

16. 多通道發光二極體調光控制系統

吳嘉哲¹、陳嘉忠²、沈峰棋³

¹國立中興大學 機械工程系助理教授

²宇盛電子有限公司 產品經理

³宇盛電子有限公司 研發經理

摘要

許多專業領域常有特殊燈光調控的需求。以專業攝影為例，除了要求燈光所呈現的色溫用來模擬各種情境下的光線照明以外，還要求較高的演色性(color rendering index)以增加顏色的層次感。為了達到上述的要求，專業攝影需要精確的燈光調控技術。傳統之調變色溫的方法大都是透過色溫轉換濾光片，將光線調整成所需要的色溫。然而此法雖然簡單，但如果使用於多種色彩變化的系統就必須準備大量不同的色溫轉換濾光片。也因此使用色溫轉換濾光片於如專業攝影的特殊燈光調控系統就比較不方便。

發光二極體是21世紀的新型光源，其優點為效率高、壽命長和不易破損等。在發光二極體施加正向電壓時，發光二極體能發出單色、不連續的光，改變所採用的半導體材料的化學組成成分，可使發光二極體發出在近紫外線、可見光或紅外線的光。目前發光二極體(LED)的製程技術已臻成熟，本研究將匹配和混和不同波長強度的LED光源來合成個別光源的明暗和色溫，藉此來得到所需要的顏色。此方法可以多變化的調整所需要的色溫，非常適合於多種色溫系統甚至是全彩高演色性燈光系統的應用。本研究的目標為提出多通道LED調光法，係利用定電流PWM(Pulse Width Modulation)調光驅動電路來控制不同光源的亮度以達到所需的色溫和演色性。以此方法可以有效且精確的控制光線的亮度值及色溫。

關鍵字：發光二極體、調光系統、色溫、演色性

一、前言

十幾年前全球LED照明產業，原本受限於LED價格較高、產業標準未定、與光形、壽命、可靠度等技術問題，一直沒有長足的進展。然而近幾年來，因地球資源銳減，節能減碳的呼聲大起，LED照明逐漸受到重視。相較於其他照明設備，LED具備體積小、堅固耐震、顏色多樣化且純度佳、省電、發熱少、點燈速度快和壽命長等優點[1]。LED也配合近代輕薄短小之應用需求，已成為日常生活中不可缺少的光電元件。未來若能提升其發光效率和降低價格，有機會完全取代

傳統照明設備。2007年LED照明市場規模僅3.3億美元。主要來源為建築內部照明應用，市場規模達1.5億美元，佔整體LED照明市場約45%左右。前瞻未來，隨著LED技術不斷提昇及廣泛應用領域，預計至2012年市場規模將達16億美元，2007-2012年複合成長率達37%，且由於綠色環保及高亮度LED技術的提升，整體市場規模將以相當快的速度成長。LED照明是一種跨領域整合的科技，除了電子業熟悉的半導體LED製造、驅動IC設計外，每個階段還要有光學設計的知識與能力（LED磊晶階段、燈泡封製階段與燈具設計階段），另外還得懂得造型、散熱等機械問題，所以在研究上還有很多整合發揮的空間。

發展LED色溫調變系統則可大幅的增加LED照明的應用面，將可以用在特殊的場合下。舉例來說，LED色溫調變系統可以用於專業攝影中。在專業攝影中，光線照明除了要求燈光所呈現的色溫以外，同時還要求較高的演色性。表1為專業攝影中常見的色溫表，不同凱式溫度下，光源將呈現不同的顏色。例如凱式溫度為11000°K時，光源將呈現深藍色；凱式溫度為1900°K時，光源將呈現黃紅色。另外為了增加色彩飽和度，燈光調控系統還需要達到高演色性的需求。LED色溫調變亦可應用於車燈照明，一般來說車燈色溫約在5000K左右。然而在雨天或者是濃霧情況下，色溫在4300K(黃光)穿透性較高。另外許多汽車車主要求色溫可達6600K，以突顯自己車燈的與眾不同。未來如果要將LED燈應用於汽車車燈上，且要兼顧穿透性及車主個性等需求時，只有發展可調變色溫LED系統。LED色溫調變也可應用於溫室照明中，在植物培養上，需要可調色溫的光源照明來模擬一天太陽光色溫的變化。LED色溫調變也可以應用光度、照度、及輻射的量測上。舉例來說，可調式光源可以用來校正色度儀。校正色度儀需要參考光源，且此參考光源的光譜分佈須相似於已通過標準測試的光譜分佈。目前用來校正色度儀的光源大部分使用寬頻帶光源，如白熾燈泡或是氙氣燈(Xe-arc source)。而這些光源只擁有固定的光譜分佈，並不太適用於全域的光譜量測中。而可調式光源可以組合出多種不同色溫的光源，比較適合用來校正光譜儀。可調式光源也可以應用不同照明條件下材料性質的量測方面，例如材料的吸收光譜分析和材料的折射、反射率量測。

