

ANOVA 應用於震盪式熱管之預測與分析

陳育堂^{1*} 康尚文² 王耀羣²

¹德霖技術學院機械系

²淡江大學機電與機械工程學系

摘要

震盪式熱管的研究已經進行有許多年，由於震盪式熱管的自變數因子有很多，往往都要花費大量的時間進行實驗去探討震盪式熱管的性能表現。此研究使用田口法進行實驗規劃，大量減少實驗次數，並對實驗使用 Minitab 進行變異數分析，找出每個因子在不同水準搭配下的最適化組合並探討各因子對震盪式熱管性能表現的影響。此研究以填充率水準為 40%、50%、60%、70%、80%，加熱功率水準為 40 W、80W、120W、160W、200W，傾斜角度水準為 0、30、45、75、90，以熱阻為品質進行 L25 直交表之田口方法分析，其結果顯示最佳組合為 70% 的填充率、200W 的加熱功率與 45 度的傾斜角，而最佳輸出品質為 0.162°C/W 的熱阻值，另加熱功率的貢獻值 $F=193.02$ 為影響實驗表現最大的控制因子。最後比較所有控制因子中任其中兩因子之實驗與預測的 S/N 等值線圖，發現預測與實驗的 S/N 等值線分布曲線非常相似。最後利用三階回歸方程預測輸出品質，所得之預測熱阻 S/N 值與實驗結果是相當符合，其準確度達 99.75%。

關鍵詞：震盪式熱管、田口方法、變異數分析、品質、直交表

Performance Prediction and Analysis on Pulsating Heat Pipe Using ANOVA

Yu-Tang Chen^{1*} Shung-Wen Kang² Yao-Chun Wang²

¹Department of Mechanical Engineering, De Lin Institute of Technology

²Department of Mechanical and Electro- Mechanical Engineering, Tam Kang University

Abstract

In order to get the best thermal performance in pulsating heat pipe (PHP) with the lowest experimental times and have ability to predict the results of experiments. This research presents analysis of thermal performance for PHP based on Taguchi method, ANOVA, and regression model. Thermal resistance is considered as quality characteristics, and filling ratio, inclination angle, heat input are chosen as control factors. Using Taguchi method and L25 orthogonal array to conduct experiments on PHP. For the best thermal performance of PHP, signal to noise ratio (SNR) based on smaller the better (STB) quality characteristic has been used. The best quality characteristic is under the combination: filling ratio 70%, heat input 200W, and inclination angle 45° where the smallest thermal resistance is 0.162°C/W. A third order regression model is performed to predict quality characteristics by Minitab. The coefficient of determination R^2 is used to evaluate the adaptation of a regression model, which R^2 is 0.997 in this research. ANOVA is conducted with Minitab. The most contribute control factor is heat input that $F=193.02$. The distribution of contour plot between experiments and regression model gets a highest match rate 91.65%

Keywords: Pulsating Heat Pipe, Taguchi Method, ANOVA, Quality, Orthogonal Array

壹、前言

震盪式熱管(Pulsating Heat Pipe, PHP 或稱 Oscillating Heat Pipe, OHP)是一種近年來所提出來的新型熱管，其結構簡單、傳熱迅速且可傳遞大量的熱，可符合現今大功率的需求。1996 年時，Akachi[1]正式提出「Pulsating Heat Pipe」此專有名詞，文中介紹震盪式熱管的基本概念，其傳熱方式為液汽共存的震盪作用，管內無需毛細結構及可將工作流體由冷凝端回流至蒸發端，為一種熱驅動壓力震盪裝置。Wong [2]等提出以動態方程式中的質量、彈簧及阻尼，來模擬震盪式熱管中的汽柱與液柱的現象，Tong [3]等製作閉迴路震盪式熱管可視化模組，利用高速攝影機觀測作動期間，工作流體震盪情形，亦探討管內流場現象，包含核沸騰、汽泡之結合、二相流及內部擾動傳遞等情形，Zhang 等[4]利用 FC-72、乙醇和純水做為其工作流體，指出閉迴路震盪式熱管效果較開迴路式的效果佳，因閉迴路式有較大震盪循環的現象，且在較高填充量時開迴路式幾乎沒有震盪狀況。而 FC-72 建議是在較低的熱通量下使用，在高熱通量下水的效果較佳。Xu 等[5]使用去離子水與甲醇為工作流體，利用高速攝影機拍攝汽泡在管內生成的過程。發現當汽柱在經過彎管處時，因表面張力及汽泡浮力的影響，容易在彎管處產生破裂。Khandekar[6]等人提出 PHP 可視化之研究，利用玻璃管連接 U 型銅管組成封閉式 PHP，如圖 25 所示，採用純水及乙醇為工作流體，且將流場變化藉影像擷取系統及高速攝影機記錄下來，同時比較熱阻、填充率、輸入熱量和傾斜角等相關參數的影響，而玻璃流道的表面溫度也利用熱影像儀監控溫度分佈情形。淡江大學陳冠廷[7]製作不鏽鋼及玻璃震盪式熱管，不鏽鋼管採用內徑 3 mm、外徑 3.5 mm 的管材，玻璃管為外徑 6 mm、內徑 3 mm，研究在不同的風速下，測其性能並利用類神經網路預測其性質。Senthilkumar[8]等，利用田口法規劃實驗分析熱管之熱性能最佳參數，其採用加熱功率、傾斜角與冷卻水之流率為 3 個控制因子，以 L_9 直交表規劃實驗並計算各輸出品質得 S/N，再利用變異數分析，分別獲得最佳效率、最佳熱阻與最佳熱傳導係數。Ma 和 Zhang[9]使用中央合成設計應用於震盪式熱管，依照中央合成設計方法進行實驗設計，並假設一個二階回歸方程式其得到的預測值會非常接近試驗結果。

