

利用噴射器之雙級冷凍系統研發(II) - 子計畫一

「新型噴射壓縮器之性能提昇研究(II)」

Design and improvement of new-type Ejector

計畫編號：NSC 87-2212-E-002-082

執行期間：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

計畫主持：陳瑤明(國立台灣大學機械系)

研究助理：張淵仁、楊勝竹

一、摘要

本計畫完成了瓣狀噴射壓縮器之初步開發與測試，並由實際的操作經驗累積中，獲得瓣狀噴射壓縮器之操作特性，其研究結果顯示，瓣狀噴射壓縮器對於噴射壓縮器之性能確實有顯著的提昇，經由比較傳統噴嘴之噴射壓縮器的結果後，發現在相同的主、副流工況下，具瓣狀噴嘴之新型噴射壓縮器在高抽吸比時可達到較大的極限背壓，但抽吸比則沒有顯著的增減。此外由兩者的性能曲線來看，具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器在低增壓比時具有較高的抽吸比，抽吸比增加率最高可達到約 50% 左右，且增壓比越小，抽吸比增加越多，對於雙級冷凍系統可以提供增強之幫助。

This study experimentally investigated the performance of ejector with petal nozzle. Two types of nozzle, petal and conical nozzle were tested on various operating conditions. Three area ratio value (AR) of ejector were also tested. The results showed that the entrainment ratio could be promoted 40% at low compression ratio (i.e. $P_b/P_s < 1.5$) by using petal nozzle.

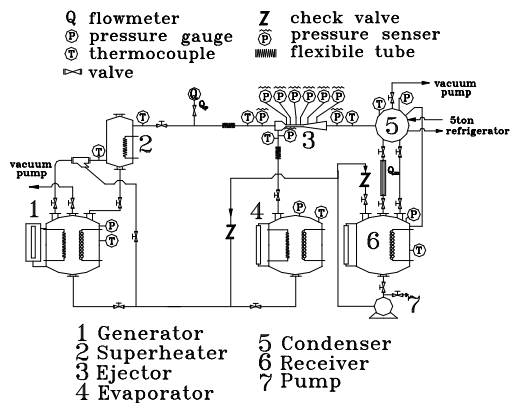
二、計畫緣由與目的

將噴射壓縮器應用於冷氣系統雖然有多方面的優點，但由先前的研究可知到目前仍有許多問題尚未解決，因此無法普遍的應用。而這其中最大的缺點即為其效率偏低；一般噴射式冷凍系統的 COP 都在 0.3 以下，與傳統的冷氣系統相比，差距甚大。噴射式冷凍系統的工作原理可知，影響 COP 主要因素為噴射壓縮器的抽吸比與增壓比，因此在本研究中希望研發裝置瓣狀噴嘴的新型噴射壓縮器，以便增加噴射壓縮器的抽吸比與增壓比。

三、瓣狀噴射壓縮器之開發

3.1 噴射壓縮器測試設備

本實驗的設備如圖一所示，主要構件除了噴射壓縮器(ejector)以外，尚包括蒸氣產生器(generator)、蒸氣蒸發器(evaporator)、冷凝器(condenser)、液體收集器(receiver)、過熱器(superheater)、循環水泵(pump)及其它相關配屬的閥、冷凍機、真空泵、管路等。

