

High performance LED street lighting using reflective luminaire

Chih-Wei Hsu*, Yen-Bo Chen

Department of Electrical Engineering National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

cwhsu@mail.nutn.edu.tw

Abstract

We propose a street lighting design consisting of a cluster LED and hexahedral reflective lamps. The light intensity distribution curves of the proposed luminaire are optimized by reflecting light with proper slant reflector. The numerical simulation results show good uniformity illumination on the street area. The overall illuminance uniformity is about 0.72, and the transverse uniformity under the luminaire is about 0.84.

Keywords: LEDs, Uniformity, Light of utilization, Light intensity distribution curves

Corresponding authour:

cwhsu@mail.nutn.edu.tw

DOI:10.53106/2223448920241014020

05

利用反射型燈具設計高性能 LED 路燈

許志維, 陳彥伯

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本研究探討 LED 結合六面體反射型燈具為基礎進行道路照明設計，利用反射板產生的反射角度分布，運行配光曲線最佳化，提升燈具橫跨道路的照度均勻性，實現高性能的道路照明。本文利用幾何光學進行光線追跡法分析，根據結果修正模型的導光結構，追求均勻性的同時兼顧光利用率，經數值分析後，整體道路均勻性可高達 0.72、燈具正下方橫跨道路之照度均勻性為 0.84。

關鍵詞：LED、均勻性、光利用率、配光曲線

1. 緒論

全球每年許多國家極度推廣節能減碳，以求防止氣候變遷。不過日常所及的照明裝置還是能看到傳統燈泡和日光燈管，傳統光源缺點是能耗大且不環保，因此發光二極體 (Light Emitting Diodes, LEDs) 開始代替一些傳統光源，廣泛運用在你我周圍，充斥了每個角落[1]。與其他光源相比 LED 具有明顯的優勢，例如，功率消耗較小、發光效率高、體積小、具有方向性、不易發熱影響壽命，與傳統燈泡相比壽命高出 10 倍[2]。基於 LED 研發技術持續進步，效能勢必不減反增，特別是 1997 年中村修二博士研究出藍色發光二極體，帶來美好的白色光源，使 LED 運用更加遼闊，目前使用於 LED 路燈、建築景觀照明、汽車燈具、醫療光源、農用光源等，照明不單只是照明，與創意、藝術、娛樂、生技、醫療結合，磨擦出夠多視覺與生活的火花，讓彼此的環境迎來夠多的變化。從事室外活動時，馬路及人行道又或者公共場所，面積大的情況下一盞照明設備是不夠的，需要更多的燈源來供應，數量也變得可觀，傳統的路燈較常使用高壓鈉燈，但演色性不佳，具有高效率的 LED 成為道路最為理想之燈源[3-11]。至今，二次光學設計主要分成穿透型(凸透鏡)設計和反射型設計。穿透型設計主要用於室外照明。由於燈具在室外會受到環境的影響，所以需要有燈罩來保護 LED，因此許多人直接在燈罩上面做二次光學的設計。多數的研究者使用自由型態(freeform)透鏡來設計[4-10]，不過穿透型設計最大的缺點是設計繁雜，製作相比反射型也較為複雜，所以此文章選用設計較簡單之反射型燈具做設計。

根據許振彬研究發現，簡易型反射燈具的設計符合路燈照明的法規要求[12]，但橫跨道路(水平方向)的均勻性不佳[11]，本論文希望透過燈具進一步優化，讓水平方向配光曲線最佳化，以及提高橫跨道路方向的均勻性。

2. 架構與設計

普遍來說，一次光學設計是指 LED 封裝製程部分，為的是提高出光效率、解決光強度、光通量、出光角度、光強度的分布、色溫分佈與範圍。二次光學設計是為了彌補一次光學設計在使用特定照明場域的不足，再次調整或修正出光角度和光強度的分佈，使特定場域的光場分布符合相關法規要求，且提供均勻照明及更低的能耗。反射形燈具參考許振彬的研究如圖 1 所示[11]，用較簡單之六面體結構(高反射率材質: 95%反射、5%吸收)進行延伸探討，我們假設頂部長方形反射面(頂板)X 方向長度為 W ，Y 方向長度為 L ，頂板到底部出光面長方形的距離為 H 。從 X-Z 平面方向來看，其梯型的張角定義為左、右板角度；從 Y-Z 平面方向來看，其梯型的張角為上、下板角度，LED 擺放於燈檯兩側，Y-Z 面可定義出燈台角度。並將燈具單側排列於路寬 10m、燈具間隔 30m 道路上，燈具出光面離地架高 10m 且內推路肩 1.5m，如圖 2 規畫出第一、第二、第三車道。

