

利用噴射器之雙級冷凍系統研發－總計畫(2/3)

Ejector-coupled two-stage refrigeration system

計畫編號: NSC88-2212-E-002-050

執行期間: 87年8月1日至88年10月07日

計畫主持: 黃秉鈞 (國立台灣大學機械工程系)

一、摘要

本計畫旨在開發雙級冷凍系統，包括「雙級單冷媒系統」與「雙級雙冷媒系統」，兩者均採用噴射器來搭配冷媒壓縮機。本計畫開發之「雙級雙冷媒系統」在儲冰空調應用時($T_e = -10^\circ\text{C}$)，測試結果顯示，COP比單級系統提升 15.1%；對一般冷氣空調的應用($T_e = 7.5^\circ\text{C}$)，COP可提升 19.2%。

本計畫亦開發使用 R-22 冷媒之「雙級單冷媒系統」原型機，其蒸發溫度與冰水槽最低可達 -40°C 。

為提高系統性能，本計畫同時探討蒸發器採滿溢式液體再循環設計，使用一具液-液噴射器來取代傳統膨脹裝置。測試結果顯示，冷凝溫度 30°C 時，短管在位置不同時，COP 由 2.3 升高至 3.1，明顯看出 COP 的提升。

另外，參考高性能 VTOL(垂直起降戰鬥機)噴射器之技術，本計畫進行新型瓣狀噴射器之開發，以提升噴射器性能。研究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。

Ejector-coupled two-stage refrigeration system including 2-stage single-refrigerant system and 2-stage dual-refrigerant system are developed in the present project. 2-stage single-refrigerant system utilizes part of the vapor exhausted from the compressor

to drive the second stage made from ejector. The ejector is used to pull the evaporator temperature down to a low temperature which is never reached by conventional single-stage compression system. 2-stage dual-refrigerant system utilizes a R22 compression unit as the first stage. Some of the condensing heat is used to drive a ejector unit using R141b as the refrigerant to produce cooling effect to subcool the liquid R22 refrigerant before entering the expansion valve. The COP can than be increased.

To improve the performance, flooded-type evaporator with liquid recirculation using ejector expansion device is also studied. For improving the ejector cooling system, a study of new-type ejector design utilizing Petal type design is also carried out.

二、計劃緣由與目的

低溫冷凍方面的應用廣泛，包括儲冰系統、低溫食品冷凍、快速凍結、食品冷凍運輸技術、工業用低溫設備等等，由於冷媒蒸發溫度降至冰點以下，比一般冰水機或冷氣機(約 $4 \sim 7^\circ\text{C}$)為低，壓縮機的壓縮比與吐出溫度因此升高(如採單級壓縮)，使得耗能增加。因此，如何改良低溫冷凍系統的設計，以提高系統性能是一項重要研究課題。

本計畫旨在開發雙級冷凍系統，包括「雙級單冷媒系統」與「雙級雙冷媒系統」，後者採疊層式(cascaded)設計，兩者均採用噴射器來搭配冷媒壓縮機。

利用噴射器之雙級冷凍系統研發－總計畫(2/3)

Ejector-coupled two-stage refrigeration system

計畫編號: NSC88-2212-E-002-050

執行期間: 87年8月1日至88年10月07日

計畫主持: 黃秉鈞 (國立台灣大學機械工程系)

Ejector-coupled two-stage refrigeration system including 2-stage single-refrigerant system and 2-stage dual-refrigerant system are developed in the present project. 2-stage single-refrigerant system utilizes part of the vapor exhausted from the compressor to drive the second stage made from ejector. The ejector is used to pull the evaporator temperature down to a low temperature which is never reached by conventional single-stage compression system. 2-stage dual-refrigerant system utilizes a R22 compression unit as the first stage. Some of the condensing heat is used to drive a ejector unit using R141b as the refrigerant to produce cooling effect to subcool the liquid R22 refrigerant before entering the expansion valve. The COP can than be increased.

To improve the performance, flooded-type evaporator with liquid recirculation using ejector expansion device is also studied. For improving the ejector cooling system, a study of new-type ejector design utilizing Petal type design is also carried out.

