

Optimal Design of an Adaptive Controller for Gasifiers

Hong-Ting Shen and Chung-Neng Huang*

Graduate Institute of Mechatronic System Engineering

National University of Tainan

Abstract. Due to the industry, population and living level are growing up, the demand on electricity power is annually increasing at an amazing speed. In the developing countries, using coal to generate electricity power occupies a large proportion. Wherein, the coal gasification with low emission and high efficiency is recognized to be the most practical technology. In current practice, coal gasification produces hydrogen for various purposes from coal, water and oxygen. The investigation of what the optimal ratio is between input oxygen, vapor water and coal to the output response including the quality/density of hydrogen and slag is important. In this paper, the dynamic model of gasifier is established based on the mathematic formulae and by using the MATLAB simulators. Through this model, the simulation studies under the input perturbation to oxygen, vapor water and coal were completed. In addition, a PID controller based on the integration of the optimizers as the Taguchi's method, PSO (particle swarm optimization) and multiple ANFIS(adaptive neuro-fuzzy inference system), is design to find out the optimal ratio. Through this proposed study, the energy transformation of gasifier is expected to be improved to maximize the hydrogen generation and minimize the slag.

Keywords: Adaptive Controller, Optimal Design, Gasifier, Hydrogen

氣化器最佳化適應性控制器之設計

沈宏庭、黃崇能*

國立台南大學機電系統工程研究所

摘要

由於人口和生活水平的增長，電力的需求每年以驚人的速度增長。在發展中國家，用煤電發電佔了很大比例。其中低排放，高效率的煤氣化被認為是最實用的技術。在目前的實踐中，煤氣化從煤，水和氧氣中產生各種用途的氫氣。研究輸入氧氣，水蒸汽和煤炭之間的最佳比例對輸出響應（包括氫氣和爐渣的質量/密度）至關重要。在本文中，基於數學公式和使用 MATLAB 仿真建立了氣化爐的動態模型。通過該模型，完成了對氧氣，蒸氣水和煤炭輸入擾動的模擬研究。此外，設計優化器，利用田口方法找出氧氣，水蒸汽和煤炭最佳的比例，PSO（粒子群優化）和多個 ANFIS（自適應神經 - 模糊推理系統）的 PID 控制器，以找出最優比。通過這一提出的研究，預計氣化爐的能量轉化將得到改善，以最大限度地發揮氫氣並使爐渣最小化。

關鍵字: 適應性控制器、最佳化設計、氣化器、氫能

1. 研究背景

目前科技發展與能源是息息相關的，工業技術和人口的快速成長加上生活水平的提高，電力需求以驚人的速度每年增長，在有限的資源下開發新能源與能源的發展顯得更加重要。氫氣將成為未來能源的主要來源。分子氫是一個乾淨的燃燒燃料，可以作為液體或氣體儲存通過管道分配，長期替代天然氣。近年來各國致力於產氫技術的突破，以確保氫能的優勢。目前生產氫氣的方式很多，如 Xincheng Wang 等人[1]利用催化劑和太陽能發電的直流電，電解水產生氫氣。Ilgi Karapinar Kapdan 等人[2]利用有機廢物轉化為有機酸的過程中產生氫氣。Stephen H. Clarke 等人[3]利用碳氫化合物的蒸氣重整產生所需氫氣。Y.-H. Percival Zhang 等人[4]利用合成酶途徑，從澱粉和水中產生氫氣。J. Stephen Herring 等人[5]利用固體氧化物細胞進行高溫電解蒸氣產生氫氣。上述方法雖能產生氫氣，但須依賴太陽能的無法持續產生氫氣，使用有機廢物轉換氫氣會產生大量的二氧化碳(CO₂)，利用生物發酵轉換成氧氣的產量過低，透過離子合成技術的則需要相當高的溫度，以上不同的產氫方式的過程中，溫度是唯一的共同因素。

近年來石油及天然氣價格由於儲量日漸匱乏而節節高升，而根據調查全球石化能源蘊藏量中，煤炭占總蘊藏量的 72%，故煤炭可成為能量的主要來源；再加上煤的氣化技術提升可有效的降低燃煤對環境的污染。由於氣化器是一種以低成本燃料來製氫的方式，其可自煤或生質燃燒裂解出合成氣，再將其中的氫氣提取出來。氣化器已在許多產煤國如：中國、俄羅斯等大量使用，將便宜的煤轉換成高價的氫。當前利用氣化器產氫的研究如：Milad Arabloo 等人[6]提出氧-蒸氣的比例改變來提升氣化器的氫氣的產量。G.-S. Liu[7]等人提出不同結構的碳，在氣化器中碳的轉化率對氣體產物的變化影響。Daya Shankar Pandey 等人[8]提出多基因遺傳編程技術，以多基因遺傳編程為基礎開發了數學模型來預測天然氣產量作為預測合成氣產量的新方法。Qun Jia 等人[9]提出粒子群優化的神經網絡優化方法，並結合軟測量技術的神經網絡進行監測氣化器溫度，對整個氣化爐提供了長期有效運作信息，優化生產的運行，產品的質量和產量改進。Wang Yuan 等人[10]提出煤氣化生產液體燃料和電力，結合二氧化碳再利用。二氧化碳重整生產液體燃料甲烷工藝加上標準的費 - 托使用二氧化碳合成和生產液體燃料。

由於上述的氣化器相關研究都將重點放在如何讓氣化器有穩定的輸出、廢棄物的再次利用，卻沒有討論過加入控制器控制氣化器，來提升氣化器的產氫量降低爐渣量故如何，改善此一問題成為本文的研究動機。

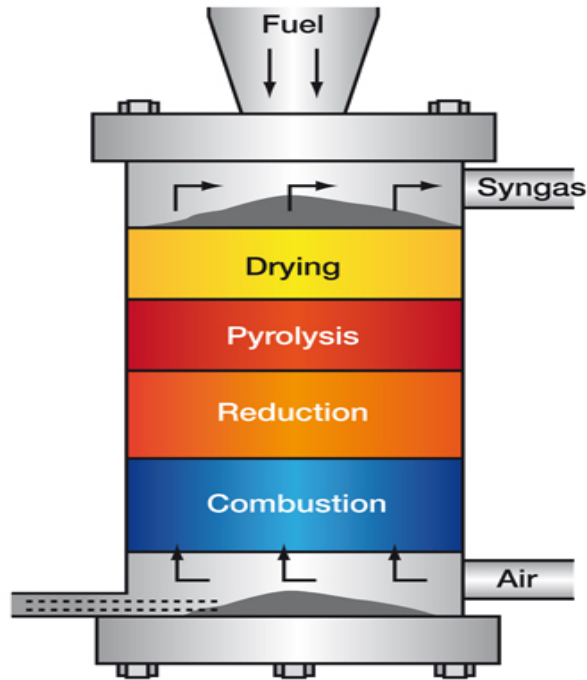
淨煤燃燒技術對氣化爐的影響極大，使氣化爐能以最大限度的轉換能源，同時達到最少的環境污染其極為重要，為此本文擬設計一自適應 PID 控制器對氣化爐系統做控制，改善並增強淨煤燃燒技術的產氫量與降低爐渣產量。

所以本文中提出一套完整的流程，運用 MATLAB/Simulink 建構氣化爐來當整體系統的測試平台，並對調整 PID 控制器參數，結合粒子群聚法，運用粒子群聚法的仿生物社會中資訊分享的概念，搜尋最佳的近似解，並以 Simulink 內建工具箱建立模糊控制的隸屬函數與規則庫，再把模糊控制與類神經網路系統混和運用，推展出 MANFIS，最後彼此結合，設計一個能自適應的模糊類神經量子群聚 PID 控制器，找尋優化 PID 參數，運用在氣化爐上，比較各種控制法對燃燒系統的穩定性影響，當氣化爐，不同煤炭品質干擾時，能否有提高產氫量，降低爐渣產量，提高氣化爐氣化系統。

