

Journal of Far East University

遠東學報

第三十五卷 第一期



VOL.35 .NO.1

遠東學報第三十五卷第一期目錄

應用實驗設計於自動光學檢查影像對比最佳化	pp.1~14	方正中 王鵬森 李靜雯	楊金山 毛水龍
凸輪-連桿機構的設計與分析	pp.15~22	謝榮發	
數值模擬三維集熱器之層流流體與熱傳導特性	pp.23~32	陳玟瑞	

應用實驗設計於自動光學檢查影像對比最佳化

Application of Experimental Design on the Parametric Optimization of Image Contrast in Automatic Optical Inspection

方正中 南臺科技大學 工業管理與資訊系副教授

楊金山 南臺科技大學 工業管理與資訊系副教授

王鵬森 南臺科技大學 工業管理與資訊系助理教授

毛水龍 南臺科技大學 工業管理所碩士

李靜雯 南臺科技大學 工業管理所碩士生

摘 要

本研究運用實驗設計法(Design of Experiments, DOE)的中央合成設計(Central Composite Design, CCD)及反應曲面法(Response Surface Methodology, RSM)，探討自動光學檢測影像對比最佳化方法。首先應用失效模式及效應分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)分析獲得，影響影像對比的三個關鍵因子為上光源、下光源、Z 軸，經實驗設計收集數據後，進行模式最佳化獲得最佳參數組合，改善後影像對比，細線路提升 26.56%，寬線路提升 31.17%，製程能力指標(Process Capability Index, Cpk)滿足大於 1.33 之要求。

關鍵詞：反應曲面法、中央合成設計、願望函數

Fang, Jeng-Jung, Associate Professor, Department of Industrial Management and Information, Southern Taiwan University of Science and Technology.

Yang, Jin-Shan, Associate Professor, Department of Industrial Management and Information, Southern Taiwan University of Science and Technology.

Wang, Peng-Sen, Assistant Professor, Department of Industrial Management and Information, Southern Taiwan University of Science and Technology.

Mao, Shui-Long, Master Graduate, Department of Industrial Management and Information, Southern Taiwan University of Science and Technology.

Li, Jing-Wun, Graduate Student, Department of Industrial Management and Information, Southern Taiwan University of Science and Technology.

Abstract

This study uses the Central Composite Design (CCD) and Response Surface Methodology (RSM) of the Design of Experiments (DOE) to carry out efficient experiments. The key factors are acquired using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) from literature review and existing process conditions. The three key factors affecting the image contrast are the upper light source, the lower light source, and the Z-axis. The quality characteristics in the study are fine-line grayscale differences and wide-line grayscale differences. After the research the optimal parameter settings for upper light source, lower light source, and the Z axis are 201.93, 20.65, and 199.98 respectively. After improving the image contrast, the fine lines is increased to be 26.56% and the wide lines is increased to be 31.17%. The Process Capability Index (Cpk) meets the requirement that Cpk is larger than 1.33.

Keywords: Response Surface Methodology, Central Composite Design, Desirability function

一、緒論

(一)研究背景與動機

目前智慧型裝置大量運用觸控螢幕(Touch panel)，其中廣泛使用於中小尺寸行動裝置的觸控螢幕主流為電容式觸控技術，電容式觸控技術的主要特色為多點觸控，是目前互動式操作的應用主流，電容式觸控的觸控感測器(Touch Sensor)所採用之製程技術及設備又與 TFT-LCD 中的 TFT(Thin-Film Transistor)及 Color Filter 製程技術高度相近。自動光學檢測(Automatic Optical Inspection, AOI)在觸控感測器製程中，可即時自動檢出製程中所發生的瑕疵，是生產線監控製程、分析及改善良率的重要依據，在觸控感測器製程上，自動光學檢測如何提升檢測品質及擴展應用領域值得深入研究。

(二)研究目的

本研究以觸控感測器製程中的自動光學檢測設備為研究對象，探討實驗設計在觸控感測器瑕疵檢測上影像對比最佳化的應用。研究目的依次為：

1. 運用反應曲面法(Response Surface Methodology, RSM)及中央合成設計(Central Composite Design, CCD)，探討自動光學檢測影像對比最佳化方法，求解多目標函數、獲得最佳化製程參數。
2. 在現有製程上提供標準化的實驗手法，取代由人員主觀判定影像是否最佳的方式。
3. 獲得影像對比最佳化方法及影像量化分析手法。

二、文獻探討

(一)電容式觸控感測器

表面電容式(Surface Capacitive)之觸控技術可視為五線阻抗膜方式，觸控面板感應區由透明導電膜與設計四個電極的來偵測人體自電容，手指觸碰破壞均勻電位，越靠近觸碰位置其電流值越

大，計算相對四個邊角電極的電流比例來判斷觸碰的位置[1]；即當人體或手指靠近於表面電容式 TP 時，人體靜電會因四方角落所發出之電流產生電容耦合之電流結合變化，該誘導電流變化之類比訊號，經控制器計算出和四方角落之距離，即可計算實際觸控位置，並達成觸控指令意義之動作如圖 1 [2]。

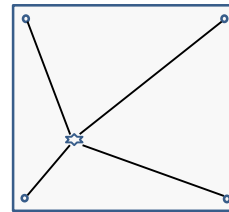


圖 1 表面電容式觸控面板示意圖

投射電容式(Projected Capacitive)觸控技術，利用手指靠近電極時兩者之間的電容會增加，偵測那條線的靜電容變大可知觸碰點位[1]，如圖 2，投射電容式觸控技術，依接收訊號的原理可區分為自電容型(Self Capacitance)、互電容型(Mutual Capacitance)兩種。

自電容量測方法是量測各個感應單元自身的電容量變化，手指觸碰時其自身感應單元電容量增加，掃描次數等於行數加列數，適用於軸座標型觸控螢幕[1]。

互電容量測方法是運用 X、Y 掃描電極構成相互之間的耦合電容，手指觸碰時其間的互電容減小，由行區域提供觸發信號，列區域接收感應信號[1]；互電容式主要有可支援真實多點觸控的優點，因支援多點觸控所以資料計算量較多($X*Y$)，較耗費 CPU 運算資源[2]。

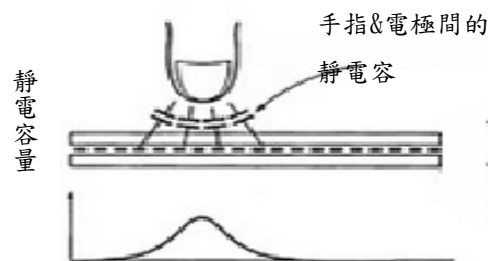


圖 2 自電容驅動

(二)自動光學檢測相關文獻

自動光學檢測相關研究，在 TFT-LCD 相關零組件有相當多的應用研究，主要有二大類，分類系統應用及實驗設計應用。

1. 瑕疵檢出的分類系統應用：

- (1) 應用 AOI 檢測過程中增加了 Cell Zone 為特徵值做分類系統應用[3]。
- (2) 利用電壓轉換影像的原理，提高缺陷檢出率、降低檢測時間、改善缺陷定位[4]。
- (3) 應用 Data mining 技術的 C4.5 決策樹分類法、倒傳遞分類器及形態學[5]。

2. 實驗設計應用：

- (1) 以田口式實驗設計法，找出影響薄膜電晶體閘極掃描電路短路檢測能力之主要因子，實驗結果發現可提升缺陷檢出能力；而過篩(假性缺陷)比率僅微幅增加[6]。
- (2) 以偏光板產業為例，以田口實驗設計法研究，檢查參數速度、閾值、直交檢查光量值、正透過檢查光量值及光圈等五個變數，經研究的速度和閾值可提昇 2%的檢出率[7]。
- (3) 應用反應曲面法及中央合成設計，提升彩色濾光片自動光學檢測機反射光源檢出能力，找出重要因子最佳參數組合為反射光源灰階亮度、白缺陷參數(閾值)、黑缺陷參數(閾值)[8]。

本研究主要是應用實驗設計，針對自動光學檢測設備做影像對比最佳化參數研究，此過程主要將 CCD 成像照片透過灰階亮度的量化分析，得到最佳成像條件，提供給其他同類型的自動光學檢測機另一種快速評估成像條件最佳化的方式。

(三)實驗設計

實驗具有相當高的成本，必需採最少量的實驗，得到最大量有用的品質特性資訊，因此產生實驗設計議題。系統化選擇獨立變數組合，進行實驗並記錄反應值，收集這些建立系統模型所需數據的程序稱為實驗設計[9]。

黎正中、唐麗英譯[10]指出一個製程系統包含輸入、輸出、可控因子、不可控因子，透過規劃和執行實驗的過程找到顯著影響輸出 Y 反應值的可控因子 X，利用統計方法進行資料分析，進而獲得可靠正確及客觀的結論。一般製程系統可以表示如模型圖 3。

基於上述觀點，葉怡成[9]指出，品質特性(反應變數)是品質因子(自變數)的函數，構成了系統模型的存在性；藉由實驗，因子水準是可以控制在特定水準下以獲得其品質特性的反應值，構成了實驗設計的可行性；實驗具有高成本，構成了系統實驗設計的必要性；品質特性的值是可觀察的，構成了系統模型建構的可行性；品質特性的函數是未知的，構成了系統模型建構的必要性；品質特性具有特定需求，構成了系統參數優化的必要性。

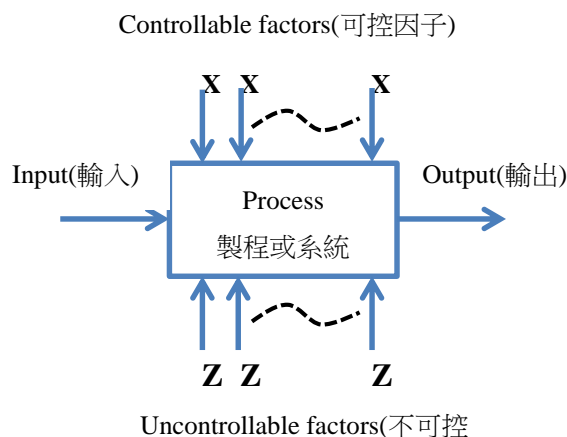


圖 3 製程系統模型[11]

(四)反應曲面法 RSM

反應曲面法彙整[10,12-14]說明如下，變數 x_1 及 x_2 與反應值 y 函數表示為式(1)，其中 ϵ 為誤差項，函數的反應值 y 受數個 x 變數影響，要求得最佳化反應值的目標值 $E(y)=\eta$ 可用集合數學和統計手法的反應曲面法 RSM 來進行建模和分析，通常使用圖形表示反應曲面(response surface)，如圖 4 是期望值 $E(y)=f(x_1, x_2)=\eta$ 和變數 x_1 及 x_2 的反應曲面圖。

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad \text{式(1)}$$

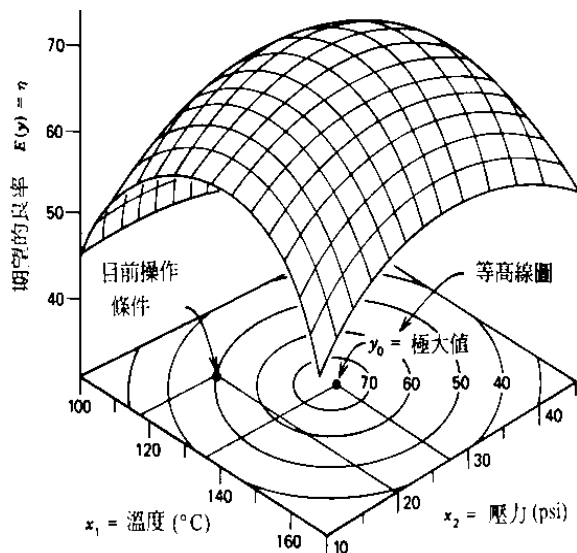


圖 4 三維的反應曲面及等高線圖[10]

RSM 的程序說明如下，通常目前系統操作條件距離真正最佳操作條件很遠，用最陡上升法 (method of steepest ascent) 沿最大反應值增加的改善路徑到達最佳點的附近，若是找極小化值則使用最陡下降法 (method of steepest descent)。反應曲面配適的一階模型 (first-order model) 為式(2)。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{式(2)}$$

到達最佳點附近若系統中存在曲率，則必須配適高階的多項式，如二階模型 (second-order model) 為式(3)。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{式(3)}$$

(五) 中央合成設計配適二階模型

中央合成設計是配適二階模型很有效率的方法，運用 2^k 因子設計包含 2^k 個角點、 $2k$ 個軸點及 n_c 個中心點，實驗數比 3^k 因子設計更有效率。

中央合成設計使用二水準因子設計的架構下，其角點 (corner points) 實驗，因為配適二階模型包含二因子交互作用，因此必須使用解析度 V 以上的因子實驗[9]。因子設計可分為全因子設計及部份因子設計，全因子設計將所有可能的實驗因子組合均列入實驗設計中，部分因子實驗設計是取

全因子實驗設計的部分點來進行實驗與統計分析。葉怡成[9]提到，二水準因子設計的重要性有三個：

1. 篩選重要變數：可以由眾多可能的品質因子中，找出具顯著性的因子。
2. 建構一階模型：實驗數據可用來建構一階模型。
3. 二階模型基礎：實驗數據加以擴充可用來建構二階模型。

中央合成設計的展開通常是透過逐次試驗 (sequential experimentation)，配適一個一階模型，然後增加軸點納入二次項模型。Box & Hunter [15] 研究中提到一個二階反應曲面設計應是可旋轉性的 (rotatable)， $\alpha = (n_f)^{1/4}$ 就可產生一個可旋轉的中央合成設計，其中 n_f 為設計中因子的角點數，旋轉性意義是在所有方向提供相同預測精確度的設計。例如考慮 2^2 因子設計，如果再加入單一中心點及四個軸點試驗，一個軸點到中心點之間的距離以 α 表示， 2^2 因子設計軸點位於中心點距離 $\alpha = (4)^{1/4} = 1.414$ 的中央合成設計，又如 2^3 因子 CCD 設計的 $\alpha = (8)^{1/4} = 1.682$ 。