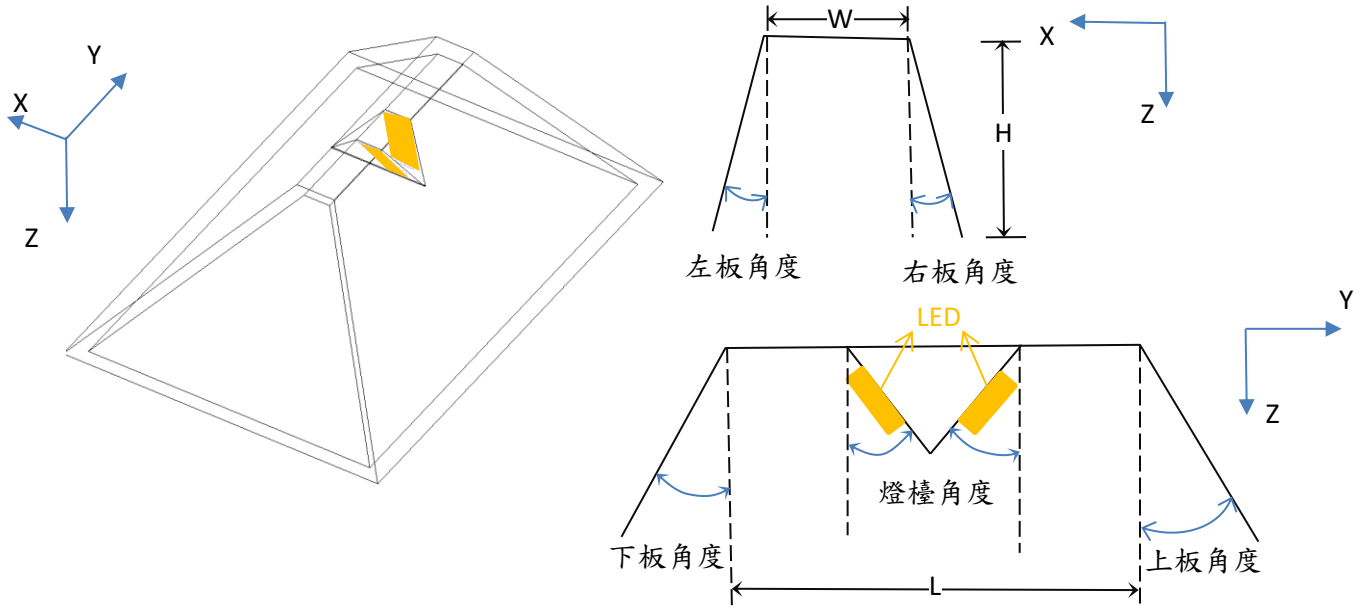


圖 1 燈具示意圖

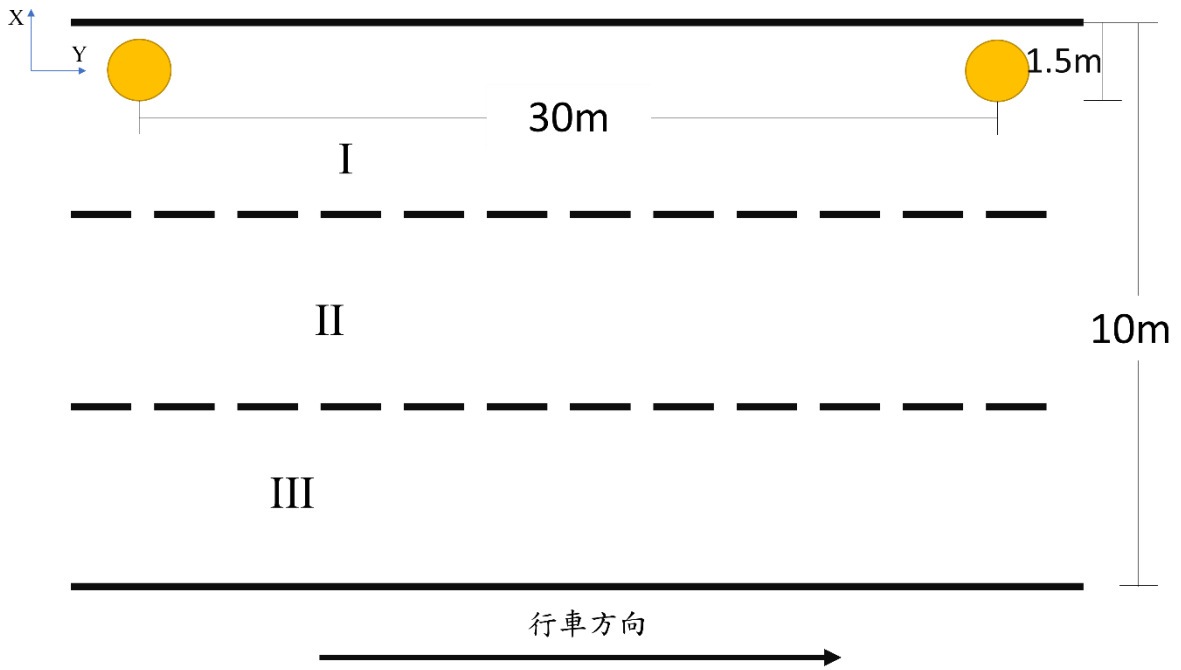


圖 2 道路路燈配置示意圖

一個光源與觀測點間存在一定角度，其水平面照度隨著角度做 cosine 三次方的修正[11]，也因為此特性，我們根據圖二參數利用三角函數計算出燈具在道路面有效的出光範圍，如圖 3 中 X 方向(跨越車道)觀測面可得 -40.35° (路燈與第三車道路肩)及 8.53° (路燈與第一車道路肩)。參考圖 4 可得到道路面的照度如下式[11]:

$$E_H = \frac{I_\theta \cos \theta}{P^2} = \frac{I_0 \cos^3 \theta}{H^2} \quad (1)$$

式中 θ 為光源到被照點的連線與光源鉛錘線的夾角， P 為光源和被照點之最短距離， H 為光源之垂直高度， I_θ 為出光強度。為了讓燈正下方橫跨車道 X 方向的照度均一化，參考上式(1)推得理想水平配光曲線如圖 5。分析理想配光曲線，主次峰比值(主峰出光強度/次峰出光強度)約 2.2，兩峰值角度差約 50° 。

