

噴射式混合器 CFD 模擬與數值最佳化設計

陳申岳^{1*}，管衍德²，李世鳴³，張靜怡⁴，林進聰⁵，李天三⁵

¹ 崑崙科技有限公司

² 國立勤益科技大學冷凍空調與能源系

³ 淡江大學航太工程系

⁴ 國立勤益科技大學機械系

⁵ 工業技術研究院材料與化工所

摘要

本文延續原專案之噴射混合器計算流體力學(Computational Fluid Dynamic, CFD)模擬分析技術成果，與泛用型最佳化設計商業軟體 SmartDO 結合，進行噴射式混合器性能之最佳化設計。在前期研究中，於 CFD 商業軟體 Fluent 中建立噴射混合器幾何形狀之參數模型，並進行分析與參數研究，以確保參數模型之運作順暢，以及其數值分析之穩定性。本研究則以前期研究之結果為基礎，將泛用型數值最佳化設計軟體與 Fluent 之參數模型結合進行最佳化設計。由於 CFD 數值分析之離散特性所產生的數值雜訊，故必須藉由 SmartDO 中的特殊運算法方可順利達到顯著的最佳化效果。研究過程並使用傳統之微分法進行最佳化設計，將其結果與 SmartDO 之運算結果比較。結果顯示，SmartDO 的運算法可以成功跳脫局部最佳值(Local Optimum)，其優化效能為傳統方法之 4.6 倍。

關鍵字：噴射式混合器、最佳化設計，SmartDO，Fluent、CFD，

Numerical Design Optimization of the Ejector Mixer with CFD Simulation

Shen-Yeh Chen^{1*}，Yean-Der Kuan²，Shi-Min Lee³，Jing-Yi Chang²，Jin-Tsong Lin⁵，Tian-San Lee⁵

¹FEA-Opt Technology

²Department of Refrigerating, Air Conditioning and Energy Engineering, National Chin-Yi University of Technology

³Department of Aerospace Engineering, Tamkang University

⁴Department of Mechanical Engineering, Air Conditioning and Energy Engineering, National Chin-Yi University of Technology

⁵ Material and Chemical Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

Abstract

This paper continues from the research from the previous stage, which performs CFD simulation for the ejector mixer. The results are then coupled with the general purpose numerical design optimization commercial package SmartDO to optimize the performance of the ejector mixer. In the previous stage, the geometric parametric model was built inside the commercial CFD software Fluent, and the parametric

study was performed to ensure the reliability of the parametric model and the stability of the numerical simulation. Due to the numerical noise caused by the discretization characteristics of CFD, a special algorithm in SmartDO must be used to achieve significant optimum result. During the research, the traditional gradient-based optimization approach was also used, and the result was compared the one done by SmartDO. The result shows that, the algorithm in SmartDO can escape from the local minimum and the improvement is 4.6 times over the traditional approach.

Keywords : Ejector Mixer, Design Optimization, SmartDO, Fluent, CFD

一、前言

蒸氣噴射器是一種利用高壓流體抽吸低壓流體的裝置。它具有結構簡單，沒有轉動物件、運轉費用低廉、操作維修方便等優點，並且對被抽介質無嚴格要求，對於有毒性、易燃易爆、腐蝕性強乃至可凝性氣體等幾乎都適用，加上抽吸量較大，工作壓力範圍廣，因此在國內外的能源動力、石油化工、建築、制冷、工業熱工等領域均得到了廣泛的應用。蒸氣噴射器雖然結構簡單，但其設備內部氣體的超音速混和過程非常複雜，存在著震波、邊界層、剪切層的交互作用，混合機制尚不清楚。現有的設計理論大多採用半經驗半理論的方法，誤差較大。在工程應用中，蒸氣噴射器仍存在著運行不穩定，動態調節性能差、設計性能與實際性能不一致等問題[1]。

噴射混合器研究中，許多學者[2-4]使用數值分析方法，對實驗量測結果進行比較分析，且提出噴射混合器內部物理現象探討。在上一階段之研究中，成功地在 Fluent[5]中建立 CFD 模擬噴射真空系統之參數模型，並完成其穩地性之測試[6]。在此研究中，將延續上一階段之成果，並與泛用型最佳化設計商業軟體 SmartDO 結合進行最佳化設計。

