

# 彩色纤维数字化混色模型的构建与应用

田晨然<sup>1</sup>, 薛元<sup>\*1</sup>, 薛惊理<sup>2</sup>, 金光<sup>2</sup>

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 康赛妮集团有限公司, 浙江 宁波 315020)

**摘要:**针对彩色纤维混色过程中缺乏数字化推演手段等问题,以构建全色域网格化混色模型为目标,选取彩色三原色纤维与灰色纤维进行混色,以10%为梯度构建3组三元双重耦合混色模型;整合四基色节点与三元双重耦合混色网格点序号,得到全色域混色模型及其网格混色样的质量矩阵、混合比矩阵与颜色值矩阵;通过直角坐标与极坐标的转换,同时代入四基色彩色纤维颜色值,可得到矩形和圆形的全色域网格化混色模型及其色谱;依据构建的全色域混色模型,给出不同离散度的全色域网格化混色色谱及与之相对应的色相、明度、彩度的渐变色谱,并应用到服装面料色彩设计领域。研究表明,构建的全色域混色模型,不但可在全色域范围内获取彩色纤维的可视化混色色谱,还可为彩色纱线的数字化设计提供有效方法。

**关键词:** 颜色模型;数字化混色;彩色纤维;色彩设计;渐变色色谱

**中图分类号:** TS 941.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)03-0198-10

## Construction and Application of Color Fiber Digital Color Mixing Model

TIAN Chenran<sup>1</sup>, XUE Yuan<sup>\*1</sup>, XUE Jingli<sup>2</sup>, JIN Guang<sup>2</sup>

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Kangsaini Group Co., Ltd., Ningbo 315020, China)

**Abstract:** In view of the lack of digital means to calculate the color mixing process of colored fiber, this paper aimed to build a full color gamut grid color mixing model. Three primary color fibers and gray fibers were selected for color mixing, and three groups of ternary double-coupled color mixing models with 10% gradient was constructed. The weight matrix, mixing ratio matrix and color value matrix of the full color gamut color mixing model were obtained by integrating four primary color nodes and three double-coupled color mixing grid point numbers. By converting cartesian coordinates and polar coordinates and substituting the color values of four primary color fibers, the full color gamut grid color mixing model of rectangular and circular panchromatic gamut and its chromatogram could be obtained. According to the constructed full color gamut color mixing model, the full color gamut meshing mixed color chromatography of different dispersion and the corresponding gradient color chromatography of hue, brightness and chroma were given, which was applied to the field of clothing fabric color design. The results showed that the constructed full color gamut color mixing model could not only obtain the visual color mixing chromatography of color fibers in the range of full color gamut, but also provided an effective means for the digital design of color yarns.

**Key words:** color model, digital color mixing, coloured fibre, color design, gradient color chromatography

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期 2024-02-21。

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01188); 宁波市重点研发计划项目(20232ZDYF020042)。

作者简介: 田晨然(1999—), 男, 硕士研究生。

\* 通信作者: 薛元(1962—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为数字化与智能化纤维及纱线成形加工技术。

Email: fzxueyuan@qq.com

在数字化时代,各领域都面临着变革与创新,服装设计领域也不例外,彩色纤维数字化设计的出现,为服装艺术带来了全新的机遇与可能。随着数字技术的快速发展,人们能够更加精准和灵活地操控彩色纤维的各种属性,同时可以自由调配色彩,形成极其丰富和细腻的彩色纤维组合<sup>[1-2]</sup>。材料科学的发展也为彩色纤维混色提供了更多可能性。新型的纤维材料具有更好的染色性能和色彩稳定性,使得混色后的纤维在质量和耐久性方面得到显著提升,但颜色精度方面存在不足<sup>[3]</sup>。近些年,着色行业的技术人员通过改进纤维的染色技术和混纺工艺,也能够创造出具有细腻渐变效果和独特视觉效果的彩色纤维混色产品<sup>[4-6]</sup>。当前对色彩的研究多集中在色度学领域的色彩分布均匀性、色彩色域和色彩风格等方面,对颜色数字化混配色的研究相对较少,且缺乏颜色混配理论模型来支撑<sup>[6]</sup>。

彩色纤维混色是从事着色行业人员要熟练掌握的技能,而工业制造中没有理论基础支撑的色彩配制会造成浪费<sup>[7]</sup>,因而需得出一套精准的配色模型。文中就彩色纤维调配色问题,设计出了全色域网格化混色模型,并对颜色模型进行可视化色谱设计,同时分析渐变色的应用情况,得出数字化色彩混色方案,为彩色纤维精准调配色提出可行的理论模型<sup>[8]</sup>。

## 1 四基色三元双重耦合混色模型设计

### 1.1 四基色彩色纤维的选取及其颜色值获取

在色彩调配设计中可以用不同颜色的纤维进行混色,或将纯色纤维与无色系纤维进行混合,也可选取多彩色纤维混合后再与无色系纤维混合。无论哪种方式,均是从色彩的色相、明度及彩度3个维度进行色彩调控。色相变化一般利用两组相邻色彩进行混色来调控;明度变化一般利用一组彩色与一组无彩色混色来调控;彩度变化一般利用两组以上近邻色与一组无彩色混色调控。为了获得较为丰富的色相、明度及彩度的调控范围,至少需要配置3种彩色纤维(色相差控制在120°左右)与1种无彩纤维(白或灰或黑)<sup>[9]</sup>进行混色。

文中选取得色率高、颜色纯净、色差在120°左

右的品红、青、黄、红、绿、蓝、红、黄、蓝3组彩色作为纤维的基础色;以灰色作为纤维无彩色原色。将被选用的3组彩色纤维 $\alpha, \beta, \gamma$ 和灰色纤维 $o$ 作为四基色纤维<sup>[10-11]</sup>进行纺制,等量称取四基色纤维质量 $W_\alpha, W_\beta, W_\gamma, W_o$ ,由测色仪获取其颜色值分别为 $C_\alpha(R_\alpha, G_\alpha, B_\alpha), C_\beta(R_\beta, G_\beta, B_\beta), C_\gamma(R_\alpha, G_\alpha, B_\alpha), C_o(R_o, G_o, B_o)$ 。

### 1.2 四基色彩色纤维质量的离散化

将四基色纤维质量 $W_o, W_\alpha, W_\beta, W_\gamma$ 以10%为梯度进行离散,分别得到其离散质量为

$$\begin{cases} W_\alpha(j) = \frac{11-j}{10} \times W_\alpha, \\ W_\beta(j) = \frac{11-j}{10} \times W_\beta, \\ W_\gamma(j) = \frac{11-j}{10} \times W_\gamma, \\ W_o(j) = \frac{j-1}{10} \times W_o. \end{cases} \quad (1)$$