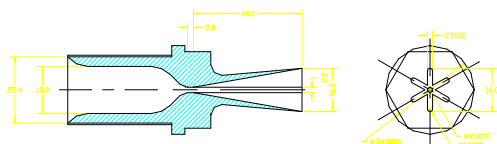


圖一：新型噴射壓縮器測試系統

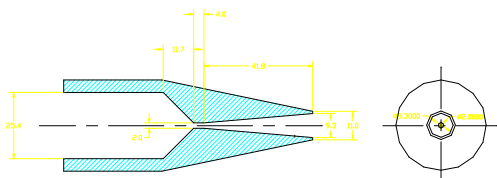
3.2 新型式瓣狀噴嘴

為探討瓣狀噴嘴與傳統圓形噴嘴對噴射壓縮器性能的影響，本實驗採用兩不同形式但出口面積與喉部面積比例相同之主噴嘴，其中瓣狀噴嘴 (petal nozzle) (細部尺寸見圖二(a)) 為黃銅所製，喉部直徑2mm，共有六瓣，每瓣長約6.5mm，寬2mm，噴嘴出口角度約十度。其尾端有螺牙，可密接在噴嘴座上，以便安裝於實驗系統。傳統圓錐型噴嘴 (conical nozzle) (細部尺寸見圖二(b)) 為黃銅所製，喉部直徑2mm，出口直徑9.3mm，利用水蒸氣 ($k=1.327$) 操作下，對應馬赫數 (Ma) 約為4.35。

(a)



(b)



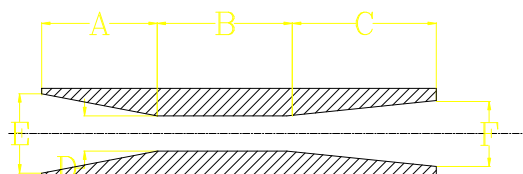
圖二：新型噴射壓縮器內裝置之瓣狀噴嘴與傳統噴嘴

3.3 新型式瓣狀噴射壓縮器

為探討具兩種不同形式噴嘴的噴射壓縮器，其等壓混合段長度及AR值 (噴射式壓縮器等截面段面積與主噴嘴喉部面積之比值) 對抽吸及增壓效果的影響，本實驗選擇四種不同尺寸的噴射壓縮器 (ejector) 進行測試，其尺寸如下：

	漸縮段 / 等截面積段 / 漸擴段 (mm)	AR值
Ejector1	107 / 72 / 107	80
Ejector2	120 / 80 / 120	100
Ejector3	168 / 112 / 168	196

Ejector1、Ejector2 及 Ejector3 之尺寸皆參考前人文獻的理論，其漸縮段長度：等截面積段長度：漸擴段長度：等截面積段直徑之比例皆為 6:4:6:1。比較 Ejector1、Ejector2 及 Ejector3 的結果，則可瞭解改變 AR 值對新型壓縮器性能曲線所造成的變化，以便找到新型噴射壓縮器最佳 AR 值。



	A	B	C	D	E	F
Ejector 1	107	72	107	φ17.8	φ40.0	φ25.4
Ejector 2	120	80	120	φ20.0	φ40.0	φ25.4
Ejector 3	168	112	168	φ28.0	φ40.0	φ42.0

Unit:mm

圖三：新型噴射壓縮器測尺寸圖

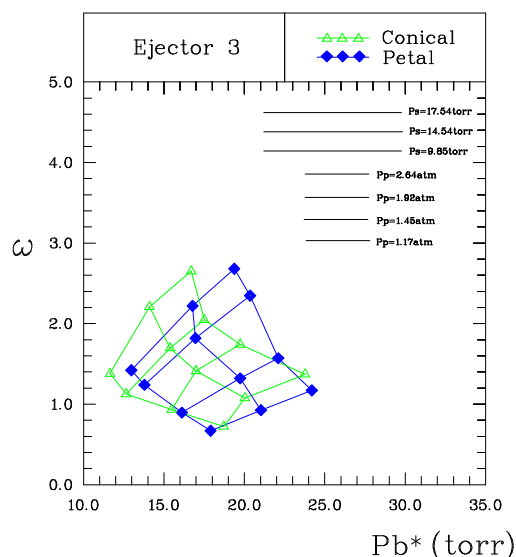
3.4 新型噴射壓縮器性能測試

圖四為新型噴射壓縮器與傳統噴射壓縮器性能比較圖，在相同的蒸氣產生器溫度及蒸氣蒸發器溫度下操作時，其最大抽吸比與極限背壓之關係圖，圖五為新型噴射壓縮器與傳統噴射壓縮器性能無因次化結果圖。