2. 氣化器模型

氣化爐可概略分為四種反應區，分別為：燃燒區、氣化區、去揮發化區及乾燥區(圖一)。燃料由上方進料孔徑入，而由下方供應氧化劑，當氧化劑流速將低時，她只能從靜止的煤粒間隙縫穿過，均勻流通，燃燒區與氣化區所產生的熱氣會與較冷的固態煤粒做熱能的交換，煤進入了氣化區，此區為碳、蒸氣、二氧化碳(CO_2)、氧(H_2)作用之區域，吸熱作用產生一氧化碳(CO)與氧(O_2)，而氧(O_2)與碳(C)作用的微放熱反應產生甲烷(CH_4)。一氧化碳(CO)或氧(O_2)可燃氣

體會在燃燒區與氧反應燃燒，而放熱燃燒反應為了吸熱氧化反應與煤灰乾燥化提供了必須的能量。由於氣化區已將所有氧氣消耗完畢，因此在氣化區上方的燃料只能受熱而產生熱解現象，而熱解通常伴有去揮發化作用，所以氣化區上方稱為去揮發化區。由於熱解需要相當的熱能，所以乾燥區只剩少許的熱量能將燃料中水份烘乾。

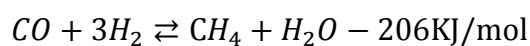
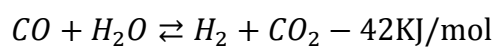
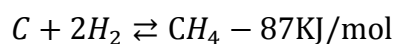
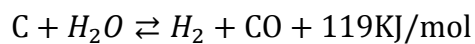
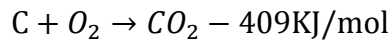
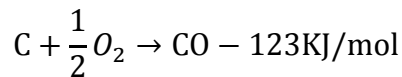


圖一：氣化爐四個反應區[11]

2.1 合成氣模型[12]

進入氣化爐後，煤粉脫揮發產生煤焦油和一些氣態烴，他的產物和揮發物在氧化反應中迅速消耗與蒸汽和氧氣，產生CO和H₂。固定碳與氧氣，蒸汽和氫氣反應產生CO、CO₂和H₂這些氣體產物將彼此反應(1)。

主要氣化過程中的反應和焓變是：

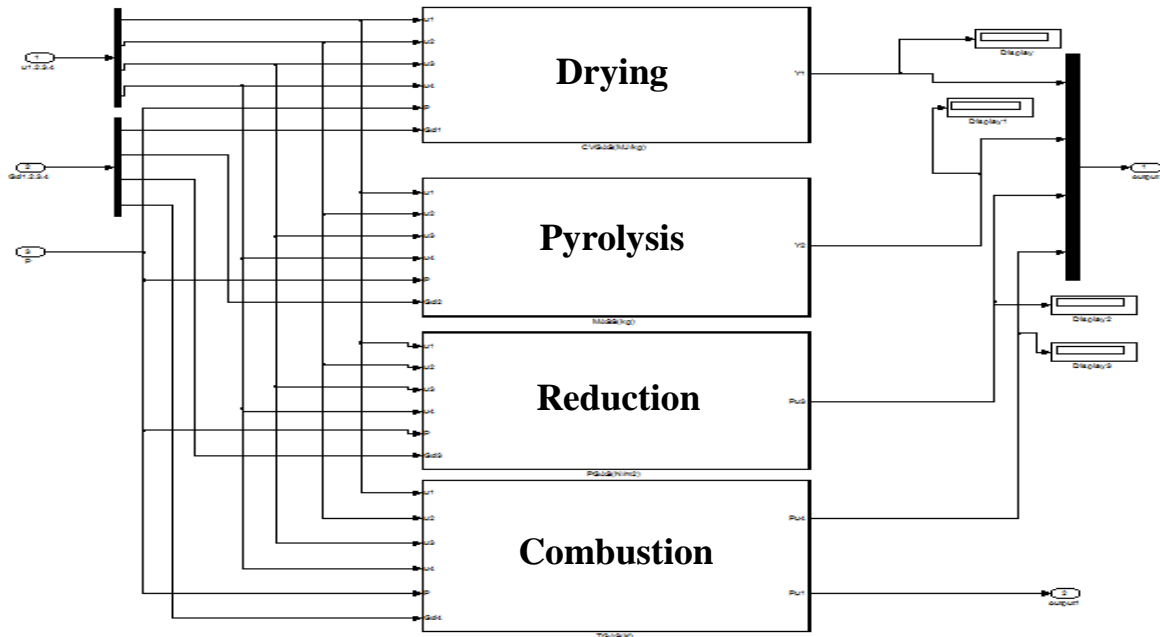


一個偏移平衡常數 K_e ，在這裡用作氣體溫度 T_g 的函數：

$$K_e = \frac{[CO_2][H_2]}{[CO][H_2O]} = \exp\left(-3.689 + \frac{4019}{T_g}\right) \quad (1)$$

K_e ：水/氣變換反應的平衡常數

T_g ：氣體溫度 K



圖二：合成器模型

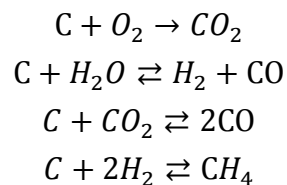
圖二為氣化爐的模型，依照圖一與數學模型建構而成，其中由四個子模型構成。

Drying

煤進入氣化爐後受熱，煤孔中吸附的氣體及水分首先被脫除。

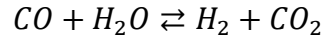
Pyrolysis

熱解過程是指煤分解並產生大量氣態物質的過程：



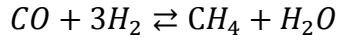
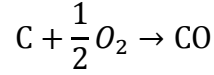
Reduction

該反應稱為一氧化碳還原反應，或稱水煤氣平衡反應。它是氣化階段生成CO的與蒸汽之間的反應，為了製取 H_2 ，需要利用這一反應。



Combustion

經氣化後殘留的煤與氣化劑中的氧進行燃燒。



對於這些化學反應，氣化爐中使用的方程式模型以每種摩爾數的形式列出：

$$2n_{N_2} = n_N$$

$$n_{H_2S} = 0.9n_S$$

$$n_{COS} = 0.1n_S$$

$$n_{CO} + n_{CO_2} = 0.9940n_{C_{jn}} - n_{COS}$$

$$n_{H_2} + n_{H_2O} = 0.5n_{H_{jn}} - n_{H_2S}$$

$$n_{CO} + n_{CO_2} + n_{H_2O} = n_{O_{jn}} - n_{COS}$$

將摩爾數形式代入(1)

$$\frac{n_{CO_2}n_{H_2}}{n_{CO}n_{H_2O}} = \frac{[CO_2][H_2]}{[CO][H_2O]} = K_e \quad (2)$$

3. MANFIS-PSO PID 控制器

3.1 PID 控制器

PID 控制器是業界最廣泛使用的閉迴路控制器。其 PID 算法可以表示為公式 (3)。假設 $Y(t)$ 是控制輸出 (參照圖 1)：

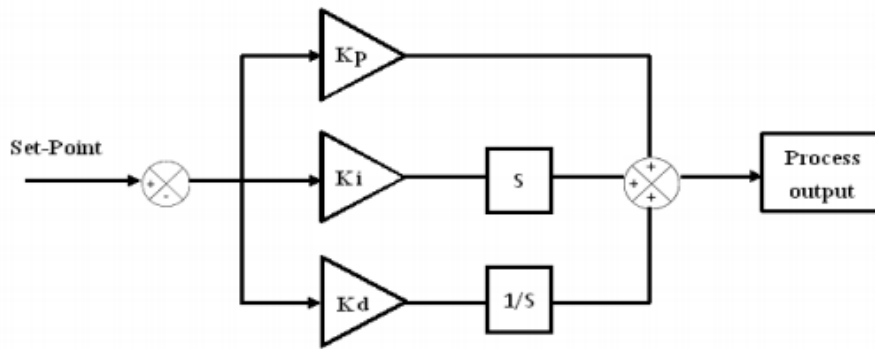
$$G(S) = K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S \quad (3)$$

