

双积分球目视色度计

荆其诚 张增慧 喻柏林 焦书兰 郑鸿祥

(中国科学院心理研究所)

目视色度计是利用人的视觉测量颜色的一种仪器。国外 Donaldson (参看 Judd and Wyszecki, 1975)、Wyszecki (1965) 设计了结构复杂的目视色度计。Burnham (1952) 的目视色度计结构简单,但只能产生一个比较色,不能提供待测色。

我们设计了一台双积分球目视色度计,它既能在两个相邻视场上产生所要求的颜色,也能测量两视场的颜色。这个仪器利用带滤光片的投光器,将红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色光射入一个标准积分球进行混合而产生标准颜色光,照亮一半视场。由另外三原色光射入另一比较积分球进行混合而产生比较颜色光,照亮另一半视场。

构造和原理

仪器的示意图见图1。仪器的标准积分球和比较积分球的直径各为300 mm,其内壁烟熏氧化镁(MgO)。每一积分球壁上垂直于赤道平面有三个直径为30 mm的入射光孔 A_1 、 A_2 、 A_3 和一个直径45 mm的出射光孔 W 。 W 外面有一光孔盖 L 。四个光孔的总面积为积分球内壁总面积的5%。在 A_1 、 A_2 、 A_3 的外部各设一个投光器。投光器的镜头处设有可调虹彩光栏 D_R 、 D_G 、 D_B ,都装有指针和标尺盘,标出光栏开口大小的读数。三个投光器镜头前面分别设有红(R)、绿(G)、蓝(B)滤光片,将(R)、(G)、(B)三原色光射入积分球。

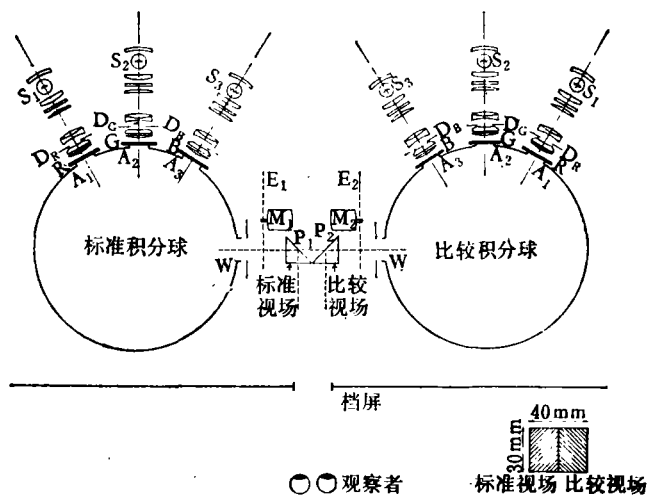


图1 双积分球目视色度计示意图

本文1978年6月2日收到。

各投光器的光源 S_1 、 S_2 、 S_3 是溴钨灯,用稳压稳流装置保持光源色温恒定。因此,在调节光栏时只改变颜色光进入积分球的通量,而不改变其色度。这样,(R)、(G)、(B)光束进入积分球,经球内壁氧化镁涂料的多次漫反射,形成均匀的混合光,再经 W 出射到球的外面。

标准积分球和比较积分球的出射光分别射到两块直角反射稜镜 P_1 和 P_2 上,构成标准光和比较光的两半相毗邻的视场。主试调节标准积分球三个投光器光栏 D_R 、 D_G 、 D_B 的光度标尺,从而改变(R)、(G)、(B)的辐通量的比例,在标准视场上呈现特定的颜色光。观察者比较两半视场。主试调节比较积分球三个投光器的光栏 D_R 、 D_G 、 D_B ,以产生相应的混合光,直到观察者认为比较视场与标准视场上的颜色和亮度匹配为止。

在每一积分球出射光孔 W 外面装有一个由马达 M_1 或 M_2 带动的可调扇形减光盘 E_1 或 E_2 ,以改变每一积分球出射光的总亮度。

测试与定标

1. 两积分球的三原色色度坐标的测试 采用与 CIE 标准光源 A(2856K) 比较测量法将光谱光度装置放在观察者眼睛的位置上进行接收,对标准积分球和比较积分球的每一投光器光源连同滤光片、积分球及视场稜镜的整个光学系统进行可见光区 400—700 nm 的光谱光度测量。图 2 是标准积分球的(R)、(G)、(B)三原色的相对光谱功率分布。比较积分球三原色的相对光谱功率分布与标准球相近,但不完全相同。各原色的色度坐标如表 1。

