

車尾燈 LED 側光式導光條的設計

陳嘉豪、劉世強、余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

摘要

本文探討 LED 側光式導光條的設計，分析導光特徵與導光條曲率對出光特性的影響。並以 LED 側光式車尾燈為設計載具，以 V-cut 結構為導光特徵，藉由 Pro/ENGINEER 繪圖軟體建模，再以 TracePro 光追跡模擬軟體分析其光學特性，利用 V-cut 角度與分佈的改變，來滿足法規光照強度與照明均勻性的需求。並搭配 Fuzzy 模糊最佳化方法，以漸進式的方法調整 V-cut 彼此的疏密程度，以出光均勻性為目標，分析整組車側光式尾燈的照度分佈，並與美國汽車工程師協會 SAE 規定的光強度值要求相驗證，相較於初始設計之車尾燈，經改良後的軸向光強度值可達 33.8 cd，整體導光的均勻性提升了 33.3%，達到預期之高均勻性與集中光強度的 LED 尾燈設計。

關鍵字: LED 側導光、車尾燈、曲面導光、Fuzzy、導光條、TracePro

1. 前言

因環保節能的意識抬頭與 LED (Light Emitting Diode) 的技術的發展，帶來了新一代燈具設計的改革，大部分的車廠也嘗試以 LED 取代傳統白熾燈泡，但目前大多 LED 尾燈採直下式燈源排列設計 [1][2][3][4] 如圖 1 所示，雖使具環保性，但所使用之 LED 數量相當多，不僅造成不必要的電力耗損，且由於 LED 光指向性強，會導致後方駕駛者有眩光的問題，也相對受影響車燈的美觀與外型，這都是 LED 車燈照明設計需考量的重要因素。

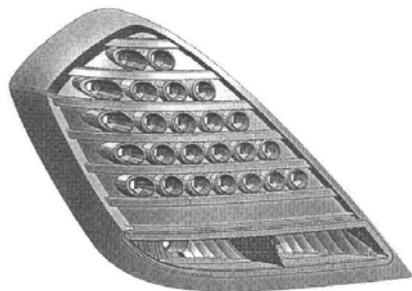


圖 1 日產裕隆汽車之車尾燈[2]

側光式導光板在平面顯示器的應用已相當成熟，LED 燈源置於導光元件的側方，藉由導光板上的微特徵排列的反射與折射，將光源均勻的由平板正面導

出。本研究將此技術應用於 LED 車尾燈的設計上，顯示器背光模組常採用擴散膜與稜鏡片來調整出光特性，但車尾燈形狀複雜，必須將光學膜片的功能整合成單一光學元件，那微結構的形狀與分佈情形，勢必是成為車尾燈最佳化出光特性的關鍵技術。

早期的車尾燈設計有利用圓柱結構或 V-cut 大小來控制出光的特性 [6][7][8][9]，而到 2009 年的 Gebauer、Wiersdorff [10] 等人所設計的 BMW 車尾燈，使用單側入光的車尾燈，控制 V-cut 三角形的 α 、 β 角度來調整光線的行進方向如圖 2 所示，但未明確探討 α 與 β 的角度對出光特性的影響。側光設計雖然使用少的 LED 燈源，但大部分的光線會集中在靠近 LED 燈的位置，而離 LED 越遠時越暗，易有均勻度不佳的情形。

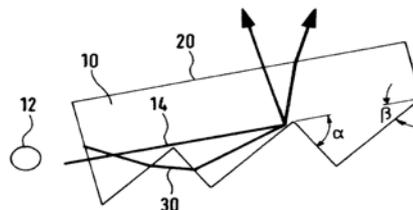


圖 2 側光式導光條設計[10]

本文將分析導光結構的導光特性，以不同 V-cut 微結構之大小、形狀與角度之出光特性，探討在三維彎曲之導光條的出光特性，利用 V-cut 改變角度的方式控制出光方向，調整 v-cut 分布以提升出光均勻性。

