

精准测量人眼视觉特性——实现完美显示色彩的必由之路



近年来，新型显示技术层出不穷。无论是OLED显示屏、采用量子点技术的TFT，还是激光投影设备，都能呈现比以往更明亮、更饱和的色彩。为确保不同显示设备间的色彩一致性，色度校准已成为不可或缺的关键环节。

当不同显示设备（尤其是采用异质显示技术且具备广色域特性的产品）经过校准时，即使用最精准的光谱仪或色度计，仍可能出现显色差异现象。

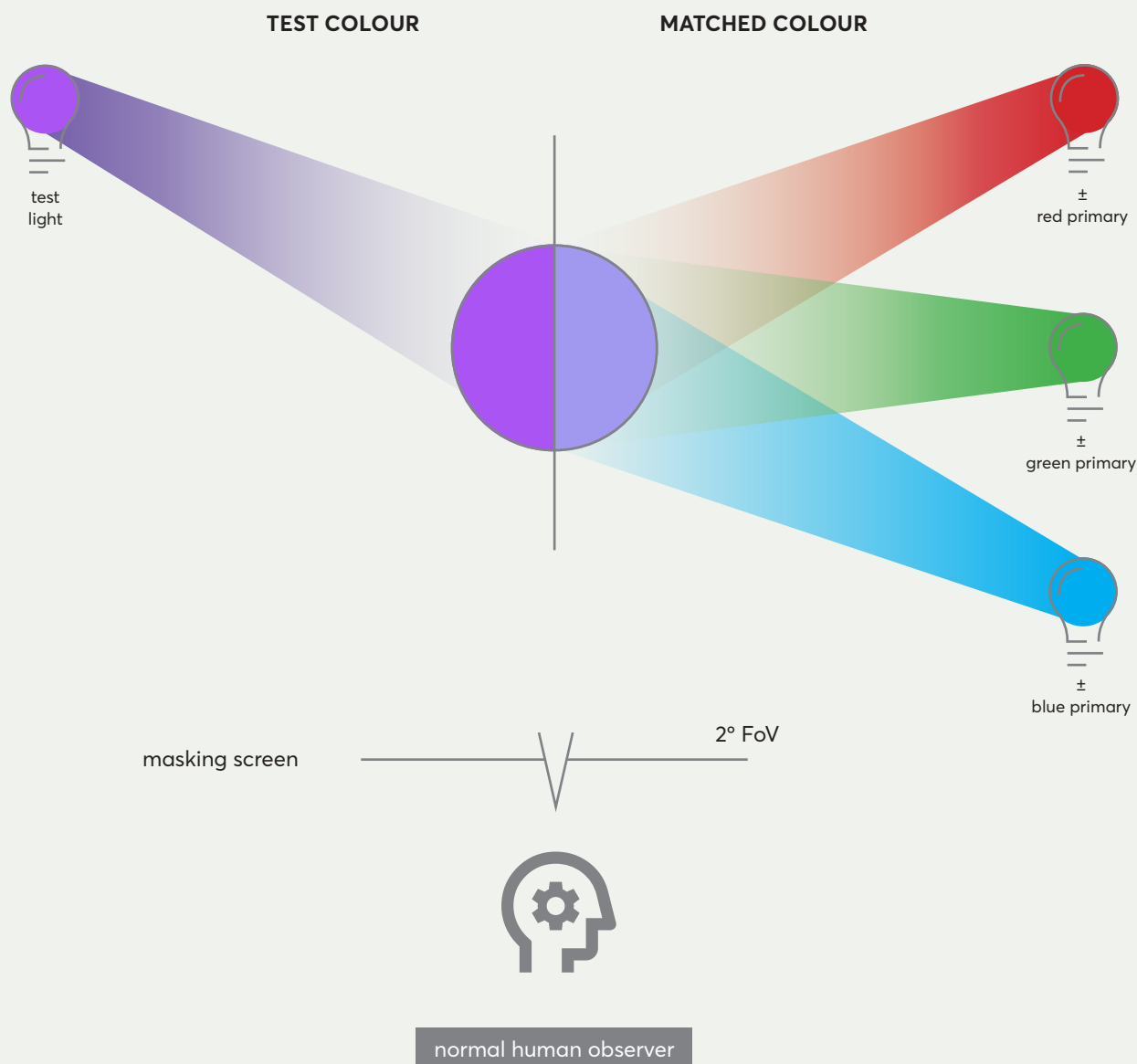
本白皮书将深入解析显示设备色度学的底层原理，并系统介绍多种可有效解决或缓解该问题的技术方案。

