

光學薄膜於色彩顯示之應用 (上)

Color Display of Optical Thin Film (I)

李正中、楊宗勳、廖詩芳

Cheng-Chung Lee, Tsung-Hsun Yang, Shih-Fang Liao

隨著顯示器、固態照明技術的迅速發展，對顏色豐富性與真實性的要求越來越高，使得色彩量測與評價的重要性日益增加。另外利用光交互干涉的方式所產生的色彩，其色彩的品質極佳，而光學薄膜即為實現光干涉產生色彩的重要技術。所以本文除了介紹色彩科學中幾個常見的表色系統、色彩的計算方式、光源及色彩量測的方法，更藉由周遭常見的光學薄膜應用為例，搭配色彩科學的方法深入探討、分析光學薄膜在色彩顯示上的應用。

Color plays an important role in our daily life since there was human culture. As the rapid growth of display and solid state lighting industry, the requirement for the variety and fidelity of color performance is much more than ever before. Hence the importance of color measurement and evaluation method increases day by day. The quality of color produced from interference of lights is remarkable, and the optical thin film which exists around our life is the principal technology to achieve this task. It has already been demonstrated in animal, plant, and mineral. At first, color system, photometry, light source, color temperature, color rendering index and color measurement will be introduced in this article. And then, several applications of optical thin film in nature and man-made will be cited as instances to discuss and analyze by using the methodology of color science.

一、簡介

如果光是生命的起源，那麼色彩是豐富生命的雲裳。太陽光對於地球上的動、植物以及人類的生存與演化關係至為密切，人類的生命與歷史演進因此也深受太陽光的影響。人造光源，如火、油燈、燭燈、本生燈、燭燈等出現後，尤其在 1879 前後幾年愛迪生等人開發電燈泡後，人類的活動在夜間更為活躍。所謂五光十色、色彩繽紛、爭奇鬥艷、多采多姿、絢麗奪目等的描述，表示光已不只對人類生理有所影響，對心理的影響更是逐漸在增加，特別是色彩部分，尤其當今平面顯示器與立體顯像

如此盛行，色彩的研究更形重要。也就是說：光與色對人類文化與科技的發展深具影響。而今發光二極體 (LED) 的開發，將逐漸成為新的照明光源。然而人造光源在色彩方面畢竟與影響人類深遠的太陽光源不同，因此色彩的研究與應用將更為重要。

光本無色，顏色是光線進入眼睛後刺激視神經，而將意識傳至大腦，才產生色彩的感覺，所以色彩是物理作用或物理與化學作用所生之電磁波 (光)，進入眼睛 (光學系統) 後被視神經元接受 (生理上起光物理與化學作用)，引起腦之認知及分辨 (心理) 的綜合效果。以上過程可由光直接進入眼睛 (稱為光源色) 或經由反射、吸收、穿透、折射、干

涉、繞射、偏振、色散、散射等 (稱為物體色) 完成，例如照明光源、LED 指示燈、交通號誌等為光源色，而光經由折射所造成的彩虹，散射而產生的藍天、黃紅色夕陽，因繞射產生色彩的光柵、全像片、光碟，和因干涉現象的肥皂泡、美蘭蝶、鮑魚殼、光學薄膜等為物體色。

顯示物體色之物體本身不發光，上述薄膜 (thin film) 為其中之一，有時稱為濾光片 (optical filter)。通常我們將濾光片分成兩大類：吸收式濾光片 (absorption filter) 與干涉式濾光片 (interference filter)。最常見的吸收式濾光片可藉由奈米金屬粒子的吸收、染色的玻璃、凝膠或液體製作，使部分入射光在濾光片內被吸收，其餘色光被反射或穿透。其應用有熱吸收色玻璃 (thermo chromatic glass)、色溫轉換濾光片、窄帶濾光片、光譜儀中波長校正濾光片等，亦有利用雙折射材料使某一偏振光被吸收，另一垂直於它的偏振光穿透。

所謂干涉式濾光片是指當光束入射至不同材料所形成的膜層中，會產生多重反射，若此膜層夠薄 (不超過幾個波長)，則反射光將因為具有同調性而彼此干涉。不同波長、不同相干性的光入射至薄膜時，其反射、穿透、偏振及相位會產生不同的變化，所以光學薄膜能產生色彩⁽¹⁾。

二、表色系統

在人類生活遺跡中，很早就有色彩的應用，但色彩科學的研究，則是始於牛頓在 1671 年以三稜鏡觀察到太陽光中各波長的光折射角度不同產生的色散現象。色彩科學的目的除了正確描述色彩外，亦包含色彩的量測、製造、顯示、資訊傳遞，甚至是改善與美化生活品質。

色覺是由人眼中三種感受紅色、綠色、藍色的視神經細胞對光的反應而產生，人眼可辨識的顏色多達一千萬種，因此準確地描述色彩非常重要，表色系統即是用來表示顏色的科學方法，主要有兩大類型：(1) 顯色系統與 (2) 混色系統。

(1) 顯色系統

根據色彩知覺的心理項：色相 (hue)、明度

(lightness)、彩度 (chroma)、飽和度 (saturation)、絕對亮度 (brightness) 及視彩度 (colorfulness) 等顯色值作為分類，例如色票、色卡之色外觀為基礎的標準色票。以孟塞爾表色系統 (Munsell color system)⁽²⁾、自然表色系統 (Natural Color System, NCS)⁽³⁾ 為代表。

(2) 混色系統

利用多種色光混色的方式求出與某一顏色匹配之混合量，探討其對眼睛所造成的刺激，並以色度值 (colorimetric value) 表示。此表色系統可以座標的方式呈現，二維空間的座標主要有 CIE x - y 色度座標、CIE u' - v' 色度座標等，三維的則有 CIELAB 色彩空間、CIELUV 色彩空間等，由於此系統可以很清楚以數學模型描述，故本節將著眼於混色系統中 CIE 色彩空間的介紹。

1. CIE XYZ 色度座標

國際照明協會 (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) 於 1931 年根據 Guild 與 Wright 的研究工作而制定「CIE1931 標準色度觀察者 (the CIE 1931 standard colorimetric observer)」^(4, 5)，以 2° 視角進行配色實驗而完成「CIE1931 配色函數 ($\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$) (CIE1931 color matching functions)」，如圖 1 所示，涵蓋的波長範圍由 380 nm 至 780 nm，間隔為 5 nm，如表 1 所列。得到配色函數後，我們就可以由光譜儀量到某物體的光譜，依下列公式計算得到三色刺激值 (tristimulus values) 來表示此物體的物體色：

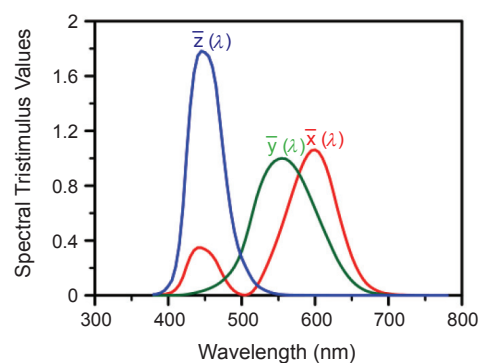


圖 1. CIE 1931 配色函數分布圖。

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\text{vis}} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\text{vis}} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\text{vis}} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; y = \frac{Y}{X+Y+Z} ; z = 1-x-y \quad (2-2)$$

其中 k 為常數， $S(\lambda)$ 代表光源光譜分布， $R(\lambda)$ 則為物體的反射率光譜 (或穿透率光譜)，積分 \int_{vis} 取自 360 nm – 830 nm。由於 XYZ 三維空間表達色彩較複雜不易理解，所以將其投影至二維空間，將三色刺激值歸一，即可得到 CIE 1931 x-y 馬蹄形色度座標系統中的色度值 (x, y)：

利用 (x, y) 可在色度座標上表示任一顏色之彩度與色相，如圖 2 所示，雖然它沒有辦法傳達亮度的訊息，然而任何顏色的混色結果，都可以在色度座標圖上預測，因此，此色度座標在色度計算與應用上被廣泛採用。

CIE 1931 標準色度觀察者適用於 $2^\circ - 4^\circ$ 視角觀察的視場範圍；由於人眼在小視角觀察色彩時，色彩差異的辨別能力較低，若觀察視場範圍