式中:离散变量 $j=1,2,3,\dots,10,11$ 。

### 1.3 四基色彩色纤维的三元双重耦合混色模式构建

选取离散质量 $W_o(j_1), W_\alpha(j_2), W_\beta(j_3), W_o(j_1), W_\beta(j_2), W_\gamma(j_3), W_o(j_1), W_\gamma(j_2), W_\alpha(j_3)$ 3组混合样进行三元双重耦合混色。则四基色纤维三元双重耦合混样的质量为

$$\begin{cases} W_{\alpha\beta o}(j_1, j_2, j_3) = \frac{j_1-1}{10} \times \left( \frac{11-j_2}{10} W_\alpha + \frac{11-j_3}{10} W_\beta \right) + \frac{11-j_1}{10} W_o, \\ W_{\beta\gamma o}(j_1, j_2, j_3) = \frac{j_1-1}{10} \times \left( \frac{11-j_2}{10} W_\beta + \frac{11-j_3}{10} W_\gamma \right) + \frac{11-j_1}{10} W_o, \\ W_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2, j_3) = \frac{j_1-1}{10} \times \left( \frac{11-j_2}{10} W_\gamma + \frac{11-j_3}{10} W_\alpha \right) + \frac{11-j_1}{10} W_o. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_{\alpha\beta o}(j_1, j_2, j_3), W_{\beta\gamma o}(j_1, j_2, j_3), W_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2, j_3)$ 分别为基色纤维 $\alpha\beta o, \beta\gamma o, \gamma\alpha o$ 混合样的质量,且 $W_\alpha = W_\beta = W_\gamma = W_o; j_1, j_2, j_3 = 1, 2, \dots, 10, 11$ ;将彩色纤维进行两两耦合混色,则设 $j_2 + j_3 = 12$ 。

令 $j_3 = 12 - j_2$ 代入式(2),即

$$\begin{cases} W_{\alpha\beta o}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (11 - j_2)}{100} W_{\alpha} + \\ \frac{(j_1 - 1) \times (j_2 - 1)}{100} W_{\beta} + \frac{11 - j_1}{10} W_{\circ}, \\ W_{\beta\gamma o}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (11 - j_2)}{100} W_{\beta} + \\ \frac{(j_1 - 1) \times (j_2 - 1)}{100} W_{\gamma} + \frac{11 - j_1}{10} W_{\circ}, \\ W_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (11 - j_2)}{100} W_{\gamma} + \\ \frac{(j_1 - 1) \times (j_2 - 1)}{100} W_{\alpha} + \frac{11 - j_1}{10} W_{\circ}. \end{cases} \quad (3)$$

针对式(3)中的混合样  $W_{\alpha\beta o}(j_1, j_2)$ , 设混合样中基色纤维  $W_{\alpha}(j_1)$ 、 $W_{\beta}(j_2)$ 、 $W_{\circ}(j_3)$  的混合比为  $\lambda_{\alpha}(j_1, j_2)$ 、 $\lambda_{\beta}(j_1, j_2)$ 、 $\lambda_{\circ}(j_1, j_2)$ , 即

$$\begin{cases} \lambda_{\alpha}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (11 - j_2)}{100}, \\ \lambda_{\beta}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (j_2 - 1)}{100}, \\ \lambda_{\circ}(j_1, j_2) = \frac{11 - j_1}{10}. \end{cases} \quad (4)$$

针对式(3)中的混合样  $W_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2)$ , 设混合样中基色纤维  $W_{\alpha}(j_1)$ 、 $W_{\gamma}(j_2)$ 、 $W_{\circ}(j_3)$  的混合比为  $\lambda_{\beta}(j_1, j_2)$ 、 $\lambda_{\gamma}(j_1, j_2)$ 、 $\lambda_{\circ}(j_1, j_2)$ , 即

$$\begin{cases} \lambda_{\beta}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (11 - j_2)}{100}, \\ \lambda_{\gamma}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (j_2 - 1)}{100}, \\ \lambda_{\circ}(j_1, j_2) = \frac{11 - j_1}{10}. \end{cases} \quad (5)$$

针对式(3)中的混合样  $W_{\beta\gamma o}(j_1, j_2)$ , 设混合样中基色纤维  $W_{\alpha}(j_1)$ 、 $W_{\beta}(j_2)$ 、 $W_{\gamma}(j_3)$  的混合比为  $\lambda_{\gamma}(j_1, j_2)$ 、 $\lambda_{\alpha}(j_1, j_2)$ 、 $\lambda_{\circ}(j_1, j_2)$ , 即

$$\begin{cases} \lambda_{\gamma}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (11 - j_2)}{100}, \\ \lambda_{\alpha}(j_1, j_2) = \frac{(j_1 - 1) \times (j_2 - 1)}{100}, \\ \lambda_{\circ}(j_1, j_2) = \frac{11 - j_1}{10}. \end{cases} \quad (6)$$

设双重耦合混色样  $W_{\alpha\beta o}(j_1, j_2)$ 、 $W_{\beta\gamma o}(j_1, j_2)$ 、 $W_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2)$  的 RGB 颜色值分别为  $C_{\alpha\beta o}(j_1, j_2)$ 、 $C_{\beta\gamma o}(j_1, j_2)$ 、 $C_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2)$ , 即

$$\begin{cases} C_{\alpha\beta o}(j_1, j_2) = [R_{\alpha\beta o}(j_1, j_2), G_{\alpha\beta o}(j_1, j_2), B_{\alpha\beta o}(j_1, j_2)], \\ C_{\beta\gamma o}(j_1, j_2) = [R_{\beta\gamma o}(j_1, j_2), G_{\beta\gamma o}(j_1, j_2), B_{\beta\gamma o}(j_1, j_2)], \\ C_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2) = [R_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2), G_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2), B_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2)]. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C_{\alpha\beta o}(j_1, j_2)$ 、 $C_{\beta\gamma o}(j_1, j_2)$ 、 $C_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2)$  分别表示基色纤维  $\alpha\beta o$ 、 $\beta\gamma o$ 、 $\gamma\alpha o$  混合样的 RGB 颜色值。