利用噴射器之雙級冷凍系統研發—總計畫(2/3)

Ejector-coupled two-stage refrigeration system

計畫編號: NSC88-2212-E-002-050

執行期間: 87年8月1日至88年10月07日

計畫主持: 黃秉鈞 (國立台灣大學機械工程系)

摘要

本計畫旨在開發雙級冷凍系統，包括「雙級單冷媒系統」與「雙級雙冷媒系統」，兩者均採用噴射器來搭配冷媒壓縮機。本計畫開發之「雙級雙冷媒系統」在儲冰空調應用時($T_e = -10^\circ\text{C}$)，測試結果顯示，COP 比單級系統提升 15.1%；對一般冷氣空調的應用($T_e = 7.5^\circ\text{C}$)，COP 可提升 19.2%。

本計畫亦開發使用 R-22 冷媒之「雙級單冷媒系統」原型機，其蒸發溫度與冰水槽最低可達 -40°C 。

為提高系統性能，本計畫同時探討蒸發器採滿溢式液體再循環設計，使用一具液-液噴射器來取代傳統膨脹裝置。測試結果顯示，冷凝溫度 30°C 時，短管在位置不同時，COP 由 2.3 升高至 3.1，明顯看出 COP 的提升。

另外，參考高性能 VTOL(垂直起降戰鬥機)噴射器之技術，本計畫進行新型瓣狀噴射器之開發，以提升噴射器性能。研究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。

「雙級單冷媒冷凍系統」主要利用壓機吐出之一部分蒸氣，來推動第二級噴射器，以抽吸蒸發器，形成低溫。噴射器吐出口則唯持在冷媒壓縮機可以承受的吸入條件，整個系統只用一種冷媒。此一採用噴射器的雙級單冷媒冷凍系統的最大優點是，利用噴射器作後一級降溫段，則可以將蒸發溫度再往下拉至傳統壓縮機所無法達到的低溫，可以用來解決目前低溫業者的技術瓶頸。

疊層式(cascaded)系統(「雙級雙冷媒」)之第一級為R22機組，第二級為噴射式機組。透過「產生器」作兩級間之熱交換，利用壓縮機吐出高溫氣體的部分廢熱來推動R141b噴射器。R141b噴射式系統所產生的製冷量，則用來過冷(subcooling)進入蒸發器前的R22冷媒液體。

為提高系統性能，R22 蒸發器採滿溢式液體再循環設計(flooded-type liquid re-circulation)，使用一具液-液噴射器來取代傳統膨脹裝置(如膨脹閥)，利用冷媒液之降壓膨脹功來抽吸再循環液，混合後噴入蒸發器，使冷媒液在蒸發器內造成極佳的循環，發揮最大蒸發效果。

本計畫共分成四個子計畫來進行，內容如下：

總計畫：黃秉鈞 (研究規劃、協調、技術整合)

子計畫一：「新型噴射壓縮器之性能提昇研究」(陳瑤明)

1. 利用已建立的噴射器測試設備，參考高性能 VTOL(垂直起降戰鬥機)噴射器之技術，進行新型瓣狀噴射器之開發。
2. 以實驗方法發展噴射器技術。

子計畫二：「噴射膨脹器與滿溢式蒸發器設計」(洪祖全)

1. 噴射膨脹器設計分析。

2. 滿溢式蒸發器設計。

子計畫三：「雙級單冷媒冷凍系統設計」(陸紀文)

1. 雙級單冷媒冷凍系統最佳化設計分析。
2. 雙級單冷媒冷凍系統原型機發展(以低溫冷凍系統為載具)。

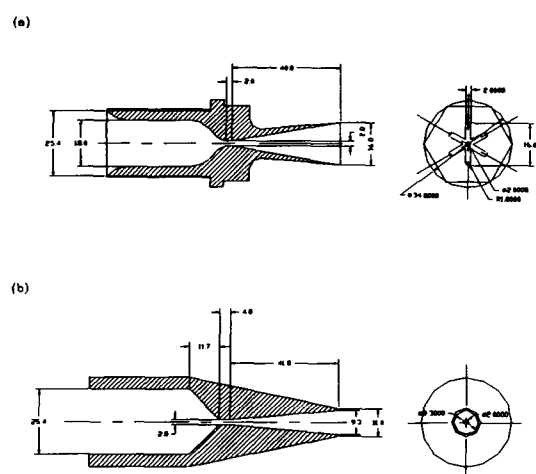
子計畫四：「雙級雙冷媒冷凍系統設計」(黃秉鈞)