表 1 标准积分球和比较积分球的三原色光色度坐标

标准积分球				比较积分球		
原色光	x	y	z	x	y	z
(R)	0.6958	0.3041	0.0001	0.6898	0.3101	0.0001
(G)	0.2686	0.6655	0.0659	0.2677	0.6674	0.0649
(B)	0.1485	0.0840	0.7675	0.1425	0.0743	0.7832

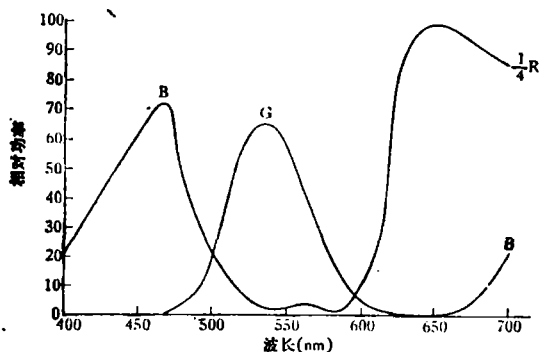


图 2 标准积分球三原色光 (R、G、B) 的相对光谱功率分布

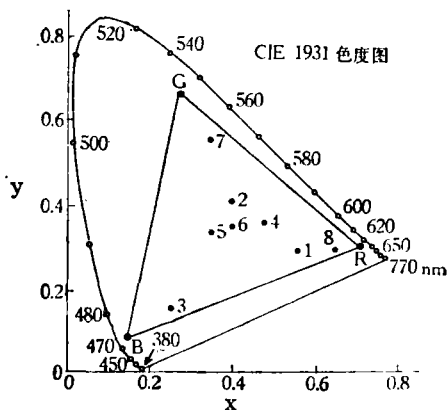


图 3 标准积分球三原色光 (R)、(G)、(B) 色域和 8 个测试颜色

图 3 给出 CIE 1931 色度图上,标准积分球的(R)、(G)、(B)色度点及其三角形色域。比较积分球的(R)、(G)、(B)色度点及色域与标准积分球相似。

2. 两积分球三原色光度标尺的定标 在观测位置上对每一投光器光栏的不同开口大小

测量相对光谱功率分布,用式(1)标出光度标尺盘上各点的相对亮度 Y :

$$Y = \sum S_i(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda, \quad (1)$$

式中 $V(\lambda)$ 为 CIE 标准光度观察者, $\Delta\lambda$ 取 10nm 间隔。因而 D_R 、 D_G 、 D_B 的光度标尺盘的相对亮度读数分别为 Y_R 、 Y_G 、 Y_B 。

颜色的呈现和测量

1. 双积分球目视色度计 RGB 色度座标系统与 CIE-XYZ 色度座标系统相互转换 任何一组三原色,在确定了三原色的色度座标,又选定了某一参照白光之后,就可构成一个色度座标系统,用它来标定颜色。本仪器已测出三原色(R)、(G)、(B)的色度座标(见表1),现选定 CIE 标准照明体 D_{65} 作为参照白,于是两个积分球各自构成一个 RGB 色度座标系统。为了用本仪器产生 CIE-XYZ 系统标定的颜色,或者将本仪器 RGB 系统标定的颜色转换为 CIE-XYZ 系统标定的颜色,我们解出两套系统间的相互转换方程 (Judd and Wyszecki, 1975)。

(1) 标准积分球:

$$\begin{aligned} R &= 2.5164X - 0.9781Y - 0.3795Z, \\ G &= -0.7837X + 1.7931Y - 0.0443Z, \\ B &= 0.0513X - 0.1183Y + 0.9830Z; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X &= 0.4786R + 0.2740G + 0.1974B, \\ Y &= 0.2092R + 0.6789G + 0.1117B, \\ Z &= 0.0001R + 0.0672G + 1.0202B. \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 比较积分球:

$$\begin{aligned} R &= 2.4697X - 0.9561Y - 0.3586Z, \\ G &= -0.8048X + 1.7903Y - 0.0235Z, \\ B &= 0.0520X - 0.1164Y + 0.9808Z; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X &= 0.4904R + 0.2737G + 0.1858B, \\ Y &= 0.2205R + 0.6823G + 0.0969B, \\ Z &= 0.0001R + 0.0664G + 1.0213B. \end{aligned} \quad (5)$$