$C_{\alpha\beta o}(j_1, j_2)$ 、 $C_{\beta\gamma o}(j_1, j_2)$ 、 $C_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2)$  3 组混合样的颜色值为

$$C_{\alpha\beta o}(j_1, j_2) = \begin{bmatrix} R_{\alpha} & R_{\beta} & R_{\circ} \\ G_{\alpha} & G_{\beta} & G_{\circ} \\ B_{\alpha} & B_{\beta} & B_{\circ} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (j_1 - 1) \times (11 - j_2)/100 \\ (j_1 - 1) \times (j_2 - 1)/100 \\ (11 - j_1)/10 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$C_{\beta\gamma o}(j_1, j_2) = \begin{bmatrix} R_{\beta} & R_{\gamma} & R_{\circ} \\ G_{\beta} & G_{\gamma} & G_{\circ} \\ B_{\beta} & B_{\gamma} & B_{\circ} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (j_1 - 1) \times (11 - j_2)/100 \\ (j_1 - 1) \times (j_2 - 1)/100 \\ (11 - j_1)/10 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$C_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2) = \begin{bmatrix} R_{\gamma} & R_{\alpha} & R_{\circ} \\ G_{\gamma} & G_{\alpha} & G_{\circ} \\ B_{\gamma} & B_{\alpha} & B_{\circ} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (j_1 - 1) \times (11 - j_2)/100 \\ (j_1 - 1) \times (j_2 - 1)/100 \\ (11 - j_1)/10 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

#### 1.4 四基色彩色纤维三元双重耦合混色构建的质量矩阵、混合比矩阵及颜色矩阵

四基色彩色纤维三元双重耦合混色各混合样的质量、混合比、颜色值为

$$W_{xyo}(j_1, j_2) = \begin{cases} W_{\alpha\beta o}(j_1, j_2), \\ W_{\beta\gamma o}(j_1, j_2), \\ W_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2). \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda_{xyo}(j_1, j_2) = \begin{cases} \lambda_{\alpha\beta o}(j_1, j_2), \\ \lambda_{\beta\gamma o}(j_1, j_2), \\ \lambda_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2). \end{cases} \quad (12)$$

$$C_{xyo}(j_1, j_2) = \begin{cases} C_{\alpha\beta o}(j_1, j_2), \\ C_{\beta\gamma o}(j_1, j_2), \\ C_{\gamma\alpha o}(j_1, j_2). \end{cases} \quad (13)$$

由式(3)可分别得到其质量矩阵、混合比矩阵及颜色矩阵, 即

$$[W_{xyo}(j_1,j_2)]_{11 \times 11} = \begin{bmatrix} W_{xyo}(11,1) & W_{xyo}(11,2) & \cdots & W_{xyo}(11,10) & W_{xyo}(11,11) \\ W_{xyo}(10,1) & W_{xyo}(10,2) & \cdots & W_{xyo}(10,10) & W_{xyo}(10,11) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{xyo}(2,1) & W_{xyo}(2,2) & \cdots & W_{xyo}(2,10) & W_{xyo}(2,11) \\ W_{xyo}(1,1) & W_{xyo}(1,2) & \cdots & W_{xyo}(1,10) & W_{xyo}(1,11) \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$[\lambda_{xyo}(j_1,j_2)]_{11 \times 11} = \begin{bmatrix} \lambda_{xyo}(11,1) & \lambda_{xyo}(11,2) & \cdots & \lambda_{xyo}(11,10) & \lambda_{xyo}(11,11) \\ \lambda_{xyo}(10,1) & \lambda_{xyo}(10,2) & \cdots & \lambda_{xyo}(10,10) & \lambda_{xyo}(10,11) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{xyo}(2,1) & \lambda_{xyo}(2,2) & \cdots & \lambda_{xyo}(2,10) & \lambda_{xyo}(2,11) \\ \lambda_{xyo}(1,1) & \lambda_{xyo}(1,2) & \cdots & \lambda_{xyo}(1,10) & \lambda_{xyo}(1,11) \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$[C_{xyo}(j_1,j_2)]_{11 \times 11} = \begin{bmatrix} C_{xyo}(11,1) & C_{xyo}(11,2) & \cdots & C_{xyo}(11,10) & C_{xyo}(11,11) \\ C_{xyo}(10,1) & C_{xyo}(10,2) & \cdots & C_{xyo}(10,10) & C_{xyo}(10,11) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{xyo}(2,1) & C_{xyo}(2,2) & \cdots & C_{xyo}(2,10) & C_{xyo}(2,11) \\ C_{xyo}(1,1) & C_{xyo}(1,2) & \cdots & C_{xyo}(1,10) & C_{xyo}(1,11) \end{bmatrix} \circ \quad (16)$$

1.5 四基色彩色纤维三元双重耦合混色模型及其色谱

根据式(16)设计网格化混色色彩子模型,具体如图 1 所示。结合四基色纤维  $\alpha,\beta,\gamma,o$  的颜色值可得出各混色子模型的色谱,具体如图 2 所示。

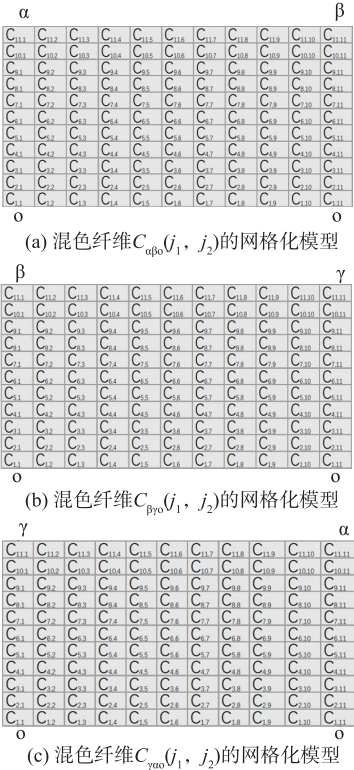


图 1 三元双重耦合混色构建的网格化混色模型

Fig.1 Grid color mixing model constructed by ternary dual coupling color mixing

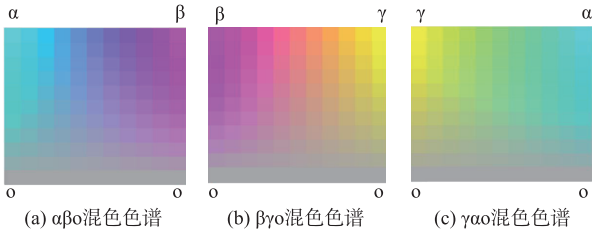


图 2 三元双重耦合混色构建的网格化混色色谱

Fig.2 Meshing color chromatography constructed by ternary dual coupling color mixing

2 全色域网格化混色模型设计

所谓全色域是针对特定颜色模型所定义の色域范围,不同颜色模型の色域范围各不相同,文中所定义的全色域是以青、品红、黄、灰四基色为基础,构建出四基色网格化混配模式,实现色相青-品红-黄-青的变化,明度实现青-灰、品红-灰、黄-灰的变化,彩度实现(青+品红)-灰、(青+黄)-灰、(黄+品红)-灰的变化。

