

## 熱泵乾燥系統的溫溼度控制策略 Temperature-humidity control strategy for heat pump drying system

蔡貴義<sup>1</sup>、蔡峻銘<sup>2</sup>

Kuei-I Tsai<sup>1</sup> and Jyun-Ming Tsai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立勤益科技大學冷凍空調與能源系

<sup>1</sup>Department of Refrigeration, Air-Conditioning and Energy Engineering,  
National Chin-Yi University of Technology

E-mail : tsaiky@ncut.edu.tw

<sup>2</sup>國立勤益科技大學冷凍空調與能源系 碩士生

<sup>2</sup>Graduated student of Department of Refrigeration, Air-Conditioning  
and Energy Engineering, National Chin-Yi University of Technology

E-mail : ming7941@yahoo.com.tw

### 摘要

研究乾燥技術需從加快乾燥除濕速度、縮短乾燥時間和節約乾燥耗能著手，熱泵乾燥系統因其熱效率高、節能，並且能保持物料的品質而受到廣泛重視。

本文主要研究內容為：

1.分析熱泵乾燥系統的結構並提出在乾燥前期採用加裝輔助冷凝器的熱泵乾燥系統來加快乾燥過程，縮短乾燥時間，節約熱泵乾燥系統的耗能，採用輔助冷凝器的熱泵乾燥系統具有除濕快、縮短乾燥時間、節約乾燥能耗等優點。

2.發展熱泵系統輔助冷凝器之冷媒量控制，以雙電磁閥結合脈波寬度調變 PWM(Pulse Width Modulation)技術控制熱泵乾燥機系統，實現輔助冷凝器冷媒量控制及系統保護控制。本文配合使用 PID 回授控制，以脈波寬度調變方式控制電磁閥之開啟及關閉時間，如此透過硬體電路可實現脈波寬度調變控制進入輔助冷凝器和主冷凝器之冷媒量，達到控制精度的要求，進入輔助冷凝器之冷媒藉由電磁閥的切換，形成間歇性流量，並藉由調整責任週期( DUTY CYCLE )來達到控制冷媒流量之效果，達成高精密乾燥室溫濕度控制。

**關鍵字詞：**熱泵乾燥，節能，輔助冷凝器，脈波寬度調變

### Abstract

How to speed up moisture extraction rate , shorten drying time required and save energy during drying process , is being hot issues of both researchers and engineers . Due to its high thermodynamic efficiency , energy-saving and other features , heat pump many applications in drying processes

The main research contents of this paper are as follows :

1. Based on the analysis of heat pump drying system and moisture extraction process , this paper proposes a heat pump drying system employing an auxiliary condenser in order to accelerate drying process , thus shortening drying time required and save energy during drying process .

2. Heat pump dryer system is realized on this research. Innovating parallel dual-on/off valves (solenoid) with PWM (Pulse Width Modulation) control signal is implemented to control heat pump dryer system for refrigerant flow rate and temperature tracking control. In this research, we use hardware to realize PWM technique to control on/off valves open and close time. To implement pulse width modulation and not only cost down but also reach control precision of demand.

3. The aux-condenser and main condenser are controlled by parallel dual-on/off valves (named duty control) to achieve precision dry room temperature and humidity control.

**Keywords:** Heat pump drying 、energy-saving 、aux-condenser 、PWM(Pulse Width Modulation)

## 1. 前言

熱乾燥法中，傳統的電加熱乾燥法初期投資較少，但熱效率低，長期運行費用成本高，極不經濟。熱泵乾燥系統初期投資費用雖然較高，但其熱效率高，長期運行費用低，短時間內便能回收投資費用，有很好的發展和應用前景。