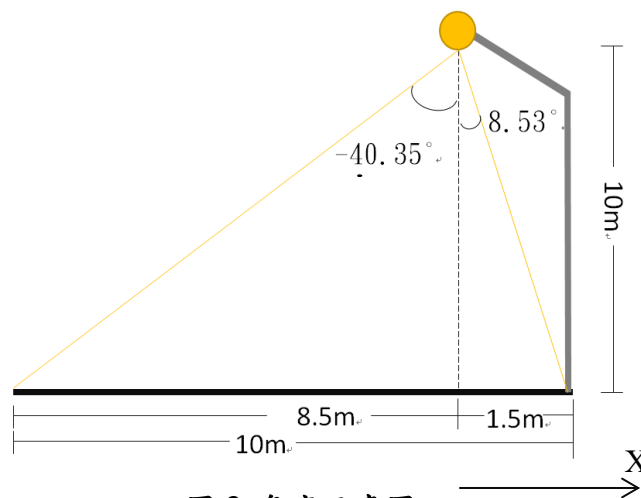


圖 3 角度示意圖

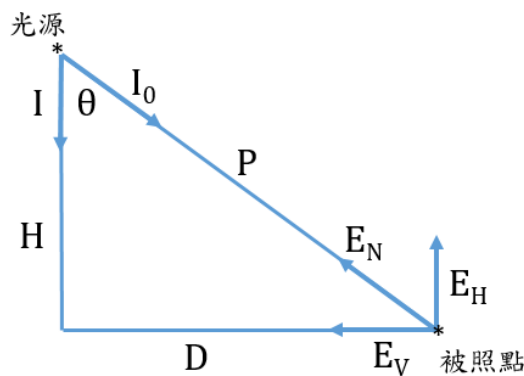


圖 4 照度公式示意圖

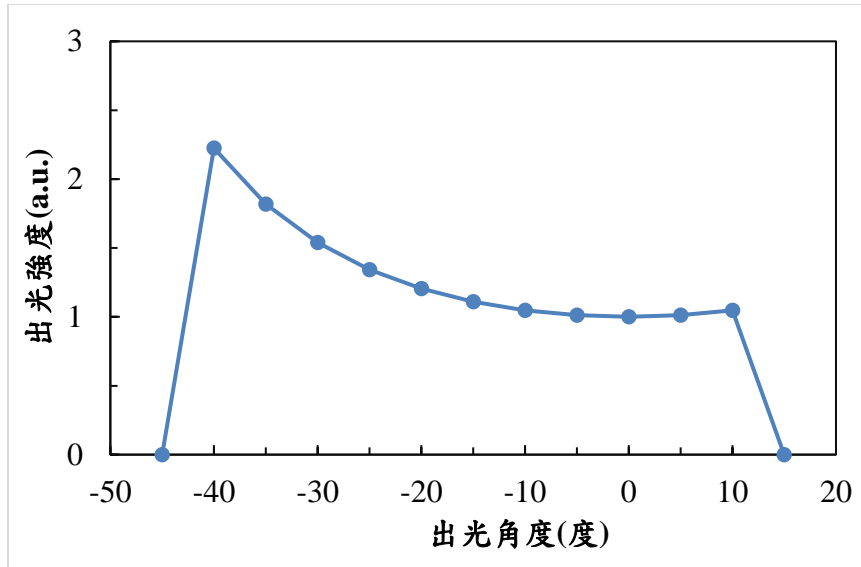


圖 5 理想配光曲線

3. 數據模擬分析

根據許振彬碩論[11]可知左右板條件影響水平配光曲線，參考其結果，固定 $L=10\text{cm}$ 、 $W=2\text{cm}$ 、上下板角度 72 度及高度 $H=20\text{cm}$ 、燈檯角度=33 度，為了實現如圖 5 的理想配光曲線，我們希望在負角度會有一個相對強的峰值出現，所以我們利用反射特性設計比較高的左板($H=20\text{cm}$)搭配比較短的右板($H=6\text{cm}$)如圖 6 插圖所示。圖 6 是左板角度固定為 50 度，改變左右張角合(左板角度+右板角度)從 40 到 80 度的水平配光曲線變化趨勢圖。在特定的情況下，主峰會出現在左板角度內縮 10 的角度，不過為了觀察方便，往後的水平配光線若形成有效的主峰，把主峰的角度平移到 -40 度與理想配光曲線做匹配。圖 6 中發現張角和大到一定程度峰值會偏離左板設定角度且鈍化，無法形成有效的主次峰分布;若過小主峰強度過強，正角度的光大幅的減少不利於次峰形成。把左板角度內縮 10 度的位置設定為主峰的位置，相距 50 度之度數為次峰。圖 7 是左板角度界於 40 到 60 度與左右板張角合界於 40 到 80 間之主次峰比值關係圖，圖中可知當左板角度或張角和變小時，主次峰比值變高，反之則變小。接續參考圖 6 和圖 7，發現主次峰比值小於 1.5 代表並無預期的主峰出現;大於 2.1 則是正角度的光快速消失，不利於次峰形成，因此把比值的參考範圍訂至 1.5~2.1 來進行後續分析。圖 8 是左右張角合固定為 50 度，在不同左板角度變化的水平配光曲線趨勢圖，藉由圖 8 可得當左板角度太小，正角度出光強度偏低，不利次峰形成;左板角度大則主峰峰值下降，正角度出光變多導致光利用率變低。有了以上分析，整理出左板 50 度且張角和 50 度和 60 度進行後續分析。

