

色彩测量：CIE色彩空间

# 色彩测量 - CIE 1931 系统

## 简介

色彩测量基本就是标准化色彩视觉，其中对光和观察者两大要素进行标准化。

色彩测量的科学基础是存在从观察者眼睛传入的 3 组不同信号（红绿蓝三原色刺激）。转入标准化系统的起点是 S、M 和 L 视锥细胞的敏感性。现在已知与波长相关的敏感性。作为国际色度学系统的依据，国际照明委员会 (CIE) 在 1931 年将三种光谱色定义为原色刺激，其中红色 (R) = 700.0 nm，绿色 (G) = 546.1 nm，蓝色 (B) = 435.8 nm。

但视锥细胞的敏感性还取决于观察者的视角。使用 CIE 标准观察者概念实施标准化。与标准光源类型类似，标准观察者也是表示“普通标准人类观察者”的数值表，所以说色觉并不特定于个体观察者。

## 人眼的光视

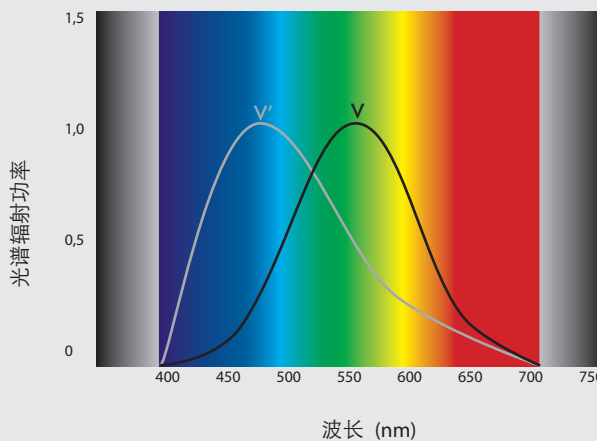
### 效率 - 亮度

在电磁光谱的可见范围内 (400 nm - 700 nm)，人眼将相同的光谱辐射视为在不同的波长有不同的亮度。眼睛的这种光谱视效由 CIE 为标准观察者进行测量和标准化。V(λ) 曲线适用于所有亮视觉，其中视网膜内视锥细胞具有活性。CIE 在 1923 年制定亮视觉的光视效率值，然后在 1924 年采用这些值完成色度计算。

V'(λ) 曲线适用于暗视觉，其中视杆细胞是活性受体。CIE 在 1951 年将亮视觉的光视效率值整理成标准。在亮暗视觉之间发光密度范围内，即在中间范围（黄昏视觉）内，光谱敏感性曲线随着自适应发光密度降低而平移，即使波长较短也是如此。



眼睛的光视效率



眼睛的光视效率 曲线 V(λ) = 亮视觉/昼 = (CIE 1924) 曲线 V'(λ) = 暗视觉/夜 = (CIE 1951)

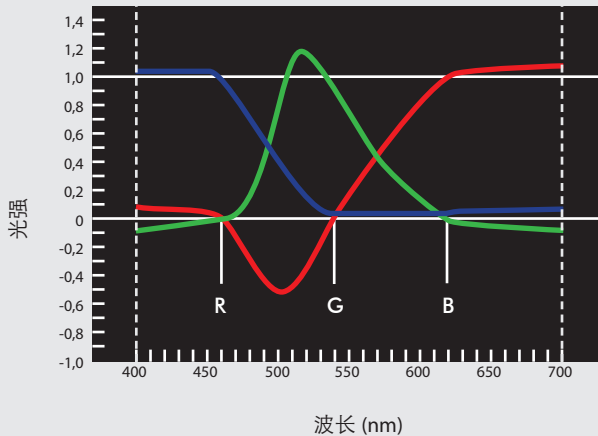
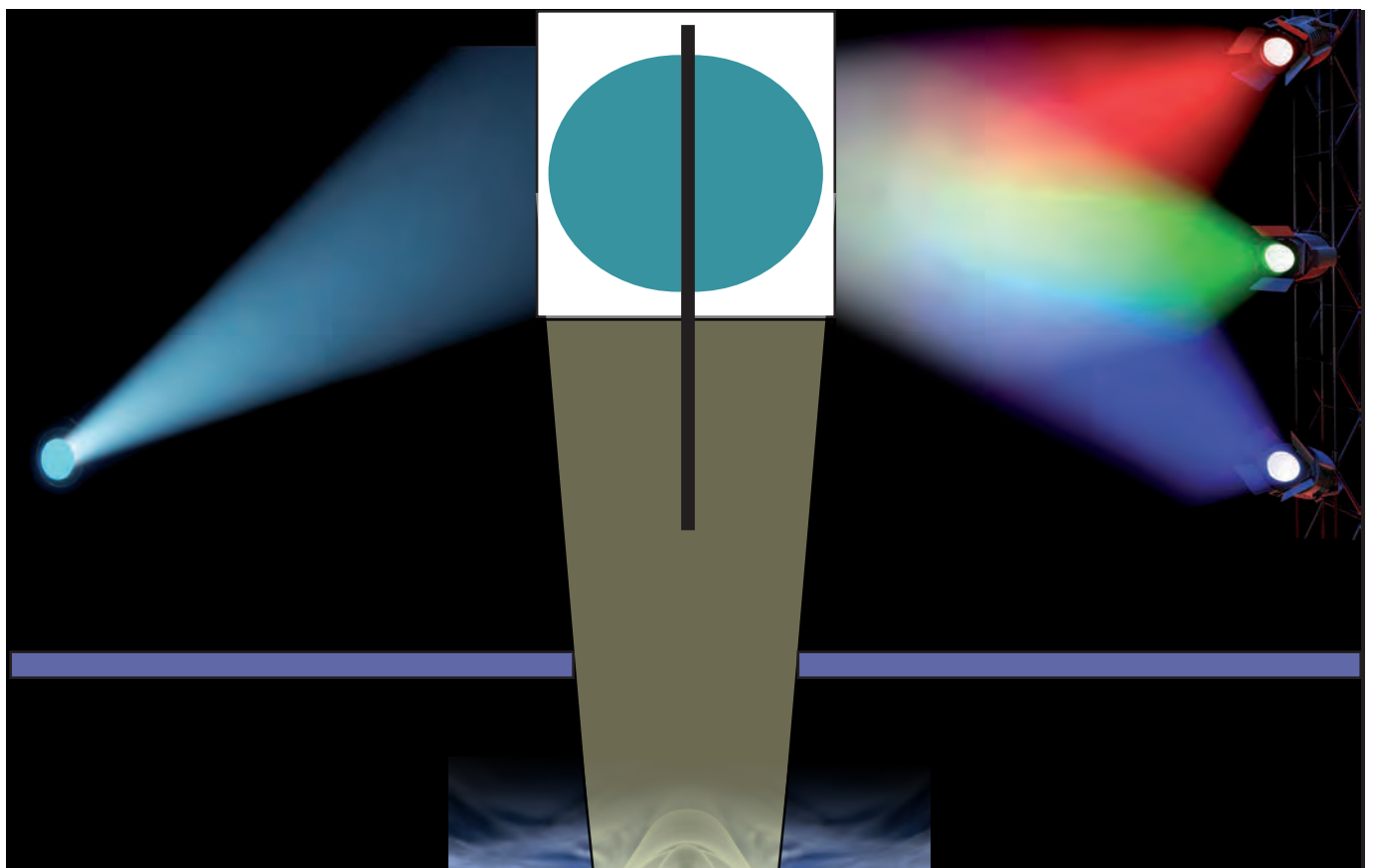
## 人类观察对色彩刺激的知觉

