

使用 IES TM-30-15 评估显色性

IES TM-30-15 是一个由多个相关测量方法和图形组成的新系统，可共同用于有效评估和交流光源的显色特性。该方法的开发涉及综合多项相关研究工作，并将各种想法整合为一个单一、有凝聚力的客观信息体系，可用于辅助决策过程，例如为特定应用寻找首选光源或评估功效与显色性之间的权衡。

几十年来，开发评估显色性的新方法一直是照明研究人员和广大照明行业的目标。国际照明委员会（CIE

国际照明委员会（CIE）的一般显色指数（ R_a ，通常称为 CRI）¹ 持续使用了 50 年，证明了它的实用性，但随着固态照明的出现，它的局限性和缺陷正变得越来越突出，因为固态照明比其他类型的光源提供了更多的光谱工程机会。在此背景下，照明工程学会（IES）成立了色彩度量工作组，隶属于 IES 色彩委员会，该委员会编写了技术备忘录 *IES TM-30-15：IES 光源色彩呈现评估方法*²。

TM-30 仅描述了一种自愿计算程序。² TM-30 只是描述了一个自愿性的计算程序，要实现最大的效益，需要照明生产商、规范制定者、研究人员和监管者对其功能进行检查，了解其独特的能力，以便为光源的色彩渲染提供指导。

¹ 更多信息，请参阅 CIE 13.3-1995 或教程：《色彩渲染及其在照明中的应用》（Houser KW, Mossman M, Smet K, Whitehead L. 2015. Leukos. DOI:10.1080/15502724.2014.989802.）

² IES TM-30-15 可在 <https://www.ies.org/store/product/ies-method-for-evaluating-light-source-color-rendition-3368.cfm> 上查阅。该文件随附 Excel 计算工具。

TM-30 可以描述色彩表现的多个方面，并将其投入使用。幸运的是，TM-30 不要求额外的测量，因此开始报告和指定所含测量的负担很小。

因此，开始报告和指定所含测量值的负担很小。更大的挑战在于开发新的光源，发挥更先进的表征方案的潜力，而不是仅仅试图最大限度地提高与参考光源的相似度。

本概况介绍介绍了 TM-30 方法的基本特征以及如何将其应用于各种情况。更多信息，请访问

- DOE/IES 简介网络研讨会：<http://energy.gov/eere/ssl/webinar-understanding-and-applying-tm-30-15>
- DOE/IES 技术网络研讨会：<http://energy.gov/eere/ssl/downloads/webinar-technical-discussion-tm-30-15>
- 常见问题页面：<http://energy.gov/eere/ssl/tm-30-frequently-asked-questions>

TM-30 计算引擎

与 CIE 测试色法（即 CRI）一样，TM-30 也是一种基于参考的方法，将测试光源与具有相同相关色温 (CCT) 的参考光源进行比较。这种方法得到广泛理解，并与照明设计流程相兼容，在照明设计流程中，色温