我们将带您追溯色度计量学的发展历程，深入解析“标准观察者”模型的科学意义。您可能已熟知CIE 1931或CIE 170:2015观察者——这些描述人类平均色彩感知的模型，构成了现代色度计量体系与自动色彩匹配技术的基石。然而，个体观察者差异与观测条件变量仍带来重大技术挑战。通过本系列探讨您将认识到：攻克这些难关，正是实现完美显示色彩的关键所在。

从颜色感知到颜色测量

您是否曾思考过“色彩可测量”这个概念的奇妙之处？究其原因，在于色彩本质是一种主观感知——它并非如物理量那般具有客观可测性。我们虽能测量入射光的光谱（这是形成色彩的主要因素），但光谱本身并不等同于色彩。完整的色彩感知源于三重作用：光谱刺激的物理特性、人眼的生理机能、以及大脑的神经处理机制。更关键的是，我们无法直接获知他人的色彩体验，只能确认自身的感知结果。

正因如此，建立定量描述色彩的体系成为必然需求。该体系基于人类能判断色彩一致性的生理特性，最终发展出色匹配函数 (CMF) 这一核心工具。色匹配函数不仅实现了对人类色彩感知的数学描述，更使其标准化成为可能。通过将人类色觉转化为数学模型，我们得以进行色彩值的计算与比对，为色彩科学奠定了量化基础。



1929年至1931年标志着色匹配函数研究的开端。色彩科学家Wright和Guild先后开展了两项开创性心理实验：通过调节三种色光的混合比例，使其与相邻显示的测试刺激色达到视觉匹配（如下图所示）。该实验的核心原理在于：对于特定三原色光源系统，其光强比例关系可唯一确定某种色彩表现。本文暂不探讨这些光源的特性及其选择依据，文末附有相关专题文献链接供深度研读。

需要重点说明的是，该实验仅需使用三种光源即可完成，这源于人眼视锥细胞对三个特定波长区的敏感特性。另一个关键认知是：使用不同的三原色光源组合都能成功完成上述色彩匹配实验。当已知两组三原色系统时，我们可将三原色光强比例（现使用准确术语称为“三刺激值”）进行系统间转换——其原理类似于厘米与英寸的单位换算。需注意的是，三刺激值作为比例值虽无量纲单位，但必须明确其对应的原色系统。我们将在后续详细讨论这一前提条件的重要性。

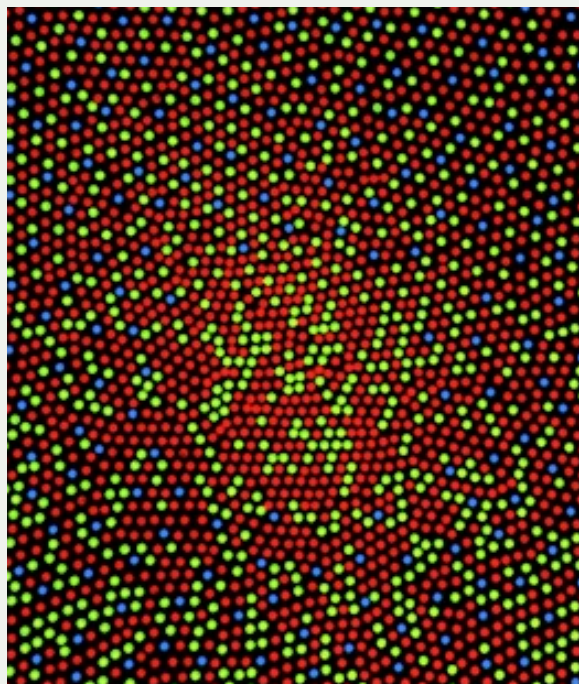
色匹配函数是色彩科学中量化人类色彩感知的核心工具。这些函数精确描述了人眼对不同波长光的响应特性，是各类应用中基于测量实现精确色彩还原的关键技术基础。

视角如何影响色彩感知

在深入探讨之前，我们需要先了解人眼视网膜的生理结构。人类视觉系统包含三种负责色觉感知的视锥细胞：

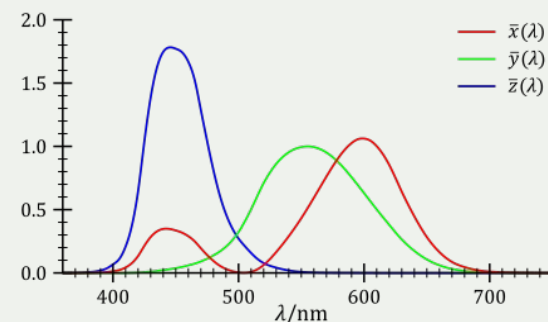
- S型视锥细胞（短波长敏感型）：对光谱中蓝紫色区域的短波光（420-440nm）最为敏感
- M型锥细胞（中波长敏感型）：主要响应绿黄色区域的中波光（534-555nm）
- L型锥细胞（长波长敏感型）：最佳感知红橙色区域的长波光（564-580nm）

