



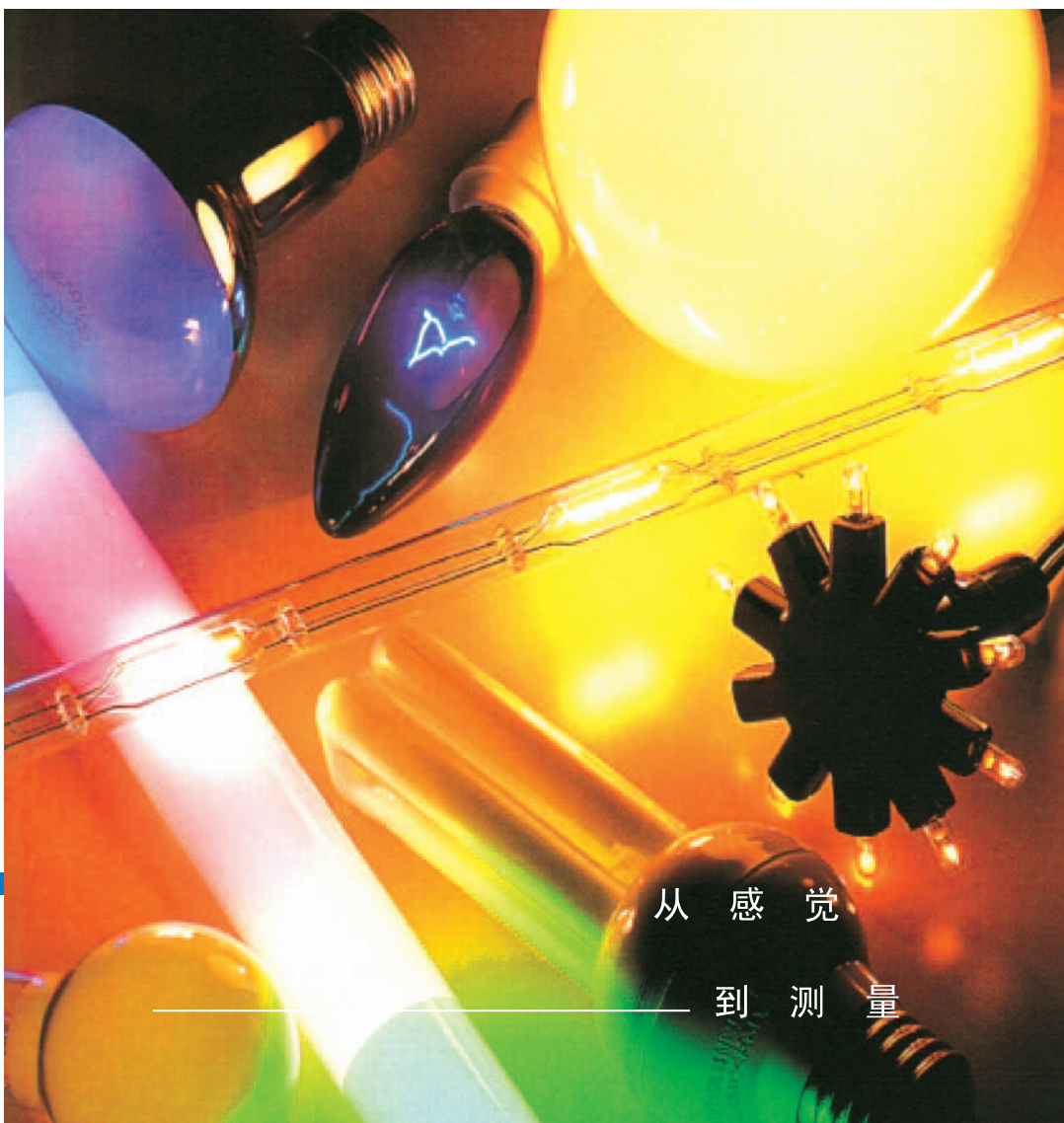
KONICA MINOLTA

光  
的

语言

The essentials of imaging

<http://se.konicaminolta.com.cn>



从感觉

到测量

## 1 引言

- 1.1 光是什么? 2
- 1.2 能测量什么? 2

## 2 基本概念

- 2.1 辐射测定 3
  - 2.1.1 辐射通量 3
  - 2.1.2 辐射强度 3
  - 2.1.3 辐射照度 4
  - 2.1.4 辐射亮度 4
- 2.2 光谱辐射测定 4
  - 2.2.1 光谱辐射亮度 4
  - 2.2.2 光谱辐射照度 4
- 2.3 光度测定 5
  - 2.3.1 光通量 6
  - 2.3.2 光强 6
  - 2.3.3 照度 6
  - 2.3.4 亮度 7
- 2.4 色度测定 7
  - 2.4.1 色彩 7
  - 2.4.2 色彩感知 7
  - 2.4.3 色彩的混合 8
  - 2.4.4 光源色彩的描述 9
    - 2.4.4.1 三刺激值色度测定 9
      - 2.4.4.1.1 CIE 1931  $Y_{xy}$ 色度图 10
      - 2.4.4.1.2 CIE 1976 UCS色度图 10
      - 2.4.4.1.3 亥姆霍兹坐标 11
    - 2.4.4.2 色温 12
    - 2.4.4.2.1 相关色温 13
    - 2.4.4.3 光谱辐射测定 14

## 3 测量仪器

- 3.1 辐射计 15
  - 3.1.1 辐射计应用 15
- 3.2 光度计 16
  - 3.2.1 传感器 16
  - 3.2.2 校准方法 17
    - 3.2.2.1 色彩修正系数 17
    - 3.2.2.2 照度计 19
    - 3.2.2.3 光通量计 20
    - 3.2.2.4 光强计 20
  - 3.2.3 光度计应用 18
- 3.3 三刺激测色计 21
- 3.4 分光辐射度计 23
- 3.5 综述 24

## 4 光测量计的测定应用

- 4.1 照明测定应用 24
  - 4.1.1 显色性 25
  - 4.1.2 色温 27
  - 4.1.3 光强分布配光特性 29
  - 4.1.4 光通量 31

## 5 总结

32

## 6 参考文献

33

# 1 引言

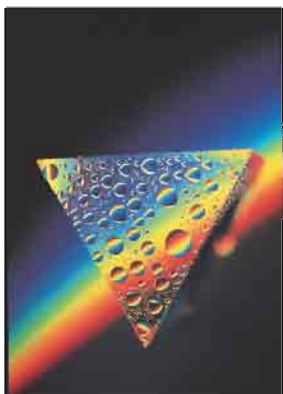
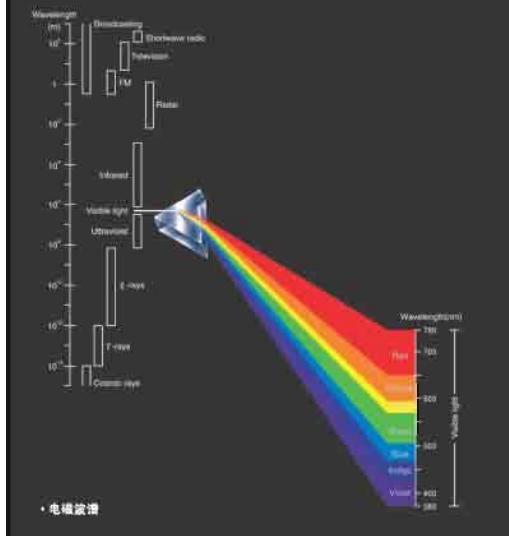
人类要看见物体，就必须要有光。对于我们大多数人，光提供了一个充满视觉信息的世界。只有从物体反射出来的光到达我们的眼睛，刺激视神经，我们才能看到周围物体的形状和颜色。

## 1.1 光是什么？

光是能量存在的一种形式，也是宽广的电磁波谱中的一部分。无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线、伽玛射线组成了电磁波。可见光在电磁波谱中是很窄的一部分，波长范围一般被定义为380nm至780nm。通常，光被定义时也包含有红外线和紫外线。