经过对视力正常的人类观察者进行实验，将“标准观察者”确立为所有色度测量和计算的依据。

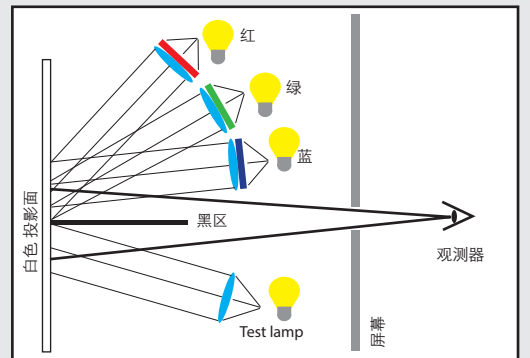
在这些实验中使用分屏。在一侧投射一种特定色彩，在另一侧透射红绿蓝三色。观察者需要通过改变三种光源的强度，重新产生对第一种色彩的印象（三色理论）。对于三原色光源的每次变化，以及实验光的每次变化，在表中按每个对应的波长记录辐射量。

以此方式，人可感知的色彩刺激的整个范围均可记录，这就在数字上记录了色觉能力。

在确定眼睛对色彩刺激的三色感知方面，W. D. Wright 在 1928 年以及 J. D. Guild 在 1931 年完成了意义最重大的实验。Wright 和 Guild 经实验证明，数值之间稍有不同，因为原色光源稍有不同。这些加性混色实验证实了杨的三原色理论。



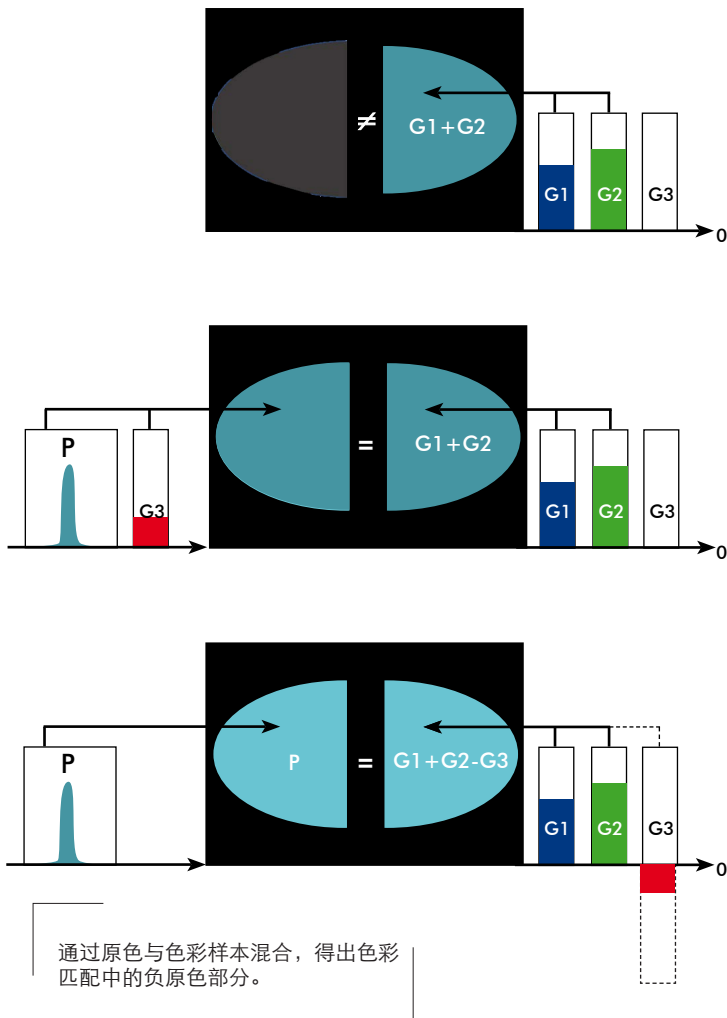
光辐射加性混色实验



## 2° (小视场) 色度

### CIE31 标准观察者

加性混色实验证明，CIE 红绿蓝三原色刺激并不能产生所有真实色彩。有时需要将色彩样本与三原色之一混合，才能达到与其余两种原色混合相等的效果。这意味着，只有三原色之一“为负”，才能通过三原色混合产生某些色彩。因此，对于一些光谱色，色度值必须为负。



$$P + G3 = G1 + G2$$

相当于

$$P = G1 + G2 - G3$$

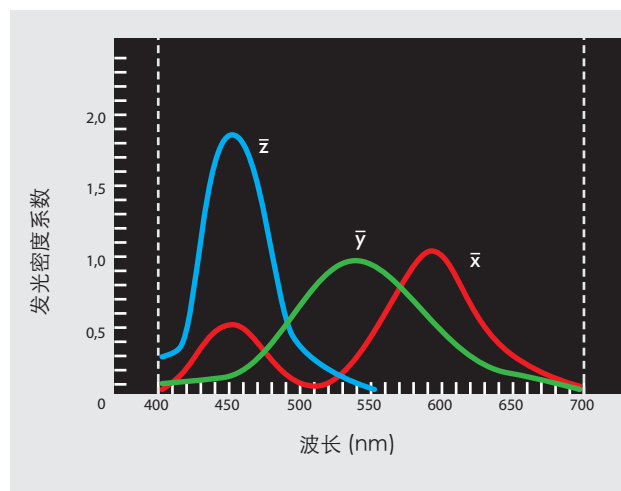
P ... 色彩样本, G1、G2 和 G3 ... 三原色

由于此类限制，1931 年 CIE 将 3 个任意假想测量值 (X、Y 和 Z) 定义为原色刺激 (为了方便色度评价起见而选择)。使用这 3 个测量值，加性混色便可表示所有真实色彩。这些测量值称为“CIE 标准三色刺激值”，而色彩空间则称为“CIE XYZ 色彩空间”。

从 RGB 原色刺激到 XYZ 原色刺激的转换具有以下特性：

- 消除负值 (当时非常难以通过电子方式处理负值)
- 定义具有 x、y 和 z 3 种“假想”原色刺激的新系统，以使光谱轨迹
- 落入由这 3 种原色刺激定义的三角形之内
- 选择并计算 y 函数，以便与光视效率函数  $V(\lambda)$  (CIE 1924) 对应，进而简化计算
- 对于大部分可见光谱范围，z 函数等于零，这也是为了简化计算
- 对辐射相等的光源以及整个光谱范围进行计算，以使 x、y 和 z 函数的面积相等。