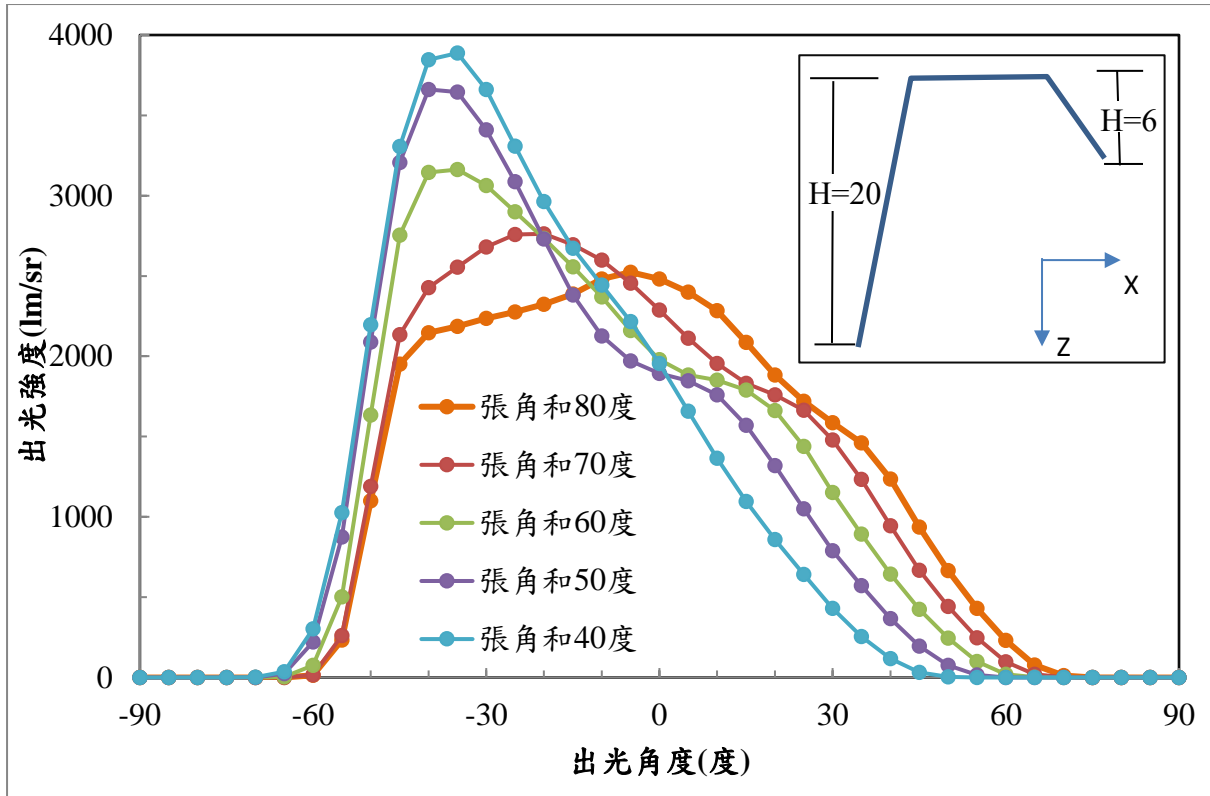


圖 6 左板角度 50 度，水平配光曲線隨著張角和的變化趨勢圖

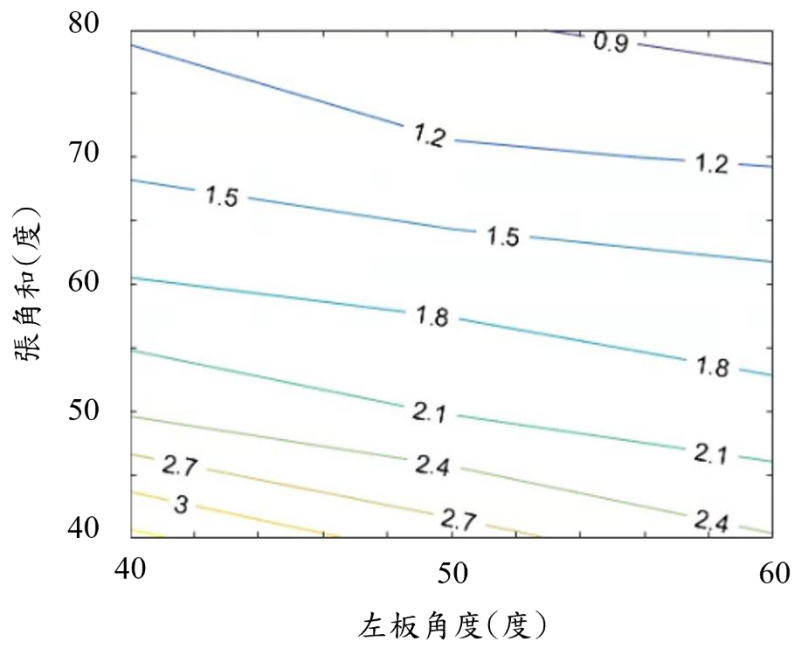


圖 7 於不同左板角度與張角合條件下，主次峰比值變化關係圖

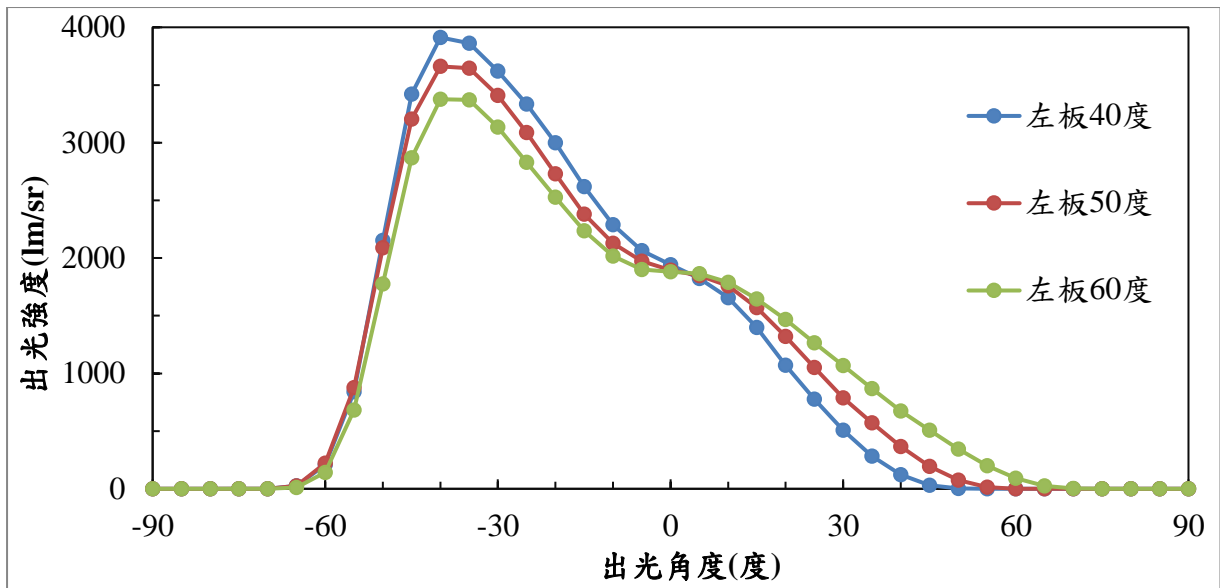


圖 8 張角和 50 度，水平配光曲線隨著左板角度的變化趨勢圖

圖 9 是考慮在不同右一板高度條件下，對於水平配光曲線的影響，因設計想法是利用小角度右一板把正方向的大角度的光搭配左板利用到主峰位置，目的是讓主峰峰值明顯增加，也因為這個效應，必須考慮右一板的效果。圖中可知主峰的光強度隨著右一板的高度增加而增加，反之，正角度的光強度則減少。右一板高度 H 變高的優點能讓主峰效果及光利用率變好，缺點則使正角度剩餘的光不足以形成次峰或迫使主次峰比值過高；高度 H 降低可以讓主次峰比值更接近 2.2，但光利用率相較於前者劣化許多，基於以上分析我們採用中間值右一板高度 $H=6\text{cm}$ 後續分析。

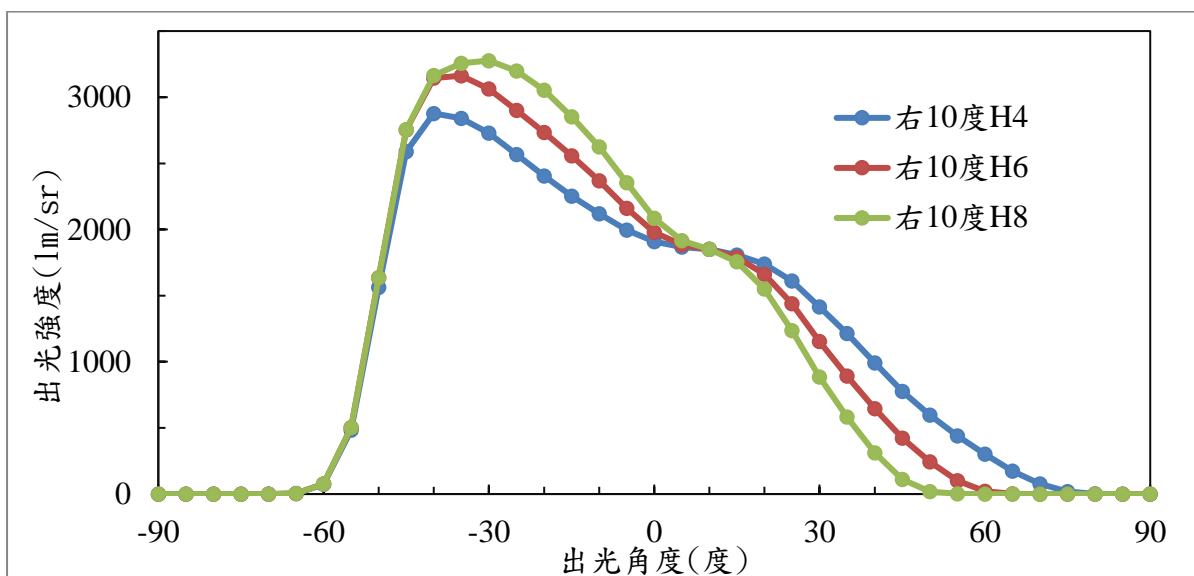


圖 9 水平配光曲線隨右一板高度關係圖

根據圖 6、8 與 9 可以發現配光曲線主峰尖角不夠尖銳，此時主峰兩側仍有大量的光分布，意味著光利用率低同時影響光均勻性。為了解決此情況，勢必要在左板增加第二或第三塊不同角度板把外側的光運用在我們需要的角度內，追求均勻性的同時兼顧光利用率，為了評斷這兩項，我們定義了主峰對應之角度減 5 度即負角度(對應的是光利用率)，主峰對應之角度加 5 度即正角度(對應的是均勻性)。負角度比值代表負角度與主峰的出光強度比值，越低代表光利用率越好;正角度比值代表正角度與主峰的比值，則根據理想配光曲線此比值越接近 0.817 越好。基於以上標準，我們新增左二板傾斜角度為界於 35 到 45 度間，左二板高度 $H_{左二}=0\sim 15\text{cm}$ ，設定 $H_{左一}+H_{左二}=20\text{cm}$ ，觀察其正負角度比值如圖 10 與圖 11。圖 10 為右板 0 度且張角合為 50 度，此圖中可發現正角度比值有個最小值出現，不過此時的負角度比值表現都已高於 0.9。