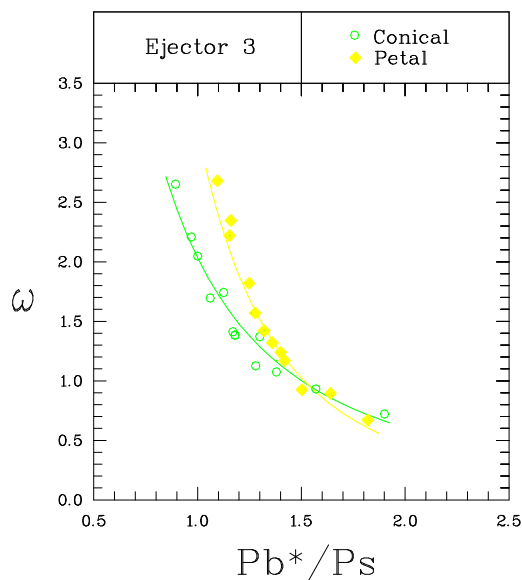
經由比較圖四中主、副流工況相同的操作狀態點後可以看出，在極限背壓方面，具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器在較低的主流入口壓力及較高的副流入口壓力下，其極限背壓較傳統噴射壓縮器為高，均增加約 1 ~ 3 torr；但在較高的主流壓力及較低的副流壓力下，極限背壓的增加變得不明顯，甚至減少；而在抽吸比方面，則兩者差距不大，僅在當主流入口壓力較小時，具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器之抽吸比略高於傳統噴射壓縮器；當主流入口壓力較大時，其抽吸比會略小。

比較圖五的兩條無因次性能曲線，也可發現具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器在增壓比約 1.0 ~ 1.5 時，其抽吸比高於傳統噴射壓縮器，且在較低的增壓比（1.0 ~ 1.2）下，抽吸比可比傳統噴射壓縮器增加約 25% ~ 50%；但在較高的增壓比時，抽吸比則與傳統噴射壓縮器相若，甚至略差。

由實驗的結果來看，具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器的極限背壓在低主流膨脹比、低增壓比時有較明顯的提高，但在高主流膨脹比、高增壓比時則表現略遜傳統噴嘴之噴射壓縮器；而其抽吸比則均改變不大。