所得函数称为 CIE x、y 和 z 色彩匹配函数。它们并非真正意义上的实际函数，只是代表普通标准观察者



2° 标准观察者 (CIE31) 的 x、y 和 z 色彩匹配函数

## 10° (大视场) 色度 CIE64 标准观察者

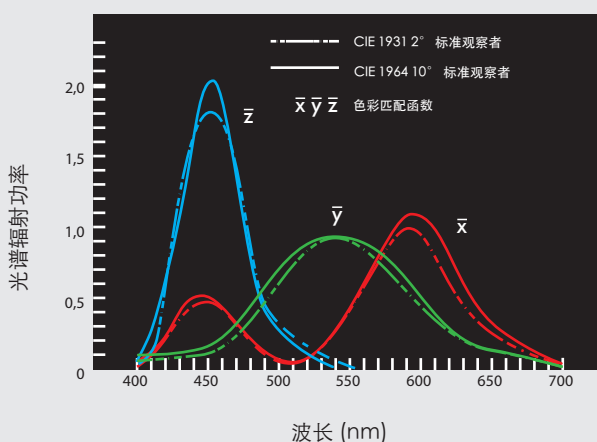
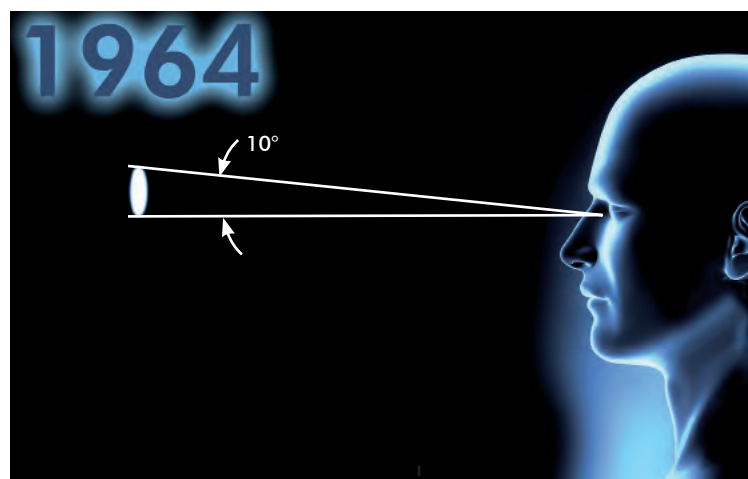
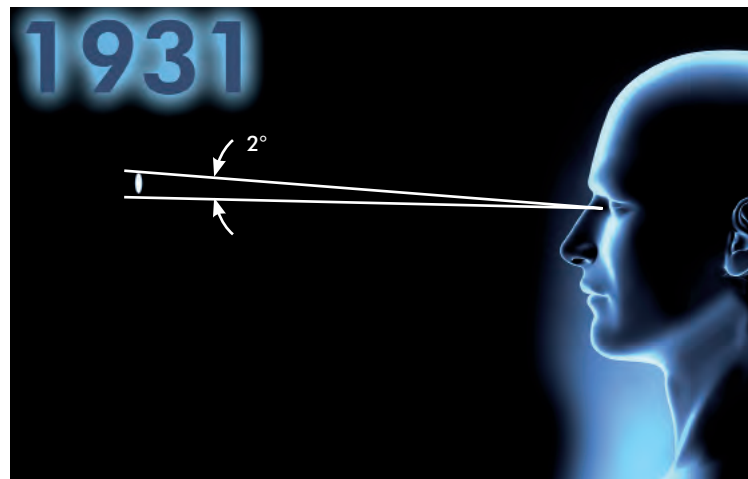
2° 标准观察者的视场相当于，手握一枚 1 欧元硬币，手臂平伸放在眼前

为了能以可控方式将人类感知纳入测量结果，必须定义人类视觉标准。这种标准化视觉由 CIE 标准观察者定义。

CIE31 标准观察者 (2° 标准观察者) 可以追溯到确定人类观察者平均色觉的一次实验。为此，认为色彩在进入眼内视觉最敏锐的区域 (中心凹，即黄斑) 时，人对色彩的感知最精确。在色彩样本的正常视距范围内，这一区域与眼睛的视轴偏离大约 2°。由此确定，观察者视角正好是 2°。这一视场相当于，手握一枚 1 欧元硬币，手臂平伸放在眼前。

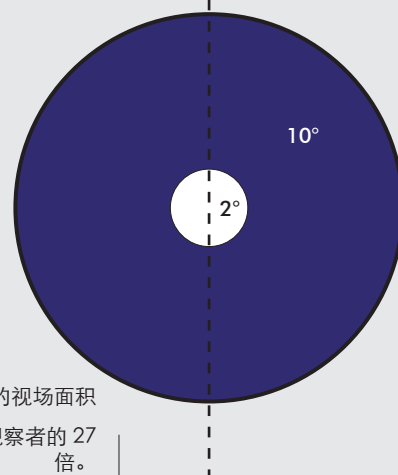
然而，人类感知的正常视场大于 2° 范围。此外，Jacobsen (1948) 和 Judd (1949) 也证明，基于 2° 视角的色度计算与短波长范围内实际观察并不相符 (特别是紫色)。因此在 1960 年，CIE 提出另一标准观察角，

即 10° 标准观察者。这一视场相当于，以 30 cm 标准视距观察一张 A4 纸。最终在 1964 年，CIE 将这一新标准观察者的 x10、y10 和 z10 色彩匹配函数指定为标准。



