

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高效率冷氣系統對變化負載之分析研究 ( III )

子計畫三：渦卷壓縮機之變速控制 ( III )

**Variable Speed Control of Scroll Compressor ( III )**

計畫編號：NCS-87-2212-E-009-034

執行期限：86年8月1日至87年7月31日止

總計畫主持人：盧定昶 交通大學機械系教授

子計畫主持人：金甘平 交通大學機械系副教授

## 一、中文摘要

變頻式冷氣系統主要是採用壓縮機馬達變速運轉的手法，來達成在負載變化時恆溫控制的目的。本計畫主要討論如何在壓縮機馬達變速運轉的同時，藉由控制電子膨脹閥開口度的大小來改變蒸發器出口冷媒的過熱度，使系統在不同轉速時，皆能維持在最高的使用效能下操作。

本年度計畫進行的主要工作有二：一是冷媒充灌量的最佳化；二是針對最佳化後的冷媒充灌量，鑑定渦卷式變頻壓縮機環路實驗系統在各運轉條件下之暫態及穩態特性，以求得最佳操作點，並據以建立數學模型及設計控制器，使得在不同壓縮機轉速時，皆能擁有最佳的系統效能。實驗結果顯示，將馬達變轉速指令設為斜坡輸入，並加上膨脹閥開口度之前置補償量後，即可改善控制模型不完善的缺失，並達到我們想要的控制結果。

關鍵詞：冷氣系統控制，壓縮機，電子膨脹閥，過熱度控制，冷媒充灌量最佳化。

A variable speed refrigeration system can continuously adjust its speed to match its loading condition. In order to obtain the highest system efficiency under various motor speeds, this project primarily focuses on the regulation of the superheat of the refrigerant at the outlet of the evaporator by controlling of the electrical expansion valve.

Two major tasks are carried out in this year's project, one is the optimization of the

quantity of refrigerant, and the other is to find out the proper operating range of the superheat, to establish superheat control models at each motor speed, and to design controllers under the optimized refrigerant condition. The experimental results show that, by setting the speed command of the motor to a ramp and by adding a forward compensation term to the controller of the electrical expansion valve, the response of the evaporator superheat can be improved and the desired result can be obtained.

**Keywords:** refrigeration system control, compressor, electrical expansion valve, evaporator superheat control, optimization of the quantity of refrigerant.

## 二、計畫緣由與目的

一般傳統冷凍系統之溫度控制，多以壓縮機時開時關的方式來進行。這種控制方式除了消耗較多電能外，亦容易降低壓縮機壽命，且其實際輸出溫度並非定值，而是在一範圍內上下振盪。因此若要使輸出溫度穩定並提高能源使用效率，採用可控制轉速連續變化之變頻式馬達，是一可行的方法。啟動時由低速連續增加至高速運轉，讓室內溫度快速降至預設溫度，再以較低轉速連續運轉，以維持室溫在固定的預設值，如此一方面可減少室內溫度波動，提高使用者的舒適度，且另一方面在長時間使用時，因壓縮機在低轉速連續運轉，效率較高[1][2]，也可減少因傳統啟閉控制法所造成之頻繁啟動耗能，達到節省

能源的效果。

要提高冷媒循環系統的效率，除了選擇高效率的壓縮機(如渦卷壓縮機[3])外，亦可由控制方式著手。蒸發器出口冷媒過熱度 (superheat)，對冷媒壓縮循環系統之效率有極大的影響[4]。在壓縮機馬達以固定轉速運轉時，當蒸發器出口冷媒過熱度愈低，則其性能係數值 (COP) 愈高，亦即循環系統整體效率愈好。反之，當過熱度升高時，系統效率亦相對變差。過熱度控制另一個重要的目的，在於當系統未裝置液汽分離器，或冷媒充灌量多過液汽分離器之額定運轉容量時，確保壓縮機入口處的冷媒狀態全為過熱氣體，以避免液壓縮造成壓縮機之損害[5]。