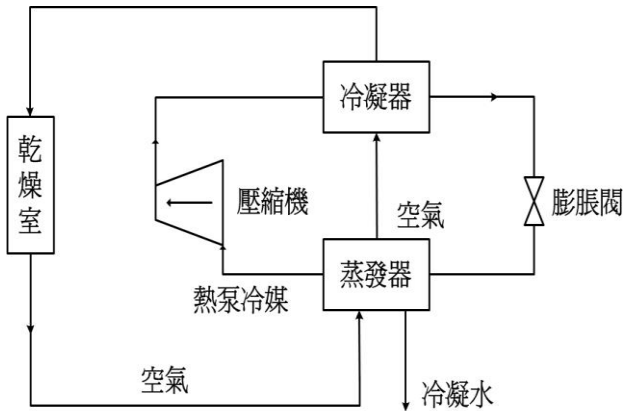


圖 1 閉式熱泵乾燥裝置示意圖

熱泵乾燥系統主要由熱泵系統(壓縮機、蒸發器、冷凝器、膨脹閥)和乾燥室組成。於乾燥室內主要是對濕物料乾燥，熱能以對流方式將溫度高、含濕量低的乾燥空氣傳給濕物料，使濕物料表面上的水分汽化。濕物料內部的水份以氣態和液態形式擴散至表面，再擴散到空氣中。

熱泵乾燥技術的特點，一份電能可以轉換為3~4 倍的熱能，而且整個乾燥過程在封閉的系統內進行，從乾燥室排出的低溫高濕空氣，通過冷凝器被加熱成高溫低濕的空氣，再進入乾燥室乾燥物，依次循環，達到乾燥的目的。

被乾燥物料想要獲得高質量的乾燥產品，必須對於乾燥環境的溫度和濕度進行精確的控制。熱泵乾燥機可以獲得較低溫度和相對濕度較低的乾燥環境，適合於農產品、藥材等熱敏性物料的乾燥。由於熱泵乾燥是一種溫和的乾燥方式，加熱溫度低，表面水分的蒸發速度與內部向表面熱傳導的速度比較接近，被乾燥物品的質量好，產品等級高。

調節熱泵乾燥機的蒸發器和冷凝器的溫度，可以實現乾燥的適時控制，更由於熱泵乾燥裝置使用的是電能，便於控制，乾燥過程中除了冷凝水，沒有任何廢氣、廢液排放，有利於環境保護。

本文控制策略係採用 PI-PD 回授控制，配合脈波寬度調整(Pulse Width Modulation, PWM ) 技術去調控進入輔助冷凝器之冷媒流量，以對熱

泵乾燥裝置的溫濕度進行 duty control。與傳統四通閥控制比較，duty control 可由 0%至 100%線性調整，其控制之閥體改為電磁閥，堅固耐用造價低更是其優點。

PI-PD 回授控制可充分滿足乾燥室溫溼度設定點追蹤(Set-point Tracking )以及抑制干擾(Disturbance Rejection)之製程條件。

## 2. 熱泵乾燥技術

### 2.1 熱泵乾燥技術的基本原理

熱泵乾燥技術，因其高效節能、熱效率高、除濕快並能完美地保持物料的品質而受到重視，熱泵乾燥機主要由蒸發器、冷凝器、壓縮機、膨脹閥和乾燥室五個部分組成。

熱泵乾燥工作原理：壓縮機把氣態的熱泵冷媒提高壓力和溫度後，在冷凝器放熱凝成液態，液態的熱泵冷媒經過膨脹閥膨脹，在蒸發器中吸熱蒸發，轉化成低溫低壓的氣態冷媒，氣態的熱泵冷媒進入壓縮機而完成熱泵冷媒的閉迴路循環。另外，經冷凝器加熱的乾空氣進入乾燥室，通過乾燥物成為濕熱空氣，然後進入除濕蒸發器析出水分並排到機外，降低溫度和濕度後的乾空氣在經冷凝器加熱進入乾燥室，完成空氣的閉迴路循環。

