

用三基色荧光粉改善荧光灯的光学特性

周雄豪 陆元成 周太明 李绍忠
(复旦大学电光源研究所)

提 要

本文对目前正在普及应用的三基色荧光灯的光学特性进行探讨,获得了在一定条件下三基色荧光粉的最佳组合,对改进荧光灯的光效和光色有一定的指导意义。本文对三种荧光粉组合的光学特性进行全面讨论,给出荧光粉组合与光谱组合之间的定量关系,找出在实际应用于低气压汞放电灯时,在任意色温条件下的最优光度和色度状态。

自 W. A. Thornton^[1] 和 M. Koedom^[2] 提出三基色理论以后,相应的三基色荧光粉也相继被研制和应用。目前最常用的是 $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 红色荧光粉、 $\text{Tb}^{3+}:\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ 绿色荧光粉和 $\text{Eu}^{3+}:\text{BaMg}_2\text{Al}_{16}\text{O}_{27}$ 蓝色荧光粉。这些荧光粉主要都由 $\lambda=254\text{nm}$ 的紫外线激发,适用于低气压汞放电灯。对这三种荧光粉混合后的光学特性,前人已有研究^[4~6],但只是在几个特定的色温条件下,而且缺少荧光粉的组合与荧光光谱的组合之间的定量关系。

一、混光效果的理论计算

图1示出了三基色荧光粉应用在低压汞放电灯时,各种单色荧光灯的光谱分布(荧光粉涂层厚度一致)。

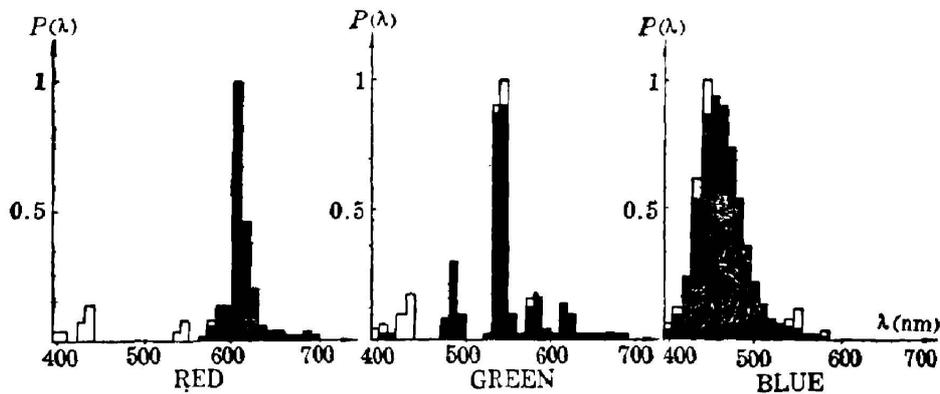


Fig. 1 Spectral power distributions of prime-color fluorescent lamps with one component

图中涂黑部分是荧光光谱分布, 未涂黑部分是在可见光区透过荧光粉涂层的汞放电光谱分布。由图可见在可见光区汞放电的光谱功率远小于荧光粉的光谱功率。

由于三基色荧光粉的化学性质稳定, 三种粉混合后, 每个发光中心的荧光光谱分布是一定的。实验证实, 荧光粉对可见光的吸收很小, 且与波长无关。 $\lambda > 380 \text{ nm}$ 的可见光对三种粉没有激发荧光现象。因此, 混合的光谱分布只是各种粉的荧光光谱分布的线性叠加。

令红色、绿色和蓝色荧光灯的光谱分布(包括在可见区汞放电的光谱分布)分别为 $P_R(\lambda)$ 、 $P_G(\lambda)$ 和 $P_B(\lambda)$, 则:

$$\begin{cases} P_R(\lambda) = P'_R(\lambda) + P'_{HR}(\lambda), \\ P_G(\lambda) = P'_G(\lambda) + P'_{HG}(\lambda), \\ P_B(\lambda) = P'_B(\lambda) + P'_{HB}(\lambda), \end{cases} \quad (1)$$