變頻式冷氣機系統中是以控制膨脹閥的開口大小來達成過熱度控制的目的。為配合變速時壓縮機冷凍容量變化需求，冷媒質量流率的控制範圍必須大幅度的增加。以往常用的感溫式膨脹閥靈敏度較低，很容易因為過熱度控制系統時間延遲 (time-delay) 的特性，使蒸發器冷媒狀態發生週期變動之追逐 (hunting) 現象，使得可供穩定控制的範圍不足[6]。為配合控制運算上的各種動態特性需求，避免過熱度的追逐現象發生，則必須採用可自由控制開度的電子膨脹閥。

由於過熱度在整個系統效率上佔有重要的地位，許多參考文獻[7]~[11]提出過熱度響應之數學模型。然而在實作上往往多所限制，例如參數的不可量測，或是因過度複雜的控制律，所造成數值運算上的問題。為避免因系統數學模型過於精密，文獻[12]直接於過熱度操作點附近進行步階測試，得到蒸發器出入口冷媒溫度，相應於電子膨脹閥開口變化的一階包含時間延遲之動態方程式，並定義過熱度為蒸發器出口冷媒溫度與入口溫度的差，再據以設計PI控制器，經穩定分析後得出可供穩定操作的範圍，最後並以實驗驗證控制結果。

本計畫所進行的工作即為針對我們已架設之渦卷式變頻壓縮機環路實驗系統，鑑定其在各運轉條件下之暫態及穩態特

性，以求得最佳操作點，並據以建立數學模型及設計控制器，使得在不同壓縮機轉速時，皆能擁有最佳的系統效能。

### 三、研究方法與成果

#### 3.1 實驗設備

本實驗設備是以R-134a為工作流體的冷凍循環系統(參閱[13])，主要元件包括渦卷式壓縮機，感應馬達與變頻器，雙套管式冷凝器、蒸發器，冰水機，恆溫水槽，電子膨脹閥，乾燥過濾器，液汽分離器，高低壓保護開關與視窗。在環路上並裝置了十組熱電偶計、四組壓力計與一流量計，透過資料擷取器，將所搜集的資料傳送至個人電腦。電腦除做最終的資料記錄外，並據以判斷計算，對電子膨脹閥和變頻器送出新的控制命令。

實驗中所使用的壓縮機為日本SANDEN株式會社所生產之汽車用渦卷式壓縮機，型號為 TRS-090。用以驅動壓縮機的馬達則為大同公司所生產的三相感應馬達，最大功率為 3hp，搭配飛瑞公司所生產之變頻器，最大轉速為 1700 rpm。馬達轉速的控制，則是透過研華公司所生產之 PCL-818 界面卡。冷凝器及蒸發器均為雙套管式熱交換器，皆分別以鋁殼包覆，內填發泡材料，以增加隔熱效果，提高實驗之準確性。冷凝器的作用在於將熱量排放到室外，故以一冰水機來維持恆定之室外側水溫；蒸發器的作用在於吸收室內熱能，所以使用有加熱功能之恆溫水槽來代表室內的溫度環境。

環路中所採用之電子膨脹閥為日本Saginomiya Seisakuso 公司所生產，型號 DKV-14D82 之步進馬達驅動型電子膨脹閥。控制方法是由個人電腦透過研華公司所生產之 PCL-838 步進馬達控制卡，經由步進馬達驅動器，對電子膨脹閥內之步進馬達施以半步激磁，以控制針閥的上下移動來改變膨脹閥的開口度，全開至全閉共有 480 pulses 的解析度。

本實驗系統環路上各點之溫度量測，

均採 T 型熱電偶計，並透過資料擷取器轉換而得。四組壓力計分別位於冷凝器進口，膨脹閥進出口兩端，和蒸發器出口處，均採 YOKOGAWA 壓力轉換計。冷媒體積流率乃是採用 EG&G 的 FT4-8 型渦輪式流量計 (Turbine Flowmeter) 來量測。以上所有的量測資料皆傳送至 YOKOGAWA 公司所製造之 DA2500E 資料擷取器，再透過 GPIB 界面卡，將所讀取到的數據傳回電腦，再利用程式運算處理後，獲得真實的冷媒壓力與流量。馬達的耗損功率則是以 YOKOGAWA 公司所出品之 WT130 功率計 (Power-meter) 量得，可直接測得每一瞬間的耗損功率。所有界面卡與實驗設備之架構請參閱文獻[13]之圖 2.4。

