

符合人眼视觉特性的颜色亮度模型*

刘伟奇 冯 睿 周丰昆

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

摘 要 从色度学基本理论出发, 对颜色变量 Y 进行了深入分析, 提出了由孟塞尔(Munsell)颜色体系进行颜色视亮度主观匹配的新方法。实验和理论分析指出孟塞尔色立体的等明度面并非在视觉上是等明度的, 建立了人眼主观亮度与孟塞尔明度值 V 之间满足线性关系的颜色亮度模型。

关键词 颜色视亮度, 异色视亮度匹配, 同色异谱。

1 引 言

颜色亮度相加律失效, 直接反映了人眼对颜色亮度的感受与色度学中现有的颜色亮度定义相矛盾^[1]。具体表现为: 按颜色亮度相加律所得到的有着相等亮度 Y 的不同颜色, 人眼在观测时会感到这些颜色的亮度并不相等, 有的亮, 有的暗。如何解决这一矛盾是近几十年来国际颜色科学界一直努力研究的课题。本文在重新认识色度学变量 Y 的物理含义的基础上, 结合同色异谱理论及人眼对颜色的感知只与颜色的外貌有关的特点, 提出了以色度点为变量, 建立一个适合人眼视觉特性的颜色亮度模型。

2 亮度 Y 值物理意义分析

目前广泛采用的对颜色描述的变量是 1931 CIE-XYZ 系统的三刺激值 (X, Y, Z), 及相应的色度坐标 (x, y)。然而, 由于颜色亮度相加的失效, 则三刺激值变量中代表亮度线性相加的物理量 Y 的含义及公式是否依然成立, 与之相应的同色异谱公式能否继续使用, 是首先要解决的问题。1931 CIE-XYZ 系统是由 CIE-RGB 系统经数学变换得到的。首先, 在 RGB 系统中, f_R, f_G, f_B 被定义为 3 个原色 R、G、B 的刺激值, 它们代表着 R、G、B 的数量。按格拉斯曼的颜色混合定律, 任何一个颜色都可以用 f_R, f_G, f_B 三个变量表示。但由于 R、G、B 三个原色所构成的颜色三角形在光谱轨迹范围内, 描述光谱色时, 原色出现负值, 不易理解, 加之使用不便, 国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage, 缩写为 CIE)又推出了 1931 CIE-XYZ 系统。通过数学变换而得到的 XYZ 系统中, f_X, f_Y, f_Z 仍然具有刺激值的含义, 即 X, Y, Z 分别代表三个原色 X、Y、Z 的数量。另外, 由于虚构的三个原色 X、Y、Z 选取巧妙, 使原色 X、Z 落在无亮度线上, 并由此得到的刺激值 f_X, f_Z 只代表色度, 不代表

* 国家自然科学基金(69478030)资助项目。

收稿日期: 1998-04-07; 收到修改稿日期: 1998-07-06

亮度。而刺激量 f_Y 不仅代表色度^[2]，而且是构成颜色亮度的唯一参量，但它并不等于符合人眼视觉特性的颜色亮度。 f_Y 的计算公式为

$$f_Y = K \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

其中 $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ 。积分结果有两个含义：1) f_Y 表示组成颜色的所有单色光中包含原色 Y 的总量，即所说的 Y 刺激值。2) 它表示构成颜色的所有单色光的亮度总和。这一点正是色度学对颜色亮度的定义。大量实验已证明，一个颜色的主观亮度并不等于构成该颜色所有单色光亮度的线性相加， f_Y 作为颜色亮度，只有在单色光的情况下才成立。因此说， f_Y 只能代表颜色的刺激值，而不能代表包括复色光在内的颜色的主观亮度。既然 f_Y 仍然是颜色的刺激值，那么 f_Y 的计算公式(1) 不会因亮度不满足线性相加而失效。这样同色异谱公式也不会因亮度的非线性关系而不再成立。人眼在观察颜色时，只能感知颜色的外貌(色貌)，而该色是由哪些光谱成分组成的，视觉系统无法感知。这也正如同色异谱理论所描述的那样：只要两个颜色光在色貌上相同，不论其光谱成分如何，它们给人眼的感觉是一样的，并具有相同三刺激值 f_x, f_Y, f_z 。按照人眼的这种视觉特性，可以通过同色异谱关系，不必追究一个颜色是由哪些波长组成的以及这些波长间的相加规律，而是从色貌即色度点 (x, y) 的角度去研究。