10° 标准观察者 (CIE 1964)  
的 x、y 和 z 色彩匹配函数

10° 标准观察者的视场面积  
约为 2° 标准观察者的 27  
倍。

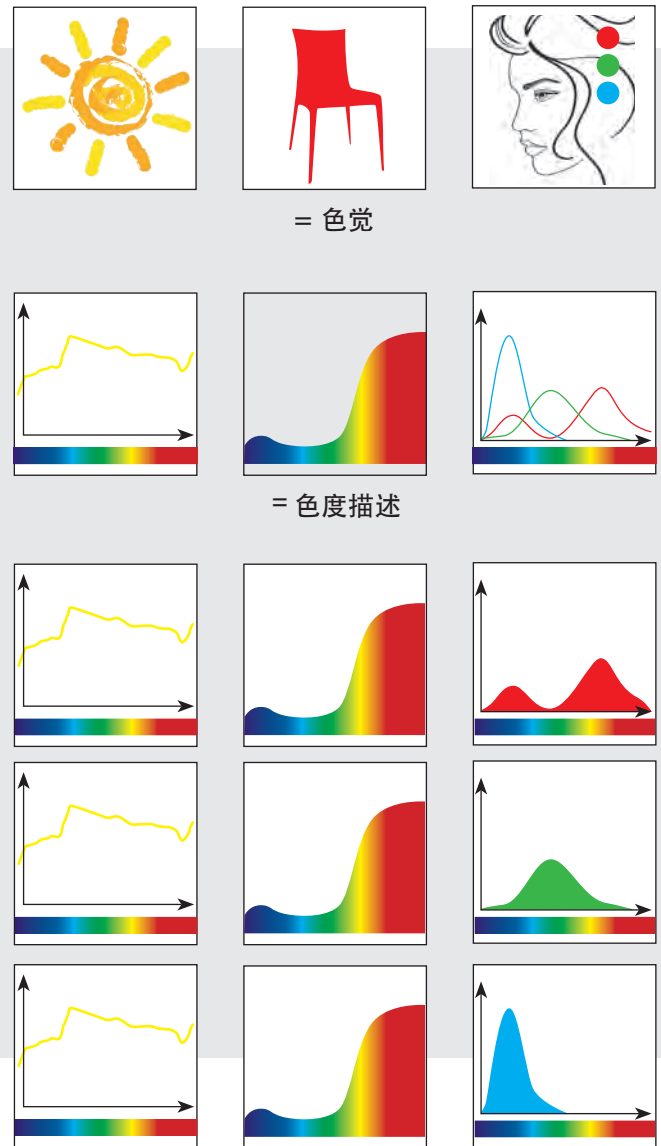


与CIE标准色度系统CIE31对应的色度图

使用标准观察者的 x、y 和 z 标准色彩匹配函数，可将光谱曲线转换为 3 个值 (X、Y 和 Z 标准三色刺激值)。通过标准三色刺激值，物体或光源的色彩可由三个测量值确定。

示例：色彩规范的标准三色刺激值 X 计算。

对于可见光谱范围内每个波长，x 色彩匹配函数的值与波长相同的标准光源类型的光谱辐射功率 S 的值相乘。在整个光谱范围内 (400 nm - 700 nm)，对每个所选波长增量 ( $\Delta \lambda$ ) 行此项计算。然后再对所有波长计算这些乘积结果之和 ( $\sum_{400-700 \text{ nm}}$ )。



为实现精确的色彩分类，我们需要：

1. 光源类型的辐射分布 (E)
2. 波长相关物理  
反射率/物体反射系数 (R)
3. 观察者的色彩规范/标准观察者的色彩匹配函数  $\bar{x}$

为计算有色物体的色彩规范，每个波长的辐射  $S(\lambda)$  都等于  $(\lambda)$ 。

- $R(\lambda)$  之积，即照亮物体的光源  $E(\lambda)$  辐射减少量等于：此物体的反射系数（百分比），  
每个波长增量  $(\Delta\lambda)$  都是如此。

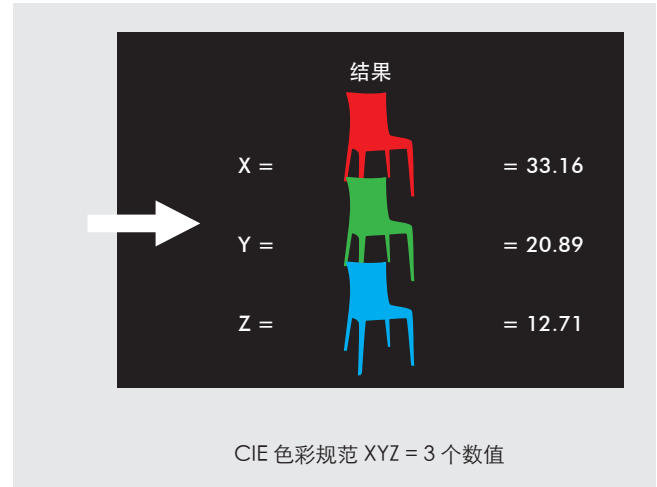
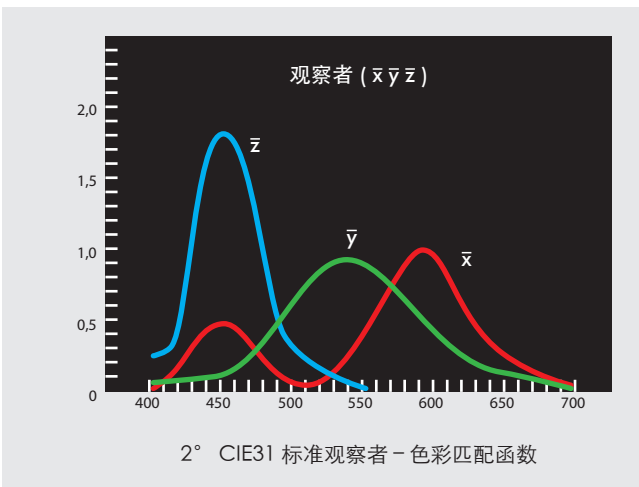
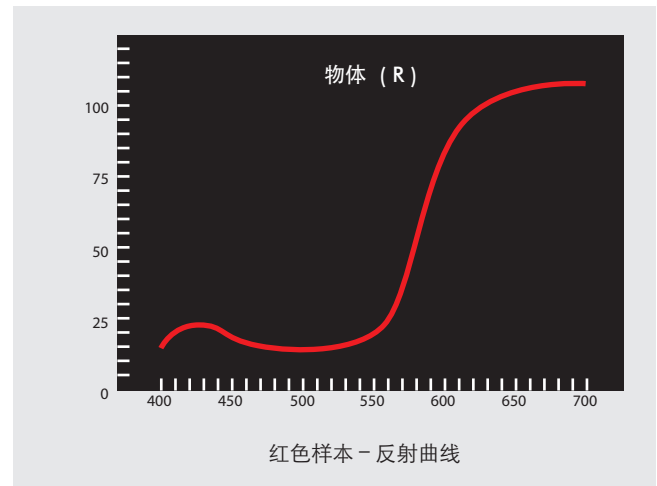
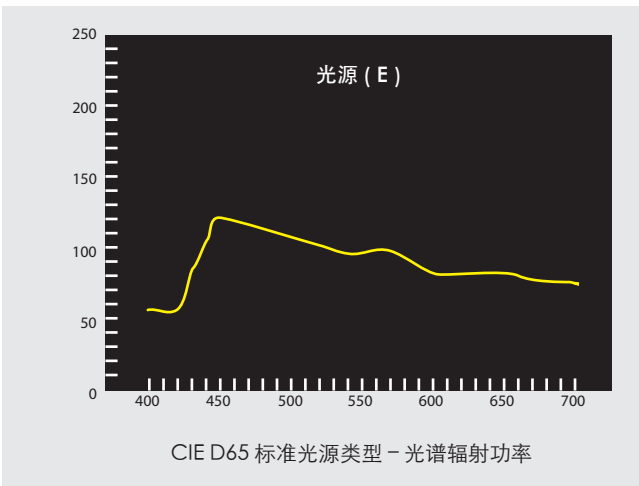
因此，有色物体的 X 标准三色刺激值的数学公式为：

$$X = \sum_{400}^{700} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

其中

- dE = 光源辐射（光源类型）
- R = 物体反射系数
- $\bar{x}$  = 标准观察者的色彩匹配函数
- $\lambda$  = 波长符号；
- 如果  $(\lambda)$  在另一符号之后，说明它与波长相关

同理计算 Y 和 Z。



光谱辐射功率 (E) x 反射系数 (R) x 色彩匹配函数 (x,y,z) = 3 色值 (X,Y,Z)