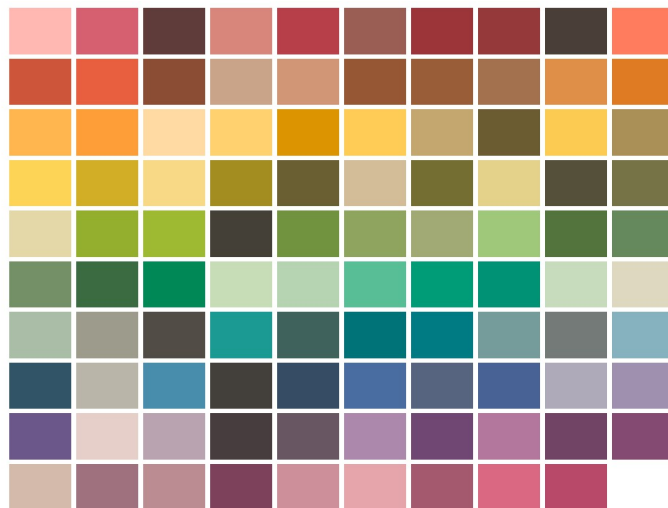
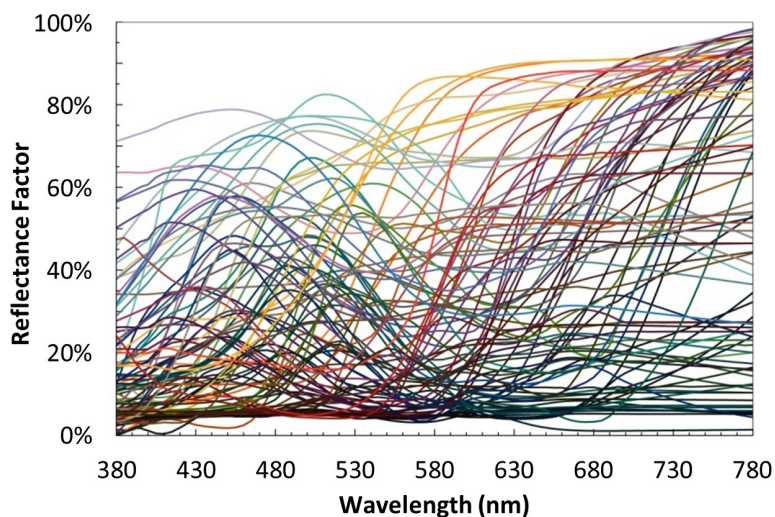


图 1. TM-30-15 的核心是一组 99 个颜色样本，用于描述测试光源和参考光源之间的差异。在计算过程中，样本由其反射率函数（左图）表示，即在每个波长上反射的辐射通量的百分比。右侧的色样说明

了样品在 5000 K 参考光源下的大致外观。



(或色度³)是首先要考虑的,与显色性是分开的。也就是说,色度和显色性可以分开考虑。TM-30 方法使用的参考光源与 CIE CRI 系统中使用的光源相同--黑体辐射和 CIE D 系列日光模型⁴,但两者在 4500 K 和 5500 K 之间按比例混合,以避免 CIE CRI 在 5000 K 时的突然转换。与之前的方法相比,这种方法对任何评分的影响都微乎其微,但鉴于可调色光源的日益普及,这种方法更为合适。

尽管 TM-30 采用的是我们熟悉的基于参考的方法,但它与 CIE CRI 之间存在许多基本的技术差异,同时还有一套更全面的数字和图形输出。表 1 列出了 CIE CRI 系统与 TM-30 系统之间的主要区别。

TM-30 方法的核心是一套新的色彩评估样本 (CES)。99 个 CES (如图 1 所示)是从一个包含约 105,000 个真实物体光谱反射函数测量值的资料库中统计选出的,这些物体包括油漆、纺织品、自然物体、肤色、油墨等。取样方法包括

3 显色性和色度 (或光本身的外观) 是两个不同的特性,但两者可在一个色彩质量规格中一并考虑。

4 黑体辐射和 CIE D 系列光源都是用数学方法推导出来的光谱功率分布,分别代表温度递增和日光不同阶段的受热体。它们可以在任何相关色温 (CCT) 下进行计算,长期以来一直是照明行业的参考标准。虽然它们是自然光源,但并不一定是理想光源。TM-30 详细说明了这些参考值的偏差,为选择光源时进行比较提供了更多技术信息。

5 灵敏度的最小化非常重要,因为不均匀性会导致基于评估样本特征的错误优化,而这些特征在典型应用中并不存在。与用于计算 CIE 一般显色指数 R_a 的 8 个样本相比⁶,99 个 CES 减少了选择性优化,因此输出值能更好地预测真实世界的性能。

CIE CRI 和 TM-30 在技术上的另一个主要区别是使用了 CAM02-UCS (统一色彩空间),它比 CIE 1964 $U^*V^*W^*$ 色彩空间具有更好的统一性。⁷ CAM02-UCS 还包括改进的色度适应变换⁸,这意味着当测试光源偏离黑体位置 (即 D_{uv} 的绝对值较大) 时,计算更为有效。

