

利用噴射器之雙級冷凍系統研發—子計畫一 「新型噴射壓縮器之性能提昇研究 (2/3)」

Design and improvement of new-type Ejector

計畫編號：NSC 88-2212-E-002-027

執行期間：87 年 8 月 1 日至 88 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、尤銘鏘

一、 摘要

在實驗方面，對傳統與瓣狀噴射壓縮器在不同馬赫數、AR 值 (噴射壓縮器等截面面積與主噴嘴喉部面積之比值) 與長度進行性能測試。實驗結果發現馬赫數越高，性能越佳，唯其所需的熱源溫度也越高；在適當馬赫數下，其性能稍差，然所需的熱源可使用太陽能等中低階熱源來驅動。至於 AR 值影響效應方面，則顯示其對傳統與瓣狀噴射壓縮器性能的影響迥異。對於瓣狀噴射壓縮器而言，AR 值增加，其性能會先增後減，存在一最佳 AR 值，在此最佳值，瓣狀噴射壓縮器在抽吸能力與增壓性能表現上有最佳的協調；反之，對於傳統噴嘴之噴射壓縮器，AR 值增加時抽吸比會增加，但所能達到的極限背壓卻會降低。長度影響效應方面之實驗結果顯示，當噴射壓縮器混合段長度越短時，瓣狀噴射壓縮器之性能越高。以上結果證明同時使用瓣狀噴嘴與縮短混合段長度確實可以有效的提昇噴射壓縮器之性能。

The behavior and characteristics of a petal nozzle are investigated experimentally by testing it under various operating conditions, i.e. generator temperature, evaporator temperature and condenser temperature. In addition, the effects of AR (area ratio of constant area section of ejector to nozzle throat) and mixing length on ejector performance are studied by testing ejectors with various values of AR and mixing length of ejector. For comparison, a conventional conical nozzle with the same Mach number as that of petal nozzle is also used. Experimental results demonstrate that the compression ratio and the entrainment ratio can be enhanced if using the petal nozzle in an ejector with a larger AR value. Moreover, for the ejector with a petal nozzle, an optimum AR value exists under which a maximum compression ratio can be found. The results also show that decreasing the mixing length can increase the performance of ejector.

二、 計畫緣由與目的

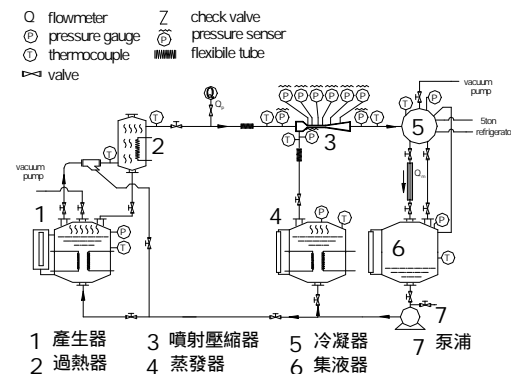
由於台灣位處亞熱帶，加上工業與民生之需求，使得冷凍空調系統的使用率日趨升高，由於絕大部份的冷凍空調系統仍然使用傳統機械式壓縮機，造成用電需求大幅提昇。根據台電於民國八十五年底之統計，台灣地區每戶人家平均擁有 1.15 台的冷氣機，夏季中冷氣用電量高達七百萬瓩的巨量，近年尚在持續增加中，87 年入夏用電尖峰更七度打破紀錄迭創新高達二千三百九十五萬瓩，較 86 年增加約一百七十一萬瓩，電力供應至為緊澀，台電公司指出，近年來為了提昇生活及工作環境品質，冷氣空調的大量使用係造成夏季電力吃緊最主要因素之一。在台電系統最高負載中，冷氣空調用電量約占整體用電量的三成。因此，若能節省冷凍空調系統的用電量，不但可以節約能源，更可以緩和興建新電廠的殷切需求。再者，由於冷凍空調大量使用氟氯碳化物，造成臭氧層的破洞危機，使得許多的氟氯碳化物逐漸遭到禁用，此一問題受到冷凍空調業界及政府環保相關團體之重視。

從冷凍系統的原裡可知，最耗電的元件為「壓縮機」，而壓縮機也是冷凍空調內最貴的元件，一部壓縮機的性能好壞，直接關係到整個冷凍空調的效率，因此，要解決冷凍空調的耗電問題，首先應針對此關鍵元件來解決。使用不耗電的蒸汽噴射式冷凍空調系統 (steam-jet refrigeration system) 是解決此一問題的良好方案。相較於傳統式壓縮機，噴射式壓縮器內部並無任何往復移動或旋轉元件，因此，並不會產生磨耗，不需潤滑，可長時間操作不需考慮過熱與冷卻問題，亦不會產生噪音與震動；而噴射壓縮式冷氣系統運作能量的來源，可利用工廠廢熱及太陽能等廉價之中、低溫熱源來驅動，無須電能，使得此類原本無法再利用之熱源得以再利用，再加上其使用水為冷媒，因此也沒有氟氯碳化物破壞臭氧層的環境污染問題產生。

