

- [13] 张晓龙、郭光灿、彭堃堉等, 物理学进展, 14-2(1994), 173.
[14] J. F. Roch et al., *Appl. Phys. B*, 55(1992), 291.
[15] 薛秋寒、郭光灿, 物理学报, 44-9(1995), 1410.

- [16] 杨卫国、郭光灿, 科学通报, (待发表).
[17] 郭光灿等, 世界光学大会论文集, 上海, (1993), 49.
[18] A. K. Ekert, *Phys. Rev. Lett.*, 67(1991), 661.

色度学及其进展*

朱正芳 汤顺青

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

摘要 颜色是人的感觉器官对外界光刺激的一种反映, 是一种知觉量. 现代色度学采用心理物理学方法成功地解决了颜色匹配和色差的定量预测. 该文对视觉生理、基本匹配实验、三刺激值和色品坐标、均匀色空间、色貌预测、颜色信息交流、颜色复现等现代色度学的基本内容和新发展作了简要的介绍.

关键词 色度学, 颜色

古时候, 人们就已经掌握了绘画、印染等技术, 但对颜色本质的认识却是模糊不清的. 牛顿将日光经过三棱镜色散成光谱, 并且模拟全音阶的七个音符将光谱分为七种颜色: 红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫; 他还将光谱中的不同部分相混合, 产生了不同的颜色, 提出了颜色混合中用重心原理来确定混合色结果的方法. 牛顿是揭示颜色与光之间关系的第一个人. 19 世纪格拉斯曼(Grassmann)等在研究颜色视觉机理、颜色混合规律等许多方面作出了重要的贡献. 而现代色度学的建立才只有几十年的历史, 是现代科学家艰苦工作的成果. 值得提出的是国际照明委员会(CIE)几十年来一直引导和组织色度学重要项目的研究. 1931 年, CIE 第 8 次会议上提出了有关色度学最早的推荐书. 从而奠定了现代色度学的基础. 随着科学技术的发展和社会的进步, 人们对颜色信息的交流、颜色定量度量 and 彩色复现提出了更高的要求. “色度学”这门学科就迅速发展和完善起来, 理论和应用都取得了长足的进步.

1 人眼的颜色视觉

现在人们认为, 颜色在客观上是光的一种特性, 在主观上是一种视知觉现象, 像味觉、听

觉、嗅觉、触觉一样, 是人的感受器官对外界刺激的反映. 与一般的物理量不同, 它包含着复杂的生理和心理过程.

在整个电磁波谱中, 只有一小部分能引起人的视觉. 要严格确定可见光的波长范围是困难的, 一般来说, 可以取 380—780 nm 作为可见光的波长范围. 然而, 当光很强, 人眼又在暗适应的情况下, 眼睛可感受的波长范围至少可扩大到 350—900 nm. 而有时在色度学计算中, 取 400—700 nm, 也可以得到一定的精度. 在我们日常生活中, 见到单色光的机会不多, 一般都是混合光. 一定成分的混合光, 有一种确定的颜色与之对应; 但反过来, 一种颜色并不只对应一种光谱组合. 也就是说, 两种光谱成分完全不同的混合光, 有可能引起的颜色知觉完全一样. 例如 6 W 540 nm(绿)与 25 W 650 nm(红)的单色光相混合, 产生的颜色与 10 W 580 nm(黄)的单色光相同. 这种现象在色度学中称为“同色异谱”.

人眼能分辨颜色的数量, 人们从不同角度进行过推算, 其结果出入很大, 有人说在最佳观察条件下人眼能辨别 1000 多万种颜色. 总之人的视觉系统辨别颜色的能力是很强的. 尽管分

* 1995 年 3 月 17 日收到.

辨颜色种类惊人,但人眼只能分辨颜色的三种变化,即明度、色调和饱和度.就是说颜色变化万千,但只有三个独立的自变量,颜色是一个三变量函数.三个自变量可以有不同的选取方法.

