

望远镜的透过率与“发黄”

白琨璞

内 容 提 要

从色度上说明目视望远系统透过率的表示方法,以实例进行了有限波长透过率的简化计算和测试。对某些望远镜“发黄”问题得出色度上的解释和度量,分析指出减轻或消除“发黄”现象的方向。

一、透过率与色度

人眼通过望远镜观察景物或目标时,要接收来自目标的丰富多彩的信息,如:亮度、颜色等等。其中,尤其是色的信息通过人眼的色觉功能更能增加对目标观察的真实性,提高对目标的识别能力。所以在性能评价中,研究有关望远镜透射色等色度学问题,是不可偏废的一项内容。

目前,有些望远镜产品透射色偏黄,俗称“发黄”,很不利于目视观察。普遍认为这种“发黄”现象,是玻璃材料和膜层的一种光谱性质,从色度学上不难认识它和度量它,并可以从工艺上减轻或消除它。本文就与此有关的一些问题进行分析、讨论。

根据C. I. E(国际照明委员会)的规定,任何一种颜色都可通过三刺激值 X 、 Y 、 Z 进行计算:

$$X = \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$$Y = \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$Z = \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

其中 $S(\lambda)$ ——标准光源的光谱分布;

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ——光谱三刺激值;

$\rho(\lambda)$ ——物体的光谱反射率或透过率。

色度坐标为:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2)$$

人眼感觉的色,不仅与 $\rho(\lambda)$ 有关,而且和照明的光谱分布 $S(\lambda)$ 有关。因此,要表示和度量物体的色,首先要规定一个标准光源或标准照明 $S(\lambda)$ 。C. I. E规定了标准光源 A 、 B 、 C (见图1和表1)。作为 A 、 B 、 C 的辅助标准,又推荐了 D_{65} 光源,它表示色温为6500°K的白光,即平均白天照明的白色。另外,还有等能量光谱白光 E ,已在德国采用,

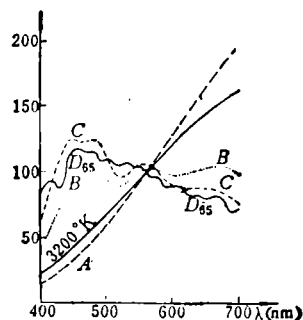


图1 标准光源的光谱分布

表 1

光源	性 质	注
A	2854°K黑体的光谱分布	$x = 0.44757$ $y = 0.40754^*$
B	大约与中午自然光相同	$x = 0.34842$ $y = 0.35141$ $T_c \approx 4870^\circ\text{K}$
C	大约与含有蓝光成分的白天光相同	$x = 0.31006$ $y = 0.31616$ $T_c \approx 6770^\circ\text{K}$
D_{65}	相当于白天的平均照明	$x = 0.313$ $y = 0.329$ $T_c \approx 6500^\circ\text{K}$
E	具有等能量的光谱分布	$x = 0.3333$ $y = 0.3333$ $T_c \approx 5400^\circ\text{K}$

注：* 均指2°视场的色坐标。

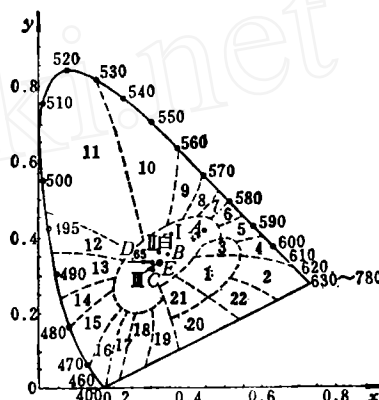
但尚未被 C. I. E 承认。针对本文讨论的目视望远镜,标准光源选用 D_{65} 光源是比较合适的。

