

Study of Furnace Temperature Control Based on Grey-Fuzzy Theory

Ming-Han Tsai
iGraduate Institute of Mechanical and
Electro-Mechanical Engineering
Taipei, Taiwan
TEL:+886-2-86317423
E-mail: 602370321@s02.tku.edu.tw

Jr-Syu Yang
Graduate Institute of Mechanical and
Electro-Mechanical Engineering
Taipei, Taiwan
TEL:+ 886-2-26215656 ext.3275
E-mail: 096034@mail.tku.edu.tw

Abstract

The research aim of this thesis is to design a temp controller using Grey-Fuzzy theory to direct a forced convection oven. Therefore, the controller doesn't need an accurate math model to work; rather by only using the data of the plant and Grey prediction's error of change, the control output can be obtained and the temperature can be controlled effectively. This study includes oven mechanism design, control route planning, temp controller design, mechanism design and their actual production. First, the oven mechanism uses Solidworks to create a model, and then fitting materials are selected for its manufacture. The control route utilizes AutoCAD to plan the control and power circuitry; then the standards compliant elements are selected for installation. Temp control achieves regulation through PLC and uses the temperature measurement module for data collection. Finally by combining the electronics and mechanical apparatus, temperature control is reached based on Grey-Fuzzy theory.

Keywords: Temperature control, Fuzzy control, Grey prediction

灰模糊理論在爐溫控制之研究

蔡明翰

淡江大學機械與機電工程學系

新北市淡水區英專路 151 號

TEL:+886-2-86317423

E-mail: 602370321@s02.tku.edu.tw

楊智旭

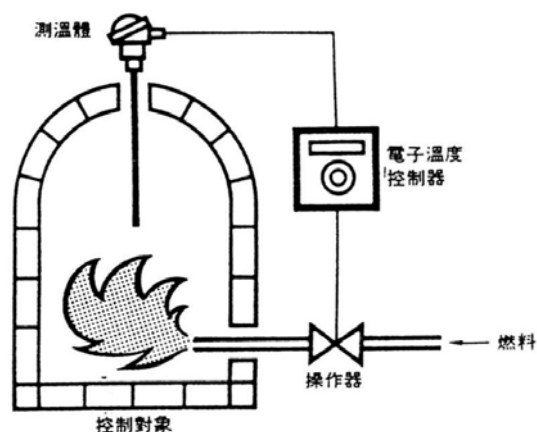
淡江大學機械與機電工程所

新北市淡水區英專路 151 號

TEL:+ 886-2-26215656 ext.3275

E-mail: 096034@mail.tku.edu.tw

摘要-本研究是針對熱風循環烘箱設計一套以灰預測結合模糊控制理論的溫度控制器，因此控制器不需要建立精確的數學模型，只需將受控場的溫度資料及灰預測之誤差變化率倒入模糊決策來控制電熱輸出量，進而達到溫度控制。本研究包括腔體機構設計、控制迴路規劃、溫度控制器設計及機電整合設計與製作。首先腔體機構設計利用工程繪圖軟體(SolidWorks)建立模型，並挑選合適材質進行製作，控制迴路是使用電腦輔助設計製圖(AutoCAD)將動力及控制線路規劃，並挑選符合電器規範的控制元件進行裝配，溫度控制器則是以可程式控制器(PLC)做為控制架構核心，並搭配溫度收集模組進行溫度資料收集，最後將上述各部進行整合達到以灰預測及模糊控制進行腔體溫度控制之目的。



圖一 溫度控制流程圖

關鍵字：溫度控制、模糊控制、灰預測

一、前言

隨著現今科技發展，加熱製程已成為許多產業不可或缺的製造流程，因應不同的產業也會使用不同的加熱設備(表一)[1]，以晶圓製程為例，烘箱內高低溫度的變化下通常導致晶圓的良率不佳，如果於製程中能使晶圓的溫度均勻，所得到的良率會提高許多，因此如何在熱處理製程中提供均勻溫度一直是一個重要的課題，如果要將溫度控制得當，精準的溫度控制器更顯得相形重要，溫度控制流程如圖一，包含三部分：測溫體、操作器及溫度控制器。