熱泵的效率可用熱泵性能係數(coefficient of performance, COP)來表示，定義如下：

$$COP = \frac{\text{高溫下熱泵輸出的有能量}}{\text{壓縮機消耗的電能}}$$

也可用除濕率(SMER)來表示，定義如下：

$$SMER = \frac{\text{水分蒸發量}}{\text{輸入的能量}} \text{ kg/(kW}\cdot\text{h)}$$

### 2.2 熱泵乾燥系統除濕乾燥過程

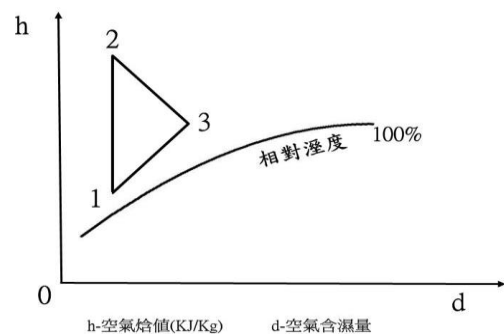


圖 2 熱泵乾燥系統空氣側循環圖

如圖 2 所示，經冷凝器加熱後的高溫、低濕空氣在風機的驅動下進入乾燥室(圖中 2 點)，等焓吸取濕物料中的水分後溫度降低相對濕度增加(圖中 2-3 過程)。溫度低、相對濕度高的乾燥室出口空氣進入蒸發器(圖中 3 點)，在蒸發器中除去其大部分含濕量並降低其溫度。濕空氣在蒸發器中的降溫、除濕過程如圖中(3-1)過程。經蒸發器降溫、除濕後的低溫、低濕空氣進入冷凝器吸收高溫、高壓冷媒在冷凝器中冷凝釋出的冷凝熱後，溫度升高，相對濕度降低(圖中 1-2 過程)。

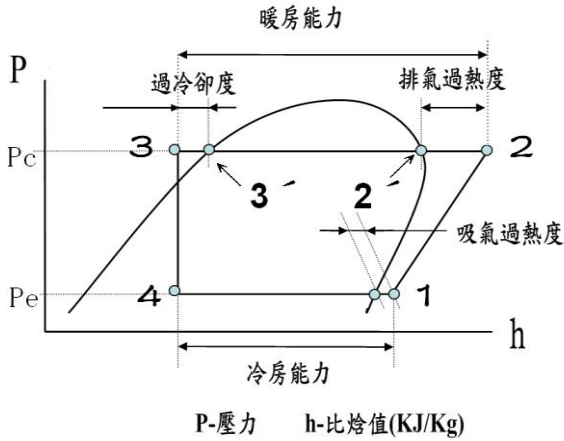


圖 3 熱泵乾燥系統冷媒側循環圖

如圖 3 所示過熱的低壓冷媒蒸氣(圖中 1 點)在壓縮機中被壓縮至高溫、高壓狀態(圖中 2 點)。壓縮機出口排出的高溫、高壓氣態冷媒在冷凝器中被空氣之散熱冷卻為常溫之液態冷媒(圖中 3 點)。高壓常溫液態冷媒經冷媒控制器之降壓節流後，成為低壓低溫之液態冷媒進入蒸發器(圖中 4 點)。低溫、低壓冷媒在蒸發器中蒸發、氣化，吸收從乾燥室出口進入蒸發器中的溫度低、相對濕度高的空氣中的潛熱和顯熱後進入壓縮機吸氣口(圖中 4-1 過程)。熱泵乾燥系統的除濕能力取決於蒸發器的除濕能力和冷凝器的溫升能力。要提高熱泵乾燥系統的除濕能力必須降低蒸發溫度和提高冷凝溫度。因此，實際進行熱泵乾燥系統設計、運行時必須綜合考慮熱泵乾燥系統的除濕能力要求和系統的熱力學第一、第二定律效率的要求。

