v'_k = v_r$ 。这时各颜色样品 i 的色度坐标 $u_{k,i}, v_{k,i}$ 也要做相应的调整, 成为 $u'_{k,i}, v'_{k,i}$ 。这种色度坐标的调整叫做适应性色位移, 用以下系数关系式进行转换:

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} \bullet c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} \bullet d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} \bullet c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} \bullet d_{k,i}},$$

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} \bullet c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} \bullet d_{k,i}}$$

式中各 c, d 函数包括待测光源 u_k, v_k 的函数 c_k, d_k , 参照照明体 u_r, v_r 的函数 c_r, d_r , 及待测光源下各颜色样品 $u_{k,i}, v_{k,i}$ 的函数 $c_{k,i}, d_{k,i}$ 均由下式计算:

$$c = \frac{4 - u - 10v}{v},$$

$$d = \frac{1.708v + 0.404 - 1.481u}{v}$$

(6) CIE 1964 颜色空间坐标的计算

将(2)中的 Y_k 值调整为 100 后, 得调整因子

$$k = \frac{100}{\sum_{380}^{730} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda}$$

将(4)中的 $Y_{k,i}$ 乘以 k 后, 用下式将数据转换为 CIE 1964 颜色空间坐标:

$$W_{k,i}^* = 25(Y_{k,i})^{1/3} - 17,$$

$$U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^* (u'_{k,i} - u'_k),$$

$$V_{k,i}^* = 13W_{k,i}^* (v'_{k,i} - v'_k),$$

式中 $u'_k = u_r, v'_k = v_r$ 。

(7) 颜色样品的总色位移

用 CIE 1964 色差公式计算在待测光源 k 和参照照明体 r 照明下同一颜色样

品 i 的色差:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} = \sqrt{(\Delta U_i^*)^2 + (\Delta V_i^*)^2 + (\Delta W_i^*)^2}$$

(8) 显色指数的计算

特殊显色指数($i=1, 2, 3 \cdots 14$)

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i ;$$

一般显色指数(CIE1-8 号颜色样品 R_i 的平均值):

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

由于一般显色指数 R_a 是由 8 个颜色样品 R_i 的平均值, 所以即使两个光源有完全相同的 R_a , 两光源下的同一颜色样品的 R_i 之间也有较大差别, 只有当两个光源的 R_a 都接近 100 时, 两光源下颜色样品的 R_i 差别才可能很小。

CIE 光源显色指数是基于 CIE 1964 颜色空间上对待测光源和参照照明体下颜色样品色差矢量长度的比较。应该承认, 色位移的方向也是重要的, 显色指数不包括色位移方向的度量。基于上述原因, 即使两个具有相同 R_i 的光源, 如颜色样品 i 的色位移方向不同, 这一样品的颜色在视觉上也不会相同。同理在两个具有相同 R_a 的光源下观察颜色, 也不保证它们有同样的颜色视觉效果。因此在要求精确辨别颜色的实践中应该注意到, 虽然不同的光源可能具有相同的特殊显色指数或一般显色指数, 但这并不表明各种光源之间可以相互代替使用。