

蒸汽噴射器之優化設計

劉旭昉¹、龔文學²、羅文華²、陳俊生²

¹黎明技術學院機械系、²龍華科技大學機械系

*Email: sfl@mail.lit.edu.tw

摘要

衛生泵浦已廣泛用於食品工業中，若能夠使用高輸送量之蒸汽噴射器來輸送，可有效降低清潔時間與建置、維護成本。反應曲面法可以採用單一品質特性可求得產品單一特性最佳值，也可兼顧多品質特性找出最佳的參數組合，工程師若採用田口法結合反應曲面法，能快速設計出性能優良的蒸汽噴射器。本文應用田口法結合反應曲面法於蒸汽噴射器之設計，以噴射器之噴嘴喉部直徑、噴嘴出口距離、吸入室角度、混合室直徑等四種設計參數、三種水準值，進行抽吸流量及熱影響溫差的實驗，找出流量與溫差的預測方程式，並優化推導出最佳參數水準組合。實驗結果顯示噴嘴喉部直徑是影響蒸汽噴射器抽吸流量與熱影響溫差的重要參數。

關鍵詞：田口法、反應曲面法、蒸汽噴射器

1. 前言

自十七世紀蒸汽機被發明以來，蒸汽已被廣泛運用到各種工業的領域之中，其包含了加熱、動力、清潔、保溫等應用，如食品應用蒸汽烹調加熱、食材經由蒸汽動力輸送、罐頭利用蒸汽殺菌、利用蒸汽進行大面積的清潔等，因此蒸汽技術在我們生活中已經占據了相當重要的地位。目前全世界有 80% 能源供應來自於石化燃料，包含了煤、石油、天然氣等，石化燃料在未來將面臨枯竭的命運，可遇見未來能源取得將更不容易。若能研究出一個有效率的噴射器，可以利用較少的能量達到輸送越多的流體，使其達到節能之效果是重要的課題。

本研究設計係參考真空產生器的原理，採用高壓蒸汽作為主要流體經由噴嘴及擴散器形成噴射流。但因噴射器的性能會因主被動流體之壓力、溫度、幾何形狀等各種複雜條件影響，而採用何種設計參數與水準值，通常需由工程師依其工程知識來決定，選擇設計參數與水準值設定，常因工程師的經驗不同而有差異性。

實驗設計為生產研發改善的重要方法，其中田口法 (Taguchi's Method) 能用較短時間及成本找出固定水準最佳組合參數，而反應曲面法 (Response Surface Methodology) 可用於建構連續性參數之品質特性方程式。本研究將結合田口法、反應曲面法來針對蒸氣噴射器，進行抽吸流量及單位時間內熱影響溫差多重品

質特性最佳設計參數組合探討，以了解設計參數與水準值對於噴射器性能之影響。針對參數優化蒸汽噴射器，其抽吸流量及單位時間內熱影響溫差之品質特性，先後採用了田口法及反應曲面法以噴嘴喉部直徑 (nozzle throat diameter)、噴嘴出口距離 (nozzle exit position)、吸入室角度 (suction chamber angle)、混合室直徑 (mixing chamber diameter) 等四種設計因子找出最佳參數組合。先以田口法找出對抽吸流量 (suction flow) 及單位時間內熱影響溫差 (ΔT) 的最佳參數水準組合，再以反應曲面法求出構成抽吸速度、抽吸比之品質特性的預測方程式，藉以探討四種參數對於抽吸能力品質特性的影響並驗證兩種分析方法以確認設計因子對於蒸汽噴射器之性能之影響度。