下图展示了中央凹区域的视锥细胞分布情况。需要特别说明的是，唯有在这一特定区域，人眼才能实现精细视觉分辨和准确色彩辨识础。



三种视锥细胞在中央凹的分布并不均匀：中央区域仅存在M型和L型视锥细胞，而外围区域S型细胞密度逐渐增加。这种解剖学特征导致人类色彩感知会随视场角变化而产生差异，因此在实施色彩匹配实验时，必须严格考量观察视角参数。

1931年，国际照明委员会（CIE）首次发布了2°标准观察者的色匹配函数：



有了这些颜色匹配函数，即可为任意给定光谱计算三刺激值 X、Y 和 Z。Admesy 公司的 Prometheus 软件套件在使用 Prometheus 内置取景器光谱仪进行光谱测量时，即采用了这种方法。另一种方案是使用色度计直接测量三刺激值，该设备通过三至四个滤光片实现 CIE 1931 2° 颜色匹配函数 (CMFs)。Admesy 的 Prometheus 色度计即遵循这一方法。

使用光谱仪的一个优势在于,它能够针对不同观察条件(不同视场大小)计算颜色三刺激值,这些条件由不同的颜色匹配函数(CMFs)表示。另一方面,与光谱辐射计相比,色度计的优势在于其测量速度更快,因为光能仅分布在三个通道中,而非更多通道。

总结——颜色匹配函数是描述人类色彩视觉的基础

在解释为何要开发多个CMF之前,我们先总结并扩展一下我们目前所学的知识。

- 通过开展颜色匹配实验,可对人类色觉进行量化。基于此,仪器能够执行颜色测量。
- 用于颜色匹配实验的原色组需要进行表征和报告。为实现色值比较,该原色组已被标准化。
- 用于定义CIE 1931 2°观察者色匹配函数(CMFs)的原色组为虚拟原色,其数值由物理原色组计算得出。出于实际考量(如简化计算),该处理在1931年无计算工具辅助的条件下尤为必要。
- 颜色匹配实验的观察条件需进行报告,其中一个关键参数是评估测试刺激颜色时的视角(视场大小)。

除了观察角度外,其他参数也会影响视觉颜色匹配的实现,这是由于大脑中发生的复杂“图像处理”过程所致。人类视觉的一个关键参数是适应状态,通过调节对当前照明的响应,我们能够保持对物体颜色外观的识别。对于显示应用,人眼往往处于混合适应状态,这种状态难以完全界定。另一个参数是绝对亮度水平,它与我们感知的亮度相关。此外,呈现颜色刺激的周围环境和背景也会影响我们的色彩感知。一个关于色块周围环境影响的经典例子是同时对比度——相同的光谱刺激因周围颜色不同,会被感知为略有差异的颜色。



因此,从严格意义上讲,任何颜色三刺激值仅对特定观察条件有效。对于其他观察条件,需要另一组三刺激值来描述视觉颜色匹配。由于可能的观察条件数量无限,这意味着需要无限数量的颜色匹配函数,显然是不切实际的。这也意味着人们无法直接比较不同观察条件下的颜色值。

值得庆幸的是,不同观测条件导致的色彩感知差异在多数情况下并不显著。因此在实际应用中,采用CIE 1931标准2°观察者的三刺激值作为近似解通常可行。但必须注意:基于前文所述机理,即使两台显示器经校准测得相同的XYZ三刺激值,仍可能呈现视觉差异——多数情况下差异较微小,但特定场景下可能较为明显。造成这种差异的两大主因,除已探讨的观测角度因素外,还包括不同观察者间的色觉个体差异。

观察者同色异谱现象

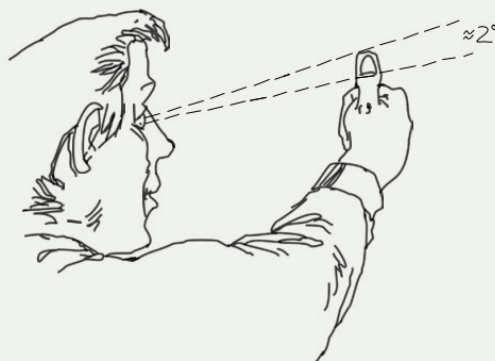
在相同观测条件下,两个显示器呈现的均匀色块可能被某位观察者判定为一致,却被另一位观察者感知为差异——这种现象源于个体特有的色匹配函数差异。