### 3.2 變頻式冷氣機冷媒填充量之最佳化

在實驗機臺上，於蒸發器出口處裝置有一液汽分離器，其目的是為了防止當冷媒充灌過多時，因熱交換量的不足，造成汽化的不完全，而產生液壓縮的現象。已知當冷媒質量流率及膨脹閥開度固定時，壓縮機轉速愈高，蒸發器出口過熱度愈高。但若裝置有液汽分離器時，當冷媒充灌超過冷凍循環所需量時，會有一部份冷媒以液態儲存於液汽分離器中，不參與循環的過程，並使過熱度的反應維持在零度，與轉速無關。又當液汽分離器中所有冷媒皆汽化時，膨脹閥的開口愈小，蒸發器出口過熱度愈大。因此冷媒充灌量最佳化的目的，在於以最少的冷媒充灌量，滿足壓縮機在各運轉頻率下，皆能任意的控制過熱度於所需要的值。而冷媒的充灌量，應以滿足當膨脹閥開度最大，壓縮機馬達運轉頻率最高時，蒸發器出口冷媒恰好到達飽和狀態為度。

為了達成冷媒充灌量最佳化之目的，我們將冷媒漸次的加入環路中，並分別量測在不同填充量時，當膨脹閥開至最大，各轉速下的過熱度、蒸發器排熱能力和 EER 值。本實驗中，最佳充灌量決定點是以壓縮機轉速 1600 rpm、膨脹閥全開 (480 pulse)、過熱度為 0 為基準，實驗結果顯

示，當冷媒充灌量為 1.07 kg 時為最佳充灌量，實驗結果請參閱[13]。同時，由實驗結果亦可看出，當膨脹閥開度與壓縮機轉速一定，液汽分離器不作用 (冷媒質量流率是由電子膨脹閥開度所控制) 時，冷媒充灌量愈多時，過熱度愈低，排熱量愈高，EER 也愈高，而當過熱度為 0 時，可得最佳的操作效能。

### 3.3 控制目標與簡化模型之建立

由前節討論可知，當冷媒填充量大於最佳充灌量時，不需使用電子膨脹閥，使用液汽分離器即可保持過熱度為 0，且可避免液壓縮的發生。但假設環路系統上並無液汽分離器，此時為了避免液壓縮的發生，控制上的基本要求，就是過熱度必須略大於 0 度，以保持不會因在運轉時的暫態響應，出現過熱度小於 0 的情況發生。

變頻式冷氣機的基本運作模式，啟動時，壓縮機馬達連續加速至高速，持續運轉，先讓室內溫度快速降至預設溫度，之後，再降回低轉速運轉，以維持室溫在固定的預設值。為了達成以上基本的目的，除了由已知的系統穩態特性，決定出過熱度最佳操作範圍外，亦必須針對操作點與所需要的運作模式，求得動態行為，以做為控制改良的依據。

為了解系統的暫態行為，我們在以下三種運作模式下進行實驗：(一) 固定膨脹閥開度，壓縮機由靜止以步階速度指令瞬間啟動至 1600 rpm；(二) 固定膨脹閥開度，壓縮機由 1600 rpm 瞬間降為 800 rpm；(三) 固定壓縮機轉速，膨脹閥開口度以步階增加 20 pulse。實驗結果[13]顯示，馬達速度瞬間改變後，過熱度會延遲約 15 秒，再瞬間劇烈地改變。假設環路系統上並無液汽分離器，控制目標可設定為：環路啟動時，立即以高速 (1600 rpm) 運轉，並控制過熱度不超過 10 度 (實驗結果顯示環路啟動時，過熱度在 10 度以下之系統排熱能力與 EER 值均大致相同)；當以低速運轉維持等溫時，控制過熱度在 6 度附近。如此，將可使冷凍環路擁有最佳

