

面向光源类型检测的同色异谱对的构建方法

谢雯, 陈丹青, 万晓霞*

武汉大学印刷与包装系, 湖北 武汉 430072

摘要 提出了一种用于光源类型检测的同色异谱对的构建方法, 实现了对光源类型的快速有效判定。在目标光源下, 利用 R 矩阵理论从 Standard Object Colour Spectra Database 中分解出同色异谱黑光谱集; 将同色异谱黑与任意目标样本光谱相加, 获得目标样本的同色异谱样本集; 去除样本集中光谱存在负值的样本; 以一般同色异谱指数作为评价指标, 选择目标样本同色异谱指数最大的样本, 完成同色异谱对的构建。选取 4 种常见光源, 以 ColorChecker 色卡为目标样本, 利用上述方法构建同色异谱对。通过计算同色异谱对在不同光源下的色差值, 对其在光源类型判定方面的有效性进行验证。实验结果表明: 该方法构建的同色异谱对在非目标光源下具有人眼可辨别的显著色差水平, 能够有效地对目标光源的类型进行判定。

关键词 光谱学; 光源类型检测; R 矩阵理论; 同色异谱对; 一般同色异谱指数

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.223004

Construction Method of Metameric Pairs for Illuminant Detection

Xie Wen, Chen Danqing, Wan Xiaoxia*

School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract A method is proposed to construct metameric pairs for illuminant detection. The proposed method allows the quick and effective determination of the illuminant type. According to this method, a metameric black spectrum set is initially decomposed from the Standard Object Colour Spectra Database under the target illuminant based on the matrix R theory. Subsequently, a metameric sample set of the target sample is obtained by adding a metameric black to any target sample. After eliminating the samples that exhibit negative spectra, the sample with the largest metamerism index is selected to construct a metameric pair, with the general metamerism index as an evaluation index. Further, the proposed method is used to construct metameric pairs under four standard illuminants. The validity of the proposed method can be verified by calculating the color-difference value of the metameric pairs under different illuminants. The experimental results demonstrate that the metameric pairs exhibit a significant color-difference level under non-target illuminants and they can effectively determine the target illuminant type.

Key words spectroscopy; illuminant detection; matrix R theory; metameric pairs; general metamerism index

OCIS codes 300.6170; 330.1690; 330.1715; 330.1720

1 引言

光源对色彩的视觉感知具有重要影响, 合适的光源是获得正确视觉评价的基础。在颜色复制过程中, 颜色准确性评价需要在统一的标准光源下进行, 避免由环境光源不标准或不一致而导致的颜色评价偏差。目前, 印刷、包装、纺织等工业领域均使用国际照明委员会(CIE)规定的标准光

源进行颜色评价和色彩管理。然而, 标准光源在长期使用后会因光衰效应^[1]而发生色温、显色性衰减, 从而影响评价结果的准确性。因此, 光源类型的检测对于颜色的正确评价和实际生产中的质量控制具有重要意义。

传统的光源类型判定利用光谱辐射计或分光辐射计测量待测光源的光谱功率分布(SPD)^[2], 在此基础上计算光源的色温和显色指数等参数。然

收稿日期: 2019-04-29; 修回日期: 2019-05-10; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61275172, 61575147)、国家重点基础研究发展计划(2012CB725302)

* E-mail: wan@whu.edu.cn

而,这些测量仪器价格昂贵,操作复杂,并且测量时间长,不利于光源类型的即时检测。若将同色异谱现象应用于光源检测,根据同色异谱色只在特定光源下匹配的特性,针对标准光源构建同色异谱对,通过观察同色异谱对在待测光源下是否匹配,就能够快速地对光源进行检测,从而判断当前环境能否正确评价色彩。目前,国外已研制出用于光源类型检测的同色异谱指示贴,并已商业销售,但是这些产品只针对 D50 和 D65 两种光源,并且价格昂贵;而国内在这方面的研究并不充分,市面上还没有自主研发的此类产品出现。总体而言,光源类型检测领域缺乏一种通用、便捷、易获取的评价方法和标准。