目前現有的研究文獻中，將 CFD 與數值最佳化技術結合進行設計者，並不多見。除了因 CFD 參數模型之穩定度不易達到，一般 CFD 或有限元素法 (Finite Element Analysis) 因將區間離散化，參數變動將產生無法控制之數值雜訊[7]。

為了處理上述之數值雜訊，研究人員提出許多不同的方法。第一種方法為使用所謂的「網格式變形」

方法，以保持網格式的一致性 [8-10]。

除此之外，亦有研究人員致力於最佳化求解器的改善。許多文獻已有運用如基因法等亂數法 (Stochastic Approach) 求得穩定可靠之結果 [11-13]，亦有文獻發表使用較接近微分法的方法處理雜訊問題[13-14]。

本研究使用 SmartDO[15,16]中之「反應平順法」(Response Smoothing Technology, RST)處理雜訊問題。過程亦使用傳統之微分法進行最佳化設計。其結果將於此論文討論。

二、研究方法與流程

2.1 CFD 參數模型建立

本研究探討之單級蒸氣噴射器噴射式混合器之構造如圖 1 及圖 2 所示。蒸氣噴射器主要是由蒸氣噴嘴 (Steam Nozzle)、吸入室 (Suction Chamber) 和擴散管 (Diffuser) 等三個部份組成，其中擴散管又可分為混合段 (Mixing Section)、第二喉管段 (Throat Section) 及擴散段 (Diffuser Section) 等三個部份。壓力較高的工作流體 (Primary Fluid, Motive Fluid) 通過噴嘴將壓力能轉換為動能，形成超音速噴流，副流體 (Secondary Fluid, Entrained Fluid) 由於與工作流體間極強的剪切作用而被抽吸至吸入室。噴流邊界層的紊流擴散作用使得兩種流體發生質量、動量及能量交換，於是工作流體的速度不斷減少，而被抽介質的速度不斷增大，並在混合段某一截面處漸趨一致，從而形成一股單一均勻的混合流體 (Compressed Fluid, Mixed Fluid)。在擴散段中的動能轉化成壓能，混

合流體減速增壓至一定的背壓後排出噴射泵。在噴射泵中，流體可能由於要適應高背壓的要求而產生正震波，視波降面可能位於第二個喉管及擴散段中的任一截面。

噴射混合器的工作特性參數主要有如圖中的三個區域壓力 P_p , P_s , P_d 與抽吸比 ω ，抽吸比的定義為副流體質量 F_p 流率與主流體質量流率 F_s 的比值[1]：

$$\omega = F_s / F_p \quad (1)$$

設計噴射混合器，噴射混合器的主要性能指標，如在特定副流體下其噴射係數要達到最大、在特定副流介質流量下副流真空度要達到最小、在特定操作壓力或工作負荷下所能達到的壓縮比須最大。

為了縮短 CFD 分析之計算時間，以配合優化設計的密集疊代，將模型簡化為如圖 3 之平面軸對稱幾何。其中 P-in1 為主流入口，P-in2 無副流入口，P-out 則為混合流之出口。其中 P-in1 之溫度為已知。P-in1 及 P-in2 之壓力為已知。圖 4 則為模型之幾何參數，包括 D2, D4, D5, D6, D10, D11, D12 L4, L9, (L10-L9), (L11-L10), (L5-L11) 及 (L6-L5)。

進行噴射混合器數值分析時，首先將以 Gambit 定義噴射器的點座標位置，將點座標位置計算出並繪製於圖面上，如圖 3 所示，在將點座標以線做連接的動作，因此就蒸氣噴射器的輪廓繪製出來，當幾何形狀建立完成後，進行網格設定的動作，此模型是屬於 2D 的模型，故所使用的網格為 Quad，其中網格種類是 Submap (Interval Size Spacing=2)。在設定網格完成後，需定義模型的邊界條件，此模型是 2D 軸對稱的模型，定義蒸氣噴射器工作流體其邊界為 Pressure-inlet1，副流體邊界為 Pressure-inlet2，排出口邊界為 Pressure-outlet，並在圖形上設定對稱軸 Axis，其餘邊界設為 Wall，示意圖如圖 3，定義完邊界條件，即存檔，至 Fluent 開啟。在 Fluent 中，設定所有需要的設定元件參數，當選擇單向理想氣體模式 (Ideal Gas Law) 時，流體為乙二醇 $C_2H_6O_2$ 性質如表 1。假設為可壓縮的理想氣體；當選擇二相化學物質傳遞模式 (Species Transport Model)，流體為乙二醇 $C_2H_6O_2$ 與氮氣 N_2 性質如表 2，邊界設定多加了 Species，主流體設乙二醇為 1，副流體設氮氣為 1，混合器出口為任意設值。數值模型中物理模式包含有穩