在震盪式熱管研究中，實驗過程及實驗數據整理往往需耗費許多時間與金錢。故本研究利用田口方法進行實驗規劃與品質分析，並利用信號雜訊比(S/N)進行各項控制因子與水準之探討，進而分析得到最適化組合與最佳品質，且能有效減少實驗次數與數據整理所耗費的時間與花費，更可利用回歸預測獲得全因子品質輸出。

貳、田口實驗規劃與三階回歸

2.1 田口架構

田口步驟流程如圖 1 所示。

(1)選定品質特性

最能表現出震盪式熱管的品質特性為熱阻值，透過熱阻值的高低，可以判斷熱管的好與壞，在許多應用上，熱管的熱阻值常為選用的重要指標。

(2)判定品質特性之理想機能

熱管的熱阻值越接近於零，表示此熱管之性能越佳，傳熱效果越好，故採用望小型品質特性來計算其 S/N。由於 S/N 是一種判斷品質好壞的依據，當熱阻越小有較佳的品質時，S/N 會顯示為越大。

(3)列出所有影響此品質特性的控制因子

一個震盪式熱管的因子有填充率、管徑大小、管徑長度、加熱端面面積、冷凝段面積、冷凝段溫度、加熱瓦數、傾斜角度、工作流體以及工作流體濃度等多種因子。

(4)定出控制因子之水準

本研究採用填充率、加熱功率與傾斜角度為控制因子，其水準分別為 40%~80%、40W~200W 與 0° ~ 90° ，如表一所示。

(5) 選定適當的直交表，安排完整的實驗計劃
依據實驗控制因子數量與水準之不同而選擇的直交表也不相同。表二為實驗規劃之 $L_{25}(5^3)$ 直交表。

(6) 執行實驗與資料分析並進行結果與討論

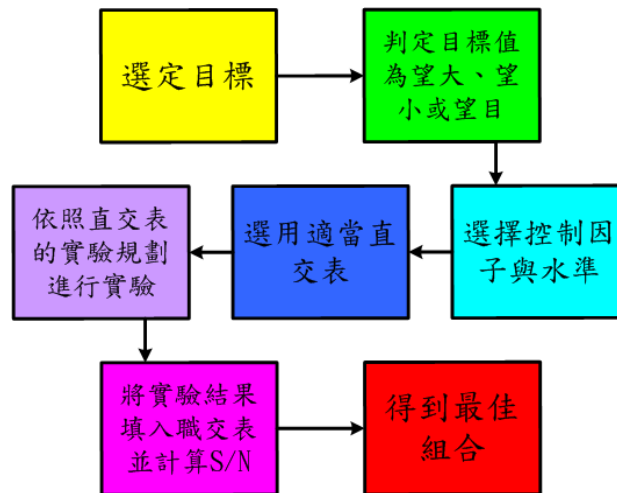


圖 1 田口方法流程圖

表一 $L_{25}(5^3)$ 控制因子

	a(填充率)	b(加熱功率)	c(傾斜角度)
Level 1	40 %	40 W	0°
Level 2	50 %	80 W	30°
Level 3	60 %	120 W	45°
Level 4	70 %	160 W	75°
Level 5	80 %	200 W	90°

表二 L₂₅(5³)直交表

	a(填充率)	b(加熱功率)	c(傾斜角度)	d(熱阻)	S/N
1	1	1	1	1.219	-1.73
2	1	2	2	0.518	5.72
3	1	3	3	0.362	8.82
4	1	4	4	0.349	9.15
5	1	5	5	0.260	11.70
6	2	1	2	1.062	-0.52
7	2	2	3	0.506	5.92
8	2	3	4	0.410	7.75
9	2	4	5	0.297	10.56
10	2	5	1	0.336	9.47
11	3	1	3	0.634	3.96
12	3	2	4	0.502	5.99
13	3	3	5	0.324	9.80
14	3	4	1	0.355	8.99
15	3	5	2	0.242	12.32
16	4	1	4	0.615	4.22
17	4	2	5	0.386	8.26
18	4	3	1	0.349	9.14
19	4	4	2	0.247	12.16
20	4	5	3	0.162	15.81
21	5	1	5	0.587	4.62
22	5	2	1	0.431	7.31
23	5	3	2	0.311	10.16
24	5	4	3	0.204	13.81
25	5	5	4	0.217	13.29

2.2 三階近似回歸方程式

震盪式熱管中控制因子與熱組表現的關係是非線性的，且無法得知。所以由 Ma 和 Zhang 等 [9]以二階回歸方程式預測實驗結果的方式，在此研究中更進一步以現有的實驗數據進行回歸分析，得到三階回歸方程式的預測結果與實驗值進行比較