为提高光源检测的科学性和有效性,在实际应用中需要使用同色异谱程度较大的同色异谱对,它能随光源的改变而呈现显著的颜色失配,便于通过目视评价判断光源的类型。然而,这样的同色异谱对在自然场景中并不常见^[3-4],需要通过特定的方法进行构建。20 世纪 50 年代, Wyszecki^[5] 提出同色异谱黑理论,在此基础上,国内外专家学者提出利用数值方法进行同色异谱对的构建^[6-11],但是这些方法均没有考虑生成的同色异谱色与目标颜色间同色异谱程度大小的问题。

针对现有方法的不足,本文提出了一种面向光源类型检测的同色异谱对构建方法。针对任意目标光源和目标颜色,基于 \mathbf{R} 矩阵理论生成目标颜色的同色异谱集;以一般同色异谱指数为评价指标,筛选出与目标颜色一般同色异谱指数最大的样本,完成同色异谱对的构建。新方法构建的同色异谱对在目标光源下呈现颜色匹配状态,当光源改变时呈现出视觉可辨别的显著色差,可实现对光源类型的快速、有效判定,为光源类型的检测和判别提供了科学支持。

2 理论基础

2.1 \mathbf{R} 矩阵理论

\mathbf{R} 矩阵理论^[12-13]是 Cohen 和 Kappauf 在同色异谱黑理论^[5]的基础上提出的实现光谱分解的数学方法,具体原理如下:

用 \mathbf{A} 矩阵表示特定光源和观察者三刺激值的组合^[14],即

$$\mathbf{A} = k\mathbf{E}\mathbf{V}, \quad (1)$$

式中: k 为调整因子; \mathbf{E} 为光源的相对光谱功率分布矩阵; \mathbf{V} 为标准观察者匹配函数矩阵。那么 \mathbf{R} 矩阵

可由 \mathbf{A} 矩阵通过 $\mathbf{R} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T$ 计算得到。

通过 \mathbf{R} 矩阵可以将任意颜色刺激的光谱分解为基本颜色光谱和同色异谱黑光谱。若已知颜色光谱反射率为 \mathbf{N} ,则基本颜色光谱 \mathbf{N}^* 为 \mathbf{N} 在 \mathbf{R} 上的正交投影,同色异谱黑光谱 \mathbf{K} 为颜色光谱与基本颜色光谱的残差。

$$\mathbf{N}^* = \mathbf{R} \times \mathbf{N}, \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{N} - \mathbf{N}^* = (\mathbf{I} - \mathbf{R}) \times \mathbf{N}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{I} 代表单位矩阵。

\mathbf{R} 矩阵理论表明,任何一对同色异谱色均由共同的基本颜色刺激和不同的同色异谱黑构成^[15]。若将 \mathbf{N} 的基本颜色光谱 \mathbf{N}^* 与不同的同色异谱黑 \mathbf{K}' 进行组合,就可以获得颜色光谱 \mathbf{N} 的同色异谱光谱 \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \mathbf{N}^* + \mathbf{K}'. \quad (4)$$

2.2 一般同色异谱指数

同色异谱指数是对同色异谱程度的定量描述,同色异谱指数越大,光源改变引起的颜色失配程度越大。同色异谱指数可分为特殊同色异谱指数 (SM)^[16] 和一般同色异谱指数 (GM)^[17]。其中,特殊同色异谱指数以同色异谱对在两种不同光源下的色差来衡量同色异谱程度,计算结果具有光源依赖性;一般同色异谱指数基于一对同色异谱色的光谱差异来衡量同色异谱程度,计算过程独立于光源,其计算原理如下所述:

首先,计算可见光谱范围内的每个波段下任意一对同色异谱色 \mathbf{N} 和 \mathbf{M} 的光谱反射率差值,计算公式为

$$\Delta\beta(\lambda) = \|\mathbf{M}(\lambda) - \mathbf{N}(\lambda)\|, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}(\lambda)$ 为 \mathbf{M} 在可见光谱范围内的光谱反射率; $\mathbf{N}(\lambda)$ 为 \mathbf{N} 在可见光谱范围内的光谱反射率; λ 为可见光波长。然后计算一般同色异谱指数 i_{GM} ,计算公式为

$$i_{GM} = \sum_{\lambda} \omega(\lambda) \times \Delta\beta(\lambda), \quad (6)$$

$$\omega(\lambda) = \sqrt{\left[\frac{dL}{d\beta(\lambda)}\right]^2 + \left[\frac{da}{d\beta(\lambda)}\right]^2 + \left[\frac{db}{d\beta(\lambda)}\right]^2}, \quad (7)$$