態、軸對稱、能量(Energy)項、k- ϵ standard 紊流模式等。圖 5 至圖 7 為某一幾何型狀下，CFD 分析所得之結果。

2.2 最佳化設計數學模式

一般而言，以非線性規劃法為主要基礎之最佳化設計，其標準數學模式為

$$\begin{aligned} &\text{find} \quad \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_{NDV}\} \\ &\text{to minimize} \quad f(\mathbf{x}) \\ &\text{subjected to} \quad G_i(\mathbf{x}) = \frac{g_i(\mathbf{x})}{g_i^0} - 1 \leq 0 \quad i = 1, \dots, NINEQC \\ &\quad \quad \quad x_k^L \leq x_k \leq x_k^U \quad k = 1, \dots, NDV \end{aligned} \quad (2)$$

傳統之非線性規劃法，假設函數之行為平滑且具規律性(well-behaved)。但在許多離散式之數值方法，如 Finite Element 或 Finite Volume 中，函數反應具有類似圖 8 之雜訊。此現象在許多文獻中被證實[7]。為處理此問題，使用在商業軟體 SmartDO[16] 中之之反應平順法 (Response Smoothing Technology)，將數學模式修正為

$$\begin{aligned} &\text{find} \quad \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_{NDV}\} \\ &\text{to minimize} \quad w \cdot f(\mathbf{x}) + \Phi \\ &\text{subjected to} \quad G_i^*(\mathbf{x}) = \frac{g_i(\mathbf{x})}{g_i^0} - 1 - \phi_i \leq 0 \\ &\quad \quad \quad i = 1, \dots, NINEQC \\ &\quad \quad \quad x_k^L \leq x_k \leq x_k^U \quad k = 1, \dots, NDV \end{aligned} \quad (3)$$

其中 w , Φ 及 ϕ_i 乃考慮最佳化計算過程的函數反應，隨著計算過程自動調整。這些係數的作用是當疊代過程陷入因數值雜訊所產生的局部最佳值(Local Optimum)時，可設法使設計跳脫而尋找下一個最佳值，如圖 9 所示。

2.3 最佳化設計分析模型

本研究之最佳化目標函數，為將壓縮比最大化，亦即將下列之算式值最大化

$$C_r = \frac{\text{Pressure of P-out}}{\text{Pressure of P-in2}} \quad (4)$$

束制函數則多半為幾何大小之限制。設計變數包括 D2, D4, D5, D6, D10, D11, D12, L4, L5, L6, L9, L10, L11 等 13 個變數。執行過程以 SmartDO 與在 Fluent 中建立之參數模型結合，並將上述之算式與參數定義於 SmartDO 中。在執行過程，SmartDO 會自動修改 Fluent 中之設計參數，並讀取由 Fluent 計算所得之反應，如此反覆疊代，直到達到最佳化設計之容許殘值(Tolerance)。數值計算常有系統或參數模型不穩定之情況，但

SmartDO 可在模型發散或當機時，由最接近的設計點再重啟計算(Restart)。SmartDO 之運作基本架構如圖 10 所示。

2.4 結果與討論

最佳化設計過程中，除了前述之反應平順法(Response Smoothing Technology, RST)之外，並用傳統之 Method Of Feasible Directions, MFD) [17] 計算比較其結果。計算結果列於表 3。由表中可知，使用 RST 方法運算時，壓縮比從原設計之 2.04 提升至 9.94，提升比例達約 4.9 倍。而使用傳統之 MFD 方法時，壓縮比僅從原設計之 2.04 提升至 2.15，提升比例約 1.05。次結果顯示 RST 方法之效能約為傳統 MFD 方法之 4.6 倍之多。