2.1 全色域网格化混色模型设计

图 1 中三元双重耦合混色网格化混色子模型包含 121 个网格点,通过改变离散变量可调控四基色彩色纤维  $W_{\alpha}, W_{\beta}, W_{\gamma}, W_o$  的混合比例,从而可以在  $[C_{\alpha\beta o}(j_1,j_2)]_{11 \times 11}, [C_{\beta\gamma o}(j_1,j_2)]_{11 \times 11}, [C_{\gamma\alpha o}(j_1,j_2)]_{11 \times 11}$  3 个色域范围内调控色彩的色相、明度及彩度的变化。但上述调控手段属于局部色域调控,

无法在全色域范围内进行颜色变化。为了实现色相、明度、彩度在全色域范围内的数字化精准调控,需要设计全色域的网格化混色模型。

2.1.1 全色域网格化混色模型的质量矩阵设计

将图 1 中 3 个网格化子模型对应各行首尾相互拼接,得到包含  $C_{\alpha\beta\gamma o}$  的全色域网格化混色模型,该模型共有 330 个网格点。通过变动网格点坐标可变更四基色彩色纤维  $W_\alpha, W_\beta, W_\gamma, W_o$  的混合比例,再由  $C_{\alpha\beta\gamma o}$  所确定的全色域范围内统一调控颜色的色相、明度及彩度变化。

将得到一体化全色域混色模型与式(3)合并,即

$$\Omega(j,\delta) = \frac{11-j}{10} \times W_o +$$
$$[\Omega(j,\delta)]_{11 \times 30} = \begin{bmatrix} \Omega(11,1) & \Omega(11,2) & \cdots & \Omega(11,29) & \Omega(11,30) \\ \Omega(10,1) & \Omega(10,2) & \cdots & \Omega(10,29) & \Omega(10,30) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Omega(2,1) & \Omega(2,2) & \cdots & \Omega(2,29) & \Omega(2,30) \\ \Omega(1,1) & \Omega(1,2) & \cdots & \Omega(1,29) & \Omega(1,30) \end{bmatrix}。$$

$$\frac{(j-1) \times [11 - \delta - (\mu - 1) \times 10]}{100} \times W_x +$$
$$\frac{(j-1) \times [\delta - (\mu - 1) \times 10 - 1]}{100} \times W_y。$$
 (17)

式中: $\Omega(j,\delta)$  为混色模型中各网格点色块的统称;变量  $j=1,2,3,\cdots,10,11$ ;  $\mu$  为混合样中基色纤维种类,在式(3)中当  $\mu=1$  时,混合样为  $\alpha\beta o$ ,且  $W_x = W_\alpha, W_y = W_\beta$ ;当  $\mu=2$  时,混合样为  $\beta\gamma o$ ,且  $W_x = W_\beta, W_y = W_\gamma$ ;当  $\mu=3$  时,混合样为  $\gamma\alpha o$ ,且  $W_x = W_\gamma, W_y = W_\alpha$ ;  $\delta$  为对式(3)中 3 种子混合样进行整合重组的编序,且  $\delta=(\mu-1) \times 10 + i, \delta=1,2,3,\cdots,29,30, i=1,2,\cdots,10,11$ 。

则全色域混色模型全部子样的质量矩阵为

2.1.2 全色域网格化混色模型混合比矩阵的设计

设  $j=1,2,\cdots,10,11; \delta=1,2,\cdots,29,30$ 。根据式

(17) 可得全色域混色模型各混合样基色纤维的混合比为

$$\lambda_x(j,\delta) = \begin{cases} (11-\delta) \times (j-1)/100 & \delta=1,2,\cdots,10, \\ (21-\delta) \times (j-1)/100 & \delta=11,12,\cdots,20, \\ (31-\delta) \times (j-1)/100 & \delta=21,22,\cdots,30。 \end{cases} \tag{19}$$

$$\lambda_y(j,\delta) = \begin{cases} (j-1) \times (\delta-1)/100 & \delta=1,2,\cdots,10, \\ (j-1) \times (\delta-11)/100 & \delta=11,12,\cdots,20, \\ (j-1) \times (\delta-21)/100 & \delta=21,22,\cdots,30。 \end{cases} \tag{20}$$

$$\lambda_o(j,\delta) = (11-j)/10, \delta=1,2,\cdots,29,30。 \tag{21}$$

设全色域混色模型各子样的混合比为

$$\lambda(j,\delta) = [\lambda_x(j,\delta), \lambda_y(j,\delta), \lambda_o(j,\delta)]。 \tag{22}$$

则全色域混色模型的混合比矩阵  $[\lambda(j,\delta)]_{11 \times 30}$  为

$$[\lambda(j,\delta)]_{11 \times 30} = \begin{bmatrix} \lambda(11,1) & \lambda(11,2) & \cdots & \lambda(11,29) & \lambda(11,30) \\ \lambda(10,1) & \lambda(10,2) & \cdots & \lambda(10,29) & \lambda(10,30) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda(2,1) & \lambda(2,2) & \cdots & \lambda(2,29) & \lambda(2,30) \\ \lambda(1,1) & \lambda(1,2) & \cdots & \lambda(1,29) & \lambda(1,30) \end{bmatrix}。 \tag{23}$$

2.1.3 全色域网格化混色模型颜色矩阵及其矩形色谱

全色域混色模型各子样颜色值  $C(j,\delta)$  为

$$C(j,\delta) = \begin{bmatrix} C_r(j,\delta) \\ C_g(j,\delta) \\ C_b(j,\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x & R_y & R_o \\ G_x & G_y & G_o \\ B_x & B_y & B_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_x(j,\delta) \\ \lambda_y(j,\delta) \\ \lambda_o(j,\delta) \end{bmatrix}。 \tag{24}$$

则全色域混色模型颜色值矩阵  $[C(j,\delta)]_{11 \times 30}$  为

$$[C(j,\delta)]_{11 \times 30} = \begin{bmatrix} C(11,1) & C(11,2) & \cdots & C(11,29) & C(11,30) \\ C(10,1) & C(10,2) & \cdots & C(10,29) & C(10,30) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C(2,1) & C(2,2) & \cdots & C(2,29) & C(2,30) \\ C(1,1) & C(1,2) & \cdots & C(1,29) & C(1,30) \end{bmatrix}。$$

(25)

基于式(25)得到的全色域网格化混色模型,共有 330 个网格点,具体如图 3 所示。通过变动网格点坐标可变更四基色彩色纤维  $W_\alpha, W_\beta, W_\gamma, W_o$  的混合比例,并在  $C_{\alpha\beta\gamma o}$  所确定的全色域范围内调控颜色的色相、明度及彩度变化。假设四基色彩色纤维