K_p : 比例

K_I : 積分

K_D : 微分

這三個參數是相互的互相影響；因此，PID 控制器難以獲得三個參數 (K_P ， K_I ， K_D) 最佳值設置，實現系統穩定性。即使系統使用 PID 控制器不保證達到最佳控制和系統穩定性。如果系統需要提高其穩定性，那麼至關重要找到最優 PID 參數。



圖二: PID 演算法結構圖

3.2 PSO-PID

粒子群優化算法 (PSO) 是從鳥類的覓食和遷徙習慣中獲得。粒子在空間中移動將具有適應性從目標函數獲得的值。一切粒子將具有確定的初始速度其移動方向和距離。因此，當 a 一組粒子依賴於他們個人的成功經驗和當前人口中最好的粒子隨著個人的獲得，空中飛翔功能的最佳價值，它會記錄最好的搜索的變量到其個人記憶和取代以前的值。完成後基於粒子群的迭代計算自適應值，它計算最優解問題。其計算公式表示為式 (4)。

$$V_{id}^{n+1} = W \cdot V_{id}^n + C_1 \cdot rand() \cdot P_{id}^n - X_{id}^n + C_2 \cdot rand() \cdot P_{gd}^n - X_{id}^n \quad (4)$$

V_{id}^{n+1} : i 是一個粒子，n + 1 飛行速度的粒子

V_{id}^n : i 是一個粒子，n 飛行速度

C_1 、 C_2 : 恆定位置最好位置，在瞬間飛行的影響下速度重量

$rand()$: 在隨機函數 0~1 之間

P_{id}^n : 所有粒子在路徑中找到最佳值

P_{gd}^n : 在一個中找到的所有粒子的最佳值

X_{id}^n : i 粒子當前位置

W: 表示為重量值

本文利用 PSO 功能。讓每個粒子代表 PID 的三個參數'候選值。設置範圍，並基於系統的傳遞函數確定三參數，KP，KI，KD。

2011 年 Mahmud Iwan Solihin 等人提出 Particle Swarm Optimization，和 Ziegler-Nichols(Z-N)進行比較，並用直流發電機作為調整平台

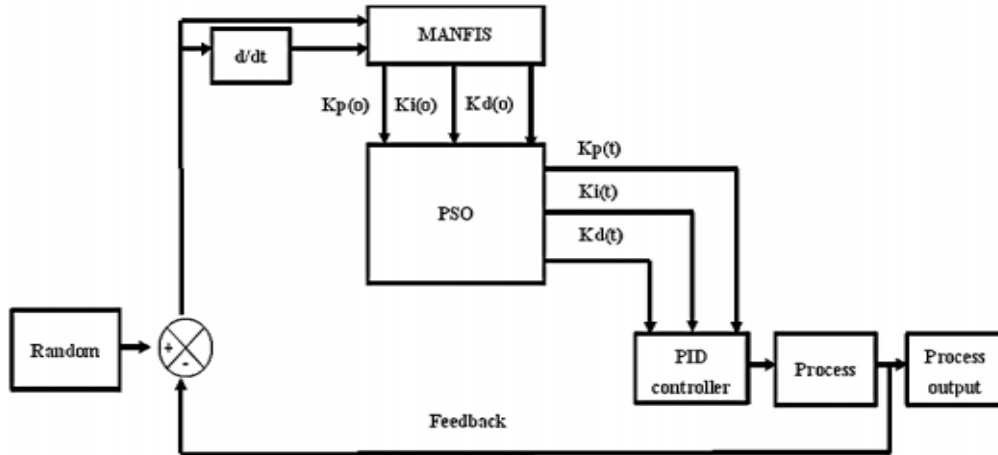
2011 年 Alireza ALFI 提出使用自適應性粒子群算法(PSO)去估測非線性系統的未知參數，並將提出的算法與基因演算法(GA)在參數的精度和收斂速度上進行比較。但由於初始設定 PSO 需在廣大的範圍裡搜尋最佳解，因而使搜尋時間較長，PSO 在疊代後也容易產生誤差。

3.3 MANFIS-PSO PID

MANFIS 主要來源於 ANFIS。這些兩個主要結構是混合型模糊控制控制和人

工神經網絡。模糊控制是一種衍生自模仿人類的理論，決策模式。模糊理論的要點是建立一個利用的數學模型目標系統的控制知識和模擬人類行為，或做出類似人的決定，學習如何處理不確定性的決定像人類一樣，還有設計控制具有更好的穩定性和適應性傳統控制[13]。

由模仿生物覓食的特性，先運用類神經網路學習與模糊控制模擬人類思考的方法，給定 PSO 做範圍參考值，再由 PSO 去特定的範圍裡，搜尋最佳解，透過這樣的方式，可發現 PSO 在搜尋最佳解的時間縮短了，亦獲得調整完整的 PID 參數，PID 控制器 也能有更好的最佳解。

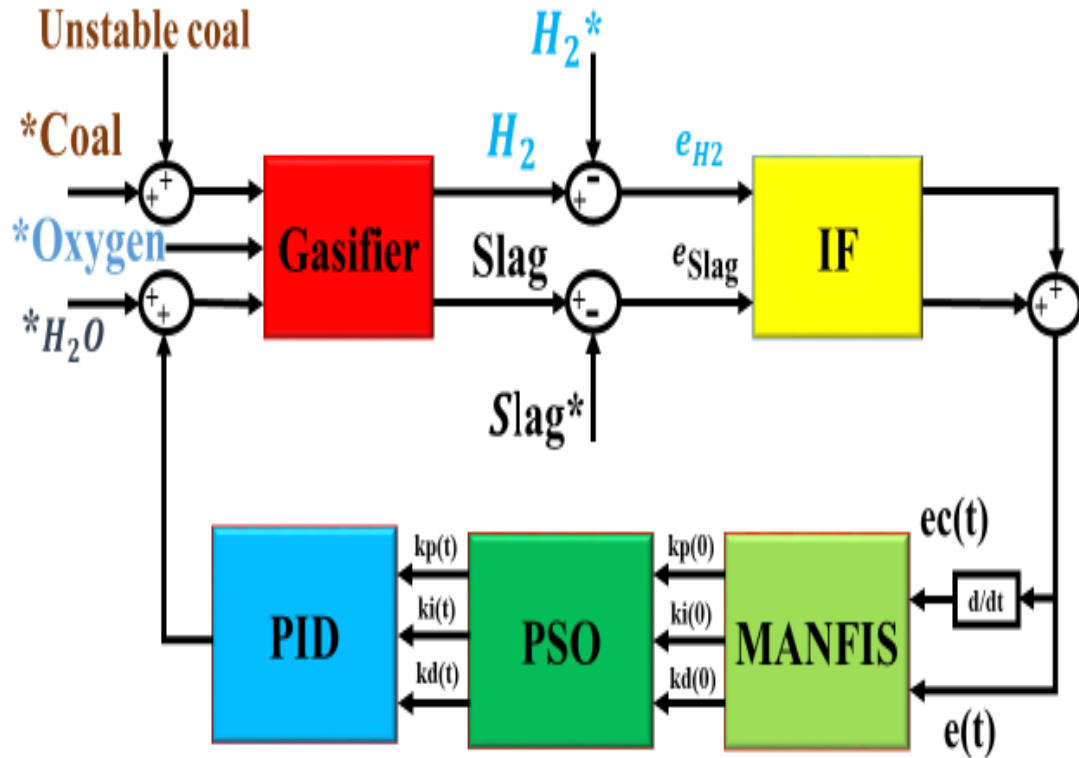


圖二 MANFIS-PSO PID

如圖二所示，本文使用 PID 執行對飛行狀態的自適應性。PID 要求三個輸出，因此無法使用 MANFIS 控制方法派生自 ANFIS 執行學習預測，並結合 PSO 調整 PID 參數，並修復 PSO 後的一些錯誤迭代周期，PID 控制器可以獲得最優解。