关于 CIE 1931 2°、CIE 1964 10° 和 CIE 170-2:2015 2°/10° 观察者标准的讨论

如先前所述,观察视角会显著影响色彩感知。在实际应用中,通常只需通过两种不同视场的色匹配函数即可满足需求。除CIE 1931 2°标准观察者外,国际照明委员会于1964年新增了描述10°视场色彩感知的标准观察者体系。

2° 与 10° 观察者标准的应用准则

在评估较小彩色细节的应用场景中,2°观察者标准可适用于不超过4°的所有观察视角。根据经验法则:当手臂伸直时,拇指宽度对应的视角约为2°(可作为视角判定的简易参考)。



当观察视角超过4°时,显著的视觉色彩差异使得必须引入额外的观察者标准及配套色匹配函数。为此,CIE 1964 10°观察者标准应运而生,专门规范大视角观测条件。

这就引出一个实际问题:显示设备应用究竟该选用哪种观察者标准呢?直觉可能认为10°观察者标准更合适,因为显示器观看角度通常确实超过4°。但若考虑到决定性因素是色彩刺激本身的视场角,我们会发现2°观察者标准可能更符合实际需求——例如观看包含精细元素的照片时。因此,国际显示计量委员会(ICDM,隶属于国际信息显示学会标准定义委员会)将CIE 1931 2°色匹配函数作为所有显示计量工作的基准[参见IDMS 1.2版本第21.2.2章]。

当两台显示器经校准达到相同的三刺激值后进行视觉比对时,通常采用全屏白色显示模式。在此情况下,基于CIE 1964 10°观察者的校准可能获得更优的视觉匹配效果——但这并不意味着10°观察者标准“优于”CIE 1931 2°标准。二者本质上是针对不同应用场景的技术方案,因此宣称10°观察者更优越的观点(这种误判时有发生)并不成立。虽然10°标准在年代上更新近且测量方法确有改进,但其核心差异在于描述了更大视场角的色匹配特性。

尽管已知CIE 1931观察者函数在短波区域存在缺陷,但标准变更必须具有重大意义——否则新标准带来的潜在收益可能无法抵消其负面影响。除却需购置新设备或升级现有仪器等巨额成本外,新旧数据可比性丧失也是重要弊端。正因如此,国际照明委员会(CIE)于1964年裁定:鉴于既有数据量尚不足以支撑实用色度学标准的变更,决定保留2°观察者标准体系。

CIE 170 色匹配函数与观察者同色异谱现象

通过色度学发展历程的梳理,我们已理解标准观察者模型虽能描述平均观察者的色彩感知,却未考虑个体间的视觉差异。正如人类在身高、体重等解剖学特征上存在差异,眼球光学特性在人群中 also 呈现多样性。这些光学特性不仅随视场大小(观察角度)变化,还与年龄密切相关。即便在同龄群体中,晶状体与黄斑色素的光学密度也存在差异(注:中央凹是视网膜中心区域黄斑的组成部分)。对于某些应用场景,这种“观察者同色异谱”现象会带来技术挑战,相关研究至今仍在持续深入。

视觉研究人员亟需建立更完善的色度观察者标准,作为基础研究共同基准。国际照明委员会(CIE)于2006年发布技术报告170-1,并于2015年完成170-2。该系列报告引入了对三种视锥细胞光谱敏感度的最新优化估算,这些数据描述了视锥细胞对光的初始响应特性,唯有精确掌握这一响应机制和相关参数,才能根据给定的光谱功率分布(SPD)准确界定色彩刺激。

技术报告的第一部分(CIE 170-1)定义了2°和10°修正版CIE色度观察者函数,并阐述了如何计算1°至10°视场范围内不同年龄组观察者的光谱视锥敏感度(视锥细胞基础响应函数)。这些视锥基础函数源自对10°视场实验采集的色匹配函数数据集的分析推导。

技术报告第二部分(CIE 170-2)开创性地基于视锥细胞响应直接定义色匹配函数,建立了全新的色彩表征体系。CIE 170-2:2015提出的视锥基础响应色匹配函数,既代表平均观察者特性,又对现有标准色度观察者形成补充。作为技术报告,CIE 170系列阐述的是“当前技术水平”,主要供国际照明委员会成员及相关研究机构参考使用,而非替代CIE 1931和CIE 1964两大标准色度观察者。该报告的核心目标在于建立生理学与色度学之间的桥梁,这种现代研究方法有望深化人类对色彩认知的理解,不仅具有教育价值,更能为突破色彩测量难题提供创新思路。

色彩匹配函数选择指南：应用场景的考量

CIE 170-2:2015标准中的2°和10°观察者函数, 与现有CIE 1931 2°及CIE 1964 10°观察者函数形成互补体系。目前还存在其他旨在优化平均观察者色彩匹配的观察者函数方案。实际选择时, 需根据测量目标与具体应用需求, 选取最符合核心指标的观察者函数。

