

國立交通大學

光電工程學系碩士班

碩士論文

多波段發光二極體之優化演算法
於智慧型照明應用

1896

Research of the Mixing Multi-Color LEDs with Heuristic
Algorithm for Intelligence Lighting Applications

研究生：陳筱儒

指導教授：田仲豪 博士

中華民國九十九年七月

多波段發光二極體之優化演算法於智慧型照明應用

**Research of the Mixing Multi-Color LEDs with Heuristic
Algorithm for Intelligence Lighting Applications**

研究生：陳筱儒

Student : Hsiao-Ju Chen

指導教授：田仲豪

Advisor : Chung-Hao Tien



**A Thesis
Submitted to Department of Photonics
College of Electrical and Computer Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in**

Department of Photonics

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

多波段發光二極體之優化演算法於智慧型照明應用

學生：陳筱儒

指導教授：田仲豪

國立交通大學光電工程學系碩士班

摘要

隨著節能意識抬頭，具有環保節能與可調性等優點的白色發光二極體逐漸成為市場的新型光源。本論文藉由 LED 混光平台的方式以啟發式演算法(模擬退火法與基因演算法)優化設計照明頻譜，多目標函數的參數包括評價演色性的 CQS，計算 LED 效率的 Luminous Efficacy (輻射光視效能)以及 Luminous Efficiency (發光效率)等，在設定的色溫以及限制條件下用演算法計算多目標函數找尋全域最佳解，最後得到擁有最佳的照明評價參數下的頻譜分布。

實驗驗證為利用實驗室擁有的 LED 陣列平台，並用頻譜儀等實驗儀器測量 LED 陣列平台的光譜並與優化的光譜做比較，未來希望引入產業上解決組合不同單色光 LED 達已定目標色溫的問題，例如智慧型照明應用以及業界上 LED binning 的問題，期以增加 LED 的有效利用之外也降低 LED 的成本。

Multi-Color mixing LEDs with Heuristic Algorithm

for Intelligence Applications

Student : Hsiao-Ju Chen

Advisor : Dr. Chung-Hao Tien

Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

With the energy-saving awareness, white light LED has the advantage of energy saving and adjustable spectrum to serve as a new light source for general illumination. In the thesis, we optimized the lighting spectrum by the way of additive mixing approach via multi-color LEDs platform with heuristic algorithm, which including the simulated annealing algorithm and the genetic algorithm. The lighting parameters of metric function include Color Quality Scale, Luminous Efficacy and Luminous Efficiency.

Under a designated correlated color temperature and lighting parameters condition, we searched for the global maximum solution of the metric function and found out the available spectrum distribution. The simulation was also verified by an off-the-shelf LED matrix. This platform associated with the algorithm program and LED matrix will be expected to have impact on the LED binning problem and intelligence lighting applications in the future.

誌謝

首先要感謝指導教授田老師這兩年來在研究上、報告表達能力以及生活細節上用心且細心的指導，並提供良好的研究資源與實驗環境，使我在碩士生活中除了對專業上的色彩與照明有深入的了解，幫助我順利的完成論文。

此外 OISLAB 這個溫馨又可愛的大家族，這裡的大家更是我亦師亦友的好夥伴。首先要感謝帶我的銘進學長，謝謝你兩年以來細心又耐心的指導，除了在研究上提供非常多珍貴的意見跟幫助之外，也包容我許多在研究的過程中犯的錯誤，而你的幽默帶給整間實驗室更多的歡樂。還有雨隴學長、健翔學長、彥行學長、璧如學姊、子翔學長、松柏學長，在研究的過程中提供我許多寶貴的意見跟幫忙，同時也謝謝可愛的助理明嫵，還有好夥伴們家豪、展輝、至宏、鍾岳、孝威、議寬、銘佐、杰恩，在碩班兩年的生活中帶給我無限的幫助與快樂。

另外，感謝陳政寰教授、盧廷昌教授以及孫沛立教授對於我的研究細心指教並給予許多寶貴的建議。

最後，謝謝我最親愛的爸媽跟弟弟，還有一直在我身邊一起奮鬥的雅惠姊、怡菁、鳳玲學姊和書瑾，當我在低潮時有了你們的鼓勵，總能更快的拾起我的信心，使我能順利完成碩士學歷。這份榮耀與喜悅將獻給幫助過我的大家，謝謝你們。

目錄

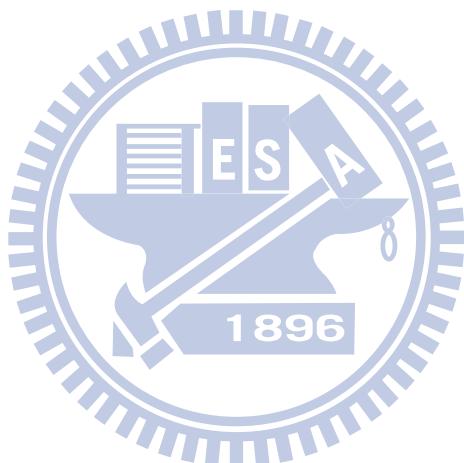
摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	iii
圖目錄	v
表目錄	vi
第 1 章 緒論	1
1.1 白光 LED 的起源	1
1.1.1 白光照明的發展	1
1.1.2 螢光粉與單晶片 LED 發光機制	3
1.1.3 多晶片 LED 混光發光機制	5
1.2 論文介紹	8
1.2.1 研究動機與目的	8
1.2.2 論文架構	9
第 2 章 基礎照明光源評價	10
2.1 基礎色彩工程學	10
2.1.1 演色性指數 (Color Rendering Index)	10
2.1.2 色彩品質指標 (Color Quality Scale)	19
2.2 LED 輻射基礎理論	24
2.2.1 LED 輻射光視效能 (Luminous Efficacy)	24
2.2.2 LED 發光效率 (Luminous Efficiency)	25
第 3 章 多波段混光模擬	29
3.1 LED 混光模擬平台	29
3.2 模擬的架構	30
3.2.1 先行模擬	30
3.2.2 啟發式演算法 (Metaheuristics)	32
- 模擬退火法 (Simulated Annealing)	32
3.2.3 啟發式演算法-基因演算法 (Genetic Algorithm)	38
第 4 章 多波段 LED 混光平台驗證	40
4.1 實驗架設	40
4.2 實驗結果	42
第 5 章 結論與未來展望	50
參考文獻	52

圖 目 錄

圖 1- 1 全球 LED 市場規模預測，到 2013 年產值約為 140 億美元	2
圖 1- 2 白光 LED 的兩種發光機制.....	2
圖 1- 3 藍光 LED 加上螢光粉的結構.....	3
圖 1- 4 藍光 LED 加上 (a) YAG:Ce 螢光粉 (b) TG:Eu 及 SrS:Eu 二螢光粉	4
圖 1- 5 CRI 與 Efficacy 之關係 (a) 兩色光組成白光 (b) 三色光組成白光.....	7
圖 1- 6 比較兩到五種不同 LED 組成 4870 K 白光的 CRI 與 Efficacy 關係	7
圖 2- 1 兩度視角測量的人眼視覺配色函數.....	11
圖 2- 2 XYZ 色度系統的配色函數.....	12
圖 2- 3 CRI 計算流程圖	14
圖 2- 4 構成日光光譜分布的三個基本函數.....	14
圖 2- 5 CIE 色票的反射頻譜 (a)前 8 種中彩度的色票 (b)後 6 種高飽和的色票 ..	16
圖 2- 6 兩組色溫、Ra 均相同，頻譜分布不同的 3-in-1 RGB LED 模組	20
圖 2- 7 兩組 LED 模組之個別 CRI 值	20
圖 2- 8 CQS 所使用的 15 個標準色票	20
圖 2- 9 CQS 0-100 值的轉換函數.....	23
圖 3- 1 模擬的流程.....	30
圖 3- 2 Planck 曲線和相關色溫.....	31
圖 3- 3 模擬退火法演算機制流程.....	35
圖 3- 4 基因演算法的流程	38
圖 4- 1 LED 的陣列系統以及每種 LED 的光頻譜圖	41
圖 4- 2 實驗架構和演算平台	42
圖 4- 3 模擬退火法演算三組不同顆數 LED 組合之最佳值的頻譜	44
圖 4- 4 五顆 LEDs 在權重因子 α 為 0-1 間的最佳 CQS 以及光視效能.....	44
圖 4- 5 四顆 LEDs 在權重因子 α 為 0-1 間的最佳 CQS 以及光視效能	44
圖 4- 6 用模擬退火法演算在權重因子 α 為 0-1 間的最佳 CQS 以及光視效能....	45
圖 4- 7 用基因演算法演算在權重因子 α 為 0-1 間下的最佳 CQS 以及光視效能 .	45
圖 4- 8 五顆 LEDs 不同的權重因子 α 下的最佳發光效率以及光視效能	48
圖 4- 9 四顆 LEDs 不同的權重因子 α 下的最佳發光效率以及光視效能	48
圖 4- 10 三種不同的目標色溫下被照物的色外貌.....	48

表目錄

表 1-1 利用螢光粉搭配單晶片 LED 製成白光 LED 的先前技術	3
表 1-2 利用多晶片 LED 混成白光 LED 的先前文獻.....	5
表 2-1 各種色溫下的標準光源 MF 值.....	23
表 2-2 不同光源的發光效率	28
表 4-1 五種 LEDs 的規格	41
表 4-2 三種演算法於五顆 LED 混光的模擬優化最佳值結果($\alpha=0.7$).....	46
表 4-3 三種演算法於四顆 LED 混光的模擬優化最佳值結果($\alpha=0.7$).....	46
表 4-4 三種不同目標色溫下的運算結果.....	49



第1章

緒論

自 1889 年愛迪生發明了電燈，人類開始大量使用人造光源。雖然日光燈為目前最普及使用的照明設備，然而其電能卻有約 40% 轉換成熱能而浪費。近年來，因為照明效能革命，新興的白光發光二極體(White Light Emitting Diode)被稱為新世紀綠色固態照明，它除了效能高、無汞等優點之外，LEDs 也具有調控頻譜、色溫、偏振態等，因此應用範圍廣闊。除了智慧型照明，包括顯微鏡、顯示器、通訊網路、以及交通系統等都可以見到 LEDs 應用的蹤跡，LEDs 對光譜的可調性更被認為是應用上的一大優勢[1]。

1.1 白光 LED 的起源

1.1.1 白光照明的發展



目前環境中能源日漸短缺以及環保意識抬頭的趨勢下，高效率、高品質、高亮度、省能且環保的新型照明光源是未來照明科技的首選條件。然而自二十世紀末白色發光二極體(White Light Emitting Diode, 簡稱白光 LED)被發展以來，先進開發國家以此為研究主題積極投入開發。將白色 LED 與傳統白熾燈泡以及日光燈相較，白光 LED 具有體積小、省電、無汞且壽命長等優點，省去了傳統白熾燈泡耗電、易碎，日光燈因含汞汙染議題等缺點，再加上 LED 反應速度快，一般 LED 的反應速度約 10^{-5} 秒，通信用更可達 10^{-9} 秒，於是被業界看好為未來替代傳統照明器具的一大潛力商品，此種趨勢可以由照明市場以及政府的經濟政策中略見一二。在 2000 年時，傳統燈泡佔有絕大部分的市場優勢，成長率約為 5%，為當時 LED 市場規模的 2.5 倍。到了 2003 年，白光 LED 三年內保持著每年 30% 左右的成長率進攻照明市場，而目前年成長率甚至突破了 36%，預計在未來 LED 成本降低，照明應用的領域進一步擴張後，白光 LED 估計還有更可觀的經濟突破。

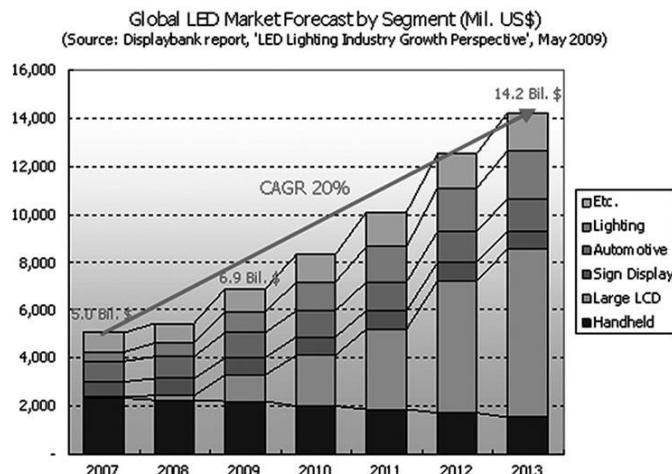


圖 1-1 全球 LED 市場規模預測，到 2013 年產值約為 140 億美元

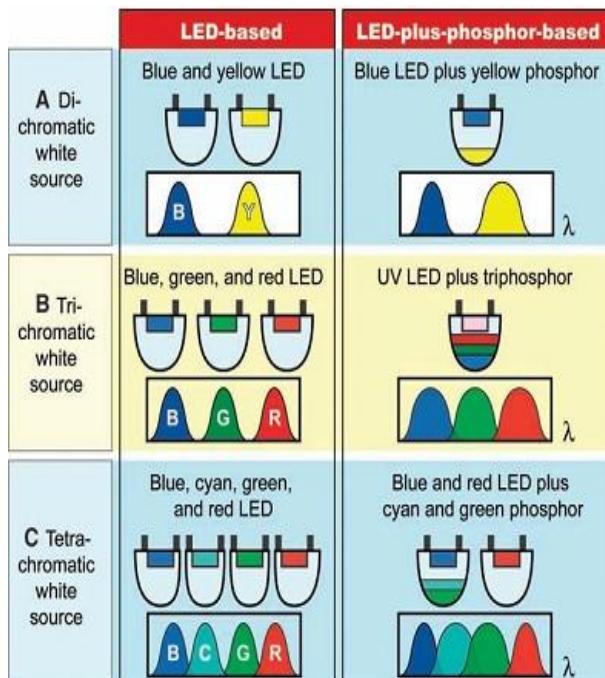


圖 1-2 白光 LED 的兩種發光機制

根據 Reed Electronics Research(簡稱 RER，為全球科技行業提供生產統計和市場預測的公司)統計，假設有 55%的白熾燈泡和 55%的日光燈被白光 LED 所取代，一年則可以省下了近千億台幣，因此美國在其政策白皮書中也提到將在 2000 年到 2010 年間動用 500 億美元發展白光 LED 的照明產品[2]，如圖 1-1 所示。目前白光 LED 主要分成兩種技術(圖 1-2)，一為單晶片 LED 加上螢光物質而發出白光，另一是以兩種以上不同色的 LED 以強度比例混色而產生白光。

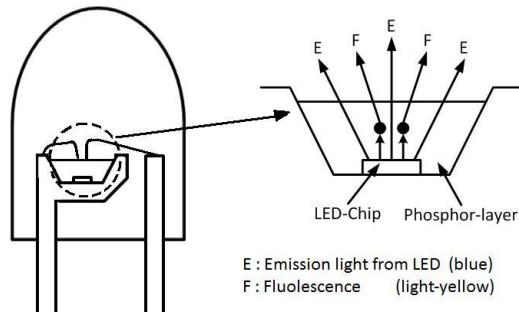


圖 1-3 藍光 LED 加上螢光粉的結構

1.1.2 螢光粉與單晶片 LED 發光機制

表 1-1 利用螢光粉搭配單晶片 LED 製成白光 LED 的先前技術

Prior art	Description
Sakuma Nakamura et al.[3]	<ul style="list-style-type: none"> • 1-PC LED (<i>phosphor converted LED</i>) • <i>Blue LED with YAG phosphor structure</i>
R. Mueller-Mach et al.[4], Proc. SPIE, 3938, 2000.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Two phosphors (TG and SrS) with 460 nm blue chip</i>
Nichia company[5], Proc. SPIE, 5187, 2004.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>High efficiency white light LED</i>
Takahashi et al.[6], Appl. Phys. Lett., 91, 2007.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>405 nm UV LED with blue, green, red and amber LEDs</i>

製造白光 LED 的方式主要分成兩類，第一種是螢光粉和單晶片 LED 發光機制，表 1-1 整理目前利用這種製程得白光 LED 的先前技術。首先由 Sakuma Nakamura 等研究團隊首次將黃色的螢光粉應用於白光 LED 裡[3]，被稱做 1-PC LED(Phosphor Converted LED)，其基本構造原理是利用藍光 LED 加上 YAG 螢光粉做成 LED 的結構(圖 1-3)。當藍光 LED 激發 YAG 螢光粉後，改變螢光粉內部晶體的電場，使光的波段變長而發出 555 nm 黃色的光譜，混合黃光與藍光而生成白光，並利用樹脂封裝使之更容易出光，這也是最簡單的白光 LED 製造方式。然而此種單晶片激發黃色螢光粉的出光效率、均勻度等特性會受到許多因素的影響，

