

# 教程：使用 ANSI/IES TM-30 方法评估光源再色性的背景和指南

Informa UK Limited

Michael P Royer

本教程文章全面概述了 ANSI/IES TM-30-20 的开发和使用，这是照明工程学会发布的一种用于评估光源再色的美国国家标准方法。自首次发布以来五年，TM-30 越来越多地被照明生产商、规范制定者和研究人员使用，因为与以前用于评估再色的工具相比，其卓越的准确性和所提供信息的范围扩大。充分利用这些改进需要使用该方法的人员更加了解和有意识，本教程整合了一系列信息以协助最佳实践。本文由一系列问题组成，包括有关标准制定、显色基础知识、TM-30 措施及其含义、TM-30 计算细节以及 TM-30 应用的信息。该文档没有提供执行 TM-30 计算的说明，这是免费提供的 ANSI/IES TM-30-20 标准的目的是。

TM-30，显色性、色觉、颜色偏好、CRI学习成果：

## 1. 介绍

ANSI/IES TM-30-20 [IES 2020]，通常称为 TM-30，记录了照明工程学会（IES）按照美国国家标准协会（ANSI）程序开发的一种评估光源再色的方法。自愿性标准规定了一个计算框架，该框架导致了許多测量和图形，这些测量和图形可以一起使用来评估和传达光源的再色特性。它还包括使用该方法创建规范标准的建议以及报告计算数据的指南。

色彩再现，或光源对物体和表面颜色外观的影响，是照明质量的重要组成部分，它是由发射光的光谱产生的，发射光的光谱被表面反射并由人类视觉系统处理。再色性差会使物体的颜色看起来令人不快或扭曲，从而降低环境满意度并可能影响任务绩效。重要的是，发光效率（另一个取决于光源光谱的属性）在色彩还原非常差的情况下会最大化。因此，所有光源开发都必须平衡再色性与竞争性性能特征，因此准确、彻底的还原量化对于优化性能和能源使用至关重要。

量化光源再色性能的尝试始于 1930 年代，当时荧光灯的引入，荧光灯的光谱与当时占主导地位的白炽灯不同。根据早期的一项称为光谱波段法 [CIE 1948] 的建议，国际照明委员会（CIE）标准化了测量和指定光源显色特性的方法，并于 1965 年确定为文件 13。该方法不久后于 1974 年更新为 CIE 13.2，并于 1995 年重新发布为 CIE 13.3 [CIE 1995]。CIE 13.3 方法包括通用显色指数 Ra（俗称 CRI）和一组 14 个特殊显色指数 Ri，其下标表示 14 个颜色样本之一。该方法狭隘地关注色彩保真度——按照现代标准来说很简单——但足以区分当时可用光源的有限数量，因此被广泛用于商业目的。

从 1970 年代开始，来自世界各地的研究人员开发了数十种替代方案，这些替代方案以更植根于人类感知的方式更好地表征色彩再现的各个方面，但科学准确性和商业权宜之计的利益冲突阻碍了许多在 CIE 内部达成共识以推荐新标准方法的尝试 [CIE 1999; 指针 2004; Sandor 和 Schanda 2006]。2000 年代固态照明时代的开始重新引起了人们对该主题的兴趣，并增加了标准化评估光源再色度的更好方法的动力。这种情况最终导致 IES 寻求一种评估光源再色性的新方法的标准。TM-30 的最初开发发生在 2013 年和 2014 年，是 IES 色彩委员会的一项共识驱动的努力，旨在综合多项相关研究工作，并将现有想法组合成一个单一的、有凝聚力的客观信息系统，推荐用于指定和评级色彩再现性能。ANSI/IES TM-30-20 是该标准的最新版本。TM-30 是数十年来开发更好的方法来评估光源再色性的工作的顶峰，但不是结束。它弥补了旧的 CIE 13.3 方法（CRI）的缺陷和局限性，提供了更准确、更全面的信息，更好地满足固态照明时代照明制造商、规范制定者、研究人员和用户的需求。TM-30 现在被广泛使用，是许多其他群体的研究的检查和综合——该方法的新颖性主要在于思想的结合，而不是任何一个方面。除其他细节外，该小组还检查了可用色觉模型的性能 [Luo 等人，2006 年; Sandor 和 Schanda 2006; Luo 等人，2015 年; Smet 等人，2015c; Xu 等人，2016 年; Gu 等人，2017 年; Royer 2017b; Jost 等人，2018 年; Royer 2018; Wei et al. 2019] 以及颜色样本数量和类型的影响 [Davis 和 Ohno 2010; 怀特海德和莫斯曼 2012 年; 大卫 2013; Smet 等人，2013 年; Smet 等人，2015c; Smet 等人，2016b; Royer 2017b; Royer 2018]。在每种情况下，最佳可用选项都被合并到 TM-30 的核心计算框架中，每个决定都通过共识投票做出。第 4 节提供了更多详细信息。TM-30 的各种产出也以现有方法为依据，目的是提供尽可能多的信息。每个输出将在第 5 节中进一步描述。

在 TM-30-15 的首次发布中，该方法仅指定了如何执行计算以确定输出，并排除了关于应设置哪些性能阈值的任何指导。该方法有意侧重于建立可用于进行心理物理实验的量化词汇表，以及对现有和未来产品进行基准测试，同时为用户提供测试该方法的机会。有了新的实验证据，规范指南有可能在 2019 年正式确定，当时附录 E 和附录 F 被添加到 TM-30 中。该指南再次遵循共识过程，利用数据、经验和协商建立适合广泛用户的系统。第 7 节提供了更多信息。

## 2.6 谁是 TM-30 的预期用户？

TM-30 的开发是为了造福照明生产商、规范制定者、研究人员和用户。它旨在用于需要量化再色的所有情况。这包括致力于设计和生产照明设备的企业、指定照明设备的人员、制定性能标准的组织或政府机构、进行实验的研究人员以及尝试选择照明产品的最终用户。

## 2.7 TM-30 是否获得 CIE 批准？

TM-30 由 IES 开发。IES 文档类似于 CIE 文档，可以作为国家或国际标准（如 ANSI 或 ISO（国际标准化组织）的标准开发或合并到这些标准中。CIE 224: 2017 和 ANSI/IES TM-30-20 共享相同的核心计算框架，这意味着有一个这样的框架被两个组织公认为科学准确。截至 2020 年，CIE 仅采用第 5.3 节中描述的保真度指数（Rf）进行准确的科学使用，并且无法就一种或多种侧重于色彩保真度以外方面的色彩再现表征达成一致，也无法对照明实践提出任何新的建议。八年多来，CIE 技术委员会 1-90 一直在尝试解决色

彩保真度之外的措施，但预计不会正式认可任何方法，将选择权留给用户。

## 2.8 TM-30 可以取代 CRI 吗？

CIE 13.3-1995 中定义的 ANSI/IES TM-30 和 CRI 由不同的组织发布，因此一个不能正式取代另一个。对照明产品性能进行评级和指定色彩再现特征的主要方法最终取决于更广泛的照明界。两者本身都不是强制性标准，但它们可以包含在政府或其他组织制定的强制性或自愿性标准中。TM-30 包括一个度量  $R_f$ （见第 5.3 节），它类似于 CRI，因为两者都旨在衡量平均色彩保真度（有关详细比较，请参见第 5.4 节）。IES 建议用户从 CRI 过渡到  $R_f$  [IES 2018]。同时，重要的是要了解 TM-30 远远超出了色彩保真度，可以传达大多数照明应用中应考虑的重要信息。

## 2.9 TM-30 今天是如何使用的？

TM-30 已被照明生产商用于设计新光源，能源效率和政府组织用于制定再色性能规范（见第 7.9 节），照明规范者用于选择产品，并被研究人员用于调查再色质量的视觉评估。TM-30 得到了广泛用户的支持 [Ashdown 等人，2015 年]，预计未来几年将扩大其覆盖范围和使用范围 [Boyce 和 Stampfli 2019]。

## 2.10 TM-30 会随着时间的推移而继续发展吗？

预计 TM-30 将随着时间的推移而发展。这可能包括添加源自同一计算框架的新输出测量值，或随着色彩科学的其他分支的进步而更新底层计算框架。例如，最近提出了一种基于 TM-30 计算框架的新指标，即同色异构体不确定性指数 ( $R_t$ ) [David et al. 2019]，并建立了新的色觉模型 [Li et al. 2017]。目前，没有推荐的符号系统来指示计算中使用的特定版本，部分原因是修订后对值的变化很小，而且总体上是朝着积极的方向发展的。

# 3. 显色基础知识

本节简要概述了与色彩再现相关的色彩科学基础知识。有关更多背景信息，请参阅 David、Smet 和 Whitehead [2019b] 或 Houser 等人 [2016]。Wyszecki 和 Stiles [1982] 提供了其他背景和历史记录。

## 3.1 什么是显色性？

物体或表面没有固有的颜色，而是在可见光谱上反射不同比例的能量。当光源发出的光谱发生变化时，从表面反射的光（到达眼睛的视觉刺激）也会发生变化，从而改变大脑对刺激的解释方式。图 2 和图 3 提供了两个示例，说明使用模拟真实再现条件的数字处理图像来影响外观。IES 和 CIE 正式将显色性定义为“通过有意识或潜意识地与参考光源下的颜色外观进行比较，光源对物体颜色外观的影响”。CIE 还将色彩再现定义为“光源光谱功率分布对物体颜色外观的影响”[CIE 2017]，它提供了限制较少的定义，尽管渲染和再现通常被认为是同义词。

生产商使用评估再色性的方法为光源分配定量评级，并由规范制定者为给定安装建立合适的性能。它们利用标准化参数来促进比较，同时预测未知真实环境中的性能。评

估色彩再现的方法是传达性能的一种方法，而无需直观地评估每个产品应用组合。尽管存在一些替代方法，但评估光源再色的方法通常依赖于三个基本组成部分：

1. 人类平均色觉的标准化模型， 2. 一组标准化颜色样本， 3. 以及定义参考的方案，可以比较给定测试光源的计算颜色。

这样，色彩再现可以纯粹通过数学来确定，即使它是对更复杂问题的简化。为了将再色性建立为光源的属性，必须将其与特定场景和查看器解除关联。也就是说，评估光源再色的方法预测光源的影响，而无需了解将被照亮的特定对象或其排列。一些影响物体外观的已知现象（例如周围场）在整个计算过程中保持不变，因此它们实际上是未解释的。同样，在现有方法中，光的强度（即照度或亮度）被忽略，尽管它可以强烈影响颜色外观 [Hunt 1952; Bao 和 Wei 2019; Kawashima 和 Ohno 2019; Wei 等人，2020 年]，并有可能被整合到规范标准或更先进的方法中。虽然评估光源再色的方法在照明行业中发挥着重要作用，但重要的是要记住，它们不是对特定房间或物体的外观的计算，而是一种有根据的预测。为了了解特定物体在特定观看条件下的颜色外观，使用了颜色外观模型，如 Fairchild [2013] 所涵盖的那样。