4. 系統模擬與驗證

4.1 控制系統設計



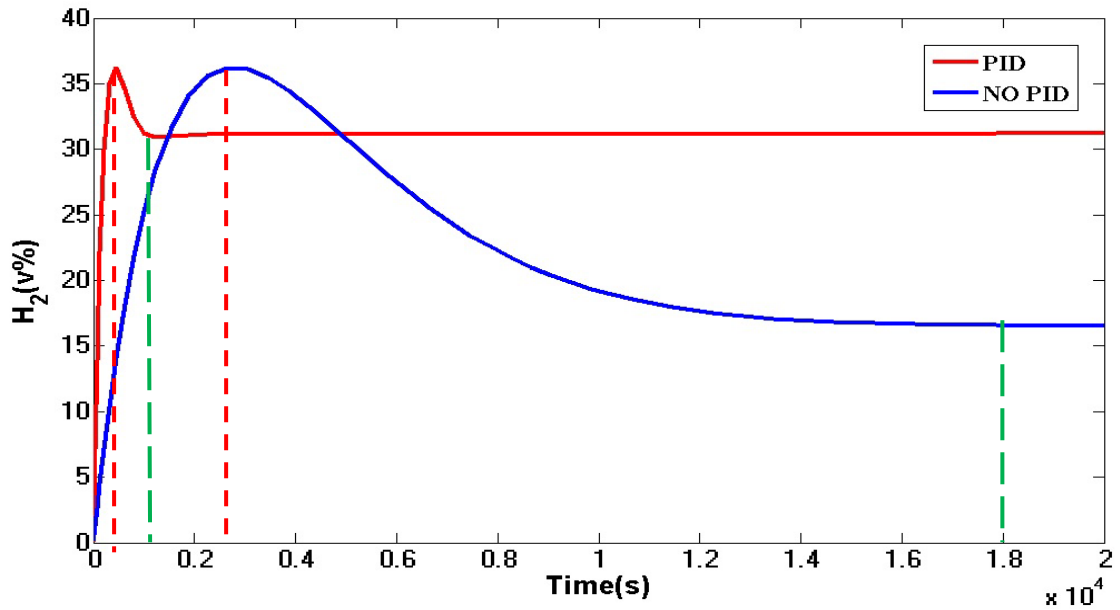
以最佳化的煤氣與水輸入氣化爐，但因為輸入煤的品質我們無法控制所以加入一個干擾因子，氣化爐因煤品質的不同輸出的氫與爐渣也隨之變化，再將輸出的氫與爐渣扣掉最佳化所得到氫與爐渣的值，在利用氫與爐渣產生的多寡來判別如何改變水的量，判別結果經過 MANFIS-PSO-PID 來控制水的輸入變化量，讓氣化爐的輸出達到最佳化輸出值。

4.2 模擬分析

4.2.1 氣化爐加入控制器

本論文執行模型建立氣化器和控制系統。控制水的變化，提高產氫量的控制，在圖三中比較了有控制器的氣化爐與沒有控制器的氣化爐，有控制器為紅線，沒有控制器為藍線，從模擬的結果中可以得知，在控制器的控制器下，氣化爐的氣化反應達到最大產氫量與產氫穩定值的時間明顯縮短。

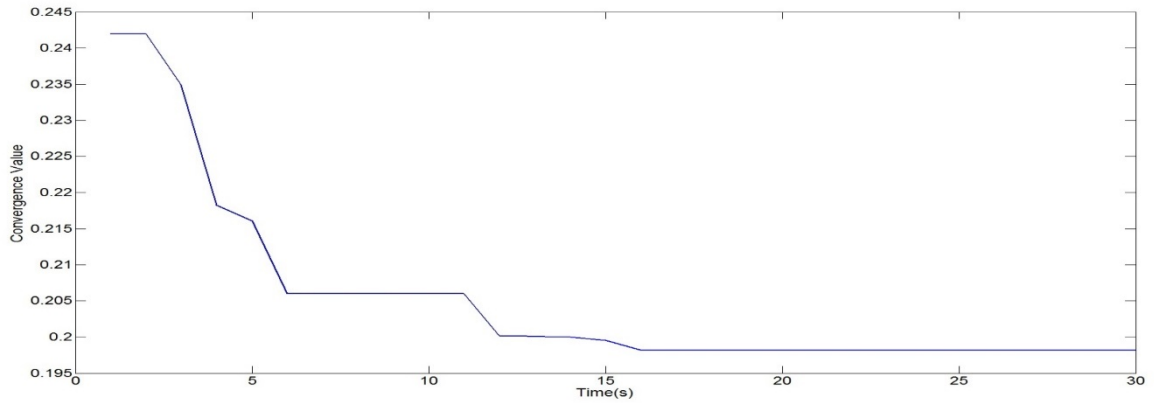
$$\frac{(\text{改善前}-\text{改善後})}{\text{改善前}} \times 100\% = \text{改善效率}$$

圖三 H₂的體積百分比。表一 H₂的對比

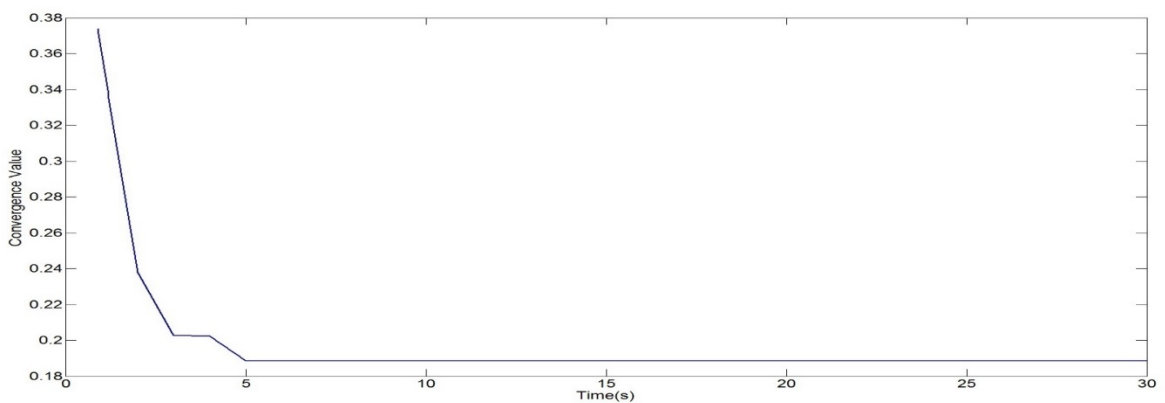
	無控制器	有控制器	改善效率
上升時間(秒) 	2800	800	71.4%
穩定時間(秒) 	18000	1700	90.5%

4.2.2 不同控制器下的模擬與分析

本文針對氣化爐與控制系統進行了建模，使用不同控制方法調整自適應性PID控制器，做系統仿真模擬，分別運用PID、PSO、MANFIS-PSO控制法，且得知PSO透過MANFIS縮小搜尋範圍，把參考值給PSO做最佳值選擇，找尋PID最佳值的收斂次數上，比直接運用PSO來搜尋PID最佳值的次數還少了12次參考圖四、圖五，證明MANFIS-PSO控制方法是有效且更優化的參考表二。