例如藍色 LED 波長、螢光粉擺放的分布甚至於 p-n junction 的合體溫度也會有影響，因此許多科學家也開始著手從事這方面的研究。

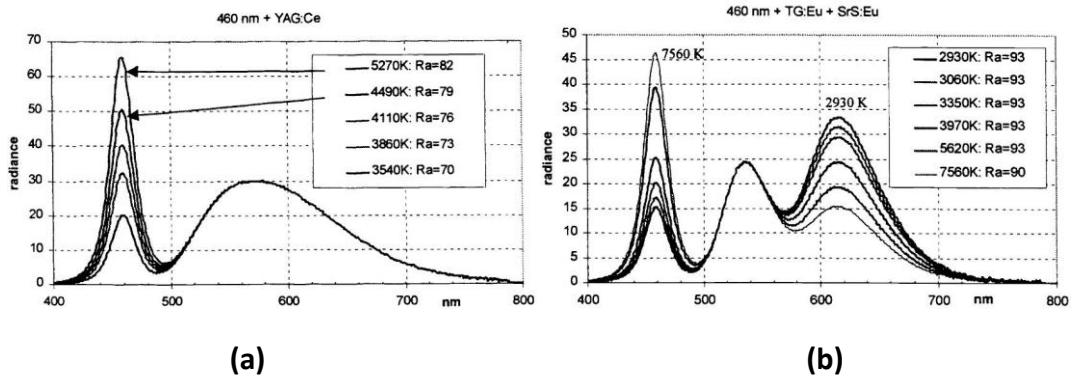


圖 1-4 藍光 LED 加上 (a) YAG:Ce 螢光粉 (b) TG:Eu 及 SrS:Eu 二螢光粉[4]

R. Mueller-Mach 等科學家們先利用理論計算 460 nm 藍光 LED 與 YAG 螢光粉輻射光視效能(Luminous Efficacy)以及在不同比例時產生的色溫值(Coordinate Color Temperature, CCT)、演色性(Color Rendering Index, CRI)，並發現當色溫大於 5000 K 時，CRI 會在 80 左右(圖 1-4a)。為了要更提高演色性，他們分別對不同波長的藍光 LED 和不同成分的 YAG 螢光粉做了更細節的研究，發現原本使用的單一種螢光粉 YAG : Ce (鈦)，而這種螢光粉因為缺少紅色， CRI 值普遍不高。R. Mueller-Mach 嘗試使用兩種螢光粉取代原先使用單一種螢光粉，一種產生綠光 (TG)，另一種產生紅光(SrS)，由圖 1-4b 中可以明顯的看出 460 nm LED 加上兩種螢光粉所得的白光有非常好的演色性[4]。Nichia 公司發展的藍光 LED 與 YAG 螢光粉合成高功率白光 LED 可達到光通量 4.22 lm，是一般白熾燈泡的四倍[5]。

隨著材料不斷的進步與發展，非可見光的 UV LED 也被發展出來，再配合可以吸收 UV 波段的紅、綠與藍色螢光粉，適當調整此三種螢光粉的混合比例可得白光，Takahashi 等人採用 405 nm 的近 UV LED 配合一定比例的藍、綠、紅、黃的螢光粉製成各種色溫的白光 LED，CRI 值為 95-96，發光效率 19-20 lm/W[6]。不過目前受限於 UV LED 發光效率尚未提升，加上 UV 光將使封裝的膠材衰變，

目前仍在研發改進中。

1.1.3 多晶片 LED 混光發光機制

表 1-2 利用多晶片 LED 混成白光 LED 的先前文獻

Prior art	Description
Neil Holger White Eklund et al.[7], <i>Opt. Eng.</i> , 43, 1531, 2004.	<ul style="list-style-type: none">• <i>Target Objective Genetic Algorithm(TOGA)</i>• <i>Search the best luminous efficacy for spectrum optimization</i>
Harald Ries et al.[8], <i>Opt. Eng.</i> , 43, 1531, 2004.	<ul style="list-style-type: none">• <i>Single objective</i>• <i>Based on available LEDs and actual efficiencies</i>
A. Zukauskas et al.[9-12], <i>Appl. Phys. Lett.</i> 80, 234, 2002.	<ul style="list-style-type: none">• $F(\lambda_1, \dots, \lambda_n, I_1, \dots, I_n) = \sigma K + (1-\sigma) Ra$• <i>Hypothetical Gaussian spectra with arbitrary peak wavelengths.</i>• <i>Degree of freedom: 2n-3</i>

第二種白光 LED 機制為多晶片混光，表 1-2 列出使用這種技術的相關文獻參考。將兩顆以上不同顏色的 LED 調整之間的光強度比例，形成白光，做法也可以有很多種，而用此種多晶片的混光方式優點在於不會因為 LED 內部 Stokes Shift Loss 而造成它在出光前的能量損失，不過缺點是每個波長的 LED 發光功率不一樣，尤其在綠光 570 nm 附近有較低的發光效率，是目前製程上一大困難，此外單波長 LED 光強度也易受電流還有溫度的影響。在另一方面，考慮強度比例的混合白光的問題，目前也有科學家們利用優化頻譜來達到最高效率和演色性的 LED 波長與強度組合。Neil Holger White Eklund 在 2002 年時使用 genetic algorithm (GA) 在特定色點(CCT)的情況下的優化 lumiance efficacy 與 CRI 值[7]。他們也提出了 Target Objective Genetic Algorithm (TOGA) 的方法，利用頻譜優化找尋最佳的發光效率。Harald Ries 等人在 2004 年也發表用四種 LED 色光混出色溫值在 1800 K 到 200000 K 之間的色點，並且對 CRI 與發光功率的進行討論與比較，而四種 LED 的

混光系統因為只有一個維度，模擬上比較容易進行[8]。若是對於四種以上的 LED 混光，Arturas Zukauskas 等人發表一系列有關多晶片混成白光 LED 的論文研究。他們以簡單的目標函數表示多晶片混成白光 LED，主要是圍繞在目標函數的優化上[9-12]，亦為本論文主要的研究課題。

在他們的研究中對於目標函數的優化上[10-12]，給與目標函數的定義如下：

$$F(\lambda_1, \dots, \lambda_n, I_1, \dots, I_n) = \alpha K + (1 - \alpha) Ra, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{Eq.1.1})$$

其中 α 為控制 luminous efficacy(文章中都以 K 為代表)與 CRI 值間的比重參數(下一章節會針對 luminous efficacy 以及演色性的相關參數做介紹)；而 λ_n, I_n 分別代表使用的 LED 的波長以及強度； n 為 LED 的編號，優化的重點著重在藉著改變不同權重 α 值，試著找尋整個目標函數的極值(global maxima)。而他們的研究中共使用兩至五種光源(primary sources)來處理色溫 4870 K 的白光問題，先將問題簡化成兩色 Dichromatic LED(假設半高寬 FWHM 為 ± 15 nm)的狀況，以 1 nm 為單位，根據每種可以合成 4870 K 色溫的波長組合，計算出 CRI 值與輻射光視效能，並且將之記錄繪製成 K 與 Ra 的關係圖(圖 1-5a)，圖中右上方邊緣處可以看到在白色的圓圈是最佳解的部分，代表這些波長組合的 LED 是擁有最佳的 CRI 以及 K 值。接著他們繼續優化了三顆 LED 的波長組合中得出的 K 與 CRI 關係圖(圖 1-5b)。

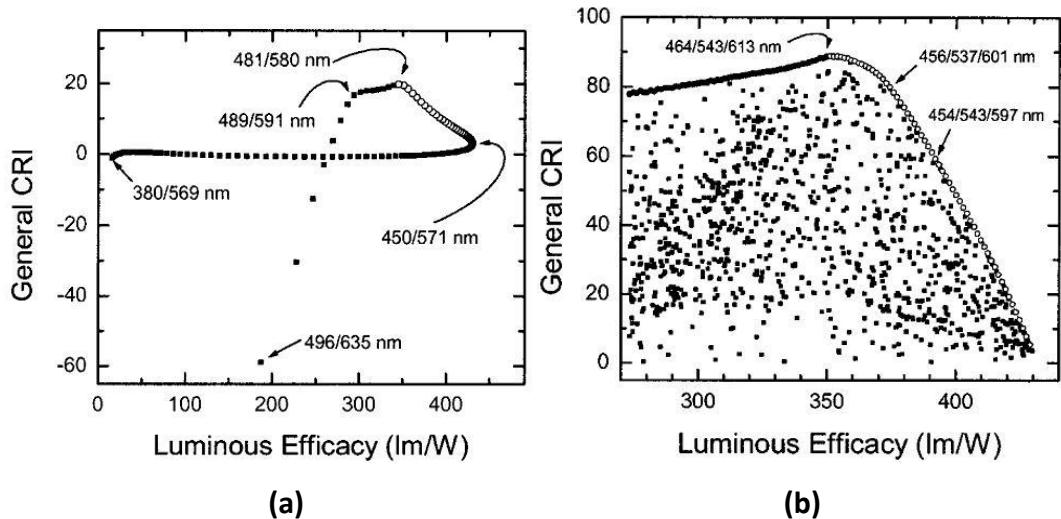


圖 1-5 CRI 與 Efficacy 之關係 (a) 兩色光組成白光 (b) 三色光組成白光[9]

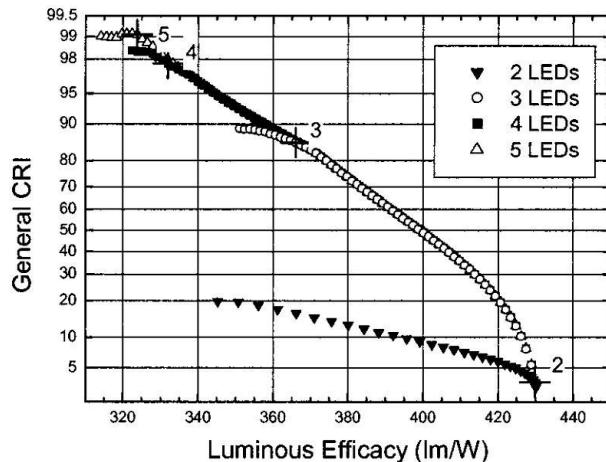


圖 1-6 比較兩到五種不同 LED 組成 4870 K 白光的 CRI 與 Efficacy 關係[9]

並指出三顆 LED 混合的最佳點為 450 nm、540 nm、610 nm 的組合，用三顆 LED 混光也會比兩色的 LED 混光在同樣演色性下，Efficacy 增加 20%，他們同時也建議最好避開 500 nm 以及 580 nm 的光源(因為發光效率太低)。在圖中可以發現邊緣處的白色圓圈串連起的一條線，跟兩顆的結果一樣，這條線也代表著目標函數的最佳組合的波長值，沿著這條線不難發現 Efficacy 與 CRI 確實存在一種 Trade-off 的關係。A. Zukauskas 等人將優化的二到五個光源最佳的組合的結果繪在圖 1-6 中，十字處是代表每種情況目標函數合理(考慮 Efficacy)下的最高 CRI 值。

多晶片的混光 LED 必須要注意一點是光源易受電流以及溫度的影響而導致顏色錯誤(color error)，在應用方面，多晶片混光 LED 比螢光粉加晶片的 LED 更具活用的空間，它可以根据不同的要求調整強度比例，改變混合出光的頻譜已達到想要的效果。最常被引用的例子就是在治療 SAD (Seasonal Affective Disorder)的疾病上，不同的視網膜對於感光的靈敏度與波長也不同，紅光以及琥珀色對 L-型圓錐體感應強，而綠色的激發 L 以及 M 型，黃色激發 S 型，所以如果改變色溫時，與視網膜相對間的感應也可以改變，因而得以配合不同的治療所需給予不同的頻譜。而目前在混白光中比較難以解決的部分就是該如何提高每顆 LED 的外部量子效率，往後日漸進步的科技將可以期待元件量子效率增高，那麼多晶片混光的白光 LED 效率自然而然也可以增加。

1.2 論文介紹

1.2.1 研究動機與目的



自從 1906 年 LED 被發展以來，沉寂了大約九十年的時間，在這段時間內，LED 最大的應用只有在交通指示燈方面，幸而半導體產業後來蓬勃發展，新的材料被發掘，許多研究相繼投入。直到 1990 年，Nakamura 等研究團隊，發現用 AlGaN 材料可以做成高效率的藍光 LED，使的白光 LED 的夢想終於被實現，而用半導體材料做成白光 LED 被稱為固態照明(Solid State Lighting)。白光 LED 的發展為未來的照明光源帶來了一束生機，但由於用螢光粉發光的白光 LED 價格昂貴，發光效率又受限於材料本身且 LED 機動性不高，相較之下多顆混成白光 LED 自然而然成為新的研究目標。傳統的照明光源除了提供照明使用之外，不太能做其他的變化，然而照明工業的大廠 Philips，同時也是智慧型照明環境的領導者之一，他們早在幾年前就推出智慧型照明(Ambient Intelligence)的概念，「智慧型照明」儼然已漸漸變成人類的對照明生活中期待可以加入的新想法，混光 LED 便是這種想法的最佳實現工具之一。混光 LED 機制是依混光的 LED 種類而定，跟傳統的

光源相較之下，此種“可調式”照明方式使人們可以針對他們工作內容或工作環境裡控制需要的色溫。總括來說，本篇論文以智慧型照明的想法著手，用多波段 LED 組合出目標色溫的頻譜，配合加入評斷光源演色性的評價指標(Color Quality Scale, CQS)以及輻射光視能效率(Luminous Efficacy)，用啟發式演算法優化求出最適當的 LED 強度組合比例，調整出目標色溫的頻譜而且同時擁有最佳的 CQS 與 Luminous Efficacy 值。論文中優化法先使用四顆的 LED 做為示範，最後推展到 N 顆 LED 光源，最終希望可以將這方法應用在智慧型光源照明上面，以白光 LED 為基礎，輔以混光 LED 創造出一個工作者想要的照明環境。

1.2.2 論文架構

本論文共有五章，第一章為緒論，包含簡介白光LED的起源以及製程上的機制，在智慧型照明的應用下，建構一個混光的平台系統，平台內包含相關的色彩運算機制以及LED的輻射光視能效率等計算，所以第二章的部份將會先針對色彩工程學裡對於光源的評價指標以及LED光源的發光效率等名詞定義介紹。但是由於評價混光系統的指標參數很多而導致欲優化的目標函數複雜，故嘗試運用演算法處理目標函數得到最適當的解，於是第三章除了說明最佳化演算法的運算機制之外，也將啟發式演算法引入混光系統中進行模擬，並在設定的限制條件下找出最佳LED陣列強度比例。第四章將設計實驗並將實驗結果拿來與模擬優化的結果做比較歸納，最後，第五章統整本篇論文的結論以及未來展望。

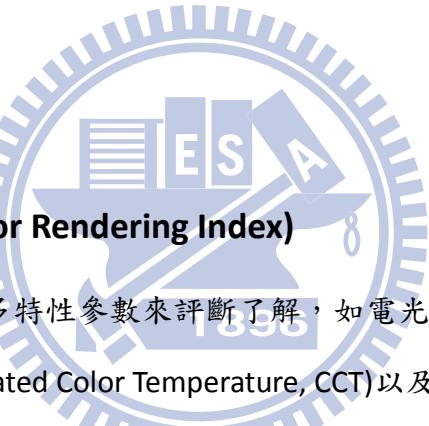
第2章

基礎照明光源評價

由於照明工業推出越來越多同色溫但不同頻譜的光源(Metamerism light sources，稱為同色異譜光源)，國際照明委員會 CIE(Commission Internationale de l'Eclairage)是研究並推行定義光標準的國際機構，他們給予照明工業如何去設計修改新光源頻譜的方向，另外還提供了比較光源在各種環境中呈現自然且真實顏色程度的好壞比較，但因為定義適合各種外在環境光源評價指標不易，CIE 自 1931 年來也一直不斷的修正提出的公式且建議人們使用最適合的光標準，儘管如此 CIE 所建議的評價光源特性的標準，仍被大家廣泛的使用到現在。

2.1 基礎色彩工程學

2.1.1 演色性指數(Color Rendering Index)



照明光源可以由很多特性參數來評斷了解，如電光轉換效率(Luminance Efficacy)、相關色溫(Correlated Color Temperature, CCT)以及演色性(Color Rendering Property)等指標。一般而言，當光源表現出物體較好的色彩恆常性(Color Constancy)，此光源會被定義為好的光源，稱其擁有高演色性。然而，由於生活中有多種不同的光源，計算在不同色票下平均演色的程度便成為 CIE 提出並公認為最具指標性的光源評價方法。本節要介紹 CIE 推行已久的評價光源演色性指標的方式，演色指數(Color Rendering Index, CRI)。