青、品红、黄、灰的 RGB 颜色值为:  $C_\alpha(R_\alpha, G_\alpha, B_\alpha) = C_c(0, 255, 255), C_\beta(R_\beta, G_\beta, B_\beta) = C_m(255, 0, 255), C_\gamma(R_\gamma, G_\gamma, B_\gamma) = C_y(255, 255, 0), C_o(R_o, G_o, B_o) = C_o(127, 127, 127)$ 。结合式(25)可得全色域网格化混色色谱,具体如图 4 所示。

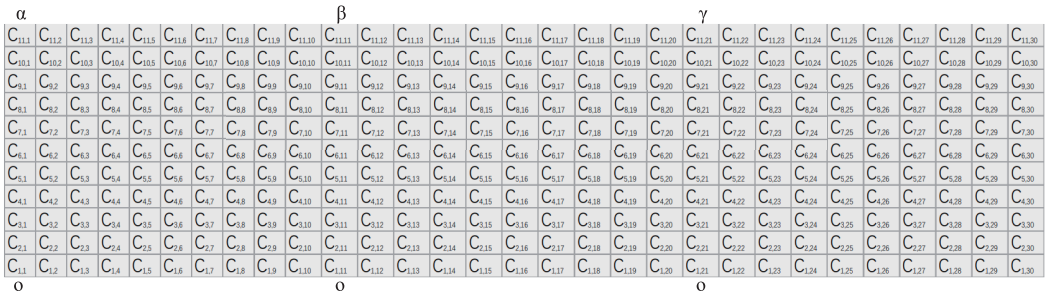


图 3 全色域混色网格化模型

Fig.3 Meshing model of full color gamut color mixing

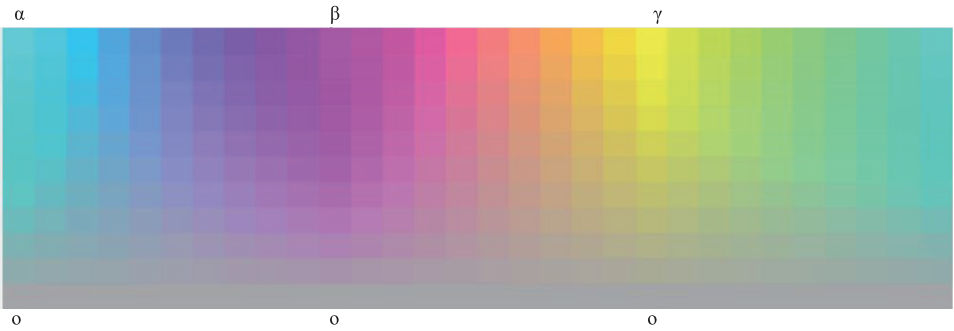


图 4 全色域混色网格化色谱

Fig.4 Panchromatic gamut meshing chromatography

2.2 圆环状全色域网格化混色模型及其色谱

基于颜色科学及色彩学理论,颜色包含色相、明度和彩度 3 个维度。色彩的 3 要素是相互联系、相互依赖的,1 个要素的变化会引起其他 2 个要素的相应变化,同时也会影响画面的整体色彩。色彩的调节和配色通常需要在色相、明度、彩度 3 个维度的全色域范围内进行。

由图 3 设计的基于四基色组合的三元双重耦合混色模型可知,全色域网格化颜色模型有 11 行,共 330 个网格点。而当  $j=1$  时为灰色纤维,将 30 个灰色网格转换为 1 个灰色网格,得到共 301 个网格点,将其按照行扭曲成同心圆的方式设计全色域网格化环状颜色模型,设环状颜色模型中各网格点位置坐标为极角  $\theta(\delta)$ 、极半径  $\rho(j)$ 。则各网格点位置的极坐标为

当  $j=1, \delta=1, 2, \cdots, 29, 30$  时:

$$\begin{cases} \theta(\delta) = 2\pi, \\ \rho(j) = 0. \end{cases}$$

(26)

当  $j=2, 3, \cdots, 10, 11, \delta=1, 2, \cdots, 30$  时:

$$\begin{cases} \theta(\delta) = \frac{2\pi \times (\delta - 1)}{30}, \\ \rho(j) = \rho \times (j - 1) / 10. \end{cases}$$

(27)

假设青、品红、黄、灰的 RGB 颜色值为  $C_c(0, 255, 255), C_m(255, 0, 255), C_y(255, 255, 0), C_o(127, 127, 127)$ , 获得四基色三元双重耦合混色环状颜色模型。

在环状四基色网格化颜色空间内,通过调控四基色纤维  $\alpha, \beta, \gamma, o$  混合样之间的混合比例,即可调控圆环状网格化混色空间内各混合样  $C_{j,\delta} (\delta=1, 2, \cdots, 29, 30; j=1, 2, 3, \cdots, 10, 11)$  的色相、明度及彩

度值变化,如图 5 所示。

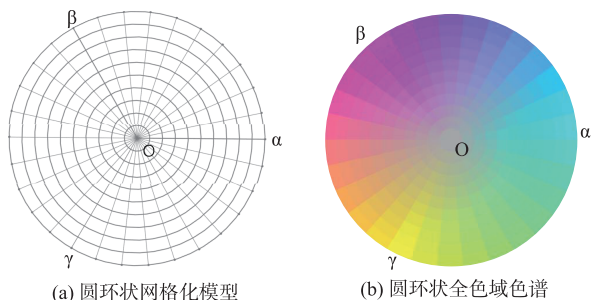


图 5 圆环状全色域网格化模型及色谱

Fig. 5 Meshing model and chromatography of circular panchromatic gamut

### 2.3 全色域网格化混色模型的混色色域分析

基于牛顿三原色原理,通过色光三原色或色料三原色的混合可获得任意色彩。图 4 和图 5 为构建的全色域矩形混色色谱和全色域环形混色色谱,其混色模式为依次选择两组相邻色相的彩色与灰色纤维以三元双重耦合混色模式进行数字化混色;通过青-灰、品红-灰、黄-灰等色料三原色纤维分别与灰色纤维的混合进行 0 ~ 1 之间的明度调和;通过青-品红-灰、品红-黄-灰、黄-青-灰等色料三原色纤维两两混合后再与灰色纤维混合进行 0 ~ 1 之间的彩度调和。基于上述原理可通过青-品红-黄-灰等四基色纤维的混合实现色相变化、彩度变化及明度变化。得到 3 组色域分别为  $C_{\alpha}-C_{\beta}-C_o$ ,  $C_{\beta}-C_{\gamma}-C_o$ ,  $C_{\gamma}-C_{\alpha}-C_o$  的混色样,将 3 组三元双重耦合混色样整合为一体化全色域混色模型,通过网格点坐标变化可调控全色域混色模型的色相实现从色相  $\alpha$  到  $\beta$  再到  $\gamma$  最后回到  $\alpha$  的变化。在圆环状混色色谱中,为了同时掌握 3 个维度变化之间的关系,全色域颜色变化由色相  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 、明度 0 ~ 1、彩度 0 ~ 1 所定义的颜色空间决定。

