

雙入口供氣法之質子交換膜燃料電池性能研究

江木勝¹、張英彬²、鄭博仁³、許志瑋⁴

¹南開科技大學 機械工程系

²南開科技大學 電機工程系

³南開科技大學 電子工程研究所 (研究生)

⁴健生實業股份有限公司

通訊作者：張英彬

聯絡地址：南投縣草屯鎮中正路 568 號

電子郵件：cyp@twu.edu.tw

投稿日期：2013 年 2 月

接受日期：2013 年 5 月

摘 要

燃料電池反應過程中，隨著電池內部的反應速率提升，濃度極化現象會愈加明顯，且此一現象會逐漸往上游蔓延，產生不均勻現象將會造成電池性能下降。本研究透過所設計的雙入口型單一蛇型流道，除了原有傳統流道入口之外，另擇以多處不同分流供氣位置注入氧氣，探討蛇型流道加入分流後的電流密度變化及性能表現。實驗分別改變不同操作溫度及分流量變化，探討質子交換膜燃料電池的極化曲線變化。結果顯示在低操作溫度時因反應速率較緩慢，對於反應物濃度之需求不大，使用此種供氣法的效果不明顯，當電池溫度提高致使反應速率加快時，第二入口點位置與分流量的正面效果逐漸顯現，此時在流道前端附近適量提供分流氣體，可以改善反應之均勻程度，於低電壓下之性能隨之提升。本研究並藉由田口實驗方法，建立具分流流道質子交換膜燃料電池性能影響之主要操作參數預測模型，經由訊號雜訊比的分析獲得最佳操作參數組合水準設定，進而提高燃料電池輸出功率。

關鍵詞：質子交換膜燃料電池、分流流道、田口方法、變異數分析

壹、緒論

隨著現代科技的快速變遷，人們對於能源的需求日益增加，但消耗性能源的儲量正在急速下降。以當前人類使用能源來源包括煤礦、天然氣與石油等，而其中代表性能源—石油，正是最佳舉例。根據 Shafiee and Topal (2009) 的預測，世界石油蘊藏量大該只剩 50 年不到，而世界的能源消耗速度每年逐漸加快，加上石化燃料帶來的環境生態問題，舉凡酸雨、溫室效應等，對於這些警訊及能源危機，迫使人們開

始尋求新的替代能源。倡導替代能源觀念逐漸傳播全世界，如今常見的替代能源，包含太陽能、風力、水力、潮汐、地熱及氫能等。燃料電池是氫能應用的技術之一，自十九世紀工業革命以來，不斷的研究發展及改進，已被視為未來最具市場潛力的綠色能源技術。

Kon, Khambadkone, and Thum (2005) 指出質子交換膜燃料電池因具有高效率、設計簡單、低噪音及環保等優點，被視為未來可能取代現有的發電設備的可能方式之一，但質子交換膜燃料電池尚有二大瓶頸必須去突破，分別為降低電池

材料成本及提升電池性能。

近來許多新的電池材料伴隨著新科技的應用而發展成功，但其成本相對昂貴，使商業化的腳步也受到阻礙，所以許多研究人員多半從提升電池性能的方面去著手研究，如水熱管理、操作參數、流道及進出口設計等。水是燃料電池內部運作的一環，內部高分子膜需透過水來傳導質子介質，因此輸入電池之燃料氣體及氧化氣體需加濕。水熱管理對於提高燃料電池性能占有重要之地位，燃料電池運作中會產生水及廢熱，過多的水含量會造成電池性能降低，形成水氾濫。

對於改善分流流道對質子交換膜燃料電池性能影響操作參數的掌握，有必要進行實驗的驗證，為了使實驗有效率及系統化，經由田口實驗計畫法 (Taguchi method) 中的直交表的實驗規畫及變異數的分析，將可大幅減少實驗的次數，並可充分的掌握分流流道對質子交換膜燃料電池性能重要影響參數的作用，經由田口方法及變異數 S/N 比的分析，建立對分流流道對質子交換膜燃料電池性能影響最佳化之參數預測模型。

