

質子交換膜燃料電池系統模擬的應用與發展現況

Application and Development Status of PEM Fuel Cell System Modeling

趙以諾¹、戴志揚²、薛康琳³、張文振⁴、曹芳海⁵

工研院能環所(EEL/ITRI) ¹工程師、⁴主任、⁵組長

國立聯合大學能源與資源學系(National United University) ²助理教授

國立聯合大學(National United University)能源與資源學系/化學工程系 ³副教授

質子交換膜燃料電池(proton exchange membrane fuel cell : PEMFC)是現有發展燃料電池中，技術最成熟、應用層面最廣的一種。除了在材料開發上有極大的突破之外，在電池組設計與組裝，系統水熱管理、電能轉換與管理等都有大幅度的進展。電腦模擬是輔助設計與研發不可或缺的工具，它可以節省實驗開發所需的時間與經費，並且可藉由電腦圖形顯示實驗無法觀察到的流體流速分佈、溫度與電流密度分佈等。本文就電腦模擬在質子交換膜燃料電池發電系統的發展做扼要的介紹，包括理論分析所需的計算流體力學軟體、系統整合分析的軟體套件，以及系統的最適化分析方法。

The low temperature proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is the most mature fuel cell technology among various fuel cells. It has been successfully demonstrated in many applications. Beside the technical breakthrough in fuel cell materials, significantly progress was also made in cell stack design and assembly, system heat and water management, electrical power conversion and management. The computer modeling saves both time and expenses of laboratory and field test. The modeling results can be presented in many visual formats on fluid flow and temperature distribution, etc. This article briefly describes the status on the computer modeling of PEMFC power system. It covers software package and system integration, optimization techniques, and neural network controlling for PEMFC power system.

關鍵字/Key Words

質子交換膜燃料電池(proton exchange membrane fuel cell : PEMFC)、最適化(optimization)、動態系統(system dynamics)、電腦模擬(computer modeling)

一、引言

質子交換膜燃料電池 (proton exchange membrane fuel cell; PEMFC) 是現有燃料電池中，技術最成熟、應用層面最廣的一種。電腦模擬是輔助設計與研發不可或缺的工具，可以節省實驗開發所需的時間與經費，並且可以藉由電腦圖形顯示實驗無法觀察到的流體流速分佈、溫度與電流密度分佈等。電腦模擬燃料電池的尺度很廣，包括：(1) 奈米尺度下，氣體分子動力與擴散、觸媒反應與電極漿料分散現象；(2) 微米尺度下，膜電極組中氣體擴散、離子傳導、水移動現象；(3) 毫米尺度下，雙極板氣體流道設計、表面親疏水性與排水；(4) 發電系統整合、動態特性模擬等。本文就電腦模擬在質子交換膜燃料電池發電系統的發展做扼要的介紹。

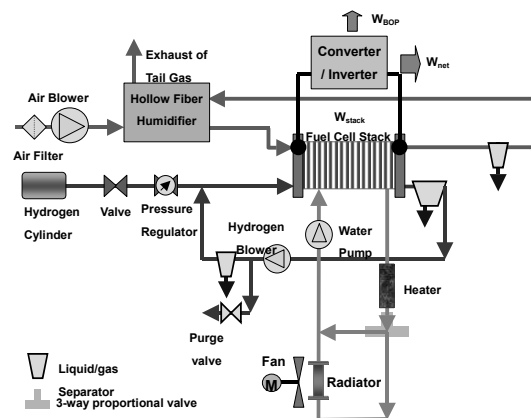
二、質子交換膜燃料電池發電系統

(一) 發電系統簡介

圖一是以純氫為燃料之質子交換膜燃料電池發電系統的基本組件與連接關係。該發電系統主要可分為三個循環迴路，包括氫氣、空氣與冷卻水循環迴路。氫氣循環迴路(紅色線路標示)起始於氫氣源，在經過調壓閥(pressure regulator)後進入電池組的陽極流道中進行反應，排出的氫氣會將來自於陰極因逆滲透而擴散到陽極的水帶出電池組，並在液氣分離器(liquid/gas separator)將水份排出氫氣循環迴路。再經由循環幫浦(hydrogen blower)將未反應的氫氣送回主管線中，並裝設一暫排閥(purge valve)，以定時排出管線中的雜質。