其中 $P'_R(\lambda)$ 、 $P'_G(\lambda)$ 和 $P'_B(\lambda)$ 分别为红粉、绿粉和蓝粉的荧光光谱分布, $P'_{HR}(\lambda)$ 、 $P'_{HG}(\lambda)$ 和 $P'_{HB}(\lambda)$ 分别为可见光区内透过红、绿和蓝色荧光粉涂层的汞放电光谱分布。

混合粉涂层的荧光灯的光谱分布为:

$$P(\lambda) = C_R P'_R(\lambda) + C_G P'_G(\lambda) + C_B P'_B(\lambda) + P_H(\lambda), \quad (2)$$

式中 C_R 、 C_G 和 C_B 分别为红粉、绿粉和蓝粉的荧光光谱含量系数, $P_H(\lambda)$ 为可见光区内透过混合粉涂层的汞放电光谱分布。

在(2)式中依次令 $C_G = C_B = 0$ 、 $C_R = C_B = 0$ 和 $C_R = C_G = 0$, (分别相应于红色、绿色和蓝色荧光灯), 得出三个等式, 分别与(1)式相比, 可得:

$$\begin{aligned} P_H(\lambda) &= C_R P'_{HR}(\lambda), & (\text{当 } C_G = C_B = 0 \text{ 时}); \\ P_H(\lambda) &= C_G P'_{HG}(\lambda), & (\text{当 } C_R = C_B = 0 \text{ 时}); \\ P_H(\lambda) &= C_B P'_{HB}(\lambda), & (\text{当 } C_R = C_G = 0 \text{ 时}). \end{aligned}$$

当 C_R 、 C_G 和 C_B 均不为零时, 作为一种近似, 设:

$$P_H(\lambda) = C_R P'_{HR}(\lambda) + C_G P'_{HG}(\lambda) + C_B P'_{HB}(\lambda). \quad (3)$$

根据(3)式, (2)式可写成:

$$P(\lambda) = C_R P_R(\lambda) + C_G P_G(\lambda) + C_B P_B(\lambda). \quad (4)$$

(4)式中的 $P_R(\lambda)$ 、 $P_G(\lambda)$ 和 $P_B(\lambda)$ 是可以由红、绿和蓝色荧光灯直接测得的光谱分布。以 C_G 为一定值(如令 $C_G = 100$), 分别改变 C_R 和 C_B , 可得到一系列光谱分布 $P(\lambda)$ 。根据 CIE 规范的方法^[2], 由 $P(\lambda)$ 可算出荧光灯的 T_c (相关色温), R_a (显色指数), ΔC (与标准参照照明体之间的色品坐标差) 等色度参量, 还可算出下式定义的视见光效 V_s :

$$V_s = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) d\lambda},$$

其中 $380 \sim 780 \text{ nm}$ 是所讨论的波长范围; $V(\lambda)$ 是人眼的光谱光效率; $P(\lambda)$ 是光源的光谱分布。

在本文中规定: 在 u 、 v 色品图中, 如果待测光源的色品坐标在标准参照照明体轨迹之下, 则 ΔC 定为负值, 反之则为正值。这些量分别在表 1 和图 2 中给出。

Table 1 Distribution of R_a

$\Delta C \times 10^3$	R_a		
	$T_c > 5000\text{K}$	$T_c < 4000\text{K}$	$T_c < 4000\text{K}$
16~12	70~72	73~75	74~76
12~8	72~74	75~78	76~76
8~4	75~77	78~80	79~81
4~0	78~80	80~82	81~82
0~-4	80~82	83~84	83~84
-4~-8	83~84	84~85	84~85
-8~-12	84~85	85~86	85~86
-12~-16	85	86	85~86