## 3 全色域混色模型网格化色谱的获取及其应用

### 3.1 不同离散度的全色域网格化混色色谱

根据配色需求纺制三原色(青、品红、黄)彩色纤维和无色系(黑色)纤维组成的四基色配色体系,以三原色(青、品红、黄)与黑色为四基色进行混合,假设其 RGB 颜色值为  $C_c(0,255,255)$ 、 $C_m(255,0,255)$ 、 $C_y(255,255,0)$ 、 $C_k(0,0,0)$ 。

根据第 2 章构建的全色域网格化环状模型,可将基色混合纤维的质量进行不同离散程度的调整。若以式(1)的方式进行质量离散化,将四基色纤维及其等比混合纤维集合体质量分别以 50%,25%,

10%,2% 为梯度进行离散化处理,可分别得到图 6 矩形色谱和图 7 圆环状色谱。

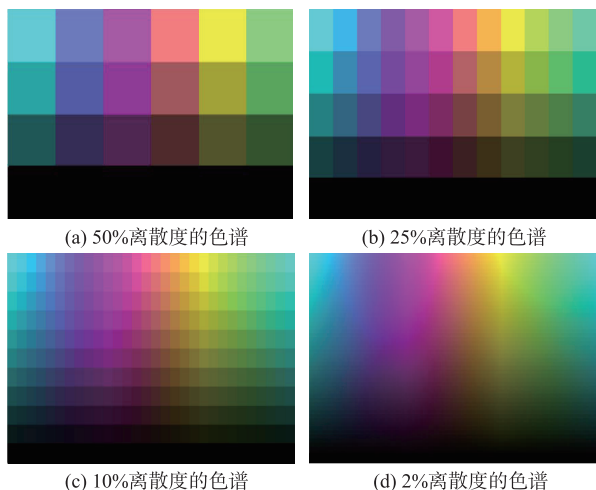


图 6 不同混合比的矩形混色色谱

Fig. 6 Rectangular color chromatography with different mixing ratios

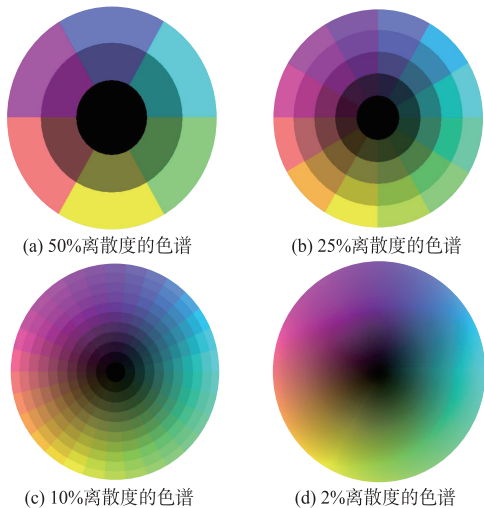


图 7 不同混合比的圆环状混色色谱

Fig. 7 Annular color chromatography with different mixing ratios

### 3.2 基于全色域混色模型的渐变色谱设计

渐变色是指从某一个颜色缓慢过渡到另外一个颜色的过程与现象,它可以是色相渐变、明度渐变、彩度渐变等单要素的变化,也可以是色相、明度、彩度等综合多要素的变化<sup>[11]</sup>。不同颜色之间的渐变也会形成风格迥异的色彩,有些渐变色充满变幻无穷的神秘浪漫气息,而有些则是平淡温婉<sup>[12]</sup>。

选用 3 种彩色纤维与一种无色系(黑)纤维进行混合。如三原色青、品红、黄与黑色四基色纤维进行混合,设四基色纤维的颜色值为  $C_c(0,255,255)$ 、 $C_m(255,0,255)$ 、 $C_y(255,255,0)$ 、 $C_k(0,0,0)$ ,根据图 4 和图 5 所设计的全色域网格化混色方

案,可以构建出四基色混色矩形和圆环形色谱,具体如图 8 所示。

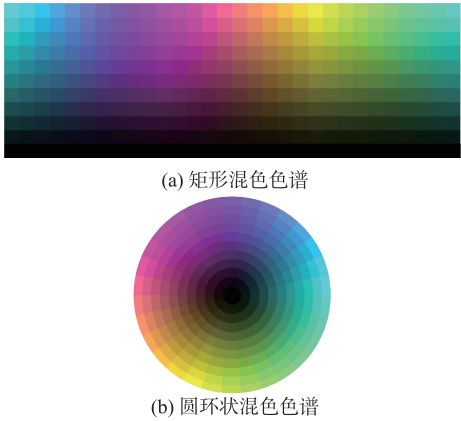


图 8 四基色混色矩形和圆环形色谱

Fig. 8 Four primary color mixed rectangle and ring chromatography

**3.2.1 色相梯度渐变色谱设计** 互补色形成的渐变色色彩更加丰富,同样色调跨度跳跃更大,会给人一种新奇、动感、活泼的感觉。在实际运用中更加广泛,可以在对比度很强的两个场景中实现过渡,如冷暖交替的情景中,或在两个色彩对比度过强时,运用渐变色进行调节以降低画面色调的跨度。

等明度的色相渐变路径可基于图 3 的全色域网格化混色模型进行如下设计

$$C_{i,1} - C_{i,2} - \dots - C_{i,\delta} - \dots - C_{i,29} - C_{i,30} \circ \quad (28)$$

式中: $i=2,3,\dots,10,11$ ; $\delta$  变量为图 3 网格点矩阵的每一列。

由式(28)可知,可设计出 10 条等明度的色相渐变色谱,每个色谱由 30 个色块组成。当  $i=7,9,11$  时,结合图 8(a) 矩形色谱和图 3 可分别得到等明度的色相渐变色谱,具体如图 9 所示。

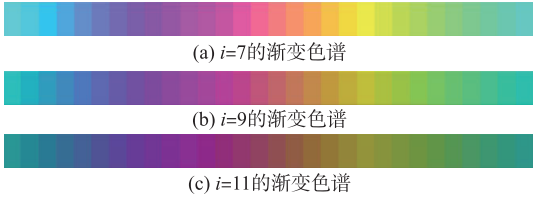


图 9 等明度的色相渐变色谱

Fig. 9 Chromatic gradient chromatography with equal brightness



图 11 等色相的彩度渐变色谱

Fig. 11 Chrominance gradient chromatogram of isochromatic phase

**3.2.4 色相、彩度及明度渐变色谱设计** 色相、彩度及明度通过丰富的色彩渐变使颜色变得更加生

**3.2.2 明度梯度渐变色谱设计** 单一色彩纤维加入黑、白、灰都会带来明度与彩度的变化,加入不同的量可以呈现不同明度的色彩,将其组合后能够形成单色明度渐变的渐变色谱。单色渐变是一种比较稳重的渐变,也是比较保守的渐变,运用单色渐变色谱会给人一种淡雅清新、简约时尚的感觉。

