

## 弧型導光板於檯燈照明之光學設計

蘇仕銘<sup>1</sup>、楊立威、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

導光板具有柔和與低炫光的出光特性，近年來開始導入於室內照明的產品應用，但現有設計多採用平板式的傳統外型，本文探討弧型導光板於檯燈照明之光學設計與應用，探討板件曲率對於整體出光的影響，並分析導光結構設計以達到最佳的配光曲線，再利用結構分佈達到均勻的光照度，以提升照明產品應用的美觀與創新性。本文所提出的設計將LED設置於弧型導光板的短邊兩側，採用等間距分佈頂角為 $80^\circ$ 的對稱V-cut以獲得軸向出光的特性。因弧型導光板的受照處與局部特徵分佈不易尋得單純的對應關係，本文以訓練樣本建立克里金代理模型，配合遺傳演算法進行V-cut大小分佈的最佳化，提升照度均勻性。本研究應用於微笑、飛鳥型與波浪型導光板光學設計，皆具有高照度均勻性，可應用於檯燈與情境照明燈設計，最後並製作原型微笑導光元件，與市售產品比較，驗證設計的優越性及可行性。

**關鍵字：**TracePro、V-cut 微結構、導光曲面、波型導光、微笑檯燈、出光均勻性

### 1. 簡介

LED導光板於顯示裝置背光模組的應用已是成熟的技術[1]，導光板利用薄板傳遞光源，並藉由分佈在薄板上的微特徵控制出光分佈，將點光源轉換成均勻平面出光。導光板出光特性不僅受到特徵幾何形狀影響[2]，也會因板件曲率而改變，彎曲導光板已應用於曲面顯示器，Samsung的專利設計[3]將導光板分為數個區域，並以框架作為固定以設計曲率。但導光板曲率會影響出光的特性，對於相同的特徵設計與分佈，隨著弧形導光板的曲率增加，平均照度隨之下降，且出光分佈的均勻性也變差（圖 1），因此不同的曲率所對應的結構設計與分佈都需要個別設計，無法適用平板的結構分佈。

V-cut為典型的導光特徵，但單側入光時V-cut對稱設計在出光會有偏向一側的現象，專利設計[4]提出因微結構V-cut角度的不同，而會讓光出光的位置也會不同的特性。

本文將探討弧狀導光板的光學設計與其在檯燈照明的應用，為便於加工與分佈設計，微結構設計將採用V-cut以藉由調整結構的角度變化來控制出光方向，探討頂角的設計與配置，以等間距的結構分佈與改變特徵尺寸設計來提升照度均勻性。

