

颜色适应对比中等效颜色刺激的研究

张军 周丰崑 陈淑芳 刘伟奇

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130024)

摘要 物理上光全相同的颜色刺激, 处于不同的周围环境时, 会给人以不同的颜色感觉; 而不同的颜色刺激, 由于环境状态的变化, 则可以产生等同的颜色感觉。这就是颜色适应对比效应。

通过大量的颜色适应对比定量匹配实验, 获得每一种颜色在不同背景下的等效颜色刺激的变化趋势、规律和相互之间的定量关系, 从而建立颜色外貌随背景变化的实验数学模型。本文进行了彩色和无彩色背景、彩色和彩色背景间的匹配实验研究, 并建立了形式简单的 $Y_u' v'$ 颜色适应实验数学模型, 可预测和定量计算颜色在各种环境背景下的等效颜色感觉, 预测结果较好。

关键词: 颜色适应; 颜色对比; 等效刺激

1 引言

人眼的颜色感觉是一个复杂的心理物理过程, 它既涉及外界物体本身的物理特性, 又涉及其所在的周围环境以及人的其他心理因素。因此, 同一个颜色刺激, 可引起人眼不同的颜色感觉。例如凝目注视一块鲜红的布, 时间久了, 鲜红的颜色会逐渐变成淡红色; 再如, 有绿叶衬托的红花要比没有绿叶陪衬的红花显得更鲜艳。这种颜色刺激本身没变, 只是所处的环境或状态不同而造成颜色感觉发生变化的现象, 常称为颜色适应对比效应。

颜色适应对比的研究对于探讨颜色视觉传输、解释颜色视觉的特点和现象, 进而发展颜色视觉理论, 有重要的学术意义; 而颜色适应对比实验数学模型可以预测并定量计算颜色在各种环境背景下的等效颜色感觉, 对于防止颜色污染, 以及利用颜色适应对比和负后象效应而有意获得彩色增强(如两色彩色还原再现)、超纯光、颜色和谐的领域有指导作用和应用价值。

国际上大的颜色研究中心或机构都投入较大力量对颜色适应对比进行研究, 并取得很多成果。贾德在自己的匀色坐标制上得出一个经验公式, 预测结果很好, 只是方法太繁, 仅适用于他选是特殊坐标系, 理论上难以推广。斯潘塞颜色适应公式简单, 但只限于彩色与无彩色背景间的适应对比, 有必要扩大范围。其他著名学者, 如 Von Kries, C. J. Bartleson,

Nayatan; Fairchild 等均在实验基础上, 采用系数调整, 矩阵转换、非线性变换、对抗色变换或多阶段变换等手段建立了一定的颜色适应对比公式, 但他们的不足就是实验基础较窄, 大部份都是在中性色环境下的颜色适应对比。

颜色适应对比是当外界环境的颜色刺激发生变化时, 人的视觉系统为抵消这种变化在颜色感知方面产生的影响而进行的一种自动调节过程, 这种过程包括两部份: 一部份是视觉系统与外界达到平衡前的阶段, 这是一个变化过程; 另一部份指眼睛调节达到平衡后的阶段, 这部份处于稳态。本文将就人眼处于稳态阶段时, 彩色和无彩色背景、彩色和彩色背景间的颜色适应对比现象、规律、色位移及其转换关系进行研究。

2 实验方案和实验系统

研究颜色适应的方法较多, 归纳如下:

1 记忆法。观察者在规定的适应环境下, 记住颜色样品的颜色变量, 当适应其他的环境状态时, 观察者根据记忆中的颜色样品标号, 标出所观察颜色的标号。

观察保存信息的能力有限, 对于颜色的短时间记忆, 显示出系统失真, 而且该方法需对观察者长时间训练。

2 直接标量法。观察者参照一定的心理标准, 再根据间隔(差别)或幅度(比率)等, 对被考察颜色的视觉知觉量直接作出主观的估计, 以使对颜色外貌有定量的描述。

这种方法的缺点是由于观察者的心理判断标准不可能规范。另卜标定值与物理测量值之间没有直接的关系, 数学处理比较复杂。

3 不同视网膜区法。同一只眼睛的不同区域同时受不同的适应, 以一个适应区的颜色为标准, 在另一适应区匹配颜色感觉。

由于视网膜不同区域会相互影响, 以及不同视网膜锥体敏感度间的复杂关系, 这一方法已较少采用。

4 双目匹配法。两只眼睛同时各自适应于自己的适应场, 一个为匹配场, 另一个为比较场, 调整匹配场中样品的颜色刺激, 使其颜色感觉与比较场中看到的颜色样品的颜色感觉相匹配, 从而研究不同适应条件下, 两个相互匹配的颜色物理刺激之间的关系。