2. 模組材質與光學設定

本文以 BMW3 系列的 LED 車尾燈為設計載具，車尾燈的導光條材質為聚甲基丙烯酸酯 (Polymethyl Methacrylate 縮寫 PMMA，俗稱壓克力)，PMMA 的折射率為 1.4935，是業界普遍採用的導光材料，每一條導光條採用 2 顆 LED 作為燈源，整付燈具共 8 顆，而在導光條的前端有 LED 飾蓋，此飾蓋具有 LED 光源回收再利用的功效，減少光線能量的損失，其材料的選擇為聚碳酸酯 (Polycarbonate，簡稱 PC)，最後在導光條與裝飾蓋的後面由內套固定，如圖 3 所示。而飾蓋上方為防止漏光，在其外表鍍上反射材質使其具有高反射性，而在導光條底部反射面的地方，為防止光線從底部漏出，而也在其表面上設上反射 Mirror 特徵 (100% 反射) 如圖 4 所示。

本研究採用 TracePro 光學軟體作為光學追跡模擬，進行照度分析。為權衡模擬分析的時間以及電腦資源，採用每顆三十萬條光線數做為後續光學模擬設定，而本文所使用的 LED 出光角為 30°，其流明值為 5.147。

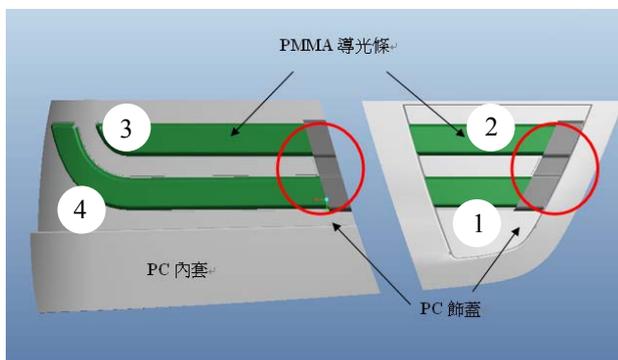


圖 3 車尾燈組成示意圖

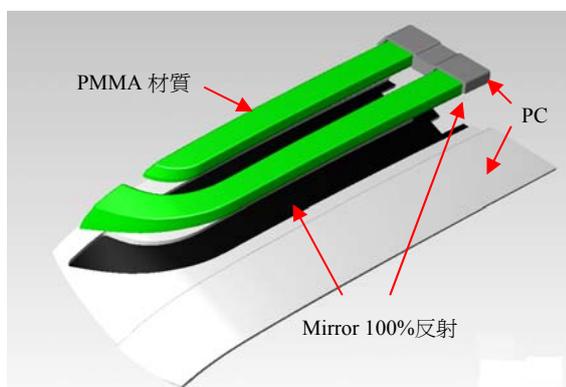


圖 4 尾燈材質示意圖

3. 研究方法與分析

3.1. 模型建構與出光角度分析

在模型 V-cut 特徵的建置，所使用的是 Pro-ENGINEER 5.0 的 3D 繪圖軟體，此軟體在曲面上處理較為強大，而研究主要以光強度 cd 值為目標，因為在檢測車尾燈是否達標準時，都是以 cd 值來研判，所以在模擬之後的出光角度圖是主要的判斷依據，並從中挑選出 LED 側光式車尾燈最佳的 V-cut 角度，使其能符合法規所規定的光強度。

若以單純的等腰三角形之 V-cut 角度，其模擬結果的光線會呈現 13~14° 偏角如圖 5 所示，所以利用 V-cut 三角形角度的改變，來控制導光條的出光方向如圖 6 所示。改變 α 與 β 的角度，藉此調整至預期所要達到的中央集光效果，而因為模組中有含有 4 條長度與曲率的導光條，所以每條的最佳 V-cut 角度也不盡相同，所以在這邊先將角度的標示定為 $(\alpha : \beta)$ ，可以發先原本偏角的位置被導正而對齊軸向如圖 7。

導光條以 1、2、3 與 4 來編號如圖 3 所示，經過反覆的分析與驗證，找出各個導光條的集中角度，其

模擬結果如表 1 所示，因為受限於後段 LGS 3 and 4 的 V-cut 設計與製作上的成本的考量，所以統一設定頂角皆為 80°，在找出相對應的最佳角度，而最後則根據所找出的角度，模擬整付車尾燈的總出光強度，進而驗證法規的規範值。