1. 測溫體：溫度感測的主要元件，它把溫度變換成電氣訊號，用管子保護安置於想保持恆定溫度的部位。
2. 操作器：使爐、箱加熱或冷卻設備動作的電磁開關及電磁閥等元件。
3. 溫度控制器：接受測溫體的電氣訊號，並且和目標值進行比較，然後向操作器輸出控制訊號的元件，假設溫度控制器內有大容量的電磁電驛，可以兼具操作器的功能[2]。

二、文獻探討

2.1 灰色系統理論

灰色系統理論(Gray System Theory)[3]，是由華中理工大學自動控制與計算機學系的鄧聚龍教授於 1982 年提出，該理論主要是針對系統模型之不確定性及資訊不完整的情況下，進行關於系統的關聯性分析(Relational Analysis)和模式構建(Model Construction)，並藉由預測與決策的方法來探討及了解系統。灰色理論本質上有別於傳統之預測方法具有不需要大樣本量與特定分佈型態等特性。傳統的模式構建方法只限於差分方程與離散模型，因此不便於描述經濟學、生命科學、生物醫學等系統內部的物理或化學過程的本質，而灰色系統建立的模式都是微分方程的時間連續模型，所以在使用上沒有間斷性的困擾，並且現有的系統理論分析，大多採用迴歸分析，有著需要大量數據、資料分佈規律和計算式相當龐大等限制。灰色理論的優點為數學模式簡單、數據資料少(至少需要四筆資料)、計量少、不需要豐富的統計知識，只需將資料適當處理即可。此外，對於訊息不完整或資料數過少的系統環境中，灰色理論亦能發揮他的強健性。灰色預測理論方法可歸納為下列幾點：

1. 灰色生成(Grey Generating)

灰色生成為補充訊息的數據處理，是一種就數找數、尋找數據規律的方法。亦是在雜亂無章的數據中，設法將被遮掩的規律和特性浮現出來。換言之，即利用灰色生成的方法降低數據中的隨機性，提高其規律性。生成處理的方法為累加生成(AGO)，還原的方式為逆累加生成(IAGO)。原始數據經累加生成運算後會產生明顯的指數規律性，這是光滑離散函數的一項性質，已有詳細之數學證明。

2. 灰色模式(Grey Model)

利用灰色生成後的數據建立一組灰差分方程(grey difference equation)與灰擬微分方程(pseudo differential equation)之模式，稱為灰色模式。灰色模式一般可分為下面幾種：

- (1) GM(1, 1)模式：表示一階微分，單變數，一般做預測用。
- (2) GM(1, N)模式：表示一階微分，N個變數，應用於多維關聯分析。

3. 灰色預測(Grey Prediction)

- (1) 灰色預測：以GM(1, 1)模式為基礎，對現有數據進行時間數列預測，為最簡單的預測模式。
- (2) 系統預測：結合 GM(1, 1)模式和 GM(1, N)模式，對系統中多個變數進行預測，以了解變數彼此間的關係。

2.2 灰色預測

灰色預測是以GM(1, 1)模型為基礎，GM(1,1)模型亦可以稱為灰預測模型[4]。灰色預測模型的優點是能利用少數幾個輸出值，即可建立灰色模型來近似系統輸出的動態行為，在此將針對數據預測做一個說明。

首先假設原始數列為一非負序列

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(k)) \quad (1)$$

其中 $k = 1, 2, 3, \dots, n; n \geq 4$

定義 $x^{(1)}$ 為 $x^{(0)}$ 一次累加生成，亦即

$$x^{(1)} = AGO\{x^{(0)}\} = \left(\sum_{k=1}^1 x^{(0)}(k), \sum_{k=1}^2 x^{(0)}(k), \dots, \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \right) \quad (2)$$