标准合规性

显示行业依赖色匹配函数实施质量控制。通过确保色彩复现严格遵循既定色匹配函数标准, 企业可保持产品一致性、实现检测结果可比性并满足品质规范。

CIE 1931 2°与CIE 1964 10°标准观察者体系确保了色彩科学实践与应用的统一性。这些标准化的色匹配函数为色彩计算、色域定义及色彩研究提供了通用基准。

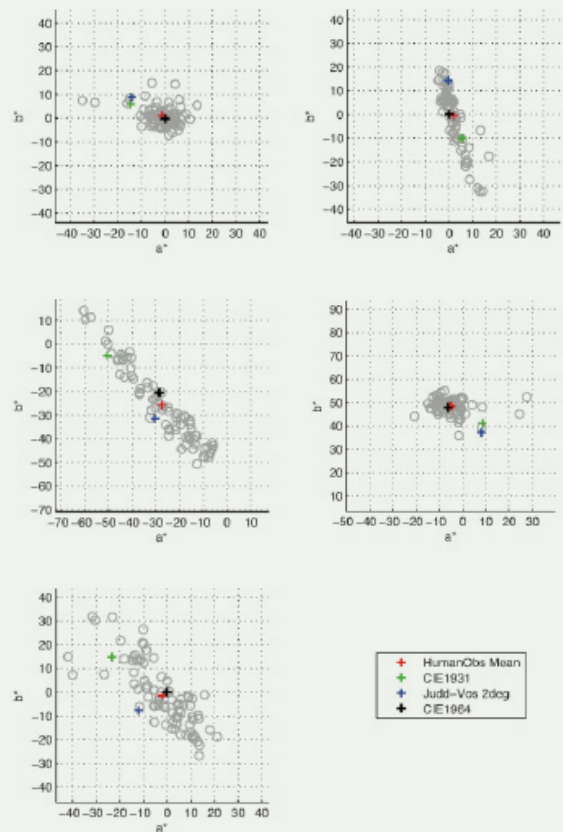
当需要符合特定标准时, 必须采用相应的标准观察者函数。在显示应用领域, 通常需使用CIE 1931 2°标准观察者函数, 例如国际显示计量委员会 (ICDM) 制定的《信息显示测量标准》(IDMS) 或DFF组织颁布的《显示测量规范》中明确规定的要求。

2° 观察者与 10° 观察者标准对比分析

2°与10°观察者标准对比分析10°观察者标准并非本质上优于2°标准, 反之亦然。在理想情况下, 应根据实际观测角度匹配对应的观察者函数。为此, CIE 170-1报告提出了1°至10°连续视场的观察者建模方法。但由于实操限制, 很难为“每个可能角度”都建立独立观察者函数。即便采用10种观察者函数来描述1°到10°视场范围, 仍无法解决因年龄差异及个体眼球光学特性变化导致的观察者差异问题。

最终在实际应用中, 观察角度往往存在动态变化。以电视显示为例: 既会呈现树叶枝桠等细小彩色细节, 也会展示蓝天等大面积色块。因此必须界定最具代表性或关键性的观测角度。对显示应用而言, 较小视场角更具典型意义, 故通常选择2°观察者标准; 而汽车/建筑涂料等应用场景, 则更适合采用10°观察者标准。

为阐明根据观测角度匹配对应观察者函数的重要性, 我们分析Yuta Asano 2015年开展的色匹配实验数据。该数据集源自8.5°视场角的色彩匹配实验 (实际接近10°标准)。下图展示了五种测试色的分析结果: 每个子图的CIE a^*b^* 色度平面上 (a^* 轴表示红-绿色度, b^* 轴表示黄-蓝色度), 灰色圆点代表个体观察者的色彩感知分布, 红色十字标记群体平均感知位置, 黑色十字表示CIE 1964 10°观察者的预测结果, 绿色十字则对应CIE 1931 2°观察者的理论值。



首先可以观察到, 群体平均感知值 (红色十字标记) 与CIE 1964 10°观察者预测值 (黑色十字) 高度吻合。这一预期结果证实: CIE 1964标准确实准确描述了10°大视场角条件下的平均观察者特性。