的排熱能力與系統效能。

### 3.4 控制器設計與穩定分析

針對前一節所確立的控制目標與數學模型，可以設計控制器，並進行穩定性分析。圖3.1為控制系統架構圖，其中 $T_{SH}^*$ 為過熱度控制命令輸入， $T_{SH}$ 為真實過熱度輸出， $G_c$ 為控制器， $G_p$ 為受控廠（plant），z-o-h 則代表零階保持器。

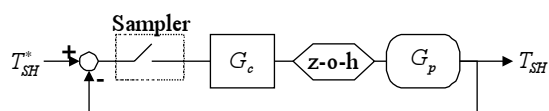


圖1 單位回授數位控制系統架構圖

本計畫採用之控制器為PI控制器，主要以 modified Z-transform 將前一節所導出之具時間延遲特性之過熱度模型數位化，並計算出控制器增益值之穩定範圍，在進行電腦模擬。詳細內容請參閱文獻[13]。

### 3.5 實驗結果與討論

依據變頻式冷氣機一般操作方式，我們將實驗分成三個部份，分別是啟動時過熱度的暫態控制、高轉速至低轉速的過熱度控制、以及低轉速至高轉速的過熱度控制。最後，將以上三部份結合，驗證整個實驗流程的可行性。實驗結果[13]顯示：  
一、當實驗環路系統啟動時，壓縮機馬達立刻以高轉速（1600 rpm）運轉，在最初的40秒內將電子膨脹閥全開，隨後電子膨脹閥開度控制器之PI增益值分別設為 $K_p = -2$ 、 $K_i = -0.6$ ，則可達到控制目標。  
二、變頻式冷氣機在室溫降至設定溫度後，會以較低轉速持續運轉以維持溫度平衡。因為假設未裝置液汽分離器，因此控制上的要求，除了過熱度低於 $7^\circ C$ 外，還要避免蒸發器出口冷媒過冷現象發生。本實驗時若將壓縮機轉速變化設為40秒的斜坡輸入，並給予一膨脹閥開度之前置補償量 340 pulses，隨後再以 $K_p = -0.4$ 、 $K_i = -0.16$ 之增益值控制，則既能達成過熱

度控制的目的，也不再發生蒸發器出口冷媒過冷的現象。

三、變頻式冷氣機操作上的另一特色，就是當負載增加（例如人數增加，電器火爐的使用等）造成溫昇時，壓縮機馬達會提高轉速以加速排熱。本實驗時若將壓縮機轉速瞬間增加（步階指令），並給予一膨脹閥開度之前置補償量 340 pulses，則控制效果最好，無明顯的 undershoot，轉速改變所造成的 overshoot 亦小，過熱度追逐震盪的現象也有明顯改善，確實達成全程過熱度小於 $7^\circ C$ 的控制需求。

四、在整合實驗時，先將蒸發器側水槽加溫至 $30^\circ C$ ，以模擬冷氣系統啟動前的室溫狀態。實驗開始後60秒，啟動馬達以1600 rpm 高速運轉，直到蒸發器入口水溫降到 $25^\circ C$ ，此時馬達轉速改為800 rpm，一直到最後300秒，再切換成1200 rpm 運轉。

因為蒸發器入口水溫比起之前所做實驗的蒸發器入口水溫皆較高，因此剛啟動時過熱度明顯維持較高的狀態有好一陣子，這是合理的現象。之後隨著入口水溫的下降，過熱度也能維持在7度以內，符合我們的要求。

### 四、結果討論

本年度執行之主要研究內容在於冷氣循環系統在啟動、減速、加速等各種操作條件下之控制。實驗結果顯示，將過熱度控制系統簡化成一階時間延遲模型，並針對此模型設計PI控制器，再搭配適當的壓縮機轉速指令及膨脹閥開度之前置補償量，就可合理應用於控制上的需求，並不需要以更複雜的控制方式增加控制硬體成本。