表 4 則列出原設計，RST 方法及 MFD 方法之幾何設計參數。由表中可看出，RST 法可得到較明顯的幾何參數改變，而 MFD 方法之改變則有限。由此可知 RST 方法成功克服數值雜訊，並跳脫局部最佳值。

三、結論

本研究成功地將泛用型設計最佳化商業軟體 SmartDO 與 CFD 商業軟體結合，對噴射式混合器進行最佳化設計，並採用 SmartDO 中之反應平順法(Response Smoothing Technology, RST)克服數值分析中常見之數值雜訊問題。結果證明此法可顯著提升噴射式混合器之效能。且與傳統方法比較，新的方發除了可跳脫局部最佳值，其最佳化效能亦高出傳統方法許多。證明本研究之方法為實用且可行之，並可進一步應用於 CFD 最佳化設計或其它類似之問題。

誌謝

本研究歷時兩年，由崑崙科技主導規劃架構並支援人力，經費由工業技術研究院材料與化工所贊助。CFD 分析則由勤益科技大學研究人員協助完成，作者在此對所有參與人員深感謝意。

參考文獻

[1] 徐海濤, 桑芝富, “蒸汽噴射壓縮器的操作狀態,” 南京理工大學學報, Vol. 25, No.4, 2003, pp55-59.

- [2] Bartosiewicz, Y. et al., “Numerical and Experimental Investigations on Supersonic Ejectors,” International J. of Heat and Mass Transfer, Vol.26, pp.56-70, 2005.
- [3] Bartosiewicz, Y. et al., “Numerical Assessment of Ejector Operation for Refrigeration Applications Based on CFD,” Applied Thermal Engineering, Vol.26, pp.604-612, 2006.
- [4] Konstantinos, G. et al., “Simulation of Distribution of Discrete Inert Particles in Two Phase Supersonic Mixing,” Journal of Food Engineering, Vol.42, pp.59-66, 1999.
- [5] Fluent 6.2 User's Guide, 2004.
- [6] 管衍德, 李世鳴, 張靜怡, 林進聰, 李天三, 陳申岳, “噴射混合器 CFD 模擬研究”, 第十四屆全國計算流體力學學術研討會, 2007.
- [7] Hiroshi Hamasaki H. et al, “Stochastic Optimization Of Tension Leveling Process For Production Of Flat Metallic Strips”, WCSMO7, May 2007, South Korea
- [8] Belegundu, A.D. et al, “A Shape Optimization Approach Based On Natural Design Variables And Shape Functions, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol.66, pp.87-106, 1988.
- [9] Rajan, S.D. et al., “Toward a Practical Design Optimization Tool”, Microcomputer in Civil Engineering, Vol.11, pp259-274, 1996.
- [10] Chen, S-Y. et al., "Improving the Reliability and Usability of Structural Shaping Optimization -The Contour Natural Shape Function", Journal of Chinese Institute of Engineers, Vol. 30., 2007.
- [11] Rajan, S.D., “Sizing, Shaping and Topology Design Optimization of Trusses Using Genetic Algorithm”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.121., pp.1480-1487, 1995.
- [12] Chen, S-Y. et al., “A Robust Genetic Algorithm For Structural Optimization”, Structural Engineering and Mechanics Journal, Vol.10, pp.313-336, 2000.
- [13] Chen, S-Y., “An Approach For Impact Structure Optimization Using The Robust Genetic Algorithm”, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 37, pp.431-446,

2001.

- [14] Snyman, J.A., "A Gradient-Only Line Search Method for the Conjugate Gradient Method Applied to Constrained Optimization Problems with Severe Noise in the Objective Function", International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol.62, pp.72-82 2005.
- [15] Chen, S-Y., Gradient-Based Structural and CFD Global Shape Optimization with SmartDO and the Response Smoothing Technology", Proceedings of the 7th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO7), 2007.
- [16] SmartDO 3.0 User's Manual, 2010.
- [17] Vanderplaats G.N., "Structural Optimization by Methods of Feasible Directions", Journal of Computers & Structures, Vol.3, pp. 739-755, 1973.

