

模糊理論簡介及其在家電與工業上的應用

Introduction to Fuzzy Sets and Its Applications on Household Appliance and Industrial Processes

陳誠亮、王子奇、楊尚峰

Cheng-Liang Chen, Tzxy-Chyi Wang, Shang-Feng Yang

摘要 本文首先介紹模糊理論的基本概念，包含了模糊集合與傳統明確集合的比較、模糊集合之隸屬度函數與口語化變數、模糊集合之交集與聯集等基本運算，並且利用上述概念導入模糊模式的四大基本推理機制以及介紹幾種常見的模糊模式的類型，最後分別以家電製品中之模糊洗衣機以及焚化爐廠之模糊控制等應用實例，說明模糊理論在現實社會中的應用情況。

ABSTRACT This paper starts with fundamental concepts underlying fuzzy sets, including the comparison between fuzzy sets and conventional crisp sets, membership functions, linguistic variables, and intersection and union of fuzzy sets. Next, this paper, applying the concepts mentioned above, would illuminate the four basic inferential mechanisms and make an introduction to several fuzzy models most widely used today. Finally, washing machines and incinerators equipped with soft sensors and fuzzy controllers will be presented as illustrations to clarify the fuzzy logic theories proposed in this paper.

一、模糊理論發展沿革

1965年，美國加州大學柏克萊分校的 Zadeh (扎德) 教授在「資訊與控制」(*Information and Control*) 這份學術期刊上，發表「模糊集合」(Fuzzy Sets) 論文⁽¹⁾，模糊理論也因此誕生問世。在這篇論文中，扎德教授把「高溫」、「巨漢」、「大數目」等無法明確定義的集合以一種新的集合論來

表示，稱之為模糊集合。他特別指出：模糊集合極適合抽象化的事物，例如圖形識別、資訊傳達等，這些很難用數學方法表示的人類思考的基本行為加以量化，而以數學理論的形態，將這些情形推展演算出來⁽²⁾。

當扎德教授發表模糊集合論時，學術界的反應極為冷漠，批評的意見很多。他曾是「現代控制理論」這個嚴密理論的一員大將，竟一百八十度轉

變，改為倡導模糊觀念，因此引起大家猛烈批評。模糊理論剛開始時一直受人輕視，但是自 1974 年英國 Mamdani 發表應用模糊邏輯控制小型蒸汽機⁽³⁾；1982 年丹麥 Østergaard 宣佈以模糊邏輯成功操作水泥窯工廠⁽⁴⁾之後，模糊理論的實用潛力才受到廣泛矚目。

近年來，模糊有如一股旋風，在歐洲、中國大陸、日本各地，均有龐大人力參與展開如火如荼的研究熱潮。尤其是日本，更挾其強大的企業經濟能力，配合無人能出其右的產業研發技術，大舉開發模糊產品。如今，小至攝影機的自動對焦裝置、洗衣機的水流量控制器、冷氣機的溫度調節，大至自來水廠原水處理程序、地下鐵的全自動駕駛系統，到處可見模糊的蹤跡，使得模糊一詞幾乎成了智慧科技的代名詞⁽⁵⁾。在本文中，將以模糊邏輯之基礎理論作出發，延伸其理論至模糊控制系統，並以全自動模糊洗衣機以及焚化爐之模糊控制系統為實例做一個簡單且清晰的介紹。

二、模糊邏輯

1. 傳統明確集合的基本概念

所謂的集合 (set) 是由一些具有共同性質的物質匯總起來的組織，可用其來歸納一群具有相同特徵事物的工具。一般而言，集合是以表達明確事物為主，為了有所區分習慣上就以明確集合 (crisp set) 稱之⁽⁶⁾。明確集合具有下列共同的性質：

集合裡的元素是確定的。

同一個集合的元素具有某種相同的性質。

集合式元素組成的整體，元素之間可以相互區別。

使用集合表現一個概念時，總是把考慮的對象限制在一個特定的範圍之內，此範圍稱為論域 (universal of discourse, U_x)。集合 A 在論域 U_x 中有下列兩種基本的表示方法：

列舉法：若集合中的每一個元素，可以一一的被列舉出來，則此集合可以用列舉法表示。此方法僅能用於有限元素集合。例如：集合 A 中的元素，分別為 a_1, a_2, \dots, a_n 則可以表示為：

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

描述法：若一個集合依據特定性質定義其元素時，此種方法稱為 描述法。對此種方法常見的通式如下：

$$A = \{x|P(x)\}$$

依照此符號表示 A 為在論域 U_x 中針對命題 (proposition) $P(x)$ 為真之所有元素所構成的集合。

對於在論域 U_x 中之一明確集合 A ，其元素 x 與集合的關係可以利用特徵函數 (characteristic function) 來說明，其定義如下：

定義 1. 在論域 U_x 中之一明確集合 A ，其特徵函數 μ_A 將 U_x 中之元素 x 映射至 $\{0,1\}$ 的集合之中。亦即

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

或

$$\mu_A(x) : U_x \rightarrow \{0,1\}$$

以上介紹了元素與集合之間的從屬關係，在集合與集合之間也有相同的從屬關係之定義，例如：子集合 (subset)、相等集合 (equal set) 等。關於集合的基本運算，一般而言是指交集 (intersection)、聯集 (union)、差集 (difference set)、補集 (complement set)。其所表現出來的性質很多，如：交換性 (commutativity)、結合性 (associativity)、分配性 (distributivity)、傳遞性 (transitivity)、排中性 (law of excluded-middle) 等。

在傳統明確集合的定義來看，論域 U_x 中之元素 x 與集合 A 之間的關係只有「屬於」和「不屬於」兩種。但是在現實應用中，許多觀念都無法做如此明確的分類。比方說，在日常生活中所遇到的「經濟不景氣」、「富有」、「健康」、「滿意」、「時間長」等敘述，都沒有很清晰與明確的外延，這些

都可以稱為模糊概念。表達此類概念就無法利用傳統的二值集合理論，必須要採用另外一種集合理論表示方能加以處理，這也就是本文所探討的模糊集合。

2. 模糊集合與隸屬度函數

Zadeh 在 1965 年正式提出模糊集合理論⁽¹⁾。模糊集合與明確集合間最大的不同乃在於 Zadeh 提出以隸屬度函數 (membership function) 來取代明確集合中的特徵函數。隸屬度函數將原本非 0 即 1 的特徵函數值擴展為範圍介於 0 與 1 間的實數。而以隸屬度函數所定義的集合便稱為模糊集合。

對於在論域 U_x 中之一模糊集合 A ，一般以如下之定義表示：

定義 2. 在論域 U_x 中之一模糊集合 A ，其隸屬度函數 μ_A 將 U_x 中之元素映射至一介於 $[0,1]$ 區間中之實數。亦即

$$\mu_A(x) : U_x \quad [0,1]$$

或

$$A(x) : U_x \quad [0,1]$$

上述兩種表示方法在文獻中均常出現，在本文中採用後者作為模糊集合的表示法。也就是說，模糊集合與其隸屬度函數均用相同的符號表示。但用以表示隸屬度函數時寫成 $A(x)$ ，而有某特定之 x 值 (x^*) 代入隸屬度函數中所得之隸屬度函數值則寫成 $A(x^*)$ 。