在人眼的视网膜上存在着大约一亿个视杆细胞和 700 万个视锥细胞.这两类细胞有不同的视觉功能.视杆细胞只有在低亮度水平(百分之几 cd/m^2 以下)起作用,称为暗视觉.视杆细胞只有明暗感觉,不能分辨物体细节,也不能分辨颜色.视锥细胞只在高亮度水平(几个 cd/m^2 以上)下起作用,称为明视觉.视锥细胞即能分辨物体细节,又能分辨颜色.视锥细胞之所以能分辨颜色,是因为它有三种类型,各有自己的光谱响应特性.这三种细胞有时称为亲红、亲绿、亲蓝视锥细胞.就是说它们受到光刺激时分别产生红、绿、蓝的颜色感觉.不同波长的光,刺激同一种视锥细胞时,只是效率不同,但产生的颜色感觉是一样的.三种刺激按不同比例组合才产生出千千万万种颜色.因为只有三种视锥细胞,人眼对光谱波长的分辨力有限,才有“同色异谱”现象.这种人眼对波长分辨能力的缺陷不一定是坏事,否则彩色电视、彩色照相的实现将困难千万倍.明视觉和暗视觉的转换在生活中是经常出现的.当人由亮环境进入暗环境时,经过约 30 分钟,视觉感受能力提高约 10 万倍,这主要不是由于瞳孔增大,因为瞳孔直径由 2 mm 变到 8 mm 时,通光量只增加 10—20 倍,适应的过程是由锥体细胞视觉向杆体细胞视觉转换的过程.完全暗适应约需 40 min.人由暗环境进入亮环境时,开始看不清物体,一般只需 1 min 就能完成由杆体视觉向锥体视觉的转换.视锥细胞和视杆细胞在视网膜上的分布不是均匀的.视锥细胞密集在黄斑部位,随着离开黄斑的距离增大.视锥细胞急剧减少,视杆细胞逐渐增大.这种分布的不均匀性,使得颜色视觉随观察物体视场大小而变化,增加了颜色视觉的复杂性.

可见光进入人眼后,聚焦在视网膜上,被视杆细胞和视锥细胞所吸收而转换成神经信息.这些信息经过其他视觉系统进行复杂处理传至

大脑中枢神经,而后产生颜色知觉现象.这个过程是极其复杂的,它涉及到光学、光化学、视觉生理、视觉心理等方面.要定量探测这个过程是困难的,色度学必须避开这个复杂的过程,直接研究进入人眼的光刺激与最后色知觉量之间的对应关系.这是一种心理物理学研究方法.这种方法表示的颜色量称为心理物理色,目前色度学主要研究的就是心理物理色.

2 现代色度学基础

颜色混合实验存在着这样的事实:适当选取红、绿、蓝三种色光,按不同比例相混合,就可得到任意一种颜色.实验方法是:将视场分为两半,一半投以待测色光,另一半投以红、绿、蓝光.调节红、绿、蓝光的比例,视场中的分界线消失时,两半视场颜色相同,称为待测色光与三色混合色光达到了匹配.所选的三种色光称为三原色.当与待测色光达到颜色匹配时,所需三原色的数量称为三刺激值.值得提出的是这里所说三原色“数量”的单位不是一般的物理量单位,而是色度学单位.色度学单位与物理单位有一定关系,色度学单位的确定方法是:选一特定的白光作为标准,用选定的三原色与白光进行匹配,当达到颜色匹配时,如果所需要的三原色光的光通量值分别为 $L_R, L_G, L_B(\text{lm})$,则 L_R, L_G, L_B 定为三刺激值的相对亮度单位,即色度学单位.例如配某一色光所用三原色光分别为 $F_R, F_G, F_B(\text{lm})$,它的三刺激值就等于 $F_R/L_R, F_G/L_G, F_B/L_B$.