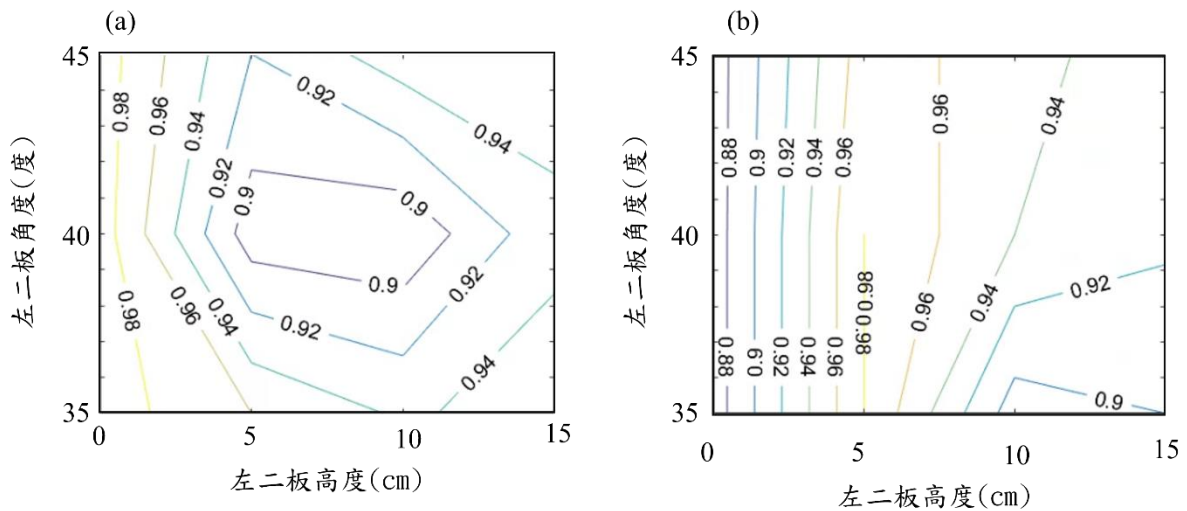


圖 10 右板 0 度，在不同左二板條件下，(a)正角度比值 (b)負角度比值

圖 11 為右板 10 度在不同左二板條件下正負角度比值關係圖，正角度比值顯示有兩個局部最小值，雖然其值相較於右板 0 度如圖 10 時有改善且較接近理想值，然而對應條件之負角度比值仍高於 0.9。

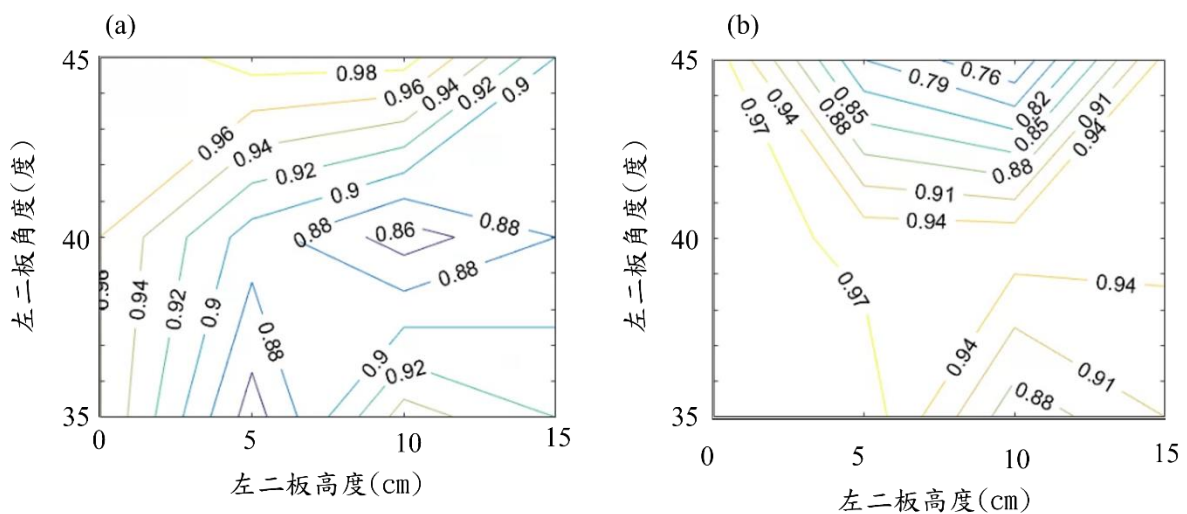


圖 11 右板 10 度，在不同左二板條件下，(a)正角度比值 (b)負角度比值

總結以上訊息，得知負角度比值(光利用率)還須加強，所以我們加上了一塊左側延伸板(左三板)降低其負角度比值，而左延伸板條件為左二板角的傾斜角度減五度，高度均為 5cm。我們新增左三板的條件下觀察其正負角度比值如圖 12 和如 13 所示。當右板 0 度，可發現負角度比值在圖 12(b)的右上角區域小於 0.9，證實可以達到降低負角度比值的効果，但正角度比值於另外的情況可較接近 0.817，不過兩者條件互斥，找不到均衡點。

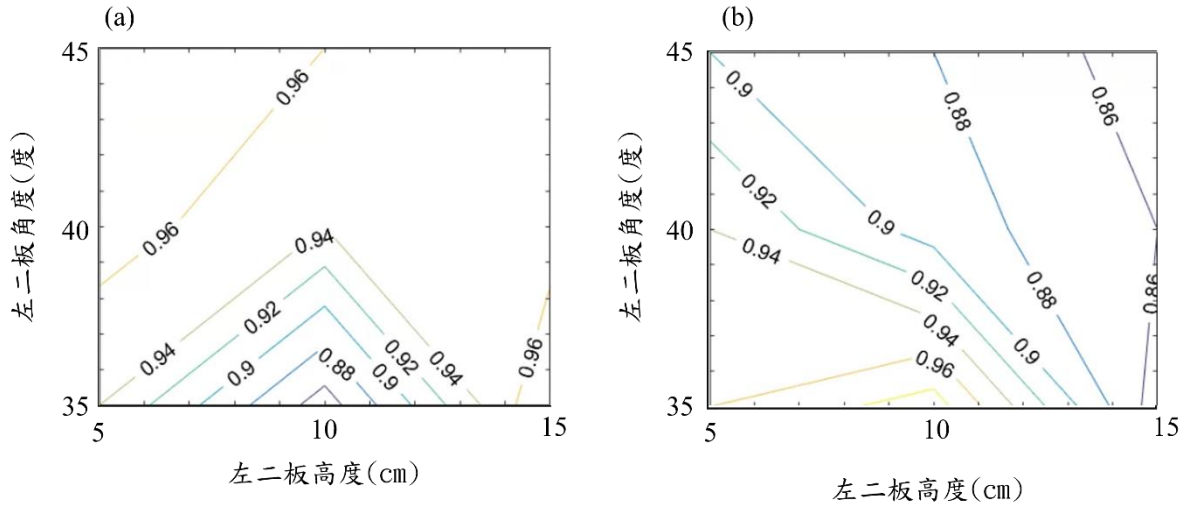


圖 12 右板 0 度搭配左三板，在不同左二板條件下，(a)正角度比值 (b)負角度比值

當右板 10 度時，則在圖 13 中發現紅色圈選處可讓正負角度比值皆低於 0.9，滿足光利用率與均勻性的要求。所以我們選用左一板 50 度高度 5cm、左二板 40 度高度 15cm 加上左三板 35 度高度 5cm 製造左側主峰並做後續次峰的討論。