表 1. CIE1931 配色函數。

| λ (nm) | $\bar{x}(\lambda)$ | $\bar{y}(\lambda)$ | $\bar{z}(\lambda)$ | λ (nm) | $\bar{x}(\lambda)$ | $\bar{y}(\lambda)$ | $\bar{z}(\lambda)$ | λ (nm) | $\bar{x}(\lambda)$ | $\bar{y}(\lambda)$ | $\bar{z}(\lambda)$ |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 360 | 1.30E-04 | 3.92E-06 | 6.06E-04 | 520 | 6.33E-02 | 7.10E-01 | 7.82E-02 | 680 | 4.68E-02 | 1.70E-02 | 0.00E+00 |
| 365 | 2.32E-04 | 6.97E-06 | 1.09E-03 | 525 | 1.10E-01 | 7.93E-01 | 5.73E-02 | 685 | 3.29E-02 | 1.19E-02 | 0.00E+00 |
| 370 | 4.15E-04 | 1.24E-05 | 1.95E-03 | 530 | 1.66E-01 | 8.62E-01 | 4.22E-02 | 690 | 2.27E-02 | 8.21E-03 | 0.00E+00 |
| 375 | 7.42E-04 | 2.20E-05 | 3.49E-03 | 535 | 2.26E-01 | 9.15E-01 | 2.98E-02 | 695 | 1.58E-02 | 5.72E-03 | 0.00E+00 |
| 380 | 1.37E-03 | 3.90E-05 | 6.45E-03 | 540 | 2.90E-01 | 9.54E-01 | 2.03E-02 | 700 | 1.14E-02 | 4.10E-03 | 0.00E+00 |
| 385 | 2.24E-03 | 6.40E-05 | 1.05E-02 | 545 | 3.60E-01 | 9.80E-01 | 1.34E-02 | 705 | 8.11E-03 | 2.93E-03 | 0.00E+00 |
| 390 | 4.24E-03 | 1.20E-04 | 2.01E-02 | 550 | 4.33E-01 | 9.95E-01 | 8.75E-03 | 710 | 5.79E-03 | 2.09E-03 | 0.00E+00 |
| 395 | 7.65E-03 | 2.17E-04 | 3.62E-02 | 555 | 5.12E-01 | 1.00E+00 | 5.75E-03 | 715 | 4.11E-03 | 1.48E-03 | 0.00E+00 |
| 400 | 1.43E-02 | 3.96E-04 | 6.79E-02 | 560 | 5.95E-01 | 9.95E-01 | 3.90E-03 | 720 | 2.90E-03 | 1.05E-03 | 0.00E+00 |
| 405 | 2.32E-02 | 6.40E-04 | 1.10E-01 | 565 | 6.78E-01 | 9.79E-01 | 2.75E-03 | 725 | 2.05E-03 | 7.40E-04 | 0.00E+00 |
| 410 | 4.35E-02 | 1.21E-03 | 2.07E-01 | 570 | 7.62E-01 | 9.52E-01 | 2.10E-03 | 730 | 1.44E-03 | 5.20E-04 | 0.00E+00 |
| 415 | 7.76E-02 | 2.18E-03 | 3.71E-01 | 575 | 8.43E-01 | 9.15E-01 | 1.80E-03 | 735 | 1.00E-03 | 3.61E-04 | 0.00E+00 |
| 420 | 1.34E-01 | 4.00E-03 | 6.46E-01 | 580 | 9.16E-01 | 8.70E-01 | 1.65E-03 | 740 | 6.90E-04 | 2.49E-04 | 0.00E+00 |
| 425 | 2.15E-01 | 7.30E-03 | 1.04E+00 | 585 | 9.79E-01 | 8.16E-01 | 1.40E-03 | 745 | 4.76E-04 | 1.72E-04 | 0.00E+00 |
| 430 | 2.84E-01 | 1.16E-02 | 1.39E+00 | 590 | 1.03E+00 | 7.57E-01 | 1.10E-03 | 750 | 3.32E-04 | 1.20E-04 | 0.00E+00 |
| 435 | 3.29E-01 | 1.68E-02 | 1.62E+00 | 595 | 1.06E+00 | 6.95E-01 | 1.00E-03 | 755 | 2.35E-04 | 8.48E-05 | 0.00E+00 |
| 440 | 3.48E-01 | 2.30E-02 | 1.75E+00 | 600 | 1.06E+00 | 6.31E-01 | 8.00E-04 | 760 | 1.66E-04 | 6.00E-05 | 0.00E+00 |
| 445 | 3.48E-01 | 2.98E-02 | 1.78E+00 | 605 | 1.05E+00 | 5.67E-01 | 6.00E-04 | 765 | 1.17E-04 | 4.24E-05 | 0.00E+00 |
| 450 | 3.36E-01 | 3.80E-02 | 1.77E+00 | 610 | 1.00E+00 | 5.03E-01 | 3.40E-04 | 770 | 8.31E-05 | 3.00E-05 | 0.00E+00 |
| 455 | 3.19E-01 | 4.80E-02 | 1.74E+00 | 615 | 9.38E-01 | 4.41E-01 | 2.40E-04 | 775 | 5.87E-05 | 2.12E-05 | 0.00E+00 |
| 460 | 2.91E-01 | 6.00E-02 | 1.67E+00 | 620 | 8.54E-01 | 3.81E-01 | 1.90E-04 | 780 | 4.15E-05 | 1.50E-05 | 0.00E+00 |
| 465 | 2.51E-01 | 7.39E-02 | 1.53E+00 | 625 | 7.51E-01 | 3.21E-01 | 1.00E-04 | 785 | 2.94E-05 | 1.06E-05 | 0.00E+00 |
| 470 | 1.95E-01 | 9.10E-02 | 1.29E+00 | 630 | 6.42E-01 | 2.65E-01 | 5.00E-05 | 790 | 2.07E-05 | 7.47E-06 | 0.00E+00 |
| 475 | 1.42E-01 | 1.13E-01 | 1.04E+00 | 635 | 5.42E-01 | 2.17E-01 | 3.00E-05 | 795 | 1.46E-05 | 5.26E-06 | 0.00E+00 |
| 480 | 9.56E-02 | 1.39E-01 | 8.13E-01 | 640 | 4.48E-01 | 1.75E-01 | 2.00E-05 | 800 | 1.03E-05 | 3.70E-06 | 0.00E+00 |
| 485 | 5.80E-02 | 1.69E-01 | 6.16E-01 | 645 | 3.61E-01 | 1.38E-01 | 1.00E-05 | 805 | 7.22E-06 | 2.61E-06 | 0.00E+00 |
| 490 | 3.20E-02 | 2.08E-01 | 4.65E-01 | 650 | 2.84E-01 | 1.07E-01 | 0.00E+00 | 810 | 5.09E-06 | 1.84E-06 | 0.00E+00 |
| 495 | 1.47E-02 | 2.59E-01 | 3.53E-01 | 655 | 2.19E-01 | 8.16E-02 | 0.00E+00 | 815 | 3.58E-06 | 1.29E-06 | 0.00E+00 |
| 500 | 4.90E-03 | 3.23E-01 | 2.72E-01 | 660 | 1.65E-01 | 6.10E-02 | 0.00E+00 | 820 | 2.52E-06 | 9.11E-07 | 0.00E+00 |
| 505 | 2.40E-03 | 4.07E-01 | 2.12E-01 | 665 | 1.21E-01 | 4.46E-02 | 0.00E+00 | 825 | 1.78E-06 | 6.42E-07 | 0.00E+00 |
| 510 | 9.30E-04 | 5.03E-01 | 1.58E-01 | 670 | 8.74E-02 | 3.20E-02 | 0.00E+00 | 830 | 1.25E-06 | 4.52E-07 | 0.00E+00 |
| 515 | 2.91E-04 | 6.08E-01 | 1.12E-01 | 675 | 6.36E-02 | 2.32E-02 | 0.00E+00 | | | | |

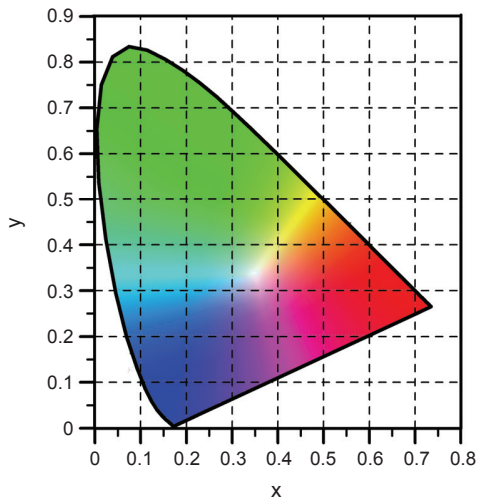


圖 2. CIE 1931 x - y 色度座標。

超過 4° 以上，色彩視覺會產生變化。所以 CIE 在 1964 年根據 Stiles、Burch⁽⁶⁾ 與 Speranskaya⁽⁷⁾ 的實驗為基礎定義「CIE 1964 補充色度標準觀察者 (the CIE 1964 supplementary standard colorimetric observer)」，以 10° 視角觀察為基準之配色函數 ($\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$)。