色度是一種對色彩感知的研究，色彩感知是個抽象難懂的科學，為了讓這種抽象的想法賦予數值上的意義，必須建立一套表色系統來解釋色度的概念。CIE 標定 CRI 數值是分析光源的切段頻譜，此種方式又稱為 Spectral band methods。先將光源的頻譜分成 14 個區域，再比較每個區域與參考標準值之間的功率。

表色系統可以大致分為兩類，一種是著重於顯色系統發展的孟德爾表色系

統(Munsell color system)，此系統用真實的色票表達顏色感知，若要表示非色票上存在的顏色，則用內插或是外插等方式，雖然是直覺易理解的方式，但因人類感官對於色彩並非屬於線性系統，所以此種表色系統精密度比較低；另一種則是 CIE 基於混光系統發展的表色系統，利用分光測色法，對於預測非在色票上存在的色刺激的表色，可以有較高的精密度[13]。所以 1931 年 CIE 以物理測量的方式，用「數值化」定量的表示顏色，將色刺激轉換成三維的座標系統。在 W. D. Wright 和 J. Guild 帶領下，進行一系列視覺實驗，經過兩者互相比較統計實驗的結果，最後得到以 2° 視角測量的人眼視覺配色函數(圖 2-1)，圖中有紅綠藍三原色的波長，主波長分別為 700nm、546.1nm、435.8nm。定義配色函數的用意在於某單色光可以由所需要的原刺激 R、G、B 混合量組合，但由圖中可以發現，配色函數 R 的部分出現了負值，表示混合某單色光中會含有負的混合量，因為這緣故，配色函數的形式上可以寫成：



$$[F_\lambda] + R[R] \equiv G[G] + B[B] \quad (\text{Eq. 2.1})$$

F_λ 是混合量，R、G、B 為三主要色刺激的比例，[R]、[G]、[B]是代表三原色。

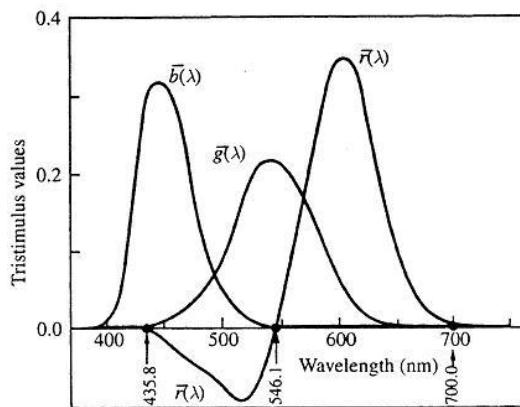


圖 2-1 兩度視角測量的人眼視覺配色函數

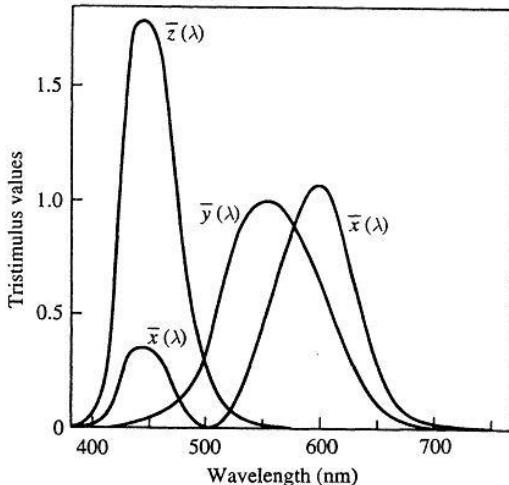


圖 2-2 XYZ 色度系統的配色函數

由圖 2.1 所知，R 這一項會出現負值，負值的存在會造成計算上的困擾，所以 CIE 在 1931 年改制新的色度系統，XYZ 色度系統，定義新三色刺激值[X]、[Y]、[Z]之外，目的是為了使配色函數都為正值(圖 2-2)。系統中的綠原色 $\bar{y}(\lambda)$ 與光譜光視效率 $V(\lambda)$ 是相等的，因此在應用上，Y 可以直接表示為光度量，使用上也較方便。在 1964 年左右，CIE 認為 2° 視角的色度系統對觀察條件施稍嫌狹隘，一般的觀察條件都幾乎大於 2° 視角，於是 CIE 以 Dean B. Judd 為中心並配合科學家們進行的實驗結果，提出了把 XYZ 的表色系統以 10° 視角的配色實驗為基礎，將之前的 2° 視角色度系統另改成 10° 視角的色度系統。到目前為止，10° 視角的色度系統被普遍的接受。導入了配色函數，三刺激值以及色度座標也可以由計算而得。

$$\begin{aligned}
 X &= k \int_{vis} R(\lambda) P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y &= k \int_{vis} R(\lambda) P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z &= k \int_{vis} R(\lambda) P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{Eq. 2.2}$$

$$k = \frac{100}{\int_{vis} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$P(\lambda)$ 是照明光的反射頻譜， $R(\lambda)$ 是照明光打在物體上的光譜反射率，所以 $R(\lambda)$ 通常小於 1，為了讓三刺激值的 Y 在完全擴散反射面的值為 100，此處的 k 設常數。為了方便表示三維座標的色彩空間，CIE 把三刺激值再度用下列公式轉換成 Eq. 2.3，於是之後的色度學的計算幾乎都使用 $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 色度系統。

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= 1-x-y \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

建構表色系統後，CIE 仍然持續的找尋研究適當的方法，想要找到一種使人眼視覺看到被照體的色彩與心中想像的視覺印象相匹配的指標，於是在 1963 年，CIE 決定以測試物體在不同光源產生的色差計算來做為評價光源的標準。除了 CIE 之外，還有研究學者們也都提出方法想要解決這個難題，包括比對照明光光譜或是比較物體在照明光下的色外貌的不同處等等，最後 CIE 在 1995 年發表演色指數的算法，也是目前被世界公認的標準，圖 2-3 為 CRI 流程圖。

為了比較光源在不同色票下的演色性，要先決定標準光源，當參考光源的 CCT 在 5000K 以下，則標準光源即為黑體輻射，如果參考光源的色溫高於 5000K 以上，則採用 CIE 日光照明當標準光源，CIE 收集了許多日光測定的結果並進行分析得到構成日光光譜分布的三個基本函數(圖 2-4)，利用下式確定任意相關色溫(T_{cp})下的日光光譜分布 $S_D(\lambda)$ [13]。

$$\begin{aligned} S_D(\lambda) &= S_0(\lambda) + M_1 \times S_1(\lambda) + M_2 \times S_2(\lambda) \\ M_1 &= \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \\ M_2 &= \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

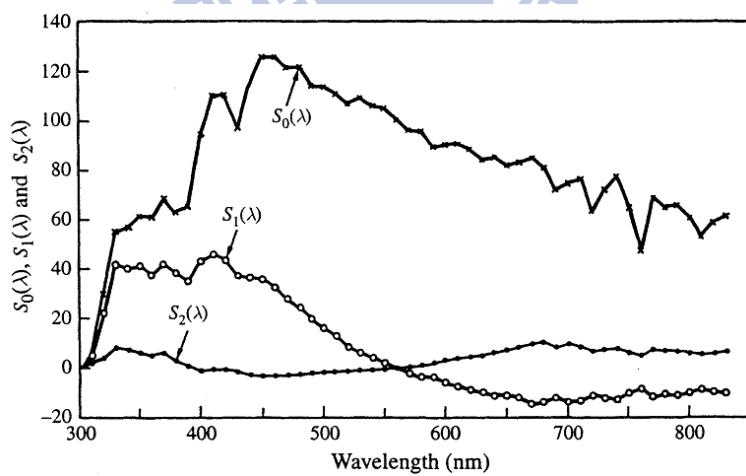
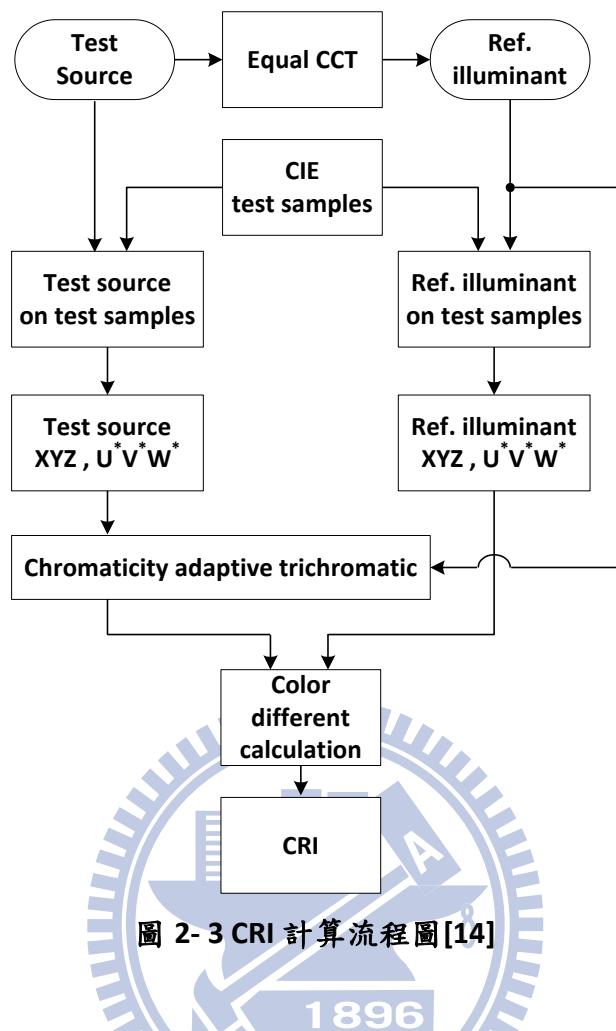


圖 2-4 構成日光光譜分布的三個基本函數

x_D 跟 y_D 代表日光曲線的色座標；當 $4000K \leq T_{cp} \leq 7000K$ 時，

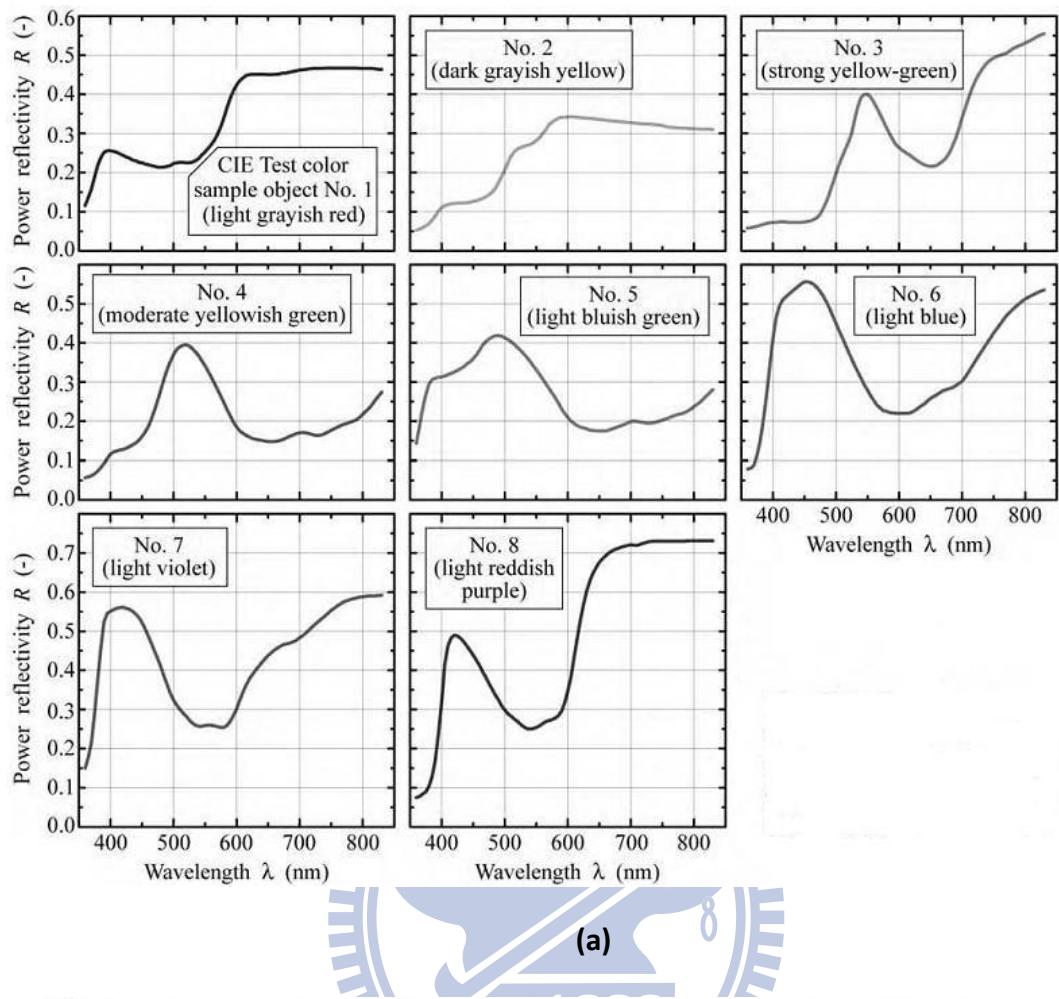
$$x_D = \frac{-4.0507 \times 10^9}{T_{cp}^3} + \frac{2.9678 \times 10^6}{T_{cp}^2} + \frac{0.09911 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.244063 \quad (\text{Eq. 2.5})$$

當 $7000K \leq T_{cp} \leq 25000K$ 時，

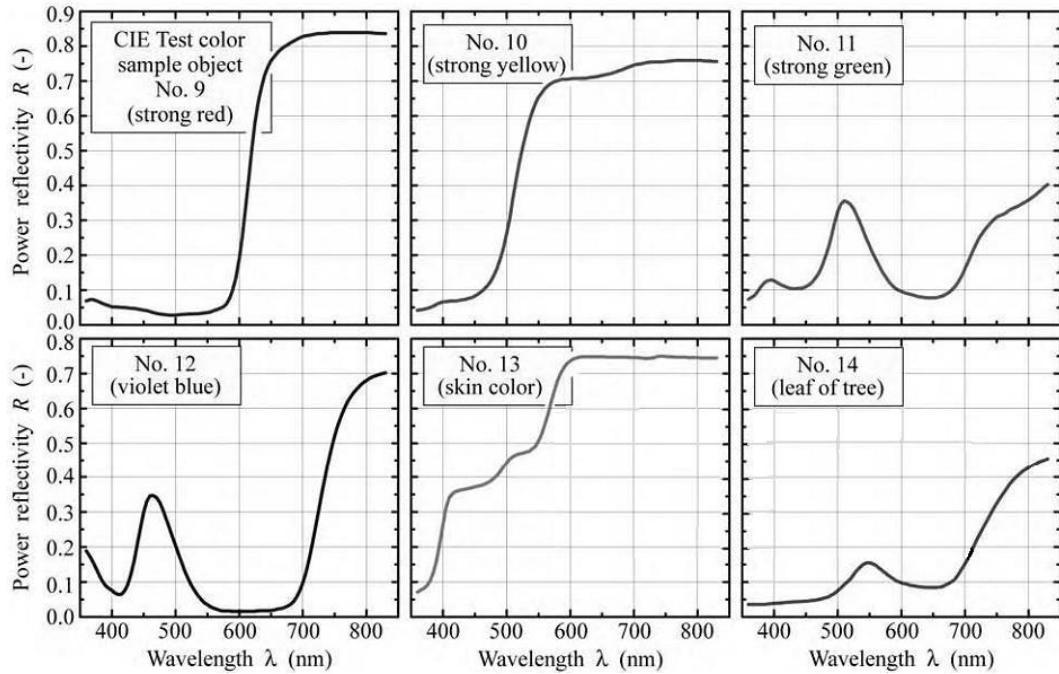
$$x_D = \frac{-2.0064 \times 10^9}{T_{cp}^3} + \frac{1.9081 \times 10^6}{T_{cp}^2} + \frac{0.24748 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.23704 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$y_D = -3x_D^2 + 2.873x_D - 0.275 \quad (\text{Eq. 2.7})$$

色票的種類一般分成 14 種，其中前八種為孟塞爾表色系統(Munsell Color System)中屬於中明度中彩度的色票，這些色票是多種物體色的平均代表樣本，過去的 CRI 定義是用前八種色票平均值來衡量，後來才又加入了後面六種顏色，圖 2-5(a)為前八種色票的反射頻譜，圖 2-5(b)為後六種色票的反射頻譜。而後六種顏色有具代表性的紅、黃、藍、綠等高彩度(Chroma)色，以及白種人膚色和自然界中的葉綠色。日本工業規格(Japenese Industrial Standards, JIS)所使用的試驗色更加入了第 15 種顏色，其為代表日本女性的平均臉部膚色，若有其他特殊目的，也可以根據需求採用其他反射頻譜之試驗色。