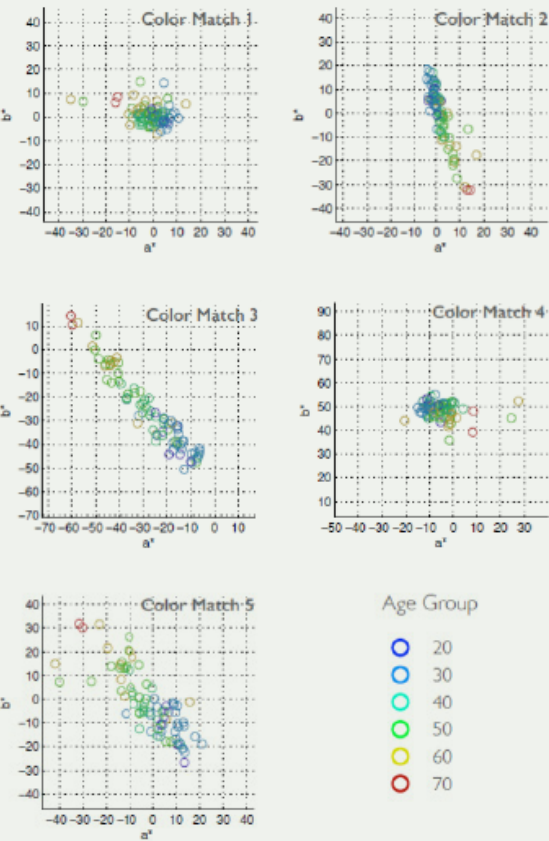
其次, 数据显示CIE 1931 2°观察者标准 (绿色十字) 与CIE 1964存在显著偏离。若非如此, 就无需分别建立小视场与大视场的独立观察者体系。这一结果充分证明: 观察者函数与实际视场条件的匹配至关重要。

最后, 图表数据还揭示了参与者间的显著个体差异。在五种测试色中有三种呈现较大的观察者间离散度。这清晰表明: 单一色匹配函数无法准确描述所有个体观察者。实际应用中, 这意味着仅少数观察者会认为色度学建立的色彩匹配是相似的。当两台显示器按相同目标值校准时, 仅凭单人的视觉评估难以判定校准效果, 因为无法得知该观察者与作为测量基准的标准观察者函数之间的偏差程度。

CIE 170观察者标准体系

CIE 170-1:2015观察者函数

CIE 170标准推出了一套适用于1°至10°视场范围的常规观察者色匹配函数及视锥细胞基础响应估计模型。该标准还可额外考量年龄因素对眼球光吸收特性的影响。为直观展示年龄对色觉的影响程度,我们将重新分析前文所述的色彩匹配实验数据。下图呈现相同实验数据,但采用色标编码以可视化参试者的年龄分布特征。



实验参与者的年龄基本呈有序分布,离散程度较低。这一结果清晰展现了观察者年龄对色彩视觉的显著影响。

虽然采用多样化的CIE 170-1建模观察者函数在色彩研究领域颇具价值,但对于需要确定单一(标准)观察者的工业应用场景而言,这类方案通常缺乏实操可行性。

CIE 170-2:2015观察者标准

这正是CIE 170-2观察者函数的应用场景。与CIE 170-1类似,该标准基于视锥细胞基础响应函数,体现了当前最前沿的色彩研究成果。该模型模拟38岁人群的平均视觉特性,提供2°和10°两种视场版本。前文所述关于2°与10°观察者函数的选择标准,在此同样适用。

采用CIE 170-2观察者标准可作为CIE 1931的创新替代方案。近年来,部分领先企业已开始应用CIE 170-2:2015的2°观察者标准。但需注意的是,当前所有显示标准化体系均基于CIE 1931 2°观察者建立。这意味着若改用CIE 170-2标准,需重新定义白点等目标参数值,且显示效果将区别于基于CIE 1931标准校准的设备——而这正是标准升级的核心价值所在:为普通观察者实现更优的视觉匹配。

但需要明确的是,采用CIE 170-2观察者标准仍无法从根本上解决观察者同色异谱问题。我们将在总结章节系统阐述应对该现象的技术路径。

其他观察者标准

除CIE 170外,学界还提出了多种色匹配函数(CMFs)优化方案。以Saski Polster提出的模型为例:其研究表明,相比CIE 1931和CIE 1964, CIE 170色匹配函数确实提升了视觉匹配度,但仍存优化空间。基于CIE 170的视锥细胞基础响应函数,她开发了一套改良型2°与10°色匹配函数,在其实验数据集上进一步优化了视觉匹配效果。

总结与实测应用方案

通过研究可得出结论:色度学已取得长足发展,人类对视觉系统的运作机制已具备深入认知。通过建立标准观察者的色彩视觉模型,我们能够在典型应用场景中获得可预测的色彩表现。

然而,现行采用单一观察者色匹配函数的标准化色度体系,既无法适应不同视场角等观测条件的差异,也不能反映人群色彩感知能力的个体差异性。更值得注意的是,当今通用的标准色度体系尚未将观察者随年龄增长而产生的色彩感知变化纳入考量范围。