这种方法是建立在一只眼睛所受到的颜色适应并不影响另一只眼睛的锥体敏感度这一假定基础上的。现有研究表明, 而只眼睛的相互影响确实很小。

颜色对比方法有两种

1 同时对比。指视网膜上的不同地点同时受到色光的刺激。

2 先后对比。指视网膜上的同一地点, 时间上先后受到色光的刺激。

综合颜色适应和颜色对比各种方法的优缺点, 本实验采用同时对比的双目匹配法。可直接获得两个相互匹配颜色物理刺激值之间的关系, 实验结果不受心理、记忆等因素的影响。

本研究采用计算机控制彩色显示系统, 可灵活、方便、快速地实现颜色匹配。其硬件和软件配置如下。

1 硬件

IBM 计算机。用于编制运行控制软件, 采集、处理数据, 以满足彩色显示的需要。

1024×1024 彩色图形显示器。其红、绿、蓝三角色域大, 图像稳定清晰。

MAG108 高分辨率彩色图形控制板。将 R、G 和 B (红、绿、蓝) 电子枪各量化 256 级, 形成约 16.8 兆种颜色, 实现颜色在视觉上的连续可调。

2 软件

采用 Microsoft C 语言编译环境, 以工作站方式工作, 利用模块型设计, 对图形处理进行优化。

彩色监视器上的色度不均匀性不影响实验精度。

3 实验与结果

3.1 实验

在彩色显示器屏幕上并排同时显示两个视场(同为 1.5°或 10°视场), 一个为比较场 C, 一个为匹配场 D(如图 1 所示), 分别置样品颜色和匹配颜色其背景分别为 A 和 B, 颜色可设置及改变。SS' 为挡板, 使左眼只能观察色块 C 和背景 A, 右眼只看到色块 D 和背景 B。

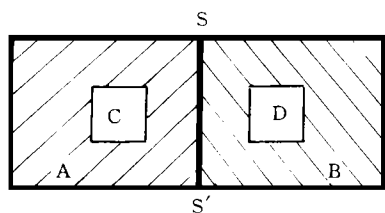


图 1 视场与背景

为了系统研究颜色适应对比的规律, 样品颜色及背景颜色按明度、色调、彩度的规则变化选用 Munsell 颜色差异系统, 并且保证不超出荧光粉三角色域。

观察者均经检查为正常色觉者, 并具备心理物理实验素质。

实验匹配时, 观察者利用编制的控制软件, 利用相应的控制键, 随时增加或减少 D 色块的 R (或 G 或 B) 值, 或随时改变调色步长, 或随时只改变色块 D 的明度, 或随时显示各颜色区域的色度值, 最终完成颜色 C 和颜色 D 的匹配, 即处于背景颜色 B 下的色块 D 的颜色感觉与处于背景颜色 A 下的色块 C 的颜色感觉相同为止。

3.2 实验结果

彩色和无彩色背景间的适应对比实验

表 1 是三种背景的色度坐标和亮度因子, 表 2 是各种样品颜色的色度坐标和亮度因子。

表 1 背景

序号	标号	x	y	u'	v'	Y
1	N 9/0	0.312	0.328	0.197	0.467	0.793
2	N 6/0	0.312	0.328	0.197	0.467	0.303
3	N 3/0	0.314	0.329	0.198	0.468	0.067