在空氣循環迴路中，空氣經鼓風機(air blower)加壓，送入加濕器(humidifier)加熱、加濕之後，進入電池組之陰極流道(綠色線路標示)。排出電池的空氣先經過液氣分離器將水份抽離後，導至加濕器的冷卻端冷卻、降濕後(釋出的水氣即由前述之增濕端乾空氣吸收)，排出系統外。也就是說，電池組陰極端出口高熱值、高濕度之空氣，恰好是電池組陰極進口端空氣所需，因此這樣的電池陰極空氣進出口熱值回收，成為系統設計重要的一環，特別是空氣中近80%屬於氮氣，氮氣卻是吸收燃料電池內之熱能與水分的重要介質，空氣端的熱管理回收與水含量的控制，對系統性能有決定性的影響。

燃料電池之電壓損失包括觸媒活性不足、電池內阻抗，及反應物在電極內之傳輸阻抗所造成的電壓損失等，此外尚有因氫氣或氧氣穿透所造成之電壓損失。這些電壓損失之能量最後都會在電池內產生熱量，當燃料電池在高功率下運轉，電壓損失的顯熱會隨之增加，導致電池溫度上升，因此需要藉由冷卻水循環迴路控制電池溫度。



▲圖一 氫氣燃料電池發電系統的基本架構與所包括的零組件(彩圖請參照目錄)

冷卻水循環迴路(橘色線路標示)是由水幫浦將冷卻水自水槽打入電池組的冷卻水道，將電池所產生的熱量帶出，並透過散熱水箱(radiator)及風扇將熱排至大氣。電能則由電池組之集電板拉出，經過換流器(inverter)/或變流器(converter)後，輸出至系統元件端或是外部負載端(黑色線路標示)。以上簡述燃料電池發電系統的基本結構、主要元件及各元件的互動關係，實際系統隨著應用需求而有變化。

(二)應用與未來發展潛力

各國之質子交換膜燃料電池的發展除了因應未來能源的短缺之外，更為了環保與緩和溫室效應的要求，而積極推動加速其商業化步調。質子交換膜燃料電池的應用層面很廣，約略可分成三大項，包括(1)作為分散式發電的定置型電源；(2)各型電動交通工具的移動式電源；(3)4C電子產品的攜帶式電源等。作為定置型發電機的燃料電池發電系統，視使用場所的不同而有1~10kW(備用或主要電力)，甚至達到200kW(主要電力)的功率規格。實際上的應用範圍包含：

- (1)熱電共生系統(combined heat and power；CHP)：同時使用燃料電池輸出的電力與所排放出的熱能，如此能源使用效率可達80%以上；
- (2)備用緊急不斷電系統(uninterruptible power supply；UPS)：超高大樓電梯、中小型工廠、行動電話基地台等；
- (3)輔助電力系統(auxiliary power units；APUs)：中小型工廠、家用發電、車輛及船隻等；
- (4)偏遠地區電力供應：可整合如風力、太陽能等之再生能源系統。

(三)系統模擬的應用與重要性

研發燃料電池系統從設計、元件製造或採

購、系統組合到特性測試，是工程浩大的任務。系統模擬可用少量的人力與經費，在短時間內預估與分析系統的各種特性、評估各種設計與操作條件，對系統穩定度、成本、效率、輸出功率的影響，並且可以計算在實際系統無法達到的設計或操作條件。系統模擬在燃料電池系統研發過程中是不可或缺的一環，也是系統整合中的核心技術之一。系統設計、操作、測試最後的結果，將反映在模擬結果的精確度，設計出更好的系統，系統可以控制得更穩定，操作範圍也更廣。

三、系統模擬現況與未來發展

電腦模擬隨著計算機能力與軟體開發日臻完善，也有愈來愈廣的應用領域，對於系統開發提供了事半功倍的成效。近幾年對於模擬的發展，大概包括了(1)整合燃料電池系統的動態分析；(2)質子交換膜燃料電池細部模擬等兩方向。茲將模擬種類與搭配的商业套裝軟體回顧如下，並審視模擬現況與未來發展。