表1:常用色溫表

顏色	凱氏溫度	對應光源
深藍	11000°K	藍天
淡藍	5000~8000°K	陰天
淡綠	6000~7000°K	日光燈
白色	5400°K	平均中午日光
淡黃	4500°K	日出後日落前1hr
黃色	3400°K	攝影棚燈
深黃	3200°K	鎢絲燈
橘黃	3000°K	黃昏
黃紅	1900°K	燭光

早期可調色溫照明大多加裝色溫轉換濾光片，隨著LED的應用普及。美國的ZyLight於2006年發表Z50 Intelligent LED light 30W攝影燈具，可輸出3200K及5600K準確色溫，也可小範圍調變其他色溫，當年此款Z50並獲得Live Design Magazine 評為年度最佳產品。於2007又發表了Z90的30W攝影燈具，可調變範圍為2500K~9000K，此款燈具也贏得了包含2007年美國廣電展(NAB)等許多獎項。台灣廠商五更科技於2009發表S-10攝影機小瓦數頭燈，其有五段色溫調變功能。Wall[2]等人使用一組傳統白光通過所設計的光柵來產生不同單色光，再經由不同的濾光片來組合出不同光譜分佈光源。Schan-da[3][4][5]等人量測各種LED的光學特性並進一步訂定LED之光學標準作為標準光源。許[6]將數個不同光譜分佈的LED 放入一積分球裝置中，藉由輸入不同的驅動電流來改變各種LED 的光強度，使得不同強度和波長的LED 光源經積分球均勻混合後，即可調整出由紅光變化到藍光。Brown 等人[7]利用四十顆理想且不同光譜分佈的LED，模擬混合出CIE 標準光。然而控制多顆LED 作為光源時，相關的電路設計極為複雜。Chhajer[8]等人討論使用多顆LED 排列組合出的光源會使得熱對LED 光學特性的影響，在製作及運用上的困難度。

現今LED在混色領域上已有少數產品出現，其優點為靈活多變化。然而目前市場上的混色系統大多以小瓦數LED為主，主要應用為氣照明用，而對於色溫的控制並不需要相當精確。也因此市面上常見的小瓦數LED調色溫系統並不適用於特殊調光狀況如專業攝影的照明。如果要將LED照明應用於專業攝影領域中，除了要能準確的調控LED照明所呈現的色溫和演色性以外，還必須利用大瓦數LED以增加光線的強度。

白光LED照明在現行LED市場中則是另一個重要的發展，從數瓦的MR16到數百瓦的路燈，各家廠商無不投入大量的人力進行開發，目前燈具廠商的

研究重心為散熱模組。另一個可能的研發趨勢則在高演色性的LED調光及色溫調變技術上。如果能發展此技術，LED照明在市場應用面及需求度將越來越高。最常見的LED照明出現在LCD背光模組。一般而言，小型的LCD顯示螢幕背光照明都是使用白光LED。常用的白光LED是在藍光LED內加入一層黃色磷光劑，此種調光方法雖然可以調整出類似白光的光源，但在光譜上其實是具有藍色和黃色波峰的光線。圖1為典型白光LED與RGB LED光譜的比較。

