

LED混色：基本知识和背景

目录

前言	1
LED照明对色彩一致性的需要	2
Led分档	3
色品学和分档基本知识	3
色彩空间基本知识	4
理想化的照明色彩 – 黑体曲线	7
麦克亚当椭圆：在色彩空间中表示的感知可变性	9
对色彩空间进行分区 – 分档	11
色品分档	13
通量分档	15
在照明规格中使用色品学和分档信息	16
光度学和色品学的可加性	17
基本方法	17
三种方法	18
购买单个（或数个）色品分档	18
采用Cree EasyWhite组件	19
在LED系统中进行混色	20
示例	21
光度从属性	23
Cree的混色工具，Binonator	23
结语	24

前言

本应用说明介绍了制造色彩一致的LED照明产品的原理和做法的各个方面，并显示了如何使用Cree XLamp LED来实现这一目标。

与所有制品一样，LED在材料和工艺方面存在差异，因而产生的产品性能也有所不同。LED分档和封装的目的是在制造工艺的性质与照明行业的需求之间取得平衡。照明级LED的推动因素包括应用要求和行业标准，其中包括色彩一致性以及色彩和流明维持率。正如传统灯按亮度（通常以瓦数表示）和色彩（暖白或冷白）销售一样，LED也按亮度（光通量）和色彩参数（色品）进行分档。

LED照明对色彩一致性的需要

没有什么比图片更能说明诸如色彩变化这样的形象化观点。图1中的照片清楚地表明每种照明技术对色彩一致性的需要。这张照片是Cree与照明行业正共同尝试解决的LED照明应用难题的一个例子。



图1： 所有照明技术均需要色彩一致性

图1是对建筑物正面进行照明的高强度放电（HID）灯阵列的照片。它显示了因色温不一致及灯具性能随着灯具老化而衰退所产生的不理想结果。

美国及世界各地日益积极的行业政策对LED照明应用提出了严格的性能要求。首项对LED灯照明技术提出要求的行业政策是一份2007年的文件：“能源之星®计划固态照明灯具要求”。¹其后是一份2010年的文件：“能源之星®计划整体式LED灯要求”，²该文件提出了严格的要求，而这些要求明显高于对紧凑型荧光灯（CFL）的要求。³每个这些文件均包含了针对经能源之星批准的LED照明产品的相关色温（CCT）、显色指数（CRI）、流明和色彩维持率的要求，并且之后均进行了修订^{4,5}。相关色温要求摘录于表1和2。

1 www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/new_specs/downloads/SSL_FinalCriteria.pdf?2a51-654a

2 www.energystar.gov/ia/partners/manuf_res/downloads/IntegralLampsFINAL.pdf

3 参阅：www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/cfls/Criteria_CFLs_V4.pdf

4 www.energystar.gov/ia/partners/product_specs/program_reqs/Integral_LED_Lamps_Program_Requirements.pdf

5 www.energystar.gov/ia/partners/product_specs/program_reqs/Final_Luminaires_V1_2.pdf?7b7d-2473

特性	要求	参考标准 / 测试方法	样品尺寸 / 具体要求
相关色温和Duv	灯必须具有以下指定相关色温之一（依照ANSI C78.377-2008）并且与以下7阶色品四边形和Duv公差一致。	IES LM-79-08	每个型号10个单位 • 5个基底向上 • 5个基底向下 10个样品中至少9个必须符合规格
	额定相关色温	ANSI/NEMA/ANSI C78.377-2008	
	目标相关色温 (K) 和公差		
	目标Duv和公差		
	2700 K 3000 K 3500 K 4000 K	0.000 ± 0.006 0.000 ± 0.006 0.000 ± 0.006 0.001 ± 0.006	

表1：针对整体式LED灯的能源之星要求，依照计划要求（版本1.4）

特性	要求
相关色温要求：所有室内光源	光源（定向光源）或可替换LED光引擎或基于GU24的整体式LED灯（非定向光源）的额定相关色温值均须为以下之一： • 2700开尔文 • 3000开尔文 • 3500开尔文 • 4000开尔文 • 5000开尔文（仅限于商用） 光源、LED光引擎或基于GU24的整体式LED灯还均须在相应的7阶色品四边形范围内（如ANSI / NEMA / ANSI C78.377-2008中所定义）。

表2：针对室内LED灯具的能源之星相关色温要求，依照计划要求（版本1.2）

这些要求突出说明了LED供应商需要通过制品达到的可重复的规定结果。

LED分档

LED的特性可以多种方法描述。对于混色，最重要的两个方面是以色品（CCx, CCy）表示的色彩和以流明（lm）测量的光通量。这些参数作为LED组件制造工艺的一部分得到收集，并且是本文所讨论的组件分档的基础。

色品学和分档基本知识

通过深入了解一点色彩学知识，可更轻松地了解LED色品分档和混色领域的内容。色品学是人类对色彩感知的科学，它包含一个框架，可依照该框架来分析照明的光谱分布以及人类的色彩感知特性。

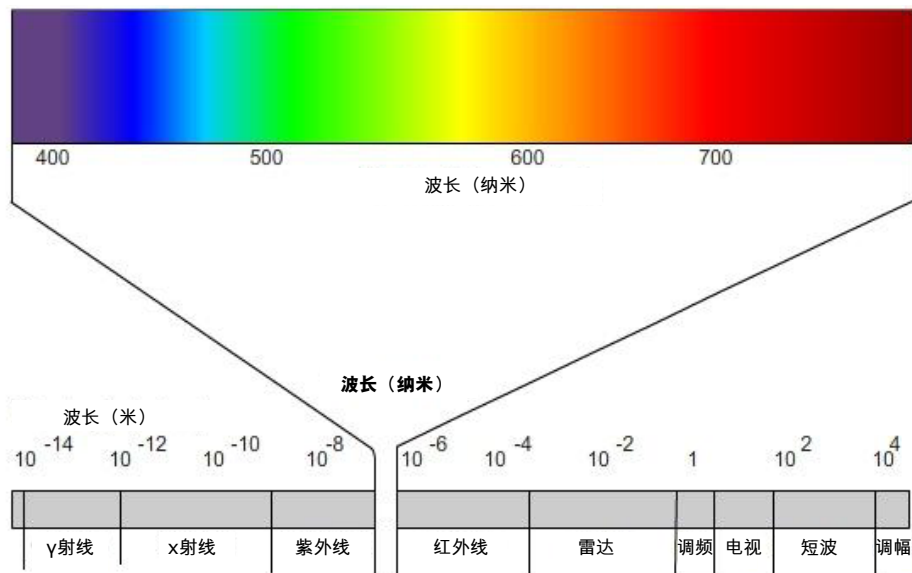


图2：光是电磁光谱的可见部分，波长范围为380到780纳米

照明设计师可能力求提供一个暖色调、中性或者冷色调的照明光源。如果具有照明应用知识，设计师将能够做出正确的空间照明决定。如果了解有关色品学和LED分档的以下关键概念，设计师将能够确定适当的LED解决方案。

1. 色彩空间——客观地描述任何可感知色彩的形式体系。
2. 色温（更确切地说，相关色温）将照明光源的色调特性描述为开氏温标上的温度。
3. 人类感知及色彩和视觉变化的经验数据和模型为色彩分档的创建方式提供了额外的框架。

知觉心理学家的“最小可觉差”概念是任何人类感官模式中可感知变化的主观阈值。这一直是理解人类感知变化的关键。在20世纪中叶为柯达工作的色彩科学家大卫·麦克亚当（David MacAdam）为“最小可觉差”概念引进了一种方法。他的工作描述了人类群体变化和个人色彩感知时间变化的特性，并将这些差异映射到色彩空间。

色彩空间基本知识

色彩科学开始于人的视网膜对光和色彩感知的生理学构造。基于人眼对色彩的感知，人们得出了色品量化的模型和客观标准。最常用的模型是1931 CIE色彩空间，它是一种将感知到的色彩映射到x, y坐标图单位面上的方法。这个色品的x,y值坐标图是对感知到的色彩的映射，并且以一定比率的红、绿和蓝三种色彩表示。这三种色彩（即三色刺激值）对应于人体视网膜中视锥的带通滤光色品响应。通过该色品映射，任何感知到的色调或色彩均可用单位平面上的简单轨迹表示。这已成为LED的主要分类或分档机制之一。