(一)模擬種類

整合系統動態分析為系統設計的工具，以功能需求分析入手，界定空間與時間範圍，進而分析系統基本的操作條件和輸入輸出等參數，以及系統動態特性。以質子交換膜燃料電池系統而言，同時包含燃料供給、空氣壓縮、水熱循環以及電力負荷控制子系統等。Jia, et al.⁽¹⁾與Hung et al.⁽²⁾建立了系統動態分析模式，在MATLAB/ SIMULINK⁽³⁾環境上來描述質子交換膜燃料電池系統動態特性，以提供系統即時動態控制。因應模擬目標不同，Haraldsson and Wipke⁽⁴⁾評估質子交換膜燃料電池的模擬系統，列舉因應不同模擬需求目標而需考慮的模式特徵，Siegel⁽⁵⁾亦參酌這些因子，而回顧近

年熱傳與質傳的計算機模式發展。表一整理質子交換膜燃料電池系統模擬模式的關鍵因素，以提供模擬工具選擇時的參考。

整合系統的模擬是以包括系統性能、電力供應系統整合、應用領域等與控制策略為主的系統動態模擬。現行商業軟體中，例如AVL公司的ADVISOR2004⁽⁶⁾或是Argonne實驗室的GCTool⁽⁷⁾均屬於這類應用，此外Ricardo⁽⁸⁾公司在MSC軟體公司的EASY5⁽⁹⁾系統動態模擬軟體上開發的燃料電池分析模組，亦可以完成質子交換膜燃料電池系統的模擬目標。模擬結果可獲得整合系統性能的描述與控制參數，以提供設計與應用的參考，或是資源與成本的最佳化控制。有許多文獻利用MATLAB/SIMULINK開發質子交換膜燃料電池系統動態模式，並整合再生能源電力供應、燃料電池油電混合車、可攜式電源供應等。在系統整合最佳化的部分，更有許多學者運用模糊理論、基因演算法、類神經網路等控制系統中最佳化的分析工具，應用在整合燃料電池系統分析中。

在細部設計與分析上，利用計算流體力學分析於質子交換膜燃料電池的文獻，包括整體質子交換膜燃料電池系統特性、氣體渠道、氣體擴散層(GDL)、質子交換膜、雙極板等特性參數。除了質子交換膜燃料電池單體與電池組外，對於燃料電池的輔助系統也有一些分析模

擬的文獻，例如：Tirnovan et al.⁽¹⁰⁾建立空氣壓縮機特性對於燃料電池輸出的影響，Meiler et al.⁽¹¹⁾建立氣體加濕器對於燃料電池輸出的動態特性之非線性預測模式，Funkea et al.⁽¹²⁾建立定置型燃料電池能源供給系統的動態特性，對於這些輔助系統的模擬則相對較少探討。此外針對天然氣或甲醇燃料供給的重組器，也有學者進行研究⁽¹³⁾。

(二)模擬方法與軟體

目前質子交換膜燃料電池的模擬方法，可以區分為(1)整合系統模擬；(2)細部零件模擬兩主軸，所應用的軟體工具多為專業工程應用軟體公司所開發的商業套件。表二整理目前商業化的系統整合模擬軟體，分析常用的商業軟體，從軟體的應用、使用功能特性等做詳盡的整理回顧。

在這些軟體中，Zhua et al.⁽¹⁴⁾利用等效電路元件模擬質子交換膜燃料電池系統，以PSpice⁽¹⁵⁾分析模擬質子交換膜燃料電池系統動態特性。PSpice是電路圖繪製分析軟體OrCAD所搭配的電路分析軟體，可分析諸多電路元件與IC的DC響應、AC響應、暫態與頻率響應等常見的電路分析。

MATLAB/SIMULINK⁽³⁾是Mathworks公司

▼表一 質子交換膜燃料電池模擬模式的關鍵特性

模式處理方式	簡單的解析模式(analytical)、半實驗數據模式(semi-empirical)或是理論分析模式
模式分析狀態	穩態(steady state)或暫態(transient state)
模式應用範圍	PEMFC 元件單體、單一 PEMFC、PEMFC 堆或是燃料電池系統，包含實際電力供給應用(如汽車、市電併聯等)
分析複雜度	電化學、熱力學、流體力學、分子動力學等彼此的關聯及涵蓋的複雜度
計算域	單一方程式的單域(single domain)或是多組聯立方程式的多域(multi-domain)分析
空間維度	0~3 維
時間步進間隔	固定、變動或即時監控
模擬系統特性	計算時間、人機介面、操作彈性