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_{iii} x_i^3 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i^2 x_j + \sum_i \sum_{j(j>i)} \beta_{ij} x_i x_j + x_i x_j x_k + \varepsilon \quad (1)$$

因變數 y 包含了各個單因子、兩不同因子相乘、二次項、三次項、三不同因子相乘，以及二次項與單因子相乘，而 ε 被視為隨機誤差。

參、實驗架設與測試

3.1 實驗設備

實驗周邊設備如下：

- (1)真空幫浦：使用真空幫浦主要目的在排除非凝結性氣體，降低工作流體的沸點，本實驗使用的真空幫浦為優貝克公司所生產(型號為 GLD-201b)，其抽氣速率為 60m³/hr，極限壓力為 3.0×10⁻⁴ Torr。
- (2)真空計：真空計為 Granville Phillips 所生產，其量測範圍為 10⁻³~1000 Torr。

- (3) 電源供應器：提供加熱的電源，由瑞領公司製作，型號為 LW-3650 及 LW-3650_R1。
- (4) 數據擷取及處理系統：作為測量 PHP 各點溫度的設備，型號為 OMEGA TempScan-1100，採用 T-type 熱電偶線，由電腦將數據擷取下來。
- (5) 恆溫水槽：由奕豐生產，型號為 P-20，控制溫度範 $-20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ ，控制精度為 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ，適用實驗之水冷裝置。
- (6) 流量計：利用開關閥控制冷凝水流量。

3.2 熱電偶位置及熱阻計算

本實驗使用 T 型熱電偶線感測溫度，其測量範圍為 $-100 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ，線徑為 0.25mm ，溫度量測點位置如圖 2 所示，蒸發段各玻璃管表面溫度為 $T_1 \sim T_{10}$ ， T_{in} 為冷凝水入口溫度， T_{out} 則為出口溫度。熱阻值計算如式 2 所示，其中 R 為震盪式熱管熱阻值， T_H 為蒸發端平均溫度， T_C 為冷凝端平均溫度。

$$R = \frac{T_H - T_C}{Q} \quad (2)$$

$$T_H = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10}}{10} \quad (3)$$

$$T_C = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (4)$$

R ：震盪式熱管熱阻值 T_H ：蒸發端平均溫度 T_C ：冷凝端平均溫度

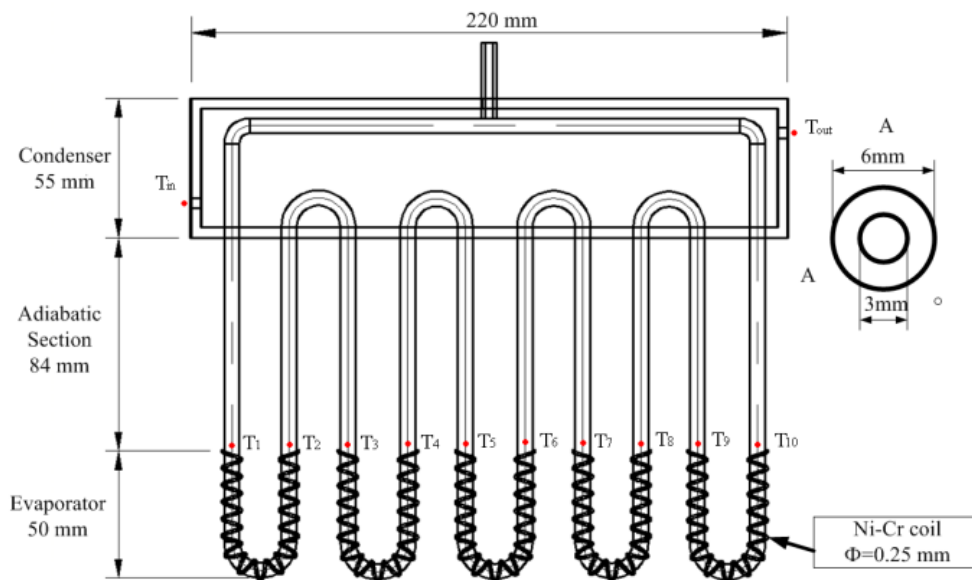


圖 2 熱電偶線配置位置

3.3 實驗步驟

- (1)抽真空：排除管內非凝結性氣體和降低水的沸點，當壓力達 1.0×10^{-2} Torr 以下後，再充填乙醇進行測漏，確認無洩漏問題。
- (2)填充工作液體：利用針筒填充工作流體-水，於填充工作流體前先將其殘留的非凝結性氣體排除。再依照實驗所需填充率填入熱管中，測量是否已到達足夠的填充率，若填充液體過多，則利用真空幫浦將多餘液體抽除，如果填充率過少則需重覆上一步驟，將液體填入，直到所需填充率。
- (4)將熱電偶線黏貼於加熱端的表面，檢查所有熱電偶線都正常。
- (5)利用水平儀確認工作平台及裝置是否為水平狀態。
- (6)開啟溫度擷取系統，並確認可以正常讀取和紀錄。
- (7)開啟恆溫水槽進行冷凝水水溫之控制，並搭配浮標式流量計進行流量控制。
- (8)在開始加熱前，先將流量計調整在一個流量，等待穩定約十分鐘，如果游標位置無任何改變，則開始加熱。
- (9)依照田口方法所規劃之實驗組合進行第一組至第二十五組實驗。
- (10)整理實驗數據，填入直交表中做計算與分析