式(3)和式(5)中的 Y 式是本系统的亮度方程式。根据 Grassmann 的亮度相加定律,参照白光 D_{65} 的亮度是三原色光亮度的算术和,而(R)、(G)、(B)三原色光的亮度在 D_{65} 白光中的贡献是不同的。在式(3)三者的比例系数是, 0.2092:0.6789:0.1117。若以 0.2092 进行归一,则

$$Y = R + 3.2452G + 0.5339B, \quad (3a)$$

在式(5)三者的比例系数是 0.2205:0.6825:0.0969。若以 0.2205 归一,则

$$Y = R + 3.0966G + 0.4397B. \quad (5a)$$

2. 两积分球视场颜色的呈现 已知一个颜色在 CIE-XYZ 系统中的三刺激值 X 、 Y 、 Z 之后,如拟在标准积分球的视场上呈现这一颜色,将其代入式(2),则可转换为本仪器标准积分球 RGB 系统的三刺激值 R 、 G 、 B 。再用式(3a)亮度方程式的三个系数分别乘以 R 、 G 、 B 即求得该混合色的三原色光相对亮度 Y_R 、 Y_G 、 Y_B 。最后按 Y_R 、 Y_G 、 Y_B 的数值调节标准积分球光度标尺 D_R 、 D_G 、 D_B 光栏,就呈现了所要求的颜色。其相对亮度为 Y_R 、 Y_G 、 Y_B 之和。

以同样方法利用式(4)或式(5a)也可在比较积分球视场上呈现上述颜色。

3. 两积分球视场颜色的测量 在标准积分球视场呈现一个特定的颜色光,通过目视比较,使比较积分球视场的比较光与标准光匹配。此时,比较光的相对亮度应是比较积分球的 D_R 、 D_G 、 D_B 三个光度标尺读数之和,即 $Y = Y_R + Y_G + Y_B$ 。用式(5a)亮度方程式的 R 、 G 、 B 系数分别除 Y_R 、 Y_G 、 Y_B 即得出比较光的 R 、 G 、 B 三刺激值: $R = Y_R/1$, $G = Y_G/3.0966$, $B = Y_B/0.4397$,将 R 、 G 、 B 三刺激值代入式(5),得出CIE-XYZ系统的三刺激值,再换算成 x 、 y 色度坐标。依同样方法,也可用比较积分球产生任意的颜色光,而用标准积分球颜色光来标定比较光的色度和亮度。

仪器准确度的考查

本仪器的准确度主要取决于光度标尺的精度。为了考查仪器呈现颜色和测色的准确度,我们在标准积分球色域内的不同部位,任意选定八种不同色度坐标的颜色。按本文所介绍的步骤,用标准积分球的三个投光器分别呈现在视场上。同时又对这八种颜色进行了光谱光度测量,并计算其色度坐标。目视色度计的平均误差是 $\Delta x = 0.0035$, $\Delta y = 0.0031$,能满足视觉实验的要求。

* * *

目视色度计在科学研究中的最大用途不仅在于用它作为测色的仪器,而在于用它作为产生颜色的仪器。当我们研究颜色匹配、人眼的辨色能力、颜色的宽容度等课题时,常常需要在两个相邻视场上产生和变化各种颜色。我们设计的双积分球目视色度计结构简单,能够方便地呈现和测量仪器色域内的颜色,而且左右两半视场的颜色都可以随意改变。只须通过简单的色度坐标转换,便可用CIE色度学系统的量值呈现或标定颜色。仪器的呈现和测量颜色的准确度和精度均较高。

这一双积分球目视色度计可以做进一步的改进。如选用更饱和的三原色滤色片,可以扩大其色域。投光器的人射光不用光栏控制,而用千分尺调节的狭缝或开口来代替,可以提高光度标尺的精度。为了提高仪器的自动化程度,可以在积分球的顶部安装一个具有 $V(\lambda)$ 光谱灵敏度的光探测器,就可不通过光栏的光度标尺而直接测出每一原色的 Y 值。如果目视色度计配合计算机,就可按预先编排的程序,呈现给定的CIE色度坐标和亮度的颜色,或者测出颜色的CIE色度坐标和亮度,并可进一步输出两颜色的色差(ΔE)。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院心理研究所二室、中国计量科学研究院光学室,电光源通讯,1976,4.
- [2] Burnham, R. W., *Am. J. Psychol.*, 65(1952), 603.
- [3] Judd, D. B. & Wyszecki, G., *Science and Industry*, 3rd. ed., 1975.
- [4] Wyszecki, G., *J. Opt. Soc. Am.*, 55(1965), 1319.