三、 瓣狀噴射壓縮器之開發

3.1 噴射壓縮器測試設備

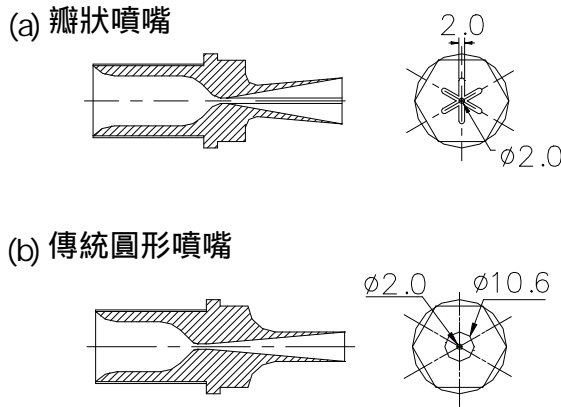
本實驗的設備如圖一所示，主要構件除了噴射壓縮器 (ejector) 以外，尚包括蒸氣產生器 (generator)、蒸氣蒸發器 (evaporator)、冷凝器 (condenser)、液體收集器 (receiver)、過熱器 (superheater)、循環水泵 (pump) 及其它相關配屬的閥、冷凍機、真空泵、管路等。



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。



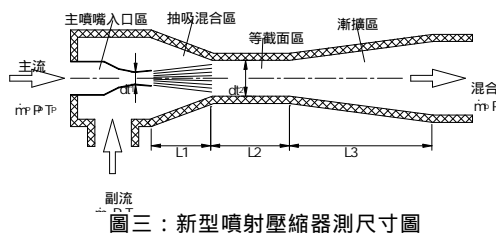
圖二：新型噴射壓縮器內裝置之瓣狀噴嘴與傳統噴嘴

3.3 新形式瓣狀噴射壓縮器

為探討具瓣狀噴嘴與傳統噴嘴的噴射壓縮器，其混合段長度及AR值（噴射式壓縮器等截面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5種不同AR值的噴射壓縮器(ejector)與三種不同混合段長度的噴射壓縮器進行測試，其尺寸如下：

| Ma | nozzle | AR | L1 : L2 : L3 |
|------|---------|-----|--------------|
| 4.35 | Conical | 60 | 6:4:6 |
| | | 80 | |
| | | 100 | |
| | | 196 | |
| | | 300 | |
| 4.35 | Petal | 60 | 6:4:6 |
| | | 80 | 2.5:1:6 |
| | | 100 | 1.5:0.5:6 |
| | | 196 | |
| | | 300 | |

噴射壓縮器之設計皆參考前人文獻的理論，其漸縮段長度：等截面段長度：漸擴段長度：等截面段直徑之比例分別為 6 : 4 : 6，2.5 : 1 : 6，1.5 : 0.5 : 6。AR 值為 60，80，100，196 與 300。



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

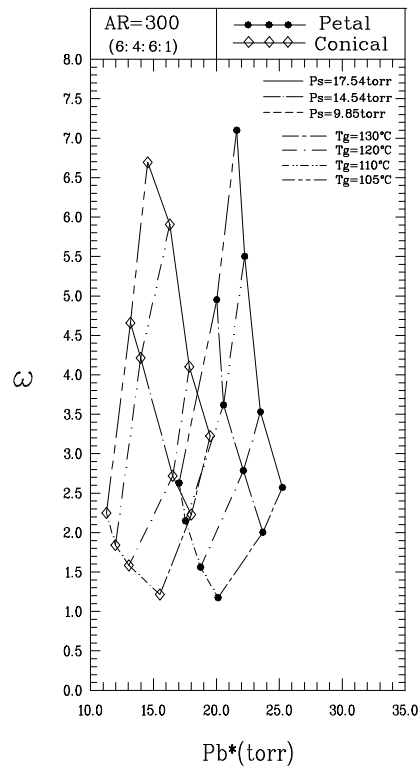
圖四為新型噴射壓縮器與傳統噴射壓縮器性能比較圖，在相同的蒸氣產生器溫度及蒸氣蒸發器溫度下操作時，其最大抽吸比與極限背壓之關係圖，圖五為新型噴射壓縮器與傳統噴射壓縮器性能無因次化結果圖。