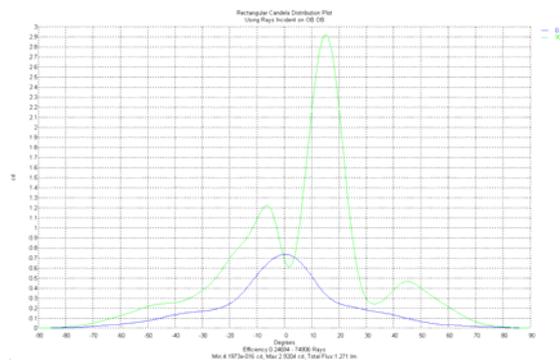


圖 5 導光條 45° 等腰 V-cut 光強度分布圖

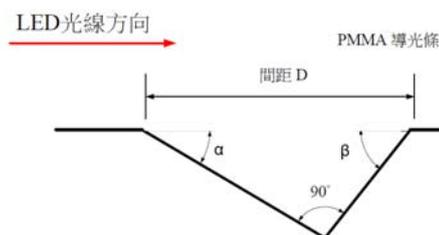


圖 6 V-cut 結構示意圖

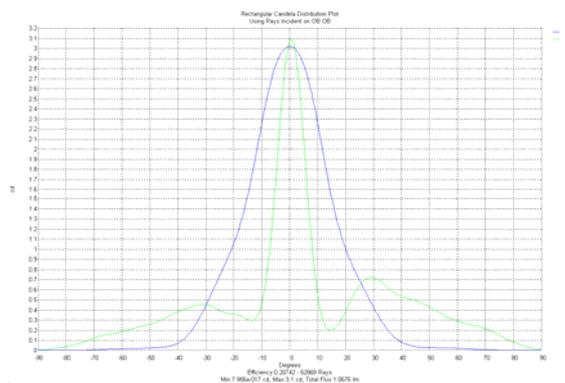


圖 7 V-cut 導角調整後之光強度特性圖

表 1 各個導光條之模擬結果

導光條結構	平均照度 lux	光強度 cd	偏光角度
LGS1(52:48)	5771.6	6.12	2°
LGS2(52:48)	4969.1	6.90	4°
LGS3(42:58)	3686.5	11.5	0°
LGS4(42:55)	4158.7	10.5	0°

3.2. Fuzzy 照度均勻性優化

本研究採用模糊最佳化(Fuzzy Optimization)於導光條的微特徵分佈上[11]。藉由模擬軟體進行導光板照度模擬時，可發現因結構分佈因素產生部份亮或暗的區域，進而需要改善這些明暗不均的現象，而有如前面設計的，雖然有集中光強度的現象，但無法得到高均勻性的導光條，所以利用 V-cut 間距的調整，也就是如果太亮，則將 V-cut 間距調疏，若是太暗則調密。

均勻性優化的反射結構選擇，為前面所分析的最佳化 V-cut 角度，前段 LGS1 與 LGS2 為頂角 80°(52:48)的 V-cut 三角形，而後段 LGS3 與 LGS4 為頂角 80°(42:58)的 V-cut 角度設計，以此兩種最佳化後的 V-cut 設計角度模組進行均勻性優化。而如圖 8 所示為 LGS1 導光條，圖中為連續性 V-cut 分佈之出光照度圖，如圖中可以看出導光條前後各有明顯的亮區。藉由這些亮暗的區域，可以分別劃出數個區塊，如圖 9 所示，LGS1 為車尾燈中最短的導光條，所以只劃分 5 區塊，而往後可以依據導光條的長短，可劃分 5 塊或更多的區塊來做控制，劃分出越多的區塊則有助於均勻性的調整，但規劃的時間也就更耗時。

利用控制點的改變即可使相鄰的兩區塊微特徵分佈受到此控制點的影響，因此相鄰的控制點間距就會線性內插至此控制點間距，並利用此依據，假設降低某控制點的間距，相鄰兩塊的分佈就會由外部往此點逐漸減少特徵間距，而達到增加相鄰兩塊的亮度，如圖 9。

本研究運用模糊邏輯以及其變數設計進行優化參數收尋。設定各個導光條反射結構之結構間起始排列間距為 1.2mm 進行初次模擬，在將模擬結果進行依據模糊規則進行模糊推論。定義導光條分區，規劃相鄰的每塊由行間距控制其亮度比(Regional Illuminance Ratio, RIR)如式，即兩相鄰塊(Region)的平均照度與整個導光條平均照度的比值。