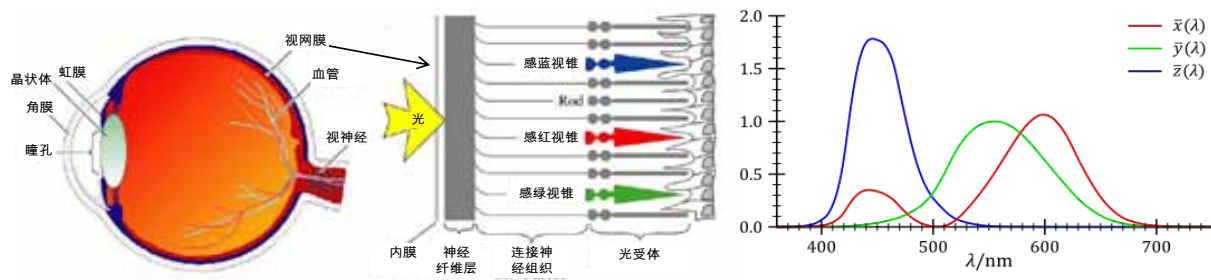


图3：人眼作为亮视觉响应源

图4以下显示了1931 CIE色品图的增强版本。

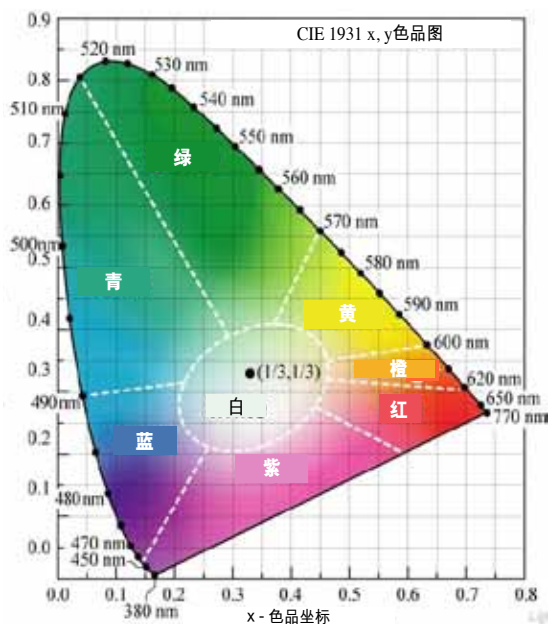


图4：1931 CIE色品图⁶

纯色或饱和色位于抛物面边缘周围，白光位于其中心。在照明应用中，白光将是该图中心周围的区域，分档将对应于色彩空间的白色中心周围的小型闭合区域。

图5中所示的转换显示了如何从照明光源的辐射特性或光谱功率分布中得到色品坐标。

6 www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/F17-04%20Chromaticity%20diagram.jpg

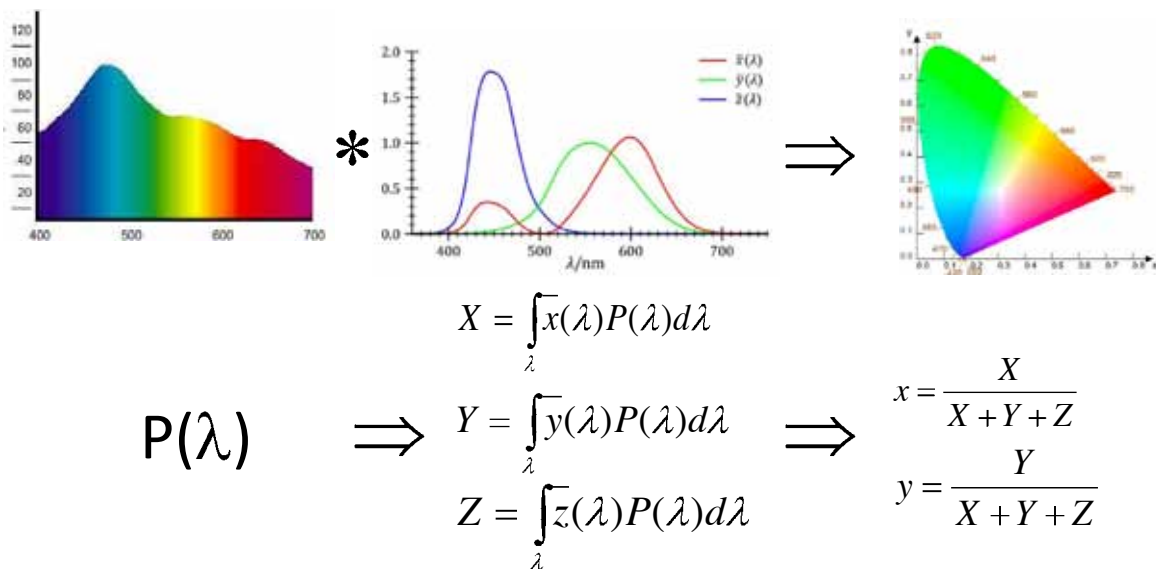


图5：如何获得光源的x和y值

每种视锥均有对红光、绿光或蓝光主波长的三种敏感度中的一种。另一种表示人类视觉的方法是三原色。X、Y和Z是视锥对给定照明信号的三原色“响应”。这些公式的推导过程可在许多教科书中找到，⁷此处提供这些公式旨在为本文档下文介绍的混色实际计算提供一个框架。⁸

色品学的关键特点在于，色彩感知本质上是色彩空间中的一个可加性函数。人类色彩感知的一个特性是，由不同波长组成的两个光源可能看似同一色彩。如果两个光源具有相同的三色刺激值，则无论采用什么光谱分布来生成它们，它们在观察者眼里均将具有相同的表现色彩。如果两个光源具有相同的三色刺激值，它们在色彩空间中也具有相同的合成色品点。

为了通过不同波长和强度的多个光源制造白光，LED制造商利用了视觉原则。

1. 任何光源的感知色彩或者反射色彩均可被定义为色彩空间上的一点。
2. 两个照明光源即使光谱特性差异悬殊，也可能在色彩空间中得到相同的（感知）值。

⁷ 例如，本材料的一个有效介绍可在舒伯特的《发光二极管》（第2版）的第17章中查阅。

⁸ 类似地，亮度或光通量是一个相加值，是混色算式的一部分。它来自感绿视锥的亮视觉响应。

$$\Phi(\text{lumens}) = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} * \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} P(\lambda) * Y(\lambda) d\lambda = Y$$

下面的图6表明磷和LED的配置可进行定制，以在CIE色彩空间中提供相同的x,y坐标。每种配置的光谱特性显著不同，但观察者感知到的是相同的表现色彩。

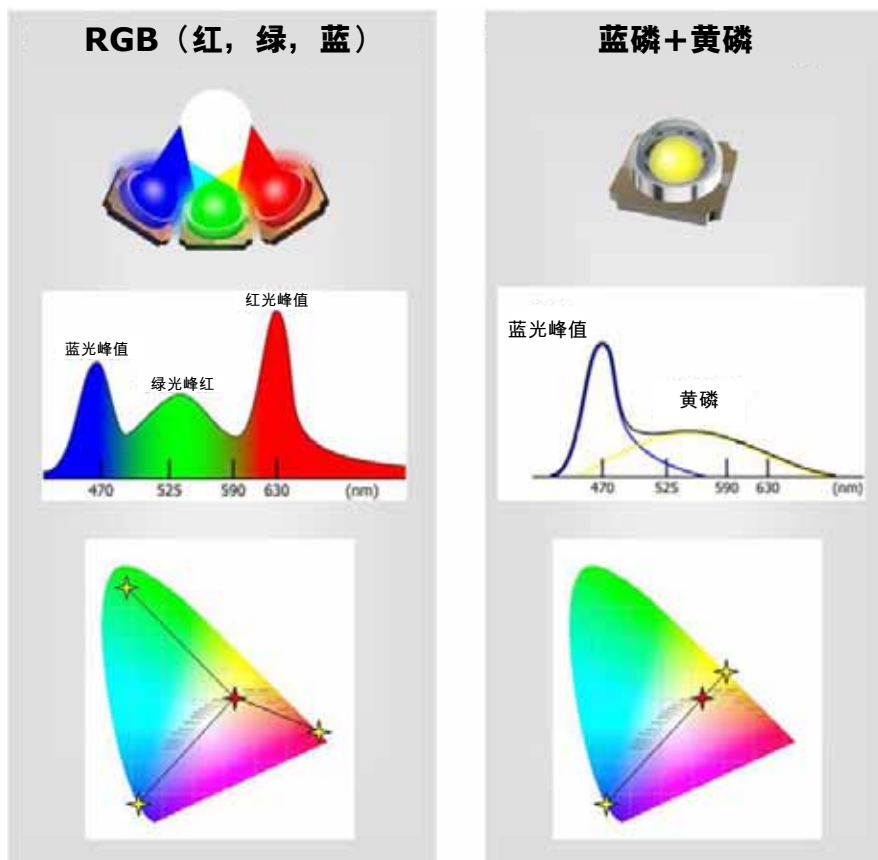


图6：用LED产生白光的2种方式

理想化的照明色彩 – 黑体曲线

除了CIE色彩空间之外，另一种重要方法是相关色温。此方法包含的物理原理在20世纪后期正式用温标表示，它是在量子物理学领域和理想化的“黑体辐射体”的光谱发射基础上提出的。这个理想化的物体在受热时发出辐射，并且所产生光谱的其中一部分在很高的温度范围内是可见光，如图7所示。