1. 雙級雙冷媒冷凍系統最佳化設計分析。
2. 雙級雙冷媒冷凍系統原型機發展(以儲冰空調系統為載具)。

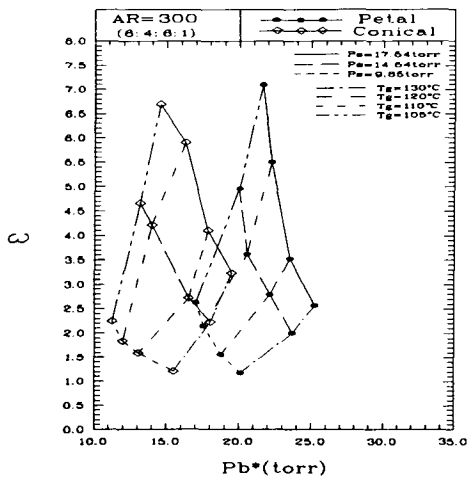
三、研究方法與結果

子計畫一：噴射壓縮器之數值分析

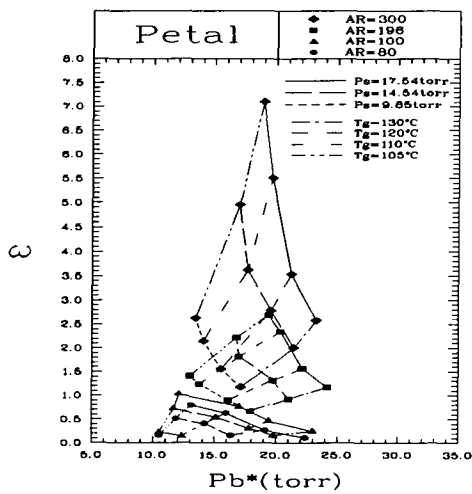
瓣狀噴射壓縮器(圖一)之測試結果顯示(圖二、三)，性能比上年度計畫有顯著提升，均比傳統噴射壓縮器優良。具瓣狀噴嘴的噴射壓縮器在低增壓比時具有較高的抽吸比，抽吸比增加率最高可達到約 50%左右，且增壓比越小，抽吸比增加越多，對於雙級冷凍系統可以提供增強之幫助。



圖一 新型噴射壓縮器內裝置之瓣狀噴嘴與傳統噴嘴



圖二 新型與傳統噴射壓縮器性能測試結果

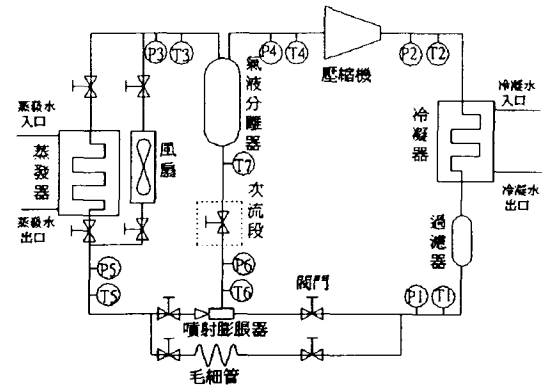


圖三 不同瓣狀噴射壓縮器性能測試結果

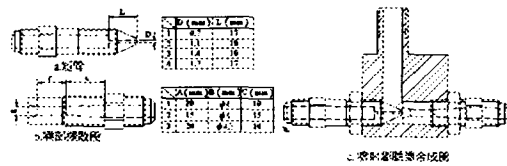
子計畫二：「噴射膨脹器與滿溢式蒸發器設計」

本研究旨在研究噴射膨脹器設計，並以短管取代噴射器的噴嘴。同時探討蒸發器採滿溢式液體再循環設計，利用冷媒液之降壓膨脹功來抽吸再循環液，使冷媒液在蒸發器內造成較佳的循環，提高蒸發器效率。

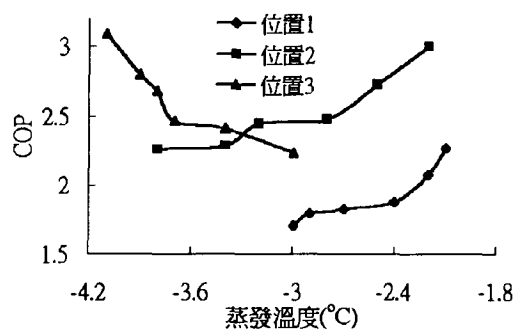
本年度完成了實驗環路的設計製作(圖四)。由噴射器測試情況看來，冷凍效率的提升依然有很大的空間，未來將搭配滿溢式蒸發器，以發揮噴射膨脹器的優點。



