

色貌模型的测试实验及其研究进展

孙刘杰, 徐卓

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 介绍了四类色貌模型测试实验方法, 阐述了每类实验的基本原理及常用测试数据, 介绍了每类方法中较有代表性的实验及其结论, 并在此基础上总结了每类实验的优缺点。最后, 分析了色貌模型测试的研究发展方向, 并在此基础上展望了色貌模型的研究方向。

关键词: 色度学; 色貌模型; CIECAM02; 对应色数据

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)23-0150-05

On Performance Test of Color Appearance Models

SUN Liu-jie, XU Zhuo

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The state-of-the-art techniques used in testing color appearance models were introduced, explaining the basic principles of each type and presenting the representative experiments and conclusions, and summarizing their advantages and disadvantages. The development direction of the color appearance model tests was analyzed and the research direction of color appearance model was put forward.

Key words: colorimetry; color appearance model; CIECAM02; corresponding color data

色貌模型是能够实现在不同观察条件下对颜色知觉进行预测的数学模型, 它在许多颜色复制相关的应用中都能起到重要的作用, 更是解决复杂光照条件和观察条件下跨媒体颜色忠实传递的重要手段。自 1982 年 Hunt 提出 Hunt 色貌模型以来, 色貌模型的研究发展迅速, 现今较具有代表性的模型有 Hunt94, Nayatani, RLAB, LLAB, CIECAM97s, CIECAM02 等。但随着应用领域逐渐扩展, 现有色貌模型的不足逐渐体现出来, 对其进行改进使其更满足目前的应用需求成为色貌模型相关研究的重点之一。CIE 于 1995 年即发布 TC1-34 “色貌模型测试技术委员会”^[1], 鼓励研究人员收集大量实验数据对色貌模型进行测试, 验证其性能, 进而促进色貌模型的改善与提升。随后的 20 余年中, 色貌模型的性能测试实验取得长足的进展, 实验结果极大地推进了色貌模型的研究发展。

笔者对色貌模型测试实验进行了总结, 阐述每类实验的原理及常用测试数据, 介绍较有代表性的实验的方法及结论, 分析了各类实验方法的优点与不足,

进而展望了色貌模型测试研究的发展方向。

现有的色貌模型性能测试实验主要可分为以下 4 类^[2]: 定性测试; 使用对应色数据进行测试; 使用量值数据进行测试; 心理物理实验。

1 定性测试

定性实验是最常见的色貌模型测试实验类型, 通常利用表色系统的视觉均匀性对色貌模型进行测试, 说明模型对各种色貌属性及色貌现象能否做出正确均匀的预测。

最早的色貌模型定性测试实验为 1988 年 Nayatani 等人^[3]对自身提出的 Nayatani 色貌模型进行的测试, 实验对 CIE 标准光源 A 下的 Munsell 色块作进行了预测, 将预测结果与 Mori 等人^[4]通过颜色匹配实验获得的 Munsell 色块数据进行比较, 验证了 Nayatani 模型对 Helson-Judd 效应的预测效果优于 von Kries 色适应模型。这一研究方法成为了以后定性测

收稿日期: 2012-08-15

作者简介: 孙刘杰(1965-), 男, 安徽人, 博士, 上海理工大学教授, 主要从事光学信息技术、数字印刷技术和印刷防伪技术的教学和研究。

试色貌模型的主要手段,同时, Munsell 系统、自然色彩系统(NCS)等表色系统则成为了测试色貌模型的重要数据。例如, Fairchild 等人^[5]于 2000 年利用 Munsell 数据对包括 Hunt, Nayatani 和 CIECAM97s 等 8 种色貌模型进行的测试,得出 CIECAM97s 对中性色附近的颜色彩度和视彩度预测过高等结论,该研究结果在 CIECAM02 的提出中起到了重要作用;杨晓莉^[6]等人于 2008 年使用 Munsell 系统验证里 CIECAM02 色空间的均匀性,得出了 CIECAM02 在彩度、色调等方面的预测优于 CIELAB,在明度预测方面则与 CIELAB 效果相似的结论;2010 年使用 Munsell 数据进一步的研究中,则指出 CIELAB 的明度均匀性略优于 CIECAM02^[7]。现今, Munsell 数据常被用于量化彩度和计算饱和度预测情况;NCS 系统则常被用于作为计算偏心因子 e 和色相角 h 的参考数据。国内,廉玉生^[8-9]等人则于 2007 年使用中国颜色体系数据对包括 CIECAM97s, CIECAM02 在内的 8 种色貌模型进行