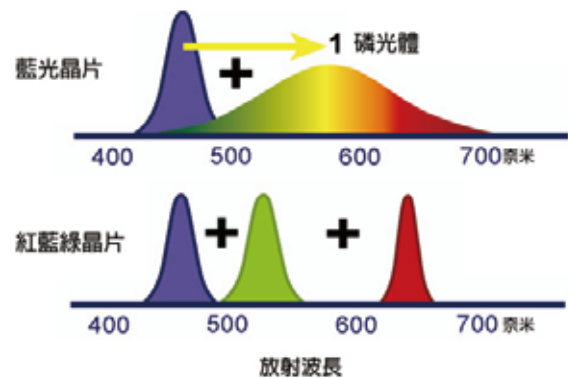


圖1 白光LED與RGB LED光譜的比較

利用R、G、B 三原色LED來調光則是目前LCD顯示器國際大廠在發展高演色性光源的作法。其多半取下彩色濾光片，以R、G、B 三原色LED來進行色溫調整控制，利用驅動器更正紅、綠和藍三個主色的亮度來達到所需要的色溫。此方法的問題有兩個主要的問題，第一：三原色LED在任何操作溫度都能維持相同的光強度。第二：三原色LED光所能涵蓋的光源波段是有限的(如圖一)，利用三原色所混合出來的某些波長的光源，其強度不足。相較於利用R、G、B 三原色調光控制，本研究提出利用多色混光技術，來發展無段式、大範圍波長調光系統。多色光源包含R、G、B、白光、cyan、amber LED。此方法可用於大瓦數(30W~100W)燈具，技術上可與國外先進產品一別苗頭，極具市場競爭力。

二、研究方法

1976 年CIE 推薦了新的顏色空間及其有關色差公式，即CIE Lab 系統，現在已成為世界各國正式採納、作為國際通用的測色標準。它適用於一切光源色或物體色的表示與計算。

CIE Lab空間由CIE XYZ系統通過數學方法轉換得到，轉換公式為：

$$L = 116(Y/Y_0) - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500 \left[\left(X/X_0 \right)^{1/3} - \left(Y/Y_0 \right)^{1/3} \right], Y/Y_0 > 0.01 \quad (2)$$

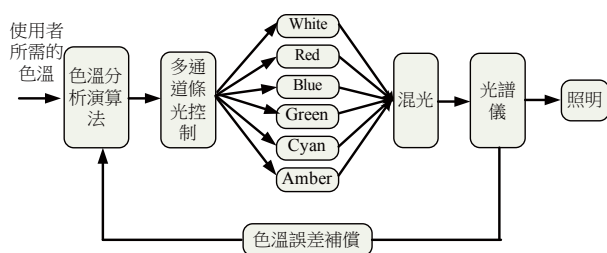
$$b^* = 200 \left[\left(Y/Y_0 \right)^{1/3} - \left(Z/Z_P \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

其中 X 、 Y 、 Z 是物體的三刺激值； X_0 、 Y_0 、 Z_0 為 CIE 標準照明體的三刺激值； L^* 表示心理明度； a^* 、 b^* 為心理色度。三個基本坐標表示顏色的亮度，舉例來說 $L^* = 0$ 表示黑色而 $L^* = 100$ 表示白色。 a^* 為負值表示綠色，而 a^* 為正值表示品紅色。 b^* 為負值表示藍色，而 b^* 正值表示為黃色。利用已經建立的 $L^*a^*b^*$ 色彩模型將所有顏色量化，以供本研究發展的調光控制系統使用。

2.1 系統介紹

本系統採精準的多通道恆流 PWM 調光方式，圖二為本計畫的所欲發展之多通道調光系統。使用者首先會告知所需色溫，經由本計畫所欲發展的色溫分析演算法送出訊號給多通道調光控制器。控制器此使利用不同的 PWM 訊號驅動 R、G、B、Amber、Cyan 等顏色的 LED 光源進行混光。利用色彩感測器偵測所混和光源的色溫並比對使用者所需的色溫，如果色溫不同將修正 PWM 訊號重新進行混光，直到色溫符合使用者需求。

多通道調光控制器需要搭配一顆 DSP 及其韌體來完成，其 PWM 與亮度相關參數設定需要一套複雜的演算法來完成，採用多通道 PWM 調光技術針對 LED 做亮度控制，再經由混色機構將顏色均勻的混合，如此可完成範圍非常廣的色溫調光系統。調光方法將於下一節介紹。