在實際應用中，隸屬度函數乃是經由現場操作人員，配合該應用領域之專家所訂定的，一般在模糊邏輯中所最常使用到的隸屬度函數為片段連續式三角形，其數學式表示如下：

$$X^{(i)}(x) = \begin{cases} \frac{x - x^{(i-1)}}{x^{(i)} - x^{(i-1)}} & \text{if } x^{(i-1)} \leq x \leq x^{(i)} \\ \frac{x^{(i+1)} - x}{x^{(i+1)} - x^{(i)}} & \text{if } x^{(i)} \leq x \leq x^{(i+1)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

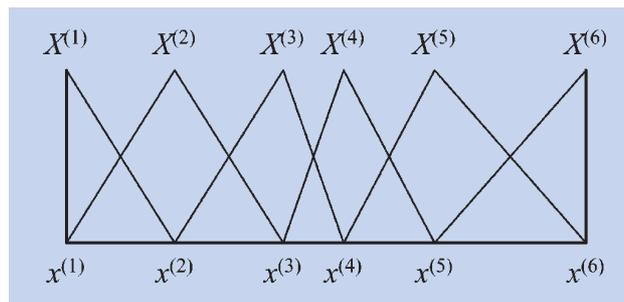


圖 1. 三角形隸屬度函數 (含 6 個模糊集合，論域為 $U(x) = [x^{(1)}, x^{(6)}]$)。

其中 $x^{(i)}$ 稱為模糊集合 $X^{(i)}$ 的主值 (principal value)，主值對於其模糊集合的隸屬度值為 1。

使用如式 (1) 所述之隸屬度函數有下列二個性質^(7,8)，使得以此為藍本的模糊模式其計算負荷大量降低。

性質 1. 對任一在論域中的輸入值 x ，至多只有兩個不為零的隸屬度函數值。

性質 2. 該輸入所對應之兩個模糊集合之隸屬度函數值其和為 1。

3. 模糊集合之交集與聯集

模糊交集與模糊聯集乃是模糊集合運算中最重要的一部分⁽⁶⁾，其可用於解決在規則庫中邏輯運算的問題。首先，由於明確集合可視為模糊集合的特例，故模糊集合的交集與聯集必須滿足明確集合的結果。以下便針對上述之模糊交集與聯集做一簡單的介紹。

(1) 模糊交集

或稱三角範數 (triangular norm, t-norm)。兩個模糊集合 A 與 B 其交集可以二元運算子 (i) 表示之，其數學形式如下：

$$(A \cap B)(x) = i[A(x), B(x)]$$

模糊交集運算子 t-norm (i) 必須滿足下列幾點基本性質，其中 $a, b, d \in [0,1]$

$$i(a,1) = a$$

$$\text{若 } b \leq d \text{ 表示 } i(a, b) \leq i(a, d)$$

$$i(a, b) = i(b, a)$$

$$i(a, i(b, d)) = i(i(a, b), d)$$

以下為一些最常用於模糊交集運算的 t-norm

最小值： $i(a, b) = \min(a, b)$

代數積 (algebraic product)： $i(a, b) = ab$

(2) 模糊聯集

或稱反三角範數 (triangular conorm, or s-norm)，兩個模糊集合 A 與 B 其聯集可以雙元運算子 (u) 表示之，其數學形式如下：

$$(A \cup B)(x) = u[A(x), B(x)]$$

模糊聯集運算子 s-norm (u) 必須滿足下列幾點基本性質，其中 $a, b, d \in [0, 1]$

$$u(a, 1) = 1$$

若 $b \leq d$ 表示 $u(a, b) \leq u(a, d)$

$$u(a, b) = u(b, a)$$

$$u(a, u(b, d)) = u(u(a, b), d)$$

以下為一些常用於模糊聯集運算的 s-norm

最大值： $u(a, b) = \max(a, b)$

代數和 (algebraic sum)： $u(a, b) = a + b$

4. 口語化變數

口語化變數 (linguistic variables) 乃是模糊控制的特點之一。在專家傳授操作經驗時，往往不是利用明確的數字，而是以自然語言中的字或者是句子來形容程序變數所處的情況，例如：口語化變數中「年齡」可以是幼年、少年、青年、中年、老年等。這些值都是模糊概念而不是精確的數值，使用字或者是句子代替數值的最主要原因，在於以人為主體的系統中，經常使用文字來表現變數之間的關係。

利用模糊邏輯的概念，它不像傳統的數位邏輯 (digital logic) 需要明確準確的模型⁽⁶⁾。亦即，在模

糊邏輯中，真偽的布林值 (boolean value) 被由 0 到 1 的連續隸屬值函數所代替。所以模糊邏輯可以輕易地處理一些無法精確描述的量，例如上述所提到的低、高與正常，而這些都是出現在對現實狀況的描述。所以需要一變數來表示之，即為口語化變數 (linguistic variables)。口語化變數是在指定論域之下用來描述一些自然語氣的模糊集合，以便能夠把自然語言敘述用邏輯推測 (logic calculates) 類化成為描述程序或控制動作的模糊規則庫 (fuzzy rule base)。口語化變數可以由一個五元組 (quintuple) 描述其特性，其中包含如下的元件：

變數的命名，如溫度，年紀等。

詞集合 (term set)，亦即變數的口語化值 (linguistic value) 名稱的集合，如高溫、低溫；青年、老年等。

涵蓋這個變數範圍的論域，如討論體溫時於 35° 至 40° 之間。

建立口語化變數到口語化值的語法規則 (syntactic rule)。

連接每個口語化值詞意規則 (semantic rule)。

三、模糊模式之架構

標準的模糊模式分為四大部份 (見圖 2⁽⁹⁾)：模糊規則庫 (fuzzy rule base；或稱知識庫，knowledge base)：模糊規則庫是整個模糊邏輯推論過程中最重要的一部份之一，規則庫中包含一組模糊若則規則 (fuzzy IF-THEN rules)。其規則型式一般可寫做：

$$R_i : \text{IF 程序狀態和輸入變數狀態} \\ \text{THEN 輸出變數狀態} \quad (2) \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

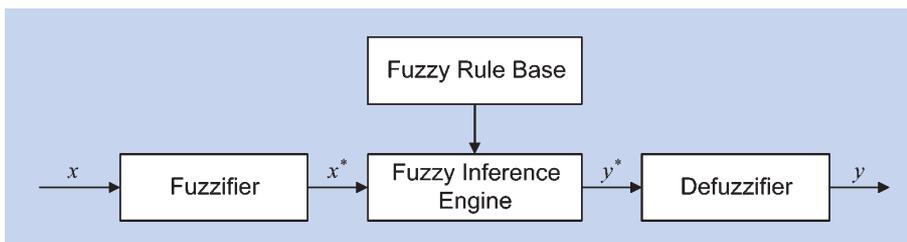


圖 2. 模糊模式的基本架構。

模糊化介面 (fuzzifier)：此為進入模糊模式的第一步，此部份的目的在於將輸入變數 (x) 透過隸屬度函數 (membership function) 映射至其所對應之模糊集合，產生相對應的口語化變數 (x^*)。

模糊推論機 (fuzzy inference engine, FIE)：根據口語化輸入變數以及模糊規則庫推論得到口語化輸出變數 (y^*)，此部份是整個模式估算輸出的核心。

解模糊化介面 (defuzzifier)：將經推論機得到之口語化輸出變數轉換為明確的數值。

在整個模式推論機制中，通常可以用下列四個模糊運算子 (operator) 代表推論的運算過程：

激發 (firing level) 階段運算子， \mathbb{F} ：用於計算在規則庫中每條規則的激發程度 ϕ_i (firing level) 或有效程度 (validity)，其計算則是由模糊交集運算子 t-norm 達成。