(1) 式中的 $\rho(\lambda)$, 在此即为望远镜的光谱透过率。它是在其它条件确定之后, 直接反映系统色性能的一种物理量, 是我们能测量和控制的一个参数。测量和控制 $\rho(\lambda)$ 便能实现对望远镜透射色的度量或色度上的改善。所以, 研究望远镜透射色的问题实质上就归结于对望远镜光谱透过率的测试与控制; 而透过率的评价自然要与色度性能联系在一起。

(1) 式中 Y , 其 $\bar{y}(\lambda)$ 实际上是人眼视见函数。取 $W(\lambda) = S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)$ 为权函数, 则 Y 即为对 $\rho(\lambda)$ 的加权平均值。其分子与望远镜透过光通量成比例, 分母与入射光通量成比例。称 Y 值为视见透光率 (相当于俗称的白光透过率), 表示符号为 $\bar{\rho}(100\%)$ 。

从色度学上讲, 色素、饱和度和亮度为色的三属性, 而视见透过率对应着亮度值, 它表示望远镜透过光通量的多少, 被列为评价望远镜性能的一项指标。色素和饱和度, 则说明所表现出的颜色和色的变化, 它们直接与色度坐标有关。所以望远镜的透射色需要通过 $\bar{\rho}$ 和色坐标 x 、 y 这些参数来表示。

由 x 、 y 值可以在 C. I. E 色度图(图 2)上找到坐标位置, 查出对应的颜色。对于标准光源同样可以确定其色度点, 例如 E 光和 D_{65} 光源的色度点分别为(0.333, 0.333)和(0.313, 0.329), 即图 2 中的 E 点和 D_{65} 点。很显然,



1—品红; 2—红; 3—橙品红; 4—橙偏红; 5—橙;
6—橙偏黄; 7—黄; 8—黄偏绿; 9—黄绿; 10—绿
偏黄; 11—绿; 12—青绿; 13—青; 14—青蓝;
15—蓝; 16—蓝偏紫; 17—紫偏蓝; 18—紫; 19—
紫偏红; 20—红紫; 21—品红偏紫; 22—红偏紫。

图 2 C. I. E 色度图

若 $\rho(\lambda) = 1$ (或常数), 即望远镜本身在任一波长上均未对 $S(\lambda)$ 造成不均匀的衰减, 那么透过的色应为原色, 其坐标即在 $S(\lambda)$ 的色度点上。例如, 若 D_{65} 光源透过望远镜后有理想的色复现, 则透射色的坐标仍在 D_{65} 色度点上。但实际上由于玻璃材料和光学镀膜的影响, $\rho(\lambda)$ 的分布不协调, 其色坐标会偏离 D_{65} 点, 这时将以其偏离的距离和方位表现出不同深浅的颜色。当实际的色坐标处于或靠近于色度图上的绿-黄等色域时, 透射色呈现的是不同程度的“发黄”。例如, 从表 6 和图 4 所示的三个双筒望远镜的实测结果看出, I 的色度点较 II 更远离 D_{65} 而接近于黄绿色域 (见图 2 中的 I 和 II 点), 和目视感觉一样, I 镜比 II 镜表现出更明显的“发黄”; III 镜的色度点很接近于 D_{65} (于 D_{65} 和 E 点之间), 表现为白色, 实际目视观察时发现不出有任何“发黄”等颜色。这样, 通过光谱透过率的测量和色坐标的计算, 就能对“发黄”与否加以一定的描述和

度量。

在色度学上，颜色的表示和色度误差的评价可采用种种方法。对于望远镜“发黄”问题应从色度学找出定量的判据。当用 x 、 y 坐标表示时，通过小批量的测试与计算看出，凡是不“发黄”的望远镜，其色坐标 x 、 y 均小于 0.35，而程度不同的“发黄”产品 x 大多小于 0.35， y 大于 0.35。这说明“发黄”现象只反映在色度图上的有限色域之内，因此可以选用 0.35 这一数值作为“发黄”与否的粗略判据。