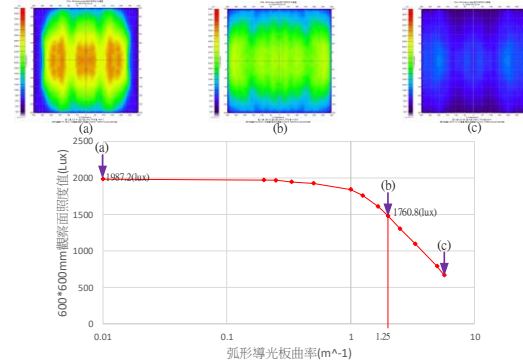


圖 1 佈上結構導光板在不同曲率變化時平均照度的變化曲線

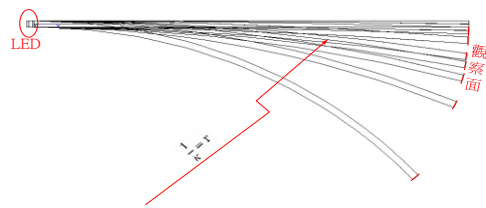


圖 2 無結構下彎曲導光板示意圖

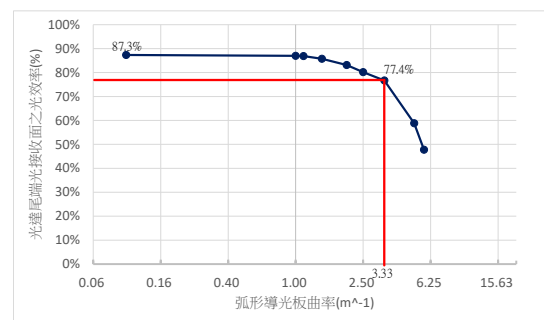


圖 3 在不同曲率下光源至尾端接收到光效率

### 2. 弧型導光板之光學設計

#### 2.1 側光導光板曲率對於光學特性影響

以板子越彎曲且不佈特徵時(圖 2)，光到達至尾端會越少(圖 3)，相對都從彎曲的面上出光。在設計接下來弧型導光板時要考量到曲率不能太大，越大時光損失就會越大，所以從圖表觀察計算出約 10 % 左右的光損失作為接下來本文所設計的曲率為 $1.663 (m^{-1})$ ，導光板採用長為350 (mm)、寬為80 (mm)、厚為3 (mm)、材質為 PMMA 的設計，LED設置位置為

雙側入光左右各8顆，採用億光(Everlight) 67-21ST/KK3C-H656S2S68499Z10/2T，發光角為 $120^\circ$ ，流明值為116(lm)LED。

## 2.2 弧型導光板的幾何設計

首先針對凸弧狀(哭臉)以及凹弧狀(微笑)兩種弧狀導光板(圖 4)分析其照度特性。在導光板兩端設有LED光源為雙側入光，導光板特徵採用 $80^\circ$ 頂角等腰凹結構為V-cut設置於靠近上方相同曲率的反射面那側。其材質設定為聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)，分析下列兩者的出光特性並篩選較佳的彎曲方向，而設置距離為400(mm)且觀察面為 $600 \times 600$ (mm)來觀察整體照面狀態。

在凸弧狀導光板設計中會發現會有中央集光的問題存在(如圖 5(a))，在接下來要做最佳化設計分佈會有些許的困難；而在凹弧狀導光板會發現光會往兩側擴張(如圖 5(b))，在接下來要做最佳化設計分佈會有明顯顯著的效果，如果以均勻性來探討顯示出凹弧狀導光板其實優於凸弧狀導光板，故選定凹弧狀導光板作為接下來的設計。

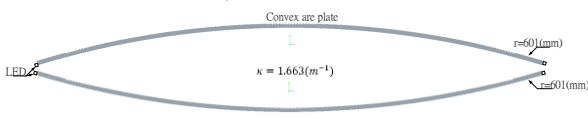
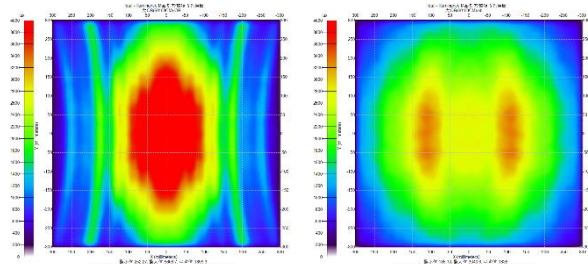


圖 4 凹與凸弧狀導光板設計示意圖



(a) 凸弧狀導光板

(b) 凹弧狀導光板

圖 5 凹與凸弧形導光板在受照面上之照度圖

## 3. 弧型導光板應用於檯燈照明的光學設計

本文先探討雙側入光弧形導光板於檯燈照明的應用，導光板採用長為350 (mm)、寬為80 (mm)、厚為3 (mm)、材質為 PMMA 的導光板設計。但有別於市售產品[5]將LED置於正對使用者的長邊設計，本研究設置LED於短邊兩端，避免燈源造成閱讀者有炫光刺眼的問題，而導光板曲率為 $1.66 (m^{-1})$ 以避免非控制性出光，特徵採用前述分析建議的內凹頂角 $80^\circ$  V-cut，分佈於導光板靠近反射面側，以具有較佳的光學特性。在JIS C 8112規範中提及檯燈照射高度須為400 mm，所以本研究將以相距燈源400 (mm)外的 $600 \times 600$  (mm)受照面的照度差異性作為設計目標如(圖 6)。