(六) 失效模式與效應分析

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) 失效模式與效應分析，FMEA 是業界常用於評價產品設計和生產製程之潛在失效模式的方法，能在設計階段就有系統的預測系統內可能引起的失效及故障等情況。最早應用於汽車工業，現今擴展應用於生產系統、產品設計、生產製程、服務品質等各種領域的失效模式之分析技術，產業橫跨航太、國防、汽車、電子及機械製造業、造船、醫療、服務業等。黃耀琨[16]提到 FMEA 手法可以解析出系統的可靠性、維護性及安全性的影響，並且指出可能影響重大失效的子系統、零件或機器，藉由風險指數 (RPN) 的評估，找出實施改善方法與預防措施的優先順序。

FMEA 主要區分，產品設計階段失效分析 DFMEA (Design FMEA) 及製程設計階段失效分析 PFMEA (Process FMEA)，主要定義如下；產品設

計階段失效分析，在 APQP(先期產品品質規劃)的第二階段產品設計開發階段完成，評估最終的產品、相關系統、子系統和零組件，根據以往的經驗和問題，評估潛在失效模式之可能對產品系統之影響性。製程設計階段失效分析，在 APQP 的第三階段製程設計開發階段完成，黃聖雄[17] 指出 PFMEA 用來分析產品在生產過程中潛在的失效模式，並且對所造成的失效效應，提出適當的製程改善活動，預先防止問題發生及不良現象再現。

在 FMEA 正式導入分析後，評估故障對系統之影響性，可用風險優先指數(Risk Priority Number, RPN)進行影響性衡量，並依衡量後之重要性進行改善之優先項目。評估 RPN 風險指數有下列三個項目：

嚴重度(Severity)，評估失效現象對於人或物的傷害嚴重程度，依實際傷害程度進行判定。發生度(Occurrence)，即失效現象發生之頻度。偵測度(Detection)，指失效現象檢出之困難程度，即代表此失效現象流出場外之可能程度。

以上嚴重度(S)、發生度(O)及偵測度(D)其等級之劃分，還有衡量之程度範圍，皆可依各產業不同自行定義。RPN 風險系數計算方式如下式(4)。

$$\text{風險系數(RPN)} = S * O * D \quad \text{式(4)}$$

三、研究方法

(一)定義研究問題及目的

本研究是以觸控感測器線路為對象來進行最佳化自動光學檢測(AOI)雙光源的參數，由實際製程條件、文獻探討及 PFMEA 分析，決定實驗因子，利用改變光源及焦距(Z 軸)參數改變影像對比並分析其灰階差異來進行影像對比最佳化，相關數據為連續性數值因此實驗進行及模型建構、分析、最佳化使用中央合成設計適配二階模型進行反應曲面法實驗及統計分析，求得最佳參數組合並進行最佳參數驗證。

(二)決定品質特性及實驗因子

本研究召集整合、工程、品保相關人員成立 FMEA 小組，以操作人員、機台設備、材料、操作方法及生產環境等構面進行討論，依據主系統、製程特性、子系統、零件等，歸納出影響線路檢測品質的失效項目有三項分別是，檢測 Function 設定、影像品質、設備氣浮設定，使用失效模式與效應分析的 PFMEA 分析各項風險係數 RPN，影像品質項目的 RPN>100 需列為優先改善項目，如下表 1 影響線路檢測品質 PFMEA 分析表。由影響線路檢測品質 PFMEA 分析表可知，影像品質項目失效的主要因素分別為上光源、下光源、Z 軸(焦距高度)、相機解析度、取像掃描速度等共 5 個因子。

再參考相關研究，吳家縛[8]提升彩色濾光片自動光學檢測機反射光源檢出缺點的能力重要因子為反射光源灰階亮度、白欠陷及黑欠陷參數；鍾育婕[7]偏光板產業為例以田口實驗設計法研究檢查參數速度、閾值、直交檢查光量值、正透過檢查光量值及光圈等五個變數的研究結果其速度和閾值是兩個主要參數；由文獻歸納出的相關實驗因子有光源亮度(光量)、閾值、速度、光圈。

同時考量生產產能其檢測速度不可變動、解析度亦不可變動，因此相機解析度、檢查速度及相機光圈無法使用在本研究。本研究由實際製程條件、文獻探討及 PFMEA 分析，決定實驗因子為上光源、下光源、Z 軸(焦距高度)。

品質特性使用成像圖片的明亮灰階差異作為反應變數，因產品特性需區分「細線路灰階差異」及「寬線路灰階差異」，兩種品質特性。若影像為彩色成像圖片亦可轉換為灰階圖片再進行分析。

表 1 影響線路檢測品質 PFMEA 分析表

項目	預估失效模式	預估失效效應	嚴重度	發生度	偵測度	風險係數(RPN)
檢測 Function 設定	Pattern 設定錯誤	造成 false defect	8	3	1	24
	閾值錯誤	漏檢	8	1	3	24
影像品質	光源不佳	漏檢或誤檢	8	7	8	448
	焦距模糊	影像模糊, 影響檢出率	8	8	8	512
	解析度錯誤	Size 錯誤影響檢出率	8	1	3	24
設備氣浮設定	玻璃振動	圖像模糊, 影響檢出	5	1	5	25
	玻璃背面刮傷	損失良率	8	1	3	24

(三) 反應曲面法與中央合成實驗設計

本研究使用中央合成設計(CCD)配適二階的反應曲面模型，中央合成設計是由下列三種實驗所組成：

1. 角點實驗(n_F)，角點實驗組數 $n_F=2^K$ 。
2. 軸點實驗(n_A)，為使實驗設計具可旋性須令 $\alpha=(n_F)^{1/4}$ ，軸點實驗組數 $n_A=2K$ 。
3. 中心點實驗(n_C)，為使中心點預測變異合理化，需要重複中心點實驗， n_C 取 3 至 5 個， $n_C=4\sqrt{n_F+1}-2k$ 。

二階反應曲面實驗設計的中央合成設計，採用上光源、下光源、Z 軸三個實驗因子，因此中央合成設計需要設計 2^3 等於 8 個角點實驗、 2×3 等於 6 個軸點實驗、中心點實驗選用 6 個中心點。

依目前常用製程條件的參數區間作為各因子水準操作條件，上光源的實驗操作範圍值為 100 至 250，下光源的實驗因子水準操作範圍值為 15 至 40，Z 軸的實驗操作範圍值為-200 至 200，軸點定義- α 等於-1.682、 α 等於 1.682。本實驗有兩

個反應變數項目，一為「細線路灰階差異」另一個則為「寬線路灰階差異」，品質規格為 90 ± 10 。

(四) 實驗數據收集及分析

首先由 Minitab Response Surface Design 產生實驗組合，重複 2 次隨機化實驗並收集影像圖片，分析細線路及寬線路圖片的灰階差異並記錄數據，為避免量測手法差異並確保實驗量測方法一致，編寫 imageJ 的 Macro (巨集指令) 自動量測圖片的灰階數據，每次實驗圖片皆量測相同的點位，使用軟體 Analyze 選項內的 Histogram 分析灰階數據。

影像分析所採用的 imageJ (<https://imagej.net/ImageJ>) 是一種可自由檢查、修改程式的開放原始碼(Open source)的影像處理軟體。Schindelin et al. [18] 指出，在生物醫學圖像的分析需要相應的先進圖像處理技術和分析技術，以 Open source 軟體 imageJ 做為分析的工具套件，可以應用在生物醫學圖像分析、影像預處理、軌跡追蹤多種影像分析及各種免費軟體插件。

實驗數據利用迴歸分析及變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA)，進行迴歸模型有效性、因子顯著性、殘差項三大假設、模式缺適性(Lack of Fit)等檢定如下，

1. 迴歸模型有效性以複判定係數 R^2 及 R_a^2 調整複判定係數(adjusted multiple coefficient of determination) 進行分析，判定係數介於 0 到 1 之間，判定係數越大表示模型對變異的解釋力越大。
2. 因子顯著性檢定可由 F 檢定統計量判定，臨界值法，若 $F \geq F_\alpha$ ，則拒絕 H_0 ；或 p 值法， $\alpha=0.05$ ，若 p 值 $\leq \alpha$ 時，則拒絕 H_0 。迴歸模型因子顯著時表示至少有一個 β_i 的估計值不為零。
3. 殘差項分析，進行檢定殘差的常態分配、誤差的變異數相等（一致性）檢定、誤差項獨立性檢定，需符合此三大假設，可使用常態機率圖與殘差圖分析，任一項假設不成立，則模型為無意義。

4. 模式缺適性檢定，臨界值法， $F_0 \geq F_\alpha$ ，則拒絕 H_0 ；或 p 值法， $\alpha=0.05$ ，若 p 值 $\leq \alpha$ ，則拒絕 H_0 。

(五) 預測模型建構

模型建構是使用實驗獲得的數據來建立獨立變數與反應變數的函數關係式，應用中央合成設計及反應曲面法，本研究採用三因子二水準實驗設計，三因子二水準的反應曲面二階模型如式(5)，利用迴歸分析的最小平方法準則來估計迴歸係數。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_{12} + \beta_{13} x_{13} + \beta_{23} x_{23} \quad \text{式(5)}$$

同時以變異數分析，對預測模型進行顯著性檢定及充份性檢定，以殘差分析做迴歸模型的診斷。模型能解釋應變數變異的百分比以複判定係數 R^2 及調整複判定係數 Ra^2 來判定；模型顯著性可用 F 統計量來檢定；模型充份性使用模式缺適性的 F 統計量來檢定；殘差分析檢定其常態性、一致性以及獨立性三大假設。

(六) 參數最佳化及驗證實驗

預測模型建構完成後進行參數最佳化，使用 Derringer and Such [19]提出的聯立最佳化技術的方法進行多目標品質函數的最佳化，使用的方法稱為願望函數(Desirability Function)。

彙整說明如下[10,20]，先將每個反應變數 y_i 轉換為個別願望函數 d_i 為式(6)。

$$0 \leq d_i \leq 1 \quad \text{式(6)}$$

當反應變數 y_i 等於目標值時， $d_i = 1$ ；若 d_i 越小則 y_i 離預測目標越遠， $d_i = 0$ 則超出可接受的範圍。 m 是反應變數的個數，若有任一反應變數的 d_i 超出可接受範圍，則總願望值為零，總願望函數 D 為式(7)。

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m)^{1/m} \quad \text{式(7)}$$

本研究的品質特性使用望目特性，目標值(T)在規格下限(L)與規格上限(U)間的兩邊願望函數為式(8)。

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad \text{式(8)}$$

確認實驗使用實驗所得到的二階反應曲面模型進行最佳化分析，由最佳化產生的因子最佳參數來進行 20 次確認實驗，確認平均反應值 \bar{y} 是否在 $100(1-\alpha)\%$ 的 CI 信賴區間內及所有個別值 y_i 皆在 $100(1-\alpha)\%$ 的 PI 預測區間內。

若 CI 信賴區間及 PI 預測區間皆符合，表示實驗設計所獲得的反應曲面二階模型正確，本研究使用 $\alpha=0.05$ ，CI 信賴區間及 PI 預測區間皆為 95%。

四、研究結果與討論

(一) 實驗數據分析

本研究經由反應曲面法及中央合成設計進行實驗的數據說明如表 2 及表 3，三個因子參數定義為 x_1 (上光源)、 x_2 (下光源)、 x_3 (Z 軸)，反應變數 y_1 表示「細線路灰階差異」， y_2 表示「寬線路灰階差異」。

表 2 細線路灰階差異(y1)數據

NO	因子編碼			細線路灰階差異	
	x1	x2	x3	y11	y12
1	-1	-1	-1	74	76
2	1	-1	-1	88	88
3	-1	1	-1	65	65
4	1	1	-1	79	79
5	-1	-1	1	63	60
6	1	-1	1	78	76
7	-1	1	1	41	35
8	1	1	1	52	53
9	-1.682	0	0	53	57
10	1.682	0	0	74	75
11	0	-1.682	0	85	89
12	0	1.682	0	53	52
13	0	0	-1.682	80	86
14	0	0	1.682	51	48
15	0	0	0	66	68
16	0	0	0	62	68
17	0	0	0	64	67
18	0	0	0	65	66
19	0	0	0	66	68
20	0	0	0	66	69

表 3 寬線路灰階差異(y2)數據

NO	上光源	下光源	Z 軸	寬線路灰階差異	
	x1 實際值	x2 實際值	x3 實際值	y21	y22
1	130.4	20.1	-118.9	72	68
2	219.6	20.1	-118.9	88	92
3	130.4	35	-118.9	45	48
4	219.6	35	-118.9	64	66
5	130.4	20.1	118.9	66	71
6	219.6	20.1	118.9	84	82
7	130.4	34.9	118.9	38	37
8	219.6	34.9	118.9	55	48
9	100	27.5	0	47	47
10	250	27.5	0	68	74
11	175	15	0	91	90
12	175	40	0	46	46
13	175	27.5	-200	73	73
14	175	27.5	200	60	60
15	175	27.5	0	61	60
16	175	27.5	0	63	63
17	175	27.5	0	65	62
18	175	27.5	0	64	65
19	175	27.5	0	65	64
20	175	27.5	0	62	59