肆、結果與討論

4.1 直交表之應用分析

將田口方法應用於震盪式熱管，使用直交表安排實驗組合，並依照實驗組合實際操作實驗。取填充率、加熱功率、熱管傾斜角度為控制因子，並採用 5 水準之 L_{25} 直交表分析最佳品質。

以 40%、50%、60%、70%、80% 為填充率的 5 水準，而加熱瓦數為 40W、80W、120W、160W、200W，傾斜角度 0° 、 30° 、 45° 、 75° 、 90° ，使用 $L_{25}(5^3)$ 直交表，經實際實驗得輸出品質熱阻，並計算其 S/N 比(表二)。表三為各參數之因子反應，將各因子中 S/N 最大的水準選出便可得到最佳組合為水準 4 的填充率(70%)、水準 5 的加熱功率(200W)與水準 3 的傾斜角度(45°)，其輸出熱阻值為 0.162°C/W ，為所有規劃實驗組合中最低者，因此具有最佳的輸出品質；將各因子中 S/N 最小的水準選出便可得到最差組合為水準 2 的填充率(50%)、水準 1 的加熱功率(40W)與水準 1 的傾斜角度(0°)，具有最差的輸出品質。

表三 L_{25} 因子反應表與最佳組合

	a(填充率)	b(加熱功率)	c(傾斜角度)
Level 1	6.73	2.11	6.63
Level 2	6.64	6.64	7.97
Level 3	8.2	9.13	9.66
Level 4	9.92	10.94	8.08
Level 5	9.84	12.52	8.99
最佳組合	a(填充率)	b(加熱功率)	c(傾斜角度)
	Level 4	Level 5	Level 3

圖 3 顯示填充率在各水準下的 S/N 表現。填充率在 40%、50%、60% 時，有部份蒸發段內部並無工作流體，較易導致部分管內有燒乾現象，需要等待其他蒸發段內之工作流體蒸發才能將工作流體導入此區域內；而填充率 60% 當中，此區域較 50% 少，故此現象發生之次數也較少。而填充率 70%、80% 當中因內部工作流體較多，所需加熱時間也較長，較適合高加熱功率時使用。圖 4 則為加熱功率在各水準的表現，在越大的加熱功率下，其工作流體蒸發速度比低功率都要來的快，較易維持內部流體震盪現象，其熱阻值相對較低，所以 S/N 則相對較高。圖 5 為傾斜

角度在各水準下的表現，可得知傾斜角度 45° 為最佳，推測 $60^\circ\sim 90^\circ$ 必需克服較大重力，汽液柱必須有足夠推力推向冷凝段，而傾斜角 45° 介於推力較大而重力較小，所以 S/N 較高。

在此實驗中，填充率 70% 為 40%、50%、60%、70%、80% 五種水準中最佳的填充率，根據實驗觀察發現，震盪式熱管內部的流體在蒸發段被加熱後汽化，蒸發段之壓力上升後將蒸氣流體推向冷凝段，流體的熱量被冷凝段的冷凝水帶走後凝結成液體，回到蒸發段時再被加熱汽化。當加熱瓦數固定時，(1) 冷凝段的溫度越低，則大部分的蒸汽到達冷凝段之前皆已凝結為液體，導致內部流體再回到蒸發段時需要更多的時間被加熱，而且其蒸氣產生時又必須重新打破內部之動力平衡。(2) 冷凝段之溫度越高，則大部分的蒸汽經過冷凝段之後尚未凝結成液體，此時震盪式熱管較容易產生燒乾現象。(3) 當控制冷凝段流速，使蒸發段與冷凝段溫差越小時，震盪式熱管內部流體在蒸發段與冷凝段兩區域中有較明顯之相變化，該震盪式熱管之熱阻值就越小。

在 Zhang 等[3]研究當中也說明，閉迴路式較開迴路式效果更好，因閉迴路式的震盪現象比開迴路式大，因震盪現象越大，其內部流體循環越佳，熱阻也就越低。故可推論震盪式熱管之熱阻值可憑藉著震盪幅度大小決定。所以震盪式熱管內部流體的相變化越快速，則內部流體運轉及震盪之情況就越頻繁，傳遞熱量的速度就越快，熱阻值就越低。