圖四 噴射膨脹器測試環路示意圖



圖五 噴射膨脹器設計圖

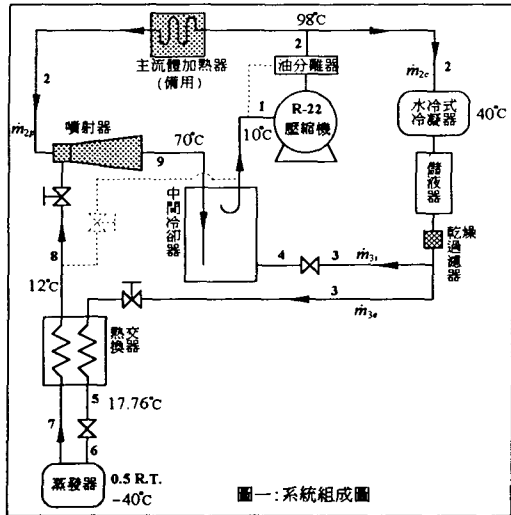


圖六 冷凝溫度30°C下不同短管位置對COP的影響

測試結果顯示(圖六)，冷凝溫度30°C時，短管在位置不同時，COP由2.3 升高至3.1，明顯看出COP的提升。

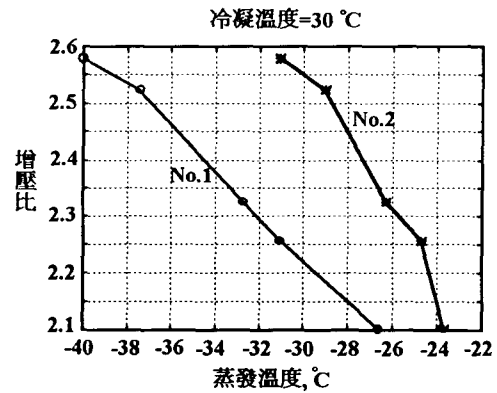
子計畫三：「雙級單冷媒冷凍系統設計」

本年度完成原型機(圖七)之開發與測試，噴射器規格如表一。當冷凝溫度為30°C時，蒸發溫度與冰水槽最低可達-40°C(圖八)，達到計畫目標。噴射器抽吸比之測試結果如圖九。



圖七 雙級單冷媒冷凍系統設計

凝液，以提高原壓縮機組的效率。噴射式機組使用冷媒 R141b，壓縮機組則使用冷媒 R22。



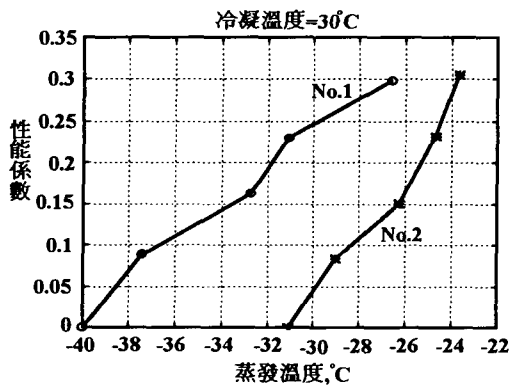
圖六: 增壓比對蒸發溫度

表一 二支噴射器各相關尺寸

項次	噴射器	No.1	No.2
噴嘴喉部直徑(mm)		3.207	3.207
混合腔與噴嘴喉部面積比		$A_d/A_t=8$	$A_d/A_t=10$
混合腔直徑, d (mm)		8.2	10
混合腔長度 L (mm)= $8d$		65	80
擴散器長度, L_{dij} (mm)= $12d$		98	120

圖九 噴射器壓力比

本計畫進行系統分析，並設計製造一台芻型機（儲冰系統的原型機）以驗證其可行性。實際測試結果顯示，對儲冰空調應用 ($T_e = -10^\circ\text{C}$)，雙級系統的 COP 比單級系統提升 15.1%(表一)。對一般冷氣空調的應用 ($T_e = 7.5^\circ\text{C}$)，採氣冷式設計時，雙級系統的 COP 比單級系統提升了 19.2%(表二)，圖十二。而上述這些性能提升均係在「遠設計點」(off-design)的運轉結果，並非最佳狀態，這也說明了在實務上，噴射式二元雙級冷凍系統的性能仍有很大改良空間。