模式建立的實驗數據由 Minitab 統計軟體進行迴歸分析及變異數分析；殘差分析則進行殘差項的常態性、一致性以及獨立性三大假設檢定。

模式建立，首先對反應變數細線路灰階差異(y1)實驗數據進行分析，其實驗數據如表 2，迴歸模型分析其結果如表 4、變異數分析其結果如表 5，因子的 P-Value 若小於 α 值 0.05 則此因子對反應變數細線路灰階差異(y1)有顯著的影響，由結果發現，一次項 x1(上光源)、x2(下光源)、x3(Z 軸)三項的 P-value 均為 0 小於 0.05(α 值)、平方項 x2*x2 及交互作用項 x2*x3 的 P-value 皆小於 0.05(α 值)均為顯著，可得到反應變數細線路灰階差異(y1)的反應曲面模型如式(9)所示。

$$y1=66.2486 + 6.5751*x1 - 9.1545*x2 - 9.8368*x3 + 1.2465*x2^2 - 3.625*x2*x3 \quad \text{式(9)}$$

檢視迴歸分析的判定係數 R^2 及複判定係數 Ra^2 ，判定係數 R^2 等於 97.78%及調整的複判定係數 Ra^2 等於 97.11%，表示此反應曲面模型對反應

變數細線路灰階差異(y1)的變異具有高度解釋的能力。

至於缺適性檢定，由 ANOVA 分析 P-Value 等於 0.177 大於 0.05(α 值)為不顯著，表示缺適性不存在，此迴歸模型有良好之配適。

表 4 細線灰階差異(y1)迴歸分析

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	66.2486	0.6345	104.415	0
x1	6.5751	0.421	15.619	0
x2	-9.1545	0.421	-21.747	0
x3	-9.8368	0.421	-23.368	0
x1*x1	-0.5213	0.4098	-1.272	0.213
x2*x2	1.2465	0.4098	3.042	0.005
x3*x3	0.0091	0.4098	0.022	0.983
x1*x2	0	0.55	0	1
x1*x3	0.375	0.55	0.682	0.501
x2*x3	-3.625	0.55	-6.591	0

S = 2.20004 PRESS = 271.048
R-Sq = 97.78% R-Sq(pred) = 95.85% R-Sq(adj) = 97.11%

表 5 細線灰階差異(y1) ANOVA 分析

Source	DF	Seq SS	F	P
Regression	9	6382.29	146.51	0
Linear	3	6112.81	420.98	0
x1	1	1180.82	243.96	0
x2	1	2289.03	472.92	0
x3	1	2642.96	546.04	0
Square	3	56.99	3.92	0.018
x1*x1	1	11.82	1.62	0.213
x2*x2	1	45.16	9.25	0.005
x3*x3	1	0	0	0.983
Interaction	3	212.5	14.63	0
x1*x2	1	0	0	1
x1*x3	1	2.25	0.46	0.501
x2*x3	1	210.25	43.44	0
Residual Error	30	145.21		
Lack of Fit	5	36.46	1.68	0.177
Pure Error	25	108.75		
Total	39	6527.5		

同樣對反應變數寬線路灰階差異(y2)實驗數據進行分析，其實驗數據如前面表 3，迴歸模型分析其結果如表 6、變異數分析其結果如表 7，因子的 P-Value 若小於 α 值 0.05 則此因子對反應變數寬線路灰階差異(y2)有顯著的影響，由結果發現，一次項 x_1 (上光源)、 x_2 (下光源)、 x_3 (Z 軸)三項的 P-value 均為 0 小於 0.05(α 值)、平方項 x_1*x_1 、 x_2*x_2 、 x_3*x_3 及交互作用項 x_1*x_3 和 x_2*x_3 的 P-value 皆小於 0.05(α 值)均為顯著，可得到反應變數寬線路灰階差異(y2)的反應曲面模型如式(10)所示。

$$y_2 = 62.7724 + 7.8615*x_1 - 13.6078*x_2 - 3.8708*x_3 - 1.4724*x_1^2 + 1.798*x_2^2 + 1.1793*x_3^2 - 1.25*x_1*x_3 - 1.75*x_2*x_3$$

式(10)

檢視迴歸分析的判定係數 R^2 (coefficient of determination)及複判定係數 Ra^2 (adjusted coefficient of multiple determination)，判定係數 R^2 等於 98.14%及調整的複判定係數 Ra^2 等於 97.58%，表示此反應曲面模型對反應變數寬線路灰階差異(y2)的變異具有高度解釋的能力。

至於缺適性檢定，由 ANOVA 分析 P-Value 等於 0.662 大於 0.05(α 值)為不顯著，表示缺適性不存在，此迴歸模型有良好之配適。

表 6 寬線路灰階差異(y2)迴歸分析

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	62.7724	0.6253	100.391	0
x_1	7.8615	0.4149	18.95	0
x_2	-13.6078	0.4149	-32.801	0
x_3	-3.8708	0.4149	-9.331	0
x_1*x_1	-1.4724	0.4039	-3.646	0.001
x_2*x_2	1.798	0.4039	4.452	0
x_3*x_3	1.1793	0.4039	2.92	0.007
x_1*x_2	-0.25	0.542	-0.461	0.648
x_1*x_3	-1.25	0.542	-2.306	0.028
x_2*x_3	-1.75	0.542	-3.229	0.003

S = 2.16815 PRESS = 265.862
R-Sq = 98.14% R-Sq(pred) = 96.49% R-Sq(adj) = 97.58%

表 7 寬線路灰階差異(y2)ANOVA 分析

Source	DF	Seq SS	F	P
Regression	9	7441.37	175.89	0
Linear	3	7155.06	507.36	0
x_1	1	1688.06	359.1	0
x_2	1	5057.74	1075.92	0
x_3	1	409.25	87.06	0
Square	3	211.32	14.98	0
x_1*x_1	1	88.99	13.29	0.001
x_2*x_2	1	82.25	19.82	0
x_3*x_3	1	40.08	8.53	0.007
Interaction	3	75	5.32	0.005
x_1*x_2	1	1	0.21	0.648
x_1*x_3	1	25	5.32	0.028
x_2*x_3	1	49	10.42	0.003
Residual Error	30	141.03		
Lack of Fit	5	16.28	0.65	0.662
Pure Error	25	124.75		
Total	39	7582.4		

接下來進行殘差分析以檢驗誤差的三大假設，對反應變數細線路灰階差異(y1)常態性檢定，由 Minitab 的 Normal Probability Plot 檢定，檢視其殘差常態機率圖，殘差各點皆落在 95%的信賴區間，且 P-Value 等於 0.506 大於 0.05 為不顯著，誤差項滿足常態性假設。

細線路灰階差異(y1)殘差變異數一致性檢定，Bartlett's Test 檢定的 P-Value 等於 0.869 大於 0.05 表示殘差的變異數符合一致性假設。

細線路灰階差異(y1)殘差獨立性檢定，由 Minitab Autocorrelation Function 殘差項獨立性檢定的自我相係數(ACF)在 95%信賴區間內，亦即誤差項彼此獨立因此符合獨立性之假設。以上三種殘差分析的假設檢定符合常態性、一致性、獨立性檢定，即表示細線路灰階差異(y1)迴歸模型為符合假設。

同樣對反應變數寬線路灰階差異(y2)進行殘

差分析，寬線路灰階差異(y2)常態性檢定，由 Minitab 的 Normal Probability Plot 檢定，檢視其殘差常態機率圖，其殘差各點皆落在 95%的信賴區間，且 P-Value 等於 0.128 大於 0.05 為不顯著，誤差項滿足常態性假設。

寬線路灰階差異(y2)殘差變異數一致性檢定，Bartlett's Test 檢定的 P-Value 等於 0.826 大於 0.05 表示殘差的變異數符合一致性假設。

寬線路灰階差異(y2)殘差獨立性檢定，由 Minitab Autocorrelation Function 殘差項獨立性檢定的自我相係數(ACF)在 95%信賴區間內，亦即誤差項彼此獨立因此符合獨立性之假設。以上三種殘差分析的假設檢定符合常態性、一致性、獨立性檢定，即表示寬線路灰階差異(y2)迴歸模型為符合假設。

(二)反應曲面(RSM)參數最佳化

由 Minitab 依據品質特性的反應變數規格分析最佳化的結果，如表 8，因子 x1(上光源)、x2(下光源)、x3(Z 軸)最佳化編碼值分別為 1.6818、-0.8488、-0.896，利用線性內插法轉換為真實值分別為 249.91、21.22、-106.53，最佳化總願望函數為 1，表示最佳參數值能讓反應變數 y1 及 y2 達到品質特性的目標值，後續依此參數進行確認實驗。

表 8 反應變數 y1 及 y2 最佳化參數

因子	因子編碼值	因子實際值	y1 最佳值	y2 最佳值
x ₁ (上光源)	1.6818	249.91	90	90
x ₂ (下光源)	-0.8488	21.22		
x ₃ (Z 軸位置)	-0.896	-106.53		

(三)驗證實驗

此確認實驗之目的，是根據實驗最佳化分析的參數數據進行重複性實驗，以確認最佳化的參數條件與反應曲面迴歸模型是否正確。葉怡成(2016)提到，獲得一個經過顯著性、充份性檢定及殘差檢定的預測模型後，進行預測時模型具有不確定性，故有信賴區間(Confidence interval)產生。

信賴區間(CI)是用於平均值的區間估計，預測區間(PI)是用於個別值的區間估計，反應個別值的預測區間比反應平均值的信賴區間寬。首先由 Minitab 來計算最佳化之後的品質特性之信賴區間(CI)以及預測區間(PI)，使用表 9 的細線路灰階差異(y1)及寬線路灰階差異(y2)最佳化參數來計算 y1 及 y2 信賴區間及預測區間說明如下，數據整理如表 9。

1. 反應變數細線路灰階差異(y1)的平均值信賴區間計算結果，95%信賴區間(CI)為(86.3709, 93.6302)，平均值需落在此區間；預測區間計算結果，95%預測區間(PI)為(84.2246, 95.7765)，所有個別值需落在此區間。
2. 反應變數寬線路灰階差異(y2)的平均值信賴區間計算結果，95%信賴區間(CI)為(86.4234, 93.5774)，平均值需落在此區間；預測區間計算結果，95%預測區間(PI)為(84.3081, 95.6926)，所有個別值需落在此區間。

表 9 反應變數信賴區間及預測區間

反應變數	95% CI	95% PI
細線路灰階差異(y1)	(86.3709, 93.6302)	(84.2246, 95.7765)
寬線路灰階差異(y2)	(86.4234, 93.5774)	(84.3081, 95.6926)

最後進行確認實驗，以表 8 的 x1(上光源)、x2(下光源)、x3(Z 軸位置)最佳化參數分別為 249.91、21.22、-106.53，進行 20 組確認實驗。

細線路灰階差異(y1)確認實驗數據，y1 其最大值等於 93 及最小值等於 86，皆在(84.2246, 95.7765)預測區間(95% PI)內；平均值等於 89.6 在(86.3709, 93.6302)信賴區間(95% CI)內；表示 y1 迴歸模式及確認實驗正確。

寬線路灰階差異(y2)確認實驗數據，y2 其最大值等於 94 及最小值等於 86，皆在(84.3081, 95.6926)預測區間(95% PI)內；平均值等於 89.5 在(86.4234, 93.5774)信賴區間(95% CI)內；表示 y2 迴歸模式及確認實驗正確。

(四)改善成果

應用反應曲面法及中央合成設計的實驗設計方式，有效地改善影像品質。「細線灰階差異」的影像對比，灰階平均值由 65.8 提高到 89.6，提高 26.56%的對比。「寬線灰階差異」的影像對比，灰階平均值由 61.6 提高到 89.5，提高 31.17%的影像對比。改善影像品質後，對線路瑕疵檢出率，實測結果由改善前 91.1% 提高到 93.9%。變更後製程之能力表現，評估製程性能指標(Process Performance Index, Ppk)及製程能力指標(Process capability index, Cpk)兩項數值，其中細線路灰階差異(y1)Cpk 等於 $1.50 \geq 1.33$ ，Ppk 等於 $1.46 \geq 1.33$ ；寬線路灰階差異(y2)Cpk 等於 $1.47 \geq 1.33$ ，Ppk 等於 $1.43 \geq 1.33$ 。Cpk 大於 1.33、及 Ppk 大於 1.33 即表示製程能力和穩定性皆可滿足要求。

五、結 論

本研究以投射電容式之觸控感測器的線路為對象，為達到改善自動光學檢測在線路區的檢測品質，運用 FMEA 及文獻探討方式，經 FMEA 分析找出影像品質項目為影響線路檢測品質的優先改善項目，將影像對比最佳化列為優先改善措施，同時分析影響品質特性(灰階差異)的因子顯著性，

運用實驗設計的中央合成設計及反應曲面法配適二階反應曲面，獲得自動光學檢測的最佳化製程參數，以達到影像對比最佳化目的，提升線路檢測品質。經本研究探討後，歸納下列幾點結論：

1. 上光源、下光源、Z 軸(焦距高度)、相機解析度、取像掃描速度、閾值、光圈等為影響影像品質的7個因子。掃描速度、光圈、相機解析度，因受限於生產產能及檢出能力是不可調整的不可控因子。光源(分上下光源或直交光量值、正透過光量)與 Z 軸(焦距高度)為可控因子，經實驗驗證確認上光源、下光源、Z 軸(焦距高度)是改善影像對比最佳化的重要因子，若是在未來生產其他產品進行影像對比最佳化可優先採用此三個因子進行最佳化。
2. 影響線路檢測品質的重要項目為影像品質，透過影像對比最佳化，在光源不佳及焦距模糊兩項失效模式，改善前 RPN 值分別為 448 及 512，改善後 RPN 值皆降為 80，如表 10。
3. 「細線灰階差異」的影像對比，灰階平均值由 65.8 提高到 89.6，提高 26.56%的對比。「寬線灰階差異」的影像對比，灰階平均值由 61.6 提高到 89.5，提高 31.17%的影像對比。線路瑕疵檢出率由 91.1% 提高到 93.9%。