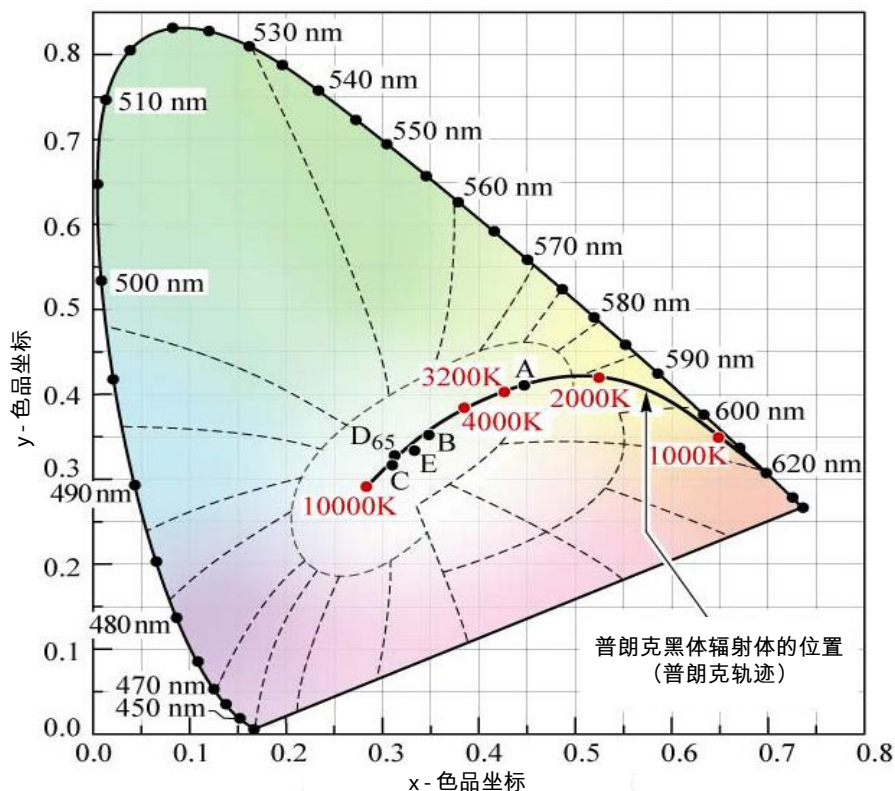


图7: CIE色品沿黑体线分布图⁹

我们可以直观地理解这一点，例如，当金属受热时，我们看到金属依次发出红光、黄光和白光。黑体线或普朗克轨迹提供了一种单一度量来描述照明光源的特性，即CCT温度，用开尔文（K）来表示。

2700-3000 K的相关色温被称为暖白，它占据了白色中带较黄色调的区域。3500-4000 K的相关色温被称为中性白，4500-5500 K的相关色温被称为冷白，对应较蓝的色调。

9 www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap18/F18-03%20Chromaticity%20diagram%20-%20planckian.jpg

麦克亚当椭圆：在色彩空间中表示的感知可变性

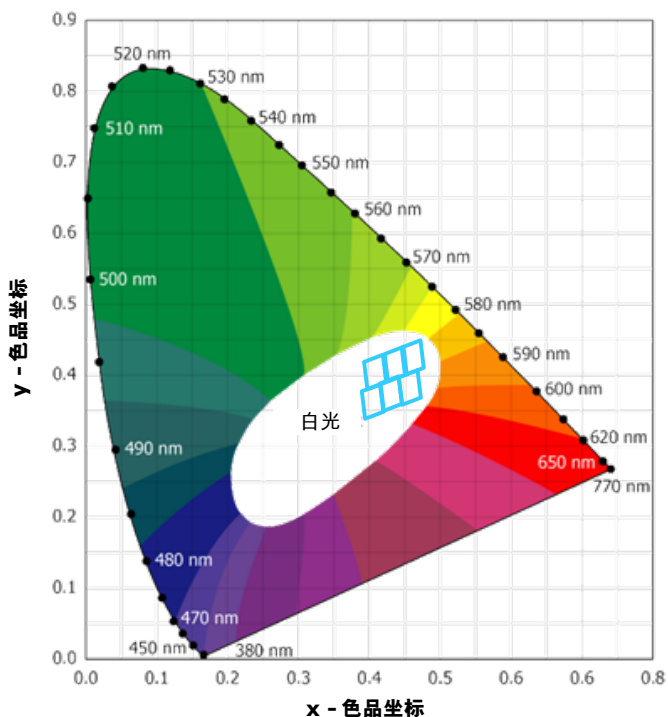


图8：色彩空间上的色彩分档

CIE色彩空间允许用客观的方法来表现色彩，因为没有两个人对色彩的感知是完全相同的。在这方面，同一个人对色彩的感知也随时间的推移而变化。那么，我们如何从人眼的角度对色彩达成一个可接受的统一定义呢？

大卫·麦克亚当设计了一组视觉实验来记录单个观察者色彩感知的变化。他的工作成果表明，每个观察者均往往将他们对“类似色彩”的感知集中在CIE色彩空间的椭圆中，如图9所示。

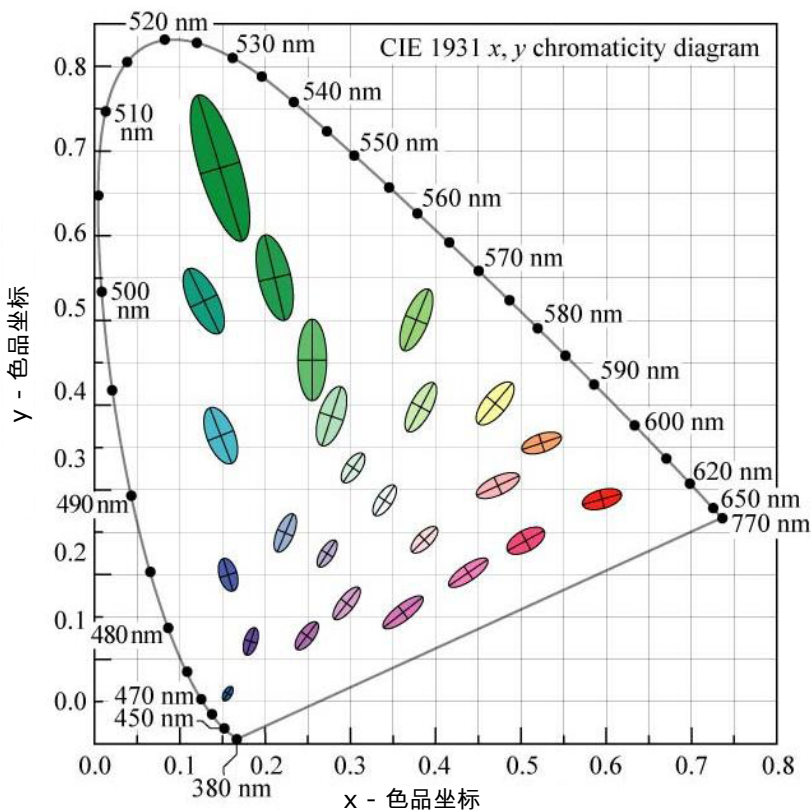


图9：麦克亚当椭圆

麦克亚当将这些椭圆在人类群体方面进行一般化，并声称感知的标准统计方差也可被映射到色彩空间中。实际上，一个特定色点的麦克亚当椭圆被定义为包含一名“标准观察者”的一个标准差。大约65%的人会将他们对同种色彩的感知定位在麦克亚当椭圆中的一点。更大的椭圆可被定义为包含2个、3个甚至更多个标准差，从而更多比例（95%到99%）的观察者能够将他们对同种色彩的感知定位在这些椭圆内的某点。

色彩分档在1931 CIE色彩空间中被定义为平行四边形。为什么呢？ANSI用来定义色彩分档的平行四边形的尺寸和方向大致包含一个麦克亚当椭圆，该椭圆的中心位于色彩平面上的一个特定位置。

ANSI在C78.377-2008标准中定义的LED分档包含了一个7阶麦克亚当椭圆，最初是为紧凑型荧光灯（CFL）定义的。这些分档在黑体线上居中。下面的图10显示了该标准的图示。