3 实 验

按照上面分析，只需在色空间内选择有限个色度点即可匹配出符合人眼视觉特性亮度分布关系。在各种颜色空间中，孟塞尔颜色空间是从心理学的角度，根据颜色的视知觉特点，通过主观匹配实验得到的颜色分类和标定系统，它的颜色变量的变化在视知觉上是等间隔的。为此选用孟塞尔颜色系统作为本文的实验系统。实验中用的是全套美国孟塞尔色卡及图册。其色卡是有光泽的，因此观测方向选择看不到镜反射光的方向，如图 1 所示。三个标准观察者均是经过颜色视觉测试正常，并且具有视觉心理物理实验能力。

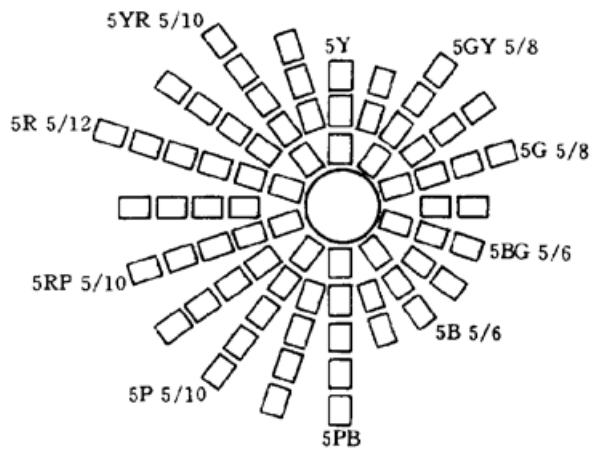


Fig. 1 Munsell equality V section

首先，选择彩度 C 最多的明度值为 5 的等明度面，按不同色调。不同彩度铺展在以黑灰色为背景的实验台面上。用窗口自然光照明。通过主观亮度观察，明显感觉到随彩度圈的向外扩展，主观亮度也明显增强，对不同的色调，其规律是一致的。为了定量研究，用不同明度的中性灰白色卡与不同彩度、不同色调的待测色样进行主观异色视亮度匹配，如图 2 所示。从图 2 可看到，对同一明度 $V = 5$ 、同一色调 $H = 5R$ 、不同彩度 C 按每 2 个彩度等级将孟塞尔色卡排好。

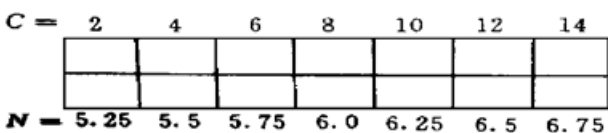


Fig. 2 Heterochromatic brightness matching

用中性灰卡分别与不同彩度级次的色样进行主观异色视亮度匹配。图 2 是色调为 5R，明度为 5，彩度为 2、4、6、8、10、12、14 的孟塞尔色卡与中性灰卡的匹配结果。对其它明度、色调的色样匹配按孟塞尔色卡所能给出的最大彩度进行匹配。一共对明度值为 2、4、5、7，色调为 5R、5YR、5Y、5GY、5G、5BG、5B、5PB、5P、5PR 等 184

个异色样品进行了主观异色视亮度匹配实验。三人的实验结果略有差异, 经过统计处理后的平均值如表 1 所示。其中 C 为孟塞尔彩度值, N 为中性色灰度值, 其等级差为 0.25。

Table 1. Testing results

 $V = 2$

5R		5YR		5Y		5GY		5G		5BG		5B		5PB		5P		5RP	
C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$	C	$N2$
2	2.25	2	2.25	1	2.0	1	2.0	2	2.25	2	2.25	2	2.25	2	2.25	2	2.25	2	2.25
4	2.5	4	2.5	2	2.25	2	2.25	4	2.5	4	2.5	4	2.5	4	2.5	4	2.5	4	2.5
6	2.75							6	2.75	6	2.75	6	2.75	6	2.75	6	2.75	6	2.75
8	3.0													8	3.0	8	3.0	8	3.0

 $V = 4$

5R		5YR		5Y		5GY		5G		5BG		5B		5PB		5P		5RP	
C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$	C	$N4$
2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25	2	4.25
4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45	4	4.45
6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75	6	4.75
8	5.0	8	5.0			8	5.0	8	5.0	8	5.0	8	5.0	8	5.0	8	5.0	8	5.0
10	5.25	10	5.25					10	5.25					10	5.25	10	5.25	10	5.25
12	5.5	12	5.5											12	5.5	12	5.5	12	5.5
14	5.75																		