並以三角形歸屬函數描述照度指標，在輸入端的歸屬函數方面，控制整體亮度的部份為 RIR，並針對模糊述詞進行歸屬度的分類，包括有太亮、稍亮、剛好、稍暗、太暗等定義如圖 10 所示[11]。接著針對其歸屬度定義其太暗或太亮時其間距要增大或減少多少倍率，在此也定義了改變間距倍率的歸屬函數，來控制整體亮度的部份，其調整方式如圖 11 所示。

$$RIR = \frac{\text{Average illuminance of adjacent regions}}{\text{Average illuminance of light bar}} \quad (1)$$

最後則為解模糊化，而本研究運用重心法以及 Matlab 程式來輔助運算，每一次都將 6 個控制點或更多的控制點帶入運算，運算出新的間距之後，再輸入光學模擬軟體 TracePro 裡面分析出新的結果，如此反覆進行，以期能達到照度優化的光學設計結果，優化的流程如圖 12 所示。

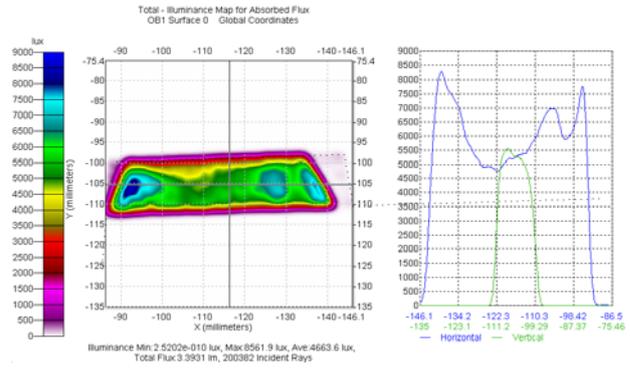


圖 8 導光條 LGS1 照度圖

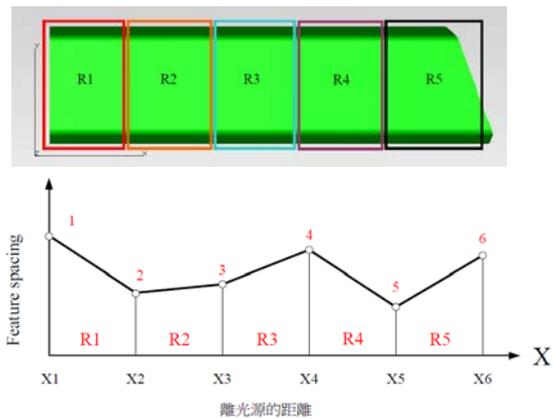


圖 9 導光條劃分區與控制點間距分佈示意圖

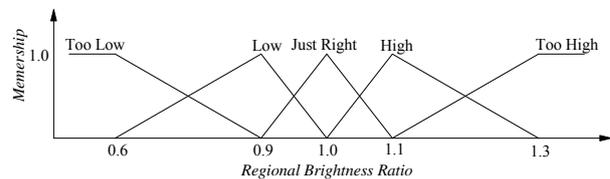


圖 10 算各區塊亮度比的歸屬函數(RIR)

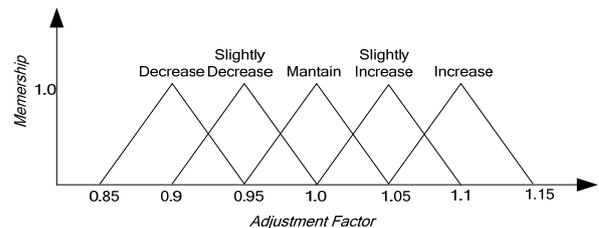


圖 11 區塊間距的倍率的調整值

3.3. 導光條照度均勻最佳化

在第一條的導光條 LGS-1 中，長度約為 54 mm 長度，經過 MATLAB 模糊優化程式的計算，而總共優化的次數為 24 次，分析結果後如圖 13 所示，其 RMS 值在優化過程中有逐步下降的趨勢，由原本的 1762 lux 下降至 1055 lux。LGS2~LGS4 的 RMS 值分別由原本 1641 lux 下降至 1134 lux，1732 lux 下降為 1301

lux, 與從 1451 lux 下降為 899 lux, 其 RMS 優化趨勢如圖 14。

3.4. 燈組照度分析與 SAE 法規驗證

汽車設計的主要規範分為美國汽車工程師協會 (Society of Automotive Engineers, 簡稱 SAE) 與歐洲經濟委員會 (Economic Commission of Europe, 簡稱 ECE) 二種, 而本研究中所採用的規範是以美國尾燈規格 (SAE) 為設計目標, 圖 15 為美規所規定的尾燈配光圖, 圖中所表示的是以車尾燈離量測機台 10 m 為量測距離所需要的 cd 光強度值, 最大不超過 25cd, 而圖中橢圓形裡的每一點皆有表示的數字與座標位置, 每點的數字即表示該車尾燈所需達到的最低 cd 標準值。