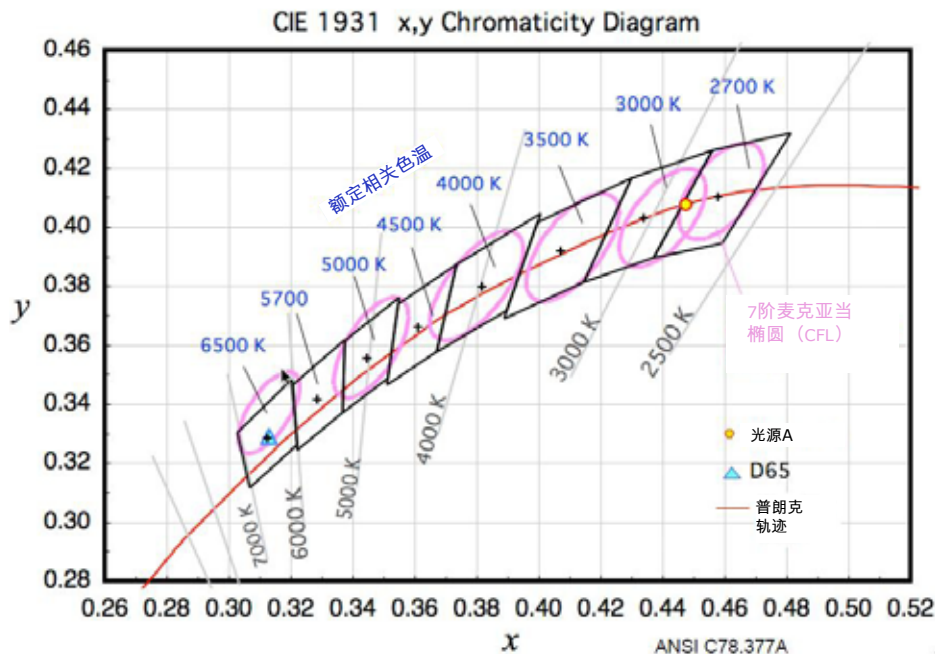


图10: ANSI C78.377-2008标准的图示¹⁰

对色彩空间进行分区 – 分档

与诸如钨灯或卤素灯这样的其他光源相比，磷基照明光源表现出更大的变化性。分档系统最初是用来描述磷的特性，最近才用来描述白光LED的特性。LED制造商采用分档方法为他们的制品提供统一的特性表述。

虽然从晶片生产到组件包装的每一步均是根据极严格的公差制造的，但材料和工艺的天然差异决定了白光LED的光度特性。材料特性随晶片表面差异而不同，单个LED晶粒也是如此。分档描述了制造工艺产品的特性，并使客户能够开发出处理这种产品的策略，从而实现均匀的照明光源。Cree的基本分档命名规则和定义遵循ANSI C78.377-2008 LED分档标准。这些分档的位置、形状和尺寸与麦克亚当椭圆不断变化的轴方向和尺寸大致相符。

为了满足照明产业的需求，LED制造商迅速改善了产品均匀性和分布。为了减少色彩变化，Cree通过细分ANSI分档来制定XLamp分档。

图11是一个3200-K产品的分档例子，图示了一个分档实例。该分档的中心是(0.4245, 0.3999)，位于黑体线与3200-K梯度线交点附近。平行四边形的边界也在图中显示。

¹⁰ NEMA ANSI ANSLG C78.377-2008, “电灯固态照明产品的色品规格”

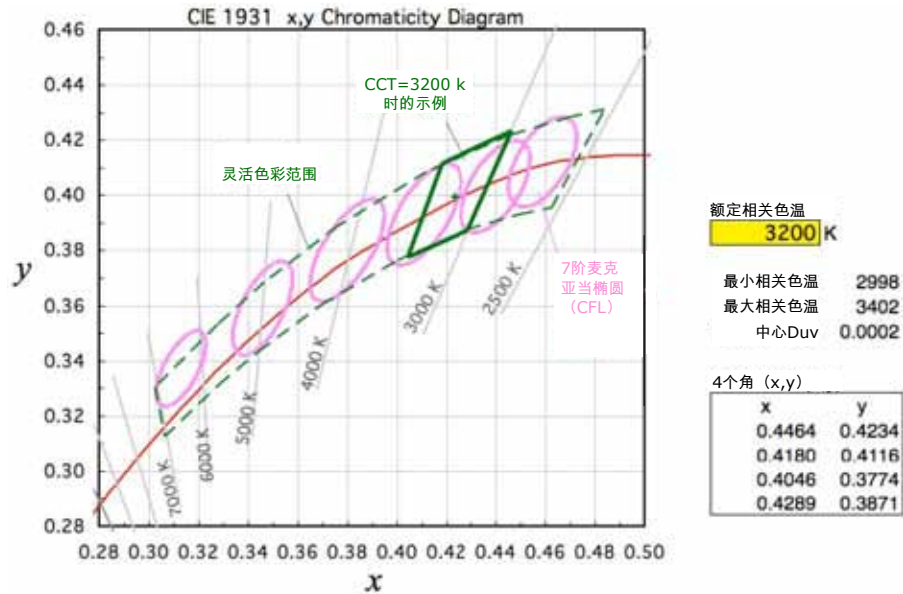


图11: 3200 K时的示例

细分ANSI分档可允许逐步采取更严格的规格以及提高产品的均匀性。这一点如下面的图12所示。图中的明虚线是黑体线，分档聚集在它周围。暗虚线平行四边形代表ANSI白光分档，如ANSI LED分档中所定义。较小的红色平行四边形是为XLamp白光LED定义的Cree分档。