等色相的明度渐变路径可基于图 3 的全色域网格化混色模型进行如下设计

$$C_{1,\delta} - C_{2,\delta} - \dots - C_{10,\delta} - C_{11,\delta} \circ \quad (29)$$

式中: $\delta=1,11,21$ 。

由式(29)可知,共有 3 条渐变色谱,每个色谱由 11 个色块组成。当  $\delta=1,11,21$  时,结合图 8(a) 矩形色谱和图 3 可分别得到等色相的明度渐变色谱,具体如图 10 所示。



图 10 等色相的明度渐变色谱

Fig. 10 Gradient brightness chromatogram of isochromatic phase

**3.2.3 彩度梯度渐变色谱设计** 在两色混色的色谱中保持色相不变找到彩度和明度都不同的一组色块,可形成彩度柔和渐变的色谱。高彩度和低彩度色彩之间的渐变,不仅会使色彩的过渡产生柔和的效果,而且会有一定的层次感,让整体色彩更加丰富。不同彩度色彩的渐变会非常融洽、自然,视觉上使人感到十分舒适。

等色相的彩度渐变路径可基于图 3 的全色域网格化混色模型进行如下设计

$$C_{1,\delta} - C_{2,\delta} - \dots - C_{10,\delta} - C_{11,\delta} \circ \quad (30)$$

式中: $\delta$  的取值范围为  $1 \sim 30$ ,但当  $\delta=1,11,21$  时,渐变色为明度的变化,所以排除  $1,11,21$ 。

由式(30)得到 27 条渐变色谱,每个色谱由 11 个色块组成,可根据渐变色色彩需求进行选择。当  $\delta=3,13,23$  时,结合图 8(a) 矩形色谱和图 3 可分别得到等色相的彩度渐变色谱,具体如图 11 所示。

动、梦幻,视觉设计感受更加舒服,设计层次更加完整。对称是最基本的美学构成法则,能够给人带来

秩序感和美感。文中将变幻丰富的渐变色与对称结构相结合,设计出一种对称循环渐变色彩。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{A: } C_{11,1} - C_{10,2} - C_{9,3} - C_{8,4} - C_{7,5} - C_{6,6} - C_{7,7} - C_{8,8} - C_{9,9} - C_{10,10} - C_{11,11} - C_{10,12} - C_{9,13} - C_{8,14} - \\ C_{7,15} - C_{6,16} - C_{7,17} - C_{8,19} - C_{9,19} - C_{10,20} - C_{11,21} - C_{10,22} - C_{9,23} - C_{8,24} - C_{7,25} - C_{6,26} - C_{7,27} - C_{8,28} - \\ C_{9,29} - C_{10,30}, \\ \text{B: } C_{11,3} - C_{10,4} - C_{9,5} - C_{8,6} - C_{7,7} - C_{6,8} - C_{7,9} - C_{8,10} - C_{9,11} - C_{10,12} - C_{11,13} - C_{10,14} - C_{9,15} - C_{8,16} - \\ C_{7,17} - C_{6,18} - C_{7,19} - C_{8,20} - C_{9,21} - C_{10,22} - C_{11,23} - C_{10,24} - C_{9,25} - C_{8,26} - C_{7,27} - C_{6,28} - C_{7,29} - C_{8,30} - \\ C_{9,1} - C_{10,2}, \\ \text{C: } C_{11,6} - C_{10,7} - C_{9,8} - C_{8,9} - C_{7,10} - C_{6,11} - C_{7,12} - C_{8,13} - C_{9,14} - C_{10,15} - C_{11,16} - C_{10,17} - C_{9,18} - C_{8,19} - \\ C_{7,20} - C_{6,21} - C_{7,22} - C_{8,23} - C_{9,24} - C_{10,25} - C_{11,26} - C_{10,27} - C_{9,28} - C_{8,29} - C_{7,30} - C_{6,1} - C_{7,2} - C_{8,3} - \\ C_{9,4} - C_{10,5} \circ \end{array} \right. \quad (31)$$

式中:A,B,C 分别为渐变色色谱循环路径 A 模式、B 模式、C 模式。

由公式(31)得到 3 条(A,B,C)色相、彩度及明度均有变化的循环渐变色谱,循环渐变色 A 从青色,即图 3 中第 11 行第 1 列开始从左至右以折线形式向另一种颜色渐变,经过 3 种颜色渐变完成一个

色相、彩度及明度的渐变路径可基于图 3 的全色域网格化混色模型设计为

循环,每个循环色谱由 30 个色块组成。循环渐变色 B 从图 3 中第 11 行第 3 列开始,每个循环色谱由 30 个色块组成。循环渐变色 C 从图 3 中第 11 行第 6 列开始,每个循环色谱由 30 个色块组成。最后结合图 8(a)矩形色谱可得对应的循环渐变色谱,具体如图 12 所示。



图 12 循环渐变色谱  
Fig. 12 Cyclic gradient chromatogram

### 3.3 彩色纤维的应用场景

伴随人们对时尚呈现出多元化的需求态势,彩色纤维在纺织行业里的运用愈发广泛,尤其在服装设计的范畴,彩色纤维可被用于织造各式各样的时尚服装,彰显出独特的色彩与风格,深受年轻人群的青睐。诸如在运动装备(由运动服装、运动鞋、运动器材的编织物等)中,彩色纤维的运用让其更具个性特征和辨识度。

渐变色是彩色纤维应用于服装设计时的一大特色,但渐变色服装对纱线色彩搭配的要求较为严格,需根据服装风格和功能来选择合适的纤维,如棉、羊毛、化纤等,再根据设计理念选择纱线的色彩搭配。结合文中构建的彩色纤维数字化混色模型,可以根据可视化色谱更加便捷地选择所需纱线色彩,同时可获取所选纱线色彩的各基色纤维的混合比,从而提高彩色纤维的混色效率。渐变纤维色彩设计思路:①选择彩色纤维数字化模型中所需色谱;②选择对应的网格点及网格点的坐标;③根据网格点坐标计算所用基色纤维的混合比;④根据纤维用量得出各基色纤维的质量。