導光板v-cut採2 (mm)等間距分佈，微結構高度變化範圍為0.1~1.1 (mm)，而藉由改變特徵大小來控制照度分佈，因微笑導光板為左右對稱設計，因此只需考慮一半的設計分佈。本文在導光板上等間距分佈了

6個高度控制點作為設計參數，首段20 mm不佈微結構，目的在於加上反射遮罩遮蔽避免LED的炫光，而後控制點間等間距31.5 (mm)，而在控制點間的特徵高度採用內差線性分佈(如圖 7)。藉由調整控制點的尺寸大小，可局部增加導光板對應區域的局部出光。

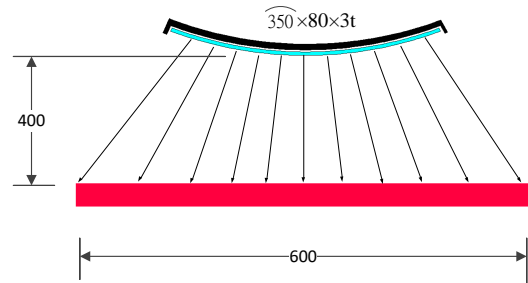


圖 6 弧狀導光板與受照面示意圖

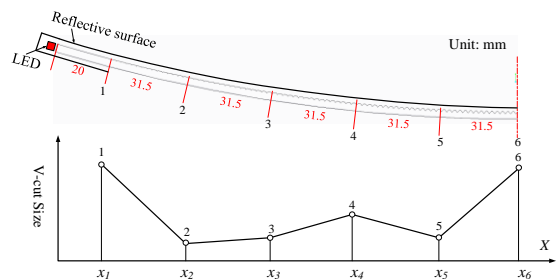


圖 7 導光板特徵控制點位置示意圖

而在光學照明設計中，我們希望降低照度的標準差，另一方面要提高整體照度的均勻性，所以設計出如(1)公式照度變異係數，即照度標準差除以照度平均值，用以量化受照面的照度差異性，並作為接下來的遺傳演算法的適應函數。

$$\text{照度變異係數 } y = \frac{\text{照度標準差}}{\text{照度平均值}} \quad (1)$$

### 3.1 V-cut與導光模組設計在雙側入光的出光特性

本文分析凹凸V-cut結構設計在導光板上分為靠近反射面與在出光面上(圖 8)、不同的頂角角度(圖 9)對於出光分佈以及出光效率的影響，從(圖 10)的光強度角分佈情況得到當結構設置在靠近出光面時，中間的光強度都會比較低；而當結構設置在靠近反射面時，中間的光強度角在會偏高，而本研究希望光強度角集中在中間會讓整體光源有預期性的出光，故在結構為凹設計、頂角角度為 $80^\circ$ 時光強度分佈會有中央集光的現象，故本研究最終採用結構設計為結構為凹設計、頂角角度為 $80^\circ$ 作為接下來的角度設計參數。

### 3.2 弧型導光板照度均勻度優化

檯燈照明除滿足規範要求外，也希望提高照度的平均值，並降低照度的分佈標準差，弧狀導光板的出光分佈較為複雜，與受照面並不會有單純的點對點對應關係，對於複雜的設計問題，大多牽涉到費時模擬或昂貴的實驗，雖然可以代理模型作為系統預測，

然而，一個“好”的代理模型往往需要大量的訓練樣本，以確保預測的精確性，但往往無法提供提供足夠的實驗樣本。因此，本文使用演化型的信賴區域建模，利用少樣的初始樣本建立克里金模型(Kriging Model)，由克里金模型所預估的預測均方差作為信賴區域的定義，並搭配遺傳演算法於信賴區域內搜尋準最佳化設計，進而以遞迴式採樣策略來改善預期產生最佳解鄰近區域的預測準確度，經過反覆搜尋、訓練的迭代過程，逐步由準最佳化設計收斂到最佳解，利用TracePro光學模擬系統模擬驗證，並加入訓練樣本，而訓練樣本設計以Uniform Design的方法設計出來(表 1)，本研究訓練樣本數採用控制點數量的3倍，藉以訓練代理模型，並達到預測輸出的目的，所得的設計經驗證後加入訓練樣本，反覆遞迴搜尋與訓練[6]