### 3. 熱泵乾燥系統介紹

本文提出一個新型加裝輔助凝器的熱泵乾燥系統，如圖 4 所示：

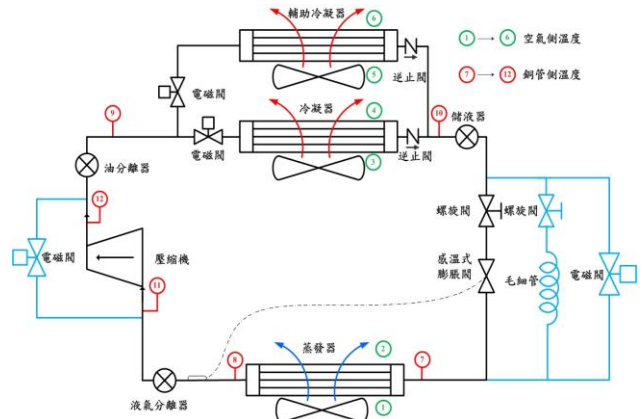


圖 4 熱泵乾燥系統實驗平台

配合使用 PID 回授控制，以脈波寬度調變方式控制電磁開關閥之開啟及關閉時間，控制進入輔助冷凝器和主冷凝器之冷媒量，並藉由調整責任週期( DUTY CYCLE )來達到控制冷媒流量之效果，達成高精密乾燥室溫濕度控制。

### 4、熱泵乾燥裝置控制原理

#### 4.1 PWM duty control 基本原理

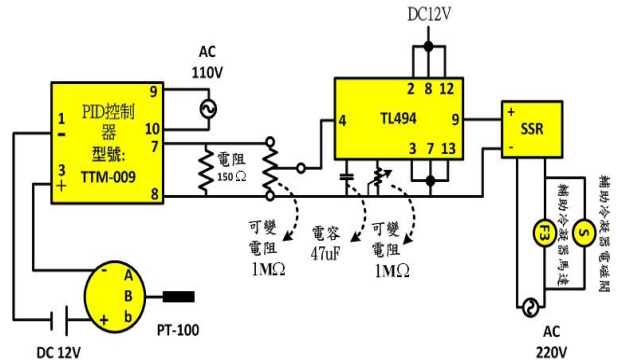


圖 5 PWM 控制策略示意圖

脈寬調變(Pulse Width Modulation, PWM)是利用不同波寬 0 與 1 的數位訊號來模擬類比輸出的一種控制，本熱泵輔助冷凝器之冷媒量控制係將 PWM 之觀念延伸至冷媒分流設計上，應用 PWM 控制電磁閥，並非控制電磁閥口之開度，而是控制電磁閥開啟的時間，進而控制時間內通過電磁閥的冷媒流量。這樣的控制方法與控制閥的開口大小在單位時間內控制流過的冷媒總量有相同的功效，同時亦可達到熱泵壓縮機保護和系統高壓過高之防止以及節能 and 精密溫溼度控制的目的。PWM 之觀念延伸至熱泵乾燥機控制上，其控制策略之示意如圖 5 所示，以輸出溫濕度值與設定值之誤差，來做為一週期(本文中為 20 秒)總冷媒量與動作次數計算之依據，在相同效果下，應用 PWM 可取代傳統四方閥之控制方



式，可提升熱泵系統之 COP 以及乾燥室溫溼度調控性能。

PWM 之優勢如下：

- (一) 配合 PID 控制器可得 0~100% 冷媒量線性控制，由控制策略設定的啟閉條件判定電磁閥之啟閉，作冷媒量之線性分配，配合 PID 回授控制可很完美的達 0~100% 之 duty control。
- (二) 增進熱泵乾燥系統之除濕及乾燥效率
- (三) 可保護熱泵乾燥系統之正常運作及維持最佳化性能。