评估光源再色性的方法可以侧重于色彩再现的一个或多个方面，包括色彩保真度、色域面积、色彩自然度、色彩偏好、色彩鲜艳度、色度偏移或色调偏移，每一个方面都在后续章节中进行描述。可以采取不同的方法来量化其中一些概念。有关先前提出的再色度量的更多背景信息，请参见 Guo and Houser [2004]、Pointer [2004]、Davis and Ohno [2009] 或 Houser 等人 [2013]。

## 3.2 为什么色彩再现很重要？

色彩再现，尤其是其准确的量化，非常重要，因为它可以影响居住者的健康、任务绩效和能源效率。不同的色彩再现已被证明会影响照明环境的可接受性 [例如，Royer 等人，2018c; Royer 等人，2019d]。其他研究将环境满意度与生产力联系起来 [例如，Veitch 等人，2008 年; Veitch 等人，2011 年]。

从根本上说，提供适当的色彩再现与最大化发光效率是相矛盾的。最大化流明输出表明在 555 nm（名义上是绿黄光）附近最大化能量，但仅针对发光效率进行优化的光源不适合几乎所有视觉任务，并且对居住来说不舒服——低压钠灯就是一个例子。

建立色彩再现的最低性能阈值有助于平衡照明质量与能源效率，通过提供色彩对比度、实现物体识别和创造愉快舒适的居住环境来确保光线适合要执行的任务。这些特性最终可以帮助节能技术通过提高其接受度和使用来减少能源使用。如果没有准确的方法来评估再色性，评估再色性和能效或其他性能特征之间的权衡将更加困难，并且可能导致非优化的解决方案，无法最大限度地提高每瓦特的收益。

## 3.3 什么是色度、CCT 和 Duv？

色度是颜色的数值规范，与亮度（亮度）无关，被定义为 CIE 比色系统的一部分 [CIE 2018; David 等人，2019b]。它的主要用途是确定来自两个或多个光源的光在外观上是否匹配。当两个光谱具有相同的色度坐标、具有相同的亮度并在相同的条件下观看时，它们的感知颜色被预测为匹配；然而，色度没有考虑到眼脑系统的适应过程，这些过程使色觉非线性和上下文依赖性。例如，白炽灯发出的光在单独观看时可能呈白色，但

在与正午日光同时观看时呈淡黄色。重要的是，具有相同色度的两个光源（称为同色异构体）可能具有不同的光谱功率分布，因此呈现的物体颜色不同。

相关色温（CCT）计算为最接近测试源色度坐标的普朗克辐射器的色温。它是在 CIE 1960（ $u$ ,  $v$ ）色度图中计算的，这是它作为测量而开发时的遗产 [Robertson 1968]。它指示表观颜色是较暖（较低的 CCT）还是较冷（较高的 CCT）。对于室内建筑照明应用，光源通常在 2700 K 到 6500 K 之间。重要的是，具有相同 CCT 的两个光源可能具有不同的色度，并且外观不匹配，如图 4 所示。这可以通过一种称为  $Duv$  的补充度量来解决，该度量是 CIE 1960 中光源与最近的普朗克辐射器色度之间的距离的度量（ $u$ ,  $v$ ）色度图 [Ohno 2013] 用于计算 CCT 的同一普朗克辐射器。 $Duv$  传达光的相对绿色度（更多正值）或粉红色（更多负值）。CCT 和  $Duv$  提供了完整的色度规范，其轴与视觉感知的联系更紧密。

### 3.4 如何对色觉进行建模以评估色彩再现？

评估光源色彩再现的框架中最重要的组成部分之一是色觉模型，或表征人类如何看待颜色的数学系统。尽管人与人之间的色觉差异很大 [Asano et al. 2014 [Asano et al. , 2016 [Asano et al. , 2016b]; Murdoch 和 Fairchild 2019]，与其他照明表征一样，使用单一平均表示来评估色彩再现。整个模型有几个重要组成部分，包括颜色匹配功能、解释视觉系统对不同照明的适应的机制（色度适应），以及建立三维坐标系的射影变换和方程组，旨在准确描述感知到的色差。

配色功能是表示人类视觉系统灵敏度的一种方式；它们可以源自心理物理学实验，也是眼睛中负责色觉的三个视锥形感光器的光谱灵敏度的线性变换。这三个功能的集合称为标准比色观察器 [CIE 2018]。颜色匹配函数用于通过积分每个函数的乘积和光谱功率分布来计算三刺激值：1931：2°、1964：10°、2015：2° 和 2015：10° [CIE 2006; CIE 2015; CIE 2018]。根据用于推导的方法和数据以及它们量化的视野，它们略有不同。1931 年 2° 配色函数是计算色度的公认标准，尽管已经提出了改变这一点的建议，并且其他方法（例如 TM-30）使用替代方案（参见第 4 节）。

在评估光源再色的方法中必须解决的一个重要视觉现象是色度适应。色度适应是视觉系统试图适应光的颜色以使其呈现白色并促进颜色恒定的过程，因此物体颜色通常在广泛的照明范围内保持其外观，以协助物体识别和评估 [Smithson 2005; 福斯特 2011]。色彩再现有时被认为是色彩恒定性的崩溃，当变化超过人类视觉系统适应的能力时。发生这种情况至少部分是因为视觉系统具有三个宽带颜色检测器，因此无法区分单个波长。

最后一个关键组成部分是定义从三刺激值派生的颜色坐标，它决定了色彩空间。如图 5 所示，色彩空间中可能的坐标范围形成了一个三维体积，这将在第 3.7 节中进一步描述。许多这样的色彩空间通常基于一组特定的颜色匹配函数进行优化，并具有原生的色度适应变换-已经标准化，包括 CIE  $U^*V^*W^*$ （现在被认为已过时）[CIE 2018]，CIE LAB [CIE 2018] 和 CAM02-UCS [Luo et al. 2006; CIE 2018]。更多背景信息可从 Fairchild [2013] 获得。新的色彩空间不断被提出，包括 CAM16-UCS [Li et al. 2017]。色彩空间的一个重要或定义特征是它的均匀性。均匀性意味着色彩空间中任何给定的欧几里得距离都对应于相同程度的感知色差——Luo 等人 [2006] 提供了不同色彩空间的比较。色差空间通常源自心理物理学实验的大量数据并根据这些数据进行测试，参与者评估了两个颜

色样本之间的差异大小。正如 Smet、David 和 Whitehead [2015c] 所解释的那样，色彩空间的均匀性对于准确表征色彩再现非常重要。

### 3.5 什么是颜色样本？

几乎所有评估光源再色度的方法都基于“颜色样本”。出于再色计算的目的，这些样品不是物理标本，而是光谱反射率函数——定义为在可见光范围内在每个波长反射的光的百分比——对于被测的真实或理论物体。图 6 说明了测量对象、光谱反射率函数和基于估计外观的数字渲染色样。请注意，光谱反射率函数以及渲染的色板具有均匀的颜色，该颜色基于小区域的平均光谱反射率；因此，它们是特定对象的有限表示，其颜色通常在表面上变化。使用光谱反射率函数可以根据光谱功率分布重复计算再色度，而无需对照明样本或物体进行视觉评估或物理测量。

使用颜色样本评估色彩再现的概念至少可以追溯到 1950 年代 [Jerome 和 Judd 1953; 尼克森 1958 尼克森, 1960;;Ouweltjes 1960];在此之前的尝试集中在可见光谱区域内的能量上 [Bouma 1937;CIE 1948 年;绞盘和拉夫 1951 年;巴恩斯 1957]。当时，颜色样本是从孟塞尔库中选择的，因此它们在物理上存在并可用于视觉评估，视觉实验也为新方法和指标的开发提供了信息。虽然拥有物理颜色样本在过去对于方法开发和验证很重要，但如今有更多的可用数据支持色彩空间的均匀性，因此色彩再现方法可以直接依赖模型的准确性，无需物理上可重复的样本。

随着时间的推移，通过改变颜色样本的数量或类型，人们付出了相当大的努力来开发新的颜色样本集 [Opstelten 1980;Seim 1985 因此，光源对一组用于评级产品性能的标准化颜色样本的颜色外观的影响与安装产品环境中物体的颜色外观之间总是存在不匹配 [Royer 和 Wei 2017c]。尽管如此，已经建立了一些重要的理论目标，以帮助确保为方法选择的颜色样品提供最大价值[Smet等人, 2015c]。其中包括以足够的分辨率对可能的颜色进行全部范围的采样，以及考虑图 6 的“特征”。真实对象、表示该对象的色板（小区域内颜色的平均值）以及色板的光谱反射率函数。

光谱反射率的作用使得对光谱功率变化的灵敏度在可见波长上大致均匀。

### 3.6 什么是基于参考的显色性测量？

大多数评估色彩再现的方法，包括 CIE 13.3 和 IES TM-30，都是基于比较相关光源如何呈现颜色与参考条件如何呈现颜色，参考条件通常是数学定义的光源，称为光源，具有与测试源相同的 CCT [Royer 2016]。在其他情况下，参考是所有光源的单个光源，或少量光源。

参考光源通常是 CIE D 系列光源或普朗克辐射器。CIE D 系列光源 [CIE 2018] 是日光的数学表示，在输入色温在 4000 到 25000 K 之间时，使用公式计算。普朗克辐射器，也称为黑体辐射器，是使用基于黑体温度的普朗克定律的公式计算的。

白炽灯丝与普朗克散热器非常接近。

CCT 匹配（即相对）基于参考的方法允许将显色性视为独立于 CCT，因为色度适应机制并不能完全解决由 CCT 变化引起的外观差异 [Pointer 2004;Royer 2016]。例如，对于家居用品店的氛围来说，5000 K 光源在外观上可能太酷了，因此将 2700 K 光源与 5000

K 参考光源进行比较可能不合适。固定参考测量通常会导致不同 CCT 产品的评级存在固有差异。无论人类是否感知到这些影响，它们都会造成混乱，因为不同的 CCT 具有不同的可能范围。

重要的是，根据方法的特点，参考光源的作用可能会有所不同。对于为参考光源分配最大值的方法，如 CIE 13.3，参考作为黄金标准，并变得越来越重要 [Davis 和 Ohno 2009]。对于提供可用于描述与引用偏差的值组合的方法，引用更像是一个锚点或路标，而不是一个理想。在后一种情况下，重要的是参考光源代表一种可以从记忆中回忆起来的共同体验。

基于参考的方法的一种替代方法是直接评估频谱功率分布，正如在遥远和最近的过去多次提出的那样 [Bouma 1937; CIE 1948 年; 柯克帕特里克 2004 年; Holm 等人, 2016 年; Acosta 等人, 2018 年]。另一种选择是检查可以创建的颜色范围，用面积或体积测量，这不需要初始计算的参考，但通常利用参考将输出值缩放到特定范围。有关更多背景信息，请参阅 Davis 和 Ohno [2009] 或 Houser 等人 [2013]。