5 有关样本选择程序的更多信息,请参阅: David et al.: David et al. 开发 IES 光源色彩呈现评估方法。Opt Express 23, 15888-15906. doi: 10.1364/oe.23.015888

6 R_a 通常被简称为显色指数 (CRI),但从技术上讲,它只是 CIE 测试色彩方法的一个组成部分,该方法包括六个特殊显色指数和一个一般显色指数。系统中共有 14 个颜色样本,但只有 8 个用于计算 R_a 。

7 Smet 等人,2015 年。色彩空间和光谱均匀性为何对色彩渲染测量至关重要》。Leukos 12(1).DOI:10.1080/15502724.2015.1091356

8 色彩渲染度量标准和色彩外观模型中采用了色度适应变换,以解释由于测试和参考条件不同而引起的观者色度适应的差异,而不是由于实际色彩失真而引起的差异。

表 1.CIE 测试色彩方法 (通常称为 CRI) 与 IES TM-30-15 的比较。

	CIE 13.3-1995 (CRI)	IES TM-30-15
发布年份	1965 年、1974 年 (修订版)、1995 年	2015
色彩空间	CIE 1964 $U^*V^*W^*$	cam02-ucs (ciecam02)
色彩样本数量	8 个一般 (R_a) 加 6 个特殊 (R_{ti})	99
色量覆盖率	限量	全等
饱和样品	无	有
样品类型	仅 Munsell 样品 (有限的颜料)	各种真实物体
样品光谱均匀性	无	是
参考光源	黑体辐射, CIE D 系列	黑体辐射, CIE D 系列
参考过渡	在 5000 K 时较尖锐	在 4500 K 和 5500 K 之间混合
输出测量	通用指数 $R_{(a)}$ (保真度) 6 个特殊指数, $R_{(i)}$ (保真度)	保真度指数, R_T 色域指数, R_g 色彩矢量/饱和度图形 16 个基于色调的保真度指数 16 个基于色调的色度指数 1 个特定皮肤的保真度指数 99 个单独的保真度值
评分范围	最高 100, 无下限, 比例可变	0 至 100, 比例一致

评估措施

尽管 IES TM-30-15 和 CIE CRI 系统之间的技术差异值得注意，但许多用户可能完全看不到这些差异。

尽管 IES TM-30-15 与 CIE CRI 系统之间的技术差异值得注意，但许多用户可能完全看不到这些差异。更具实际意义的是，TM-30 提供了新的信息来补充改进后的色彩保真度平均值。

TM-30 提供的信息层次丰富，从高级平均值到特定颜色样本的高度详细描述，不一而足。表 2 介绍了 TM-30 的每种输出结果，随后的章节将进行更多讨论。

的讨论。了解 TM-30 每项输出的含义和限制非常重要。

平均值

显色性无疑是一个复杂的课题，任何显色性测量方法都必须将复杂的信息提炼为易于理解的数字或图形。对于大多数用户来说，最熟悉的 TM-30 值是保真度指数 R_f ，它描述了 99 CES 在测试和参考条件下的平均色差。它类似于 CIE R_a ，尽管其基础数据如表 2 所示。