燃料電池由於反應氣體抵達流道尾端濃度會明顯下降，加上高電流密度時受到濃度極化的影響，造成電池性能下降，此時若能透過分流注入氧化氣體的方式使局部氣體濃度提高，增加其內部反應時間，進而提高燃料電池效率及增加電流密度。本研究中，採實驗量測方法，來探討多孔型單進單出蛇型流道，對質子交換膜燃料電池之性能影響。在實驗量測部分，透過設定各種操作參數及分流注入位置等操作條件，所測得之 I-V 電池極化曲線，輔以文獻回顧之局部電流量測，將有助於了解多孔型單進單出蛇道對燃料電池性能及局部電流影響，找出最佳的操作條件，以提升質子交換膜燃料電池的性能及效率。

本文綜覽國內外相關文獻，燃料電池為一種直接轉換化學能為電能的裝置，縱使此技術原理簡易，惟電池內部任何微小變化都可能影響整體性能。有鑑於此，近年來國內外學者對於燃料電池的局部電流量測則更為重視，因此採用各種不同的量測方法觀察燃料電池內部行為變化。傳統燃料電池的研究，均透過整體性效能量測來探討燃料電池對於溫度、壓力等參數變化之反應，其電流均以外部量測取得數據，到最近幾年開始從燃料電池局部電流密度量測，並實際觀察燃料電池內部情況，來獲取傳統測試方法無法檢測微量的水成分變動或其他因素造成對燃料電池的影響。

Nishikawa et al. (2006) 使用區域測量法，來探討質子交換膜燃料電池內部電流分佈及濕度的變化行為，其研究指出質子交換膜燃料電池會受到燃料電池內部相對濕度及反應氣體之影響，造成電壓下降。

梅聖鑫 (2009) 所採用的區域式電流測量方法搭配可靠

度分析探討局部電流密度，結果指出，低負載的電流密度較為均勻，但電池流道下游反應較為微弱，而高負載時，局部電流密度分佈差異較大，電流集中在流道上游。

Liu, Mao, Wu, Wang, and Schmidt (2005) 透過區域式電流密度測量法，將電池分成 12 個區塊，探討水在電池內部的行為模式，研究結果發現水的分佈對於電池性能有相當的影響，因為在某些情況下，在入口處容易乾燥，或者出口處易積水，這兩個情形皆會顯著的影響到燃料電池的性能。同時其結果發現電流集中在流道上游，而在流道末端下游出口位置處之電化學反應較小。

Hwang, Chang, Peng, Chen, and Su (2007) 透過區域式局部電流測量探討水在兩種流道系統中的變化行為與其對局部性能的影響，結果顯示當經過加濕系統的飽和氣體 (約 70°C) 剛進入到室溫電池內部的時候，水蒸氣會因為飽和及溫差而凝結，進而影響到電化學反應，其中當流過平行流道時因壓力梯度在平行流道較小，帶走液態水量少而使電化學反應較差，而蛇型流道剛啟動時有均勻的電化學反應然後略為下降後馬上趨於穩定，這是因為單蛇型流道便於將多餘的水帶出，可以保持良好的水管理，但是在部分的蛇型流道轉彎處，因為液態水在轉彎處停留的時間較長，故電流分布較直流行流道之電池稍不均勻。結果同時發現工作電壓越高，電流分布越均勻，而蛇型流道在此研究中效能最佳，因為其具備優異的質傳能力與水管理，但蛇型流道在轉彎處依然會有少許積水現象，稍稍降低電化學反應。

Sun, Zhang, Guo, and Liu (2006) 利用蛇型流道設計測量局部電流的技術，基於氣體擴散層和流道板嵌入新式電流測量墊片來獲取燃料電池局部電流分佈。研究結果發現，氣體加濕對於電流分佈扮演著重要的角色，當氣體低加濕時電池性能較低，加濕氣體過量也是水氾濫的原因。反應氣體的流量對電池性能有很大的影響，電流密度分佈會沿著電池流道而遞減，且溫度跟操作壓力對電池性能來說也是一個重要關鍵，操作溫度過高電池性能隨之下降，而操作壓力跟燃料電池流道長度也對電池有相當的影響，較短的流道可以使得高壓發揮較佳效果。