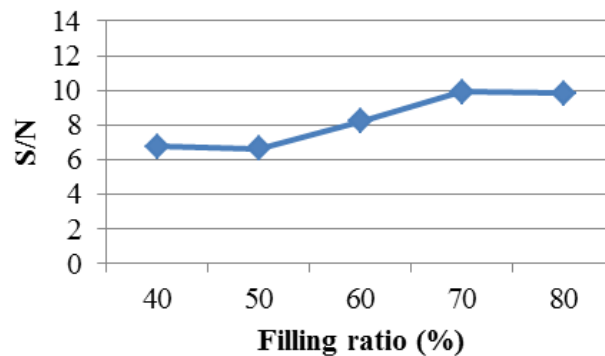


圖 3 填充率各水準下的 S/N 表現

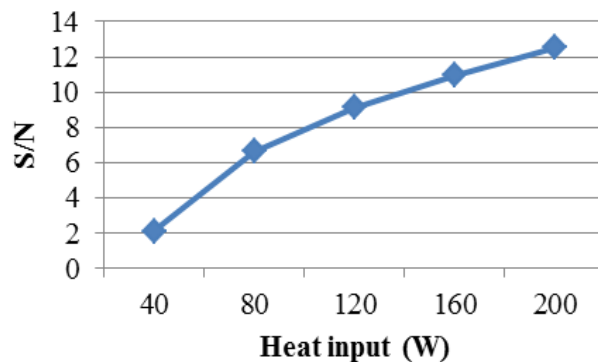


圖 4 加熱功率各水準下的 S/N 表現

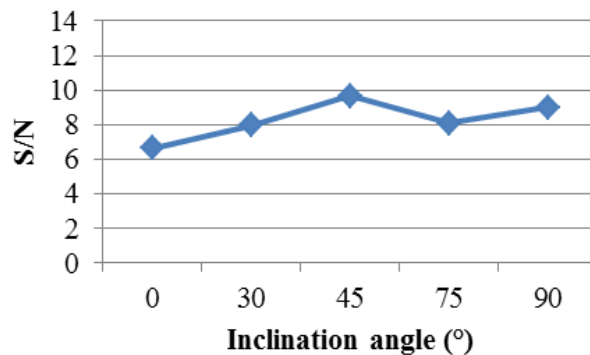


圖 5 傾斜角度各水準下的 S/N 表現

4.2 ANOVA

變異數分析(ANOVA)如表四所示，其中 F 為貢獻度，F 值越大代表著在所有實驗中對實驗品質影響最大的因子，由表四中可以看出加熱功率為影響本實驗品質最大的因子，其次是填充率，最後的是傾斜角度。

Factors	DF	SS	MS	F
Filling ratio	4	51.044	12.7609	29.66
Heat input	4	332.280	83.0700	193.06
Inclination angle	4	26.237	6.5592	15.24
Pure error	12	5.163	0.4303	
Total	24	414.724		

表四 控制因子變異數分析

4.3 預測方程式

由在 2.2 節提到的三階回歸方程式，將本次實驗的各控制因子進行回歸得到

$$\begin{aligned}
 S/N = & 57231 - 76401X_1^3 - 0.00119X_2^3 \\
 & - 0.0362X_3^3 - 571X_1^2X_2 - 615X_1^2X_3 \\
 & - 1.42X_2^2X_1 - 0.00385X_2^2X_3 + 8.16X_3^2X_1 \\
 & + 0.0204X_3^2X_2 - 3.08X_1X_2X_3 + 229097X_1^2 \\
 & + 1.43X_2^2 - 3.27X_3^2 + 1142X_1X_2 \\
 & + 495X_1X_3 + 1.24X_2X_3 - 209932X_1 \\
 & - 523X_2
 \end{aligned} \tag{5}$$

其中 S/N 即為品質特性，由於熱阻值太小，所以採用 S/N 來進行回歸盡可能減少可能的誤差。而 X₁ 為填充率、X₂ 為加熱功率、X₃ 為傾斜角度。在此方程式中，因為方程式是假設的原故，在使用 Minitab 進行回歸時，程式判定 X₃ 項為因變數所以在此被移除，並且設定誤差項 ε 為 0。以實驗得到的 S/N 為 SN_e 和由預測方程是得到的 S/N 為 SN_p，用所有 1~25 次實驗得到的 SN_e-SN_p 如圖 6 所示，其差值明顯在近似 0 的時候最高，最大差值也只到正負 0.3 之間。