Kim[1] 研究四個幾何參數對於環狀噴射器之影響，其參數包含了主噴嘴出口與喉部面積比、混合室入口夾角角度、第二喉部截面積及長度與直徑 (L/D) 比值對其性能之影響。其研究顯示當混合室的長度小於 20mm 時，起始壓力與喉管面積比呈線性比例關係。當混合室長度大於 20mm 時，起始壓力與混合室長度成正比，而啟動壓力取決於喉部面積比。最後根據實驗結果，簡化分析模型用來預測二次側流體壓力，結果顯示二次側流體壓力與混合室收縮角的測量值幾乎為吻合。在預測製冷應用中，Sriveerakul[2] 將數值模擬分析使用於蒸汽噴射器性能的探討，透過實驗模型及計算流體動力學 (CFD) 分析，驗證了 CFD 不僅是預測噴射器性能的有效工具，且為更方便了解噴射器內部湍流、混合模式之工具。因應全球變暖控制，餘熱回收熱泵也可以貢獻一己之力，Hu[3] 採用新型離心式熱泵系統回收鋼廠餘熱進行區域供熱，兩台蒸汽噴射離心式壓縮機，以雙循環並聯繫統配置，能源效率可更高，制熱量更大，此廢熱回收系統顯示比傳統加熱方法更具優勢和經濟。分層液氣系統中的直接接觸凝結、誘發水錘或加壓熱衝擊在不同應用中，是許多嚴重事故的重要原因，El-Said[4] 對分層液-氣系統中直接接觸凝結誘導的加壓熱衝擊，進行了全面的探討，通過分析和實驗來預測，並對未來研究方向提供建議。

工業加工製造過程中，常對高溫水蒸汽有很大需求，Zhao[5] 開發數學模型來評估三種不同的熱泵和蒸汽壓縮相結合的蒸汽生產系統性能，同時進行技術經濟分析，結果顯示兩級蒸汽壓縮系統具有較高的性能係數，但建設成本也大得多，最佳的中間階段溫度受

操作條件的影響。Yu[6]提出結構簡單的新型閉環準兩級強化蒸汽噴射熱泵乾燥系統，分析熱泵製冷劑和空氣循環側參數特性，結果顯示隨著乾燥送風溫度升高，乾燥速率明顯提高，系統的平均性能係數、平均比吸濕率和復水率先增加後減少，熱泵乾燥系統在品質上也有明顯提升。而呂英誌[7]則研究發展一套利用廢熱或太陽能為能源的噴射式蒸餾系統，藉由噴射器的抽吸功能進行蒸餾。其研究採用四種位置以實驗尋找不同擴散段直徑下的最高抽吸比，用以決定最佳的蒸餾系統噴嘴安裝位置。數據顯示擴散段直徑增加時，噴嘴出口應離擴散段入口位置越遠。

曾建翔[8]利用 CFD 數值模擬分析軟體設計多組進氣口的仿龍捲風式旋轉器場之真空產生器，針對不同的幾何形狀進行模擬分析，找出影響較深之關鍵因子後並以田口法找出其最佳化設計並以實作量測，研究結果顯示其最佳化實體量測結果效能最佳且耗氣量低。在水蒸汽噴射式蒸餾系統中，賴威廷[9]研究工作流體過熱度對於蒸汽噴射器性能之影響。其研究採用單一管徑之噴嘴以及七個對應擴散段並以實驗實作驗證，發現了當主流體過熱度越高其抽吸比(ω)越低，副流體過熱度對於抽吸比影響則相反。王博立[10]研究適合 R-404A 冷媒的冷凍系統噴射器裝置，希望提升冷凍系統的效率。其研究採用 ANSYS Fluent 軟體來預測使用 R-404A 冷媒的噴射器夾帶比以及壓力恢復比。其研究結果顯示在相同條件下，噴射器的夾帶比會隨噴射器的喉部直徑上升而下降，而壓力恢復比隨噴射器喉部直徑上升而上升。而賴育呈[11]將噴射器尺寸放大設計後，採用 R245fa 新型環保冷媒，配合已開發噴射製冷系統進行製造與實測，並建立針對不同冷媒之設計經驗方程式。其結果顯示運用經驗式設計所得之噴射器之不準確性可控制在 $\pm 15\%$ 內。王正彥[12]利用於電熱系統代替太陽能作為驅動噴射器之熱能，並採用雙吸入口設計提高噴射器抽吸比，並配合蒸發器與冷凝器以低壓閃蒸方式製造蒸餾水，並證實了採用噴射器進行水蒸餾之可行性。