表 2 样品

序号	标号	x	y	u'	v'	Y
1	5.0R 5/8	0.436	0.318	0.293	0.481	0.194
2	5.0YR 5/8	0.483	0.395	0.285	0.525	0.206
3	5.0Y 5/8	0.469	0.452	0.250	0.543	0.198
4	5.0GY 8/8	0.369	0.454	0.191	0.530	0.581
5	5.0G 8/8	0.272	0.386	0.153	0.490	0.593
6	5.0BG 8/8	0.242	0.336	0.147	0.461	0.594
7	5.0B 8/8	0.224	0.275	0.152	0.423	0.591
8	5.0PB 7/8	0.243	0.245	0.178	0.404	0.427
9	5.0P 5/8	0.289	0.229	0.223	0.399	0.195
10	5.0RP 5/8	0.374	0.273	0.270	0.444	0.198
11	5.0N 7/0	0.312	0.329	0.197	0.468	0.433
12	5.0N 5/0	0.312	0.330	0.197	0.469	0.202
13	5.0G 5/8	0.220	0.458	0.109	0.512	0.200
14	5.0P 5/4	0.298	0.268	0.212	0.429	0.198
15	5.0G 5/4	0.284	0.364	0.167	0.481	0.201
16	5.0Y 5/4	0.397	0.396	0.228	0.512	0.191

由于背景组合方式较多，实验数据仅举例如表 3，匹配 (x, y, Y) 结果

表 3

序	左 N 9/0			右 N 3/0			序	左 N 9/0			右 N 3/0		
1	0.453	0.328	0.0057	0.421	0.319	0.549	9	0.313	0.217	0.042	0.290	0.249	0.837
2	0.484	0.407	0.062	0.479	0.391	0.560	10	0.390	0.267	0.045	0.363	0.293	0.649
3	0.452	0.466	0.055	0.455	0.449	0.710	11	0.312	0.328	0.057	0.312	0.328	0.854
4	0.373	0.469	0.122	0.368	0.450	1.078	12	0.312	0.324	0.039	0.310	0.330	0.856
5	0.272	0.409	0.098	0.285	0.370	1.150	13	0.219	0.464	0.041	0.239	0.444	0.728
6	0.241	0.338	0.075	0.246	0.331	1.168	14	0.287	0.254	0.037	0.297	0.273	0.846
7	0.214	0.246	0.071	0.229	0.289	1.143	15	0.275	0.378	0.044	0.289	0.358	0.859
8	0.242	0.233	0.058	0.252	0.265	1.037	16	0.407	0.415	0.044	0.389	0.387	0.836

彩色和彩色背景间的适应对比实验

部份背景的色度坐标和亮度因子如表 4. 表 5. 表 4 为同色调, 表 5 为同亮和同彩度情况。

表 4 同色调背景

序号	标号	x	y	u'	v'	Y
1	5.0R 5/8	0.436	0.318	0.293	0.481	0.194
2	5.0R 8/4	0.351	0.322	0.228	0.470	0.600
3	5.0R 8/8	0.400	0.327	0.261	0.480	0.592

表 5 同亮度和同彩度背景

序号	标号	x	y	u'	v'	Y
1	5.0R 8/8	0.400	0.327	0.261	0.480	0.592
2	5.0Y 8/8	0.424	0.424	0.234	0.527	0.589
3	5.0G 8/8	0.272	0.386	0.153	0.490	0.593
4	5.0B 8/8	0.224	0.275	0.152	0.423	0.591
5	5.0P 8/8	0.291	0.252	0.213	0.417	0.579

样品颜色应如表 2。为说明实验结果，只例举 13 种组合中之一，如表 6。

表 6 匹配结果

序号	左 5R 8/8			右 5B 8/8			序号	左 5R 8/8			右 5B 8/8		
	x	y	Y	x	y	Y		x	y	Y	x	y	Y
1	0.344	0.300	0.229	0.534	0.342	0.244	9	0.215	0.212	0.205	0.382	0.261	0.252
2	0.386	0.491	0.177	0.558	0.385	0.207	10	0.284	0.248	0.180	0.467	0.296	0.221
3	0.355	0.443	0.231	0.530	0.407	0.194	11	0.213	0.292	0.429	0.434	0.354	0.459
4	0.235	0.439	0.581	0.474	0.420	0.618	12	0.215	0.299	0.226	0.431	0.351	0.205
5	0.184	0.342	0.638	0.424	0.424	0.614	13	0.192	0.397	0.245	0.347	0.468	0.209
6	0.182	0.298	0.623	0.369	0.360	0.597	14	0.199	0.244	0.173	0.400	0.293	0.196
7	0.179	0.262	0.604	0.316	0.303	0.592	15	0.204	0.329	0.203	0.415	0.404	0.196
8	0.168	0.232	0.426	0.350	0.264	0.486	16	0.257	0.381	0.181	0.517	0.420	0.202