推理 (implication) 階段運算子， \mathbb{I} ：決定每條規則的輸出模糊集合 Y_i' ，其計算也是由模糊交集運算子 t-norm 達成。

聚集 (aggregation) 階段運算子， \mathbb{A} ：合併各個輸出模糊集合，以產生最後的模糊輸出 Y^* 。在合併時則是使用模糊聯集運算子 s-norm。

解模糊化 (defuzzification) 階段運算子， \mathbb{D} ：將模糊輸出 Y^* 轉為數值 y^* 。在此常用的方法是面積中心法 (center of area)。意即若模糊輸出為一多邊形，則取多邊形面積之中心，若為數值型，則對各個數值取加權平均。

在不同類型的模糊模式中，模糊模式的推理機制大致上遵循此四大部分，但由於 t-norm、s-norm 以及隸屬度函數所考量的形式差異，會產生不同的模糊模式推理結果。

四、常用的模糊模式

1. 傳統模糊模式

考慮輸入以及輸出均為模糊集合之傳統模糊模式概念，最早由 Mamdani⁽¹⁰⁾ 所提出，此類型的模式其規則庫可表示如下：

表 1. 三種典型的模糊模式。

模糊模式	輸入	輸出
傳統	模糊集合	模糊集合
TSK	模糊集合	函數 ($f(x)$)
單質型	模糊集合	常數

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } X_1^{(i)} \text{ and } x_2 \text{ is } X_2^{(i)} \text{ and, ... ,} \\ \text{and } x_p \text{ is } X_p^{(i)} \text{ THEN } y \text{ is } Y^{(i)} \quad (3) \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中 $X_j^{(i)}$ 是口語化項目 (linguistic term)，每個口語化項目均為一模糊集合，可用一隸屬度函數表示變數 x_j 屬於口語化項目 $X_j^{(i)}$ 的程度，記做 $X_j^{(i)}(x_j)$ ； $Y^{(i)}$ 亦為一模糊集合，表示輸出的口語化項目。傳統模糊模式在上述考慮模糊推論機制時，其在激發、推理、聚集、以及解模糊化 (見圖 3) 之數學形式如下：

$$\text{激發： } \phi_i = \mathbb{F}(x) = \mathbb{T}(X_1^{i_1}(x_1), X_2^{i_2}(x_2), \dots, X_p^{i_p}(x_p))$$

$$\text{推理： } Y_i' = \mathbb{I}(\phi_i, Y^{(i)})$$

$$\text{聚集： } Y^* = \mathbb{A}(Y_1', Y_2', Y_n')$$

$$\text{解模糊化： } y^* = \mathbb{D}(Y^*)$$

在激發階段，由輸入變數的大小以及所考量規則的隸屬度函數，可以得到變數對於各規則隸屬度函數之激發程度 ϕ_i ，因此進入推理階段時，就可以描繪出各個輸出所激發到的隸屬度函數的形狀。當得到各規則分別的輸出之後，透過 s-norm 即可把分別的輸出結合成一個多邊形，此時再以面積重心法 (center of gravity method) 將真正的輸出數值 y^* 計算出來。

2. TSK 模糊模式

TSK 模式 (Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model) 是由 Takagi 等人⁽¹¹⁾ 於 1985 年提出，有愈來愈普遍化的趨勢，其規則庫是將結論部份由模糊集合修改為一函數：

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } X_1^{(i)} \text{ and } x_2 \text{ is } X_2^{(i)} \text{ and, ... ,} \\ \text{and } x_p \text{ is } X_p^{(i)} \text{ THEN } y = f_i(x) \quad (4) \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

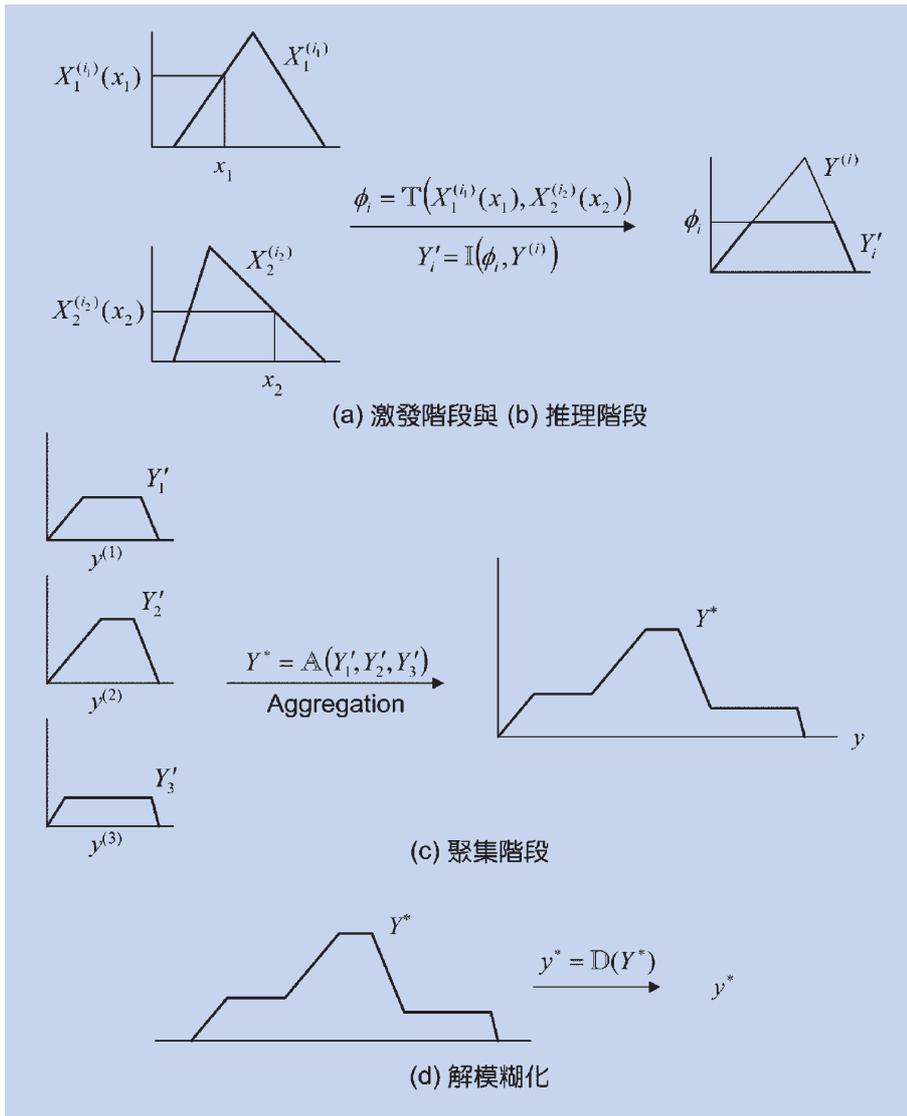


圖 3. 口語化輸出模糊模式推理機制。

最常見的 TSK 模式是使 $f_i(x)$ 為一線性函數，因此，式 (4) 可改寫為：

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } X_1^{(i)} \text{ and } x_2 \text{ is } X_2^{(i)} \text{ and, ... , and } x_p \text{ is } X_p^{(i)} \\ \text{THEN } y = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ip}x_p \quad (5) \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