每次所搜尋的準最佳化設計經驗證後加入訓練樣本，重新訓練代理模型，經由反覆訓練與搜尋，弧型導光板特徵分佈最佳化在第89次迭代後收斂至最佳設計，以結構為線性分佈與最佳化設計做為比較發現雖然整體平均照度略降低些，但標準差從原本的721.9 (lux)下降至384.0 (lux)下降約46.8 % (表 2)，而受照面的照度圖(圖 10)可以看出原本從很明顯光分佈在兩側各有一個明顯的亮點，經過反覆的學習與搜尋後到光較均勻分佈。

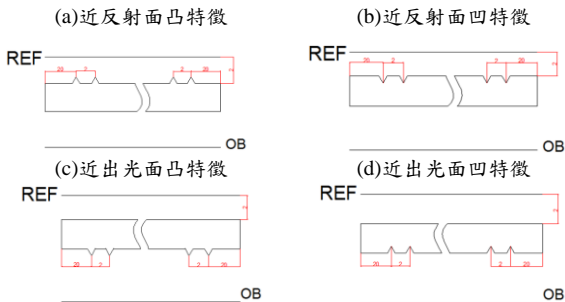


圖 8 微結構特徵配置示意圖

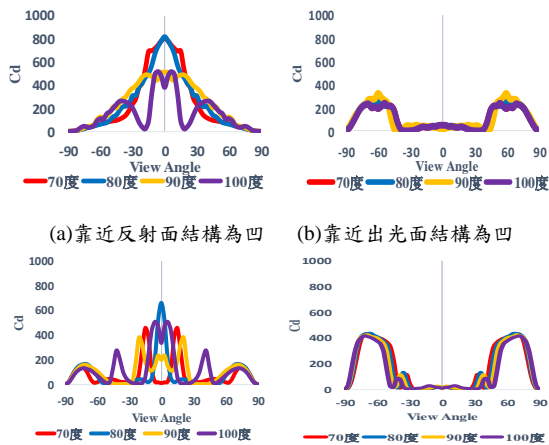


圖 9 凹凸V-cut結構在出光與反射面的出光強分佈

表 1 凹弧導光板於克里金模型初始學習樣本

Run	Height of anchored point(mm)						Stdev/Aver.
	1	2	3	4	5	6	
1	1.02	0.18	0.52	0.63	0.96	0.79	0.259
2	0.24	0.29	0.96	0.24	0.74	0.52	0.404
3	0.29	0.24	0.29	0.96	0.41	0.68	0.453
4	0.46	0.85	0.35	0.29	1.07	0.57	0.355
5	0.41	0.91	1.07	0.57	0.35	0.85	0.353
6	0.57	0.52	0.13	0.13	0.63	0.91	0.407
7	0.18	0.68	0.74	0.79	0.91	1.02	0.341
8	1.07	0.74	0.68	0.18	0.46	0.29	0.388
9	0.13	0.63	0.46	0.46	0.13	0.35	0.396
10	0.63	0.57	1.02	1.02	1.02	0.41	0.308
11	0.68	0.35	0.63	0.35	0.24	1.07	0.364
12	0.91	0.79	0.41	1.07	0.57	0.96	0.386
13	0.96	0.46	0.91	0.85	0.18	0.63	0.331
14	0.74	0.96	0.18	0.74	0.29	0.46	0.377
15	0.35	1.02	0.57	0.91	0.68	0.24	0.323
16	0.85	0.41	0.24	0.52	0.85	0.18	0.334
17	0.79	1.07	0.85	0.41	0.79	0.74	0.465
18	0.52	0.13	0.79	0.68	0.52	0.13	0.373

表 2 樣本與最佳化設計的參數比較

	Average Illuminance (lux)	Standard Deviation (lux)	Stdev/Aver.
線性分佈	1838.0	721.9	0.393
最佳設計	1604.4	384.0	0.239