建立灰預測GM(1,1)之模型

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (3)$$

其中： $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k+1)$

a 為發展係數， b 為灰作用量。

為求得 a 與 b 二個參數，先計算平均值 $z^{(1)}$ 矩陣與矩陣 Y ，而構造數據矩陣 B 與數據向量 Y

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ x^{(0)}(4) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ -z^{(1)}(4) & 1 \\ \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

此時可由最小平方法 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$ 求解 a 及 b 值。接著將 a 及 b 代入，以一般常微分方程求解，可以得到

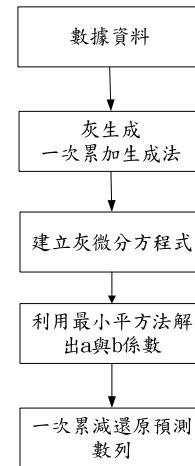
$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1))e^{-ak} + \frac{b}{a}(1 - e^{-ak}) \quad (4)$$

接著做一次逆累加生成(IAGO)

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (5)$$

便可以求得原始數列

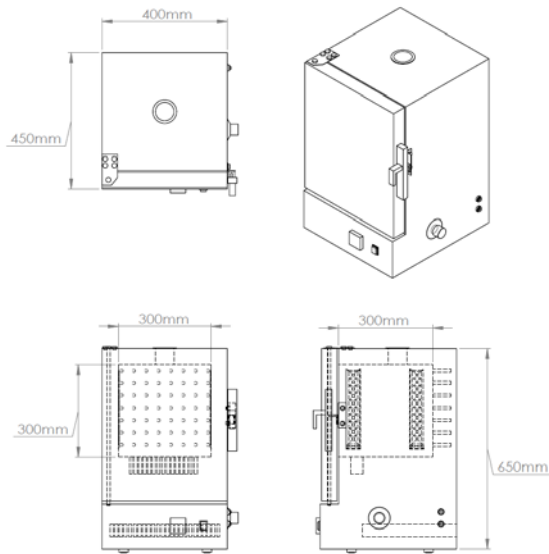
$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^a)(x^{(0)}(1)) - \frac{b}{a}e^{-ak} \quad (6)$$



圖二 灰色預測流程

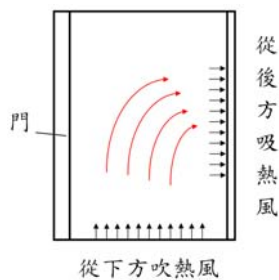
三、研究設備

腔體設計需要能與外界溫度隔閡，因此設計雙層腔體如圖三，內腔體及外腔體中間斷熱材質使用岩棉，因為岩棉不但可以隔熱，並且為防火材質。外腔體尺寸為 W400*D450*H650mm，選用材質為 SECC 鍍鋅鋼板烤漆，鍍鋅鋼板有良好耐腐蝕性及抗酸功能，內腔體尺寸 W300*D300*H300mm，內容積為 27L，材質選用 SU#430 不鏽鋼板，有膨脹率低、耐氧化、抗腐蝕性好及易加工等優點[5]。



圖三 腔體三視圖

腔體內加熱元件使用1200W不鏽鋼電阻式電熱，循環系統使用耐高溫直軸馬達，並且安裝多翼式渦流葉扇，腔體內部進行垂直送風，如圖四所示。



圖四 腔體垂直送風示意圖

固態繼電器簡稱SSR，又稱為無接點繼電器，是利用SCR及Triac等功率元件控制負載。依照輸入訊號的不同，可以分為交流型和直流型二種，交流型亦有單相及三相用兩種。固態電驛主要是應用於頻繁並且高速啟斷的負載，因為高速啟斷的場合如果使用傳統的機械式電磁接觸器，接觸器將會很快的折損。普通用途的SSR，開閉週期壽命可達十萬次以上[6,7]。



圖四 SSR 外觀

本文的實驗使用 K type 熱電偶，K type 型式熱電偶構成正端是使用鎳鉻合金，負端使用鋁鉻合金，溫度範圍為-270~1372°C，接點型式為露出型，具有反應時間快及靈敏度高等優點[8]。

