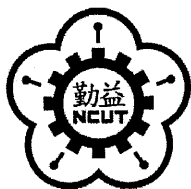


DT
448
4417
100
225159



國立勤益科技大學
電機工程系研究所碩士班

碩士論文

質子交換膜燃料電池故障預測系統

國立勤益科技大學圖書館
Research on Fault Forecasting
System for Proton Exchange
Membrane Fuel Cells

研究生：蔡函學

指導教授：王孟輝 教授

中華民國一百年七月

國立勤益科技大學圖書館



225159

國立勤益科技大學

博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學
電機工程系 電能科技 組 99 學年度第 二 學期取得碩士學位之文。

論文題目：質子交換膜燃料電池故障預測系統之研究
指導教授：王孟輝

■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路	■ 中華民國 102 年 7 月 28 日公開
校外網際網路	■ 中華民國 102 年 7 月 28 日公開

授權人：蔡函學

簽名：

中華民國 100 年 7 月 28 日

國家圖書館

博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學電機工程系 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：質子交換膜燃料電池故障預測系統之研究
指導教授：王孟輝

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

■ 上列論文為授權人向經濟部智慧財產局申請專利之附件或相關文件之一（專利申請案號：99118209 號），請於 102 年 7 月 28 日後再將上列論文公開或上載網路。

■ 因上列論文尚未正式對外發表，請於 102 年 7 月 28 日後再將上列論文公開或上載網路。

授權人：蔡函學

親筆簽名及蓋章：蔡函學  民國 102 年 7 月 28 日

電話：

聯絡地址：新北市新海路 397 巷 6 之 1 號

E-Mail：anan52077@hotmail.com

國立勤益科技大學
研究所碩士班
論文口試委員會審定書

本校電機工程系碩士班 蔡函學 君

所提論文 質子交換膜燃料電池故障預測系統之研究

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人：

委員：

指導教授：

主

任：

吳志強
江煒樟
趙貴祥

王益輝

姚賀騰

中華民國 一 百 年 七 月

質子交換膜燃料電池故障預測系統之研究

學生：蔡函學

指導教授：王孟輝教授

國立勤益科技大學電機工程系碩士班

中文摘要

隨著科技的進步，燃料電池逐漸具有商業運用之價值，燃料電池因具有低污染的特點，各國均積極投入開發燃料電池的技術與應用；但燃料電池發電在操作時，很容易受燃料之純度、流量、電池堆溫度、積水效應與負載電流等因素而影響其操作性能，進而導致燃料電池供電不穩；故有必要建構一套狀態監測及預測故障的系統，防止系統操作錯誤導致永久損壞。本論文旨在發展一套狀態監測及預測故障的系統運用於質子交換膜燃料電池，首先使用一套感測模組，配合 Zigbee 無線傳輸系統完成燃料電池狀態監測；其次，利用無線感測模組建立燃料電池之電壓、電流、電池堆溫度與供應氣體之氣壓等數據之資料，同時利用 LabVIEW 人機介面建立此故障預測系統，讓使用者能預先得知系統故障狀態，以便更換元件或切換運轉狀態，達到防範未然之目標。

本論文中將燃料電池系統分成 7 類故障，並利用 13 種特徵建立故障診斷之物元模型。由於燃料電池輸入和輸出具有時間延遲現象，因此本論文利用灰色預測模型預測燃料電池的特徵訊號，分別應用可拓評價方法與可拓類神經網路進行故障預測和診斷，並和其他傳統方法比較其實用性；經實測 200W 之質子交換膜燃料電池的實驗結果驗證，所提之診斷系統較其它方法具有準確率高、訓練時間短及結構簡單等特點。

關鍵字：質子交換膜燃料電池、物元模型、灰色預測、可拓評價方法、可拓類神經網路

Research of Fault Forecasting System for Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Student : Han-Hsueh Tsai

Advisor : Dr.Meng-Hui Wang

Department of Electrical Engineering

National Chin-Yi University of Technology

Abstract

With advancements in technology, the using of fuel cells (FCs) gradually gains commercial value due to low pollution, and many countries are actively developing FCs technologies and applications. However, during power generation of FCs, its operation may be affected by fuel purity and flow, as well as stack temperature resulting in an instable power supply. Many studies have developed FCs fault forecasting systems that can prevent operating errors leading to permanent damage. This paper has developed a FC fault forecasting system using to proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). Firstly, a set of Zigbee wireless sensors with a PC to achieve FCs condition monitoring. The sensor modules are used to construct the data for FCs voltage, current, temperature, and supplied gas pressure. The fault forecasting system is constructed with a Labview human-machine interface, thus, users can forecast the system fault conditions, and replace the system components to prevent future risks.

The system divides faults into 7 fault types, and each fault type has 13 kinds of experimental features to construct the matter-element model. Due to the time delay condition of FCs reactions, this paper first forecasted all operational features of FCs using a gray prediction model. Fault diagnosis uses the extension method and an extension neural network (ENN) to demonstrate the effectiveness of the proposed method, and

compares testing results in a 200W PEMFC with other traditional methods. The experimental results confirmed that the proposed diagnostic system has a very high accuracy, fast learning, and simple structure.

Key word: Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Matter-Element Model, Gray Prediction, Extension Method, Extension Neural Network.



誌謝

研究生涯兩年使學生受益良多，首先感謝恩師王孟輝教授的悉心指導與教誨使得本論文能順利完成，於求學期間給予機會參與計畫與投稿國內外研討會之機會，從中學習專業技能、培養解決問題之能力與待人處事之方法；同時在學習之過程老師總會給與學生很大的自由度，使學生學習到自動自發與積極之學習態度，並當學習時遇到難題時，老師也會即時的給予指導與方向，使學生得以解決困難，謹誌於此，學生由衷之敬意與感謝。此外，感謝口試委員趙貴祥教授、江炫樟教授與華志強教授於百忙之中抽空進行學生之口試，並且對本論文提供諸多寶貴意見與建議，使學生的論文得以更加完善。

學生求學期間特別感謝學長鐘裕國、葉治宏、邱嘉隆、陳昭廷、陳經緯以及李仁豪在研究上進行指導與幫助，使得學生之研究能事半功倍，亦感謝同窗好友黎修宏、張世平、顏志鴻、賴俊源與趙孟鴻等同學在就學階段互相切磋求精進，使得研究生活充滿刺激與充實感；學弟莊倍嘉、蘇于庭、王泰淵、陳柏硯、黃峻豪與魯峻閔等學弟妹，兩位系辦美麗的助理葉郁祺與黃怡倫，以及好友許立安、王郁婷、王雅芳、王子傑與張玲瑛，曾給予學生在各方面提供研究上的協助與幫忙。

最後致上十二萬分的感謝，感謝一直在背後支持學生的雙親、所有關心學生的家人與學生的女朋友王淳葦，在就學期間給予經濟上的支持，讓我無後顧之憂，完成求學生活，若沒有你們的支持與鼓勵，求學的過程中並不會那麼的一帆風順。落筆之際，在次感謝關懷過學生的人，願與你們分享這份榮耀與喜悅。

蔡函學 謹誌

國立勤益科技大學 電機工程系碩士班

中華民國一百年七月

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	IV
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XI
符號說明.....	XII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究方法.....	4
1.4 論文大綱.....	5
第二章 燃料電池簡介.....	7
2.1 前言.....	7
2.2 燃料電池之種類.....	7
2.3 燃料電池之特色.....	10
2.4 燃料電池發電原理.....	11
2.4.1 質子交換膜燃料電池.....	12
2.4.2 質子交換膜燃料電池單電池結構.....	13
2.4.3 質子交換膜燃料電池原理與特點.....	14
2.4.4 質子交換膜燃料電池之模型.....	15
2.5 模擬質子交換膜燃料電池數學模型.....	19
2.5.1 電池堆溫度對電池性能之影響.....	21
2.5.2 氫氧之氣壓對電池性能之影響.....	22
2.5.3 電池堆溼度對電池性能之影響.....	25
2.6 本章小結.....	25
第三章 故障預測系統之架構.....	26
3.1 前言.....	26

3.2 燃料電池系統架構.....	26
3.2.1 質子交換膜燃料電池發電系統.....	27
3.2.2 Modbus 監測模組.....	29
3.2.3 Zigbee 無線傳輸系統.....	30
3.2.4 系統通訊方式.....	31
3.3 質子交換膜燃料電池之故障特徵.....	35
3.3.1 燃料電池故障特徵.....	36
3.3.2 燃料電池故障特徵之擷取方法.....	38
3.3.3 燃料電池狀態監測系統.....	43
3.4 本章小結.....	46
第四章 系統特徵訊號預測之方法.....	47
4.1 前言.....	47
4.2 灰色系統理論之研究.....	47
4.2.1 灰色生成.....	48
4.2.2 灰色關聯分析.....	48
4.2.3 灰色建模.....	48
4.2.4 灰色預測.....	49
4.3 訊號軌跡之預測方法.....	49
4.3.1 預測系統故障狀態之流程.....	50
4.3.2 灰色預測方法.....	52
4.4 本章小結.....	54
第五章 質子交換膜燃料電池之診斷方法.....	55
5.1 前言.....	55
5.2 可拓理論.....	56
5.2.1 可拓物元理論.....	58
5.2.2 可拓關聯函數.....	60
5.2.3 可拓理論之評價方法.....	61
5.3 可拓類神經網路.....	65
5.3.1 類神經網路之理論.....	66
5.3.2 類神經網路之架構.....	68

5.3.3 可拓類神經網路之學習法則	70
5.3.4 可拓類神經網路之診斷法則	76
5.4 本章小結	77
第六章 實驗結果與討論	78
6.1 前言	78
6.2 訊號預測之測試結果	78
6.3 故障診斷之結果	86
6.3.1 利用所提可拓方法診斷之結果	92
6.3.2 利用所提可拓類神經網路診斷之結果	97
6.3.3 所提診斷方法與其它方法之比較	100
6.4 本章小結	102
第七章 結論與未來展望	103
7.1 結論	103
7.2 未來展望	104
參考文獻	105
作者簡介	111

圖目錄

圖 2.1 燃料電池之結構示意圖.....	11
圖 2.2 典型質子交換膜燃料電池單電池模組之結構.....	13
圖 2.3 質子交換膜燃料電池之結構示意圖.....	14
圖 2.4 質子交換膜燃料電池之極化特性曲線.....	18
圖 2.5 質子交換膜燃料電池模擬模型.....	19
圖 2.6 單顆質子交換膜燃料電池輸出之：(a) I-V 曲線；(b) I-P 曲線.....	21
圖 2.7 不同電池堆溫度輸出之 I-V 曲線.....	22
圖 2.8 不同電池堆溫度輸出之 I-P 曲線.....	22
圖 2.9 不同電池堆溫度輸出之 I-E 曲線.....	22
圖 2.10 氧氣壓力為 1atm 輸出之 I-V 曲線.....	23
圖 2.11 氧氣壓力為 1atm 輸出之 I-P 曲線.....	23
圖 2.12 氧氣壓力為 1atm 輸出之 I-E 曲線.....	23
圖 2.13 氫氣壓力為 1atm 輸出之 I-V 曲線.....	24
圖 2.14 氫氣壓力為 1atm 輸出之 I-P 曲線.....	24
圖 2.15 氫氣壓力為 1atm 輸出之 I-E 曲線.....	24
圖 3.1 燃料電池監測系統之架構.....	26
圖 3.2 質子交換膜燃料電池發電系統實體.....	27
圖 3.3 質子交換膜燃料電池發電系統架構.....	28
圖 3.4 質子交換膜燃料電池系統實體正面.....	28
圖 3.5 質子交換膜燃料電池系統實體反面.....	28
圖 3.6 系統通訊方式之架構.....	32
圖 3.7 Modbus 模組內部架構.....	33
圖 3.8 Modbus 模組外觀接腳圖.....	33
圖 3.9 軟體 Dcon 偵測介面.....	34
圖 3.10 Modbus 設定流程圖.....	35
圖 3.11 質子交換膜燃料電池監測系統之感測器放置.....	37
圖 3.12 質子交換膜燃料電池監測系統故障樹.....	39
圖 3.13 40cell 電壓(V_{FC})之變動率.....	39

圖 3. 14 40cell 電壓(V_{FC})之實際波形	40
圖 3. 15 40cell 電壓(V_{FC})移動平均值	40
圖 3. 16 單區間之質子交換膜燃料電池之故障樹.....	43
圖 3. 17 系統架構流程圖	44
圖 3. 18 質子交換膜燃料電池發電系統監測之介面.....	45
圖 3. 19 第一層診斷質子交換膜燃料電池系統.....	45
圖 3. 20 第二層診斷質子交換膜燃料電池系統.....	46
圖 4. 1 灰色預測建立模型之流程圖	51
圖 5. 1 明確集合示意圖	56
圖 5. 2 可拓關聯函數示意圖	57
圖 5. 3 可拓物元之三維空間示意圖	60
圖 5. 4 可拓關聯函數示意圖	61
圖 5. 5 可拓診斷方法之流程圖	65
圖 5. 6 可拓類神經網路之架構.....	66
圖 5. 7 兩個生物神經元之簡化圖.....	67
圖 5. 8 類神經網路架構.....	69
圖 5. 9 可拓距離示意圖	72
圖 5. 10 P 類別與 T 類別權重調整情形-調整前.....	74
圖 5. 11 P 類別與 T 類別權重調整情形-調整後.....	74
圖 5. 12 可拓類神經網路學習流程圖	75
圖 5. 13 可拓類神經網路診斷流程圖.....	77
圖 6. 1 (a) V_{FC} 之預測與實際電壓曲線(b)誤差百分比曲線.....	80
圖 6. 2 (a) I_{FC} 之預測與實際電流曲線(b)誤差百分比曲線	81
圖 6. 3 (a) T_{stack} 之預測與實際溫度曲線(b)誤差百分比曲線	82
圖 6. 4 (a) T_H 之預測與實際溫度曲線(b)誤差百分比曲線.....	83
圖 6. 5 (a) P_H 之預測與實際壓力曲線(b)誤差百分比曲線.....	84
圖 6. 6 (a) α 值之預測與實際值曲線(b)誤差百分比曲線	85
圖 6. 7 電池發電系統正常(F_1)之特徵波形	87
圖 6. 8 電池發電系統排氣閥故障(F_2)之特徵波形	88
圖 6. 9 電池發電系統控溫系統故障(F_3)之特徵波形	89

圖 6.10 電池發電系統氧氣孔堵塞故障(F ₅)之特徵波形	90
圖 6.11 電池各區間電壓正常(F ₁)之特徵波形.....	91
圖 6.12 電池各區間電壓排氣閥故障(F ₂)之特徵波形	91
圖 6.13 電池各區間電壓發生控溫系統故障(F ₃)之特徵波形	91
圖 6.14 電池各區間電壓發生氧氣孔堵塞故障(F ₅)之特徵波形	92
圖 6.15 可拓類神經學習誤差收斂曲線.....	98



表目錄

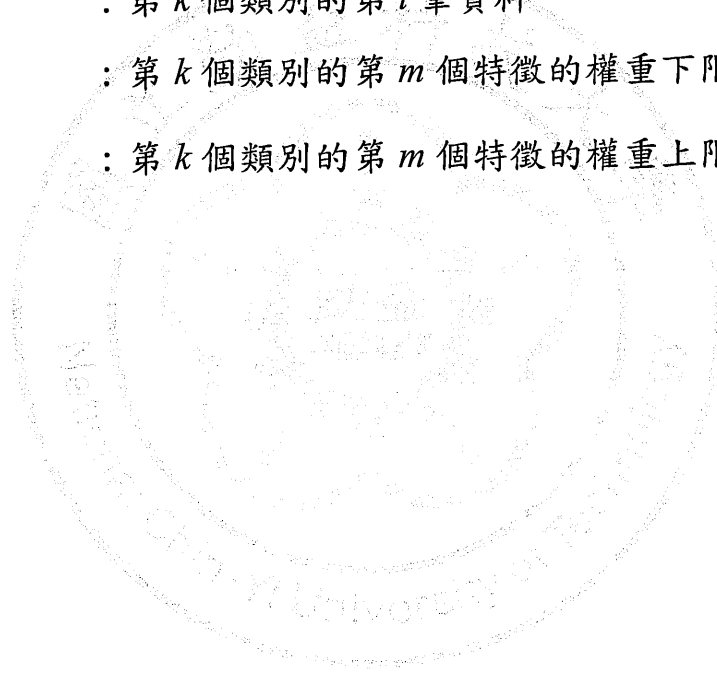
表 2.1 常見燃料電池基本特性之比較.....	8
表 2.2 常見燃料電池基本特性之比較.....	9
表 2.3 Ballard Mark V 型燃料電池參數	20
表 3.1 質子交換膜燃料電池之系統規格表.....	29
表 3.2 ZigBee 無線網路與其它無線網路之差異表.....	31
表 3.3 RTU Mode 訊號格式表.....	34
表 3.4 RTU Mode 功能指令表	35
表 3.5 質子交換膜燃料電池偵測系統故障種類.....	37
表 3.6 質子交換膜燃料電池發電系統 13 個特徵值.....	42
表 3.7 單區間質子交換膜燃料電池之 3 個特徵.....	42
表 4.1 傳統預測方法與灰色預測方法之差異表.....	50
表 5.1 三種類型的數學集合比較表	57
表 5.2 特徵向量數值表	59
表 6.1 系統 13 個特徵值之誤差百分比.....	79
表 6.2 系統 13 個特徵之經典域範圍與節域範圍.....	93
表 6.3 現行狀態之任 14 筆數據資料.....	94
表 6.4 系統 13 個特徵之權重值.....	95
表 6.5 診斷現行狀態 14 筆數據之結果.....	95
表 6.6 第二層之可拓經典域上下限範圍.....	96
表 6.7 第二層之可拓節域範圍與各特徵之權重值.....	97
表 6.8 可拓類神經網路權重上下限與中心值.....	98
表 6.9 可拓類神經網路權重上下限與中心值.....	99
表 6.10 可拓類神經診斷現行狀態之 14 筆數據的結果.....	100
表 6.11 各方法之診斷準確率	101
表 6.12 各方法之診斷準確率	101
表 6.13 各方法之預測準確率	101
表 6.14 誤差容錯能力測試結果.....	102

符號說明

H^+	: 正電之氫離子
e^-	: 帶負之電子
E_r	: 單顆電池開路輸出之熱動力學可逆性電壓
E_{Nernst}	: 單顆電池開路輸出之熱動力學可逆性電壓
V_{ohmic}	: 歐姆電壓
V_{act}	: 極化過電壓
V_{con}	: 擴散限制之質量傳輸所引起之濃度壓降
$\Delta G(\text{J/mol})$: 吉布斯自由能之變化值
F	: 法拉第常數(96487C)
$\Delta S(\text{J/mol})$: 熵之變化值
R	: 氣體的通用常數(8.314J/K·mol)
P_{H_2}	: 氫氣之壓力(atm)
P_{O_2}	: 氧氣之壓力(atm)
T	: 燃料電池工作溫度
T_0	: 參考溫度
I_{FC}	: 燃料電池電流
C_{O_2}	: 氧氣濃度
$\xi_i(i=1-4)$: 各種燃料電池之特性系數
R_C	: 電荷傳送之電阻
R_M	: 質子交換薄膜之阻抗
$l(\text{cm})$: 電解質膜厚度
$\rho_M(\Omega \cdot \text{cm})$: 電解質膜電阻
ψ	: 膜之水含量
$B(V)$: 任何類型燃料電池之常數
J	: 電流密度(A/cm ²)
J_{max}	: 最大電流密度
V_{FC}	: 燃料電池 40cell 電壓

I_{FC}	: 燃料電池 40cell 電流
V_1	: 燃料電池 01-05cell 電壓
V_2	: 燃料電池 06-11cell 電壓
V_3	: 燃料電池 12-17cell 電壓
V_4	: 燃料電池 18-23cell 電壓
V_5	: 燃料電池 24-29cell 電壓
V_6	: 燃料電池 30-35cell 電壓
V_7	: 燃料電池 36-40cell 電壓
T_{stack}	: 燃料電池電堆溫度
T_H	: 氫氣瓶溫度
P_H	: 氫氣進氣壓力
α_{VT}	: 40cell 電壓與電池堆溫度之關係值
Δt	: 取樣時間
m_i^{\wedge}	: 現行變動率
m_{i+1}^{\wedge}	: 下一週期預測點之變動率
m_{i+2}^{\wedge}	: 下兩週期預測點之變動率
\overline{H}_i	: 現行變動率與前 4 點之變動率之平均值
\overline{H}_{i+1}	: 前 3 點、現行系統點與下一週期預測點之平均變動率值
\overline{H}_{i+2}	: 系統前 2 點、現行系統點、下一週期預測點與下兩週期預測點之平均變動率值
$x^{(1)}$: 累加生成
N	: 事物名稱
C	: 事物特徵
V	: 特徵量值
$R=(N,C,C(N))$: 可拓多維物元
X_o	: 可拓經典域
X_P	: 可拓節域

N_k	: 資料的類別總數
c_n	: 可拓物元模型內之特徵
$K(x)$: 關聯程度
x_{in}^k	: 可拓類神經網路輸入端之學習樣本
Z_{med}	: 特徵權重中心值
ED	: 可拓距離
μ	: 可拓類神經網路之學習率
R_k	: 第 k 個類別的可拓類神經權重
X_i^k	: 第 k 個類別的第 i 筆資料
w_{kn}^L	: 第 k 個類別的第 m 個特徵的權重下限
w_{kn}^U	: 第 k 個類別的第 m 個特徵的權重上限



第一章 緒論

1.1 研究背景與目的

自進入 21 世紀以來，隨著科技與經濟的發展，能源需求也逐年增加，目前世界上使用之能源主要仍以石油、煤礦與天然氣等為主要能源，但此種能源是有限不可再生的。另一方面全球能源日益枯竭且工業以及大眾交通工具之大量排放出二氧化碳，造成全球氣候暖化效應，而在 2009 年 12 月 18 日哥本哈根全球減碳會議之後，喚醒了世界對於地球暖化的重視，節能減碳是必須強力執行的政策；使得各國必需積極開發各種新興能源，且必定要選擇具備低污染、低危險性之再生能源[1][2]。

目前最常見之再生能源包括風力發電、太陽能發電、潮汐發電、水力發電與燃料電池(Fuel Cell; 簡稱 FC)等再生能源，但由於風力發電、太陽能發電與潮汐發電等能源，都會隨著外在環境因素而改變發電量，使得發電之輸出功率不穩定，因此也不易應用在日常生活中，眾多綠色能源只有燃料電池具備發電穩定且不易受到外在環境因素而影響。燃料電池之燃料為「氫」，氫取得方式有諸多種類，例如藉由石油、沼氣與天然氣中提煉出或是利用電解水製氫，但我國係屬於四面環海的島型國家，則可利用四面環海之優勢取得氫氣，而我國積極發展燃料電池之技術，並且有助於解決能源短缺等問題。

燃料電池被各國視為最具有發展潛力的乾淨新能源之一，其主要係透過電化學反應直接將燃料轉換成電能；而最早期之燃料電池在 1839 年威廉·羅伯特·葛羅夫爵士(Sir William Robert Grove)之「氣體電池(Gas Voltaic Battery)」實驗，成功地利用稀釋硫酸液體做為電解質產生電能，而後經由不斷之研究，直到 1889 年由兩位化學家提出，電池隔膜具有電解質之多孔非傳導材料，運用鉑黑做為催化劑，以金屬片為電流收集器，所組裝成之電池其操作電壓為 0.73V 則電流密度為 $3.5\text{mA}/\text{cm}^2$ ，若以現行發展來看當時發展燃料電池結構已經相當接近現代燃料電池；現今由於電池材質之改良、功率密度之提高以及所使用之觸媒價格與用量之下降等各種因素之帶動下，使得燃料電池逐漸具

有商業運用性以及競爭能力，所以各國已將燃料電池之技術列為新能源發展之主流[3]；此外電池具備低汙染特點，然而在做為教學用途時之燃料電池發電系統性能檢測，因成本較高、操作繁雜以及環境安全等問題之考量，再者由於操作時，會容易受燃料(氫氣與氧氣或空氣)之純度、流量、電池堆溫度、積水效應與負載電流等影響操作性能，且進而導致燃料電池供電不穩，故吾人有建構一套預測性能與故障診斷之燃料電池發電系統的想法，以便日後可提供初學者或使用者對於燃料電池發電系統性能之理解，更可進一步對燃料電池之產業界提供此診斷技術以及數據庫與此系統之預測之模型，使得燃料電池發電系統能達到防範未來之效果與延長系統使用壽命之目標。

1.2 文獻回顧

曾信元學在 2010 年[4]探討質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell；簡稱 PEMFC)非線性動態模型分析及控制，其論文主要係分析電池若在穩態響應或是在動態響應之 V-I 特性曲線，其結果有助於電池之輸出控制設計，並藉由操作參數對燃料電池之輸出影響分析，得出供應氣體壓力與電池輸出之電壓關係，依據理想氣體壓力與流率之關係，提出了輸入/輸出反饋線性化控制，將誤差值傳回至重組器之輸出流率，以達到控制電池堆中的供應氣體壓力，使輸出電壓穩定至目標值。

楊承鏞之質子交換膜燃料電池之陰極觸媒加速老化之研究在 2009 年提出[5]，係以高頻動態負載對電池進行性能與電池壽命之測試，並且能在短時間內診斷出電池退化之機制；其結果係透過高頻動態負載加速退化，而導致在短時間內使電池之性能急遽下降，此時電池薄膜結構也受到破壞，因此容易產生水氾濫等問題，若不即時解除此問題，則會對電池之供電穩定度造成很大之影響。

林佳德於 2006 年提出之質子交換膜燃料電池性能檢測與倒傳遞神經網路應用之研究[6]，此論文係說明電池在操作之時，容易會因氣體純度不夠或流量不足之影響而導致供電不穩定，因此作者建立一套之「質子交換膜燃料電池故障診斷模型」，則此系統可告知使用者氣體純

度不夠或是流量不足之狀態；其論文中之模擬電池性能模型與電池故障診斷模型的建構，其技術係由倒傳遞神經網路實現，並且藉由實驗結果驗證倒傳遞神經網路演算法係可以運用於此系統。

利用貝氏網路法診斷質子交換膜燃料電池故障系統[7][8]在 2007 年被提出，首先係利用 MATLAB 軟體模擬燃料電池之各種故障之狀態，並且記錄各參數之變化，最後以貝氏網路法診斷電池之狀態，此文章係將質子交換膜燃料電池故障類別分成四類，分別為抽風系統故障、製冷系統故障、系統漏氣故障以及氫氣壓力故障等故障情況。並由以上各種故障情形可得知電池系統故障之電壓、電流、電池堆溫度與空氣流量的變化曲線波形圖，同時作者再使用貝氏網路法診斷各故障情形與各曲線變化之關係，而此方法雖然可以辨識出故障點位址，但有時所辨識出之系統故障點位址可能會出現兩個以上之故障點，使得辨識系統結果不明確，且貝氏網路法之學習次數過高，其次數高達 10000 次以上。

在 2008 年提出一套預測方法以阻抗為基礎來預測質子交換膜燃料電池之健康狀態[9]，此文章係將電池系統之水氾濫的狀態分成三大類，分別為薄膜過乾之狀態、薄膜過溼之狀態以及薄膜正常溼度之狀態，並且再利用交流阻抗分析儀器中之定交流小訊號，響應出此三種狀態之內電阻值的變化情形，藉由內電阻值之變化可以觀察出現行之質子交換膜燃料電池堆薄膜之情況以及預測出電池往後之狀態，其文章雖然可以精確的得知電池的現行狀態與預測狀態，但所使用之儀器成本太高，且不符合實際之推廣。

2011 年運用神經網絡建立診斷質子交換膜燃料電池之故障狀態(過溼與乾燥)[10]，其文章係主要在分析電池之水氾濫等問題，並建構出兩顆質子交換膜燃料電池之故障樹分析，則一顆樹為薄膜過溼之故障樹，另一顆為薄膜過乾之故障樹，且此文章只利用電池電流、電池堆溫度、空氣露點溫度與空氣流率等四個特徵，就可診斷出質子交換膜燃料電池之狀態；其中最大之優點為減少嵌入式系統之使用與適用於任何燃料電池發電之系統，但其文之缺點為只能診斷出三種電池之系統故障狀態。

1.3 研究方法

本論文首先利用 MATLAB/Simulink 軟體模擬質子交換膜燃料電池系統之狀態，若當任何參數改變時，則可能會對電池系統的電壓-電流(V-I)特性曲線產生變化，並藉由此變化情形了解其質子交換膜燃料電池發電的特性；實驗最後以實際操作 200W 之發電系統進行故障預測系統之研究，再由操作之過程中改變電池之各參數，如空氣進氣量、氫氣壓力以及電池堆溫度等參數，並且收集及記錄此數據，將由此數據庫觀察系統在正常與故障情形之曲線差異，則依據此差異可利用所提之可拓理論(Extension Theory)診斷法[11]建立質子交換膜燃料電池發電系統故障與正常之物元模型(Matter Element Model)以及建構可拓經典域(Classical Domain)與節域(Neighborhood Domain)範圍，並再計算關聯函數(Correlation Function)以驗證所提之故障診斷法之準確性；同時本論文將所收集之資料庫用來對所提之可拓類神經網路(Extension Neural Network)診斷法進行學習與重新調整權重值(Weight)，且再經可拓距離(Extension Distance；簡稱 ED)之計算後，其可驗證可拓類神經網路應用在此系統故障診斷之準確度[12]；當診斷系統故障之同時，本論文並使用所提之灰色系統理論(Grey System Theory)[13]進行故障之預測，雖然只對系統預測下一週期與下兩週期之故障點，但此理論已對系統產生很大之幫助，如有預防故障之作用與延長壽命之效果。

將來燃料電池電動車盛行或是使用燃料電池發電系統的普遍，所以本論文將使用 ZigBee 無線傳輸網路系統，係將使系統所收集之數據經由無線網路傳輸至故障診斷中心中進行診斷。則在數據收集之過程中，使用 MODICON 公司在 1979 發展出一套 Modbus 通訊系統，透過此系統擷取感測器所感測出燃料電池系統狀態值，再經類比/數位轉換器(ADC)模組後，傳輸至 ZigBee 無線傳輸網路，藉由 ZigBee 傳回系統中心診斷此訊號；且各國未來勢必要發展燃料電池電動車之同時，可加裝本論文所提之系統，而此系統可即時利用無線傳輸網路系統將燃料電池系統狀態告知使用者，使系統能即時更換損壞之元件與防範故障之行為。則本論文提出以 LabVIEW 人機介面軟體所建構出一套，燃料電池故障預測之系統中心，其系統中心能夠快速診斷與預測下一

週期和下雨週期之故障類別，所以若使用所提之可拓理論診斷法係無需要訓練學習，且只需要少許之數據即可建構故障類別資料庫；另外可拓類神經網路診斷法，係指類神經網路與可拓理論所結合成之理論，其所需學習資料較少、學習效率較快、診斷準確率較高以及使用較小之記憶體容量，更能快速及精確診斷燃料電池系統之故障類別。

1.4 論文大綱

本論文共分成七大章節，其各章內容分別概述如下：

第一章 緒論

簡述此論文之研究背景、目的、國內外文獻回顧以及本論文所提之研究之方法，最後敘述各章節之主要概述。

第二章 燃料電池工作原理與種類之介紹

本章節主要係介紹燃料電池基本架構、工作原理以及電化學反應，並同時以 MATLAB/Simulink 軟體模擬燃料電池系統，由 V-I 特性曲線推導出影響燃料電池系統各參數值之變化，並從模擬單片質子交換膜燃料電池系統中擷取所需之特徵，例如電池電壓(V_{FC})、電流(I_{FC})、溫度(T_{stack})、氫氣壓力(P_H)以及氣瓶溫度(T_H)等特徵。

第三章 預測故障之燃料電池系統架構

本章節主要係介紹如何利用 Modbus 模組抓取故障特徵值，以 ZigBee 無線網路傳輸系統之數據給 LabVIEW 人機介面軟體，並以 Microsoft Office Excel 2003 記錄所測得之各特徵值的數據庫，使未來能讓專家系統利用此數據庫，求得所提之診斷系統所需的可拓經典域與節域之範圍大小，藉由此人機介面軟體建構出一套完整具有質子交換膜燃料電池發電系統監測功能與診斷功能之系統；而此診斷系統又分成兩層，一層為辨別質子交換膜燃料電池發電系統 7 大故障點的診斷層，則另外一層為診斷質子交換膜燃料電池發電系統之各區間電池之故障層，如此可讓使用者能更快速的找出故障點與那個區間電池之故障問題，進而達到快速診斷之目標與防範未然之效果。

第四章 信號預測方法

本章節係使用 GM(1,1)模型作為本論文灰色預測模型，此模型係將現行狀態點與前 4 點狀態之數據共 5 點數據，累加生成運算 (Accumulated Generating Operation；簡稱 AGO 序列 $x^{(1)}$) 所建立出 GM(1,1)模型；並利用 LabVIEW 人機介面軟體完成灰色預測系統預測質子交換膜燃料電池發電系統，本論文藉由灰色預測系統所預測出未來系統之行為(故障點)，可讓使用者提早得知下一週期或下兩週期之系統問題點，以達到預防勝於治療之功用與延長使用系統壽命之效果。

第五章 故障診斷之方法

本章節係主要說明本論文所利用之兩種診斷法則，一個為中國學者蔡文所提之可拓理論，則另外一個理論為可拓類神經網路，係將可拓理論與類神經網路所結合而成之理論，而此理論係為了改善類神經網路之諸多缺點，此網路之學習速度較類神經網路快且診斷準確率高；並且將第三章節與第四章節所擷取質子交換膜燃料電池發電系統之特徵數據值(現行狀態與預測狀態)，轉化成可進行本論文所提之診斷系統的待測物元模型，其診斷結果係由第六章節說明。

第六章 實驗結果與討論

本章節主要採用第三章節與第四章節所擷取之質子交換膜燃料電池發電系統現行狀態與預測狀態之數據庫共 650 筆資料，且利用第五章節之所提診斷方法進行此數據庫之即時診斷系統與預測系統之診斷辨識，除了運用所提方法診斷，本論文也使用其它傳統的診斷演算法進行故障診斷之比較，透過比較準確度之結果；可更加確定所提之診斷電池發電系統之診斷效果能力是否優於其它傳統辨識診斷方法。

第七章 結論與未來展望

本章節主要將本論文之研究成果作總結與測試結果進行分析和討論，最後探討本論文之未來的發展性。

第二章 燃料電池簡介

2.1 前言

燃料電池的源自於 19 世紀初之歐洲兩位科學家珊戴(C.F. Schönbein)教授與威廉·羅伯特·葛羅夫爵士(Sir William Robert Grove)，首度研發出燃料電池之電化學效應，係將氣體電池之基本構想源自於水的電解實驗中，再透過利用電將水分解成氫氣與氧氣，而爵士則認為將氧氣與氫氣作相反的反應後，可能會產生電力。隔年 1839 年一月時，爵士在氣體電池證實此實驗，首先將兩條白金分別放置於兩個密封瓶中，其一個瓶中充滿氫氣，則另一個瓶中充滿氧氣，若此兩個容器同時浸入稀硫酸溶液時，而所產生之電流可在兩個電極之間流動，且裝有氧氣瓶之瓶內，同時也產生水，爵士為了提高所產生之電壓，所以再利用四組相同之裝置並串聯在一起，而後此實驗裝置也被公認為全世界第一顆燃料電池，則稱此系統為「氣體電池」。

「氣體電池」的一詞，一直沿用至 1889 年後才由兩位化學家蒙德(L. Mond)與蘭格(C. Lange)重新命名為「燃料電池」，而在當時所運用鉑黑(Pt Black)做為催化劑，再以金屬片為電流收集器，且所組裝而成之電池，其操作電壓在 0.73V 則電流密度為 $3.5\text{mA}/\text{cm}^2$ ，若以目前科技的發展來看當時發展燃料電池結構已經相當接近現代化燃料電池。則由於爵士所發明之燃料電池因商業化有諸多障礙無法克服，所以人們逐漸淡漠了他的發明，而在科技發展十幾年後，由於電極材料之進步；1959 年劍橋大學培根(F. T. Bacon)博士，才開發出能實際工作之一顆 5kW 之「鹼性燃料電池」，因此也奠定了日後人們對於燃料電池的廣泛使用[14]。

2.2 燃料電池之種類

燃料電池之種類相繁雜，由文獻中最常採用分類方式係根據電解質與操作溫度之不同加以分類，例如低溫型($60^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$)之燃料電池種類電池有質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell；簡

稱 PEMFC)與鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell; 簡稱 AFC), 而中溫型(160°C~220°C)之燃料電池種類電池有磷酸燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell; 簡稱 PAFC), 則高溫型(600°C~1000°C)之燃料電池種類電池有熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell; 簡稱 MCFC)與固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell; 簡稱 SOFC)等 5 種燃料電池, 然而操作溫度影響了燃料電池電化學反應所使用觸媒種類, 同時也影響所使用不同種類的燃料, 並且在不同種類之燃料電池所對燃料處理程度的要求也不盡相同, 如表 2.1 各種類型燃料電池基本特性比較(A 表)與表 2.2 各種類型燃料電池基本特性比較(B 表)[15][16]。

表 2.1 常見燃料電池基本特性之比較

電池種類	質子交膜 (PEMFC)	鹼性 (AFC)	磷酸 (PAFC)	固態氧化物 (SOFC)	熔融碳酸鹽 (MCFC)
溫度類型	低溫型 (60°C~200°C)		中溫型 (160°C~220°C)	高溫型 (600°C~1000°C)	
啟動時間	<0.1h	<0.1h	1h~4h	5h~10h	5h~10h
發電效率	43~58%	60~70%	37~42%	50~65%	>50%
技術	250kW	80kW	11MW	100kW	2MW
先進廠家	<i>Ballarad</i>	<i>IFC</i>	<i>IFC</i>	西屋電氣	<i>ERC</i>
應用	汽車、可攜式電力、住家電源	太空飛行、國防、車輛	熱電合併電廠	熱電合併電廠、複合電廠、住家電源	複合電廠、熱電合併電廠
優點	低污染排放、低噪音、啟動快	低污染、電效率高、維護需求低	低污染、低噪音	能源效率高、低噪音、具有內重整能力	能源效率高、低噪音、具有內重整能力
缺點	與常規發電技術相比價格貴	燃料氧化劑限制嚴格、壽命短、造價高	價格昂貴、發電效率相對低	啟動時間長、對材料要求非常嚴苛	啟動時間長、電解液具腐蝕性

