《LED 量測標準探究系列(五)》

產品標準規範待拍板　LED 照明量測率先起跑

2008/7 吳登峻/梁瑋耘/莊柏年

目前全世界照明所耗損的電力約占總電力百分之二十，如何在照明達到環保節能的目標，是當今重要的議題。隨著發光二極體(LED)的亮度、發光效率(lm/W)不斷提升，且其具有高效率、長壽命、耐振動、體積小容易變化等優點，使得將 LED 運用於照明逐漸可行，近來全世界有越來越多的廠商投入 LED 照明產業，試圖替代現有傳統照明，預期應用 LED 的新照明革命將很快到臨。

照明用 LED 量測馬虎不得

LED 照明即是所謂的固態照明，其與傳統照明有極大不同。以光源特性而言，它具有點光源、高亮度、窄光束的輸出特性，而且機械特性及產品可靠度的考量也與傳統燈具產品不同。目前市面上所推出的 LED 照明燈具，如道路照明、戶外照明、室內照明等等，因 LED 的體積小、封裝形式不同，加上各類型的散熱機構設計，所產出的 LED 照明燈具形式五花八門，其中包括延續傳統燈具型態僅將燈源置換為 LED 光源的方式，以目前工研院量測中心接獲委託測試的燈具為例，有越來越多以傳統燈具為基礎置換光源的做法，如 E27、MR16、仿 20 瓦(W)日光燈管、輕鋼架用的 T5 燈等等。另外，市面上也有跳脫傳統燈具思維的新型設計 LED 燈具。

如何將 LED 燈具的產品特性作適當的呈現以及符合相關規範要求，以驗證市面上眾多廠家的產品優劣，供消費者及承包工程者作具體參考，選擇合適的燈具作最佳的利用，避免最終使用者對 LED 燈具產生誤解及認知上的差異，如宣稱 LED 節能效率高，但實際測試後之發光效率卻有可能比相對等的傳統燈具更差，因此進行 LED 燈具驗證測試相當重要。

探討 LED 照明光源特性量測技術

燈具其主要目的就是照明，因此燈具的光源特性就顯得特別重要。在此將重點放在 LED 燈具模組的光源特性測試，幾項重要項目分別說明如下：

- **光通量**

  光通量(Luminous Flux, lm)單位為流明(Lumen, lm)，是由一光源所發出並被人眼感知的所有輻射能，換句話說就是輻射通量經視效函數 V(λ)加權後的對應量，如圖 1 所示。輻射通量以輻射形式發射傳輸功率，單位為瓦。圖 2 則為光通量示意圖。

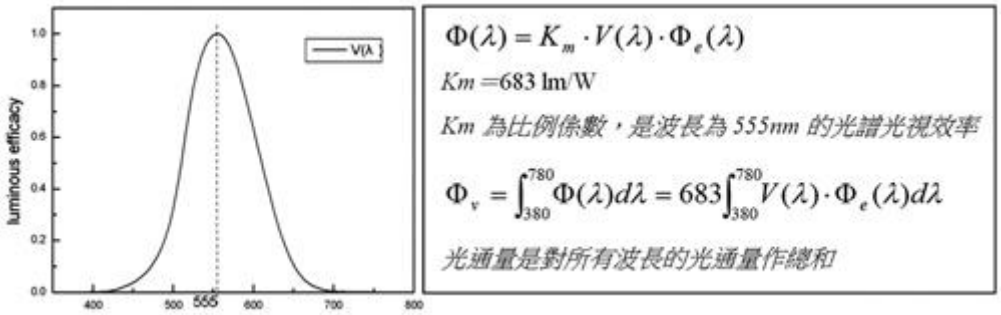
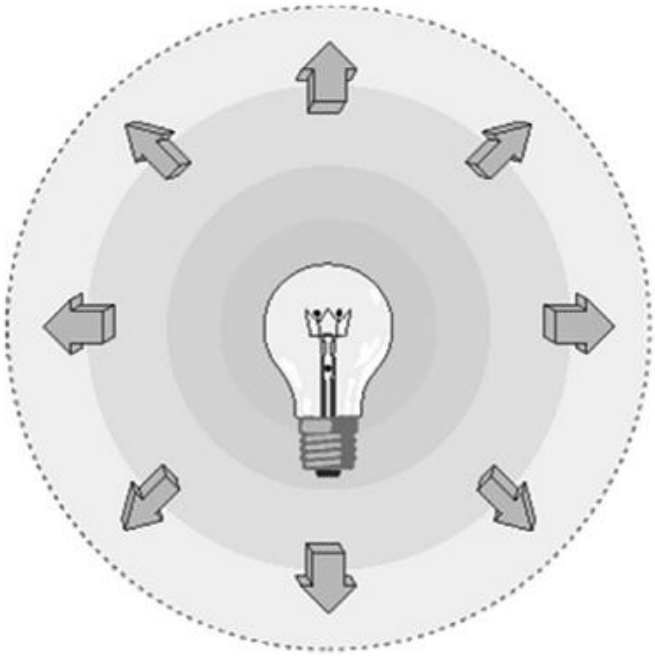


圖 1　右圖為視效函數 V(λ)



資料來源：Dr. Richard Young, Optronic Laboratories, Inc.

