

不只是一張白紙： 紙張光學特性的科學視角



文／王俊超¹、徐健國¹、葉若鋆^{*}

圖／王俊超

為何辦公室的影印紙白得刺眼，小說內頁卻多為溫潤的米黃色？為何時尚雜誌的圖片色彩鮮豔，報紙上的照片卻顯得灰濛濛？當我們拿起一張紙，它的顏色、質感乃至於閱讀時的舒適程度，其實都源自於一套融合物理、化學與人類視覺感知的光學機制。

這不僅關乎美學，更直接影響溝通的精準度、品牌形象的傳達與長時間閱讀的舒適性，從商業印刷、出版設計到日常辦公用紙，對紙張的選擇往往隱含著對「光與色」的精細調控。本文將從色彩量化出發，進一步說明亮度、白度、光澤與不透明度等紙張光學性質測量，解析一張「白紙」背後的科學內涵。

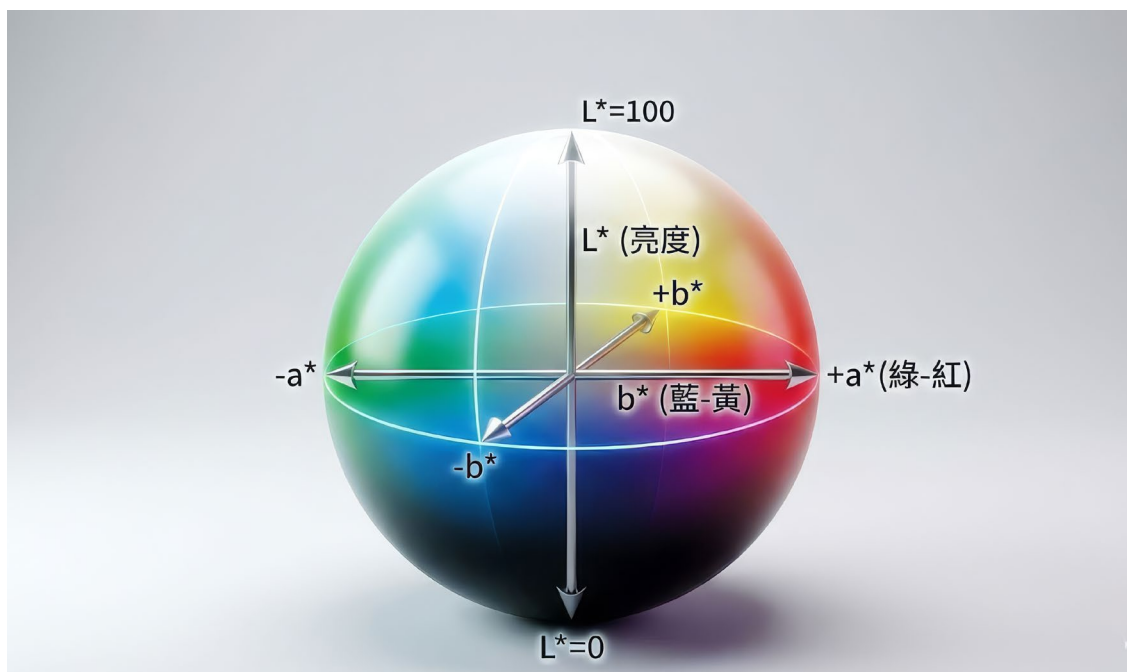


圖1 CIE L*a*b* 色彩空間

¹ 林業試驗所林產利用組

^{*} 通訊作者 (zoeyeh@tfri.gov.tw)

色彩的量化：從感覺到數據

在討論紙張顏色之前，首先需要一套客觀描述顏色的方式，國際照明委員會（CIE）所建立的 $L^*a^*b^*$ 色彩空間，是目前廣泛使用且與設備無關的色彩模型。此系統以三個數值描述顏色： L^* 表示明度（由黑到白）， a^* 表示紅綠方向的色偏， b^* 則表示黃藍方向的色偏。