的產品，提供簡單操作介面供模擬數學方程式特性，許多的控制模型與控制介面都可以在此平台上發展。目前許多動態分析或控制的軟體都可支持MATLAB/SIMULINK的分析。在此平台上，美國再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory；NREL)與AVL合作開發汽車動態模擬套件ADVISORTM 2004⁽⁶⁾，其中在先進的燃料與動力供給系統中，將燃料電池的模擬納入。

GCTool⁽⁷⁾同樣是於MATLAB平台上執行的分析模組，是由美國Argonne國家實驗室汽車科技研發中心所開發模擬燃料電池系統的工具，包含了整個燃料電池系統，包括電池組、空氣壓縮機、燃料供應系統、流道流場等數學模式庫，都已建置在套件中，將有利於使用者設計系統與模擬驗證結果。為開發最早且功能最完整的專業燃料電池系統分析套件之一。

Easy5⁽⁹⁾則是系統動態分析的軟體，現為美商麥格尼軒公司(MSC software)整合工程分析軟體中的一個模組。MSC本身專精於有限元素法分析機械元件，以有限元素法的分析軟體NASTRAN起家。RICARDO公司則是汽車開發的研究顧問公司，專精於汽車引擎的研發與汽車系統動態分析。RICARDO開發的燃料電池套件(fuel cell library for EASY5)與GCTool相似，只是這套件支援MSC EASY5。

COMSOL⁽¹⁶⁾是以有限元素分析法在PC上執行的泛用型多重物理量耦合分析軟體，多重物理量運算能力可以執行質子交換膜燃料電池較詳細的分析，但是對於系統動態分析則相對較弱。但是COMSOL的輸出可與MATLAB家族結合，因此擴展應用到系統動態分析上。

對於質子交換膜燃料電池單體或電池組的元件模擬，Siegel⁽⁵⁾對於相關文獻報導做了詳盡的回顧。表三整理近年較多使用者的流體力學套裝軟體，其中ANSYS-FLUENT⁽¹⁷⁾為使用者最多的泛用型有限體積法計算流體力學軟體之一，有許多的應用實例與社群。2006年Fluent被ANSYS整併後，使利用有限元素法分析機械結構的ANSYS擴展應用領域，而完成全面的電腦輔助工程(CAE)，爾後FLUENT軟體將納入ANSYS整合電腦輔助工程的一環，與ANSYS結合成為整合CAE軟體，擴大其應用領域。

CFD-ACE+⁽¹⁸⁾以有限體積法在計算流體力學的分析基礎上，應用多重物理量分析模式，為泛用型計算流體力學整合多重物理量分析模式商用軟體，各不同物理模式採模組化設計，有較大的應用彈性。

COMSOL結合計算流體力學與多重物理分析模式，應用於PC的Windows環境。可以結合化學工程運算模組、化學反應模組、熱傳與質傳等偏微分方程式分析器，分析複雜的物理現

▼表二 質子交換膜燃料電池系統模擬軟體套件

模式名稱	分析平台	模式開發	軟體描述
PSpice	PSpice		電路模擬軟體，透過電路模擬系統的動態特性，將系統以電路分析軟體模擬
ADVISORTM	MATLAB®/SIMULINK®	AVL/NREL	美國再生能源實驗室(NREL)開發的軟體，主要分析汽車的性能與能源經濟議題
GCTool	MATLAB®/SIMULINK®	ANL	美國Argonne國家實驗室，運輸科技研發中心開發的燃料電池分析軟體
RICARDO Fuel Cell Library	MSC EASY5	Ricardo	Ricardo 公司開發的燃料電池資料庫，提供給 MSC 公司的 EASY5 動態分析軟體解析燃料電池動態特性
COMSOL	PC	COMSOL	COMSOL 為多重物理耦合分析軟體，可以將多重物理現象的多重方程式一起解析。

▼表三 常用於模擬PEMFC的CFD套裝軟體

軟體名稱	計算方法	軟體描述	備註
ANSYS FLUENT	有限體積法	最多使用者的商用 CFD 軟體之一，有許多的應用實例。當與 ANSYS 結合成為整合 CAE 軟體，將提升其應用	2006 年 5 月 Fluent 被 ANSYS 整併，爾後 FLUENT 軟體將納入 ANSYS 整合電腦輔助工程的一個模組
CFD-ACE+	有限體積法	原為 CFDRC，泛用型 CFD 整合多重物理量分析模式，使得軟體應用彈性大。各不同模式採模組化設計，應用彈性大	
COMSOL	有限元素法	利用有限元素法結合 CFD 與多重物理分析模式，應用在 PC 上的分析軟體，在 Windows 環境操作的圖形介面	
STAR CD	有限體積法	有很強的多維空間分析能力，因此在 3 維空間運算中有許多應用實績	
OpenFOAM	有限體積法	開放程式碼的 CFD 軟體，採用模組化設計以應用多重物理量的分析，搭配平行運算處理，可以處理大尺度的運算。但是此軟體在 32 位元或 64 位元的 LINUX 系統上運算，其他作業系統則需要自行下載程式碼編譯後執行	