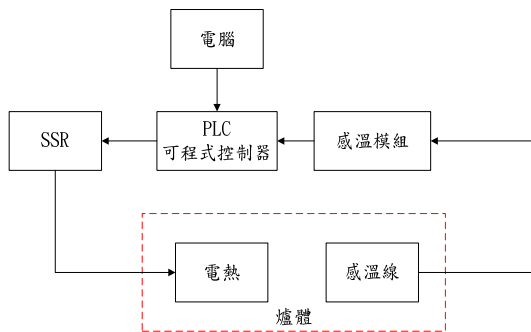
可程式邏輯控制器 (programmable logic controller: PLC) 是一種以數位動作的電子裝置，使用可程式記憶體以儲存指令，用來執行邏輯、順序、計時和計數等演算功能，並且透過輸出接點控制受控對象。主要的特性是使用模組化的概念，省去一些基本而繁雜的電路配線，而且控制方式簡單、程式修改編輯容易、擴充性強與穩定性高，在工業自動化中扮演相當重要的角色。本研究使用的可程式邏輯控制器 (圖六)，型號為台達 DVP20EX200R[9]，該機台擁有 12 組(8DI 及 4AI) 輸入、8 組(6DO 及 2AO) 輸出，掃描時間為 1ms，程式容量 16k steps，內建 RS232 通訊埠。PLC 擔任第一線的控制器，為整體控制器之核心。主要工作包含邏輯運算、輸入輸出及程序控制等，經由台達軟體 ISPSOft 做撰寫及編譯，並且使用電腦透過 RS232 傳輸將程式載入到可程式控制器中，本研究類比模組使用台達 DVP04TC-E2，該類比模組為 4 通道溫度量測模組，可以直接擴充於 PLC 主機後，並且可以直接將熱電偶之溫度訊號轉換為電訊號傳入 PLC 中，精度為 $\pm 0.6\%$ 。



圖六 可程式邏輯控制器

四、研究方法

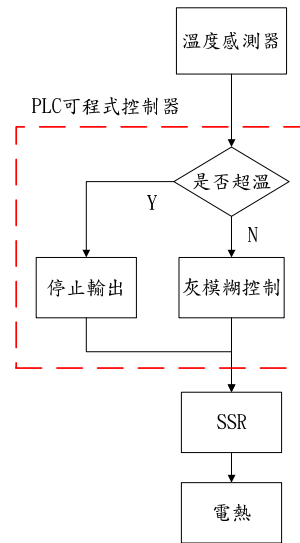
硬體部分除了電器零件需選用符合法規之安全元件外，電線也要參考安全電流表來做選擇，本研究控制線路選用 20AWG 絞線，最大耐電流約可達 11 安培，而交流電部分使用黃色線，直流電部分使用藍色線，連接電熱管部分因會有部分線路連接到加熱室，因此連接電熱線路部分使用包紗耐熱線，最高溫度可達 200°C。另外本研究除了控制器必須設計超溫斷電外，另外還安裝了機械式超溫保護裝置。機械式超溫保護器感溫點安裝於電熱室，目的為當電熱異常升溫時能即時切斷電熱，達到超溫保護之功能，本腔體兼具硬體及軟體超溫保護功能，達到操作人員安全之目的。硬體接線部分首先為啟動開關，啟動後啟動燈亮、風扇馬達運轉，PLC 收集溫度後，並且做灰預測及模糊控制處理，再將訊號輸出至 SSR，並以 SSR 驅動電熱，並輔以馬達風扇加速爐內均溫。在加熱途中如果溫度異常升高，安裝於電熱室之機械式超溫保護器隨即切斷電熱，並由 PLC 停止對 SSR 輸出加熱訊號，達到升溫異常停止加熱之安全機制。另外於超溫時風扇馬達持續運轉，達到溫度均勻散熱之效果。