光的检测是一门基本的学科，也需要有广泛的基础知识。要进行光的检测，光学方面的基本常识和概念、术语是必要的。测量光是一项挑战，尤其是决定测量什么和如何测量。

### 人眼能把光谱感应为色彩



## 1.2 能测量什么？

通常，从光源放射或照到物体表面的光的总能量可以被测量。此总能量覆盖可见光部分，也包括红外线和紫外线的能量。特定波长或某一波长区域的能量也能测量。

另一个有趣的领域是色彩，它是光的一种特性，也能被测量和数量化。

测量光的科学被称为光度测定，它是辐射测定（可见光区域外的辐射测量）的一部分。

## 2.1 辐射测定

辐射测定是测量电磁辐射的科学，此测量所涵盖的光谱是基于物理常数层面上的。

我们所关心的辐射特性是辐射功率和它在空间及角度的分布。

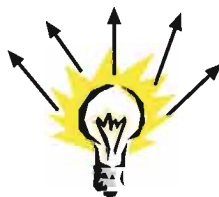
四个基本概念为：

- 辐射通量
- 辐射强度
- 辐射照度
- 辐射亮度

### 2.1.1 辐射通量

这是源发射或者表面接受的辐射功率。也可被定义为通过某特定区域或某立体角辐射能量的速率。

辐射通量的国际单位是瓦特(Watt)。



辐射通量  
总功率(Watt)

### 2.1.2 辐射强度

它被定义为从源发出的某角度内的辐射密度。在特定方向上的辐射强度是整个源在那个方向上（呈锥体状）所发出的所有辐射线的功率总和（例如每立体角的功率）。

辐射强度的国际单位是瓦特/球面度(Watt/sr)。



辐射强度  
功率/立体角

### 2.1.3 辐射照度

这是对照在某物体表面的辐射通量的测量（例如单位面积上的辐射通量）。

辐射照度的国际单位是瓦特/平方米( $\text{Watt}/\text{m}^2$ )。



### 2.1.4 辐射亮度

这是指辐射源的单位投影面积内的辐射强度。

辐射亮度的国际单位是瓦特/平方米·球面度( $\text{Watt}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ )



## 2.2 光谱辐射测定

光谱辐射测定是在电磁波谱中某段波长的光能测量。它能测量整个光谱段或是特定带宽的波长。

### 2.2.1 光谱辐射亮度

特定光源的辐射亮度是一个定值，它是整个光谱段范围内的所有能量总和。对于特定波长的能量值可用光谱辐射亮度来测量。

光谱辐射亮度的国际单位是瓦特/平方米·球面度·纳米( $\text{Watt}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ )。

### 2.2.2 光谱辐射照度

这是对照在单位面积上的特定波长的辐射通量的测定。

光谱辐射照度的国际单位是瓦特/平方米·纳米( $\text{Watt}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}$ )。

## 2.3 光度测定

电磁能量能以光的形式被人眼看见，所以光度测定是对电磁能量在心理与物理特性上的测定。“明亮”这个形容光线的词汇的使用，定义了光度测定应根据人类的感知而进行。

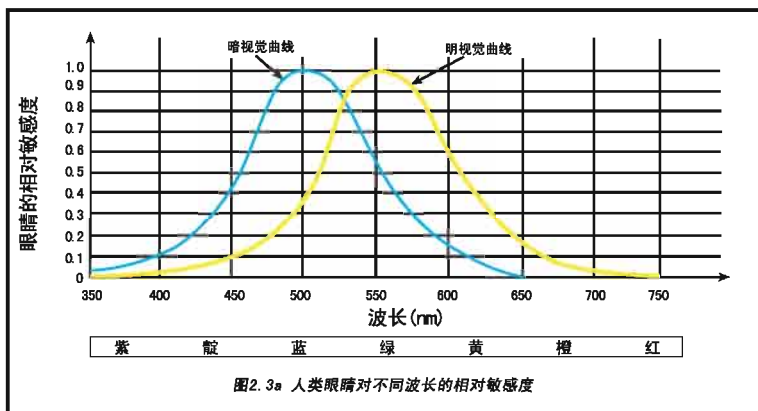


图2.3a 人类眼睛对不同波长的相对敏感度

当1942年，国际照明委员会（CIE）定义了人眼的平均敏感度后，光度测定成了一门新兴学科。CIE测定了大量人类样本的亮适应数据，然后汇编进CIE标准光度函数（明视觉曲线—正常状态下的色彩感知；暗视觉曲线—低照度情况下的非彩色感知。—见图2.3a）。

光度测定的值与辐射测定的值相对应，对应关系为CIE的标准光视效率函数。我们可以把光视效率函数想像成接近人眼表现的一块滤镜的转换函数（见图2.3b）。



图2.3b 辐射测定与光度测定的关系

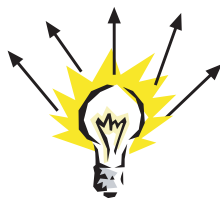
光度测定包括四个概念，称为光通量、光强、照度、亮度。

### 2.3.1 光通量

光源以电磁波的形式辐射能量。我们用通量来形容光能，光通量是对光源发射或是某表面接收光能流量的测定。通过估算与标准眼睛相对应的光度效率的辐射，从辐射通量得到光通量的数值（CIE标准光谱效率函数， $V_{\lambda}$ ）。

单位是流明 (lm)。

$$\text{lm} = (683) \times (\text{辐射通量值}) \times (V_{\lambda})$$



光通量  
总功率/流明

### 2.3.2 光强

这个描述了光源在某方向上的强度，定义为发射到单位立体角内的光通量值。

单位是坎德拉 (cd)。

1 cd = 1 流明每球面度（实际应用时，一坎德拉大致等于一烛光。）



光强  
总功率/立体角

### 2.3.3 照度

这是对照在表面上的光通量的测定，表述为流明每单位面积。

单位是勒克斯 (lx)。

1 lx = 1 流明每平方米 ( $\text{lm}/\text{m}^2$ )

英制单位是尺烛光。

1 尺烛光 = 1 流明每平方英尺 ( $\text{lm}/\text{ft}^2$ )



照度  
总功率/单位面积

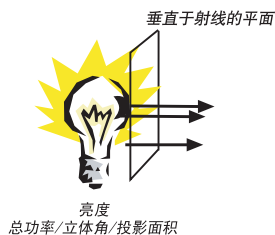
## 2.3.4 亮度

也称为光亮度。亮度是对发射自或反射自某一投影平面的通量的测定，也可被想象为单位面积上的光强。

单位是坎德拉每平方米( $\text{cd}/\text{m}^2$ )，或者叫做尼特(nit)。

英制单位是英尺朗伯(f1)。

1 f1 = 0.2919 nit



## 2.4 色度测定

### 2.4.1 色彩

色彩是光的一种特性，决定于光的光谱成份和人眼的交互作用。因此，色彩是一种与心理紧密联系的物理现象，对于色彩的感知是主观的。

### 2.4.2 色彩感知

眼睛工作的时候象一架照相机，晶状体在视网膜上形成景物的图像。在视网膜上有两种感光细胞，分别为视杆和视锥细胞。视锥细胞可分为三类，每类细胞感知特定的光谱段，其中最敏感的是红、绿、蓝波段。这三类细胞的相互作用形成的刺激，被大脑解释为色彩。这种被普遍接受的视觉色彩理论称作三原色理论。

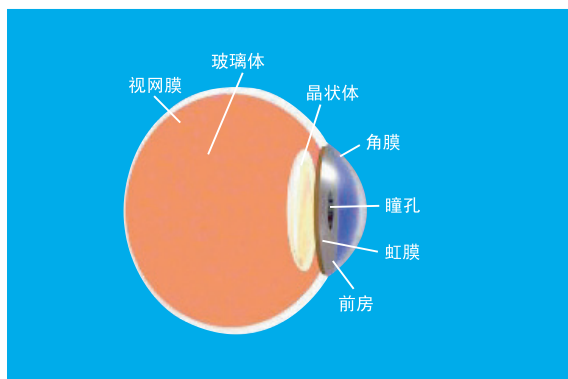


图2.4.2 人眼



### 2.4.3 色彩的混合

伊萨克·牛顿通过棱镜将白光折射为光谱色彩带，首次证实并解释了白光的组成。如果彩色光线增加了，意味着不同的光谱成份也增加了。这种增加的色彩在大脑中的影响可以是可视光谱中的任何色彩，例如，黄色；也可以是非光谱色（光谱色的混合物），例如，紫色。