透過這套系統，紙張顏色可以被量化為具體數據，將人眼感知的顏色差異，轉化為空間中的幾何距離，例如理想的白紙應接近中性，即 a^* 與 b^* 接近零。然而實際上，多數紙張會帶有輕微色偏： b^* 為正值時呈現偏黃的「暖白」， b^* 為負值則呈現偏藍的「冷白」，這種細微差異，正是造成紙張視覺感受不同的原因之一。

值得注意的是，顏色並非物體本身的固定屬性，而是光線與人眼共同作用的結果。同一張紙在不同光源下（如日光或室內照明）可能呈現不同外觀，因此色彩測量需在標準化條件下進行，才能確保數據具有可比性。只有當「光源」、「幾何條件」與「標準觀察者」三者都被明確定義時，一組 $L^*a^*b^*$ 數據才具有科學上的可比性。

CIE所規定並且常用於紙張光學性質測量的標準光源包括D65光源和C光源，D65光源模擬平均日光，其光譜包含充足的紫外線，最能反映含螢光增白劑的紙張在戶外的真實外觀。C光源由於幾乎不含UV，現今較少用於評估含有螢光增白劑的材料。

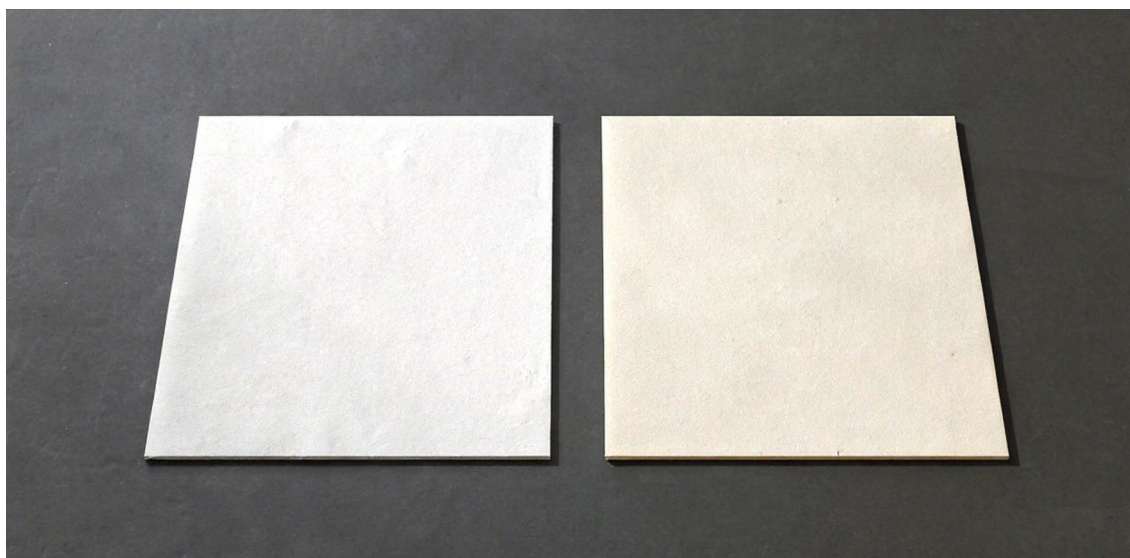


圖2 冷白與暖白紙張對比

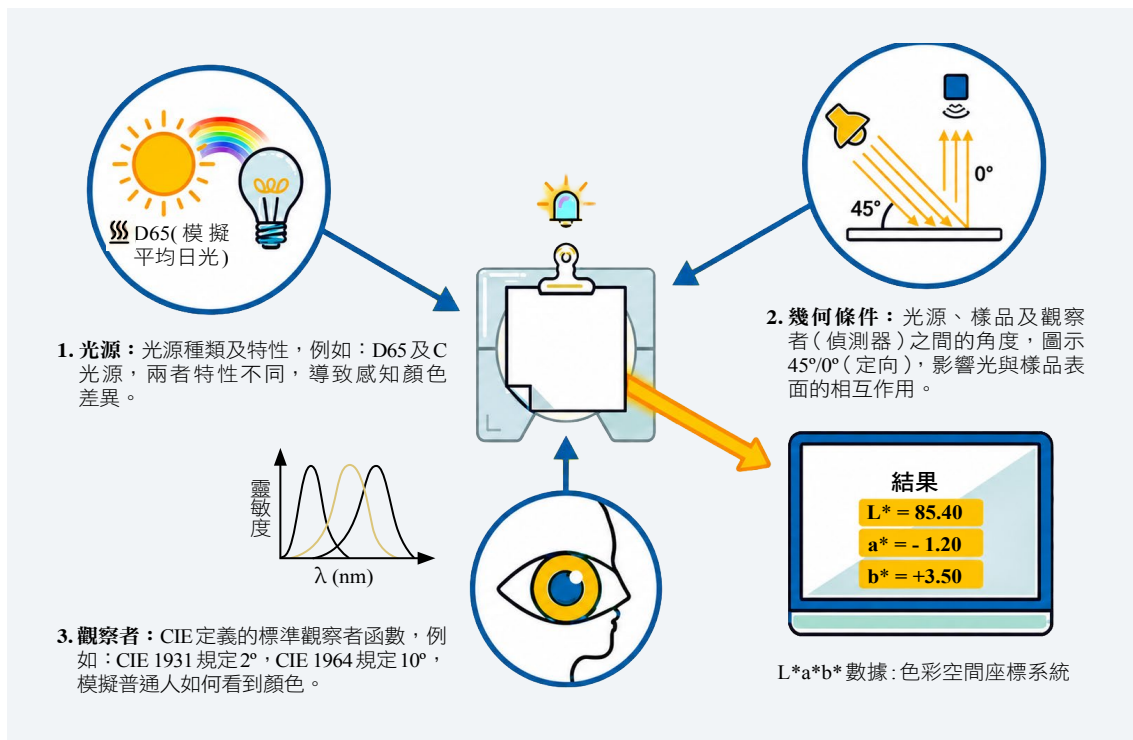


圖3 色彩測量的標準化條件

光線照射與接收的角度，會顯著影響測量結果，主要條件可分為定向照明和擴散照明。定向照明通常指光線從 45° 入射，儀器在 0° (垂直於樣品) 接收，此方式對紙張表面紋理和纖維方向性非常敏感，能捕捉細微的質感差異。擴散照明指光線從四面八方均勻照射到樣品上 (通常使用積分球實現)，儀器在 0° 接收。此方式能有效消除表面紋理的影響。

由於每個人的色彩感知略有不同，CIE 透過大量實驗，建立了模擬人類視覺反應的數學模型，即「標準觀察者」。根據 CIE 1931 模擬人類注視小物體時 (約 2° 視野) 的色彩感知，為 2° 標準觀察者，適用於需要精細辨色的場