圖四 PSO-PID 收斂次數

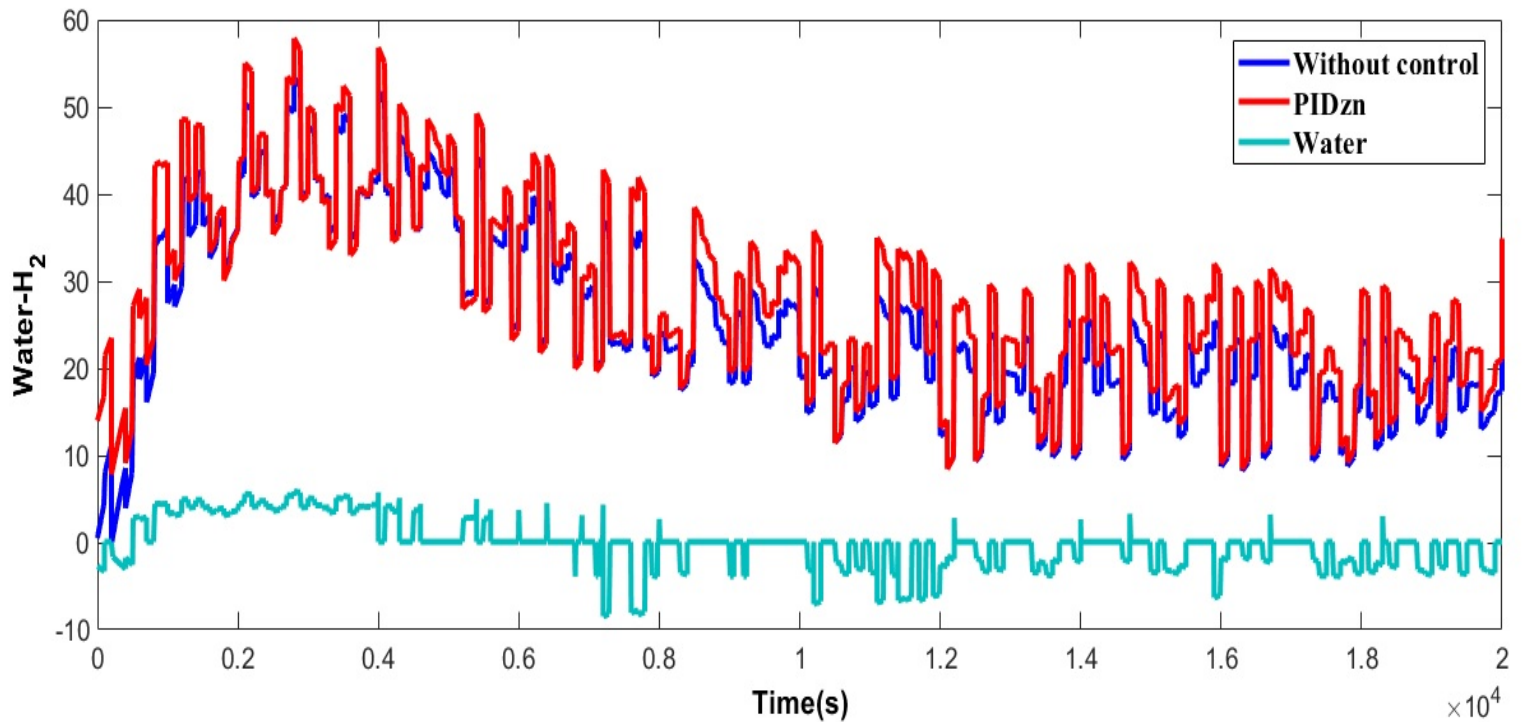


圖五 MANFIS-PSO 收斂次數

表二 PSO-PID 與 MANFIS-PSO 收斂次數比較表

控制方法	第幾次 時收斂	收斂時間	MANFIS-PSO 比 PSO 收斂減少次數	MANFIS-PSO 收斂時間 比 PSO 收斂改善時間
PSO-PID	17	慢	12	70.5%
MANFIS-PSO-PID	5	快		

比較氣化爐的輸入因煤的成分不同情況下，使用不同的控制器控制水的輸出變化量，來改變氫的產量，從模擬結果可以得知 PSO-PID、MANFIS-PSO-PID 這兩種控制器表現較為優秀。

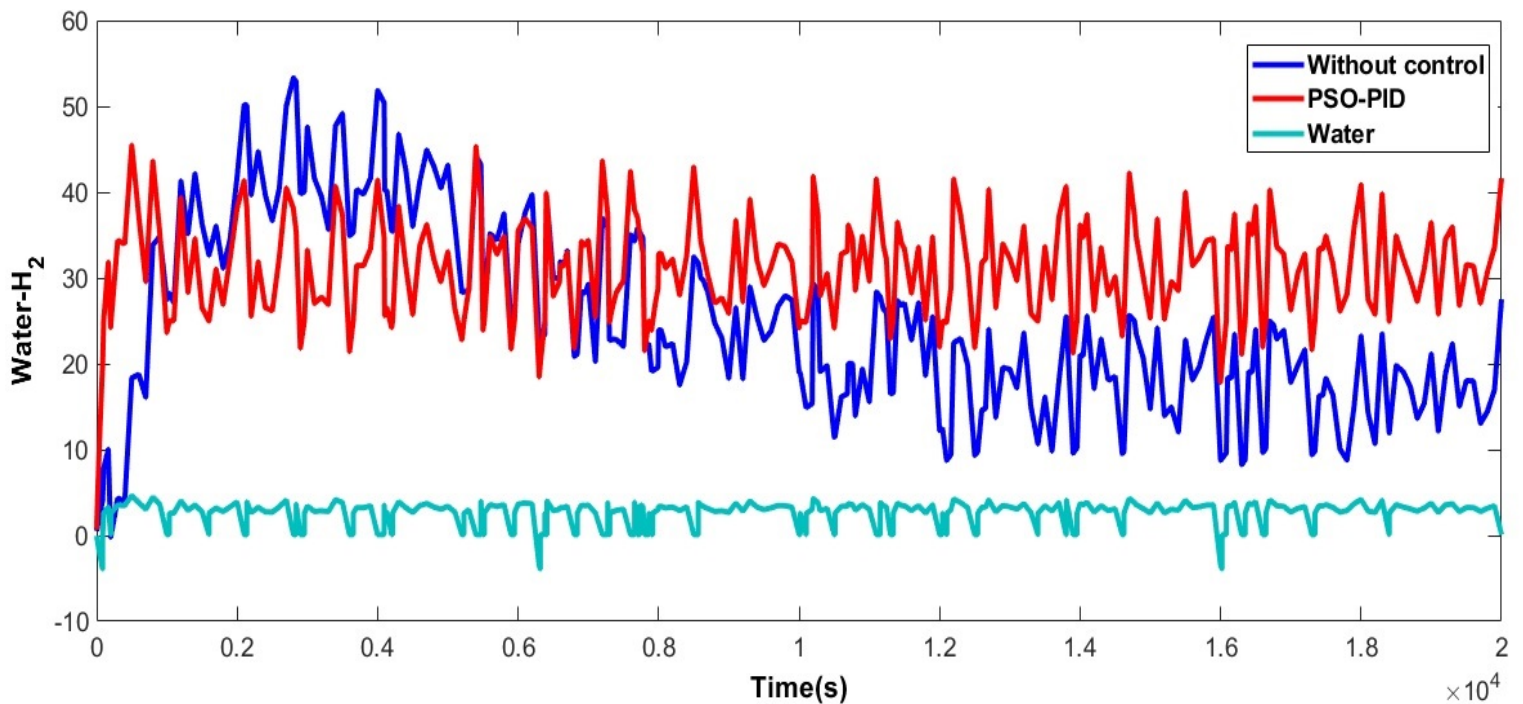


圖六 產氫量模擬結果(PIDzn)

圖六中加入 PIDzn 控制器後，前期輸入的水量變多，提升前期的轉換效率，穩定後一樣的煤料品質需要的輸入水量比沒有控制器的少，但在產氫的表現高出許多，PIDzn 的 K_p 、 K_i 、 K_d 是利用 Z-N 參數調整法，調整出 PID 的值 $K_p=12.5$ 、 $K_i=46$ 、 $K_d=15$ 。

表三 without control 與 PID 比較

控制方法	產氫(kJ/m^3)	PID 控制器 比無控制器 總水的變化量(L/s)	PID 控制器 比無控制器 增加的產氫量(v%)	PID 控制器 比無控制器 產氫提升效率(%)
without control	5019.08	120000		
PIDzn	5669.79	120149	650.71	12.96%