彩色光线的增加引起色彩的增加，这称为加色法。

人们发现，眼睛对色彩的感觉，是三种视锥细胞共同作用的产物。

图2.4.3a 显示了混合红、绿、蓝三种色彩后的视觉效果。  
红、绿、蓝称为三原色，青、品红、黄称为三间色（三补色）。

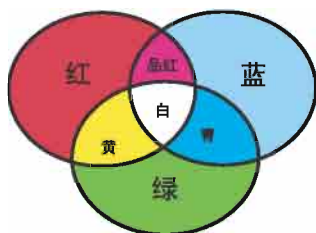


图2.4.3a 加色法

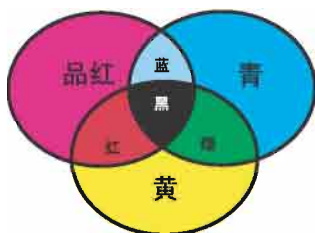
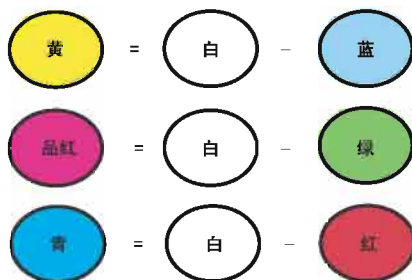


图2.4.3b 减色法

一般物体的色彩取决颜料。颜料通过减去入射光的部份光谱来呈现出另一种色彩，剩余的光线反射后进入眼睛，人就感觉到了物体的色彩。

混合颜料来制造色彩的方法可以概括为减色法（见图2.4.3b），每种颜料都在入射光谱内吸收特定的光谱成份，反射剩余的光谱。下面是一些例子（入射光线为白光）：



## 2.4.4 光源色彩的描述

过去，人们发明了很多方法来度量色彩，以使得色彩的交流变得简单和准确。这些方法尝试着将色彩数字化，就如同表述长度和重量一样。

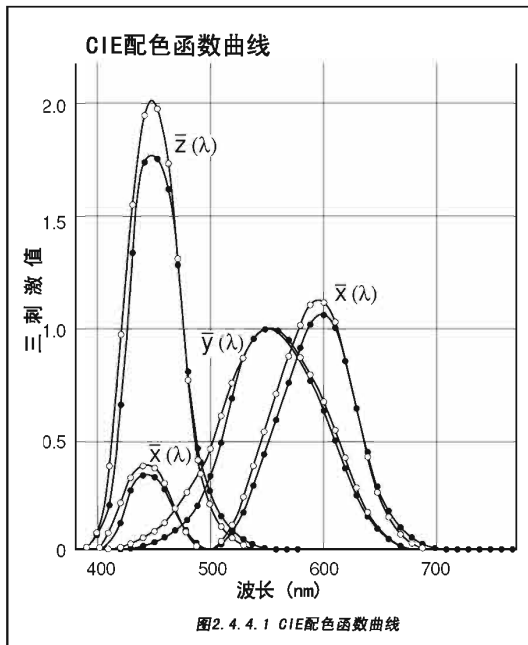
光源色彩的描述和测量可以分为三种主要的色度测定方法。

三种方法：

- 三刺激值色度测定
- 色温
- 光谱辐射测定

### 2.4.4.1 三刺激值色度测定

三刺激值色度测定是基于人眼对色彩感应的三原色理论。这种理论认为人的眼睛只对三原色(红、绿、蓝)敏感，而其他所见到的色彩均为三原色混合而成。这方面，最重要的标准是1931 CIE系统，它定义了符合配色函数的标准观察者(见图2.4.4.1)。使用标准观察者的三个配色函数计算出X、Y、Z三刺激值，并由这三个值及其相关联的 $Y_{xy}$ 色坐标系构成了现今的CIE色空间的基础。



### 2.4.4.1.1 CIE 1931 Yxy色度图

XYZ三刺激值对定义一种颜色是非常有用的，但结果却不是很容易理解。因此，1931年，CIE在两维方向上定义了一个独立于亮度的色空间，这就是Yxy色空间。

Yxy色空间中，Y表示亮度，x和y是从三刺激值XYZ中计算出的色度值。

计算公式如下：

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

1931系统的缺点是图上相等的距离，不表示相同的色彩感知差别，因为人眼的感知是非线性的。

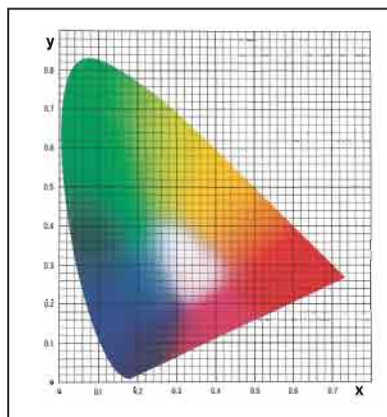


图2.4.4.1.1 1931xy色度图

### 2.4.4.1.2 CIE 1976 UCS 色度图

均匀色度等级 (Uniform Chromaticity Scale) 的出现弥补了1931系统的缺点。它尝试提供一种在大致相同的亮度下，人的感知更统一、更均匀的色空间。

1976 CIE UCS色度图使用 $u'$ 和 $v'$ ，这两个符号的使用，是为了与相类似但存在时间短暂的1960 CIE-UCS系统的 $u$ 、 $v$ 符号相区别。

$u'$ 和 $v'$ 的值也是从XYZ三刺激值计算得到的，计算公式如下：

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

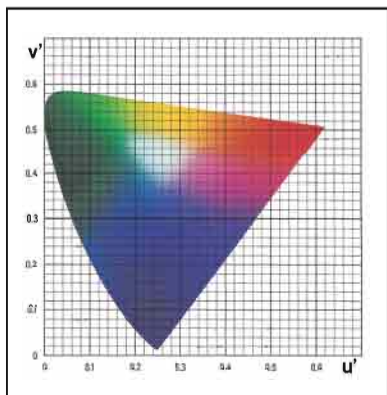


图2.4.4.1.2 1976 UCS色度图

### 2.4.4.1.3 亥姆霍兹坐标

在CIE系统中，另一种可选的坐标系统是特征波长和纯度(也称为亥姆霍兹坐标)，它们与色调和饱和度密切相关。色彩的特征波长(DW)也是光谱的波长，它的色度值落在样品点(S)和白点(N)的连线上(测量光源时，白点是 $x=0.333, y=0.333$ )。纯度，也称为激发纯度，计算公式为白点(N)和样品点(S)的距离除以白点(N)和光谱点(DW)之间的距离。

$$\text{纯度} = (N-S) / (N-DW)$$

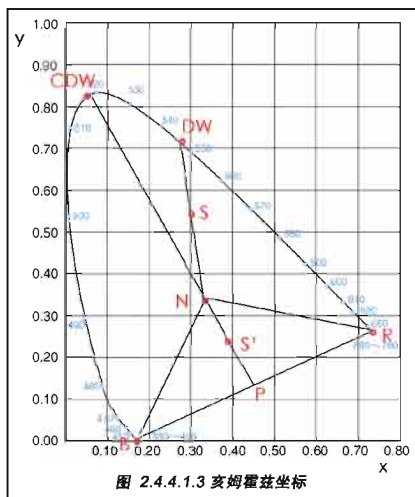


图 2.4.4.1.3 亥姆霍兹坐标

上述方法只适用于出现在光谱中的色彩，对于非光谱色彩，即由光谱色混合而成的色彩，且落在N、R和B组成的三角形内的色彩，要适用到补充主波长(CDW)。这是因为被设想为特征波长的截点P没有相对应的波长，为了确定补充主波长(CDW)，要反向延长R到P的连线。

非光谱色彩的纯度计算公式为：

$$\text{纯度} = (N-S') / (N-P)$$

特征波长和纯度通常用于LED的色彩规格中。

## 2.4.4.2 色温

色温的概念是起源于物体被加热至不同温度时，它会表现出相对应的不同颜色，这样，颜色和温度之间就有了一种联系。当温度升高时，物体的辐射会改变，导致了颜色的变化。某类特殊的遇热发光物体，当被加热时，它会以100%的效率辐射，科学家们将这类理想的完全辐射称作黑体辐射，这种辐射体称为黑体。