圖 2　光通量示意圖

量測光通量方式可分為積分球量測總光通量與配光曲線儀(Goniophotometer)量測光通量兩種。積分球量測總光通量的方式可以快速地量測出光源的總光通量。所需的設備有積分球、照度計、一個已知總光通量的標準燈，如圖 3 所示，將標準燈置於積分球的中心，光經過積分球內均勻漫反射塗層多次反射後，再經探測孔的照度計量取照度值。更換光源為待測光源重複量測動作，量測待測光源照度值，經由已知標準燈之總光通量作比對即可得知待測光源之總光通量。

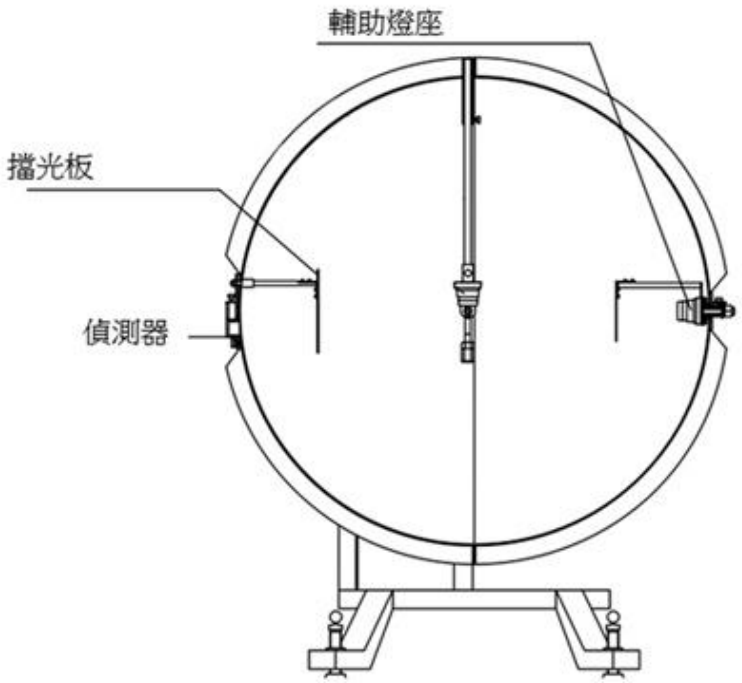


圖 3　積分球測試光通量示意圖

這種方式的確快速，但在實際執行上卻有所限制，當光源最大直徑大於 300 毫米時至少採用 2 公尺直徑的積分球，而當光源最大直徑小於 300 毫米時，積分球的直徑至少為光源最大直徑的六倍。以目前 LED 照明市場積極推出的道路照明來說，其燈具發光面積大，所需的積分球的直徑要求也就相對大，一般會將燈具以側面入光方式擺放(圖 4)。

圖 4　LED 燈具由積分球側面入光

另一方面，由於積分球量測的被測光源光通量是通過與標準燈比較而得，一般標準燈為白熾燈，光譜分布為連續光譜，與 LED 光源差別較大，若要以此法進行光通量測試，須

以近似待測光源光譜分布的 LED 燈源作為標準燈。除了標準燈光譜為量測不確定度的因素外，標準燈與待測光源的發光面尺寸、形狀、光束分布也都須進行評估，才能得到正確的量測值。

而配光曲線儀量測光通量是目前量測 LED 照明燈具光通量的最佳的方式。配光曲線儀是量測光源的光強度隨空間分布的設備，想像燈源放置在地球球心的位置，配光曲線儀的量測機制則為沿著經緯線量測各經緯度上的光強度值，如圖 5 所示。根據配光曲線儀量得的光強度資料可計算出光通量。

$$\Phi_{tot} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} I(\theta,\varphi)\sin\theta d\theta d\varphi$$

圖 5　配光曲線儀測試光通量示意圖

量測中心目前即是以配光曲線儀進行光通量測試，將被測光源或燈具懸置於配光曲線儀的旋轉中心，確保被測光源或燈具處於穩定狀態，更符合光源或燈具實際運用時裝置狀態。量測光源或燈具的距離(偵測器與待測物之光路距離)一般以不小於待測物發光面最大尺寸的十五倍，如此才可將待測光源或燈具視為點光源。以目前 LED 路燈而言，一般測試距離為 8～15 公尺。