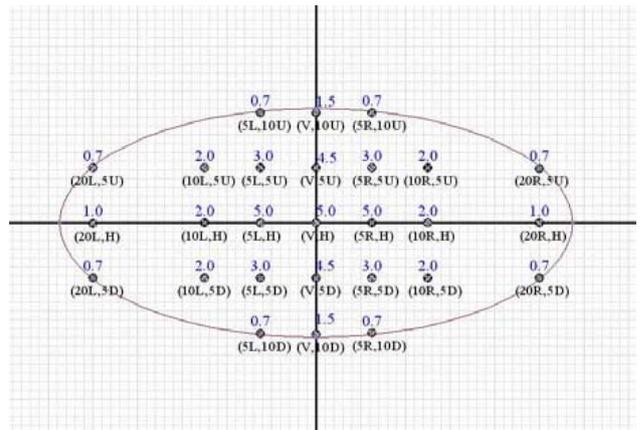


圖 15 美國尾燈配光規格示意圖

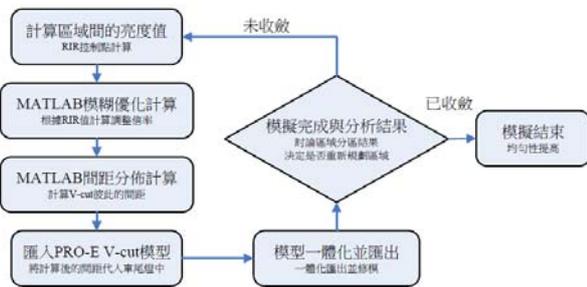


圖 12 Fuzzy 優化流程圖

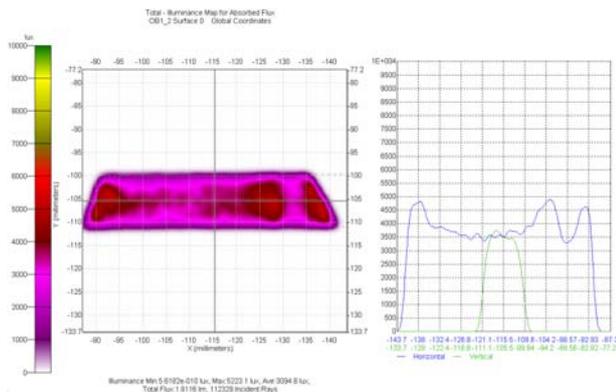


圖 13 LGS1 優化後支出光照度圖

各個導光條的RMS值

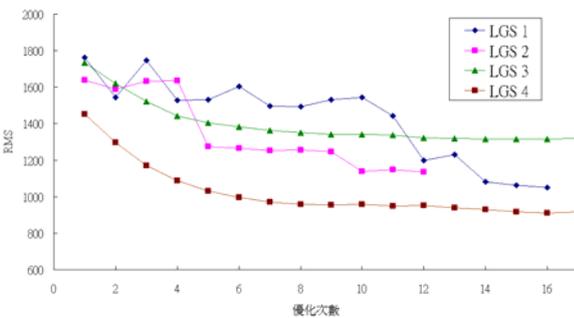


圖 14 各導光條優化之均方根值變化

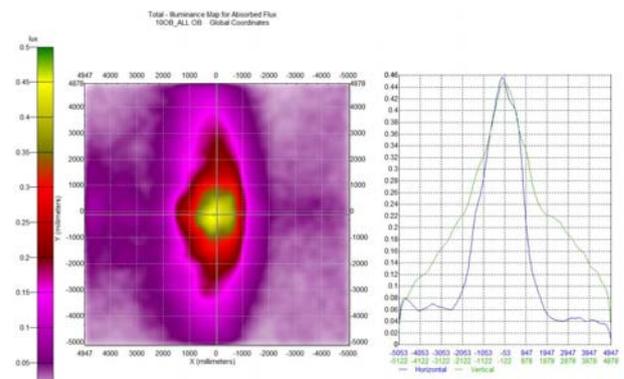


圖 16 整體車尾燈之最佳化照度圖

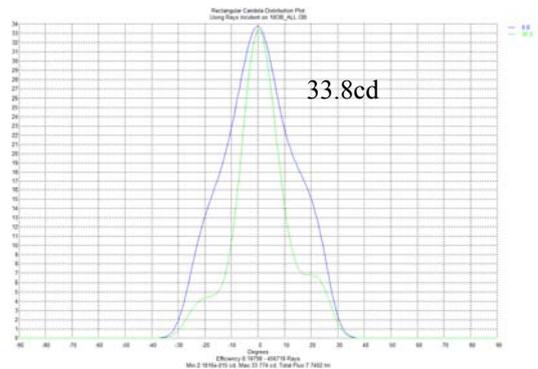


圖 17 整體車尾燈之最佳化光強度角度分布圖

模擬後的結果如圖 16, V-cut 結構為前段 (52:48)、後段(42:58), 為模擬結果的照度圖, 可以由照度圖得知光線的亮度大多集中於觀察面中點, 而照度圖中右邊是將左邊的圖沿著 X 軸與 Y 值切開, 依數值的高低繪成的線條圖, 可看出大致上的光能量是集中於中央 X 與 Y 軸相交的原點上。

圖 17 是為光強度分佈圖, 使用最佳化後的 V-cut 反射角度, 最大光強度集中於正軸向。圖 18 是為 Polar Iso-Candela plot, 根據前面所設置的觀察面範圍與距離, 經模擬結果後的光強度極座標分布圖, 可看出光

的亮區多集中於中央，而此圖所接收的結果，是根據其發光角度與能量所成的圖形，而將此圖轉換後可得到其光強度值，再根據其相關的角度位置來擷取相對應的法規角度座標點，彼此對應後，判斷是否符合規所規定的。