二、色度计算上的简化

要完成 (1) 式的计算，可以通过数值求积法简化成有限项之和，例如：

$$\bar{\rho} = \frac{\int_{380}^{780} W(\lambda) \cdot \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} W(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{K=1}^n C_K \cdot W_K(\lambda) \cdot \rho_K(\lambda)}{\sum_{K=1}^n C_K \cdot W_K(\lambda)} \quad (3)$$

其中 C_K 为求积系数。从此，通过测量有限波长的透过率 $\rho_K(\lambda)$ ，便能求得 $\bar{\rho}$ ，从而使测量和计算得以简化。

数值积分方法很多，我们选用高斯公式，因为它的逼近速度较快。高斯公式为：

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = \sum_{K=1}^n C_K \cdot f(x_K) \quad (4)$$

其中 基点 x_K 为 n 次勒让德多项式

$$L_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \cdot \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n]$$

的 n 个实根。而系数 C_K 通过多项式性质得出：

$$C_K = \frac{2}{1 - x_K^2} \cdot \frac{1}{L_n'(x_K)}$$

应用时，基点和系数均可查表， $n = 1, 2 \dots 5$ 时的具体数值见表 2。

考虑到光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 是按钟状分布 (图 3) 的，应用高斯公式时所取的基数 $n = 4 \sim 5$ ，由于“钟状曲线”

表 2

n	1	2	3	4	5
x_K	0	0	0	0	0
	0.5773503	0.7745967	0.8611363	0.9061799	
C_K	1	5/9 = 0.5555556	0.3478548	0.2369269	
			0.6521452	0.4786287	
	1	8/9 = 0.8888889	0.6521452	0.5688889	
				0.4786287	
		5/9 = 0.5555556	0.3478548	0.2369269	

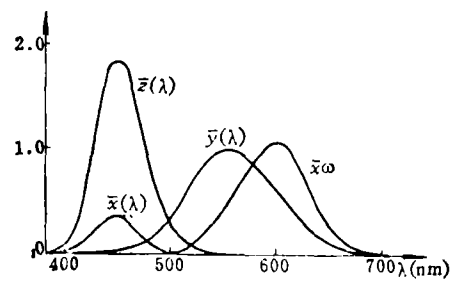


图 3 光谱三刺激值的分布

靠近两端部的实际值是比较小的，再与对应的 C_K 相乘，其结果对总积分值贡献是很小的，故可忽略。按 (4) 式，取 $n = 4$ ，对 (1) 式进行计算。积分域本应为 $\lambda = 380 \sim 780 \text{ nm}$ ，但考虑实际的分布情况，计算 X 、 Y 、 Z 时分别按表 3 选取，相应的基点也列入表 3。

表 3

项目	积分区间	基 点 (波长 nm)
X	[400, 500]	406.9; 433.0; 467.0; 493.1
	[510, 705]	523.5; 574.4; 640.6; 691.5
Y	[413, 676]	431.3; 500.0; 589.3; 657.7
Z	[380, 540]	391.1; 432.8; 487.2; 528.9

以 Y 值的计算为例，如表 4 所示。其计算过程和结果如下：

$$Y = \bar{\rho} \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{413}^{676} W(\lambda) \cdot \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{413}^{676} W(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum_{K=1}^4 C_K \cdot W_K \cdot \rho_K(\lambda)}{\sum_{K=1}^4 C_K \cdot W_K}$$

$$= \frac{0.39969\rho_{431.3} + 23.04433\rho_{500.0} + 44.52435\rho_{589.3} + 1.96228\rho_{657.7}}{69.93065}$$

$$\approx \frac{23.04433\rho_{500.0} + 44.52435\rho_{589.3}}{69.93065} \approx 0.3295\rho_{500.0} + 0.6367\rho_{589.3} \approx \frac{1}{3}(\rho_{500.0} + 2\rho_{589.3}) \quad (5)$$