了测试,验证了中国颜色体系数据的性能仅次于 Munsell 数据,同样可作为色貌模型在彩度、色相等方面的定性测试数据。

定性测试的优点是可以直观地总结出各种色貌模型能否对不同的色貌现象、色貌属性的做出预测,见表 1(√表示该色貌模型能直接预测出该色貌现象)。这对色貌模型的应用起到了指导作用。但定性实验最明显的不足则是无法精确地描述预测能力的好坏,从而难以对色貌模型做出反修正。故现今定性实验常与修正研究相结合以优化色貌模型的均匀性。例如刘真等人^[10]利用四组色差评价数据,对 CIECAM02 进行了局部视觉均匀性修正,而后再利用 Munsell 数据进行整体均匀修正及验证;梁静等人^[11]利用 BED-CP 小色差,评估数据和 Munsell 新标数据及线性回归方法,调整了 CIECAM02 色空间的明度、彩度坐标量表,进一步优化了色貌空间的均匀性。

表 1 各类模型对各种色貌属性、现象的预测能力

Tab. 1 Color appearance attribute and phenomena predicted by various color appearance models

项目	CIELAB	LLAB	RLAB	Nayatani	Hunt94	CIECAM
明度	√	√	√	√	√	√
视明度				√	√	√
彩度	√	√	√	√	√	√
饱和度		√	√	√	√	√
视彩度		√	√	√	√	√
色相角		√		√	√	√
色相				√	√	
Helson-Judd 效应				√	√	√
Stevens 效应		√		√	√	√
Hunt 效应				√	√	
Helmholtz-Kohlrausch 效应		√		√	√	√
Bartleson-Breneman 方程		√	√		√	√
折扣光源		√	√		√	√
不完全色适应			√		√	√
色差	√	√	√		√	
其他				√	√	

2 对应色数据进行测试

对应色数据指的是在 2 种观察条件下,呈现相同色貌的 2 组三刺激值数据,它是色适应变换研究的成果,常被用来优化色貌模型中的色适应变换过程和色适应因子 D 。其应用方法如下:将其中一组三刺激值

及其观察条件作为色貌模型的输入量,预测对应的另一观察条件下具有相同色貌的颜色的三刺激值,而后再将预测结果与对应色数据进行比较,通常计算两者之间的色差,从而量化的衡量预测结果的好坏。

目前,最全面的专门用于色貌分析的对应色数据,由日本色彩科学协会(CSAJ)通过 4 个系列实验得出,由 Mori 等人^[12]于 1991 年在报告中总结为

CSAJ 数据集,该数据集可用于验证色适应变换和色貌模型对 Hunt 效应、Steven 效应及 Hellson-Judd 效应的预测精准度。其他较常用的对应色数据集有: Breneman^[13]于 1987 年得到一组不同亮度等级的对应色数据, Fairchild^[14]使用该数据对 Hunt, RLAB, Nayatani 等模型进行了测试,指出对于细微的 Hunt 效应 Hunt 和 Nayatani 模型会做出过度预测; Lam 等人^[15]通过实验获得的 58 块毛织染色样品在 A 和 D65 两种光源下的对应色数据,并采用 3 种色差对 7 种色适应方法进行了评价,验证了数据的有效性; McCann 对应色数据^[16]是通过 Mondrian 图片和孟塞尔色卡在不同光源下进行匹配实验获得的; Kuo & Luo 对应色数据^[17]则包含了 D65, D50, A 光源下的三组对应色数据。

上述对应色数据多为同种反射体媒体之间得到的,而根据实际应用的需求,研究人员开始展开跨媒体、自发光机制媒体的对应色数据的实验。Braun 和 Fairchild^[18]于 1997 年通过实验得到了一组打印体图像与显示器图像在复杂刺激下的对应色数据。吴旭东等人^[19]于 2011 年通过视觉匹配实验得到了一组显示器与打印体之间的跨媒体对应色数据,并使用该数据对 3 种经典色适应变化算法和 CIECAM02 色貌模型的表现进行了测试,得出 Von Kries 与 CMC-CAT2000 色适应模型的表现,优于 CIECAM02 色貌模型的结论,该结论与使用同种媒体对应色数据的测试结果不一致,这与色貌模型的改进过程中较多使用同种媒介对应色数据有关。