理想黑体辐射的颜色根据特定的温度而异，色相的范围可在CIE色度图上显示为一条曲线，这条线称作黑体辐射轨迹(或叫普朗克轨迹)。当温度上升时，颜色会从深红色转为橙色、黄色、白色直至最终的略带蓝色的白色。大多数的自然光源，例如太阳光、星光和火的色彩温度特性，都非常接近普朗克轨迹。

当一个完全辐射体处在特定温度下时，某些光源的色彩与它的色彩相对应。对于某些特定的应用，引入色温的概念来对这样一类光源进行区分是非常方便的(测量单位为开尔文)，色温曲线经过1,500K至10,000K。如果被测量的光源和一个黑体相类似，测量结果就会非常精确。因此，这条轨迹在对白色分类时非常有用，在灯及显示设备制造领域的应用也很广泛。

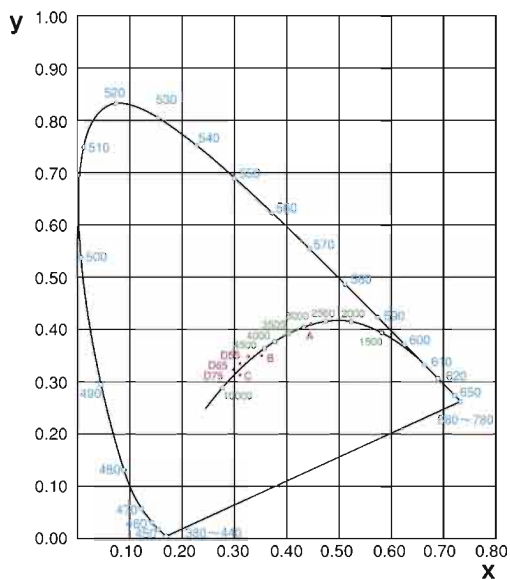


图2.4.4.2 CIE xy色度图上的普朗克轨迹

### 2.4.4.2.1 相关色温

当光源的特性与完全辐射体的特征完全吻合时，色温的概念是非常适用的。当光源发出的光接近但不吻合于黑体辐射时，色温的概念就需要被延伸出去，这时如果要来描述这样一类光源发射的光，就要用相关色温 (CCT) 的概念。黑体辐射的色温与这样一类光源发射光的色温是相接近的，相关色温是由光源色彩所在点的等温线计算所得的。等温线是一些直线，同一线上各点的颜色看起来是相似的，而  $\Delta uv$  表示该颜色与黑体轨迹上同色温点的色差，最大的色差大小  $\Delta uv$  为  $\pm 0.02$ 。

CCT对于具有窄带光谱辐射轨迹特性的光源是不适用的，因为它们与黑体辐射轨迹不接近(例如LED)。

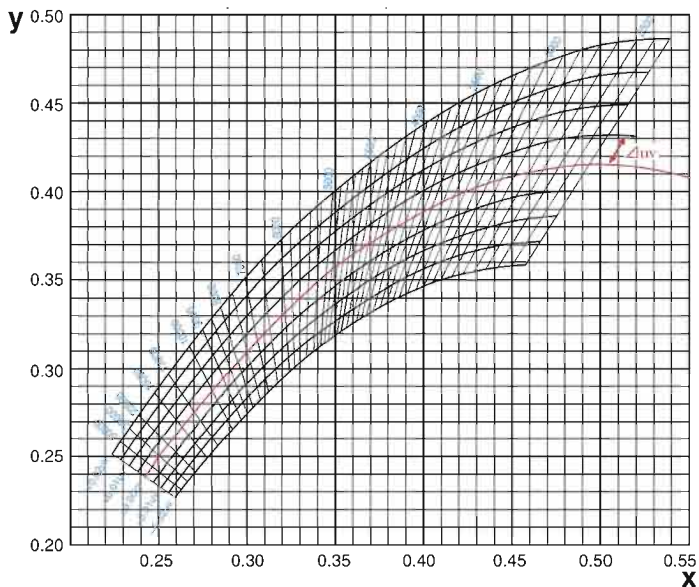


图2.4.4.2.1 xy色度图，其中标有黑体轨迹，等温线及等 $\Delta uv$ 线

### 2.4.4.3 光谱辐射测定

许多光谱能量分布曲线不同的光源，能够产生出相同的视觉效果，相同的色彩；也就是说，光源的色彩并不能告诉人们，它的光谱能量分布是怎么样子的。通常情况下，两种不同的光源，即使有相同的xy值，或者是相同的色温，它们的光谱能量分布也可能是不一样的。因此，了解光谱能量分布，能使我们更精确、更容易地了解颜色、描述颜色。

(参见图 2.4.4.3 几种常见CIE光源的光谱能量分布曲线)

因此，光谱辐射测定方法是目前最精确，也是最完整的描述色彩的方法。光谱能量分布曲线可以用来作简单的目测分析，也可以和另一种光源的曲线数据作比较。然而，最好的应用是将光谱数据和CIE的配色函数曲线一起作积分，得到CIE三刺激值。然后将三刺激值通过公式转换，计算得出各种CIE色度坐标和亮度值，也就是我们通常所接触到的色空间。

#### ① 标准光源D65:

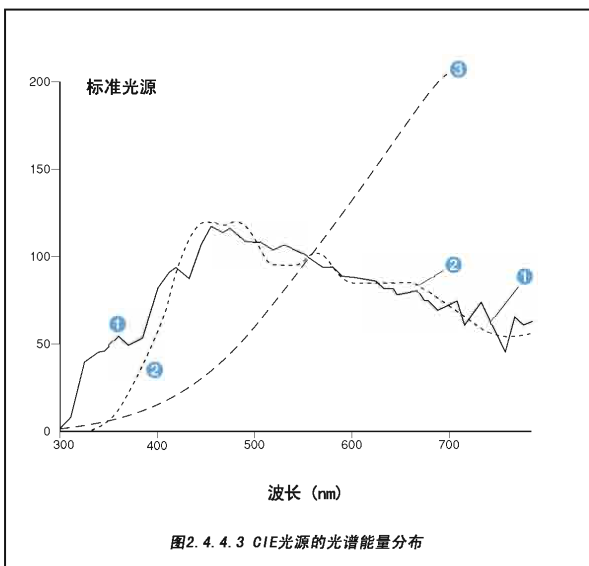
正常日光 (包含紫外线波长区)  
相关色温为6504K

#### ② 标准光源C:

正常日光 (不包含紫外线波长区)  
相关色温为6774K

#### ③ 标准光源A:

相关色温为2856K的白炽灯光



## 3.1 辐射计

辐射计是用来测量辐射能量强度的仪器。大多数的辐射计只使用一块光电传感器，为了测定特定光谱段的辐射能量，或是为使辐射计有特定的光谱感应，通常都会使用到光学滤镜。这样的光学滤镜简单可靠，并且行之有效。

辐射计在工业上的应用，主要包括辐射照度测量和辐射亮度测量。如要计算从光源出来的辐射量，通常会用到辐射亮度。如果关心的是曝光的级别，那么就要进行辐射照度或累积辐射照度的测量。

### 3.1.1 辐射计应用

辐射计通常使用在计算可见光谱段外的辐射测量时，例如，红外和紫外的测量。紫外线(UV)在各种工业应用中也是很常见的，例如，

- 半导体制造中的光阻加工
- 印刷及制版中的乳剂加工
- 色彩牢固度测试
- 生物学应用

要使用辐射计进行UV测量，无论辐射照度或辐射亮度测量，光谱感应(波长范围和特征波长)应该和特定的应用相吻合。

除了UV以外，红外线测量也是辐射计测量的一个重要部份。所有的物体都根据本身的热能量向外辐射红外线，利用这一点，通过测量物体的红外线发射情况，就能知道物体的温度。这种非接触式的测量仪器就是红外测温仪。因此，这样的测温仪也通常被称作“辐射测温仪”。使用不同特性的滤镜，就能够有不同的应用领域、不同的应用温度范围。如果想知道更多关于红外测量的情况，请参阅我们出版的《温度测量漫谈》。



## 3.2 光度计

光度计是对可见光区域进行测量的仪器。亮度计和照度计是最常见的光度计，也是最有效的可见光测量解决方案。由于要牵涉到几何学的测量，光通量计和光强计应用并不广泛，如果要使用，也需要根据特定的应用领域而定制。