圖 6　工研院量測中心之配光曲線儀

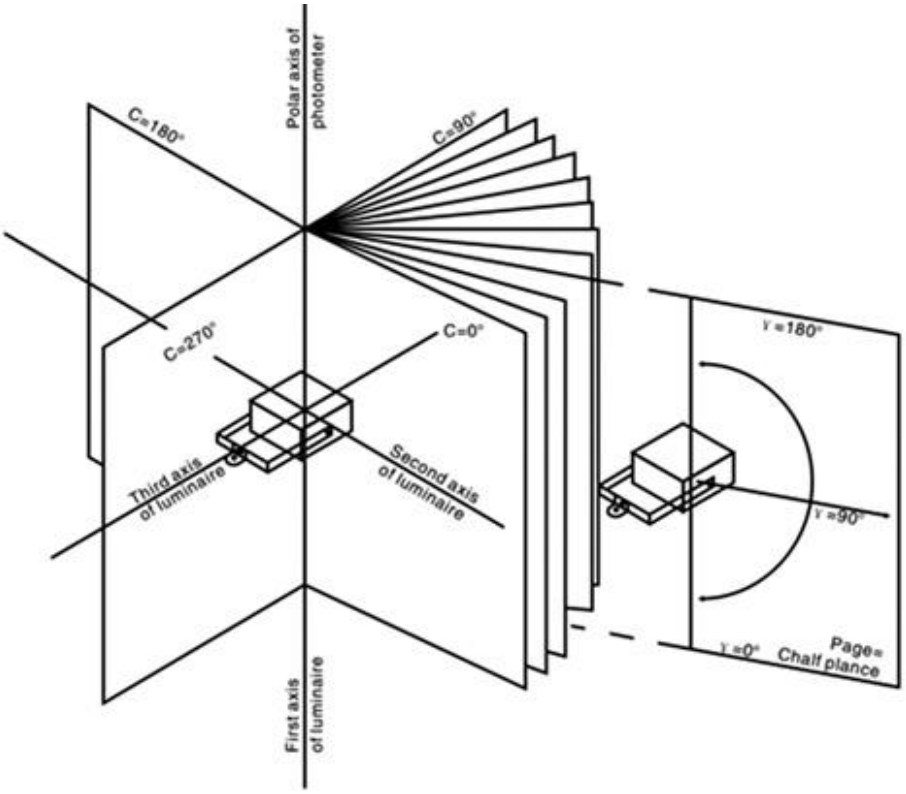


圖 8　C-γ 量測系統軸向示意圖

- 光強度

光強度(Luminous Intensity, Iv)是指光源在某一方向單位立體角中所發出的光通量大小，也就是說單位立體角內有多少流明發出(圖 9)。單位是燭光(cd)，可表示成：

$$Iv = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

其量測的方法是，一般以量測照度值再乘以距離平方即得光強度。實際測試需要照度偵測器，以及測距工具，如尺或雷射測距儀，使用此法測試距離必須夠長，將待測光源視為點光源。使用配光曲線儀即為以照度偵測器量測各位置照度值再乘上量測光路距離的平方(圖 10)。

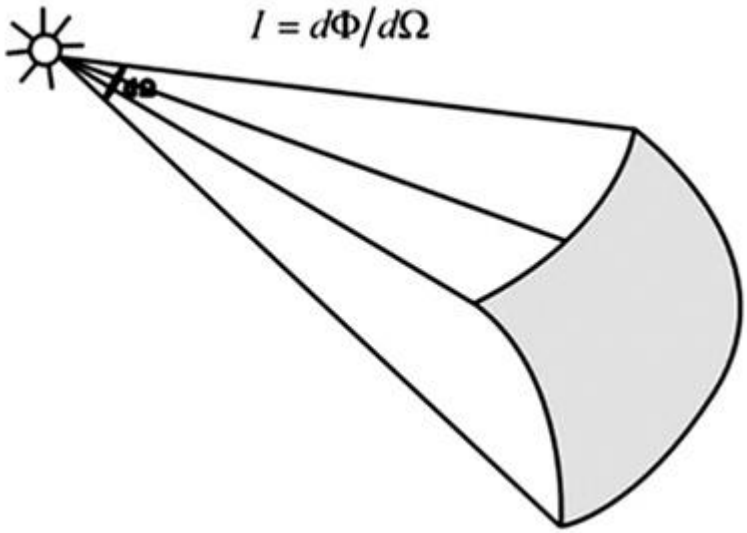


圖 9　光強度示意圖

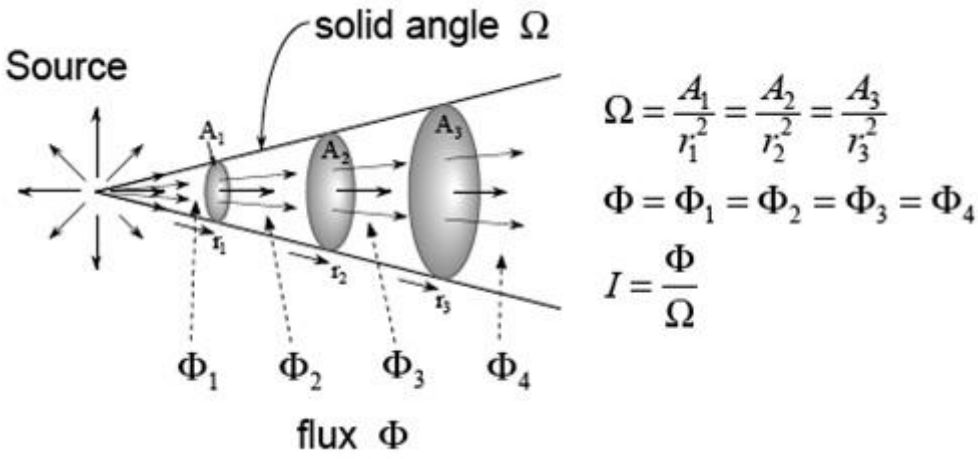


圖 10　圖中顯示固定立體角下，各距離的光強度均相同。

- **照度**

照度(Illuminance, Ev)是光通量與被照面面積的比值，1lx 的照度為 1lm 之光通量均勻分布在面積為 1 平方公尺的區域，單位為勒克斯(Lux, lx)，可表示為：