表 2.2 常見燃料電池基本特性之比較

電池種類	質子交換膜 (PEMFC)	鹼性 (AFC)	磷酸 (PAFC)	固態氧化物 (SOFC)	熔融碳酸鹽 (MCFC)	
電解質	高分子	KOH	H_3PO_4	ZrO_2	$LiCO_3-K_2CO_3$	
陰極材料	Pt/C	$Metal/C$	Pt/C	$sR/LaMnO_4$	NiO	
陽極材料	$Pt, Ru/C$	Pt/C	Pt/C	Ni/ZrO_2	$Cr, Al/Ni$	
流動離子	H^+	OH^-	H^+	O^{2-}	CO_3^{2-}	
操作壓力	<30psia	<60psia	<120psia	常壓	<120psia	
氧化劑	O_2 、Air	O_2 、Air	O_2 、Air	O_2 、Air	O_2 、Air	
池體材料	石墨、金屬	金屬	石墨	陶瓷	鎳、不銹鋼	
可用燃料	天然氣、甲醇、輕油	精煉氫氣 電解氫氣	天然氣、甲醇、輕油	天然氣、甲醇、輕油	天然氣、甲醇、輕油	
反應方程式	陰極	$0.5O_2+2H^++2e^-\rightarrow H_2O$	$0.5O_2+H_2O+2e^-\rightarrow 2OH^-$	$0.5O_2+2H^++2e^-\rightarrow H_2O$	$0.5O_2+2e^-\rightarrow O^{2-}$	$0.5O_2+CO_2+2e^-\rightarrow CO_3^{2-}$
	陽極	$H_2\rightarrow 2H^++2e^-$	$H_2+2OH^-\rightarrow 2H_2O+2e^-$	$H_2\rightarrow 2H^++2e^-$	$H_2+O^{2-}\rightarrow H_2O+CO_2+2e^-$	$H_2+CO_3^{2-}\rightarrow H_2O+CO_2+2e^-$
	全部	$H_2+0.5O_2\rightarrow H_2O$	$H_2+0.5O_2\rightarrow H_2O$	$H_2+0.5O_2\rightarrow H_2O$	$H_2+0.5O_2\rightarrow H_2O$	$H_2+0.5O_2\rightarrow H_2O$

2.3 燃料電池之特色

燃料電池皆具有以下五大特點[17][18]：

1. 效率高：

燃料電池運用電化學原理將化學能轉換為電能並且產生熱能，其整體熱電合併效率可達 90% 以上；然而由於各種之限制，目前實際電池能達到之轉換效率約在 40% 至 60% 左右，其發電過程中產生高溫水蒸氣之特點，所以日後在熱電合併時，電池效率可高達 80% 以上。

2. 污染低：

電池主要原料為氫氣燃料，係以化石燃料提煉出氫氣燃料，其取氫之過程中二氧化碳排放量較少，而且燃料電池發電過程中無須燃燒過程，則產生電能過程它幾乎不排放 SO_x 與 NO_x 等氣體，並可有效的減緩地球溫室效應。

3. 噪音低：

因燃料電池結構簡單而且運轉機件較少，所以減少發電過程中產生出噪音值，藉由文獻實驗證明 40kW 磷酸燃料電池發電機組 4.6m 的噪音值為 60dB，而 4.5MW 與 11MW 的大功率燃料電池發電機組的噪音值低於 50dB。

4. 原料廣：

氫氣燃料之源源不絕，對於燃料電池而言係很重要，且含有氫原子之物質都能作為燃料原料來源，例如液化石油氣、煤炭與石油等所有之氣化合物，或是由沼氣、甲醇與酒精等原料，都可以提煉出氫氣，並同時可以減緩主流能源之耗竭。

5. 用途多：

燃料電池發電容量係依據電池片數與單片電池反應面積所決定，因此根據不同使用著之需求組裝出不同規格之燃料電池發電機組，則目前已有能提供的電力範圍在 1W 至 1000MW 之燃料電池。其電池運用在現行之商品非常多元化，例如有可應用於可攜式電力、電動機踏車、電動汽車、集中型電廠、分散型電廠以及共供用電等諸多商品。

且燃料電池具有高密度能量、操作時間長與無需充電等特點，因此目前各國廠商正積極開發「微型燃料電池(Micro Fuel Cell)」取代現有之電二次電池作為可攜帶式電子產品之電源。

2.4 燃料電池發電原理

燃料電池之發電原理與一般傳統所使用之拋棄式電池只有一次之充放電週期即無法再使用係不一樣，也與可重覆充放電之二次電池(Rechargeable Battery)有相當之差異，其發電原理相當簡單，係由一個轉換元件，而當儲存於電池內之燃料反應完畢時，必須停止使用且適時的補上所需燃料，然而再進行發電功能，換言之燃料電池只是一個能量轉換器，並非能量儲存容器，所以只需要持續性的供應燃料給電池，以維持電化學反應之正常動作，則發電過程中並無產生燃燒反應與污染性物質的產生，並且其操作步驟少與效率高等多項優點。其發電原理基本上可是為一逆反應之電解水，若當氫氣抵達陽極(Anode)觸媒層時，則釋放出一帶正電之氫離子(H^+)與帶負之電子(e^-)，氫離子經由電解質(Electrolyte)到達陰極(Cathode)，其中電子係經由外部電路之負載傳回陰極，並在陰極測產生反應完之物質水氣；如圖 2.1 燃料電池之結構示意圖所示[19]。

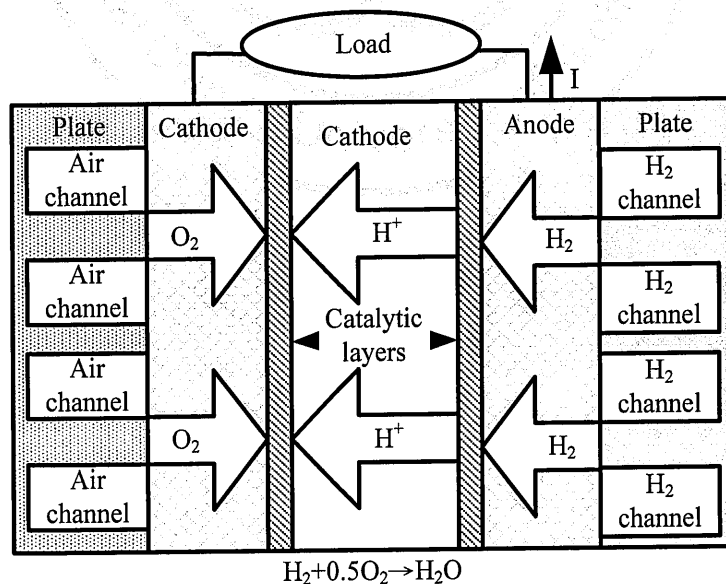


圖 2.1 燃料電池之結構示意圖

2.4.1 質子交換膜燃料電池

電解質是一種固態高分子化合物之燃料電池，係稱為質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell；簡稱 PEMFC)或是高分子電解質燃料電池(Proton Exchange Fuel Cell；簡稱 PEFC)；質子交換膜燃料電池具備了其它燃料電池之共通優點，但它同時具備有其它燃料電池沒有的低溫操作以及快速啟動之特性。因此本論文選擇此類電池作為研究之對象，則此類電池非常適合於電動車電力、可攜式電力與小型家用發電機。而在 1960 年美國首度將 1kW 之質子交換膜燃料電池運用在太空能源計畫中，當作輔助電用，但當時所採用之聚苯乙烯磺酸膜在電池反應中發生劣化，使得所生成的純水不能飲用，發電穩定度差壽命短(約 500 小時)以及鉑催化劑用量過多，基於以上等問題，所以此電池之發展一度停擺。直到 1983 至 1984 年加拿大國防部(Canadian Department of National Defense)贊助巴拉德動力系統公司(Ballard Power System)之質子交換膜燃料電池研究，則此研究解決了氧化劑等問題，同時也使用石墨極板取代原本 NASA 電池中之鈦板，並且降低成本，使得全球再度吹起質子交換膜燃料電池研發旋風。

近年來隨著科技之進步，使得質子交換膜燃料電池薄膜材料性能的改進，功率密度提高以及觸媒價格與使用量下降等因素，讓電池逐漸具有商業化之競爭能力，而原本係屬於軍用之質子交換膜燃料電池發電系統，也慢慢轉向民生用品等，例如 BMW、本田、通用汽車、福特、豐田與戴姆克萊斯勒等眾多車廠，都相繼的開發以質子交換膜燃料電池為主電源之電動車，並且預計不久後的將來上市成為大眾運輸工具之一；此外也可發展可攜式電源、備用電源以及小型發電機等發電系統全是各國目前積極開發質子交換膜燃料電池的產品，如此可得知電池能量轉換效率高、環境污染少與可靠度佳等諸多優點，並成為適應性廣之燃料電池，這也是本論文選擇它之最大原因[20]。

2.4.2 質子交換膜燃料電池單電池結構

質子交換膜燃料電池之單電池係由雙極板、電極、觸媒以及質子交換膜等組件所構成之電池，而文獻有諸多有關各項元件之性能評估法，例如分析觸媒、電極與雙極板結構與表層組織方法就有以下兩項，X 光繞射儀(X-Ray Diffraction；簡稱 XRD)或掃描式電子顯微鏡(Scanning Electronic Microscope；簡稱 SEM)方法；而分析質子交換膜之歐姆阻抗之方法有交流阻抗儀器(AC Impedance)；以旋轉圓盤電極(Rotating Disk Electrode)或循環伏安法(Cyclic Voltammetry)分析電極活性與電觸媒；測量雙極板之流場阻力係利用壓力孔(Pressure Tap)等。然而個別元件之性能好壞係無法呈現整顆電池之性能，因此，必須要將上述之元件組裝成一顆單電池或是電池堆，並且固定任何會影響電池之參數條件下進行性能之評估，而本論文利用電池之操作溫度、空氣溼度與氣瓶溫度等對燃料電池系統進行故障診斷；圖 2.2 所示為典型質子交換膜燃料電池單電池模組的結構[21]。

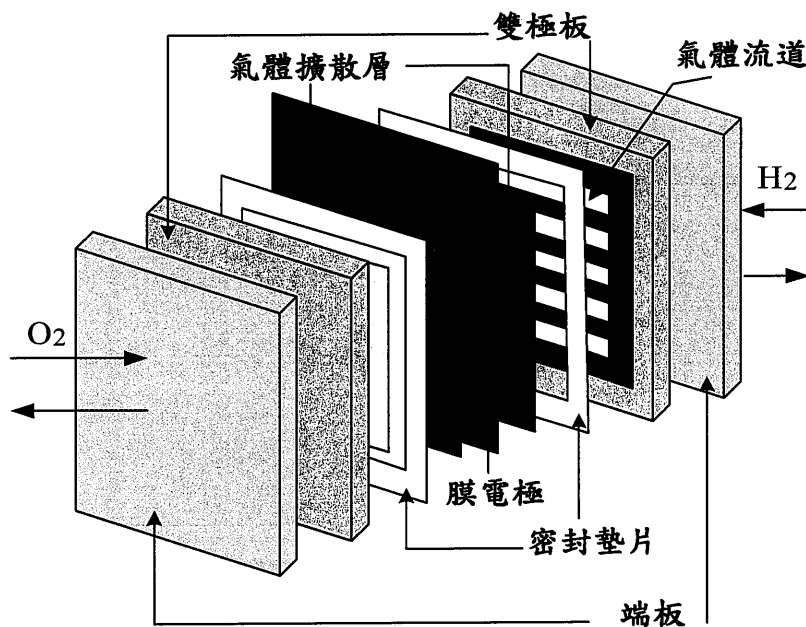


圖 2.2 典型質子交換膜燃料電池單電池模組之結構

2.4.3 質子交換膜燃料電池原理與特點

質子交換膜燃料電池是一種電化學反應，係將淨化重整氫或氫氣等燃料氣體，而氧化劑則為空氣或氧氣；如圖 2.3 所示為質子交換膜燃料電池之工作原理示意圖[22]。將此化學能轉換成電能之能源轉換裝置，其電解質將電池分成兩部分，一邊為陽極與一邊陰極，而在陽極中之氫氣在觸媒催化下，降低活化能，則使解離成氫離子與電子；如式(2-1)所示。



氫離子由質子交換膜通過陰極時，而電子則經由外電路對負載做功後移往陰極。陰極半反應則為氧分子、氫離子以及電子在觸媒之催化下發生還原反應產生水；如式(2-2)所示。



質子交換膜燃料電池在電化學反應過程中由於係為放熱反應，然而質子交換膜若在溫度過高之情況下會因濕度不足而導致膜破裂或是發電效率之下降，為了防止以上種種情況下，所以要維持電池工作溫度(<80°C)以下，且同時須進行冷卻系統與加溼等作業，則其所生成之產物水會經由空氣帶離電池外[23]。

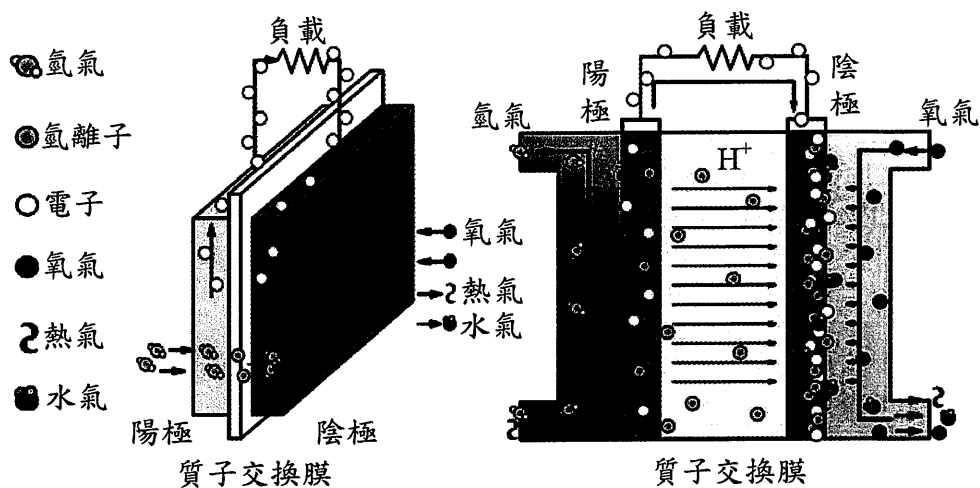


圖 2.3 質子交換膜燃料電池之結構示意圖

2.4.4 質子交換膜燃料電池之模型

J. C. Amphlett[24]運用 Ballard Mark IV 型燃料電池之實驗數據，針對單電池建立出一特性係數之公式進行線性迴歸，並得到質子交換膜燃料電池輸出特性模型，然而運用統計法證實該模型之可信度；如式(2-3)所示。

$$V = E_r + V_{act} + V_{ohmic} \quad (2-3)$$

其中

$$E_r = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T [\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})] \quad (2-4)$$

$$V_{act} = -0.9514 + 0.00312T + 7.4 \times 10^{-5} T [\ln(C_{O_2})] - 0.000187T [\ln(J)] \quad (2-7)$$

$$V_{ohmic} = -J(0.01605 - 3.5 \times 10^{-5} T + 8.0 \times 10^{-5} J) \quad (2-6)$$

則式(2-3)中之 V_{ohmic} 為歐姆電壓與 V_{act} 為極化過電壓，而極化電壓包含單電池之陽極電壓與陰極電壓兩部分，化學反應與電極表層上原子或分子之吸附物理化學過程所產生之電壓，其歐姆電壓係由於電子流在雙極板傳輸與質子交換膜中之傳輸，所引起之阻抗電壓，但 J. C. Amphlett 所開發之模型忽略濃差極化引起之電壓損失。

根據上述，本論文使用 Amphlett 所建立之燃料電池模型為基礎，來進行模擬電池操作之狀態，並從中擷取特徵，以便日後進行預測故障系統。而單顆電池之輸出電壓(V_{FC}) 係熱力學之輸出電壓減去各種消耗引起之電壓損失，並由以下幾個公式所示，其公式可稱為可 Nernst 公式[25]。

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (2-7)$$

式(2-7)中之 E_{Nernst} 表式單顆電池開路輸出之熱動力學可逆性電壓，而參考溫度 25°C 時，則 Nernst 公式得出式(2-8)所示[26]。

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T - T_0) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (2-8)$$

其中吉布斯自由能(Gibbs Free Energy)之變化值由 ΔG (J/mol)表示，則F表式為法拉第常數(96487C)， ΔS 係熵之變化值(J/mol)，R為氣體的通用常數(8.314J/K·mol)， P_{H_2} 與 P_{O_2} 為燃料電池所需氫氣與氧氣之壓力(atm)，燃料電池工作溫度為T所示， T_0 表示為參考溫度；若使用標準溫度下之 ΔG 、 ΔS 、 T_0 以及標準之大氣壓力等值，代入式(2-8)可得出簡化後之式(2-9)。

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} T \times [\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})] \quad (2-9)$$

而式(2-7)中之 V_{act} 為活化陽極與陰極所產生之電壓降，由式(2-10)所示。

$$V_{act} = [\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \ln(I_{FC})] \quad (2-10)$$

則式(2-10)中之 I_{FC} 為燃料電池電流、 C_{O_2} (atm)氧氣濃度與 ξ_i ($i=1-4$)係為各種燃料電池之特性系數，其 ξ_i 經驗係數，分別定義如式(2-11)至式(2-14)所示；陽極與陰極催化劑表層之氫氣與氧氣濃度可根據Henry所定律，如式(2-15)與式(2-16)所示。

$$\xi_1 = -\frac{\Delta G_c}{2F} - \frac{\Delta G}{\alpha_c nF} \quad (2-11)$$

$$\xi_2 = \frac{RT}{\alpha_c nF} \ln \left[nFAK_c^0 (C_{H^+})^{(1-\alpha_c)} (C_{H_2O})^{\alpha_c} \right] + \frac{RT}{2F} \ln \left[4FAK_a^0 C_{H_2} \right] \quad (2-12)$$

$$\xi_3 = \frac{R(1 - \alpha_c)}{\alpha_c nF} \quad (2-13)$$

$$\xi_4 = -\left(\frac{R}{2F} + \frac{R}{\alpha_c nF}\right) \quad (2-14)$$

$$C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{1.09 \times 10^6 \times e^{(77/T)}} \quad (2-15)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \times e^{(-408/T)}} \quad (2-16)$$

則式(2-7)中之 V_{ohmic} 歐姆電壓降，其因電荷傳送之電阻(R_M 、 R_C)將導致燃料電池的電壓損失，遵循歐姆定律；如式(2-17)所示。

$$V_{ohmic} = I_{FC}(R_M + R_C) \quad (2-17)$$

若能使用較薄之電解質膜與高導電材料，可將燃料電池之歐姆損失達到最小化；其式(2-17)中的 R_C 表接觸電子流之電阻，因質子交換膜燃料電池工作溫度範圍內不好得知，所以文獻上通常視為常數；而 R_M 表通過質子交換薄膜之阻抗，可由經驗公式來表示，如式(2-18)所示。

$$R_M = \frac{\rho_M \times l}{A_c} \quad (2-18)$$

$$\rho_M = a / b$$

$$a = 181.6 \left[1 + 0.03 \frac{I_{FC}}{A_c} + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{FC}}{A_c} \right)^{2.5} \right] \quad (2-19)$$

$$b = \left[\psi - 0.634 - 3 \left(\frac{I_{FC}}{A_c} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(T - \frac{303}{T} \right) \right]$$

式(2-18)中之 A_c 表示燃料電池之活化面積區域(cm^2)，電解質膜厚度則由 $l(\text{cm})$ 表示，電解質膜電阻 $\rho_M(\Omega \cdot \text{cm})$ 表示係數；此電阻係數可用式(2-19)所示。參數 ψ 係為膜之水含量，若值落在 14 之間，則表相對濕度在 100% 之理想值，而其值通常都落在 22 至 23 之過飽和之狀態

下，此值為可調節參數。

燃料電池在大電流操作中，所產生之電壓損失為 V_{con} ，則表是為擴散限制之質量傳輸所引起之濃度損失；如式(2-20)所示。

$$V_{con} = B \times \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (2-20)$$

其式(2-20)中 B 表示為任何類型燃料電池之常數，係由燃料電池與運轉狀態所決定其值大小， J 為燃料電池所產生之電流密度(mA/cm^2)；如式(2-21)所示。 J_{max} 為最大電流密度，其值定義在 500 至 1500(mA/cm^2) 上下，是因燃料供應速度有限，所以電流密度不能超出此範圍。

$$J = \frac{I_{FC}}{A_C} \quad (2-21)$$

依據文獻之理論與以上之公式，可得知當電池在理想狀態，電池在任何之負載(電流)條件下，燃料電池之開路電壓都為 1.244V 上下，但實際狀態並非如此，因會隨負載(電流)成反比變化，例如當隨負載(電流)增加而電壓下降，可將此現象稱之極化(Polarization)現象；如圖 2.4 所示為質子交換膜燃料電池之極化特性曲線圖[27]。

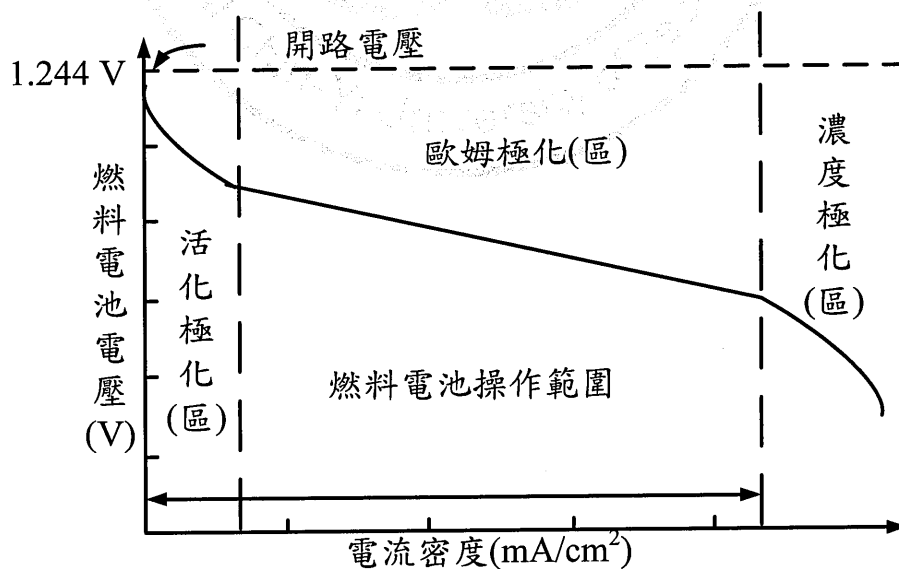


圖 2.4 質子交換膜燃料電池之極化特性曲線

2.5 模擬質子交換膜燃料電池數學模型

由 2.4.4 章節中之公式可以得知質子交換膜燃料電池之數學模型，然而本論文依據此方程式，並使用 MATLAB/Simulink 建立相應之燃料電池模擬模型；如圖 2.5 所示為質子交換膜燃料電池模擬模型圖 [28][29]。

實際模擬情況中，會與實際操作質子交換膜燃料電池有些許之誤差，且無法完整之呈現實際電池之特性，因此必須對模擬系統參數作出一定之假設值；如表 2.3 所示為燃料電池參數[30]。其中參數值可由文獻資料中經驗證實此模型參數是可用，則模擬出之結果與 Ballard 公司所開發之燃料電池輸出特性相近，而本論文所採用之燃料為氫氣、氧化劑為氧氣與質子交換薄膜為杜邦 Nafion117 型，係利用加拿大所開發之 BallardMark V 型之單顆電池參數驗證此模擬之模型。

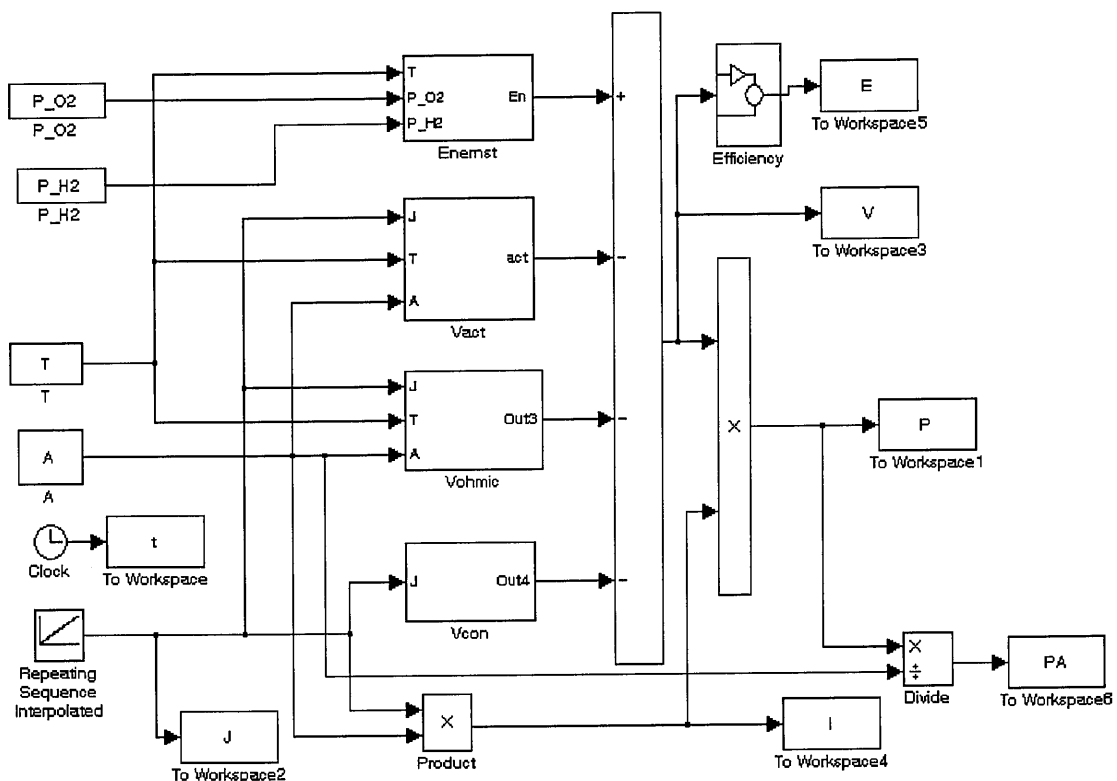


圖 2.5 質子交換膜燃料電池模擬模型

表 2.3 Ballard Mark V 型燃料電池參數

參數	數值	參數	數值
T	343.15 K(45°C)	ξ_1	-0.948
A	50.6 cm ²	ξ_2	$(286+20\ln A+4.3\ln C_{H_2}) * 10^{-5}$
λ	178 um	ξ_3	$7.6 * 10^{-5}$
P_{H_2}	1atm	ξ_4	$-1.93 * 10^{-4}$
P_{O_2}	1atm	Ψ	23
B	0.016V	J_{max}	1500 mA/cm ²
R_C	0.0003 Ω	J_n	12 mA/cm ²

根據式(2-7)之公式與操作電流之間關係，電池電壓會隨著操作電流增加而減少，則圖 2.6 係說明操作單顆質子交換膜燃料電池輸出之 I-V 曲線與 I-P 曲線模擬圖，其圖中之上圖與圖 2.5 相似，而活化極化(區)定義電流密度在 0mA/cm² 至 0.2mA/cm² 範圍內，電池操作區域(歐姆極化)範圍則為 0.2mA/cm² 至 1mA/cm²，其濃度極化(區)之範圍落在 1mA/cm² 至 1.3mA/cm²；經由以往文獻中建議使用者若在操作電池時，盡量操作在歐姆極化(區)內，此區的輸出電壓與負載電流之變動區間較小且比較為穩定，則近似線性關係，此外不會因電流之小範圍的上升或下降，造成輸出電壓有巨大之變動。

從圖 2.6 中可觀察出，質子交換膜燃料電池單片電池不能操作在高電壓下工作，其因相對輸出功率較小，相反單片電池也不能操作至高電流輸出狀態下，其因也是輸出電壓過低，其兩種狀態都會對電池本身造成永久性之損壞，以致減少使用質子交換膜燃料電池之壽命；所以本論文將所提之預測診斷系統方法運用在此範圍，來確保電池是否操作在正常之狀態。

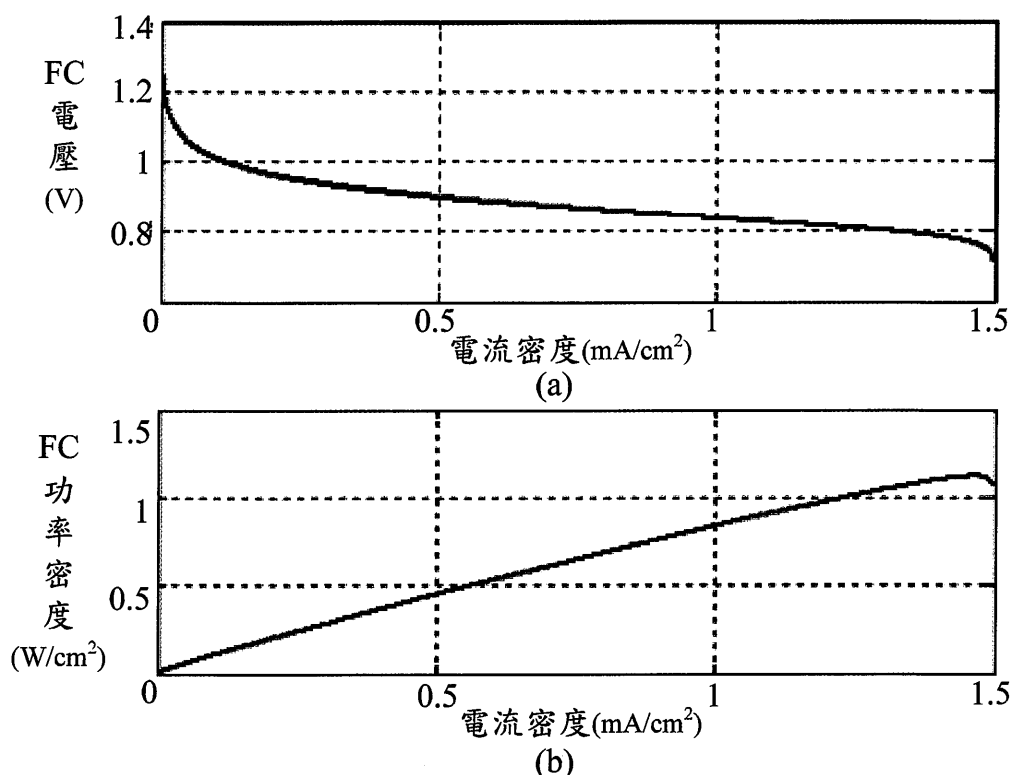


圖 2.6 單顆質子交換膜燃料電池輸出之：(a) I-V 曲線；(b) I-P 曲線

2.5.1 電池堆溫度對電池性能之影響

本論文首先利用 MATLAB/Simulink 建立質子交換膜燃料電池單片電池模組，改變其中電池堆溫度之參數，觀察改變其值對電池之 I-V 特性曲變化與 I-P 特性曲之影響，並從模擬單片電池模組系統擷取故障特徵。現今大部分文獻都採用質子交換膜燃料電池的薄膜為 Nafion 系列，則電池堆溫度介於 0°C 至 80°C 上下，若此電池堆溫度高過於此溫度時，則會使質子傳導性與穩定度有嚴重之降低情形，導致性能受到嚴重之影響；圖 2.7 至圖 2.9 分別在電池堆溫度($T_0=35^{\circ}\text{C}$ (313.5K)、 $T_1=45^{\circ}\text{C}$ (343.15K)與 $T_2=65^{\circ}\text{C}$ (353.15K))與壓力都在 1atm 的氫氣/氧氣時，不同電池堆溫度之變化 I-V 曲線與 I-P 曲線圖；由圖可得知當相同之電流密度時，輸出電壓、功率以效率都會隨著溫度變化，而跟著改變其值之大小，但電池堆溫度也不是無限的提升溫度，則因會影響至電池內