式中: $\omega(\lambda)$ 为权重函数; $\frac{dL}{d\beta(\lambda)}$ 、 $\frac{da}{d\beta(\lambda)}$ 、 $\frac{db}{d\beta(\lambda)}$ 为同色异谱色的 L 、 a 、 b 值关于 $\beta(\lambda)$ 的导数,其中 L 为明度指数, a 、 b 为色品指数。根据链式法则可以计算得到

$$\frac{dL}{d\beta(\lambda)} = 116 \times k \times S(\lambda) \times y(\lambda) \times \frac{d}{dY} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right), \quad (8)$$

$$\frac{da}{d\beta(\lambda)} = 500 \times k \times S(\lambda) \times$$

$$\left[x(\lambda) \times \frac{d}{dX} f\left(\frac{X}{X_n}\right) - y(\lambda) \times \frac{d}{dY} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right], \quad (9)$$

$$\frac{db}{d\beta(\lambda)} = 200 \times k \times S(\lambda) \times$$

$$\left[y(\lambda) \times \frac{d}{dY} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - z(\lambda) \times \frac{d}{dZ} f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right], \quad (10)$$

式中: S 为标准照明体在可见光范围的光谱功率分布; x, y, z 为标准观察者三刺激值; X, Y, Z 为颜色的三刺激值; X_n, Y_n, Z_n 为标准照明体照射到完全漫反射体表面的三刺激值; $f(\cdot)$ 为判断函数。详细计算过程参见文献[17]。

3 基于 R 矩阵理论的同色异谱对的构建方法

基于 R 矩阵理论的同色异谱对构建方法, 针对确定的目标光源和观察者, 首先利用 R 矩阵实现同色异谱集的构建, 然后以一般同色异谱指数为评价指标, 筛选出最佳的同色异谱对。具体的构建步骤如下所述:

1) 确定构建同色异谱对的目标光源和观察者, 利用 $A = kEV$ 和 $R = A(A^T A)^{-1} A^T$ 计算得到目标光源的 R 矩阵。

2) 选取 Standard Object Color Spectra Database(SOCS 数据库)作为提取同色异谱黑的数据来源, 利用(3)式从 SOCS 数据库中分解出同色异谱黑光谱数据集 N_k 。ISO/TR 16066: 2003 标准^[18]将 SOCS 数据库定为评估图像输入设备色彩再现能力的颜色标准, 共包含 53486 条典型物体色彩光谱反射率数据。因此, N_k 中包含 53486 个同色异谱黑光谱数据。

3) 确定目标颜色样本, 利用 R 矩阵通过(2)式分解出目标颜色的基本颜色光谱刺激。

4) 利用(4)式, 将 SOCS 数据库中样本的同色异谱黑依次与目标颜色的基本颜色光谱刺激相加, 获得目标颜色的同色异谱集 N_m , 其中包含 53486 个目标颜色的同色异谱色。