### 3.7 感知颜色的维度是多少？

鉴于颜色的三色性质，需要三个维度来描述人类对颜色的感知，尽管确切的术语可能因颜色描述模型而异。例如，可以使用色调、饱和度、值（HSV）或色调、色度、亮度（HCL）等对颜色进行分类。图 7 在离散化图中展示了色调、色度和亮度。

色调是一个更精确的术语，指的是人们可能所说的“颜色”；它是红色、黄色、绿色、蓝色以及介于两者之间的色调之间的区别。色相通常被描述为极坐标系中的旋转角度——这称为色相角。亮度是相对于类似照明区域判断的区域的亮度，该区域看起来是白色的。最后，色度被定义为一个区域相对于看起来为白色的类似照明区域的色彩——它可以被认为是颜色的强度。

对象在任何方向上的颜色外观的更改都可能是后果。颜色的一些变化会影响物体检测，增强或掩盖有关物体的信息，例如水果的成熟度。

其他变化会使表面看起来陈旧和暗淡，而不是充满活力或生动。

对于任何给定的颜色样本（或真实物体），可以在所有三个维度上计算颜色外观相对于参考光源的变化。还可以计算颜色偏移的总幅度。

色彩再现的早期概念侧重于将所有色移提炼为一个数字，丢弃有关色移方向的信息。在 1980 年代，一些研究人员提出了至少在某种程度上专注于描述颜色变化方向的新方法，包括 Worthey [1982]、Pointer [1986; 2004]

### 3.8 什么是色彩保真度？

颜色保真度是指由光源渲染的一个或多个颜色与参考光源之间的相似程度。颜色保真度仅描述颜色差异的大小，而不是颜色的不同程度。它通常被表述为平均值，其中一组颜色样本的色差被平均以提供表征光源的单个值。例如，CRI（CIE 通用显色指数 Ra）是根据八个颜色样本的平均色差确定的。（平均差乘以比例因子，然后从 100 中减去。

颜色保真度如图 8 所示，是该领域较旧的概念之一，起源于 1950 年代，并于 1965



年由 CIE 标准化。计算平均色彩保真度的好处是单个数字便于产品比较。主要缺点是它不能传达任何单个色移的大小或方向，并且具有非常不同的单个色移的光源可以具有相同的平均色保真值。CIE 13.3 规定：“颜色变化方向的重要性已得到认可，但未包含在显色指数中”[CIE 1995]。色彩保真度通常被认为是色彩自然性的特征，并被不恰当地用作“整体色彩质量衡量标准”[CIE 2017]，但大多数心理物理学实验发现平均色彩保真度的衡量标准不足以满足这些目的。尽管如此，表征色彩保真度有助于确保与我们预期的颜色相比不会过于失真；如果失真太大，环境可能会不舒服或混乱。然而，具有相同平均色彩保真度的光源可能会使表面显得生动或暗淡、自然或不自然、可接受或不可接受。

颜色样本、色彩空间和参考光源方案会影响颜色保真度测量的准确性和精密度，已经提出了许多变体 [Jerome 1974; Seim 1985 年; 指针 1986; CIE 1999; Geisler-Moroder 和 Dur 2009; Zukauskas 等人，2009 年; Davis 和 Ohno 2010; Bodrogi 等人，2011 年; Smet 等人，2013 年; Smet 等人，2016b]。它们还会影响结果对真实照明环境的适用性。有关这些因素如何影响表征的系统探索，请参阅 Royer [2016Royer [，2017b]] 的文章。

在 2015 年 TM-30 首次发布之前，CRI 是唯一试图量化平均色彩保真度的标准化衡量标准。TM-30 具有平均色彩保真度的度量，即保真度指数 ( $R_f$ ) (见第 5.3 节)，并指定如何计算每个颜色样本的颜色保真度 (见第 5.10 节) 或按色相角度分组的样本的小子集 (局部颜色保真度) (见第 5.9 节)。Rf 也于 2017 年被 CIE 采用。

### 3.9 什么是色域面积？

色域可能意味着不同的东西，具体取决于其具体用途。在印刷和显示行业中，色域是指可以基于油墨或显示原色创建的颜色；也就是说，这些点代表颜色混合的原色。对于显色度量，色域是指一组颜色样本的颜色坐标包围的区域，与可见颜色的数量或范围无关。与其他颜色再现度量一样，颜色样本的行为可以预测光源对真实物体的影响。

与打印或显示器不同，没有不能被光源渲染的物体，只是测试条件和参考条件之间颜色外观的各种差异。色域面积近似于色度的总体变化：一组颜色样本的色相-色度坐标包围的较大区域表示所有色相的色度平均增加。然而，鉴于计算的性质，色域面积不仅受色度变化的影响，还受到色相偏移的影响，尤其是当发生较大的颜色偏移时 [Royer 2018]。图 8 中的图像 A 和 B 分别说明了减少或增加色域面积的效果。

色域面积可以作为鲜艳度的粗略指标，也与颜色辨别有关 [Thornton 1972; Davis 和 Ohno 2009; Houser 等人，2013 年]，视觉清晰度 [Hashimoto 和 Nayatani 1994; Hashimoto 等人，2007 年]，以及颜色偏好 [Hashimoto 等人，2007 年; Rea 和 Freyssinier-Nova 2008; Rea 和 Freyssinier 2010; Liu 等人，2017 年]。然而，较新的研究表明，完全描述这些现象可能还不足以 [Royer 等人，2017 年; Esposito 和 Houser 2017; Zhang 等人，2017 年; Esposito 和 Houser 2019]。与某些色调的参考相比，许多光源会增加色度，但会降低其他色调的色度，这些变化会导致感知差异。图 9 包括三张图像，说明了由不同偏移导致的具有相等色域面积的潜在再色条件。

尽管色域面积测量至少可以追溯到 1970 年代，但 TM-30 的色域指数 ( $R_g$ ) 是目前由照明标准组织正式确定的唯一色域面积测量 (参见第 5.5 节)。其他几个指标，如颜色辨别指数 (CDI) [Thornton 1972]、对比感指数 (FCI) [Hashimoto 和 Nayatani 1994; Hashimoto 等人，2007 年]、色域面积指数 (GAI) [Rea 和 Freyssinier-Nova 2008]



和色彩质量量表色域指数 (Qg) [Davis 和 Ohno 2010] 已被提出。Royer [2018]回顾了计算框架的不同方面，包括颜色样本和色彩空间，如何影响色域面积的量化。

色域面积已被讨论为平均色彩保真度的补充，并且已经描述了双测量系统 [Rea 和 Freyssinier-Nova 2008;Rea 和 Freyssinier 2010;Houser 等人, 2013 年]。颜色保真度量化了颜色偏移的幅度，而色域面积则部分量化了方向。然而，现在已经表明，具有相同平均色彩保真度和色域面积的光源可以以不同的方式感知[例如，Royer等人, 2016]。为了进行完整的表征，需要更多关于不同色调的颜色偏移的信息，而不是用两个平均值所能传达的信息。

### 3.10 什么是色域形状？

随着研究人员对平均色彩再现测量的局限性的了解不断加深，色域形状的概念变得更加突出。自 1980 年代后期以来逐渐发展 [van Kemenade 和 van der Burgt 1988;van Kemenade 和 van der Burgt 1995;van der Burgt 和 van Kemenade 2010;Davis 和 Ohno 2010;de Beer 等人, 2015 年;David 等人, 2015 年;Wei 等人, 2017 年;Royer 等人, 2018b;David et al. 2019]，色域形状是指色相和色度随色调变化而变化的模式，即颜色变化如何随色调角度而变化。它通常以图形而不是数字方式捕获，尽管已经证明该模式可以与多项式方程拟合，并叠加一些可变性 [David, Esposito, et al. 2019]。色域形状很重要，因为它区分了具有相同颜色保真度和色域面积的光源，这些光源以不同的方式呈现颜色，并且可以以不同的方式感知。图 9 中的中心和右侧图像具有相反的色域形状：中间的图像显示蓝色和黄色物体的色度相对于左侧的参考增加，而右侧的图像则增加了红色和绿色物体的色度。与参考条件相比，两者都显示了伴随的色调向色度增加的颜色偏移。

虽然色域形状是一个重要的概念，但很难提炼成一个数字。可以通过对特定色调使用一个或多个色偏值来传达有关色域形状的一些信息。也可以使用适合移位模式的椭圆参数进行量化 [Esposito 和 Houser 2019, 2014]。然而，其他研究表明，有几个因素会影响颜色偏好，包括被照亮的物体 [Lin 等人, 2015 年;Wei 等人, 2017 年;Tang 和 Teunissen 2018]，光照水平 [Ohno 等人, 2015 年;Bao 和 Wei 2019;Wei 等人, 2020 年]，也许还有文化 [Liu 等人, 2013 年;Smet 等人, 2014b;Tang 和 Teunissen 2018]。毫无疑问，个人喜好存在一些差异，就像食物和艺术作品一样。

色彩偏好、色彩自然、色彩鲜艳度不是独立的概念。大量研究表明，在建筑内部通常发现的光照水平下，人类更喜欢并找到更自然的场景，这些场景也被评为稍微更生动——尽管不太生动 [Sanders 1959b;贾德 1967 年;桑顿 1974]

## 4. TM-30 计算框架详细信息

本节介绍 TM-30 所有输出计算通用的底层组件。有关所有计算细节，请参阅 ANSI/IES TM-30-20;本文档不提供执行计算所需的信息。ANSI/IES TM-30-20 可从 IES 网页免费下载。

### 4.1 什么是 TM-30 计算框架？

TM-30 的核心是一个计算框架，这是一组用于计算色移的模型。该框架包括四个组件：CIE 1964 10° 颜色匹配功能、CAM02-UCS 色彩空间、一组 99 个颜色评估样本（CES）以及参考的 CCT 相关定义。所有输出都是使用该框架确定的。计算框架的四个组成部分是独立的，这意味着任何一个组件都可以根据色彩科学的新进展单独更新。这种变化可能会影响产出的价值，但不会改变它们的概念基础。已经做了一些工作来检查不同组件对输出值的影响程度 [Royer 2016[Royer, 2017b[Royer, 2018]]。对于 TM-30 的最终用户来说，没有必要详细了解计算框架;更重要的是了解输出的解释，这在第 5 节中进行了描述。

## 4.2 什么是CAM02-UCS?

CAM02-UCS 于 2006 年首次推出 [Luo et al. 2006;CIE 2018]是基于CIE CAM02颜色外观模型[Fairchild 2013]的色彩空间。在其开发过程中和之后的许多实验中，它已被证明比前身的色彩空间具有更大的均匀性，例如 CIE  $U^*V^*W^*$ （1960）或 CIE LAB（1976），这意味着它可以更准确地映射人类对色差的评估 [Luo 等人, 2006 年;Xu 等人, 2016 年;Gu 等人, 2017 年;Jost 等人, 2018 年;Wei 等人, 2019 年]。提高均匀性可以对所有类型的再色度措施产生重大影响 [Smet 等人, 2015c;Royer 2017bRoyer, 2018]。由于这一改进，TM-30 选择了 CAM02-UCS。之前曾建议使用 CAM02-UCS 作为更新 CRI 的一种方式 [Li 等人, 2012 年]，而无需在 TM-30 中实施其他更改。