部的溼度值，並且造成薄膜脫水，導致質子交換薄膜溼度不足，使得質子交換膜的傳導率降低。

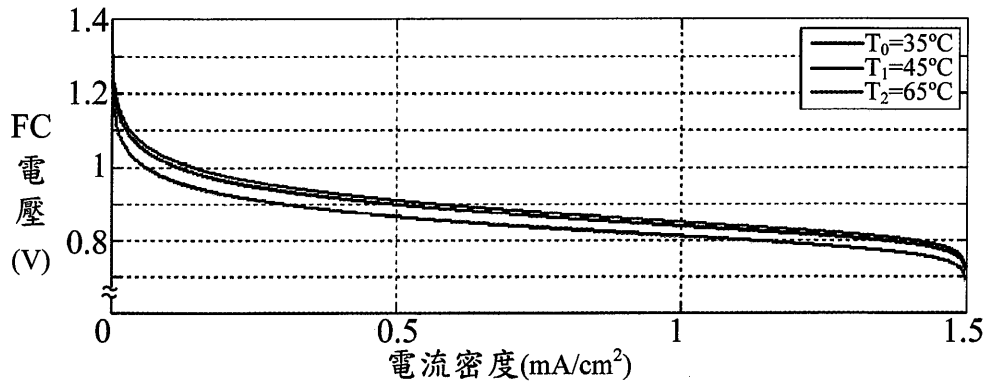


圖 2.7 不同電池堆溫度輸出之 I-V 曲線

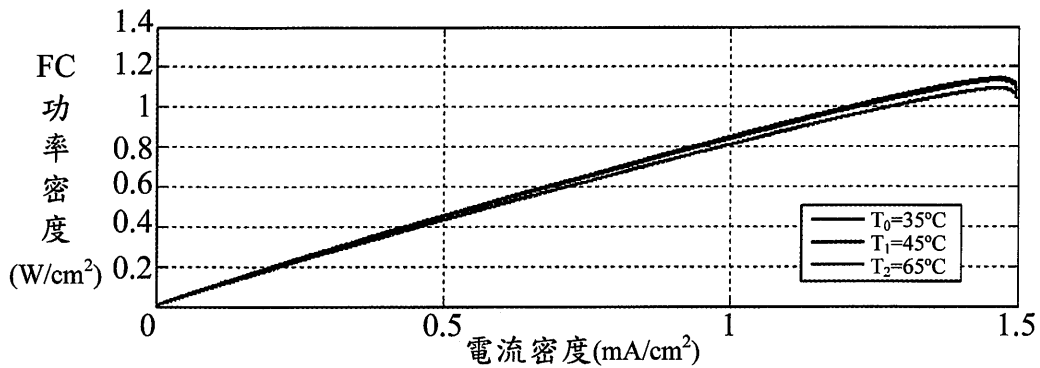


圖 2.8 不同電池堆溫度輸出之 I-P 曲線

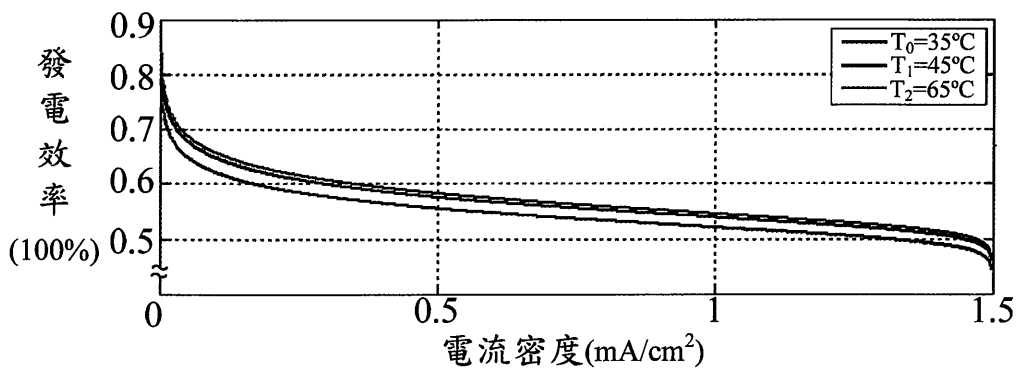


圖 2.9 不同電池堆溫度輸出之 I-E 曲線

2.5.2 氫氣之氣壓對電池性能之影響

圖 2.10 至圖 2.12 所示為若氫氣壓力大於、等於或小於氧氣壓力時

之各波形曲線圖，而由圖中得知，當氫氣壓力大於氧氣壓力時，會讓電池性能有所提升；反之當小於時，電池性能也會跟著下降。

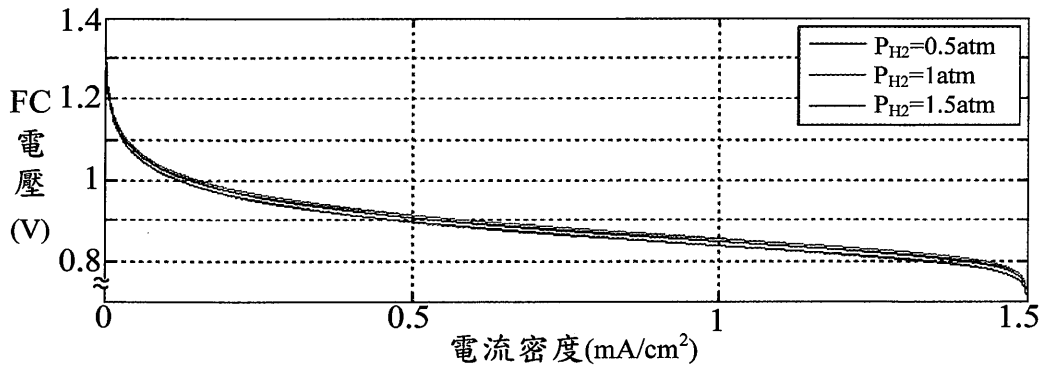


圖 2.10 氧氣壓力為 1atm 輸出之 I-V 曲線

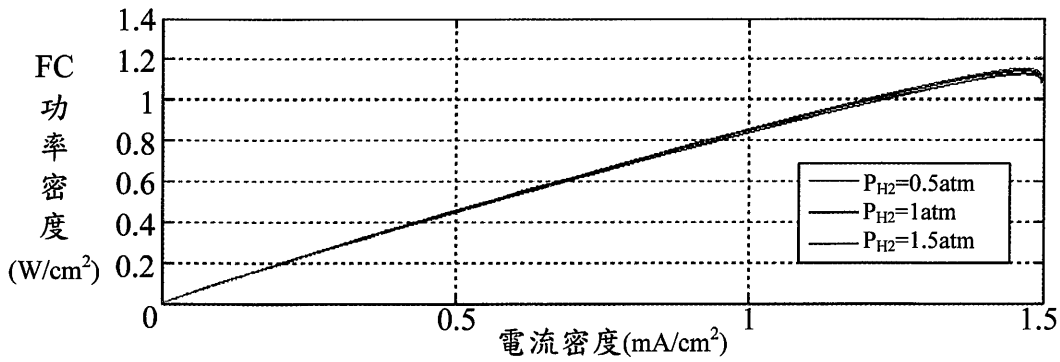


圖 2.11 氧氣壓力為 1atm 輸出之 I-P 曲線

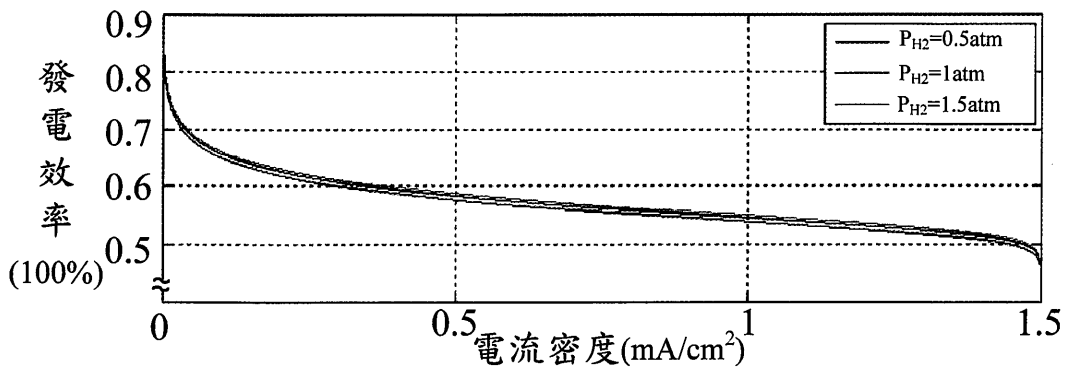


圖 2.12 氧氣壓力為 1atm 輸出之 I-E 曲線

圖 2.13 至圖 2.15 所示為氧氣壓力大於、等於或小於氫氣壓力時之各曲線圖。

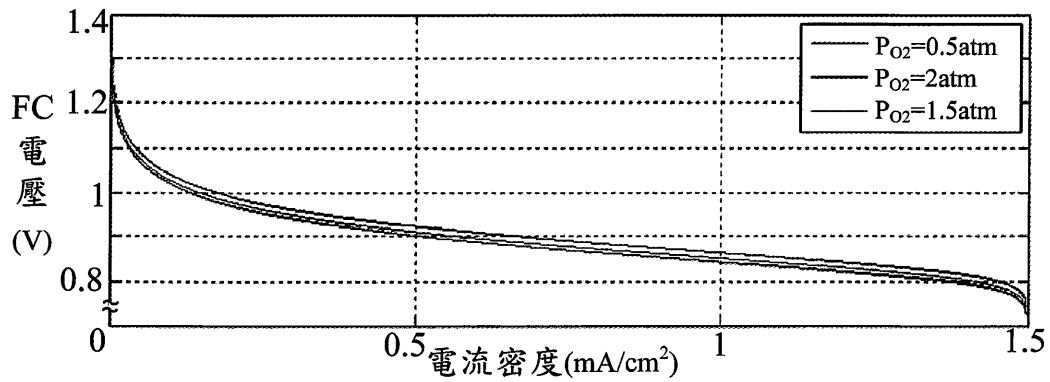


圖 2.13 氫氣壓力為 1atm 輸出之 I-V 曲線

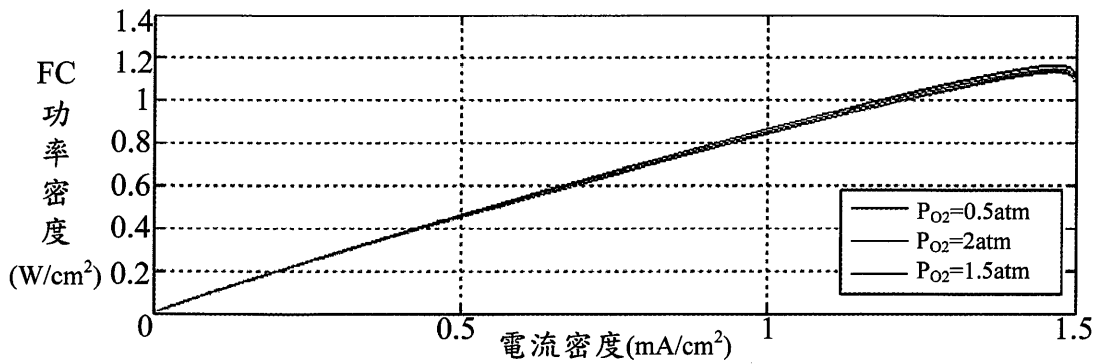


圖 2.14 氫氣壓力為 1atm 輸出之 I-P 曲線

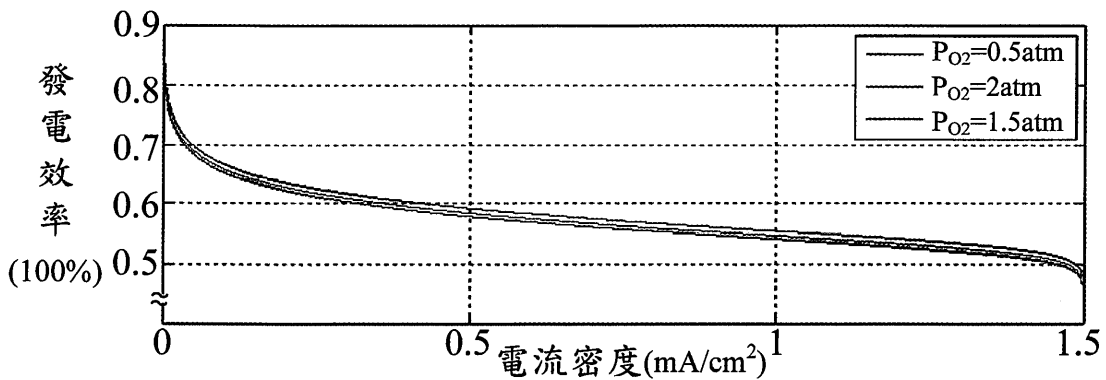


圖 2.15 氫氣壓力為 1atm 輸出之 I-E 曲線

藉由 2.4.4 小節中之 Nernst 方程式可得知，反應氣體壓力較高時，其電池開路電壓也相對的提升，使極化曲線隨著反應氣體分壓的加壓而上升；而從反應過程中之氫氣與氧氣須先流過雙極板擴散至催化層，並且在催化劑表層吸附與解離，若當壓力加壓係有利於加快反應之擴

散速度，但也降低對電池性能之影響，使得電池性能有所提升，所以加壓係有助於提高電池之性能，此外也不能只對氫氣壓力或氧氣壓力之單邊加壓，或是兩邊同時加壓過大之壓力，且記得要隨著此顆電池之規格而定，不然會使電池之薄膜所承受之壓力不同而損壞或破裂，進而導致電池性能降低。

2.5.3 電池堆溼度對電池性能之影響

Nernst 方程中提到 V_{ohmic} 之 Ψ 值為質子交換薄膜水含量，則此值的大小，在一般文獻上都定義此值為 23 時之電池內部含水量最高，表示薄膜為過飽和之狀態，而當此值為 14 時，表示薄膜溼度在相對理想溼度 100%，當此值低於 14 時，表示薄膜溼度不足，導致電池無法產生最佳性能，所以此質子交換薄膜水含量增加且相對濕度上升，則會使質子傳遞速度加快、薄膜阻抗減少與增加電導效率，確保電池薄膜在高濕度之狀態，係可以提高電池之性能；由此本論文並利用此特點找出一個故障特徵。

2.6 本章小結

本章主要係說明如何建立質子交換膜燃料電池之模擬模型，藉由文獻中擷取可用電池之經驗模型，並且利用 MATLAB/Simulink 建立此模型，則模擬不同狀態下之電池之性能；其由模擬出各種曲線顯示結果可得知，若當提高電池堆之溫度會影響電池內部溼度，或是只對電池堆溫度的提高以及氫氣氧氣加壓之不同時，電池之性能也都會有所變化情況，利用模擬過程中發現電池在穩態條件下，質子交換膜燃料電池是沒必要保持在高功率點操作，是因為此時電池所發出電之效率低；並由此可了解特性與找出質子交換膜燃料電池系統故障診斷之特徵，所以此章節對本論文之預測故障診斷之研究有相當大之幫助。

第三章 故障預測系統之架構

3.1 前言

本章節藉由第二章節各種參數對質子交換膜燃料電池系統狀態與性能影響因素進行探討後，將針對此燃料電池發電系統狀態之各種故障特徵，找出最適合預測故障狀態之特徵值，並藉由對此發電系統進行之各種實驗，擷取系統在各種故障狀態下之特徵數據庫分佈之情況，並且分析所擷取之特徵數據，以便能在本論文第四章節預測下一週期與下兩週期之故障特徵值，再則利用第五章節中建構出診斷質子交換膜燃料電池發電系統之故障狀態監測系統。

3.2 燃料電池系統架構

本論文所開發一套具有質子交換膜燃料電池偵測預測故障系統，係使用質子交換膜燃料電池發電系統、感測器系統、Zigbee 無線傳輸系統與人機介面軟體等諸多系統，以建構完成之偵測故障系統；其感測器感測得燃料電池之電壓(V_{FC})、電流(I_{FC})、溫度(T_{stack})及供應氣體之氣壓(P_H)等，同時利用感測器測量之數據會經由 Zigbee 傳輸至 PC、PDA 或是手機螢幕中顯示並監測燃料電池所供電之狀態，則此監測系統介面係採用 LabVIEW 之套裝軟體建立一個監測電池狀態之人機介面；圖 3.1 所示為系統架構圖。

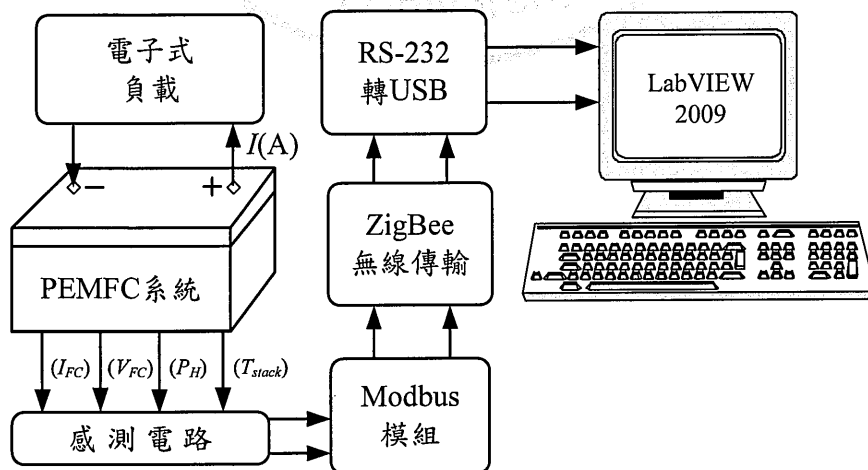


圖 3.1 燃料電池監測系統之架構

其圖 3.1 中之 Modbus 模組是由 MODICON 公司在 1979 發展出來的一套通訊協定，具有標準化與開放式架構之特性，廣泛地被工業自動化所使用的通訊協定[31][32]；圖 3.2 所示為系統實體圖。



圖 3.2 質子交換膜燃料電池發電系統實體

3.2.1 質子交換膜燃料電池發電系統

目前質子交換膜燃料電池大致分成兩類，一種為氫氣與氧氣作電化學反應之燃料電池，另一種為氫氣與空氣中的氧氣作電化學反應之燃料電池，其後者又分成自冷式與加壓式兩種，本論文是採用自冷式之燃料電池；如圖 3.3 所示為質子交換膜燃料電池發電系統架構圖、圖 3.4 所示為質子交換膜料燃料電池系統實體正面圖與圖 3.5 所示為質子交換膜燃料電池系統實體反面圖。

此類質子交換膜燃料電池系統之優點為攜帶方便，且不需要帶氧氣瓶，但與加壓式相較其壽命較短，其原因為係採用大自然空氣中的氧氣，若此環境之空氣受到汙染或是塵埃較多時，燃料電池利用抽風機所吸入之空氣品質不佳，導致薄膜受到阻塞，以致電池發電效率降低；加壓式之燃料電池它較不易攜帶，因要攜帶兩瓶氣瓶，但空氣品質穩定，且使用壽命長；表 3.1 所示為此質子交換膜燃料電池之系統規格表。則此類電池系統係採用單迴路風扇進行供氧氣與散熱(自冷式)，經 CE 認證。

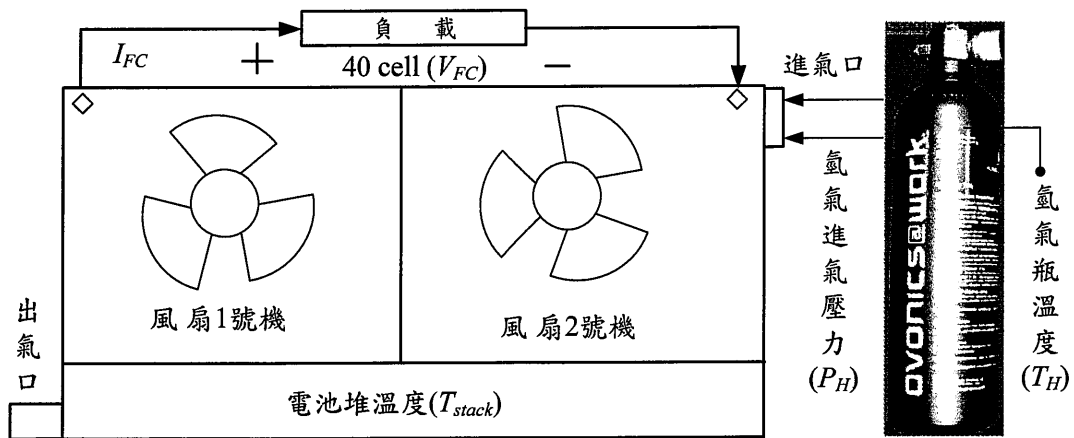


圖 3.3 質子交換膜燃料電池發電系統架構



圖 3.4 質子交換膜燃料電池系統實體正面

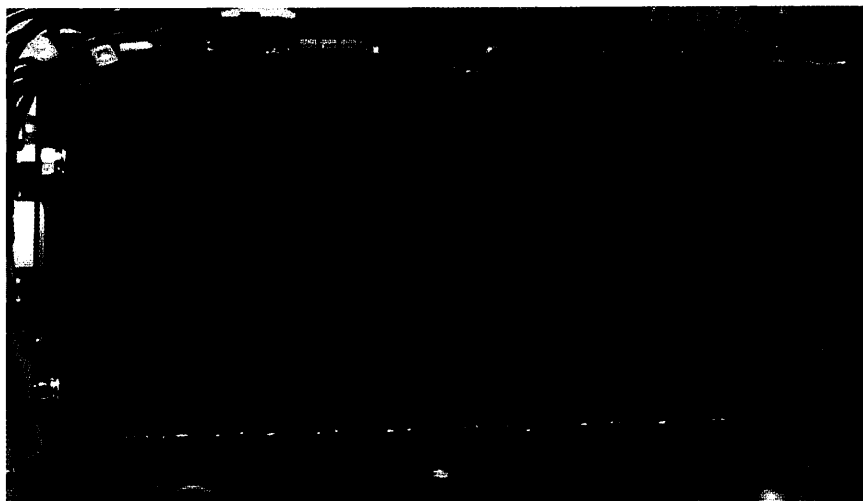


圖 3.5 質子交換膜燃料電池系統實體反面

表 3.1 質子交換膜燃料電池之系統規格表

項目名稱	系統規格
單電池數	40 single cell
散熱系統	氣冷式(自冷式)
額定電壓	24V
額定電流	10A
額定功率	220W
額定功率氫氣消耗量	3L/min
操作直流電範圍	20V 至 38V
操作氫氣壓力範圍	0.4bar 至 0.5bar
空氣燃料壓力	1 大氣壓力
環境溫度	-10°C 至 40°C
相對溼度	20%至 95%
電池溫度	-10°C 至 60°C
系統重量	<800g
系統體積	<1.02L
系統總尺寸:(長*寬*高)	<20*12*6(cm ³)
發電效率	>50%

3.2.2 Modbus 監測模組

Modbus 模組是由 MODICON 公司在 1979 發展出來的一套通訊協定，此通訊透過 Modbus 模組、SCADA(Supervisor Control and Data Acquisition)與 HMI 等軟體，可以很容易將諸多串列設備整合成一套系統；其 Modbus 模組前身則為 Modbus/TCP，於 21 世紀被發展出來，讓 SCADA 與 HMI 等軟體可以透過 Modbus/TCP 存取網路上之設備；而在支援 Modbus 通訊協定之軟體有以下等軟體 Citect、ICONICS、

iFIX、InduSoft、Intouch、Entivity Studio、Entivity Live、Entivity VLC、Trace Mode、Wizcon 與 Wonderware 等眾多軟體，則 Modbus 比其它通信協議使用的更廣泛之主要原因有以下三點[33]：

1. 可以公開發表且無版稅需求。
2. 佈署工業網路架構容易實施。
3. 可修改系統無諸多系統限制。

Modbus 通訊可一次同時，允許諸多設備連接在同條網路上通信；如本論文主要利用它來抓取質子交換膜燃料電池系統之電壓(V_{FC})、電流(I_{FC})、電池堆溫度(T_{stack})與壓力(P_H)等訊號至電腦進行 LabVIEW 數據之傳輸介面。

3.2.3 Zigbee 無線傳輸系統

此系統並利用 ZigBee 無線網路傳輸資料給系統，其 ZigBee 主要是由 IEEE 802.15.4 小組與 ZigBee Alliance 組織，分別制訂硬體與軟體標準，而在實體層(Physical Layer PHY)、媒體儲存控制層(Medium Access Control Layer MAC)與資料鏈結層(Data Link)等發展係由 IEEE 主導規範，此網路架構簡單、消耗功率低、傳輸速率低以及係一種短距離傳輸無線網路，故在一個理想空間並且無干擾環境下，其通訊距離可達到數百公尺遠，ZigBee 無線網路除了此項優點外，還具備以下三大特性[34][35]。

1. 擴充性佳：網路中之協調者(Coordinator)可多達 65535 個網路節點，而不同網路之協調者可相互之傳輸，使整體 ZigBee 無線網路節點可無限延伸。
2. 可靠性佳：若當發射端發出一訊息給接收端，若接收端收到此訊息時，會回覆一訊息給發射端，表已收到此訊息，則無此動作表示沒有收到發射訊息，以此機制提高 ZigBee 無線網路之可靠度。
3. 節省電力：ZigBee 傳輸資料較少、傳輸率低且接收或發射訊號時間短，若與一般 3 號電池結合運用，其壽命可達 2 年以上之時間，故可無須經常更換新電池。

而目前科技有諸多低速度之無線傳輸，例如有紅外線(IrDA)、藍芽、Wi-Fi 與 ZigBee 等無線傳輸網路；表 3.2 所示為 ZigBee 無線網路與其它無線網路之差異表[36]。故由表 3.2 中觀察出 ZigBee 無線網路有成本低廉、低耗電量與傳輸距離遠等多項優點，且有利於本監測系統之研究，所以本論文選擇此無線網路。

表 3.2 ZigBee 無線網路與其它無線網路之差異表

比較項目	紅外線	藍芽	Wi-Fi	ZigBee
傳輸距離	3.8 公尺	10 公尺	100 公尺以上	100 公尺以上
接收角度	有限制	無限制	無限制	無限制
傳輸速度	最快達 16Mbps	1Mbps	11Mbps	20K/40K/250K bps
傳輸方式	850 至 900nm	2.4GHz	2.4GHz	868M/915M/2.4GHz
網路協定	無法構成網路	可構成網路	可構成網路	可構成網路
電磁波干擾	不受干擾	受干擾	受干擾	受干擾
優點	成本低廉	低耗電	傳輸速度高	低耗電、成本低廉
缺點	傳輸角度窄 約±15 度	易受干擾	高耗電量	傳輸速度低
應用市場	家庭市場	傳輸量低之 產品	商用市場	監測/控制等商用 市場

3.2.4 系統通訊方式

系統通訊方式係利用感測器可以感應出所需之參數值，經本論文所用 Modbus 模組將類比訊號轉換成數位訊號(A/D 轉換)，由 RS-485

傳輸埠輸出訊號給 ZigBee 無線網路發射端(A)，再由接收端(B)接受此訊號，利用 RS-232 傳輸埠轉換成 USB2.0 訊號輸出至電腦內的 LabVIEW 人機介面之軟體，並用此軟體進行系統監測；圖 3.6 所示為系統通訊方式之架構圖。

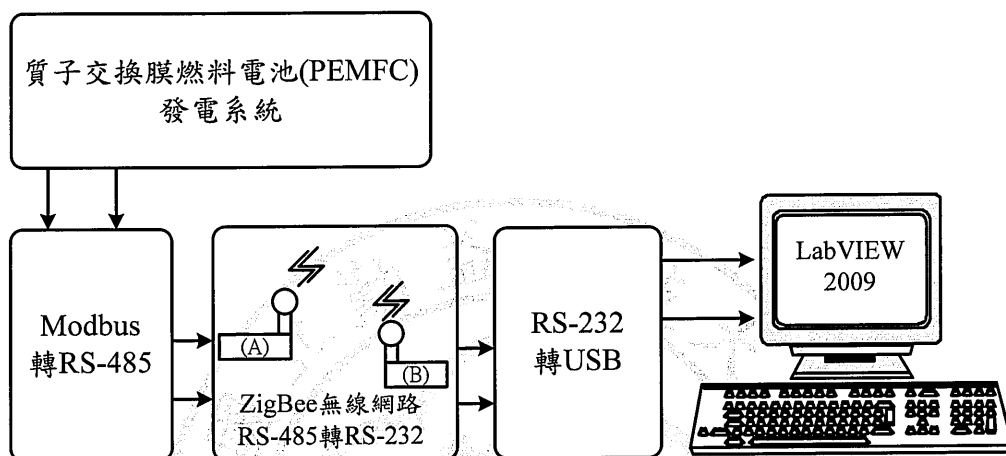


圖 3.6 系統通訊方式之架構

Modbus 模組與電腦通訊前，必須先將其工作電壓 $\pm 30V$ 接至模組之接腳 $+Vs$ (R)與接腳 GND(B)兩端，而使 Modbus 模組有通電之狀態；再將監測系統所需要量測各種訊號資料接至腳位 $Vin(i)^+$ 與腳位 $Vin(i)^-$ ($i=0, \dots, 7$)，經由圖 3.7 之 Modbus 模組內部架構，將訊號 A/D 轉換後，由圖中 RS-485 之兩支腳位輸出此訊號($Data^+$ 與 $Data^-$)，則圖 3.8 所示為 Modbus 模組外觀接腳圖。本論文將以上動作都完成，Modbus 模組則需要再經 MODICON 公司所開發之 Dcon 軟體介面設定以及確認是否有偵測訊號，此步驟為系統通訊方式最為重要之步驟，若未完成此步驟將前功盡棄；其因此系統運用諸多 Modbus 模組，例如有 M-7019R(A)、M-7019R(B)、M-7018、M-7024 以及 M-7060 等模組，若要直接將此 Modbus 模組所收集之訊號，直接傳輸給 LabVIEW 人機介面之軟體是不可行，原因係每顆 Modbus 模組都有不同之位置以及不同量測訊號之功能，所以必定要經由 Dcon 軟體介面設定後，Modbus 模組所收集的資料才能用。

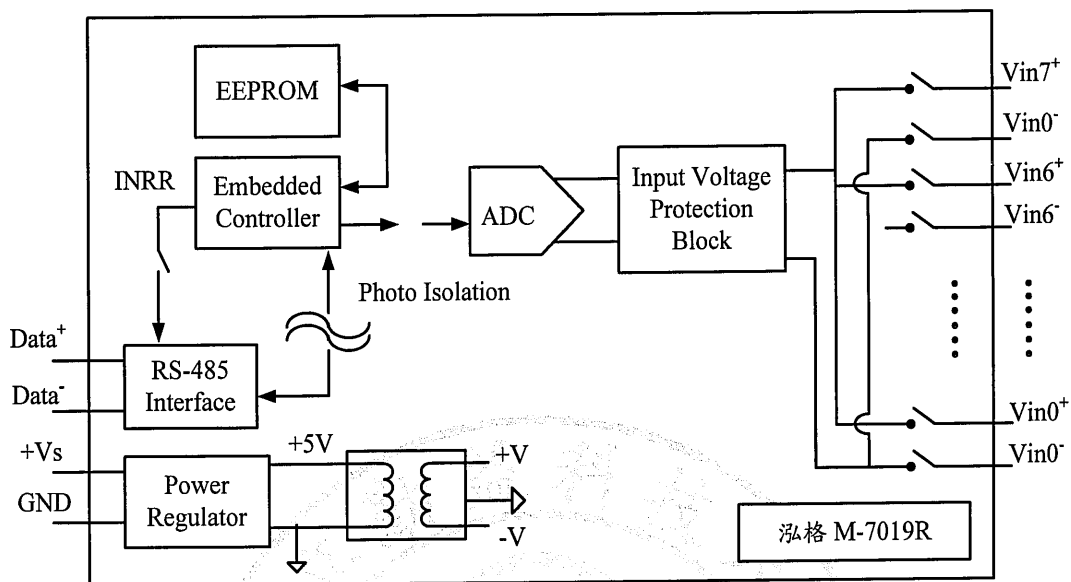


圖 3.7 Modbus 模組內部架構

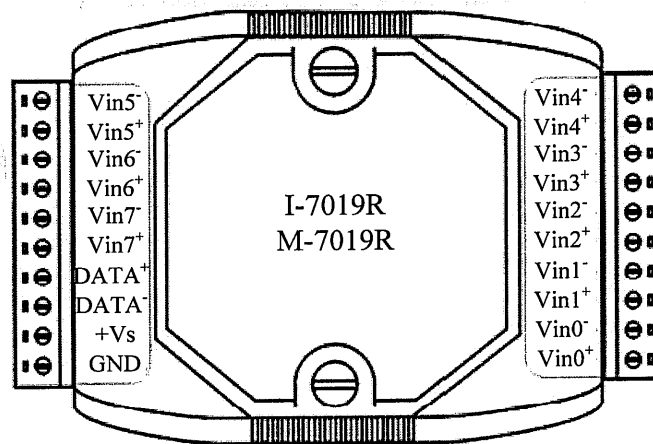


圖 3.8 Modbus 模組外觀接腳圖

圖 3.9 所示為 MODICON 公司所開發之 Dcon 軟體介面圖，圖中之 COM4 通訊埠為電腦訊號接收端；假若此軟體顯示 Modbus 模組型號為 7019R 時，可將通訊參數設為 Modbus RTU，輸入可依量測之訊號調整量測之範圍，若通道開啟圖 3.9 中黃色欄位的 8 組通道檢視其現行系統量測之訊號值大小。

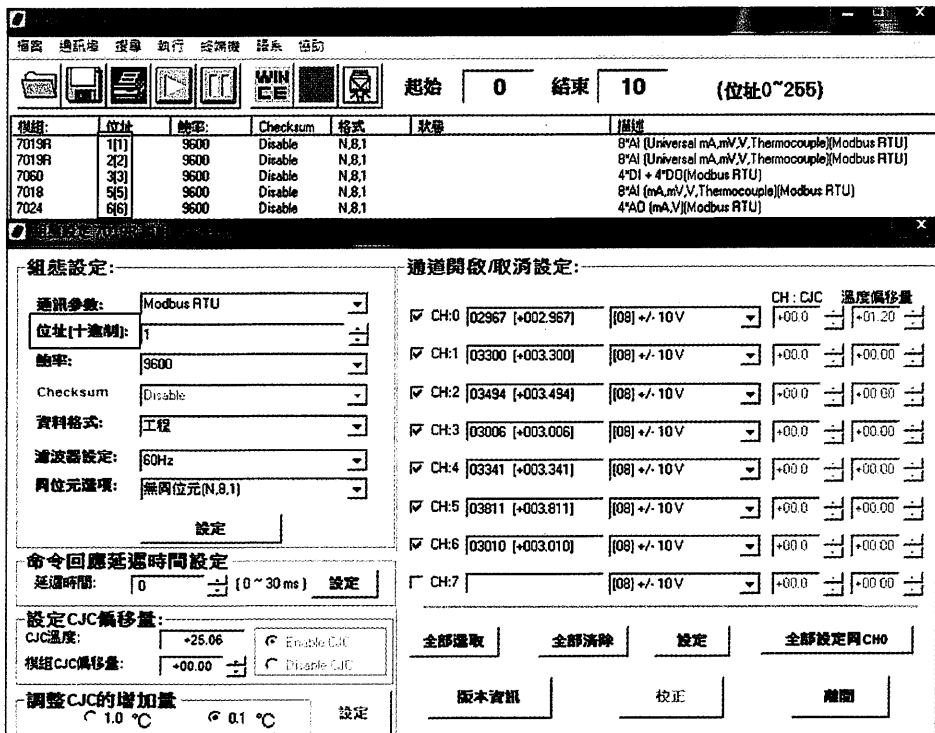


圖 3.9 軟體 Dcon 偵測介面

在 Dcon 軟體介面定義 Modbus 模組中之主控端傳送訊號與裝置元件回應訊號格式，再由其主控端發出訊號，而此訊號包括接收端或是廣播之位址(站號)、功能碼(主控端所要求之動作)、資料(配合要求之功能而提供的資料)以及檢查碼(提供給接收端判定接收資料是否無誤)；如表 3.3 所示為 RTU Mode 訊號格式表與表 3.4 所示為 RTU Mode 功能指令表[37]。

表 3.3 RTU Mode 訊號格式表

位址(站號) < 1 Byte >	功能碼 < 1 Byte >	資料 < n Byte >	檢查碼 < 2 Byte >
各指令說明			
位址(站號)：	一個 8bit 數值在 1 至 247 範圍，位址 0 保留給廣播通訊用，此產品不支援廣播模式。		
功能碼：	一個 8bit 數值，對接收者之功能指令		
資料：	依使用功能不同而加入。		
檢查碼：	一個 16bit 數值之資料，用來檢查接收資料是否無誤。		

表 3.4 RTU Mode 功能指令表

功能碼	指令功能說明
01(0x01)	讀取內部接點狀態
02(0x02)	讀取輸入狀態
03(0x03)	讀取內部暫存器狀態
05(0x05)	設定單點內部地址
06(0x06)	設定單點內部暫存器
16(0x16)	設定多點內部暫存器

而接收端收到主控端所發出之訊號後，則回應對應之訊號已確定完成通訊，若有任何之通訊錯誤產生時，此訊號資料錯誤或接收端係無法完成主控端之要求動作，而所接收之訊號有問題，使其監測系統無法正確之動作；當確定 Dcon 軟體偵測所設定之值後，欲將其在 LabVIEW 介面上做實現；如圖 3.10 所示設定之流程圖，並在程式內選擇通訊埠 COM4，其因 Dcon 軟體係選擇通訊埠，此後輸入通道位置、指令、資料長度以及加上檢查碼(CRC 數值)即可設定完成此通訊方式，例如圖中 RTU Mode 訊號格式所示，則 0103 中表位址為(01)與指令為(03)，而 0000 至 0007 為資料長度，最後為檢查碼(CRC 數值)。

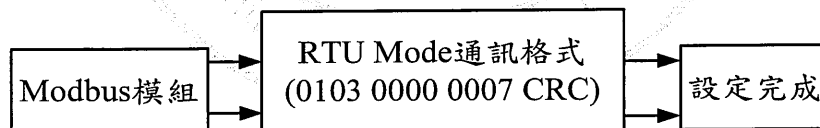


圖 3.10 Modbus 設定流程圖

3.3 質子交換膜燃料電池之故障特徵

係由第二章節中對於模擬改變參數對質子交換膜燃料電池發電系統狀態之影響探討可以得知，目前使用文獻對於燃料電池故障診斷之偵測方法主要分成兩類，一類為使用交流阻抗儀器診斷電池之狀態，則另外一類為使用嵌入式系統對電池偵測狀態，而本論文中所選擇之預測與診斷電池狀態之特徵，係主要考量到以下三大點因素：

(1) 即時偵測

雖然交流阻抗儀器[38]可以迅速的得知電池現行狀態，但因此儀器昂貴，其診斷成本提高；且使用到交流小訊號(電流源)輸入至電池內，從中響應出交流小訊號(電壓)，並由歐姆定律算出電池現行狀態之內電阻值，由此值大小決定此系統狀態，但因此電路較難以實現。所以本論文採用燃料電池系統之電壓為特徵，其原因是當系統若出現任何故障時，第一時間反應出參數為系統電壓降。

(2) 保持電池封裝結構

現行市面所通用之電池堆都已組裝完成，若要以 X 光繞射儀[39]或掃描式電子顯微鏡[40]方法，即時監測系統故障狀態是沒辦法；而本論文所採用區間監測電池電壓狀態，例如有一質子交換膜燃料電池發電系統為 40cell 之電池堆，本論文把 40cell 分成 7 個區間，如此可監測各區間之狀態以及維持電池之完整性。

(3) 硬體限制

本論文先考慮硬體成本之限制與未來可行性這兩方面，此系統目標著重於使研發一套預測故障診斷質子交換膜燃料電池發電系統能在未來可廣泛推行，所以本論文採用 Modbus 模組監測儀器監測此系統，則其架構簡單與成本較低廉，且具有一定之診斷準確率。

3.3.1 燃料電池故障特徵

由文獻[7][8]之中可得知質子交換膜燃料電池，大致會發生故障之原因有哪些，例如本論文所採用之自冷式它係使用抽風機，係將抽外在之空氣給燃料電池作電化學反應，同時也對電池散熱，若抽風扇損壞時，可能會對電池造成傷害，若不即時更換零件，則將使電池將會永久性之損壞以致無法修復之地步。則本論文利用 40cell 電壓(V_{FC})、01-05cell 電壓(V_1)、06-11cell 電壓(V_2)、12-17cell 電壓(V_3)、18-23cell 電壓(V_4)、24-29cell 電壓(V_5)、30-35cell 電壓(V_6)、36-40cell 電壓(V_7)、電流(I_{FC})、電池堆溫度(T_{stack})、氫氣瓶溫度(T_H)、氫氣進氣壓力(P_H)以及 40cell 電壓與電池堆溫度之關係值(α_{VT})，如式(3-1)所示等 13 個特徵值，其各種電壓、電流、溫度與氣壓感測器所放位置，如圖 3.11 所示質

子交換膜燃料電池發電系統之感測器放置位置圖，圖中黑色粗體字係為各感測器所放置位址；發電系統所測得之特徵值，再將此數值送入故障診斷系統找出質子交換膜燃料電池偵測系統之 7 大故障點，分別如表 3.5 所示。

$$\alpha_{V/T} = \frac{V_{FC}}{T_{stack}} \quad (3-1)$$

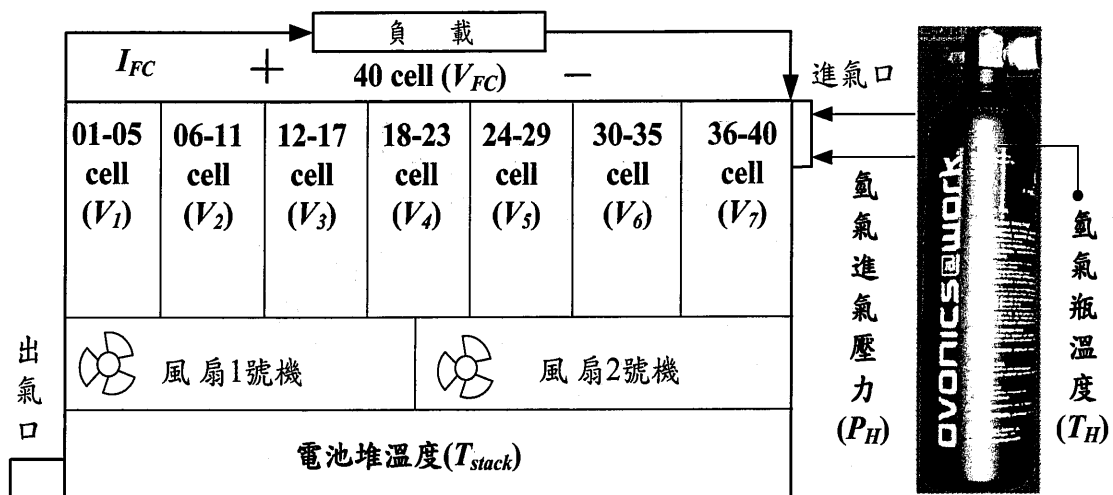


圖 3.11 質子交換膜燃料電池監測系統之感測器放置

表 3.5 質子交換膜燃料電池偵測系統故障種類

項目	故障名稱
F ₁	質子交換膜燃料電池發電系統正常狀態
F ₂	質子交換膜燃料電池發電系統排氣閥故障
F ₃	質子交換膜燃料電池發電系統電池堆溫度失溫
F ₄	質子交換膜燃料電池發電系統之散熱系統故障
F ₅	質子交換膜燃料電池發電系統之氧氣孔堵塞
F ₆	質子交換膜燃料電池發電系統之供氫氣系統故障
F ₇	質子交換膜燃料電池發電系統之通訊系統故障