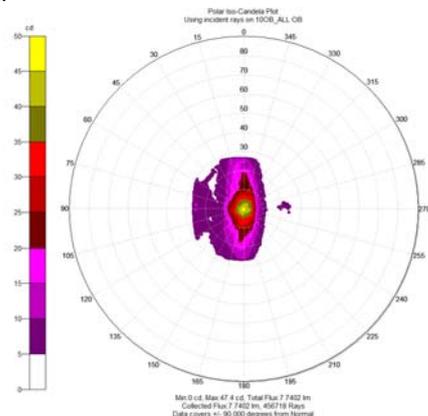


圖 18 整體車尾燈之最佳化極座標圖

本實驗車燈以美國車尾燈 SAE 規範標準，其中共分 27 個點，每個點都有規範標準的最低值，將模擬結果擷取相對應的座標後整理成如表 2，表中看出不論是模擬的值或保守估計值都在標準之上，甚至還超過其標準最低值許多。而最大光強度值約為 36 cd，這數值已超出規範所設置的最大值 25 cd，但在模擬中的車尾燈是只考慮光線的出光，而在真實的量測中還有燈罩的光損、空氣溼度與 LED 溫度等多種影響因子，實際值將會有些損耗，未來實作如果所量測的值過高，可調整 LED 的電壓與電流，同時也使 LED 因使用的能量下降而不至於溫度太高。

4. 結論

本論文利用車尾燈為設計載具，分析曲面上 V-cut 角度的出光特性影響，搭配使用 Pro-E 3D 繪圖軟體在 X、Y 與 Z 皆不平行的曲面上建製 V-cut 三角形，然後調整其三角形的角度，並搭配 TracePro 光學模擬軟體與 Fuzzy 模糊理論分析其出光特性與均勻性，找出 LED 側光式車尾燈最合適的出光設計參數。

使用 V-cut 角度設計套入 CAD 側光式車尾燈載具後，LGS1、2 導光條的最佳 V-cut 角度為(52:48)，出光強度約為 6 cd 左右，而套用至 LGS3、4 中，其適合的 V-cut 角度為(42:58)，光強度值 LGS3 為 11.5cd、LGS4 為 10.5cd，成功的將光線集中於中央 0 度。將整組車尾燈最佳化後帶入 TracePro 中模擬，其結果顯示光線集中於中央 0°，光強度最高值為 33.8cd。