采用CIE 1931 2°或CIE 1964 10°标准观察者作为色度学基础,在多数实际应用中表现良好——尤其对于具有相对平滑光谱功率分布的反射色而言。然而在显示应用领域,特别是涉及现代广色域显示屏时,观察者间的个体差异会对标准色度体系提出挑战,难以实现令人满意的视觉匹配效果。这种对观察者光谱敏感度差异的更高敏感性,本质上是广色域显示技术追求高饱和度色彩所带来的副作用:为实现最生动鲜艳的色彩表现,显示屏三原色(通常为红、绿、蓝)必须具备窄带光谱峰值特性。

采用CIE 170-2:2015标准的2°或10°观察者函数,可作为优化38岁标准观察者色度测量精度的有效方案。在实际应用中,观察者视场角的选择(2°或10°)应遵循两大准则:一是符合应用场景的典型观测视场条件,二是考量细部辨色需求。

还需重点考量是否符合ICDM或DFF等现行标准的要求。若标准合规性为强制条件,则必须选用对应的标准观察者函数。就显示标准而言,当前仍以CIE 1931 2°观察者函数为统一基准。

应对观察者同色异谱现象的技术方案

针对个体观察者色彩视觉差异性特征,目前存在多种可行的技术解决路径:

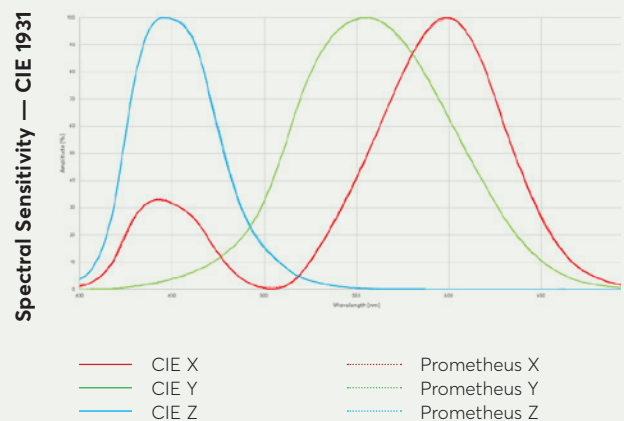
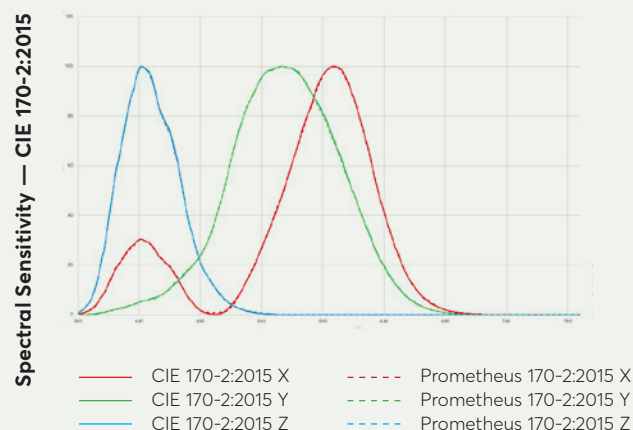
首要技术方案是在显示屏设计阶段,通过优化三原色光谱选择(参见参考文献),从源头上降低实际观察中的同色异谱现象。该方案的可行性基于色觉感知的生理特性——不同光谱刺激可产生相同的色彩感知体验。更先进的解决方案可采用多原色显示技术(参见参考文献),通过增加原色数量(超过三原色)来进一步提升色彩匹配精度。

第二种技术路径是通过为个体定制色彩匹配方案。该方法虽然理论可行,但存在显著局限——仅适用于单一观察者,无法满足多人同时观看显示设备的场景需求。针对个体色彩感知的定制化处理可通过两种方式完成:

其一是在仪器测量完成色度匹配后,通过视觉校正补偿色彩偏差,并记录色彩偏差值作为后续参考。该方案已应用于部分电视校准软件套装,其具体实现方式可能各异,但核心原理都是通过手动调节显示内容,并将其与色度测量数据建立关联。该方案实际效果良好,但难以实现输出结果的客观标准化。

另一种方式是测定每位观察者的个性化色匹配函数,但该方法耗时耗力且成本高昂,通常不具备实操性。更可行的折中方案是提供一组预定义的色匹配函数,将色觉特征相似的人群归类——这类似于提供多尺码成衣,而非单一的“均码”方案。色彩学家Mark Fairchild和Yuta Asano研究表明:10种

分类观察者函数已能满足常规需求,而激光投影仪等具有尖锐原色光谱峰值的设备则需要多达50种分类观察者函数才能准确预测个体匹配效果。这种分级方案兼具实操性与标准化潜力。