表 10 影響線路檢測品質 PFMEA 改善結果

項目	預估失效模式	預估失效效應	預估失效原因	現行措施	改善措施	改善前				改善後			
						嚴重度	發生度	偵測度	RPN	嚴重度	發生度	偵測度	RPN
影像品質	光源不佳	漏檢或誤檢	上光源及下光源，亮或過暗	明亮由目視判斷	進行最佳化，定期取樣確認品質	8	7	8	448	8	2	5	80
	焦距模糊	影像模糊，影響檢出率	Z 軸過高或過低	靜態影像目視判斷	進行最佳化，定期取樣確認品質	8	8	8	512	8	2	5	80
	解析度錯誤	size 錯誤，影響檢出率	解析度或掃描速度錯誤	軟體預設固定值	定期標準片確認	8	1	3	24	8	1	2	16

參考文獻

- [1] 洪錦維，電容式觸控技術導入與解析，佳魁資訊，2014。
- [2] 劉堂傑，單片式 Touch Panel 最佳 ESD 防護結構研究，逢甲大學碩士論文，2015。
- [3] 郭志忠，TFT-LCD 自動光學檢測 - 以 CellZone 為基礎之瑕疵分類研究，國立成功大學碩士論文，2008。
- [4] 廖家豪，TFT-LCD Array 製程缺陷檢測之分析，國立雲林科技大學碩士論文，2012。
- [5] 黃思博，應用自動化光學檢測技術於 TFT-LCD 模組瑕疵辨識系統之開發與研究，國立臺灣科技大學碩士論文，2013。
- [6] 蔣沅融，整合薄膜電晶體閘極掃瞄電路接地短路並以田口式實驗設計法找出影響 TFT 液晶顯示器檢測能力之主要因子以提升製造缺陷檢測率之研究，中華大學碩士論文，2013。
- [7] 鍾育婕，AOI 檢測缺陷檢出率提升之研究－以偏光板產業為例，義守大學碩士論文，2011。
- [8] 吳家縛，提升 TFT-LCD 之彩色濾光片自動光學檢測機反射光源檢出缺點的能力，元智大學碩士論文，2015。
- [9] 葉怡成，實驗計劃法－製程與產品最佳化，五南圖書，2016。
- [10] 黎正中、唐麗英譯，實驗設計與分析，高立圖書有限公司，2015。
- [11] Montgomery, Douglas C., “Design and Analysis of Experiments”, 9th Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [12] Jang, A., “Robust Tolerance Design by Response Surface Methodology”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 6, pp. 399-403, 1999.
- [13] Khuri, A. J. and Cornell, J. A., “Response Surface: Design and Analysis”, Marcel Dekker, 1996.
- [14] Box, G. E. P., and D. W. Behnken., “A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment”, Technometrics, Vol. 35, pp. 1-12,1993.
- [15] Box, G. E. P. and Hunter, J. S., “Multifactor for Experiments for Exploring Response Surface”, Annals of Mathematical Statistics, Vol. 28, pp.195-242,1957.
- [16] 黃耀琨，FMEA 與公理設計關聯之研究，義守大學碩士論文，2007。
- [17] 黃聖雄，運用 PFMEA 模式於電子製造服務業，國立臺北科技大學碩士論文，2011。
- [18] Schindelin, J., Rueden, C.T., Hiner, M.C. and Eliceiri, K.W., “The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis”, Molecular Reproduction and Development, Vol. 82, pp. 518-529, 2015.
- [19] Derringer, G. and Suich, R., “Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, Journal of Quality Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 214-219, 1980.
- [20] Harrington, E. C., Jr., “The Desirability Function”, Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498,1965.

凸輪-連桿機構的設計與分析

Design and analysis of cam-linkage mechanism

謝榮發 遠東科技大學機械工程系教授

摘 要

凸輪-連桿組合機構其凸輪直接作用的推桿既非作平移也非作擺動，而是作平面一般運動的連桿。此類機構除能實現各種運動規律、剛體的導引、軌跡等要求外，還具有能實現大擺動角、高效率 and 動力性能好等優點。故該類機構已在冶金、輕工、紡織、印刷、縫紉和包裝等各行業領域的自動生產線中廣泛的應用。

本文以包裝機中的凸輪-連桿組合機構為研究對象，首先建立連桿座標系，再運用齊次座標轉換及共軛理論，推導凸輪輪廓的通用表示式，當指定機構設計參數與機構的運動模式時，吾人數值模擬分析凸輪輪廓，並應用 Solidworks 軟體建構所設計機構模擬並分析其運動特性。

關鍵詞：凸輪-連桿、座標轉換、壓力角

Jung-Fa Hsieh, Professor, Depart. of Mechanic Engineering, Far East University

Abstract

Cam-linkage mechanisms combine the advantages of cam mechanisms and link mechanisms and provide the means to achieve a wide variety of output motions given an appropriate design of the cam profile. This paper presents a simple method for the design and analysis of a cam-linkage mechanism with a translating slider. In the proposed approach, the cam profile is first derived using homogenous coordinate transformation and conjugate surface theory. Analytical expressions for the pressure angle of the cam-linkage mechanism and principal curvatures of the cam profile are then derived. The validity of the proposed design methodology is verified by means of motion simulations performed using CAD software. The results confirm that the designed mechanism meets the design requirements.

Keywords: cam-linkage, coordinate transformation, pressure angle

一、前言

凸輪-連桿組合機構兼具有凸輪機構與連桿機構的各自優點：只要適當設計出凸輪輪廓曲線，便可實現各種預期的運動規律，並且結構緊湊；故有凸輪的參與可精確實現其複雜運動要求，而連桿機構又能滿足一些運動規律和運動軌跡的設計要求。故對凸輪-連桿組合機構開展研究具有重要的理論意義和工程實用價值。

1974 年, S.N.Kozhevnikov 等人和 C.O.Huey [1,2] 分別研究了可實現輸出件週期性停歇的凸輪差動機構綜合方法以及無結構誤差的再現軌跡、函數的凸輪-連桿組合機構的合成問題。1981 年, Yesh-Pal Singh 等人 [3] 詳細討論了機構機型的合成, 應用封閉環、包絡等理論研究了凸輪-連桿組合機構的精確軌跡綜問題。1990 年, J. P. Sadler 等人 [4] 針對簡單、串聯式凸輪-連桿組合機構, 討論了動力學特性的最佳化問題。1996 年, Nishioka [5] 提出空間凸輪-連桿組合機構的標準化、模式化方法。2001 年, G. K. Ananthasuresh [6] 提出一種新穎的凸輪-連桿組合機構, 顯著特點: 滾子-曲柄和凸輪皆作整周轉動, 但輸入件是滾子-曲柄而非凸輪。2004 年, Lifang Yuan 等人 [7] 以鉸鏈四連桿機構為例, 提出在具有封閉環連桿機構的一個或幾鉸鏈處配以協同凸輪, 改善或實現輸出運動的新思維和新方法。Z. H. Ye 等人 [8] 探討了針對複雜凸輪-連桿組合機構, 如何用解析法分析設計的若干問題。2006 年, D. Mundo 等人 [9] 提出通過將凸輪、連桿經適當的組合, 實現任意且精確的軌跡最佳化合成的理論方法。2009 年, Taik-Min. Lee 等人 [10] 為實現機構具有物料進給、提升和夾持等要求, 提出基於共軛凸輪和扭矩控制凸輪的凸輪-連桿組合式傳輸功能解決方案。2006 年, D. Mundo 等人 [11] 提出了一種方法用於合成的平面機構, 將凸輪和連桿組合為了提高機械沖壓機的運動行為。2007 年 Gatti and Mundo 等人 [12] 探

討了將整合凸輪與六連桿機構組合, 用於合成精確的剛體導引任務的方法。

本文將提出一個系統性的方法來設計及分析一個具有平移滑塊的凸輪-連桿機構。所建議的方法包括三個基本步驟: (1) 建構凸輪連桿機構的座標系, (2) 推導所設計凸輪輪廓, 分析機構其壓力角, (3) 利用 CAD 運動模擬以驗證所建議方法的可行性。

二、曲面幾何

如圖 1 為本文所探討的凸輪連桿組合機構。凸輪旋轉中心 O_0 位於滑塊導路下方, O_{20} 、 O_{2m} 分別為滑塊推程起初始及終點, h 為滑塊的行程, s_2 為推程位移函數, 滑塊偏距記為 a_1 , b_{20} 為滑塊初始位置, 連接桿(連桿 3) 瞬時傾斜角記為 β , 滑塊位於初始位置時的傾斜角則記為 β_0 , 因為連接桿 3 通過搖塊 4, 因此連桿 3 和搖塊 4 相對於固定桿的方位是相同的, 最後滑塊與滾子的距離記為 l_3 , 滾子半徑記為 ρ , 因此凸輪基圓 r_b 存在下列關係:

$$r_b = \sqrt{b_{20}^2 + a_1^2} - l_3 - \rho \quad (1)$$

為求得凸輪輪廓, 首先對各連桿建立一個座標系 $(xyz)_i$ ($i=0\sim 4$), 其中輸入件凸輪編號為 0, 座標系 $(xyz)_0$ 隨凸輪等角速度旋轉, 機架編號為 1 其座標系 $(xyz)_1$ 為固定不動, 輸出桿滑塊編號為 2, 座標系 $(xyz)_2$ 作平移運動, 連接桿編號為 3, 座標系 $(xyz)_3$ 作平移及擺動運動, 搖塊編號為 4, 座標系 $(xyz)_4$ 隨搖塊作擺動(圖 1 未顯示), 其中滾子中心 O_r 固定於連桿 3, 滾子與凸輪做連續滾動接觸。凸輪中心 O_0 與搖塊接頭 O_4 為複合接頭。

當凸輪旋轉時, 必須求得連桿 3 的傾斜角變化, 如圖一所示, 連桿 3 傾斜角可表示如下:

$$\tan \beta = \frac{a_1}{b_2} \quad (2)$$

其中 $b_2 = b_{20} + s_2$.

將方程式(2)對 θ_1 微分,可求得連桿3的類角速度(quasi-velocity)如下:

$$\frac{d\beta}{d\theta_1} = \frac{-a_1}{[a_1^2 + (b_{20} + s_2)^2]} \frac{ds_2}{d\theta_1} \quad (3)$$

各桿件相對於前一桿件的齊次轉換矩陣可表示如下:

$${}^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b_2 \\ 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -C\beta & S\beta & -\ell_3 C\beta \\ -S\beta & -C\beta & -\ell_3 S\beta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 C 及 S 分別表示 COSINE 及 SINE。

結合方程式(4)~(6),坐標系 $(xyz)_3$ 相對於座標系 $(xyz)_0$ 的轉換矩陣可表示如下:

$${}^0\mathbf{A}_3 = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -C(\theta_1 + \beta) & S(\theta_1 + \beta) & -\ell_3 C(\theta_1 + \theta_3) + b_2 C\theta_1 - a_1 S\theta_1 \\ -S(\theta_1 + \beta) & -C(\theta_1 + \beta) & -\ell_3 S(\theta_1 + \theta_3) + b_2 S\theta_1 + a_1 C\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由圖(2)滾子坐標系 $(xyz)_r$ 相對於連桿坐標系 $(xyz)_3$ 的轉換矩陣可表示如下:

$${}^3\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} C\beta & S\beta & 0 \\ -S\beta & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

因此滾子坐標系 $(xyz)_r$ 相對於凸輪座標系 $(xyz)_0$ 的轉換矩陣可表示如下:

$${}^0\mathbf{A}_r = {}^0\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} -C\theta_1 & S\theta_1 & -\ell_3 C(\theta_1 + \theta_3) + b_2 C\theta_1 - a_1 S\theta_1 \\ -S\theta_1 & -C\theta_1 & -\ell_3 S(\theta_1 + \theta_3) + b_2 S\theta_1 + a_1 C\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

滾子表面方程式 ${}^r\mathbf{S}$ 相對於滾子坐標系 $(xyz)_r$ 可表示如下:

$${}^r\mathbf{S} = [\rho C\theta \quad \rho S\theta \quad 1]^T \quad (10)$$

其中 ρ 和 θ 分別描述滾子的半徑和極角。

滾子表面單位法向量 ${}^r\mathbf{n}$ 可表示如下:

$${}^r\mathbf{n} = [C\theta \quad S\theta \quad 0]^T \quad (11)$$

利用座標轉換可求得凸輪輪廓及法向量如下:

$${}^0\mathbf{S} = {}^0\mathbf{A}_r {}^r\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\rho C(\theta_1 + \theta) - \ell_3 C(\theta_1 + \beta) + b_2 C\theta_1 - a_1 S\theta_1 \\ -\rho S(\theta_1 + \theta) - \ell_3 S(\theta_1 + \beta) + b_2 S\theta_1 + a_1 C\theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^0\mathbf{n} = {}^0\mathbf{A}_r {}^r\mathbf{n} = \begin{bmatrix} C(\theta_1 + \theta) \\ S(\theta_1 + \theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

凸輪與滾子的接觸點(共軛點)由下列式子(共軛理論)決定:

$${}^0\mathbf{n}^T \cdot \frac{d{}^0\mathbf{S}}{dt} = ({}^0\mathbf{A}_r {}^r\mathbf{n})^T \frac{d({}^0\mathbf{A}_r {}^r\mathbf{S})}{dt} = 0 \quad (14)$$