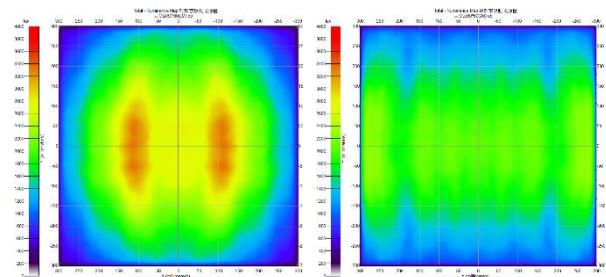


圖 10 受照面照度圖比較

表 3 最佳化設計計算照度值驗證JIS C8112規範

	檯燈前方半徑 500mm 的 1/3 圓周上	檯燈前方半徑 300mm 的 1/3 圓周上
JIS C8112 規範	250	500
最佳化設計	421	1155

(Unit: lux)

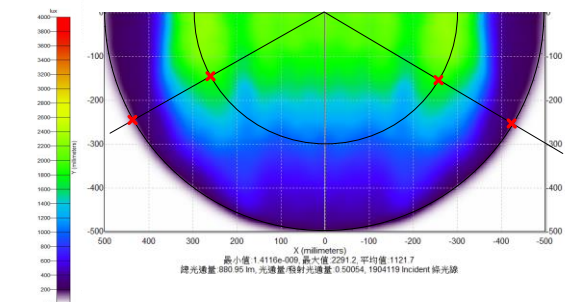


圖 11 最佳化設計以JIS C8112規範模擬照度圖

從照度分佈圖藉由凹弧狀設計，使得受照寬度600(mm)內都具有非常均勻的照度分佈，平均照度為1604 (lux)，以JIS C8112量測方式模擬(圖 11)所示，並做計算(表 3)符合此規範最大照度500(lux)以上。

### 3.2 弧型導光板與市售弧型檯燈之比較

而本文與市售弧形檯燈[5]除了照面均勻性有差異外，光源配置也亦不同，也因為配光位置的不同，在觀察面上所呈現的光照度圖也會不一樣(圖 12)，在市售的弧形檯燈燈源設計在長邊所使用的LED數量36顆共18 W，而本研究採用的光源配置在短邊且光源使用1 W LED左右各8顆共16 W，觀察面上的光照度圖就比較均勻對稱，光源配置在長邊雖光強度很高，但造成閱讀者會有光源直視的問題產生，而本研究設計光源在短邊，較不會有光源直視的問題產生，且所耗的功率節省約11%，且而在市售弧形檯燈實測均齊性為67%，而在本文最佳化設計均齊性達到82%。

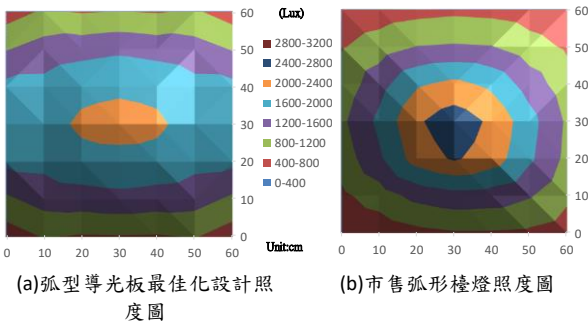


圖 12:市售與最佳化設計之弧形檯燈照度比較圖

## 4. 多弧型導光板設計

本文除了單一彎成凹弧狀的設計外，是否可以設計出如飛鳥型及多波型導光板，除了視覺的多變性外，也一樣可以讓受照面在距離為400 (mm)且在600×600 (mm)的桌面上有均勻的出光，從一開始固定微結構角度 $\alpha$ 、 $\beta$ 角到變化角度，觀察受照面的照度圖研究出最佳出光角度後再藉由優化程式來優化出最佳均勻度。

### 4.1 飛鳥型導光板元件設計

而在設計飛鳥型導光板時考量到整體「型」的設計，除了考量到外型設計像飛鳥一樣展翅，相對的曲率設計也需要較大，但曲率太大有時不代表著說可以讓光照在桌面上範圍變大，還反而會造成光損失變大(圖 13)。