對於蒸汽噴射器探討中，尚未見以田口法結合反應曲面來處理蒸汽噴射器設計的最佳化問題，本研究將以蒸汽噴射器設計參數噴嘴喉部直徑、噴嘴出口距離、吸入室角度、混合室直徑等四種參數，運用反應曲面法求出抽吸流量及熱影響溫差最佳化的預測方程式，及最佳化設計參數水準組合，以了解蒸汽噴射器設計對於抽吸流量及溫差之影響，以快速設計優良的蒸汽噴射器。

2. 實驗步驟

進行蒸汽噴射器參數優化設計實驗前，先針對可能影響抽吸速度等設計參數提出實驗計畫法，並依據實驗計畫規畫進行實驗。首先針對噴射器之噴嘴喉部直徑、噴嘴出口距離、吸入室角度、混合室直徑等四個設定參數進行設定，經過不同組合的實際測試量測

其抽吸流量與熱影響溫差後，透過田口法與反應曲面法分析獲得蒸汽噴射器最佳設定參數，並比較其設定參數之相關影響。

本實驗應用田口實驗法期望以較少的實驗獲得可靠的因子效果估計量。實驗將以 L9 直交表為例，首先決定各個參數的水準，本研究的實驗控制參數共有四種分別為噴嘴喉部直徑、噴嘴出口距離、吸入室角度、混合室直徑分別以 A、B、C、D 為其代號，如表 1 所示，將水準配置於 $L_9(3^4)$ 直交表中，根據實驗結果找出抽吸流量以及熱影響溫差之最佳組合與預測多項式方程式。實驗開始時先將一次側蒸汽管路冷凝水以及二次側管路排乾後，將 35L 定量容器底部閥門關閉並注滿水。確定滿水後首先將磅秤歸零、開啟容器底部閥門、開啟蒸汽閥門值至磅秤顯示數值為 35L 為止。實驗過程需要量測四組參數分別為抽吸時間(t)、被動流體初始溫度(T_1)以及混合完畢之流體溫度(T_2)。測量蒸汽噴射器性能優化實驗之實驗設備，需減壓閥、定量容器、噴射器、磅秤系統等。蒸汽鍋爐為利用燃料燃燒將水升溫直至產生蒸汽之設備，減壓閥之設置目的為調整蒸汽壓力其壓力數值由減壓後之壓力表顯示讀值，如圖 1 所示。

表 1 田口實驗計畫法 $L_9(3^4)$ 直交表

實驗編號	A 噴嘴喉部直徑	B 噴嘴出口距離	C 吸入室角度	D 混合室直徑
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

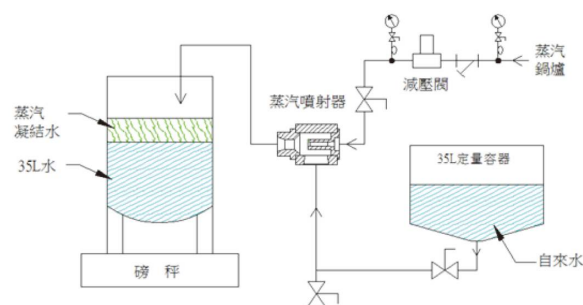


圖 1 實驗設備示意圖

噴射器採用高壓蒸汽作為其主動流體，其入口處與蒸汽減壓閥銜接。實驗中為了取得之方便性將採用自來水為被動流體，這些水將被放置在一定容量之容



器中。噴射器之出口將連接到一組較大容量之桶槽，桶槽底部設置有一組磅秤用於量測混合完畢之流體重量。實驗所採用之志豪工業生產之蒸汽鍋爐，蒸汽鍋爐產出之蒸汽壓力介於 6~8kgf/cm² 之間，必須另外設置蒸汽減壓閥將壓力調整至適合蒸汽噴射器之操作壓力。