其中 ${}^0\mathbf{n}$ 和 ${}^0\mathbf{S}$ 分別為凸輪單位法線向量和表面的方程式。

方程式(14)說明對連續維持接觸的凸輪與滾子其兩者的相對滑動速度,亦即 $d{}^0\mathbf{S}/dt$ (其中 t 是時間變數)在接觸點必須與共同法線向量 ${}^0\mathbf{n}$ 正交。

經簡化可求得凸輪與滾子共軛點的參數 $\bar{\theta}$ (記為 $\bar{\theta}$)如下:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{-\ell_3 \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right) S\beta - \frac{ds_2}{d\theta_1} + a_1}{[-\ell_3 \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right) C\beta + b_2]} \right) \quad (15)$$

由式(15)得知共軛點與輸入輸出運動曲線及連桿傾斜角變化率有關。

將方程式(15)帶入式(12)可求得凸輪的輪廓。

$${}^0\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\rho C(\theta_1 + \bar{\theta}) - \ell_3 C(\theta_1 + \beta) + b_2 C\theta_1 - a_1 S\theta_1 \\ -\rho S(\theta_1 + \bar{\theta}) - \ell_3 S(\theta_1 + \beta) + b_2 S\theta_1 + a_1 C\theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

三、性能指標

對凸輪-連桿有兩個重要的性能指標，名義上為壓力角 ψ 及傳動角 μ 。壓力角其提供了機構瞬間力的傳遞性質，壓力角值越小其力量的傳遞效率就越高(一般凸輪-連桿機構，其回程通常是由彈簧驅動，因此其自鎖的可能性很小)。一般壓力角 ψ 的定義為被動桿受力的方向與被動桿接觸點速度方向的夾角。

圖 3 為本研究探討凸輪-連桿機構壓力角的示意圖。由文獻[9]知壓力角的大小，可由下列數學式表示：

$$\tan \psi = \frac{\|{}^1\mathbf{n}_p \times {}^1\mathbf{v}_p\|}{\|{}^1\mathbf{n}_p \bullet {}^1\mathbf{v}_p\|} \quad (17)$$

其中 ${}^1\mathbf{n}_p$ 為滾子與凸輪接觸點 p 相對於座標 $(xyz)_1$ 的單位法向量， ${}^1\mathbf{v}_p$ 則為接觸點 p 相對於座標 $(xyz)_1$ 的速度。

接觸點 p 相對於連桿座標 $(xyz)_3$ 的單位法向量可表示如下：

$${}^3\mathbf{n}_p = {}^3\mathbf{A}_r \mathbf{n} = [C(\beta - \theta) \quad -S(\beta - \theta) \quad 0]^T \quad (18)$$

接觸點 p 相對於固定座標 $(xyz)_1$ 的單位法向量利用齊次座標轉換可表示如下：

$${}^1\mathbf{n}_p = {}^1\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{n}_p = [-C\bar{\theta} \quad -S\bar{\theta} \quad 0]^T \quad (19)$$

如圖 3 所示凸輪旋轉時，連桿 3 執行了複雜的平移及旋轉的組合運動，任何時候連桿的運動方向可由瞬時中心的觀念求得，連桿 3 的瞬時中心標示為 I_{13} (看圖 3)。瞬心 I_{13} 的位置向量可表示為

$${}^1\mathbf{p}_{I_{13}} = \begin{bmatrix} b_2 & -\frac{\sqrt{a_1^2 + b_2^2}}{S\beta} + a_1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

接觸點 p 的位置向量可表示如下：

$${}^1\mathbf{p}_p = [a_1 \cot \beta - \ell_3 C\beta - \rho C\bar{\theta} \quad a_1 - \ell_3 S\beta - \rho S\bar{\theta} \quad 1]^T \quad (21)$$

因此接觸點的瞬時速度可求得如下：

$${}^1\mathbf{v}_p = \mathbf{w}_3 \times ({}^1\mathbf{p}_p - {}^1\mathbf{p}_{I_{13}}) = \begin{bmatrix} \ell_3 S\beta - \frac{\sqrt{a_1^2 + b_2^2}}{S\beta} + \rho S\bar{\theta} \\ a_1 \cot \beta - \ell_3 C\beta - b_2 - \rho C\bar{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} w_3 \quad (22)$$

其中 \mathbf{w}_3 為連桿 3 的角速度

結合方程式(19)及(22)，帶入方程式(17)壓力角可以簡化表示如下：

$$\tan \psi = \frac{\left| \ell_3 C(\beta - \bar{\theta}) - \frac{(a_1^2 + b_2^2)}{a_1} S\bar{\theta} + \rho \right|}{\left| \ell_3 \sin(\beta - \bar{\theta}) - \frac{(a_1^2 + b_2^2)}{a_1} C\bar{\theta} \right|} \quad (23)$$

由方程式(23)顯示壓力角大小與滾子的位置及機構的尺寸有關。

傳力角 μ 是個重要的指標在評估力的傳遞系統性能[13]，考慮本研究凸輪-連桿機構凸輪是輸入桿，傳力角為連接桿與滑塊直線路徑法線的夾角(如圖 3 所示)。換言之傳力角 μ 可表示如下：

$$\mu = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (24)$$

對多數的凸輪-連桿機構而言，它的值在 $40^\circ \sim 140^\circ$ 之間 [14]。

四、凸輪輪廓曲率分析

當凸輪等速旋轉時，為維持凸輪與滾子連續接觸，凸輪的輪廓必須為凸面，另外為避免太小的曲率避免跳躍，因此凸輪的主曲率大小必須加以評估，以防止產生奇異點，主其率大小可由下列算式求得：

$$\kappa_1, \kappa_2 = H \pm \sqrt{H^2 - K} \quad (25)$$

其中 κ_1 及 κ_2 為凸輪的主曲率且 K 及 H 分別定義如下：

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad \text{及} \quad H = \frac{2FM - EN - GL}{2(EG - F^2)}$$

其中

$$L = {}^0n \bullet \frac{\partial^2 S}{\partial u^2}, \quad M = {}^0n \bullet \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial \theta_1}, \quad N = {}^0n \bullet \frac{\partial^2 S}{\partial \theta_1^2},$$

$$E = \frac{\partial^0 S}{\partial u} \bullet \frac{\partial^0 S}{\partial u}, \quad F = \frac{\partial^0 S}{\partial u} \bullet \frac{\partial^0 S}{\partial \theta_1}, \quad \text{及} \quad G = \frac{\partial^0 S}{\partial \theta_1} \bullet \frac{\partial^0 S}{\partial \theta_1}$$

經運算簡化可得到如下：

$$L = 0 \tag{26}$$

$$M = 0 \tag{27}$$

$$N = \rho^2 \left(1 + \frac{d\bar{\theta}}{d\theta_1}\right)^2 + \ell_3 C(\beta - \bar{\theta}) \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right)^2 + 2S\bar{\theta} \frac{ds_2}{d\theta_1} + \ell_3 S(\beta - \bar{\theta}) \frac{d^2\beta}{d\theta_1^2} - b_2 C\bar{\theta} + C\bar{\theta} \frac{d^2s_2}{d\theta_1^2} - a_1 S\bar{\theta} \tag{28}$$

$$E = 1 \tag{29}$$

$$F = 0 \tag{30}$$

$$G = \rho^2 \left(1 + \frac{d\bar{\theta}}{d\theta_1}\right)^2 + \ell_3^2 \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right)^2 + b_2^2 + \left(\frac{ds_2}{d\theta_1}\right)^2 + a_1^2 + 2\rho\ell_3 \left(1 + \frac{d\bar{\theta}}{d\theta_1}\right) \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right) C(\beta - \bar{\theta}) - 2\rho b_2 \left(1 + \frac{d\bar{\theta}}{d\theta_1}\right) C\bar{\theta} - 2\rho \left(1 + \frac{d\bar{\theta}}{d\theta_1}\right) \frac{ds_2}{d\theta_1} S\bar{\theta} - 2\rho a_1 \left(1 + \frac{d\bar{\theta}}{d\theta_1}\right) S\bar{\theta} - 2\ell_3 a_1 \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right) S\beta - 2a_1 \frac{ds_2}{d\theta_1} - 2b_2 \ell_3 \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right) C\beta + 2\ell_3 \frac{ds_2}{d\theta_1} \left(1 + \frac{d\beta}{d\theta_1}\right) S\beta \tag{31}$$

五、執行

為了驗證本文所建議方法的可行性，凸輪-連桿機構參數設定如下：滑塊初始位置 $b_{20} = 210$ ，偏心距 $a_1 = 115$ ，凸輪的基圓半徑 $r_b = 35$ ，滾子半徑 $\rho = 18$ ，由式(1)可求得滑塊與滾子的距離 $\ell_3 = 186.426 \text{ mm}$ ，且滑塊動程 $h = 60 \text{ mm}$ ，凸輪的揚程及回程區間(亦即 θ_r 及 θ_f)都設定為 150° ，暫停區間則為 30° 。

滑塊位移的運動型態採用修正型正弦運動曲線，其運動曲線方程式表示如式(32)。式中 h 為凸

輪在旋轉 τ 角度過程中，滑塊從起始位置至終點最大行程， s_2 是滑塊的任一時刻行程， θ_1 、 θ_d 是凸輪旋轉角及暫停週期。

$$s_2(\theta_1) = \begin{cases} h \left[\frac{\pi}{4 + \pi} \frac{\theta}{\tau} - \frac{1}{4(4 + \pi)} S\left(4\pi \frac{\theta}{\tau}\right) \right], \\ h \left[\frac{2}{4 + \pi} + \frac{\pi}{4 + \pi} \frac{\theta}{\tau} - \frac{9}{4(4 + \pi)} S\left(\frac{4\pi}{3} \frac{\theta}{\tau} + \frac{\pi}{3}\right) \right], \\ h \left[\frac{4}{4 + \pi} + \frac{\pi}{4 + \pi} \frac{\theta}{\tau} - \frac{1}{4(4 + \pi)} S\left(4\pi \frac{\theta}{\tau}\right) \right], \end{cases} \begin{cases} 0 \leq \theta \leq \frac{\tau}{8} \\ \frac{\tau}{8} \leq \theta \leq \frac{7\tau}{8} \\ \frac{7\tau}{8} \leq \theta \leq \tau \end{cases}, \text{其中 } \theta = \theta_1 - \theta_d \tag{32}$$

將設計參數帶入方程式(33)，滑塊位移關係如圖(4)所示，類速度及類加速度輸入與輸出關係如圖(5)所示。結合方程式(15)及(16)可模擬求得所設計凸輪輪廓如圖(6)所示。而凸輪-連桿機構運轉時壓力角的變化情形，可利用方程式(23)求得，其結果顯示於圖(7)，由圖顯示回程時壓力角較大，通常回程時滑塊不做功。凸輪-連桿機構的傳力角變化情形可利用方程式(24)求得，其結果顯示於圖(8)，其大小落於 $61^\circ \sim 67^\circ$ 之間，符合設計要求範圍內。接著應用方程式(25)可求得所設計凸輪主曲率變化情形，因本機構為平面機構，因此有一個主曲率為 0，另一個主曲率顯示於圖(9)，由圖得知最小曲率半徑為 35 mm (曲率為 0.02857)，因此不會產生奇異現象。吾人於 Solidwrok 軟體建構相關零件，及將凸輪輪廓數據輸入轉換成圖形，並依設定的設計參數組合凸輪-連桿機構，如圖(10)所示，接著執行動態模擬，以了解其凸輪運轉時滑塊輸出特性，模擬時凸輪的角速度設定為 $w_1 = 20 \text{ rev/min}$ (亦即 $\theta_1 = 120t$ ， t 為時間單位秒)，圖(10)-a 為滑塊位移圖與所設計位移圖(4)相一致，圖(10)-b 為滑塊速度運動輸出圖與所設計類速度圖(5)具有相同的型態，因此本文所得結果令人滿意，亦證明本文所提方法的可行性。

六、結 論

本文提出一個完整步驟在設計及分析一個具平移滑塊的凸輪-連桿機構，首先依據齊次座標轉換以及共軛理論去推導凸輪的輪廓表示式，利用瞬心的觀念推導機構凸輪與滾子運動中的壓力角表示式並建立傳力角的關係式，應用微分幾何的觀念推導凸輪的主曲率，最後利用軟體模擬所設計凸輪-機構運動情形，以驗證本文所提方法的可行性。

參考文獻

- [1] S. N. Kozhevnikov, E. Ya. Antonyuk and A. I. Tkachuk, "Synthesis of a cam-differential mechanism with periodic dwell of the output link," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 9, pp. 219-229 (1974).
- [2] C. O. Huey and M. W. Dixon, "The cam-link mechanism for structural error-free path and function generation," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 9, pp. 367-384 (1974).
- [3] Yesh-Pal Singh and Dilip Kohli, "Synthesis of cam-link mechanisms for exact path generation," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.16, pp. 447-457 (1981).
- [4] J. P. Sadler and Zhijia Yang, "Optimal design of cam-linkage mechanisms for dynamic-force characteristics path generation," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.25, pp.37-41(1990).
- [5] Masao Nishioka, "Modular structure of spatial cam-linkage mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.31, pp.813-819 (1996).
- [6] G. K. Ananthasuresh, "Design of fully rotatable roller-crank-driven cam mechanisms for arbitrary motion specifications," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.36, pp.445-467 (2001).
- [7] Li-Fang Yuan and Jahangir S. Rastegar, "Kinematic synthesis of linkage mechanisms with cam integrated joints for controlled harmonic content of the output motion," *Journal of mechanical Design*, Vol.126, pp.135-142 (2004).
- [8] Z Ye and M.R. Smith, "Design of a combined cam-linkage mechanism with an oscillating roller follower by an analytical method," *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, Vol.219, pp.419-427 (2005).
- [9] D. Mundo, J. Y. Liu and H. S. Yan, "Optimal synthesis of cam-linkage mechanisms for precise path generation," *Journal of mechanical Design*, Vol.128, pp.1253-1260 (2006).
- [10] Taik-Min.Lee, Doog-Yoon Lee and Ho-Cheol Lee, "Design of cam-type transfer unit assisted with conjugate cam and torque control cam," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.44, pp.1114-1155 (2009).
- [11] D. Mundo, G.A. Danieli and H.S. Yan, "Kinematic optimization of mechanical presses by optimal synthesis of cam-integrated linkages," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol.30, pp.519-532 (2006).
- [12] G. Gatti and D. Mundo, "Optimal synthesis of six-bar cammed-linkages for exact rigid-body guidance," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.42, pp.1069-1081 (2007).
- [13] Shrinivas S. Balli and Satish Chand, "Transmission angle in mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, Vol.37, pp. 175-195(2002).
- [14] D. C. Tao, "Applied linkage synthesis" *Addison-Wesley*, Reading, MA, pp.7-12 (1964)