動作流程如圖 6 所示

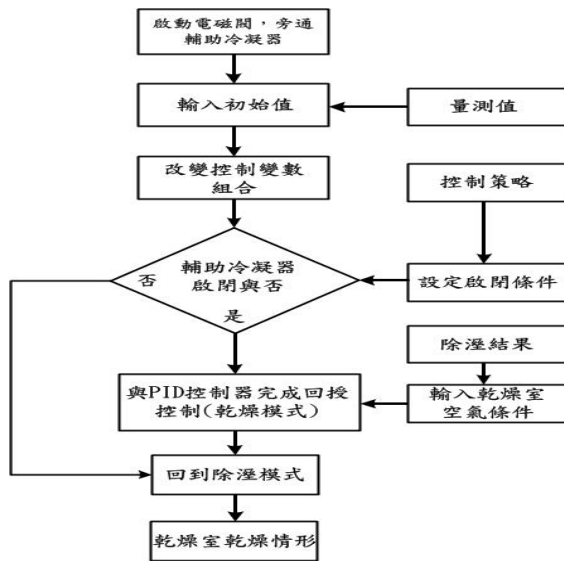


圖 6 熱泵乾燥系統動作流程

#### 4.2 PID 控制原理與實現

傳統 PID 控制器有三個參數(比例、微分、積分)需要調整，我們可以透過系統辨識求出被控系統(製程)之轉移函數，進一步獲得此控制系統的臨界振盪週期  $T_u$  及臨界增益  $K_u$ ，再利用 Ziegler-Nichols 經驗法則 ( $K_p = 0.6 K_u$ ， $T_i = 0.5 T_u$ ， $T_d = 0.125 T_u$ ) 來得到控制器之各個參數值。在傳統的 PID 控制演算法則裡，其比例、積分和微分動作皆在順向路徑上進行，以此方式依設定點和輸出之間的偏差上做修正動作，如此可能導致微分的突變現象(derivative kick)。再加上傳統 PID 控制器架構上的限制及三個參數之間互有影響，故同時要達到設定點追蹤(Set-point Tracking)以及抑制干擾(Disturbance Rejection)這兩大部份是相當困難的。

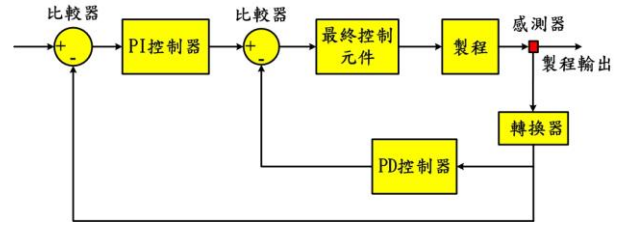


圖 7 PI-PD 控制架構圖

為了克服以上的問題，在順向路徑上採用 PI 控制，而在回授路徑採用 PD 控制，如圖 7 所示的結構即是一個 PI-PD 策略控制的架構。

以傳統 PID 控制器各參數為基準，可寫出下式：

$$G_{PID}(s) = K_p^* \left( 1 + \frac{1}{T_i^* s} + T_d^* s \right) \quad (1)$$

在圖 7 PI-PD 控制架構中  $G_p(s)$  是被控系統的轉移函數， $G_{Pi}(s)$  和  $G_{Pd}(s)$  分別為 PI 和 PD 控制器轉移函數。PI-PD 控制策略中其  $G_{Pi}(s)$  及  $G_{Pd}(s)$  參數值之求法如下：

$$G_{Pi}(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2)$$

$$G_{Pd}(s) = K_f (1 + T_d s) \quad (3)$$

$$K_c = \frac{\beta K_p^*}{1 + \beta} \quad (4)$$

$$K_f = \frac{K_p^*}{1 + \beta} \quad (5)$$

$$T_i = \frac{\beta T_i^*}{1 + \beta} \quad (6)$$

$$T_d = (1 + \beta) T_d^* \quad (7)$$

經由實驗得知：

- (1)  $K_p^*$ 、 $T_i^*$ 、 $T_d^*$  為利用 PID 參數調整方法 (Ziegler-Nichols 經驗法則) 求得。 $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  這三個參數是一般 PID 控制器的調整數值，所以在實務上 PI-PD 調整策略為將  $T_d$  值設為零即為 PI 控制器，將  $T_i$  值設至無限大即為 PD 控制器。

- (2)在製熱及製冷系統控制中，(4)–(7)式之  $\beta$  值取 0.25 能得到最佳之性能控制，且系統時間常數  $T$  愈大  $\beta$  值應再增加。
- (3)欲實現現場 PI-PD 實務控制，本文採用兩個普通市售通用 PID 控制器形成雙 PID 結構，如圖 8 所示。