随着研究的深入,现有对应色数据的不足逐渐显现出来:首先,大部分对应色数据实是单一光源下获得,而实际应用中经常出现两种及以上光源的照明环境,针对混合适应问题的对应色数据有待研究;其次,现有数据主要是针对单个颜色刺激的,复杂刺激在不同照明条件下的对应色数据有待增加。

3 量值估计数据进行测试

量值估计实验需要观察者按照自身感受对接收到的明度、彩度等刺激进行量值划分,量值估计实验得出的有效数据称为量值估计数据,它和对应色数据统称为色貌数据^[20],常被用来优化明度、视彩度和色相等关联色知觉属性。

最为常用的量值估计数据由英国拉夫堡大学科

技电脑人机界面(LUTCHI)研究中心得出,发表于 Luo 等人^[21-24]的系列论文中。由 Hunt 与 Luo^[25]于 1994 年总结成 LUTCHI 数据集,并使用该数据集改进了 Hunt 色貌模型为 Hunt94 色貌模型。LUTCHI 系列实验的一些结果还被 CIE TC1-34 采用,成为了测试及改进 CIECAM97s, CIECAM02 等后续色貌模型的重要参考。另一个常用的量值估计数据为 Juan 数据,它由 Juan 等人通过系列心里物理实验得到^[26-27],包含明度、视彩度、饱和度等数据。

利用量值估计数据进行测试的实验,通常计算分散程度 CV 来评价色貌模型的表现, CV 值越大则表示误差越大,色貌模型的表现越差。

4 心理物理实验法

测试色貌模型最为直接的方式为心理物理测试实验法,通常采用对比实验,观察者同时或依次观察两个观察条件下色貌模型预测出的结果,按照自身的感受将色貌模型的颜色预测效果的进行排序;而后对于大量观察者的实验结果进行等距量表分析,即可得出色貌模型间的预测效果排序。

最早的心理物理测试实验为 Fairchild 和 Berns^[28]于 1993 进行的简化形式实验,实验的目的为证实色貌模型在跨媒体颜色传递中的效用。实验使用六种不同的图像,14 位观察者使用连续双眼观看技术,首先观察 D50/A 光源下的印刷品图像,再观察 D65 光源下的 CRT 显示器图像。所测试的模型仅为 CIELAB 和 RLAB,70% 的观察者选择 RLAB,30% 的观察者选择 CIELAB,即证明该实验中 RLAB 的预测效果优于 CIELAB。其后较为典型的实验有: Braun 等人^[29]对色貌模型在观察条件变换下的情况下的性能进行了测试; Luo 等人^[30]于 2012 年对 CIECAM02 对知觉对比度的预测能力进行测试、心理物理实验方法在色貌模型研究的早期,常被用于测试色貌模型的优良程度,但它存在着以下缺点:只能对已有色貌模型进行排序,无法对改进旧模型、研究新模型做出贡献;对实验条件及环境的要求较高等。故现今心理物理实验法的使用逐渐减少。

5 结语

描述了包括定性测试、利用对应色数据进行测

试、利用量值估计数据进行测试及心理物理实验法在内的4类测试色貌模型的实验方法,阐述了每类方法的实验思想和常用数据,介绍了相关研究,并在此基础上总结了每类方法的优点及不足。

事实上,在色貌模型的测试研究中常常将4种实验方法结合使用,已达到较为全面的测试目的,如Li等人^[31]在CIECAM02提出时即将CIECAM02与CIECAM97s进行了较为全面的性能比较,实验利用Munsell数据进行彩度预测评价;Juan数据作为饱和度、明度、视彩度、色相预测表现的评价数据;LUTCHI数据则作为明度、视彩度、色相预测表现的评价数据。实验结果表明CIECAM02对CIECAM97s的缺点有所改进,能在图像应用上替代CIECAM97s模型。