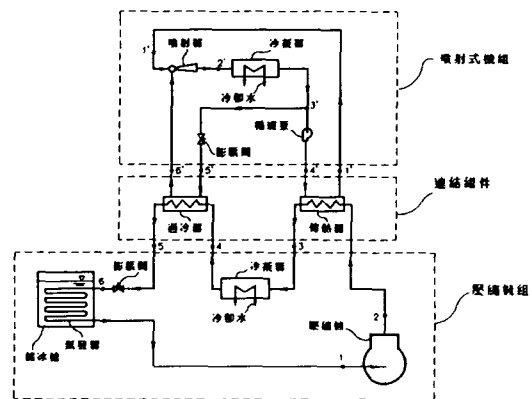


圖四: 性能係數對蒸發溫度

圖八 雙級單冷媒冷凍系統測試結果

子計畫四: 「雙級雙冷媒冷凍系統設計」

本計畫旨在開發雙循環冷凍系統，其係將噴射式機組搭載壓縮機組(圖十)，利用壓縮機吐出的高溫氣體廢熱來推動噴射式機組，其特點在於以噴射式機組過冷傳統壓縮機組的



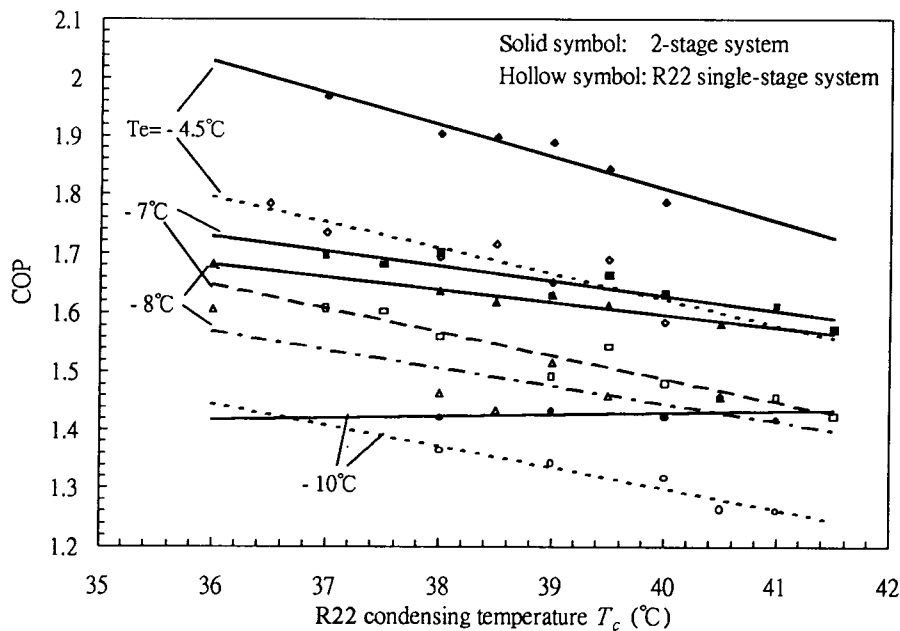
圖十 雙循環冷凍系統

表二、二元雙級系統與單級壓縮機系統之性能測試比較 ($T_e = -10^\circ\text{C}$)

R22 冷凝 溫度 T_c ($^\circ\text{C}$)	R22 單壓縮機系統			雙級系統			
	制冷量 Q_e (kW)	COP	EER (kcal/W-h)	制冷量 Q_e (kW)	COP	EER (kcal/W-h)	COP 提升 (%)
38	1.915	1.363	1.173	2.021	1.421	1.223	4.23
39	1.914	1.343	1.156	2.030	1.431	1.232	6.54
40	1.922	1.316	1.133	2.092	1.422	1.224	8.04
40.5	1.843	1.265	1.089	2.119	1.457	1.254	15.13
41	1.835	1.258	1.083	2.110	1.416	1.219	12.54

表三、二元雙級系統與單級壓縮機系統之性能測試比較 ($T_e = 7.5^\circ\text{C}$)

R22 冷凝 溫度 T_c ($^\circ\text{C}$)	R22 單壓縮機系統			雙級系統			
	制冷量 Q_e (kW)	COP	EER (kcal/W-h)	制冷量 Q_e (kW)	COP	EER (kcal/W-h)	COP 提升 (%)
40	4.389	2.33	2.01	4.562	2.41	2.07	3.18
42	4.376	2.28	1.96	4.562	2.35	2.02	3.04
45	4.311	2.18	1.87	4.482	2.22	1.91	2.14
47	4.345	2.10	1.81	4.433	2.16	1.86	2.78
50	4.121	1.91	1.64	4.364	2.04	1.75	6.65
53	3.883	1.73	1.48	4.398	1.92	1.66	11.35
55	3.777	1.66	1.43	4.528	1.98	1.70	19.23



圖十二 雙級系統與單級系統在低溫應用時之 COP 測試結果比較