5) 剔除同色异谱集中光谱反射率存在负值的同色异谱样本。

6) 利用(5)~(10)式, 依次计算同色异谱集中剩余样本与目标颜色的一般同色异谱指数, 选择最大 GM 对应的同色异谱样本。

7) 完成同色异谱对的构建。
构建方法流程图如图 1 所示。

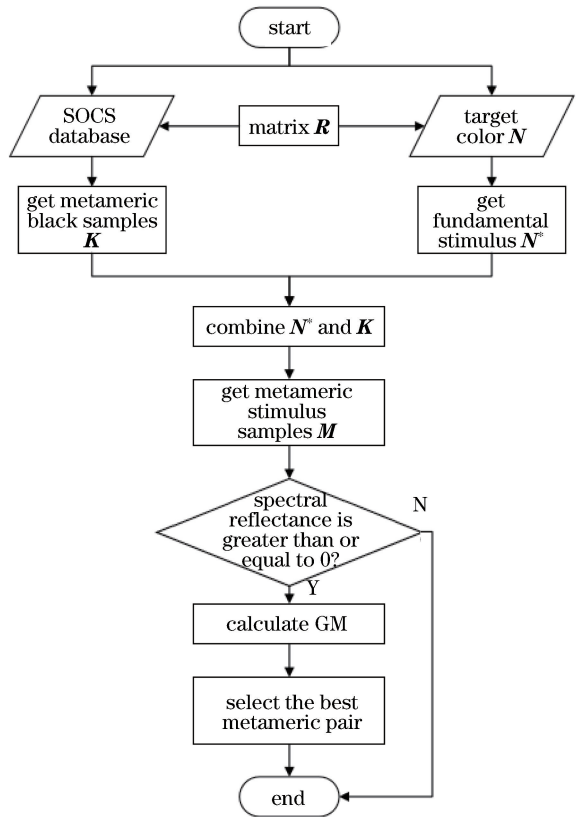


图 1 基于 R 矩阵理论的同色异谱对的构建方法流程

Fig. 1 Flow chart of construction method of metameric pairs based on matrix R theory

4 实验与结果分析

同色异谱现象出现的概率及失配程度的大小与光源的种类密切相关^[19-20]。为验证方法的有效性, 根据 CIE 第 15 号出版物^[16]中推荐的用于评价同色异谱程度的光源, 本文以 D65、D50、A 和 F11 这 4 种常见标准光源(光源相对光谱分布如图 2 所示)和 CIE 1964 标准观察者为, 进行同色异谱对的构建。其他光源构建同色异谱对的方法与之类似, 只需更改(1)式中的光源数据即可。选取 ColorChecker 色卡中的第一个颜色作为目标样本(记为 N), 用所提方法构建 N 在 4 种目标光源下的同色异谱对。通过计算同色异谱对在不同光源下的色差和仿真渲染视觉比对的方式, 对本文方法构建的同色异谱对在光源类型检测方面的有效性进行验证。本文使用的波长范围为可见光谱范围(400~700 nm), 取样间隔为 10 nm。

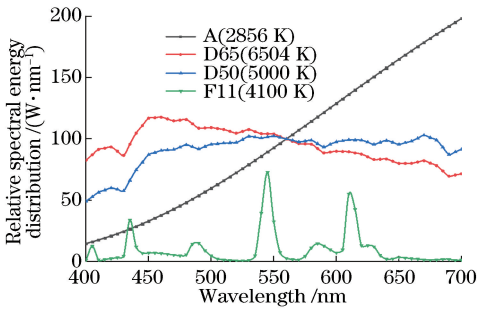


图2 4种测试光源的相对光谱能量分布曲线
Fig. 2 Relative spectral energy distribution curves of four test illuminates

将以标准光源 D65、D50、A 和 F11 为目标光源生成的同色异谱样本分别记为 M_{65} 、 M_{50} 、 M_A 及 M_{11} ，该方法构建的 4 对同色异谱色 $N-M_{65}$ （针对 D65）、 $N-M_{50}$ （针对 D50）、 $N-M_A$ （针对 A）、 $N-M_{11}$ （针对 F11）的一般同色异谱指数分别为 67.77、