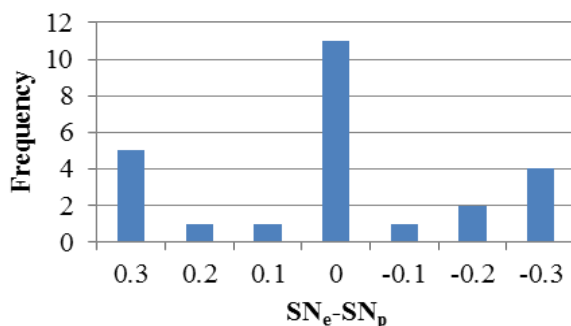


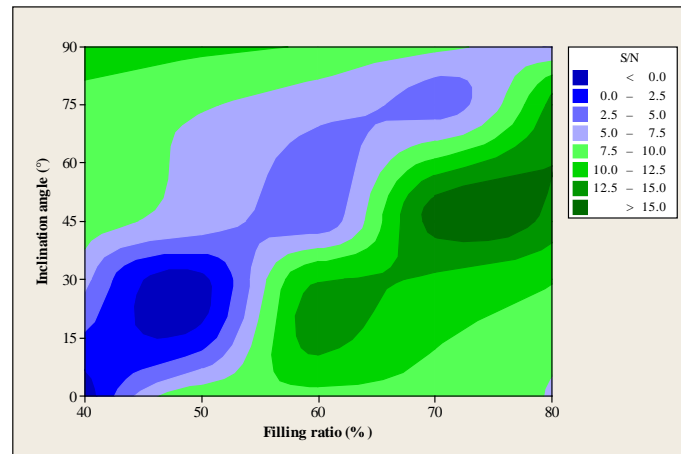
圖 6 SN_e-SN_p 差值長條圖

另計算預測值與實驗值的是否相符合，所得到的結果如式(6)[9]， \overline{SN}_e 為所有實驗值的平均，相當於具有 99.75%的準確度。

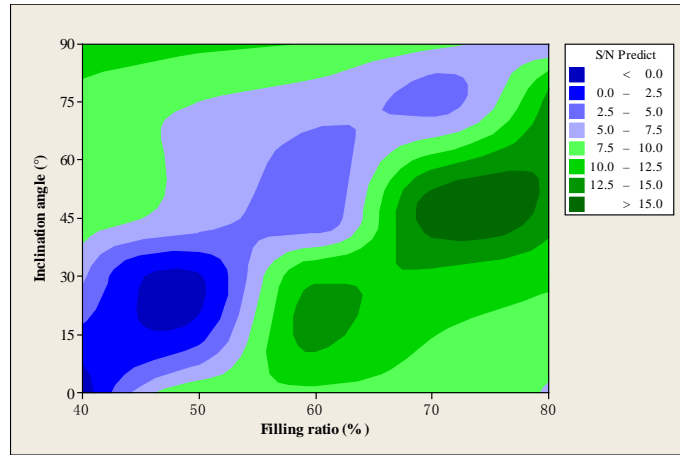
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{25} (SN_{p,i} - \overline{SN}_e)^2}{\sum_{i=1}^{25} (SN_{e,i} - \overline{SN}_e)^2} = 0.9775 \quad (6)$$

經分析得到最佳以及最差的品質組合，最佳品質出現在 70%的填充率、200W 的加熱功率以及 45 度的傾斜角的時候；而最差品質則出現在 50%的填充率、40W 的加熱功率以及 0 度的傾斜角度的時候。利用三階回歸方程預測輸出品質，將預測出來的輸出品質，另使用 Minitab 對全部控制因子中的其中兩個因子做 S/N 等值線圖，並進行實驗值與預測值之比對(圖 7~9)。由圖 7 和圖 8 顯示，70%~80%左右的填充率具有較大的 S/N 值，而 40%~50%的填充率則 S/N 值較小；另由圖 8 和圖 9 觀察，45 度~60 度左右的傾斜角度有較大的 S/N 值，當傾斜角度為 0 度~30 度時，則 S/N 值較小；最後由圖 7 和圖 9 得知，當加熱功率約在 160W~200W 時 S/N 值大，而 50W 左右的加熱功率時，則 S/N 值小。比較實驗得到的最佳組合與最差組合，皆落在預測較大 S/N 值範圍內與較小區塊內，顯示預測 S/N 的等值線圖與實驗是相符合的。

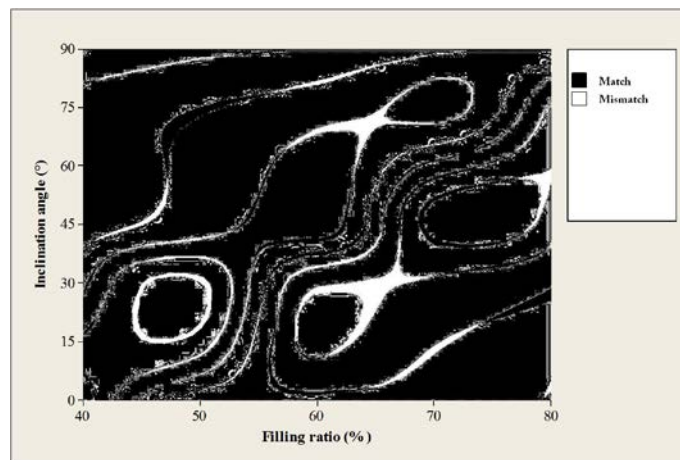
最後圖 7(c)、圖 8(c)和圖 9(c) 為實驗值與預測值之比對，各圖中黑色部分為 S/N 實驗與預測 Match 的區域，白色部分為 Mismatch 的區域，可以發現到實驗與預測的 S/N 分布極為相似，經過 Matlab 演算結果，可以得到圖 7(c)傾斜角度與填充率的實驗與預測等值線圖，Match 率達 83.99%；圖 8(c)填充率與加熱功率的實驗與預測等值線圖，Match 率達 91.65%；最後圖 9(c) 傾斜角度與加熱功率的實驗與預測等值線圖，Match 率達 91.16%。再由加熱功率有最大 F 值，對應到圖 7、圖 8 和圖 9 發現有加熱功率為因子的圖中，Match 率也較高。