表 2. IES TM-30-15 中描述的测量方法的说明和使用。

测量	缩写	说明
保真度指数	R_f	类似于 CIE $R_{(a)}$ (CRI)。表征 99 CES 的平均色移，以表征测试光源与参考光源之间的总体相似程度。数值范围为 0 至 100。
色域指数	R_g	比较 16 个色相箱中每个色相箱的平均色度坐标所包围的区域，以确定测试光源与参考光源相比的平均饱和度水平。中性分数为 100，大于 100 表示饱和度增加，小于 100 表示饱和度降低。随着保真度的降低，数值范围也会增大。
色彩矢量图		根据每个色阶的平均渲染值，提供相对于参考值的色调和饱和度变化的直观表示。通过该图形，可以快速了解不同色调是如何以不同方式呈现的。
色彩饱和度图表		根据每个色阶的平均表现，仅提供饱和度变化的简化可视化表示。
色调保真度指数	$R_{f,j}$ ($j = 1$ 至 16)	在 16 个色调分段 (j) 中的每个分段提供色彩保真度的数值特征，可用于评估测试信号源与参考信号源相比，在呈现红色、黄色、绿色、蓝色或介于两者之间的色调时的相似程度。数值范围从 0 到 100。如果对某一色调类型特别关注，可以使用特定值来补充平均值。也可 以 为所有数值指定限值。这些分数类似于 CRI 系统中的特殊指数（如 R_{9j} ），但由于结合了多个具有不同光谱特征的样本，因此更加稳健。
色调指数的色度变化	$R_{g,j}$ ($j = 1$ 至 16)	提供 16 个色调分段 (j) 中每个分段的 相对色度变化数值，可用于评估红色、黄色、绿色、蓝色和介于两者之间的色调与参照物相比的饱和度（正值）或失饱和度（负值）。补充标准可以针对所有值，也可以只针对特定值，如红色（分区 1）。
皮肤保真度指数	$R_{f,皮肤}$	表征测试源与参考源相比所呈现的肤色（CES15 和 CES18）的相似度。数值范围为 0 至 100。当皮肤是一个重要的考虑因素时， $R_{f,skin}$ 可用于补充其他值。

样本保真度指数

Rf_{CESI} ($i=1$ 至 99)	表示测试源与参考源相比，每个 CES (i) 的相似度。数值范围从 0 到 100。单个值对其他对象的预测能力可能很小，但在综合图表中检查分数可以显示源的对象间一致性。
------------------------------	--

R_f 的范围是 0 到 100，它是一种更严格的测试，可以防止选择性优化（通常称为“博弈”）。
 的范围为 0 至 100，100 表示完全匹配
 的平均值。作为一个平均值， R_f 并不能说明哪种类型的色彩失真最严重，或者失真是否饱和度增加、饱和度减少还是色调偏移。这时，色域指数 R_g 就能填补仅评估保真度的空白。

R_g 记录了相对于同一 CCT 参考光源饱和度的总体增减情况，100 分表示平均色域面积相同。
 高于 100 分表示饱和度平均上升，低于 100 分表示饱和度平均下降。 R_g 可以帮助捕捉炫的影响。

⁹ 虽然 CIE R_a 和 TM-30 R_f 具有相似的标度，但许多以前针对 CIE R_a 进行优化的光源在考虑 R_f 时已不再优化，因此得分较低。峰值较窄的光源尤其如此，例如三基色荧光灯，其专门设计用于平衡光效和 CIE R_a 分数。