4 数学模型与检验

CIE 国际照明委员会推荐了几种颜色空间，如 CIE1931 (XYZ)、CIE1960 UCS、CIE1976 (Lab) 及 CIE1976 (Luv) 等，各颜色空间的均匀性、即空间距离与视觉感知差异的一致性有很大区别。将本实验研究的匹配实验数据分别画到各 CIE 颜色空间的色图上，可以明显看出，在 CIE1976 (Luv) 图上，似乎在背景颜色的变化与随之带来的颜色感觉的变化之间有一种倾向性，在色度点间的距离方面和色度点变化的转向方面有明显的规律，因此选定该匀

色空间。

$$L = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16$$

$$u = 13L(u' - u'_0)$$

$$v = 14L(v' - v'_0)$$

其中

$$u' = 4X/(X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z)$$

u', v' 为颜色样品的色度坐标, u'_0, v'_0 为标准光源的色度坐标。

设样品颜色的亮度为 Y_s , 背景亮度为 Y'_s ; 匹配颜色的亮度为 Y_m , 所处背景亮度为 Y'_m 。样品色品坐标和所在背景的色品坐标分别设 u_s, u'_s 及 v_s, v'_s ; 匹配色品坐标和所在背景坐标分别为 u_m, u'_m 及 v_m, v'_m 。

根据方差计算和线性回归方程处理, 首先得到亮度的转换 $Y_m = Y_s + (Y'_m - Y'_s)$, 并通过分析色品坐标变化规律与亮度变化规律的相似性, 设

$$u_m - u_s = a_1(\mu'_m - u'_s) + b_1, \quad v_m - v_s = a_2(v'_m - v'_s) + b_2$$

由最小二乘法可得到 (a_1, b_1) 及 (a_2, b_2) , 而且 $a_1 \approx a_2$ b_1 和 b_2 较小。通过预测结果和实验结果的方差分析说明, 利用色位移的线性处理可以很好估计颜色适应对比影响, 综合全部实验, 最后得到

$$\begin{cases} Y_m = Y_s + (Y'_m - Y'_s) & a \approx 0.69 \\ u_m = u_s + a(u'_m - u'_s) + b_1 & b_1 \approx 0.008 \\ v_m = v_s + a(v'_m - v'_s) + b_2 & b_2 \approx 0.010 \end{cases}$$

部分检验数据如表 7

表 7 数学模型计算与实验结果对照

序号	实验 (u' v' Y)			计算 (u' v' Y)		
1	0.213	0.444	0.463	0.217	0.441	0.455
2	0.123	0.397	0.579	0.128	0.406	0.587
3	0.197	0.468	0.585	0.204	0.466	0.589
4	0.225	0.520	0.366	0.262	0.514	0.375

三位观察者的 (a, b_1, b_2) 差异比较小。只要有足够的观察者, 经过统计处理获得的 (a, b_1, b_2) 值, 便可使实验公式具有通用性。研究表明, a 与适应水平有关, 适应越充分, 色位移越大 a 值则越大。 b_1 和 b_2 值则是视觉主观评价的宽容性所致, 随实验精度提高, b_1 和 b_2 则小, 甚至可以忽略。整个实验公式将更简单, 色位移规律一目了然。由于选择的是 CIE1976 (

Luv) 匀色空间, 等效颜色刺激转换关系呈简单的线性转换, 这也是提示我们, 正确恰当地选择颜色坐标系统, 复杂的颜色视觉问题能够简单化。

参 考 文 献

- [1] 荆其诚等者, 《色度学》. 科学出版社, 1979 年
- [2] 束越新著, 《颜色光学基础理论》. 山东出版社, 1981
- [3] D. B. Judd and G. Wyszecki, *Color in Business, Science and Industry*, 1975

The Study on Equivalent Chromatic Stimulus in Color Adaptation and Contrast

Zhang Jun, Zhou Fengkun, Chen Shufang and Liu Weiqi

(Changchun Institute of optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 13002)

Abstract

On the basis of color adaptation and color contrast experiments under various viewing circumstances of different background-colors, an equivalent color perception model is proposed as a method for predicting color perception. The model is simple and can be used accurately to predict color adaptation effects.

Key words: Color adaptation, color contrast, Equivalent stimulus