CAM02-UCS 的坐标为  $J'$ 、 $a'$ 、 $b'$ ，其中（ $a'$ ， $b'$ ）表征色度平面， $J'$  表示亮度。这些值修改了 CIE CAM02 的感知相关性，以便生成的色彩空间更好地拟合现有的色差数据。底层 CIE CAM02 模型包括许多可调节参数，可用于预测特定情况下的颜色外观。由于色彩再现被认为是光源的属性，而不是整个观看场景，因此这些参数（例如亮度和适应因子）在所有 TM-30 计算中保持不变。高级用户可以通过调整参数来执行“自定义”计算，以更好地捕获特定的观看场景，但这超出了 ANSI/IES TM-30-20 标准的范围。

## 4.3 什么是 99 种颜色评估样本?

99 个颜色评估样本（CES）是真实物体的光谱反射率函数。这些颜色样本或它们的子集用于计算 TM-30 中包含的所有测量值。这组标准化的颜色样本可以实现一致的产品评级，并有效预测光源在安装在真实环境中时将如何影响颜色外观。图 10 提供了颜色样本的大致视觉表示。

专门为 TM-30 开发的 99 CES 是从之前在科学文献中记录的一组 100,000 多个物体光谱反射率测量值中下选的。100,000 个测量值的大型集合被认为代表了可能颜色的范围，但它并不是所有颜色的均匀采样，因为它由几个特定的数据库（例如，花朵、肤色和颜料）组成。因此，建立了一个生成较小的集合的过程，该集合均匀地覆盖了可能颜色的体积，并包括一组平衡的光谱特征。David等[2015]描述的该过程生成了一组大约 4,880个光谱反射率函数，称为参考集。

虽然 4,880 个样本的参考集具有理想的特性，可以作为世界上颜色的平均表征，但一些人认为它太大而无法快速计算。除其他因素外，还建立了正负一分的容差来计算较小的颜色与参考集的平均颜色保真度，以指导进一步减少数量。使用优化程序来建立最终一组样本，即 99 CES。请注意，两个代表人类肤色的反射率函数与更大的皮肤反射率

测量值提供了最大的相关性，被强行放入 99 的集合中。99 CES 根据 IES TM-30-15 的 5000 K 参考光源下的色调角度进行编号，该光源是 5000 K 普朗克辐射和 CIE D50 的均匀混合。

99 CES 代表各种各样的物体，包括油漆、纺织品、油墨、肤色、自然物体（例如食物、花卉、树叶）和塑料。CES 涵盖了广泛的色调、色度和亮度，尽管在建立参考集的过程中排除了一些最饱和和最暗的样品，以确保色差公式的有效性，并确保样品具有典型的建筑环境代表性。尽管如此，图10和图11显示TM-30样品覆盖了颜色体积的色相-色度平面的广泛范围。它们还涵盖了广泛的亮度范围，但没有显示。

TM-30 用户必须记住，任何给定环境中的物体总是在某种程度上与 99 CES 不同。有时，由于空间或场景（例如番茄展示）中色调的平衡不均匀，对特定色调（例如红色）的测量可能会提供比平均值（即平均色彩保真度或色域面积）更有用的信息。由于每个空间都是不同的，并且无法表征平均建筑空间，因此像 99 CES 这样的颜色样本集涵盖可能的颜色范围并且不偏向任何光谱特征，适用于确定光源颜色再现的广义预测。颜色样本集较小、颜色体积采样不均匀或有利于某些光谱特征，更有可能错误地预测真实环境中的性能，并激励光源开发人员进行有针对性的优化；这是对孟塞尔库中用于计算 CRI 的八个柔和颜色样本的普遍批评。

## 4.4 什么是色相角度箱？

为了便于一些 TM-30 输出测量（参见第 5.5 至 5.9 节），定义了 16 个色相角度箱。它们是大小相等的  $22.5^\circ$  扁平色彩空间（CAM02-UCS 的  $a'-b'$  平面）切片。箱从正  $a'$  轴或红色区域开始按顺序编号。4-5 个箱名义上是黄色的，8-9 个标称是绿色的，12-13 个标称是蓝色的，如图 12 所示。箱的精确数量是一个任意选择，平衡了精度和实用性。

每次计算时，颜色样本都会根据参考光源下每个样本的坐标分配到一个箱中。每个箱中有 2 到 11 个颜色样品，根据参考光源的 CCT 而发生变化。图12还显示了 2700 K（普朗克辐射）和 6500 K（CIE D65）两个参考条件下的样品分布。虽然颜色样本的不均匀和不均匀分布乍一看似乎令人担忧，但重要的是要记住，99 CES 是特意选择的，以匹配 4,880 个样本参考集的性能，该参考集对体素化色彩空间进行均匀采样。

图 12.Top: TM-30 中使用的 99 个颜色评估样本的 CAM02-UCS ( $a'$ ,  $b'$ ) 坐标和相关的色相角度箱（虚线，周边编号）。底部：两个示例参考条件的每个箱内颜色样本的分布。

## 4.5 参比光源有哪些？

TM-30 是一种基于参考的方法，用于将测试源与相同 CCT 下的参考光源进行比较。也就是说，每个 CCT 对应于一个唯一但系统定义的参考光源。对于色温为 4000 K 或更低的光源，参考是相同 CCT。At 5000 K 或以上的普朗克辐射器，参考光源来自 CIE D 系列。在 4000 K 和 5000 K 之间，参考光源是普朗克辐射和 D 系列光源的比例混合，每个光源都处于指定的色温。例如，在 4750 K 时，参考光源是 75% 的普朗克辐射（在 4750 K 时）和 25% 的 CIE D4750。

除了混合方面减轻了输出测量值的不连续性外，TM-30 参考方案与 CIE 13.3 中指定的方案相同。有人建议参考应该是所有普朗克辐射或所有 CIE D 系列光源，但实际上这种变

化对输出测量值的影响很小[Royer 2016]。太阳是普朗克辐射器，日光与普朗克辐射的区别只是因为地球大气层会稍微过滤某些波长。

其他人则建议参考来源不应位于普朗克基座上，因为根据一些研究，对  $Duv$  具有负值的非普朗克来源可能被视为更中立或更受欢迎 [Dikel 等人，2013 年;Rea 和 Freyssinier 2013;Smet 等人，2014 年;Smet 等人，2015 年;Ohno 和 Oh 2016;斯梅特 2018]。然而，在此范围内没有定义的具有色度的标准光源，这使得建立参考光谱功率分布变得更加困难。最终，选择参考光源方案（没有对错之分）的影响较小，因为 TM-30 没有将参考描述为理想的光源。

## 5. TM-30 措施及其含义

本节描述了 TM-30 的每个输出，重点是对值的解释，而不是技术备忘录本身中提供的计算细节。有关理想值或目标值的信息在第 7 节中提供。

### 5.1 度量值和指标有什么区别？

术语度量、度量、指数和方法都与量化有关。这些术语的具体定义尚未得到普遍认可，特别是度量和公制之间的区别，其中定义可能会根据不同的来源而颠倒过来。在本文中，度量用于描述客观且可重复的量化，例如颜色保真度、色域面积或色度偏移等颜色偏移的量化。度量用于描述本质上更主观的量化，例如颜色偏好、颜色自然性或颜色鲜艳度。术语指数用于某些特定度量或指标的名称，保留用于基于一组单个数据点或聚合多个指标的更改的量化。股票市场指数就是一个很好的例子，许多色彩再现的量化都被适当地视为指数，因为它们汇总了多个颜色样本的颜色变化。最后，这里使用方法来指代一般评估方法或可以从通用框架生成的度量或指标的集合。也就是说，TM-30 方法包括许多单独的测量，旨在以各种组合使用，以评估和传达再色性能。

### 5.2 TM-30 有多少个输出？

尽管有时被错误地称为只有两个测量（ $R_f$  和  $R_g$ ），但 ANSI/IES TM-30-20 指定了 149 个不同的数字输出测量和一个图形输出。虽然  $R_f$  和  $R_g$  受到更多关注，但 TM-30 的其他部分对于描述和指定再现通常更为重要。这些其他工具，例如 16 个局部色度偏移测量，是 TM-30 与大多数其他评估光源再色方法区分开来的重要组成部分。后续部分将介绍每种类型的输出。图13记录了TM-30的当前范围，而表1提供了TM-30输出的基本概述。

### 5.3 什么是 TM-30 保真指数（ $R_f$ ）？

保真度指数（ $R_f$ ）是衡量平均色彩保真度的 TM-30 指标，描述了测试和参考条件下颜色外观的总体相似性。它类似于 CRI，但使用了更现代的色彩科学，使其更能代表人类感知，并且作为表征光源的工具更易于推广。

$R_f$  平均所有 99 个 CES 的测试条件和参考条件之间颜色坐标差异的大小。此平均差值乘以比例因子，然后从 100 中减去。应用对数变换，使值不低于 0，使总范围为 0 到 100。值 100 表示与参考完全匹配，值越低，与参考相比计算的差异就越大。对于建筑室

内设计，低于 60 的  $R_f$  值通常不被认为是合适的，尽管保真度本身并不一定是应用程序来源适当性的良好指标。在某些情况下，有针对性的偏离参考，例如增加红色与参考的色度，可能是可取的。色彩保真度越高“更好”的旧范式已经成为对复杂现象的过于简单化的方法。

某些颜色样本的渲染可能比其他颜色样本更类似于参考，如图 14 中的二维表示所示，但最终平均值中未传达此信息。

同样，一些色调可以向一个方向移动，而另一些色调可以向相反方向移动，如图 14.No 中的两个示例所发生的那样，无论偏移方向如何，如果平均幅度相同，则  $R_f$  值将相同，如图 14 中的两个示例。这是所有平均色彩保真度度量的实质性限制。请注意， $R_f$  并不是 99 个单独的保真值  $R_f$ ， $CES_i$  的精确平均值，因为对 TM-30 中包含的每个保真值进行了转换，以防止负数。考虑（8 对 99），如对两种措施的系统比较所证明的那样 [David 等人，2015 年;Smet 等人，2015c;Royer 2017b]。

## 5.4 TM-30 怎么样

虽然  $R_f$  的表述与 CRI 具有大致相同的尺度，但各个光源的值通常存在差异。图 15 显示了两个数据集的关系，一个是大约 165,000 个理论白光 SPD [Royer 2019c]，另一个是用于真实照明产品的 1,529 个 SPD，其中一些用于实验中使用的可调系统 [Royer 2020]。对于 CRI 为 80 的 SPD，对于当今存在的光源， $R_f$  和 CRI 之间的差异可能超过 20 分，对于未来可能可用的光源， $R_f$  和 CRI 之间的差异可能超过 40 分——尽管两者相当相关。