辐射计和光度计最基本的区别，是后者必须以CIE标准观察者的特性去测量光。也就是说，光度计的光谱感应必须要吻合CIE标准光度函数 $V_\lambda$ 。

### 3.2.1 传感器

对于光度计的传感器，其特性曲线与CIE  $V_\lambda$  曲线的吻合程度，决定了光度计的精度表现。带滤镜和不带滤镜的传感器都可使用在光度计上。

不带滤镜的传感器，例如硒和硫化镉，拥有与 $V_\lambda$  曲线相类似的光谱感应度。但是，它与 $V_\lambda$  之间还是有一定的偏离的，对于精确的光度测量不是非常适合，通常运用在自动光开关领域。

大多数的带滤镜传感器使用硅光电管，并在传感器前面放置了特定透射特性的光学滤镜。通过滤镜和传感器的有机组合，就能得到光谱特性极其接近CIE  $V_\lambda$  曲线的传感器组。

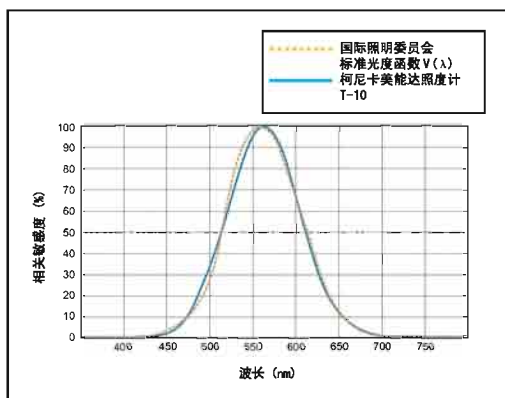


图3.2.1 相关光谱敏感度

CIE意识到，需要建立一套有效且国际化的应用方法来标识光度计传感器的质量等级。因此，建立了 $f1$ 值。 $f1$ 值指的是一个百分比误差，表示传感器特性曲线与CIE  $V_\lambda$  曲线的吻合程度。

## 3.2.2 校准方法

除了 $f_1$ 值外，光度计的校准方法也是决定仪器是否适合特定应用领域的一个重要因素。例如，对于一台 $f_1$ 值相对较大的光度计，只要校准用的标准灯和被测光源相类似时，也能够得到很精确的结果。

有两种基本的方法用来校准光度计。第一种也是最常用的方法是使用一盏标准灯（通常是钨丝灯），这些灯都是验证过并可溯源至国家标准实验室/国家标准机构。光度计校准时，其显示结果会被调整至和标准灯输出一致。

第二种校准方法是使用标准检测仪。这样的检测仪有内建的，完美吻合CIE  $V_\lambda$  曲线的传感器。用这样的校准方法，仍旧需要一盏标准灯，输出可以调节但必须要稳定。先用标准检测仪测量标准灯的输出，然后用待校光度计测量，调整至标准检测仪测量到的相同数值。当然，这些标准检测仪也要被验证并可溯源至国家标准。

### 3.2.2.1 色彩修正系数

传感器-滤镜组合的特性和CIE  $V_\lambda$  曲线的吻合度，在可见光谱边缘范围通常是较差的，因此，校准时所用灯的色温是很关键的。当大多数的光度计以钨丝灯作校准时，用来测量白炽灯、卤素灯和太阳光时能得到精确的值。但是，测量单色光和窄带辐射体，例如，蓝色和白色LED时不是非常适合。测量气体放电灯，例如，冷光灯，会在可见光谱区内显示清晰的特征波峰。

因此，现在的光度计为了弥补传感器的光谱敏感度和CIE标准光度函数曲线 $V_\lambda$ 之间的误差，都有一个相对应的色彩修正系数，简称为CCF。当传感器的光谱敏感度和光源的光谱能量分布已知时，就能够计算出CCF值。改变CCF值是将当前测量数据（例如，由辐射计测量的数据）转换为光度计数据的最简单有效的方法。CCF也可被作为用户校准的特性参数，尤其是需要室内标准溯源时更有实际使用价值。

### 3.2.3 光度计应用

在光的测量中，有很多量可以被测量。不足为奇，光度计的不当选用是造成测量错误的一个主要原因。对于多数使用者而言，进行有效的光度测量的障碍是缺少光度测量的相关知识，尤其是想在光度单位间进行转换会导致最基本的错误。例如，遇到的最常见的错误，是试图使用照度计( $\text{lumen}/\text{m}^2$ )去测量光通量( $\text{lumen}$ )，或者，是想用亮度计( $\text{candela}/\text{m}^2$ )去测量光强( $\text{candela}$ )。

现在常见的有四种光度测量仪器，分别是亮度计，照度计，光通量计和光强计。

#### 3.2.3.1 亮度计

亮度计用来测量光源发射出的可见光谱段能量。因为亮度是具有方向性的，为了更方便的进行测量结果的沟通交流，在测量时，必须要明确仪器的测量角，测量区域和对于光源的测量几何结构。几乎所有的光源都不是朗伯发光源(亮度值在所有方向上都是一致的)，从光源发出的光线并不均匀，所以上述的这些测量因素都是相当重要的。

由于亮度测量是要瞄着光源进行的，所以可以使用光学镜头系统来得到测量结果。视场角和光学镜头的测量角必须要有一定限制，以避免测量到微小角度偏差而出现的非必要光线。

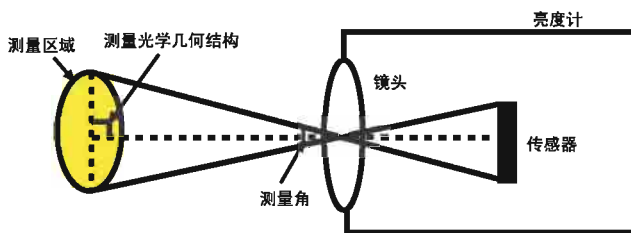


图3.2.3.1 使用光学镜头的亮度测量结构

亮度测量对产品质量很重要，如交通信号灯，电视屏幕和汽车尾灯。

### 3.2.3.2 照度计

照度计是用来测量落在某物体表面的可见光能量的仪器。照度测量特别容易受光轴以外光线的影响而产生误差。根据定义，测量面上某处的光线应和其入射角的余弦值成正比，但是，由于探头内传感器的原因，或是仪器本身的原因，许多照度计并不严格按照余弦法则去接收光线。

余弦感应特性通过在传感器和滤镜上覆盖余弦修正漫射罩来实现。需要注意的是，因为系统几何结构的差异，会产生不同的余弦感应特性，导致在不同入射角下得到不一样余弦误差。因此，当比较照度测量结果，尤其是涉及到偏离光轴光线测量时，一定要理解系统的余弦感应特性。

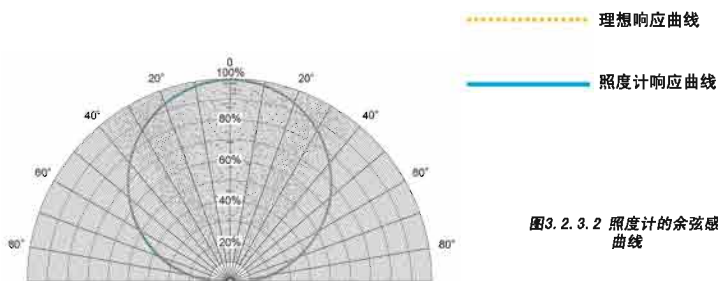


图3.2.3.2 照度计的余弦感应特性曲线

照度计被广泛应用在环境光线的测量中，以决定室内的光线是否适合阅读或工作。举个例子，一个舒适的用于阅读的桌面，其照度值应大约在 $300\text{l x}$ 。

照度计有时也用来计算ANSI流明(特别是在投影仪测量中)，方法是取九个探头的照度平均值，乘以投影仪投射屏幕的面积，就得到了ANSI流明值。

### 3.2.3.3 光通量计

光通量测量可以得到光源发射的所有可见光的能量。通常使用积分球，将光源发射的能量汇聚到传感器上，以便测量。

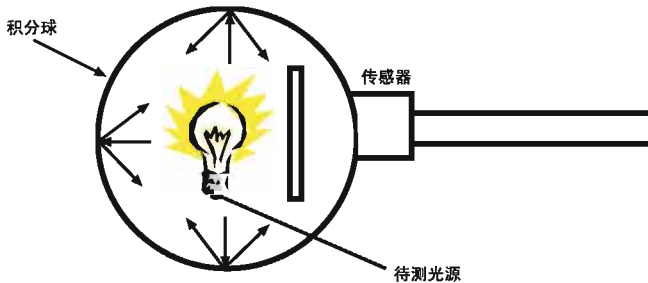


图3.2.3.3 使用积分球的总光通量测量结构

通常情况下，积分球要足够大，才能容纳待测光源，而且积分球越大，在测量不同光源时的误差也就越小。举个简单的例子，以一盏小的白炽灯作为标准，在直径为2.5米的积分球内校准一根1.5米长的灯管，所产生的误差是将灯管放置在直径2米的积分球内所产生误差的一半。对此种积分球的校准，通过可溯源至国家标准的标准光源来进行。一个高质量的积分球，要求球体尽量圆整，其内腔的涂层投入也很大，并且通常是需要根据光源的具体测量应用来定制。因此，作为普通用途的光通量计数量非常有限。