XYZ 标准色值计算原理

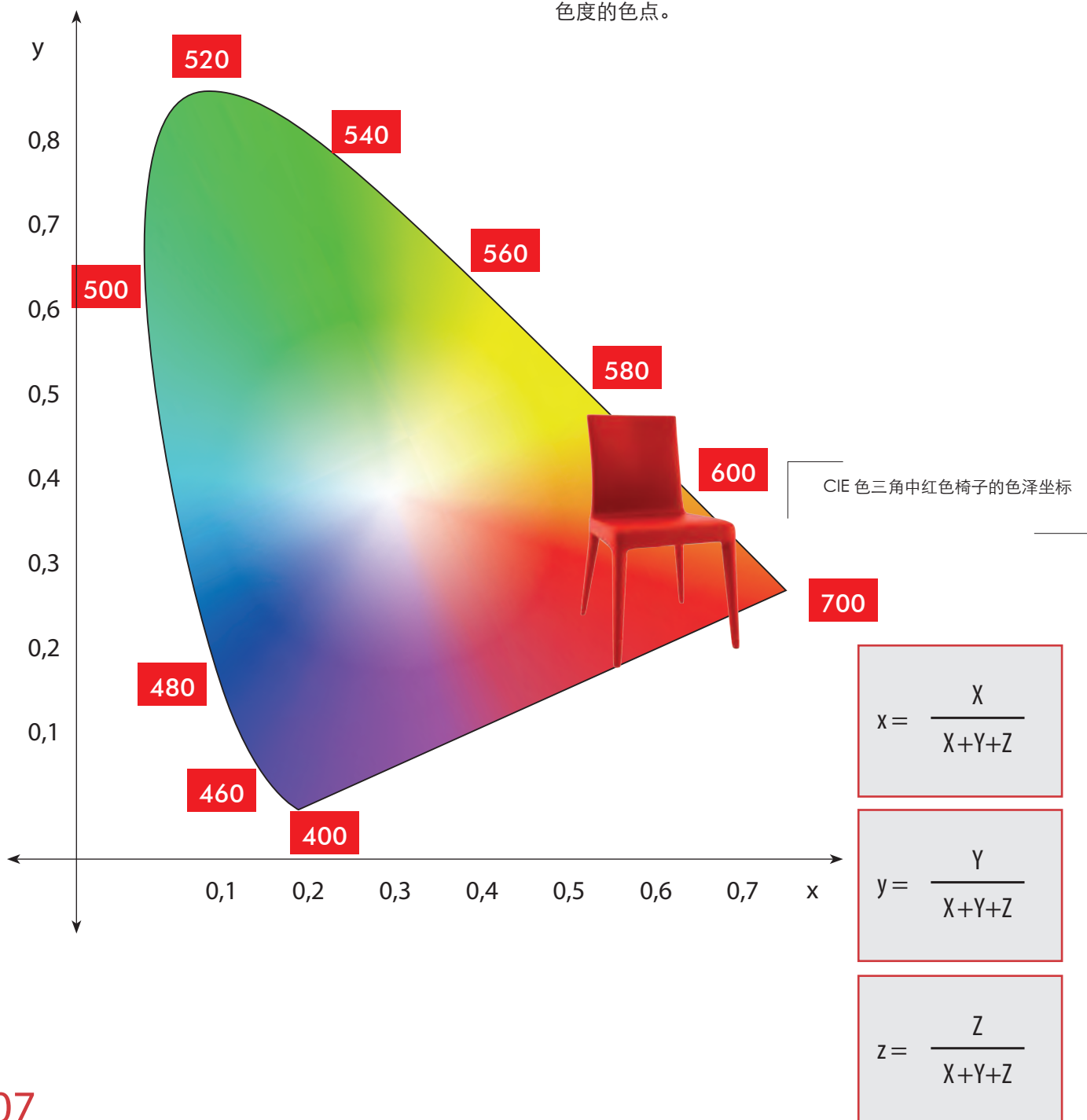
与 CIE 标准色度系统 CIE31 对应的色度图

使用 CIE 标准色度系统的 XYZ 标准三色值，色彩可以精确定义。但遗憾的是，通常很难产生视觉评估相关性。即使 Y 标准三色刺激值相对贴切地体现亮度感，但 X 和 Z 值很难近似达到色彩视觉中的色相和色度标准。

为了能够更加明确地表示观察者所感知的三维色彩空间（按色度），制定出二维 CIE 标准色度图。这可用于确定与亮度无关的色彩规范。为此，CIE 引入 x、y 和 z 标准色度坐标，其中 x 和 y 用于确定色度。相对而言，“小 x”是红色坐标，“小 y”是绿色坐标，z 无

关紧要，因为  $z=1-x-y$ ）。以鞋为例，色度坐标如下：对于 D65 标准光源和 2° 标准观察者， $x=0.4967$ ， $y=0.3129$ 。

为便于图示表达，CIE 提出以 x 为横坐标，y 为纵坐标的坐标系。可见光谱范围内纯色的色度坐标形成一条形似“鞋底”的凹曲线。这称为光谱轨迹。在“鞋底”内侧区域（又称色三角），所有可能的色彩均可表示（以光表示）。在此区域内，每个色点都有不同的色度。绿色和蓝色位于色三角顶部区域内，紫色位于左下角，而红色则位于右下角。紫色与红色之间连接直线称为紫红线（紫红色不是光谱色！）。闭合区域包含所有实际色度的色点。





此区域中心是等能量辐射光源的自然消色点 ( $x=0.333$ ,  $y=0.333$ ), 又称白点。白点随所用光源而变, 因为每种光源类型都有不同的光谱组成。标准光源 A (灯泡发光) 位于位于黄色/橙色比其他标准光源更明显的区域。标准光源 D65 (日光) 更白, 接近中心区域。

为了在 CIE31 标准色度图中简化色彩确定和分类, 可定义色彩的等色相波长和色度, 而不是标准色度坐标。与视力分类相似, 此方法可按色相和色度定义色彩。这也是此方法的优势。等色相波长是与所需色彩的加性混色对应的波长。它表示纯色点的色相。色度是混色中纯色所占百分比。最高色度等于 1。这对应于纯色。色度为 0 对应于光源类型的色彩 (白光)。在光谱轨迹上色度最高, 在中心消色点色度最低。

## 结论 - 概要

简而言之, 只要能够使用 CIE31 标准色度系统, 通过 X、Y 和 Z 三个测量值并将标准光源类型和 CIE31 标准观察者考虑在内, 便可精准确定物体色彩。

CIE31 标准色度系统为现代色彩测量奠定科学基础。

从 1936 年至今, 有关色度公式的所有著作和研究均以此系统为基础, 虽可通过三个测量值精准确定色彩, 但它已成为众多研究和改进的主题。有关详细信息, 请参见下文章节。