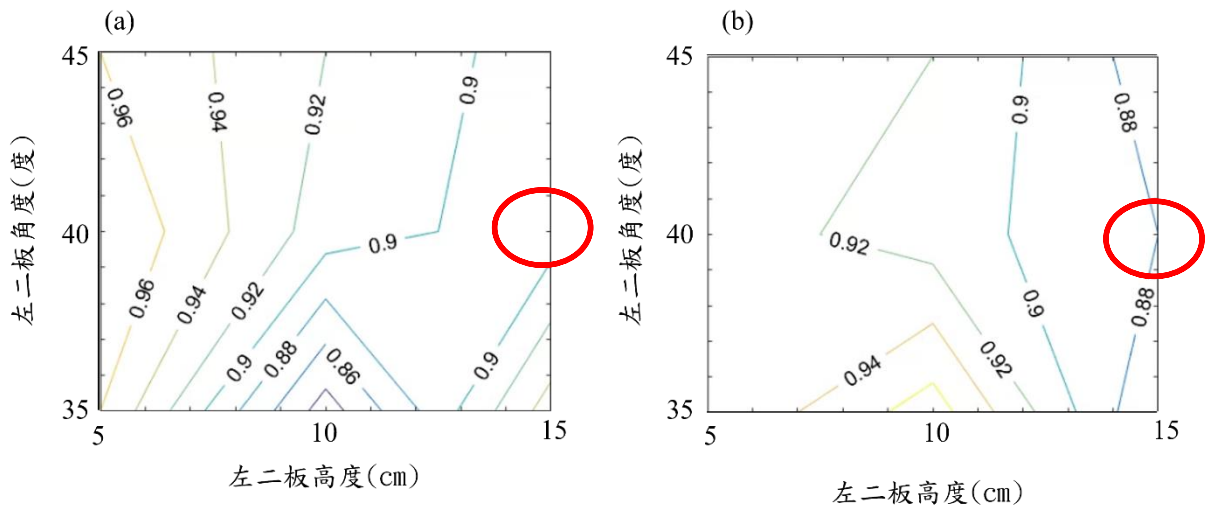


圖 13 右板 10 度搭配左三板，在不同左二板條件下，(a)正角度比值 (b)負角度比值

完成了左側反射板的設計並形成有效的主峰接著要針對次峰分析，首先引入右二板修飾次峰。圖 14 是固定右二板高度為 6cm 根據不同右二板角度條件所得到的水平配光曲線關係圖，得知新增右二板可把大角度的出光反射到對應小角度的區域，而提升小角度的出光強度，受影響的範圍與右二板角度有關，例如：右二板 35 度影響的範圍是 5~20 度(但出光強度仍低於理想配光曲線)，右二板 25 度影響範圍是 -15~15 度(但局部區域出光強度高於理想配光曲線)，而右二板 30 度影響範圍則是 -5~15 度，剛好與理想配光曲線較為匹配。圖 15 是同樣右二板角度且不同右二板高度下水平配光曲線關係圖，因為右二板角度固定，影響範圍之角度也就不變。受影響範圍內出光強度的增幅會與高度呈正相關，不過影響值會有個邊際效應遞減，當正角度的光全部被反射完之後就不會有後續變化，當右二板高度過高時會讓 5 到 10 的光強度超過理想配光曲線，反而會有個最佳值存在，綜合數據結果我們可訂出右二板為 30 度、高度 $H=10\text{cm}$ ，如圖 16 所示。