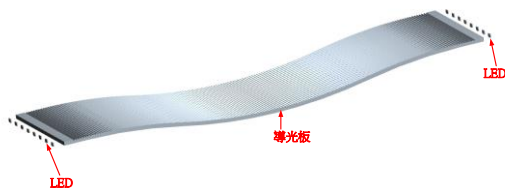


圖 13 飛鳥型導光板設計爆炸圖

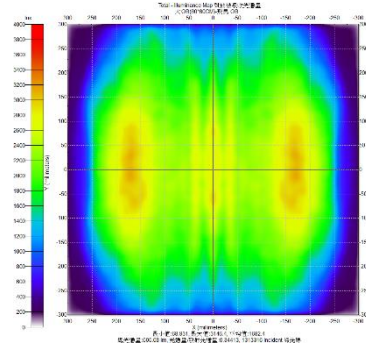


圖 14 曲率為 $2.5(m^{-1})$ 照在觀察面上的照度圖

從不同的曲率設計照在距離為400 (mm)的600×600 (mm)的觀察面上，結構設計為凹設置在靠近反射面那側，而藉由TracePro光學模擬跑完後的照度圖(圖 14)得到當曲率為 $2.5 (m^{-1})$ 的時候整體亦較高於其他曲率設計，故曲率取此值作為接下來實驗參數設計。

### 4.2 飛鳥型導光板結構設計

為改善兩側缺光問題，故分為兩個區域改變角度：左側至中間結構 $\alpha$ 角度從 $57^\circ$ 至 $43^\circ$ 作線性分佈，右側至中間結構 $\alpha$ 角度從 $43^\circ$ 變化至 $57^\circ$ 作線性分佈，角度改變幅度低就有明顯的效果出來且結構設計較簡單(圖 15)。

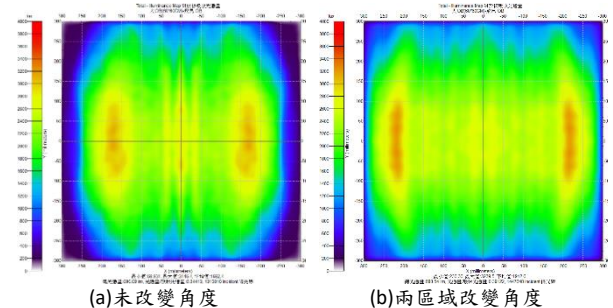


圖 15 微結構分成兩區改變與未改變 $\alpha$ 角度時照度圖比較

接下來結合前述的優化程式來進行迭代優化，原本結構為線性分佈時有明顯的亮區，在迭代至第37組資料時有最佳解，最佳化設計光打在照面上較均勻。在標準差及變異係數降低分別約46.5%及30.8%，整體照度均勻性較佳。

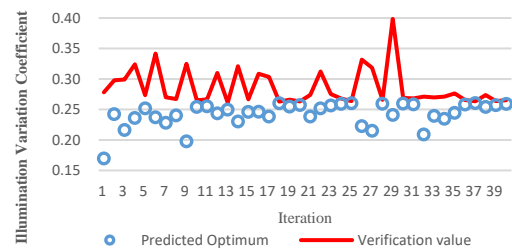
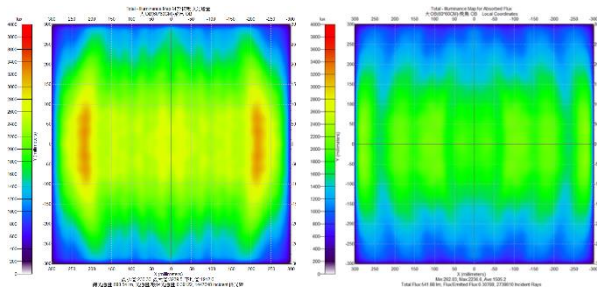