TSK 模糊模式比傳統口語化輸出模式在推論上有許多方便的地方，最重要的，它省去解模糊化過程中求取形心的麻煩，而改以求取各個輸出的加權平均值，其權重則由各個規則的隸屬度函數值決定，即：

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i f_i(x)}{\sum_{i=1}^n \phi_i} = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x) \quad (6)$$

3. 單值型模糊模式

單值型模糊模式 (crisp-type fuzzy model) 是模糊模式中最簡化的一種，其規則可表示為：

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } X_1^{(i)} \text{ and } x_2 \text{ is } X_2^{(i)} \text{ and, ... ,} \\ \text{and } x_p \text{ is } X_p^{(i)} \text{ THEN } y = y^{(i)} \quad (7) \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

其結論部份比 TSK 模式更為簡化，僅為一常數，其輸出表示式為：

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i y^{(i)}}{\sum_{i=1}^n \phi_i} = \sum_{i=1}^n \omega_i y^{(i)} \quad (8)$$

由於單值型模糊模式較為簡易，目前已有理論分析的工作在進行且已獲得一些成果^(7,12)，亦有對 TSK 模式做分析者⁽¹³⁾。

利用上述所示之模糊模式，可應用於真實程序之模式鑑別以及模糊邏輯控制器的設計之中。本文以下針對全自動模糊洗衣機與焚化爐之模糊邏輯應用實例，配合上述所示模糊邏輯以及模糊模式的概念，做一些概略性的介紹。

五、模糊邏輯在家電製品上的應用：以模糊洗衣機為例

在變化快速的社會結構下，連家電製品的功能取向都有很大的改變。以洗衣機為例，由於小家庭結構的出現，職業婦女的比例大幅的提高，洗衣的工作也因此由家庭主婦的專屬工作進而成為必須由

全家人共同分擔的工作，且洗衣時間的機動性提高了，洗衣量可能也會有相當極端的差異⁽¹⁴⁾。在這樣的前提下，模糊控制洗衣機訂了下列的開發目標及技術課題：

將老練家庭主婦在洗衣服時，針對所洗衣物之總量與質料所採用之最適當洗衣方式電腦化。

為了配合全家人均能操作與使用，所有的操作最好採取單一按鍵式，也就是洗衣者負責按啟動鍵，其餘的均交由洗衣機的模糊系統來判斷。

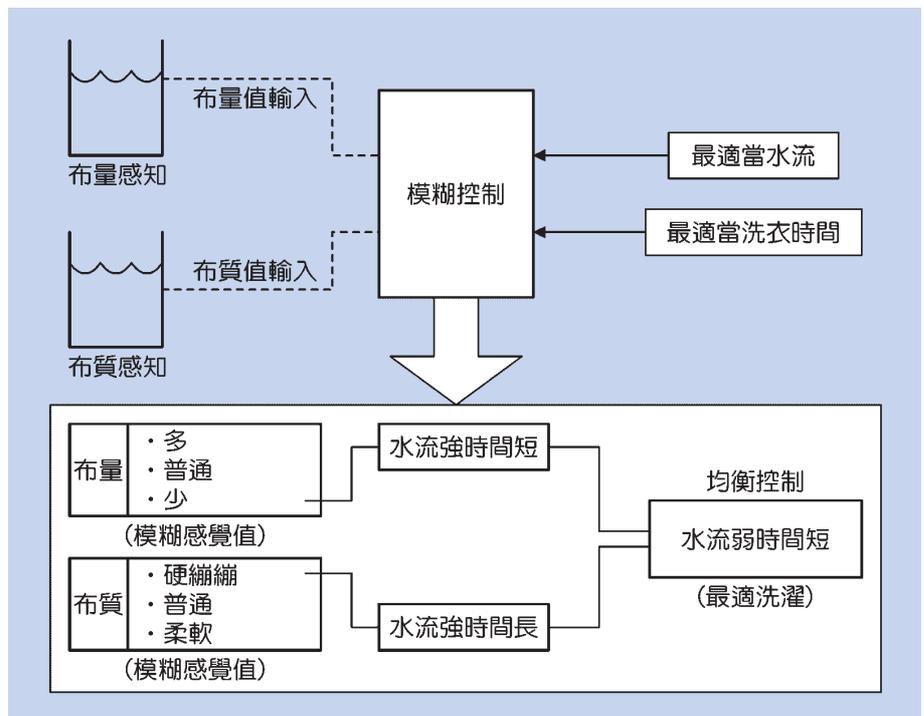
模糊全自動洗衣機能夠有足夠的感應器量測到衣物的量與衣物的質料，並能夠有適當的模糊控制規則庫制訂出良好的洗衣水量與洗衣時間，來作最適當的控制。

為了能夠讓所有使用者均能瞭解目前模糊洗衣機的運作狀況，對於所有預計與完成的洗衣過程，必須能清晰的顯示給使用者瞭解。

1. 模糊理論的應用

全自動洗衣機模糊洗衣機乃是根據老練的家庭主婦對於洗衣服時所考量到的問題，如「不傷布料」、「洗淨力強」、「洗衣時間縮短」等，並且除

圖 4. 模糊全自動洗衣機概要。



了清洗的主題外，更實現了以按鍵式操作達到均衡控制的效果。模糊控制提供了感知資訊，開發出洗衣物的量及布料的感應器。又根據此原理，開發了最適度的水流強度及洗衣時間的控制技術，如圖 4 所示。

(1) 布量及布質感應器的開發

布量及布質感應器可以二階段方式來尋求。首先談到布量，洗衣槽的水位達到量測水位時，馬達在一定的時間內回轉後停止，同時測量用來表現布抵抗的逆向電力。量測的方法是從裝在馬達上的電容器兩端的電壓波形，取得脈波之衰減時間 (T)。在布質方面，配合布量的適當水位，決定水位控制後，再以同樣的順序，測量求得脈波的衰減時間差 (ΔT)。

(2) 模糊控制的開發

在洗衣機方面據模糊表現知識的記述是感應器輸入為布量 (x_1) 和布質 (x_2)。控制輸出為水流的強度 (y_1) 和洗衣時間 (y_2)。控制規則 R_i 可以用 if 和 then 方式表示：

- R_1 if x_1 is A_{11} and x_2 is A_{21}
then y_1 is B_{11} , y_2 is B_{21}
- R_i if x_1 is A_{1i} and x_2 is A_{2i}
then y_1 is B_{1i} , y_2 is B_{2i}
- ⋮
- R_n if x_1 is A_{1n} and x_2 is A_{2n}
then y_1 is B_{1n} , y_2 is B_{2n}

在這裡 A_{1i} 、 A_{2i} 、 B_{1i} 、 B_{2i} ($i = 1, 2, \dots, n$) 為形容布量、布質、水流強度及洗衣時間的口語化敘述，均為模糊集合。推論結果 (B_1^* , B_2^*) 解模糊化 (defuzzified) 的結果 y_1^* 、 y_2^* ，為 B_1^* 、 B_2^* 的重心，可以下式求得：

$$y_j^* = \frac{\int B_j^*(y)y dy}{\int B_j^*(y) dy} \quad (j = 1, 2) \quad (9)$$

其具體的規則是：

表 2. 洗衣知識的控制規則。

布質 \ 布量		布量 (x_1)		
		少	普通	多
布質 (x_2)	柔軟	$y_1 =$ 弱 $y_2 =$ 短	低負荷 短	標準 標準
	普通柔軟	低負荷 短	標準 標準	標準 標準
	普通硬繃繃	低負荷 短	標準 標準	強 長
	硬繃繃	低負荷 短	標準 標準	強 長