(a)



(b)

圖 2-5 CIE 色票的反射頻譜 (a)前 8 種中彩度的色票 (b)後 6 種高飽和的色票 [3]

分別算出測試光與標準光對於 14 種色票的三刺激值後，色差的計算上採用 CIE 1964 W*U*V 均等色彩空間，轉換式如下[13]：

$$\begin{aligned} W^* &= 25Y^{\frac{1}{3}} - 17 \\ U^* &= 13W^*(u - u_n) \\ V^* &= 13W^*(v - v_n) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

其中 u 跟 v 為 1960UCS 色度圖的色度座標，

$$\begin{aligned} u &= \frac{4X}{(X + 15Y + 3Z)} = \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)} \\ v &= \frac{6Y}{(X + 15Y + 3Z)} = \frac{6y}{(-2x + 12y + 3)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

目前 CIE 的均等色彩空間已經到進展到 CIE 1976 L*a*b* 以及 CIE 1976 L*u*v* 色彩空間，雖然如此但 CIE 1960 UCS 色度圖相較於 CIE 1976 UCS 色度圖，在演色指數計算的變化上仍然很小。

一般來講，雖然測試光源色度座標和標準光源的色度座標原本應該是不一樣的，但色度座標的差異而造成物體顏色的色偏移，人眼會自然的適應這種色差，稱為色適應。最基本的色適應的模型是 1902 年由 Johannes von Kries 提出，他認為人眼有三種可以接收分別為紅、藍、綠不同頻譜感度的感光器，這三種感光器也會因為外在環境的照明光頻譜不同，而修正他們的對於顏色的敏感度，舉例來說，在白天裡由戶外走入白熾燈的室內，因為日光光譜分布大致是平均的，因此紅綠藍感度大致上也是平均的，而白熾燈的光譜中含有大量的長波長的頻譜，則紅色的感光器的刺激就會被減低。簡單闡述 Von Kries 色適應預測式的推導，假設紅綠藍感光器的測試光和照在色票上之測試色的三刺激值分別是 R_0 、 G_0 、 B_0 以及 R 、 G 、 B ，同樣假設參考光與對應色的三刺激值也可以被寫為 R_0' 、 G_0' 、 B_0'

以及 R' 、 G' 、 B' ，為使試驗色和對應色達到色外貌一致，則必須滿足下列公式：

$$\begin{aligned}\frac{R}{R_0} &= \frac{R'}{R_0}, \\ \frac{G}{G_0} &= \frac{G'}{G_0}, \\ \frac{B}{B_0} &= \frac{B'}{B_0},\end{aligned}\quad (\text{Eq. 2.10})$$

為了近似表示這種效果，CIE 採用 Von Kries 的想法，將測試光源給予下列的修正：

$$\begin{aligned}u'_k &= u_r \\ v'_k &= v_r \\ u'_{k,i} &= \frac{(10.872 + 0.404c_r \frac{c_{k,i}}{c_k} - 4d_r \frac{d_{k,i}}{d_k})}{(16.518 + 1.481c_r \frac{c_{k,i}}{c_k} - d_r \frac{d_{k,i}}{d_k})} \\ v'_{k,i} &= \frac{5.52}{(16.518 + 1.481c_r \frac{c_{k,i}}{c_k} - d_r \frac{d_{k,i}}{d_k})} \\ c &= \frac{(4 - u - 10v)}{v} \\ d &= \frac{(1.708v + 0.404 - 1.481u)}{v}\end{aligned}\quad (\text{Eq. 2.11})$$

其中 u_r 和 v_r 是標準光源的色座標， $u'_{k,i}$ 和 $v'_{k,i}$ 是經過色適應修正後的測試光源色座標，而 $u'_{k,i}$ 和 $v'_{k,i}$ 代表色適應修正後各色票的色座標， c_r 和 d_r 是計算 u_r 和 v_r 的係數，同理 $c_{k,i}$ 和 $d_{k,i}$ 是計算 $u_{k,i}$ 和 $v_{k,i}$ 的係數。

總結演色性的基本算法，一開始用光頻譜計算出三刺激值，然後使用 CIE 1964 W*U*V*均等色彩空間以及 Von Kries 的色適應模型修正後，將每個色票算出的 W*U*V*套入 Eq 2.12 色差計算式中：

$$\Delta E_i = \left(U_{r,i}^* - U_{k,i}^* \right)^2 + \left(V_{r,i}^* - V_{k,i}^* \right)^2 + \left(W_{r,i}^* - W_{k,i}^* \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_i$$

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i}{8} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

R_i 為各種色票的演色性，而平均演色指數 R_a 是對色票第一種到第八種取平均值，公式中的係數 4.6 是為了要配合早期的暖白螢光燈的演色指數大約為 50 所導入求出的，一般而言，平均演色性可以到達 80 以上，我們皆認為此測試光源具有良好的演色特性。

2.1.2 色彩品質指標(Color Quality Scale)

CRI 雖然是個頗具指標性的光源品質的評估標準，但是原本用來評估色差的均勻色彩空間一旦面臨具極窄頻譜的 LED 就不再適用，尤以紅色波段為最[15-16]。Wendy Davis, Yoshi Ohno 等人使用兩組 3-in-1 RGB LED 模組照射高飽和度的顏色(色票第 9-12 個)並做比較。由圖 2-6 和圖 2-7 可以得知，這兩組不同頻譜的 RGB LED 光譜計算在高飽和的色票中 CRI 值差異較大，過去的指標平均 CRI 和飽和紅色的色票 CRI 產生了衝突，即使在一般中飽和度的色票下 $R(1-8)$ 是一個極佳的指標，但是對其他高飽和度(如紅色、橘色、紫色...等)的色票卻沒有辦法演繹出真正的色票顏色，其色相會有所偏移，然而並非所有的高飽和度顏色都有相同的趨勢和變化。因此美國國家標準和技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)，Yoshi Ohno 等人研擬了另一光源衡量指標，期望可以解決 LED 在高飽和度顏色時的演色性偏差(尤其以高飽和度的紅色最為明顯)，NIST 所發佈的新演色性指標為 Color Quality Scale(CQS)[17]。CRI 最大的問題在於即使 R_a 很高卻擁有很多差的演色性，尤其是針對高飽和度的顏色。

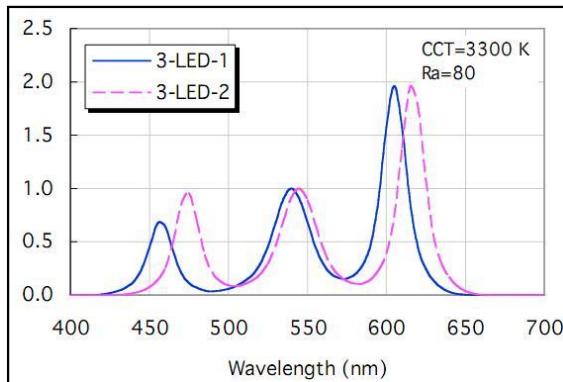


圖 2-6 兩組色溫、Ra 均相同，頻譜分布不同的 3-in-1 RGB LED 模組[15-16]

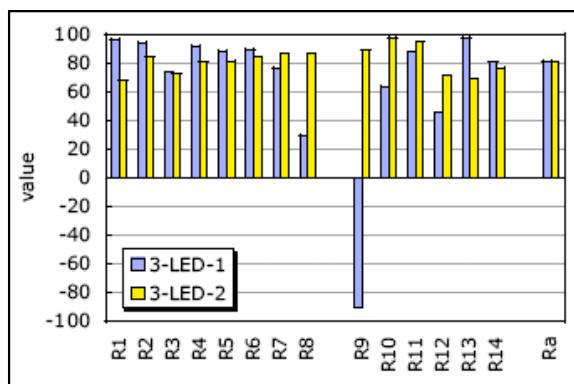


圖 2-7 兩組 LED 模組之個別 CRI 值

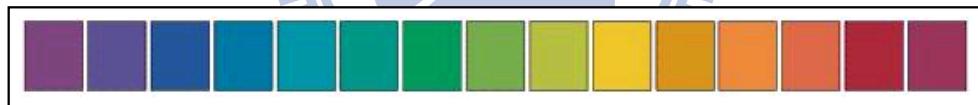


圖 2-8 CQS 所使用的 15 個標準色票

因此，原本的 14 種色票被新的 15 個擁有高彩度(Chroma)且平均環繞色相環(Hue Circle)的色票所取代，其色彩如圖 2.8 所示，對應到 Munsell 色卡的色相值/彩度編號分別為：7.5 P 4 / 10、10 PB 4 / 10、5 PB 4 / 12、7.5 B 5 / 10、10 BG 6 / 8、2.5 BG 6 / 10、2.5 G 6 / 12、7.5 GY 7 / 10、2.5 GY 8 / 10、5 Y 8.5 / 12、10 YR 7 / 12、5 YR 7 / 12、10 R 6 / 12、5 R 4 / 14，以及 7.5 RP 4 / 12。色差的計算系統採用 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 均等色空間，與 $W^*U^*V^*$ 和 $L^*u^*v^*$ 系統相較之下，CIE1976 $L^*a^*b^*$ 系統擁有較寬廣較為均勻的特性，因此近期 CIE 推薦使用 CIELAB 均等色座標系統。

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\
 a^* &= 500 \left\{ \left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \\
 b^* &= 200 \left\{ \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}
 \end{aligned} \tag{Eq. 2.14}$$

X, Y, Z 代表光源對物體色的三刺激值，而 X_n, Y_n, Z_n 則表示完全擴散反射面 ($R(\lambda)=1$)

的三刺激值，而且 Y_n 正規化為 100，當 $\frac{X}{X_n} > 0.008856$ 、 $\frac{Y}{Y_n} > 0.008856$ 、

$\frac{Z}{Z_n} > 0.008856$ 的範圍中，Eq. 2.14 才會成立，反之則必須做下列修正：

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 f \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\
 a^* &= 500 \left\{ f \left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - f \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \\
 b^* &= 200 \left\{ f \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}
 \end{aligned} \tag{Eq. 2.15}$$

$$f \left(\frac{X}{X_n} \right) = 7.787 \left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{16}{116} \tag{Eq. 2.16}$$

$f \left(\frac{Y}{Y_n} \right)$ 和 $f \left(\frac{Z}{Z_n} \right)$ 也可以用 Eq. 2.16 式求得。測試光源的 Lab 座標為 (L_1^*, a_1^*, b_1^*) ，標準光源的色座標為 (L_2^*, a_2^*, b_2^*) ，將測試光源跟標準光源分別得到的 $L^* a^* b^*$ 數值帶入色差公式 (Eq. 2.17) 作運算，為了保證光源當色票上任何色彩偏移時都會使 CQS 有顯著的影響，將色差做均方根處理 (Eq. 2.18)，如此一來確保較大的色相偏移可以被考慮進來。

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$$\Delta E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_i^2} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

在 CRI 的計算時，標準光源的 CCT 在任何色溫下皆定義 CRI 為 100，但是真實色彩是會因為光源色溫高或低影響色彩演色性，這個難題也是尚待解決的問題之一，而目前暫時的解決方式是乘上每個色溫的色溫因子。利用 LAB 色彩空間系統，當標準光源在不同的色溫下可以將 15 種色票換算得一個色域範圍值，假定當物體顏色的表色性會隨著標準光源的 CCT 的不同，色域範圍也不同，因此色溫因子(Multiplication Factor, MF)定義不同色溫色域範圍與 D65 色域範圍的比值，如表 2-1 所示。將 ΔE_{RMS} 與 MF 帶入下列式中：



$$R_{in} = MF \times (100 - 2.81\Delta E_{RMS}) \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Eq. 2.19 中的參數 2.81 的原因是因為定義當使用 CIE 標準螢光燈源(F1-F12)計算 CQS 時會等於 75.1 即等於計算螢光燈光譜在計算 CRI 的值。另外，擁有負值之 CRI 的光源常使人難以理解其物理意義，所以 CQS 使數值維持在 0 到 100 內，也讓使用者可以容易的明白數值的意義，確保在 0-100 的轉換式(Eq. 2.20)(圖 2-8)：

$$R_{out} = 10 \times \ln[\exp(R_{in} / 10) + 1] \quad (\text{Eq. 2.20})$$

經過一系列的計算後，CQS 這個新型的評價光源演色的指標已被建立，未來仍有更好的演色機制在建構中，像是 Bradford transform，CMCCAT2000 或是 CIE CAT02[16]等等，到時 CQS 也將因此做修正。

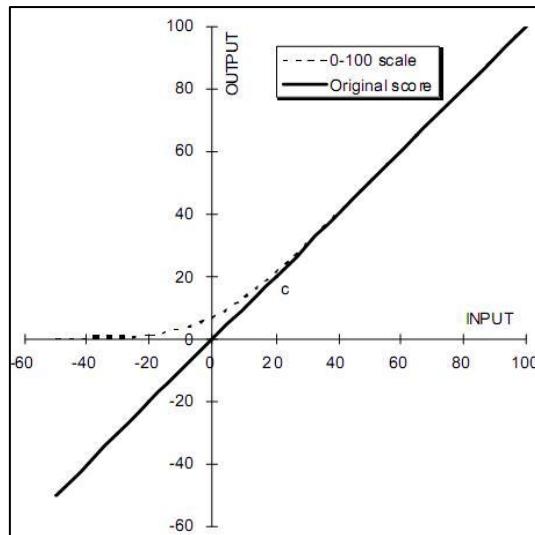


圖 2-9 CQS 0-100 值的轉換函數

表 2-1 各種色溫下的標準光源 MF 值

CCT (K)	Gamut Area	Multiplication Factor
1000	2645	0.32
1500	5424	0.65
2000	6902	0.83
2500	7676	0.93
2856	7987	0.97
3000	8075	0.98
3500	8268	1.00
4000	8347	1.00
5000	8341	1.00
6000	8274	1.00
6500	8211	1.00
7000	8151	0.99
8000	8040	0.98
9000	7947	0.97
10000	7868	0.96
15000	7620	0.93
20000	7495	0.91

2.2 LED 輻射基礎理論

2.2.1 LED 輻射光視效能(Luminous Efficacy)

除了色彩的資訊之外，亮度也是人眼接受光的另一項資訊。人眼是一個非常精密的光偵測器，可以調節瞳孔來控制入光量。而人腦處理外部環境的亮度資訊時，是由柱狀和錐狀細胞共同決定，依據日本工業標準 JIS，當環境光強高於 10 lx 時(如一般夜間路燈點亮的街道)，採用的稱為明視覺(Photopic Vision)，此時的外部資訊，主要來自錐狀細胞的傳送，因此除了亮度，還保有色彩的資訊。而當環境光低於時 0.1 lx(如只有星光的室外環境)，則採用暗視覺(Scotopic Vision)，此時的光強度還不足以刺激錐狀細胞產生反應，因此資訊接收主要由柱狀細胞負責，只能獲得明暗的亮度資訊，而沒有色彩的訊息。而環境亮度介於兩者之間時，則稱為中間視覺(Mesopic Vision)，這時錐狀細胞和柱狀細胞同時會作用，而獲取的資訊為兩者的某種比例關係[13]。

以人眼對於外部環境的亮度感受來說，在一般的狀況下，是由明視覺來決定。人眼的亮度感受可用輻射光視效能表示之，輻射光視效能(Luminous Efficacy)是將光通量(Eq. 2.21)除以輻射通量(Eq. 2.22)而得到的數值，

$$\phi_{lum} = K_m \int_{vis} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (Eq. 2.21)$$

$$P = \int_{\lambda} P(\lambda)d\lambda \quad (Eq. 2.22)$$

其中 K_m 是光譜光視效能(lm/watt)， $P(\lambda)$ 為光源能量頻譜(watt)， $V(\lambda)$ 為光視效率頻譜(ratio)， ϕ_{lum} 是人眼感受總能量(lm)，所以 Luminous Efficacy 的定義即為：

$$\text{luminous efficacy} = \frac{\phi_{lum}}{P} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

由上式可知，人眼所感受的亮度值，可由環境光源之頻譜和明視覺效率曲線的乘積作積分而得。由圖 2-2，不同波長的光，對人眼所感受的亮度，其權重將隨之有所不同[13]。