陳龍正、洪敏發、李明三 (2007) 指出蛇型流場 (serpentine flow field) 之流道因長度較長使流速分布均勻，且因具有較高流速使排水性較佳，使陰極生成液態水易排除，惟下游反應氣體濃度往往過低，於低、中電流密度時，受到電化學反應的影響，產生極化現象，高電流密度時，則受到歐姆損失及濃度損失，而電池過於乾燥，將產生極大的歐姆損失，當氧氣傳輸過慢，亦會增加濃度損失，造成電池性能下降，易造成局部電流密度分布不均勻現象。

林育昇 (2008) 探討傳統蛇型流道設計，其構造為單進

單出流道入口，並經過數次轉折後抵達流道出口，其傳輸機制與直通型流道大體相同，以對流傳輸為主。因單進單出之出入口設計，導致流道末端的燃料傳輸速率略低，轉折提高燃料壓降，且相同流量下與直通型流道相比，其燃料入口傳輸速度較高，故流道前緣燃料易經擴散層傳輸至觸媒層，進而得到較佳的性能分佈。但單進單出蛇型流道的總流道長度為直通型的數倍，且流道內具許多轉折，導致燃料傳輸的阻抗極大，提高進出口壓降，再加上電化學反應消耗的燃料，因此流道末端濃度偏低，造成局部性能下降，使其局部電流密度分佈不均。

Geng, Mills, and Sun (2012) 認為人們對化石燃料的依賴性持續增加，因此發展質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 插電式混合電動車。提出質子交換膜燃料電池及鋰電池之混合動力系統和兩階段的控制器 (TSC)，最後控制目標是氫消耗量最小化，並能延長質子交換膜燃料電池的壽命。

綜觀上述學者之論點，得知質子交換膜燃料電池反應氣體的流動對電池性能有很大的影響，電流密度分佈會沿著電池流道而減少，且溫度跟操作壓力對電池性能來說也是一個重要關鍵。本文所研究範圍為了便於本文之研究與簡化問題之複雜度，本文擬定研究之範圍如下：

- 一、著重於實驗量測方法探討多孔型單進單出蛇型流道，對質子交換膜燃料電池之性能影響。
- 二、探討各種操作參數及分流注入位置等設計條件，所測得之 I-V 電池極化曲線。
- 三、使用田口方法、變異數分析及 F 檢定來分析操作參數對分流供氣對 PEMFC 性能影響之貢獻度。

貳、方法

本研究期望透過實驗方式，探討將質子交換膜燃料電池導入雙氣孔分流供氣方式，使兩股較高濃度氣體分散注入電池內部時，是否達到均勻電化學反應，改善燃料電池效率及增加電流密度的效果。

一、燃料電池基本原理

(一) 燃料電池種類與工作原理：

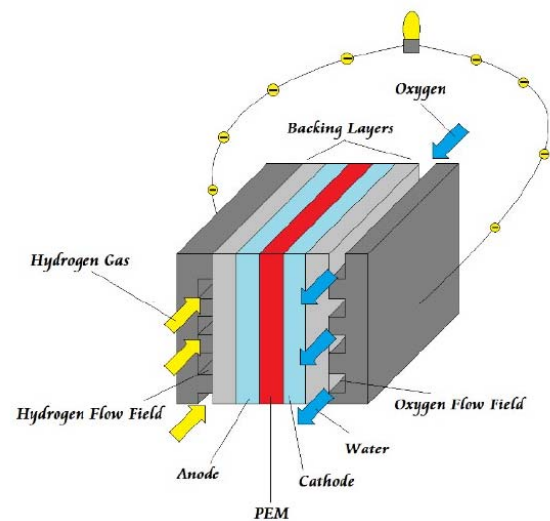
燃料電池為現代綠色能源技術的其中一項，燃料電池的工作原理類似電解水逆過程，水電解的過程中，透過電壓將水轉變成氫氣和氧氣。燃料電池則是利用氫氣和氧氣透過電化學反應產生電和水，為一種將化學能轉變成電能的機構。燃料電池依不同的燃料與電解質的區分，可分為下列六種：