圖四：新型與傳統噴射壓縮器性能測試結果

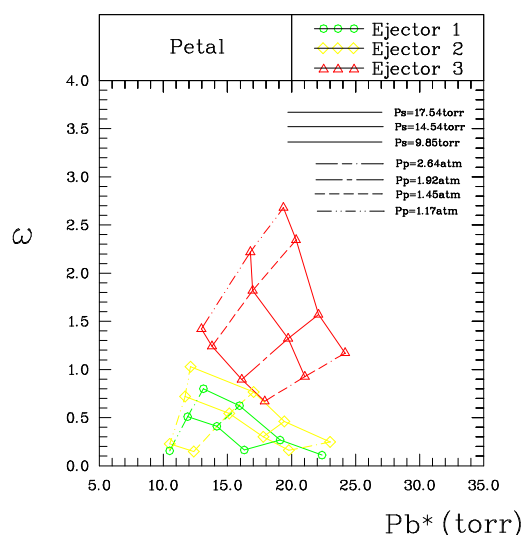


圖五：新型與傳統噴射壓縮器性能測試無因次化結果

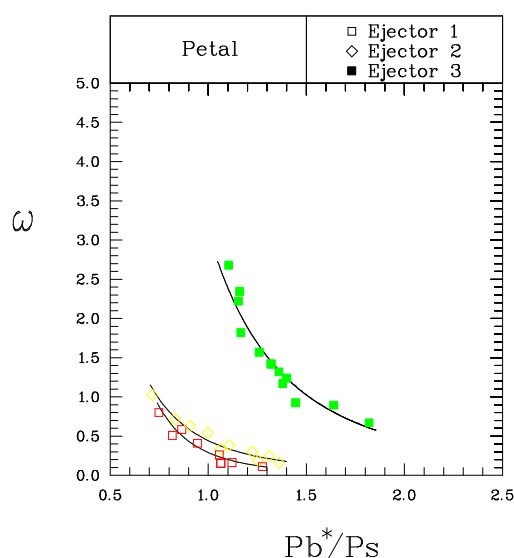
另外，AR 值（噴射壓縮器等截面積段與主噴嘴喉部之面積比）對噴射壓縮器是個相當重要的參數，AR 值不同，噴射壓縮器的性能亦受到影響。故本研究也針對不同 AR 值的具瓣狀噴嘴之新型噴射壓縮器進行性能分析，期能找出最適合之 AR 值。

將三種不同等截面段面積的噴射壓縮器，配合瓣狀主噴嘴，在相同的蒸氣產生器溫度及蒸氣蒸發器溫度下操作，比較其結果，如圖六及圖七，圖六為最大抽吸比與極限背壓之關係圖；圖七為最大抽吸比與極限增壓比之關係曲線。由圖六中可以看出，具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器其 AR 值與操作範圍成正比，當 AR 為 80 時，在某些本實驗所設定的主、副流工況下噴射壓縮器無法操作，且抽吸比與極限背壓均不高；當 AR 值增加為 100 時，也有部份的操作點無法操作，但情況較有改善，抽吸比與極限背壓均提高；當 AR 值為 196 時，本實驗所設定的主、副流工況均可操作，抽吸比與極限背壓均較 AR 值為 100 時大幅增加。由圖七也可看出，在相同的主、副流操作狀態下，當 AR 值增加時，噴射壓縮器的性能曲線往右上方移動，抽吸比與增壓比均增加，利用價值較

大。



圖六：不同 AR 值新型噴射壓縮器性能測試結果

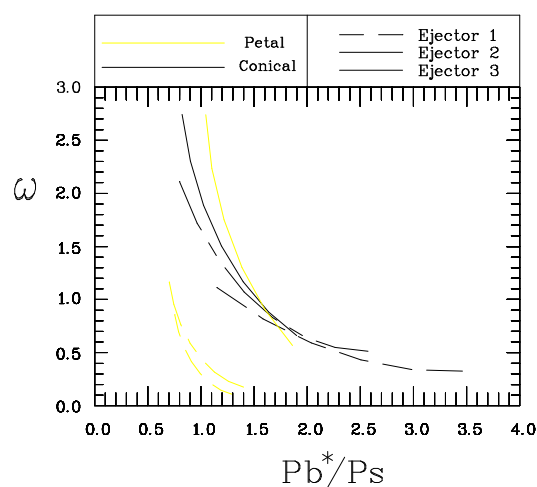


圖七：不同 AR 值新型噴射壓縮器性能測試無因次化結果

根據上述實驗結果，具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器，其整體的抽吸與增壓的行為不但與傳統噴嘴之噴射壓縮器相反，且與理論所推導的趨勢不同。為了能進一步瞭解此現象，可把不同主噴嘴形式的所有 AR 值之噴射壓縮器的性能曲線均繪於一圖上，以便相互比較，如圖八。由圖八中可發現，除了 AR 值

為 196 時具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器的性能不輸於傳統噴嘴之噴射壓縮器外，當 AR 值為 80 及 100 時，其性能皆遠不及傳統噴嘴之噴射壓縮器；在相同的主、副流操作狀態下，不僅在增壓效果方面變的甚差，抽吸比也大幅降低。

經比較後發現，對於兩種不同主噴嘴形式但 AR 值均為 80 及 100 的噴射壓縮器，在相同的主、副流工况下操作時，其抽吸比有很大的差異，此點與前面的結果均不相同，且與 Munday & Bagster (1977) [9] 的副流喉部面積理論相違背，此現象頗不尋常。然而經由參考 Stanley A. Skebe et al. [25] 的文獻後，發現本實驗結果中，具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器其抽吸比與 AR 值成正比的特性，與該篇文獻的實驗結果相同。該篇文獻中將發生這種現象的原因，歸咎於當混合段截面積不足時，流體易被混合段的壁面所限制，亦即當混合段截面積太小時，由瓣狀噴嘴所噴出的主流體因撞擊到壁面而無法完全發展，造成大量的動能損耗及紊亂流，使得抽吸比變差。