規則 1：若布量少且布質柔軟時
則水流弱，洗衣時間短

⋮

規則 n ：若布量多且布質硬繃繃時
則水量強，洗衣時間長

以表格的方式整理出如表 2 的 12 條規則。if 部分關於模糊集合感應器輸入的布量和布質是以隸屬度函數來表示，then 部分則是以關於水流強度和清洗時間的隸屬度函數表示，如圖 5。推論方式如圖 6 所示。

2. 模糊控制實用化方式

為了使商品實用化，將模糊控制放入 CPU 中，包括液晶顯示等多項功能均在 4 bit CPU 中執行，實現省記憶體與縮短計算時間的模糊控制。為使從輸入資訊到模糊控制輸出的順序及輸出結果簡單化，因此將可能發生之輸出組合以模糊方式及實驗結果加以歸類，劃分出輸出組合的範圍，照著 19 種實用化方式，將好的模糊控制留下 (圖 7)，於是開發出能控制最適當水流、洗衣時間、脫水時間的模糊全自動洗衣機。

3. 結論

以上敘述了模糊全自動洗衣機的應用實例。針對直至今日為止計算機控制困難的問題來說，模糊控制可說明在一般產業的機械設備與製程控制的領域中，如熟練駕駛員般地自動化操作的實現及家電、汽車等量產產品，需要高度的控制機能要求

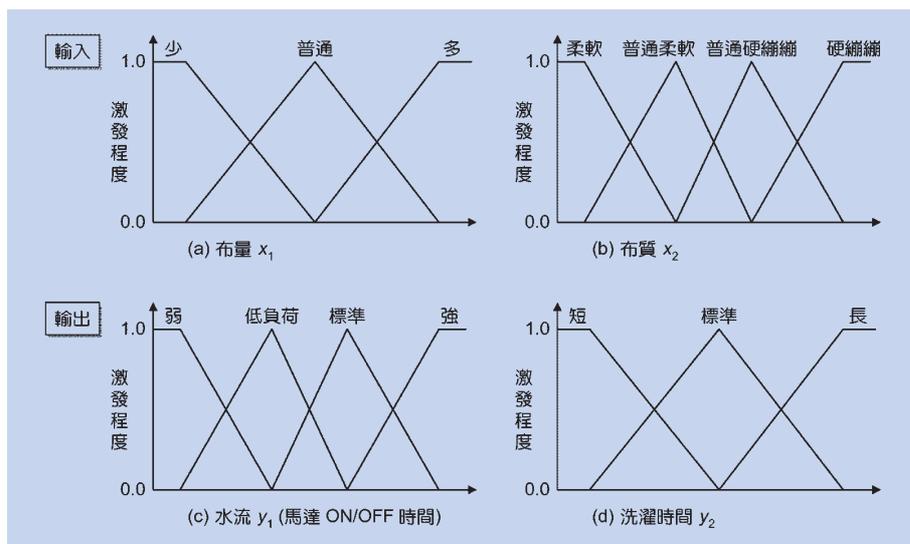


圖 5. 各口語化變數的隸屬度函數。

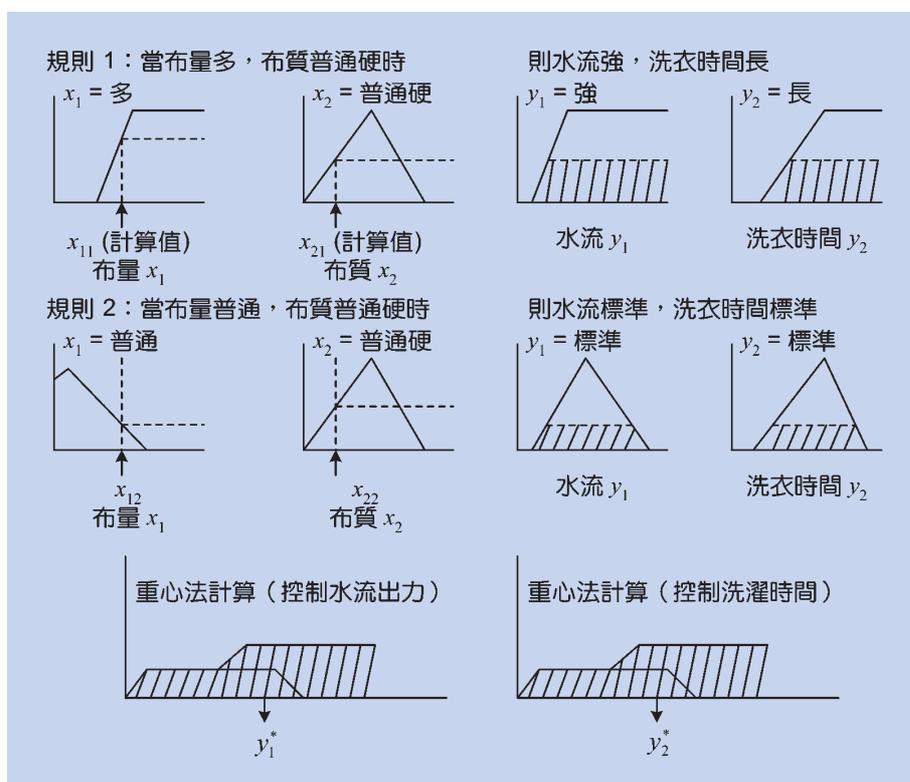


圖 6. 模糊推論方式。

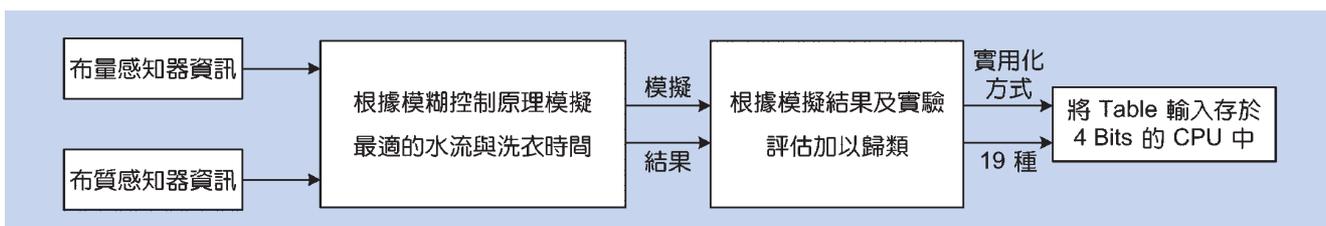


圖 7. 模糊控制的實用化方式 (裝置 4 bit CPU)。

式來描述焚燒的過程。因而焚化過程所遭遇到的控制問題並不容易用傳統的控制方法來解決。所以，當焚化爐燃燒不完全的時候，操作員往往會根據目前的燃燒狀況以及焚化爐內容物的情況來決定往後的控制動作。

在此種情況下，能夠模擬人類專家控制動作的模糊控制器，就可能較傳統的模式控制策略更能夠發揮其控制的效能。在韓國學者與三星重工的合作下⁽¹⁵⁾，便嘗試以模糊控制架構來達成焚化爐控制的目標。