圖二 多通道調光系統

2.2 類比調光

以下說明 LED 常用之調光方法，類比及數位調光。類比調光為改變輸入電流，當改變的輸入電流比例直接地影響 LED 的亮度。此方法為常用的調光法，但卻有以下的缺點。第一：系統必須能精準的控制電流量。這樣的方式如果不能精確的操控電流

量的話，將使得 LED 難以達到所預期的亮度。但是如果能夠精確的讓 LED 產生期望亮度的話，就需要相當複雜的電路設計。第二：設計成本較高。在大電流和高功率 LED 系統中，為了精確的控制電流量將大幅的增加設計的困難度和系統的成本。第三：不同電流大小下會使 LED 都產生不同的亮度，然而在不同亮度下，LED 產生的波長會有飄移的現象。所產生的光線就會有不同的效果，此方法不適用於高度要求色溫精準度的場合。

2.3 數位調光-脈衝寬度調變(PWM)調光

本研究採用數位調光法，係利用 PWM 技術。PWM 調光技術將提供固定的電流給 LED，但可以增減電壓負載週期 (duty cycle)，進而達成調光的要求。由於電流大小固定，LED 產生的波長大小會固定。如果要將亮度減半，只需控制負載週期就可以。例如利用 50% 的負載週期將可以將 LED 的亮度降低一半。PWM 訊號頻率通常會超過 100Hz，確保所產生的 LED 光線不會被眼睛察覺，而 PWM 頻率的最高值需視電源供應和反應時間而定。

2.4 LED 驅動電路設計/色溫調變韌體設計

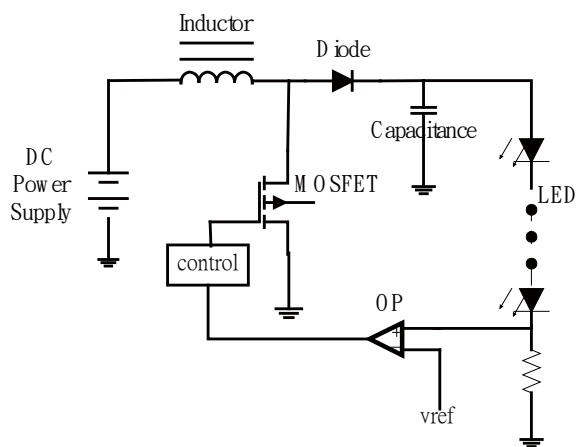
LED 的強度正比於通過 LED 的順向電流。本研究利用恆定電流源來驅動 LED 驅動方式，此方法可以提供穩定波長的 LED 光線。恆定電流能避免 LED 順向電壓的改變而造成電流的變動。使用可控制的固定恆定電流，就能提供可控制的穩定顯示亮度。另一個設計的考量為 LED 串聯或並聯模式。LED 的應用通常需要同步驅動多顆 LED，若設計人員可以很有彈性的驅動多顆 LED，他們應將所有 LED 串聯，確保每顆 LED 的電流都相同。然而此時控制電路需要提供足夠的電壓才能進行串聯控制。當控制電路僅能提供有限的電壓值時，可以利用並聯方式推動 LED。此時每顆 LED 都必須串聯一顆限流電阻，以避免通過的電流出現差異，但是這些電阻卻也會消耗電力造成電池使用時間縮短。

專為驅動 LED 而設計的控制電路可以提供固定電流，常見有電荷泵浦式和電感式，這兩種控制電路各有其優缺點。電荷泵浦式控制電路或稱為交換式電容控制電路，利用大量的電容將輸入電源儲存起來。接著此控制電路就可以利用電容放電供應恆定的電壓源，此方法相當簡單也不需使用任何電感，是相當受歡迎的控制電路設計。電荷泵浦電源供應的體積很小，設計也很簡單，選擇零件時只需根據元件規格表中挑選合適的電容。絕大多數以電荷泵浦控制電路都能達到 60% 至 85% 的轉換效率。更新型的電荷泵浦控制還提供分數轉換模式 (fractional

conversion mode) · 能在輸入電壓改變時自動切換到最有效率的轉換模式。電荷泵浦控制電路的主要缺點為該電路只能提供有限的輸出電壓範圍。絕大多數電荷泵浦控制電路的轉換比最多只能達到輸入電壓的兩倍 · 這表示輸出電壓不可能高於輸入電壓的兩倍 · 因此若想利用電荷泵浦控制電路驅動一顆以上的LED · 就必須採用並聯驅動的方式。當驅動多顆LED時 · 必須使用限流電阻來防止電流分配不平均 · 但此電阻也會消耗功率因而減少電池的使用時間。