由于样本数量少，显色指数不精确，这增加了相对于更全面的颜色样本集的值方差 [Smet 等人，2015c]。鉴于特定的特殊特征受到青睐以及  $R_f$ -CRI 差异对色域形状的依赖性，CRI 也不准确：由于 CIE  $U^*V^*W^*$  的不均匀性，对于增加红色色度的源，CRI 值往往低于  $R_f$  值。也就是说，名义上红色的色度增加在视觉上等于相同颜色的色度减少，将导致 CRI 的更大降低，从而产生系统偏差。这种不均匀性的一个明显表现是  $R_9$  值与 CRI 或其他  $R_i$  值相比的尺度不同。

CIE 承认“ $R_a$  [CRI] 偏离了科学上准确的色彩保真度测量”，并指出“ $R_a$  [CRI] 值并不总是与普通用户的视觉评估密切相关”[CIE 2017]。尽管如此，CIE 没有建议用  $R_f$  代替  $R_a$  [CRI] 来指定再现和评级产品，因为色彩保真度无论量化得多么准确，并不总是与感知的色彩质量相关。相比之下，“IES 建议照明专业人员过渡到 IES  $R_f$ ”来量化色彩保真度，同时还建议“根据具体情况重新评估仅根据平均色彩保真度创建规范的做法，以确定它是否足够……”[IES 2018]IES 还承认，在过渡期间额外提供  $R_a$  值可能会有用。

## 5.5 什么是 TM-30 色域指数（ $R_g$ ）？

色域指数（ $R_g$ ）是相对色域面积的 TM-30 度量，近似于所有色调的色度平均变化。（如第 3.9 节所述，色相偏移也会影响色域面积。计算  $R_g$  首先需要将 99 个 CES 划分为 16 个色相角度箱（参见第 4.4 节），以便可以计算出稳定区域。对每个箱中所有样本的（ $a'$ ， $b'$ ）坐标进行平均，形成一个 16 边形的顶点，用于测试条件和参考条件。 $R_g$  是两个多边形的面积（测试面积除以参考面积）乘以 100 的商。图 16 说明了此计算中使用的区域。

$R_g$  的值范围没有特定的限制，尽管该范围取决于  $R_f$ ：随着平均色彩保真度的降低，色域面积增加或减少的可能性更大。当  $R_f$  约为 60 时， $R_g$  大约介于 60 和 140 之间。大于 100 的值表示色域面积增加，而小于 100 的值表示色域面积减少。 $R_f$  和  $R_g$  之间的关系如图 17 所示。与所有色域面积测量一样， $R_g$  不涉及哪些色调表现出色度变化的增加或减少。

图 16. 色相角度箱平均图示以及用于计算  $R_g$  的比较面积。

## 5.6 什么是彩色矢量图形？

彩色矢量图形（CVG）是定义色域形状的色彩的可视化表示。它基于第 4.4 节中描述的 16 个色相角箱中每个颜色样本计算的平均（ $a'$ ,  $b'$ ）坐标。颜色矢量图形很重要，因为它可以快速传达哪些类型的颜色在测试光源下相对于参考光源具有更多或更少的色度，以及发生色相偏移的位置。

在彩色矢量图中，两个示例如图 18 所示，参考光源由黑色圆圈表示。在 16 个色相角箱中的每一个中，测试源相对于箱中样品的参考创建的平均偏移都用源自箱中心的箭头绘制。箭头的末端连接起来形成一个形状，用红线表示，以表征测试源色域。（请注意， $R_g$  是根据样本的原始坐标计算的，而不是相对于参考的归一化圆绘制的形状。

如果测试源的红线位于黑圈之外，则测试源在该色调范围内增加色度。同样，当测试源的线位于圆圈内时，测试源会减少这些色调相对于参考的色度。非纯径向箭头表示也发生了色调偏移（例如，红色向橙色移动）。尽管它不能提供对微小差异的简单比较或评估差异大小的方法，但颜色矢量图形有助于快速检查光源将如何渲染各种颜色。颜色矢量图形的数值对应物有助于进行详细比较：局部色度偏移、局部色相偏移和局部颜色保真度。

## 5.7 什么是局部色偏（ $R_{cs}$ , $h_j$ ）？

局部色度偏移是特定（局部）色调的典型色度变化的量化。（本地“名称在整个 TM-30 中用于指代特定色调区域的平均值，而不是所有色调的平均值。每个色相角度箱中的平均色偏是通过从颜色矢量图形中计算每个矢量的径向分量来确定的。局部色度偏移值表示为  $R_{cs}$ ,  $h_j$ ，其中  $h$  表示色相角度箱的特定值， $j$  表示色相角度箱的编号。它们以百分比表示，因为色偏的幅度取决于样品的绝对色度。该值的符号指示色度相对于参考是增加（正）还是减少（负），因此度量同时指示大小和方向。图 19 给出了两个示例，它们对应于图 14 和 18 中所示的相同 SPD。典型光源的值

## 5.9 什么是局部颜色保真度值？

局部颜色保真度是特定（局部）色调的典型偏移幅度的量化。它计算为色相角度箱内颜色评估样本的平均颜色偏移，转换后范围为 0 到 100。这些值缩写为  $R_f$ ,  $h_j$ ，其中  $h$  代表色相， $j$  是色相角度箱的编号，从 1 到 16。 $R_f$ ,  $h_j$  值提供比  $R_f$  更精细的信息，这些信息可能与对象颜色所在的特定应用更相关已知。例如，如果红色的保真度非常重要，则可以检查  $R_f$ ,  $h_1$ 。色相角度箱保真度值还可以揭示具有相同  $R_f$  值的源之间的差异，如图 21 所示。重要的是，相等的  $R_f$ ,  $h_j$  值可能是由色度、色调和亮度偏移的各种不同组合引起的。 $R_{cs}$ ,  $h_1$  值为正的光源可以与  $R_{cs}$ ,  $h_1$  值为负的光源具有相同的  $R_f$ ,  $h_1$  值，

如图22所示。

局部色彩保真度值的功能类似于补充 CRI 的 CIE 13.3 的特殊显色指数。例如， $R_f$ 、 $h_1$  与 CIE 13.3 方法中的  $R_9$  具有相同的预期用途。然而，一个关键的区别是，TM-30 版本是少量相似颜色样本的平均值，并且值的比例在所有色调中都是一致的，这使得结果更加普遍并便于比较。

## 5.10 单个样本保真度值是多少？

可以为每个单独的颜色评估样本（CES）计算颜色保真度值。这些值表示为  $R_f$ 、 $CES_i$ ，其中  $i$  是样本的数量。与 TM-30 方法中的所有颜色保真度值一样，可能的范围是 0 到 100。图23说明了这些措施。在极少数情况下，单个样本保真度值可能可用于预测特定对象的显色性，其粒度略大于局部颜色保真度。例如，保真度值与 CIE TCS 9（用于计算 CIE  $R_9$ ）最相关的单个样本是 CES 7。但请注意， $R_f$ 、 $CES_7$  的比例与 TM-30  $R_f$  的比例相同，而不是 CIE  $R_9$  存在的不寻常比例。

## 6. TM-30 计算注意事项

本节详细介绍了 TM-30 中排除的内容以及如何以非标准方式使用它。

### 6.1 IES TM-30-15、ANSI/IES TM-30-18 和 ANSI/IES TM-30-20 之间有哪些技术区别？

在 2015 年首次发布 TM-30 后，CIE 发布了 224: 2017，该框架采用了 TM-30 计算框架，并进行了细微修改。这些修改包括调整比例因子以增加所有颜色保真度值（ $R_f$ 、 $R_f$ 、 $h_j$  和  $R_f$ 、 $CES_i$ ），调整颜色样品在 400-700 nm 之外没有数据时使用的外推方法，以及将参考光源的混合范围从 4501-5499 K 调整到 4001-4999 K。只有比例因子的变化显著影响着任何值，导致保真度值增加——对于常见照明产品，保真度值通常小于 2 分 [Royer 2017b]。ANSI/IES TM-30-18 的发布统一了两个计算框架，更新了 IES TM-30-15 以匹配 CIE 224: 2017 中的计算框架，以便拥有一个全球标准。

ANSI/IES TM-30-18 还提供了有关各种输出测量的更多详细信息和用于呈现数据的推荐布局，但没有添加任何新的输出测量。最明显的变化之一是彩色矢量图形的新格式指南。由于基本上所有输出值都上升或保持不变，因此确定不需要任何系统来识别使用哪个版本的 TM-30 来计算特定值。

ANSI/IES TM-30-20 只是 ANSI/IES TM-30-18 与 2020 IES 在线照明库的发布一起重新发布。

### 6.2 可以使用不同的参比光源吗？

TM-30 规定了给定测试光源的 CCT 必须用于计算的参考光源。定义的引用促进了商业，并且使用指定的引用以外的引用不符合该方法。

尽管如此，指定的参考光源不一定是给定应用最重要的比较点。例如，如果想要渲染绘画中的颜色以匹配艺术家在不同照明条件下绘画时所看到的颜色，则可以使用艺术家的照明条件作为参考，并可以计算自定义度量。更进一步，可以使用绘画中的实际颜



色进行计算，而不是使用 TM-30.It 中使用的通用样品集来执行这些类型的计算，但不应在没有明确区分它们不是标准 TM-30 计算的情况下呈现结果。

### 6.3 可以使用不同的配色功能吗？

TM-30 指定使用 CIE 1964 10° 配色功能。可以将它们换成另一组，但不应使用 TM-30 命名法报告计算，因为它们不会遵循标准化方法。相对于其他组件，颜色匹配函数对输出值的影响往往很小。

### 6.4 可以使用不同颜色的样品吗？

可以使用不同的颜色样本进行自定义计算，但不应使用 TM-30 命名法报告结果值，因为它们不会遵循标准化方法。这种定制计算方法已被遵循，对于理解心理物理实验中的视觉刺激特别有用 [Royer 和 Wei 2017c]。颜色样本集不包括每个色相角度箱中的颜色样本，意味着无法计算某些值，并且必须修改颜色矢量图形。如果对特定调色板感兴趣，则使用自定义颜色样本可能是合适的。

### 6.5 TM-30 输出测量是否可以产生负值？

对于  $R_f$ ， $h_j$  和  $R_f$ ， $CES_i$  中的保真度值，零是下限。尽管不常见，但 CIE 13.3 方法中的值可能是负数，即使零经常被错误地声明为量表的下限。

对于  $R_g$ ，负值是不可能的。对于局部色度偏移和局部色相偏移，负值具有特定含义，如第 5.7 和 5.8 节所述。

### 6.6 TM-30 是否解决白色渲染问题？

TM-30 包括近白色样品，但它没有解决荧光增白剂（白色渲染的典型内涵）的影响，这些增白剂会导致许多白色物体的出现。已经提出了其他方法来解决白色渲染问题。

### 6.7 TM-30 是否解决了光照水平的差异？

TM-30 依赖于 CIE CAM02 颜色外观模型，该模型尽可能地解决了光照水平如何影响颜色感知。然而，输入到 TM-30 计算中的 CIE CAM02 光照水平参数是固定的，以确保所有报告的值在产品之间具有可比性；这是必要的，因为显色性测量表征的是光源，而不是装置。给定光源照射的物体的每种情况都会导致不同的物体亮度，从而影响颜色感知。第 7.12 节提供了有关光照水平如何影响颜色感知的更多详细信息。