$$E_v = \frac{d\Phi}{dA}$$

對點光源來說，dΦ=IdΩ，因而照度為：

$$E_v = \frac{Id\Omega}{dA} = \frac{I\cos\alpha}{R^2}$$

量測的方法是，受照面的照度一般以照度計進行量測直接讀值。因以不同角度入射到受照面產生的實際照度符合照度的餘弦法則(E_0=E Cosα)，因此照度探測器前端一般已加白色餘弦修正器。

- **亮度**

亮度(Luminance, Lv)的基本概念是，一光源或一被照面的輝度為單位表面在某一方向的光強度密度，也就是被視物體在視線方向單位投影面積上的發光強度(圖 11)。單位為 cd/m^2，可表示為以下的公式。

$$Lv = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta} = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta}$$

公式中 dA 為被視物體的單位面積，ε 為單位面積法線與觀察方向間的夾角，dΩ 是單位面積在某一方向上所張的立體角元，$d^2\Phi$ 是單位面積在觀察方向的立體角元內的光通量，而 dI 是單位面積觀察方向的發光強度。

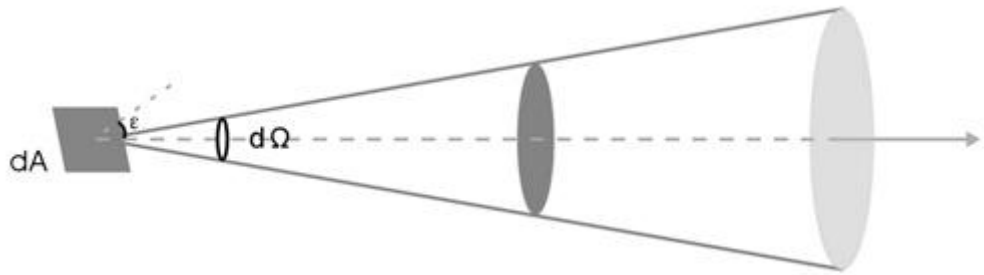


圖 11　亮度示意圖

其量測的方式是光源或被照面的亮度以亮度計直接進行量測(圖 12)。

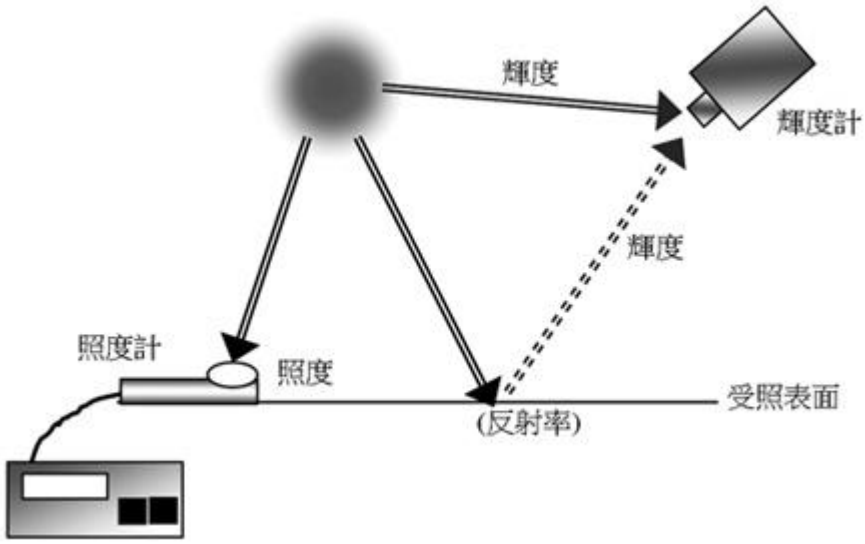


圖 12　亮度與照度量測試示意圖

- **顏色特性**

人眼對於顏色的感知是由可見光的輻射功率傳遞而來。1931 年，CIE 根據混色原理做了配色實驗，當時把人眼對光反應的情形量化，分別為感紅色、綠色和藍色細胞的反應量所得到三條反應曲線，稱為色匹配函數(Color Matching Function)，如圖 13 所示，並從光譜分布導出一套三刺激值，如下所述三個積分方程式定義：

$$\begin{cases} X = k\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y = k\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z = k\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