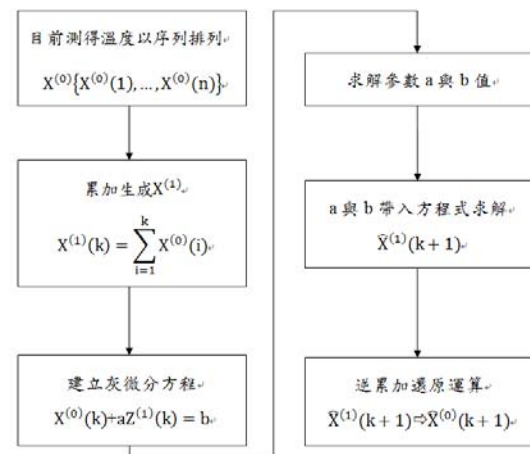
圖七 控制系統示意圖

軟體部份控制核心為 PLC 可程式控制器，利用電腦撰寫台達 ISPSOFT 軟體，並且使用 RS232 傳輸線將資料傳輸至 PLC，程式部分包含對目前已知溫度進行灰色預測分析及對電熱進行模糊控制及升溫異常斷電熱功能，達到以灰模糊進行爐溫控制及安全保護功能。

本研究以灰色預測 GM(1,1) 模式，由感溫線測得目前溫度預測未來一筆或更多之溫度，並且利用預測之數據減去前一筆預測之誤差變化量做為控制器輸入值，灰色模型預測方法流程圖如圖九所示。

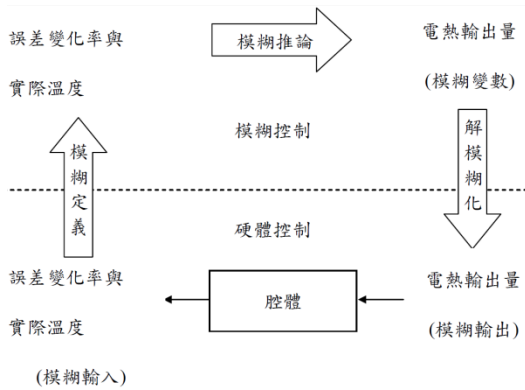


圖八 系統流程圖



圖九 溫度進行灰預測流程

為了使爐內溫度持續在目標值內，本研究採用模糊控制來進行溫度控制，模糊控制器與腔體結合之架構如圖十，將灰色預測之誤差變化率 Δ_e 與目前測得溫度值 T_A 做為模糊控制之輸入值，電熱的輸出量 H_o 為輸出值，控制流程為將實際溫度值模糊化後轉為模糊變數，再經由模糊推論與解模糊化後得到一個最佳的控制變數，進而達到溫度控制之效果。



圖十 腔體模糊控制架構圖

模糊控制器首先利用歸屬函數將輸入訊號轉換成模糊可接受的模糊量，輸入部分採用三角形歸屬函數，變數為四種型態，根據溫度的模糊定義分別為過低(OL)、低(L)、中(M)及高(H)四種，再將輸出的電熱量分為五種型態：0%(ZO)、25%(PS)、50%(PM)、75%(PB)及100%(PBB)，控制器的規則庫(表三)共有十六條規則，以下就其中一條規則為例加以說明。

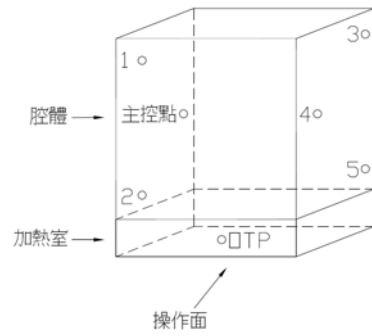
If T_A is L, Δ_e is M, Then H_o is PBB.