### 3.2.3.4 光强计

光强描述了光源在给定方向上一个立体角内发射的光通量，它是用来度量光源功率的物理量。正如定义中所描述的，光强测量包含了错综复杂的几何结构，如测量方向，测量的立体角数量。由于光源很少是呈空间均匀发射的，所以在测量光强时，必须要考虑到测量什么方向的光强和测量多少立体角内光强的问题。

因此，要精确测量光源所发射的光强，需要一组可调整的夹具，用来决定测量中所包含的立体角，以及将光源朝向指定的方向用以测量。也就是说，这样的光强计，在测量时必须配置测量的光学几何结构。

综上所述，没有两件一模一样的光强计。在两组不同光强计测得的结果之间的比较，也是没有目的，没有意义的，除非他们的测量光学几何结构是相同的。

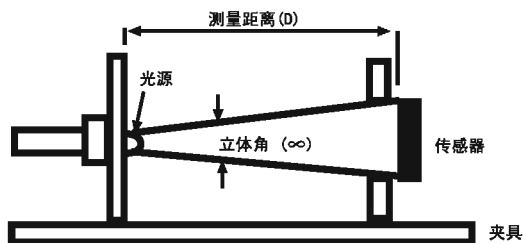


图3.2.3.4 光强测量装置结构

注释：立体角可以通过已知的传感器面积和测量距离来计算。

### 3.3 三刺激测色计

使用三片光谱敏感度吻合CIE三刺激值配色函数曲线的滤光片，用以测量光源色彩的仪器，称为三刺激测色仪，也叫三滤光片测色仪。除了色度测量外，这些仪器通常还包括四种光度测量中的一种，如亮度值，照度值，光强或者是光通量测量。

这些仪器的传感器为高质量的光电二极管，并覆有高敏感度的滤光片。传感器将入射光线转换为电信号，直接产生标准的XYZ三刺激值。

然而，测色仪的传感器精度与CIE曲线的吻合度总是有限的，一些小的误差偏离肯定会存在于测量仪器的敏感度曲线上。在测量一些整个可见光谱段放射连续能量的光源时，这些小的误差可以被忽略掉。但是，如果光谱的谱线比较特殊或带宽非常窄，那么测量就可能出现较大误差。因此，三滤光片测色仪通常不用于测量谱线特殊的光源，如高压放电灯(参考图3.2.3.5a)，或是谱线带宽非常狭窄的光源，如LED(参考图3.2.3.5b)。

### 相对光谱功率分布

峰值: 1.173E-02 : 545nm

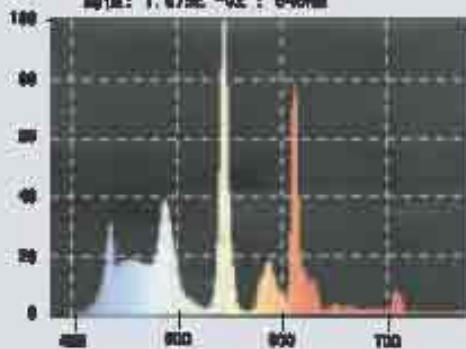


图2.2.2.2 特殊照明特殊光源功率分布

### 相对光谱功率分布

峰值: 1.186E+01 : 595nm

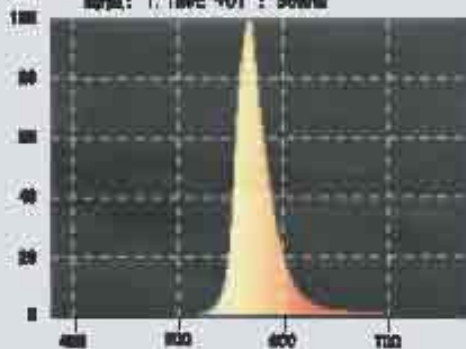


图2.2.2.3 特殊光源功率分布

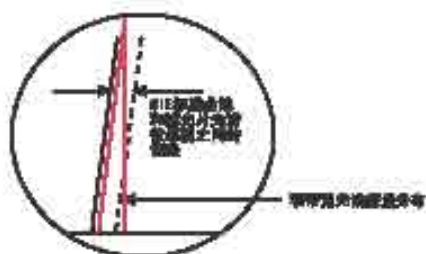


图2.2.2.4 由LED光源色温和配光特性决定之特殊照明产生特殊光谱

### 三刺激测量法



### 分光辐射测量法

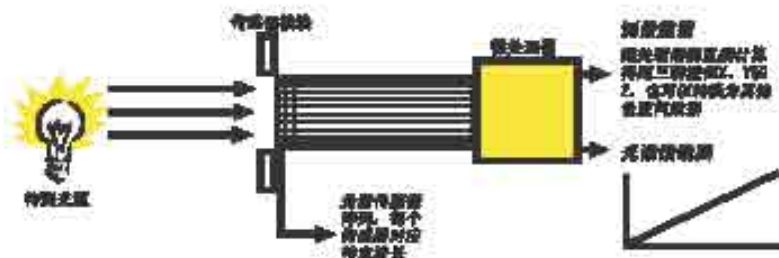


图 3.2.3.4 三刺激测量法和分光辐射测量法原理图

## 3.4 分光辐射度计

分光辐射度计是测量光源光谱能量分布的最准确仪器, 不仅能测量辐射度或光度值, 还可以测量色度值。这种仪器测量光源的辐射光谱, 并计算得到所需的参数, 例如色度或亮度。无论是使用光谱分光, 还是用棱镜分光, 仪器测得的光谱数据都是一致的。

CIE  $\bar{y}$ 、由绝对 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ 三色基色函数以数据形式存储在仪器中, 并用来处理从特殊光源测量得到的光谱能量分布数据。因此, 相比于光度计和三刺激颜色计由于传感器敏感度匹配不好而引起测量误差, 分光辐射度计都不存在。无论如何, 足够的灵敏度、高线性、低杂光影响、低背景光干扰、 $1\mu\text{m}$ 甚至更窄带宽的应用, 是得到高精度数据的基本要求。



无热能辐射体，例如高压放电灯(其光谱能量分布非连续)，或者是能量分布带宽非常狭窄的一些物体，都只能使用分光辐射度计测量。

当然，与三刺激测色计相比，分光辐射度计也有一些不足，如测量速度较慢，价格和携带性等问题。

### 3.5 综述

如果需要得到精确的光源数据，光谱辐射度计是最理想且最全面的测量仪器。因为光谱辐射度计先记录光源光谱数据，然后以数学方法处理这些数据，得到辐射度值，光谱辐射度值，光度值和色度值。

当主要考虑到便携性，测量速度和仪器费用时，也可以选择光度计。但是，使用人员必须要很好地理解光度计的 $f1$ 值和它的校准方法。参考待测光源的光谱能量分布，来确定使用光度计是否正确，这是非常重要的。

最后，需要提醒的是，选择了一种仪器后，就应该使用仪器直接测量某个物理量，如亮度，照度，光强或光通量，不要试图去转换测量其他量。

## 4 光测量计的测定应用

对这一章我们会介绍光测量计在LED照明产品的测定应用：

### 4.1 照明测定应用

LED成为照明光源快速发展的今天，我们除了关心照明产品的光度，还会对LED照明的色度比较重视。

以白光LED为例，作为人造的白光光源，它不仅与自然光(太阳光)有差别，与传统照明光源相比也存在差异，主要表现在光谱曲线、显色性指数、色温、色坐标等参数上，同时，LED自身的热稳定性和独特的配光性也决定了LED灯具与传统照明灯具的不同。