實驗所採用之蒸汽減壓閥為 MIYAWAKI INC 所生產之產品，在實驗中將主動流體蒸汽壓力設定在 2.0kgf/cm²，其蒸汽溫度為 133.25⁰C。實驗所採用之蒸汽減壓閥為自行設計之定量容器，其材質採用不鏽鋼製造。容器底部安裝一只 1-1/2”之球塞閥用以隔絕容器與噴設器之間之管路可有效避免管路過長引起之量測誤差。本實驗模組所採用之蒸汽噴射器依據表 2、表 3 中規劃之 9 種實驗模型製造，蒸汽噴射器由主動噴嘴、混合室及擴散段組裝而成，而表 2 之參數水準值是依據以往經驗與相關文件歸納所選用。圖 2 為實驗用蒸汽噴射器結構示意圖，其中包含 4 個控制因子之位置。蒸汽噴射器考慮其高溫及衛生問題，其材質選用 304 不鏽鋼經由傳統車床車削製作而成。圖 3 及圖 4 分別為實驗之噴嘴及擴散段

硬體設計參數皆選用 3 個水準配置於 L₉(3⁴) 直交表中。依據表 3 之田口實驗方法 L₉(3⁴) 直交表之水準值進行蒸汽噴射器抽吸流量及熱影響溫差實驗量測，並將 3 次實驗平均數據換算出 S/N 信號雜訊比。田口實驗方法可依據品質特性，來採用信號雜訊比為望目值、望大、望小，本研究之品質特性為抽吸流量(V) 選擇望大值來計算 S/N 比，而熱影響溫差(ΔT)則選擇望小值來計算 S/N 比，圖 5 與 6 為其信號雜訊比 S/N 圖。

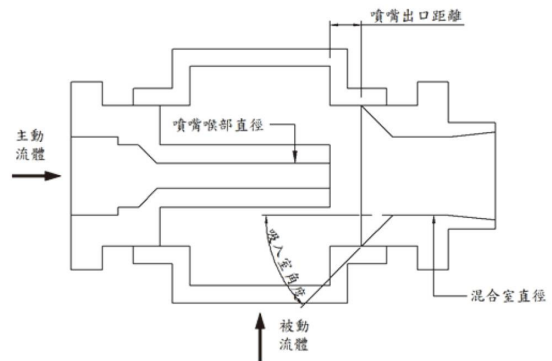


圖 2 蒸汽噴射器結構示意圖

表 2 田口實驗方法實驗參數水準表

被動流體側管台規格		1-1/2”PT 管牙		
主動流體蒸汽壓力 (kgf/cm ²)		2.0		
代號	實驗參數	1	2	3
A	噴嘴喉部直徑 (mm)	8	10	12
B	噴嘴出口距離(mm)	40	25	10
C	吸入室角度(degree °)	15	30	45
D	混合室直徑(mm)	15	20	25



圖 3 蒸汽噴射器之主動噴嘴圖

表 3 田口實驗方法 L₉(3⁴) 直交表

實驗編號	A 喉部直徑	B 噴嘴出口距離	C 吸入室角度	D 混合室直徑
1	8	40	15	15
2	8	25	30	20
3	8	10	45	25
4	10	40	30	25
5	10	25	45	15
6	10	10	15	20
7	12	40	45	20
8	12	25	15	25
9	12	10	30	15