其中 X、Y、Z 是刺激值；S(λ)是刺激物的光譜功率分布；$\bar{x}$、$\bar{y}$、$\bar{z}$是國際公認的 CIE 1931 色匹配色函數。此外，由三刺激值可求出色座標，公式如下：

$$x = X/(X+Y+Z)$$

$$y = Y/(X+Y+Z)$$

顏色量測可分為兩種方式，一種是使用濾光片式偵測器，另一種為使用光譜儀進行光譜量測。使用濾光片式偵測器時，在光偵測器前加濾色片(一般有三個或四個濾色片)，讓色度偵測器的光譜靈敏度曲線與 CIE 1931 XYZ 三刺激值相匹配，色度量測的精確度與色度偵測器的匹配程度相關。因三刺激值中的與人眼視效函數一致，所以也可量測光源亮度。此種測試儀器一般稱為亮度計或輝度計，對準待測點直接讀取(x,y)。

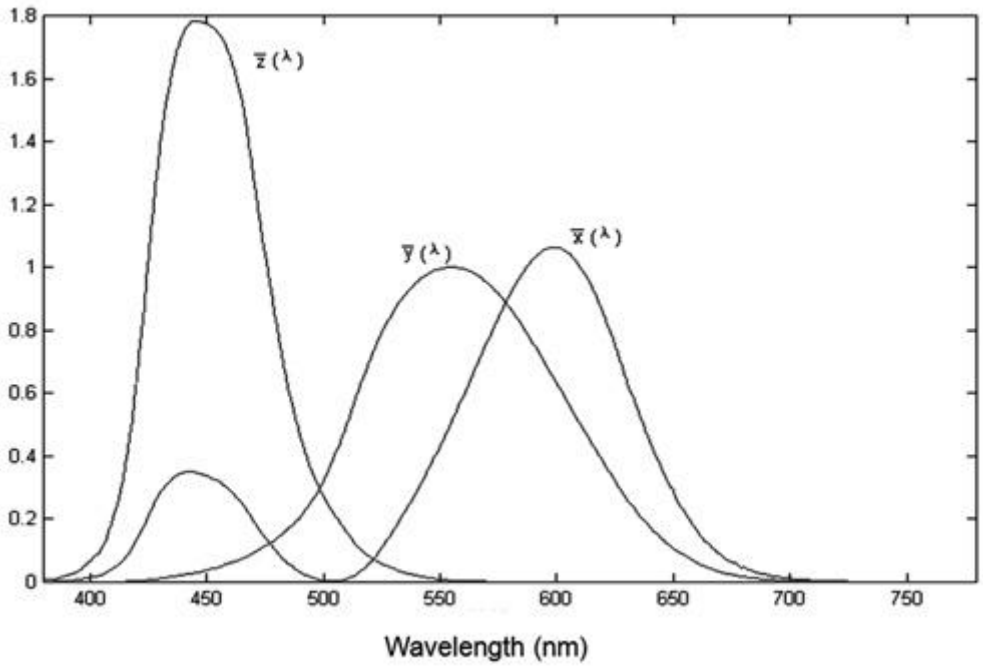


圖 13　CIE 1931 色匹配函數圖

分光光譜儀則利用分光光柵，量測被測光源的光譜分布，經 CIE 15.2 的色度理論推算被測光源的色座標□色溫、演色性。此種方□可較精確地評估顏色。目前 LED 燈具在量測時，可用白熾燈會將燈具置於積分球內，於積分球之偵測孔外接光譜儀進行光譜量測，可得知被測光源的平均顏色。

上述為五個基礎測試物理量，光源或燈具的光源特性依此五個量測量，可衍生出包括光效、配光曲線圖、照度分布圖、眩光指數(SLI)、色溫(Color Temperature)、演色性(Color Rendering Index, CRI)等六個常見的評估項目。其中，光效評估是將燈源的總光通量除以電源消耗功率即得光效，單位是 lm/W。配光曲線圖，亦即極座標光強度分布圖，是使用配光曲線儀，將光源於各空間分布的光強度大小量出以極座標方式呈現，即為配光曲線圖(圖 14)，一般單位是 cd；有時會將光源燈具的總光通量視作 1,000lm，呈現相對光強度分布，單位為 cd/klm。

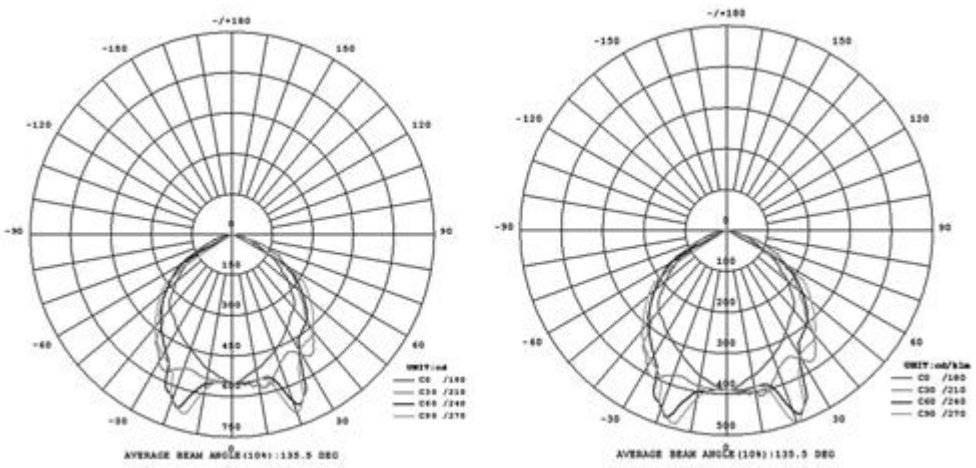


圖 14　配光曲線圖(右圖為相對配光曲線圖，單位為 cd/klm)