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。

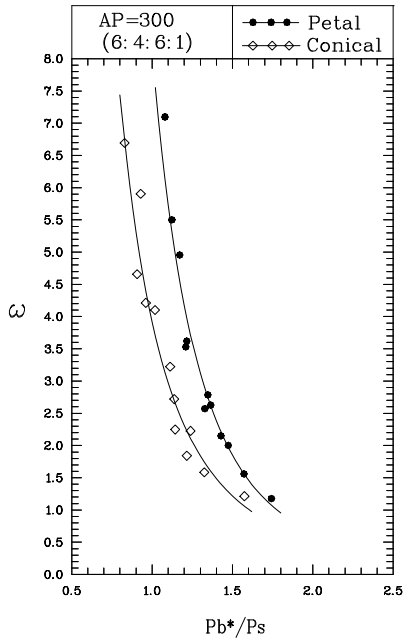
比較圖五的兩條無因次性能曲線，也可發現在抽吸比方面，瓣狀噴射壓縮器除了在主流入口壓力與副流入口壓力較大的操作工況下抽吸比較傳統噴射壓縮器為低外，在其他的主副流操作工況下，瓣狀噴射壓縮器的抽吸比與傳統噴射壓縮器相若。而在極限背壓方面，瓣狀噴射壓縮器在所有的主副流操作工況下，其極限背壓皆較傳統噴射壓縮器為高，均增加約 2.4 torr。

比較圖中的兩條性能曲線，可以發現瓣狀噴射壓縮器的性能曲線皆位於傳統噴射壓縮器的右邊，亦即在抽吸相同的副流量下操作，瓣狀噴射壓縮器所能達到的增壓效果皆較傳統噴射壓縮器為高（約增加 10% 30%）。

由實驗的結果來看，具瓣狀噴嘴之噴射壓縮器的極限背壓較傳統噴射壓縮器為高；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

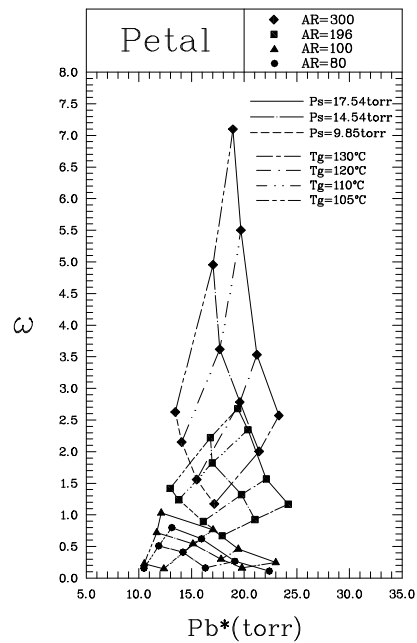
另外，AR 值（噴射壓縮器等截面積與主噴嘴喉部之面積比）對噴射壓縮器是個相當重要的參數，AR 值不同，噴射壓縮器的性能亦受到影響。故本研究也針對不同 AR 值的具瓣狀噴嘴之新型噴射壓縮器進行性能分析，期能找出最適合之 AR 值。

將五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，在 AR 值較小時，有數個工况中的抽吸比並不穩定，顯示在這些工况是無法操作的，因此其結果並未顯示在圖中。但隨著噴射壓縮器之 AR 值的增加，其抽吸比會迅速增加而且其極限背壓也會增加，也就是整個網狀圖有往右上方移動的趨勢，此種現象，從 AR 為 196 增加到 300 的時候表現的更為顯著。若觀察圖七可以發現，當噴射壓縮器之 AR 值從 80 增加至 300 時，其抽吸比不但隨之增加，其壓縮比也會增加，尤其是 AR 值從 100 增加至 196 時，其增加的幅度較鉅，但是當 AR 值從 196 增加至 300 時，其增加的幅度顯然較小使得整個曲線似有轉而向左上方移動之趨勢。但由此實驗結果可以明顯得知，其性能曲線與隨著 AR 值增加之趨勢與傳統噴射壓縮器極不相同，顯示瓣狀噴射壓縮器之優異能力。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。

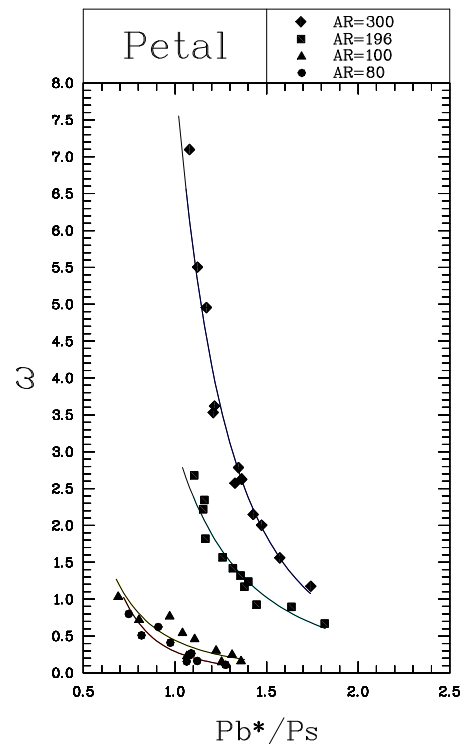
根據上述實驗結果，具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器，其整體的抽吸與增壓的行為不但與傳統噴嘴之噴射壓縮器相反，且與理論所推導的趨勢不同。