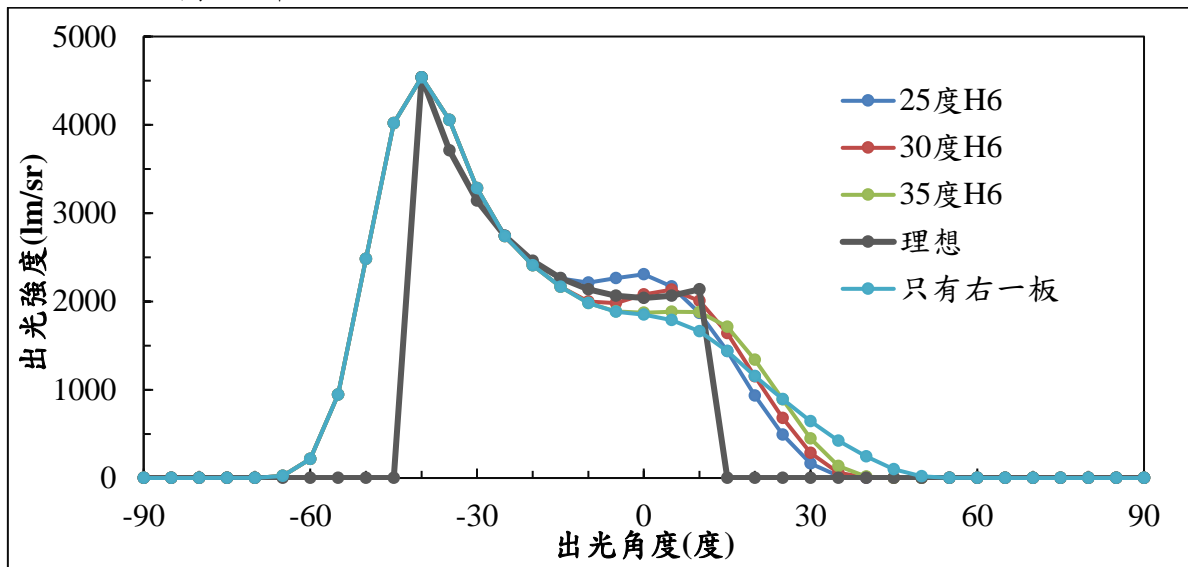


圖 14 不同右二板角度得到的水平配光曲線圖

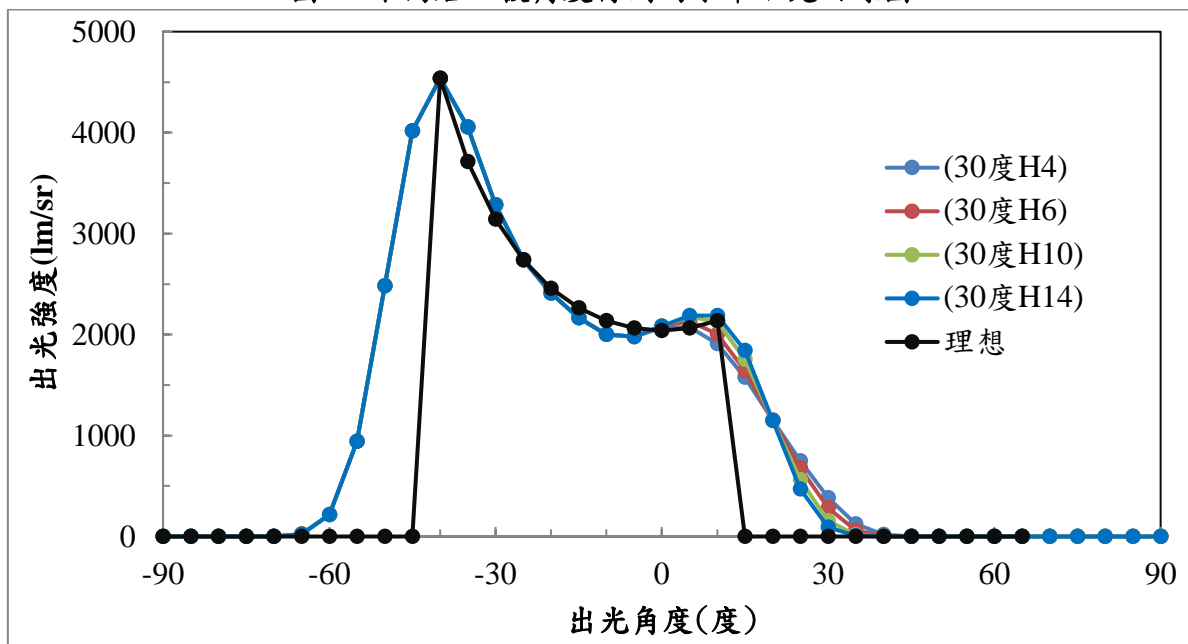


圖 15 不同右二板高度得到的水平配光曲線圖

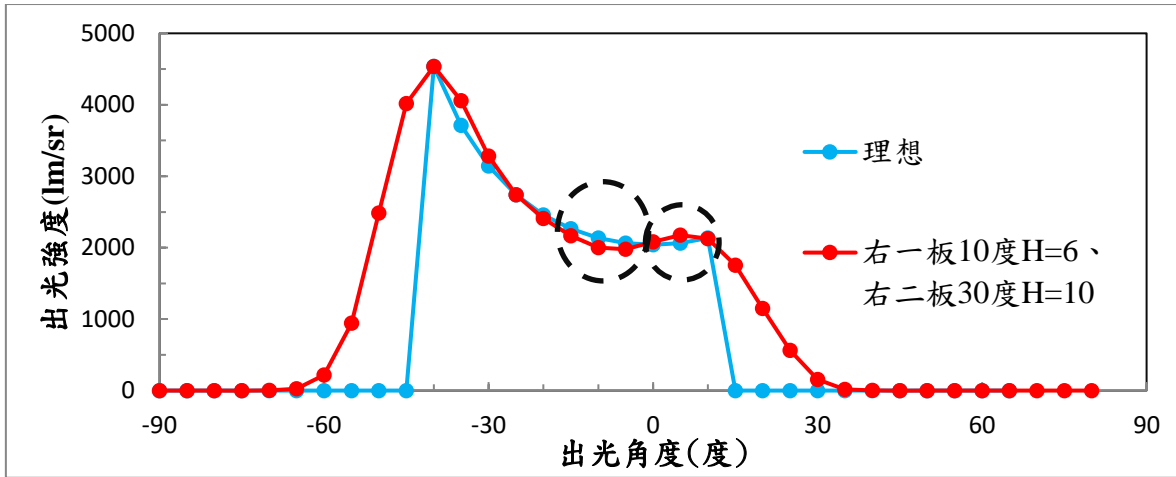


圖 16 右一板 10 度 H=6、右二板 30 度 H=10

圖 16 是根據上述右二板條件下得到之水平配光曲線，不過圖中圈選區段處仍然有差距，所以我們用了以上同樣的分析方法於原本右一、右二板中插入另一角度板，使新的板子成為右二板，先前之右二板成為右三板。為了有效辨別燈具的水平配光曲線 $I(\theta)$ 與理想配光曲線 $I_{ideal}(\theta)$ 之差異性，定義出這兩條曲線的相合程度之匹配誤差如下算式：

$$\text{匹配誤差} = \sum_{-40}^{10} \left[\frac{I(\theta)}{I_{ideal}(\theta)} - 1 \right]^2 \quad (2)$$

上式角度總合的上下限分別代表對應道路出光角度分布。匹配誤差數值越小代表兩曲線的匹配程度越高，以便我們判斷均勻性，為了把圖 16 中右側圈選處的光降低並補強到左側圈選處，我們設定右二板角度變化為 15~30 度，高度 $H=0\sim 3\text{cm}$ ，此時匹配誤差與右二板關係如圖 17 所示，從此圖發現最小值出現在右二板角度 25 度高度 $H=1\text{cm}$ 處。

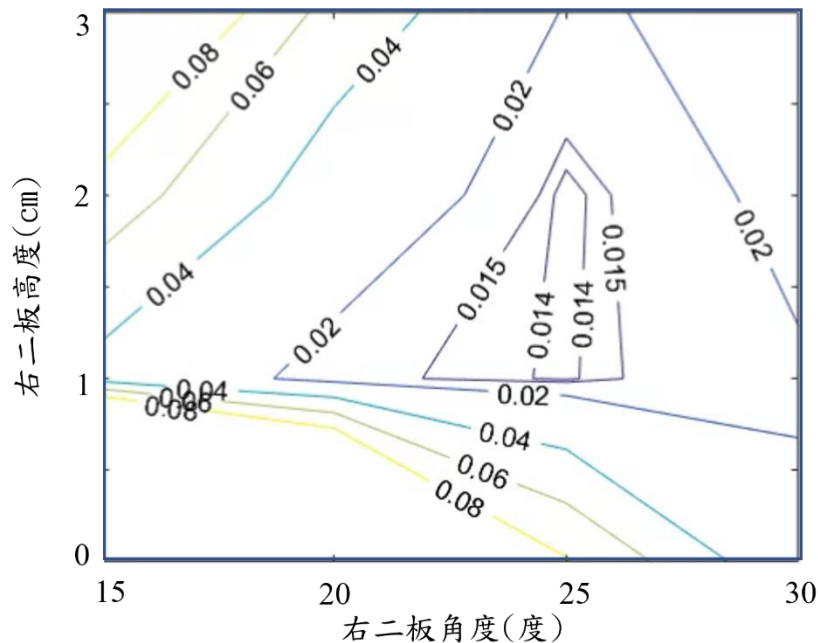


圖 17 差值與右二板關係圖

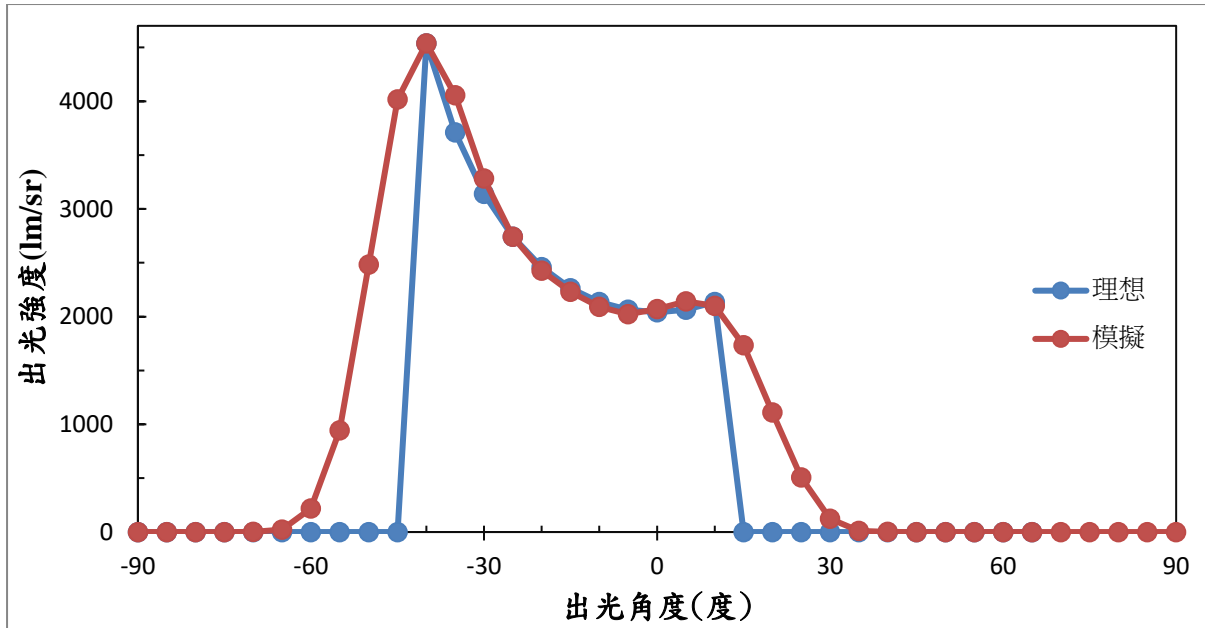


圖 18 匹配誤差最小之配光曲線

圖 18 是我們匹配誤差最小之配光曲線圖，可以發現與理想配光曲線相合度高，最後我們將數據放入實際道路模擬軟體 DIALux 進行分析，得到實際道路之照度等位線圖如圖 19 所示。並定義平均照度為道路面照度平均值、最小照度為道路面照度最小值，從最小照度與平均照度的比值可定義出整體道路照度均勻性如下式：

$$\text{整體道路的照度均勻性} = \frac{\text{最小照度}}{\text{平均照度}} \quad (3)$$

而從平均照度亦可定義光利用率如下式：

$$\text{光利用率} = \frac{\text{平均照度} \times \text{有效道路面積}}{\text{LED 總出光通量}} \quad (4)$$