### 6.8 TM-30 有色调和色度的度量，但是亮度呢？

TM-30 包括色度偏移、色相偏移和色彩保真度的局部测量，但不包括亮度偏移。虽然局部亮度偏移测量可以很容易地以与其他测量相同的方式定义，但亮度偏移通常被认为不太重要，并且对观察者来说不太明显。请注意，亮度偏移包含在所有颜色保真度的计算中。

## 6.9 TM-30 与光源色度有何关系？

光源色度是光颜色的基本表征，不考虑色度适应。虽然色度适应很强大，但光源的色度（或 CCT 和 Duv）通常仍可由房间居住者在粗略水平上确定，并且会对环境的感知和物体的外观产生一些影响。部分原因是我们通常处于色度混合的环境中，并且经常从一个空间过渡到另一个空间（例如，从外部到内部），这提供了色度的指示。

由于 TM-30 测量基于相同色温下的参考光源，并且由于 CAM02-UCS 中内置的色度适应变换的有效性，因此可以独立考虑显色性和色度。也就是说，TM-30 测量值的范围在不同的 CCT 下不会改变，这比使用旧色彩空间的方法有所改进。最近的研究表明，根据 TM-30 具有等效表征但色度不同的光源在名义上产生相同的还色主观评价[Zhang 等人，2017 年; Royer 等人，2018c; Royer 等人，2019d]]。

## 6.10 TM-30 可以用于普朗克基因座以外的源吗？

TM-30 适用于所有标称白光光源。这个定义有些宽松，但至少包括 ANSI C78.377 [NEMA 2017] 中定义的区域。限制因素是人类视觉在色彩上适应新白点的范围; 在极端情况下，计算值可能不太可靠或意义较小。尽管如此，由于使用了 CAM02-UCS，TM-30 比旧方法（例如 CRI [CIE 2017]）提供了更准确的非普朗克光源预测。对于距离普朗克基因座较远的光源尤其如此（例如， $Duv < -0.01$ ）。

## 6.11 TM-30 能否帮助确保光源在视觉上匹配？

灯具孔径本身之间的视觉匹配主要根据色度和亮度来确定——尽管色度规范系统并不完善，这可能会导致意外的不匹配。如果关注的是不同光源下匹配的照明物体，TM-30 可以提供信息。为了帮助实现多色场景中对象的视觉匹配，至少应该比较  $R_f$ 、 $R_g$  和  $R_{cs}$ ， $h_1$ ，尽管其他参数会有所帮助。没有关于在尝试创建匹配时要考虑多少或哪些度量或其相关容差的具体指导，特别是考虑到对上下文的严重依赖。

## 6.12 有多少点的差异是明显的？

没有数字代表  $R_f$  或  $R_g$  差异可显著性的通用阈值。这是因为两者都是平均度量，其中不同的单个颜色偏移可能导致相同的结果值。也就是说，具有相同  $R_f$  值或相同  $R_g$  值的两个光源不一定会为它们所照亮的的一个或多个对象产生相同的颜色外观。即使组合在一起，具有相同  $R_f$  和  $R_g$  值的两个光源也不总是产生相同的视觉体验 [Royer 等人，2017 年]，即使所有其他非再色系数保持不变。同样，没有数字可以确保这两个指标中的任何一个都存在视觉差异，但大约 5 个点的差异通常被认为是有意義的，因此两者在大多数情况下可能会导致明显的差异。

对于量化幅度和方向的度量（如局部色度偏移或局部色相偏移），定义明显的差异更容易，但此类值仅在与特定查看上下文相关联时才相关。当亮度、场景构图或观看条件发生变化时，明显的差异程度也可能发生变化。例如，训练有素的观察者并排评估两个色块，可能能够检测到比建筑空间中典型的建筑物居住者小得多的差异。也不可能在不影响相邻值的情况下仅调整一个本地值。在典型应用中，轶事经验表明，在适当的视觉目标下，3%（局部色偏）或 0.03（局部色相偏移）的差异可能会很明显。

## 6.13 TM-30 是否包括颜色偏好、颜色自然度或色彩鲜艳度的指标？

根据设计，TM-30 不包括任何主观色彩再现质量的单数指标，例如偏好、可接受性、自然性或鲜艳度。做出这一决定是因为主观品质更难量化并涉及个人判断力。此外，当值离最大值较远时，当渲染颜色非常不同的两个光源可能被评定为相同时，所有单数平均色彩再现指标的信息量都会变得较少。这一点尤为重要，因为主观评价可能受到许多因素的影响，包括照度水平、场景构图、照明应用、文化或个体差异。当隐藏在单个数字后面时，这种细微差别就会丢失。有关这些因素的更多信息，请参见第 7.12 节。

没有用预定义的指标来总结主观品质，而是建立了多度量规范标准来解决颜色偏好/自然性/可接受性、色彩鲜艳度和色彩保真度（见第 7.3 节）。也就是说，这些品质是通过应用 TM-30 提供的目标量来解决的。规范标准方法提高了透明度，并增加了规范制定者和产品开发人员自行决定的机会。值得注意的是，现有的推荐标准适用于照度在大约 200 至 700 勒克斯之间的多色环境，尽管可以使用通用构建块集 TM-30 为任何情况制定标准（参见第 7.10 节）。

## 6.14 如何计算或访问 TM-30 数据？

TM-30 是根据光谱功率分布计算得出的，该分布是作为典型光度测试的一部分进行测量的。因此，TM-30 不需要除了已经对照明产品进行的测试或测量之外，例如 ANSI/IES LM-79-19 测量方法 [IES 2019] 中规定的测试或测量，并且通常将 TM-30 值包含在光度测试实验室提供的报告中。许多 TM-30 输出测量包含在 ANSI/IES TM-33-18 中，灯具光学数据电子传输标准格式 [IES 2018b]，它提供了对熟悉的 .iesfile 的更新。同样，使用手持式光谱仪可以轻松测量光谱功率分布，其中许多现在包括设备内或随附软件中 TM-30 的本地计算。

许多制造商将 TM-30 数据作为标准产品规格的一部分提供。如果不是直接发布，制造商应该能够在要求时提供 TM-30 数据。如果没有直接提供，TM-30 中描述的产出测量可以使用市售软件或 IES 随技术备忘录提供的免费 Excel 计算器工具进行计算。目前正在开发一种基于网络的工具。DesignLights 联盟合格产品列表发布了截至 2019 年所包含产品的 TM-30 数据。

## 7. TM-30 的应用 7.1 TM-30 的最佳值是什么？

在 TM-30 中包含的所有度量中，最大值不一定是最佳值。在某些情况下，最大化色彩保真度是最合适的目标。在其他情况下，增加色度（需要较低保真度）是更合适的目标。简而言之，价值观的最佳组合取决于情况以及个人喜好。

### 7.2 使用 Rf 和 Rg 就足够了吗？

任何平均度量的局限性是有多个组合可以产生相同的值。例如，一个源可以渲染高保真度的红色，但不能渲染蓝色，而另一个源可以渲染高保真度的蓝色，但不能渲染红色，两者的平均性能相同。即使两个光源具有相同的 Rf 和 Rg，它们也可能被不同地感知，因为它们以不同的方式扭曲不同的色调（参见第 6.12 节）[Royer 等人，2017 年]。

因此，将颜色矢量图形（Color Vector Graphic）与局部色度偏移（Local Chroma Shift）或局部色相偏移（Local Hue Shift）值一起使用，可以确保更恰当地传达性能。当然，在某些情况下，再色性不是关键的设计考虑因素，或者平均色彩保真度是关键因素，除了  $R_f$ （和  $R_g$ ）之外的额外细节可能没有必要。在大多数通用建筑照明应用中，四个值（ $R_f$ 、 $R_g$ 、 $R_{cs}$ 、 $h_l$  和  $R_f$ 、 $h_l$ ）将提供足够的信息来预测颜色偏好、色彩鲜艳度和色彩保真度。

### 7.3 TM-30 是否提供规范指导？

2019 年，TM-30 在两个附件中添加了规范指南。附录 E 提供了使用 TM-30-18 中定义的措施指定光源再色性的指南，其中包括一个表，用于实现不同的目标，称为设计意图。附件 F 提供了支持这些建议的额外背景和证据。

除了关于可能影响规范标准选择的因素的一般指导外，附录 E 还为具有三个优先级（即标准限制性）的三个设计意图提供了推荐的标准，这些标准适用于典型的室内光照水平（200-700 勒克斯），当照明空间具有多种颜色时。设计意图包括：

- 颜色偏好（P）：旨在创建一个令人愉悦、自然的环境。颜色偏好可能是零售、办公室、酒店或住宅照明应用中的主要色彩再现设计意图。
- 色彩鲜艳度（V）：旨在创建一个充满活力的场景，无论它是否自然。色彩鲜艳度可能是特定娱乐、展示或零售照明应用中的主要色彩再现设计意图。
- 色彩保真度（F）：旨在相同的照度水平下实现与参考光源相似的颜色外观。色彩保真度可能是制造、医疗、色彩匹配或色彩再现照明应用中的主要色彩再现设计意图。

每个设计意图都包括三个优先级——级别 1-3，其中 1 是最高或最严格的，这表明标准的严格性。较高的级别增加了实现设计意图的可能性，而较低的级别提供了考虑其他考虑因素（例如能源效率）的灵活性。

图 24 显示了首次在附录 E 中发布的推荐再色规范标准的完整矩阵。

每个规范包括一到三个措施。所有措施都有一个下限，并且为颜色偏好规范的  $R_{cs}$ 、 $h_l$  添加了上限。由于不同度量之间的关系，其他上限是隐式的。为了满足规范，必须满足单元内的所有标准。设计意图中的优先级是嵌套的，因此满足较高优先级规范的任何光源也将满足同一设计意图的较低优先级规范。

九个单独的规范中的每一个都可以用一个结合设计意图和优先级（例如 P1）的两个字符代码来表示，如图 24 所示，如果给定的设计意图不需要任何要求，可以使用破折号代替优先级，如 P- 所示。这些代码提供了一种方便的简写，旨在简化基于 TM-30 的显色规范的沟通。

### 7.4 TM-30 附录 E 的不同规格可以组合吗？

自定义再色度规范的一种策略是组合两个或三个设计意图中的单个规范。例如，可以指定光源必须同时满足 P3 和 F3。

在本例中，新的复合规范将是  $R_f \geq 85$ 、 $R_g \geq 89$ 、 $-12\% \leq R_{cs}$ 、 $h_l \leq 23\%$  和  $R_f$ 、 $h_l \geq 85$ 。