合。根據 CIE 1964 則模擬較大視野下的色彩感知，為 10° 標準觀察者，被認為更能代表日常觀看物體的感受，是現今工業界最廣泛使用的標準。

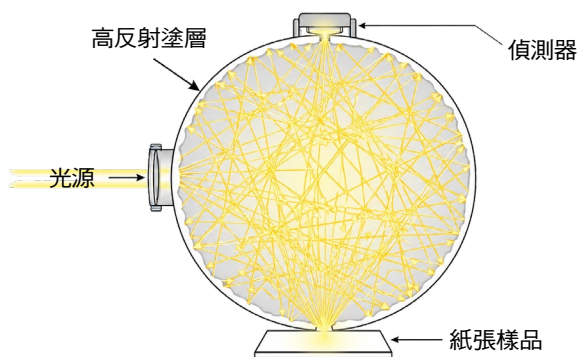


圖4 積分球內部結構和工作原理示意圖

亮度與白度：看似相同，實則不同

基於前述色彩量化的概念，便能更精確地理解兩個最常被提及、也最容易混淆的光學指標：白度與亮度。

白度 (Whiteness) 遵循色度學原理，評估紙張在整個可見光譜 (約 400 ~ 700 nm) 的光反射均勻程度與總量，是一個更全面、更貼近人眼真實感知的綜合指標。高白度意味著紙張能均勻反射各種波長的光線，使其呈現中性、無色偏的白。這對於需要精確色彩呈現的應用，如藝術品複製、攝影作品印刷等尤為重要，因為紙張本身的色偏會直接影響最終影像效果。

亮度 (Brightness) 則是一個高度標準化的單點指標，核心是測量紙張在 457 nm 附近的藍光反射率。略帶藍調的紙張，通常會被人眼

感知為更潔白明亮。因此，高亮度紙張常給人「白得發亮」的印象，廣泛應用於影印紙與商業文件。實務上，這種效果多透過添加螢光增白劑達成，該類物質能吸收紫外線並轉換為可見的藍光，使紙張在視覺上顯得更白。

在紙張行業中，亮度指標主要有兩種國際標準，它們在測量條件和應用上存在顯著差異。GE 亮度主要流行於北美地區。由於其對纖維結構的敏感性，它更適用於評估紙漿的漂白效果，或比較不含螢光增白劑的紙張。ISO 亮度則廣泛應用於全球市場。如使用 D65 光源，ISO 亮度能更好地反映含有螢光增白劑的紙張在日光下的實際視覺亮度，特別適用於商業印刷紙張和辦公用紙。