 $V = 5$

5R		5YR		5Y		5GY		5G		5BG		5B		5PB		5P		5RP	
C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$	C	$N5$
2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25	2	5.25
4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5	4	5.5
6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75	6	5.75
8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0	8	6.0
10	6.25	10	6.25			10	6.25	10	6.25	10	6.25	10	6.25	10	6.25	10	6.25	10	6.25
12	6.5	12	6.5											12	6.5			12	6.5
14	6.75																		

 $V = 7$

5R		5YR		5Y		5GY		5G		5BG		5B		5PB		5P		5RP	
C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$	C	$N7$
2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25	2	7.25
4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5	4	7.5
6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75	6	7.75
8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0
10	8.25	10	8.25	10	8.25	10	8.25	10	8.25									10	8.25
		12	8.5	12	8.5	12	8.5												
		14	8.75																

4 分析与结论

从实验结果可以看出, 颜色的主观亮度随彩度的增加而增加, 且满足线性关系, 与色调

和明度变化无关。按上述实验结果可得出明度修正公式和亮度修正公式。明度修正公式为

$$V_s = V + (\Delta V/\Delta C)C \quad (2)$$

其中 V_s 为修正后的主观明度, V , C 分别为孟塞尔系统的明度值和彩度值, ΔV 和 ΔC 分别为孟塞尔颜色体系中明度间隔和彩度间隔。在实验中 $\Delta V = 0.25$, $\Delta C = 2$, 所以(2)式可以写成

$$V_s = V + 0.125C \quad (3)$$

在孟塞尔系统中, 明度 V 与亮度因数 f_Y 满足公式

$$V = 116(f_Y/f_{Y_0})^{1/3} - 16, \quad \text{或} \quad f_Y = [(V + 16)/116]^3 f_{Y_0} \quad (4)$$

其中 f_{Y_0} 为白物体色刺激亮度因数, 白物体色刺激通常以完全漫反射体为代表, 其 $f_{Y_0} = 100$ 。将(3)式代入(4)式可得主观亮度修正公式:

$$f_{Y_s} = [(V + 0.125C + 16)/116]^3 \times 100 \quad (5)$$

孟塞尔颜色系统的最大特点是颜色空间变量的变化是线性的, 符合人眼视觉特性。从实验结果来看, 每一级彩度的变化引起视觉亮度的变化也是线性的, 之所以能得到如此简单的公式正是基于孟塞尔颜色体系的结果。然而该公式中明度变量 V 和彩度变量 C 与客观色度参量 (x, y, f_Y) 却不能用简单的数学表达式来描述。若将(5)式的变量 V 和 C 换成 (x, y) 则公式将非常复杂。另外, 孟塞尔颜色系统中彩度的确定是通过表面色样由观察者主观评价逐一确定的, 而对于那些色饱和度极高的光谱色, 无法作出相应的表面色。因此也就给不出高饱和度和色样的彩度值。因此上面的公式适用于饱和度不是极高的表面色。

在研究中发现, 孟塞尔系统的等明度面在视觉主观评价时并非是主观等明度的。因为它的等明度实质是等亮度因数, 而亮度因数是测量亮度相对参考白板的测量亮度的归一值, 它是一个与人眼视亮度不完全相符合的物理量。因此通过对孟塞尔等明度面亮度主观匹配, 得到符合人眼视觉特性主观等明度面。这将对孟塞尔颜色体系更加完善的补充。

参 考 文 献

- [1] Sherman L G, Howard R L. Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(4): 450~ 462
 [2] 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林等. 色度学. 北京: 科学出版社, 1979. 193~ 216

A Color Brightness Model Fitting Characteristics of the Human Vision

Liu Weiqi Feng Rui Zhou Fengkun

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 7 April 1998; revised 6 July 1998)

Abstract Based on colorimetric theory, the present study has made a thorough analysis of color variable Y and presented a new method of subjective matching of heterochromatic brightness using Munsell color system. It was pointed out that the Munsell equality V section does not conform the characteristics of human vision, and the linear relation between Munsell V and subjective brightness was established through experimental and theoretical analysis.

Key words color brightness, heterochromatic brightness match, metamerism.