复合规范包括每个措施的最严格标准。组合规范是一种承认多个设计意图对于给定

情况很重要的方法。

## 7.5 附录E推荐规格可以用于产品评级吗？

与每个规范关联的代码可用作产品评级和识别系统。这是一种区分产品性能的便捷方法，无需了解 TM-30 措施背后的细节。建议提供所有三个设计意图的代码，例如 P3 V-F3 或 P1 V3 F-，以便呈现一致且完整的图片。

虽然规范代码是一个有用的简写，但不应将其视为基础措施的数值数据的替代品。具有相同名称的两个光源可能看起来不同，并且三个优先级是一个相对粗略的细分。

## 7.6 TM-30 附录 E 规范有哪些组合可能？

并非三个设计意图之间的 TM-30 规范的每种组合都是可能实现的。例如，不可能实现 P1 V1 F1。这是一个合乎逻辑且预期的结果，因为最大鲜艳度与参考不太相似，并且在典型的建筑照明应用中不太可能成为首选或自然——即使它在某些情况下是一个合适的目标。以下组合是可能的：每种组合的适用性由用户、规范者或生产者自行决定。

## 7.7 附件E的标准是如何制定的？

附件E中的建议标准是通过基于协商一致的过程制定的，通过评估当前的研究并考虑生产者和规范制定者的经验。来自最近几项大规模研究的数据 [Royer et al. 2017[Royer et al. , 2018c[Royer et al. , 2019[Royer et al. , 2019d;;Zhang 等人, 2017 年;Esposito 和 Houser 2019] 是主要来源，如附件 F 中所述，但过去几十年的数十项研究为讨论提供了信息。最终，基于共识的结果试图平衡特异性与可用性，从而创建适当的粒度水平。持续的研究和经验可能会导致未来建议的完善，并且有可能添加更多的设计意图。

## 7.8 为什么 TM-30 关注规范标准而不是单数指标？

过去关于色彩再现的大部分工作都集中在为产品开发单数字评级系统上。这仍然是一种可能性——即使现在要求的特异性有所提高——但需要几个单数指标来涵盖偏好、生动度和其他品质。例如，可以通过使用适合规范标准中包含的相同度量的回归模型来开发此类指标，例如 TM-30 颜色偏好标准的  $R_f$ 、 $R_g$  和  $R_{cs}$ ， $h1$ 。然而，这种方法并没有得到 IES 色彩委员会的青睐。

当与单数度量的理想偏差增加时，度量值会降低，但下降的原因并不明显，因为多个因素在起作用。例如，如果使用  $R_f$ 、 $R_g$  和  $R_{cs}$ ， $h1$  从实验数据中构建颜色偏好模型，则不清楚哪些变化导致了较低的值，并且具有不同特性的多个光源可以评定为相同。TM-30 推荐的规范标准速记符号也具有此限制，但速记代码并不旨在取代大多数用途中基础指标的报告。

另一个重要问题是，考虑到所有可能影响感知色彩再现质量的因素，回归模型和基于它们的单数指标意味着不存在的精度。人们通常认为，微小的差异可能会产生重大影响，尽管许多实验中此类模型的相关系数仅表明中等预测能力。隐含的精确度和潜在因素的模糊性也使情况调整变得更加困难，而规范标准呈现出适当的粒度，并且可以轻松组合和修改。

## 7.9 还有哪些组织使用基于 TM-30 的规范？

一些组织已经采用了基于 TM-30 的再色规范：

- DesignLights 联盟的技术要求 V5.1 对室内产品（工矿除外）采用 P3 规范和 P3 规范的修改版本，室外和工矿产品的  $R_{cs}$ ,  $h1$  下限降至 -18%。
- ANSI/ASHRAE /USGBC/IES 189.1-2017，高性能绿色建筑设计标准使用 P2 V-F3 的组合规范。
- WELL 建筑标准 V2 包括通过修改版本获得资格的途径 P1 规范，其中最低  $R_g$  水平从 95 提高到 100。本规范是在 TM-30 附录 E 发布之前制定的。循环空间规范是 P2 规范的修改版本。

- 美国国防部军事医疗设施设计统一设施标准规定了  $R_f \geq 80$ 、 $97 \leq R_g \leq 110$ 、 $-9\% \leq R_{cs}$ ,  $h1 \leq 9\%$  和  $R_f$ ,  $h1 \geq 78$ 。该规范也是在 TM-30 附录 E 发布之前制定的，依赖于先前发现适合该应用的产品的基准测试。

除了 ANSI/ASHRAE/USGBC/IES 189.1 之外，还提供使用 CRI 进行认证的途径，从而有助于过渡到更合适的规范。随着时间的推移，预计更多的政府和能效组织将继续采用并专门使用 ANSI/IES TM-30-20 规范。

### 7.10 TM-30的定制规格书可以写吗？

虽然附录 E 中的推荐规范（参见第 7.3 节）对许多场景都很有用，但也建议说明制定者制定独特的规范来满足其精确目标。这些可以是现有推荐规格的组合，也可以是针对安装量身定制的全新版本。例如，当一个已知物体被照亮时，应该考虑使用与物体色调相关的度量的规格，因为它们比一般度量更有信息量。如果照度低于 200 勒克斯或高于 700 勒克斯，也可以这样做。

## 7.11 如何使用TM-30建立自定义再色规范？

过去的再色范式只是在再色性更重要的情况下指定更高的 CRI 值。由于有机会使用 TM-30 提供的大量信息来针对特定结果，因此在建立规范标准时需要采取更深思熟虑的方法。以下是一组建议提出的问题：

1. 被照亮的场景是什么？存在哪些对象，它们的属性是什么？重要的是要知道特定的色调是否重要，以及人们的皮肤是否会被照明渲染。预期的视觉体验是什么？目标是使照明环境中的颜色显得暗淡、自然、生动、扭曲还是其他什么？将此视为概念设计；它会在很大程度上受到过去的经验和说明者的意图的影响——没有正确的答案。TM-30 的哪些措施可用于为被照明的特定场景实现预期效果？这需要对这些措施及其含义有一般的了解，这在 TM-30 附件 E.4 中也有规定。还有哪些其他照明性能方面很重要，例如能源效率？5. 与其他性能方面相比，实现所需的色彩再现效果有多重要？如果色彩再现更重要，则需要更严格的标准。

结合上述问题的答案，应该能够确定适当的措施和相关的阈值，以达到预期的效果，同时平衡相互竞争的需求。然而，这确实需要知识和经验，这可能需要时间来获得。一种可用于理解不同色彩再现效果的工具是光谱可调光源，它可用于模拟不同的条件并直观地体验结果。

## 7.12 哪些因素会影响色彩还原感知和规范标准？

除了设计意图和优先级（参见第 7.3 节）之外，还有许多因素可以告知色彩再现规范标准，包括光线水平、对象、场景构图、照明应用、文化偏好、观看人群和个人偏好。其中一些因素已经得到了很好的研究，而另一些因素大多仍然是假设的。

强烈影响颜色感知的一个因素是光照水平 [Hunt 1952; Ohno 等人, 2015 年; Kawashima 和 Ohno 2019; Bao 和 Wei 2019; Wei 等人, 2020 年]。随着光照水平的增加，对增加饱和度的偏好降低，因此在 5,000 勒克斯或更高时，相对于参考的色度没有增加是首选 [Bao 和 Wei 2019]。同样，为了在非常低的光照水平下实现最大偏好，例如在博物馆中可能发生的那样，需要更大的色度增加。因此，可能需要根据预期的照度调整显色规范标准。这也是为什么 TM-30 附录 E 中推荐的规范标准包括低（200 lux）和高（700 lux）照度限制。

另一个重要因素是被照亮的对象，包括对象的颜色属性以及场景中单个对象的相对重要性。大量文献支持名义上红色物体的心理重要性 [Elliot 和 Maier 2014]，这些物体已被证明对多色环境中的色彩再现感知影响更大 [Rea 和 Freyssinier 2010; Wei et al. 2016; Wei et al., 2017; Royer 等人 2017; Royer 等人, 2018c; Royer 等人, 2019d; Wei 和 Houser 2017b]。这支持在大多数情况下明确指定红色的再现颜色，但在某些情况下，另一种色调将是最重要的；例如，照亮典型的树叶或公司徽标。还证明，场景构图可以影响色彩再现的主观评价 [Lin 等人, 2015 年; Wei 等人, 2017 年; Tang 和 Teunissen 2018]。请注意，场景合成经常与照明应用混淆；没有研究检查过具有相似物体颜色分布的不同照明应用。

与感知的色彩再现质量关系不太确定的一些因素包括观察者变异性和文化。虽然色觉的个体差异可能会影响对色移的客观评估 [Murdoch 和 Fairchild 2019]，但尚不清楚这些差异是否表现在现实环境中的不同偏好或其他主观评估中。同样，关于文化或地区差异在色彩再现感知中的作用的证据有限且相互矛盾 [Liu et al. 2013; Smet 等人, 2014b; Smet 和 Hanselaer 2015b; Tang 和 Teunissen 2018]。说明符最适合了解当地偏好。

### 7.13 消费者如何使用 TM-30?

虽然消费者和其他最终用户当然可以看到再色在建筑环境中的效果，但他们通常缺乏技术专长来理解评估光源再色的方法。即使是像 CRI 这样的简单措施也经常被误解；例如，CRI 有时被错误地认为表示准确呈现的颜色百分比。

预计普通消费者不会理解 TM-30 计算框架的复杂性，甚至不会理解产出度量的含义。如果没有详细信息，附件 E 推荐的规范仍可用作分类识别系统，允许消费者从有限范围的选项中进行选择。这种方法还将允许消费者识别性能相似的产品来替代他们满意的现有产品——尽管特异性在低优先级时确实会降低。这一变化将需要持续采用 TM-30 并在产品包装上提供 TM-30 规范代码。

### 7.14 TM-30 规范与基于 CRI 的规范相比如何？

多年来，再色规范依赖于 CRI，最低标准范围为 70 到 95，具体取决于应用 [Royer 2019]。这些标准最初是为了区分现有灯类型（主要是不同类型的线性荧光灯）而建立的。区分阈值与当时市售灯的有限范围的用户体验一致，但随着光源光谱功率分布的可变性和再色性标准所寻求的特异性的增加，已被证明存在问题。最近，CRI 经常被 R9 补



充，试图解决红色色调的出现，尽管这并不能有效解决这个问题，因为两个具有相同红色保真度的光源可以以非常不同的方式呈现红色物体（见图22）。

基于 CRI 的标准对最终用户的各种误解与颜色自然性、可接受性、偏好或颜色质量的某些总体指示有关，尽管最初将 CRI 作为颜色保真度的衡量标准 [CIE 2017]。对于所有这些解释，当光谱功率分布更加多样化时，基于 CRI 的标准已被广泛证明表现不佳，尤其是在实验室实验的情况下 [CIE 2007;Wei 等人，2014 年;Royer et al. 2016Royer et al.，2018cRoyer et al.，2019d;;Zhang 等人，2017 年;Esposito 和 Houser 2019;Royer 2019 年;Wei 等人，2019 年]。这个问题是“由于 CRI 作为色彩保真度指数的预期作用不准确；其次，来自与感知相关的色彩质量效果，超越色彩保真度”[CIE 2017]。