在實驗中我們發現冷媒充灌量對系統效率有極大的影響。例如在裝有液汽分離器之系統中，液汽分離器即可達到調節氣態冷媒量，使蒸發器出口過熱度維持在0度，且提高系統能源效率之功效。所以在一對一式的變頻冷氣中，並無裝設昂貴的電子式膨脹閥之必要。至於在一對多變頻

冷氣中，因為必須個別控制各子機之冷媒流量，故仍必須在各子機之蒸發器前加裝電子式膨脹閥，並進行蒸發器出口過熱度控制。

## 五、計畫成果自評

本年度計畫所進行的工作，主要分成兩部份。一是針對現有的實驗設備，進行冷媒充灌量的最佳化，二是針對充灌量最佳化後的系統，在假設無液汽分離器時，依據變頻式冷氣機的操作需求，設計電子膨脹閥在各運轉速度時過熱度的控制方法，並進行冷氣循環系統在各種操作條件下之控制實驗。其中針對充灌量之分析及實驗可達到省去電子膨脹閥、降低變頻式冷氣機成本之目的。此外，在針對冷氣循環系統在各種操作條件下之控制實驗方面，我們提出以簡化模型設計PI控制器，再搭配適當的壓縮機轉速指令及膨脹閥開度之前置補償量之控制方法，可滿足控制上的需求，達到降低控制硬體成本之目的，故具有相當之學術及應用價值。

## 六、參考文獻

- [1] 鄒中興，「變頻技術原理及對空調的應用」，*中國冷凍空調雜誌*，79頁，1994年2月。
- [2] 鄭智元，「變頻式冷氣機的效率分析」，*中國冷凍空調雜誌*，84頁，1994年2月。
- [3] Uchikawa, N., Terada, H., and Arata, T., "Scroll compressors for air conditioners", *Hitachi Review*, v.36, No.3, pp.155~162,1987.
- [4] Yasuda, H., Ishibane, K., and Nakayama, S., "Evaporator superheat control by an electrically driven valve", *Trans. of the JAR*, v.9, No.2, pp.147~156,1992.
- [5] 俞炳豐，王志剛，何曉明，「變頻空調器制冷系統充灌量的影響分析和確定原則研究」，西安交通大學能源與動力工程學院，西安，710049。
- [6] 汪仁雄，「電子式膨脹閥與蒸發器控制系統」，*冷凍空調技術雜誌*，1989年10

- 月。
- [7] Shoureishi, R. and McLaughlin, K., "Modeling and dynamics of two-phase flow heat exchangers using temperature-entropy bond graphs", *Proc. of American Control Conference*, 1984, pp.93~98, 1984.
  - [8] MacArthur, J.W. and Grald, E.W., "Unsteady compressible two-phase flow model for predicting cyclic heat pump performance and a comparison with experimental data", *Int. J. Refrigeration*, Vol.12, pp.29~41,1989.
  - [9] Wedekind, G.L., Bhatt, B.L., and Beck, B.T., "A system mean void fraction model for predicting various transient phenomena associated with two-phase evaporating and condensing flows", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.4, pp.97~114,1978.
  - [10] He, X., Liu, S., and Asada, H., "A moving-interface model of two-phase flow heat exchanger dynamics for control of vapor compression cycle", *Heat Pump and Refrigeration Systems Design Analysis and Applications*, ASME, pp.69~75,1994.
  - [11] He, X., Liu, S., and Asada, H., "Modeling of Vapor Compression Cycles for Advanced Control and Diagnostics in HVAC Systems", *Proc. of American Control Conference*, 1995.
  - [12] 安田 弘，石羽根久平，中山 進，"Evaporator Superheat Control by An Electrically Driven Expansion Valve", *日本冷凍協會論文集*，Vol.9，No.2，pp.147~156，1992。
  - [13] 蘇哲毅，*變頻式冷氣系統之過熱度控制*，碩士論文，交通大學機械系，民國八十七年。