圖 16 迭代優化預測值與實際值的比較與收斂狀態



(a)結構為線性分佈 (b)最佳化設計

圖 17 結構為線性分佈與最佳化設計之照度比較圖

### 4.3 多波型導光板設計

除了弧型導光板的設計、飛鳥型的設計外，是否可以設計出多波型的導光板來增加不同的視覺效果及多樣性，故本文開始研究多波型導光板的設計應用於檯燈上。

而在設計多波型導光板也是要考量到曲率對於整體光效率的影響，所設計的曲率與飛鳥型導光板的曲率一樣為 $2.5(m^{-1})$ ，在整體設計中以三個完整的波作為多波型的外觀設計(圖 18)，而尺寸設計為 $350 \times 80 \times 3t$  (mm)，特徵仍採用頂角80度靠近反射面的V-cut作2 (mm)等間距分佈，微結構高度變化範圍為0.1~1.1 (mm)，而藉由改變特徵大小來控制照度分佈，因多波型導光板為左右對稱設計，因此只需考慮一半的設計分佈。在導光板上等間距分布了7個高度控制點作為設計參數，首段20 (mm)不佈微結構，以反射遮罩遮蔽避免LED的炫光，而控制點位置取法為每個波峰波谷各取一個點，再加上波峰波谷之間亦取一個點。

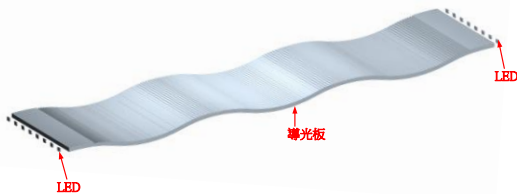


圖 18 多波型導光板設計爆炸圖

從優化程式所預測出來的預測值與實際使用TracePro光學模擬出來的優化資料所得到的變異係數值的趨勢圖可以發現，當優化次數越多時，預測值與實際值出來趨近於接近，而在優化第28次時有最佳解。

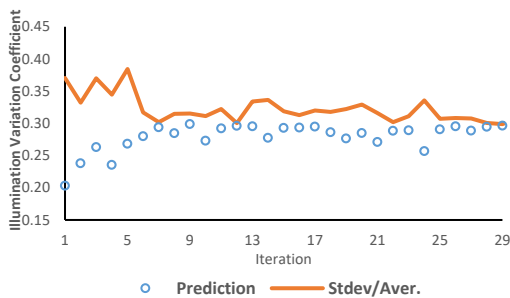
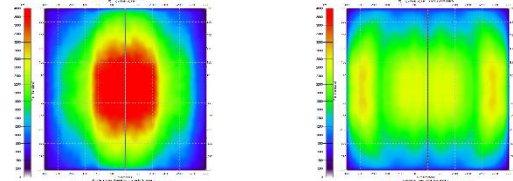


圖 19 多波型導光板迭代趨勢圖

因線性分佈中間光強度較強導致整體平均照度有提升，經過優化後的參數設計雖然在平均照度略低，但在均勻度改善約48%。



(a)線性分佈 (b)最佳化設計

圖 20 結構為線性分佈與最佳化設計照圖比較

## 5. 原型製作與驗證

以弧形檯燈參數設計製作出原型，並利用照度計作量測九點照度值與TracePro光學模擬系統與市售檯燈光學特性作比較。而製作的部分，原設計係以模具加工V-cut分佈，配合設出成形方式製作弧形導光板，但顧及製作成本限制，本文首先使用CNC銑床加工V-cut結構至平板(圖 21)，最後使用固定在具有設計曲率之燈罩框架來達成弧形檯燈的製作，藉以量測與驗證本設計的可行性。

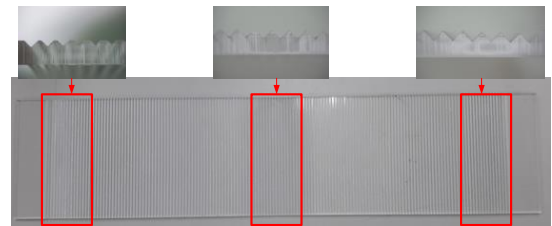


圖 21 利用CNC銑床加工後的壓克力板

加工好的壓克力板利用3D列印出弧型檯燈的外殼遮罩並組裝，接上燈源並做測試(圖 22)，在壓克力加工的結構面在加工時會產生霧面的效果，而因為無法精準測得加工後的V-cut面上所產生的霧化狀態所對應調整TracePro光學系統中的表面參數，故本研究在模擬時參考賴彥璋[7]所設計的ABg參數做為設計， $A=0.026$ ， $B=0.03$ ， $g=2.3$ 所得到的光照度圖與實際測量比較(表 4)，在加工成品後與模擬出來的參數略高，會有此差異主要為因參考的ABg參數並非相對應實際結果。