圖表

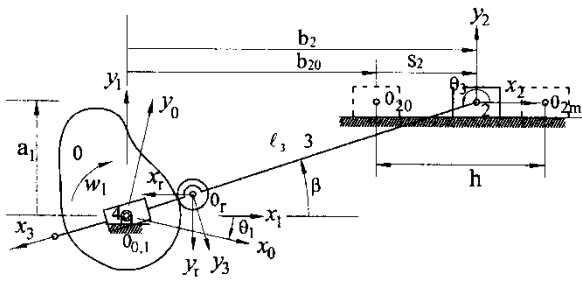


圖 1 凸輪連桿組合機構示意圖

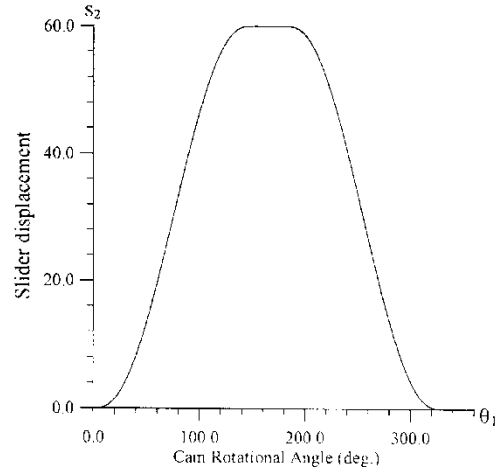


圖 4 滑塊位移圖

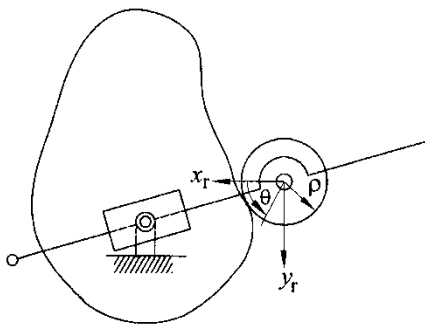


圖 2 滾子參數示意圖

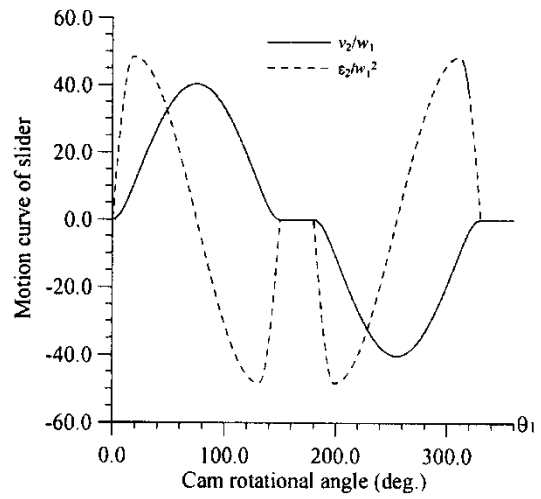


圖 5 滑塊的類速度及類加速度

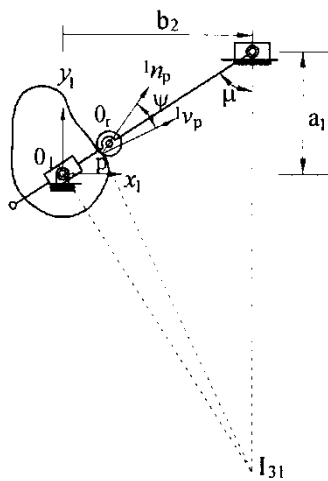


圖 3 凸輪-連桿機構性能指標

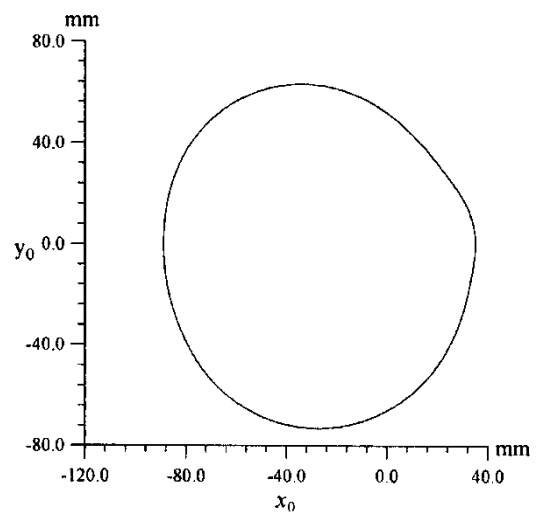


圖 6 凸輪輪廓模擬圖

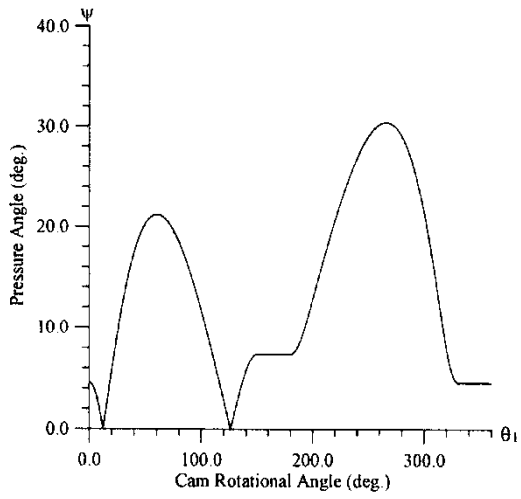
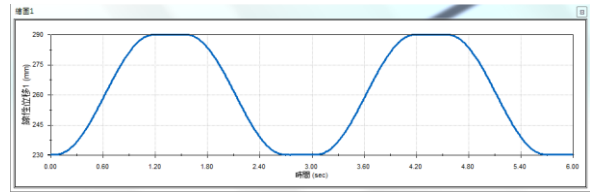
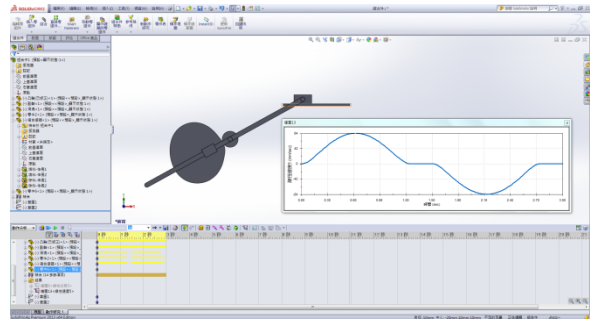


圖 7 壓力角的變化情形



(a)



(b)

圖 10 凸輪-連桿機構模擬情形

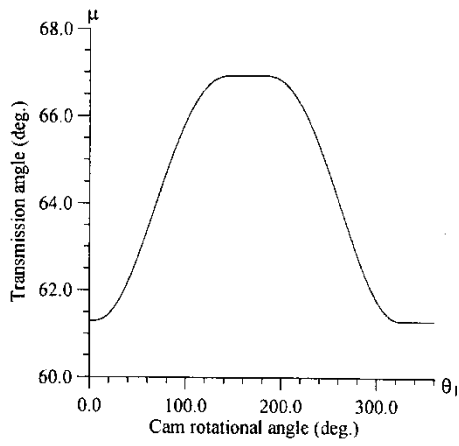


圖 8 傳力角的變化情形

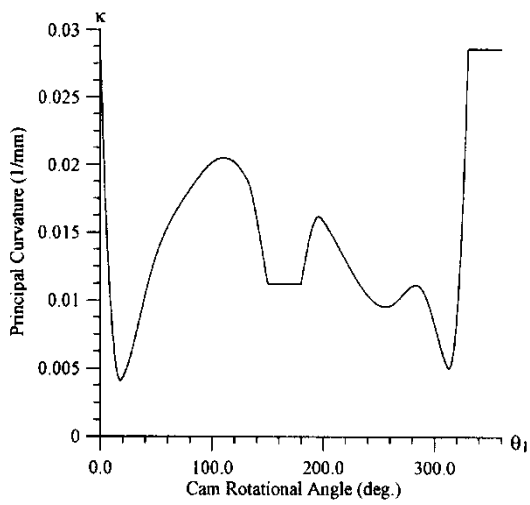


圖 9 凸輪主曲率的變化情形

數值模擬三維集熱器之層流流體與熱傳導特性

Numerical simulation laminar fluid and heat transfer characteristic in three dimension collector

陳玟瑞 遠東科技大學材料與能源工程系副教授

摘 要

強制循環於太陽能集熱器填充水於傾斜23.5度角受常態分佈太陽輻射的邊界條件下探討層流流體之溫度、焓、及速度場分佈。控制方程式分別為連續方式、動量方程式、浮力方程式、能量方程式等以套裝軟體 ANASYS解之。流體於集熱管內以層流對流熱傳形式吸收太陽能輻射熱。集熱管之集熱性能係數主要受到一些參數影響如流體黏滯性、密度、熱傳系數、流體的普郎多數和萊利數等。因此，將可開發智慧型太陽能真空集熱管具層流流體熱傳系統和最高集熱效率之創新和全面性的改良構想

關鍵詞：層流流體、常態太陽輻射分佈、最大集熱效率

Wen Ruey Chen, Associate Professor, Department of Materials and Energy Engineering, Far East University.

Abstract

The study of the temperature, enthalpy and velocity distributions of laminar fluid for the forced circulation in the solar power collector of the inclined angle 23.5° filled with water under boundary condition by normal solar radiation distribution. The governing equations are continuity equation, momentum equation, buoyancy equation and energy equation are numerically solved by a commercially software (ANASYS). The fluid in the collected tubes flowed by free convection heat transfer model to absorb the radiant solar power. The collective performance of the collector effected by some parameters, such as the fluid viscosity, density, thermal conductivity, Prandtl number (Pr) and Rayleigh number (Ra). Therefore, we will be able to develop innovatively and comprehensively the fluid in the smart solar vacuum tube with the lamina flow heat transfer system obtained a maximum collected thermal efficiency

Keywords: Laminar fluid, normal solar radiation distribution , maximum collected thermal efficiency

I. Introduction

Solar energy is one of the most common renewable energy sources. Because they are so useful for heating systems and do not generate any pollutants, solar energy systems have been a subject of keen interest in the scientific literature. The performance of solar collectors, used to collect solar energy and convert solar radiation to heat energy, is particularly crucial. The earthly environment need to be renewable and clean energy due to the dearth of fossil fuels and the harmful gas emitted into the air. The energy security, climate change, and other environmental concerns had been arrived at a critical development from fossil fuels. The solar energy was almost applied to the photovoltaic system but rarely used in water heaters. Therefore, for a general familial user, hospital, swimming pool and factory, they almost installed the solar water heater. The most of the water heater were used mainly by the natural convective circulation system. It is necessary for a big space when the equipment of solar water heater collected heat efficiency is low. If the water heaters will be installed in the force convective circulation system then the solar power collector performance will be increases and the system will not be limited in the space.

Heat transfer fluids and materials such as water, ethylene glycol, engine oil, alumina, copper and silver have been widely used in numerous important fields, such as heating, ventilating, air-conditioning system, micro-electronics, transportation, manufacturing and nuclear engineering. The performances of thermal transport for some cooling or heating systems were important to play vital roles in the development of energy-efficient heat transfer equipments, such as MEMS and NEMS (Micro and Nano Electro Mechanical Systems, respectively). Enhancing the performance of heat transfer is essential to a saving energy topic in these systems. The low thermal conductivity of conventional fluids such as water and oils which are limited in the enhancement of the heat

transfer performance.

Natural convection heat transfer occurs in enclosures due to temperature difference and buoyancy forces. Effects of non-isothermal boundary conditions on natural convection in enclosure were studied by researchers due to its applications in solar systems or furnaces. Bilgen and Ben [1] performed study on the effects of non-isothermal boundary condition on natural convection for a rectangular cavity. In their study, two cases were considered: in the first case, the lower part was heated while the upper part was cooled. In the second case, the upper part of cavity was heated while the lower part was cooled. The heat transfer system was investigated for enclosures filled with clear fluid [2] or nanofluid [3] and for the cases of constant temperature or constant heat flux. The effects of uniform and non-uniform heating of bottom wall on natural convection flows in a trapezoidal cavity was investigated by Natarajan et al. [4] who conducted a study using a penalty finite element analysis with bi-quadratic elements. Moreover, two-dimensional laminar natural convection in enclosures with three flat and one wavy wall, one of which was exposed to sinusoidal temperature profile, was studied by Dalal and Das [5]. Basak et al. [6] solved the governing equations using the finite element method to study the effects of thermal boundary condition in square enclosures. They numerically tested the effects of Prandtl number and observed that the non-uniform heating of the bottom wall produced greater heat transfer rates at the center of the bottom wall than the uniform heating case for the whole range of Rayleigh numbers. However, average Nusselt numbers showed lower heat transfer rates for the non-uniform heating. Varol et al. [7] investigated the effects of sinusoidally varying temperature on natural convection in a rectangular enclosures filled with porous media, numerically. Sarris et al. [8] numerically studied the natural convection in a square cavity with non-

isothermal temperature gradient on top wall. The problem of non-isothermal boundary conditions was extended to nanofluid by Oztop et al. [9]. In their case, comparison of Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticle was formed from heat transfer enhancement point of view. Parvin et al. [10] analyzed thermal conductivity variation on natural convection flow of water–alumina nanofluid in an annulus. They found significant heat transfer enhancement due to the presence of nanoparticles and it was accentuated by increasing the nanoparticles volume fraction and Prandtl number as well as large Grashof number. M. Chen et al. [11] studied that a one-dimensional transient heat transfer analysis is carried to analyze the effects of the NP volume fraction, collector height, irradiation time, solar flux, and NP material on the collector performance, leading to optimized collector and fluid parameters. They expressed a high solar flux to be desirable to maintain a high efficiency over a wide temperature range, which is beneficial for subsequent energy utilization.