1. 質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

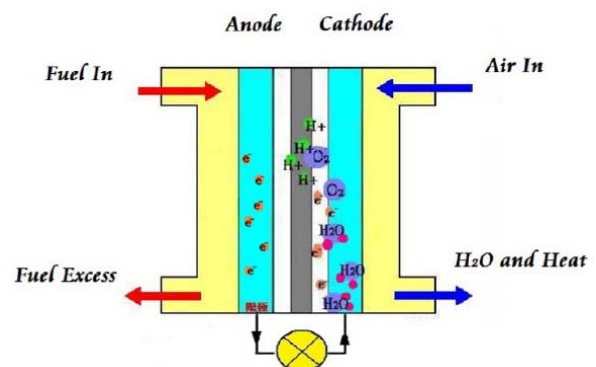
2. 直接甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)
3. 鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell, AFC)
4. 磷酸燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)
5. 固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)
6. 熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)。

本文就質子交換膜燃料電池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 作為討論的核心，以下簡稱 PEMFC。

質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 其操作溫度介於 80°C 至 100°C 之間，一顆質子交換膜燃料單電池，主要由陽極流道、陽極氣體擴散層、陽極觸媒層、質子交換膜、陰極觸媒層、陰極氣體擴散層及陰極流道所組成的，如圖一所示。主要以氫氣為燃料，以純氧或空氣為氧化劑，當氣體分別由兩端進入流道，經由氣體擴散層均勻分布擴散到觸媒層，經過觸媒的催化作用，分解成帶正電之氫離子與帶負電之電子，氫離子通過質子交換膜到達陰極，電子則由外接電路到達陰極形成電流，而氧氣分子也透過陰極流道及氣體擴散層與電子及氫離子起化學反應產生水，電池運作過程如圖二所示。



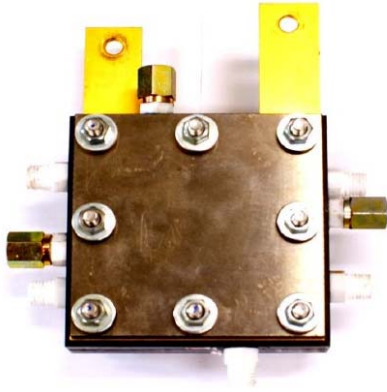
圖一 質子交換膜燃料電池結構示意圖



圖二 質子交換膜燃料電池之工作原理示意圖

(二) 質子交換膜燃料電池材料與構造：

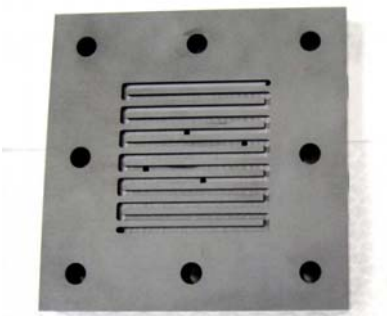
實驗中所使用的質子交換膜燃料電池為單電池，其結構分為七層，自陽極端觀測，依序為陽極氣體流道、陽極氣體擴散層、陽極觸媒層、質子交換膜、陰極觸媒層、陰極氣體擴散層與陰極氣體流道，而膜電極組包含了陽極氣體擴散層、陽極觸媒層、質子交換膜、陰極觸媒層與陰極氣體擴散層，再加上集電板、氣密墊片、極板和端板等，就成為實驗中所使用質子交換膜燃料電池，如圖三所示。