表中之 F_2 表示為質子交換膜燃料電池反應後之排氣閥故障，若出現此故障系統時，將會造成電池之電壓下降； F_3 與 F_4 分別為散熱系統之故障，若被診斷出故障 F_3 時，則表示此系統散熱過快，反之若診斷出 F_4 時為系統溫度過高，這將會導致系統不穩定之情況； F_5 與 F_6 表供應氣體系統故障，若此兩個故障同時出現或單一出現，都會使系統無法很順利之進行電化學反應；若當判斷出 F_7 時，則表示用之通訊系統出現斷路之情況或是受到外在干擾。

3.3.2 燃料電池故障特徵之擷取方法

利用第 3.3.1 章節經感測器抓取 13 個特徵值並進行預測與診斷故障系統，但因此 13 個特徵值變動較小，使其系統無法預測以及診斷系統，所以將此 13 個特徵值運用式(3-2)算出各特徵值之變動率，其中 13 個特徵值內只有電壓變動率、電流變動率及電池堆溫度變動率共 10 個特徵值，其餘的如進氣壓力、氣瓶溫度與 $\alpha_{(V/T)}$ 值(電壓與電堆溫度之關係值)等 3 個特徵值，並不適用於此式(3-2)，同時利用此式(3-2)與表 3.5 之質子交換膜燃料電池發電系統之故障種類，建立一顆圖 3.12 質子交換膜燃料電池監測系統之故障樹，由此故障樹最後之葉子可觀察出若當 13 個特徵值只要有些許的變動且都會影響到電池發電系統。

$$m_i = \frac{[X(i+1) - X(i)]}{\Delta t} \quad (3-2)$$

利用式(3-2)算出一值，而此值如圖 3.13 所示為 40cell 電壓(V_{FC})之變動率圖形，其值因變動過大，但此圖與圖 3.14 之實際 40cell 電壓(V_{FC})之圖形有相當大之落差，所以本論文使用移動平均值，來改善圖 3.14 之落差，則其式(3-3)所示為系統之 5 筆資料作一次移動平均值。則由此式(3-3)可得出一圖與實際圖相當之圖形；如圖 3.15 所示為 40cell 電壓(V_{FC})移動平均值之圖形。

$$\overline{H}_i = \frac{[m_{i-4} + m_{i-3} + m_{i-2} + m_{i-1} + m_i]}{5} \quad (3-3)$$

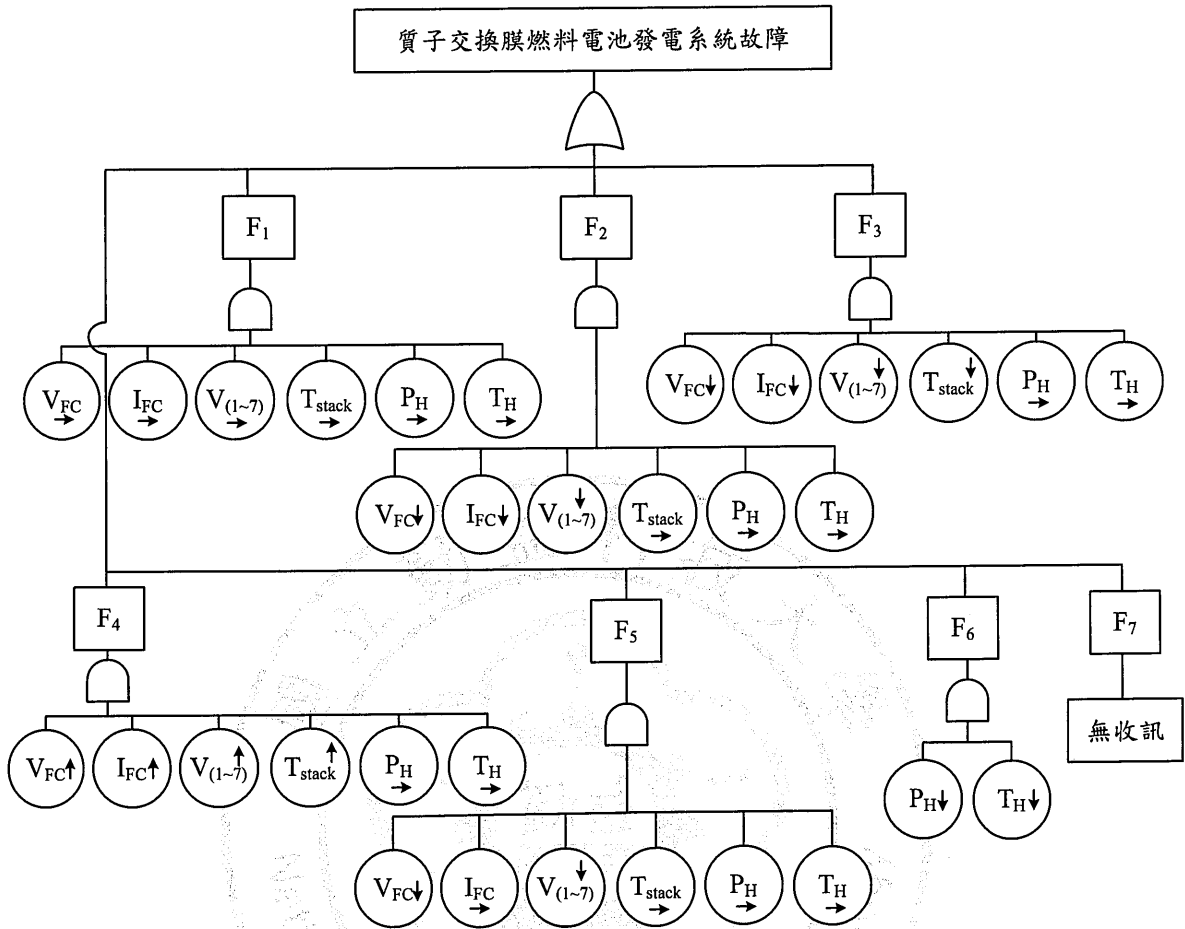


圖 3. 12 質子交換膜燃料電池監測系統故障樹

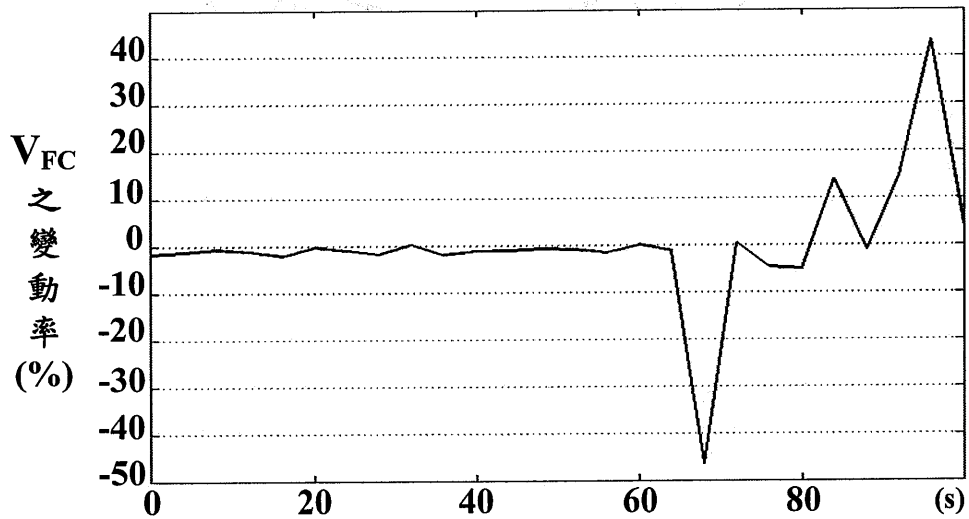


圖 3. 13 40cell 電壓(V_{FC})之變動率

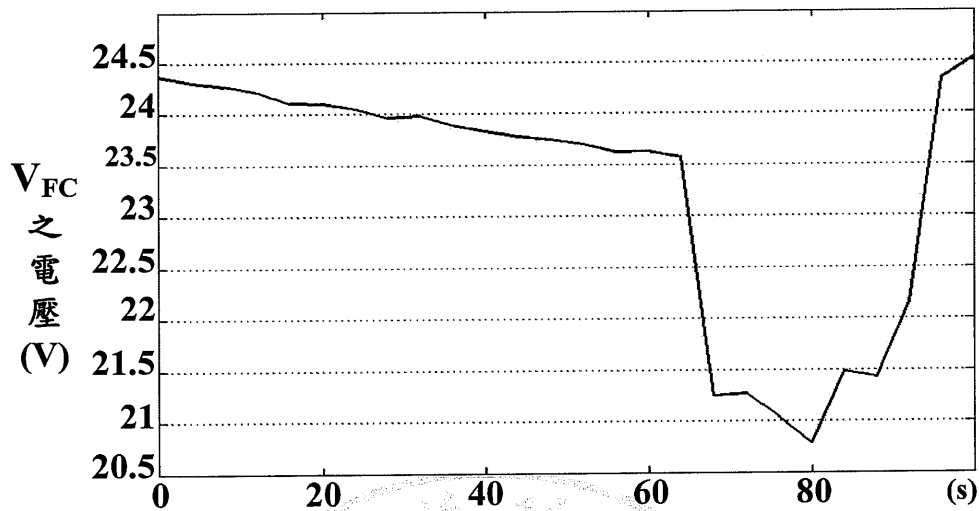


圖 3.14 40cell 電壓(V_{FC})之實際波形

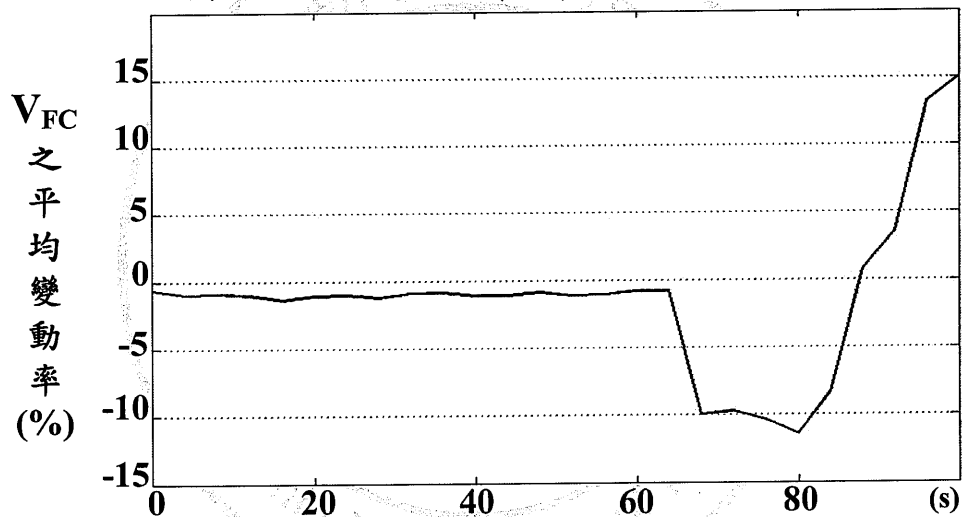


圖 3.15 40cell 電壓(V_{FC})移動平均值

式(3-3)中值算法係將現在所量測得到之訊號變動率與前 4 點之變動率做一次移動平均後，所得出來之值為 \overline{H}_i 值，如表 3.6 所示為質子交換膜燃料電池發電系統 13 個特徵值表，然而再將各特徵值輸入給第五章節中所提方法進行診斷現行電池發電系統之故障點，同時並利用第四章節所提之理論預測下一週期與下兩週期之預測 13 個特徵值之大小，則預測移動平均值如式(3-4)可得知係利用系統前 3 點、現行系統點與下一週期預測點(m_{i+1}^{\wedge})之變動率，所組成下一週期之變動平均值為 \overline{H}_{i+1}' 。

$$\overline{H}_{i+1}' = \frac{[m_{i-3} + m_{i-2} + m_{i-1} + m_i + \hat{m}_{i+1}]}{5} \quad (3-4)$$

$$\overline{H}_{i+2}' = \frac{[m_{i-2} + m_{i-1} + m_i + \hat{m}_{i+1} + \hat{m}_{i+2}]}{5} \quad (3-5)$$

而預測下兩週期之故障點，本論文係採用式(3-5)為下兩週期之移動平均值，則其預測下兩週期後之值為 \overline{H}_{i+2}' ，式中為使用系統前 2 點、現行系統點、下一週期預測點(\hat{m}_{i+1})與下兩週期預測點(\hat{m}_{i+2})等 5 點之值所組成的移動平均值。

式(3-4)與式(3-5)所得出一值，而後可藉由第五章節之提方法診斷下週期與下兩週期之質子交換膜燃料電池發電系統故障點，並以 LabVIEW 介面告知使用者系統現行狀態與未來狀態。此外本論文並利用表 3.6 中之 13 個特徵值取 $C_3(\overline{V}_1)$ 至 $C_9(\overline{V}_7)$ 之區間電壓值與第 2.2.4 章節中之單顆電池的極化曲線特性找出 3 個特徵；如表 3.7 所示為單區間質子交換膜燃料電池之 3 個特徵表。而表中之 C_x 與 C_y 為單電池之電壓，若此區間平均電壓 $\leq 0.5V$ 之單電池電壓時，則表示電池操作在臨界濃度極化(區)，而當此區間平均電壓 $< 0.3V$ 時，表示為電池操作在濃度極化(區)；由第二章節可得知若燃料電池長期操作在此區域時，將會對電池造成嚴重之傷害，而此區間平均電壓為式(3-6)所示。

$$\overline{V}_n = \frac{\overline{V}_n}{M} \quad (3-6)$$

式(3-6)中之 (\overline{V}_n) 為質子交換膜燃料電池平均區間電壓， M 為區間電池片數，則 $n=1, \dots, 7$ ；藉由此 3 個特徵可建立本論文第二顆故障樹，此顆故障樹為診斷單區間之狀態；如圖 3.16 所示。而建立第二顆故障樹可以提高質子交換膜燃料電池發電系統之診斷效率，例如當系統出現氧氣孔堵塞(F_5)時，可以利用此顆故障樹即時的找出系統受異物堵塞氧氣孔之電池區間，因此有增加發電系統使用壽命之效果。

表 3.6 質子交換膜燃料電池發電系統 13 個特徵值

特徵	名稱
C ₁	$\overline{V_{FC}}$ = 前四點與現在點之燃料電池電壓平均變動率
C ₂	$\overline{I_{FC}}$ = 前四點與現在點之燃料電池電流平均變動率
C ₃	01-05cell($\overline{V_1}$)=前四點與現在點之 01-05cell 電壓平均變動率
C ₄	06-11cell($\overline{V_2}$)=前四點與現在點之 06-11cell 電壓平均變動率
C ₅	12-17cell($\overline{V_3}$)=前四點與現在點之 12-17cell 電壓平均變動率
C ₆	18-23cell($\overline{V_4}$)=前四點與現在點之 18-23cell 電壓平均變動率
C ₇	24-29cell($\overline{V_5}$)=前四點與現在點之 24-29cell 電壓平均變動率
C ₈	30-35cell($\overline{V_6}$)=前四點與現在點之 30-35cell 電壓平均變動率
C ₉	36-40cell($\overline{V_7}$)=前四點與現在點之 36-40cell 電壓平均變動率
C ₁₀	$\overline{T_{stack}}$ = 前四點與現在點之燃料電池堆溫度平均變動率
C ₁₁	T_H =現在點之氫氣瓶溫度值
C ₁₂	P_H =現在點之供氫壓力
C ₁₃	$\alpha_{V/T}$ =(燃料電池電壓/電池堆溫度)之關係值

表 3.7 單區間質子交換膜燃料電池之 3 個特徵

特徵	名稱
C _x	$\overline{V_{1-7}}$
C _y	1cell (≤ 0.5 V)
C _z	1cell (<0.3 V)

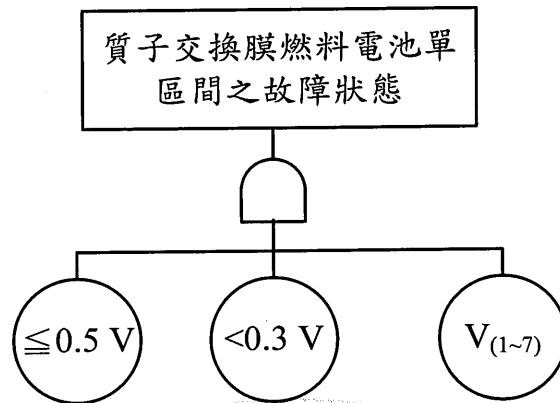


圖 3.16 單區間之質子交換膜燃料電池之故障樹

3.3.3 燃料電池狀態監測系統

本論文利用 LabVIEW 人機介面所建構出一套質子交換膜燃料電池發電預測故障與診斷系統，此建構之流程可由第 3.3.2 章節得知其架構流程圖；如圖 3.17 所示為此系統架構流程圖。其圖 3.18 所示為此 LabVIEW 人機介面所建立之系統監測圖，藉由此圖觀察出 13 個特徵值之大小以及變化之情況，則利用 Microsoft office Excel 2003 記錄與儲存此人機介面將所測得之數據，並且建立數據庫以便助於日後之研究。若當發電系統發生任何之故障時，可由圖 3.19 介面得知系統第一層發生各種故障時，系統燈號所變換之情形；而圖中紅色的燈號亮起表示系統現行之故障點，則黃色的燈號亮起表示系統經由所提之預測方法得到此特徵數據，然而將此數據透過診斷所得出下一週期之故障點；由於本論文建立兩顆故障所以利用所提之診斷方法建立兩層的診斷系統，第一層為診斷質子交換膜燃料電池發電系統之狀態層，則第二層為診斷質子交換膜燃料電池之各區間電池之狀態，若當發電系統出現任何之故障時，可同時利用此診斷層，診斷出被遮住或損壞之質子交換膜燃料電池區間，其燈號圖如圖 3.20 所示。

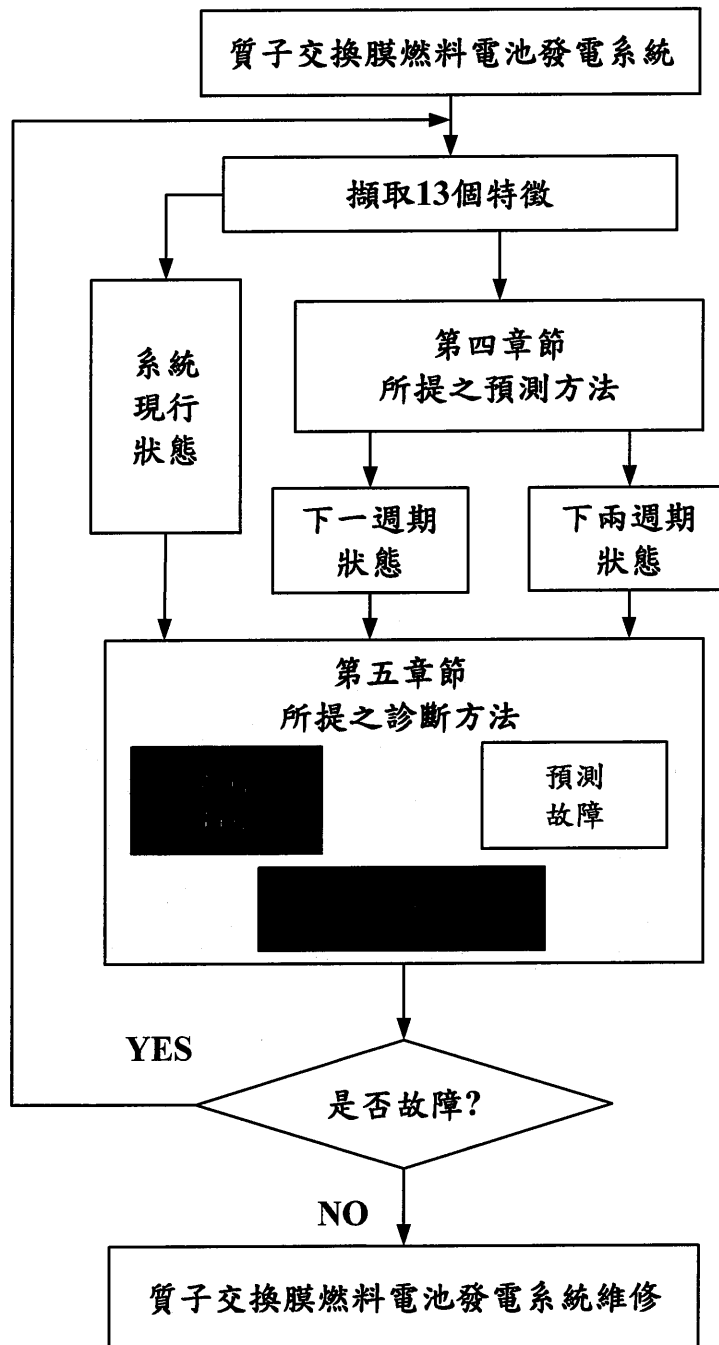


圖 3.17 系統架構流程圖

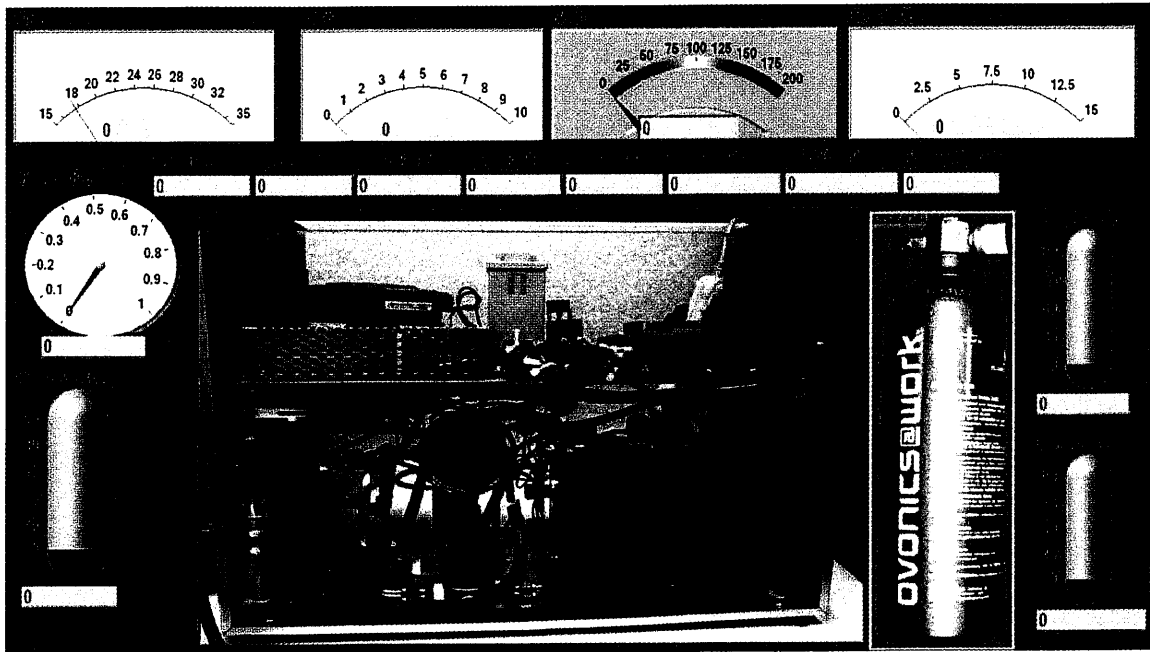


圖 3.18 質子交換膜燃料電池發電系統監測之介面

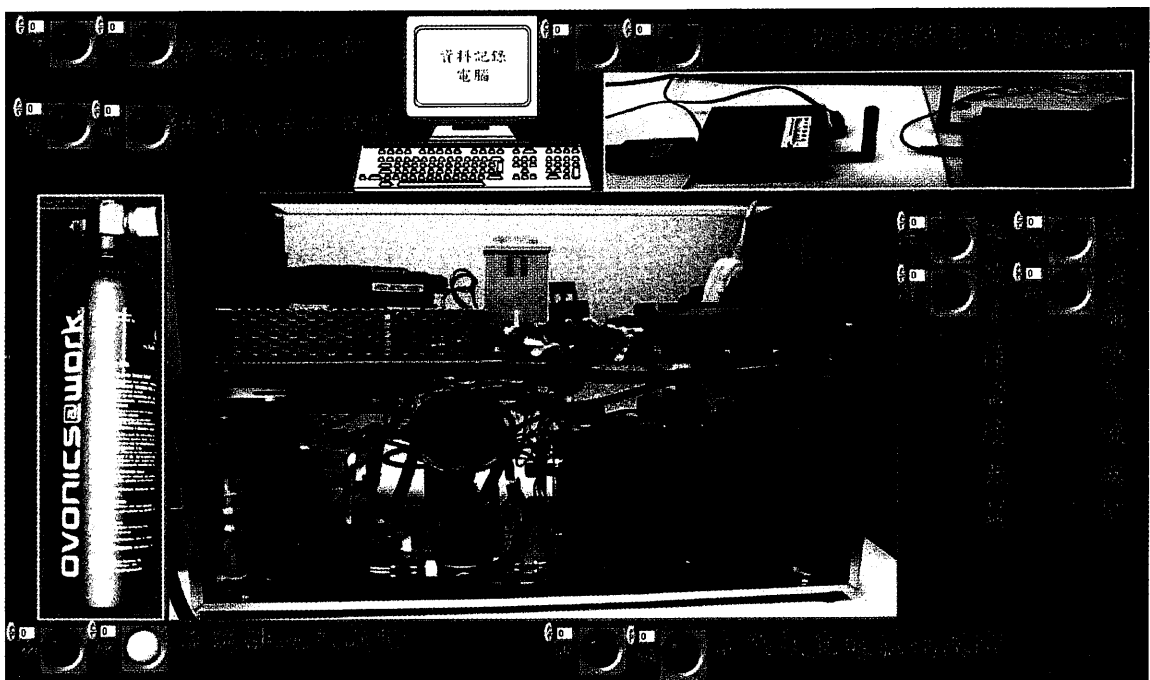


圖 3.19 第一層診斷質子交換膜燃料電池系統

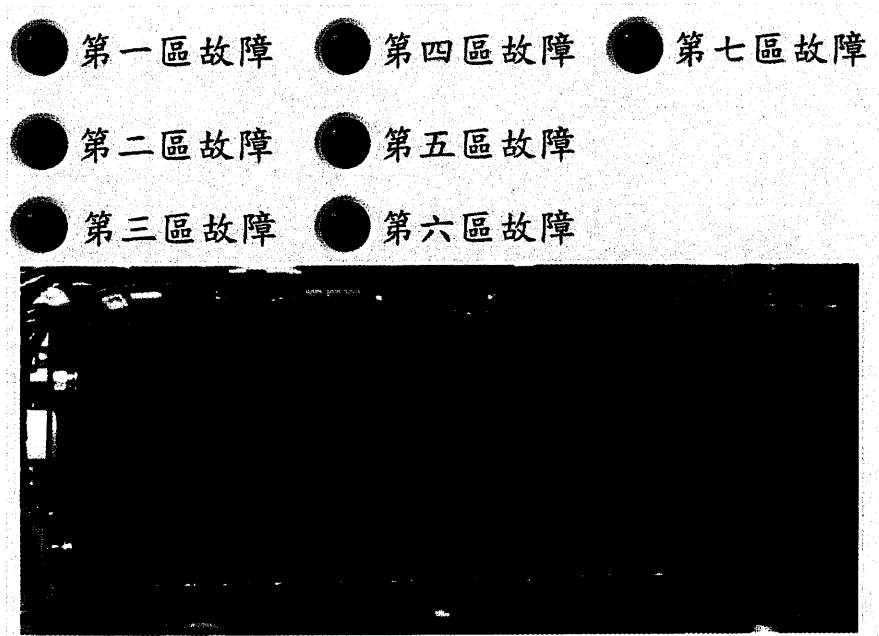


圖 3.20 第二層診斷質子交換膜燃料電池系統

3.4 本章小結

本章主要係說明如何利用 Modbus 模組、ZigBee 無線網路與 LabVIEW 軟體設計人機介面軟體建立一套質子交換膜燃料電池發電系統的監測以及診斷系統，並由文獻得知此發電系統大概會發生之故障情形，且藉由本身發電系統之電壓、電流、溫度與壓力等參數，當作診斷系統故障特徵；以達到監測系統簡單化、節省監測成本、可迅速得知系統故障點與下一週期之故障點以及可透過無線網路傳輸系統資料等諸多優點。

第四章 系統特徵訊號預測之方法

4.1 前言

本論文系統中的故障訊號預測方法，係採用中國學者-華中理工大學教授，控制論專家鄧聚龍教授在 1982 年提出灰色系統理論分析(Grey System Theory)[41][42]；而此灰色分析方法，顧名思義係在說明系統出現輸訊號不完整，並且以此不完整之訊號進行系統評估與預測。則此系統理論基本觀念，係說明大自然界中存在諸多已知事物訊息表示為白色(White)，而未知訊息表示為黑色(Black)，若此訊息介於黑與白之間且不明確地帶，則稱之灰色(Grey)地帶，由於灰色系統提供不完全訊息與未知訊息的情況下的系統本質，則此系統著重在訊息補充之地方，充分運用系統已知訊息，進行系統關聯分析(Relational Analysis)與模型建構(Model Construction)，使得灰色狀態系統轉化為白色狀態系統，再藉此預測(Prediction)以及決策(Decision)等方法，探討與了解此灰色系統理論[43]。

灰色系統理論分析之特點，基於系統訊息不充足、不明確與不能充份了解此訊息情況下，且數值之預測值不僅能提供數值之基礎，而且又能保有相當大的彈性調整空間。例如此灰色系統理論常被廣泛的應用於農業與畜牧業之糧食規劃與預測、氣候方面為預測梅雨季節來臨時期、交通方面運用在公路規劃與車輛調度、經濟方面為都市發展分析以及其它人口預測、地質探勘分析與醫學等多種預測與分析之用途；本論文將此理論用在質子交換膜燃料電池發電系統之預測系統下一週期之數據與下兩週期之數據值。

4.2 灰色系統理論之研究

此理論係能主要針對系統模型之不確定性與資訊不完整性，進行有關系統關聯分析與模型建構，將從預測與決策之方法加以探討系統；則系統對於事物之不確定性(Not Certainty)、離散數據(Discrete Data)、數據不完整性(Not Enough)與多變量輸入(Multi Input)等狀況作出有效之預測與分析[44]；而理論研究之項目大致可歸類以下幾小章節。

4.2.1 灰色生成

灰色生成(Grey Generating)係為一種運用數據處理之方法，將一些雜亂且無章法之數據庫中，設法把被掩蓋之規律與特徵浮現出來，而此方法稱之生成方法；其灰色理論中常用之生成方法有以下3大項：

- A. 灰色關聯生成(Grey Relational Generating Operation; 簡稱 GRGO)：
係將數據依照實際情況不同且不失真之狀態下，所作的數據處理。
- B. 累加生成(Accumulated Generating Operation; 簡稱 AGO)：
將以往各時刻之數據逐漸累加，且所得出新的一組數據與數列；而累加前之數列稱之原始數列，累加後之數列則稱為生成數列。
- C. 逆累加生成(Inverse Accumulated Generating Operation; 簡稱 IAGO)：
將累加生成逆運算，即可完成逆累加生成。

4.2.2 灰色關聯分析

灰色系統理論中分析離散序列之基本方法，在傳統上係採用統計迴遞分析處理變數以及變數之間的關係，則此統計迴遞分析方式有以下4大項之限制：要求系統大量的數據、變數之間必須存在互相影響之關係、數據分佈必須典型之分佈方式與不能擁有過多之變化因素等4點限制；則此灰色關聯分析(Grey Relational Analysis)具較少之數據且較多因素分析，能夠解決以上傳統統計迴遞分析方式的諸多限制與缺失。

4.2.3 灰色建模

灰色建模(Grey Model Construction)係用所生成過後之數據建立，則此灰色分方程式與灰微分方程式；一般可將灰色建模分成以下3種。

- A. 第一種為 GM(1,1)：
一般預測所用，則 GM(1,1)表示一階微分，輸入變數一個。
- B. 第二種為 GM(1,N)：
眾多變量之關聯分析所用，則 GM(1,N)表示一階微分，輸入變數 N 個。

C. 第三種為 GM(0,N)：

眾多變量之關聯分析所用，係為 GM(1,N)之特例，則 GM(0,N)表示零階微分，輸入變數 N 個。

4.2.4 灰色預測

利用 GM(1,1)模型為基礎對現有之數據進行灰色預測(Grey Prediction)之方法，用此方法找出各個元素之未來之動態情形，其灰色預測有以下幾種。

A. 異常數據與災變之預測：

對於一定時間內預測是否發生災變，或以異常數據預測發生災害之時間；例如預測農業與畜牧業之收成過多或過少的年份。

B. 季節異常數據與災變之預測：

對於一年中某個季節內所發生之災害或異常數據進行預測；例如預測颱風季節與梅雨季節。

C. 數列預測：

對於一般數據使用；例如商品銷售量、食品銷售量與交通運輸量等。

D. 系統預測：

採用 GM(1,1) 模型與 GM(1,N) 模型互相結合，同時對系統中多個變數進行預測。

4.3 訊號軌跡之預測方法

從現有資訊與數據，找出一種符合邏輯運算之方法，並建立一套模式，再利用此種模式推測或預測之目的，則係為預測之定義。而本論文所使用之訊號軌跡的預測方法係以 GM(1,1)模型為主要基礎，運用於質子交換膜燃料電池發電系統對現有之數據進行預測下一週期之數據或是預測下兩週期之數據等方法；在於傳統預測方法若要進行各種預測時，其缺點為所需觀察資料較多與數學運算式繁雜等多項缺點，但質子交換膜燃料電池發電系統之預測故障點是採用此灰色預測法，相較傳統預測方法所需觀察值較少，只需 5 筆觀察值，即可順利進行

灰色預測；如表 4.1 所示為傳統預測方法與灰色預測方法之差異表 [45]。

表 4.1 傳統預測方法與灰色預測方法之差異表

預測方法	灰色預測法	簡單指數平滑型	Holt's指數平滑型	迴遞分析法	Causal 迴遞分析法
所須觀察值	至少 5 筆	至少 5 筆至 10 筆	至少 10 筆至 15 筆	10 筆或 20 筆以上	10 筆以上
數學運算	基本運算	基本運算	中等運算	中等運算	高等運算
所需時間	短少	短	短	短	較長

4.3.1 預測系統故障狀態之流程

欲要完成預測之目的，勢必要先建立預測模型 GM(1,1)模型，即利用質子交換膜燃料電池發電系統過去所偵測之資料數據，則本論文經實驗測試探討 4 筆、5 筆與 6 筆資料後，發覺 5 筆資料與實際曲線相近，所以係採用 5 筆資料預測下一週期故障點與下兩週期故障點，其中 5 筆資料為現行點(m_i)之數據與前 4 點之數據；如式(4-1)所示。

$$\text{系統 5 筆資料} = (m_{i-4}, m_{i-3}, m_{i-2}, m_{i-1}, m_i) \quad (4-1)$$

然而由此預測模型，對此發電系統 13 個特徵值進行預測，而所預測出之值再配合 3.3.2 章節，所提之式(3-4)與式(3-5)的公式算出下一週期之平均變化率與下兩週期之平均變動率，依據 3.3.3 章節所提出流程，將兩個數據值，輸入給第 5 章節所提之故障診斷方法，診斷出兩週期之質子交換膜燃料電池發電系統之故障點；本論文之灰色預測建立模型之流程如圖 4.1 所示。

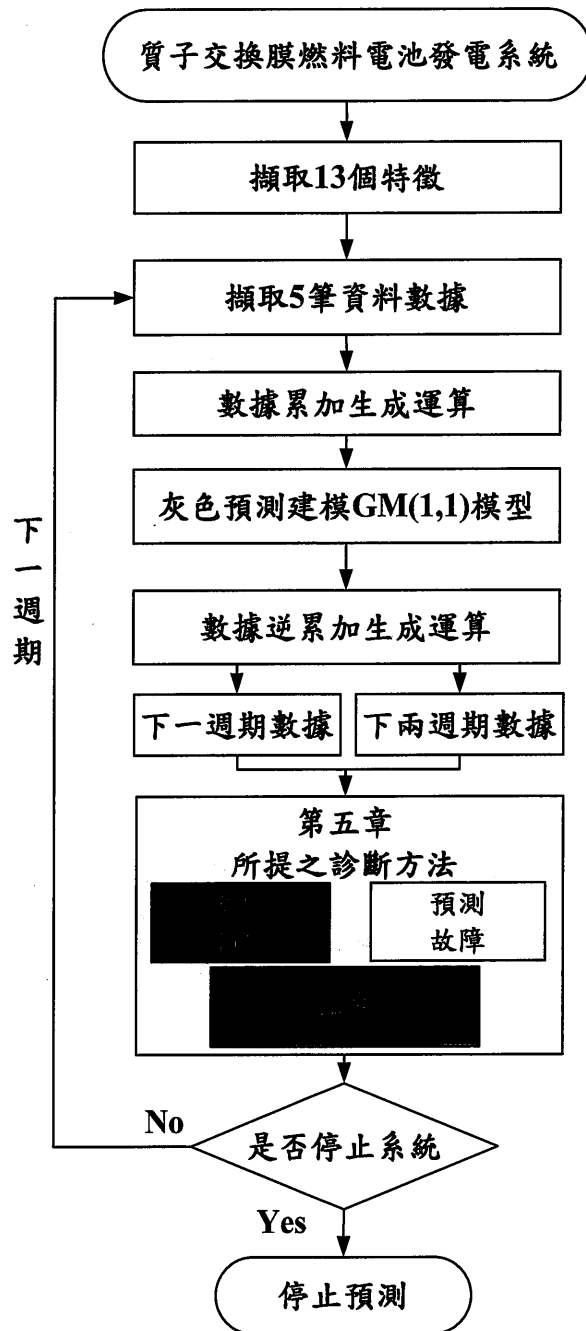


圖 4.1 灰色預測建立模型之流程圖

4.3.2 灰色預測方法

本論文首先利用灰色理論定義出式(4-2)，灰色的 GM(1,1)模型之微分方程式。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (4-2)$$