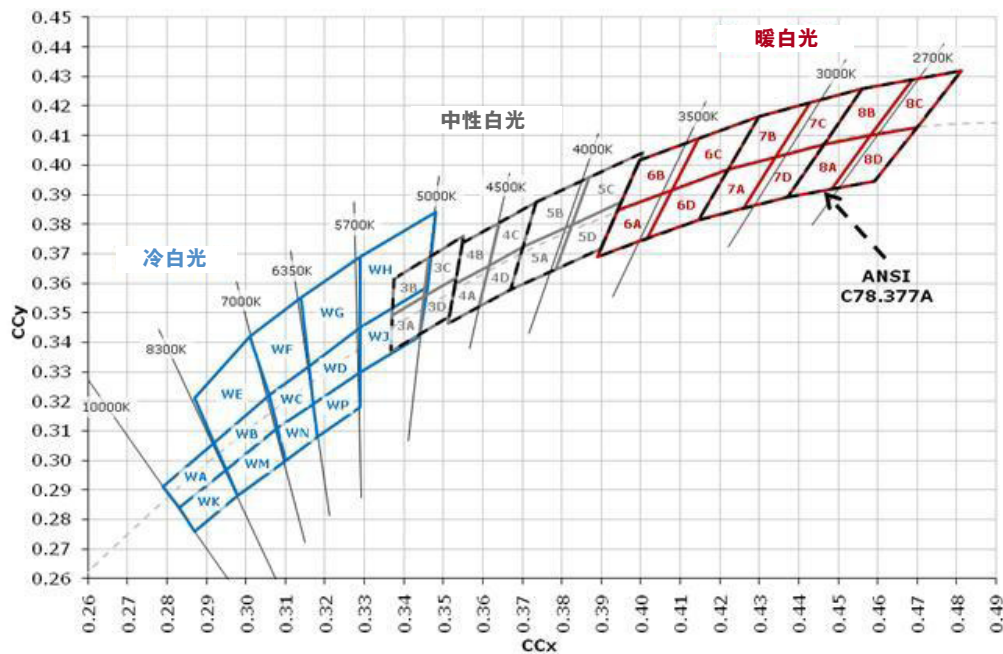


图12: Cree XLamp分档结构

如图13所示，Cree对标准X Lamp分档作了进一步细分，以适应日益精细的粒度需要以及更好地进行产品控制。

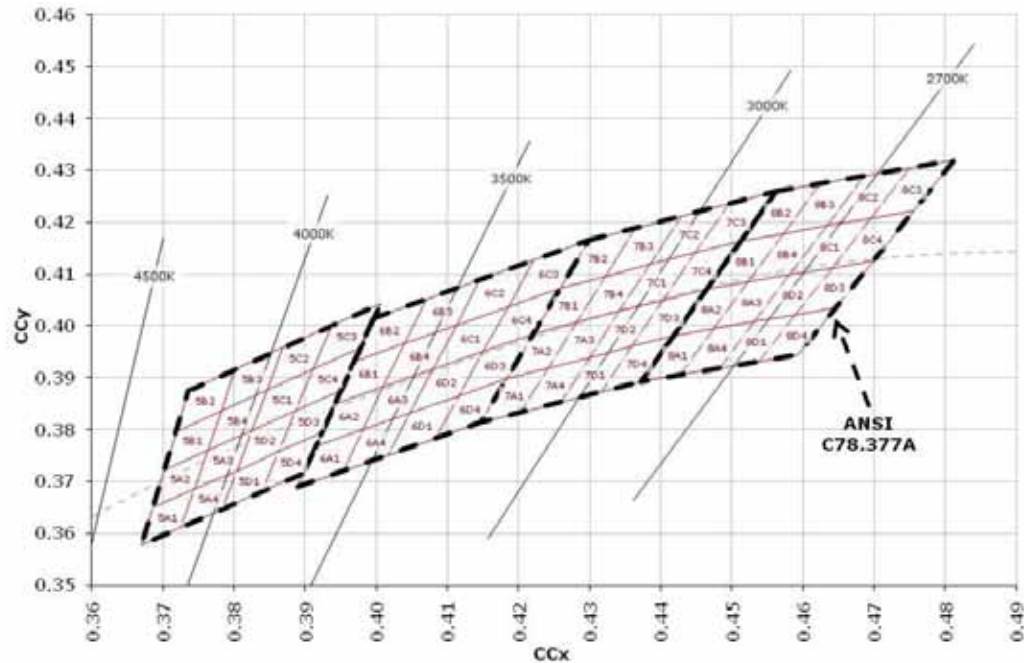


图13: Cree X Lamp暖白光分档

色品分档

Cree在每个ANSI C78.377分档中，为暖白光、中性白光和冷白光X Lamp产品定义了子分档，提供了业界领先的分档精细度。

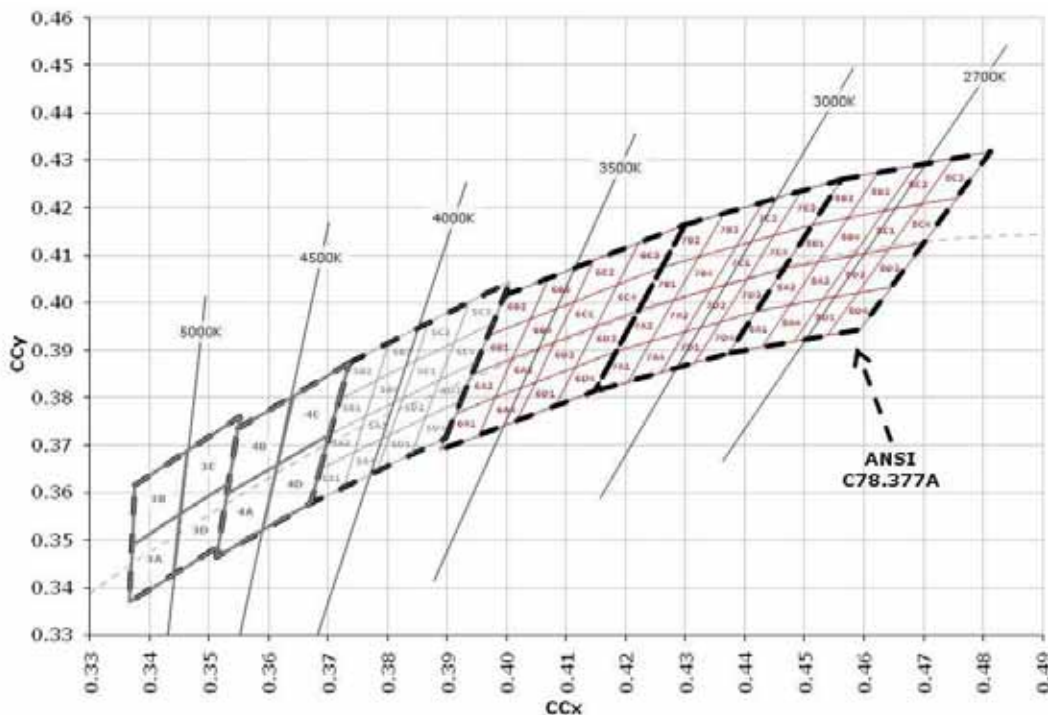


图14: XLamp暖白光和中性白光分档

Cree XLamp LED产品有两份主要的技术支持文档，均可在Cree网站上查阅。¹¹

1. 数据手册提供了电气和光通量性能特性。
2. 分档和标贴文档提供了有关色品、光通量分档和订购信息的详细信息。

从2009年12月开始，Cree就推出了一个多晶粒LED组件版本：XLamp MC-E EasyWhite™ LED。随着XLamp MP-L EasyWhite LED的发布，EasyWhite分档系列有了第二个多晶粒成员。Cree之后发布了多晶粒MT-G、XM-L和MK-R EasyWhite LED组件。EasyWhite代表了实现白光的LED分档倍增级数的极大简化，如下面的图15所示。每个标准色温均只有一个色品分档，而不是数十个。此方法还有一个特点，即四个分档均在黑体线上居中。

¹¹ www.cree.com/led-components-and-modules/document-library

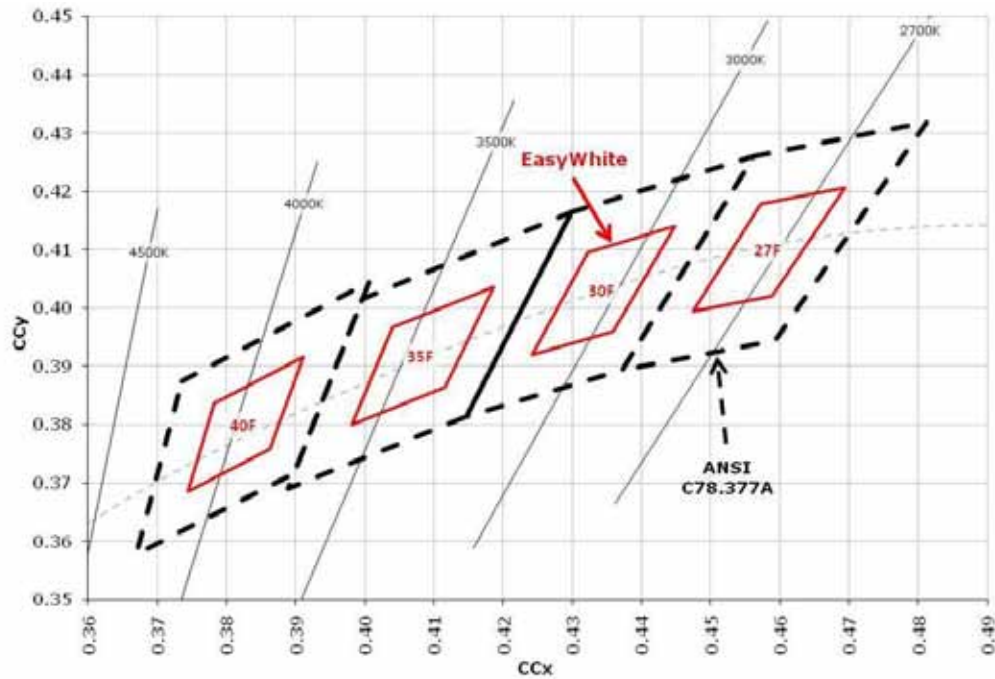


图15: EasyWhite分档

通量分档

光通量是一个可加性度量值，就像感知到的色彩是可加性的一样。许多类型的灯具就是通过排列LED阵列并将整个阵列的通量相加而形成的。

Cree XLamp LED也以标称电流¹²和工作温度下的光通量来描述特性。¹³此分类的示例如下面表3所示。

通量分档	光通量 (lm)		通量分档	光通量 (lm)	
	最小值	最大值		最小值	最大值
K2	30.6	35.2	Q3	93.9	100
K3	35.2	39.8	Q4	100	107
M2	39.8	45.7	Q5	107	114
M3	45.7	51.7	R2	114	122
N2	51.7	56.8	R3	122	130
N3	56.8	62.0	R4	130	139
N4	62.0	67.2	R5	139	148
P2	67.2	73.9	S2	148	156
P3	73.9	80.6	S3	156	164
P4	80.6	87.4	S4	164	172
Q2	87.4	93.9			

表3: Cree通量分档示例

12 通常是350 mA

13 通常LED结点（组件的活跃区域，基于热阻和焊点温度计算）的温度是85°C

在照明规格中使用色品学和分档信息

为了理解多LED混色为何是一种重要且具有成本效益的制造技术，请考虑大量生产运行中的以下LED假想分布。

客户可能通过调用特定分档（如黑体线附近约3000 K的分档7B4）来指定一个色品要求。LED生产运行在各个类似色彩分档中均将有组件分布。与仅购买一个特定分档的客户相比，能够采用更广泛色彩分档的客户有望以较低成本购买LED。

在LED组件的特定生产运行中，光通量将在几个分档上有所差异，例如上面表3中的通量分档Q5到R2。下面图16显示了某一生产过程中的假想色品变化。一些色品分档中有许多产品，而另一些分档中则根本没有任何产品。