在颜色匹配实验中,待测色光也可以是单色光,对单色光进行匹配,可以得到单色光的三刺激值.如果在匹配实验中,将各单色光的辐射能量保持为相同,这时所得到的三刺激值称为“光谱三刺激值”.也就是匹配等能光谱色的三原色数量.光谱三刺激值又称为“颜色匹配函数”,它的数值只决定于人眼的视觉特性.因为任何颜色的光都是由不同单色光混合而成的.所以光谱三刺激值能作为其他色光三刺激值的

计算基础.

三原色和标准白光选择不同,得到的三刺激值也不同. CIE 用假想的红(X)、绿(Y)、蓝(Z)作为三原色,等能白(即在可见光范围内光谱功率分布为恒定值的白光)作为标准白光,建立了 CIE 色度系统. CIE 推荐的光谱三刺激值已用表格的形式公布,它代表人类平均色觉特性,称为“标准色度观察者”.

任何色光的三刺激值可用下列方程计算:

$$\begin{aligned} X &= k \int S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $S(\lambda)$ 为进入眼睛色光的光谱功率分布. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 是光谱三刺激值, k 是归一化常数.

(1)式可以预测两个色光是否匹配,即视觉上是否相同.例如有 $S_1(\lambda)$ 、 $S_2(\lambda)$ 两种不同光谱功率分布的色光,用(1)式计算出它们的三刺激值分别是 X_1, Y_1, Z_1 和 X_2, Y_2, Z_2 , 它们匹配的条件是:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_2, \\ Y_1 &= Y_2, \\ Z_1 &= Z_2. \end{aligned} \quad (2)$$

(1)式和(2)式告诉我们:任何一种颜色都可以用一组数 X, Y, Z 定量地表示出来. 只用数学计算的方法就可以预测两种颜色在视觉上是否相同,这是色度学的一个革命性进步. 在一定精度下用不太复杂的计算解决了十分复杂的人类颜色视觉现象.

一个已达到匹配的视场,保持色光不变,只变视场的大小,匹配就会破坏. 所以 CIE 推荐了两套“标准色度观察者”,分别用于 $1-4^\circ$ 和大于 4° 视场物体颜色的计算.

有两类不同的颜色形式,自发光色(光源色)形式和物体色形式. 对于物体色,它的颜色不仅决定于它的反射(透射)特性;也决定于照明光源种类. 同一物体在钠灯和日光下看颜色不会相同. 因此 CIE 规定了标准照明体.

物体、照明光源和人眼三者之间相对位置不同,也会影响颜色. CIE 也规定了标准的“照

明观察条件”.

标准观察者、标准照明体、标准照明观察条件是 CIE 色度系统的基本规定. 评价颜色时必须要在相同照明体、同一标准观察者和相同照明观察条件下进行. CIE 的规定保证了颜色匹配条件的正确使用,但是色度学用于解决日常生活中的复杂问题时,不一定能完全满足上述条件,会引起不同程度的误差,所以还必须十分注意.

在色度学计算中,常用色品坐标、色品坐标是三刺激值各自在三刺激值的总量中所占的比例,用 x, y, z 表示:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z}, \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z}, \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z}. \end{aligned}$$

以色品坐标 x, y 所表示的平面图称为色品图,如图 1 所示. 任何一种颜色均能在色品图中找到对应点,将单色光在色品图上的点连接,形成一马蹄形,马蹄形内包括了自然界能得到的所有颜色.