圖八：新型噴射壓縮器性能測試結果

四、結 論

一、由實驗發現不論新型或是傳統噴射壓縮

器的一般特性皆如下：

(1) 當蒸氣產生器壓力及蒸氣蒸發器壓力固定時，若噴射壓縮器的出口背壓小於某值，則蒸發器內的蒸氣開始會被抽吸；此時若再繼續降低背壓，則抽吸比會增加；但當噴射壓縮器出口背壓降至極限背壓以下時，抽吸進入的流體會發生阻塞(chocking)現象，使抽吸比固定，不再因背壓降低而增加。

(2) 當蒸氣產生器壓力固定時，若蒸氣蒸發器壓力愈大，最大抽吸比增加，且極限背壓亦提高。

(3) 當蒸氣蒸發器壓力固定時，若蒸氣產生器壓力愈大，則最大抽吸比減少，但所能達到的極限背壓會變大。

二、以實驗對具瓣狀噴嘴之新型噴射壓縮器做性能測試時，經由比較傳統噴嘴之噴射壓縮器的結果後，發現在相同的主、副流工況下，具瓣狀噴嘴之新型噴射壓縮器在高抽吸比時可達到較大的極限背壓，但抽吸比則沒有顯著的增減。此外由兩者的性能曲線來看，具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器在低增壓比時具有較高的抽吸比，抽吸比增加率最高可達到約 40%左右，且增壓比越小，抽吸比增加越多。

三、對於具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器，其性能與 AR 值成正比，當 AR 值增加時，抽吸比與極限背壓均會提昇，且由性能曲線圖中也可看出，AR 值為 80 與 100 的具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器，在相同的主、副操作範圍下，抽吸比與極限增壓比均遠較 AR 值為 196 者低。其理由乃是因為 AR 值較低的噴射壓縮器，所噴出的主流體撞擊到壓縮器壁面形成紊亂的流場，損失大量的動能並阻塞副流進入的通道，使抽吸比與極限背壓均降低。

綜上所述，未來將更進一步增加新型噴射壓縮器之 AR 值，以便完全發揮新型瓣狀

噴嘴之優異增壓能力，並嘗試不同的新型噴射壓縮器的混合長度，以減低由於摩擦損耗所消耗之能量，增加其增壓與混合能力。。

五、參考文獻

1. ASHRAE, Steam-jet refrigeration equipment. 1979 Equipment Handbook, Chap. 13, pp. 13.1-13.6. AHRAE, Atlanta, GA, U.S.A., 1979.
2. Elrod, H. G., "The Theory of Ejectors," *J. Applied Mechanics*, 1945, pp. A170-A174.
3. Vil'der, S. I., A Simplified Method of Calculating Stream-Jet Ejector Vacuum Pumps, *International Chemical Engineering* 4 (1), 88-92, 1964.
4. Rice, P., and Dandachi, J., "An Equation for the Prediction of Steam Flowrate Required in the Design of Ejectors," *Trans I Chem. Eng. Research & Design* 69 (4), 332-334, 1991.
5. Huang, M. C., and Chen, S. L., The Experimental Study of Ejector Performance Characteristic in Jet Refrigeration Systems, submitted to *Heat Recovery Systems & CHP*, 1995.
6. Chen, Y. M., and Sun, C. Y., Study on the Flow Field of a Supersonic Air-Ejector, *Proceedings Symposium on Transport Phenomena and Applications*, Taipei ROC, September, pp. 17-20, 1993. (in Chinese)
7. Sun, D. W. and Eames I. W., "Recent Developments in the design theories and applications of ejectors – a review," *J. Institute of Energy*, June 1995, 68, pp. 65-79.
8. Keenan, J. H., Neumann, E. P., and Lustwerk, F., "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1950, 72, pp. 299-309.
9. Munday, J.T., and Bagster, D.F., A New Ejector Theory Applied to Steam Jet Refrigeration, *Ind. Eng. Chem., Process Res. Dev.*, Vol.16, No.4, 1977, pp.442-449.
10. Hsu, C.T., Investigation of an Ejector Heat Pump by Analytical Methods, U.S. Department of Energy, Contract No.DE-AC05-84OR 21400, July, 1984.
11. Tragi, K.P., and Murty, K.N., Ejector Compression System for Cooling Utilisting Low Grade Waste Heat, *Heat Recovery Systems*, Vol.5, No.6, 1985, pp.543-550.