2. CIE 均等色度圖

即使 CIE 1931 x - y 色度座標已經被廣泛地使用，但在色度座標上兩色之間的距離無法代表人眼所感知的色差，而產業界十分注重色差管理。在 1942 年，MacAdam 針對 25 個特定色 (中心色)，以不同方向進行了加法混色的配色實驗，他將結果畫在 CIE 色度圖上，稱為麥克亞當等色差橢圓 (MacAdam ellipses)⁽⁸⁾，圖 3 即為麥克亞當橢圓放大 10 倍後在 CIE 1931 x - y 色度座標上的表現，橢圓內的各色與中心點的色差是一般人眼無法分辨的，即橢圓範圍內的色彩為等視覺色彩，因此利用這項特性，將麥克亞當橢圓當作是評估色度圖均勻性的標準方法之一——均等色度圖中的麥克亞當橢圓應當為大小一致的正圓。

在圖 3 中每個橢圓的長短軸差異大、甚至面積大小也都是不均等的，最大 (綠色) 與最小 (藍色) 橢圓差異約為 10 倍，即色彩知覺在藍色較為敏感，在綠色則較遲鈍。所以 CIE 1931 x - y 色度座標相當不均勻、無法準確地呈現人眼的色彩知覺。

有鑑於此缺點，色彩科學家不斷嘗試欲提出均勻色度圖 (uniform color scales, UCS)⁽⁹⁾，其中 MacAdam 發展出 u - v 色度圖，即 CIE 1960 均勻色度圖 (CIE 1960 UCS diagram)，轉換公式如下：

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3} = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad (2-3)$$

$$v = \frac{6y}{-2x+12y+3} = \frac{6Y}{X+15Y+3Z}$$

u - v 色度圖已被廣泛應用，例如：求光源的相關色溫之等色溫線即以 u - v 色度圖表示，光源演色性的評價也是由 u - v 色度值計算。但是 u - v 色度圖在麥克亞當橢圓均勻性的改善方面，仍不夠完美，如圖 4(a) 所示。

1975 年，Eastwood 將 (2-3) 式中的 v 值放大 1.5 倍，使其均勻性更佳，如圖 4(b) 所示⁽¹⁰⁾。並在 1976 年被 CIE 採用，定義為 u' - v' 色度圖，即 CIE 1976 均勻色度圖 (CIE 1976 UCS diagram)，轉換公式如下：

$$u' = \frac{4x}{-2x+12y+3} = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad (2-4)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} = \frac{9Y}{X+15Y+3Z}$$

1963 年，Wyszecki 以 CIE 1960 UCS 為基礎，加入明度 (lightness) 的修正，發展三維均勻色彩空

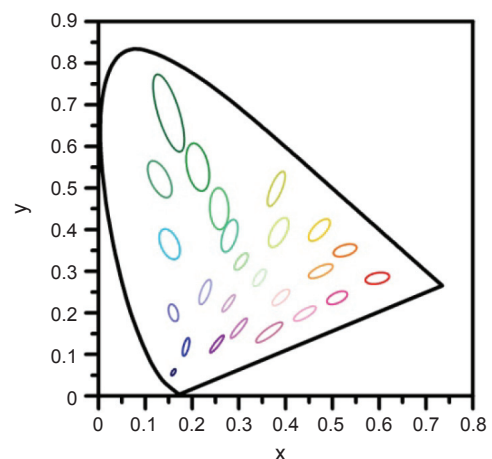


圖 3. CIE 1931 x - y 色度圖上的麥克亞當橢圓，圖中顏色為示意圖。

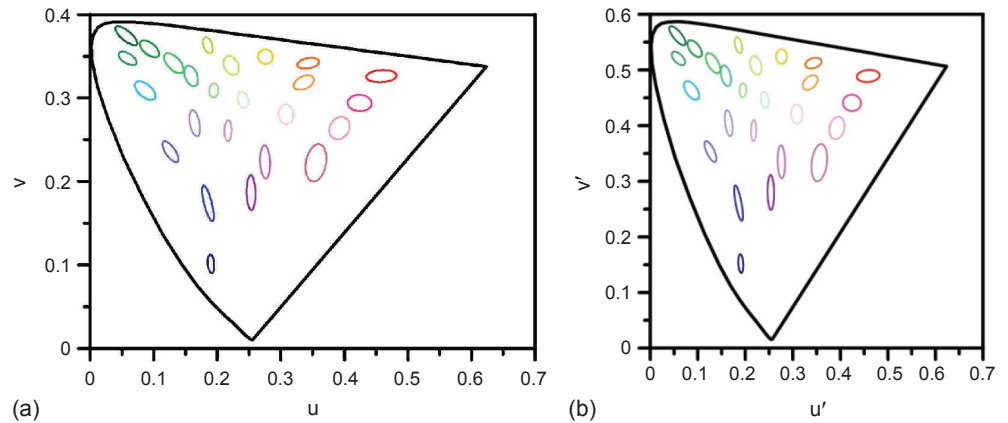


圖 4.
(a) $u-v$ 色度圖與 (b) $u'-v'$ 色度圖上的麥克亞當橢圓，圖中顏色為示意圖。

間 (uniform color spaces)⁽¹¹⁾，即為 CIE 1964 $U^*V^*W^*$ 色彩空間：

$$\begin{aligned} W^* &= 25Y^{1/3} - 17 \\ U^* &= 13W^*(u - u_n) \\ V^* &= 13W^*(v - v_n) \end{aligned} \quad (2-5)$$

其中， u 、 v 為光源照在待測物體上之 (u, v) ， u_n 、 v_n 則是光源照在完全擴散體上之 (u, v) ，CIE 1964 $U^*V^*W^*$ 色彩空間在 1976 年以前被廣泛使用。於此同時，亦有許多均勻色彩空間被紛紛提出，至 1976 年，CIE 整理之後提出兩個具代表性的均勻色度空間：CIE 1976 ($L^* u^* v^*$) 色度空間 (CIELUV 色度空間) 與 CIE 1976 ($L^* a^* b^*$) 色度空間 (CIELAB 色度空間)。

由於 CIELUV 色彩空間是以均等色度座標為基礎發展，可在色彩空間上以直線代表加法混色，因此 CIELUV 被廣泛的應用於色光混合工業，例如：電視及照明工業⁽¹²⁾。

CIELAB 色彩空間則是以等色覺表色系統—孟塞爾表色系統 (Munsell color system) 為基礎而建立，所以 CIELAB 是傳統上用來描述人眼所有可見顏色的最完整的色彩模型，CIELAB 向來在纖維與染織業界所使用。

三、光源

如上文所述，形成色彩的三要素中，光源為其第一要素，例如：太陽光、白熾燈泡或 LED 燈

等。光源除了本身可以表現色彩 (光源色) 之外，更常被用來當作照明體，賦予物體更豐富的色彩變化—同樣的物體在不同光源的照明下，卻可展現不同的顏色 (物體色)。故本節將介紹光源的分類與其物理量。

1. 輻射學與光度學

在光學領域中，輻射學 (radiometry) 是研究電磁輻射相關量測的科學，輻射量為一絕對的物理量。而輻射學中的分支—光度學 (photometry)，則是將人眼接收光的明亮程度量化，為一心理物理學。因此光度學著眼於可見光波段的研究，將光的輻射量透過光譜光視效函數 (spectral luminosity efficiency function) 加權後，即我們所每天所見的「光 (light)」。其中光譜光視效函數是 CIE 採用標準光度觀測者 (standard photometric observer) 根據閃爍法 (flicker method)⁽¹³⁾ 的實驗結果，於 1924 年訂出亮視覺光譜光視效函數 ($V(\lambda)$)⁽¹⁴⁾，適用於 1 cd/m^2 以上的亮度。而亮度小於 0.01 cd/m^2 時，則是採用 1951 年制訂的暗視覺光譜光視效函數 ($V'(\lambda)$)⁽¹⁵⁾，如圖 5 所示。 $V(\lambda)$ 與 $V'(\lambda)$ 的最大值分別落在 555 nm 與 507 nm ，詳細數據如表 2 所列。

輻射量與光度量之間轉換的關係如下式：

$$\Phi_l = K_m \times \int_{\text{vis}} \Phi_r(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda \quad (3-1)$$

其中， Φ_l 為光通量 (luminous flux)， $\Phi_r(\lambda)$ 為光譜輻射通量 (spectral radiant flux)， K_m 為常數，是最大光視效能，當採用明視覺光譜光視效函數

$V(\lambda)$ ， $K_m = 683 \text{ lm/W}$ ，而採用暗視覺光譜光視效函數 $V'(\lambda)$ 時， $K'_m = 1,754 \text{ lm/W}$ 。根據此定義，若一波長為 555 nm 的單色光，輻射通量為 1 W ，則此單色光對人眼來說，在白天之光通量為 683 lm ，但在夜晚時， $V'(\lambda) \doteq 0.402$ ，即相當於光通量為 $1,754 \times 0.402 = 705.108 \text{ (lm)}$ 。輻射學與光度學對應的用語及單位整理如表 3 所列。