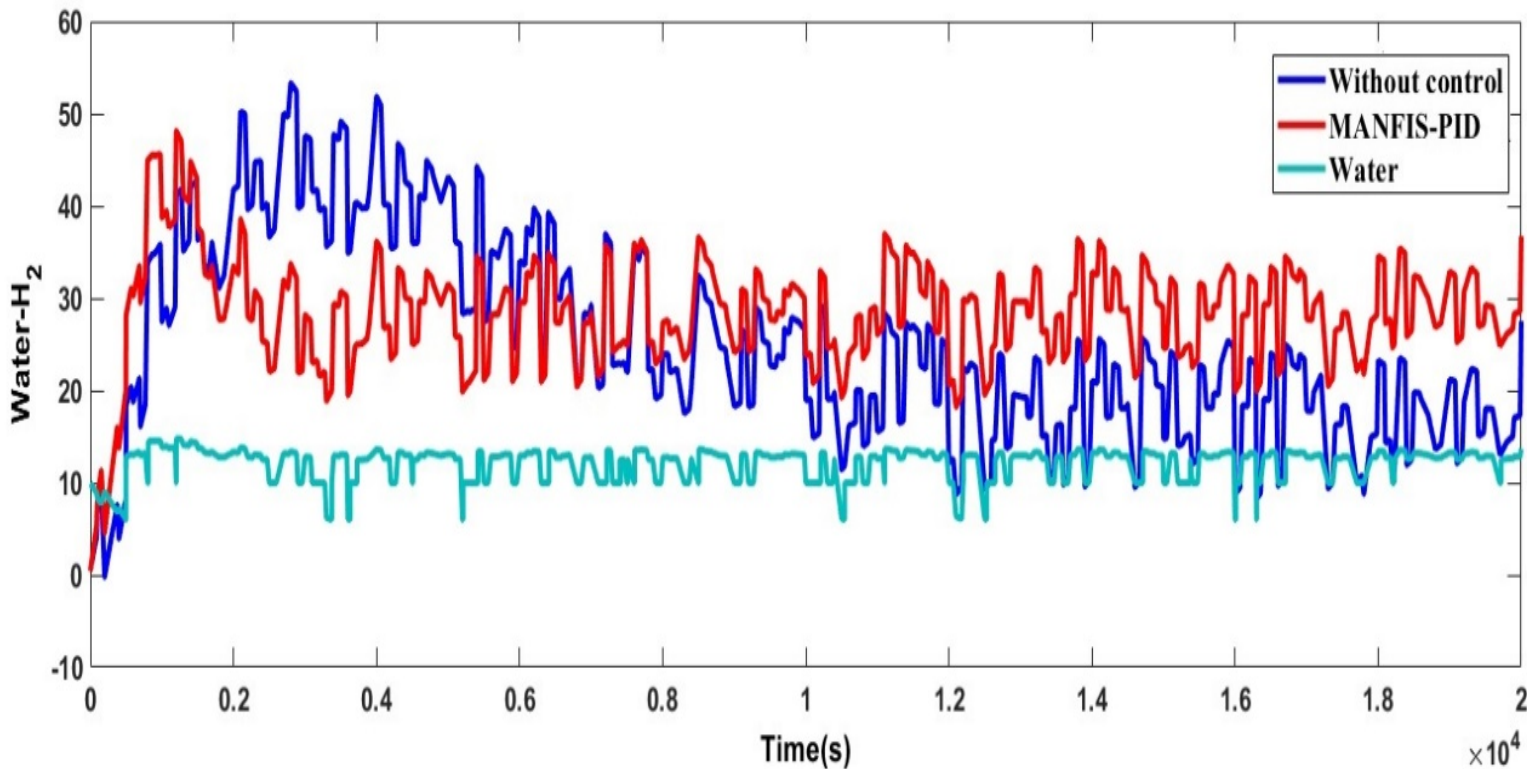


圖七 產氫量模擬結果(PSO-PID)

圖七中加入 PSO-PID 控制器後，在控制器的控制下輸出產氫量比沒有控制器時多，雖然在前期反應明顯的低了許多，但在完整的氣化反應下整個過程保持了一定的輸出值，PSO-PID 的 K_p 、 K_i 、 K_d 是利用粒子群聚法，一群粒子靠著個體本身的成功經驗與目前族群中最佳粒子的腳步搜尋最佳值，而當個體遇到函數最佳值的時候，將最佳搜尋的變數記錄於個體記憶中，持續替換原本的值，經過疊代計算之後，根據粒子群中適應值，計算出最佳解調整出 PID 最佳的 K_p 、 K_i 、 K_d 值 $K_p = 18.73$ 、 $K_i = 54.62$ 、 $K_d = 10.83$ 。

表四 without control 與 PSO-PID 的比較

控制方法	產氫(kJ/m^3)	PID 控制器 比無控制器 總水的變化量(L/s)	PSO-PID 控制器 比無控制器 增加的產氫量	PSO-PID 控制器 比無控制器 產氫提升效率
without control	5019.08	120000		
PSO-PID	5935.29	120447.5	916.21	18.25%

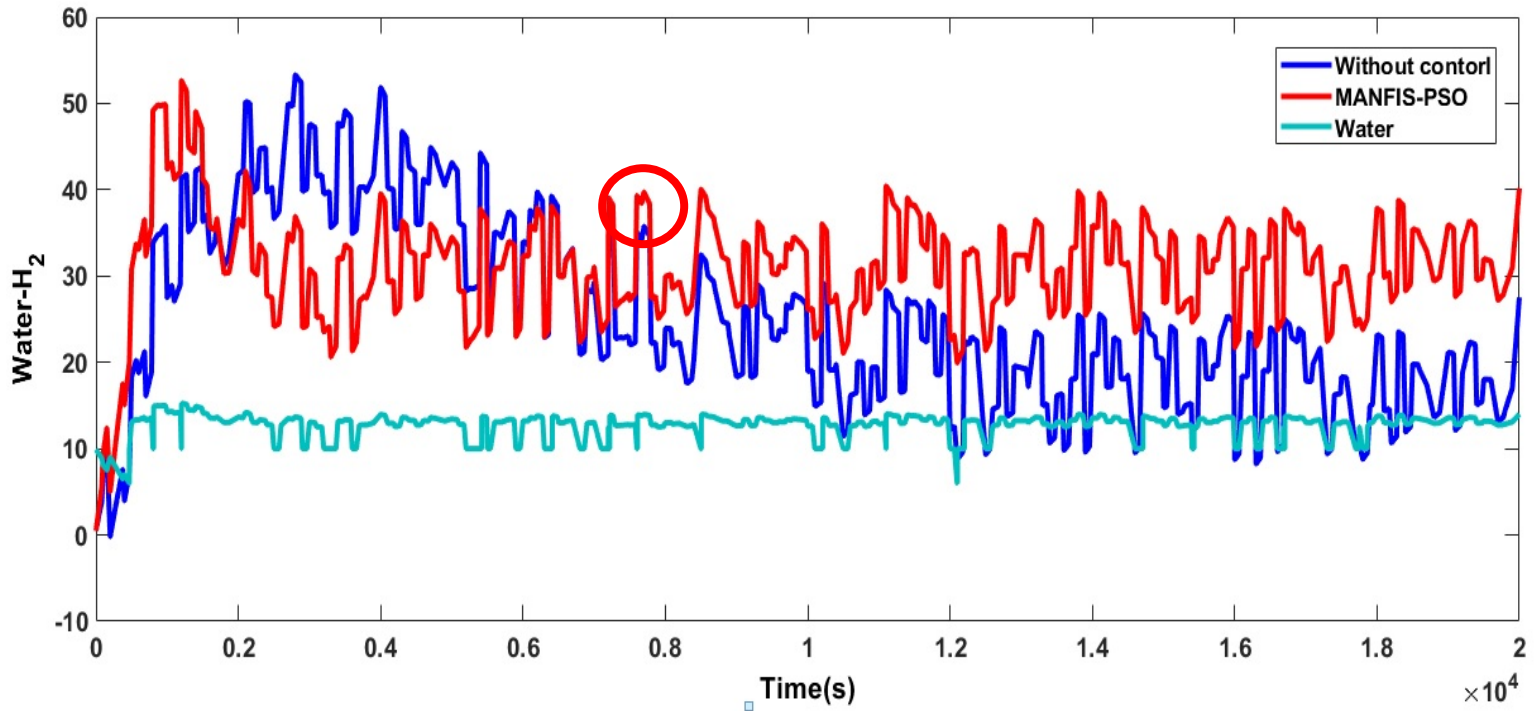


圖八 產氫量模擬結果(MANFIS-PID)