Admesy Prometheus色度计与CIE1931及CIE 170-2标准2°观察者函数的光谱匹配性能分析

Admesy Prometheus多标准观察者测量方案

实现特定观察者色匹配函数的测量可通过两种技术路径:使用带滤光片的色度计或采用光谱辐射计。Admesy Prometheus点式测量仪系列同时提供这两类仪器配置,满足不同标准观察者的测量需求。

Admesy Prometheus

色度计



Prometheus色度计采用自主研发制造的滤光片,可实现业界领先的 $f1'$ 光谱失配度。 $f1'$ 指数用于量化滤光片曲线与目标光谱的匹配精度。Admesy提供支持多种观察者函数的Prometheus色度计,当前可选配CIE 1931 2°及CIE 170-2:2015 2°/10°标准观察者滤光片。该系列色度计在保证卓越测量速度的同时,仍能维持极高精度,是兼顾可靠性与检测效率的、符合大规模生产场景的理想解决方案。

计算CIE 170-2基于视锥细胞基本特性的三刺激值时,需对390nm至830nm波长范围进行积分运算。这与CIE 1931和CIE 1964标准观察者函数形成鲜明对比,后两者定义的波长范围为380nm-780nm。Prometheus内置取景器光谱仪凭借超越常规显示光谱仪的宽广波长覆盖范围(390-830nm),可精准执行CIE 1931、CIE 1964及CIE 170-2:2015标准的2°和10°视场角色彩测量。

Prometheus内置取景器光谱仪的多功能性因其可调测量角度设计得到进一步增强,用户可精准控制光线测量角度(需注意:这与计算三刺激值时对光谱功率分布按特定观察者角度[2°或10°]进行加权的处理方式有本质区别)。例如在1°测量角度下,可同步获取上述全部四种标准观察者体系的XYZ三刺激值读数!

结合行业顶尖的测量精度,这些特性使Prometheus内置取景器光谱仪成为高要求显示测量应用的理想之选。

Admesy Prometheus

光谱仪



采用Prometheus光谱辐射仪,可基于任意色匹配函数计算颜色的三刺激值。仅需获取一次光谱功率分布 (SPD),即可同步测得不同标准观察者体系下的三刺激值——这种多标准兼容特性正是光谱辐射仪的核心优势之一。

链接与参考文献

A Beginners guide to colorimetry

<https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>

Asano Y, Fairchild MD., Categorical observers for metamerism.

Color ResAppl. 2020;1-10.

<https://doi.org/10.1002/col.22493>

CIE 1931 colour-matching functions, 2 degree observer

<https://cie.co.at/datatable/cie-1931-colour-matching-functions-2-degree-observer>

CIE 170-1:2006

https://store.accuristech.com/cie/standards/cie-170-1-2006?product_id=1270665

CIE 170-2:2015

https://store.accuristech.com/cie/standards/cie-170-2-2015?product_id=1907362

DFF - Specifications & Technical Documents

<https://www.displayforum.de/wp-content/uploads/2023/11/2023-11-23-DFF-Specifications-and-Technical-Documents.pdf>

Emulating the Wright-Guild experiment

<https://rgbcmyk.com.ar/en/emulating-the-wright-guild-experiment/>

Fovea

https://en.wikipedia.org/wiki/Fovea_centralis

How the CIE 1931 color-matching functions were derived from

Wright-Guild data

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291520-6378%28199702%2922%3A1%3C11%3A%3AAID-COL4%3E3.0.CO%3B2-7>

IDMS – Information Display Measurement Standard

<https://www.sid.org/Standards/ICDM>

ISO 11664-1:2007(E)/CIE S 014-1/E:2006

<https://cie.co.at/publications/colorimetric-observers>

Optimizing Spectral Color Reproduction in Multiprimary Digital Projection

<http://markfairchild.org/PDFs/PRO39.pdf>

Observer metamerism in commercial displays

<https://opg.optica.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-37-4-A61>

Le Moan et al, An observer-metamerism sensitivity index for electronic displays, Journal of the SID, 2017, DOI # 10.1002/jsid.605

Kraushaar A, et al, Fogra-Forschungsbericht Nr. 10.058, Einflussgrößen auf die hochqualitative Monitordarstellung hinsichtlich einer Standardisierung von Softproofsystemen, 2016

Polster, S, Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit

https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00041621/ilm1-2018200111.pdf

Trumpy, G.; Andersen, C.F.; Farup, I.; Elezabi, O. Mapping Quantitative Observer Metamerism of Displays. J. Imaging 2023, 9, 227.

<https://doi.org/10.3390/jimaging9100227>

与Admesy专业人士取得联系

浏览官网: admesy.com

ADMESY