表 1 C₂H₆O₂ 材料性質表

Cp			thermal conductivity		
point	temperature(k)	value(j/kg-k)	point	temperature(k)	value(w/m-k)
1	293.15	1239.83	1	293.15	0.0112266
2	333.15	1345.21	2	333.15	0.015011
3	373.15	1453.24	3	373.15	0.018095
4	413.15	1558.68	4	413.15	0.0201612
5	453.15	1659.03	5	453.15	0.0236865
6	493.15	1753.45	6	493.15	0.0274798

viscosity		
point	temperature(k)	value(kg/m-s)
1	293.15	8.197E-06
2	333.15	9.331E-06
3	373.15	1.045E-05
4	413.15	1.156E-05
5	453.15	1.265E-05
6	493.15	1.368E-05

表 2 N₂ 材料性質表

density(kg/m ³)	ideal-gas				
cp(J/kg-k)	piecewise-polynomial				
	range1	min:300	max:1000		
		979.043	0.4179639	-0.001176279	1.674394E-06
	range2	min:1000	max:5000		
		868.6229	0.4416295	-0.000168723	2.996788E-08
	polynomial	0.004737109	7.271938E-05	-1.122018E-08	1.454901E-12
	thermal(w/m-k)				
	polynomial	7.473306E-06	4.083689E-08	-8.244628E-12	1.305629E-15
	viscosity(kg/m-s)				
	polynomial				
	molecular weight	28.0134			

表 3 最佳化設計之 CFD 模擬性能結果比較

model	P-in1	P-in2	P-out	Cr
Original	957.68	1.96	4.00	2.04
RST	957.55	0.40	4.00	9.94
MFD	957.40	1.86	4.00	2.15

表 4 最佳化設計之幾何參數結果比較

	Original	RST	MFD
D2	5.30	5.06	5.41
D4	50.30	52.35	49.94
D5	80.30	94.81	80.81
D6	201.47	202.02	201.47
D10	160.30	158.98	161.11
D11	135.30	131.35	135.02
D12	80.30	101.07	80.36
L4	280.96	312.80	281.05
L5	1385.92	1365.65	1386.13
L6	2195.92	2173.20	2196.25
L9	520.96	520.37	520.92
L10	640.96	640.77	641.28
L11	1225.92	1209.19	1226.23