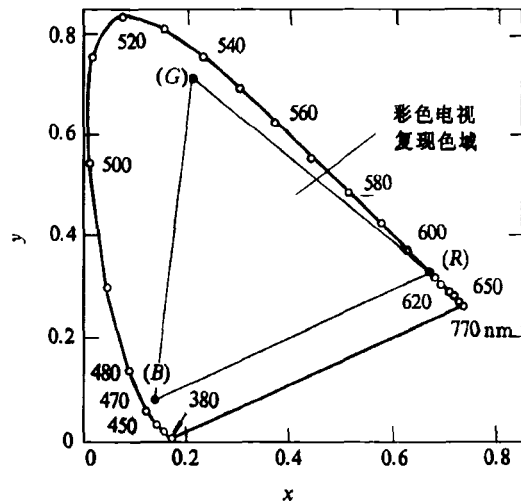


图 1 色品图

3 色差评价

上面的(1)式和(2)式能够预测两种颜色是否相同. 但是,如果不同,两种颜色就存在差异,称为色差. 能否从三刺激值差异大小判断两种

颜色的色差大小呢?答案是否定的.我们用三刺激值 X, Y, Z 作坐标建立一个直角坐标系,该坐标系称为颜色空间.那么任何一个颜色在该坐标系中均能找到一个对应的点.两个颜色不同,颜色空间中的两点就不重合,可以从三刺激值的差算出两点的距离,上述问题就成为在 X, Y, Z 颜色空间中两点距离能否判断色差的大小呢?莱特(Wright)和麦克亚当(Mac Adam)做了著名的实验:任选一个颜色,从各个方向慢慢变化,当人眼恰可觉察到颜色改变时,得到三刺激值的变化量,画在色品图上,发现恰可觉范围不是一个圆,而是椭圆.不同颜色椭圆的大小和长轴的方向均不一样.在绿色部分椭圆最大,蓝色部分椭圆最小,就是说,同样的 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 如果是绿色,人眼感觉到的颜色变化很小,而如果是蓝色,颜色变化就十分明显了.这说明 X, Y, Z 色度系统是个不均匀的颜色空间.解决色差度量的问题就是寻找一个均匀颜色空间,在这个空间内,两点的距离正比于视觉上颜色的差异,即色差的大小.

创立一种定量预测两种颜色色差的计算公式是工业生产中迫切需要解决的问题.这项工作无疑是十分困难的.直到本世纪 60 年代才不断有不同的均匀色空间问世.以后,许多学者提出了许多色差评价公式. CIE 在 1976 年在总结各位学者工作的基础上,推荐了 $L^* u^* v^*$ 和 $L^* a^* b^*$ 两种色差公式,目前已为各国所采用.前者主要用于自发光体,后者主要用于一般物体色的计算.所有学者建立的均匀色空间中的参数,都与 CIE 色度系统的三刺激值或色品坐标用数学公式联系起来,只是公式形式不同而已,三刺激值和色品坐标是色度计算的基础.到目前为止,理想的均匀色空间尚未找到,人们认为理想的均匀色空间应具有黎曼几何形式.在欧氏几何空间中只能近似描述.寻找更好的均匀空间的工作仍在进行.

现代色度学的成果,很快在工农业生产和科学技术研究中得到了广泛的应用.因为现代色度学预测颜色是否相同或色差的大小,不需要人眼直接参与,这就为颜色测量自动化开辟

了途径.目前许多高精度全自动仪器已经商品化,各种测色分光光度计、分光辐射计、光电色度计、白度计、光泽度计、彩色密度计、彩色亮度计、各种比色计、用于生产线上颜色质量控制的“在线颜色控制系统”,用于自动求解色料配方的“电脑配色系统”等等已在各行业发挥作用.

4 颜色外貌的预测

一个已经达到匹配的视场,视场周围有不同的颜色光刺激时,颜色匹配通常不受影响;人眼预先经受过其他颜色光刺激后再来观察匹配视场,颜色匹配也不受影响.这种经验事实叫做“颜色匹配恒常律”.这条定律对(1)式和(2)式的有效范围十分重要.两半视场匹配不被破坏,并不是说我们看到的颜色感觉没有变化,正好相反,颜色感觉会变化,只是两半视场同时变化而已.例如,在红色背景上放一块小的白纸,注视几分钟后,白纸上会出现淡淡的绿色;观察一张大面积的红纸一段时间后,再去观察一张白纸,白纸会出现绿色.说明当要观察的色刺激周围存在其他颜色刺激或者人眼已适应其他色刺激后再来观察此颜色时,其色外貌会产生变化.事实上颜色外貌的预测是十分复杂的.大脑总是要把整个视场的信息、眼睛此前的视觉史、过去生活的经验全部加以综合,最后产生颜色外貌的判断.传统的 CIE 色度系统只能判断在特定观察条件下一对颜色样品是否匹配,不能准确定量地给出复杂环境下人眼视觉系统感知的颜色外观属性.色度学的最终目的就是要预测日常生活中所遇到的复杂环境中呈现给观察者的颜色外貌,这是一个很远的目标.近年来许多学者已致力于这种研究.英国的 R. W. G. Hunt 和日本的 Nayatana 等提出了各自的色貌模型.他们用色调(hue)、视彩度(colourfulness)、视亮度(brightness)等量来表示颜色的外貌.在这些数学模型中,考虑了照明光源的变化、亮度水平的变化、背景条件的变化、以及介质不同对颜色外貌的影响等,而这些在颜色匹配基本实验中是不考虑的.他们的工作为色貌