没有一个LED制造商能够在白光LED中产生均匀的色点，相反，它们分批生产带有不同色彩和通量分布的LED并根据生产结果来创建库存。

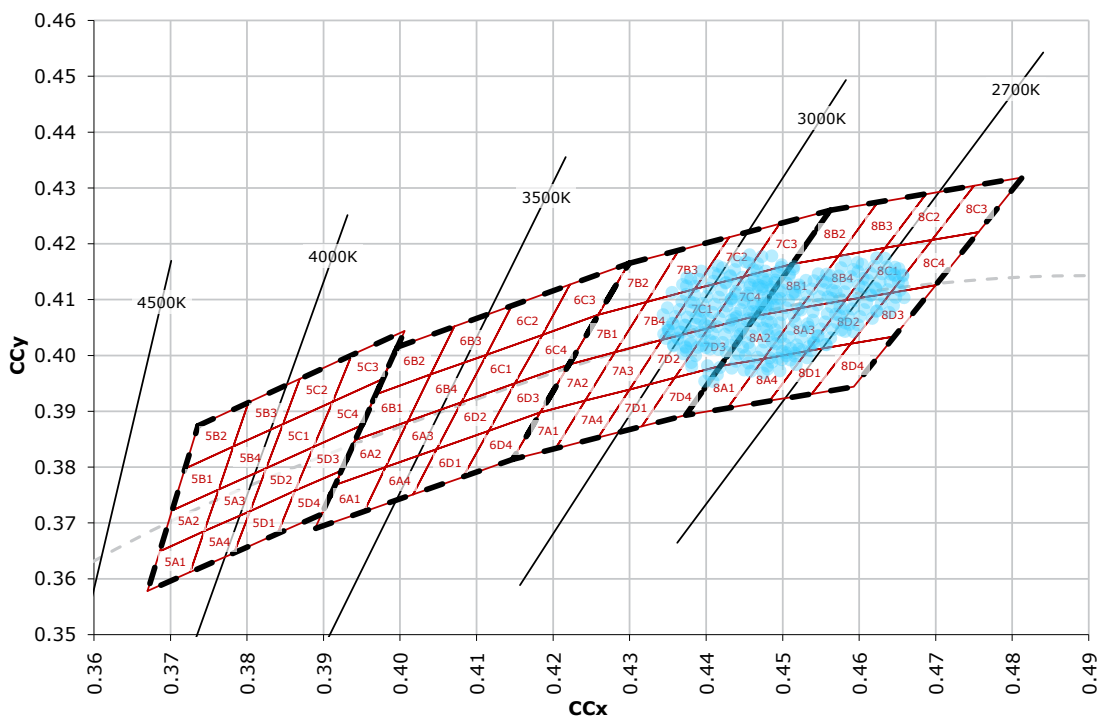


图16: LED假想色品分布

色品和通量均是可加性的，这是我们所证明的用于从色彩不一致的LED供应中创建色彩一致的产品的基础。

光度学和色品学的可加性质

每个照明光源均有一个（辐射）光谱功率分布，其输出可以用发光源波长范围内的辐射功率的积分表示。人眼对此类发光源的感知可用单个色品值来表示，即用二维色彩空间中的一个有序对（ CC_x , CC_y ）来表示。该值最终可用相关色温表示。色品结果来自于色彩感知的生理学可加性质。相关色温是照明光源的分类或分档，被归入暖白、中性白和冷白区域。

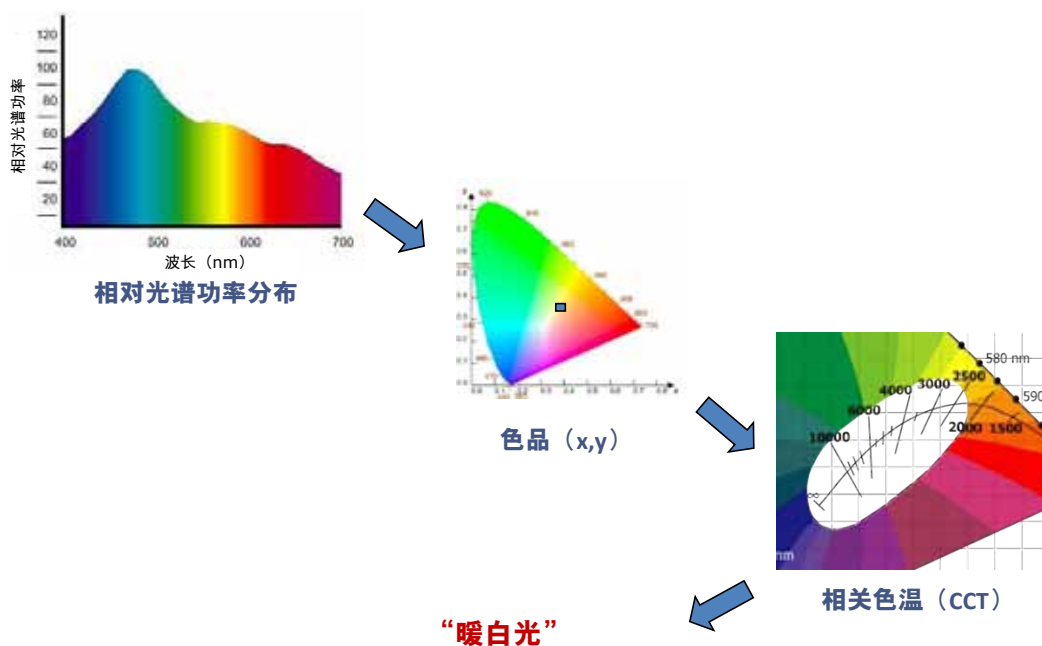


图17：从客观到主观

基本方法

为了实现色彩一致的照明产品，一家公司可以有三种方式与Cree合作以购买LED。

1. 购买一个或少量分档。反复购买少量的相同部件是一种合理且可重复的策略，但由于LED制造的性质，这绝不是成本最低的LED采购方式。
2. 随着EasyWhite产品于2009年年底开始发布，Cree使得客户能够对LED采取类似于原灯泡规格做法的方式（例如，仅指定相关色温和通量）。Cree代表客户进行混色，打造精选XLamp LED组件的EasyWhite版本。
3. 与Cree合作的最具成本效益的方式是购买XLamp LED的完整分布，即LED生产运行的完整制品，其中包括各种通量和色品的产品。为了有效利用完整的分布，照明制造商开发了LED照明系统专业知识和混色配方。混色配方为产生可重复的色品结果提供了大量灵活的解决方案，并且与前两种方法相比更具成本竞争力。