# 色彩空间

## 综述

通过三色刺激法绘制出第一张色彩空间图，即 CIE 色度图。在色度学领域内，绘制成图是一个意义重大的决定性时刻。在图上找到两个物体，即可测量间距。

间距表示（尽管存在缺陷）样本之间色差。CIE 色度图以数字表示视觉差异，是最先得到广泛使用的工具。

它仍是持续发展完善色彩空间图和色度计算的基础。

现在，我们使用数字指定色彩，设定色容差以及评估有色产品的一致性和可接受性。最显著的是，我们现在看到，对色差的数字描述与我们亲眼所见更为相符。

## 1905 年至 1976 年发展史

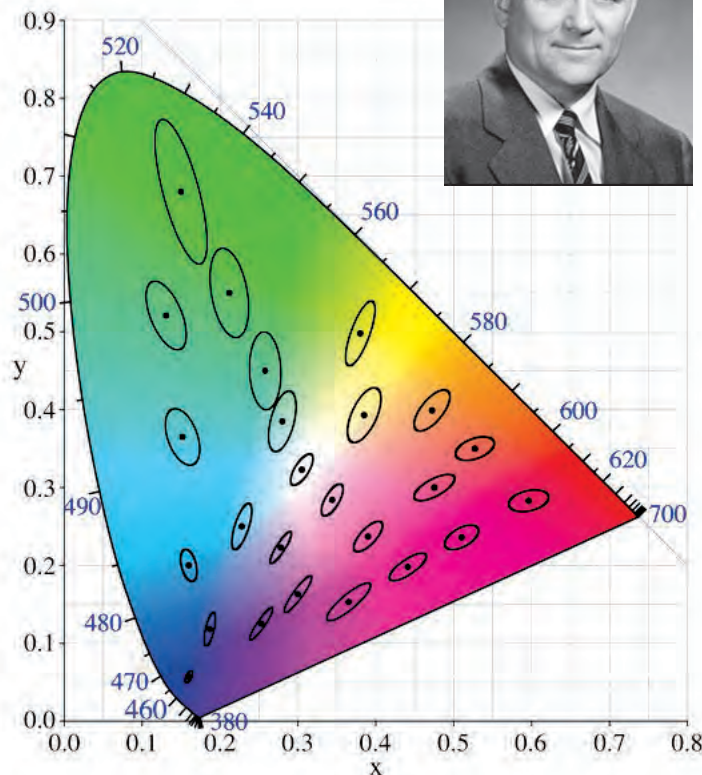
20 世纪初，蒙赛尔在科学基础上开发出第一套色系。他按色泽、亮度和色度这三个可测量特性，通过三维排列确定色彩。1905 年，他发表介绍该系统的“表色法”著作。1915 年，从不同视角展现三维色彩空间的第一个色谱问世。

蒙赛尔色谱以人类观察者对色彩的感觉为导向，具有以下特点：

- 光学平衡设计（均匀色彩空间）
- 色彩相互确定法，其中每种色彩只占一个位置。

另一方面，CIE31 标准色度系统则以光的物理特性为基础。CIE 系统旨在实现光色、光源以及体色均匀性和标准化。此处不考虑色度的感知均匀性。1942 年，MacAdam 通过色彩视觉实验证明，CIE31 色彩空间存在非均匀性。在照明条件恒定的情况下，观察者观看 2 种色彩，其中一种色彩固定，另一种色彩必须由观察者调整，使其与试色相同。通过 CIE31 图中 25 种不同试色进行这一实验。经过调整的色彩都在围绕原始试色的椭圆内，而椭圆的形状和朝向则有很大差异（视色彩而定）。

David L. MacAdam



以 MacAdam 椭圆表示的 CIE 色图

## CIE Lab 色彩空间 - 定义

### 和特性

这促进 CIE 开发出 CIE31 色彩空间数学变换，以保持色彩空间均匀。

1976 年，CIE 建议两套新系统，即 CIE Luv 和 CIE Lab 色彩空间。为与其他系统（特别是 Hunter 系统）区分开来，使用的所有参数都加一个 \*（例如  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$ ）。