圖 22 微笑檯燈原型設計製作

表 4 模擬與實際成品平均照度與均勻度之比較

	Average illuminance(lux)	Uniformity(%)
光學模擬加入 ABg 參數	1227	57.6%
原型弧狀導光板	1013	58%

## 5. 結論

本研究利用弧型為基礎的設計出三種導光板應用在閱讀用的檯燈照明上，除了打破一般對於檯燈設計都以為只有平板設計外，也增加了創意與創新性。而在這些設計中針對尺寸設計與結構調整對於出光的調整方法、不同的曲率對出光的影響探討並做驗證。

## 7. 參考文獻

- [1].余志成、陳宗男、張簡少棠，“以矽基蝕刻角錐特徵進行LED側光整合式導光板的最佳化設計”，中國機械工程學會第二十六屆全國學術研討會，2009
- [2].Chen C.-F., Kuo S.-H., "A highly directional light guide plate based on V-groove microstructure cell", Journal on Display Technology, Vol. 10, NO. 12, December 2014
- [3].Samsung Patents Curvier Flex Screen Phone and Concept TV, CES 2013
- [4].Hong, H., Huang, T.-Y., Chou, T.-H., Yang, W.-H. "Microstructural fabrication and design of sunlight guide panels of inorganic - organic hybrid material", Energy and Buildings 43, 2011
- [5].BenQ檯燈-  
[http://www.benq.com.tw/product/led\\_lighting/wit\\_genie/specifications/](http://www.benq.com.tw/product/led_lighting/wit_genie/specifications/)
- [6].Yu, J.-C., Suprayitton "Evolutionary Algorithm Using Progressive Kriging Model and Dynamic Reliable Region for Expensive Optimization Problems," IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics • SMC 2016 | October 9-12
- [7].賴彥璋，"LED組合式導光條的設計與應用"，國立高雄第一科技大學，2014，碩士論文
- [8].嚴逸鋒，"應用創新波形導光板於檯燈照明之產品設計"，國立高雄第一科技大學，2015，碩士論文

# Optical design of curved light guide plate for desk lamp illumination

Shih-Ming Su, Li-Wei Yang, Jyh-Cheng Yu\*

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Automation Engineering

National Kaohsiung First University of Science and Technology

\*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

## Abstract

Light guide plates (LGP) are often crucial components in the backlight module of liquid crystal display. Because of its uniformity and low glare characteristics, LGPs become popular in the lighting applications in recent years. However, most LGPs adopt a flat panel design. This study addresses the optical design of curved light guide plate of illuminative uniformity, which greatly increases the possibility for aesthetic and innovative product design for the illumination applications using various arc-shaped LGPs. The design and the distribution of the coupling feature and the influence of the LGP curvature to the optical design are the major issues in this study. The geometrical design of the micro-feature will determine the light distribution curve, and the feature distribution will influence illumination uniformity. The curved LGPs studied in the thesis includes a single arc and multiple-arc design of LGPs. The LEDs are arranged on the short edges of LGPs to prevent possible glare problems. The v-cut with the vertex angle of 80° is selected due to a peak intensity at the axial direction. The pitch of v-cut is fixed at 2 (mm) and the size of the v-cut is varied to obtain the illumination uniformity. Because there is no direct relationship between the regional v-cut distribution and the local illumination intensity on the observation surface for curved LGPs, this study applies a surrogate optimization using Kriging model to obtain the size distribution of v-cuts for illumination uniformity. The optical design of three curved LGPs including a single arc, a three-arc, and a multiple-arc types have been proposed, which can be applied to the desk lamps with a smiling, a dished, and a waved shape design. A prototype of a smiling desk lamp is fabricated and the optical performance is measured to compare with a commercial product to verify the superiority and feasibility of the proposed design.

**Keywords:** TracePro、V-cut microstructure、Wave light guide plate、Smile desk lamp