此即为视见透过率 $\bar{\rho}$ 的简化式。其中透过率 ρ 的下角码为相应的波长数。可见, $\bar{\rho}$ 主要决定于波长 500.0nm 和 589.3nm 的贡献, 而且只要测出该两波长的透过率即可求出 $\bar{\rho}$ 值。

表 4

λ (nm)	431.3	500.0	589.3	657.7
$S(\lambda) (D_{65})$	89.07	109.4	89.2	80.2
$\bar{y}(\lambda)$	0.0129	0.3230	0.7654	0.0702
$W(\lambda)$	1.1489	35.3362	68.2737	5.6265
C_K	0.3478548	0.6521452	0.6521452	0.3478548
$C_K W(\lambda)$	0.39969	23.04433	44.52435	1.96228

同样计算了 X 和 Z 的近似表达式,

$$X = 0.10\rho_{433} + 0.09\rho_{467} + 0.55\rho_{674} + 0.25\rho_{641} \quad (6)$$

$$Z = 0.79\rho_{433} + 0.35\rho_{487} \quad (7)$$

若 $\rho(\lambda) = 1$, 即得出 D_{65} 光源的三刺激值, 其近似值为:

$$X_{D_{65}} = 0.99$$

$$Y_{D_{65}} = 1.00$$

$$Z_{D_{65}} = 1.14$$

色坐标为:

$$x_{D_{65}} = 0.316$$

$$y_{D_{65}} = 0.319$$

另用数值积分中的梯形公式:

$$\int_a^b f(\lambda) d\lambda = \frac{b-a}{2n} [y_0 + 2(y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1}) + y_n]$$

取间隔 $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ 进行计算, 同时对 C 光源也进行了同样的计算, 其结果一并列入表 5。

表 5

光源或样品 项目	D_{65}		C		62式8×30双望	苏制8×30双望
	X, Y, Z	x, y	X, Y, Z	x, y	$\bar{\rho}, x, y$	$\bar{\rho}, x, y$
梯形法	0.9504	0.3128	0.980	0.310	71.69%	74.0%
	1.0000	0.3291	1.000	0.316	0.330	0.318
	1.0880		1.180		0.376	0.362
近算法	0.99	0.316	1.027	0.307	72%	73%
	1.00	0.319	1.000	0.299	0.34	0.33
	1.14		1.318		0.37	0.36

上述近似对一般的色度计算来说精度是偏低的, 而对于概略地度量“发黄”现象来说, 实现测试与评价的简化是方便可行的。从表 5 所列 62 式双望和苏制 8×30 双望测试计算结果可以看出, 近似计算的精度是足够的。特别是在“发黄”问题的分析中, 近似计算为获得主要影响环节、寻求改善方向提供了有力手段。

三、测试与分析

对两具国产 8×30 和一具 7×50 双筒望远镜测量了轴上光谱透过率。测得曲线见图 4, 按 (5)、(6) 和 (7) 式计算的结果列入表 6。

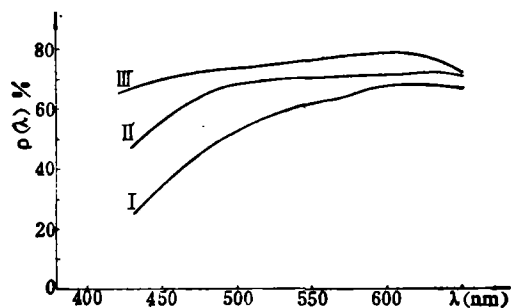


图 4 双望光谱透过率测量曲线

从 I、II 两镜的情况看,要减轻或避免“发黄”现象,应使其色坐标 x 、 y 减小些而向 D_{65} 点靠近。从 (2) 式可知,当保持一定大小的 Y 值(视见透过率)时, x 、 y 的减小取决于 X 和 Z 的相应的变化。试分析以下几点,可以对各波段的透过率提出合理的安排和要求。