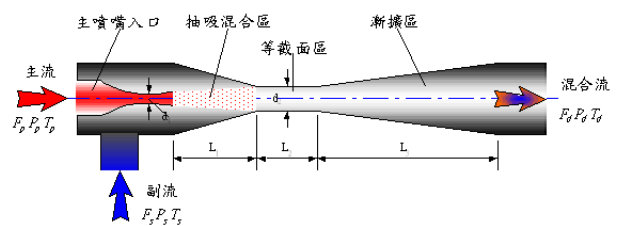


圖 1 噴射式混合器之構造示意圖

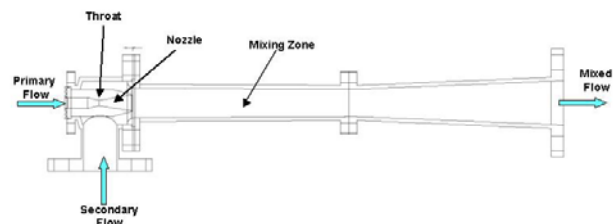


圖 2 噴射式混合器之二維設計圖

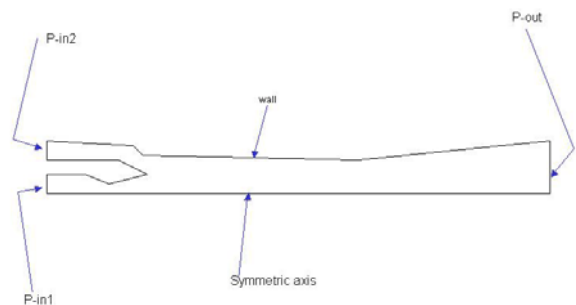


圖 3 簡化後之軸對稱 CFD 模型示意

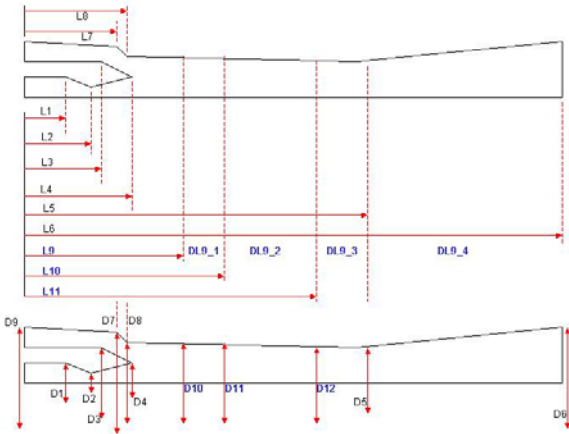


圖 4 噴射式混合器之幾何設計參數

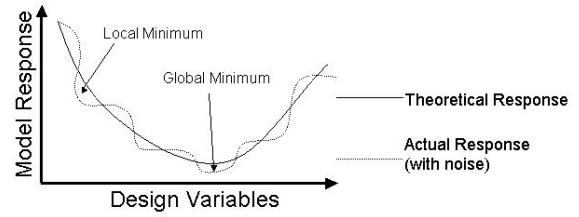


圖 8 具數值雜訊特性之反應曲線

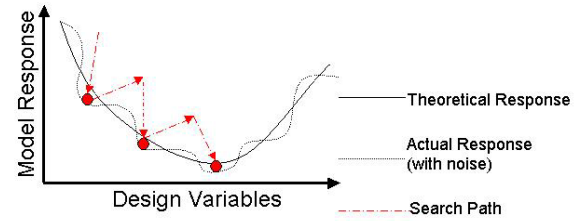


圖 9 反應平順法之作用示意圖

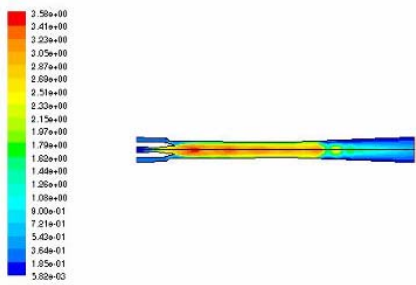


圖 5 Mach Number 的分佈(Contour)圖

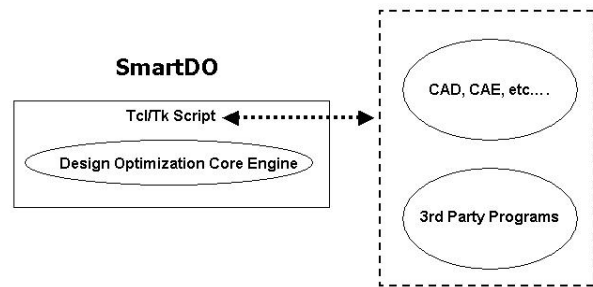


圖 10 SmartDO 之執行基本架構示意圖

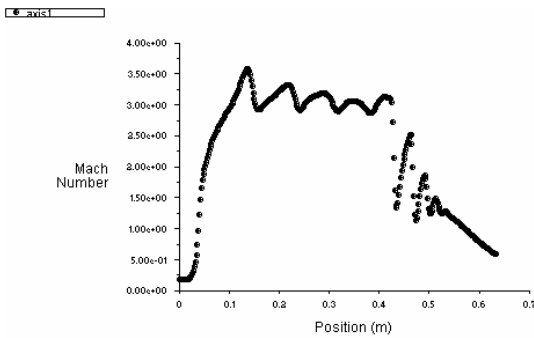


圖 6 Mach Number 的軸向變化圖

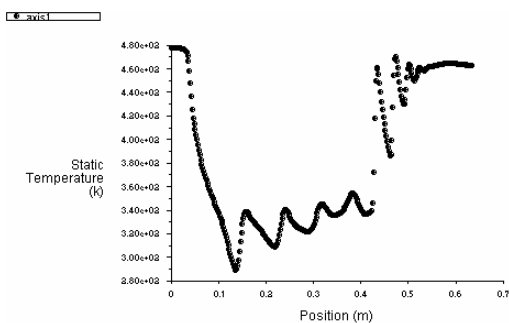


圖 7 溫度的軸向變化圖