表三 模糊控制規則庫

	H	M	L	OL
OL	PBB	PBB	PBB	PBB
L	PBB	PBB	PB	PB
M	PBB	PB	PB	PB
H	PB	PB	PM	PS

五、實驗假設

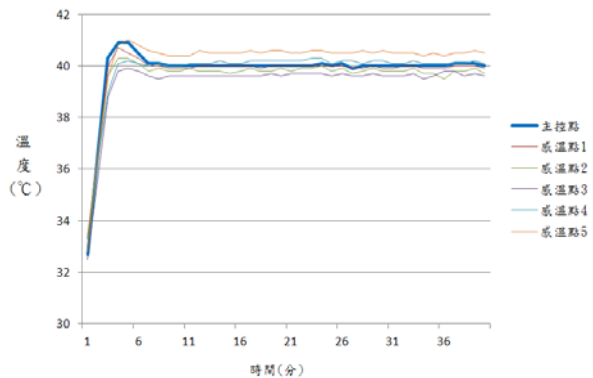
在處理溫度控制時，除了控制器的設計之外，也要選用適當的溫度感測器，並且放置在適當的感測位置，同時要特別注意溫度感測會有熱傳效應而導致落後的問題，因為熱傳效應可能導致系統溫度偏離，甚至發生不穩定的現象，因此於實驗設計上除了採用熱風循環使溫度能快速分佈均勻。另外安裝了五條感溫線及一點機械超溫保護裝置(OTP)，佈線方式如圖十一，達到多點偵測確保均溫之效。實驗分別以40、90及125度進行40分鐘之測試，觀察六點溫度的分布情形。



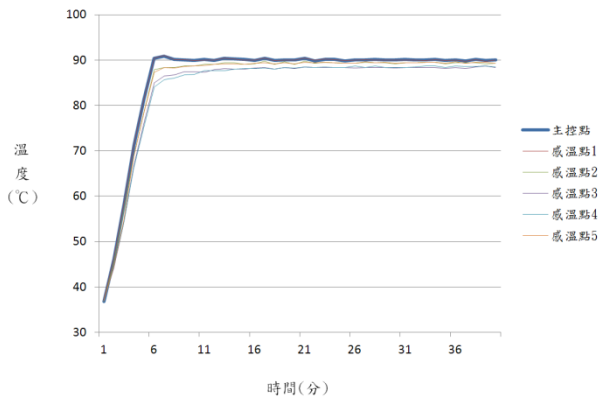
圖十一 感溫線佈線圖

六、實驗結果

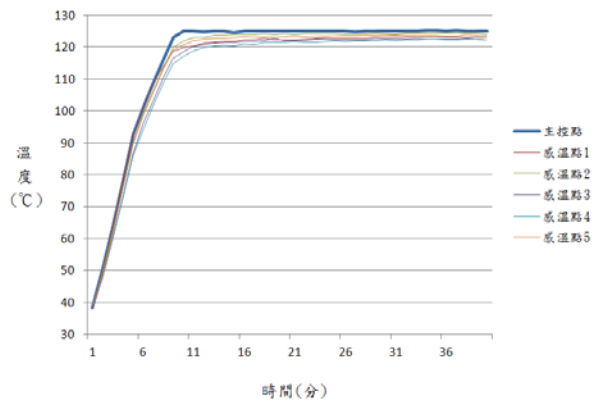
- 目標值設定為 40°C，由常溫開始加熱至目標值，觀察 40 分鐘後，六點溫度曲線圖如圖十二所示，由實驗結果可以發現腔體內部於 6 分鐘進入恆溫段，但由於目標溫度與常溫太過接近，因此有造成些微的超溫現象，溫度最高至 40.9°C，主控點於恆溫段達±0.1°C，腔體均勻度達±1°C。
- 目標值設定為 90°C，由常溫開始加熱至目標值，觀察 40 分鐘後，六點溫度曲線圖如圖十三所示，由實驗結果可以發現腔體內部於 8 分鐘即進入恆溫段，溫度最高至 91°C，主控點於恆溫段達±0.2°C，腔體均勻度於 15 分鐘後達±2°C。
- 目標值設定為 125°C，由常溫開始加熱至目標值，其觀察 40 分鐘後，六點溫度曲線圖如圖十四所示，由實驗結果可以發現腔體內部於 10 分鐘即進入恆溫段，溫度最高至 125.2°C，主控點於恆溫段達±0.2°C，腔體均勻度於 15 分鐘後達±4°C。