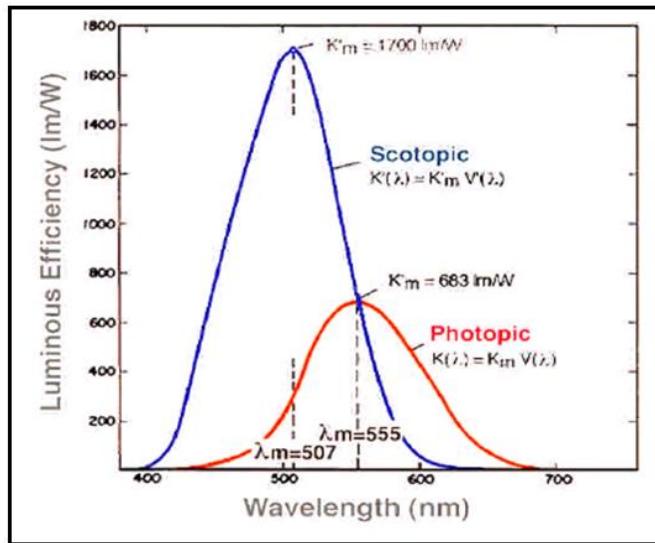


圖 2.2 視明效率圖(藍線：暗視覺，紅線：明視覺)

2.2.2 LED 發光效率(Luminous Efficiency)

影響 LED 發光效率的因素很多，包括材料品質、元件結構和製程等等，因此發光效率經常被用來分析 LED 的特性。元件發光效率的定義目前學術上最常使用量子效率(Quantum Efficiency) η ：

$$\eta = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{ext}} \quad (\text{Eq. 2.24})$$

η_{int} 稱為內部量子效率(Internal Quantum Efficiency) , η_{ext} 稱為外部量子效率(External Quantum Efficiency)。

$$\eta_{int} = \frac{R_r}{R_{nr} + R_r} \quad (\text{Eq. 2.25})$$

R_r 和 R_{nr} 分別稱為輻射複合效率(Radiative Recombination Rate)和非輻射複合速率(Nonradiative Recombination Rate)。內部量子效率表示每秒從 LED 發光層發射出光子數除以每秒從外部注入電子數。簡單說，就是 LED 元件本身電光轉換效率，主要與元件本身特性如元件材料能帶、缺陷、雜質及元件磊晶組成結構等息息相關。影響內部量子效率的主因為非輻射複合速率，當電子與電洞複合時，會發射能量也就是光子，但因為晶體結構的缺陷可能導致電能不是轉為光子而是轉成聲子，也就是電能會轉成熱能，這是最不期望發生的情況，所以摻雜條件會影響複合速率，因此優化摻雜條件才能得到最大的內部量子效率。材料、製造技術以及元件結構的持續推進，已經可以使我們製造出高內部量子效率的發光二極體，最好的紅光四元(AlGaInP) LED 已經可以使內部量子效率達到 100%，而 GaN 綠光及藍光元件的內部量子效率則是 50%。

外部量子效率 η_{ext} 是 LED 最重要參數之一，定義為每秒發射之光子數與每秒注入之電子數的比值：

$$\eta_{ext} = \frac{qP_L}{Ihv} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

P_L 是 LED 的光輸出功率。外部量子效率為 LED 內部產生光子，在經過元件本身吸收、折射、反射後實際上在元件外部可量測到光子數目。LED 外部量子效率因素包括 LED 電特性(Electrical Efficiency)與 LED 封裝效率(Packaging Efficiency)等。影響

外部量子效率的因素主要有三種，第一種 Fresnel Loss，是當 LED 發出的光子要從半導體進入空氣時，光子必須穿越兩者的界面，有一部分的光會透射而進入空氣，有一部分的光會被反射回半導體，反射係數為 $\Gamma = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)$ ， n_1 為空氣的折射率， n_2 為半導體的折射率，反射係數 Γ 為入射光被反射回半導體的比例；第二種為臨界角的損失，當光子傾斜入射半導體與空氣間的界面時會發生折射，但當入射角太大時會發生全反射，此時入射角稱為臨界角 θ_c ，可由 Snell's law 決定；最後一種是半導體內部的吸收，當 LED 內部因電子電洞複合而放射光子時會向四面八方放射，一部分光子會進入空氣，剩下的部分則會在半導體內部一直行進直到被半導體材料吸收為止。目前 LED 受限於材料吸收、電流分佈不均以及臨界角損失等因素，以至於發光層所發出光量，僅有少部分真正能從 LED 向外發出。換言之，縱使 LED 內部量子效率極高，但是在 LED 外部所能真正接收到光卻很少，因此 LED 外部量子效率提升仍有很大技術瓶頸待克服。目前市面上高效率 LED 主要使用兩種材料系統： InGaN (用於藍光及綠光) 以及 AlGaN (發光波長涵蓋可見光頻譜的紅色部份)，在確定發光波長下的 LED (例如 400 nm 及 650 nm) 外部量子效率可以達到 50% 左右。

歸納上面所述，量子效率是半導體將電能轉成光能的效率，

$$\text{Quantum Efficiency} = \frac{P}{IV} \quad (\text{Eq. 2.27})$$

P 用 Eq.2.22 積分後得的光源能量頻譜(watt)，I 與 V 的為驅動元件時的電流電壓值，於是結合量子效率與輻射光視效率，LED 的發光效率(Luminous Efficiency)被定義為輻射光視效能與電能轉成光能的量子效率的相乘積：

$$\text{Luminous Efficiency} = \text{Luminous Efficacy} \times \text{Quantum Efficiency}$$

$$= \frac{\text{lum}}{P} \times \frac{P}{IV} = \frac{\text{lum}}{IV} \quad (\text{Eq. 2.28})$$

發光效率對於 LEDs 在可見光波段的是個很重要的參數指標，它代表著一個 LED 由輸入的功率換算可以得到最後人眼可以接收到的光功率的值，換句話說，假定如果有一個 LED 光源可以完美的將電能功率轉成光能功率，則發光效率就會等於輻射光視能效率[3]。表 2-2 為一般常用光源的發光效率[3]。就應用角度分析，儘管 LED 發光效率已遠超過白熾燈與鹵素燈泡，甚至超越大部分的螢光燈，不過為了擴張 LED 應用領域且降低 LED 生產成本，LED 亮度與發光效率提升仍是近年來 LED 技術發展重心。2001 年標準型白光 LED(20 mA)發光效率僅 25 lm/W，至 2009 年初 Nichia 發表之白光 LED，在 20 mA 電流下，其發光效率可達 249 lm/W，為目前業界之最。高功率白光 LED(350 mA)發光效率也由 2004 年約 30 lm/W，截至 2008 年年底 Cree 發表 161 lm/W 產品為業界之最。

表 2-2 不同光源的發光效率[3]

Light Source	Luminous Efficiency (lm/W)
Edison's first light bulb	1.4
Tungsten filament light bulbs	15-20
Quartz halogen light bulbs	20-25
Fluorescent light tubes and compact bulbs	50-80
Mercury vapor light bulbs	50-60
Metal halide light bulbs	80-125
High-pressure sodium vapor light bulbs	100-140

第3章

多波段混光模擬

本篇論文的目標是建構一個優化 LED 混光強度的模擬系統，藉由這個系統輸入需要的 LED 參數資料、目標色溫、目標色點，這些因子寫成一目標函數，用啟發式演算法組合計算各種配對可能，最後達穩態取出目標函數的最佳解，解中包含現有可以組合的 LED 強度內最適當的演色性指數以及輻射光視效率，利用啟發式演算法除了可以大範圍的搜尋最適當解，避免陷入局部最佳解的情況，此外也可以解決多目標函數的問題，遠成目標希望可以藉由這種目標函數的概念解決 LED 在產業上分群(LED Binning)的問題，幫助找尋最適合的 Binning Process。

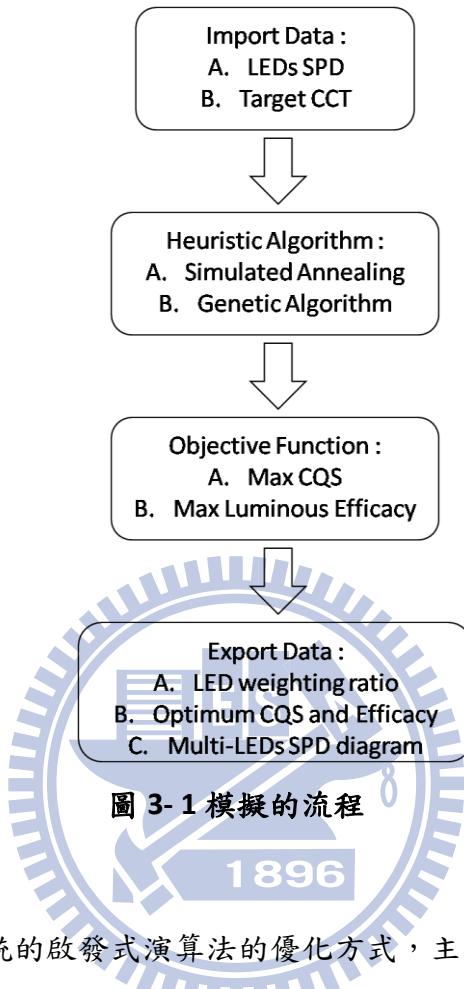
3.1 LED 混光模擬平台



研究中的模擬平台主要用 MATLAB® 內的 GUI(Graphic User Interface, 是一種以圖形化為基礎的使用者介面)來架構，這個平面是專給 LED 用以計算混光光譜。傳統的光源，發出的光譜強度分布早在製程上已被限制了，所以它們演色上的特性亦在出廠時也被確定，幾乎沒有可調的空間。所以我們善用 LED 對光譜的可調性設計一種界面，讓使用者可以針對他們想要的色溫，得到不同波段的 LED 應有的光強度分布比例，先讓 LED 混光合成的光譜達到使用者的目標色溫的色座標上，對可以達到該色座標的上混合光的光譜，再依據光源的光譜演色特性公式(前一章所述)，每組的混合光光譜 CQS 值和 Luminous Efficacy 都可被得知，最後比較後取出一組最好的 CQS 和 Luminous Efficacy 解。

模擬的主要流程如圖 3-1。一開始先要求使用者輸入參與計算的每種 LED 的光譜值還有目標參數，經過複雜的啟發式演算法優化求目標函數的全域最大值 (global maximum)或是最適當解，得到最佳解的 CQS 值和 Luminous Efficacy，最後混光平台會顯示每種 LED 應該給予的強度分配比例、光譜強度圖和色座標圖，如

此一來便完成這個模擬系統大致上的架構。



使用在此模擬系統的啟發式演算法的優化方式，主要分成兩類，第一種是模擬退火法(Simulated Annealing, SA)，第二種是基因演算法(Genetic Algorithm, GA)，為了可以找到全域最佳解，此兩種方法在模擬的系統中都有使用，分別在下兩節會做介紹。

3.2 模擬的架構

3.2.1 先行模擬 [19]

本 LAB 之前董雨隴學長在此混光系統中使用的優化方法，首要條件是要將多顆 LED 的強度疊加起來，最後的頻譜可以達到某一色溫的色座標，在之前的模

擬方法是考慮每個波長($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)的 LED 混成一個任意目標色點的頻譜，剛開始每個波長的 LED 是給予同樣的比重，藉著每次只增加一階或是減少一階 LED 的強度，套入色座標的公式(Eq. 2.1-2.2)，藉由計算前者的 xy 座標與改變灰階後的 xy 座標之差值當成一個指標，判斷下一組的改變量的方向，舉例來說，如果這次更改變量後，得到一個 xy 的座標直接近原先預設的目標座標值，那麼就以這個改變後的座標當為一個新座標，再繼續重複每次只增加一階或是減少一階 LED 的強度，然後再度套入頻譜色座標的計算方法計算，直到色點吻合目標色點的色座標為止，為了增加找尋最佳強度解的容易度，在黑體輻射曲線裡，我們將目標色點位置上的相關色溫線(Correlated Coordinate Temperature, CCT)(圖 3-2)用 y 座標間距 0.001 分割為 100 個色座標，如此一來相關色溫線上的每一個色點即被這個演算法視為近似目標色點的色座標，也就可以被套入目標函數中計算。換句話說，每次的計算只拿出這 100 個色點的其中之一個色點做為目標色點，對 LEDs 開始調整強度灰階，如果經過增加一次和減少一次的灰階仍然沒有比原始(初始的灰階)的色點更接近目標色點，那就放棄這個相關色溫的色點，再取下一個相關色溫的色點當作新的目標色點，重複演算直到搜尋完 100 組的色點後再比較這些留下的色點其灰階強度的目標函數值，找出最高值就接受它為該目標色點的最佳解。

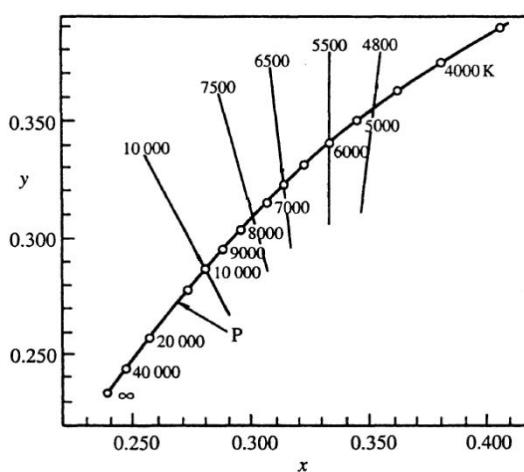


圖 3-2 Planck 曲線和相關色溫

這邊模擬的目標函數，根據 A.Zukauskas 等人提出的概念，將評價光源的指標們，以線性假設為前提下，將多個評價指標組合在一起，經過修改，本篇研究的目標函數將可以寫成：

$$F(I_1, \dots, I_n) = \alpha K + (1 - \alpha) CQS, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

I_1, I_2, \dots, I_n 代表參加混光的每顆 LED 的強度， K 為 Luminous Efficacy， CQS 代表 Color Quality Scales， α 為表示 K 和 CQS 之間的權衡的關係。

因此目標函數將可以寫成 LED 強度的函數，再套入前面求得目標色點的方式，將符合目標色點的 LED 組合強度套入目標函數 F 中，比較出最大的 F 值就是所求。但是這方法有個缺點，因為它擁有一百組色點，所以當第一回的增加減少灰階仍無法更接近該色點時，則放棄這個目標色點，再找下一個色點，如此一來，最後得到的最佳解未必是由原本所想要的目標色點所求得的最佳解之外，因為這種方式求解的路徑都會是同一種，所以落入 F 目標函數的局部解(local maximum)的機率就會提高很多，所以 CQS 和 Luminous Efficacy 也未必真的是此目標函數的全域解。因此，啟發式演算法求解剛好可以處理這種目標函數複雜的情形，更甚於它也可以處理多目標的最佳函數解。

3.2.2 啟發式演算法(Metaheuristics)

-模擬退火法(Simulated Annealing)

萬用啟發式演算法 (Metaheuristics) 是一種新興的最佳化演算法，這類演算法的概念經常是由觀察自然界所獲得的靈感，例如：基因演算法源自於生物演化、蟻群演算法習自蟻群的覓食行為、粒子群最佳演算法則效法鳥類的覓食。由

於這些演算法非常具有彈性，可求解許多不同問題，加上作法簡單且求解效率高，因此目前已經成為數量方法中最熱門、最重要的方法之一。在計算機科學中，對於處理單一目標或多目標函數複雜的最佳化問題，啟發式演算法提供一種求解的方式，藉由反覆計算函數以及判斷函數結果等重複的步驟逐漸逼近函數的解。啟發式演算法在優化過程中很少對於問題本身做出解題的預先假設，因此它擁有非常大的搜索解集合的空間之外，求得最佳解或次佳解的成功率也很高。啟發式演算法使用在複雜的數學模型雖然收斂速度可能會比較慢，但也較能將取得最適當解，因此現實世界中啟發式演算法很常用來解決問題。啟發式演算法處理許多實際問題時通常可以在合理時間內得到不錯的答案。本篇論文主要採用啟發式演算法的兩種數學模型，第一種是用模擬退火法計算整個目標函數。

1953 年，美國物理學家 Metropolis 等人提出利用 Monte Carlo Method 模擬在固定溫度下達到熱平衡的過程：

1. 在搜尋空間中每一點 S 代表某些物理系統的狀態。
2. 目標函數代表 $E(S)$ 代表此一狀態下系統的內能(internal energy)。
3. 對目前的 S 進行擾動產生 S' ，在依據 Boltzmann Gibbs 分布決定接受或是拒絕 S' 做為新的狀態。

於是模擬退火法的雛型就已經漸漸形成，在 1983 年，美國 IBM 的 Thomas J. Watson 研究中心研究員 Kirkpatrick 等人為使演算法更一般化，所以引入了溫度方案在這個熱平衡的過程裡[20]，由熱力學的角度來看就是退火的過程，所以稱之為模擬退火法。