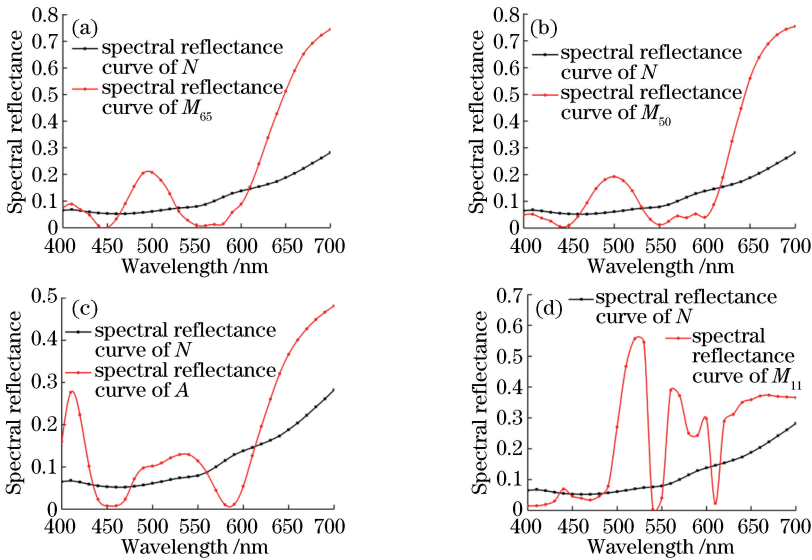


图3 4对同色异谱色在可见光范围内的光谱反射率曲线。(a) $N-M_{65}$ ；(b) $N-M_{50}$ ；(c) $N-M_A$ ；(d) $N-M_{11}$
Fig. 3 Spectral reflectance curves of four metameric pairs in visible range. (a) $N-M_{65}$ ；(b) $N-M_{50}$ ；(c) $N-M_A$ ；(d) $N-M_{11}$

表 1 是 N 与 M_{65} 、 M_{50} 、 M_A 及 M_{11} 在 4 种测试光源下的 L 、 a 、 b 值。由表 1 可知，4 对同色异谱色在对应的目标光源下均具有相同的 L 、 a 、 b 值，在非目标光源下的 L 、 a 、 b 值均存在一定差异。以同色异谱对 $N-M_{65}$ 为例， N 和 M_{65} 在目标光源 D65 下的 L 、 a 、 b 值相同，分别为 36.80、13.83、14.66，即呈现相同的色貌，同色异谱对匹配；在非目标光源（D50、A 和 F11）下，由于 N 与 M_{65} 的 L 、 a 、 b 值均不同，同色异谱对呈失配状态。

根据表 1，同色异谱色的 L 、 a 、 b 值在非目标光源下的变化趋势均不相同，这是由颜色的光谱特性

71.61、99.12、1051.60，同色异谱程度很大。图 3 展示了 4 对同色异谱色的光谱反射率曲线。

根据 Ohta 等^[8,21]的研究，一对同色异谱色的光谱反射率曲线在可见光谱内至少相交三次。通常情况下，两颜色光谱曲线的交点越多，能使其呈现匹配状态的观察条件就越多。根据图 3 可知， N 与 M_{65} 、 M_{50} 、 M_A 的交点分别为 4、3、4 个，交点个数很少，并且光谱反射率曲线几乎没有重合的部分，因此，除目标光源外，同色异谱色难以呈现颜色匹配状态。 N 与 M_{11} 虽有 7 个交点，但图 3(d) 可以直观地反映出二者的光谱反射率曲线不仅在形状上差异巨大，而且在 500~600 nm 内的光谱差异明显大于其他三组同色异谱对。人眼视觉特性表明，人眼对光谱中间段更为敏感^[15]，因此，同色异谱对 $N-M_{11}$ 容易在非目标光源下呈现显著的颜色差异。

和光源的能量分布共同决定的，但 N 的 L 、 a 、 b 值受光源变化的影响明显小于其同色异谱色。这是由于 N 的光谱反射率曲线相对于其他四个颜色更加平缓，总体呈缓慢上升的趋势，这样的光谱特性导致 N 对光源变化的敏感程度较低，在不同光源下， N 的色貌虽会发生一定的变化，但改变程度并不显著。而本文方法构建的同色异谱色（ M_{65} 、 M_{50} 、 M_A 及 M_{11} ），其光谱曲线在不同波长处具有明显的波峰和波谷，对特定波长的光具有强烈的反射和吸收作用，对不同入射光的反应比 N 更加灵敏，因此在不同光源下，其 L 、 a 、 b 值的变化更为显著。同时，在 4 个

表 1 4 对同色异谱色在标准光源 D65、D50、A 和 F11 下的 L 、 a 、 b 值

Table 1 L , a , and b values of four metameric pairs under illuminants of D65, D50, A, and F11