2. 色溫與相關色溫

依 Plank 公式可算出不同溫度下黑體輻射體 (black-body radiator) 的輻射光譜，如圖 6 所示 (圖中顏色為示意圖，且在波長 560 nm 處歸一為 100)，並利用上文的計算方式得到黑體輻射軌跡 (或稱普朗克軌跡，Planckian locus)，如圖 7 所示。

當某光源之色度與黑體在某溫度下輻射之色度相同時，則將此黑體之溫度稱為光源之顏色溫度，

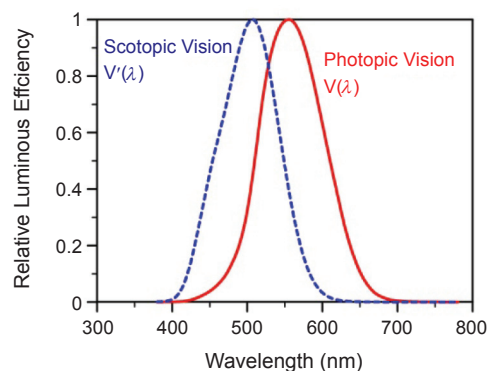


圖 5. 光譜光視效函數。

簡稱色溫 (color temperature, T_c)。因此光源的顏色可用色溫的概念描述之，單位為絕對溫度即凱氏溫度 (Kelvin, K)。例如：某螢光燈之色溫為 $6,000 \text{ K}$ ，代表其色度與 $6,000 \text{ K}$ 之黑體表面的色度相同，並非其溫度為 $6,000 \text{ K}$ 。白熾燈之色度點分布

表 2. 光譜光視效函數。

| λ (nm) | $V(\lambda)$ | $V'(\lambda)$ | λ (nm) | $V(\lambda)$ | $V'(\lambda)$ | λ (nm) | $V(\lambda)$ | $V'(\lambda)$ |
|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|
| 380 | 3.90E-05 | 5.89E-04 | 515 | 6.08E-01 | 9.75E-01 | 650 | 1.07E-01 | 6.77E-04 |
| 385 | 6.40E-05 | 1.11E-03 | 520 | 7.10E-01 | 9.35E-01 | 655 | 8.16E-02 | 4.59E-04 |
| 390 | 1.20E-04 | 2.21E-03 | 525 | 7.93E-01 | 8.80E-01 | 660 | 6.10E-02 | 3.13E-04 |
| 395 | 2.17E-04 | 4.53E-03 | 530 | 8.62E-01 | 8.11E-01 | 665 | 4.46E-02 | 2.15E-04 |
| 400 | 3.96E-04 | 9.29E-03 | 535 | 9.15E-01 | 7.33E-01 | 670 | 3.20E-02 | 1.48E-04 |
| 405 | 6.40E-04 | 1.85E-02 | 540 | 9.54E-01 | 6.50E-01 | 675 | 2.32E-02 | 1.03E-04 |
| 410 | 1.21E-03 | 3.48E-02 | 545 | 9.80E-01 | 5.64E-01 | 680 | 1.70E-02 | 7.15E-05 |
| 415 | 2.18E-03 | 6.04E-02 | 550 | 9.95E-01 | 4.81E-01 | 685 | 1.19E-02 | 5.01E-05 |
| 420 | 4.00E-03 | 9.66E-02 | 555 | 1.00E+00 | 4.02E-01 | 690 | 8.21E-03 | 3.53E-05 |
| 425 | 7.30E-03 | 1.44E-01 | 560 | 9.95E-01 | 3.29E-01 | 695 | 5.72E-03 | 2.50E-05 |
| 430 | 1.16E-02 | 2.00E-01 | 565 | 9.79E-01 | 2.64E-01 | 700 | 4.10E-03 | 1.78E-05 |
| 435 | 1.68E-02 | 2.63E-01 | 570 | 9.52E-01 | 2.08E-01 | 705 | 2.93E-03 | 1.27E-05 |
| 440 | 2.30E-02 | 3.28E-01 | 575 | 9.15E-01 | 1.60E-01 | 710 | 2.09E-03 | 9.14E-06 |
| 445 | 2.98E-02 | 3.93E-01 | 580 | 8.70E-01 | 1.21E-01 | 715 | 1.48E-03 | 6.60E-06 |
| 450 | 3.80E-02 | 4.55E-01 | 585 | 8.16E-01 | 8.99E-02 | 720 | 1.05E-03 | 4.78E-06 |
| 455 | 4.80E-02 | 5.13E-01 | 590 | 7.57E-01 | 6.55E-02 | 725 | 7.40E-04 | 3.48E-06 |
| 460 | 6.00E-02 | 5.67E-01 | 595 | 6.95E-01 | 4.69E-02 | 730 | 5.20E-04 | 2.55E-06 |
| 465 | 7.39E-02 | 6.20E-01 | 600 | 6.31E-01 | 3.32E-02 | 735 | 3.61E-04 | 1.87E-06 |
| 470 | 9.10E-02 | 6.76E-01 | 605 | 5.67E-01 | 2.31E-02 | 740 | 2.49E-04 | 1.38E-06 |
| 475 | 1.13E-01 | 7.34E-01 | 610 | 5.03E-01 | 1.59E-02 | 745 | 1.72E-04 | 1.02E-06 |
| 480 | 1.39E-01 | 7.93E-01 | 615 | 4.41E-01 | 1.09E-02 | 750 | 1.20E-04 | 7.60E-07 |
| 485 | 1.69E-01 | 8.51E-01 | 620 | 3.81E-01 | 7.37E-03 | 755 | 8.48E-05 | 5.67E-07 |
| 490 | 2.08E-01 | 9.04E-01 | 625 | 3.21E-01 | 4.97E-03 | 760 | 6.00E-05 | 4.25E-07 |
| 495 | 2.59E-01 | 9.49E-01 | 630 | 2.65E-01 | 3.34E-03 | 765 | 4.24E-05 | 3.20E-07 |
| 500 | 3.23E-01 | 9.82E-01 | 635 | 2.17E-01 | 2.24E-03 | 770 | 3.00E-05 | 2.41E-07 |
| 505 | 4.07E-01 | 9.98E-01 | 640 | 1.75E-01 | 1.50E-03 | 775 | 2.12E-05 | 1.83E-07 |
| 510 | 5.03E-01 | 9.97E-01 | 645 | 1.38E-01 | 1.01E-03 | 780 | 1.50E-05 | 1.39E-07 |

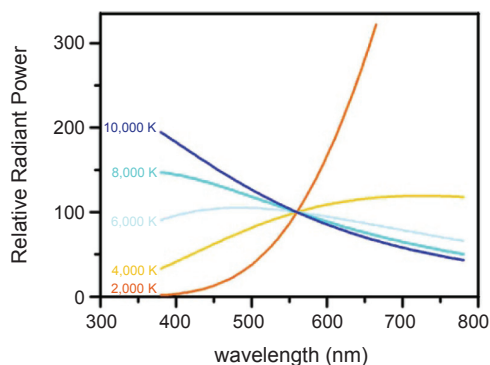


圖 6. 各色溫之黑體輻射光譜分布圖。

幾乎落在黑體軌跡上，因此可用 T_c 來表示，但其它光源之色度點可能會落在黑體軌跡之外，則無法用 T_c 表示，必須選擇與其色度點最接近之黑體輻射色度的溫度，因此稱為相關色溫 (correlated color temperature, T_{cp})，例如：標準光源 A 的相關色溫為 2,856 K。

3. 標準照明體與標準光源

由於光源大大影響物體色彩的表現，因此 CIE 制定了標準照明體 (CIE standard illuminants) 與標準光源 (CIE standard sources)，前者根據相對光譜輻射功率分布定義光源，為一理想光源，而後者則是實現標準照明體的人造光源。

(1) 標準照明體 A 與標準光源 A

標準照明體 A (CIE standard illuminant A) 為

表 3. 輻射量與光度量用語與單位。

| 輻射學 | | 光度學 | |
|--------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|
| 用語 | 單位 | 用語 | 單位 |
| 輻射能 (radiant energy) | Joule (J) | 光能量 (quantity of light) | Talbot (lm·s) |
| 輻射通量 (radiant flux) | Watt (W) | 光通量 (luminous flux) | Lumen (lm) |
| 輻射強度 (radiant intensity) | W/sr | 光強度 (luminous intensity) | lm/sr = candela (cd) |
| 輻射亮度 (radiance) | W/m ² sr | 亮度、輝度 (luminance) | lm/m ² sr = NIT |
| 輻射照度 (irradiance) | W/m ² | 照度 (illuminance) | lm/m ² = lux (lx) |
| 輻射出射度 (radiant exitance) | W/m ² | 光出射度 (luminous exitance) | lm/m ² |