為了能進一步瞭解不同混合段長度的噴射壓縮器性能不同，可把實驗結果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，在相同的主、副流操作工况下，長度最長與次長的噴射壓縮器其抽吸比與所能達到的極限背壓均相差不多，僅在抽吸比較低的主副流工况下，次長的噴射壓縮器之抽吸比與極限背壓較最長的噴射壓縮器稍高，增加的幅度並不大；而最短的噴射壓縮器則很明顯的擁有不同性能表現，在抽吸比較低的主副流工况時，其抽吸比與最長的噴射壓縮器相當；但在抽吸比較高的主副流工况時，其抽吸比就明顯的提昇，而在極限背壓方面，在任何工况下，皆明顯超過次長與較長噴射壓縮器，另外，由圖中可以看出，最短的噴射壓縮器在較低抽

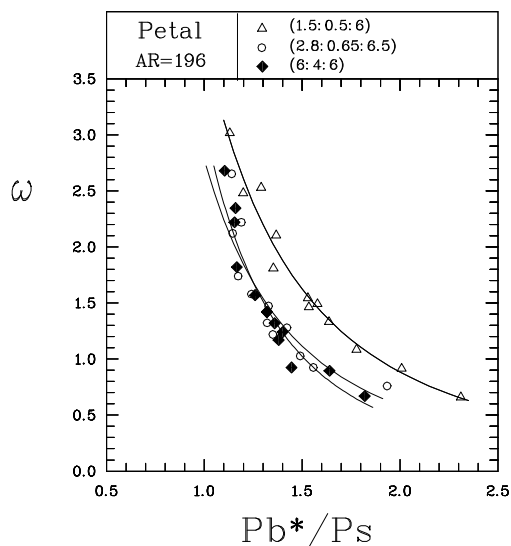
吸比時，擁有較其他噴射壓縮器更強的增壓能力；在較高抽吸比時，其增壓比提昇的幅度較小。



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



圖八：不同混合段長度下，抽吸比與極限背壓之關係圖

四、結論

一、由AR值對噴射壓縮器的影響中，當AR值增加時，不論是瓣狀或傳統噴射壓縮器，其最大抽吸比皆會增加，但是對增壓比的影響在瓣狀與傳統噴射壓縮器是截然不同的。對於瓣狀噴射壓縮器而言，隨著AR值的增加，其極限增壓先增後減，因此，由實驗中推測有一最佳AR值座落在200-250之間，此時的瓣狀噴射壓縮器在抽吸能力及最佳的增壓性能具有最佳的協調；對於傳統噴射壓縮器，增壓性能卻隨著AR值的增加而降低。

二、當縮短噴射壓縮器之混合段長度時，可以發現噴射壓縮器性能會有顯著增加，顯示瓣狀噴嘴的確具有快速混合的能力，因此可以縮短噴射壓縮器來降低其流體與壁面之摩擦損耗。

五、參考文獻

- ASHRAE, Steam-jet refrigeration equipment. 1979 Equipment Handbook, Chap. 13, pp. 13.1-13.6. AHRAE, Atlanta, GA, U.S.A., 1979.
- Elrod, H. G., "The Theory of Ejectors," *J. Applied Mechanics*, 1945, pp. A170-A174.
- Vil'der, S. I., A Simplified Method of Calculating Steam-Jet Ejector Vacuum Pumps, *International Chemical Engineering* 4 (1), 88-92, 1964.
- 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.
- 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.
- 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)
- 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.
- 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.
- 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.

- Hsu, C.T., Investigation of an Ejector Heat Pump by Analytical Methods, U.S. Department of Energy, Contract No.DE-AC05-840R 21400, July, 1984.
- Tragi, K.P., and Murty, K.N., Ejector Compression System for Cooling Utilizing Low Grade Waste Heat, *Heat Recovery Systems*, Vol.5, No.6, 1985, pp.543-550.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Parerson, R. W., "Turbofan Mixer Nozzle Flow Field - A Benchmark Experimental Study," *ASME J. Eng. Gas Turbines Powers*, Vol. 106, pp. 692-698, 1984.
- 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.
- Skebe, S. A., McCormick, D. C., and Presz, W. M., Jr., "Parameter Effects on Mixer-Ejector Pumping Performance," *AIAA Paper* 88-0188, Jan. 1988.