經由 Fuzzy 模糊理論結合 MATLAB 程式，以照度均勻性為目標，將導光條劃分區域並設上控制點，依據控制點間距將 V-cut 做分佈的優化，模擬結果分析得知，有效的使平均照度 RMS 值由 1650 下降至 1100，平均改善率大約為 33.3%，成功提高導光條的均勻性。藉由比較美國國家標準 SAE 的車尾燈規範，

比較其結果得知模擬的數值遠高於規範所需求的最低值，證明設計應用的可行性。

表 2 模擬結果與美規規範值比較表

座標位置	原標準值	光強度值
V,H	5	33.8
5L,10U	0.7	13.5
V,10U	1.5	20.1
5R,10U	0.7	19.9
20L,5U	0.7	7.0
10L,5U	2.0	4.7
5L,5U	3.0	12.8
V,5U	4.5	26.5
5R,5U	3.0	26.8
10R,5U	2.0	6.7
20R,5U	0.7	4.2
20L,H	1.0	8.5
10L,H	2.0	5.4
5L,H	5.0	21.8
5R,H	5.0	36.5
10R,H	2.0	9.6
20R,H	1.0	4.5
20L,5D	0.7	7.0
10L,5D	2.0	5.8
5L,5D	3.0	19.6
V,5D	4.5	35.6
5R,5D	3.0	34.9
10R,5D	2.0	7.0
20R,5D	0.7	4.1
5L,10D	0.7	14.5
V,10D	1.5	30.8
5R,10D	0.7	26.1

5. 參考文獻

- [1] Lin, Y. C., Exterior Surface Configuration Of A Vehicle Rear Light, US Patent D550870S, 2007.
- [2] 陳晉玄, 汽車尾燈座, 專利號碼: D114238, 2006.
- [3] 林伯恒, 汽車尾燈, 專利號碼: D106513, 2005.
- [4] Pfeiffer, P., Taillight For a Vehicle, US Patent D590526S, 2009.
- [5] Futaml, T., Vehicle Lamp, US patent 7695175B2, 2010.
- [6] Huang, J., Light Guide Device For Vehicle Lamps, US patent 2008/0310187A1, 2008.
- [7] Sayers, E. M., Eichelberger, C. L., Combination Rear Lighting System, US patent 2009/0207610A1, 2009.
- [8] Martin, L., Vernisse, B., Thierry, B., Vathonne, N., Gasquet, J. C., Optical System With Main Function For Motor Vehicle, US patent 2009/0219731A1, 2009.
- [9] Peck, J. P., Led Illumination Device With A Highly Uniform Illumination Pattern, US patent 7658513B2, 2010.
- [10] Gebauer, M., Wiersdorff, S., Lighting Mechanism, US Patent 7494257B2, 2009
- [11] Yu, J. (余志成) and Hsu, P.-K. (2009) "Integration of Stamper Fabrication and Design Optimization of LCD Light Guides Using Silicon-based

Microfeatures”, *Microsystem Technologies*, Vol. 16,
Issue 7 (2010), pp. 1193-1200.

Design of LED Edge-lit Light Bar for Automotive Taillight Applications

Jia-Hao Chen, Shih-Chiang Liu, Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and Automation Engineering
National Kaohsiung First University of Science and
Technology

*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

Abstract

This study investigates the design of LED edge-lit light bar, and analyzes the influence of light guide features and the component curvature on the optical characteristics. An automotive taillight with the light bar is used as an illustrated example. V-cut is used as the optical features to distribute the brightness on the light bar. The design utilizes Pro-E to establish the system model which is later introduced to the TracePro program for the simulations of optical distribution. The angles and the distribution of the V-cut are varied to satisfy the regulation requirement and the illumination uniformity. To achieve a uniform luminance of light bar, a Fuzzy optimization scheme is applied to vary the V-cut density along the light bar. The polar Iso-Candela plot is derived to verify the compliance with the luminous intensity requirements of the Society of Automotive Engineers (SAE). The optimum result provides an axial intensity of 33.8 cd, and an improved optical uniformity of 33.3% compared with the initial design.

Keywords: LED edge-lit taillight, Curved guide light, Fuzzy, Illuminance uniformity.