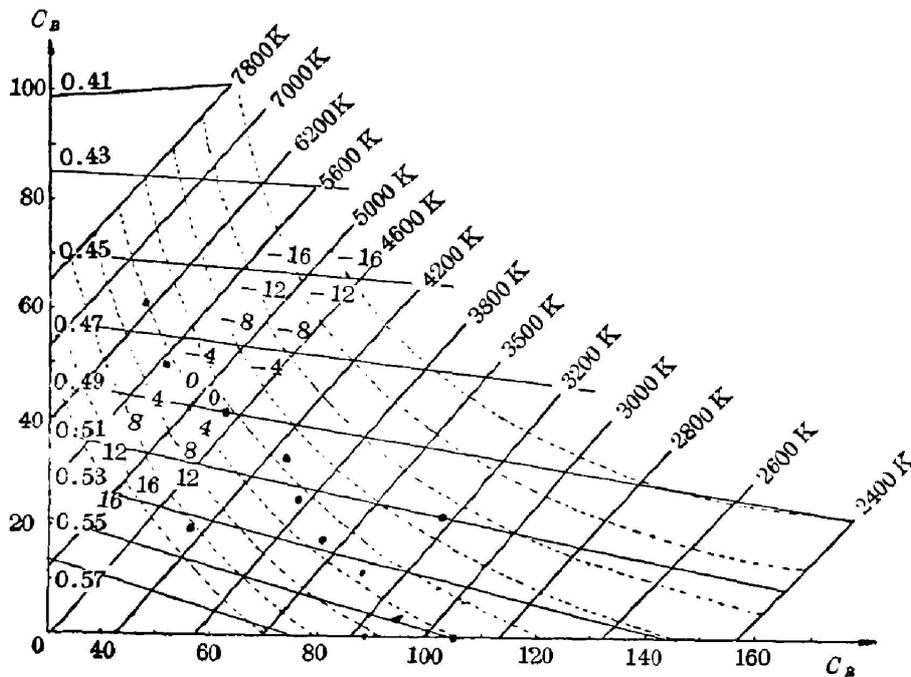


Fig. 2 Color temperature (T_c), visual efficiency (V_s) and chromaticity difference (ΔC) as functions of C_R and C_B

- equal- V_s line
- - - equal- T_c line
- · · equal- $\Delta C (\times 10^3)$ curve
- test point (calculated value)

二、混光效果的实现

当要求一定的 C_R 、 C_B 值时, 求红色、绿色和蓝色荧光粉的质量 M_R 、 M_G 和 M_B 。

出于简单的考虑, 可以认为各单色荧光粉质量的百分比与相应的光谱含量系数成正比:

$$\begin{cases} C_R = \overline{C}_R M_R / M, \\ C_G = \overline{C}_G M_G / M, \\ C_B = \overline{C}_B M_B / M, \end{cases} \quad (5)$$

式中 $M = M_R + M_G + M_B$; \overline{C}_R , \overline{C}_G 和 \overline{C}_B 为比例系数。

混光的光谱分布 $P(\lambda)$ 为:

$$P(\lambda) = C_R P_R(\lambda) + C_G P_G(\lambda) + C_B P_B(\lambda).$$

因为 $P(\lambda)$ 是相对的光谱功率分布, 所以可令 C_R , C_G 和 C_B 任何一个为常数, 如令 $C_G = 100$, 则(5)式可写成:

$$\begin{cases} C_R = 100 \overline{C}_R M_R / (\overline{C}_G M_G) = \overline{C}_R M_R / M_G, \\ C_G = 100, \\ C_B = 100 \overline{C}_B M_B / (\overline{C}_G M_G) = \overline{C}_B M_B / M_G, \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\overline{C}_R = 100 \overline{C}_R' / \overline{C}_G'$; $\overline{C}_B = 100 \overline{C}_B' / \overline{C}_G'$ 。

理想情况下(即: 三种荧光粉对紫外线的吸收率和散射率一致, 粉粒的大小一致, 粒子与

粒子以及粒子与玻壳之间的吸附性也一致), \overline{C}_R' , \overline{C}_G' 和 \overline{C}_B' 在一定的荧光粉受潮度和制灯工艺条件下应为常数, 亦即 \overline{C}_R 和 \overline{C}_B 应为常数。从而可以取几种荧光粉配方, 用实验方法测得。

但实验发现, \overline{C}_B 近似为一常数, 而 \overline{C}_R 不是常数, 它随 C_B 而变。当涂层厚度一定, 且 M_G/M 的变化限制在一定范围内时, \overline{C}_R 与 C_B 的关系如图 3 所示。