预测迈出了可喜的一步。

5 彩色复现

按特定要求产生彩色的过程称为彩色复现。彩色电视、彩色照相、彩色印刷已为人们所熟悉。色度学的成果为彩色复现提供了理论依据；彩色复现的新发展又给色度学提出了新的研究课题。

5.1 电脑配色系统

在印染、油漆等行业需要用不同色料配制所要求的颜色。过去是由配色师凭经验估算配方，一般来说这种方法命中率不高。色料混合的光学原理早在 30 年代就提出来了。但是电脑配色系统的完善并大量用于生产还是近十几年的事。电脑配色系统由分光光度计、计算机和软件组成。它的工作过程是：将用户要求的样品放在分光光度计上进行测试。计算机采集到数据后，以预先存储在机内的色料基础数据库为依据，按色度学原理进行计算，几分钟内便可以给出多种配方供选择。这种全自动求解色料配方的命中率已经很高，它的优越性已无人怀疑。为了满足多种行业的需要，电脑配色的软件分为印染、油漆、塑料、油墨等多种，分别用于相应的行业。

5.2 CRT (阴极射线管)真彩色显示

现在优质的 CRT 在理论上可以显示 1000 多万种颜色。由于计算机控制的 CRT 显示的可控性和灵活性，CRT 在彩色图像处理、彩色桌面印刷、各种 CAD 彩色设计中得到了广泛的应用。有报道说，美国孟塞尔实验室里大约有 50% 的颜色视觉研究实验都是在 CRT 上完成的。CRT 的三个电子枪分别激发三种荧光粉产生红、绿、蓝光。由于三个红、绿、蓝光点很小且很近，人眼不能分辨，而是合成一个光斑产生总的颜色感觉。要改变 CRT 显示的颜色，就要改变红、绿、蓝三个通道的输入值。三个通道的输入值由计算机控制。

真彩色显示的一种含义是在 CRT 上能准确复现出已知颜色的三刺激值和色品坐标。目

前这方面的研究已取得重要成果。CRT 的三原色及选用的白场构成了它自己的 RGB 色度系统。如果每台 CRT 的三原色及白场不同，则它们的 RGB 系统亦不同。为了交流、处理方便，必须把每个 CRT 的 RGB 系统转换为通用的 CIEXYZ 系统。另外 CRT 的输入值与它各通道的输出亮度之间的关系必须逐台测定，完成了这两步工作后，就可以建立预测三刺激值显示的数学模型。这种预测目前已达到了较高的精度。

真彩色显示的真正含义应该是能在 CRT 上真实地显示色貌，即达到“所见即所得”的效果。即使三刺激值复现完全一致，色貌的视觉效果也不能完全相同。这是因为 CRT 是自发光色，而需要在它上面复现的常常是物体色。它们的色貌受环境、背景、物体结构、照明光源等多种因素的影响。色貌的复现要比三刺激值复现复杂得多。目前人们正向这个方向努力。

6 颜色信息的交流

在科学技术高度发展的今天，颜色信息的准确交流十分重要。

人类最早进行颜色交流是用颜色名词，在日常生活中现在仍在采用。但是无规律的和简单的语言所能表达的颜色种类是十分有限的。它最大的问题是不能准确定量。虽然美国有人下过大工夫，编辑了多达 7500 条的颜色词典，但它难以推广应用是可想而知的。