CIE Luv 系统更适用于加性混色，例如扫描仪和监视器光色测量。CIE Lab 系统仅限于本色检验。

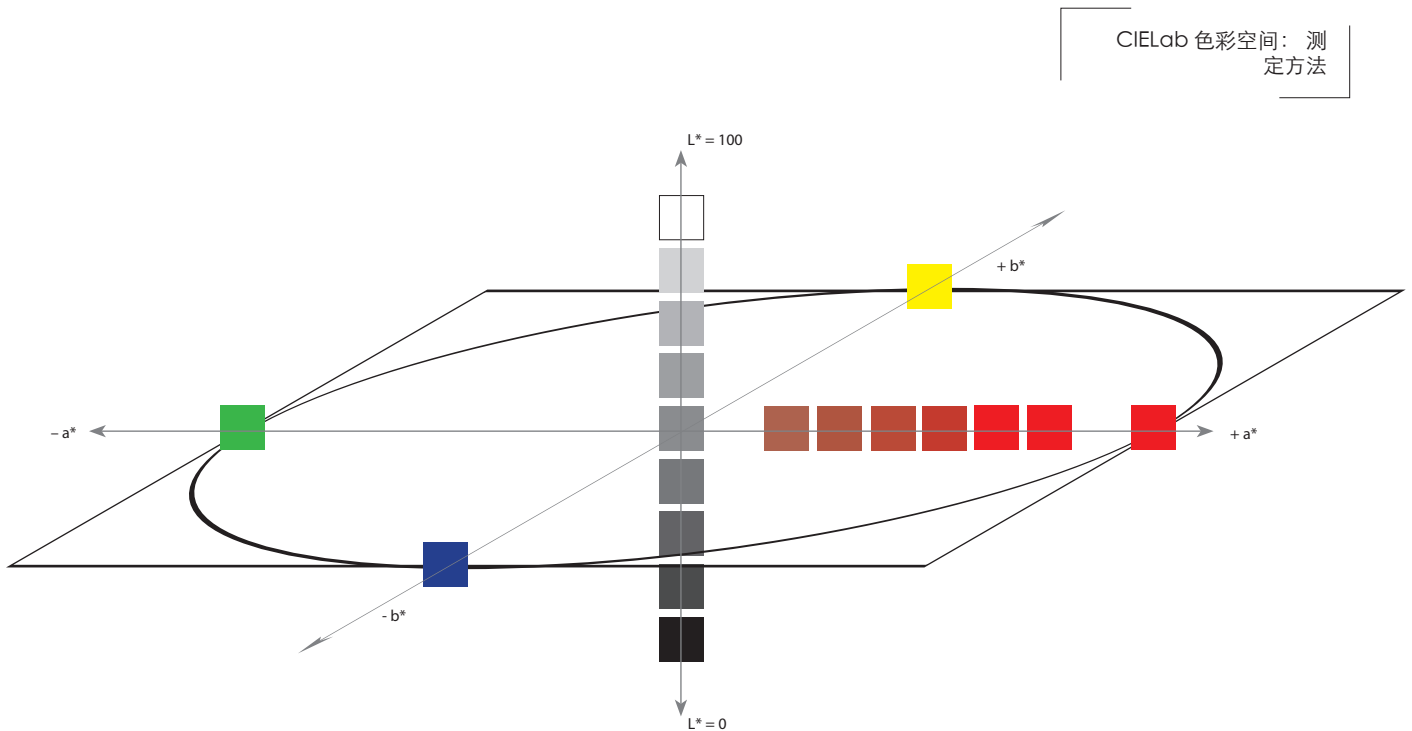
由于在色彩测量应用领域内，CIE Lab 系统最为常用，我们将详细介绍此系统。

1976 CIE 色彩空间（又称 CIELAB 色彩空间）基于 1931 CIE 三色刺激坐标 X、Y 和 Z 的非线性变换。制定这一色彩空间有两个目标：

- 均匀。计算出的样本之间距离必须与样本之间视觉差异均匀相关。
- 简单。应为用户解读数据提供简单方法。

某些条件下，CIE Lab 色彩空间是均匀色度，与设备无关。色彩空间内每种可以感知的色彩均以坐标为  $\{L^*, a^*, b^*\}$  的色点定义。在对立色理论应用中，绿色和红色分局  $a^*$  轴两侧。 $b^*$  轴对应于蓝黄对立色。 $L^*$  轴与此平面垂直，表示亮度。 $L^*$  轴也可称为中性灰轴，因为其端点分别为黑色 ( $L=0$ ) 和白色 ( $L=100$ )，这条轴上端点之间各值为消色灰阶。

基于 XYZ (CIE31) 的 CIE76 (CIE Lab) 色彩空间变换和计算公式如下：



色值:  $L^* a^* b^*$

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{于} \quad \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \quad a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$L^* = 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \quad \text{于} \quad \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \quad b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

其中

■ 如果  $\frac{X}{X_n} > 0.008856$ ,  $f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}}$ , 否则  $f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7.787 \left(\frac{X}{X_n}\right)$

■ 如果  $\frac{Y}{Y_n} > 0.008856$ ,  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}$ , 否则  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7.787 \left(\frac{Y}{Y_n}\right)$

■ 如果  $\frac{Z}{Z_n} > 0.008856$ ,  $f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}$ , 否则  $f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7.787 \left(\frac{Z}{Z_n}\right)$

值  $X_n, Y_n, Z_n$  是特定 CIE 标准光源类型 (例如 D65 或 A) 体色的绝对白色值 (理想情况下是消色刺激)。这种条件下,  $X_n, Y_n, Z_n$  是标准光源类型的色值, 其中  $Y_n$  等于 100。

例如对于 D65/10°:

$X_n = 94.81$

$Y_n = 100.00$

$Z_n = 107.304$

为使用亮度、彩度 (色度) 和色相的相关系数表示色彩距离, 可按如下定义的规则计算:

■ CIE76 亮度:  $L^*$  参数  $L^*$  由以下关系定义:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{于} \quad \frac{Y}{Y_n} > 0.008856$$

$$L^* = 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \quad \text{于} \quad \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856$$

■ CIE76 色度-彩度:  $C^*$  参数  $C^*$  由以下关系定义:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

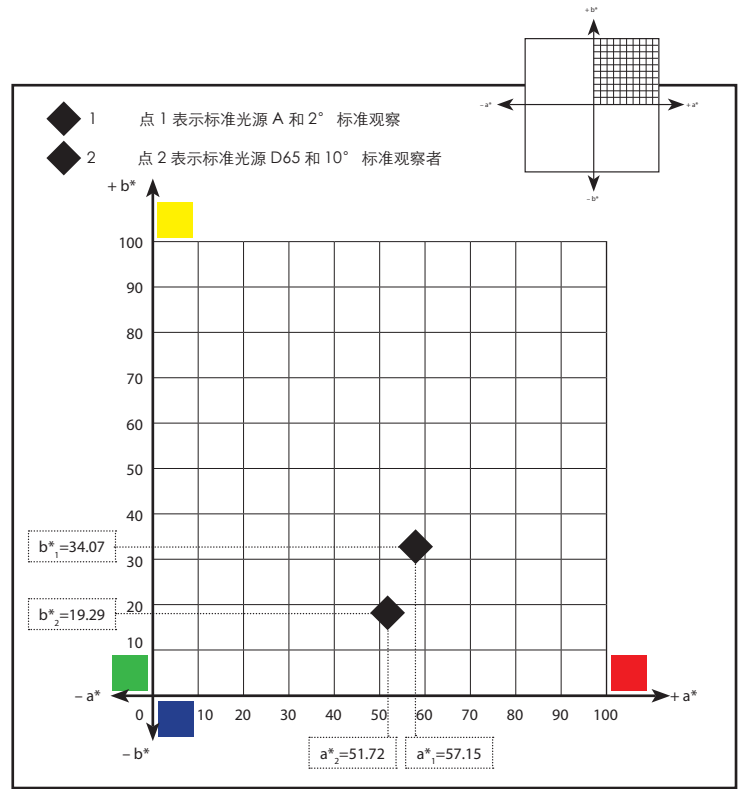
■ CIE76 色相角:  $h$  参数  $h$  由以下关系定义:

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

此外，CIELab 色彩空间还有欧几里得空间的特性。每一点均可表示为

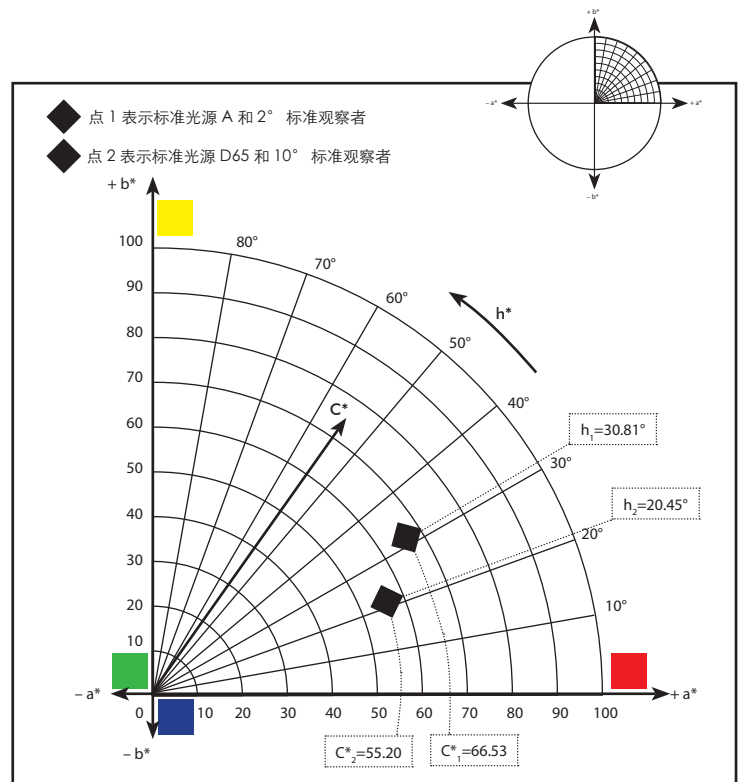
- 直角坐标  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$ ，其中
  - $L^*$  表示亮度
  - $a^*$  表示红/绿色彩空间
  - $b^*$  表示黄/蓝色彩规范