拟合结果由下式表示:

$$\overline{C}_R = \alpha_R (1 + 4.16 \times 10^{-3} C_B - 2.00 \times 10^{-5} C_B^2), \quad (7)$$

其中 α_R 为一常数。

一般说, \overline{C}_R 和 \overline{C}_B 的变化规律将由三种荧光粉在涂层中的密度分布、吸收系数和散射系数所决定, 这方面的定量描述有待进一步研究。上述 \overline{C}_R 表达式和 \overline{C}_B 近似为常数的结论, 只是实验的近似结果。

根据荧光灯的设计要求(如一定的相关色温 T_c), 可在图 2 和表 1 中找到优化点所对应的 C_R 和 C_B , 然后从下式求出红粉和蓝粉相对于绿粉的含量比例:

$$\begin{cases} M_R/M_G = C_R / [\alpha_R (1 + 4.16 \times 10^{-3} C_B - 2.00 \times 10^{-5} C_B^2)], \\ M_B/M_G = C_B / \overline{C}_B. \end{cases} \quad (8)$$

三、实验结果

由于 M_G/M 已限于一定范围内变化, 所以我们把实验点选在 $-5.4 \times 10^{-3} < \Delta C < 5.4 \times 10^{-3}$ 的范围内(试样 L_2, L_3 和 M_3 除外)。由图 2 可见, 这一选择实际上限制了 M_G/M 的变化范围。这是一个实用的范围, 因为根据 CIE 规范, 只有当光源的色表和标准参照照明体之间的色品坐标差值在这一范围内, 才能得到准确的评价。

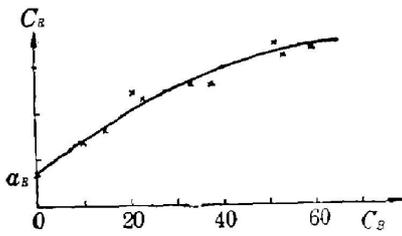


Fig. 3 Variation of \overline{C}_R with C_B
x: experimental.

Table 2 Comparison between calculated and experimental values

Type	Sample (Fluo. Lamp)	C_R	C_B	T_c (K)	$10^6/T_c$ (MK ⁻¹)		V_s		R_s		$\Delta C \times 10^3$	
					Theoretical	Theo.	Exp.	Th. o.	Exp.	Theo.		Exp.
Low Color Temp.	L_1	105	0	2900	344.0	344.4 ± 2.5	0.550	0.553 ± 0.002	81	82	4.0	
	L_2	102	22.4	3250	307.7	316.6 ± 3.3	0.510	0.512 ± 0.001	84	85	-6.1	
	L_3	87.5	0	3170	315.5	314.3 ± 3.1	0.560	0.567 ± 0.002	79	79	9.4	
	L_4	87.2	11.7	3350	298.5	298.9 ± 2.1	0.536	0.538 ± 0.002	81	82	3.0	
	L_5	80.5	17.9	3600	277.8	279.6 ± 1.7	0.528	0.529 ± 0.002	82	82	2.7	
Medium Color Temp.	M_1	74.7	24.4	3870	258.4	262.0 ± 2.2	0.517	0.520 ± 0.002	82	83	1.9	
	M_2	73.3	32.8	4120	242.7	240.3 ± 3.9	0.501	0.498 ± 0.004	83	84	-1.0	
	M_3	56.5	19.7	4280	233.6	240.9 ± 3.9	0.530	0.529 ± 0.007	75	78	12.5	
	M_4	61.8	41.2	4750	210.5	210.7 ± 1.5	0.490	0.496 ± 0.002	82	82	1.0	
	M_5	60.9	49.5	5100	196.1	196.6 ± 1.9	0.477	0.474 ± 0.002	83	84	-5.0	
High C. T.	H_1	50.8	49.2	5560	179.9	177.5 ± 2.2	0.479	0.475 ± 0.002	79	81	1.2	
	H_2	48.3	60.5	6210	161.0	163.8 ± 1.7	0.463	0.467 ± 0.002	81	81	0	