至於照度分布圖，則是透過軟體計算可將光源燈具距離一定高度下的照度分布求出，如圖 15 為距離燈具 10 公尺處的照度分布圖。一般透過配光曲線儀量得的數據，依規範定義(如 LM-63、CIE102 等)格式將數據轉換為.IES、.ldt、.cie 等檔案，套入軟體即可得出照度分布。以 LED 路燈而言，軟體可依路燈安裝的高度、安裝仰角、安裝間隔距離將路面照度分布狀態求出。

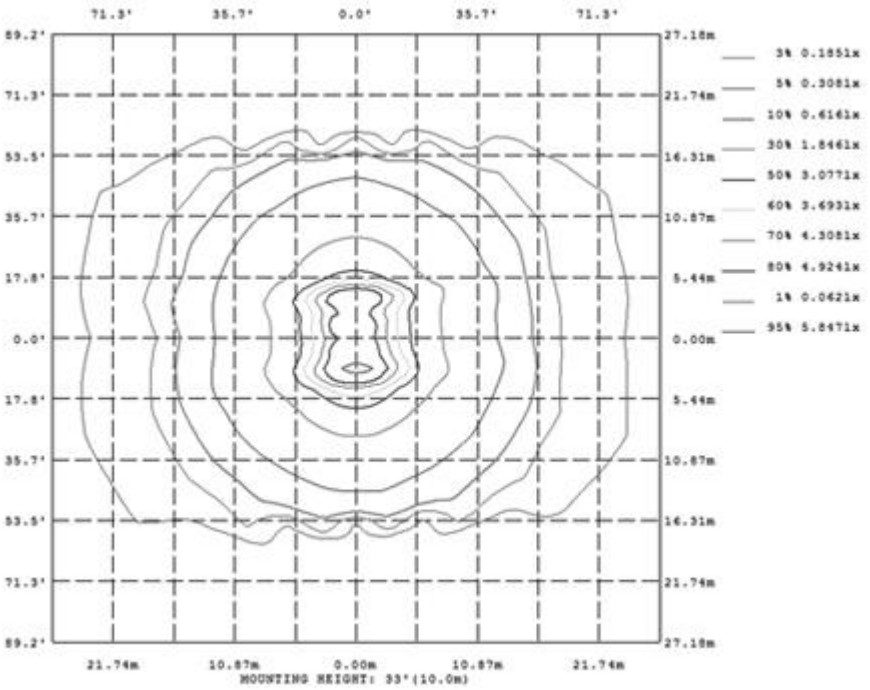


圖 15　等照度圖

眩光指數(SLI)則用於評估道路照明中的眩光。此眩光除涉及燈具外、還與燈具的布置安裝高度等有關，SLI 值為考慮單個燈具的不舒適眩光。計算公式如下：

$$SLI=13.84+3.31\lg I_{80}+1.3(\lg\frac{I_{80}}{I_{88}})0.5-0.08\lg\frac{I_{80}}{I_{88}}+1.29\lg F+C$$

I_{80}……C0-180平面, γ=80度的光強值

I_{88}……C0-180平面, γ =88度的光強值

F……76度閃亮面積(m^2)

C……色常數,與光源光譜有關

其中 76 度閃亮面積由成像亮度計(CCD)在 76 度角方向上量測的 LED 路燈的發光亮度分布直接計算。

而色溫的評估是當一發光光源的顏色與某一溫度下黑體輻射所呈現的顏色相同時，此黑體的溫度即定義為此發光光源的色溫，單位為 K(圖 16)。

圖 16　色溫示意圖

演色性評估項目的內容是，光源對於物體顯現其真實顏色的能力稱為演色性，即顯色指數。對於人造光源，演色性是一個很重要的色度參數，其表示物體在光源下的顏色與在太陽光下的顏色偏離程度(圖 17～18)。顯色指數 Ra 以 0～100 評估，Ra=100 時演色性最好，數值越小，演色性越差。一般室內照明會要求較高的演色性。