電感式恆定電壓控制電路則如圖三所示 · 運算放大器可以使電壓回授 · 讓右下方的電阻兩端的電壓恆定 · 此方法可以使通過LED的電流恆定。採用電感的交換式轉換器元件除了包含控制電路外 · 至少還會內建一個開關電晶體 · 電感式恆定電壓控制電路的輸出電流範圍都大於電荷泵浦轉換器。控制器至少會使用一個電感做為電能儲存元件 · 控制器也需要輸出電容器；相較於線性穩壓器和無電感的交換式轉換器 · 交換式轉換器能提供更具寬的負載範圍和具更高效率。

直接針對電流感測電阻的兩端電壓進行穩壓 · 此時通過LED的電流是由電源供應的參考電壓值和電流感測電阻值來決定。電感式控制電路的體積非常小 · 效率很高 · 適合為絕大多數消費性產品提供更長的電池使用時間。由於大多數電感式解決方案都是採用升壓轉換器 · 它們最多能驅動六顆或七顆串聯的LED。電感式控制電路有以下的優點。第一：許多顯示器內建的LED都採用串聯模式 · 因此電感式可以提供足夠的功率。第二；驅動五顆並聯的LED共需使用連接器的六隻接腳 · 驅動串聯在一起的五顆LED只需要兩隻接腳。如此可以大大的降低控制電路的複雜度。



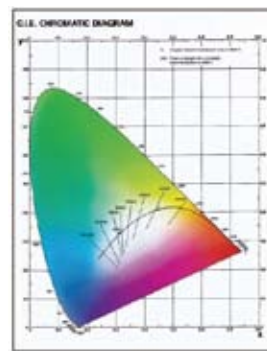
圖三 電感式恆定電流源

2.5 相關電子零件的選用

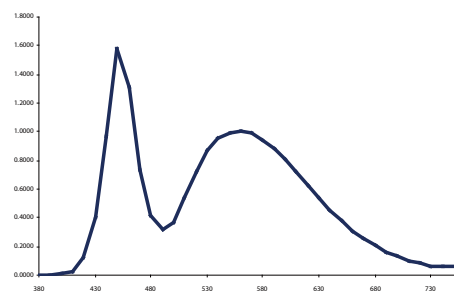
選擇適當的電感不僅能確保設計所需要的效率 · 也能配合有限的電路板面積。電感的選擇必需考慮三項參數：電感值、飽和電流和線圈阻抗 (DCR)。如同所有的交換式轉換器 · 選擇電感就是在效率和電路板面積間做出取捨 · 較大的電感值提供更小的阻抗、更高的效率和更大的飽和電流額定值。較小的電感則使用較少的電路板面積 · 飽和電流額定值也較小 · 但線圈阻抗卻比較大 · 因此整體效率較低。選擇適合的輸入電容可幫助穩定電源供應器的輸入電源阻抗 · 這在電池供電型系統中極為重要 · 因為在電源供應的開關頻率下 · 所有電池都會有很高的阻抗。若沒有輸入電容 · 交換式電源供應器以脈衝形式自輸入端汲取電流時 · 就會在輸入電源線路上產生很大的電壓漣波 · 進而衝擊到系統的其餘部份。輸出電容用於交換式升壓轉換器會直接影響輸出漣波電壓 · 但輸出電壓對於LED驅動電路並不重要 · 因此這個設計可以使用低輸出電容。電源供應的逆向電壓保護二極體很容易選擇 · 它需要和電感相同的峰值電流額定值 · 逆向電壓額定值必須大於LED兩端的電壓。

2.6 光譜儀器量測校正檢驗

攝影照明領域對色溫 and 顯色性非常注重。即使照明的色溫相同 · 也可能因為其發出光線光譜組成不同而有很大的演色性表現的差異。因此測量光譜、色溫及亮度等數值 · 需要專業量測儀器來測量。