CIE 色度系统是目前颜色信息交流的重要工具。你要求的颜色的三刺激值和色品坐标可以用数据准确传给对方。现代色度学还有许多表示颜色特性的参数，它们可以方便地交流，而不用任何实物。所生产的颜色是否达到了要求可用仪器客观来测定，避免了目视主观评价的许多纠纷。这种方法的缺点是：只从颜色参数难以对颜色建立准确的彩色感觉。

色序系统作为颜色表示方法和交流的工具已有很长的历史。色序系统由一系列的色卡组

样的颜色时,在一定的照明条件下将试样与色卡进行目视比较,与试样颜色一样的那块色卡的标号就代表该试样的颜色.要科学地和准确地制造一套色序系统是十分困难的.现在最常用的孟塞尔(Munsell)系统是美国光学学会花了6年时间,经过几百万人次的测定、观察和判断,对旧孟塞尔图册修订后出版的.瑞典创立的NCS(自然色系统)系统国际上也已广泛采用.还有很多种色序系统为特定行业所应用.色序系统的困难是色块不可能做得很多,但它的建立大都依赖于目视实验,没有过多的假设,这是

其他系统无法比拟的.

现在 CRT 颜色显示的快速发展和普及,有可能成为一种新的颜色信息交流的工具.人们希望传递一张软盘,便可准确直观地完成颜色信息交流.现在已有人致力于这方面的研究.

参 考 文 献

- [1] Alan R. Robertson, *Physics Today*, 45-12(1992), 24.
- [2] G. Wyszecki, *Color 73*, Adam Hilger, (1973), 21—51.
- [3] R. W. G. Hunt, *Measuring colour*, Ellis Horwood, (1992).
- [4] P. A. Rhodes et al., *Displays*, 13-12(1992), 89.
- [5] 汤顺青,色度学,北京理工大学出版社,(1991).

核动力与核武器扩散问题*

张 会 杜祥琬

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088)

摘 要 核武器的扩散日益成为一个重要的国际安全问题.阻止核扩散最重要的途径就是控制裂变材料的生产和利用.由于裂变材料在核动力和核武器方面均有着重要的作用,因而核动力的发展可能引起核扩散.本文主要讨论核动力引起的核扩散问题及安全保障措施.着重分析各种浓缩技术可能引起的核扩散及转移高浓缩的可能途径;还讨论了民用核动力系统中铀的扩散问题;最后,研究了如何加强国际安全保障的问题.

关键词 核动力,核武器扩散,核安全保障

控制核武器的扩散是当今国际社会的一个重要问题.由于核燃料铀-235和钚-239可同时用于制造核武器和核动力(指在核工业中,利用裂变聚变能提供动力)工业,这就使从核动力工业中转移生产核武器用裂变材料成为可能,因此加强对核动力系统的安全保障,对于阻止核武器扩散是十分必要的.

1 原子能的双重性及其意义

原子能不仅能用于和平目的,造福于人类,而且还能用于制造核武器.核武器的超常杀伤能力,引起了国际社会极大关注.一方面是和平利用原子能,另一方面是控制核武器的扩散.这

两方面的矛盾以及人们对和平利用核能日益增长的兴趣导致了1957年国际原子能机构(IAEA)的建立.该机构的主要职能之一是执行保障措施以确保用于和平目的的核材料和设备不用于军事目的.另外自1945年美国拥有原子弹之后,到60年代末,苏联、英国、法国和中国也相继爆炸了核武器.为了防止核武器进一步扩散,导致《不扩散核武器条约》(NPT)于1970年生效.其主要宗旨是,防止核武器或其他核爆炸装置的扩散;保证无核武器国家的和平核活动不转变成生产核武器或其他核爆炸装置;促进和平使用核能.

* 1995年4月17日收到初稿,1995年7月3日收到修改稿.