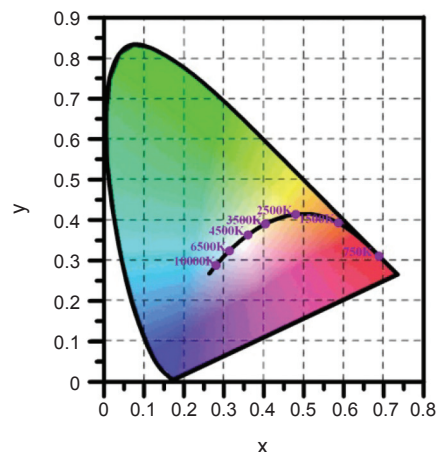


圖 7. 普朗克軌跡。

普朗克輻射體於 $T_c = 2,856$ K 時之相對光譜分布相同的照明體。可以利用透明玻璃或熔化石英 (SiO_2) 覆蓋之充氣鎢絲燈實現，即標準光源 A (CIE standard source A) 其 $T_{cp} = 2,856$ K。

(2) 標準照明體 B、標準照明體 C 與標準光源 B、標準光源 C

標準照明體 B (CIE standard illuminant B) 為 $T_{cp} = 4,874$ K 之直射太陽光 (direct sunlight)，標準照明體 C (CIE standard illuminant C) 為 $T_{cp} = 6,774$ K 之平均太陽光 (average daylight)。兩者皆可由標準光源 A 加上色溫轉換濾波器 (戴維斯吉伯遜濾波器 (Davis-Gibson filters)⁽¹⁶⁾) 實現，然而此為一液體濾波器在實用上十分不便，但若以玻璃濾波器取

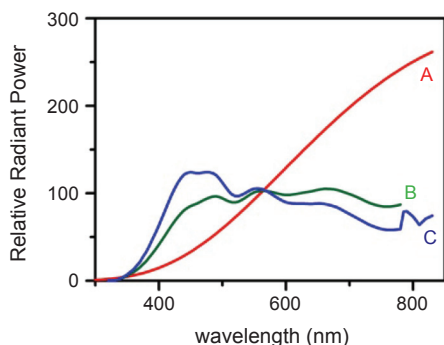


圖 8. 標準光源 A、B、C 之相對光譜輻射功率分布圖。

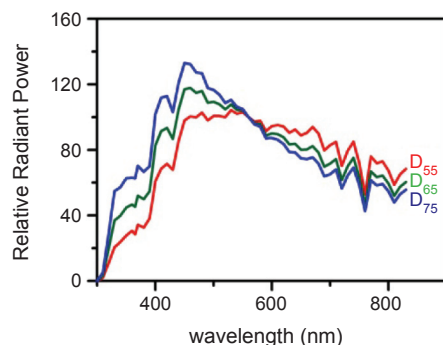


圖 9. 標準光源 D_{55} 、 D_{65} 、 D_{75} 之相對光譜輻射功率分布圖。

代，其穿透光譜的特性卻無法達到目標，加以兩者在紫外光區之光譜分布比例很少，但利用紫外光激發螢光物質的應用十分重要，所以標準光源 B (CIE standard source B) 與標準光源 C (CIE standard source C) 不常被使用。

(3) 標準照明體 D 與標準光源 D

由於相同 T_{cp} 之太陽光光譜在紫外光波段較普朗克輻射體光譜低，因此在 1963 年，CIE 制定標準照明體 D_{65} (CIE standard illuminant D_{65}) 代表平均太陽光 ($T_{cp} = 6,504$ K)，其光譜包含可見光並延伸至 300 nm。也可以標準照明體 D_{55} ($T_{cp} = 5,503$ K) 或標準照明體 D_{75} ($T_{cp} = 7,504$ K) 代替。一系列之標準照明體 D，可由下列公式得到某一相關色溫 T_{cp} 所相對應之色度座標 (x_D, y_D) 。當 $4,000$ K $\leq T_{cp} \leq 7,000$ K 時，

$$x_D = -4.6070 \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 2.9678 \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.09911 \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.244063 \quad (3-2a)$$

當 $7,000$ K $\leq T_{cp} \leq 25,000$ K 時，

$$x_D = -2.0064 \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 1.9018 \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.24748 \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.237040 \quad (3-2b)$$

求得 x_D 後，代入下式求 y_D ：

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.275 \quad (3-3)$$

得到 (x_D, y_D) 後，其相對光譜輻射功率分布 $S_D(\lambda)$ 可由一平均光譜 $S_0(\lambda)$ 與兩特徵光譜 $S_1(\lambda)$ 與 $S_2(\lambda)$ 之線性組合而成 $S_1(\lambda)$ 與 $S_2(\lambda)$ 的詳細數據如附表三所列。

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda)$$

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (3-4)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D}$$

以 D_{65} 為例，將 $T_{cp} = 6,500$ 代入 (3-2a) 式、(3-3) 式中，得到 $(x_{D65}, y_{D65}) \doteq (0.3128, 0.3292)$ 。再根據 (3-4) 式與表 4，即可得到，如表 5 所列。圖 8 與圖 9 分別為標準光源 A、B、C 與標準光源 $D^{17, 18)}$ 之相對光譜輻射功率分布圖，其中圖 9 在波長 560 nm 處歸一為 100。

4. 演色性

色彩恆常性 (color constancy) 即在不同光譜光源照射下，物體的色彩表現大致不變，由於色彩恆常性並非總是成立，所以不同光源照在物體上所表現的顏色也有差異，評價光源的方法有兩種：(1) 兩種光源光譜分布之差異；(2) 兩種光源照在標準物體上其色外貌 (color appearance) 之差異。第二