模擬退火法簡單的說包括兩個循環，內循環與外循環。內循環是指在某溫度 T 時，內循環必須要經由最大的疊代次數之後才可指終止循環，每經過一個疊代便會產生一組新的狀態(新的 S')與之前的狀態做比較，越貼近的目標函數的解為可留下的解，如此循環下去；外循環則是指依據冷卻程式降低溫度，每到達一個新的溫度便會進入內循環中繼續疊代，而當新狀態不比原狀態更接近目標函數

的優化值時，新的溫度也決定新狀態可接受的機率，換句話說如果這個新的狀態的函數值偏離目標函數優化的條件時(跟原先的相較之下，有較差的目標函數值)，照理說應該要被淘汰，但因為可接受機率的關係，所以它有機會被留下，以另一個角度來看，這方式是允許往目標函數變差的方向，因此可以避免停在局部最小值，當外循環的溫度降低至終止溫度時，模擬退火法程式就結束計算。

模擬退火法大致上的流程如圖 3-3。定義圖中的參數， I 為各種 LED 的強度值， T 為溫度， K 為隨機機率， B 為降溫因子。一開始給定初始值，初始值就是目標函數的變數；之後再決定外循環的終止設定，即終止溫度，這個條件的設定可以視情況做修正，如果終止溫度設得太低，有可能模擬時間太長但得出的結果卻不一定比終止溫度設高一點者來的好，必須要經過幾次的模擬比較答案後則較易掌握終止溫度的範圍，外循環的條件設定還有一項是降溫的速度，也就是決定外循環的循環次數；接著就是內循環的設定，內循環的設定跟外循環的降溫速度有相關，如果當外循環的疊代次數高時，內循環就可以減少疊代次數，反之亦然；最後還有一項稱為可接受機率的參數，這個參數是根據外循環疊代的次數項而會做動態修正，它在每次外循環下都給定某一機率讓搜尋方向往優化的反方向走，如此才可以避免局部極值的問題；所以再不斷的循環搜尋的過程中，目標函數便會慢慢的收斂到某值(如果當目標函數真的存在極值的情況)，可以在每次的循環中記錄該循環的最佳值，最後比較最佳值的變動程度判斷這個目標函數是否真的會收斂，當函數最後收斂到某值時(整體趨向於一個穩定值時)，整個模擬退火法的演算就結束了[20-22]。

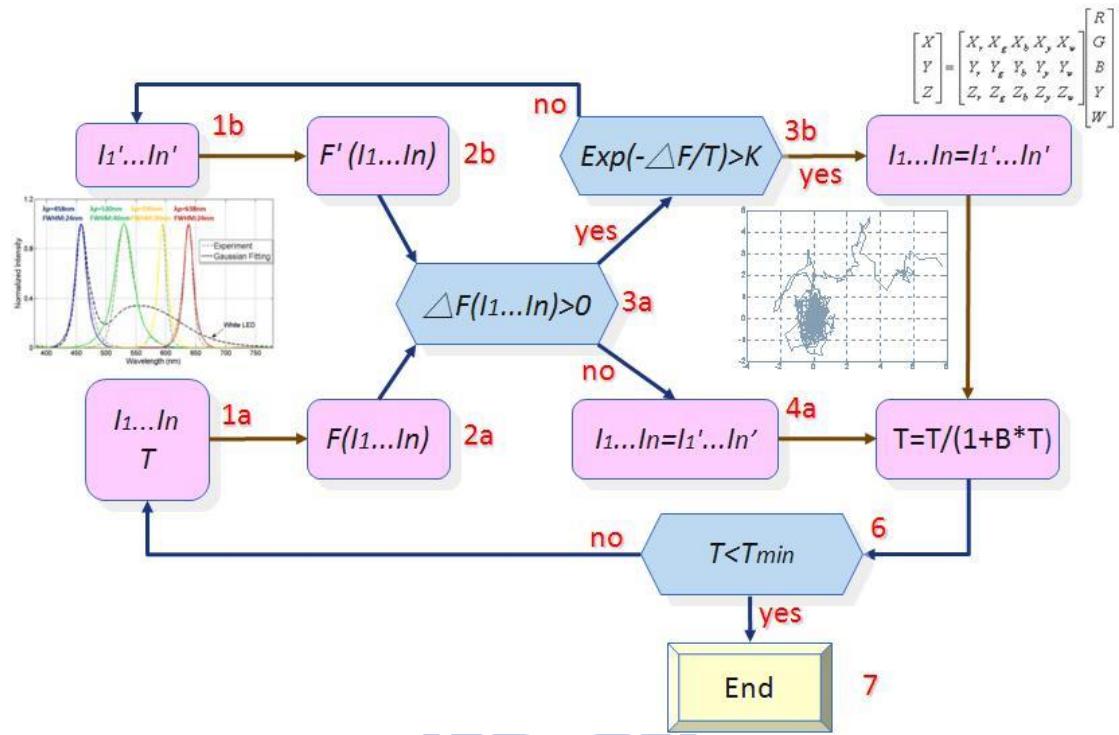


圖 3-3 模擬退火法演算機制流程

了解模擬退火法的主要機制後，則換決定目標函數的變數項，由前面所述，目標函數配合實驗的架構將改為 $F(I_1, I_2, \dots, I_n)$ ，以 LED 強度為目標函數的變數，目前我們實驗中擁有的 LED 陣列中 LED 的總類是四種(不含白光)，所以放進目標函數可改寫為 $F(I_1, I_2, I_3, I_4)$ 。利用色座標的之間轉換，可以將目標函數簡化改為 $F(I_1)$ ，在代入模擬退火演算法可以省去一些計算的時間。

先從四顆 LED 中任取三顆，三點色座標標示出一個色域圖之後，加上強度可以得到合成的色座標點的三刺激值(Eq. 3.2)，暫時稱之為 I_5 的 XYZ 值，

$$\begin{bmatrix} X_{15} \\ Y_{15} \\ Z_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{13} & X_{12} & X_{11} \\ Y_{13} & Y_{12} & Y_{11} \\ Z_{13} & Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_3 \\ I_2 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

I_4 的強度跟 I_5 合成最後的目標色點(Eq. 3.3)，假定目標色點是 D65 色座標，

$$\begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{14} & X_{15} \\ Y_{14} & Y_{15} \\ Z_{14} & Z_{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

這邊的 I_5 其實是一個虛擬值，它是為了幫助最後合成目標點的三刺激值而設定的虛擬值，因為 I_5 本身就是由 I_1 、 I_2 、 I_3 的值得出的，所以這邊的 I_5 其實是被 I_1 、 I_2 、 I_3 決定的，因此可以將 I_5 假設為 1。如此一來目標函數就被改寫成只有 I_4 這項變數(如 Eq. 3.4)。

$$F(I_4) = \alpha K + (1 - \alpha) CQS, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

最後，將這目標函數加入模擬退火演算法計算。設定模擬退火法的初始值是這個演算法最困難的步驟，包括初始 I_4 的給定，即外循環的條件設定，還有內循環的疊代設定與內循環中目標函數可被接受的機率等等，必須要比較不同的參數設定下模擬退火法的演化狀況，判斷得出的目標函數結果是不是真的往優化方向進行，因此若要得到準確的目標優化的結果，初始值及疊代的條件設定盡量要隨著程式演算的狀況而做調整。

因為初始值的選取不易，而且通常初始值會落在某一定的範圍中，反之 LED 強度會有負值出現，所以目標函數可算是一個有限制範圍的函數，要處理這種有有限制範圍的目標函數，我們加入了條件限制函數法，稱為懲罰函數法。基本概念是將一個有條件限制的參數最佳化問題，轉換成一個沒有條件限制的最佳化問題，作法是將目標函數項後面增加多一個懲罰因子項(penalty term)，以我們的目標函數為例，則修改為：

$$F(I) = \alpha K + (1 - \alpha)CQS + M \times [\min(\text{contrains}, 0)]^2, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

(Eq. 3.5)

M 是一個極大的參數，如果隨機選取的初始值不在目標函數的限制條件內，目標函數會因為乘上 M 的因素而遠遠偏離最佳值，以我們的系統而言(Eq. 3.5)則為當變數 I 不在限制範圍內，懲罰因子項則會使 F 越來越小，而理想所求為 F 極大值，因此透過此種方式自然將限制條件隱含在目標函數內中，選取初始值也無須再加上額外的限制。

將系統擴展到 N 種以上 LED 混光，則會有 $N-3$ 個維度的變數，以本篇論文實驗為例，共有五種 LED 光源，所以有兩個維度的變數空間。從五顆 LED 中任選兩顆並給予初始強度使其三刺激值合成 P 點，



$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_P = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ Y_1 & Y_2 \\ Z_1 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (Eq. 3.6)$$

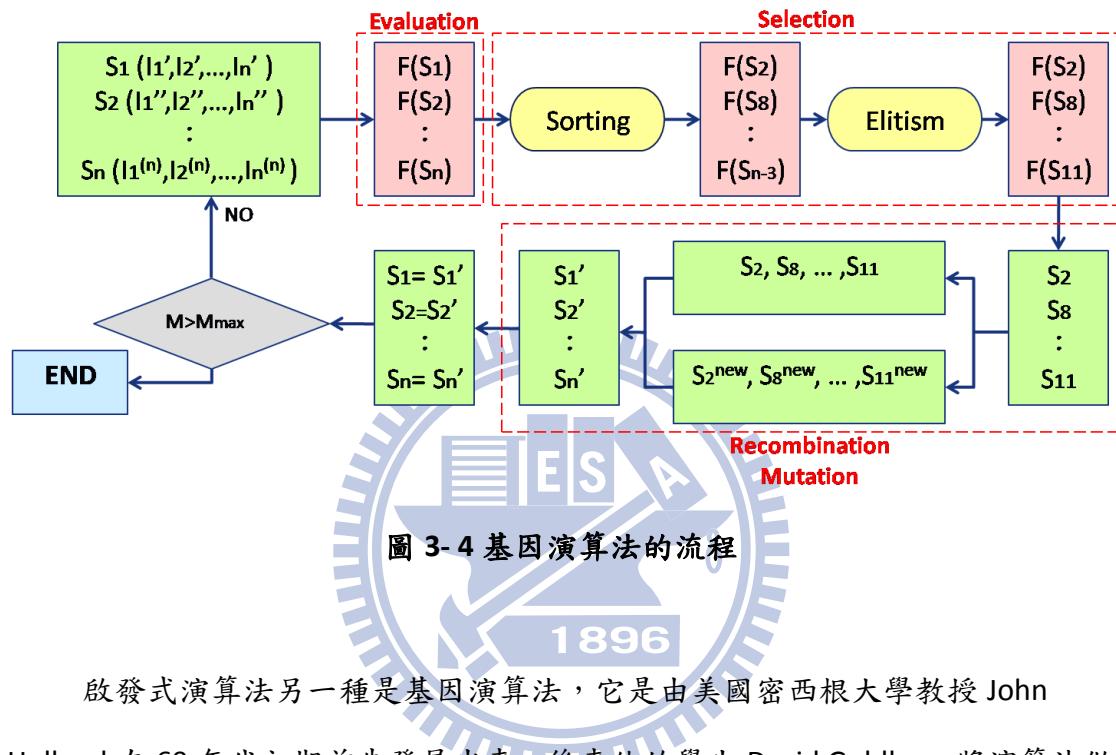
最後的目標為 D65 色點，所以剩下三種 LED 的強度就可以被 Eq. 3.7 轉換式決定：

$$\begin{bmatrix} I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_3 & X_4 & X_5 \\ Y_3 & Y_4 & Y_5 \\ Z_3 & Z_4 & Z_5 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_P \right\} \quad (Eq. 3.7)$$

因此在五種中隨機挑選兩種 LED，使初始值在 I_1 、 I_2 下，其餘 LED 強度比例也被求得，但跟四顆的情況一樣，目標函數也必須加上限制範圍選擇 I_1 、 I_2 的數值的範圍，以免經過演算法計算後強度有負值出現，最後比較這 10 種情況下的最佳值，演算法即完成。同理，解 N 種 LED 以上的混光光源的目標函數時，則有 $N-3$

種維度的變數空間，利用此方式將逐漸搜尋極值，到此模擬退火法的優化演算也趨於完整。

3.2.3 啟發式演算法-基因演算法 (Genetic Algorithm)



啟發式演算法另一種是基因演算法，它是由美國密西根大學教授 John Holland 在 60 年代初期首先發展出來，後來他的學生 David Goldberg 將演算法做些修正改寫後，基因演算法因此發揚光大而被廣泛使用[23]。以達爾文進化論「物競天擇，適者生存」為基礎，一種模擬自然界演化過程的計算方式，也可以稱之為演化計算(Evolutionary Computing)或稱為演化式演算法(Evolutionary Algorithms)。運算機制主要包括：重組、突變、選擇。基因演算法利用隨機多點同時搜尋，對於複雜的數學函數而言，比起傳統的直線搜尋法利用單點輔以梯度資訊搜尋方式，更可避免掉入局部最佳解，再者基因演算法僅需對於目標函數進行計算不需要計算目標函數的梯度。基因演算法的運算主要將參數經過編碼轉成為適合基因演算法運算的數據結構，所以在搜尋分析上不受參數連續性的限制，因此更可以應用在不同類型的最佳化問題。常用的編碼方式有兩種，第一種是將

參數轉成二進制(Binary)，第二種是實數(Real-valued)編碼，本篇研究裡評估 LED 強度值數量與數值後遂將初始值採用實數的編碼的方式進行分析。圖 3-4 是基因演算法計算的流程圖，M 為疊代的次數，I 為 LED 的強度值。跟模擬退火法不同的地方是演算開始前給定初始值的數量，模擬退火法只要給定一個初始值即可，而基因演算法初始值的數量端視問題的大小決定，需要初始群體的意義就在於基因演算法利用隨機的選擇使族群中的初始值擁有多樣性，同時也使得搜尋目標函數解能具有隨機和多點的特性。

一般而言，對於高維度的目標函數問題，會需要比較多的初始群體，隨後代入目標函數中計算和比較函數值之後，選擇出優良群體，淘汰目標函數值差的組合。挑選優良群體的方式有很多，主要用意都是由群體(Population)依據目標函數值的大小來決定可以進入重組步驟的個體(Individual)，這種選擇方式有很多，本篇論文選用用排序演算法(Sorting)，將每種目標函數算出的結果按一定順序排列的演算法，挑出最佳的 N 組解(Elitism)進入重組(Recombination)階段。參數重組時依據重組機率從最佳 N 組解中隨機地任意兩個參數，經公式計算產生兩個新參數的一種過程；重組的過程中也包含突變機制(Mutation)，突變機制其實是為了提供隨機解，在任意挑選的情況下，這些突變解可能會離開原本的局部區域，因而提高找到全域極值的機率。最後，在反覆的進行這系列的步驟後，當全部的演算達到指定演算次數或是目標函數已無明顯的改變時，即可結束運算求得優化解[23-25]。

第4章

多波段 LED 混光平台驗證

經過演算法平台的計算後，此章將比較上面介紹的兩種優化演算方法的結果，並將在不同 LED 顆數的優化結果下，討論 CQS、輻射光視效能與發光效率的比較，最後利用本實驗室的 LED 陣列測量光譜驗證計算的結果。

4.1 實驗架設

本論文中用來模擬的 LED 是採用實驗室的 LED 陣列系統，它由一個 LED 陣列燈箱以及一個控制盒所組成(圖 4-1 a)，採用的 LED 陣列中共有五種 LED 光源，分別是紅、綠、藍、琥珀色以及白光 LED，其規格與頻譜如表 4-1 及圖 4-1(b)所示。LED 陣列燈箱由 64 個單位的 LEDs 所組成，每一個單位擁有固定的比例的 LED 顆數，而控制盒利用 PWM 系統(Pulse Width Modulation，脈衝寬度調變，簡稱 PWM)將每種 LED 光強度切割成 128 灰階，由模擬程式計算出的結果調整每種 LED 的灰階數，最後測量 LED 依比例混合光源頻譜，測量頻譜的實驗儀器架設如圖 4-2(a)所示，將 LED 光源以 45 度入射一片全反射的白板，而頻譜儀(機型為 Agilent Technologies, SR-UL1R)則位於白板前一公尺處正面接收由 LED 光源的反射光譜。圖 4-2(b)為演算法的計算平台，經由這個平台得到的數據再與實驗量測的光譜在下幾節中比較討論。

表 4-1 五種 LEDs 的規格

LEDs	Efficiency (lm/W)	$2\Theta_{1/2}$	CIE 1931 x,y
Red (638±12nm)	74.8	30	0.6969, 0.3027
Green (530±20nm)	37.8	23	0.1773, 0.7261
Blue (458±12nm)	20.2	30	0.1313, 0.0682
Yellow (595±10nm)	65.8	30	0.5833, 0.4157
White (broadband)	65.5	30	0.2874, 0.2935