其式(4-2)中 t 表系統自變數， a 與 b 為灰色模式的待定參數(a 為發展係數與 b 為灰色控制變數)，而 $x^{(1)}$ 為累加生成之值；此灰色預測建模可分成參數型與矩陣型兩種，而本論文主要係採用矩陣型式建立此模型，其建模方法步驟如以下公式所示。

步驟1：系統一開始預測係利用式(4-1)擷取一組數列，作為原始之數列；當系統完成一個週期之後，系統每次將都會重新取式(4-1)之一組數列，作為新的原始之數列，其式(4-3)為預測建模之原始數列($x^{(0)}$)。

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(k)) \quad (4-3)$$
$$k = 1, 2, 3, \dots, m; m \in N$$

步驟2：此步驟係將原本雜亂無章法且沒有一定規律的數據，經此累加生成運算處理，可得出新一組新的並且較有規律的數列，其累加生成運算式；如式(4-4)所示為新的數列($x^{(1)}$)。

$$x^{(1)} = \left(\sum_{L=1}^1 x^{(0)}(L), \sum_{L=1}^2 x^{(0)}(L), \sum_{L=1}^3 x^{(0)}(L), \dots, \sum_{L=1}^n x^{(0)}(L) \right) \quad (4-4)$$

$$L \in N$$

步驟3：均值生成係可以調整數據之權重值，本次預測權重值採用0.5之平均值；其如式(4-5)所示。

$$z^{(1)} = \left[0.5 \left(\sum_{L=1}^2 x^{(1)}(L), \sum_{L=1}^3 x^{(1)}(L), \sum_{L=1}^4 x^{(1)}(L), \dots, \sum_{L=1}^n x^{(1)}(L) \right) \right] \quad (4-5)$$

$$L > 1; L \in N$$

步驟4：求取GM(1,1)待定係數 a 與 b 兩值之大小，此步驟採用最小平方方法(Least Square)算出兩值大小範圍；如式(4-6)所示。

$$x^{(0)}(L) + az^{(1)}(L) = b \quad (4-6)$$

$$L \in N$$

並將式(4-6)方程式轉換為式(4-7)之矩陣方程 $Y=B*\hat{a}$ ，其參數 a 與 b 兩值可由此式求出；如式(4-8)所示。

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ x^{(0)}(4) \\ \vdots \\ x^{(0)}(L) \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ -z^{(1)}(4) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(L) & 1 \end{bmatrix} \quad \hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4-7)$$

$$a = \frac{\sum_{L=2}^n z^{(1)}(L) * \sum_{L=2}^n x^{(0)}(L) - (n-1) * \sum_{L=2}^n z^{(1)}(L)x^{(0)}(L)}{(n-1) * \sum_{L=2}^n [z^{(1)}(L)]^2 - \left[\sum_{L=2}^n z^{(1)}(L) \right]^2} \quad (4-8)$$

$$b = \frac{\sum_{L=2}^n [z^{(1)}(L)]^2 * \sum_{L=2}^n x^{(0)}(L) - \sum_{L=2}^n z^{(1)}(L) * \sum_{L=2}^n z^{(1)}(L)x^{(0)}(L)}{(n-1) * \sum_{L=2}^n [z^{(1)}(L)]^2 - \left[\sum_{L=2}^n z^{(1)}(L) \right]^2}$$

步驟5：經逆累加生成(IAGO)，得出灰色預測之值；如式(4-9)所示。

$$\hat{x}(L+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-aL} + \frac{b}{a} \quad (4-9)$$

$$L \in N$$

步驟6：經以上五大步驟可得出一個預測值，將此值代入式(4-10)，可觀察出與實際值之誤差量與預測準確度，其式中 $x(L)$ 為實際值、 $\hat{x}(L)$ 為實際值與 n 為數據總筆數；而質子交換膜燃料電池發電

系統總誤差量由式(4-11)所示，其式中 m 表系統之特徵值個數。

$$\varepsilon(\%) = \frac{1}{n} \sum_{L=1}^n \frac{|x(L) - \hat{x}(L)|}{|x(L)|} \times 100 \% \quad (4-10)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(\%) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \varepsilon_i ; m = 13 \quad (4-11)$$

4.4 本章小結

本章節係使用 GM(1,1)模型當作本論文灰色預測模型，主要為改善傳統預測方法，其因傳統式觀察資料大與運算繁雜等缺點，而灰色預測觀察資料少與運算簡單等諸多優點，所以本論文利用灰色預測系統建立質子交換膜燃料電池發電系統的預測故障系統，將藉由灰色預測系統預測未來系統之行為(故障點)，並且利用 LabVIEW 人機介面讓使用者能事先預防故障點，以達到防患未然之效果與延長系統使用壽命之目標。

第五章 質子交換膜燃料電池之診斷方法

5.1 前言

經由第三章節中對質子交換膜燃料電池發電系統所進行多次之故障實驗測試，共可取得 350 筆質子交換膜燃料電池發電系統之各種故障狀態特徵數據；本論文再經由分析其在各種故障狀態下之特徵值分佈範圍以及其系統發生故障之狀態對於這些特徵值所產生的影響，依據已知的發電系統狀態進行分類，可將系統分成 7 個類別，而每類別共有 50 筆之系統狀態特徵數據資料。以此數據資料運用中國學者蔡文所提之可拓理論[46]，將質子交換膜燃料電池發電系統之故障狀態分成 7 種類別故障，並由第三章節所偵測出系統電壓(V_{FC})、電流(I_{FC})、電池堆溫度(T_{stack})、氣瓶溫度(T_H)、氣壓(P_H)、區間電壓($V_{1\sim7}$)與 α_{VT} 值(系統電壓/電池堆溫度)等共 13 種特徵之實驗數據建立可拓物元模型，而此模型包含 7 種故障狀態之經典域與一組包含所有即將發生系統故障狀態之數據範圍值的可拓節域，經可拓關聯函數運算，將其值乘於各自之權重指數並進行累加函數所得出一值為可拓關聯度，由關聯度之大小作為辨別發電系統故障狀態之依據。

從以往文獻中採用類神經網路(Neural Network; 簡稱 NN)[47][48]，模糊邏輯法則(Fuzzy Logic Approaches)[49]，專家系統(Expert System)[50]與模糊類神經網路(Fuzzy Neural Networks; 簡稱 FNN)[51]等技巧，進行資料診斷與分類之研究不乏有故障診斷與疾病檢測等，為了改善診斷準確度，進而提出兩種方法合併為一診斷方法，經研究顯示的確可大幅提升診斷之準確率，但仍然存在著缺點，例如類神經網路無法產生敘述性之輸出，其推理時相對的困難；而可拓方法則需要專家經驗法則進行經典域、可拓節域與權重值等調整。則為了能克服上述等缺點，所以本論文提出可拓理論與類神經網路結合發展出可拓類神經網路演算法，使所提方法同時具有兩種方法等優點；而在本章節中將各別介紹可拓理論與可拓類神經網路，將藉由此兩診斷方法之互相比較下，選擇出較適合本質子交換膜燃料電池發電系統之故障預測之演算診斷方法。

5.2 可拓理論

創始人為中國學者蔡文在 1983 年創立可拓理論，經過幾年之發展此理論已經日臻完善，則基本理論與評價方法已成功之應用在各方面，例如人工智慧、決策、生醫與檢測技術等領域；蔡文教授利用所提之可拓理論解決事物矛盾之問題並從中找尋答案，係由量化數據將其矛盾之問題轉換成以數學運算式可處理之數據。而可拓理論可分成可拓數學與物元理論之兩大部分，則物元理論係將一事物分成特徵與特徵拓展之範圍值，並由可拓理論中之物元模型表示其事物訊息，經由轉換事物關係，可得知各特徵影響事物之比例，並且明顯的觀察出該特徵對於事物之重要性；可拓數學則以可拓集合(Extension Set)與可拓關聯函數作為核心，係將古典數學中之原本二位值邏輯明確集合(Crisp Set)之範圍 $\langle 0,1 \rangle$ ；如圖 5.1 所示為明確集合示意圖。

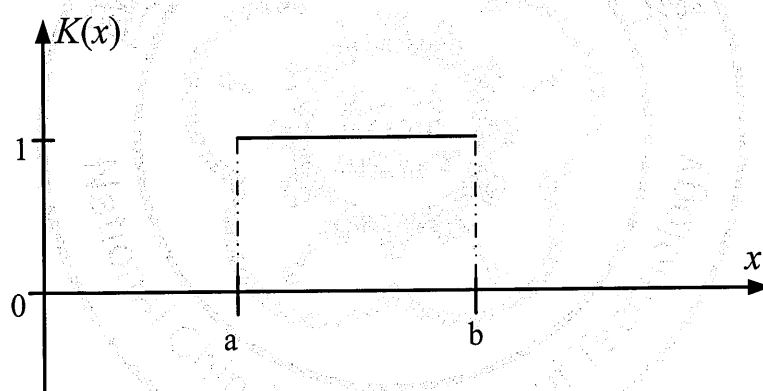


圖 5.1 明確集合示意圖

係將明確集合拓展成連續多值(Continuous Multi Value)之範圍 $\langle -\infty, \infty \rangle$ ，並且將關聯函數(Correlation Function)表示成事物之特質透過關聯函數可以定量地描述任一元素屬於正域(Positive Field)、負域(Negative Field)或是零界(Zero Boundary)，其關聯函數定義為可拓距，描述點與區間在區域中的位置值；如圖 5.2 所示為可拓關聯函數示意圖，而此實數可稱為此元素對於事物特性所屬集合之關聯度(Membership Grade)，若將關聯度正規化後數值為 1 時，則代表此元素完全符合該事物特性；而若將關聯度正規化後得到之數值為 -1 時，代表元素不屬於此事物特性，假使正規化後之關聯度介於 $\langle -1,1 \rangle$ 之間，則表示元素屬於或不屬於

事物特性之強弱程度；古典集合、模糊集合與可拓集合的比較表，如表 5.1 所示為三種類型的數學集合比較表[52]。

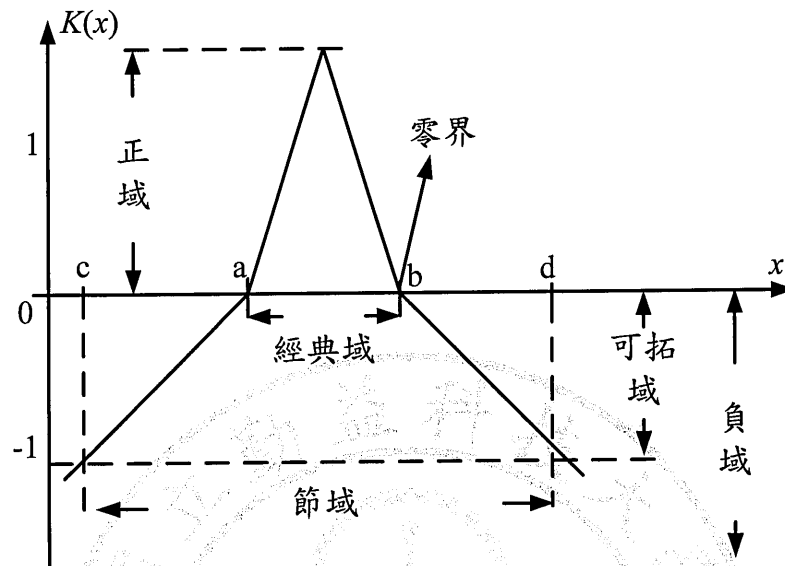


圖 5.2 可拓關聯函數示意圖

表 5.1 三種類型的數學集合比較表

比較項目	古典集合	模糊集合	可拓集合
研究對象	數值變量	語言性變量	不相容問題
模型	數學模型	模糊規則庫	物元模型
函數描述	轉移函數	集合函數	關聯函數
事物特性描述	準確	模糊	可拓
集合函數範圍	$C_A(x) \cap \langle 0, 1 \rangle$	$u_A(x) \cap \langle 0, 1 \rangle$	$K_A(x) \cap \langle -\infty, \infty \rangle$

可拓理論可應用範圍非常廣泛，如故障診斷、評判、分類、搜尋與自動控制等各種領域，此時可將可拓理論稱之為可拓工程方法[53][54]；而可拓工程方法具有可拓物元模型化，定性與定量相結合及非封閉性等三大特色。因此，將可拓工程方法特性與各種領域之專業知識互相結合，進而可發展成該領域所運用之法則；例如可拓決策、可拓資訊與可拓行銷等[55][56]。

5.2.1 可拓物元理論

可拓理論將係日常生活之各種人、事、物，一切通稱為「事物」，但為了明確的分別各種事物之有所不同，因此將其以不同「事物名稱」分別表示之。其各種事物皆具有描述不同之功能、樣式、型態與事物發生相對之關係者通稱為其「事物特徵」，而各事物特徵也具有相對應的「特徵量值」，因此若要詳細描述一件事物之物元(Matter-Element)，則需要具備基本三項要素分別為訂定事物名稱 N (Name)、事物特徵 C (Characteristic)以及特徵量值 V (Value)而所構成之物元；將以式(5-1)所示為物元數學表示式。

$$R = (N, C, V) \quad (5-1)$$

依據物元特徵與物元質量之關係 $V=C(N)$ ，可將式(5-1)轉化成式(5-2)所示。

$$R = (N, C, C(N)) \quad (5-2)$$

通常一件事物不會只有單具備一項特徵，所以其物元模型 $R=(N, C, C(N))$ 亦可為多維物元；如式(5-3)所示為多維物元。

$$R_j = (N, C_{ji}, V_{ji}) = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

而式(5-3)中包含了物元特徵向量 $C=[C_1, C_2, \dots, C_i]^T$ ，其相對應之物元特徵量值向量可用 $V=[V_1, V_2, \dots, V_i]^T$ 表示，則 $R_j=(N, C_j, V_j)(j=1, 2, \dots, n)$ 表示為 R 之 j 個子物元；本論文將其發電系統描述之物元模型為式(5-4)所示，其事物名稱為質子交換膜燃料電池發電系統，特徵向量為[40cell 電壓($\overline{V_{FC}}$)，電流($\overline{I_{FC}}$)，01-05cell 電壓($\overline{V_1}$)，06-11cell 電壓($\overline{V_2}$)，12-17cell 電壓($\overline{V_3}$)，18-23cell 電壓($\overline{V_4}$)，24-29cell 電壓($\overline{V_5}$)，30-35cel 電壓($\overline{V_6}$)，36-40cell 電壓($\overline{V_7}$)，電池堆溫度($\overline{T_{stack}}$)，氫氣瓶溫度(T_H)，氫氣進氣壓力(P_H)，40cell 電壓與電池堆溫度之關係值(α_{VT})]，其特徵向量數值分別為表 5.2 所示。

$$R = \begin{pmatrix} \text{質子交換膜燃料電池 發電系統} & \overline{V_{FC}} & 0.152 \\ & \overline{I_{FC}} & 0 \\ & \overline{V_1} & -0.2 \\ & \overline{V_2} & -0.24 \\ & \overline{V_3} & -0.08 \\ & \overline{V_4} & 0.04 \\ & \overline{V_5} & 0.08 \\ & \overline{V_6} & 0.28 \\ & \overline{V_7} & 0.20 \\ & \overline{T_{stack}} & 0 \\ & T_H & 31.96 \\ & P_H & 0.585 \\ & \alpha_{V/T} & 0.451 \end{pmatrix} \quad (5-4)$$

表 5.2 特徵向量數值表

特徵	名稱	特徵	名稱
C ₁	$\overline{V_{FC}} = 0.152$ 平均變動率	C ₈	30-35cell($\overline{V_6}$)=0.28 平均變動率
C ₂	$\overline{I_{FC}} = 0$ 平均變動率	C ₉	36-40cell($\overline{V_7}$)=0.20 平均變動率
C ₃	01-05cell($\overline{V_1}$)=-0.20 平均變動率	C ₁₀	$\overline{T_{stack}} = 0$ 平均變動率
C ₄	06-11cell($\overline{V_2}$)=-0.24 平均變動率	C ₁₁	$T_H=31.96$ °C
C ₅	12-17cell($\overline{V_3}$)=-0.08 平均變動率	C ₁₂	$P_H=0.585$ bar
C ₆	18-23cell($\overline{V_4}$)=0.04 平均變動率	C ₁₃	$\alpha_{V/T}=0.451$
C ₇	24-29cell($\overline{V_5}$)=0.08 平均變動率		

三維空間的物元模型可利用圖 5.3 所示為物元變化組合之特性圖，則圖中 Z 軸、Y 軸與 X 軸，分別表示為事物之名稱(N)、特徵(C)以及特徵質量(V)，並由三軸所延伸出一點為三維物元空間。

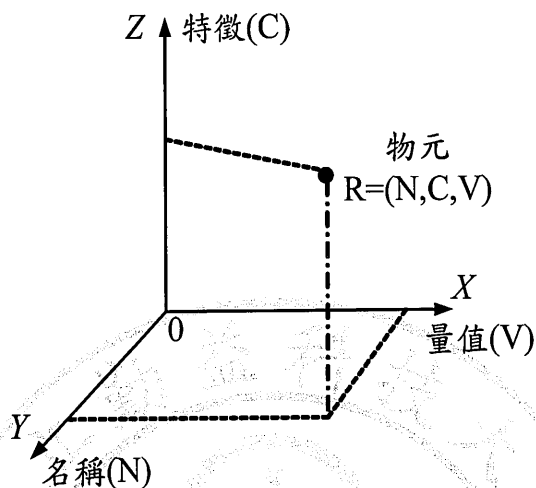


圖 5.3 可拓物元之三維空間示意圖

5.2.2 可拓關聯函數

蔡文教授將可拓理論中之集合區域分成可拓經典域 $X_o = \langle a, b \rangle$ 與可拓節域 $X_p = \langle c, d \rangle$ ，則為實數域 $\langle -\infty, \infty \rangle$ 上之兩個區間，區間中之 X_o 係隸屬於區間 X_p 則表示為 $X_o \cap X_p$ ，若假設 x 值為實數區域上之一點，其關聯函數定義為式(5-5)與式(5-6)所示。

$$D(x, X_o, X_p) = \begin{cases} \rho(x, X_p) - \rho(x, X_o), & x \notin X_o \\ -1, & x \in X_o \end{cases} \quad (5-5)$$

$$K(x) = \frac{\rho(x, X_o)}{D(x, X_o, X_p)} \quad (5-6)$$

可拓經典域之關聯函數距為式(5-7)所示，則可拓節域之關聯函數距為式(5-8)所示。

$$\rho(x, X_o) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (5-7)$$

$$\rho(x, X_p) = \left| x - \frac{c+d}{2} \right| - \frac{d-c}{2} \quad (5-8)$$

式(5-6)中之 $K(x)$ 為 x 與 X_o 區間之關聯程度，若當 $K(x) \geq 0$ 時，則可稱 x 係隸屬於 X_o 之程度；反之若當 $K(x) \leq 0$ 時，則 x 係不屬於 X_o 之程度；其可拓關聯函數圖如圖 5.4 所示。

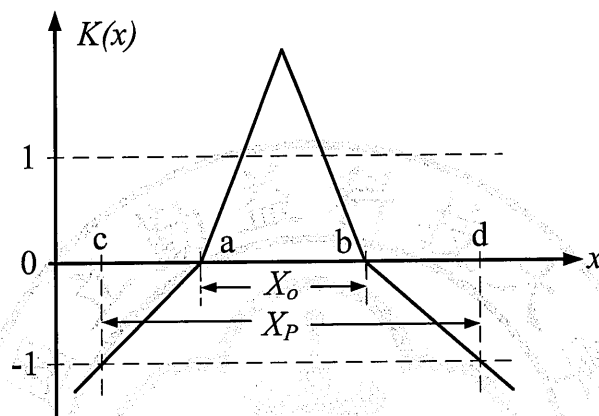


圖 5.4 可拓關聯函數示意圖

5.2.3 可拓理論之評價方法

若要將此可拓理論發展運用於實務方面，則需由數學式中之集合函數庫將其理論實現；依據理論中之「可拓集合」與「關聯函數」之兩項數學方法，作為運用於實務化之可拓評價之工具。可拓評價方法係由實驗累積諸多數據庫，再將一事物分解成一個或多個等級集合，並且由專家系統給予各等級集合訂定範圍，然而將其要評定之事物數據代入各等級集合數據範圍值中進行可拓關聯度運算與正規化，而後運算結果再與各等級集合之可拓關聯度進行比較，若可拓關聯度值愈接近於 1，則表示其評定之事物數據符合該等級之集合之程度愈佳；其具體評定之步驟由以下幾步驟表示。

步驟1：由專家系統先訂定可拓經典域與節域之區間範圍

此步驟首先訂定可拓經典域如式(5-9)所示，其理論係將該事物 R 分成 k 個等級之數值集合，則稱為各集合之可拓經典域，其中 $N_k (k=1 \sim m)$ 表示所劃分之 k 個等級集合各自的物元名稱，則該物元名稱所有特徵

為 $C_i(i=1\sim n)$ 表示，其特徵值範圍由 X_{ki} 所示，此特徵值範圍係在第 k 個等級之第 i 筆特徵之分佈範圍，而特徵值大小由 a_{ki} 表示該物元等級集合特徵之最大值，反之 b_{ki} 則表示該物元等級集合特徵之最小值。

$$R_k = (N_k, C_i, X_{ki}) = \begin{bmatrix} N_k & C_1 & X_{k1} = \langle a_{k1}, b_{k1} \rangle \\ & C_2 & X_{k2} = \langle a_{k2}, b_{k2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{kn} = \langle a_{kn}, b_{kn} \rangle \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

而在節域之中係將式(5-9)各等級集合之經典域結合成一大集合，此集合務必要包含所有之經典域中的特徵值範圍；如式(5-10)所示。其式中 R_p 表示為眾多集合之節域集合，而 P 之定義為包含 k 個等級內所有特徵分布範圍之集合，則特徵名稱為 $C_i(i=1\sim n)$ 表示，其特徵值範圍 X_{pi} 所示而此特徵值範圍包含所有此特徵的範圍，而節域特徵值大小由 a_{pi} 表示所有物元等級集合特徵之最大值，反之 b_{pi} 則表示所有物元等級集合特徵之最小值。

$$R_p = (P, C_i, X_{pi}) = \begin{bmatrix} P & C_1 & X_{p1} = \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & X_{p2} = \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} = \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

步驟2：確定待測物元

將一個未知之物元分成各等級集合特徵，其等級集合必須要與經典域與節域之集合個數相等，則稱之為待測物元；如式(5-11)所示。

$$R = (q, C_i, x_i) = \begin{bmatrix} q & C_1 & x_1 \\ & C_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_n \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

式(5-11)中之 q 表示此組特徵數值，而 x_i 為 q 之特徵 C_i 的特徵值數據，則待測事物檢測所得之具體數據。

步驟3：訂定各特徵之權重係數

該事物 R 係由各組特徵 C_i 所組成，其各特徵要對於此事物也有不同的影響程度，此步驟利用權重係數之關係決定各特徵對事物之權重百分比；如式(5-12)所示。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (5-12)$$

步驟4：計算待測數據與各等級集合間之關聯度大小值，此步驟分成兩小步驟。

1. 計算距

係指一待測物元中之一個特徵值 x_i 對於所有經典域 R_k 或該特徵之節域 R_p 之中心點的距離差值和中心點與上下極限之距離差值，而此距離差值定義為距，所以該特徵值 x_i 對於各個經典域 R_k 之距定義則如式(5-13)所示。

$$\rho(x_i, X_{ki}) = \left| x_i - \frac{a_{ki} + b_{ki}}{2} \right| - \frac{b_{ki} - a_{ki}}{2} \quad (5-13)$$

該特徵值 x_i 對於節域 R_p 之距定義如式(5-14)所示。

$$\rho(x_i, X_{pi}) = \left| x_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2} \quad (5-14)$$

2. 計算關聯函數

若已完成各經典域與節域距之計算，便可進行聯函數之運算，由式(5-15)可以得出關聯函數之 $k_k(x_i)$ 值，則此值之大小為描述待測事物(q)之各特徵與各評價類別(N_k)之歸屬程度。

此步驟內包含對待測事物之資料進行初始分類，並由式(5-15)計算出之各經典域的距之大小；此時若利用式(5-14)運算出一組經典域的距之值大於零時，則表示該待測事物之資料完全不屬於此類別的範圍內，因而為了避免某一組經典域之距與節域之距的值，則其兩值之大小為相同之狀況下，並導致關聯函數之值趨近於無限大，進而影響可拓診

斷系統之無法解析之情況，對此種狀況與經典域之距小於零時，則對關聯函數另外定義之計算。

$$k_k(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_i, X_{ki})}{|X_{ki}|} & , \rho(x_i, X_{ki}) = \rho(x_i, X_{pi}) \\ \frac{\rho(x_i, X_{ki})}{\rho(x_i, X_{pi}) - \rho(x_i, X_{ki})} & , \text{or } \rho(x_i, X_{ki}) < 0 \\ & , \rho(x_i, X_{ki}) \neq \rho(x_i, X_{ki}) \end{cases} \quad (5-15)$$

步驟5：計算關聯度

經由以上步驟運算可得關聯函數 $k_k(x_i)$ 值，再依步驟3對所屬類別之各特徵與權重值相乘之比例並進行累加運算，如此各評價類別之關聯度值由 $k_k(q)$ 所示，將各等級集合之關聯度之值代入式(5-16)取得所有關聯度中之最大值，則式(5-17)為取得所有關聯度中之最小值。

$$\max k_k(q) = \max \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i k_k(x_i) \right) \quad (5-16)$$

$$\min k_k(q) = \min \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i k_k(x_i) \right) \quad (5-17)$$

步驟 6：關聯度正規化

藉由運算各等級集合之關聯度的相對值，本論文使用式(5-18)之正規化讓每各等級集合之關聯度值都均落在 $\langle 1, -1 \rangle$ 之間，而進行此步驟為以利日進行故障診斷所用。

$$k_k(q)^* = \frac{2k_k(q) - k_k(q)_{\min} - k_k(q)_{\max}}{k_k(q)_{\max} - k_k(q)_{\min}} \quad (5-18)$$

步驟 7：確定評定物元為何種等級集合

若 $k_k(q)^*$ 等於1時，則可拓判斷此關聯度隸屬於類別k之評價結果，而其它集合型態之可能性則依其關聯度決定，而一般關聯度愈大者，則表示該評定物元型態關係愈接近此集合之機率愈大；若所有評定物元都已評定完畢時，則結束此診斷系統，否則迴至步驟2重新判別新之評定物元，其可拓診斷方法之流程圖如圖5.5所示。

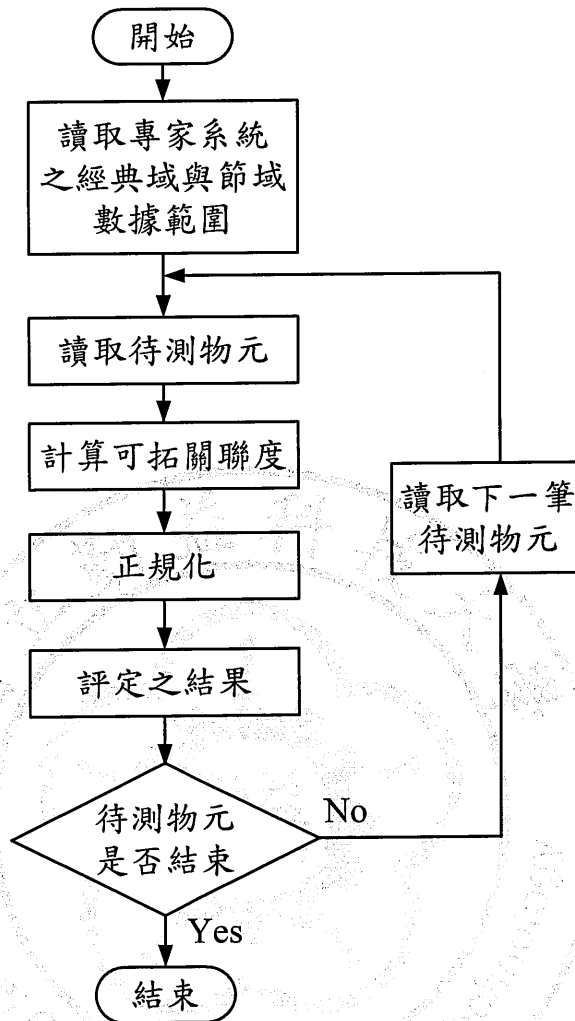


圖 5.5 可拓診斷方法之流程圖

5.3 可拓類神經網路

此章節係利用類神經網路與 5.2 章節結合而成之可拓類神經網路演算法，此演算法具備有接受不同種類變數作為輸入之適應性，並且已成功的運用諸多系統之故障診斷領域；例如汽車引擎故障診斷、變壓器故障診斷與人體血液之診斷等領域[57][58][59]。並且都具相當高之診斷率，其可拓類神經網路之架構圖如圖 5.6 所示；從此圖可得知其架構內包含輸入層、連結著輸入和輸出的權重值(演算層)與輸出層等三層架構。

可拓類神經網路之演算流程首先必須利用訓練資料進行分類與建立可拓物元模型後，才可將待測物元導入可拓類神經網路中；其此演算法之輸入層多寡係由物元模型中的特徵個數決定，而輸出層則是由訓練資料之類別數目決定輸出之數量，並且此層也是存放經演算法運算後之可拓距離值，則能從此值之大小決定待測物元所屬之類別；若與它法比較，可拓類神經演算法與其它類神經演算法一樣都有分成學習與診斷兩種階段，在此章節將會詳述學習與測試兩個過程。

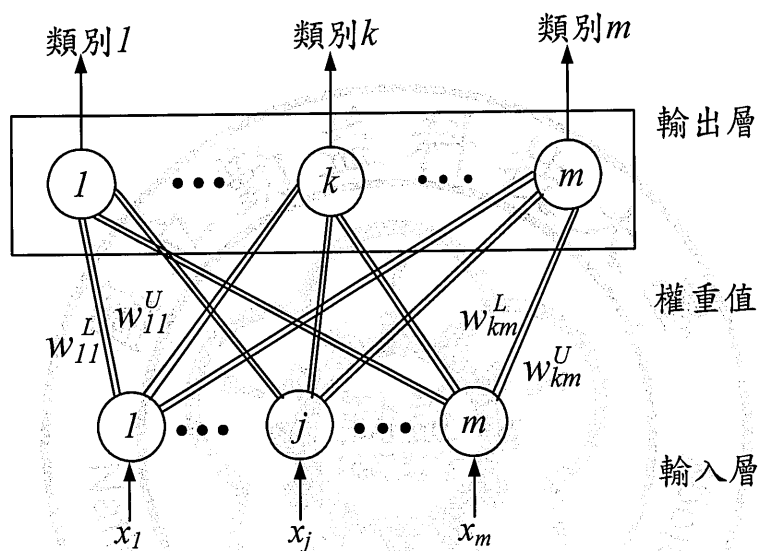


圖 5.6 可拓類神經網路之架構

5.3.1 類神經網路之理論

類神經網路或係稱為人工神經網路都是一樣之演算法，此演算法係運用大量之簡單運算處理單元所構成之神經網路，而此網路約有 10^{11} 個高度互連之單元組成，亦稱為神經元(Neuron)；係由樹突、細胞體與軸突三大部分所構成，其流程為樹突將訊號送至細胞體內，由細胞體對此輸入訊號進行整合與閾值運算，而軸突係將細胞體所計算之輸出信號導向其它之神經元，則突觸係為神經細胞之軸突與其它神經細胞樹突結合點；圖 5.7 所示為兩個生物神經元之簡化圖示。

此演算法係一種模仿人類神經系統，其因人類神經系統在事物判斷、診斷與決策等方面都有很完美之表現，而運算模式有如動物神經

結構之平行計算模式，並可從外界環境或其它之人工神經元取得資訊，以簡單之運算法則將結果輸出至外界，因此類神經網路具有基本之學習能力、推理判斷能力、記憶知識之能力與歸納能力，以及此類神經網路演算法也具備相似人類神經網路之以下幾種之特性[60]。

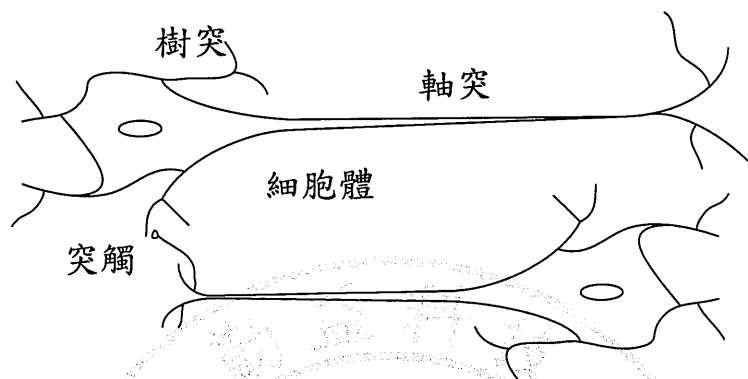


圖 5.7 兩個生物神經元之簡化圖

A. 平行處理之特性

類神經網路演算法係運用動物之樹狀神經網路作為藍圖之設計雛形，再以成熟的超大型平行處理以及若干理論之發展，使得成為人工智慧最為常用之領域。

B. 容錯(Fault Tolerance)之特性

若將其輸入資料參雜少許的雜訊干擾運算，則類神經網路驗算法仍然不受外在之影響，繼續正確之運作，即使增加 10%的神經網路失效仍能照常運作；所以此網路在操作上具有相當高之容忍度。

C. 結合式記憶(Associative Memory)之特性

可以記憶曾經訓練過之輸入樣本以及輸出對應之理想值，又可將此特性稱之為內容定址記憶(Content Addressable Memory)。

D. 解決最佳化(Optimization)問題

此網路用於處理非演算法所表示之問題，或是解決以演算法處理很費時者。

E. 超大型積體電路實作(VLSI Implementation)

因此網路之結構具有相當高度之互相連結(Interconnections)，且運算簡單有規律性，所以採用超大型積體電路(VLSI)完成此網路。

F. 能處理一般演算法難以處理的問題

則為了增加效率起見，所以利用「個個擊破(Divide and Conquer)」之方法，已求得一條正確可走之路徑；而這是在傳統之方法上所以無法達到之目的。

5.3.2 類神經網路之架構

以往建立傳統之數學模型時所面對之困難為複雜性與非線性等問題，且必須要假設參數或化簡參數才能建構此物理之數學模型；而類神經網路演算法在處理同等問題時，無需建立模式與解其所建立之模式，係要藉由電腦快速學習的方式解決問題點，則可將此網路分成三階段分別為學習、回想與歸納推演等階段。其網路學習階段係在於建立神經元之間的連結模式、修正神經元之間的權重、調整神經元之門檻值；而回想階段為若是神經網路接受到一個刺激之輸入後，網路會依據此架構產生一個對應輸出之訊號，則歸納推演階段是局部之觀察整體特性之描述過程，此階段係為類神經網路不可或缺之階段，便可提供有效率之記憶與儲存模式。

學習能力與網路系統架構之形態有關，若神經元太少則無法處理困難之問題，反之神經元若太多時則效率不彰；因此神經元之多寡係由問題之複雜程度、所其訓練資料量與所要求之精確度等因素決定其個數，但要找出最佳之網路神經元大小，並不完全由以上等因素決定係要經由不斷的經驗累積與錯誤嘗試所決定的。而類神經網路之應用層面上，絕大部分取決於神經元之連結方式，因此形成多種類神經網路模式，則這些模式都具備有特定之規則與學習方法，經由文獻可得知一般之類神經網路學習方法可分為以下四大類。

- (1) 監督式學習網路(Supervised Learning Network)
- (2) 無監督式學習網路(Unsupervised Learning Network)
- (3) 聯想式學習網路(Associate Learning Network)
- (4) 最適化應用網路(Optimization Application Network)

監督式學習網路係為目前被廣泛使用之類神經網路，其因它係從問題中尋找出訓練規範，透過學習得到輸入變數與輸出變數之對應關係，並且利用目標值與網路輸出值之差異調整網路權重值，以降低輸出誤差；則此網路應用於工業、商業、管理、資訊以及醫學等方面。

而每一神經細胞網路模型，其特性係由網路拓樸(Network Topology)之圖形與節點之特性加以決定，則訓練過程中的法則係為最初之一組初始加權值(Initial Weights)訂定，且在學習過程中調整其加權值以增加效率，經由不斷調整與學習，使得理想網路之輸出值與目標值能達到相同值，此時才固定網路中之加權值，若以固定此值時表已完成類神經網路訓練過程；而類神經之基本網路如圖 5.8 所示。

1. 輸入層(Input Layer)

眾多神經元接受大量非線之資料輸入信息，則輸入的信息稱為輸入向量。

2. 隱藏層(Hidden Layer)

介於輸入層與輸出層中間之諸多神經元與鏈接組成的各個層面則簡稱「隱層」；隱藏層若因網路之需求可以增加多層，通常一般網路都習慣都以一層為極限，則隱層之節點之數目係不定，若其節點數目愈多時，類神經網路的非線性與強健性(Robustness)就愈顯著。

3. 輸出層(Output Layer)