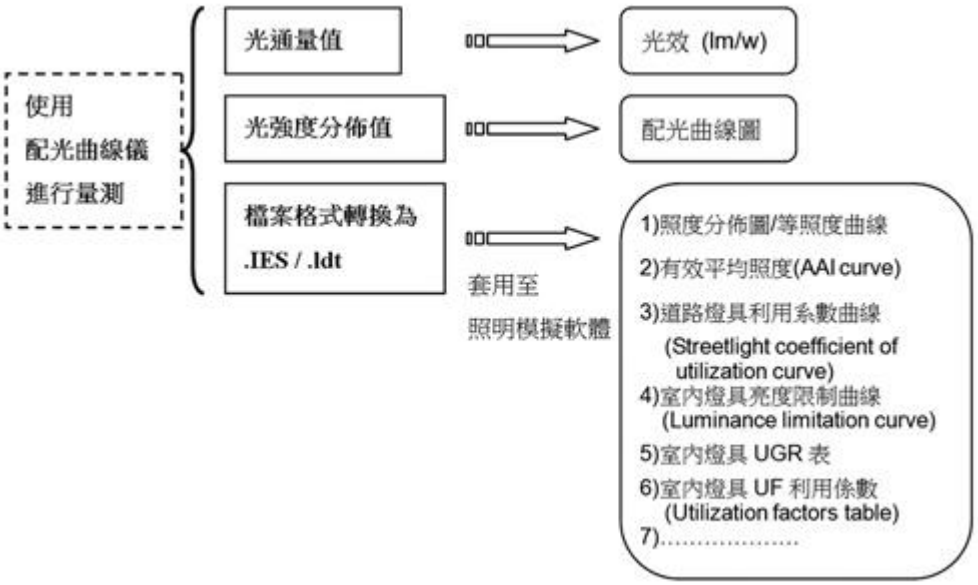


圖 17　配光曲線測試產出量測量示意

圖 18　光譜測試產出量測量示意

留意 LED 照明的其他特性量測

除上述光源特性的評估之外，其他常見的特性評估還包含基本電氣特性與溫升測試等等。基本電氣特性又細分成電壓/電流、功率、功率因數三項。功率指的是測試燈具的消耗功率；功率因數則由輸入試驗的電流值與電力值計算得出。這三項使用數位功率計就可以量測出結果。

溫升測試是用來評估 LED 照明燈具的溫度變化。測試方式是將被測 LED 照明燈具依其正常工作姿態放置於無氣流擾動的空間，將溫度探測器緊貼於測溫點(可設置多點)。一般會放置於外部散熱機構可能達到最高溫度的地方，並且必須避免光源直射溫度探測器。然後點亮燈具，記錄測溫點由點燈至達熱平衡的溫度變化。

除了基本電氣特性、溫升測試之外，其他還有電磁相容性能測試、LED 路燈所需要的防塵防水測試、壽命測試等。

審視 LED 照明燈具標準發展現況

近來隨著 LED 發光效率的提升，LED 照明產業也蓬勃發展，LED 照明產品由於具有明顯的溫

度依賴性、特殊的光譜分布及光譜組成多樣化、組成燈具之機構變化多、壽命長，與傳統光源有諸多不同處。傳統光源的相關法規標準行之已久，但對於 LED 照明燈具則無法全盤套用，假使標準規範未能合理地將 LED 照明產品定義清楚，將會影響 LED 照明產業的發展。

目前各國將制定 LED 光源照明標準視為重要且迫切的工作，國際組織也積極地著手 LED 光源標準的研究討論與制定，與 LED 密切相關的國際組織包括國際照明委員會(International Commission on Illumination, CIE)、國際電工委員會(International Electrotechnical Commission, IEC)、美國國家標準與技術中心(NIST)、北美照明協會(Illuminating Engineering Society of North America, IESNA)、日本照明學會(JIES)、日本照明委員會(JCIE)、日本照明器具工業會(JIL)、日本電球工業會(JEL)以及 UL(Underwriters Laboratories)。

其中 CIE 與 IEC 為兩大國際標準化組織，CIE 多數以技術報告形式發布，IEC 一般都以正式標準形式發布。CIE 有七個分部(Division)，目前負責 LED 研究的是第二分部-光和輻射量測(CIE D2-Measurement of Light and Radiation)，第二分部又可分為二十五個技術委員會(TC)及七個報告小組(Reportership)，針對照明量測的問題進行長期的研究討論。CIE 在 2007 年已經完成和正在制定的 LED 的標準、技術報告和研究報告見表 1。

表 1　CIE 的 LED 標準、技術報告與研究報告一覽

標準訂定機構	標準
CIE TC 2-45	"Measurement of LEDs" CIE 127-2007, Revision of CIE 127-1997.
CIE TC 2-46	CIE/ISO standard on LED intensity measurements.
CIE TC 2-50	Measurement of the optical properties of LED clusters and arrays.
CIE TC 2-58	Measurement of LED radiance and luminance.
CIE TC 2-62	Color rendering of white LED light soruces.
CIE R4-22	Use of LEDs in visual signaling.
CIE TC 6-55	Light Emitting Diode (photobiological safety).

CIE 組織於 1997 年發表的 CIE 127 標準，為國際最早制定的 LED 量測標準，其中針對單顆 LED 的光度量測作定義廣為 LED 業者採用。至於，在 IEC 中對應 LED 照明研究的是 TC-34，相關的 LED 標準如表 2 所示。

表 2　IEC TC-34 與 LED 標準關聯對應表

標準訂定機構	標準
IEC TC-34	IEC 60838-2-2: Miscellaneous Lampholders - Part 2-2: Particular requirements - Connectors for LED Modules.