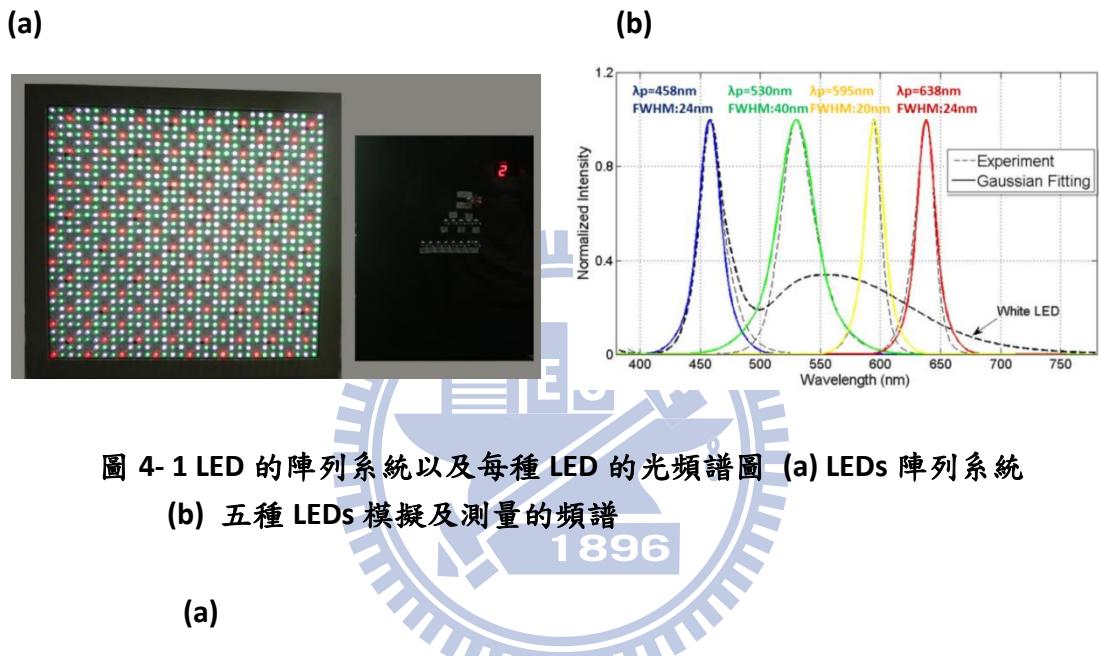


圖 4-1 LED 的陣列系統以及每種 LED 的光頻譜圖 (a) LEDs 陣列系統
(b) 五種 LEDs 模擬及測量的頻譜



(b)

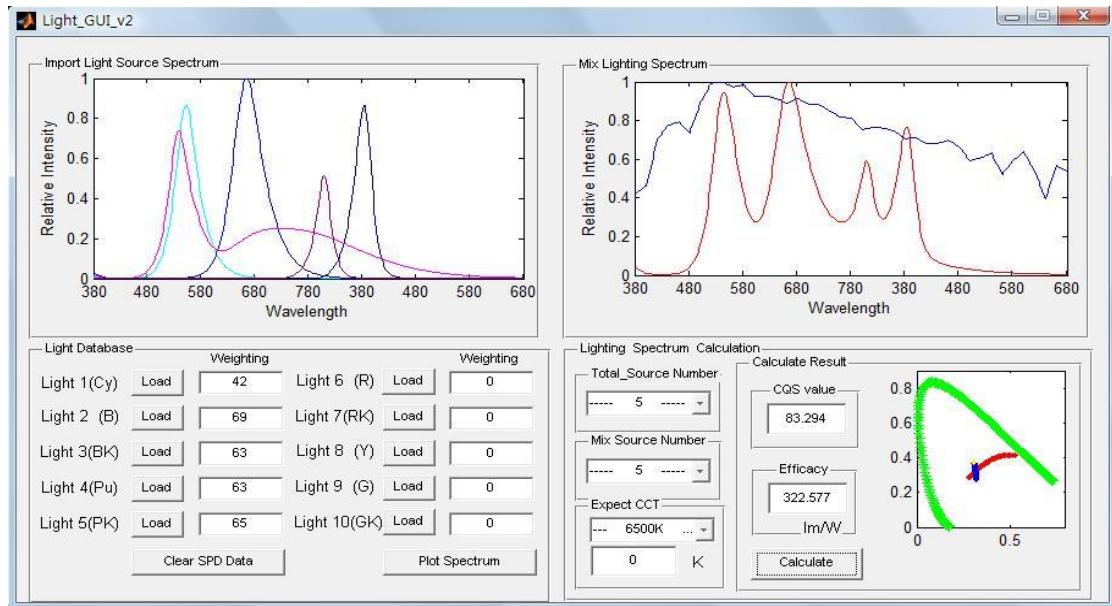


圖 4-2 實驗架構和演算平台 (a) 測量頻譜的實驗架設 (b) 演算法的計算平台

4.2 實驗結果

根據第三章論述的演算法為基礎，討論此五種 LED 對目標色溫所有可能的排列組合，CQS、發光效率以及輻射光視效能三者之前的關係比較圖，色溫限定在 6500K，目標函數為 $F = \alpha \times \left(\frac{\text{CQS}}{\text{CQS}_{\max}} \right) + (1 - \alpha) \times \left(\frac{\text{Efficacy}}{\text{Efficacy}_{\max}} \right)$ ，而權重因子初始設定 $\alpha = 0.7$ 。將混光分成三組進行，分別是三種、四種、五種 LED 混 6500K 色點，圖 4-3 中為此三組別中用模擬退火法演算目標函數的最佳化值，並把 LED 混光頻譜繪於圖上，其中紅線處為模擬頻譜，而藍色線則為根據計算後的結果，使用 LED 陣列系統量測的頻譜。圖 4-3 a 為三顆混光將四種 LEDs(藍色、綠色、紅色以及琥珀色)挑取其中三種進行，而四種 LED 混光(圖 4-3 b)則使用非白光的 LEDs 進行混光，五種 LEDs(圖 4-3 c)則為包含白光 LED 進行混光，由圖中模擬計算的光譜結果與實驗測量的光譜結果是近似吻合的。權重因子 α 的數值可以根據使用者對照明光源的需求而調整，研究中將討論 α 值在 0 到 1 之間 CQS 與輻射光視效

能的關係，圖 4-4 為五種 LEDs 組成的混光，並利用模擬退火法與基因演算法在不同 α 值下的 CQS 與光視效能值，圖中形成的曲線又可以稱之為 Pareto Front。Pareto Front 代表的意義為在設定條件下，可以藉由演算法優化達到的最適當解的集合。圖 4-5 為不含白光的四種 LEDs 的 Pareto Front。由結果可以發現，不論是四顆混光或是五顆混光，用這兩種演算法得到的優化結果是近乎相同的，交互驗證得出的最佳解。圖 4-6 和圖 4-7 分別表示利用模擬演算法演算以及基因演算法計算四顆及五顆 LED 在 α 值在 0 到 1 之間的優化結果，由這兩個圖可以發現，四顆跟五顆演算目標函數值 α 值較高的區域最佳值是會重疊的，即表示在強調輻射光視效能(α 值約 0.9 到 1 之間)下，少顆數的 LED 混白光也可以達到跟多顆 LED 混白光一樣的目標結果。而不論是哪一種演算法，輻射光視效能與 CQS 在不同的權重因子 α 下的最佳值集合圖都呈現同樣的趨勢，當 CQS 值越高則會減低輻射光視效能的值，這 trade-off 的現象雷同 CRI 和輻射光視效能之間的關係，因為光譜頻率分布越平均演色性指標則越高，但輻射光視效能最佳值是接近單色光 555 nm(綠光)波長的範圍，因此越好的輻射光視效能，光譜越集中於綠光區域，演色性也會比較差。

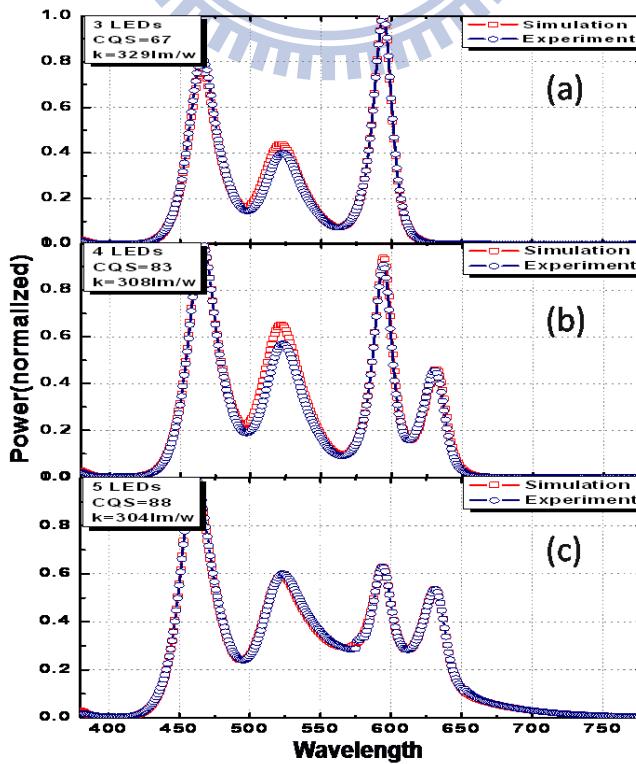


圖 4-3 模擬退火法演算三組不同顆數 LED 組合之最佳值的頻譜

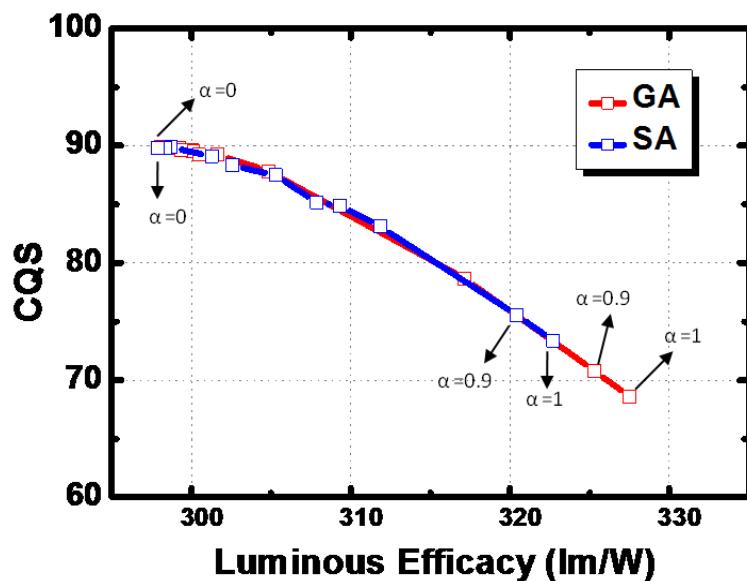


圖 4-4 五顆 LEDs 在權重因子 α 為 0-1 間的最佳 CQS 以及光視效能

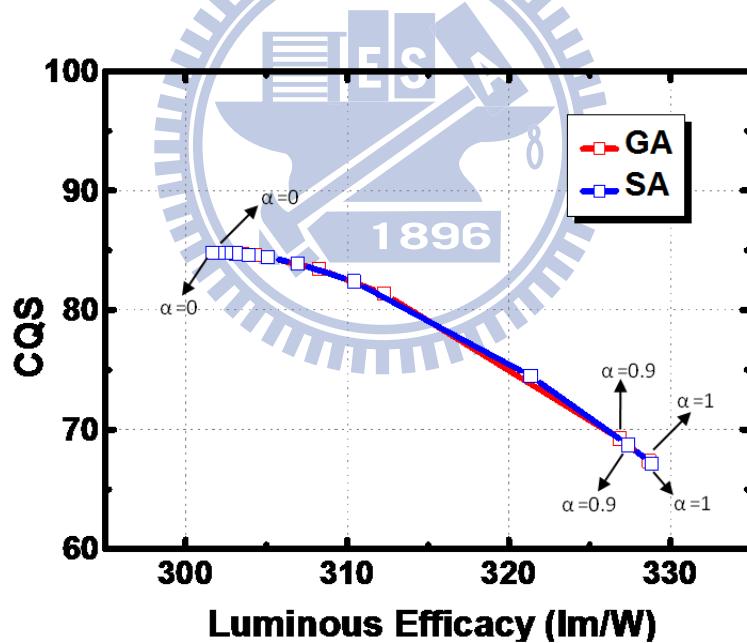


圖 4-5 四顆 LEDs 在權重因子 α 為 0-1 間的最佳 CQS 以及光視效能

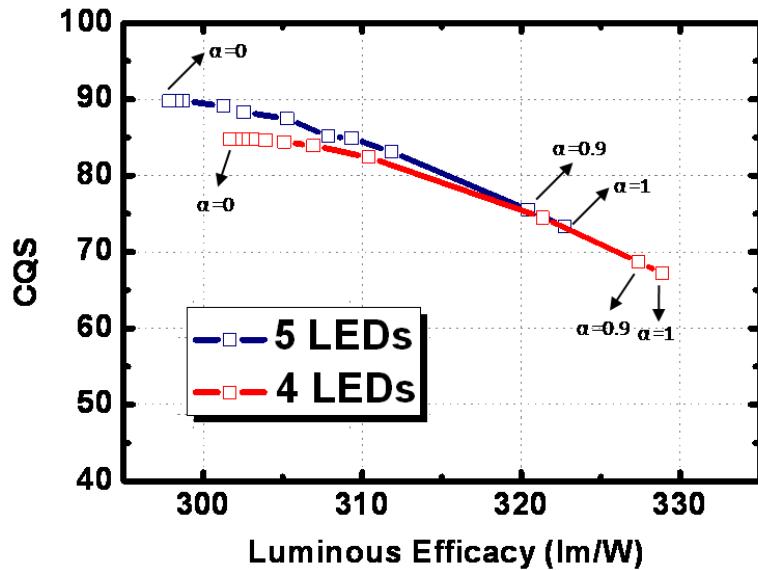


圖 4-6 用模擬退火法演算在權重因子 α 為 0-1 間的最佳 CQS 以及光視效能

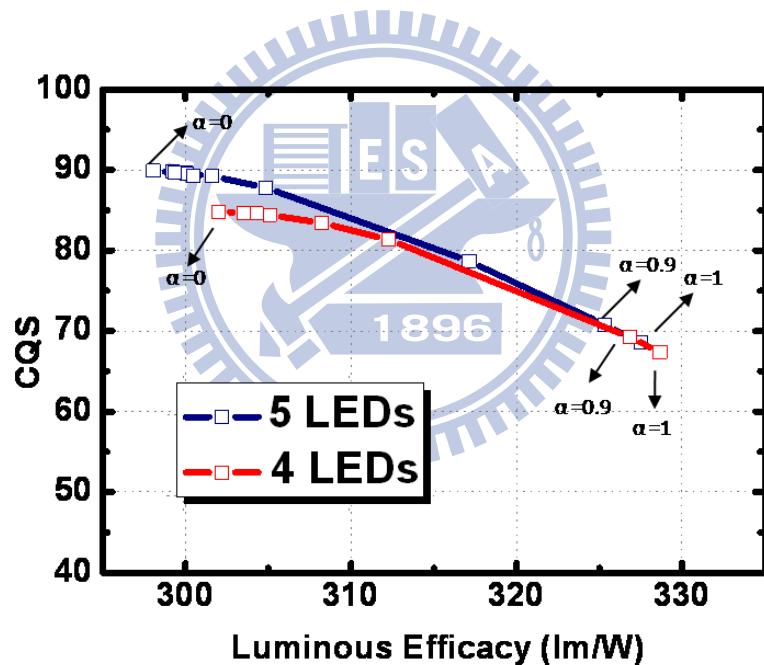


圖 4-7 用基因演算法演算在權重因子 α 為 0-1 間下的最佳 CQS 以及光視效能

表 4-2 三種演算法於五顆 LED 混光的模擬優化最佳值結果($\alpha=0.7$)

Intensity	R (623nm)	G (525nm)	B (465nm)	Y (589nm)	W	CQS	Luminous Efficacy (lm/W)
Tung's Simulation	63	69	42	63	65	83.3	322.6
SA Algorithm	79	46	39	39	98	89.2	301.1
Genetic Algorithm	50	42	55	90	65	89.5	300.0

表 4-3 三種演算法於四顆 LED 混光的模擬優化最佳值結果($\alpha=0.7$)