信息在神經元鏈接中傳輸、分析與權衡，而形成輸出之結果，則此輸出信息稱之為輸出向量。

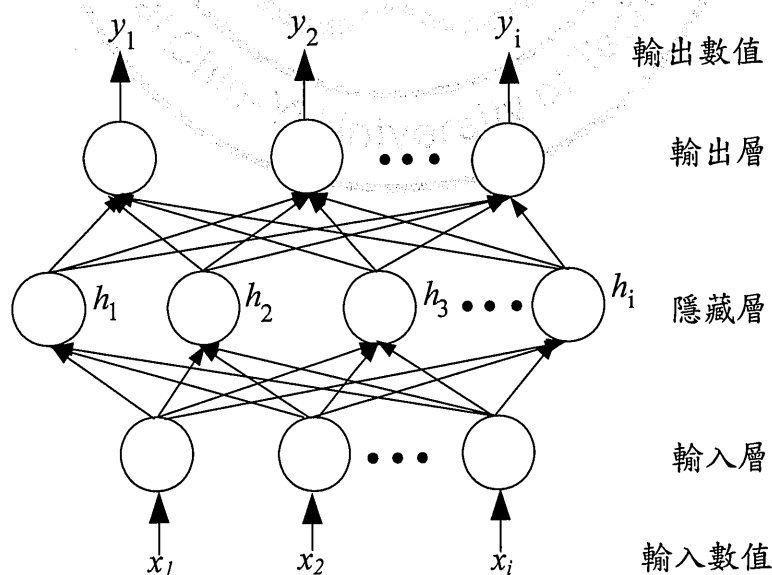


圖 5.8 類神經網路架構

5.3.3 可拓類神經網路之學習法則

本論文所使用之可拓類神經網路係藉由監督式學習法之類神經網路與可拓理論互相結合所產生之演算法，此演算法透過監督式學習法調整權重值，再經不斷知學習之過程，其調整與修正權重值或診斷值；以此降低可拓類神經網路之輸出值與目標值之差距，便可提升可拓類神經網路之診斷精確率，但可拓理論也可與非監督式學習法之類神經網路結合，其利用所擁有之特徵樣本值進行學習，並由此學習找尋樣本中之訓練規律性與關聯性，若當有新的資料要輸入此演算法診斷時，則診斷結果為演算法中找尋最接近者作為此診斷結果，而此非監督式學習法之可拓類神經網路並不適合用於本論文之質子交換膜燃料電池故障偵測系統。

監督式學習法之可拓類神經網路的學習前，務必將所有學習樣本轉化為 $X=\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{P_m}\}$ ，則此每一筆樣本都須包含著其樣本特徵與類別如式(5-19)所式。其樣本總誤差比率(E_t)由式(5-20)所式，則式中的 P_m 所示為學習樣本，其 P_n 則表示為樣本總筆數，而 n 表示特徵總數。

$$X_i^k = \{x_{i1}^k, x_{i2}^k, x_{i3}^k, \dots, x_{in}^k\} \quad (5-19)$$

$$E_t = \frac{P_m}{P_n} \quad (5-20)$$

可拓類神經監督式學習之演算步驟如下所示。

步驟 1：將學習樣本利用物元模型建立其輸入與輸出之權重值，則可拓物元模型由式(5-21)所示。則式中之 N_k 所示為資料的類別總數，其可拓物元模型內之特徵值為 c_n 所示，而其值之可拓經典域為 v_{kn} 表示，此經典域範圍係經由學習樣本所決定的最大值與最小值，如式(5-22)與式(5-23)所示；式中之 x_{in}^k 則代表可拓類神經網路輸入端之學習樣本。

$$R_k = \begin{bmatrix} N_k & c_1 & v_{k1} = \langle w_{kn}^L, w_{kn}^U \rangle \\ & c_2 & v_{k2} = \langle w_{kn}^L, w_{kn}^U \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{kn} = \langle w_{kn}^L, w_{kn}^U \rangle \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} k = 1, 2, \dots, M \\ n = 1, 2, \dots, M \end{array} \quad (5-21)$$

$$w_{kn}^L = \min_{i \in P_m} \{x_{in}^k\} \quad (5-22)$$

$$w_{kn}^U = \max_{i \in P_m} \{x_{in}^k\} \quad (5-23)$$

步驟 2：利用式(5-24)計算出每各特徵之權重中心值；如式(5-25)所示為 Z_{med} 之所有特徵權重中心值。

$$z_{kn} = \frac{(w_{kn}^L + w_{kn}^U)}{2} \quad (5-24)$$

$$Z_{med} = [z_{k1}, z_{k2}, z_{k3}, \dots, z_{kn}] \quad (5-25)$$

步驟 3：由式(5-26)讀取 i -th 學習樣本資料與 n 個特徵數。

$$X_i^k = \{x_{i1}^k, x_{i2}^k, x_{i3}^k, \dots, x_{in}^k\} \quad (5-26)$$

步驟 4：運用以上 3 步驟取得所設定值與所得計算值後，並將此值代入式(5-27)計算出 X_i^k 之可拓距離。

$$ED_{ik} = \left[\sum_{n=1}^j \frac{|x_{in}^k - z_{med, kn}| - 0.5 \times (w_{kn}^U - w_{kn}^L)}{0.5 * (w_{kn}^U - w_{kn}^L)} + 1 \right] \quad (5-27)$$

藉由式(5-27)可觀察出若當可拓經典域之範圍區間較寬時，則所運用之樣本資料也相較雜亂且模糊，因此計算可拓距離之靈敏度也有較低之情形發生；反之若經典域之範圍區間較窄時，其運用之樣本資料為較清晰且明確，所以計算可拓距離之靈敏度有較高之情況發生。而圖 5.9 所示為可拓距離之示意圖，此圖敘述點 X 與經典域區間 $\langle w^L, w^U \rangle$

之距離，若當此區間 $\langle w^L, w^U \rangle$ 範圍改變時，則可拓距離之形式也會跟著有所改變。

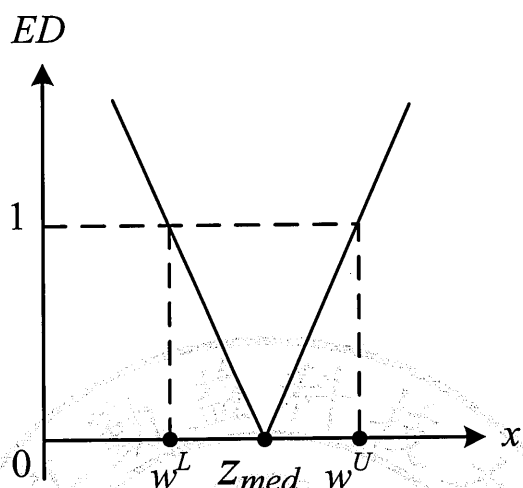


圖 5.9 可拓距離示意圖

步驟 5：此步驟利用式(5-28)尋找所有類別中最小之可拓距離，若類別 T 之可拓距離為所有類別中之最小值，則此樣本之所屬類別為 T；其可拓距離值若有類別 T 與類別 P 相同時($T=P$)，將其步驟跳至步驟 7 繼續進行學習，反之若辨別樣本之最小值無與其它類別相等時($T \neq P$)，則繼續步驟 6 之動作。

$$ED_{ik}^* = \min_{k \in m} \{ ED_{ik} \} \quad (5-28)$$

步驟 6：調整 P 類別與 T 類別之權重值，並由以下幾個公式所完成。

$$w_{Pn_new}^L = w_{Pn_old}^L + \mu(x_{in}^k - Z_{medPn_old}) \quad (5-29)$$

$$w_{Pn_new}^U = w_{Pn_old}^U + \mu(x_{in}^k - Z_{medPn_old}) \quad (5-30)$$

$$w_{Tn_new}^L = w_{Tn_old}^L - \mu(x_{in}^k - Z_{medTn_old}) \quad (5-31)$$

$$W_{Tn_new}^U = W_{Tn_old}^U - \mu(x_{in}^k - Z_{medTn_old}) \quad (5-32)$$

步驟(6-2)：變更新權重中心值大小。

$$Z_{med,Pn_new} = \frac{(W_{Pn_new}^U + W_{Pn_new}^L)}{2} \quad (5-33)$$

$$Z_{med,Tn_new} = \frac{(W_{Tn_new}^U + W_{Tn_new}^L)}{2} \quad (5-34)$$

則步驟 6 之(6-1)步內的公式中 μ 為可拓類神經網路之學習率 (Learning Rate)，此學習率之值過大或過小都會影響至收斂速度與收斂精準度，若其值愈大值收斂速度愈快，但收斂精準度與收斂速度係成反比變化，收的愈快則收斂精準度愈低；反之學習率愈小其收斂精準度較為精準，因精準度的提高所以學習疊代次數與學習時間勢必增長；則調整權重值之過程可由圖 5.10 與圖 5.11 所示。其調整方式因 $ED_{T_old} < ED_{P_old}$ 所以分配類別時並非學習樣本隸屬之類別如圖 5.10 所示，且必須再透過式(5-29)至式(5-34)重新作調整，直到所學習樣本計算之 $ED_{T_new} > ED_{P_new}$ 時，則表示透過調整權重以達到改變其所歸屬之正確類別。

步驟 7：若還有學習樣本筆數時則重複步驟 3 至步驟 7，而當所有學習樣本都已讀取完畢與學習分類結束為止。

步驟 8：當學習樣本筆數之分類程序都達到收斂狀態或容許總誤差率以達到目標值時則停止疊代，若未達到時則返回步驟 3 繼續此動作。

其由以上 8 大步驟，可利用流程圖說明可拓類神經網路之學習流程圖；如圖 5.12 所示。

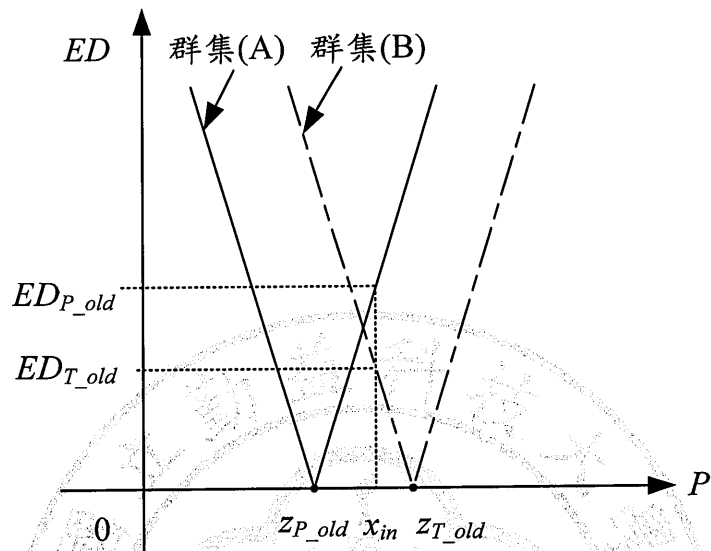


圖 5.10 P 類別與 T 類別權重調整情形-調整前

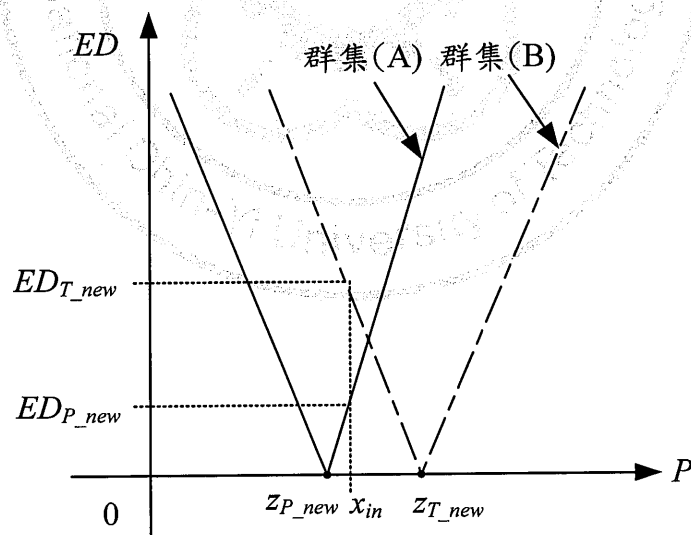


圖 5.11 P 類別與 T 類別權重調整情形-調整後

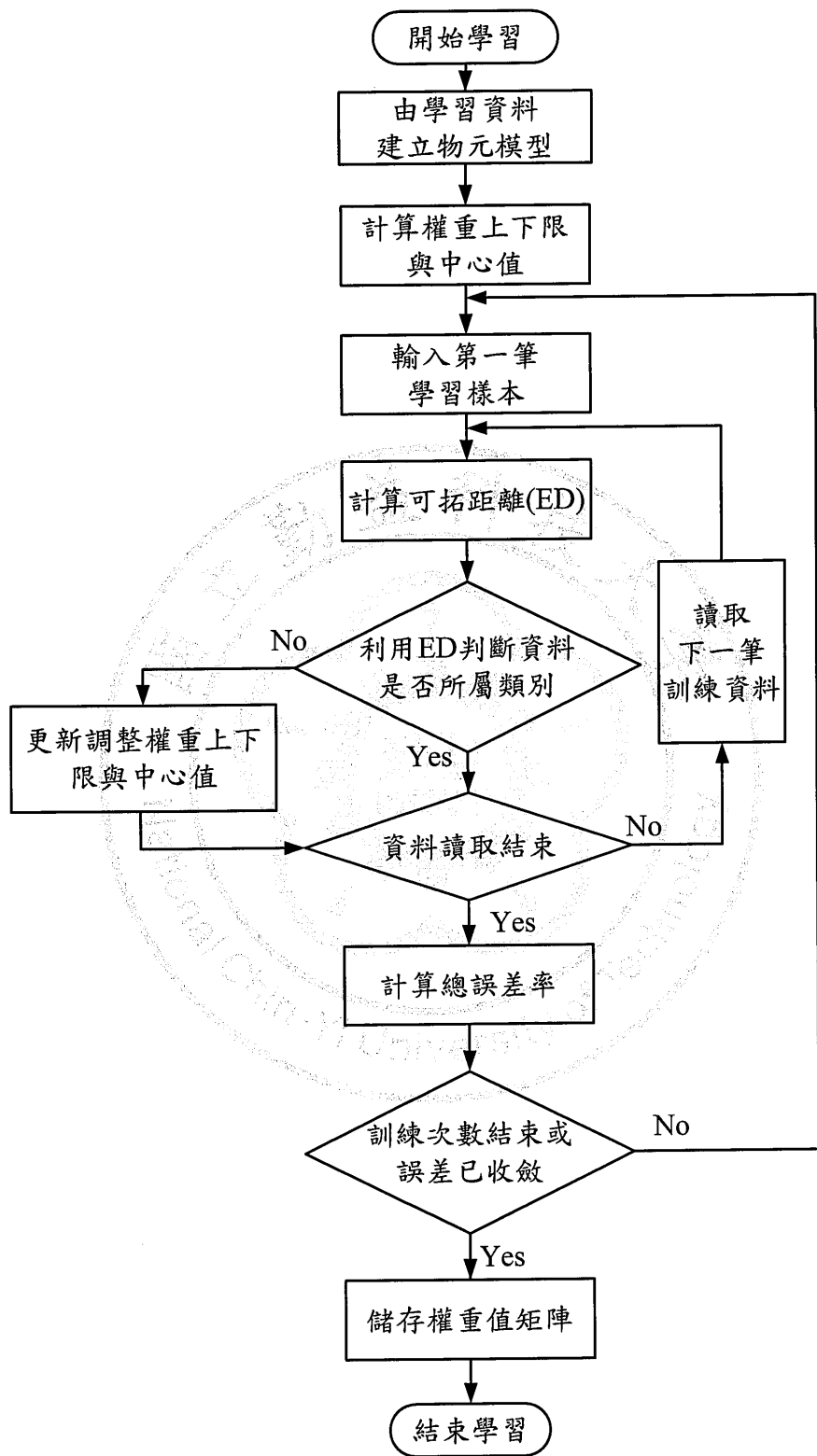


圖 5.12 可拓類神經網路學習流程圖

5.3.4 可拓類神經網路之診斷法則

利用前小章節將可拓類神經網路之學習階段完成後，並將所其學習後之權重值紀錄，便可進行下一階段之診斷待測資料之類別，則其診斷之演算步驟如下所示。

步驟 1：讀取可拓類神經網路之最佳權重值矩陣。

步驟 2：計算中間值之大小。

步驟 3：讀取即將待測之樣本。

步驟 4：計算該待測樣本與各類別之可拓距離。

步驟 5：尋找該待測樣本在各類別運算後之最小可拓距離值，如式(5-35)所示。

$$ED^* = \min_{k \in m} \{ ED_{ik} \} \quad (5-35)$$

步驟 6：運算各等級集合可拓距離的相對值，本步驟使用式(5-36)之可拓類神經網路正規化公式，且讓此可拓距離值都能在 $\langle 1, \infty \rangle$ 之間；假若此 ED'_i 等於 1 時，則可以判定該待測樣本係隸屬該類別之型態。

$$ED'_i = \frac{ED_{ik}}{ED^*} \quad (5-36)$$

步驟 7：若讀取完所有待測樣本後即停止運算，否則回此診斷法則中步驟 3 讀取下一筆待測樣本。

則由以上 7 大步驟，可利用流程圖說明可拓類神經網路診斷流程圖；如圖 5.13 所示。

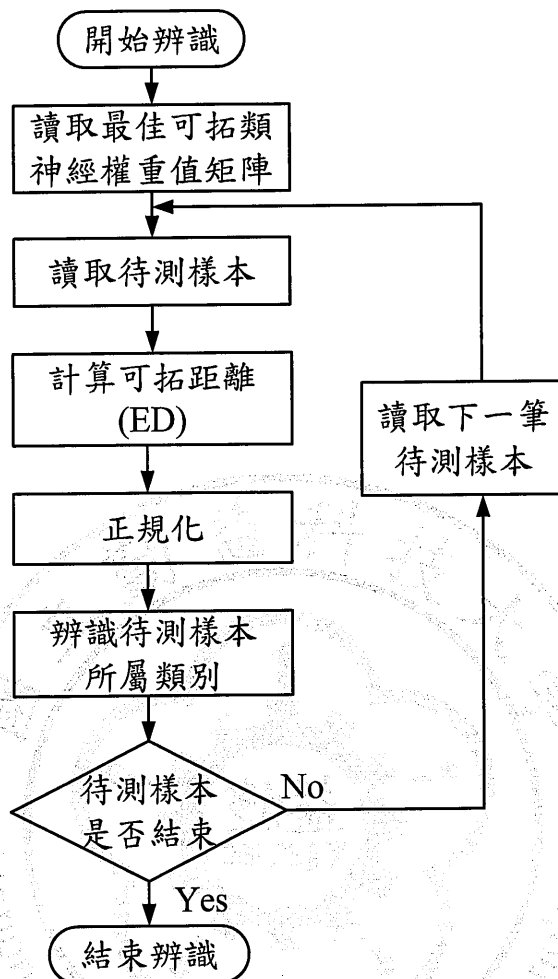


圖 5.13 可拓類神經網路診斷流程圖

5.4 本章小結

本章係主要說明本論文所利用之兩種診斷法則，一種為中國學者蔡文教授在 1983 年所發展出之可拓理論，則另一種為類神經網路與可拓相互結合而成之可拓類神經網路演算法，後者係將類神經網路中之缺點改善，而所衍生出新之方法；本論文將藉由第三章節所截取之質子交換膜燃料電池發電系統現行狀態與第四章節所預測之第一週期和第二週期中之 13 個特徵值，將一併轉化為可拓理論之待測物元模型，並且將此三組物元模型代入兩種不同之理論，進行診斷流程；則診斷現行狀態與預測狀態之結果，再由第六章節係說明其診斷類別之結果。

第六章 實驗結果與討論

6.1 前言

本章結合前三章之內文所構成的質子交換膜燃料電池故障預測發電系統，其論文中第三章節為抓取現行狀態之 13 個特徵值與第四章節為預測下一週期狀態與下兩週期狀態之 13 個特徵值，並經由第五章節診斷出各狀態下的故障點，其結果由本章節所示。首先將系統操作在工作區間內，並且使用電子式負載把負載固定在一定值，其電池系統所控的抽氧氣風扇電壓將會落在一定之範圍內，而室內溫度維持在 25 °C 至 27 °C 之間；若以上的條件都已設定完成時，則可進行故障預測電池發電系統。並以 LabVIEW 設計軟體人機介面軟體完成此系統建構，係將系統所測得值與預測值利用 Microsoft office Excel 2003 紀錄以便未來系統故障診斷或是重新調整可拓經典域範圍與可拓節域範圍所用，而此人機介面可即時診斷出質子交換膜燃料電池發電系統故障點與系統下一週期之故障，可以明確的告知使用者現行狀態，並且能提早停止系統繼續動作而造成嚴重之系統傷害，以至無法彌補的過失。

6.2 訊號預測之測試結果

此章係將所提之預測方法以 LabVIEW 軟體實現 13 個特徵預測值，本論文將第三章節所測得之實際 13 個特徵值、所預測之第一週與第二週期的 13 個特徵值，其此數據庫共儲存 455 筆資料，則本系統所取樣之時間為 5 秒抓取數值一次，並利用式(4-9)算得出 13 個特徵值之誤差 ($\varepsilon\%$)；如表 6.1 所示為各特徵之誤差百分比；其表中之每個特徵誤差百分比都小於 5%，則總誤差百分比($\underline{\varepsilon}\%$)由式(4-10)所算得，此表預測第一週期之總誤差百分比為 2.049%與第二週期總誤差百分比為 2.272%。

其圖 6.1 至圖 6.6 所示為本實驗所測質子交換膜燃料電池發電系統之特徵實際曲線值、預測第一週期與預測第二週期值之曲線為(a)，而圖中藍色線為實際曲線、綠色線為預測下一週期之曲線而紅色線為預測下兩週期之曲線；則(b)為誤差百分比圖，其圖中藍色線為預測第一

週期之誤差百分比，而紅色線為預測第二週期之誤差百分比。

表 6.1 系統 13 個特徵值之誤差百分比

特徵名稱	預測(1)誤差(ε %)	預測(2)誤差(ε %)
V_{FC}	1.507121(%)	1.815044(%)
I_{FC}	1.889812(%)	2.449186(%)
01-05cell (V_1)	3.707183(%)	4.284905(%)
06-11cell (V_2)	3.917834(%)	4.694496(%)
12-17cell (V_3)	1.570534(%)	1.699898(%)
18-23cell (V_4)	2.734268(%)	3.180198(%)
24-29cell (V_5)	1.615805(%)	1.879866(%)
30-35cell (V_6)	0.744976(%)	0.930577(%)
36-40cell (V_7)	1.001124(%)	1.233707(%)
T_{stack}	1.222962(%)	1.444917(%)
T_H	0.579016(%)	0.649992(%)
P	4.306187(%)	4.778683(%)
$\alpha_{(V/T)}$	1.8516(%)	2.175811(%)
總平均誤差(<u>ε</u> %)	2.049879(%)	2.272029(%)

其中圖 6.1 至圖 6.6 之(b)，若有出現誤差較大之百分比點時，則為此時系統係為解除質子交換膜燃料電池發電系統之排氣閥(F_2)故障，因當將排氣閥之狀態故障排除時，燃料電池之電壓與電流都會有上升之趨勢，但所提之預測系統係無法很快速在此種狀態下，預測下一週期或下兩週期之值；則系統只要排除故障狀態時都會出現此情況。而圖 6.5 為供氫壓力，其會有較大之誤差百分比點時，則為發電系統現在進行之狀態為排氣狀態，此狀態係將所反應完之氣體與電化學反應所產生之氣體排出電池外，以維持系統正常動作。

而經本論文所提之診斷法辨識後，所預測之第一週期故障與實際故障之故障比對準確率有 90%以上，則實際故障對於預測之第二週期

故障的準確率之比對結果，係因本實驗係採用 10 個特徵平均變動率與 3 個特徵之值，而 13 個特徵所取之值都為小數點第三位，所以預測系統若有些許之差異，則預測診斷結果會有誤判之情況，但本論文所提之預測第二次週期之故障與實際故障比對，其準確率大約還維持在 81% 以上，而此預測準確率結果由 6.3.3 章節說明，則所提之預測系統已有相當高之準確率，便可提升系統使用壽命。

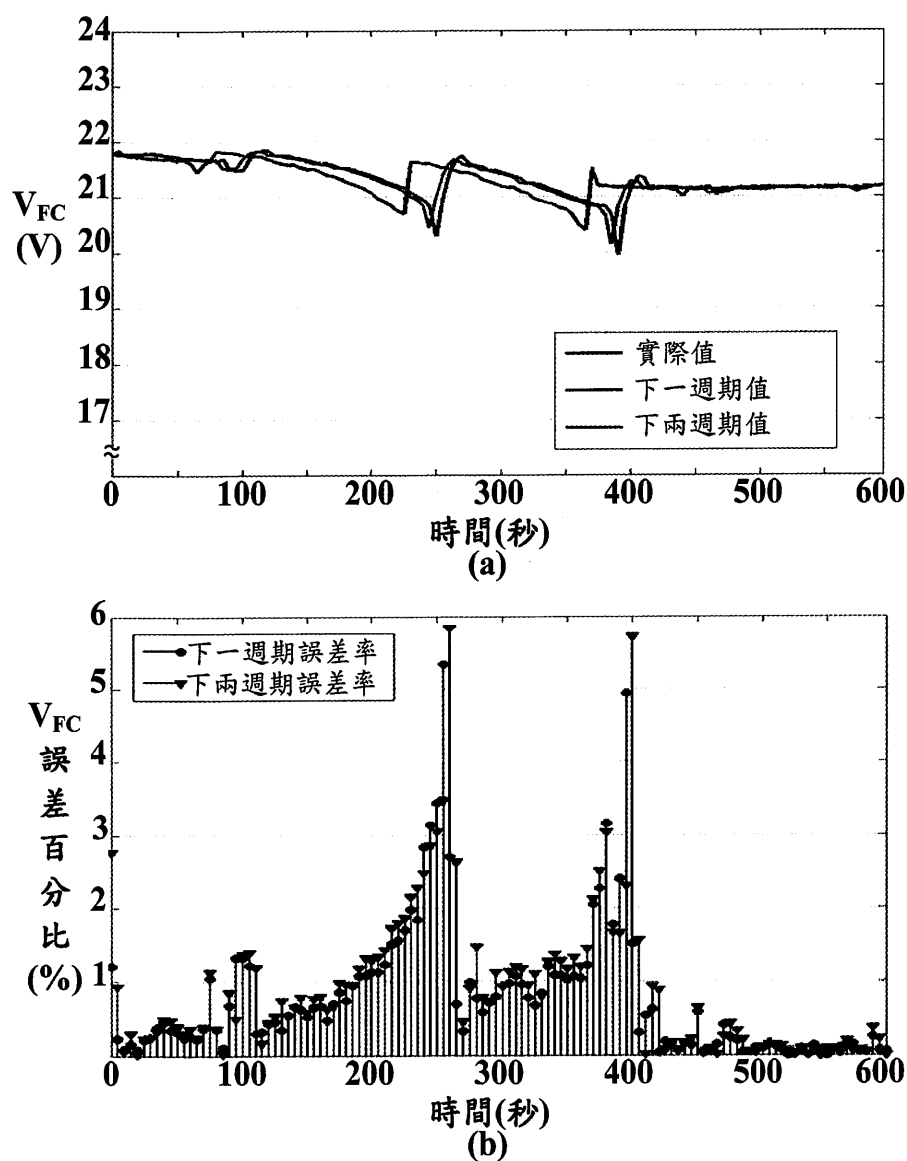


圖 6.1 (a) V_{FC} 之預測與實際電壓曲線 (b) 誤差百分比曲線

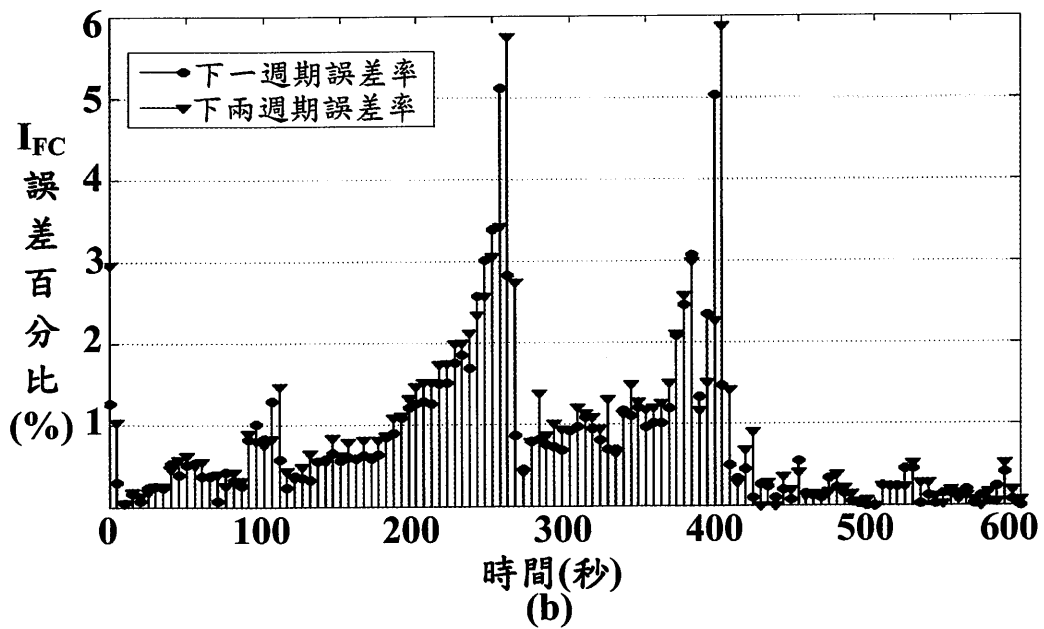
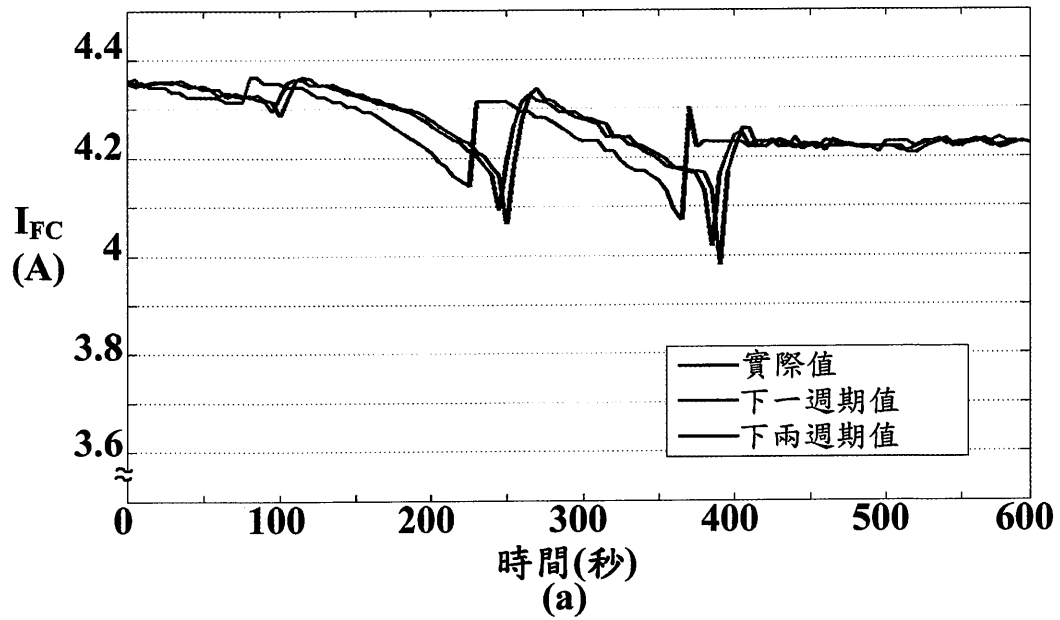


圖 6.2 (a) I_{FC} 之預測與實際電流曲線 (b) 誤差百分比曲線

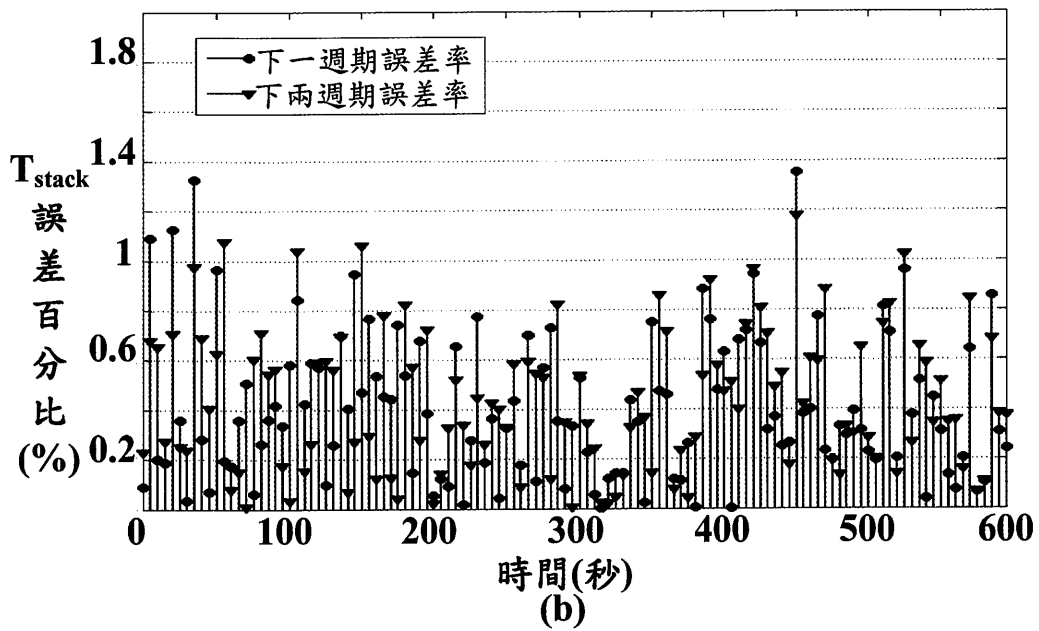
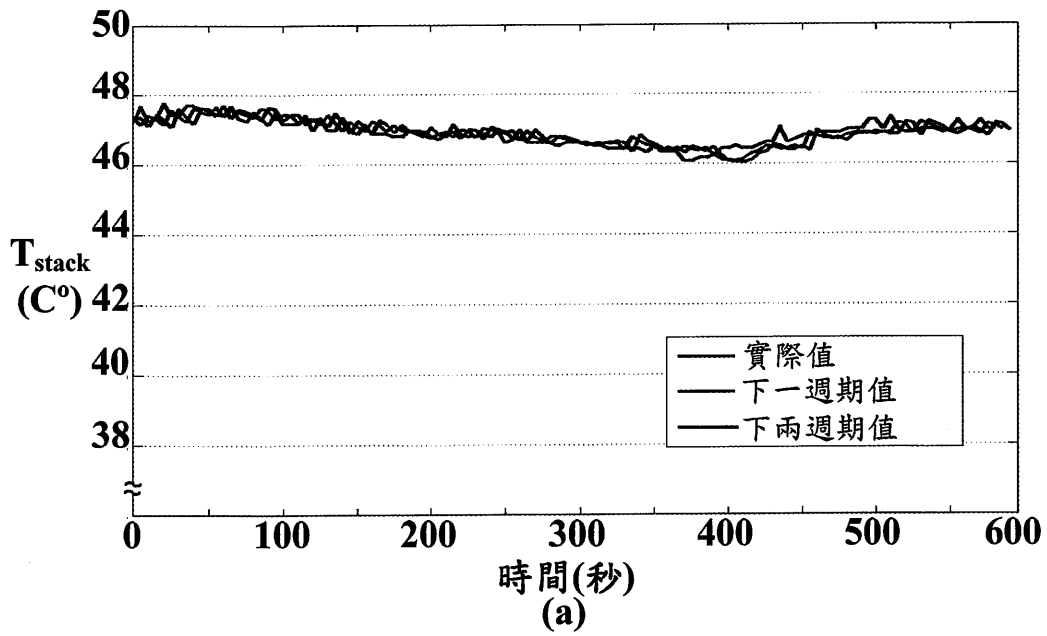


圖 6.3 (a) T_{stack} 之預測與實際溫度曲線(b)誤差百分比曲線

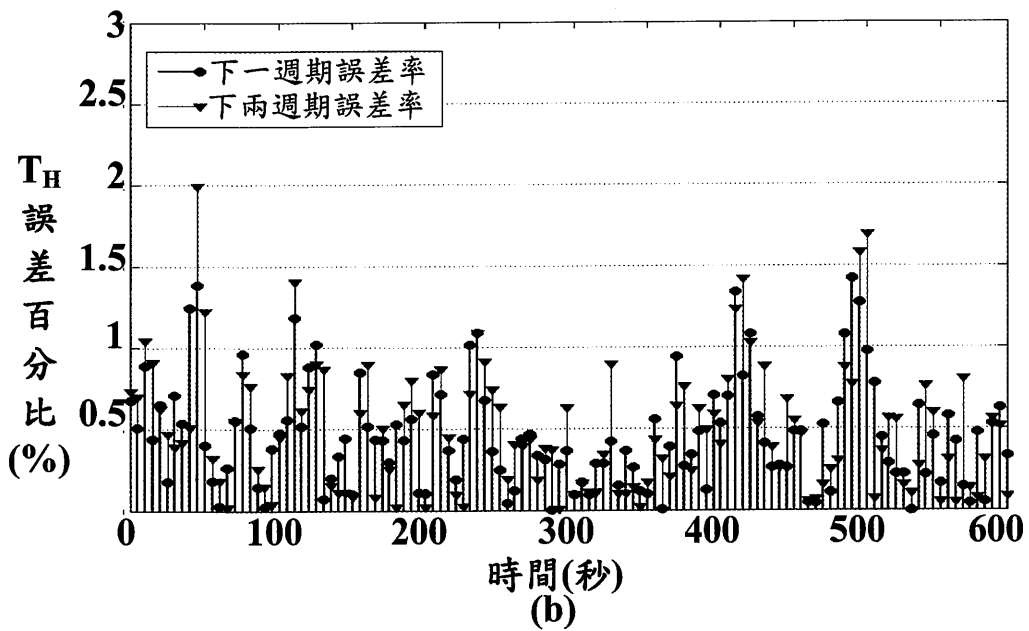
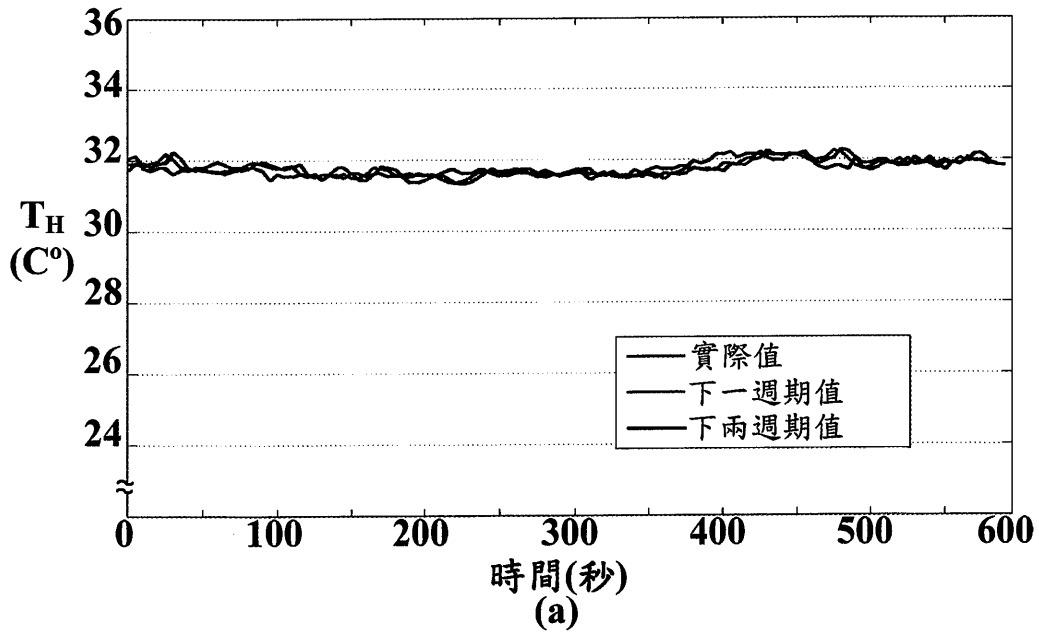