表 4. $S_0(\lambda)$ 、 $S_1(\lambda)$ 、 $S_2(\lambda)$ 。

| $\lambda(\text{nm})$ | $S_0(\lambda)$ | $S_1(\lambda)$ | $S_2(\lambda)$ | $\lambda(\text{nm})$ | $S_0(\lambda)$ | $S_1(\lambda)$ | $S_2(\lambda)$ | $\lambda(\text{nm})$ | $S_0(\lambda)$ | $S_1(\lambda)$ | $S_2(\lambda)$ |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 360 | 61.50 | 38.00 | 5.30 | 520 | 106.50 | 8.60 | -1.20 | 680 | 81.30 | -13.60 | 10.20 |
| 365 | 65.15 | 40.20 | 5.70 | 525 | 107.65 | 7.35 | -1.10 | 685 | 76.60 | -12.80 | 9.25 |
| 370 | 68.80 | 42.40 | 6.10 | 530 | 108.80 | 6.10 | -1.00 | 690 | 71.90 | -12.00 | 8.30 |
| 375 | 66.10 | 40.45 | 4.55 | 535 | 107.05 | 5.15 | -0.75 | 695 | 73.10 | -12.65 | 8.95 |
| 380 | 63.40 | 38.50 | 3.00 | 540 | 105.30 | 4.20 | -0.50 | 700 | 74.30 | -13.30 | 9.60 |
| 385 | 64.60 | 36.75 | 2.10 | 545 | 104.85 | 3.05 | -0.40 | 705 | 75.35 | -13.10 | 9.05 |
| 390 | 65.80 | 35.00 | 1.20 | 550 | 104.40 | 1.90 | -0.30 | 710 | 76.40 | -12.90 | 8.50 |
| 395 | 80.30 | 39.20 | 0.05 | 555 | 102.20 | 0.95 | -0.15 | 715 | 69.85 | -11.75 | 7.75 |
| 400 | 94.80 | 43.40 | -1.10 | 560 | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 720 | 63.30 | -10.60 | 7.00 |
| 405 | 99.80 | 44.85 | -0.80 | 565 | 98.00 | -0.80 | 0.10 | 725 | 67.50 | -11.10 | 7.30 |
| 410 | 104.80 | 46.30 | -0.50 | 570 | 96.00 | -1.60 | 0.20 | 730 | 71.70 | -11.60 | 7.60 |
| 415 | 105.35 | 45.10 | -0.60 | 575 | 95.55 | -2.55 | 0.35 | 735 | 74.35 | -11.90 | 7.80 |
| 420 | 105.90 | 43.90 | -0.70 | 580 | 95.10 | -3.50 | 0.50 | 740 | 77.00 | -12.20 | 8.00 |
| 425 | 101.35 | 40.50 | -0.95 | 585 | 92.10 | -3.50 | 1.30 | 745 | 71.10 | -11.20 | 7.35 |
| 430 | 96.80 | 37.10 | -1.20 | 590 | 89.10 | -3.50 | 2.10 | 750 | 65.20 | -10.20 | 6.70 |
| 435 | 105.35 | 36.90 | -1.90 | 595 | 89.80 | -4.65 | 2.65 | 755 | 56.45 | -9.00 | 5.95 |
| 440 | 113.90 | 36.70 | -2.60 | 600 | 90.50 | -5.80 | 3.20 | 760 | 47.70 | -7.80 | 5.20 |
| 445 | 119.75 | 36.30 | -2.75 | 605 | 90.40 | -6.50 | 3.65 | 765 | 58.15 | -9.50 | 6.30 |
| 450 | 125.60 | 35.90 | -2.90 | 610 | 90.30 | -7.20 | 4.10 | 770 | 68.60 | -11.20 | 7.40 |
| 455 | 125.55 | 34.25 | -2.85 | 615 | 89.35 | -7.90 | 4.40 | 775 | 66.80 | -10.80 | 7.10 |
| 460 | 125.50 | 32.60 | -2.80 | 620 | 88.40 | -8.60 | 4.70 | 780 | 65.00 | -10.40 | 6.80 |
| 465 | 123.40 | 30.25 | -2.70 | 625 | 86.20 | -9.05 | 4.90 | 785 | 65.50 | -10.50 | 6.90 |
| 470 | 121.30 | 27.90 | -2.60 | 630 | 84.00 | -9.50 | 5.10 | 790 | 66.00 | -10.60 | 7.00 |
| 475 | 121.30 | 26.10 | -2.60 | 635 | 84.55 | -10.20 | 5.90 | 795 | 63.50 | -10.15 | 6.70 |
| 480 | 121.30 | 24.30 | -2.60 | 640 | 85.10 | -10.90 | 6.70 | 800 | 61.00 | -9.70 | 6.40 |
| 485 | 117.40 | 22.20 | -2.20 | 645 | 83.50 | -10.80 | 7.00 | 805 | 57.15 | -9.00 | 5.95 |
| 490 | 113.50 | 20.10 | -1.80 | 650 | 81.90 | -10.70 | 7.30 | 810 | 53.30 | -8.30 | 5.50 |
| 495 | 113.30 | 18.15 | -1.65 | 655 | 82.25 | -11.35 | 7.95 | 815 | 56.10 | -8.80 | 5.80 |
| 500 | 113.10 | 16.20 | -1.50 | 660 | 82.60 | -12.00 | 8.60 | 820 | 58.90 | -9.30 | 6.10 |
| 505 | 111.95 | 14.70 | -1.40 | 665 | 83.75 | -13.00 | 9.20 | 825 | 60.40 | -9.55 | 6.30 |
| 510 | 110.80 | 13.20 | -1.30 | 670 | 84.90 | -14.00 | 9.80 | 830 | 61.90 | -9.80 | 6.50 |
| 515 | 108.65 | 10.90 | -1.25 | 675 | 83.10 | -13.80 | 10.00 | | | | |

種方法較常被採用，若色外貌一致性越高，代表此光源之演色性 (color rendering) 越高，演色性可由 CIE 制定的演色指數 (color rendering index, CRI)⁽¹⁹⁾ 量化，計算的方式如下。

(1) 參考照明體的選取

參考照明體之色度應與測試光源接近或相等：若測試光源之 T_{cp} 低於 5,000 K，以普朗克輻射體為參考光源；當測試光源之 T_{cp} 高於 5,000 K，則以 CIE 日光為參考光。

(2) 測試色塊的選取

計算演色指數時，共有 14 組測試色票，表 6 所列為這些樣本大約對應的孟塞爾記號與其分別在日光照明下表現的色外貌。

(3) 演色指數的計算

步驟 1. 求三刺激值 (X, Y, Z) 或色度座標 (x, y)

利用 (2-1) 式與 (2-2) 式分別計算參考照明體 $S_{\text{Ref}}(\lambda)$ 與測試光源 $S_{\text{Test}}(\lambda)$ 之三色刺激值 ($X_{\text{Ref}}, Y_{\text{Ref}}, Z_{\text{Ref}}$)、($X_{\text{Test}}, Y_{\text{Test}}, Z_{\text{Test}}$) 或對應之色度座標 ($x_{\text{Ref}}, y_{\text{Ref}}$)、($x_{\text{Test}}, y_{\text{Test}}$)。以及二者分別照射在同一測試色塊 (下標 i) 下的三刺激值： $(X_{\text{Ref},i}, Y_{\text{Ref},i}, Z_{\text{Ref},i})$ 、($X_{\text{Test},i}, Y_{\text{Test},i}$)

表 5. $D_{65}(\lambda)$ 。

| $\lambda(\text{nm})$ | $D_{65}(\lambda)$ | $\lambda(\text{nm})$ | $D_{65}(\lambda)$ | $\lambda(\text{nm})$ | $D_{65}(\lambda)$ | $\lambda(\text{nm})$ | $D_{65}(\lambda)$ |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 360 | 46.6383 | 480 | 115.923 | 600 | 90.0062 | 720 | 61.604 |
| 365 | 49.3637 | 485 | 112.367 | 605 | 89.8026 | 725 | 65.7448 |
| 370 | 52.0891 | 490 | 108.811 | 610 | 89.5991 | 730 | 69.8856 |
| 375 | 51.0323 | 495 | 109.082 | 615 | 88.6489 | 735 | 72.4863 |
| 380 | 49.9755 | 500 | 109.354 | 620 | 87.6987 | 740 | 75.087 |
| 385 | 52.3118 | 505 | 108.578 | 625 | 85.4936 | 745 | 69.3398 |
| 390 | 54.6482 | 510 | 107.802 | 630 | 83.2886 | 750 | 63.5927 |
| 395 | 68.7015 | 515 | 106.296 | 635 | 83.4939 | 755 | 55.0054 |
| 400 | 82.7549 | 520 | 104.79 | 640 | 83.6992 | 760 | 46.4182 |
| 405 | 87.1204 | 525 | 106.239 | 645 | 81.863 | 765 | 56.6118 |
| 410 | 91.486 | 530 | 107.689 | 650 | 80.0268 | 770 | 66.8054 |
| 415 | 92.4589 | 535 | 106.047 | 655 | 80.1207 | 775 | 65.0941 |
| 420 | 93.4318 | 540 | 104.405 | 660 | 80.2146 | 780 | 63.3828 |
| 425 | 90.057 | 545 | 104.225 | 665 | 81.2462 | 785 | 63.8434 |
| 430 | 86.6823 | 550 | 104.046 | 670 | 82.2778 | 790 | 64.3040 |
| 435 | 95.7736 | 555 | 102.023 | 675 | 80.281 | 795 | 61.8779 |
| 440 | 104.865 | 560 | 100 | 680 | 78.2842 | 800 | 59.4519 |
| 445 | 110.936 | 565 | 98.1671 | 685 | 74.0027 | 805 | 55.7054 |
| 450 | 117.008 | 570 | 96.3342 | 690 | 69.7213 | 810 | 51.9590 |
| 455 | 117.41 | 575 | 96.0611 | 695 | 70.6652 | 815 | 54.6998 |
| 460 | 117.812 | 580 | 95.788 | 700 | 71.6091 | 820 | 57.4406 |
| 465 | 116.336 | 585 | 92.2368 | 705 | 72.979 | 825 | 58.8765 |
| 470 | 114.861 | 590 | 88.6856 | 710 | 74.349 | 830 | 60.3125 |
| 475 | 115.392 | 595 | 89.3459 | 715 | 67.9765 | | |

$Z_{\text{Test},i}$) 或色度座標 $(x_{\text{Ref},i}, y_{\text{Ref},i})$ 、 $(x_{\text{Test},i}, y_{\text{Test},i})$ 。

注意：先將 $(X_{\text{Ref}}, Y_{\text{Ref}}, Z_{\text{Ref}})$ 、 $(X_{\text{Test}}, Y_{\text{Test}}, Z_{\text{Test}})$ 正規化，使 Y_{Ref} 及 Y_{Test} 為 100。

步驟 2. 根據 (2-3) 式計算求 $(u_{\text{Ref}}, v_{\text{Ref}})$ 、 $(u_{\text{Test}}, v_{\text{Test}})$ 與 $(u_{\text{Ref},i}, v_{\text{Ref},i})$ 、 $(u_{\text{Test},i}, v_{\text{Test},i})$ 。