圖四 CIE色度圖



圖五 White LED光譜圖

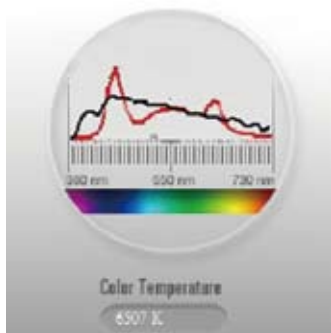
本研究量測色溫調變後的色度圖分佈如圖四和光譜分佈圖如圖5。依White LED本身波長限制，測量出光譜分佈再比對系統設定光源資料庫，並算出其誤差，以回授方式來調整其他LED光譜分佈以驗證其調變準確度。再者針對專業照明還需檢驗色彩演色性所以本系統會針對設定光源進行最佳化補償，以其對常用幾種光源(CIE標準照明體A, B, C, D50, D65光源)進行模擬，期望能達到演色性85以上的水準，以符合專業照明領域的要求。

三、實驗結果

圖六為本研究所建置的多通道調光系統。實驗將量測多通道調光系統所混和出來的光線的色度座標、預估圖和實際量測圖。圖七為利用多通道調光系統所混和出的D65光源和標準D65光源的光譜比較圖。實驗結果以光譜圖來表示。圖中為黑線為D65標準光源，紅線為白光及其它頻譜LED所混光而得的光源，雖然成功混合出色溫為6507K的光源，但從光譜中可看出2個波段有明顯凹陷，第一處出現在400nm，由於人眼對於400nm波段敏感度較低，因此這個波段較不重要；第二處出現在500nm到600nm有些許誤差。此混合光源色溫6507K，雖然色溫接近D65色溫6504K，但此處誤差對演色性會有一定的影響。然而相較於其他廠商所發展的調光技術，本研究提出的調光系統已經相當接近使用者所需要的光源。未來可以增加500-600nm波段的LED燈具於系統之中，即可補足此波段的誤差。



圖六 多通道調光系統



圖七 利用多通道調光系統所混和出的D65光源和標準D65光源的光譜比較圖

四、結論

本研究提出多通道LED調光法，係利用定電流PWM(Pulse Width Modulation)調光驅動電路來控制不同光源的亮度以達到所需的色溫和演色性。以此方法可以有效且精確的控制光線的亮度值及色溫。本研究發展的調光系統成功的混合出接近D65的標準光源，雖然其在500nm到600nm波段會有些許誤差。然而相較於其他廠商所發展的調光技術，本研究提出的調光系統已經相當接近使用者所需要的光源。

參考文獻

1. K. Muray, B. Kranicz, Y. Ohno, and J. Schanda, "Comparison Measurements of LEDs: Spectral power distribution," Proc. CIE 2nd Expert Symposium on LED Measurements, Gaithersburg, MD, pp. 52-55, 2001
2. C. F. Wall, A. R. Hanson, and J. A. F. Taylor, "Construction of a Programmable Light Source for Use as a Display Calibration Artefact," Proc. SPIE, 4295, pp.259-266, 2001
3. J. Schanda, G. Schanda, and K. Muray, "Light emitting diode standards," Proc. CIE 2nd Expert Symposium on LED Measurements, Gaithersburg, MD, pp. 24-27, 2001
4. C. C. Miller and Y. Ohno, "Luminous intensity measurements of Light Emitting Diodes at NIST," Proc. CIE 2nd Expert Symposium on LED Measurements, Gaithersburg, MD (2001) pp. 28-32.
5. [5] C. C. Miller and Y. Ohno, "Total luminous flux calibrations of LEDs at NIST," Proc. Compound Semiconductor Manufacturing Exposition, Boston, MA, July, 2001.
6. 許梓恂，「發光二極體照明系統之色彩特性優化設計」，國立中央大學光電科學研究所，碩士論文，民國九十四年六月。
7. S. W. Brown, C. Santana, and G. P. Eppeldauer, "Development of a Tunable LED-Based Colorimetric Source," Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 107, pp. 363-371, 2002
8. S. Chhajed, Y. Xi, Y.-L. Li, Th. Gessmann, and E. F. Schubert, "Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes," Journal of Applied Physics, 97, 054506, 2005