表 6

项目 样品	X, Y, Z	$\bar{\rho}$	x, y	注
I (8×30)	0.571	65.5%	$x = 0.35$ $y = 0.40$	目视感觉 “发黄”严重
	0.655			
	0.395			
I (8×30)	0.658	70.0%	$x = 0.33$ $y = 0.36$	较 I 轻度 “发黄”
	0.700			
	0.610			
II (7×50)	0.733	76.3%	$x = 0.32$ $y = 0.33$	不“发黄”
	0.763			
	0.797			

1. 当保持 X 不变时,应增大 Z 值使 x 、 y 变小些。据 (7) 式,需提高波长 433nm 和 487nm 的透过率。所以提高短波部分的透过率会有利于改善“发黄”现象。

2. 在提高短波透过率时, X 值实际上也以相应的权重增大了〔见公式 (6)〕,因为会使 x 略有增大。为便于分析,我们仍假定 X 值不变,则从 (6) 式可知,必须降低长波部分的透过率。

3. 已知 D_{65} 的三刺激值比例为:

$$X_{D_{65}}:Y_{D_{65}}:Z_{D_{65}}=0.9504:1:1.088 \\ \approx 0.99:1:1.14$$

所以要使实际的透射色不“发黄”(色坐标符合于 D_{65} 点),其 $X:Y:Z$ 也应相应地符合(接近于)这个比例。例如,若要求 $Y=0.7$,则使:

$$X=0.7X_{D_{65}}, Z=0.7Z_{D_{65}}$$

但因 $Y=\bar{\rho}=\frac{1}{3}(\rho_{600.0}+2\rho_{680.3})$,并且在一般

情况下波长 500.0nm 至 600.0nm 的透过率曲线基本上能达到平直,又因 (6) 式中的 ρ_{574} ,其波长接近波长 433nm 和 641nm 的中值,所以可认为:

$$Y=\bar{\rho}\approx\rho_{600.0}=\rho_{580.3}=\rho_{574}$$

于是如要求 $Y=0.7$ 时, (6) 和 (7) 式变为:

$$0.1\rho_{433}+0.09\rho_{487}+0.25\rho_{641}=0.308$$

$$0.79\rho_{433}+0.35\rho_{487}=0.798$$

可见,若能控制 ρ_{433} 、 ρ_{487} 、 ρ_{487} 和 ρ_{641} 四个量,便能使 X 、 Y 、 Z 达到预定值,而使透射色不至于“发黄”,前面提及的降低长波透过率,即降低 ρ_{641} ; 提高短波部分的透过率即提高 ρ_{433} 、 ρ_{487} 和 ρ_{487} ,但按一般工艺情况,只要提高 ρ_{433} 即可。

综上所述,在保持 500.0nm 到 600.0nm 波段的透过率达到所要求的视见透过率的情况下,为了使“发黄”现象得以改善,应着眼于提高 ρ_{433} 和降低 ρ_{641} 。按这分析,可以得到两条光谱透过率曲线 A 和 B (图 5),它们都接近于相同的视见透过率 ($\rho_{500.0}\approx\rho_{580.3}$)。与 B 比较, A 提高了 ρ_{433} ,降低了 ρ_{641} 。所以曲线 A 较曲线 B 有利于改善“发黄”问题。在镀膜工艺上如能按 A 曲线安排各波段的透过率是合理的。图 4 中不“发黄”样品 II 镜的光谱透过率曲线就比较符合这一规律。

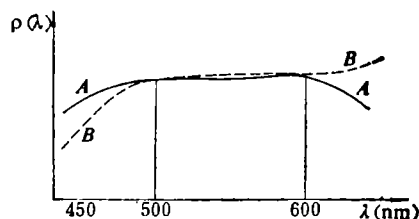


图 5 各波段透过率的安排

另外,前面曾指出“发黄”现象多集中表现在 $y>0.35$,所以改变“发黄”问题主要是使 y 值向 D_{65} 靠近。于是只要提高短波透过率 ρ_{433} ,而使长波透过率保持平直即可。