有效道路面積為兩燈桿之間的道路面積，在本文中為 300m^2 。路燈正下方橫跨道路方向的區域如圖 19 紅色虛線方框所示區域，利用在此區域的最小、最大照度之比值定義燈正下方橫跨道路方向的照度均勻性如下式：

$$\text{燈正下方橫跨道路方向的照度均勻性} = \frac{\text{此區域之最小照度}}{\text{此區域之最大照度}} \quad (5)$$

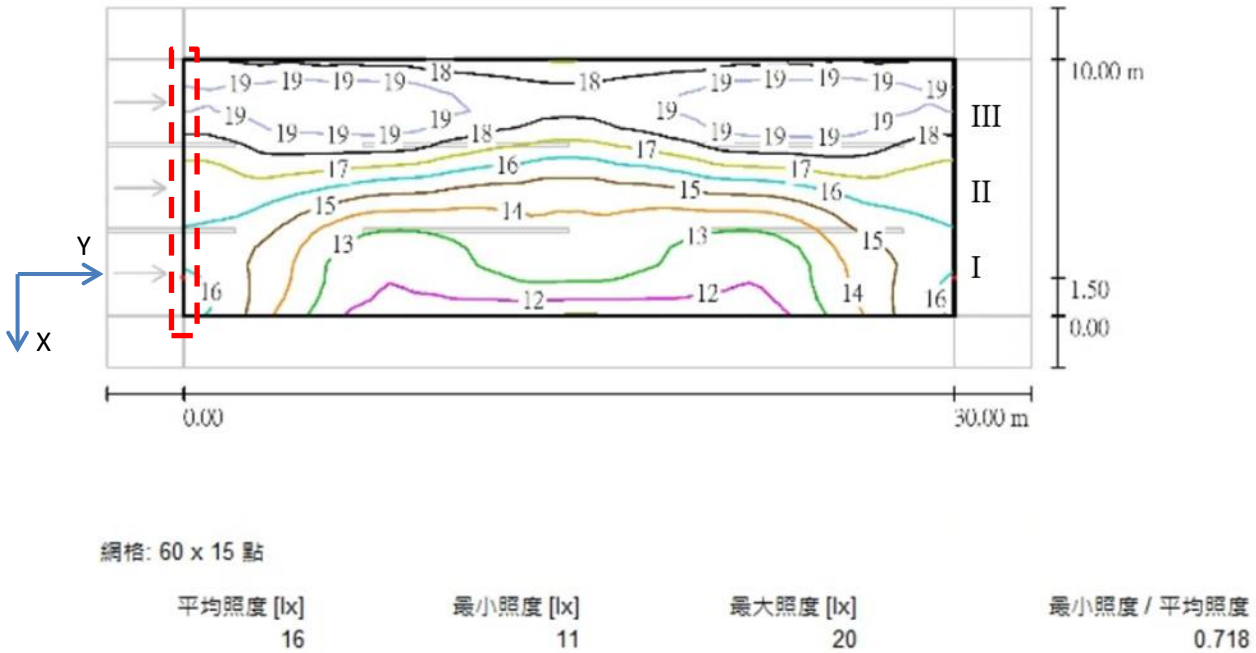


圖 19 實際道路模擬之照度等位線圖

雖然水平配光曲線中接近理想狀態，但圖 19 中可得燈正下方橫跨道路之照度均勻性為 0.84，整體道路之照度均勻性為 0.72，而光利用率為 0.43，第一車道在 Y 方向 15 米處照度明顯低於其他地方許多，整體照度也隨著從第三車道至第一車道遞減。本研究之水平配光曲線與理想水平配光曲線相合程度高，但正下方照度均勻性還是只有 0.84，是因為當初許振彬論文[11]為了提升縱向的光均勻性，垂直方向的配光曲線為蝠翼型式，因此大角度的出光會影響到下一盞路燈正下方的位置。

4. 結論

燈具最終數據結果為 $L=10\text{cm}$ 、 $W=2\text{cm}$ 、上下板 72 度且高度 $H=20$ ，左板組成為左一板 50 度高度 5cm、左二板 40 度高度 15cm 與左延伸板 35 度高度 5cm，右板組成為右一板 10 度高度 6cm、右二板 25 度高度 1cm 與右三板 30 度高度 10cm。雖然在水平配光曲線中有不錯的表現，不過數據到了實際道路模擬測試中仍發現整體均勻性不理想，有加強的空間，後續可以利用增加右板條件加強第一車道之照度並維持其餘之照度，進而改善整體照度均勻性。從許振彬論文結論結果相比[11]，經由我們改善之後雖然光利用率下降約 4%，不過整體的照度均勻性提升了 11% 左右。

5. 參考文獻

- [1] <https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=90d7fc32-baf1-4423-a4ae-b87905f33d59>。
- [2] <https://www.ledcase.com/light-3.htm>。
- [3] <https://www.ledinside.com.tw/news/20170915-34580.html>。
- [4] 鍾泓璟，“利用六面體模型的二次光學設計 LED 路燈”，國立台南大學，碩士論文，台南，民國一百零三年八月。
- [5] K. Wang, S. Liu, F. Chen, Z. Qin, Z. Liu, and X. B. Luo, “Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination,” *Opt. A: Pure Appl. Opt.* 11 105501(2009)。
- [6] Mikhail A. Moiseev, Leonid L. Doskolovich, and Nikolay L. Kazanskiy, “Design of high-efficient freeform LED lens for illumination or elongated rectangular regions,” *Optics Express*, Vol. 19, Issue S3, pp. A225-A233 (2011)。
- [7] Z. Zhenrong, H. Xiang, and L. Xu, “Freeform surface lens for LED uniform illumination,” *Applied Optics*, Vol. 48, Issue 35, pp. 6627-6634 (2009)。
- [8] [10] Y. Ding, X. Liu, Z. R. Zheng, and P. F. Gu, “Freeform LED lens for uniform illumination,” *Optics Express*, Vol. 16, Issue 17, pp. 12958-12966 (2008)。
- [9] S. Zalewski, “Design of optical systems for LED road luminaires,” *Applied Optics*, Vol. 54, Issue 2, pp. 163-170 (2015)。
- [10] M. F. Lai, Y. C. Chen, Nguyen Doan Quoc Anh, T. Y. Chen, H. Y. Ma, and H. Y. Lee, “Design of asymmetric freeform lens for low glared LED street light with total internal reflection,” *Optics Express* Vol. 24, Issue 2, pp. 1409-1415 (2016)。
- [11] 許振彬，“利用反射型 LED 燈具設計道路照明”，國立臺南大學，碩士論文，臺南，民國一百一十年二月
- [12] CIE88, “Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses,” *International Commission on Illumination*, pp.1~35(2004)。