Standard illuminant	Parameter	N	M_{65}	M_{50}	M_A	M_{11}
D65	L	36.80	36.80	36.97	37.65	58.67
	a	13.83	13.83	8.62	5.19	-20.38
	b	14.66	14.66	16.55	14.93	52.18
D50	L	37.38	37.28	37.38	38.06	58.85
	a	15.24	20.27	15.24	8.20	-16.02
	b	15.74	14.34	15.74	16.97	51.13
A	L	39.28	39.45	39.24	39.28	58.99
	a	15.79	31.91	27.70	15.79	7.30
	b	18.97	14.50	15.28	18.97	67.43
F11	L	38.20	33.76	30.90	39.33	38.20
	a	15.55	28.03	19.41	2.61	15.55
	b	23.00	7.61	13.70	30.09	23.00

同色异谱色中, M_{11} 的光谱曲线最为曲折, 这也导致其 L 、 a 、 b 值随光源的变化程度明显大于其他颜色。总的来说, 由于光谱反射率的巨大差异, 构建的同色异谱对在非目标光源下, 色度值变化程度差异较大, 将导致非目标光源下的显著色差。

为了评价构建的同色异谱对在非目标光源下的颜色失配程度, 分别使用 CIE76、CIE94、CIEDECMC、CIEDE2000 4 种色差公式, 计算 4 对同色异谱色在 4

种光源下的色差, 色差值分别用 ΔE_{76} 、 ΔE_{94} 、 ΔE_{CMC} 、 ΔE_{2000} 表示, 计算结果见表 2。根据表 2, 4 对同色异谱色在目标光源下的色差均为 0; 在 3 种非目标光源下, 用 4 种色差公式计算的色差值均超出人眼可察觉色差阈值^[22-26], 具有显著色差水平。本方法构建的同色异谱对能够随光源改变呈现人眼可感知的颜色失配, 可通过观察同色异谱颜色匹配与否, 判断环境光源是否为标准的目标光源。

表 2 4 对同色异谱色在标准光源 D65、D50、A 和 F11 下的色差

Table 2 Color differences among four metameric pairs under illuminants of D65, D50, A, and F11

Standard illuminant	Color difference	$N-M_{65}$	$N-M_{50}$	$N-M_A$	$N-M_{11}$
D65	ΔE_{76}	0	5.54	8.68	55.29
	ΔE_{94}	0	4.17	6.23	39.93
	ΔE_{CMC}	0	6.69	9.68	55.10
	ΔE_{2000}	0	4.91	7.99	37.23
D50	ΔE_{76}	5.22	0	7.180	51.87
	ΔE_{94}	3.57	0	5.15	37.55
	ΔE_{CMC}	5.39	0	7.88	50.93
	ΔE_{2000}	3.60	0	6.11	36.00
A	ΔE_{76}	16.73	12.46	0	53.01
	ΔE_{94}	10.77	8.24	0	33.23
	ΔE_{CMC}	16.57	12.85	0	42.13
	ΔE_{2000}	9.66	7.67	0	28.94
F11	ΔE_{76}	14.30	12.44	14.80	0
	ΔE_{94}	10.16	9.96	10.39	0
	ΔE_{CMC}	16.27	13.91	17.91	0
	ΔE_{2000}	9.38	9.00	12.04	0

根据表 2 可知: 同色异谱对 $N-M_{11}$ 在非目标光源下的色差明显大于其他 3 对同色异谱色, $N-M_{50}$ 、 $N-M_A$ 在 F11 下的色差最大, $N-M_{65}$ 在 F11 下的色差虽略小于 A 光源, 但也明显大于 D50, 这种现象可能与 F11 的光谱能量分布特性有关。F11 为三基

色荧光光源, 其光谱在 435, 540, 610 nm 处存在 3 个锐峰, 其余波长处的光谱辐射能量很小, 光谱功率分布曲线不连续, 以 F11 为照明光源可能导致部分颜色的丢失。因此, 在有 F11 参与的光源变换中, 同色异谱对的失配程度较大。Akbarinia 等^[20] 也发