圖八中加入 MANFIS-PID 控制器後，用 MANFIS 控制方的強力學習性，模擬人類的思考方式，在學習過程中，根據輸入的誤差和誤差變化對原先 FUZZY 的模糊規則庫進行自適應性調整，藉此提升氣化爐產氫量，在反應的前期因為水的大量輸入導致反應比沒有控制器時來的少，但在中後期保持了穩定的輸出，MANFIS-PID 的 K_p 、 K_i 、 K_d 是用 PIDzn 的輸入值， $K_p=12.5$ 、 $K_i=46$ 、 $K_d=15$ 。

表五 without control 與 MANFIS-PID 的比較

控制方法	產氫(kJ/m ³)	PID 控制器 比無控制器 總水的變化量(L/s)	MANFIS-PID 控制器 比無控制器 增加的產氫量(v%)	MANFIS-PID 控制器 比無控制器 產氫提升效率(%)
without control	5019.08	120000		
MANFIS-PID	5702.22	122379	683.14	13.61%

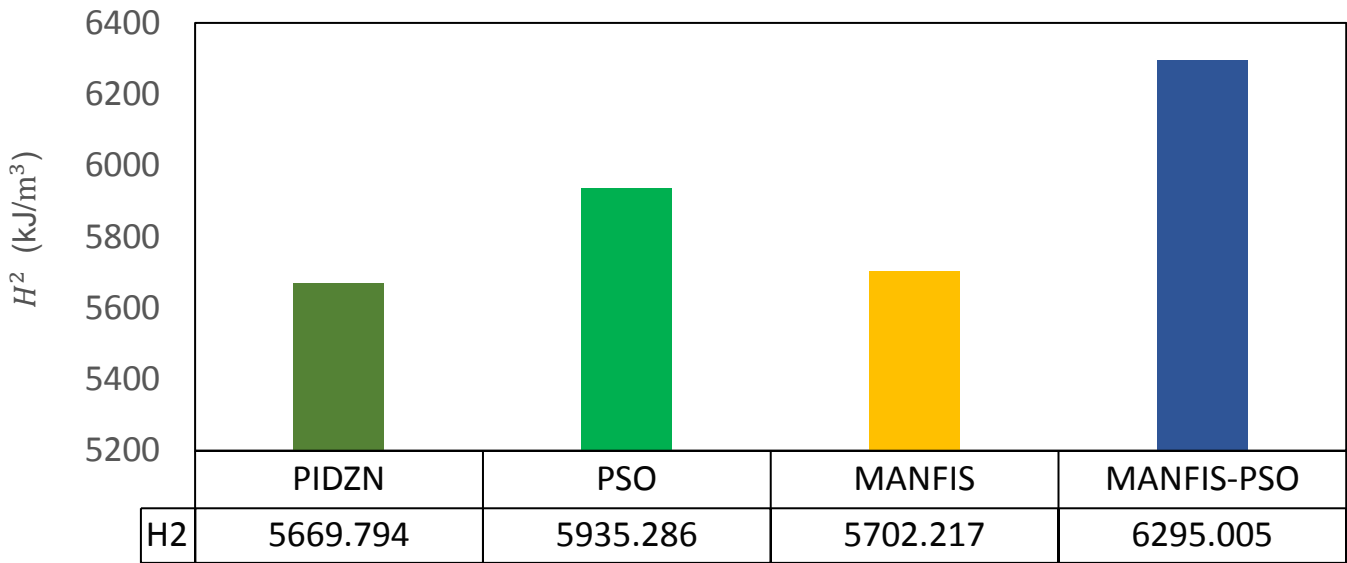


圖九 產氫量模擬結果(MANFIS-PSO)

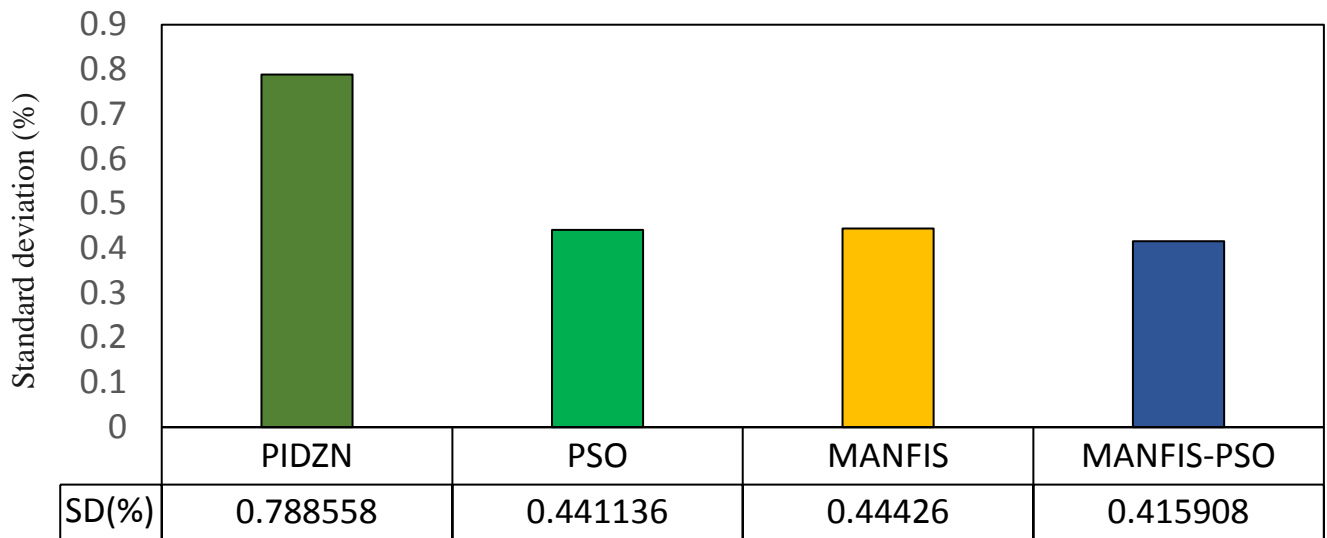
圖九中加入 MANFIS-PSO-PID 控制器後，在反應的前期與 MANFIS-PID 控制器一樣，因為水的大量輸入導致反應比沒有控制器時來的少，在大約 8000 秒開始產氫量比 MANFIS-PID 控制器明顯高出許多，MANFIS-PSO-PID 的 K_p 、 K_i 、 K_d 是利用粒子群聚法， $K_p = 18.73$ 、 $K_i = 54.62$ 、 $K_d = 10.83$ 。