步驟 3. 色適應校正

由於測試光源與參考照明體的色度座標有差異，會造成物體色偏移，所以在測試光源照射下要以色適應修正 (chromatic adaptation correction) 補償，如下：

$$\begin{aligned}
 u'_{\text{Test}} &= u_{\text{Ref}} \\
 v'_{\text{Test}} &= v_{\text{Ref}} \\
 u'_{\text{Test},i} &= \frac{10.872 + 0.404 \times c_{\text{Ref}} \times c_{\text{Test},i} / c_{\text{Test}} - 4 \times d_{\text{Ref}} \times d_{\text{Test},i} / d_{\text{Test}}}{16.518 + 1.481 \times c_{\text{Ref}} \times c_{\text{Test},i} / c_{\text{Test}} - d_{\text{Ref}} \times d_{\text{Test},i} / d_{\text{Test}}} \\
 v'_{\text{Test},i} &= \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \times c_{\text{Ref}} \times c_{\text{Test},i} / c_{\text{Test}} - d_{\text{Ref}} \times d_{\text{Test},i} / d_{\text{Test}}}
 \end{aligned}
 \tag{3-5}$$

表 6. 演色指數計算用之測試色塊⁽²⁰⁾。

| No. | 孟塞爾記號 | 日光下的色外貌 |
|-----|----------|--------------------------|
| 1. | 7.5R6/4 | Light grayish red |
| 2. | 56/4 | Dark grayish yellow |
| 3. | 5GY6/8 | Strong yellow-green |
| 4. | 2.5G6/6 | Moderate yellowish green |
| 5. | 10BG6/4 | Light bluish green |
| 6. | 5PB6/8 | Light blue |
| 7. | 2.5P6/8 | Light violet |
| 8. | 10P6/8 | Light reddish purple |
| 9. | 4.5R4/13 | Strong red |
| 10. | 5Y8/10 | Strong yellow |
| 11. | 4.5G5/8 | Strong green |
| 12. | 3PB3/11 | Strong blue |
| 13. | 5YR8/4 | Light yellowish pink |
| 14. | 5GY4/4 | Moderate olive green |

表 7. 步驟 1 計算結果。

| 光源 | X_{Ref} 127.43 | | Y_{Ref} 100.00 | | Z_{Ref} 14.52 | |
|-----|----------------------|-------------|----------------------|--------------|---------------------|--------------|
| i | $X_{Ref,i}$ | $Y_{Ref,i}$ | $Z_{Ref,i}$ | $X_{Test,i}$ | $Y_{Test,i}$ | $Z_{Test,i}$ |
| 1. | 51.31 | 34.87 | 3.24 | 50.00 | 36.01 | 3.28 |
| 2. | 42.05 | 31.46 | 2.22 | 42.73 | 32.64 | 2.08 |
| 3. | 34.11 | 29.90 | 1.68 | 36.03 | 29.91 | 1.43 |
| 4. | 25.06 | 25.00 | 3.40 | 26.81 | 23.49 | 3.02 |
| 5. | 27.89 | 26.27 | 5.55 | 29.58 | 25.05 | 5.47 |
| 6. | 30.76 | 25.89 | 7.46 | 29.87 | 23.72 | 7.68 |
| 7. | 43.78 | 30.69 | 6.50 | 39.70 | 28.91 | 6.92 |
| 光源 | X_{Test} 128.74 | | Y_{Test} 100.00 | | Z_{Test} 14.59 | |
| i | $X_{Ref,i}$ | $Y_{Ref,i}$ | $Z_{Ref,i}$ | $X_{Test,i}$ | $Y_{Test,i}$ | $Z_{Test,i}$ |
| 8. | 57.30 | 36.52 | 5.62 | 47.51 | 33.11 | 5.94 |
| 9. | 46.11 | 21.56 | 0.54 | 28.26 | 15.47 | 0.57 |
| 10. | 88.33 | 66.14 | 2.23 | 89.08 | 68.40 | 1.80 |
| 11. | 13.88 | 15.60 | 2.51 | 14.24 | 13.08 | 2.19 |
| 12. | 3.15 | 3.51 | 3.75 | 2.81 | 2.47 | 3.82 |
| 13. | 89.76 | 64.13 | 5.73 | 89.99 | 67.06 | 5.64 |
| 14. | 12.93 | 11.38 | 0.83 | 13.52 | 11.27 | 0.75 |

其中， (u_{Ref}, v_{Ref}) 為參考照明體之色度座標， (u_{Test}, v_{Test}) 為測試光源之色度座標， $(u_{Test,i}, v_{Test,i})$ 為測試光源照射在測試色塊 (下標 i) 之色度座標， (u'_{Test}, v'_{Test}) 為經過色適應修正後，測試光源之色度座標， $(u'_{Test,i}, v'_{Test,i})$ 為經過色適應修正，測試光源照射在測試色塊 (下標 i) 之色度座標。 (c_{Ref}, d_{Ref}) 、 (c_{Test}, d_{Test}) 與 $(c_{Test,i}, d_{Test,i})$ 為將 (u_{Ref}, v_{Ref}) 、 (u_{Test}, v_{Test}) 與 $(u_{Test,i}, v_{Test,i})$ 代入下式得到：

$$c = (4.0 - u - 10.0v) / v$$

$$d = (1.708v + 0.404 - 1.481u) / v$$
(3-6)

步驟 4. 根據 (2-5) 式計算求 $(W_{Ref,i}^*, U_{Ref,i}^*, V_{Ref,i}^*)$ 及 $(W_{Test,i}^*, U_{Test,i}^*, V_{Test,i}^*)$ 。

步驟 5. 計算色差

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{Ri}^* - U_{Ti}^*)^2 + (V_{Ri}^* - V_{Ti}^*)^2 + (W_{Ri}^* - W_{Ti}^*)^2}$$
(3-7)

步驟 6. 求特殊演色指數

每個測試色塊之特殊演色指數 (CIE special color-rendering index, R_i)：

表 8. 步驟 2 計算結果。

| 光源 | u_{Ref} 0.31 | | v_{Ref} 0.36 | |
|-----|--------------------|-------------|--------------------|--------------|
| i | $u_{Ref,i}$ | $v_{Ref,i}$ | $u_{Test,i}$ | $v_{Test,i}$ |
| 1. | 0.35 | 0.36 | 0.33 | 0.36 |
| 2. | 0.32 | 0.36 | 0.32 | 0.36 |
| 3. | 0.28 | 0.37 | 0.29 | 0.37 |
| 4. | 0.24 | 0.37 | 0.28 | 0.36 |
| 5. | 0.25 | 0.36 | 0.28 | 0.36 |
| 6. | 0.28 | 0.35 | 0.29 | 0.35 |
| 7. | 0.33 | 0.35 | 0.32 | 0.35 |
| 光源 | u_{Test} 0.31 | | v_{Test} 0.36 | |
| i | $u_{Ref,i}$ | $v_{Ref,i}$ | $u_{Test,i}$ | $v_{Test,i}$ |
| 8. | 0.37 | 0.35 | 0.34 | 0.35 |
| 9. | 0.50 | 0.35 | 0.43 | 0.35 |
| 10. | 0.33 | 0.37 | 0.32 | 0.37 |
| 11. | 0.22 | 0.37 | 0.26 | 0.36 |
| 12. | 0.19 | 0.31 | 0.22 | 0.29 |
| 13. | 0.34 | 0.36 | 0.32 | 0.36 |
| 14. | 0.28 | 0.37 | 0.29 | 0.37 |

$$R_i = 100 - 4.6(\Delta E_i)$$
(3-8)

若某測試色塊 O_i 在測試光源與參考照明體照射下，其三刺激值相同，則 R_i 為最大值， $R_i = 100$ ，代表此測試光源有極佳的演色性。

步驟 7. 求平均演色指數

因為 no.1 - no.8 的色票是孟塞爾色彩系統中的中明度、中彩度之色塊，為物體色之平均代表樣本，所以將它們的色差取算術平均數，即可求得平均演色指數 (CIE general color-rendering index, R_a)：

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$
(3-9)

(4) 以高壓鈉燈為例計算演色性

高壓鈉燈 $T_{cp} \approx 2,000$ K，所以選擇 $T_c = 2,000$ K 的普朗克輻射體為參考照明體。

步驟 1. 求三刺激值 (X, Y, Z)，計算結果表 7 所列。

步驟 2. 求 (u_{Ref}, v_{Ref}) 、 (u_{Test}, v_{Test}) 與 $(u_{Ref,i}, v_{Ref,i})$ 、 $(u_{Test,i}, v_{Test,i})$ ，計算結果表 8 所列。