圖十二 40°C 溫度曲線圖



圖十三 90°C 溫度曲線圖



圖十四 125°C 溫度曲線圖

五、結論

本論文建立熱風循環系統，並且設計灰模糊控制器以達到設定之目標值，由實驗結果顯示，主控點溫度均可以控制在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以下，腔體均勻度於恆

溫段之誤差可達4%以內。

灰色預測僅需以少量的數據建立模型，而模糊控制有不需精確數學模型等優點，兩者結合使用可以達到不錯的效果，並且不需要調整複雜的參數，對於溫度控制，不失為一項簡便的選擇方案。

參考文獻

- [1]天宜科技，工業烤箱常用製程，<http://www.tbillion.com.tw/tycht/htmls/series2.html>, 2015年。
- [2]彭錦銅，溫度控制器的認識，行政院勞工委員會職業訓練局，台北市，2001年。
- [3]鄧聚龍，灰色控制系統，華中理工大學出版社，湖北省，1993年。
- [4]溫坤禮，灰色系統理論，第二版，五南圖書，台北市，2013年。
- [5]鋼鐵的世界，T. w. o. “不鏽鋼科學知識，”
<https://deferroalloy.wordpress.com/information-consultation/%E4%B8%8D%E9%8F%BD%E9%8B%BC%E7%A7%91%E5%AD%B8%E7%9F%A5%E8%AD%98/>, 2015年。
- [6]周東成，固態電驛的認識，行政院勞工委員會職業訓練局，台北市，2001年。
- [7]陽明電機，SSR固態繼電器，<http://www.fotek.com.tw/>, 2008年。
- [8]菘啟工業有限公司，Industrial temperature sensors，菘啟工業有限公司，2012年。
- [9]台達電子，可程式控制器，台北市，2015年。
- [10]J. L. Deng, “Introduction to grey system theory,” *The Journal of Grey System*, vol. 1, no. 1, pp. 1-24, 1989.
- [11]L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

表一 各產業加熱製程常用設備表

常用製程	加熱設備	應用產業
祛水 1.PCB 去濕 2.超音波洗淨乾燥 3.電鍍後水洗乾燥	1.無氧化型熱風循環烤箱 2.精密型熱風循環烤箱 3.無塵型熱風循環烤箱	1.電子業 2.SMD 3.電子外殼、 4.IC 零件 5.被動元件
乾燥 1.塗裝乾燥 2.樹脂硬化 3.油墨乾燥 4.塑膠塗裝 5.印刷乾燥	1.精密型熱風循環烤箱 2.無氧化型熱風循環烤箱 3.無塵型熱風循環烤箱	1.射出成型業 2.電子機殼產業 3.印刷業 4.封裝業
預熱 1.烘烤 2.培林安裝 3.預熱 4.熱收縮膜	1.精密型熱風循環烤箱 2.無氧化型熱風循環烤箱 3.無塵熱風烤箱	1.機械業 2.文具業 3.電子業 4.加工業

表二 三種測溫體比較

	熱電偶	金屬測溫電阻體	熱敏電阻
原理	利用電熱效果	利用金屬電器阻抗變化	較常利用半導體之變化
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1.構造簡單 2.價格低 3.可以測定狹小範圍 4.工作溫度範圍非常廣 	<ol style="list-style-type: none"> 1.在常溫及中溫領域的精度優良 2.容易使用 3.安定性佳 4.輸出曲線接近線性 	<ol style="list-style-type: none"> 1.價格低 2.可以測定狹小範圍 3.感度佳 4.較不易受到連接線阻抗的影響
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1.必須有基準點 2.連接上必須有補償線矯正誤差值 3.輸出電壓非常小 	<ol style="list-style-type: none"> 1.價格高 2.不耐震動及衝擊 3.受到導線阻抗的影響 4.測溫部稍大 	<ol style="list-style-type: none"> 1.測溫環境狹小 2.必須根據測溫範圍加以選定 3.阻抗的變化為非直線性
熱反應	快速	較緩慢	快速
測溫範圍	-200°C~1700°C	-200°C~650°C	-50°C~350°C