The study mainly investigated the fluid flow and heat transfer in an inclined vacuum tube with normal distribution of solar radiation heated enclosure filled with water fluid. Isotherms, enthalpies and streamlines were plotted for enclosures with different thermal flux. Moreover, the distributions of thermal flow field of the collector between the hot and cold at the outlet and inlet of the water heater that are presented to support the discussions.

II. The introduce of collector system

The coordinate system is illustrated in figure 1. The thermal corrector is formed by inner and outer cylinder while the inclination angle is 23.5° about the symmetrical axis and the horizontal ground which is normal to the line of gravity acceleration. The top-half wall is heated by normal distribution radiation and the bottom-half wall is kept at constant scatter. The

maximum radiation intensity of the heated wall located on the top wall. The solar radiated directly on the top-half wall and scattered on the bottom-half wall.

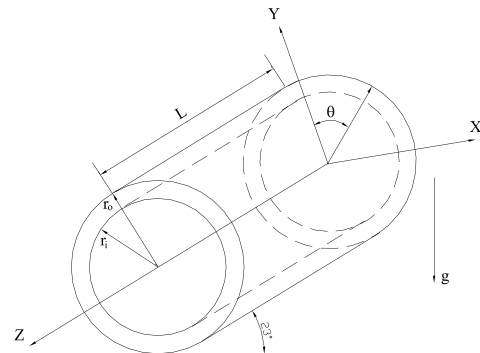


Figure 1. The cylinder coordinates system.

The purpose of this project will be considerate to investigate the vacuum tube filled with the water. It can be improved effectively the performance of solar power collector.

According to the solar power collector in the commercial equipment consist of eight all-glass vacuum tube and water tank. The laminar convention may be natural or forced circulation as shown figure 2. The specifications present Table 1

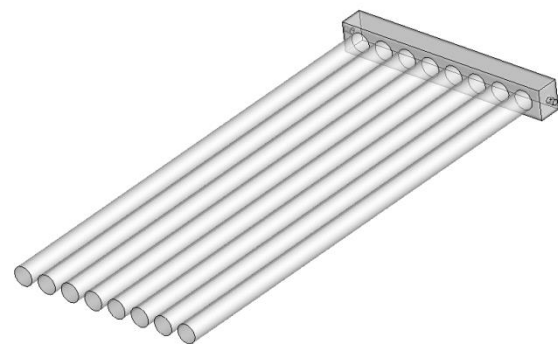


Figure 2. A sketch of solar collectors without the reflection flat

Table 1. the collector device specifications

Water tank volume (cm ³)	58×8×6
Tube Length (cm)	120
Tube inside diameter (cm)	5.2
Cold water inlet closs section area (cm ²)	π×0.8 ²
Hot water outlet closs section area area (cm ²)	π×0.8 ²
Placement angle (azimuth)	23°
Vacuum number	8

III. Mathematical formulation

The governing equations include the mass, the momentum and the energy equation. They are obtained from the original Navier-Stoke equation. The transient system consider the unsteady state unsteady flow, ie, $\partial(\) / \partial t \neq 0$, the equations are expressed as follows:

IV. Continuity Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Where t is the time, ρ is the density, x is the coordinate directions and j is the direction of the absolute velocity.

V. Momentum Equation

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + s_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

Where t is the time, ρ is the density, u is the relative velocity of the fluid and the coordinate system for the Cartesian coordinates ($i = 1,2,3$), the absolute velocity of the fluid in the direction for the stress tensor, P is the total pressure, as momentum source (Momentum Source Term), δ is kronecker delta, τ is force to shear strain tensor

VI. Buoyancy equation

$$S_i = g_i \rho \beta (T - T_o) \quad (4)$$

The acceleration g_i is a vector in the direction of the gravity, and ρ is the reference density. In the analysis of the problem and the associated buoyancy, it needs to consider the relationship between pressure and gravity in the momentum equation:

$$P_{piezo} = P_{stat} - \rho \begin{bmatrix} g_x(x-x_o) \\ g_y(y-y_o) \\ g_z(z-z_o) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Where P is the static pressure of the reference density. For the coordinate measuring point, g is the acceleration of gravity.

VII. Energy Equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h - F_{h,j}) &= \frac{\partial}{\partial t} P + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j P) \\ - P \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + S_h & \end{aligned} \quad (6)$$

$$h = c_p T - c_p T_o + \sum m_m H_m = h_i + \sum m_m H_m \quad (7)$$

Where h is the static enthalpy, T is the temperature, C_p is the average specific heat, the subscript m is the sum of all fluids for the quality of the mixed fluid m molecules and H is the amount of energy diffusion direction as the heat source of the enthalpy.

VIII. Numerical simulation

The simulation is analyzed by a commercially ANASYS CFD software. The simulation and analysis of the engineering problems involve the working fluids, heat transfer and chemical reaction. They are available ANASYS CFD software to perform

computation and obtain the solution. It is general commercially CFD software in the international, which has been applied to the aviation, the automotive design, the gas turbines and other design analysis, respectively.

(I) Three-dimensional computational grids

The grid design can be plotted a forced circulation solar water heater as shown in figure 3. Mesh distributions for water tank, inlet and outlet tube as shown in figure 4. For each tube, inlet, outlet and water tank are set up grids, it is can be planned for the complete full mesh. The grid point distributions in each region are described as below.

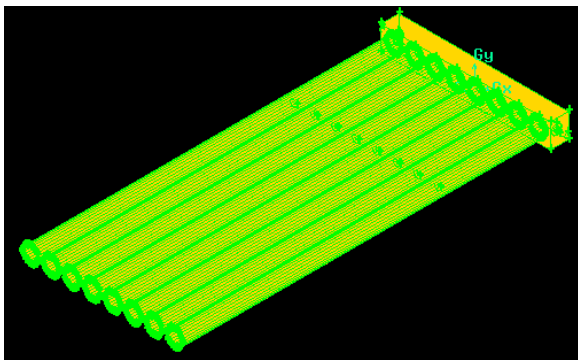


Figure 3. three-dimensional computational grid

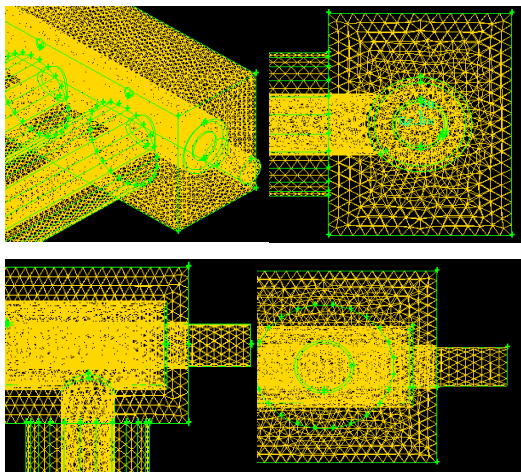


Figure 4. Mesh distributions for water tank, inlet and outlet tube.

(II) Improving design in each tube

Considering the working fluid flow into the

vacuum tube from the water tank that the design as shown in figure 5. The principle of the collected heat from the vacuum tube which are a coating thin film material and can be absorbing thermal energy as the solar radiated it. If the flow model is natural convection in the vacuum tube that the cold water has heavy fluid flow into the vacuum tube along the bottom while the hot working fluid flow out along the upper of the vacuum tube. If the flow model is forced convection in the vacuum tube, then the vacuum tube should be improving design in each tube.

The corresponding parameters are using different geometric conduit length designs are considered. They are $L_i=0.3L, 0.6L, 0.9L$. L expresses vacuum length.

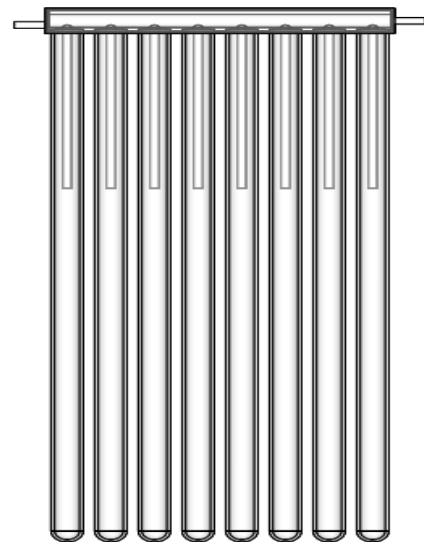


Figure 5. The design of combination of the vacuum tube and conduits.

(III) Initial and boundary conditions

1. The flow rate of the inlet is equal to the outlet as a reference standard test specifications.
2. The solar radiation intensity according to the outlet temperature of up to nearly 100 °C at high radiation intensity (800W/m²), the temperature of the normal distribution of 364K, 350K, 346, 342K, 335K, 321K from the top vacuum tube

wall extended down the bottom tube wall. When the middle radiation intensity (600), the temperature distributions of 335K, 331K, 328K, 324K, 321K, 313K; low radiation intensity (400), the temperature distribution of 322K, 320K, 318K, 315K, 312K, 309K. The temperature distributions on vacuum tube as shown in figure 6.

3. The water tank is insulation.
4. The working fluid flow into the solid wall assumed to be no-slip condition (No-Slip Condition).
5. All fluid properties are taken to be constant, except for the density variation with temperature in the buoyancy term, i.e. the Boussinesq approximation is valid.
6. A forced circulation collector of the velocity at the inlet and outlet is uniform velocity.
7. A "forced circulation collector" of the outlet and temperature gradient (gradient) along axial direction is zero, and the inlet temperature is normal temperature 25°C.
8. The angle is 23.5° for each tube with the ground.

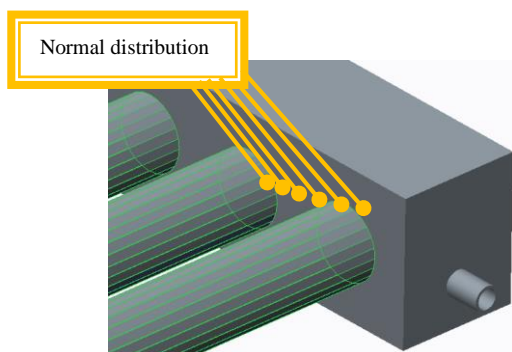


Figure 6. Normal radiation distributions on vacuum surface

IX. Results and discussion

Consider saving simulation time, we must compare results of the simulation when using eight vacuum tubes with two vacuum tubes. The results show that eight vacuum tubes and two vacuum tubes

on the temperature profile is very similar. A cross-comparison shows that the results of two vacuum tubes are the same as the eight vacuum tubes. The length of duct is equal to 0.3L, where L is the length of vacuum tube. The result of temperature distribution between eight vacuum tubes as shown in figure 7(a) on the left hand side and two vacuum tubes as shown in figure 7(b) on the right hand side. However, they are similar temperature distributions using any conduit length.

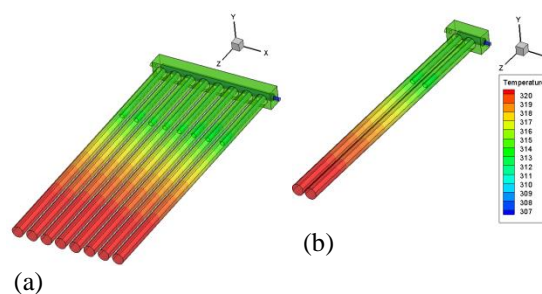


Figure 7. Temperature distributions for duct length is 0.3L. (a) eight vacuum tubes; (b) two vacuum tubes .

Figure 8 expresses the temperature profile of the cross section in y-plane. The inlet to the conduit part is the lower temperature. This area is the blue. The outlet portion of the conduit is gradually green from blue, indicating that the fluid at the outlet has been heated by the vacuum tube wall. In addition, most of the bottom of the vacuum tube is red, indicating a higher temperature fluid stagnation at the bottom, although the buoyancy effect driven, but the flow rate is small. Hence, the length of the conduit is 0.3L which is 0.3 times of the vacuum tube L, indicating that the hot fluid at the bottom of the vacuum tube cannot be fully driven up. The average water temperature of the outlet is 315 ° C and the average water temperature of the inlet is 306 ° C. The forced circulation of water flux is 0.4825L/min just equal to the inlet velocity of 0.01m/s, converted into a per unit collector area for a forced circulation of water flux of 0.67 L/m². (The area of the vacuum tube collector in

this study is $0.6 \times 1.2 = 0.72\text{m}^2$.)