象。COMSOL 具有與 MATLAB/SIMULINK 結合的輸出與輸入介面，更可以將質子交換膜燃料電池運算結果與 MATLAB 的分析模式結合，而增加模擬的深度和廣度。

STAR-CD⁽¹⁹⁾同樣為泛用型有限體積法計算流體力學分析軟體，有較佳的多維空間分析能力，因此在 3 維空間運算中有許多應用實績。在 Sigel 回顧的文獻中，許多文獻都利用此套軟體分析三維的質子交換膜燃料電池。

OpenFOAM⁽²⁰⁾為開放程式碼的計算流體力學分析軟體，應用有限體積法，以模組化的方式應用多重物理量的分析模式，搭配平行運算處理，可以處理大尺度的運算。但是此軟體在 32 位元或 64 位元的 LINUX 系統上運算，其它作業系統則需要自行下載程式碼編譯後執行，此套軟體的前處理與後處理均有不錯的表現。

利用計算流體力學分析質子交換膜燃料電池的相關文獻中，必須藉由物理與電化學的基本原理推導微分方程式，再配合不同的空間尺度模擬分析。由 1990 年代早期分析 1 維或 2 維空間尺度的質能平衡，到 1990 年代後期利用偏微分方程式分析電池單體特性。隨著計算機軟體與硬體日益茁壯，進而分析 3 維空間尺度的非

等溫流道流場及濃度分佈⁽²¹⁾。對於質子交換膜燃料電池的設計參考與性能提升，提供愈來愈詳盡的資料。

(三)國內發展現況

國內在質子交換膜燃料電池的模擬方面具有相當可觀的研發能量，主要發展方向集中於電池組及關鍵零組件之相關研究，然而針對發電系統的設計及性能分析等模擬則較少見。工研院能環所與美國 Argonne 國家實驗室合作，以 Argonne 實驗室開發之 GCTool 軟體模擬系統的操作及性能，透過輸入電池組與周邊元件的性能曲線(如電壓-電流、效率等)，及相關操作條件(如壓降、操作壓力及溫度、燃料與氧氣之流量及利用率等)，計算在不同操作參數下，氣體消耗量、電池組輸出功率、系統淨輸出功率、各周邊元件耗能、系統效率等系統特性，並與實驗數據做比對(圖二、圖三)。

四、最適化技術與類神經網路在模擬上的應用

系統模擬結合最適化技術，可以運用電腦搜索到最佳的設計參數，系統模擬結合類神經

網路，可以運用電腦自動學習到最穩定的控制條件與策略。本節簡要介紹最適化技術與類神經網路。

(一)最適化技術在系統模擬的應用

燃料電池系統的最適化目的是要達到：最低成本的設計^(22~24)、最高運轉效率^(25,26)、最大輸出功率的操作參數^(27,28)、最低燃料用量⁽²⁹⁾等。這些最適化研究都需要定義一個標的函數(objective function; Y)。例如尋求最低成本的標的函數可以定義如下⁽²²⁾：

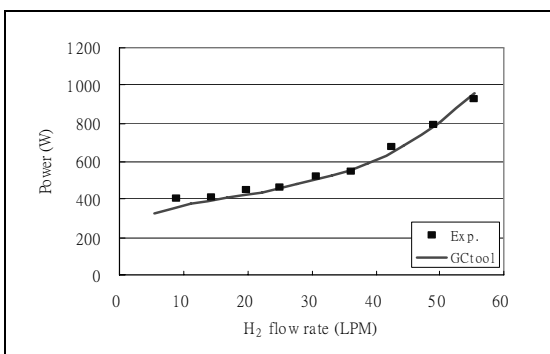
$$Y = \min(\sum \text{cost} - \sum \text{Income}) \quad (1)$$