现了在窄带光源下更容易观测到同色异谱现象。

为了更直观地反映同色异谱对在不同光源下的颜色变化程度,根据表 1 中的 L 、 a 、 b 值,对 N - M_{65} 在 4 种光源下的颜色进行仿真渲染,结果见图 4。

由图 4 可见,在目标光源 D65 下,同色异谱对呈颜色匹配状态,但在另外 3 种非目标光源下,同色异谱对具有一定的颜色差异。对于 N ,其在不同光源下的颜色差异程度明显小于 M_{65} ,这是由其光谱特性决定的;对于 M_{65} ,其在 A 和 F11 下的颜色模拟图比在 D65 和 D50 下偏红。综合分析颜色的光

谱反射率曲线和光源的辐射能量分布可以发现, M_{65} 在 600~700 nm 波段的光谱反射率明显大于 N ,即 M_{65} 在红光区域的反射率很高,而 A 和 F11 的色温比 D65 和 D50 低,颜色偏暖,特别是光源 A,其在红光区域的辐射能量最强,导致 M_{65} 在光源 A 和 F11 下偏红。研究表明,颜色的光谱刺激及照明光源的光谱分布和色温不同会对观察者的颜色感知产生很大影响^[26-27]。因此,光源和颜色光谱特性的共同作用导致同色异谱对在不同光源下呈现出可辨别的显著色差。

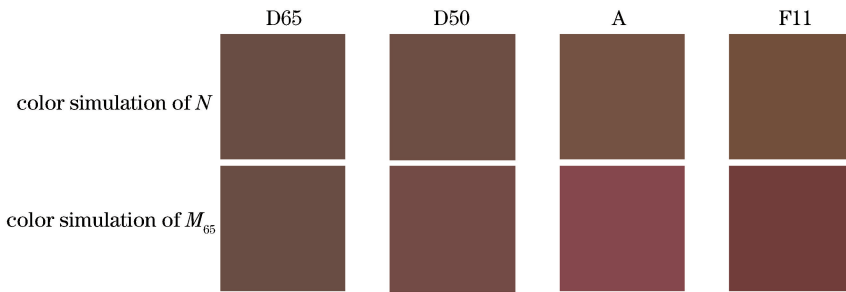


图 4 4 种测试光源下同色异谱对 N - M_{65} 的颜色模拟图

Fig. 4 Color simulation of metamer pairs N - M_{65} under four test illuminants

5 结 论

本文基于 R 矩阵理论和一般同色异谱指数,提出了一种用于光源类型检测的同色异谱对构建方法。4 种标准光源下的仿真实验表明,本方法构建的同色异谱对在目标光源下呈现相同的颜色,在非目标光源下具有视觉可辨别的显著色差。若将构建的同色异谱对置于待检测光源环境中,通过观察其颜色是否匹配,就能够快速有效地对光源类型进行检测与判断。本方法实施起来很便捷,通过改变光源数据即可针对任意目标光源构建同色异谱对,而且避免了现有方法在构建同色异谱对时对测试光源的依赖性,有助于提高光源检测的效率。后续将针对构建的同色异谱对的精确打印输出开展具体的方法研究。

参 考 文 献

- [1] Yan B X, Wang Y W, Qi Y, *et al.* Study of color proportion and color temperature in laser display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401004. 颜博霞, 王延伟, 亓岩, 等. 激光显示光源颜色配比和色温研究[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401004.
- [2] Standardization administration of the people's republic of China. The spectroradiometric measurement of light sources: GB/T 26179-2010[S].

Beijing: Standards Press of China, 2011.

中华人民共和国国家标准化委员会. 光源的光谱辐射度测量: GB/T 26179-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

- [3] Foster D H, Amano K, Nascimento S M C, *et al.* Frequency of metamerism in natural scenes [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(10): 2359-2372.
- [4] Feng G Y, Foster D H. Predicting frequency of metamerism in natural scenes by entropy of colors [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012, 29(2): A200-A208.
- [5] Wyszecki G. Evaluation of metamer colors [J]. Journal of the Optical Society of America, 1958, 48(7): 451-454.
- [6] Takahama K, Nayatani Y. New method for generating metamer stimuli of object colors [J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(12): 1516-1520.
- [7] Ohta N. Generating metamer object colors [J]. Journal of the Optical Society of America, 1975, 65(9): 1081-1082.
- [8] Ohta N, Wyszecki G. Location of the nodes of metamer color stimuli [J]. Color Research & Application, 1977, 2(4): 183-186.
- [9] Schmitt F J M. A method for the treatment of metamerism in colorimetry [J]. Journal of the Optical