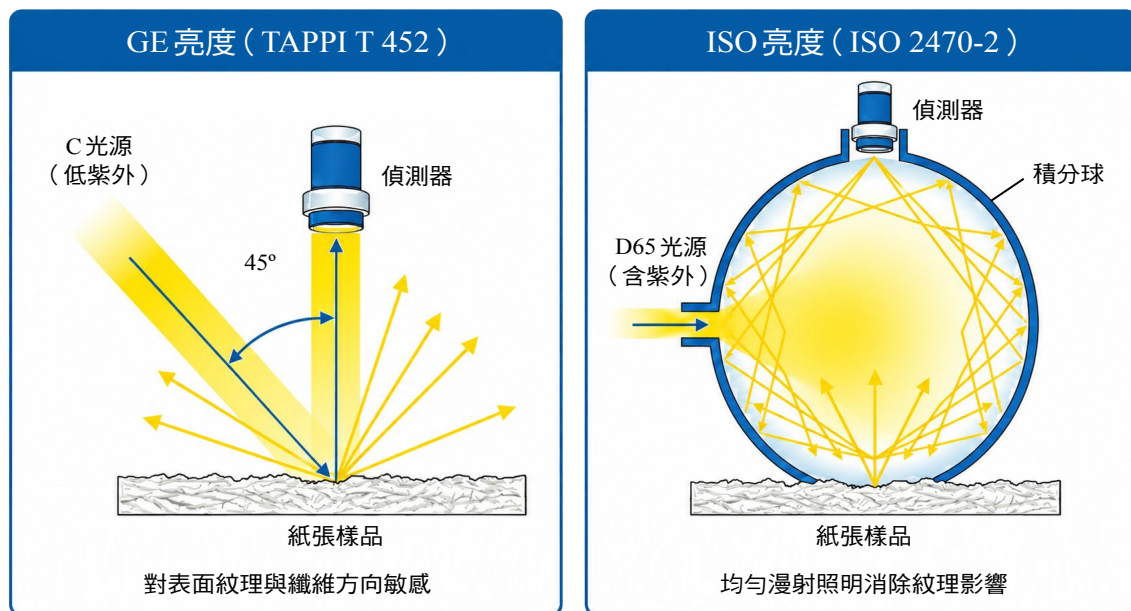


圖5 紙張 GE 亮度及 ISO 亮度測量方法示意圖

表面質感的差異：光澤的角色

除了顏色之外，紙張的表面光澤也會影響其視覺效果與使用情境，光澤度描述的是紙張表面對光線進行鏡面反射的能力。

高光澤紙張（如銅版紙）表面平滑，能強烈反射光線，使影像顯得鮮豔且對比清晰，因此常用於雜誌、型錄或攝影集等需要強烈視覺效果的印刷品。相對地，低光澤紙張（如道林紙）表面較粗糙，光線多以漫反射形式散射，呈現柔和、不反光的霧面效果，適合長時間閱讀，因此被廣泛應用於書籍內頁。

光澤度的測量使用光澤度計（Glossmeter），儀器以特定角度（通常是 20° 、 60° 或 75° ）向紙樣表面發射光束，然後在對應的反射角度測量反射回來的光線反射率，單位是GU（Gloss Unit）。高光澤紙張常用 20° 測量；中等光澤紙張常用 60° 測量；低光澤紙張則常用對低光澤更敏感的 75° 測量。

光澤的選擇，實際上反映了「視覺表現」與「閱讀舒適」之間的取舍，高光澤有利於影像呈現，但可能產生反光；低光澤則較為內斂，有助於減輕眼睛疲勞。



圖6 不同光澤度紙張的視覺效果對比

不透明度：閱讀品質的關鍵

另一項容易被忽略但極為重要的特性是不透明度 (opacity)，即紙張阻擋光線穿透的能力。當紙張不透明度不足時，背面的文字或影像會透出至正面，形成干擾，降低閱讀清晰度。對於需要雙面印刷的書籍或文件而言，不透明度直接影響閱讀品質。

在測量時，也同樣需要定義幾何與光源條件，實務上主要區別在於測量時使用的背襯 (backing)，因此衍生兩種指標。

首先是「印刷不透明度」(printing opacity)，

又稱紙背不透明度，其定義是將單張紙背襯黑色標準板測得的反射率 (R_0)，除以背襯極厚同款紙張測得的反射率 (R_∞) 所得之比值。此指標是印刷與出版業評估書籍、報刊雙面印刷品質的關鍵標準。

另一種則是「對比不透明度」(contrast ratio, $C_{0.89}$)。這是比較單張紙在黑色標準板上的反射率 (R_0) 與在反射率 89% 的標準白板上的反射率 (R_w)。常作為造紙工業生產過程中的控制項目，用來監控產品的一致性以及標籤、包裝紙的遮蓋能力。