其中 $\sum \text{cost}$ 是燃料電池系統的發電成本，包括燃料成本、外購電價(若用電量超過發電量)、系統操作成本、發電系統與儲氫設備攤

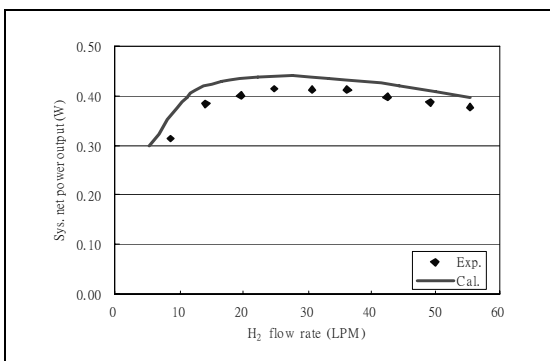
提成本。 $\sum \text{Income}$ 是指售電收入(若發電量超過用電量)。這些標的函數經由最適化的電腦數值方法，搜尋出最低成本的設計或是最高能源轉換效率的操作條件。

最適化技術(最優化、最佳化、optimization)便是運用數值方法搜尋一組參數(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4)的值，這組參數使標的函數達到最大值或最小值，標的函數(Y)的值隨著參數而變化。這函數在特定設計參數或操作參數(X_i)下的數值，可先由模擬靜態或動態燃料電池系統的電腦計算出。最適化技術就是一種電腦搜尋策略，以最簡便的方式改變這些參數，達到標的函數的最大或最小值。

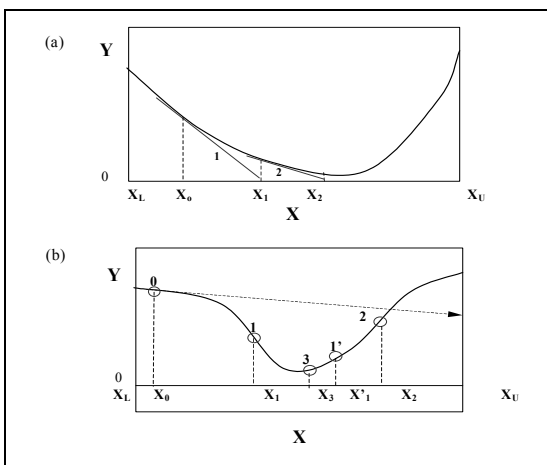
在數學上，一維的最適化可以看作是求取標的函數的根。如圖四(a)可以用數值分析中所謂Newton-Raphson法(或稱為Newton method；牛頓法)求得 $X_{\min}$ ；或者如圖四(b)用Fibonacci搜尋法或黃金比率搜尋方法(Golden ratio search method)。二維以上的最適化可以用各種梯度方法(gradient method)計算搜尋點的梯度，由此梯度外插到新的搜尋點。如圖五(a)標的函數(Y)是參數 X_1 、 X_2 的函數。在起始點 $X_1^{(1)}$ 、 $X_2^{(1)}$ 計算該搜尋點的梯度($\Delta Y / \Delta X_1$ 、 $\Delta Y / \Delta X_2$)，由



▲圖二 5kW質子交換膜燃料電池發電系統總內耗



▲圖三 5kW質子交換膜燃料電池發電系統效率



▲圖四 一維最小化值尋求方法

此外插到下一個搜尋點 $X_1^{(2)}$ 、 $X_2^{(2)}$ 。或者是基因運算(genetic algorithm)運用生化演進、優勝劣敗的策略逐步淘汰掉不適的搜尋點。粒子群最佳化(particle swarm optimization)則是一種仿生運算策略，例如鳥群搜尋食物，圖五(b)的每一搜尋點代表一隻鳥。在每一搜尋循環中，搜尋範圍所有的搜尋點會向目標最近的搜尋點靠近，依此仿生策略搜尋到最佳值。