圖 4 蒸汽噴射器之擴散段圖

3. 結果與分析

本研究先採用 L₉(3⁴) 直交表，決定各個參數的水準，經評估之後，實驗參數分別選擇喉部直徑、噴嘴出口距離、吸入室角度、混合室直徑，參數代號依序為 A、B、C、D 如表 2 所示，固定的參數有 2 個，被動流體側管台規格、主動流體蒸汽壓力。如表 3 所示，每一

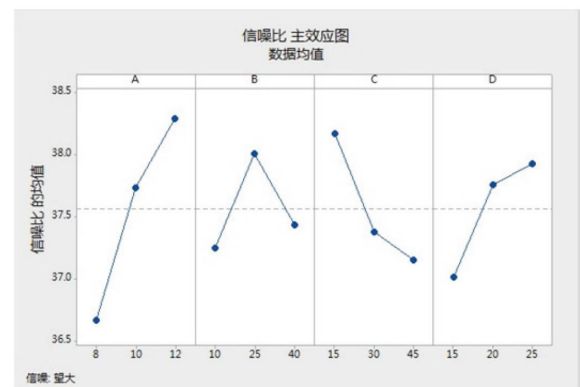


圖 5 抽吸流量信號雜訊比

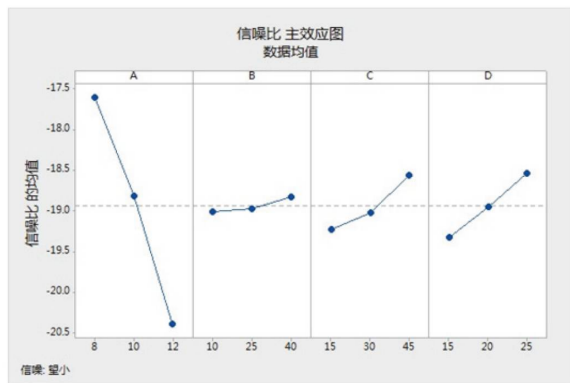


圖 6 熱影響溫差信號雜訊比

由所得的抽吸流量信號雜訊比，再進一步進行田口變異數分析可得到表 4 與表 5，從兩個表格中均可得出抽吸流量之最佳設計參數組合及其因子重要性。從表 4 可得知抽吸流量之最佳設計參數組合為 A₃B₂C₁D₃，而影響抽吸流量之因子重要性依序為 A(噴嘴喉部直徑)、C(吸入室角度)、D(混合室直徑)、B(噴嘴出口距離)。由表 5 中可以充分了解各個設計參數因子對於蒸汽噴射器抽吸流量之貢獻度百分比，可用此參數作為優先改善設計條件之參考。

表 4 抽吸流量之信號雜訊比響應表

訊號雜訊比 (dB)				
	A	B	C	D
水準 1	36.67	37.25	38.16	37.02
水準 2	37.73	38.01	37.38	37.75
水準 3	38.28	37.44	37.15	37.92
Effect	1.61	0.76	1.01	0.90
排序	1	4	2	3

表 5 抽吸流量之田口變異數分析

因子	自由 度	總平 方和	方差	貢獻度	排序
A	2	317.4	158.7	46.98%	1
B	2	83.6	41.8	12.38%	4
C	2	152.4	76.2	22.55%	2
D	2	122.3	61.15	18.09%	3
總和	8	675.7		100%	

以 Minitab 統計分析軟體來進行分析，可求得預測抽吸流量方程式如下：

$$\begin{aligned} \text{抽吸流量方程式} = & -42.03 + 11.83A + 1.458B - 1.109C \\ & + 3.933D - 0.4111A^2 - 0.02820B^2 \\ & + 0.01321C^2 - 0.07644D^2 \end{aligned}$$