IEC TC-34	IEC 61347-2-13: Lamp controlgear - Part 2-13: Particular requirements for d.c. or a.c.supplied electronic controlgears for LED modules.
IEC TC-34	IEC 62031 LED modules for general lighting - Safety specifications.
IEC TC-34	IEC 62384: Performance of controlgear for LED modules d.c. or a.c. supplied electronic controlgears for LED modules - Performance requirements.
IEC	IEC 60825-1 Safety of laser products
CIE IEC	CEI IEC 62471 Photobiological safety of lamps and lamp systems

當 LED 功率不斷增強以及多晶片的 LED 陣列應用於照明時，LED 照明對人眼的傷害問題就需要被重視。提到 LED 對人眼的傷害，較主要的規範應為 IEC 60825-1，規範為定義雷射產品的安全，文中並提到將 LED 也被視為雷射的一種；另一重要規範則是 IEC 62471，規範中定義評估燈具和燈具系統(包含 LED 燈具)光輻射對生物的傷害，包含曝照限制、評估量測方式以及風險分級。

另外，日本聯合日本國內的日本照明學會、日本照明委員會、日本照明器具工業會與日本電球工業會四個 LED 研究組織制定一套照明用白光 LED 量測標準，於 2004 年底發布所謂的「四團體共同規格—照明用白色 LED 測光方法通則」，成為 JIS 日本工業規範(表 3)。

表 3　四團體共同規格－照明用白色 LED 測光方法通則

標準訂定機構	標準
JIES	JIES 009
JCIE	JCIE S001
JIL	JIL 9003
JEL	JEL 311

美國能源部門(DOE)為積極推動 LED 照明，集合相關照明產業標準機構，如 NEMA、IESNA、ALA 等將固態照明(SSL)的燈具設備納入能源之星(Energy Star)計畫，並於 2007 年 9 月發布「能源之星固態照明要求規範」第一版(表 4)。

表 4　美國能源之星「固態照明要求」對應的相關規範

Reference Standards and Test Procedures		
Organization	Identifier	Description
ANSI	*ANSI C82.XXX*	*Electronic Drivers for LED Devices, arrays, or systems (In development).*
ANSI	*ANSI C78.377A*	*Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products (In development).*
ANSI	ANSI C82.77 - 2002	Harmonic Emission Limits – Related Power Quality Requirements for Lighting
ANSI	ANSI/IEEE C62.41 - 1991	Recommended Practice for Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits
ANSI/UL	ANSI/UL 153 - 2005	Portable Electric Luminaires
ASTM	ASTM E 283 - 2004	Restricted air movement
CIE	CIE Pub. No. 13.3 - 1995	Method of Measuring and Specifying Color Rendering of Light Sources
FCC	FCC 47 CFR	Electromagnetic interference
IESNA	IESNA LM-16	Correlated Color Temperature
IESNA	IESNA LM-58	Color Rendering Index and Correlated Color Temperature
IESNA	*IESNA LM-79*	*Approved Method for the Electrical and Photometric Testing of Solid-State Lighting Devices (In Development)*
IESNA	*IESNA LM-80*	*Lumen Depreciation of LED Light Sources (In Development)*
NFPA	NFPA 70 - 2005	National Electric Code
UL	UL 1012 - 2005	Power Units Other Than Class 2
UL	UL 1310 - 2005	Class 2 Power Units
UL	UL 1598 - 2004	Luminaires
UL	UL 1838 - 2002	Low Voltage Landscape Lighting Systems
UL	UL 1994 - 2005	Luminous Egress Path Marking Systems

美國檢測公司優力(UL)對於傳統光源的安全評估標準已有相關法規並執行已久，近年來 UL 一直探索 LED 照明方面的安全標準，找尋與並傳統光源的差異項，於已存在之傳統光源的安全規範增加 LED 安全要求或須另行提出規範。目前，UL 提出相關 LED 照明安全規範，如表 5 所示，表中並將傳統光源的安全規範一併列入供參考。

表 5　UL 提出的相關 LED 照明安全規範

標準編號		標準名稱	適用範圍
傳統光源	**UL 153**	Portable Electric Luminaries	移動式燈具
	UL 48	Electric Signs	電子招牌
	UL 588	Seasonal and Holiday Decorative Products	季節性裝飾產品
	UL 1838	Low Voltage Landscape Lighting Systems	低電壓景觀照明系統
	UL 2108	Low Voltage Lighting Systems	低電壓照明系統
	UL 2388	Flexible Lighting Products	可撓式燈具
	UL 1786	Nightlights	小夜燈
	UL 1993	Self-Ballasted Lamps and Lamp Adapters	自整流燈及其燈座
	UL 879A	Outline of Investigation for LED Kits	LED 器具概述
UL 1598		Luminaries	燈具
UL 8750		Outline of Investigation for LED Light Sources for Use in Lighting Products	LED 燈具概述 (安規標準)

建立量測技術與系統為當務之急

LED 照明將逐漸取代傳統照明，在全世界各國及國際組織積極研究與制定 LED 照明標準下，將於近年內提出適當且完整的 LED 產品標準與特性量測規範。像 LED 照明這樣新穎的產品有了法規定義規範之後，將會讓生產供應商與消費者擁有共同的語言，而國內建立 LED 照明量測技術與系統，對產品進行驗證與把關，將可確保消費者的利益，並有助於 LED 照明產業的良性競爭與發展。

(本文作者皆任職於工業技術研究院量測技術發展中心計量驗證與創新應用組)