Intensity	R (623nm)	G (525nm)	B (465nm)	Y (589nm)	CQS	Luminous Efficacy (lm/W)
Tung's Simulation	66	61	64	64	71.5	313.6
SA Algorithm	21	24	43	66	84.5	304.3
Genetic Algorithm	22	24	44	65	84.6	303.9

將這三種優化方法，先行模擬的方法(Tung's simulation)、模擬退火法(SA)、基因演算法(GA)做一整裡比較，表 4-2 與表 4-3 分別是五顆 LED 混光和四顆 LED 混光用這三種方法優化出最佳強度分布以及照明參數值，目標色溫設定為 6500 K，權重因子 α 為 0.7。模擬退火法與基因演算法得出的 CQS 與輻射光視效能幾乎是一致的，這兩種方法得到的目標函數確實接近全域最佳解。

接著比較 LED 輻射光視效能(Luminous Efficacy)和發光效率(Luminous Efficiency)。這部分想要探討光視效能和發光效率之間存有的關係，光視效能與發光效率之間的轉換公式如 Eq. 4.1：

$$\text{Luminous Efficiency} = \text{Luminous Efficacy} \times \text{Quantum Efficiency} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

量子效率(Quantum Efficiency)是電能轉換成光能的效率，因主要受到 LED 內部製程的限制，根據實驗用的 LEDs 出廠規格利用 Eq. 4.2 計算可以大略得到每種 LED 的量子效率[26]：

$$I(\phi) = I_0 \cos^m \phi$$

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \frac{\phi_1}{2})} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$\Phi = \int I(\phi) d\Omega = \frac{4\pi I_0}{m+1} (1 - \cos^{m+1} \phi_{\max})$$

I為 LED 的光源強度分布， ϕ 是視角， I_0 是在光源表面法線方向的強度，最後 Φ 為光源的光通量大小。 Φ 再乘上輻射光視效能後經由計算後得發光效率，圖 4-8 為五顆 LEDs 混光的發光效率與光視效能的比較，在用模擬退火法計算結果(圖 4-8 a)顯示光視效能與發光效率成正相關(相關係數為 0.9983)，用基因演算法(圖 4-8 b)算出的光視效能與發光效率是負相關(相關係數為-0.9675)，在四顆混光中(圖 4-9)，模擬退火法與基因演算法的相關係數分別為-0.9982、-0.9996，在圖 4-8 與圖 4-9 這幾張圖中可以發現光視效能與發光效率並未存有如演色性對光視效能一樣有正相關或是負相關的關係存在，推測原因可能為在 LED 混光中，紅色 LED 的發光效率最高，而當光視效能高時，因為視明效率曲線峰值是綠光，偏重綠光的結果下，紅光強度成份較少，所以相乘後得的發光效率也較差，又因為白光 LED 發光效率較高，如果混光中的白光 LED 強度成分較多，發光效率可以跟光視效率同時提高呈現正相關。由於本論文中的演算法計算的目標函數中尚未包含發光效率，但由圖 4-8 以及圖 4-9 顯示出發光效率是必須另外設成一項獨立的參數並放入目標函數一起優化，因為它除了跟輻射光視能效率有關之外與元件本身的量子效應也息息相關，故無法單用光視能效率就判斷發光效率的高低。

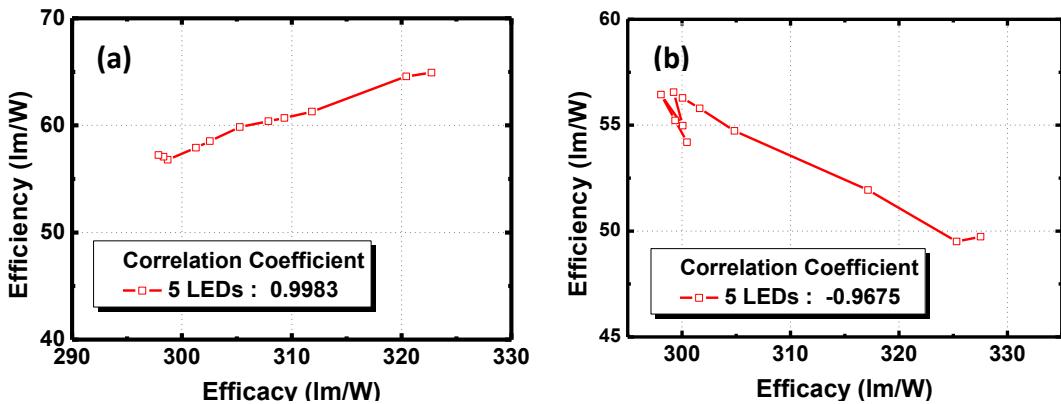


圖 4-8 五顆 LEDs 不同的權重因子 α 下的最佳發光效率以及光視效能

(a) 模擬退火演算法 (b) 基因演算演算法

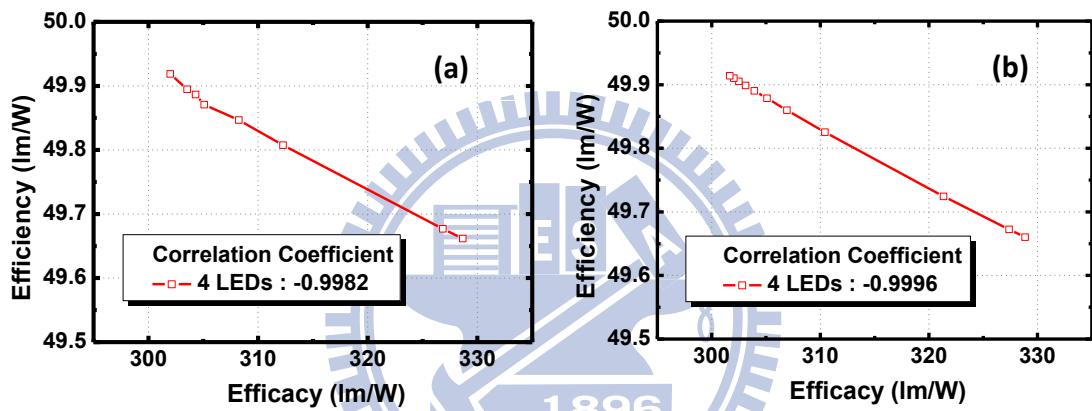


圖 4-9 四顆 LEDs 不同的權重因子 α 下的最佳發光效率以及光視效能

(a) 模擬退火演算法 (b) 基因演算演算法

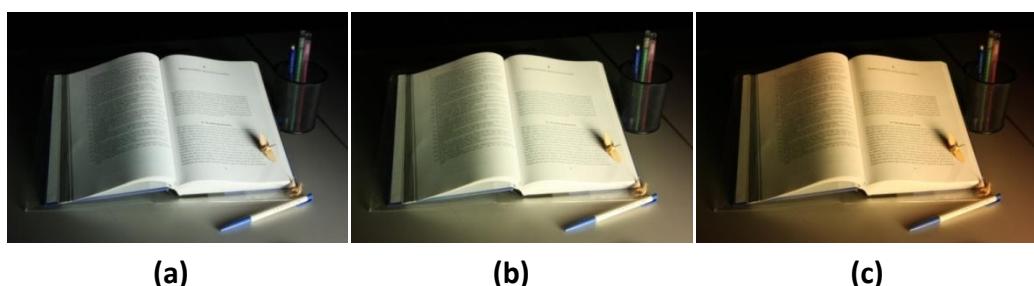


圖 4-10 三種不同的目標色溫下被照物的色外貌 (a) 6500 K (b) 5000 K (c) 2850 K

表 4-4 三種不同目標色溫下的運算結果

Target CCT	6500K	5000K	2856K
Color	T12 fluorescent lamp	HID lamp	Tungsten lamp
CQS	88	87	81
Luminous Efficacy (lm/W)	304	302	324
Luminous Efficiency (lm/W)	60.4	58.5	57.8

論文中利用優化演算法計算加上不同的目標色溫設定，最後利用 LED 陣列系統做為照明光源照射被照物體所呈現的色外貌如圖 4-10 所示。根據一般照明常用的色溫標準，我們挑選了三種色溫分別是 6500 K、5000 K、2856 K，其色點座標與標準照明體 D 65、D 50、A 光源一樣，圖 4-10(a)(b)(c) 則為 LED 陣列系統光源照射在一般的被照物體上的色外貌。表 4-4 則是在這三種色溫下目標函數配上權重因子利用演算法計算這三種色溫的最佳的結果，由表中顯示所有色溫都可以達到 80 以上的高演色性(高 CQS 值)同時輻射光視效能也可以維持 300 lm/W 以上，不過當乘上 LED 外部量子效率後，得到的發光效率卻都小於 60 lm/W，推測其原因應為 LED 在製程上的出光效率仍顯不足，期待未來可以改善元件的外部量子效率增進發光效率。

第5章

結論與未來展望

本篇論文中建構 LED 混光平台的方式，分成模擬平台以及 LED 陣列平台，在模擬方面，使用者提供在某固定色溫條件下，結合照明光源評價參數的限制條件下設定目標函數，並以每種 LED 的強度為變數，各種強度組合都可以得到一組目標函數值，輔以啟發式演算法尋找目標函數的全域極大值，並且在平台中顯示出每種 LED 的強度分布以及照明評價參數的數值，照明參數包含 CQS、LED 發光效率以及輻射光視效能等；實驗驗證的部分，利用 LED 陣列平台，將演算法得到的每種 LED 的強度值輸入 LED 陣列平台中，經用頻譜儀等實驗儀器測量光譜並與模擬的光譜做一比較，實際的光譜與模擬的幾乎吻合一致，於此 LED 混光平台的建構已趨於完成。

未來的目標就近程而言，還可以將目標函數做些推廣和修正。因為受限於 LED 陣列中的限制，所以我們只取現有的五顆 LED 模擬，未來可以替換不同型號或是數量的 LED 陣列，利用這個系統演算出適合的光譜分布進行比較，更甚者，目前採用的目標色點是精確的 D65 標準光源的色座標來做為模擬的條件，但因為人眼對於顏色是有某程度的接受的範圍，在色彩工程學上稱為麥克爾當橢圓 (MacAdam Ellipsis)[13]，因此我們不但可將目標色點的數目增加同時也不會影響人眼視覺色彩感知，而目標函數中搜尋最佳值的範圍也會跟著提高。另外，以往我們習知評價演色性指數 Color Rendering Index(CRI)，近來不斷受到許多學者的質疑，因為 CRI 的色票選用上的不足以及數學上的計算方式容易出現負值，這對 LED 這類型短波長的照明光源而言並不那麼適用，因此，本篇論文選以 CQS 為替代 CRI 做為評價 LED 的演色指標，CQS 也為目前被認為具有潛力可以取代 CRI 成為新一代的演色性指標之一。不過，仍然還有其他的演色性指標漸漸發展欲取代 CRI 在光源色彩評價的地位，像是 Colour Harmony Rendering Index (HRI)，採用 CIECAM 色彩空間來計算色差的方法，人眼對每種顏色擁有的色差的容忍度不一

樣，而 HRI 將這種情形考慮進去，它為計算測試光源對於每種色票顏色色差的容忍度程度值[27]，然而，這類型的色彩評價指標還是持續發展中，未來若有更完整的評價演色性的指數也將會放入目標函數中做為新的光源評價參數來討論。

另外，光視能效率雖然被放入目標函數中計算，但這並不表示光視能效率增加時發光效率也會成正相關的增加，所以若要用光視能效率評價 LED 照明光源仍然有不足之處。於是，未來的目標函數也許可以加入發光效率這一項進入考量，但因為發光效率要考慮的因子很多，所以目標函數可以預期會更複雜，Eq. 5.1 為加入發光效率項的目標函數。

$$F(I_1, \dots, I_n) = \alpha \times \left(\frac{\text{efficacy}}{\text{efficacy}_{\max}} \right) + \beta \times \left(\frac{\text{CQS}}{\text{CQS}_{\max}} \right) + (1 - \alpha - \beta) \times \left(\frac{\text{Efficiency}}{\text{Efficiency}_{\max}} \right) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

透過啟發式演算法的優化模擬解決多目標函數的這種方式，將來除了應用於 LED 混光照明系統中，加乘智慧型照明的概念，可以讓使用者決定需要的環境光參數，提供不同的光譜資訊，使照明不再只是單調的提供燈光，而有彈性調整的空間。此外更進一步 LED 在業界一直有分 bin 的問題，LED 的分檔(Bin)則是指把 LED 的數種不同特性如光強度、顏色波長、參考電壓、色溫等等進行等級排列，使得相同等級裡面的 LED 封裝或 LED 晶片呈現落在等級數值範圍裡的表現。因此 LED 按照出廠的好壞被分 bin 之後，倘若藉由這套系統的想法，LED 擁有比較差的 binning 的部分藉由組合強度等等的方式，也可以達到與高等級的 LED 一樣的色點或目標的參數值，增加 LED 的有效利用，退一步降低 LED 的成本。

參考文獻

- [1] E. Fred Schubert *et al.*, “*Transcending the replacement paradigm of solid-state lighting*,” Optics Express, **16**, 21835 (2008)
- [2] 林志明, 「LED 產業發展概況」, 電子業-LED, 64, (2004)。
- [3] E. Fred Schubert, Light-Emitting Diodes, Cambridge university press (2006).
- [4] Regina Mueller-Mach *et al.*, “*White light emitting diodes for illumination*,” Proc. SPIE, **3938**, 30 (2000).
- [5] Isamu Nikilsamu Niki *et al.*, “*White LEDs for solid state lighting*,” Proc. SPIE, **5187**, 1 (2004).
- [6] K. Takahashi *et al.*, “*Luminescence properties of blue $La_{1-x}Ce_xAl(Si_{6-z}Al_z)(N_{10-z}O_z)$ ($z \sim 1$) oxynitride phosphors and their application in white light-emitting diode*,” Appl. Phys. Lett., **91**, 091923 (2007).
- [7] Neil Holger White Eklund, “*Multiobjective Visible Spectrum Optimization: A Genetic Algorithm Approach*,” Ph. D Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute (2002).
- [8] Harald Ries *et al.*, “*Optimized additive mixing of colored light-emitting diode sources*”, Opt. Eng., **43**, 1531 (2004).
- [9] A. Zukauskas *et al.*, “*Optimization of White Polychromatic Semiconductor Lamps*,” Appl. Phys. Lett., **80**, 234 (2002).
- [10] A. Zukauskas *et al.*, “*Progress in III-Nitride Based White Light Sources*,” Proc. SPIE, **4776**, 82 (2002).
- [11] A. Zukauskas *et al.*, “*Spectral Optimization of Phosphor-conversion Light-emitting Diodes for Ultimate Color Rendering*,” Appl. Phys. Lett., **93**, 05115 (2008).
- [12] A. Zukauskas *et al.*, “*Rendering a Color Palette by Light-emitting Diodes*,” Appl.

- Phys. Lett., **93**, 021109 (2008).
- [13] Noboru Ohta *et al.*, Colorimetry, John Wiley & Sons Ltd, England (2005).
- [14] J'anos Schanda, Colorimetry Understanding the CIE System, A John Wiley & Sons INC., America (2007).
- [15] Yoshi Ohno *et al.*, “*Toward an improved color rendering metric*,” Proc. SPIE, **5941** (2005).
- [16] Yoshi Ohno, “*Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra*,” Proc. SPIE, **5530** (2004).
- [17] Yoshi Ohno *et al.*, “*Development of a Color Quality Scale*,” National Institute of Standards and Technology (2006).
- [18] Commission Internationale de l'Eclairage. “*A Review of Chromatic Adaptation Transforms*,” CIE 160 (2004).
- [19] Yu-Lung Tung *et al.*, “*Platform of Optimized Additive Mixing via Multi-color LEDs*,” MS. Thesis, Department of Photonics, NCTU (2009).
- [20] S. Kirkpatrick *et al.*, “*Optimization by Simulated Annealing*,” Science, **220**, 671 (1983).
- [21] Franco Busetti, “*Simulated Annealing overview*,” www.geocities.com/francorbusetti/anneal.htm, 2003.
- [22] B. Suman *et al.*, “*A survey of simulated annealing as a tool for single and multi-objective optimization*,” JORS, **57**, 1143 (2006).
- [23] Goldberg *et al.*, Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley (1989).
- [24] Randy L. Haupt, *et al.*, Practical Genetic Algorithm, Wiley (2004).
- [25] Davis, L. *et al.*, Handbook of Genetic Algorithm, Van Nostrand Reinhold (1991).
- [26] Hao Xiang, *et al.*, “*Freeform surface lens design for uniform illumination*,” Journal of Optics A: Pure Appl. (2008).

[27] Peter Bodrogi, *et al.*, “Why does the CIE colour rendering index fail for white RGB LED light sources?” *CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment*, Japan (2004).