表 9. 步驟 3 計算結果。

| 光源 | c_{Ref} | d_{Ref} | 光源 | c_{Test} | d_{Test} | 光源 | u'_{Test} | v_{Test} | 光源 | u'_{Test} | v_{Test} |
|-----|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|-----|---------------|---------------|-----|---------------|---------------|
| | 0.29 | 1.57 | | 0.29 | 1.56 | | 0.31 | 0.36 | | 0.31 | 0.36 |
| i | $c_{Test,i}$ | $d_{Test,i}$ | i | $c_{Test,i}$ | $d_{Test,i}$ | i | $u'_{Test,i}$ | $v'_{Test,i}$ | i | $u'_{Test,i}$ | $v'_{Test,i}$ |
| 1. | 0.18 | 1.46 | 8. | 0.36 | 1.43 | 1. | 0.33 | 0.36 | 8. | 0.34 | 0.35 |
| 2. | 0.13 | 1.53 | 9. | 0.07 | 1.04 | 2. | 0.31 | 0.36 | 9. | 0.43 | 0.35 |
| 3. | 0.10 | 1.62 | 10. | 0.05 | 1.53 | 3. | 0.29 | 0.37 | 10. | 0.32 | 0.37 |
| 4. | 0.26 | 1.69 | 11. | 0.34 | 1.75 | 4. | 0.27 | 0.36 | 11. | 0.26 | 0.36 |
| 5. | 0.44 | 1.68 | 12. | 3.09 | 1.99 | 5. | 0.28 | 0.36 | 12. | 0.22 | 0.29 |
| 6. | 0.65 | 1.62 | 13. | 0.17 | 1.50 | 6. | 0.29 | 0.35 | 13. | 0.32 | 0.36 |
| 7. | 0.48 | 1.50 | 14. | 0.13 | 1.63 | 7. | 0.32 | 0.35 | 14. | 0.29 | 0.37 |

表 10. 步驟 4 計算結果。

| i | $W_{Ref,i}$ | $U_{Ref,i}$ | $V_{Ref,i}$ | $W_{Test,i}$ | $U_{Test,i}$ | $V_{Test,i}$ |
|-----|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1. | 64.68 | 38.98 | -0.73 | 65.55 | 21.69 | 1.15 |
| 2. | 61.92 | 14.51 | 2.82 | 62.90 | 7.68 | 4.00 |
| 3. | 60.59 | -19.91 | 6.95 | 60.61 | -10.41 | 6.53 |
| 4. | 56.10 | -44.26 | 4.78 | 54.60 | -22.47 | 3.06 |
| 5. | 57.32 | -37.72 | 0.22 | 56.15 | -19.95 | -1.72 |
| 6. | 56.95 | -19.50 | -5.33 | 54.83 | -11.06 | -7.51 |
| 7. | 61.27 | 23.41 | -5.90 | 59.73 | 10.47 | -5.97 |
| 8. | 65.95 | 54.37 | -5.78 | 63.28 | 24.89 | -4.31 |
| 9. | 52.58 | 131.22 | -7.18 | 45.29 | 72.77 | -2.65 |
| 10. | 84.10 | 21.84 | 6.53 | 85.24 | 11.17 | 8.35 |
| 11. | 45.47 | -51.87 | 4.39 | 41.90 | -24.74 | 1.57 |
| 12. | 20.98 | -31.98 | -12.29 | 16.80 | -19.49 | -15.26 |
| 13. | 83.07 | 33.31 | 0.98 | 84.57 | 17.10 | 3.12 |
| 14. | 39.23 | -13.86 | 3.99 | 39.05 | -7.73 | 3.61 |

步驟 3. 色適應校正，計算結果表 9 所列。

步驟 4. 計算 CIE 1964 均等色彩空間的色度值 W^* 、 U^* 、 V^* 值，計算結果表 10 所列。

步驟 5. 至步驟 7. 計算色差，並求特殊演色指數與平均演色指數，計算結果表 11 所列。

| 光源 | 相關色溫 $T_p(K)$ | 平均演色指數 (R_a) | 發光效能 (lm/W) |
|-----------------------|---------------|------------------|-------------|
| 鎢絲燈 | 2,800–3,200 | 100 | 12–20 |
| 日光 (D ₆₅) | 6,500 | 100 | — |
| 氙燈 | 5,290 | 93 | 25 |
| 螢光燈—人造日光 | 6,500 | 92 | 45 |
| 螢光燈—冷白光 | 4,200 | 58 | 81 |
| 螢光燈—暖白光 | 3,000 | 51 | 83 |
| 高壓鈉燈 | 2,000 | 25 | 100 |
| 低壓鈉燈 | — | — | 150 |
| 金屬鹵化燈 | 4,020 | 61 | 90 |

表 11. 步驟 5 與步驟 6 計算結果。

| i | ΔE_i^* | R_i | i | ΔE_i^* | R_i |
|-----|----------------|-------|-----|----------------|---------|
| 1. | 17.41 | 19.92 | 8. | 29.64 | -36.35 |
| 2. | 7.00 | 67.80 | 9. | 59.08 | -171.77 |
| 3. | 9.50 | 56.29 | 10. | 10.89 | 49.90 |
| 4. | 21.90 | -0.75 | 11. | 27.51 | -26.53 |
| 5. | 17.92 | 17.58 | 12. | 13.50 | 37.90 |
| 6. | 8.97 | 58.74 | 13. | 16.42 | 24.48 |
| 7. | 13.03 | 40.04 | 14. | 6.14 | 71.76 |

$R_a = 27.91$

(5) 常見光源的相關色溫與演色指數

表 12 所列為常見光源的相關色溫與演色指數 (21,22)。

(未完，待續)

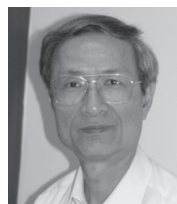
參考文獻

1. 李正中, 薄膜光學與鍍膜技術, 6th ed., 台北: 藝軒出版社 (2009).
2. M. Color, *Munsell Book of Color*, Baltimore: Macbeth, a division of Kollmorgen Corp. (1929).

表 12.

常見光源的相關色溫與演色指數 (21,22)。

3. A. Hard and L. Sivik, *Color Research and Application*, **6** (3), 129 (1981).
4. J. Guild, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, **230** (681-693), 149 (1932).
5. W. D. Wright, *Transactions of the Optical Society*, **30**, 141 (1928).
6. W. S. Stiles and J. M. Burch, *Optica Acta*, **6**, 126 (1959).
7. N. I. Speranskaya, *Optics and Spectroscopy*, **7**, 424 (1959).
8. D. L. Macadam, *J. Opt. Soc. Am.*, **32** (5), 247 (1942).
9. G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, New York: Wiley (1982).
10. D. Eastwood, "A Simple Modification to Improve the Perceptual Uniformity of the CIE 1964 $U^*V^*W^*$ Colour Space," *Farbe*, **24**, 97-108 (1975).
11. G. Wyszecki, *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, 1318 (1963).
12. Edited by CIE, Vienna: CIE Publication, 19 (1986).
13. H. E. Ives, "Studies in the Photometry of Lights of Different Colors, I. Spectral Luminosity Curves Obtained by the Equality of Brightness Photometer and the Flicker Photometer under Similar Conditions," *Phil. Mag.*, **24**, 149-188, 352-370, 744, 845 (1912).
14. Cambridge, 1926 (unpublished).
15. Paris, 1951 (unpublished).
16. R. Davis and K. S. Gibson, "Filters for the Reproduction of Sunlight and Daylight and the Determination of Color Temperature," *Bur. Standards Misc. Pub.*, **114** (1931).
17. Henderson, *Trans. Illum. Eng. Soc.*, **33**, 83 (1968).
18. F. Grum, S. Saunders, and T. Wightnam, "Artificial Light Sources to Simulate Illuminant D," *TAPPI*, **53** (7) (1970).
19. Edited by CIE (Paris, 1974).
20. G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, New York: Wiley, 173 (1982).
21. R. W. G. Hunt, in *Measuring Colour*, Fountain Press (2000).
22. T. M. Angelo, V. Arecchi, and R. John Koshel, *SPIE Press*, 20 (2007).



李正中先生為美國亞歷桑那大學光學博士，現任國立中央大學與中興大學講座教授、中央大學薄膜技術中心主持人、OSA 台灣分會主席、OSA 及 SPIE 中央大學學生分會指導教授、

SPIE 及 OSA Fellow。

Cheng-Chung Lee received his Ph.D. in optical sciences from University of Arizona, USA. He is currently a Chair Professor of National Central University and National Chung-Hsing University and the director of the Thin Film Technology Center of NCU. He is the chairman of OSA Taiwan Section and the advisor of NCU SPIE and OSA Student Chapter. He is the Fellow of SPIE and OSA.



楊宗勳先生為國立交通大學光電工程博士，現任國立中央大學光電科學與工程學系助理教授。

Tsung-Hsun Yang received his Ph.D. in electro-optical engineering

from National Chiao Tung University. He is currently an assistant professor in the Department of Optics and Photonics at National Central University.



廖詩芳小姐現為光電系博士候選人。

Shih-Fang Liao is currently a candidate for Ph.D. in the Department of Optics and Photonics at National Central University.