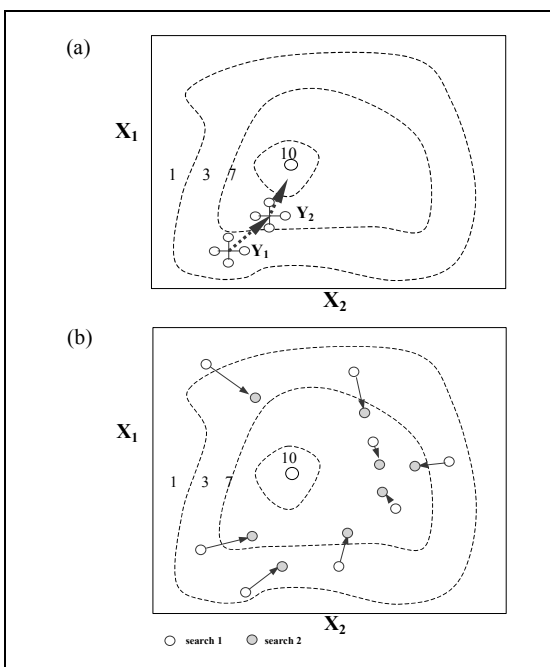
(二)類神經網路

類神經網路模仿生物腦神經細胞處理資訊的方法，將輸入訊號經過神經元(neuron)處理後(圖六-a)，以各種神經元連結方式，將訊號傳遞出去的單層類神經網路(圖六-b)或傳遞到下一層的多層類神經網路(圖六-c)。類神經網路的運作是先以許多組已知訊號($n_{i,j}$)和答案(O_i)輸入類神經網路，經過所謂的學習訓練過程，權重因數($w_{i,j}$)逐漸修正到可以運用的程度。訓練完成後，若輸入訊號是一組未知狀況的資料時，類神經網路便可藉由過去學習的經驗輸出比較合理的答案。

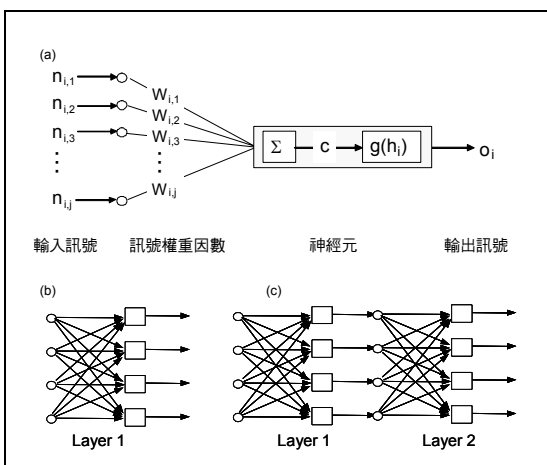
在系統控制或製程控制的應用方面，可先輸入系統模擬或是過取實際操作參數與實測結果，輸入類神經網路訓練學習。訓練過的神經網路便可用於系統或製程的控制，後續實際操作的結果可以繼續輸入網路中，讓網路逐步修正它的控制能力。類神經網路除了運用在控制系統操作外，也已成功地應用在圖形、影像辨識、音樂記憶、資訊分類等。

類神經網路連結方式有許多種，圖六屬於訊號前饋式(feed forward)，將訊號由前一層網路向下一層網路傳遞。圖七屬於訊號回饋式(feed backward)，除了由前一層網路向下一層網路傳遞之外，也會傳回到前一層網路，這種回饋式網路，包括Hopfield Net、Recurrent Net等。這些回饋網路具有記憶功能(associate memory)，例如輸入一小段音樂，網路便可以回憶出下一段音樂等。

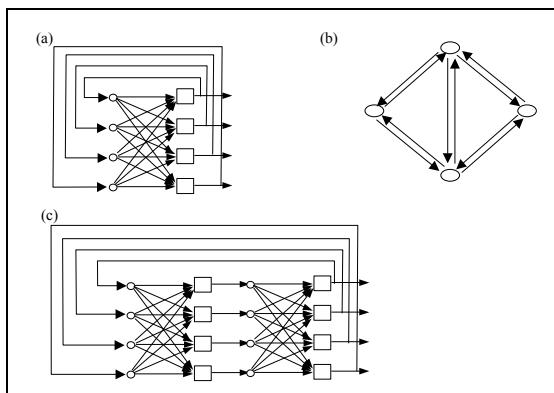
類神經網路近年來開始應用到燃料電池的控制，但是為數不多^(30,31)。Saengrung等人⁽³⁰⁾



▲圖五 二維或多維最大值搜尋方法



▲圖六 類神經元訊號處理與單層/多層類神經網路



▲圖七 各種基本類神經網路聯結方式

以倒傳遞類神經網路(back-propagation; BP)和RBF類神經網路(radial basis function)控制1.2kW Nexa燃料電池系統，如前所述，網路先以800組實驗數據學習訓練，完成之後再以83組實驗數據驗證網路的輸出。