將方程式進行優化處理，可得到最佳化設計參數為噴嘴喉部直徑 12mm、噴嘴出口距離 25.75mm、吸入室角度 15°、混合室直徑 25mm，將最佳化之參數水準值

代入抽吸流量方程式可得最佳抽吸流量數值為 96.45 (L/min)。

從表 6 可得知熱影響溫差之最佳設計參數組合為 A₁B₃C₃D₃，而影響熱影響溫差之因子重要性依序為 A(噴嘴喉部直徑)、D(混合室直徑)、C(吸入室角度)、B(噴嘴出口距離)。由表 7 中可以充分了解各個設計參數因子對於蒸汽噴射器熱影響溫差之貢獻度百分比，可作為優先改善設計條件之參考。

表 6 熱影響溫差之信號雜訊比響應表

信號雜訊比 (dB)				
	A	B	C	D
水準 1	17.6	19.01	19.23	19.32
水準 2	18.81	18.97	19.02	18.94
水準 3	20.39	18.82	18.56	18.54
Effect	2.79	0.19	0.66	0.79
排序	1	4	3	2

表 7 熱影響溫差之田口變異數分析

因子	自由 度	總平 方和	方差	貢獻度	排 序
A	2	12.52	6.26	87.98%	1
B	2	0.14	0.07	0.99%	4
C	2	0.66	0.33	4.64%	3
D	2	0.91	0.455	6.39%	2
總和	8	14.23		100%	

從表中得知貢獻度最高的兩個參數為 A(噴嘴喉部直徑)及 D(混合室直徑)，當 A(噴嘴喉部直徑)越小以及 D(混合室直徑)越大時，其熱影響溫差越小。再次將實驗數據以 Minitab 統計分析軟體來進行反應曲面分析得出回歸方程式：

$$\text{熱影響溫差方程式} = 11.84 - 0.8389A - 0.005432B$$

$$\begin{aligned} & + 0.02481C - 0.1489D + 0.07778A^2 - \\ & 0.000099B^2 - 0.000765C^2 + 0.00177 \\ & 8D^2 \end{aligned}$$

將方程式進行優化處理，可得到最佳化設計參數為噴嘴喉部直徑 8mm、噴嘴出口距離 40mm、吸入室角度 45°、混合室直徑 25mm，將最佳化之參數水準值代入抽吸流量方程式可得最佳熱影響溫差數值 6.69°C。表 8 中將反應曲面法之品質特性以個別優化及統一優化方式呈現，其誤差採用誤差百分比計算。其數據顯示在採用各別優化時其數據相當接近於其預測值，顯示採用田口法結合反應曲面法用以預測其流量數據上最大誤差值不超過 3%，而用於預測溫差之誤差百分比雖然較高但是實際溫差與預測值不超過 1°C 屬於可接受範圍。個別優化是依據其最佳參數所得到最大抽吸流量與最小溫差，但兩者的最佳參數不同，是以再統一優化抽吸流量與溫差，可得其一組最佳參數水準值，導致抽吸流量略降，溫差略升，是以統一優化後之量測數據相較於個別優化在流量及溫差性能上均略遜一



籌，但是整體性能則比各別優化更為優異。

表 8 雙品質特性最佳化

反應 曲面 法	最佳參數			
	喉部 直徑 (mm)	出口 距離 (mm)	吸室 角度 (°)	混室 直徑 (mm)
各別 優化	12	25.75	15	25
統一 優化	9.17	27.27	15	25

反應 曲面 法	品質特性	優化品質性		誤差 (%)
		預測	量測	
各別 優化	抽吸流量 (L/min)	96.45	94.0	2.6
	溫差 (°C)	6.69	7.36	9.1
統一 優化	抽吸流量 (L/min)	87.56	85.6	2.2
	溫差 (°C)	8.05	8.7	7.4