表六 without control 與 MANFIS-PSO 的比較

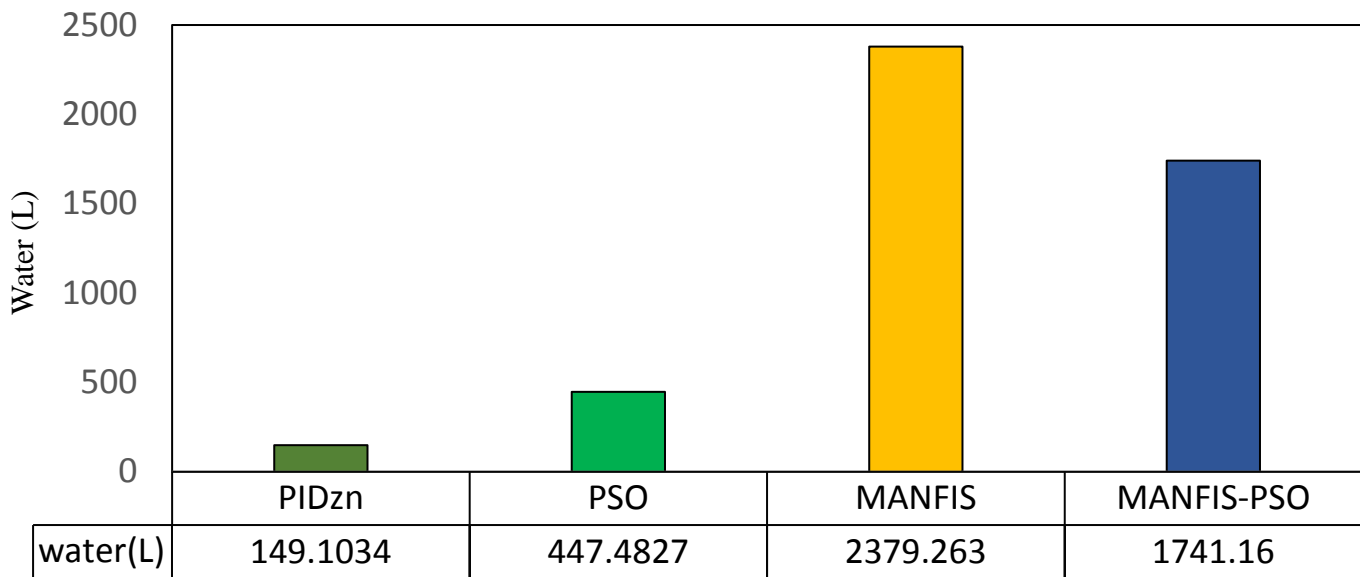
控制方法	產氫((kJ/m ³)	PID 控制器 比無控制器 總水的變化量(L/s)	MANFIS-PSO 控制器 比無控制器 增加的產氫量	MANFIS-PSO 控制器 比無控制器 產氫提升效率
without control	5019.08	120000	/	/
MANFIS-PSO	6295.01	121741		



圖十 不同控制器的產氫量



圖十一 不同控制器標準誤差值(Standard deviation, SD)



圖十二 不同控制器水的變化量

圖十可知在產氫量，PSO-PID 與 MANFIS-PSO-PID 較為優秀，在圖十一的標準誤差率的表現中，MANFIS-PSO-PID、MANFIS-PID、PSO-PID 相近，但 MANFIS-PSO-PID 相較下更佳，在圖十二中水的變化量在控制器的控制下水的輸入多寡影響了輸出的產氫量，MANFIS-PID、MANFIS-PSO-PID 明顯高出許多，由圖(十~十二)中可以發現 PIDzn 最不穩定，而 MANFIS-PID 為中等，PSO-PID 為次要，MANFIS-PSO-PID 則為最優是本文中理想的控制器。

5. 結論

本文以氣化爐為研究對象，在 Matlab 下建立氣化爐氣化器模型，提出自適應 MANFIS-PSO-PID 控制器設計，可以得知自適應 MANFIS-PSO-PID 的準確性與可行性，在 Matlab /Simulink 中，利用便利的工具可以迅速調整模糊控制器的歸屬函數與參數，因而建立 MANFIS 與 PSO 控制系統，並利用 Simulink 的模塊，建構氣化爐模組與控制器控制系統，完成項目如：

- (1)建立 MANFIS-PSO-PID，使 PSO 在搜尋 PID 最佳值，收斂時間上面，MANFIS-PSO-PID 與 PSO-PID 比較，MANFIS-PSO 控制方法有效的縮短 PSO 找尋最佳值 12 次，因此可以證明 MANFIS-PSO 在執行效率方面比 PSO-PID 快。

(2)將 MANFIS 與 PSO 兩種控制方法的優點互相結合，運用 MANFIS 控制法的強力學習性，模擬人類的思考方式，在學習過程中，根據輸入的誤差和誤差變化對原先 FUZZY 的模糊規則庫進行自適應性調整，藉此提升氣化爐產氫量，而 PSO 模擬生物覓食習性搜尋方法，應用在 PID 控制上，能自動搜尋最佳值，因此兩種方法結合後，運用於氣化爐氣化器中，可知這是可行的，獲得良好的控制。

(3)透過分析的結果，在模擬氣化爐上面，MANFIS-PSO-PID 較不易受到煤料品質都干擾，可得知 MANFIS-PSO-PID 控制法的產氫量，比一般 PID 控制的產氫量高，在產氫量方面改善了約 25%，MANFIS-PSO 控制法的輸出結果，增加了更多產氫，更符合本文設定的需求，並且對系統突然改變能有較佳的穩定性。

(4)本文透過理論分析與模擬探討，不同的控制方式對輸出性能的影響，由模擬結果了解不同的控制方法對氣化爐的穩定度影響。

6. REFERENCES

- [1], Kazuhiko Maeda, Arne Thomas, Kazuhiro Takanabe, Gang Xin, Johan M. Carlsson, Kazunari Domen and Markus Antonietti, "A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light", *NOVEMBER*, pp.1038-1048, 2009.
- [2] Ilgi Karapinar Kapdan, Fikret Kargi,, "Bio-hydrogen production from waste materials", *Enzyme and Microbial Technology* 38, pp.569–582, 2006.
- [3] Stephen H. Clarke, Andrew L. Dicks*, Kevin Pointon, Thomas A. Smith, Angie Swann, "Catalytic aspects of the steam reforming of hydrocarbons in internal reforming fuel cells", *Catalysis Today* 38, pp.411-423, 2007.
- [4] Y.-H. Percival Zhang, Barbara R. Evans, Jonathan R. Mielenz, Robert C. Hopkins, Michael W. W. Adams, "High-Yield Hydrogen Production from Starch and Water by a Synthetic Enzymatic Pathway", *International Journal of Hydrogen Energy* 32,, pp. 456-467, 2007.
- [5] J. Stephen Herring , James E. O'Brien , Carl M. Stoots , G.L. Hawkes ,Joseph J. Hartvigsen , Mehrdad Shahnam, "Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology", *International Journal of Hydrogen Energy* 32, pp. 440–450, 2007.
- [6] Milad Arabloo, Alireza Bahadori , Mohammad M. Ghiasi , Moonyong Lee , Ali Abbas ,

- Sohrab Zendehboudi, November 2013, "A novel modeling approach to optimize oxygen–steam ratios in coal gasification process", *Fuel* 153, pp. 1–5, 2015.
- [7] G.-S. Liu, H.R. Rezaei, J.A. Lucas, D.J. Harris, T.F. Wall, "Modelling of a pressurised entrained flow coal gasifier: the effect of reaction kinetics and char structure", *Fuel* 79, pp. 1767–1779, 2000.
- [8] Daya Shankar Pandey, Indranil Pan, Saptarshi Das, James J. Leahy, Witold Kwapinski, December 2014, "Multi-gene genetic programming based predictive models for municipal solid waste gasification in a fluidized bed gasifier", *Bioresource Technology* 179, pp.524–533, 2015.
- [9] Qun Jia, Yongxin Li, "The Analysis and Application of the Monitor Model of Gasifier Temperature Based on the PSO Neural Network", *IEEE*, pp.1109-1121, 2013.
- [10] Wang Yuan, Luo Yonghao, Deng Jian, Hu Liyuan, "Modeling and Simulation of Coal Gasification with Carbon Dioxide Reuse System", *IEEE*, pp. 4244-4252, 2009.
- [11] Energy Technology & Thermal Process Chemistry, University of Umea, Sweden, ISSN 1653-0551 ETPC Report 05-02
- [12] Bo Sun, Yongwen Liu, Xi Chen, Qulan Zhou, Ming Su, January, "Dynamic modeling and simulation of shell gasifier in IGCC", *Fuel Processing Technology* 92, pp. 1418– 1425, 2011.
- [13] Le Hoang Sona, Nguyen Duy Linha, Hoang Viet Longb, "A lossless DEM compression for fast retrieval method using fuzzy clustering and MANFIS neural network", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 29, pp. 33 -42,2012.