圖 6.4 (a) T_H 之預測與實際溫度曲線 (b) 誤差百分比曲線

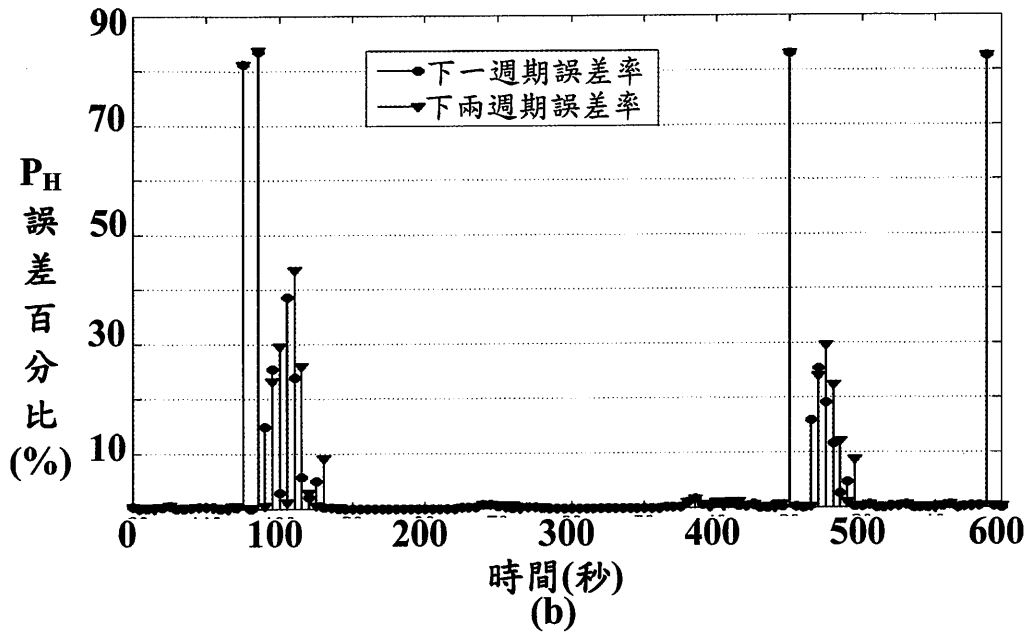
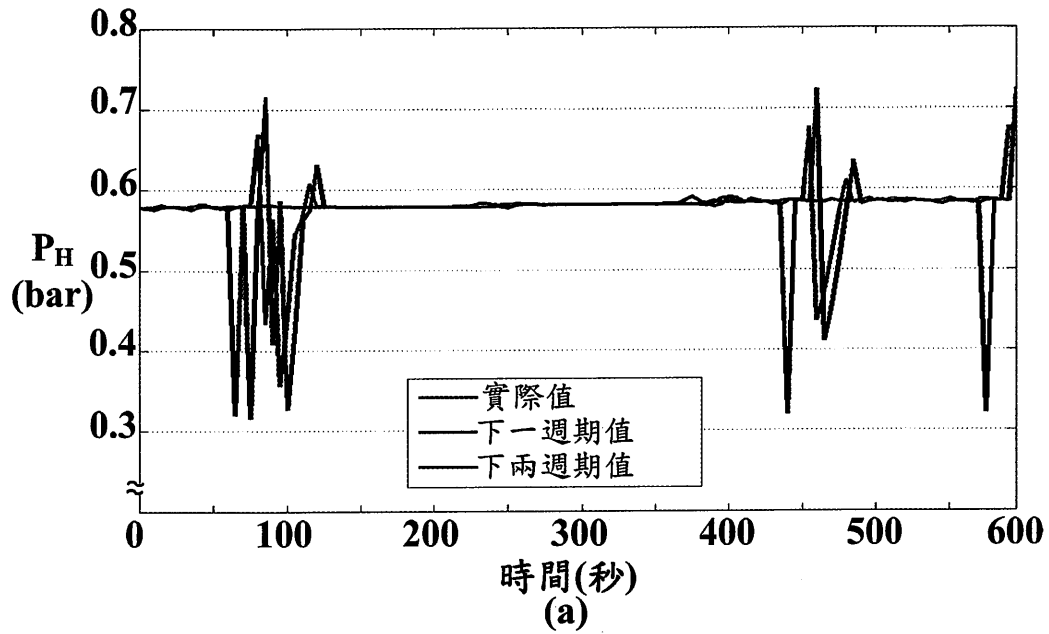


圖 6.5 (a) P_H 之預測與實際壓力曲線 (b) 誤差百分比曲線

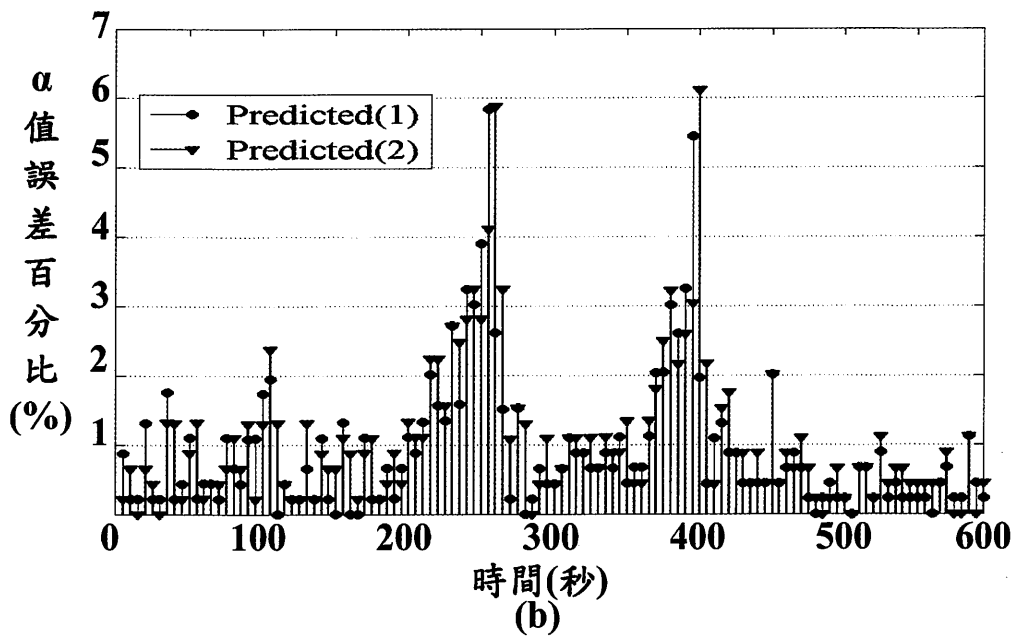
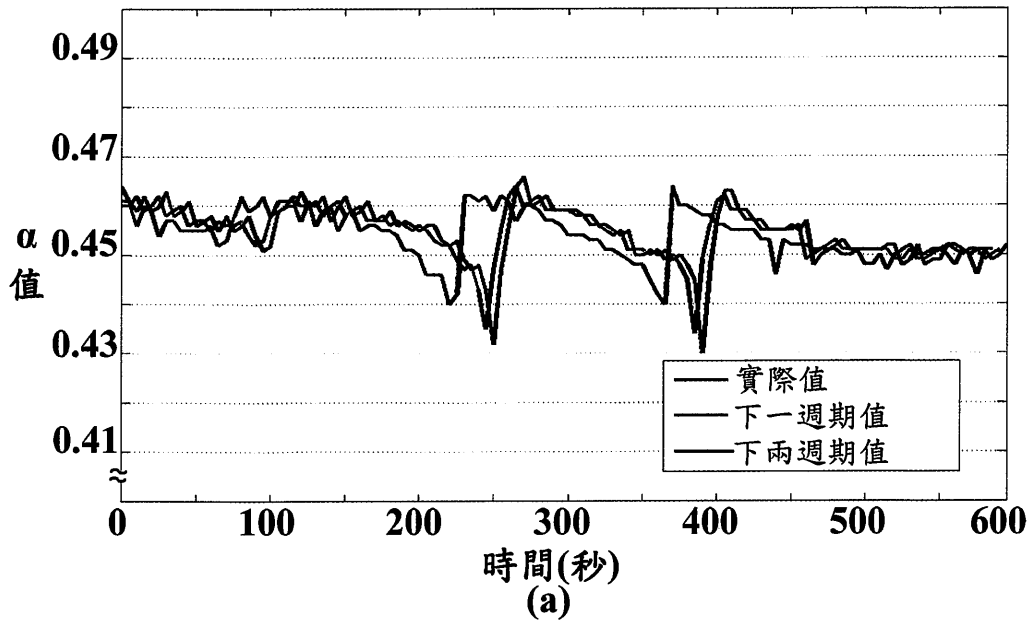


圖 6.6 (a) α 值之預測與實際值曲線 (b) 誤差百分比曲線

6.3 故障診斷之結果

以第二章節了解質子交換膜燃料電池之數學模型與電池特性，而從中擷取影響燃料電池之故障特徵物元，並利用可拓理論與灰色理論預測與診斷故障點；其在任何故障發生後，發電系統的電壓必定會有壓降之情況發生，假若使用者不加以重視，進而導致質子交換膜燃料電池發電系統永久性之損壞，則本實驗將紀錄各訊號並建立數據庫，以便日後預測與診斷此系統，由數據庫繪出電池電壓變化情形；如圖 6.7 所示電池發電系統正常(F₁)之特徵波形圖、圖 6.8 所示電池發電系統排氣閥故障(F₂)之特徵波形圖、圖 6.9 所示電池發電系統控溫系統故障(F₃)之特徵波形與圖 6.10 所示電池發電系統氧氣孔堵塞故障(F₅)之特徵波形。

則各圖中之(a)為電池之電壓(V_{FC})、(b)為電池之電流(I_{FC})與(c)為電池之電池堆溫度(T_{stack})；圖 6.11 至圖 6.14 為電池發電系統在何故障之各區間電壓特徵變化曲線，而圖中藍色線表示 01-05cell 電壓(V_1)、綠色線表示 06-11cell 電壓(V_2)、紅色線表示 12-17cell 電壓(V_3)、紫色線表示 18-23cell 電壓(V_4)、土黃色線表示 24-29cell 電壓(V_5)、灰色線表示 30-35cell 電壓(V_6)以及黑色線表示 36-40cell 電壓(V_7)。

則圖 6.11 所示為質子交換膜燃料電池發電系統在正常狀態之各曲線，其曲線變化不大，而圖 6.12 所示為系統發生 F₂ 之故障與圖 6.13 所示為系統發生 F₃ 之故障情況的各電壓、電流與溫度曲線之變化情形，並且由此兩圖可觀察出各電壓、電流與溫度變化曲線相似，讓使用者係無法從各值之曲線圖，得出質子交換膜燃料電池發電系統之故障點，所以本論文所提之診斷方法係可以即時得知當下發電系統之狀態；圖 6.14 所示為質子交換膜燃料電池發電系統出現 F₅ 之故障型態，其由此圖得知系統在 25 秒時發生故障，並且在 15 秒後解除此故障之曲線圖，而圖 6.14 所示為各區間電壓之變化曲線，若要找出在哪個區間之故障情形，則須本論文所提之第二層可拓診斷各區間電壓運作是否正常，若以故障可盡速且明確的告訴使用者系統之故障點，便可快速讓電池發電系統停止運轉，並能防止系統損毀。

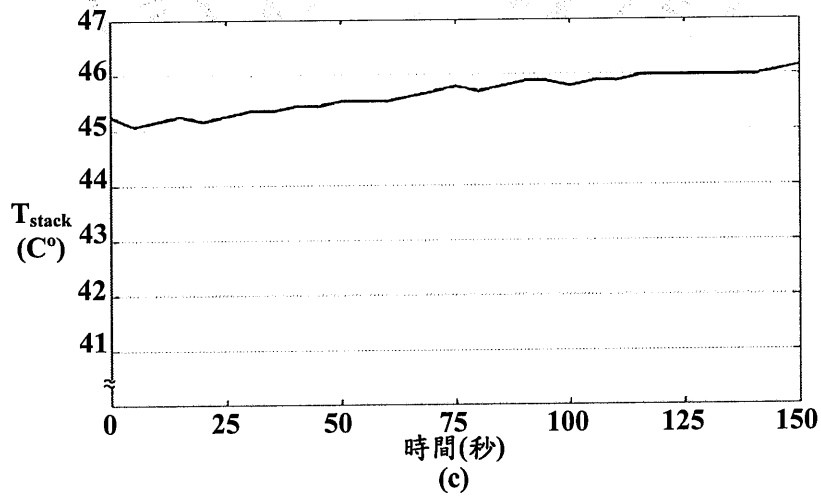
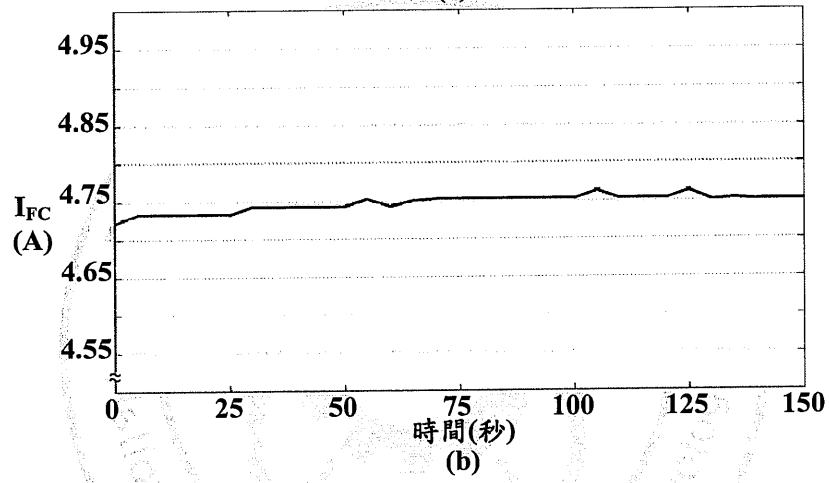
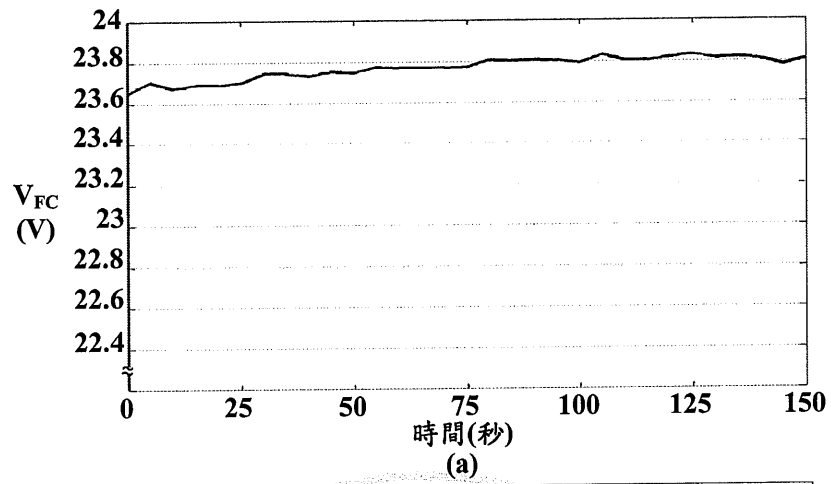


圖 6.7 電池發電系統正常(F_1)之特徵波形

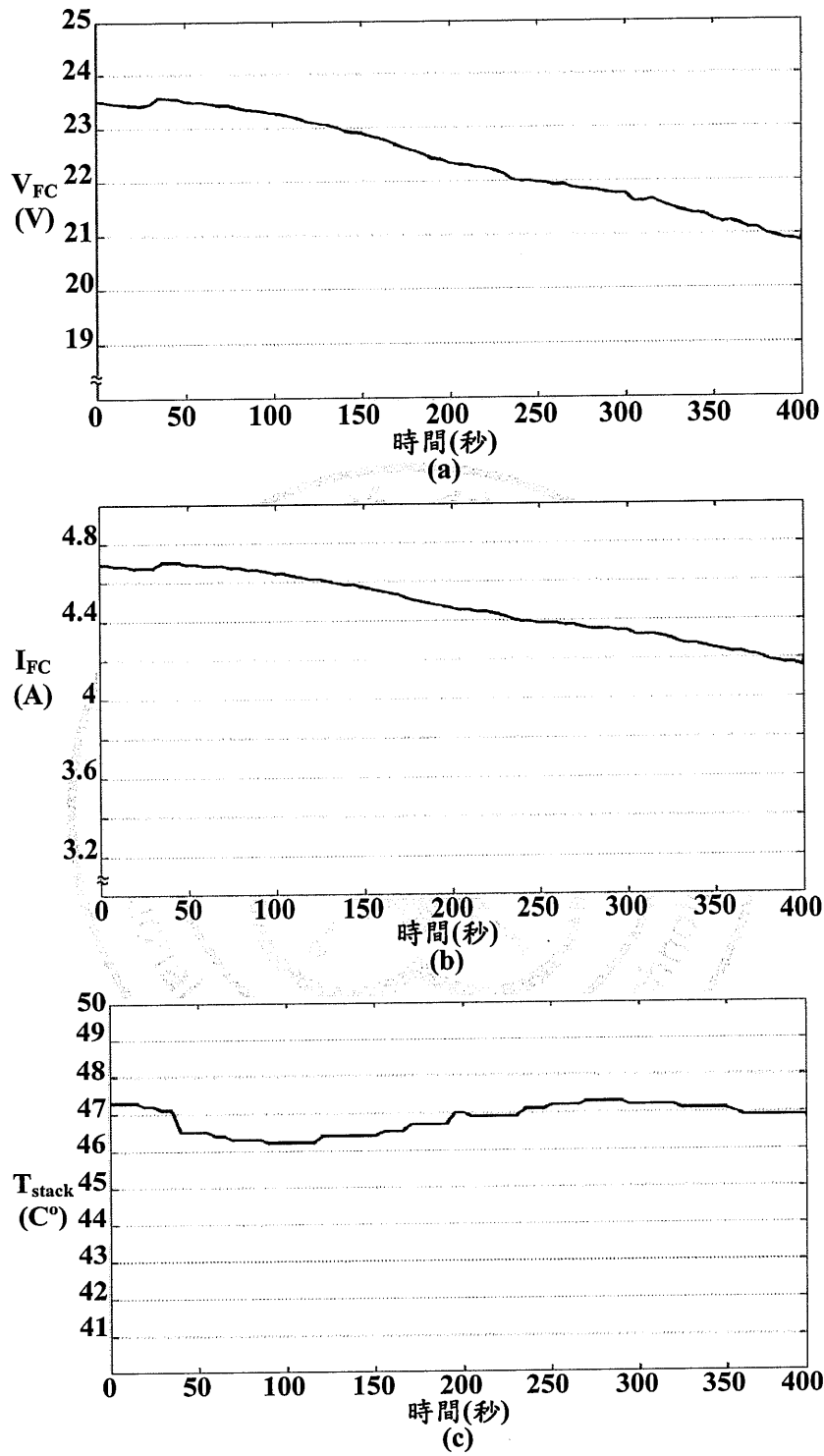


圖 6.8 電池發電系統排氣閥故障(F₂)之特徵波形

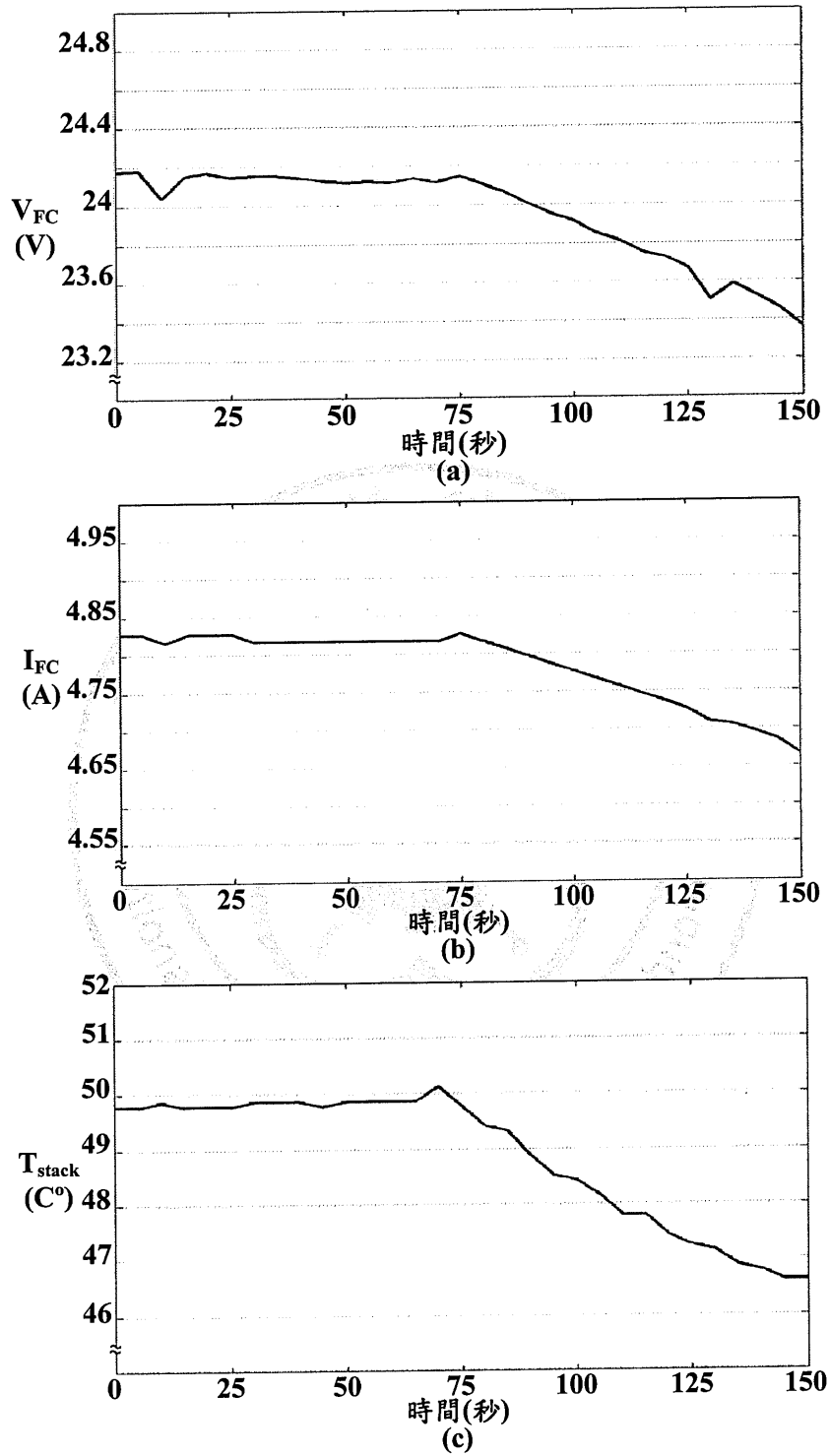


圖 6.9 電池發電系統控溫系統故障(F₃)之特徵波形

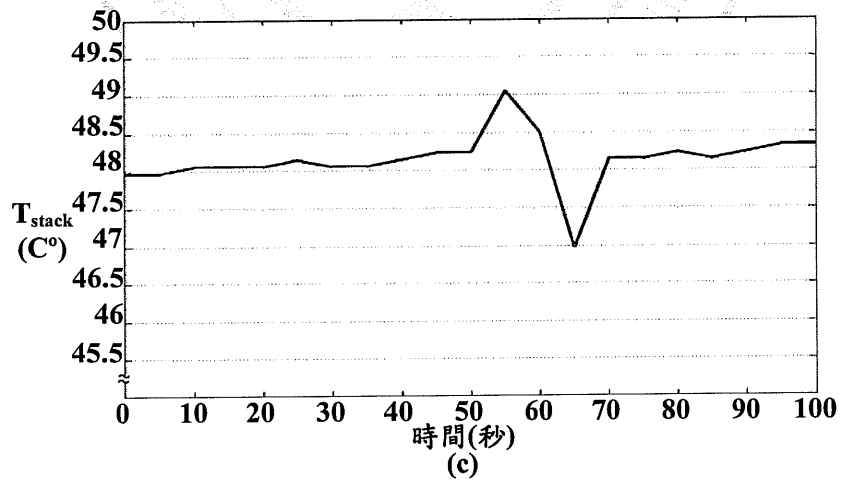
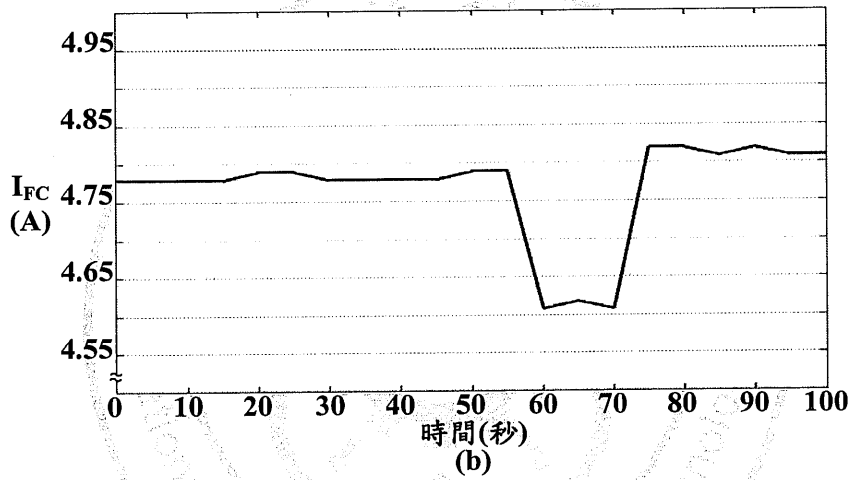
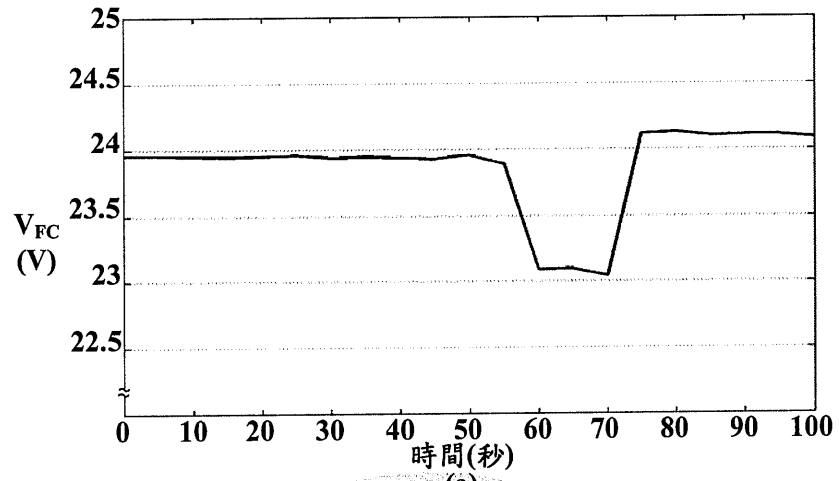


圖 6.10 電池發電系統氧氣孔堵塞故障(F₅)之特徵波形

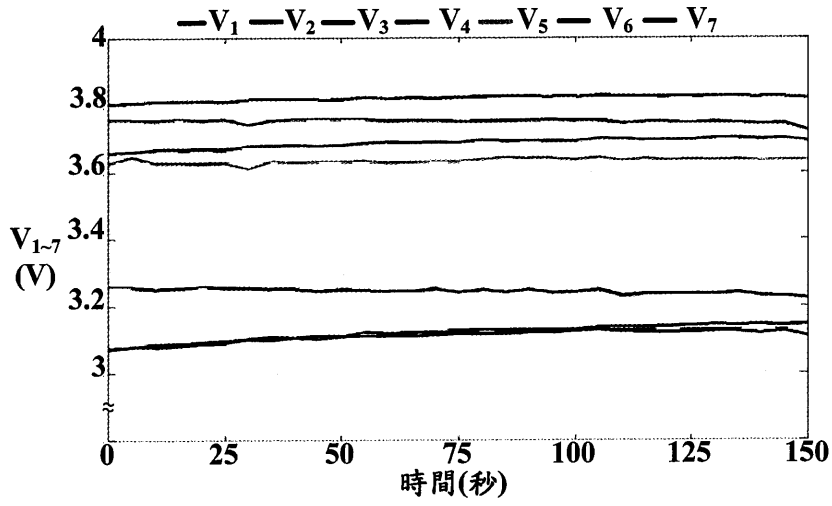


圖 6.11 電池各區間電壓正常(F₁)之特徵波形

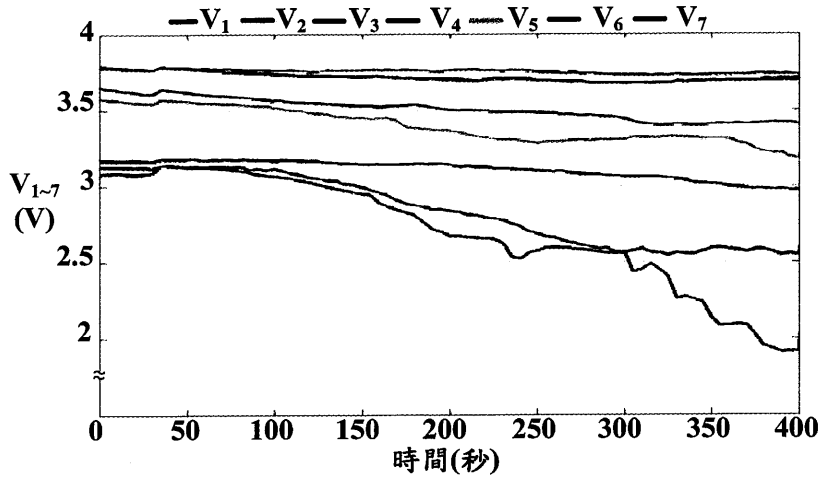


圖 6.12 電池各區間電壓排氣閥故障(F₂)之特徵波形

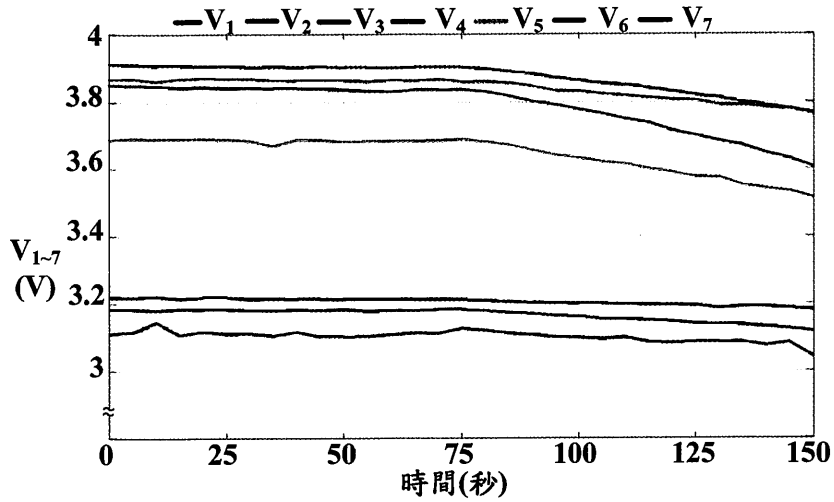


圖 6.13 電池各區間電壓發生控溫系統故障(F₃)之特徵波形

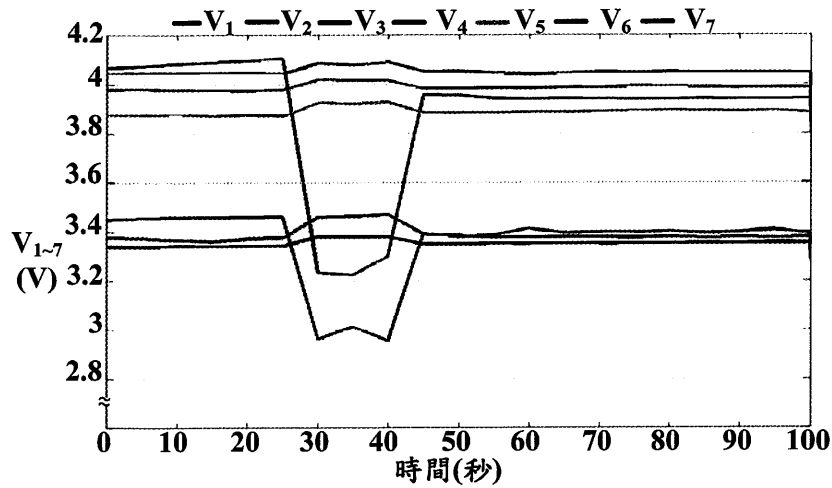


圖 6.14 電池各區間電壓發生氧氣孔堵塞故障(F₅)之特徵波形

6.3.1 利用所提可拓方法診斷之結果

依據本論文中之所提之可拓物元、可拓數學與關聯函數理論，所建立一套診斷發電系統之可拓物元模型，進而利用可拓理論之步驟計算關聯度大小，且所得關聯度值並作為判別發電系統之狀態依據；根據本論文所量測之數據資料與式(5-9)，便可建立可拓經典域，則式中之 $C_i (i=1\sim 13)$ 為 13 個特徵其經典域範圍，而式(5-10)為所提之可拓理論節域，其範圍要包含所有可拓經典域大小值；有關各故障狀態之類別經典域的上下限與節域的上下限分別列於表 6.2 所示。

$$R = \left(\begin{array}{l} \text{質子交換膜燃料電池 發電系統 } F_1 \\ \overline{V_{FC}} \\ \overline{I_{FC}} \\ \overline{V_1} \\ \overline{V_2} \\ \overline{V_3} \\ \overline{V_4} \\ \overline{V_5} \\ \overline{V_6} \\ \overline{V_7} \\ \overline{T_{stack}} \\ \overline{T_H} \\ \overline{P_H} \\ \overline{\alpha_{V/T}} \end{array} \right) \begin{array}{l} 1.949 \\ 0.361 \\ 1.04 \\ 7.12 \\ 4.28 \\ 1.92 \\ 3.28 \\ 1.4 \\ 11.52 \\ 2.52 \\ 32.47 \\ 0.594 \\ 0.441 \end{array} \quad (6-1)$$

已訂定可拓節域與經典域之範圍後，若以表 6.3 所示為 455 筆數據庫中之任 14 筆現行狀態數據進行診斷，而此數據表中之第一筆數據為例，將此數據或預測系統所預測第一週期質與第二週期值代入式(5-13)與式(5-14)計算距，而得此距後依式(5-15)計算得該資料對各類別之關聯函數；則診斷出發電系統現行狀態為系統正常(F_1)時之各特徵之值為式(6-1)所示；將式(6-1)之資料代入式(5-13)與式(5-14)，則可計算出節域與經典域之距。

表 6.2 系統 13 個特徵之經典域範圍與節域範圍

類別 特徵		F_1 經典域	F_2 經典域	F_3 經典域	F_4 經典域	F_5 經典域	F_6 經典域	F_7 經典域	可拓 節域
C_1	上限	2	-1	-1.6	7	-3	3	0.01	8.5
	下限	-1	-1.5	-3.5	1	-20	-1.5	-0.001	-25
C_2	上限	1	-0.07	-0.16	-0.16	-0.4	3	0.01	4
	下限	-0.07	-0.15	-0.4	-0.4	-1.6	-0.6	-0.001	-1.8
C_3	上限	2	-1.12	-0.7	-0.7	-9	3	0.01	4
	下限	-0.7	-9	-1.12	-1.12	-30	-10	-0.001	-35
C_4	上限	3	-1	-2.12	-2.12	-5	3	0.01	4
	下限	-0.1	-2.1	-4.9	-4.9	-55	-5	-0.001	-66
C_5	上限	2	-0.85	-1.55	-1.55	-3	3	0.01	4
	下限	-0.8	-1.5	-3	-3	-49	-3	-0.001	-58.8
C_6	上限	2	-1.2	-0.7	-0.7	-6	3	0.01	4
	下限	-0.7	-6	-1.2	-1.2	-50	-6	-0.001	-58
C_7	上限	3	-0.8	-1.6	-1.6	-4	3	0.01	4
	下限	-0.8	-1.55	-3.5	-3.5	-130	-4	-0.001	-156
C_8	上限	3	-0.35	-0.65	-0.65	-2	3	0.01	4
	下限	-0.35	-0.6	-1.7	-1.7	-150	-2	-0.001	-180
C_9	上限	3	-0.6	-0.35	-0.35	-2	3	0.01	4
	下限	-0.35	-1.5	-0.6	-0.6	-130	-2	-0.001	-156
C_{10}	上限	2.5	2	-4	12.5	2.5	2.5	0.01	13
	下限	-0.3	-4	-12	4	-3.5	-0.3	-0.001	-12.5
C_{11}	上限	30	30	30	30	30	12	30	35
	下限	13	13	13	13	13	7	13	6
C_{12}	上限	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.53	0.1	0.7
	下限	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.45	0	0.4
C_{13}	上限	0.456	0.431	0.466	0.442	0.42	0.444	0.01	0.49
	下限	0.443	0.42	0.455	0.431	0.41	0.443	-0.001	0.37