以下各图依次说明了这些方法。

三种方法

购买单个（或数个）色品分档

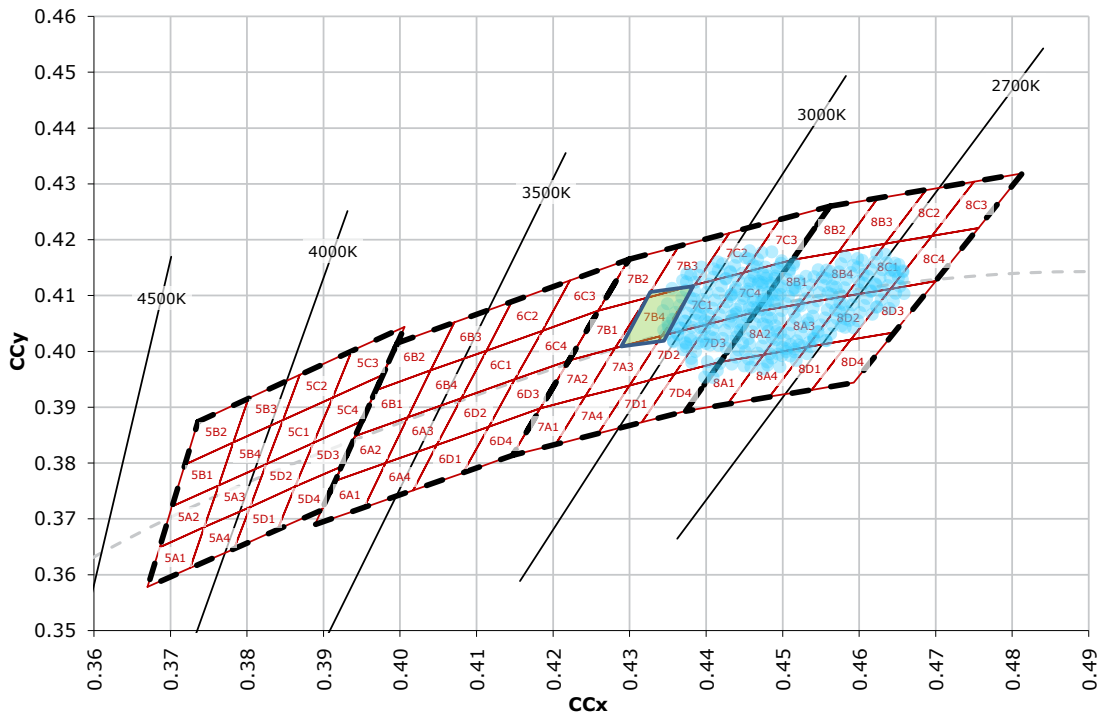


图18: 购买单个分档——对价格不敏感的策略

采用Cree EasyWhite组件

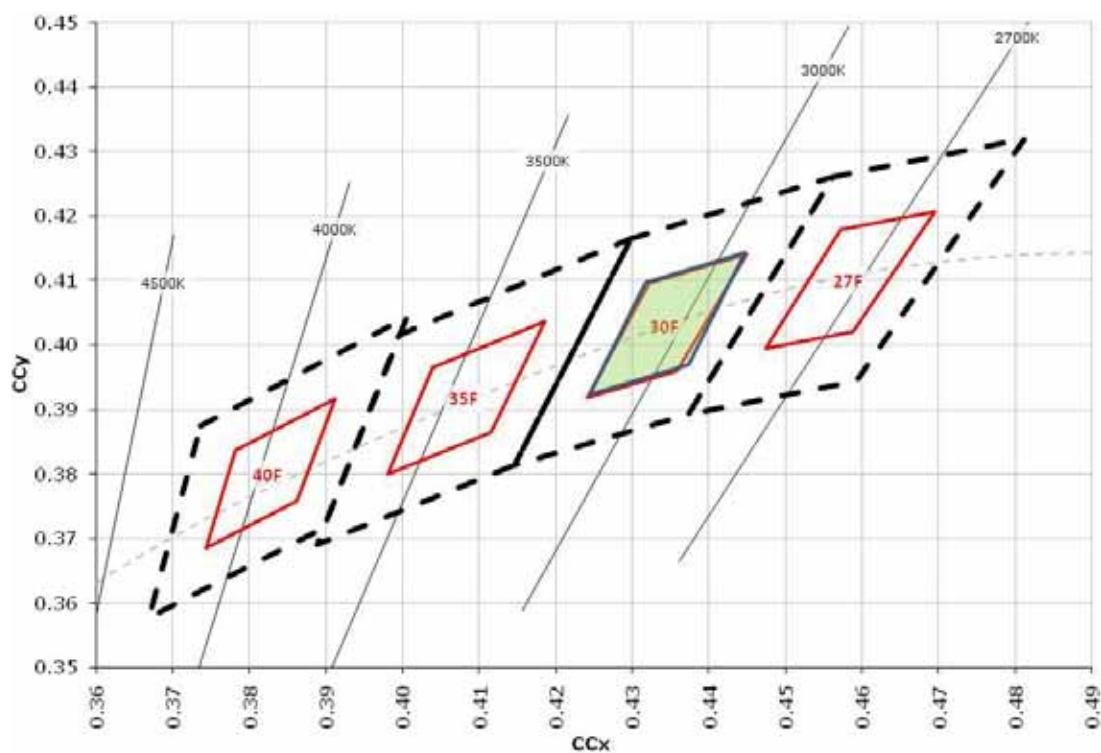


图19: 购买EasyWhite分档, 在结构上可重复的策略

在LED系统中进行混色

对于一些多LED应用，混合来自各种分档的白光LED是一种具有成本效益的方式，可在实现良好的色彩质量的同时最大限度地降低LED成本。在该图示中，我们显示了4个混色LED能够实现相同的感知效果，就好像4个LED是来自其中一个中心子分档一样。

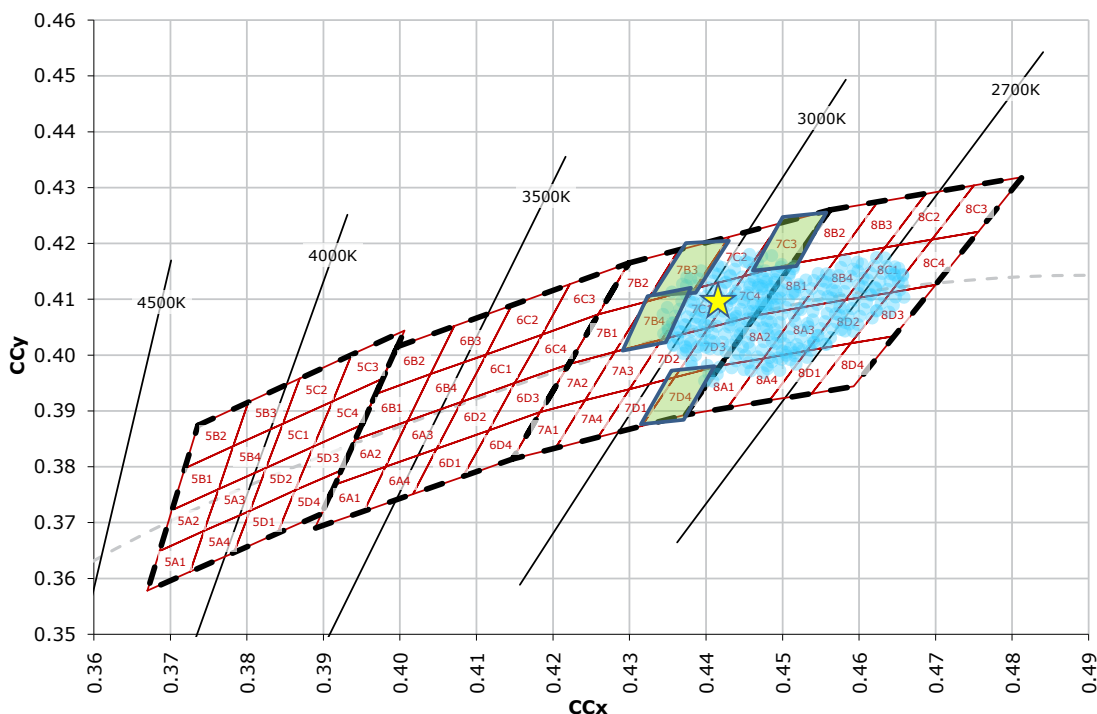


图7：多LED灯具可使用混色并在LED上花费更少

从数学角度而言，之所以有这种效果是因为色彩和通量是可加的。LED通常用品色（1931 CIE色彩空间中的x, y）和通量（ $\Phi = Y$ ）来描述特性。

混色算式中所用的三色刺激值可计算如下：

$$\begin{aligned} X &= x \cdot (Y/y) \\ Y &= Y \\ Z &= (Y/y) \cdot (1-x-y) \end{aligned}$$

合成色彩是三色刺激值相加的结果。

$$\begin{aligned} X_{\text{mix}} &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \\ Y_{\text{mix}} &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \\ Z_{\text{mix}} &= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \end{aligned} \quad \text{和} \quad \begin{aligned} x_{\text{mix}} &= X_{\text{mix}} / (X_{\text{mix}} + Y_{\text{mix}} + Z_{\text{mix}}) \\ y_{\text{mix}} &= Y_{\text{mix}} / (X_{\text{mix}} + Y_{\text{mix}} + Z_{\text{mix}}) \\ \Phi_{\text{mix}} &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \end{aligned}$$

当然，在灯具设计方面还有一些注意事项。为了获得混色的好处，建议采取以下措施之一。

1. 灯具应与观察者保持一定距离，以便LED光能够“融合”在一起。
2. 应使用二次光学元件将带有细微色调差异的LED阵列发出的光进行混合和均质化。

示例

该示例灯具有多种设计方法。光输出目标是2900 K，并尽可能靠近黑体线。一个满足此色品要求的Cree子分档是7D3。假设灯具是一个多LED器件，则有多种方式来满足生产要求。

使用2个分档的解决方案

LED	分档代码	x	y	Y(Φ) lm
XP-E #1	8C3 P3	0.4753	0.4263	74
XP-E #2	7A1 Q2	0.4194	0.3866	87

$X_1 = x_1 * (Y_1 / y_1) = 82.5057$	$Y_1 = 74$	$Z_1 = (Y_1 / y_1) * (1 - x_1 - y_1) = 17.0809$
$X_2 = x_2 * (Y_2 / y_2) = 94.3813$	$Y_2 = 87$	$Z_2 = (Y_2 / y_2) * (1 - x_2 - y_2) = 43.6575$
$X_{mix} = X_1 + X_2 = 176.8870$	$Y_{mix} = Y_1 + Y_2 = 161$	$Z_{mix} = Z_1 + Z_2 = 60.7384$

$x_{mix} = X_{mix} / (X_{mix} + Y_{mix} + Z_{mix}) = 0.4437$
$y_{mix} = Y_{mix} / (X_{mix} + Y_{mix} + Z_{mix}) = 0.4039$
$\Phi = Y_{mix} = 161 \text{ lm}$