1. 控制目標與控制器架構

在參考文獻(15)中，焚化爐的整體結構如圖 8 所示。其控制的目標是要達到完全燃燒，同時並確保蒸發速率以及處理能量在目標區內。此套控制系統以一般文獻上所提到的模糊控制器架構為基礎，然後加以修正以適應焚化爐控制之所需。整體來說，此套模糊控制系統總共分成三大部分(如圖 9)。首先，除了利用一般的儀表來測量焚化爐各項燃燒參數的數值外，比較特別的部分是設計者為了適應焚化爐的特性，而特別利用所謂的模糊量測器 (fuzzy sensor) 來擷取無法由儀表量測到的、但卻是模糊控制所需的資料，以作為模糊控制器輸入變數資料的來源。第二，在此系統中，一些參數的設定

圖 9. 焚化爐控制器架構。

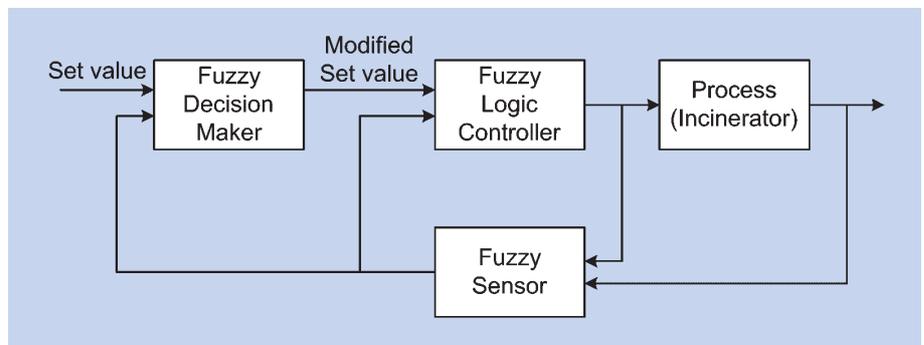
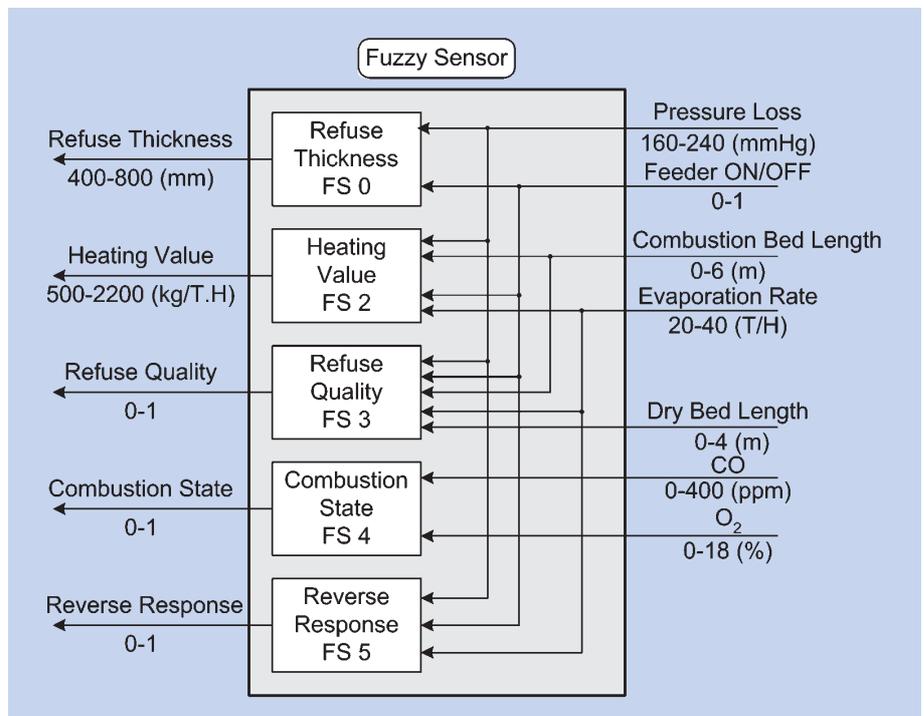


圖 10. 模糊量測器。



值隨時會根據目前燃燒的情況而做調整，這個調整設定點的步驟，便交由模糊決策器 (fuzzy decision maker) 來進行。最後，也是最重要的就是模糊控制器本身，在焚化爐這樣複雜的系統中，研究人員使用了多輸入多輸出形式的模糊控制器結構，並且根據由現場操作人員的實際經驗所整理出來的規則庫，進行操作變數的調節。

2. 模糊量測器

簡單來說，所謂的模糊量測器 (fuzzy sensor) 就是將一些可以利用儀表測量的數據，經由模糊集合的運算而得到另外一群無法用設備量測的指標值。

以參考文獻 (15) 的系統為例，一般的操作人員在判斷焚化爐的燃燒狀況時，可能會根據目前爐內焚燒物的厚度、焚化系統的熱值、廢棄物的性質以及燃燒的狀況等因素，來做控制調整的參考。可是，對於模糊控制器來說，實在很難為「燃燒狀況」這樣一個抽象的觀念下個明確的定義。所以在此系統中，便利用像焚化爐的壓降、進料口的開關狀態、燃燒床的長度、蒸發的速率、乾床的長度、一氧化碳濃度、氧氣濃度等可以利用測量設備測量的性質來估算上述幾個指標的大小。整個模糊量測器的輸入、輸出關係可以由圖 10 得知。例如，燃燒狀態這個模糊變數的大小 (數值介於 0 與 1 之間)，便是