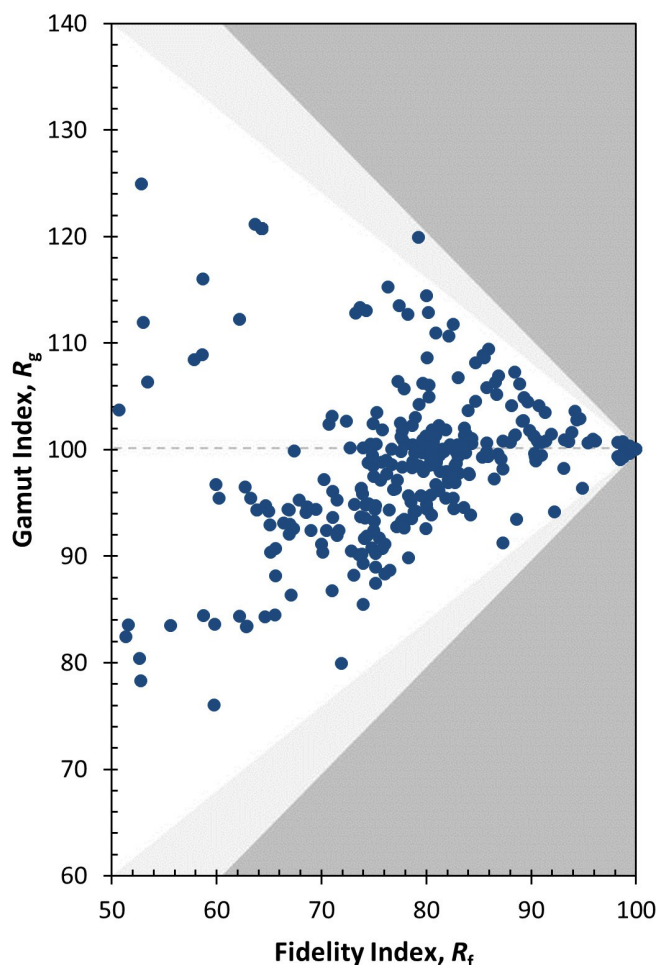


图 2 R_f 和 R_g 构成一个互补的双测量系统，通过绘制该图可以直观地说明保真度和饱和度之间的权衡。蓝色点代表真实光源，阴影区域近似于黑体位置上的光源（浅灰色）或未被归类为白光的光源（深灰色）不可能出现的组合。

例如， R_f 和 R_g 都是以白炽灯为基准，以增加饱和度来换取保真度。由于 R_f 和 R_g 基于相同的参考光源和基本计算，因此它们构成了一个可理解的双轴系统（图 2），在这个系统中，保真度和饱和度之间的关系可以通过多个光源进行评估和比较。通过这种方式，与保真度是唯一评估方面的系统相比，准确的参照物就变得不那么重要了；因为我们可以了解光源与参照物之间的差异，而不仅仅是差异的大小，所以我们有办法判断光源是否适合特定应用。

光源对特定应用的适用性或色彩偏好，是色彩渲染度量中的一个关键考虑因素。

度量的关键因素。TM-30 并不包括表征偏好的单值测量，因为最合适的色源并不适合所有应用或人群。有些应用

应用，如医院，需要高色彩保真度。而其他应用，如零售业，则可能更适合提高饱和度，使商品的色彩更加鲜艳夺目。有了 TM-30，就可以有目的、有依据地做出这样的决定。

图形表示和详细数值

在许多应用中， R_f 和 R_g 的平均值可能足以指定最合适的光源，并允许制造商更有效地设计和销售新型光源。然而，正如 R_g 在 CIE 在色彩关键应用中，有关特定色调的补充信息可能非常重要。色彩矢量图（图 3）显示了测试源（红线）与参考源（黑圆）的饱和度变化和色调变化。色彩饱和度图标以简化的形式显示类似的信息，可能更容易传达，但不显示色调变化。例如，该图形可轻松用于区分红色饱和光源和绿色饱和光源，这两个特征可能与偏好和效果有关。

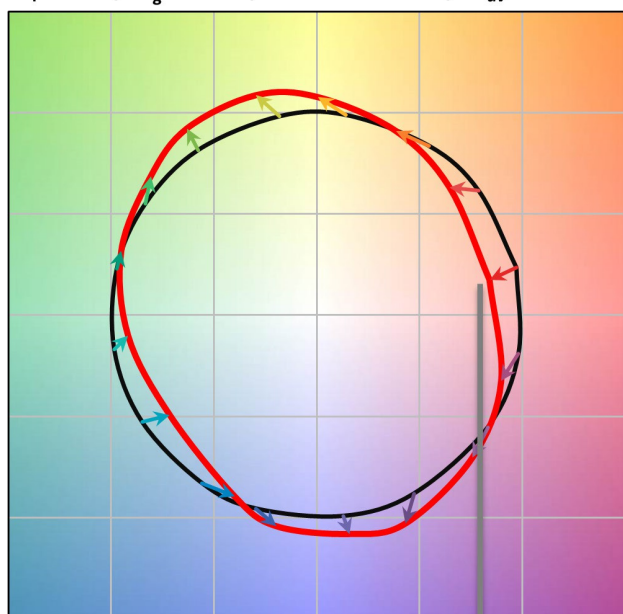
在某些情况下，可能需要为红色等特定色调区域指定数值。测量值 $R_{f,h}(j)$ 和 $R_{g,h}(j)$ （其中 j 表示色相箱的编号）对应于 16 个色相箱中每个箱平均色度的保真度和色度变化。如图 4 所示，从 CAM02-UCS 的正 a' 轴开始，按逆时针顺序对色调组进行编号。例如， $R_{f,h1}$ 对应色相箱 1 中的保真度，即红色。