且將其值代入式(5-16)與式(5-17)，並且進行正規化關聯函數計算後可得到該特徵值與各故障類別之關聯函數 $k_j(x_i)$ ；則依使用者需求可從人機介面中調整各特徵之權重值大小，而本實驗之權重值設為表 6.4 所示；最後若所求得之關聯函數值等於 $k_k(q)=1$ 之此值時，則可拓診斷系統辨別此關聯函數為 k 類別，其診斷現行狀態 14 筆數據之結果如表 6.5 所示，其表中第 83 筆資料原本類別為 F_3 ，經所提之可拓診斷方法診斷後辨識為 F_2 類別，與原本類別不同所以辨識有誤，則可拓診斷方法計算 F_3 類別之關聯度值也相近故障點。

表 6.3 現行狀態之任 14 筆數據資料

特徵筆	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	類別
61	1.949	0.361	1.04	7.12	4.28	1.92	3.28	1.4	11.52	2.52	32.47	0.594	0.441	F ₁
62	-2.014	-0.401	0.08	-0.52	-0.04	-18.44	-0.36	-0.16	0.28	1.8	32.13	0.603	0.395	F ₁
63	-1.321	-0.281	-0.32	-1.08	-0.16	-11.08	-0.56	-0.48	-0.08	-1.08	32.13	0.597	0.423	F ₂
64	-0.975	-0.16	-0.48	-1.24	-0.64	-6.08	-0.88	-0.44	-0.04	-0.72	32.13	0.599	0.431	F ₂
83	-3.898	-0.762	-4.72	-14.88	-7.88	-1.56	-4.76	-2.6	-4.12	-4.32	28.39	0.57	0.481	F ₃
84	-3.249	-0.641	-3.36	-10.68	-5.8	-1.12	-4.68	-2.72	-4.2	-7.92	28.05	0.57	0.492	F ₃
106	-0.801	-0.2	-2.24	-3.16	-2.28	0.32	0.36	0.28	-0.2	9	29.92	0.568	0.467	F ₄
138	-1.494	-0.361	-2.64	-5.44	-3.56	0.16	-0.44	0.2	-1.64	7.92	30.17	0.569	0.473	F ₄
169	-20.9	6.887	-18.96	-37.6	-27.28	-41.44	-31.84	-23.64	-19.32	4.32	32.13	0.591	0.468	F ₅
170	-20.9	6.887	-18.96	-37.6	-27.28	-41.44	-31.84	-23.64	-19.32	4.32	32.13	0.591	0.471	F ₅
24	-0.152	-0.04	-0.16	-0.08	-0.2	-0.28	-0.48	0.04	-0.12	0.36	11	0.5	0.45	F ₆
25	-0.152	-0.04	-0.16	-0.08	-0.2	-0.28	-0.48	0.04	-0.12	0.36	10.8	0.5	0.451	F ₆
125	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	F ₇
126	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	F ₇

表 6.4 系統 13 個特徵之權重值

特徵	權重值	權重值總合
C ₁	10%	100%
C ₂	10%	
C ₃	5.3%	
C ₄	5.3%	
C ₅	5.4%	
C ₆	4%	
C ₇	4%	
C ₈	4%	
C ₉	4%	
C ₁₀	13%	
C ₁₁	10%	
C ₁₂	15%	
C ₁₃	10%	

表 6.5 診斷現行狀態 14 筆數據之結果

筆數	K(F ₁)	K(F ₂)	K(F ₃)	K(F ₄)	K(F ₅)	K(F ₆)	K(F ₇)	類別
61	1	0.271895	0.048031	0.685024	0.109544	0.311369	-1	F ₁
62	1	0.583049	0.460534	0.297647	0.811695	-0.12543	-1	F ₁
63	0.065372	1	-0.09968	-0.11815	0.39927	-0.50763	-1	F ₂
64	0.410734	1	0.172353	0.21153	0.744157	-0.22697	-1	F ₂
83	0.244251	1	0.833649	0.007159	0.462828	-0.07162	-1	F ₂
84	-0.27527	0.085673	1	-0.28533	-0.22588	-0.46129	-1	F ₃
106	0.477803	0.100429	0.180224	1	-0.3239	0.022079	-1	F ₄
138	0.32565	0.18066	0.128533	1	-0.25821	-0.12371	-1	F ₄
169	0.292198	0.187835	0.238494	0.349627	1	-0.54231	-1	F ₅
170	0.26527	0.177284	0.194141	0.335064	1	-0.56566	-1	F ₅
24	0.448507	-0.39173	-0.66642	-0.66182	-0.56074	1	-1	F ₆
25	0.373582	-0.40626	-0.66457	-0.67353	-0.57174	1	-1	F ₆
125	0.121466	-0.15591	0.000285	-0.1372	-0.33814	-1	1	F ₇
126	0.130169	-0.15027	0.011083	-0.12899	-0.33489	-1	1	F ₇

則本論文第 3.3.2 章節內文中可利用所提之可拓物元理論、可拓數學與關聯函數理論，建立第二類故障樹可以提高發電系統之診斷效率，如系統區間電壓出現故障時，可即時運用第二層可拓診斷法找出故障區間範圍，以達到快速檢修之目的；則根據文中所量測之數據資料與式(5-9)，

再建立一套診斷區間電壓正常或故障之系統，而可拓經典域、可拓節域與個特徵之權重值分別由表 6.6 與表 6.7 所示。

若已訂定可拓節域與經典域之範圍後，將以所測得之平均變動率電壓(\overline{V}_{1-7})、1cell 電壓($\leq 0.5V$)與 1cell 電壓($< 0.3V$)等三個特徵值轉化為式(6-2)之可拓待測物元模型，將此資料代入圖 5.5 之可拓診斷方法之流程圖診斷各區間電壓是否正常運作，其圖 3.19 所示為第二層質子交換膜燃料電池發電系統診斷之結果圖。

$$R = \begin{pmatrix} 01-05cell(V_1) & \overline{V}_1 & 0.21 \\ & 1cell(\leq 0.5V) & 2 \\ & 1cell(< 0.3V) & 8 \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

表 6.6 第二層之可拓經典域上下限範圍

特徵 類別	上限	C_x	C_y	C_z	特徵 類別	上限	C_x	C_y	C_z
	下限					下限			
01-05cell(V_1) 正常(F_1) 經典域	上限	1	10	20	01-05cell(V_1) 故障(F_2) 經典域	上限	-3.5	2.5	12
	下限	-3.5	2.5	12		下限	-21	-6	7
06-11cell(V_2) 正常(F_1) 經典域	上限	1	10	20	06-11cell(V_2) 故障(F_2) 經典域	上限	-6	1.5	13.5
	下限	-6	1.5	13.5		下限	-28	-16	-3
12-17cell(V_3) 正常(F_1) 經典域	上限	1	10	20	12-17cell(V_3) 故障(F_2) 經典域	上限	8.5	3.2	15.2
	下限	-8.5	3.2	15.2		下限	19	-4	9
18-23cell(V_4) 正常(F_1) 經典域	上限	0.8	5	10	18-23cell(V_4) 故障(F_2) 經典域	上限	-10	-3.8	7.7
	下限	-10	-3.8	7.7		下限	-55	-13	1
24-29cell(V_5) 正常(F_1) 經典域	上限	1	10	20	24-29cell(V_5) 故障(F_2) 經典域	上限	18	2.5	13.7
	下限	-7	2.5	13.7		下限	7	-3.5	-6
30-35cell(V_6) 正常(F_1) 經典域	上限	1	10	20	30-35cell(V_6) 故障(F_2) 經典域	上限	-5	4.5	16.6
	下限	-5	4.5	16.6		下限	-18	-10	4
36-40cell(V_7) 正常(F_1) 經典域	上限	0.8	10	20	36-40cell(V_7) 故障(F_2) 經典域	上限	10	2.3	13
	下限	-10	2.3	13		下限	-5	-16.5	-5

表 6.7 第二層之可拓節域範圍與各特徵之權重值

特徵	C_x	C_y	C_z
類別	上限(max)	上限(max)	上限(max)
	下限(min)	下限(min)	下限(min)
01-05cell(V_1) 可拓節域	1.5	12	22
	-22	-6	7
06-11cell(V_2) 可拓節域	1.5	12	22
	-29	-17	-4
12-17cell(V_3) 可拓節域	1.5	12	22
	-20	-5	8
18-23cell(V_4) 可拓節域	1.5	12	22
	-56	-14	0
24-29cell(V_5) 可拓節域	1.5	12	22
	-19	-4.5	-7
30-35cell(V_6) 可拓節域	1.5	12	22
	-19	-11	3
36-40cell(V_7) 可拓節域	1.5	12	22
	-21	-17.6	-6
權重值	20%	40%	40%
權重值總合	100%		

6.3.2 利用所提可拓類神經網路診斷之結果

質子交換膜燃料電池發電系統經由上一章節之可拓診斷系統後，發覺其診斷之準確率約有 90% 以上，但離本論文所需要之診斷準確率還有一定之距離，則本章節再利用第三章節與第四章節收集完所有待測物元的數據庫後，共 650 筆資料，並將此數據庫中之 70% (455 筆數據) 作為可拓類神經網路學習，另外 30% (195 筆數據) 則作為可拓類神經網路診斷用；首先利用 70% 之數據庫進行 5.3.3 章節之學習法則，其步驟為調整可拓類神經網路之權重值大小與權重值中心，並找出可拓類神經網路之最佳權重值矩陣，則可拓類神經網路建立權重值模型之參數值為以下幾值所表示，其可拓類神經網路之學習率 0.15、學習次數

1000 與學習誤差 0.01，而訓練完成之權重值上下限與中心值可由表 6.8 與表 6.9 所示；可拓類神經網路學習率之值若愈大則其學習次數愈多，而本論文選用 0.15 之值作為可拓類神經網路學習率，其學習效果為最佳。藉由可拓類神經之學習步驟得知，若當以達到所要之學習誤差率時，則停止學習步驟，其此次學習次數 20 次，而學習誤差收斂曲線圖如圖 6.18 所示。

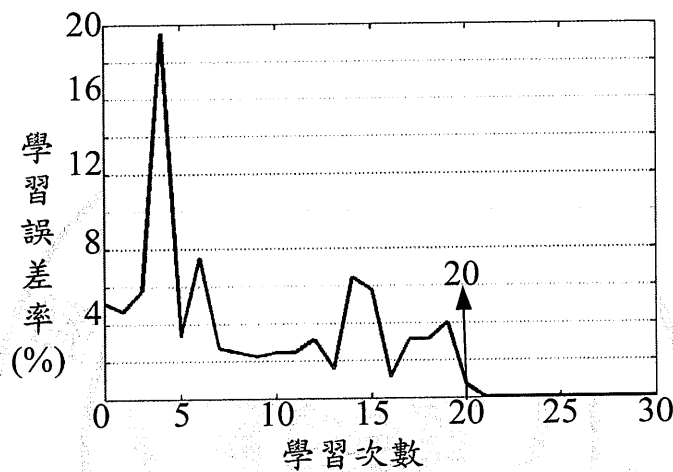


圖 6.15 可拓類神經學習誤差收斂曲線

則將此學習完之權重中心各值固定，則利用所學習完之可拓類神經網路驗證表 6.3 現行狀態之 14 筆數據，其所得各個數據之可拓距離 (ED) 值，如表 6.10 所示為可拓類神經診斷現行狀態之 14 筆數據的結果表；且再利用數據庫中之 30% 數據作為診斷樣本，找出此診斷樣本之診斷率，則由 6.3.3 章節說明。

表 6.8 可拓類神經網路權重上下限與中心值

類別		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	
訓練 權重 值	特徵 C ₁	上限	1.44639	-0.2218	-0.96818	-10.9565	13.4261	0.39325	1.48941
		中心	-2.18161	-0.6443	-2.35418	-31.835	-7.91785	-0.06175	0.817907
		下限	-5.80961	-1.0668	-3.74018	13.4261	-29.2619	-0.51675	0.146407
	特徵 C ₂	上限	0.585393	-0.03929	-0.17622	13.7948	16.5694	0.1724	0.240381
		中心	-0.12011	-0.13979	-0.45722	6.85128	6.93188	0.0364	0.119881
		下限	-0.82561	-0.24029	-0.73822	-0.09222	-2.70562	-0.0996	-0.00062

表 6.9 可拓類神經網路權重上下限與中心值

類別		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	
訓練 權 重 值	特徵 C ₃	上限	-18.4764	0.953455	-2.96185	-1.82382	140.919	-0.177	3.53962
		中心	-47.6964	-0.12655	-4.82185	-2.68382	95.8186	-1.397	1.99962
		下限	-76.9164	-1.20655	-6.68185	-3.54382	50.7186	-2.617	0.459617
	特徵 C ₄	上限	42.3398	-2.00577	-3.82497	2.21843	20.843	1.283	3.0669
		中心	17.3798	-4.04577	-9.62497	-19.1416	-14.977	-0.337	1.7869
		下限	-7.5802	-3.82497	-15.425	-40.5016	-50.797	-1.957	0.506896
	特徵 C ₅	上限	42.3398	0.03423	-3.82497	-1.52726	-1.6881	1.753	2.8877
		中心	17.3798	-2.00577	-9.62497	-22.3873	-26.4881	0.733	1.6077
		下限	-7.5802	-4.04577	-15.425	-43.2473	-51.2881	-0.287	0.327702
	特徵 C ₆	上限	8.49607	2.85212	1.81553	55.4477	62.1409	2.505	0.524978
		中心	-1.28393	-3.10788	-1.28447	0.127748	-5.79909	1.005	0.344978
		下限	-11.0639	-9.06788	-4.38447	-55.1923	-73.7391	-0.495	0.164978
	特徵 C ₇	上限	11.2267	-0.00801	0.290701	53.9325	-48.6628	1.645	1.56428
		中心	6.96671	-0.52801	-2.5093	13.7325	-76.9828	0.545	0.779282
		下限	2.70671	-1.04801	-5.3093	-26.4675	-105.303	-0.555	-0.00572
	特徵 C ₈	上限	2.83464	0.859668	0.601267	6.13228	8.60724	0.936	1.41852
		中心	0.114639	0.099668	-1.21873	-17.1877	-18.0928	0.296	0.713525
		下限	-2.60536	-0.66033	-3.03873	-40.5077	-44.7928	-0.344	0.008525
	特徵 C ₉	上限	9.39506	0.174527	-1.02477	0.110852	-17.0783	0.899	0.01
		中心	2.87506	-0.48547	-2.72477	-0.60915	-40.5383	0.239	0
		下限	-3.64494	-1.14547	-4.42477	-1.32915	-63.9983	-0.421	-0.01
	特徵 C ₁₀	上限	-0.59028	0.470146	3.60459	37.8584	29.765	1.602	5.14886
		中心	-9.23028	-0.42985	-6.83541	20.0384	13.925	-0.198	3.70386
		下限	-17.8703	-1.32985	-17.2754	2.21842	-1.91499	-1.998	2.25886
	特徵 C ₁₁	上限	-0.59028	32.4156	31.6055	31.653	30.8164	12.7764	24.5972
		中心	-9.23028	32.1181	29.8205	30.6755	28.5639	11.7339	11.4597
		下限	-17.8703	31.8206	28.0355	29.698	26.3114	10.6914	-1.67781
	特徵 C ₁₂	上限	0.641511	0.594729	0.5801	0.559263	0.6004	0.55	0.590536
		中心	0.498011	0.592729	0.5746	0.546763	0.5779	0.5	0.303036
		下限	0.354511	0.590729	0.5691	0.534263	0.5554	0.45	0.015537
	特徵 C ₁₃	上限	0.507394	0.594729	0.470638	0.528539	0.543806	0.461	0.460832
		中心	0.477894	0.592729	0.452138	0.486539	0.482306	0.458	0.219832
		下限	0.448394	0.590729	0.433638	0.444539	0.420806	0.455	-0.02117

表 6.10 可拓類神經診斷現行狀態之 14 筆數據的結果

筆數	ED(F ₁)	ED(F ₂)	ED(F ₃)	ED(F ₄)	ED(F ₅)	ED(F ₆)	ED(F ₇)	類別
61	1	4.670168	2.899706	2.882963	1.258132	5.742928	100.0161	F ₁
62	1	1.629154	1.839614	1.355755	1.087588	4.982648	11.19994	F ₁
63	1.080237	1	1.82257	1.49652	1.293491	4.731761	8.529409	F ₂
64	1.32023	1	2.211598	1.907618	1.659645	5.286441	7.206677	F ₂
83	1.305006	7.868869	1	1.62197	1.021124	7.864008	47.74572	F ₃
84	1.35505	8.352362	1	1.700817	1.189479	8.274617	52.10062	F ₃
106	1.108673	4.443219	1.416368	1	1.273393	4.136465	4.812702	F ₄
138	1.137771	4.842426	1.070591	1	1.257637	5.328681	21.74416	F ₄
169	5.122636	31.12036	11.00491	5.469572	1	31.12702	238.6214	F ₅
170	5.137453	31.28979	11.07476	5.489108	1	31.37872	239.786	F ₅
24	1.646731	13.38474	3.968395	3.674047	2.43155	1	3.138631	F ₆
25	1.675834	13.67258	4.036329	3.75088	2.477229	1	3.189458	F ₆
125	2.267679	26.39854	9.556047	5.821167	3.443306	10.68175	1	F ₇
126	2.453781	28.60903	10.37764	6.2943	3.722655	11.6547	1	F ₇

6.3.3 所提診斷方法與其它方法之比較

經由本論文中之 70%(455 筆)之數據資料進行可拓類神經網路之學習步驟，而 30%(195 筆)進行測試用，以找出所提診斷方法中之各特徵最佳權重值範圍，並且與其它方法作比較其診斷準確率，其中本論文利用 k-means 分類器與所提之可拓診斷方法相較之診斷率，且因兩者都無須經學習步驟，就可直接進行待測樣本之診斷，但 k-means 分類器之診斷準確率結果較低，所以不被本論文採用；如表 6.11 所示。而使用多層類神經網路進行此數據庫診斷時，可由表 6.12 觀察可出神經元愈多則其診斷效果愈佳，但也不可以過多之神經元數目或過少之神經元數目，因若神經元過多數目，則其學習時間會增加並且診斷率不佳；反之若過少神經元的情況下，則其學習時間不足且診斷率不佳。所提之可拓類神經網路診斷方法與多層類神經網路之相較下，係主要改善類多層神經網路之缺點以及增加診斷率之效果，而所提之可拓類神經網路診斷方法辨之識率較高，則所提之診斷方法最大之優點是無須學習，且運算時間短。表 6.13 所示為各方法之預測準確率表，且藉

由表中可得知所提預測方法之準確率比其它方法佳，則此質子交換膜燃料電池發電系統若使用它法，將可能導致系統永久損壞率較高。

表 6.11 各方法之診斷準確率

名稱	學習次數	30%測試資料準確率
所提之可拓診斷法	N/A	92%
K-means	N/A	60%

表 6.12 各方法之診斷準確率

名稱	學習次數	學習診斷準確率	測試診斷準確率
所提之可拓類神經網路診斷法	20	99%	97%
多層類神經網路 (13-18-7)	1000	85%	84%
多層類神經網路 (13-16-7)	1000	86%	88%
多層類神經網路 (13-14-7)	1000	84%	73%
多層類神經網路 (13-12-7)	1000	81%	73%

表 6.13 各方法之預測準確率

名稱	預測下一週期準確率	預測下兩週期準確率
所提之可拓診斷法	91%	82%
K-means	65%	42%
所提之可拓類神經網路診斷法	93%	86%
多層類神經網路 (13-18-7)	75%	70%
多層類神經網路 (13-16-7)	77%	71%
多層類神經網路 (13-14-7)	75%	69%
多層類神經網路 (13-12-7)	74%	67%

同時驗證所提方法之容錯能力，係將診斷數據隨機加入 $\pm 5\%$ 至 $\pm 20\%$ 之誤差範圍值，以比較容錯能力；其結果如表 6.13 所示。從表 6.13 可觀察出，若當診斷數據誤差範圍高達 $\pm 15\%$ 時，本論文所提之兩種診斷方法仍有 70%以上之準確率；由此可得知，若偵測數據因人為因素造成數據失真之情況時，所提之兩種診斷方法仍可提供可用之訊息給使用者，所以深具實用之價值。

表 6.14 誤差容錯能力測試結果

誤差加入比例	所提可拓診斷法之準確率	所提可拓類神經網路診斷法之準確率
$\pm 0\%$	92%	99%
$\pm 5\%$	88%	92.4%
$\pm 10\%$	83.5%	88%
$\pm 15\%$	70%	86.4%
$\pm 20\%$	65.7%	85.3%

6.4 本章小結

本章節首先將第四章節所預測值與第三章節所擷取到之實際值，進行預測誤差之比較，藉由此比較之結果可發現第一週期誤差值較第二週期誤差值小，而其預測辨識結果為第一週期較為準確。則其診斷方法係採用 1983 年蔡文學者所發展之可拓理論與跟類神經網路結合成之可拓類神經診斷方法，其可拓診斷法係首先利用第三章節所擷取出 350 筆數據，將此數據分成 7 大類別，而每個類別共有 50 筆數據，決定可拓經典域與節域範圍；可拓類神經診斷法係採用 650 筆數據中之 455 筆數據進行學習後，所得到之可拓類神經網路之權重上下限與中心值之範圍。最後將所提之兩種方法與其它傳統之辨識法進行比較準確率，其比較之結果可發現本論文所提之方法都優於其它方法；若使用其它方法診斷其質子交換膜燃料電池發電系統，將導致誤判情形發生的機率增加，使得影響系統使用壽命之長短。

第七章 結論與未來展望

7.1 結論

本論文係主要針對目前各國正在積極開發當中之再生能源-燃料電池發電系統的檢測技術與預測系統故障點的研究，而在質子交換膜燃料電池發電系統運轉的過程中會出現 7 種不同的運轉狀況下，利用燃料電池電壓、燃料電池電流、燃料電池區間電壓與燃料電池電池堆溫度等 10 個移動平均值和燃料電池供氫壓力、氫氣瓶溫度與 $\alpha_{(VT)}$ 值(電壓與電堆溫度關係值)等 3 個特徵值，總共有 13 個特徵值；預測故障點係利用所提之灰色理論預測下一週期與下兩週期之 13 個特徵值後，透過可拓診斷方法與可拓類神經網路診斷方法，進行診斷辨識發電系統之現行故障點狀況與預測故障點狀況，經過本論文之研究後提出下幾點結論：

1. 本論文所建立之質子交換膜燃料電池發電故障預測系統，其系統結構係採用多個 Modbus 模組與一些在市面上容易購得之感測器所組裝完成，其施工容易，且整體架構簡單。
2. 所謂預防勝於治療，係說明只要事前先作好預防措施，會比日後發生故障問題時，需要維修來的事半功倍；本論文提出以灰色理論預測下一週期與下兩週期之特徵數據值進行故障診斷，在系統出現故障前預測故障，能提早停止系統運轉使損害降至最低。
3. 本論文中之可拓診斷方法係使用經驗法則訂定可拓經典域與節域之範圍，為了改善此人為所造成之誤差與物元經典域上下限編寫所消耗之時間，進而利用類神經網路與可拓理論互相結合成所提之可拓類神經網路故障診斷法進行系統診斷辨識，而在物元模型之空間域中，搜尋診斷辨識效果最佳之可拓物元，經由模擬結果證實可拓類神經網路之使用便利性與診斷準確度皆有明顯的提高，此方法之優點為降低學習時間且診斷效果佳；經由測試之結果，本方法不只能夠診斷出主要之故障點，而且還可藉由可拓距離 (ED) 值判斷是否有其它種類之故障點。

4. 將質子交換膜燃料電池發電系統一些常見之故障問題種類之特徵參數整理後，再使用 K-means 分群法、多層神經網路辨識法、傳統可拓診斷方法與可拓類神經網路診斷法進行診斷準確度之探討與比較，經由實驗結果比較得知本論文所提之診斷方法學習準確率皆有 94% 以上，其預測之診斷準確率也有 93% 以上，而在預測下兩週期之準確率較為差，但與其它方法比較下，本論文之預測準確率也優於其它方法，且系統若使用它法，可能導致系統永久損壞率較高。

7.2 未來展望

- (1) 本論文將所提之系統與 Zigbee 無線傳輸系統網路架構相互配合，所完成一套無線監測質子交換膜燃料電池發電系統，若使此系統能達到遠距離監測，未來可將此系統擴充成具智慧型燃料電池電動車之狀態警示器。
- (2) 本論文中所提之診斷特徵已經證實的確具有診斷辨識之能力與效果，但本系統所採用之類比/數位轉換器(ADC)模組為 MODICON 公司所開 Modbus 模組，其成本較高體積也較大等缺失，若未來能使用可程式系統晶片代替此模組與運用此可程式系統晶片寫此質子交換膜燃料電池預測故障系統之程式，並可將成本降低與減小硬體電路之體積等優點。
- (3) 本論文所提之可拓類神經網路故障診斷法，日後希望可與家庭式燃料電池發電或是小型燃料電池發電進行實際測試所用，以驗證本論文所提方法之可靠性。

參考文獻

- [1] International Institute for Environment and Development: *COP15 for journalists: a guide to the UN climate change summit*, 2009.
- [2] Presentation – The Physical Science Basis of Climate Change: *Latest Findings to be Assessed by WGI in AR5*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2009.
- [3] 毛宗強，氫能-21世紀的綠色能源，出版，新文京開發股份有限公司，2008。
- [4] 曾信元，質子交換膜燃料電池非線性動態模型分析及控制，國立勤益科技大學，碩士論文，2010。
- [5] 楊承鐸，質子交換膜燃料電池之陰極觸媒加速老化研究，華梵大學，碩士論文，2009。
- [6] 林佳德，質子交換膜燃料電池性能檢測與倒傳遞神經網路應用之研究，建國科技大學，碩士論文，2006。
- [7] Luis Alberto M. Riascos, Marcelo G. Simoes, and Paulo E. Miyagi, “A Bayesian network fault diagnostic system for protonexchange membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, Vol.165, pp.267-278, 2007.
- [8] Luis Alberto M. Riascos, Marcelo G. Simoes, and Paulo E. Miyagi, “On-line fault diagnostic system for proton exchangemembrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, Vol.175, pp.419-429, 2008.
- [9] Timo Kurz, and Alex Hakenjos, J’erôme Krämer, Mario Zedda, Carsten Agert, “An impedance-based predictive control strategy for the state-of-health of PEM fuel cell stacks”, *Journal of Power Sources*, Vol.180, pp.742-747, 2008.
- [10] N. Yousfi Steiner, D. Hissel, Ph. Moc,ote’guy, and D. Candusso, “Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes(flooding & drying out) by neural networks modeling”, *Internationaljournal*

of hydrogenenergy, Vol.36, pp.3067-3076, 2011.

- [11] 蔡文，楊春燕，林偉初，可拓工程方法，全華科技圖書股份有限公司，2001。
- [12] M. H. Wang, “Extension Neural Network for Power Transformer Incipient Fault Diagnosis”, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol.150, pp.679-685, 2003.
- [13] 張偉哲，溫坤禮，張庭政，灰關聯模型方法與應用，高立圖書股份有限公司，2000。
- [14] 衣寶廉，陳憲偉，科技大浪潮-燃料電池，五南圖書出版公司，2003年4月。
- [15] 李威霆，質子交換膜燃料電池應用漁船舶輔助電力的探討，國立成功大學，碩士論文，2006。
- [16] 楊昇晃，微型燃料電池設計、製作與電化學阻抗量測分析，國立中山大學，碩士論文，2004。
- [17] Ryan O’Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, and Fritz B.Prinz, “Fuel Cell Fundamentals”, *John Wiley & Sons, Inc*, 2006.
- [18] 蔡武田，質子交換膜燃料電池之非線性電路分析與控制，國立中興大學，碩士論文，2004。
- [19] A. Rowe and X. Li , “Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, *Journal of Power Sources*, Vol.102, pp.82-96, 2001.
- [20] A. Sripakagorna, and N. Limwuthigrajirarb, “Experimental assessment of fuel cell/supercapacitor hybridsystem for scooters”, *Internationaljournalof hydrogen energy*, Vol.34, pp.6036-6044, 2009.
- [21] 黃鎮江，燃料電池，全華科技圖書股份有限公司，2005。
- [22] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha, and M. G. Simões, “An Electrochemical based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.51, No.5, Oct. 2004.

- [23] N. Yousfi-Steiner, Ph. Mocote'guya, D.Candussoc, D.Hissel, A. Hernandez, and A. Aslanides, "A review on PEM voltage degradation associated with water management:Impacts, influent factors and characterization", *Journal of Power Sources*, Vol.183, pp.260-274, 2008.
- [24] J. C. Amphlett, R. F. Mann, B.A. Pepley, P. R. Roberge, and A. Rodrigues, "A Model Predicting Transient Response of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 61, pp.183-188, 1996.
- [25] D. J. Lee, and L. Wang, "Dynamic and Steady-State Performance of PEM Fuel Cells under Various Loading Conditions", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp.1-8, 2007.
- [26] Sheng-Ju Wu, Sheau-Wen Shiah, and Wei-Lung Yu, "Parametric analysis of proton exchange membrane fuel cell performance by using the Taguchi method and a neural network", *Renewable Energy*, Vol.34, pp.135-144, 2009.
- [27] Suk Won Cha, Ryan O'Hayre, Yong-Il Park, and F.B. Prinz, "Electrochemical impedance investigation of flooding in micro-flowchannels for proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol.161, pp.138-142, 2006.
- [28] S.M. Sharifi Asl, S. Rowshanzamir, and M.H. Eikani, "Modelling and simulation of the steady-state and dynamic behavior of a PEM fuel cell", *Energy*, Vol.35, pp1633-1646, 2010.
- [29] Colleen Spiegel, "PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB", *Copyright Elsevier Inc. All rights reserved*, 2008.
- [30] Felix A. Farret, Luciane N. Canha, Marcelo G. Simões, and Senior Member, "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.51, No.5, pp1103-1112, 2004.

- [31] Modicon PLC with MODbus Multi-Gateway Manual, 三維資訊有限公司, 2002。
- [32] 廖文輝, 圖形監控實務, 全華科技圖書股份有限公司, 2009。
- [33] 陳正義, 方昭欽, 陳致弘, 圖形監控系統設計實務, 全華科技圖書股份有限公司, 2009。
- [34] 瞿雷、劉盛德、胡咸斌, 無線網路結構和原理基礎, 僑高股份有限公司, 2008。
- [35] J. S. Lee, Y. W. Su, and C. C. Shen, “A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, No.5-8, pp.46-51, 2007.
- [36] 吳俊忠, 無限感測網路室內區域定位及監控系統之實作, 逢甲大學, 碩士論文, 2007。
- [37] I-7017, I-7018, I-7019, M-7017, M-7018 and M-7019 Series User's Manual, *Copyright 1999 -2004 ICP DAS*. All rights reserved.
- [38] Jean-Marc Le Canut¹, Ruth Latham, Walter Merida, and David A.Harrington, “Impedance study of membrane dehydration andcompression in proton exchangemembrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, Vol.192, pp.457-466, 2009.
- [39] A. Isopo, and V. Rossi Albertini, “An original laboratory X-ray diffraction method for in situ investigations on thewater dynamics in a fuel cell proton exchange membrane,”*Journal of Power Sources*, Vol.184, pp.23-28, 2008.
- [40] Masashi Kishimoto, Hiroshi Iwai, Motohiro Saito, and Hideo Yoshida, “Quantitative evaluation of solid oxide fuel cell porous anode microstructurebased on focused ion beam and scanning electron microscope technique andprediction of anode overpotentials”, *Journal of Power Sources*, Vol.196, pp.4555-4563, 2011.

- [41] Deng Julong, "Control Problems of Grey System", *Systems and Control Letters* 5, pp285-294, 1982.
- [42] Deng Julong, "Introduction to Grey System, Theory", *The Journal of Grey system 1*, pp1-24, 1989.
- [43] 吳國榮，灰色預測 GM(1,1)之模型改善與應用，國防大學，碩士論文，2008。
- [44] 溫坤禮，趙忠賢，張宏志，陳曉瑩，溫惠筑，灰色理論與應用，五南圖書股份有限公司，2009。
- [45] 黃勝正，灰色預測中辨識係數對鉛酸電池放電系統影響之研究，國立彰化師範大學，碩士論文，2006。
- [46] Wen Cai, "Extension Set and Incompatible Problems," *Science Exploration*, Vol.3, No.1, pp. 83-97, 1983.
- [47] B. Kerezsi, "Vibration Fault Detection of Large Turbine Generators Using Neural Networks" , *IEEE International Conference on Neural Networks*, University of Western Australia, Perth, Western Australia, Vol.1, pp.121-126, 1995.
- [48] 汪惠健，類神經網路設計，湯姆生股份有限公司，2007。
- [49] 王文俊，認識 Fuzzy，全華科技圖書股份有限公司，2001。
- [50] Mamun Bin Ibne Reaz, Florence Choong, Mohd Shahiman Sulaiman, Faisal Mohd-Yasin, Member, IEEE, and Masaru Kamada, "Expert System for Power Quality Disturbance Classifier", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.22, No.3, pp.1979-1989, 2007.
- [51] Julio César Tovar, and Wen Yu, "Fuzzy Neural Modeling via Clustering and Support Vector Machines", *IEEE 22nd International Symposium on Intelligent Control*, University of Singapore, Singapore, pp.24-29, 2007.
- [52] 何志勇，可拓理論於電力系統負載預測與局部放電圖譜辨識之應用，國立勤益技術學院，碩士論文，2004。
- [53] 陳經緯，鉛酸電池之智慧型充電狀態與壽命狀態估測器研製，國立勤益科技大學，碩士論文，2009。

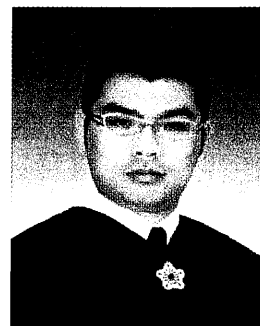
- [54] 鍾裕國，應用熱影像和可拓方法於手部辨識，國立勤益科技大學，碩士論文，2010。
- [55] 王洪偉，策略生成的物元模型，系統工程理論與實踐，11 期，頁 55-124，1999。
- [56] 楊春燕、何斌，可拓方法在新產品構思中的應用，系統工程理論與實踐，4 期，頁 120-124，1999。
- [57] M. H. Wang, "Extension Neural Network for Power Transformer Incipient Fault Diagnosis", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol.150, pp.679-685, 2003.
- [58] M. H. Wang, "Application of Extension Theory to Vibration Fault Diagnosis of Generator Sets", *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, Vol.151, No.4, pp.503-508, 2004.
- [59] M. H. Wang and C. P. Hung, "Extension Neural Network and its Applications," *Neural Networks*, Vol.16, pp.779-784, 2003.
- [60] 莊婉君，類神經網路於病患常規血液檢查項目中危險因子之研究，國立東華大學，碩士論文，2010。

作者簡介

姓名：蔡函學(Han-Hsueh Tsai)

出生日期：民國七十五年九月三日

籍貫：台灣新北市



學歷：

- ❖ 國立勤益科技大學 電機工程系研究所 (98.9~ 100.7)
- ❖ 國立勤益科技大學 電機工程系 (94.9~ 98.6)

論文著作：

- [1] M. H. Wang, K. H. Chao, G. J. Huang, and H. H. Tsai, “Application of Extension Theory to Fault Diagnosis of Automotive Engine” , *ICIC Express Letters*, Vol. 5, No. 4(B), pp.1293-1299, April. 2011(EI, INSPEC).
- [2] M. H. Wang, H. H. Tsai, K. H. Chao, and K.H. Huang, “A Fault Forecasting System for PEM Fuel Cell” , *Proceedings of the Sixth Intelligent Living Technology Conference*, pp.1378-1383, 2011.
- [3] 趙貴祥、陳經緯、蔡函學等(2009)，“以可程式系統晶片實現之蓄電池內阻測試系統” 第二十九屆電力工程研討會，pp.808-812。
- [4] 王孟輝、鍾裕國、蔡函學(2011)，“應用熱影像和可拓方法於手部辨識”，第十五屆人工智慧與應用研討會論文集。
- [5] 王孟輝、蔡函學(2011)，“質子交換膜燃料電池故障診斷系統之研究”，第六屆綠色科技工程與應用研討會，pp.147-152。

申請專利：

- [1] 王孟輝、蔡函學，“燃料電池故障預測系統及其建立方法”，中華民國經濟部智慧財產局發明專利，申請案號第 99118209 號，申請日 2010 年 06 月 04 日。
- [2] 王孟輝、蔡函學、蘇于庭等，“體適能評估分析器、分析方法及其腳踏健身裝置”，中華民國經濟部智慧財產局發明專利，申請案號第 100104949 號，申請日 2011 年 02 月 15 日。

參加之研習：

[1] 綠色科技工程與應用學程燃料電池實務研習

主辦單位：國立勤益科技大學-工程學院上課時數：8 小時

參與計畫：

[1] 行政院國家科學委員會補助大專學生參與研究計畫，計畫名稱：
可攜式鉛酸電池充電狀態估測器之研製，時間為 97 年 7 月 1 日至
98 年 2 月底止。

[2] 國科會研究計畫，計畫名稱：多元綠色電力故障診斷系統之研製，
時間為 99 年 7 月至 100 年 7 月止。

榮獲獎項：

[1] 2009 年國立勤益科技大學電機工程系-大學實務專題競賽-電力組-
第二名。

[2] 2010 年全國技職院校師生創業競賽-中區競賽科技組-第一名。

[3] 2010 年全國技職院校師生創業競賽-全國競賽科技組-入圍獎。

[4] 2011 年全國燃料電池創意應用競賽-第三名。

[5] 2011 年第六屆智慧生活科技研討會(The 6th Intelligent Living
Technology Conference, ILT 2011)評選，榮獲電能與節能技術開發
與應用-佳作。