12. Huang, B.J., Jiang, C.B., and Hu, F.L., Ejector Performance Characteristics and Design Analysis of Jet Refrigeration System, *Trans.ASME*, Vol.107, July, 1985, pp.792-802.
13. Sokolov, M., and Hershgal, D., Enhanced Ejector refrigeration Cycles Powered by Low Grade Heat.Part 1.System Characterization, *International Journal of Refrigeration*, Vol.13, Nov,1990, pp.351-356.
14. Sokolov, M., and Hershgal, D., Enhanced Ejector refrigeration Cycles Powered by Low Grade Heat.Part 2.Design Procedure, *International Journal of Refrigeration*, Vol.13,Nov,1990, pp.357-363.
15. Sokolov, M., and Hershgal, D., Enhanced Ejector refrigeration Cycles Powered by Low Grade Heat.Part 3.Experiment Results, *International Journal of Refrigeration*, Vol.14, Jan,1991, pp.24-31.
16. Eames, I. W., Aphornratana, S., and Sun, Da-Wen, "The Jet-Pump Cycle-a Low Cost Refrigerator Option Powered by Waste Heat, " *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 15, No. 8, 1995, pp. 711-721.
17. Eames, I. W., Aphornratana, S., and Haider, H., A Theoretical and Experimental Study of a Small-Scale Steam Jet Refrigerator, *Int J.Refrig.*Vol.18, No.6, 1995, pp.378-386.
18. Chen, Y. M., and Sun, C. Y., Experimental study on heat and mass transfer of a combined absorber-evaporator exchanger, *Int. J. Heat and Mass*, Vol.40, No.4, pp. 961-971, 1997.
19. Chen, Y. M., Chang, Y. J., "Performance Analysis of Steam Ejector Applied to Refrigeration System," *Proc. Thirteenth National Conference of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Taiwan, R.O.C., 1996, pp. 209-216.
20. Srikrishnan, A. R., Kurian, J., and Sriramulu, V., "Experimental Study on Mixing Enhancement by Petal Nozzle in Supersonic Flow, " *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 12, No. 1, Jan.-Feb., 1996, pp. 165-169.
21. Presz., W. M., Morin, B. L., and Gousy, R. G., "Force Mixer Lobes in Ejector Designs, " *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 4, 1988, pp. 350-355.
22. Narayanan, A. K., and Damodaran, K. A., "Supersonic-Ejector Characteristics Using a Petal Nozzle, " *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 10, No. 5, Sept.-Oct., 1994,pp.742-744.
23. Parerson, R. W., "Turbofan Mixer Nozzle Flow Field – A Benchmark Experimental Study," *ASME J. Eng. Gas Turbines Powers*, Vol. 106, pp. 692-698, 1984.
24. Yu, S. C. M., and Xu, X. G., "Turbulent Mixing of Coaxial Nozzle Flows with a Central-Lobed Mixer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 4, July-Aug., 1997, pp. 517-524.
25. Skebe, S. A., McCormick, D. C., and Presz, W. M., Jr., "Parameter Effects on Mixer-Ejector Pumping Performance," *AIAA Paper 88-0188*, Jan. 1988.