$R_{f,h1}$ 与 CIE R_g 值相关，但并不具有相同的标度。¹⁰ TM-30 中所有保真度值的标度从 0 到 100，100 表示与参照物完全匹配。

如果还需要更详细的信息，可以查看 99 个 CES 中任何一个的保真度值或所有值的图谱（图 5）。检查所有值

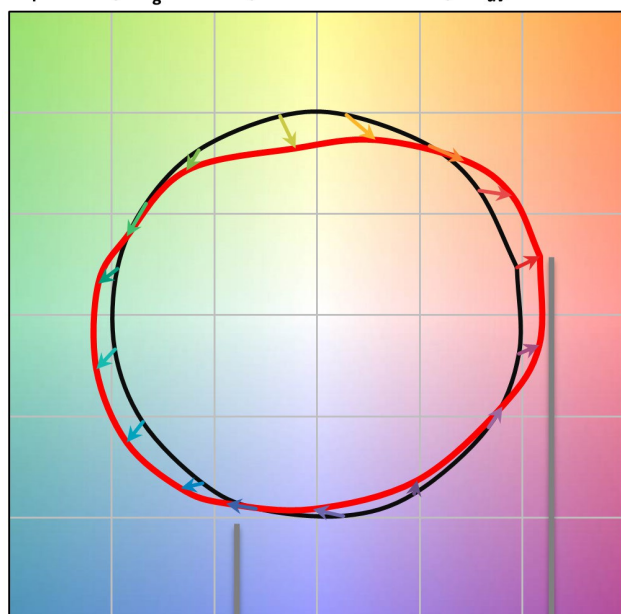
¹⁰ 由于计算 R_g 的 CIE 1964 $U^*V^*W^*$ 色彩空间的不均匀性， R_g 具有不寻常的比例。

$R_f = 75$ | $R_g = 100$ | CCT = 3500 K | $D_{uv} = 0.000$



Decreased
Saturation

$R_f = 75$ | $R_g = 100$ | CCT = 3500 K | $D_{uv} = 0.000$



Hue Shift

Increased
Saturation

图 3. 色彩矢量图显示了 16 个色相箱中每个箱的平均色相和饱和度变化。参考源被归一化为黑色圆圈，而测试源则用红线表示。箭头表示特定的变形：从黑圆圈向内的箭头表示饱和度降低的区域，从黑圆圈向外的箭头表示饱和度升高的区域，与黑圆圈相切的箭头仅表示色调偏移。

同时可以帮助人们了解色彩呈现的一致性。如果一个信号源的相邻 CES 值相差悬殊，则表明该信号源对类似颜色的呈现可能与参照物大相径庭。而其他信号源，通常是那些光谱功率分布更连续的信号源，在不同样本之间的表现可能更加一致。

还有一种测量方法，即 $R_{f,skin}$ ，可用于记录信号源在呈现人类肤色方面的性能。 $R_{f,skin}$ 是 CES15 和 CES18 的平均值，这两个皮肤反射率测量值与大型人类肤色库相比，保真度得分的相关性最高。

设计标准和指导

IES TM-30-15 记录了一个计算程序，但没有规定任何测量的标准（即最小值），也没有规定如何应用这些测量。指导和标准可由适当的团体利用以往的经验 and 行业反馈来制定。对于保真度等熟悉的特性，指导和标准可能很容易制定，而对于色域面积或色域形状等新特性，则可能需要更多时间，因为业界需要适应新的自由度。