- Society of America, 1976, 66(6): 601-608.
- [10] Zoido J M, Carreño F, Bernabeu E. Improved linear programming method to generate metameric spectral distributions[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1938-1943.
- [11] Xia D W, Wang S K, Yan X W, *et al.* The realization of metamerism and its quantitative analysis [J]. *Journal of Textile Research*, 1999, 20(1): 19-21.
夏东伟, 王盛奎, 闫学为, 等. 异谱同色的实现与定量评价[J]. *纺织学报*, 1999, 20(1): 19-21.
- [12] Cohen J B, Kappauf W E. Metameric color stimuli, fundamental metamers, and Wyszecki's metameric blacks [J]. *The American Journal of Psychology*, 1982, 95(4): 537-564.
- [13] Cohen J B, Kappauf W E. Color mixture and fundamental metamers: theory, algebra, geometry, application[J]. *The American Journal of Psychology*, 1985, 98(2): 171-259.
- [14] Zhao Y H, Berns R S. Image-based spectral reflectance reconstruction using the matrix R method [J]. *Color Research & Application*, 2007, 32(5): 343-351.
- [15] He S H, Liu Z, Chen Q. Research of spectral dimension reduction method based on matrix R theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0233001.
何颂华, 刘真, 陈桥. 基于矩阵 R 理论的光谱降维方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0233001.
- [16] International commission on illumination. Colorimetry: CIE 15:2004[S]. 3rd ed. Vienna: CIE Publications, 2004.
- [17] Viggiano J A S. Perception-referenced method for comparison of radiance ratio spectra and its application as an index of metamerism [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4421: 701-704.
- [18] International organization for standardization. Graphic technology--standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS): ISO/TR 16066: 2003 [S]. Geneva: ISO Publications, 2003.
- [19] Zhang X D, Funt B, Mirzaei H. Metamer mismatching in practice versus theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(3): A238-A247.
- [20] Akbarinia A, Gegenfurtner K R. Color metamerism and the structure of illuminant space[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(4): B231-B238.
- [21] Ohta N. Intersections of spectral curves of metameric colors[J]. *Color Research & Application*, 1987, 12(2): 85-87.
- [22] Zhao X P, Phil G. Evaluating acceptability threshold and weighting for color difference on gloss paper reproduction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(9): 814-817.
赵秀萍, Phil G. 彩色印刷复制中色差公式加权系数的计算和可接受阈值的评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(9): 814-817.
- [23] Liu H X, Huang M, Wu B, *et al.* Color difference evaluation for printed images [J]. *Journal of Beijing Institute of Graphic Communication*, 2007, 15(2): 1-4.
刘浩学, 黄敏, 武兵, 等. 彩色印刷图像色差的主观评价[J]. *北京印刷学院学报*, 2007, 15(2): 1-4.
- [24] Huang M, Liao N F, Liu H X, *et al.* Cathode-ray tube color perceptible color difference threshold evaluation in visual color matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 599-603.
黄敏, 廖宁放, 刘浩学, 等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 599-603.
- [25] Huang M, Liu H X, Liao N F. Just-noticeable color difference discrimination threshold using printed samples II: analysis and evaluation of color-difference formulae[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1740-1745.
黄敏, 刘浩学, 廖宁放. 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 II: 色差公式分析与评价[J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1740-1745.
- [26] Huang M, Shi C J, Li Z Y, *et al.* Influences on observers color discrimination with normal color vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0933001.
黄敏, 史春洁, 李泽阳, 等. 色觉正常观察者辨色差影响研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0933001.
- [27] He R L, Huang M, Guo C L, *et al.* Color-difference discrimination between young and old observers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 033301.
何瑞丽, 黄敏, 郭春丽, 等. 年轻和老年观察者的色差分辨差异研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 033301.