(a) 實驗值

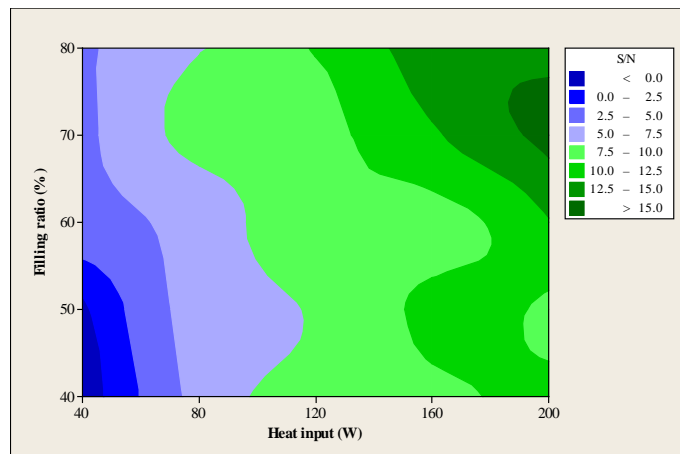


(b) 預測值

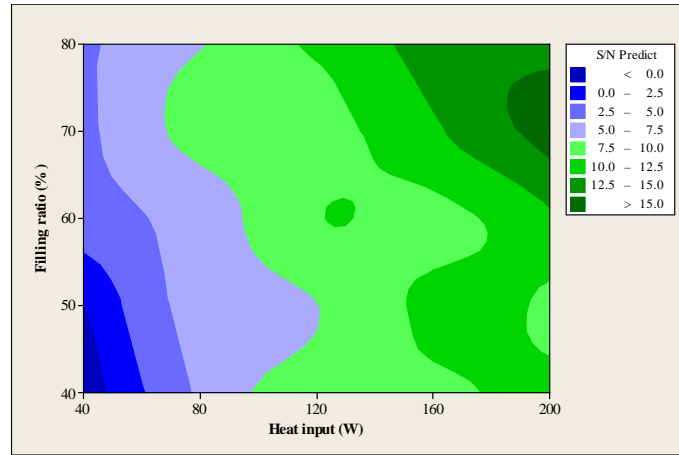


(c) 實驗值與預測值 Match 分布

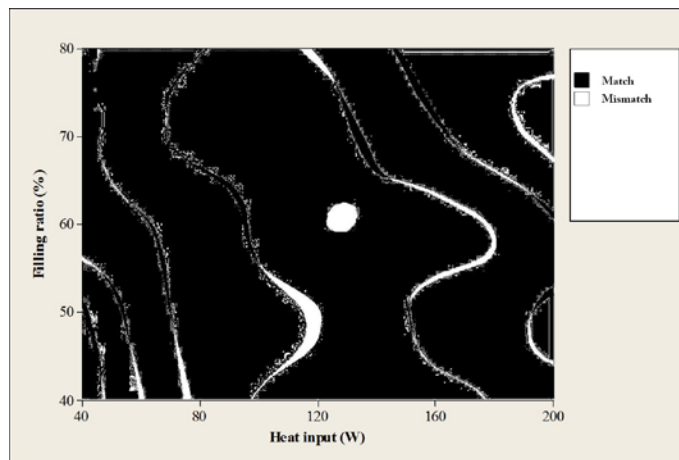
圖 7 傾斜角度與填充率 S/N 等值線圖



(a) 實驗值

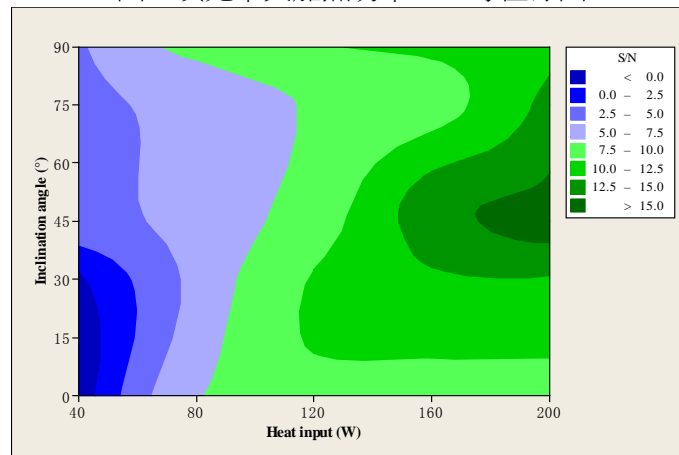


(b) 預測值

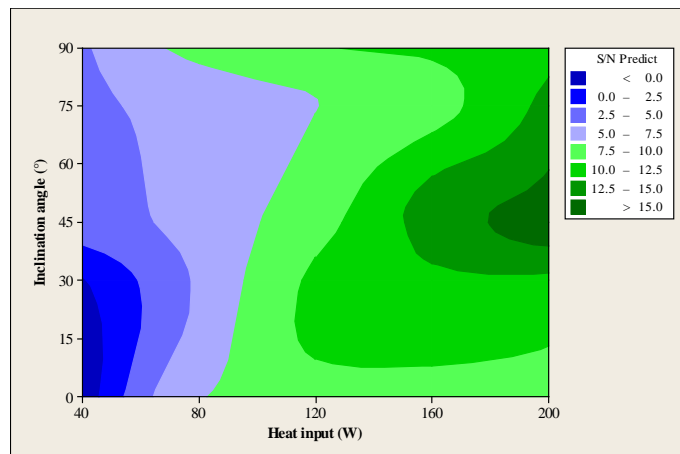


(c) 實驗值與預測值 Match 分布

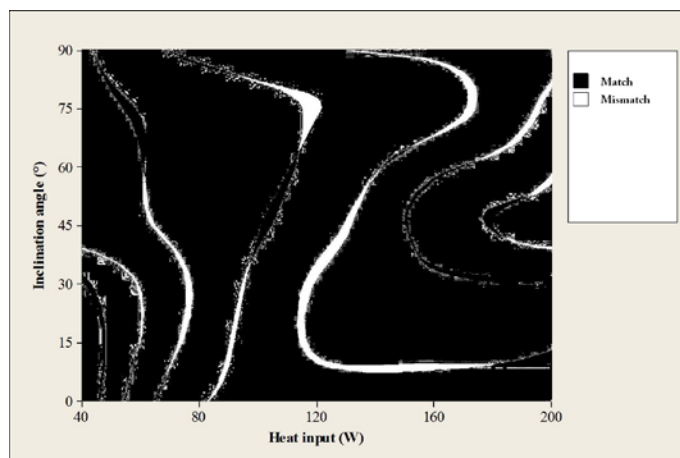
圖 8 填充率與加熱功率 S/N 等值線圖



(a) 實驗值



(b) 預測值



(c) 實驗值與預測值 Match 分布

圖9 傾斜角度與加熱功率S/N等值線圖

伍、結論

震盪式熱管研究中，實驗過程及實驗數據整理往往是耗費最多時間的部份，若能有效減少實驗及數據整理所耗費的時間，勢必能做更多的研究及分析。故本研究利用田口方法進行實驗規劃與品質分析，進而減少實驗次數，並利用當中的信號雜訊比(S/N)進行各項因子與水準之探討，找出最適化組合與最佳品質。

選用填充率、加熱功率與傾斜角度為控制因子，水準分別為 40%、50%、60%、70%、80%；40W、80W、120W、160W、200W；0°、30°、45°、75°、90°，搭配 $L_{25}(5^3)$ 直交表進行實驗規劃，結果顯示當填充率 70%，加熱功率 200W，傾斜角度 45°時，可得到最佳熱阻值 0.162°C/W，此為所有規畫實驗當中的最低值。田口方法應用於震盪式熱管，能有效的減少實驗次數，且其 S/N 比也可作為一基準，探討在各水準下其性能的好與壞。由 ANOVA 更可以得到在實驗中對品質影響最大的控制因子為加熱功率(F=193.02)，可做為震盪式熱管設計之重要參考依據。

最後由假設的三階回歸方程式，對各實驗組合進行預測，得到的預測結果與實驗值相似度高達 99.75%，再利用預測得到的 S/N 與實驗得到的 S/N 使用 Minitab 做出等高線圖，再使用 Matlab 對各別的預測與實驗等高線圖進行 Match 分析，得到傾斜角度與填充率 Match 率為 83.99%，填充率與加熱功率 Match 率為 91.65%，傾斜角度與加熱功率 Match 率為 91.16%，由於預測值與實驗值相似程度以及 S/N 等高線圖分布都非常相近，因此可以利用三階回歸預測進而獲得全品質輸出。

陸、參考文獻

- [1] Akachi, H., Polasek, F., & Stulc, P. (1996). Pulsating Heat Pipes. Proc. 5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia, pp. 208-217.