下面，我们分别对LED照明的四个重要光学参数测定作介绍。

- 显色性
- 色温
- 光强分布
- 光通量

#### 4.1.1 显色性

“显色性”是指物体在这些新型光源下的颜色与自然光下的颜色表现，以及比较物体在不同光源间的匹配程度。我们称与自然光（太阳光）色调相近的光源具有好（高）的显色性。

很久以前，人类就已经开始对物体在不同光源下进行颜色的比较，通常是把物体放在一起在自然光（太阳光）下观察。虽然火把、蜡烛、白炽灯和其他光源也可以用作照明，但通常的比较都是在自然光（太阳光）下进行。

物体在太阳光的照射下，会显示出它的真实颜色，但当物体在非连续光谱的气体放电灯的照射下，颜色就会有不同程度的失真。我们把光源对物体真实颜色的呈现程度称为光源的“显色性”。

在日常生活，我们能接触到许多不同类型的照明光源，如白炽灯、荧光灯和LED等，而荧光灯和LED又出现了“白光”和“暖白光”等系列产品。我们不难发现，物体在不同的荧光灯和LED（发光二极管）照明光源下颜色会产生差异。

下面，我们分别以高显色性的D50荧光灯、带有“自然白”标志的荧光灯和LED作为例子进行阐述：



D50荧光灯



自然白荧光灯

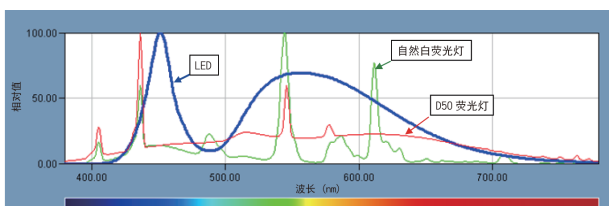


LED

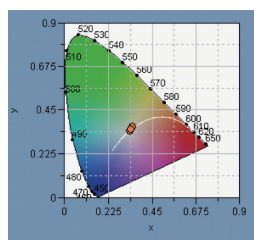
在人眼看来，它们都发白光，但由于自然白荧光灯的色温偏高一些，所以看起来会略显微蓝。

我们用柯尼卡美能达的分光辐射亮度计CS-2000配备一个亮度适配器，并对三个光源进行测量。如果在右边的xy色品图上比较测量点，你会发现它们的坐标很相近，且都在可见光范围内。

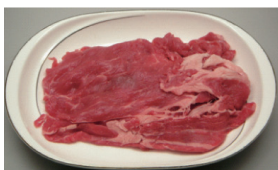
	D50荧光灯	自然白荧光灯	LED
X	0.3407	0.3372	0.3465
Y	0.3518	0.3496	0.3662
相关色温 (K)	5173	5308	5004



图：D50荧光灯、自然白荧光灯和LED的光谱分布相对强度



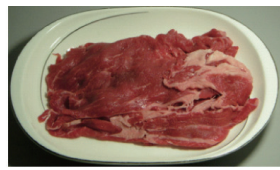
接下来，我们把一盘生肉放在这三个光源下比较，并观察肉的显色状况。



D50荧光灯



自然白荧光灯



LED

在D50荧光灯照明下，肉和盘子看起来跟实际情况差不多，但在自然白荧光灯照明下，由于色温略高，肉和盘子看起来稍显苍白。用LED照明时，一切都显得更加昏暗。

※ 三个光源在样品表面的照度都调节为大约1600lux。
















#### 4.1.1.1 显色指数测定

当用不同光源照明样品时，样品颜色看起来会有所不同。光源性能的这种差异可以用“显色指数” (CRI, Color Rendering Index) 描述。

CIE (国际光学照明委员会) 选取了8种典型的色饱和度适中的实验色块，其显色指数用R1~R8表示，称“一般显色指数”；我们通常评价光源时用R1~R8的平均值“Ra”来表示，即“平均显色指数”。CIE补充规定了六种计算“特殊显色指数”的标准颜色样品，它们是色饱和度较高的红、黄、绿、蓝及叶绿绿色和欧美人的肤色；中国计算光源显色指数的方法还增加中国青年妇女肤色的颜色样品；分别用R9~R15表示。

显色指数值为100是最好的。

根据分光辐射亮度计CS-2000测得的光谱分布，我们得到了如下显色指数。利用CS-2000的数据管理软件CS-10w很容易进行计算。

	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
																
D50荧光灯	91	94	91	86	90	93	89	90	90	77	78	93	81	93	92	91
自然白荧光灯	79	89	89	54	82	81	72	86	76	16	40	63	55	92	70	92
LED	68	65	74	79	68	65	62	81	54	-39	36	61	31	66	88	59

Ra表示“平均显色指数”。它是指R1~R8的平均值，也是显色指数的典型值。R9~R15称为“特殊显色指数”，尤其是R9（深色鲜红）和R15（中国人的肤色）。

R9是评价红色复现质量的指标，而三种类型光源的R9值相差很大，由于LED光源的R9显色指数很低，甚至为负，使肉和盘子看起来比较昏暗。

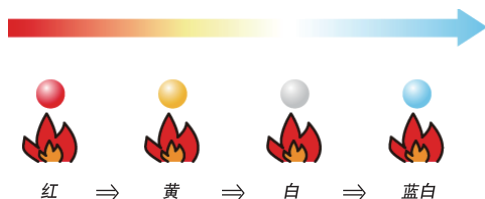
国际照明委员会（CIE）一般把显色指数分成五类：

类别 Ra 适用范围

1. A >90 美术馆、博物馆及印刷等行业及场所
2. B 80—90 家庭、饭馆、高级纺织工艺及相近行业
3. 60—80 办公室、学校、室外街道照明
4. 20—40 室外道路照明及一些要求不高的地方

#### 4.1.2 色温

前面章节2.4.4.2介绍到色温的概念，在生活中我们也可看到色温的例子。铁匠打铁，铁块的颜色会从红→黄→白→蓝白变化。白矮星的颜色演变也是反映色温的一个很好例子。



### 4.1.2.1 色温的测定

色温和相关色温可用我们的色彩照度计CL-200/CL-200A、色彩亮度计CS-200或更高端的分光辐射亮度计CS-2000/2000A和二维色彩分析仪CA-2000进行测量。

#### 与摄影色度计所测色温的差别

摄影色度计有别于上述工业级测量仪器，虽然可以测量色温，但摄影色度计的主要用途是为拍照设定合适的滤光值，这种色度计测得的色温叫做“摄影色温”。之前所述工业用仪器的传感器意在与人眼的灵敏度匹配，摄影色度计的传感器却与彩色照相底片的灵敏度十分相近。

下面左边的图1给出了人眼的灵敏度，右边的图2给出了彩色照相底片的灵敏度。你会发现它们全然不同。因此，例如用色彩照度计和摄影色度计测量相同光源的色温，得到的结果肯定也完全不同。当单纯为测量色温而不是进行拍照时，就需要使用工业测量仪器。

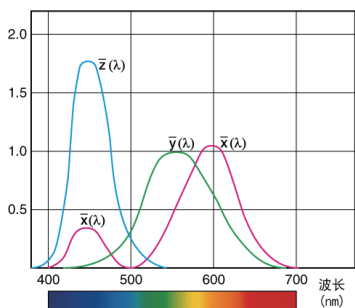


图1：人眼的相对频谱响应

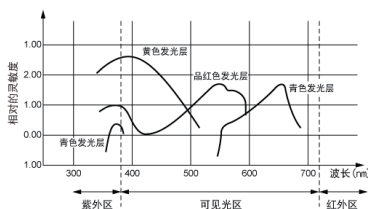


图2：彩色底片频谱灵敏度示例

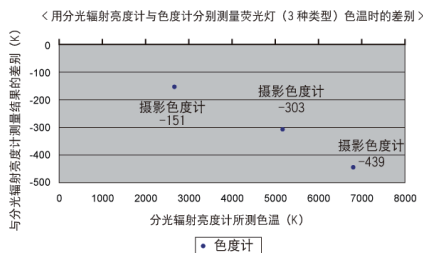
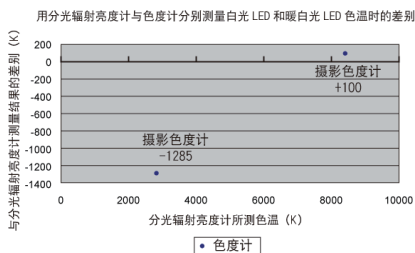
LED 灯泡、荧光灯等      工业仪器