尽管照明行业的许多人都迫切希望看到用于评估显色性的新资源，但这一转变

这一时期没有明确的时间表。如果用户认为 TM-30 适用，它将会被迅速采用。一些制造商已经开始提供 TM-30 信息，规范制定者可以根据任何给定信号源的光谱功率分布 (SPD) 计算出 TM-30 测量值。

结论

TM-30 综合了数十年来对显色性的研究，提供了一套客观的特性，可用于帮助选择最适合应用的光源，以及新型光源的工程设计。它弥补了广泛使用的 CIE CRI 方法的缺陷和局限，同时提供了更详细的补充信息。

要想从 TM-30 中获得最大效益，就必须超越“数字越大越好”的思维定势；最佳光源取决于应用需求，并不总是参考光源。因此，TM-30 遵循了现在解决复杂问题的常见方法

因此，TM-30 采用了一种数据驱动的方法来解决复杂的问题（即描述色彩渲染）。它是一个强大的新工具，同时也尊重并支持设计和工程的作用。

尽管从熟悉和简单的 CIE CRI 过渡到 CIE CRI 需要相当大的努力，但更多用于表征显色性的数据的可用性将使规范制定者、制造商和研究人員受益匪淺。

时间表尚未确定。有待满足的需求包括建立

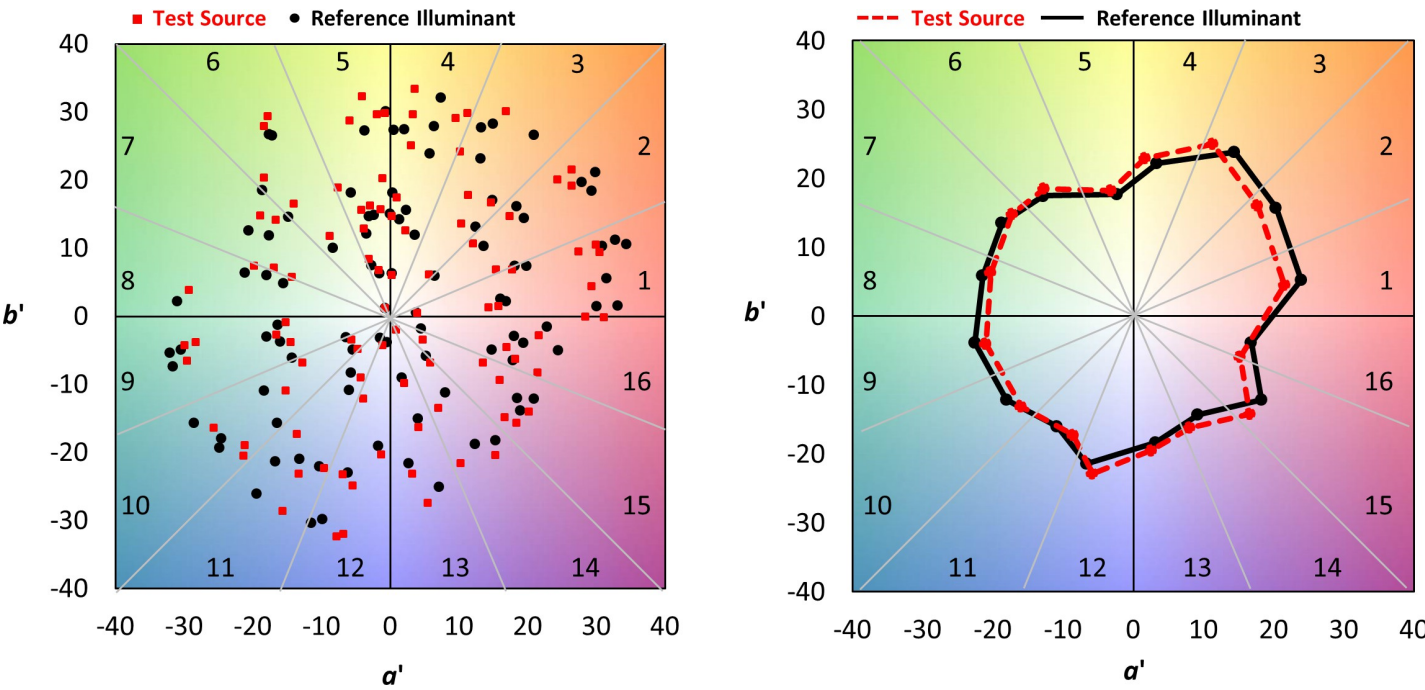


图 4.99 个样本可根据其 (a' , b') 坐标 (左) 分成 16 组。从正 a' 轴开始, 对大小相等的分区进行顺序编号。根据测试光源和参考光源 (右图), 可以计算出每个分区内的平均坐标。 R_g 是两个所得多边形所包含区域的比较。

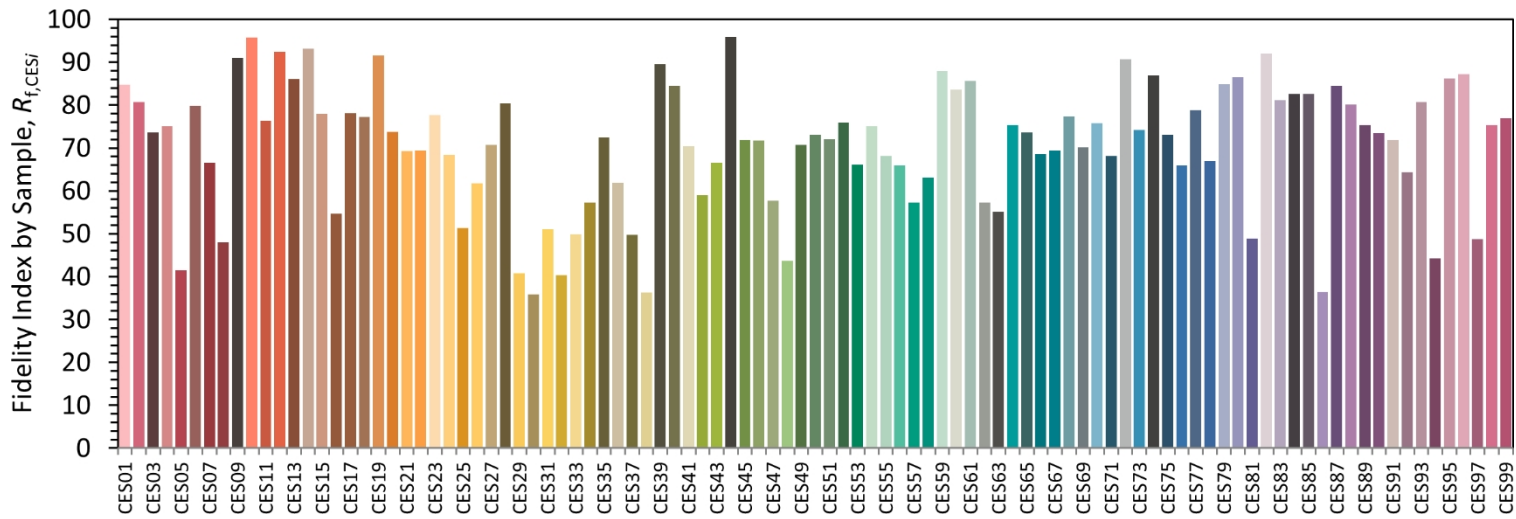


图 5 各个样本的保真度得分 ($R_{t,CESj}$) 可以按色调顺序绘制在一起, 从而为信号源创建一个 "签名"。该特征表示色彩呈现的一致性。也就是说, 色调相似的色彩评估样本相对于参考光源的偏移量是否相同?

此外, 还需要建立一个数据交换的基础设施, 以了解光源和应用之间的关系, 包括规格标准、设计指导和个人经验, 以及如何使用这些措施来匹配光源和应用。

此外, 还需要建立数据交换基础设施。

通过制造商、规范制定者、研究人员和监管机构的合作, 我们的产品将不断增长。

通过制造商、规范制定者、研究人员和监管机构的合作来实现增长。