由于色貌模型仍处于研究阶段,需要对包括CIECAM02模型在内的色貌模型进一步进行改进。故而测试与评价、进而优化改进现有色貌模型将会是研究领域中的重点,色貌模型测试实验的发展方向可总结为以下3点:(1)结合应用环境和现有的测试手段、数据,对具体应用中的模型选择做出指导;(2)根据实际需求,通过实验获得新的对应色数据、量值估计数据,进而更好地对色貌模型的性能进行测试;(3)关于图像色貌模型(iCAM)^[32]的测试研究,现有方法和数据只有部分可以直接加以应用,针对性较强的实验方法还有待研究。

参考文献:

- [1] FAIRCHILD M D. Testing Colour-appearance Models: Guidelines for Coordinated Research [J]. *Color Res Appl*, 1995, 20:262-267.
- [2] FAIRCHILD M D. *Color Appearance Models* [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [3] NAYATANI Y, TAJAHAMA K, SOBAGAKI H. Field Trials on Color Appearance of Chromatic Colors under Various Light Sources [J]. *Color Res Appl*, 1988, 13:307-317.
- [4] MORI L, FUCHIDA T. Subjective Evaluation of Uniform Color Spaces Used for Color Rendering Specification [J]. *Color Res Appl*, 1982, 7:285-293.
- [5] FAIRCHILD M D. Prediction of Munsell Appearance Scales Using Various Color Appearance Models [J]. *Color Res Appl*, 2000, 25:132-144.
- [6] 杨晓莉, 杨卫平, 杨卫国, 等. CIELAB与CIECAM02色空间均匀性比较研究 [J]. *光学技术*, 2008, 34(4):620-625.
- [7] 于明伟, 方恩印. CIELAB与CIECAM02明度均匀性的研究 [J]. *包装工程*, 2010, 31(3):96-100.
- [8] LIAN Yu-sheng, WANG Xiu-ze, MENG Wei. Prediction of Chinese Color System Appearance Scales Using Various Color Appearance Models [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(9):617-620.
- [9] 廉玉生. 利用中国颜色体系数据集对色貌模型的研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2007.
- [10] 刘真, 孟凡亚, 解娴婷. CIECAM02色貌模型的视觉均匀性分析与模型优化 [J]. *影像科学与光化学*, 2009, 27(2):128-134.
- [11] 梁静, 廖宁放, 廉玉生. 基于CIECAM02模型的均匀色貌空间研究 [J]. *中国印刷与包装研究*, 2010, 11(2):65-71.
- [12] MORI L, SOBAGAKI H, KOMATSUBARA H. Field Trials on CIE Chromatic Adaptation Formula [J]. *Proceedings of the CIE 22nd Session, Melbourne*, 1991:55-58.
- [13] BRENNEMAN E J. Corresponding Chromaticities for Different States of Adaptation to Complex Visual Fields [J]. *Opt Soc Am*, 1987, 4:1115-1129.
- [14] FAIRCHILD M D. Formulation and Testing of an Incomplete-chromatic-adaptation Model [J]. *Color Res Appl*, 1991, 16:243-250.
- [15] LUO M R, RHODES P A. Corresponding Colour Datasets [J]. *Color Res Appl*, 1999, 24(4):295-296.
- [16] MCCAN J J, MCKEES P, TAYLOR T H. Quantitative Studies in Retinex Theory [J]. *Vision Res*, 1976, 16:445-458.
- [17] KUO W G, LUO M R, BEZ H E. Various Chromatic-adapta-