表 2 为理论设计值与实验结果的比较。由表可见理论值和实验值符合得较好。

表 2 中荧光灯试样的理论值在图 2 中的相应点均已在图中标出, 这些实验点均匀分布在限定的区域内。当超出此区域的, 理论值与实验值之间的差别可能变大(如试样 L_2 和 M_3)。

四、讨 论

由图 2 和表 1 可见, 在一定的相关色温情况下, 要得到较好的显色性和最佳的色表(与标准参照照明体相比), 视见光效 V_s 不能很高。再要提高 V_s 会使荧光灯的色表偏离标准参照照明体并降低其显色性。所以在设计三基色荧光灯时, 必须对各参量进行综合考虑, 以求达到最佳状态。

如果把 ΔC 限制在 $\pm 4 \times 10^{-3}$ 范围内, 则视见光效最高的一点相当于 $C_R=105$, $C_B=0$, 其相关色温 $T_c=2900$ K, 与普通白炽灯的光色相近。一般认为, 在低照度时, 这个光色看起来较为舒适, 可认为是最优点。试样 L_1 相应于这一点。对于相关色温较高的荧光灯, 如果 ΔC 仍限制在上述范围内, V_s 将随 T_c 的升高而降低。

三基色荧光灯不仅光效高, 光色好, 而且能使许多被它照明的物体产生令人喜爱的物体色。Thornton^[5]曾研究了 $T_c=6500$ K 的三基色荧光灯、标准昼光和卤磷酸钙荧光灯的喜爱指数 (Color Preference Index, 简称 CPI), 得到的结论是三基色荧光灯的 CPI 最大。我们也曾对 H_3 和 M_5 两种试样荧光灯进行主观的照明效果评价, 观察者都认为: 三基色荧光灯照明的物体所呈现的颜色, 较色温相近的一般的灯或日光照射下所产生的颜色更受人喜爱。但在各种色温时这种效果的定量描述还有待进一步的研究。

在实验工作中得到了我们研究所邵红、周风雷、高冀民和上海特种灯泡二厂糜仲良、王传康等同志的大力协助,作者在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] W. A. Thornton; *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**, No. 9 (Sep), 1155.
- [2] M. Koedon; *J. Ill. Eng. Soc.*, 1972, **1**, No. 4 (Jul), 285.
- [3] 荆其诚等;《色度学》, (科学出版社, 北京, 1979), 217~246.
- [4] 周大明等;私人通信。
- [5] W. A. Thornton; *J. Ill. Eng. Soc.*, 1974, **4**, No. 1 (Oct), 48.
- [6] J. M. P. J. Verstege, *et al.*; *J. Electrochem. Soc.*, 1974, **121**, No. 12 (Dec), 1627.

Improvement of optical characteristics of fluorescent lamps with prime-color blend of phosphors

ZHOU XIONGHAO, LU YUANCHENG, ZHOU TAIMING AND LI SHAOZHONG
(Institute of Electric Light Sources, Fudan University, Shanghai)

(Received 8 July 1985)

Abstract

This paper describes the optical properties of prime-color fluorescent lamps popular in recent years. The main purpose is to improve the luminous efficiency and colorimetric properties of fluorescent lamps. The prime-color phosphors used in the fluorescent lamps are mixtures of three kinds of phosphors emitting narrow bands of red, green and blue lights respectively. The relative spectral power distribution (SPD) of the prime-color blend of phosphors is a weighted linear combination of the SPD of individual phosphors and the SPD of the Hg discharge in the visible region. The colorimetric and photometric condition of the prime-color fluorescent lamps can be calculated from the weighted SPD's. The relations among correlated temperature T_c , color rendering index R_s , colorimetric difference (from the reference illuminator) ΔC and visual efficiency V_s with weighting factors are illustrated by a figure and a table. The optimum colorimetric and photometric conditions and corresponding weighting factors can be obtained from these calculations. The relations between weighting factors and proportions of individual prime-color phosphors are obtained from experiments. Experiments were carried out under certain theoretically predetermined colorimetric conditions with corresponding proportions of phosphors. The experimental results are in good agreement with calculated values.