以 CIELab 系统的直角坐标  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  表示色点位置



- 或柱坐标  $L^*$ 、 $C^*$  和  $h$ ，其中
  - $L^*$  仍表示亮度
  - $C^*$  表示彩度或色度
  - $h$  表示色相角或色泽。

以 CIELab 系统的柱坐标  $L^*$ 、 $C^*$  和  $h$  表示色点位置

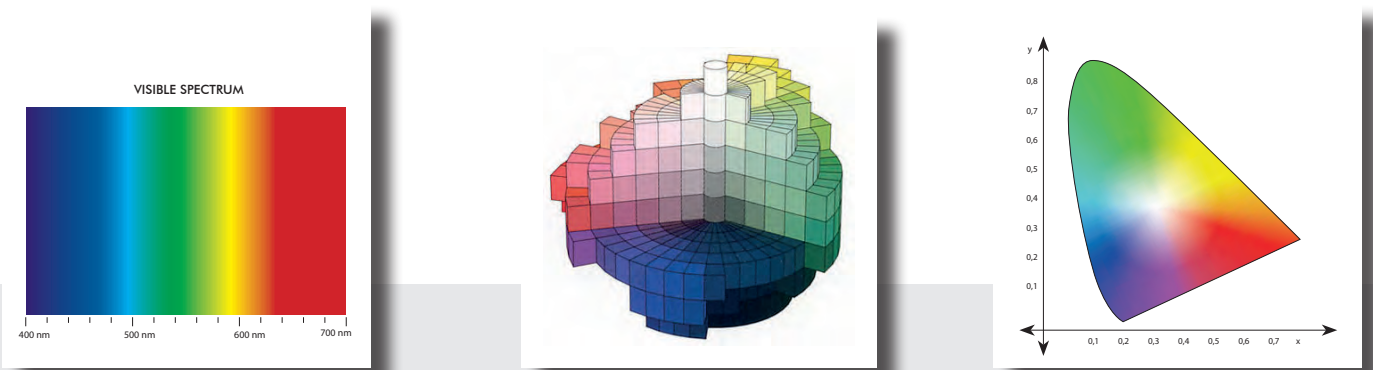


由于变换原因，CIELab 色彩空间没有色度图。在由值  $a^*$  与  $b^*$  或  $C^*$  与  $h$  定义的色彩平面内，无法多加色彩。

CIELab 色彩空间结构大致（非绝对）符合感知，在统计上，它与人眼色觉对应。因此，就感知心理学而言，它对色彩评估并非严格均匀，它简化了色点和色差的解释。

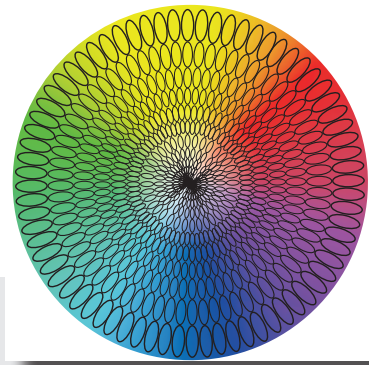
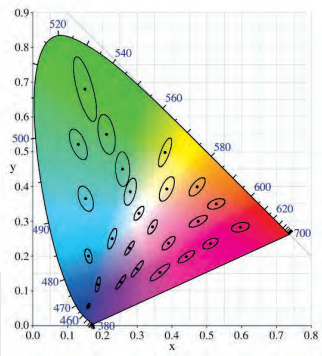
## 从色彩到色彩测量

从视觉评估到通过 CIE31 和 CIELab 1976 标准化色系确定色彩（始终考虑单独或分离色彩），上文章节着重介绍色彩测量发展。下文章节将介绍两种或更多色彩之间距离和色彩可接受性。



色彩测量之前		
始终	1905-1915	
语言	蒙赛尔色谱	CIE31
“红色” “鲜艳” “浅色”	样本 2.5 R 5/12	X = 33.16 Y = 20.89 Z = 12.71  对于 D65 / 2°
词汇有限	可比确定	首次计算
由人确定		
主观		

从色彩到色彩测量 从技术语言到 1931 CIE 色彩空间，再到 1976 CIE Lab 色彩空间  
从主观到客观，再到测量



### 色彩测量

1931

1976

色三角

CIE Lab 色彩空间

$x = 0.4967$   
 $y = 0.3129$   
主色  $L_{\lambda} = 628 \text{ nm}$   
发光密度 = 46.9 %

$L^* = 52.15$   
 $a^* = +51.72$   
 $b^* = +19.29$

$L^* = 52.15$   
 $C^* = 55.20$   
 $h = 20.45^\circ$

对于 D65 / 2°

对于 D65 / 10°

对于 D65 / 10°

首次客观确定

通过直角坐标确定

通过柱坐标确定

色度计算

客观

## List of references

- Farbe sehen, Corinna Watschke, 01.2009 [[www.planet-wissen.de](http://www.planet-wissen.de)],
- Farbmanagement in der Digitalfotografie (ISBN 3-8266-1645-6), 2006, Redline GmbH, Heidelberg
- Beschreibung und Ordnung von Farben, Farbmeterik, Farbmodelle, DMA Digital Media for Artists – Archiv 2006-2011, Kunstuniversität Linz, Gerhard Funk
- Messen – Kontrollieren – Rezeptieren, Dr. Ludwig Gall [[www.farbmeterik-gall.de](http://www.farbmeterik-gall.de)]
- Farbabstandsformeln, 2012, Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V. [[www.fogra.org](http://www.fogra.org)]
- Wikipedia, various articles about color and color measurement [<http://de.wikipedia.org/wiki/Farbe>]
- Various representations of color models and color spaces [[http://www.chemie-schule.de/chemieWiki\\_120](http://www.chemie-schule.de/chemieWiki_120)]
- Praktische Farbmessung, Anni Berger-Schunn, 2. überarbeitete Auflage, 1994, Muster-Schmidt Verlag, Göttingen – Zürich
- Farbabstandsformeln in der Praxis, SIP 01.2011
- Schläpfer, K.: Farbmeterik in der grafischen Industrie, 3. Aufl. St. Gallen; UGRA 2002 (Tabelle S. 48)

## Publication data

### 发布者:

Datacolor, Inc. 5 Princess Road, Lawrenceville, NJ 08648, USA

电话: 1-800-982-6497 | 传真: 609-895-7472 | [marketing@datacolor.com](mailto:marketing@datacolor.com) | [www.datacolor.com](http://www.datacolor.com)

### 正文:

Gabriele Hiller, Hiller Direct Marketing, Stühren 41, 27211 Bassum, Germany

[www.hiller-direct-marketing.de](http://www.hiller-direct-marketing.de)

2019 年10月

© 版权 Datacolor。保留所有权利。

### 欧洲

Datacolor AG Europe  
6343 Rotkreuz  
电话: +41 44.835.3800

### 美国

Datacolor 总部  
Lawrenceville, NJ  
电话: +1 609.924.2189

### 亚洲

Datacolor Asia Pacific Limited  
Hong Kong  
电话: +852 24208283