圖三 質子交換膜燃料電池單電池

二、研究方法與工具

進行質子交換膜燃料電池實驗時 除了燃料電池本身之結構之外，實驗還需提供電池溫度控制、氣體溫度控制、氣體流量、加濕控制之機台和資料擷取系統，以下依序介紹質子交換膜燃料電池實驗的軟硬體設施及實驗方法。實驗中所使用的極板為具氣孔的單一蛇型燃料電池流道板，在流道板上的流道中段另開設氣孔如圖四所示，讓流道不僅能由兩端的開口輸入反應氣體，也能從中段的氣孔輸入，以期改善流道內反應氣體與產物在不同位置的濃度差異，提升反應放電的效能，降低不均勻性。本研究分別依流道總長度 35%、45%、55% 及 65% 開孔建置反應氣體第二供氣位置，透過這些分流供氣位置，使電池內部能適當補充反應氣體及提高局部氣體濃度。以下介紹本文的研究方法及設備工具。



圖四 多孔型流道板

(一) 實驗設備

本研究所使用的實驗測試平台，如圖五所示，其包含溫度控制模組、增濕控制系統、氣體供應設備、電子負載系統、流量控制系統和資料擷取電腦等六大部分。研究所使用之機台為 BEAM 燃料電池測試平台，其測試最大功率為 600W、最大電流上限為 80A、最大電壓上限為 8V。陽極測試氣體為氫氣，陰極則有氧氣以及空氣兩種不同氣體，氮氣則作為清洗流道之用。此套實驗測試平台可適用於燃料單電池及燃料電池組，其主要功能為燃料氣體的供應(如氫氣、氧氣與空氣)、氣體增濕器及感測器(加濕氣體及溫度、壓力流量以及濕度的量測)、電池溫度控制模組以及電子負載系統等。除了本身之控制與量測功能外還具有與電腦連線及傳輸資料等功能，將測試數據透過連線傳輸並儲存於電腦，電腦所使用的擷取軟體為 FCTS 燃料電池測試軟體。



圖五 燃料電池實驗平台

(二) 電池與氣體溫度控制系統

本文研究所使用之電池為單電池，實驗中有一參數為電池溫度。本實驗利用加熱片將質子交換膜燃料電池加熱，讓電池溫度穩定維持在所設定參數範圍裡，加熱片不只有加熱、也有冷卻和時間控制。實驗中電池溫度參數設定在 50°C、65°C 與 80°C 三種溫度變化。

(三) 濕度控制系統

對於氣體加濕系統方面，本實驗採用水瓶氣泡加濕法來對燃料氣體進行加濕。水瓶氣泡法是將燃料氣體以小氣泡方式通過實驗平台內部的加濕瓶，燃料氣體經過加濕瓶後同時

也達到所需的濕度飽和狀態。在實驗中，為了控制燃料氣體進入燃料電池系統的含水量，因此須透過溫度控制器來調節加濕瓶內部水溫，達到所設定參數的入口氣體加濕溫度，以及此溫度下燃料氣體所含飽和蒸汽壓。當燃料氣體處於飽和狀態時，離開加濕瓶則溫度會開始下降，在任何加濕溫度下，其氣體都是飽和狀態，當溫度開始下降時，就會產生凝結水，所以加濕瓶也具有內部升溫裝置，此外在加濕瓶頂端與管線部分也附有加熱保溫裝置，避免因管線溫度下降而造成實際濕度與實驗設定值不同。

(四) 氣體供應設備

實驗中所使用之氫氣、氧氣、氮氣與空氣都是採用高壓氣瓶通過調壓閥調壓，將氣體控制在我們所設定的 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右，再經由機台內部閥門將氣體導入電池。此時必須注意，當電池陰極和陽極兩端壓力差過大時，則會造成膜產生破裂。所以經過調壓的氣體會通過燃料電池測試平台內部的流量控制器，經由管線進入加濕瓶達到加濕目標，最後再將加濕氣體經由管線導入燃料電池內部進行電化學反應。