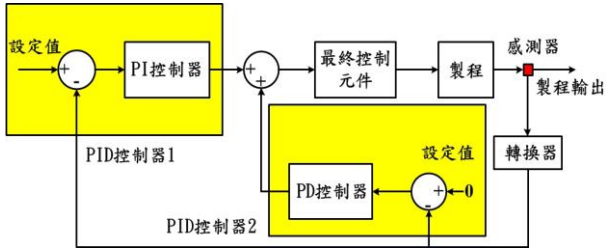


圖 8 用兩個普通 PID 控制器實現現場控制

### 5. 結果與討論

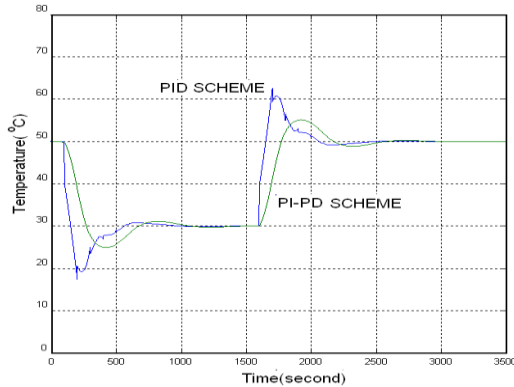


圖 9 PI-PD 策略與傳統 PID 控制之性能比較

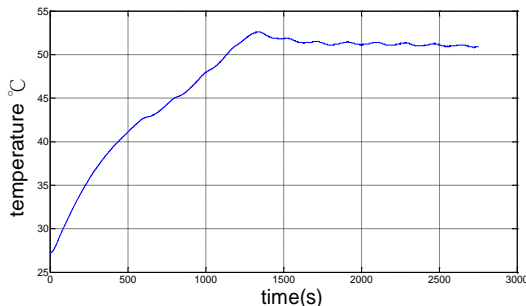


圖 10 熱泵乾燥控制溫度曲線

本文控制策略係採用 PI-PD 回授控制，配合脈波寬度調整(Pulse Width Modulation, PWM) 技術去調控冷媒流量，以對熱泵乾燥裝置的溫濕度進行 duty control。與傳統四通閥控制比較，duty control 可由 0%至 100%線性調整，其控制之閥體改為電磁閥，堅固耐用造價低更是其優點。PI-PD 回授控制可充分滿足設定點追蹤(Set-point Tracking) 以及抑制干擾(Disturbance Rejection) 之製程條件。圖 9 為 PI-PD 策略控制與傳統 PID

控制之性能比較。

藉由脈波寬度調整(Pulse Width Modulation, PWM) 技術搭配 PID 回授控制，達成高精密乾燥室溫濕度控制，圖 10 為溫度控制實現圖。

### 6. 結論

乾燥過程是一個非穩態傳熱傳質過程，因此在乾燥過程中各狀態點控制參數值有較大幅度變化，手動調節難度大，所以自動化控制尤其重要。將感測及控制技術結合起來應用於熱泵乾燥加工，如 PID(比例積分與微分)控制法和 PWM duty control 相結合，可提高熱泵乾燥機乾燥介質的控制精確度。

本文所提熱泵乾燥技術具有乾燥除濕快、熱效率高和顯著的節能效果，在常溫下即可獲得較為理想的乾燥速度，大幅度節省資源，且提高產品的品質，經濟效益顯著，並可改善工作環境。提高乾燥溫度，開發新型熱泵乾燥系統，充分應用現在測試技術、及自動控制技術、將是熱泵乾燥技術今後的主要發展方向。

### 7. 誌謝

本研究為低溫熱泵乾燥裝置的研製及其控制策略計畫編號 NSC101-2622-E-167-020-CC3 之計畫，由於國科會產學合作的支持，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

### 8. 參考文獻

1. Kaya I., Tan N. and Atherton D.P., "Simple procedure for improving performance of pid controllers," Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, vol.2, pp. 882-885, 2003.
2. Hasatani, M.; Kobayashi, N.; Li, Z. Y. Drying and dewatering R&D in Japan. Drying Technology, V01. 19, No. 7, 2001, 1223-1251.
3. Shibata, H.; Ide, M. Combined superheated steam and microwave drying of sintered glass beads: drying rate curves. Drying Technology, V01. 19, No. 8, 2001, PP. 2063-2079.
4. 林宗輝, DIGITIMES Inc, PWM 控制 IC 解決方案, 2007
5. Michael Barr, global sources, 脈寬調變的基本原理及其應用實例, 2002