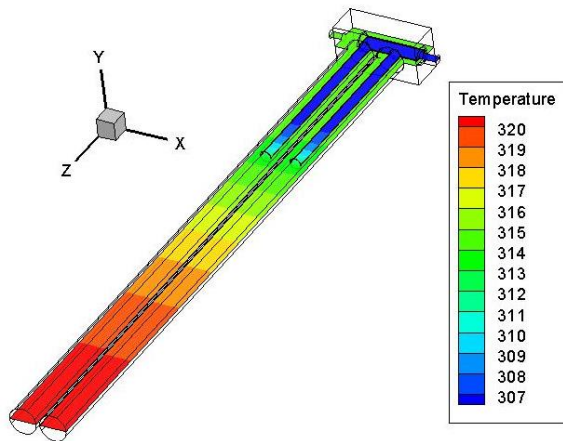


Figure 8. Temperature distributions on the y-plane view for duct length of $0.3L$ and two vacuum tubes.

Figure 9 shows the temperature distributions on the cross section of the y-plane of the eight vacuum tubes, similar to Figure 8 above.

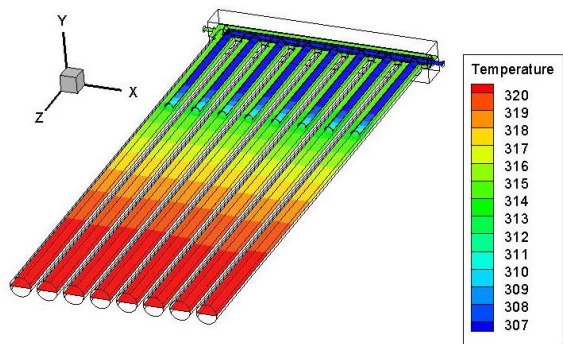


Figure 9. Temperature distributions on the y-plane view for duct length of $0.3L$ and eight vacuum tubes.

Figure 10 shows the enthalpy distributions on the y-plane view for duct length of $0.3L$ and two vacuum tubes. The inlet to the conduit part is the lower part of the enthalpy. The area presents the blue part. The outlet portion of the conduit is gradually green from blue, indicating that the fluid at the outlet has absorbed energy from the vacuum tube wall. In addition, most of the bottom of the vacuum tube is red, indicating a higher enthalpy fluid stagnation at the bottom, although the buoyancy effect driven, but the heat flux is small. Hence, the length of the conduit is $0.3L$ which is only 0.3 times of the vacuum tube L ,

indicating that the hot fluid at the bottom of the vacuum tube cannot also be fully driven up. The average enthalpy of water at the outlet is 90000J and the average enthalpy of water at the inlet is 35000J . Figure 11 shows the enthalpy distributions on the cross section of the y-plane of the eight vacuum tubes, similar to figure 11 below.

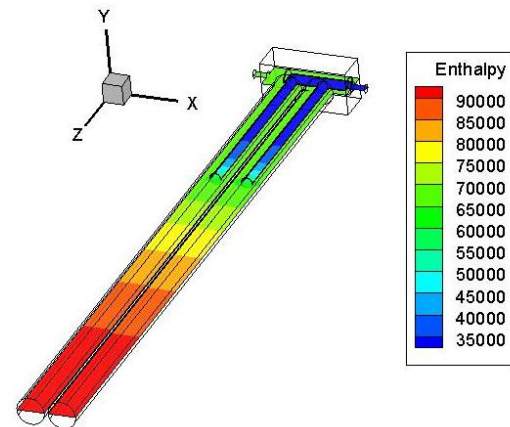


Figure 10. Enthalpy distributions on the y-plane view for duct length of $0.3L$ and two vacuum tubes.

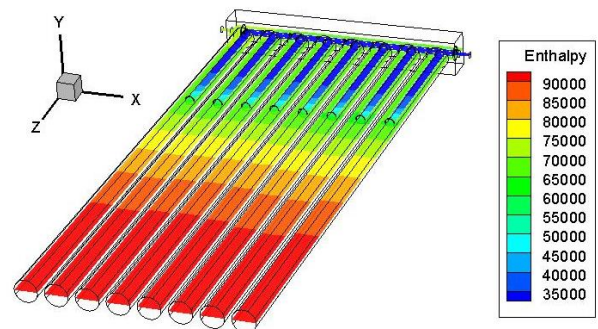


Figure 11. Enthalpy distributions on the y-plane view for duct length of $0.3L$ and two vacuum tubes.

Figure 12 presents a streamline profile on the cross section x-plane, the fluid flows along the conduit from the inlet to the conduit outlet position can be clearly pointed along the streamline and arrow while the colder fluid near the outlet of the conduit flows below along vacuum tube to the bottom, and then the fluid flows reword along the vacuum tube above to a water tank and completed fully circulation of collecting heat. Figure 13, 14 and 15 are zoomed view in part-A, part-B and part-C of figure 12 respectively. It is more clearly shows that the tracking of

streamlines.

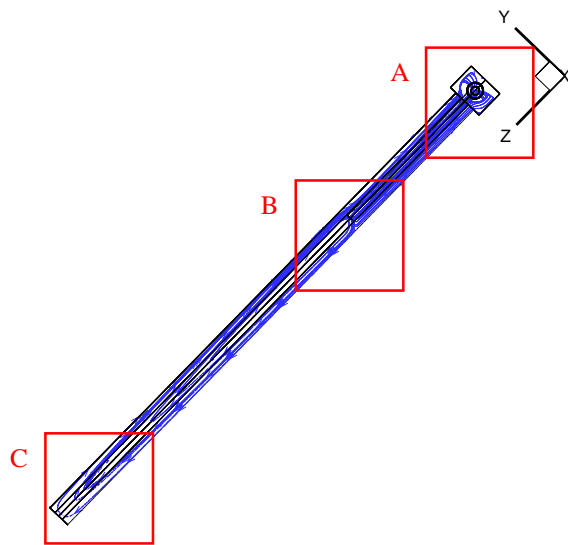


Figure 12. Streamline distributions on the x-plane view for duct length of 0.3L.

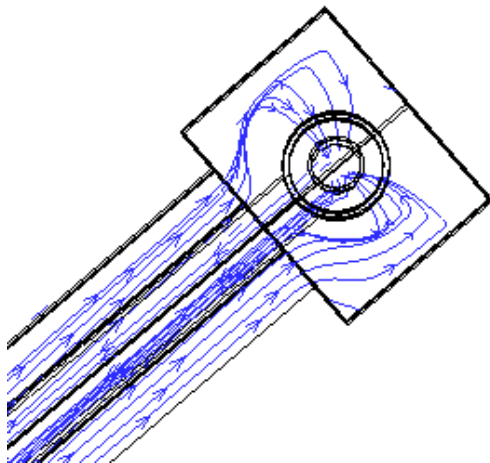


Figure 13. The zoomed part-A view

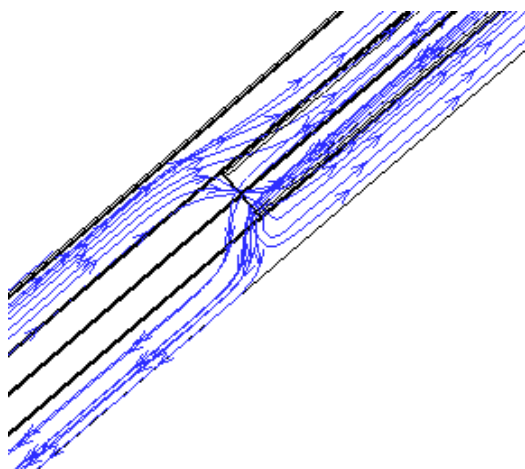


Figure 14. The zoomed part-B view

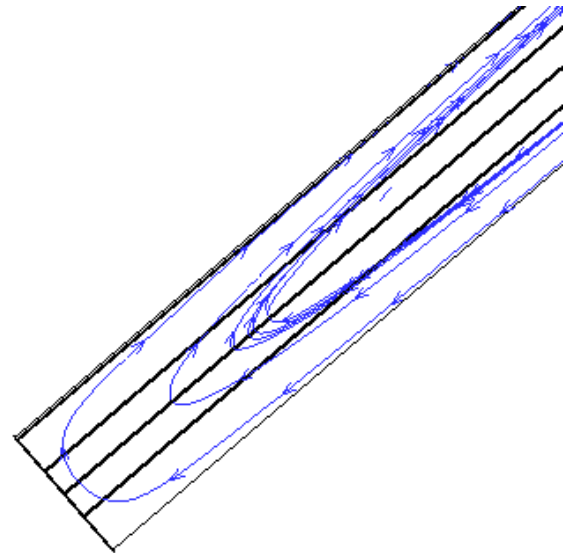


Figure 15. The zoomed part-C view

Figure 16 shows the efficiency vs. flux at the high solar radiation of 650W/m^2 , we can see that the efficiency firstly increases with the flux of collector when the flux located at 2.0 L/min then the efficiency gradual increases except a case of 0.6L length of the conduit that the efficiency decreases as flux at 1.5 L/min . The efficiency of the collector at various fluxes is almost the highest in the conduit length of 0.9 L when the solar radiation is 650W/m^2 .

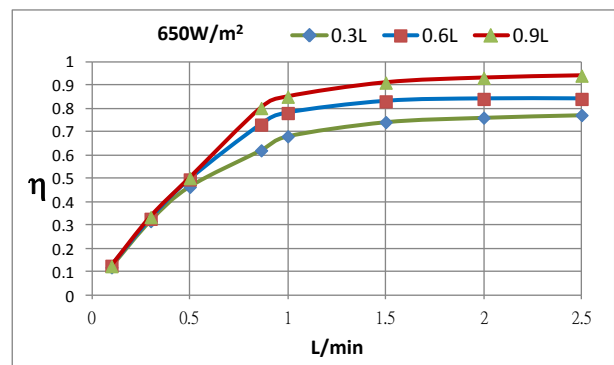


Figure 16. Efficiency vs. flux at the solar radiation of 650W/m^2 .

X. Conclusions

The governing equations are continuity equation, momentum equation, buoyancy equation and energy equation are numerically solved by a commercially software (ANASYS). The water filled in the collector tube flowed by laminar convection heat transfer model and heated by the radiant solar power. Finally,

the forced circulation of the solar vacuum tube are also completed and shown the maximum heat collected efficiency under fixed radiation intensity. The optimal flux is 1.5~2.0L/min for the solar collector, the corresponding maximum efficiency reaches 0.92 when the conduit length is 0.9L and radiation is 650W/m². The collected efficiency increases with the inlet flux. The numerical simulation in the radiation intensity corresponding to the optimal flux ratio and the best length of duct into the vacuum tube, these parameters are very important for the design of solar collector.

References

- [1] E. Bilgen, Y.R. Ben, “Natural convection in enclosure with heating and cooling by sinusoidal temperature profiles on one side”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 50, pp. 139–150 (2007).
- [2] J.A. Eastman, U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson, “Anomalously increased effective thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles”, *Appl. Phys. Lett.* 78, pp. 718–720 (2001).
- [3] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, “Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosure filled with nanofluids”, *Int. J. Heat Fluid Flow* 29, pp.1326–1336 (2008).
- [4] E. Natarajan, T. Basak, S. Roy, “Natural convection flows in a trapezoidal enclosure with uniform and non-uniform heating of bottom wall”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 51, pp. 747–756 (2008).
- [5] A. Dalal, M.K. Das, “Natural convection in a cavity with a wavy wall heated from below and uniformly cooled from the top and both sides”, *ASME J. Heat Transfer* 128, pp. 717–725 (2006).
- [6] T. Basak, S. Roy, A.R. Balakrishnan, “Effect of thermal boundary conditions on natural convection flow in a square cavity”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 49, pp. 4525–4535 (2006).
- [7] Y. Varol, H.F. Oztop, I. Pop, “Numerical analysis of natural convection for a porous rectangular enclosure with sinusoidally varying temperature profile on the bottom wall”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 35, pp. 56–64 (2008).
- [8] I.E. Sarris, I. Lekakis, N.S. Vlachos, “Natural convection in a 2D enclosure with sinusoidal upper wall temperature”, *Numer. Heat Transfer, Part A: Appl.* 42, pp. 513–530 (2002).
- [9] H.F. Oztop, E. Abu-Nada, Y. Varol, K. Al-Salem, “Computational analysis of nonisothermal temperature distribution on natural convection in nanofluid filled enclosures”, *Superlattices Microstruct.* 49, pp. 453–467 (2011).
- [10] S. Parvin, R. Nasrin, M.A. Alim, N.F. Hossain, A.J. Chamkha, “Thermal conductivity variation on natural convection flow of water–alumina nanofluid in an annulus”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55, pp. 5268–5274 (2012).
- [11] M. Chen, Y. He, J. Zhu, D. Wen, “Investigating the collector efficiency of silver nanofluids based direct absorption solar collectors”, *Applied Energy* 181, pp. 65–74 (2016)

List of symbols

C_p	specific heat at constant pressure
g	local gravitational acceleration
h	static enthalpy
H	the amount of energy diffusion direction
Nu	local Nusselt number, hL_d/k
P	pressure
R_a	rayleigh number, $g\beta\Delta\bar{T}L_d^3/\nu\alpha$
t	time
Greek symbols	
μ	dynamic viscosity
ν	kinematic viscosity
ρ	fluid density
τ	stress tensor

Journal of Far East University Vol.35 No.1

Publisher: Yen Ren Wang

Published by Far East University

Editor: Synthetic Affairs Section of Far East University

Address: No.49, Zhonghua Rd., Xinshi Dist., Tainan City 744-48, Taiwan

(R.O.C.)

Telephone: (06) 597-9566 ext 7010

Fax: (06) 597-7010

Published in April 2018

ISSN: 1811-816X

Copyright Reserved 2018

遠東學報 第三十五卷第一期

發行人：王元仁校長

發行單位：遠東科技大學

編輯：教務處綜合業務組

地址：744-48台南市新市區中華路49號

電話：(06) 597-9566 分機 7010

傳真：(06) 597-7010

出版日期：2018年 04月

I S S N : 1811-816X

版權所有、禁止翻印