随着色彩再现研究的进步，很明显，色彩保真度只是光源是否适合给定应用的部分指标。基于 CRI 或 CRI 和 R9 组合的现有规范通常会取消现有和理论产品的资格，这些产品被看好，并且不能消除所有可能评估不佳的条件 [Royer 2019;IES 2020]。与生动性本质上没有关系。即使色彩保真度是设计意图，CRI 作为色彩保真度度量的不准确性和不精确性使得在考虑当前或未来的各种光源时依赖它的标准变得不那么有效。

考虑到所有这些因素，不建议通过简单地将 CRI 阈值转换为 Rf 阈值来将基于 CRI 的现有再色标准转换为新方法 [IES 2018]。相反，用户应该了解具体的期望结果或主要考虑因素（设计意图），然后利用 TM-30 中的相关措施来确定给定产品的适用性。

## 7.15 当前产品在附件 E 推荐规范标准中处于哪些位置？

市售 LED 产品符合 TM-30 附录 E 推荐规范标准的所有类别。这些类别中的产品数量不相等，这是许多因素的结果，包括需求和其他性能参数的权衡。这至少部分是围绕 CRI 及其通用规范标准开发的结果。

许多当前的 LED 产品旨在以最有效的方式满足  $CRI \geq 80$  标准（能源效率计划激励的特别常见的阈值），这导致红色度降低 [Royer 2019[Royer, 2019b;;IES 2020]。在制定 TM-30 附录 E 规范时，考虑了如此大比例的产品，并且 P3 标准被定义为包括绝大多数这些产品。

颜色偏好设计意图的优先级较高的大多数产品同时具有更高的颜色保真度——大多数被设计为  $CRI \geq 90$  或  $CRI \geq 95$ 。然而，正在设计的新产品利用了 TM-30.It 提供的额外特异性，希望 TM-30 能够促进产品供应的多样性增加，以便规范制定者和最终用户可以选择最能满足其需求的产品。表 2 提供了从业者可能熟悉的几个示例光源的关键性能数据。（具体值可能无法代表系列中的所有产品。

2014 年发表的一项实验结果 [Wei 等人] 提供了一个例子，说明过去基于 CRI 的再色度规范标准可能如何影响当前可用的产品。实验比较了两盏灯，一盏 CRI 为 78，但 Rf 约为 84，另一盏 CRI 为 86，Rf 约为 84。色域形状各不相同，CRI 低的灯增加了红色的色度，而另一盏灯则降低了红色的色度。显色指数较低的灯是首选，但不符合显色指数  $\geq 80$  标准，因此不符合能效组织提供的许多激励措施，并且推广起来更具挑战性，可能会阻碍将此类产品推向市场。同时，两盏灯的 Rf 值相同。在此示例中，CRI 作为颜色保真度的衡量标准和颜色偏好的衡量标准都失败了。

## 7.16 为什么应该使用 TM-30 代替其他替代品？

在过去的 50 年里，已经提出了许多色彩再现指标，这些指标可以比使用 CRI 的现有做法提供好处，现在包括 TM-30。然而，长期以来，照明生产商派系一直抵制摆脱 CRI [CIE 1999; 指针 2004; Sandor 和 Schanda 2006]。可能有人会疑惑，为什么这次会有所不同。

TM-30 与其他提案之间的主要区别之一是，TM-30 是唯一通过基于共识的流程开发的方法，并在过去 45 年中被推荐给照明标准组织广泛使用。从概念上讲，TM-30 的独特之处在于它专注于提供大量科学准确的信息，而过去的提案通常侧重于以下三个选项之一：1. 创建改进且更准确的色彩保真度测量。著名的例子包括 R96a [CIE 1999]、CQS Qf [Davis 和 Ohno 2010]、CRI-CAM02UCS [Li et al. 2012] 和 CRI2012 [Smet et al. 2013; Smet et al., 2016b]。2. 创建单数字颜色首选项或整体质量指标。著名的例子包括奉承指数 [Judd 1967]、颜色偏好指数 [Thornton 1974]、对比感指数 [Hashimoto 和 Nayatani 1994; Hashimoto 等人, 2007 年]、CQS Qa [Davis 和 Ohno 2010] 和 MCRI [Smet 等人, 2010 年; Smet 等人, 2011 年; Smet 和 Hanselaer 2016]。3. 创建扩展 CIE 13.3 方法的多测量系统。著名的例子包括 A 类 [Rea 和 Freyssinier-Nova 2008; 雷亚 2010; Rea 和 Freyssinier 2010] 和基于 CRI 的再色属性 [GLA 2018]。

与原始 CIE 13.3 方法相比，这三种路径都提供了优势。例如，当颜色保真度是主要色彩再现目标时，更准确和精确的颜色保真度量可能会有所帮助，而当颜色偏好是目标并且应用程序合适时，单数颜色偏好指标可能会很有用。然而，这两种方法都无法灵活地解决多种设计意图和不同的照明情况。

多测量系统可以灵活地解决更多的设计意图和不同的照明情况，但当基于 CIE 13.3 时，它们也无法提供精确和准确的结果，因为它们使用了过时的色彩科学。在某些情况下，这些限制可以克服，例如在考虑特定的设计意图并使用回归模型评估有限范围的现有光源时，这些回归模型结合了测量并包括红色色偏以补偿  $U^*V^*W^*$  的不均匀性。在这些情况下，该方法的性能似乎与 TM-30 几乎相同。然而，如果改变设计意图或扩大所考虑的光源范围，则不精确性和实用性问题可能会变得明显。例如，使用基于 CIE 13.3 [即 GLA 2018] 的多测量系统无法复制 TM-30 附录 E 的规范，因为 CIE  $U^*V^*W^*$  的不均匀性会引起所包含的测量之间的相关性，而这些测量值之间不存在基于统一色彩空间的测量值之间不存在；因此，创建等效规范将需要非独立的规范标准或牺牲系统的精度，如图 25 所示，以 P2 规范为例。如果使用基于度量之间相关性的规范，则许多 P2 源将不再符合条件，而如果建立新的规范值以包括所有 P2 SPD，则许多不符合 P2 的 SPD 将符合条件。

总是可以说，更多的改进是可能的，但 TM-30 提供了更好的精度、准确度和灵活性，并具有通过提供更有针对性的结果来提高色彩质量的能力。

#### 7.17 TM-30 是否针对特定物体的外观？

评估光源再色性的标准化方法通常可以预测颜色外观，但它们并不是为了准确表征特定物体在给定照明和观看条件下的外观。评估光源再色性的方法被简化以促进商业，并且不考虑颜色感知的重要部分，如环绕条件或照度。为了更准确地预测已知物体，使用颜色外观模型（例如 CIE CAM02）是更好的选择。对于最复杂的情况，视觉评估是不可替代的。

#### 7.18 TM-30 如何影响能源效率？

能源效率和再色性之间的关系已被广泛研究 [Zukauskas 等人, 2002 年;大野 2005 年;Schubert 和 Kim 2005 年;Protzman 和 Houser 2006 年;He 和 Yan 2011;Chalmers 和 Soltic 2012;Zhong 等人, 2012 年;Soltic 和 Chalmers 2013, 2018;G.X.He andTang 2014, 2014b;Bulashevich 等人, 2015 年;David 等人, 2015 年;Dai 等人, 2016 年;Zan 等人, 2016 年;Zhang 等人 2017b, 2017c, Royer 2019b]。这是一个需要考虑的重要权衡, 因为在不限制色彩再现的情况下最大化发光效率会导致视觉环境不佳并降低色彩任务的视觉性能。与过去表征再色性的单数方法相比, TM-30 与光谱效率 (更具体地说, 辐射的发光效率) 之间没有单一关系 (或帕累托边界)。已经探索了单个 TM-30 测量和特定多测量组合 (如 TM-30 附录 E 规范) 的连续值范围内的最大可能光谱效率 [Royer 2019b]。正如预期的那样, 提高颜色首选项或颜色保真度设计意图的优先级会降低最大可能的效率 (从而降低效率)。然而, TM-30能够纵色彩质量, 而不会简单地提高色彩保真度 (这与光谱效率降低有关), TM-30提供了一个机会, 可以指定更合适的色彩再现, 同时减少能量损失。

重要的是, 光谱效率只是发光效率的一个组成部分。准确、精确地评估光源再色的方法, 结合对再色和光谱效率之间关系的了解, 有助于提高电转换效率。具体来说, 优化光谱的识别可以为发射器开发提供信息, 从而产生更有效的产品。

## 8. 结论

几十年来, 人们已经认识到准确量化和有用地总结色彩再现的必要性。一个重要的转折点是荧光灯的可用性, 与现有的白炽灯相比, 荧光灯具有不同的特性。这种情况最终导致了 CRI 的发展, 它在几十年的照明开发和应用中发挥了重要作用, 但最终被证明既不是准确的量化, 也不是对照明产品的有用总结, 当照明产品的光谱变得更加多样化并且预期的再色结果更加具体时。

TM-30 在过去评估光源色彩再现的其他提案中是独一无二的, 因为其基本目的是提高颜色客观表征的准确性和精确度, 并提供一套广泛的措施, 以提高信息的实用性和特异性, 使其能够满足广泛的需求。它还很独特, 因为它是通过共识过程开发的, 其中包括照明社区各个部分的意见, 包括制作人、研究人员和规范制定者。这些功能得到了绝大多数照明行业的好评, TM-30 已稳步添加到现有机构规范、制造商数据表和应用规范中。

与过去使用基本经验法则指定色彩再现的方法相比, 准确度和精确度的提高, 加上更多信息输出, 必然会导致系统对用户提出更多要求。本文档旨在帮助 TM-30 的所有用户充分利用它。

自首次发布以来的五年里, TM-30 不断发展, 并出现了有研究支持的、基于共识的应用指南。有两种类型的开发可以继续帮助 TM-30 在未来发展。第一种类型是对核心计算框架的更改, 其中包括对色彩空间、颜色匹配功能、颜色样本或参考光源定义的更新。这些组件, 特别是色彩空间和色彩匹配功能, 是活跃的研究领域, 除了对色彩再现评估方法的影响之外。如果能够证明最终产出存在实质性差异, 则有可能在今后的TM-30修订本中更新两者。

更有可能发生的发展是 TM-30 的新扩展, 例如一组扩展的推荐规范标准。例如, 可以有更多关于肤色再现的指导。

随着新研究的发布和通过共识过程进行审查，规范标准也有可能在设定的限值或使用的措施中进行修订。对 TM-30 的扩展也可以采取围绕 TM-30 计算框架开发的新指标的形式。毫无疑问，还有一些尚未开发的方法来总结 TM-30 核心计算提供的信息。

最终，TM-30 被设想为一份动态文档，将在适当的时候进行更新，以继续成为色移客观规范准确性的标准，并用于总结色彩再现属性以预测视觉环境的色彩质量。