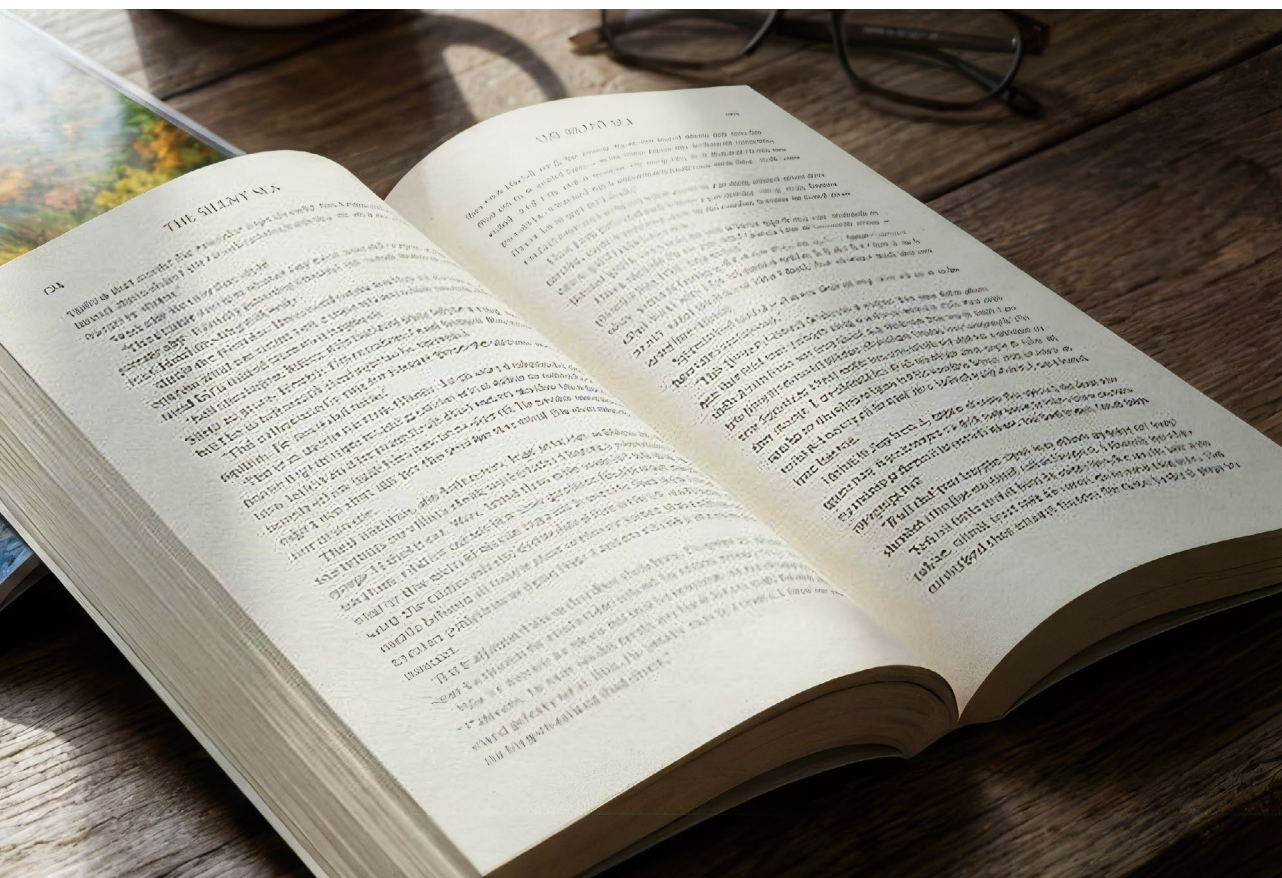




圖7 不同不透明度紙張的透光效果對比

從物理角度來看，不透明度與紙張內部的光散射能力有關，紙張中的纖維結構以及填料（如二氧化鈦）會增加光線在材料內部的散射，使光無法直接穿透，從而提升遮蔽效果。這也是為何某些高品質印刷紙會添加特定填料，以改善其不透明度表現。



從光學測量到應用：紙張選擇的科學

綜合上述各項光學特性，可以發現不同用途的紙張其實對應著不同的光學需求。辦公用影印紙通常強調高亮度，以提升文字對比；書籍內頁偏好低光澤與適中白度，以提供舒適閱讀體驗；藝術印刷則追求高白度與良好色彩還原；報紙則因成本與用途考量，通常在亮度與不透明度之間取得平衡。這些差異並非偶然，而是經過長期材料設計與光學調控的結果。紙張的顏色與質感，實際上是一種「設計選擇」，反映其功能與使用情境。



當我們再次拿起一張紙時，或許可以從不同角度重新理解它，那看似單純的白色，其實蘊含了亮度與白度的微妙平衡；表面的光澤，決定了影像的張力與閱讀的舒適；而不透明度，則默默影響著資訊的清晰傳遞。

紙張早已不只是被動的載體，而是一種融合光學、材料科學與人類感知的設計成果。透過理解這些光學特性，我們不僅能更精準地選擇適合的紙張，也能在日常生活中發現隱藏其中的科學之美。⦿