4. 結論

針對蒸汽噴射器之最佳化設計參數，以田口法及反應曲面法進行實驗驗證可歸納出下列結論：

1. 根據反應曲面法可得到預測抽吸流量方程式，抽吸流量最佳化因子參數為噴嘴喉部直徑 12mm、噴嘴出口距離 25.75mm、吸入室角度 15°、混合室直徑 25mm。
2. 根據反應曲面法可得到熱影響溫差方程式，熱影響溫差最佳化因子參數為噴嘴喉部直徑 8mm、噴嘴出口距離 40mm、吸入室角度 45°、混合室直徑 25mm。噴嘴喉部直徑及吸入室角度為影響抽吸流量之重要參數，而噴嘴喉部直徑及混合室直徑為影響熱影響溫差之重要參數。
3. 利用田口方法及反應曲面法就單一品質特性可以找出特定特性之極大或極小值，而採用多品質特性之反應曲面法則可以兼顧多種因子下找出最佳的參數。

參考文獻

1. S. Kim and S. Kwon "Experimental Determination of Geometric Parameters for an Annular Injection Type Supersonic Ejector" *Journal of Fluids Engineering* 128, (2006) 1164-71.
2. T. Sriveerakul, S. Aphornratana and K. Chunnanond "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results" *International*

- Journal of Thermal Sciences 46, (2007) 812-22.
3. B. Hu, H. Liu, J. Jiang, Z. Zhang, H. Li, R. Z. Wang "Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: Onsite application research" *Energy Part B* 238, (2022) 121699-712.
4. E. M. S. El-Said, M. M. Awad, M. Abdulaziz "A comprehensive review on pressurized thermal shock: predictive, preventive and safety issues" *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 146, (2021), 525-544.
5. Z. Zhao, H. Yuan, S. Gao, Y. Tian "Comparative study on performance and applicability of high temperature water steam producing systems with waste heat recovery" *Case Studies in Thermal Engineering* 28, (2021) 101622-31.
6. X. Yu, W. Wu, J. Wang, Y. Jin, Z. Li „Experimental study on effect of drying air supply temperature on performance of a quasi-two-stage closed loop heat pump drying system for lentinus edodes" *Renewable Energy* 201, (2022) 1038-49.
7. 呂英誌，噴射式蒸餾系統噴嘴最佳位置研究，碩士論文，國立勤益科技大學，(2013)。
8. 曾建翔，多進氣口仿龍捲風狀真空產生器之 CFD 模擬設計及實體測試，碩士論文，國立雲林科技大學，(2014)。
9. 賴威廷，工作流體過熱度對水蒸汽噴射器性能影響之研究，碩士論文，國立勤益科技大學，(2015)。
10. 王博立，應用於 R-404A 冷媒冷凍系統之噴射器性能研究，碩士論文，國立台北科技大學，(2019)。
11. 賴育呈，熱製冷噴射器之最佳化研究，碩士論文，國立勤益科技大學，(2009)。
12. 王正彥，太陽能噴射式蒸餾器系統設計與分析，碩士論文，國立勤益科技大學，(2010)。

Optimum design of steam injector

S.F. Liu¹, W.H. Kung², W.H. Lo², C.S. Chen²

¹Department of Mechanical Engineering,
Lee-Ming Institute of Technology

²Department of Mechanical Engineering,
Lunghwa University of Science and
Technology

Abstract

The sanitary pumps have been widely used in the food industry. If the steam ejector with low steam consumption and high delivery volume can be developed to transfer products, it will effectively save cleaning time and reduce cost of construction and maintenance. The response surface method can use a single quality characteristic to obtain the optimal value of characteristic. It is also possible to find the best combination of parameters taking into account multiple quality characteristics. If engineers use the Taguchi method combined with the response surface method, they can quickly design a steam injector with excellent performance. In this paper, the Taguchi method combined with the response surface method is applied to the design of the steam ejector, and the optimization of suction flow rate and heat effect is complied. The nozzle throat diameter, nozzle outlet position, suction chamber angle and mixing chamber diameter four parameters F\to find the predictive equation for suction flow rate and temperature difference. It shows that the most important parameter to influence the ejector suction flow rate and heat effect per unit time is the nozzle throat diameter.

Keywords: Taguchi's method, response surface method,
steam injector