燃料電池系統模擬結合最適化技術，可讓電腦自動搜尋最佳的設計參數和操作條件。燃料電池系統模擬結合類神經網路，可讓系統控制電腦，藉由過去控制經驗逐漸調整控制策略，達到啟動迅速、操作穩定的發電系統。

五、結語

質子交換膜燃料電池發電系統的模擬，可應用於開發初期的系統設計，中期的系統控制與操作參數的最佳化及最適化，甚至是後期長期運轉的失效模式及時間預測等。進一步亦可針對各應用領域之載具性能需求及使用環境特性，建立質子交換膜燃料電池系統之設計準則，將可有效縮短新型系統之研發時程及降低成本。國際間之研究單位已建構出多種系統模擬之架構準則及軟體，相對國內各學研單位除了持續精進於電池組及關鍵零組件的模擬能力外，若能跨入系統模擬軟體及技術能力的發

展，對於未來產業界進行應用載具開發與商品化，應會有相當程度的助益。

參考文獻

1. J. Jia, et al., IEEE TRANS. ENERGY CONVERSION 24 (1) (2009) 283-291.
2. Y.H. Hung, et al., J. Franklin Institute 345 (2008) 182-203.
3. MATLAB/SIMULINK <<http://www.mathworks.com/>>
4. K. Haraldsson and K. Wipke, J. Power Sources 126 (2004) 88-97.
5. C. Spiegel, Energy 33 (2008) 1331-1352.
6. ADVISOR 2004 <<http://www.avl.com/wo/webobsession.servlet/go/encoded/YXBwPWJjbXMcGFmZT12aWV3JiZub2RlaWQ9NDAAwMDMwODI2.html>>
7. GCTool <http://www.anl.gov/techtransfer/Software_Shop/GC_TOOL/GC_TOOL.html>
8. RICARDO fuel cell library <<http://www.ricardo.com/engineeringservices/engine.aspx?page=ricardofuelcelllibraryformsc.easy5%ae>>
9. MSC-ESAY5 <<http://www.msccsoftware.com.tw/products/easy5/easy5.htm>>
10. R. Timovon, et al., Applied Energy 86 (2009) 1283-1289.
11. M. Meilera, et al., J. Power Sources 190 (2009) 56-63.
12. M. Funkea, et al., Chemical Engineering Science 64 (2009) 1860-1867.
13. A.T. Stamps and E. P. Gatzke, J. Power Sources 161 (2006) 356-370.
14. W.H. Zhua, et al., J. Power Sources 178 (2008) 197-206.
15. PSpice <http://www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/pages/default.aspx>
16. COMSOL <<http://www.comsol.com/>>
17. ANSYS-FLUENT <<http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/fluently/default.asp>>
18. CFD-ACE+ <<http://www.esi-cfd.com/content/view/656/209/>>
19. STAR-CD <<http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CD/index.html>>
20. OpenFOAM <<http://www.openfoam.co.uk/openfoam/index.html>>
21. D. Cheddie and N. Munroe, J. Power Sources 147 (2005) 72-84.
22. M.Y. Ei-Sharkh, M. Tanrioven, A. Rahman, M.S. Alam, J. Power Sources, 161 (2006) 1198-1207.
23. S.M. Hakimi, S.M. Moghaddas-Tafreshi, Renewable Energy 34 (2009) 1855-1862.
24. J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, Renewable Energy 34 (2009) 683-691.
25. J. Godat and F. Marechal, J. Power Sources, 118 (2003) 411-423.
26. K. Subramanyan, U.M. Diwekar, A. Goyal, J. Power Sources 132 (2004) 99-112.
27. J.O'Rourke, M. Arcak, M. Ramani, J. Power Sources 187 (2009) 422-430.
28. J. Wishart, Z. Dong, M. Secanell, J. Power Sources 161 (2006) 1041-1055.
29. M.-J. Kim, H. Peng, J. Power Sources 165 (2007) 819-832.
30. A. Saengrue, A. Abtahi, A. Zilouchian, J. Power Sources 172 (2007) 749-759.
31. M. Hatti and M. Tioursi, J. International Hydrogen Energy (2009), doi:10.1016/j.ijhydene.2008.12.094