- tion Transformations Tested Using New Colour Appearance Data in Textiles[J]. *Color Res Appl*,1995,20:313-327.
- [18] BRAUN K M, FAIRCHILD M D. Testing Five Color Appearance Models for Changes in Viewing Conditions [J]. *Color Res Appl*,1997,21:165-174.
- [19] 吴旭东,石俊生,云利军. 一组显示器与打印体对应色数据及其色适应模型评价[J]. *光学学报*,2011,31(5):53-64.
WU Xu-dong, SHI Jun-sheng, YUN Li-jun. New Set of Corresponding Colors Data between Monitor and Printer and Evaluation of Chromatic Adaptation Transforms[J]. *Acta Optica Sinica*,2011,31(5):53-64.
- [20] LUO M R, HUNT R W G. The Structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model (CIECAM97s) [J]. *Color Res Appl*,1998,23:138-146.
- [21] LUO M R, CLARKE A A, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part I. LUTCHI Colour Appearance Data [J]. *Color Res Appl*,1991,16:166-180.
- [22] LUO M R, CLARKE A A, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part II. Testing Colour Models Performance Using LUTCHI Color Appearance Data [J]. *Color Res Appl*,1991,16:181-197.
- [23] LUO M R, CLARKE A A, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part III. Supplementary LUTCHI Color Appearance Data [J]. *Color Res Appl*,1993,18:98-113.
- [24] LUO M R, GAO X W, RHODES P A. Quantifying Colour Appearance. Part IV. Transmissive Media [J]. *Color Res Appl*,1993,18:191-209.
- [25] HUNT R W G, LUO M R. Evaluation of a Model of Colour Vision by Magnitude Scalings: Discussion of Collected Results [J]. *Color Res Appl*,1994,19:27-33.
- [26] JUAN L G, LUO M R. New Magnitude Data for Evaluation Colour Appearance Models [C]. NPL, UK, Colour and Vision Scales 2000,2000:3-5.
- [27] JUAN L G, LUO M R. New Magnitude Estimation for Scaling Saturation [C]. *Proceeding of SPIE*,2002,4421:575-578.
- [28] FAIRCHILD M D, BERNIS R S. Image Color Appearance Specification through Extension of CIELAB [J]. *Color Res Appl*,1993,18:178-190.
- [29] BRAUN K M, FAIRCHILD M D, ALESSI P J. Viewing Environments for Cross-Media Image Comparisons [J]. *Color Res Appl*,1996,21:6-17.
- [30] LUO M R, LYU Wei-ge, XU Hai-song. Testing Performance of CIECAM02 in Predicting Perceptual Contrast [J]. *Chinese Optics Letters*,2012,10(3):33-310.
- [31] LI C, M R LUO, HUNT R W G, et al. The Performance of CIECAM02 [C]. *Proc IS&T/SID 10th Color Imaging Conference*,2002:28-32.
- [32] 刘红芳,赵秀萍,金洪勇. 图像色貌模型的研究及应用 [J]. *包装工程*,2008,29(6):58-60.
LIU Hong-fang, ZHAO Xiu-ping, JIN Hong-yong. Research and Application of Image Color Appearance Model [J]. *Packaging Engineering*,2008,29(6):58-60.

(上接第 136 页)

- SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication [DB/OL]. Translated by CHEN Guo-min. (2011-05-27). <http://www.2cto.com/ebook/201105/27469.html>.
- [2] 金杨. 印前流程中图像的信息量和信息熵分析 [J]. *北京印刷学院学报*,2000,8(3):1-9.
JIN Yang. Analysis of Information Capacity and Entropy of Image in the Prepress Workflow [J]. *Journal of Beijing Institute of Graphic Communication*,2000,8(3):1-9.
- [3] HIRADEZKY R. Obejektive Qualitätsbeurteilung von Druckprodukten und Möglichkeiten Zur Analytischen Behandlung von Reproduktion und Druckprozessen mit Hilfe der Informationstheorie [D]. Darmstadt: Technischen Hochschule Darmstadt,1977.
- [4] 姚军财. 基于人眼视觉特性的印刷图像压缩技术研究 [J]. *包装工程*,2011,32(5):69-72.
- YAO Jun-cai. Compression Technology of Printed Image Based on Human Vision Characteristics [J]. *Packaging Engineering*,2011,32(5):69-72.
- [5] 和克智,刘奇龙,赵鸿雁. 包装印刷中 JPEG2000 标准实现的研究 [J]. *包装工程*,2006,27(1):79-83.
HE Ke-zhi, LIU Qi-long, ZHAO Hong-yan. Study on Realization of JPEG2000 's in Packaging and Printing [J]. *Packaging Engineering*,2006,27(1):79-83.
- [6] JIN Yang. Analysis on Frequency Transfer Characteristics of AM/FM Screening Image [C]//XIA Pei-jie. 2005 Beijing International Conference on Imaging. Beijing: Science Press,2005.