图20：2个XLamp XP-E LED暖白混合示例

这些结果落在7D3分档中，如下面图21所示。

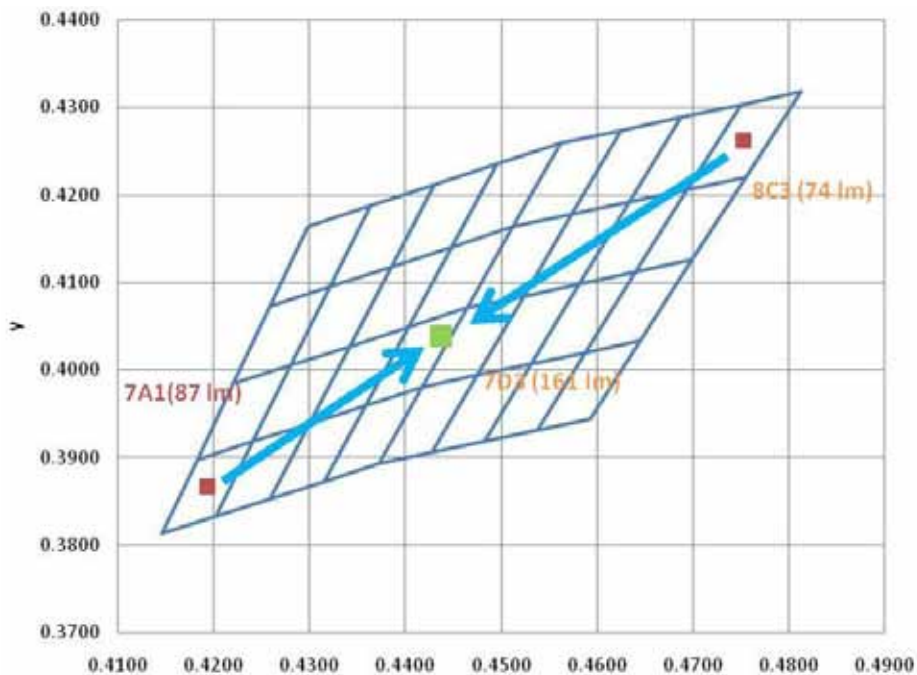


图21: 2个LED实现7D3分档 (161流明时)

也可采用类似的算法，用3到4个LED来实现混色结果。

使用3个分档的解决方案

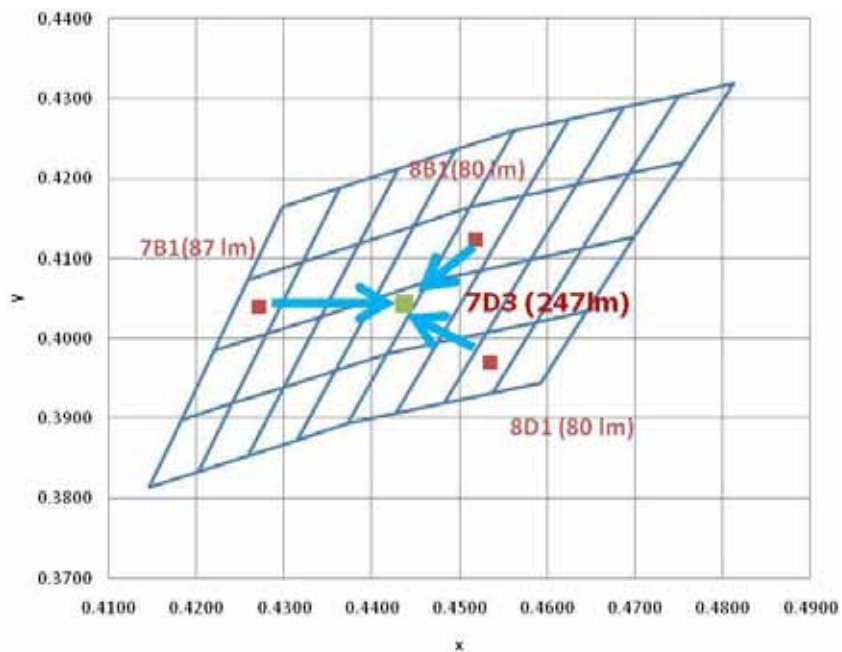


图22: 3个LED实现7D3分档 (247流明时)

使用4个分档的解决方案

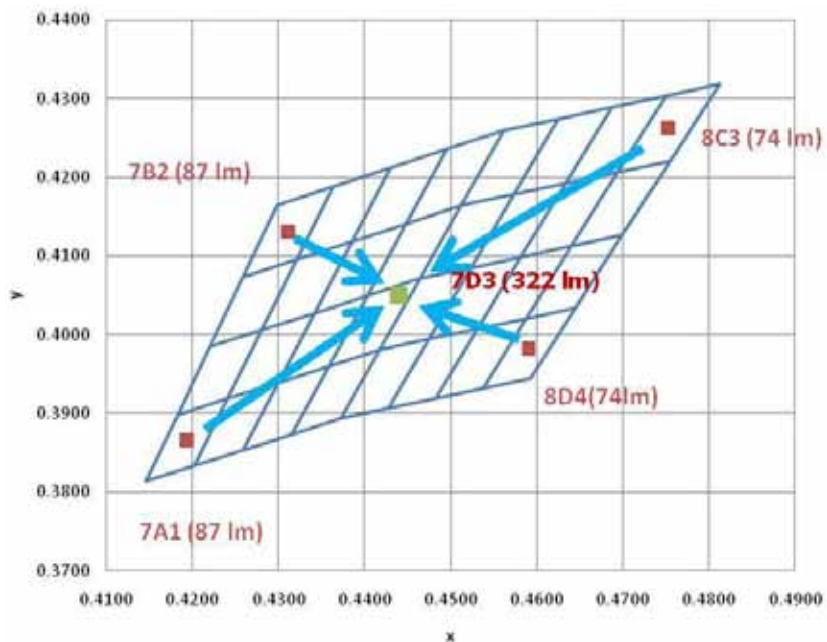


图11：4个LED实现7D3分档（322流明时）

对于每个色品目标，均有多种方法利用整个产品分布来实现色彩一致且具有成本效益的系统结果。

光度从属性

LED发出的光用通量和色品来描述特性。这些光度特性取决于器件材料、通过LED的正向电流及LED的结温。

白光LED的一般经验法则：

1. 随着器件结温的升高，通量将减少并且器件的相关色温将降低（色温将变得较暖）。
2. 随着器件正向驱动电流的增加，通量将增加并且器件的相关色温将升高（色温将变得较冷）。

CREE的混色工具，BINONATOR

Cree开发了一款名为Binonator的软件工具，可自动进行色彩和通量计算并在Cree定义的整个XLamp色彩分档空间上显示所产生的输出。

Binonator是一款运行在微软Windows系统下的应用程序，需要本地安装有Microsoft Excel才可正确执行。它可从Cree网站受控访问下载。¹⁴

该工具允许用户：

1. 在一系列在黑体线上居中的相关色温周围指定并显示N阶麦克亚当椭圆。
2. 指定一系列LED，每个LED带有相关的色彩和通量分档。
3. 计算所产生的通量和色点。
4. 以图形显示以上第1到第3项的结果。
5. 读写配方文件，以检索和存储配方数据。
6. 补偿驱动电流和温度。

该工具采用以下假设。

1. 任一特定色彩分档中的任何LED的色点均是该分档的平均值或中值。
2. LED的通量是所选通量分档的最小通量。

Cree的任何一个XLamp色彩分档均可被用于产生结果，但使用宽间隔和不相邻的色彩分档有一些实际限制，这些限制取决于应用、实施和观察者。例如，在道路照明（灯具可能位于被照表面上方10米（30英尺），而且照明光源相对于周围环境非常明亮）应用场合下，用多种不相邻的色彩分档进行混色是允许的。相比之下对于非漫射室内应用场合（如基于LED的T8照明灯管），如果并排使用不相邻的色彩分档，则可能显示可感知的色彩变化。在得出初始配方之后，务必先测试结果，然后再交付生产。

结语

与传统灯具一样，LED是按亮度（流明）和色彩（色品）分档的。但是与传统照明设计不同的是，LED混色能够帮助多LED产品最大限度地利用LED性能。LED混色是实现一致、可重复的多LED灯具的一种有效技术。混色还允许使用大色品范围，同时可降低LED单位成本并提供一致的色点结果。为了在这方面起到帮助作用，Cree的Binonator工具帮助照明设计师创建LED照明产品的色品分档混合配方。通过混合LED组件中的色彩，Cree的EasyWhite LED帮助进一步简化了灯具设计。

¹⁴ www.cree.com/led-components-and-modules/tools-and-support/tools