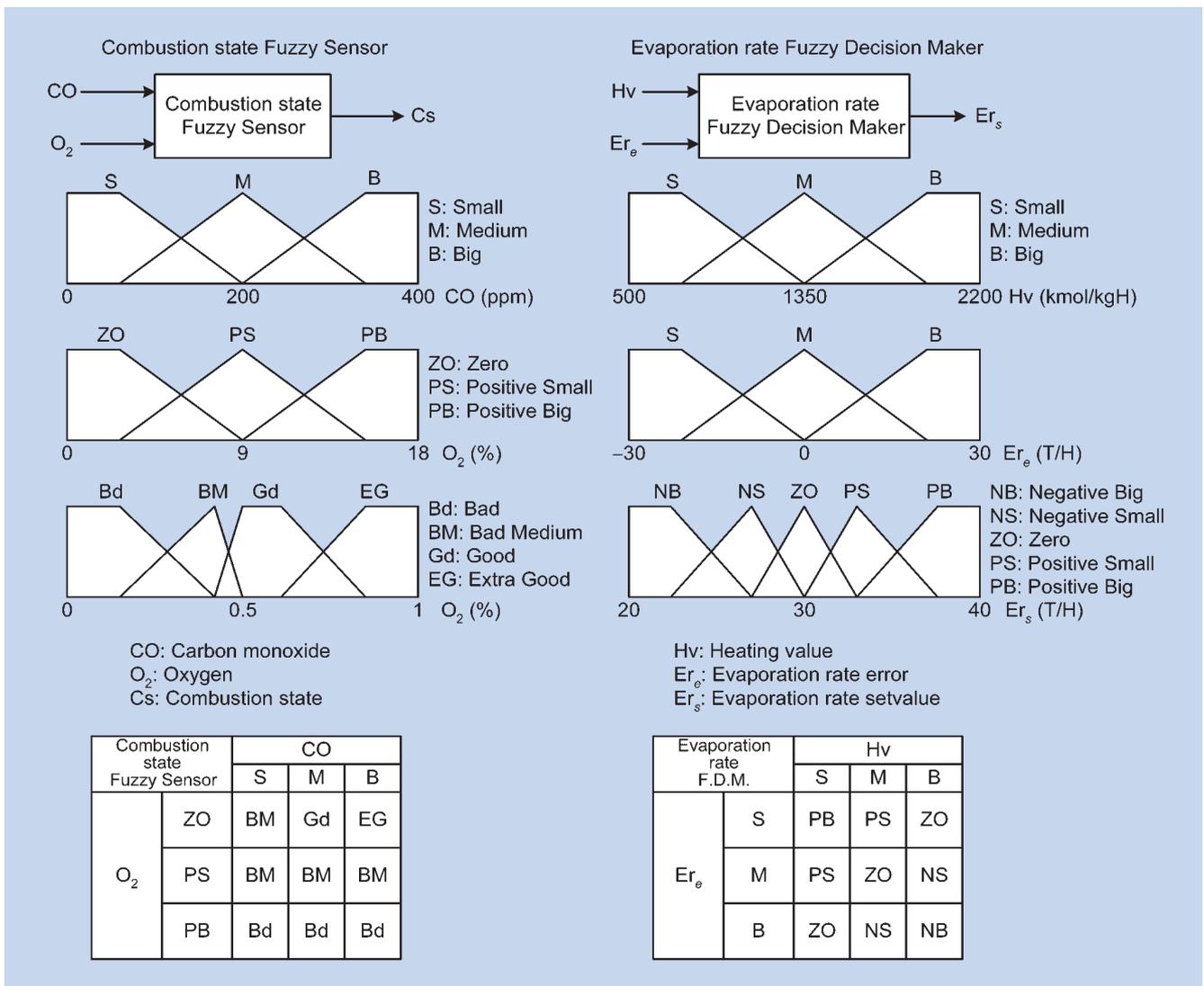


圖 11. 燃燒狀態之模糊量測器運作模式。

利用一氧化碳與氧氣的濃度來推算(如圖 11 所示)。

3. 模糊決策器

在此焚化爐模糊控制系統當中，較特別的就是所謂的模糊決策器 (fuzzy decision maker)。其實模糊決策器就是模糊控制器當中，部分參數的設定點決定機制。簡單來說，模糊決策器將焚化爐、鍋爐、傳動裝置等設備的性質以及控制目標設定值一同加以考慮，以便決定控制器的設定值。舉例而言，燃燒空氣的溫度設定值，乃是利用焚化爐目前的溫度以及由模糊量測器測量而得的廢棄物性質來決定。而其決定過程乃是根據操作專家的經驗轉化而成，藉此讓焚化爐的溫度能夠維持在一個目標區。此種決策規則一般會有如下的敘述：「當廢棄物的性質不佳時，如果燃燒空氣的溫度增加，則焚化爐的溫度會趨於穩定。」

另外一項由模糊決策器決定的參數乃是蒸發速

率的設定點。在以往的傳統控制當中，為了要維持蒸發速率在某個目標區，一般是利用調節廢棄物的進料量來達成目標。但是由於進料的成分隨時都在變化，因此很難得到理想的效果。在此系統中，為了能夠求得適當的蒸發速率設定點，乃利用廢棄物的熱值以及目前蒸發速率與目前其設定點的差值，來推算下一步之設定點。有關此模糊決策器的運作，可以參考圖 12 所示。

4. 模糊控制器

在此模糊控制器 (fuzzy controller) 中，主要是利用前述之模糊決策器所推算得到之各項參數設定點，與目前由模糊量測器之所測量到的數據相比較，再利用由專家知識所建構之模糊控制規則加以推理，最後得到各項操作之控制動作。