选择 4 种基色纤维,依据彩色纤维数字化混色模型得出彩色纱线的混纺比数据,进行纱线的纺制,根据设计风格织制面料,最后进行成衣的设计

与制作,纤维—纱线—面料—服装设计流程如图 13 所示。

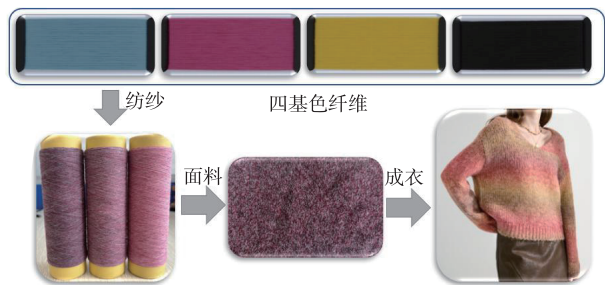


图 13 纤维—纱线—面料—服装设计流程  
Fig. 13 Schematic diagram of the fiber—yarn—fabric—clothing design process

## 4 结 语

通过对青、品红、黄、灰四基色纤维进行三元双重耦合混色,得到青—品红—灰、品红—黄—灰、黄—青—灰 3 组混合样,并将混合样的质量进行数字化划分,得到了质量可调控的有序矩阵。根据混合比与纤维颜色值的关系式得出混合彩色纤维的色彩值,以及各混合样的数字化颜色值矩阵,从而通过调控混合样中各基色质量的占比,达到对混色彩色纤维色相、明度及彩度变化的控制;并通过有序的数字化颜色矩阵,设计出全色域矩形混色模型及其色谱。

为方便色彩的调控,将矩形色谱转化为环状色谱。

基于四基色网格化混色色谱,是通过改变基色纤维的质量离散程度,得到不同网格点数的网格化混色色谱,其为以后精准配色提供了可行性方案。将构建的全色域混色色谱应用到渐变色谱及时尚化服装的色彩设计当中,不仅得到了色相、明度或彩度梯度变化及多色循环渐变的色谱,还为服装面料的设计提供了更多的设计思路,有效提高渐变色设计的灵活性与多样性。

参考文献:

[ 1 ] 薛元,崔鹏,孙显强,等. 一种彩色纤维四维混色空间网格模型及网格点阵列颜色矩阵的构建方法及应用: 202011372158.3 [ P ]. 2022-02-01.

[ 2 ] 李娟娟,薛元,徐志武,等. 基于四基色的全色域混色模型构建及彩色纱纺制[ J ]. 现代纺织技术, 2023, 31 ( 6 ): 117 - 129.

LI Juanjuan, XUE Yuan, XU Zhiwu, et al. Construction of a full color gamut mixing model based on four primary colors and color yarn spinning [ J ]. Advanced Textile Technology, 2023, 31 ( 6 ): 117 - 129. ( in Chinese )

[ 3 ] 薛元,崔鹏,孙显强,等. 彩纤三维混色空间网格模型与网格点阵列色谱构建及应用:202011373563.7 [ P ]. 2021-08-10.

[ 4 ] 张震,薛元,徐志武,等. 数码纺循环渐变色纱设计及渐变色织物的织制[ J ]. 毛纺科技, 2020, 48 ( 11 ): 12-18.

ZHANG Zhen, XUE Yuan, XU Zhiwu, et al. Design of digital spinning cycle gradient yarn and spinning of gradient fabric [ J ]. Wool Textile Journal, 2020, 48 ( 11 ): 12-18. ( in Chinese )

[ 5 ] 张震,崔鹏,薛元,等. 彩色纤维数字化混色构建的渐变色谱及渐变色纱线的纺制实践[ J ]. 纺织导报, 2019 ( 10 ): 60-64.

ZHANG Zhen, CUI Peng, XUE Yuan, et al. Gradient chromatography constructed by digital color mixing of colored fibers and spun practice of related gradient yarns [ J ]. China Textile Leader, 2019 ( 10 ): 60-64. ( in Chinese )

[ 6 ] 汪燕燕,薛元,陈宥融,等. 面向全色域转杯纺纱的 Kubelka - Munk 双常数理论模型构建及颜色预测[ J ].

现代纺织技术, 2024, 32 ( 3 ): 1 - 13.

WANG Yanyan, XUE Yuan, CHEN Yourong, et al. Kubelka - Munk dual constant theory for the construction of full color gamut rotor spinning and color prediction [ J ]. Advanced Textile Technology, 2024, 32 ( 3 ): 1 - 13. ( in Chinese )

[ 7 ] 顾燕,薛元,高卫东,等. 采用三通道数码纺的色彩渐变纱性能[ J ]. 纺织学报, 2018, 39 ( 2 ): 62-67.

GU Yan, XUE Yuan, GAO Weidong, et al. Analysis on properties of gradient yarns spun by three-channel digital ring spinning [ J ]. Journal of Textile Research, 2018, 39 ( 2 ): 62-67. ( in Chinese )

[ 8 ] 刘曰兴,薛元,王立强,等. 一种多维度网格化染液混配的全色域颜色模型及其色谱构建方法: 202211075972.8 [ P ]. 2022-12-13.

[ 9 ] 刘曰兴,薛元,王立强,等. 多维度耦合混色模型与渐变色谱矩阵算法构建应用: 202011594598.3 [ P ]. 2022-12-13.

[ 10 ] 刘曰兴,薛元,赵义斌,等. 多维度叠加混色模型与渐变色谱矩阵算法构建应用: 202011594583.7 [ P ]. 2021-04-30.

[ 11 ] ZHU W S, XUE Y, XU Z W, et al. Symmetrical circulation gradient color system construction and gradient color yarn spun by a three-channel numerical control spinning system [ J ]. Textile Research Journal, 2022, 92 ( 11 ): 2046-2060.

[ 12 ] SUN X Q, XUE Y, CUI P, et al. Serialized gradient chromatography for the digital blending of colored fibers and spinning of gradient colored yarn [ J ]. Textile Research Journal, 2022, 92 ( 1/2 ): 43-58.

[ 13 ] KIRILLOVA N, GRAUER-GRAY J, HARTEMINK A, et al. New perspectives to use Munsell color charts with electronic devices [ J ]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155 ( 10 ): 378-385.

[ 14 ] 湛启鑫,薛元,许仲哲,等. 三原色染液数字化配色色立体的构建及应用[ J ]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49 ( 5 ): 145-154.

CHEN Qixin, XUE Yuan, XU Zhongzhe, et al. Construction and application of three primary color liquid digital color stereo [ J ]. Journal of Donghua University ( Natural Science ), 2023, 49 ( 5 ): 145-154. ( in Chinese )

( 责任编辑:张 雪 )