摄影      摄影色度计



下图作为参考，给出了白光LED、彩色LED及荧光灯（暖白、自然白和日光白）相关色温与色温的比较结果，其中相关色温用分光辐射亮度计CS-2000和亮度适配器测得，色温用摄影色度计测得。横轴是分光辐射亮度计测得的相关色温，竖轴是分光辐射亮度计和摄影色度计测量值之间的差别。你会发现对于一些光源，两个测量值相差很大。用分光辐射亮度计测得的相关色温理论上更接近真实值。但是应该注意这只是一种情况；当使用另外一个摄影色度计，甚至用另外一个相同型号的摄影色度计测量同一样品时，也不能保证结果完全一致。



相关标准：JIS Z 8725标准，用于确定光源的分布温度以及色温或相关色温。

### 4.1.3 光强分布配光特性

所有光源都发光，但在哪个方向（角度）上传播以及强度如何则统称为“光强分布”。光强分布特性用于确定何种光源适合于高方向性光或扩散光。对照明器材及其类似物、光源、阴影、背景偏转板等的测量和评价都相差不远。

“光强分布”定义见JIS Z8113“照明词汇”。原文为“主光源、次光源（包括光学材料的透射和反射等）和照明器材发光度的角度变化或分布”。举例说明，下面左边图1给出了子弹型LED的光强分布测量结果，右边图2为表面贴装LED的测量结果。

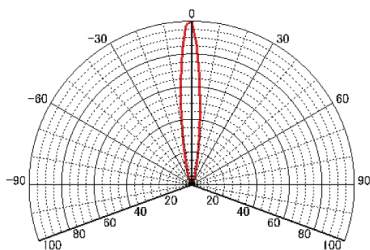


图1：子弹型LED光强分布测量结果

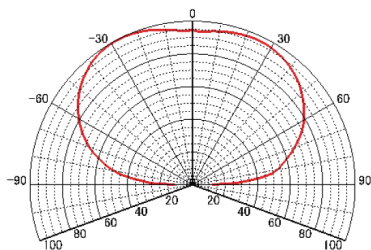


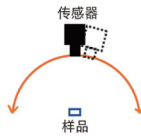
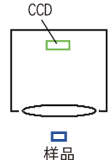
图2：表面贴装LED光强分布测量结果

对于灯具的光强分布，实际上还包含了部件对灯泡的影响。所以在室内照明、路灯照明和景观照明的配光设计上，也需要把光强分布的因素考虑进去。而光强分布则需要对照明区域的亮度均匀性和照度均匀性做测量计算，柯尼卡美能达的色彩照度计CL-200A和色彩亮度计CS-100A, CS-200, 分光辐射亮度计CS-2000和二维色彩亮度计CA-2000可满足这方面的测量。

以下提到的国际通用方法是一种对光强分布进行分类的常用方法。它定义光强分布为光源出射的上行移动通量与下行移动通量之比。这样就解决了灯具的结构问题，而且简明地解释了照明灯具在配光设计中的一个重要因素——利用率。

### 4.1.3.1 光强分布测定

光强分布的测量方法基本上可分为两种。一种是把传感器放在距样品一定距离的地方，然后测量光强分布。这时，在样品周围同心分布的若干点进行测量即可得到结果。这种系统可使用多种类型的传感器：如分光辐射亮度计传感器、色度计传感器和亮度传感器。另外一种方法是在距样品不同的距离处测量，测量装置由一个CCD传感器和一个具有类似鱼眼镜头的超广角棱镜的光学系统组成。

	移动传感器	固定传感器
示意图		
优点	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 俯仰角和传感器距离可自由调节。</li> <li>• 较固定传感器结构造价要低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 测量时间短</li> </ul>
不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 测量时间长</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 较移动传感器结构造价要高</li> <li>• 受样品形状和尺寸限制</li> </ul>

以白光LED测量为例，作为普通照明光源我们更希望了解以照明光源为点光源其在空间 $2\pi$ 立体角的范围内的发光特性。所以利用LED机械轴和柯尼卡美能达的色彩亮度计CS-200对准待测的LED灯泡，按 $2\pi$ 的角度旋转，同时在机械轴上配备其它灯泡，按实际环境的漫射光对LED灯泡产生的影响，将白光LED光源所测的空间中若干个点的亮度、色坐标(x, y)、色温等值测量，从而让我们了解白光LED在空间中的光强分布以及发光的颜色特性。



资料来源：日本照明工程学会照明基础课程课本

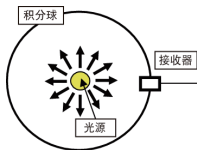
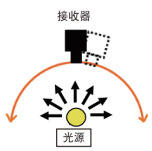
## 4.1.4 光通量

前面章节2.3.1介绍了光通量的定义，光通量是评价光源特性的常用参数，用lm来表示。下面来介绍光通量的测定方法：

### 4.1.4.1 光通量测定

测量光通量有两种方法：用积分球或光强分布测量。积分球方法是把样品光源放在积分球内（积分球中空，内壁是高散射的白色），然后用传感器接收光。这种情况下，传感器必须就参考光源进行校准。

对于光强分布测量方法，传感器在样品周围固定距离的同心位置上移动，进而测得光强分布。

方法	积分球	光强分布测量
示意图		



对光源待测物理量的理解，以及测量这些物理量所需要的测量条件和方法的理 解，将会确保我们在特定的测量应用中，使用正确的辐射度计或光度计。

此份资料并未涵盖全部，只是简单涉及到了一些使用者应该知道的光源测量概念和方法，内容基本基于供应商和客户经常讨论到的一些项目。

- B**illmeyer, Fred W (1981). Principles of color technology—2nd Edition. Wiley & Sons, New York.
- H**utson, Geoffrey, H. (1990). Colour Television—2nd Edition. McGraw-Hill Book Company Europe, England.
- T**he Photonics Dictionary—A Four-Book Set (1993). United States of America.
- J**oseph B. Murdoch. Illumination Engineering—From Edison's lamp to the laser. Macmillian Publishing Company, England.
- D**. Allan Roberts. Radiometry/Photometry Terms. The Photonics Design and Applications Handbook 1993, United States of America.
- D**aniel C. McCarthy. Integrating Sphere Aids Absolute Calibration of Lamps. Photonics Spectra—December 1998, United States of America.
- R**ichard Distl. Measure What You See. Photonics Spectra—May 2000, United States of America.
- I**an K. Edwards. Counting Coup — Photometry: Origin of the science to applying handheld equipment. LD&A—December 1993.
- C**larance E. Rash and Everette McGowin III. Measuring Light. Information Display 9/96. SID 1996.
- K**enneth A. Miller. Colorimetry: Methods and Tools. The Photonics Design and Applications Handbook 1993, United States of America.



KONICA MINOLTA

柯尼卡美能达 (中国) 投资有限公司 SE营业本部  
Konica Minolta (China) Investment LTD. SE Sales Division

<http://se.konicaminolta.com.cn>

上海市零陵路899号  
飞洲国际广场29楼A,K室  
电话: 021-54890202  
传真: 021-54890005  
邮编: 200030

北京分公司:  
北京市东城区金宝街89号  
金宝大厦11层1107B  
电话: 010-85221551  
传真: 010-85221241  
邮编: 100005

广州分公司:  
广州市天河区体育西路  
189号城建大厦8G  
电话: 020-38264220  
传真: 020-38264223  
邮编: 510620

重庆事务所:  
重庆市江北区建新北路16号  
茂业时代建新广场10楼29室  
电话: 023-67734988  
传真: 023-67734799  
邮编: 400020

青岛事务所:  
青岛市市南区山东路16号  
阳光泰鼎大厦1602室  
电话: 0532-80791871  
传真: 0532-80791873  
邮编: 266071

武汉事务所  
武汉市解放大道686号  
世界贸易大厦3213室  
电话: 027-85449942  
传真: 027-85449991  
邮编: 430022