在此模糊控制器中(如圖 13)的輸出部分，可細分為蒸汽熱值、進料口開關、燃料開關、進料速

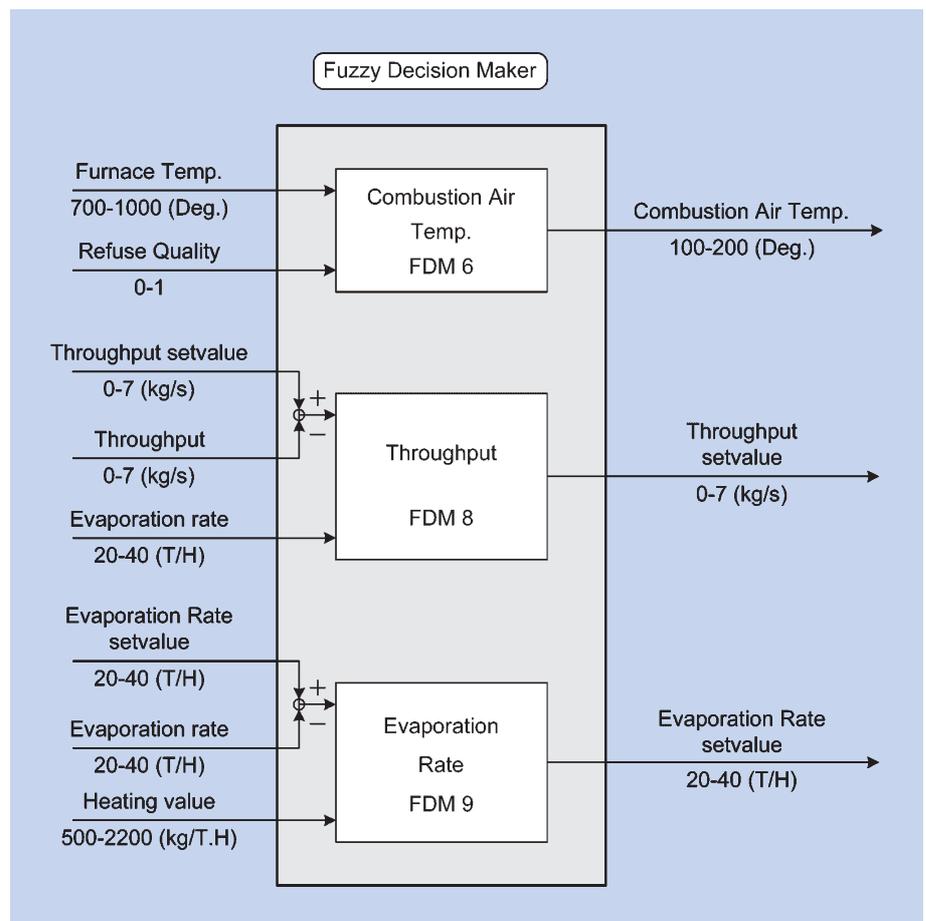


圖 12. 模糊決策器。

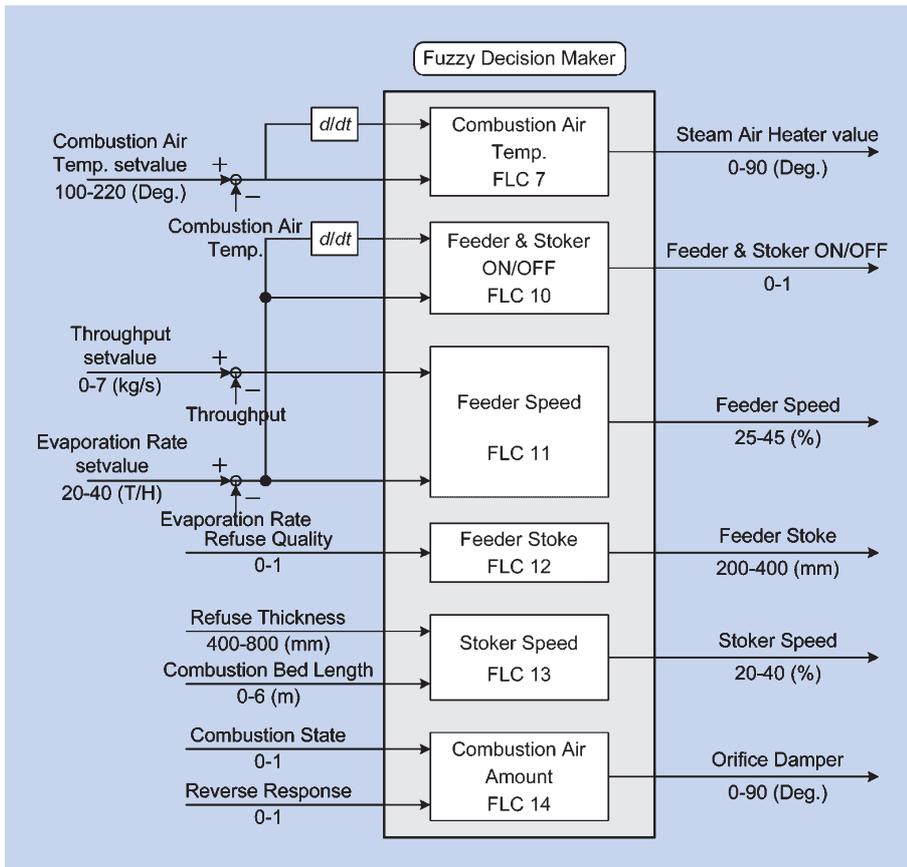


圖 13.
模糊控制器。

率、燃料速率、節氣閥角度等。而每項輸出變數分別具有不同的輸入部分，其詳細內容可以從圖 13 中得知。整體來說，這個多輸入多輸出的模糊控制器，可以將其視為數個多輸入單輸出模糊控制器的組合。

舉例來說，對於其中廢棄物及燃料進料口 (feeder and stoker ON/OFF) 的開關控制部分而言，其輸入分別為目前蒸發速率與其設定點的差值，以及差值的變化率。而其控制規則的內容可能有如下的敘述：「如果蒸發速率高，同時蒸發速率有越來越高的趨勢時，便應開啟廢棄物進料口，」或者是「如果蒸發速率低，同時蒸發速率有越來越低的趨勢時，便應關閉廢棄物進料口。」這些規則的內容則是由現場控制人員的經驗累積而成。

5. 控制規則的擷取

根據前述的各項模糊控制器元件的運作情況來看，吾人可以發現其中最難的部分大概是控制規則

的建立。而對於像焚化爐這樣複雜的多變數系統來說，規則庫的建立尤其不易。現場的控制人員一般只通曉其現場操作的程序，可是常常無法將其所累積的經驗，轉化為有效的模糊控制規則。另一方面，現場操作人員之間對於相同的狀況，往往也會有不一樣的控制策略。這些因素都增加了模糊控制器之規則建立的複雜度。

根據參考文獻 (15) 所述，在建構此焚化爐模糊控制系統時，設計人員分別跟多位的現場操作人員做了多次的晤談，並且將他們的控制經驗加以綜合整理，去蕪存菁。除此之外，設計人員還利用焚化爐程序在正常進料操作下的程序反應作為參考基點。另外，在從事電腦模擬時，他們還參照了實際焚化爐的控制情況。最後，設計人員還將過去焚化爐所使用的傳統控制策略融合到模糊控制器的規則庫中，以充實控制器的效能。

總結來說，焚化爐的模糊控制系統主要是由模糊量測器、模糊決策器以及模糊控制器這三個部分

組成。此控制系統將可以由實際測量裝置量測到的數據，經由模糊量測器，轉換出操作人員據以進行推理、但卻無法用儀器測量的操作狀態。接著再利用模糊決策器來推定各項變數的設定值，如此可以讓控制氣得設定也達到自動調節的目的。而這些設定點再與由量測器所得的目前數值相比較，藉由模糊控制器加以推理出各操作變數的控制動作，以完成整個控制迴路。

根據參考文獻 (15) 的作者所言，上述的控制策略在電腦模擬中，因應不同的焚化爐狀況，都能夠在短時間內得到令人滿意的控制結果。

七、總結

本文從基本的模糊邏輯理論作出發，一系列的探討了模糊集合、模糊模式以及模糊推理機制，並利用家電產業以及工廠中的實例來作驗證。但是，不論將模糊邏輯應用於模糊模式建模以及模糊控制上，專家知識的彙整與落實在整個模糊理論應用上顯得相當重要，而各種類型感應器所取得量測值的準確與否，更是模糊理論能否落實專家知識的關鍵因素。

參考文獻

1. L. A. Azdeh, *Information and Control*, **8**, 338 (1965).
2. 向殿政男著，劉天祥，佟中仁譯，Fuzzy 立論入門，中國生產力中心 (1993).
3. E. H. Mamdani and S. Assilian, *Int. J. Man-Machine Stud.*, **7**, 1 (1975).
4. L. P. Holmlod and J. J. Østergaard, *Fuzzy Information and Decision Processors*, M. M. Gupta and E. Sanchez eds., North-Holland, 389 (1982).
5. 林信成，彭啟峰，Oh! Fuzzy, 模糊理論剖析，第三波文化事業股份有限公司 (1994).
6. 孫宗瀛，楊英魁編著，Fuzzy 控制理論、實作與應用，全華科技圖書股份有限公司 (1994).
7. C. L. Chen, S. N. Wang, C. T. Hsieh, and F. Y. Chang, *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, **6**, 122 (1998).
8. Ying and Hao, *Automatica*, **29**, 1185 (1994).
9. Li-Xing Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall (1997).
10. E. H. Mamdani, *IEE*, **121**, 1585 (1974).
11. T. Takagi and M. Sugeno, *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-15**, 116 (1985).
12. C. L. Chen, C. T. Hsieh, T. C. Wang, and S. H. Hsu, *1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Proceeding of FUZZ-IEEE '98*, 510 (1998).
13. A. Grauel and H. Mackenberg, *Fuzzy Sets and Systems*, **85**, 165 (1997).
14. 溫坤禮，陳振欽，鄧國修編譯，模糊控制原理與應用，全華科技圖書股份有限公司 (1994).
15. Y. Song, J. Choi, Y. Kim, H. Lee, and S. Sung, *Seventh International Fuzzy Systems Association World Congress*, 370 (1997).

陳誠亮先生為國立臺灣大學化學工程博士，現任國立臺灣大學化學工程系教授。

王子奇先生為國立臺灣大學化學工程博士，現於國立臺灣大學化學工程系從事博士後研究。

楊尚峰先生為國立臺灣大學化學工程碩士，現任國立臺灣大學化學工程系助教。

Cheng-Liang Chen received his Ph.D. in chemical engineering from National Taiwan University. He is currently an professor in the department of chemical engineering at National Taiwan University.

Tzxy-Chyi Wang received his Ph.D. in chemical engineering from National Taiwan University. He is currently a post doctor reseacher in the department of chemical engineering at National Taiwan University.

Shang-Feng Yang received his M.S. in chemical engineering from National Taiwan University. He is currently a teaching assistant in the department of chemical engineering at National Taiwan University.