- [2] Wong, T.N., Tong, B.Y., Lim, S.M., & Ooi, K.T. (1999). Theoretical Modeling of Pulsating Heat Pipe. Proc. 11th International Heat Pipe Conference. Tokyo, Japan, pp. 159-163.
- [3] Tong, B.Y. & Ooi, K.T. (2001). Closed-loop pulsating heat pipe. Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1845-1862.
- [4] Zhang, X.M., Xu, J.L., & Zhou, Z.Q. (2004), Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol, and water as working fluids. Experimental Heat Transfer, Vol.17, pp 47-67.
- [5] Xu, J.L., Li, Y.X., & Wong, T.N. (2005), High speed flow visualization of a closed pulsating heat pipe. Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 3338-3351.
- [6] Khandekar, S., Schneider, M., Schafer, P., Kulenovic, R., & Groll, M. (2000). Visualization of Thermo Fluid Dynamic Phenomena in Flat Plate Closed Loop Pulsating Heat Pipe. Proc. 6th International Heat Pipe Symposium, Chiang Mai, Thailand, pp. 235-247.
- [7] 陳冠廷(2009)。應用類神經網路預測震盪式熱管之熱性能。碩士論文，淡江大學機械與機電工程研究所。
- [8] Senthilkumar, R., Vaidyanathan, S., & Sivaraman, B. (2010). Thermal Analysis of Heat Pipe Using Taguchi Method. International Journal of Engineering Science and Technology, Vol.2 (4), pp.564-569.
- [9] Ma, Y., Zhang, H. (2006). Analysis of Heat Transfer Performance of Oscillating Heat Pipes Based on a Central Composite Design. Chinese J. Chem. Eng., 14(2) 223-228.