(五) 電子負載系統

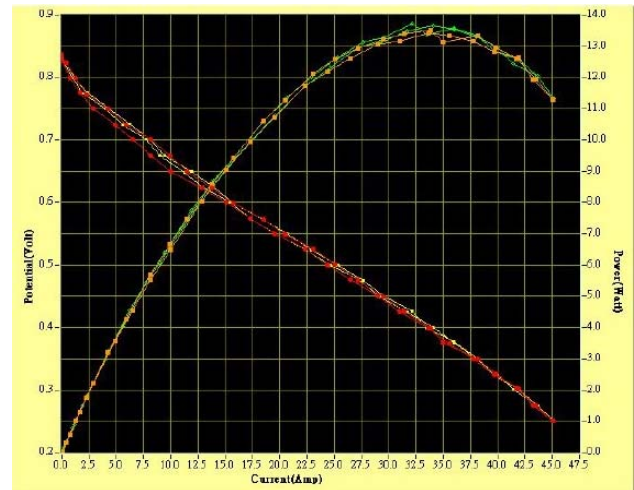
本文實驗所使用之電子負載系統建置於 BEAM 燃料電池測試平台中，其測試最大功率為 600W、最大電流上限為 80A、最大電壓上限為 8V。燃料電池測試平台之控制與操作整合於燃料電池資料擷取軟體 (FCTS)。FCTS 之工作環境須在 Window XP 下操作，測試質子交換膜燃料電池在不同參數不同負載下所測得之電池電壓、電流密度、以及電池功率。

(六) 流量控制系統

本論文實驗除了使用燃料電池測試平台流量控制器，另外還有使用 NEW-FLOW 浮子流量計，來控制氣體進口流量及分流，其最大流率為 300 CC/MIN。

(七) 資料擷取系統

系統使用 FCTS 燃料電池測試軟體，可以控制電流、電壓、功率與流量控制器，如圖六所示。其數據擷取功能有電流 vs.時間、電壓 vs.時間、功率 vs.時間、Tafel 曲線、長時間性能測試、即時數據顯示。



圖六 資料擷取畫面

(八) 田口方法

田口方法其理論始於 1949 年，創始者田口玄一博士，於日本電信實驗室 (Nippon Telegraph and Telephone Corporation, NTT) 研發通訊系統時所發展出，其構想是為了改善全因子實驗計畫法繁雜的實驗過程，以較少的實驗次數來獲取實驗參數。田口方法目前已是業界普遍採用的工具之一，其優點在於以低成本、高效率及數字化的指標幫助工程師得到最佳化的選擇依據，並減少實驗次數，其參考直交表實驗中所得之結論可幫助整個實驗架構中，建立容易分析的參數資料。

(九) 直交表

直交表或稱田口式直交表 (Taguchi's Orthogonal Arrays)，為田口玄一博士設計及部份前人研究成果所結合而成，田口法中使用直交表的用意在於利用較少次數的實驗交叉比對，就可以得到與全因子完整實驗之結果相去不遠的實驗數據。

(十) 品質計量 S/N 比

在通訊工程中，通訊品質定義為有意義的信號 (signal) 與無意義的背景雜訊 (noise) 之間的比值，稱為 S/N 比或 SNR (signal to noise ratio)。在田口方法中同樣使用 S/N 比做為品質標的，單位為分貝 (Decibel, dB)。S/N 比越大代表品質越高，每提高 3 個 dB，則品質損失減為原來的一半，在望目特性下 S/N 比每提高 6 個 dB，標準差降為原來的一半，本文望大特性其計算式如下列所示：

●望大特性

其品質特性就是越大越好 假設品質特性理想機能為 0 且永遠是正數。其 S/N 比定義如 (1) 式所示：

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

其中 n 為每次測試之樣本數, y_i 為樣本值。

在實驗設計方面, 選擇品質特性為最大電功率的燃料電池。為了提高燃料電池的工作性能, 根據控制因素來選擇因子, 包括燃料電池的工作溫度, 陽極加濕溫度, 陽極氣體流率, 陰極氣體流率, 分流位置及分流流率, 設定水準值如表一所示。

表一 設定水準值

Factor	Description	Level 1	Level 2	Level 3
A	Fuel Cell Temperature(°C)	50	65	80
B	Anode Temperature(°C)	55	70	85
C	Hydrogen Flow(SCCM)	200	250	300
D	Oxygen Flow(SCCM)	200	250	300
E	Split Flow(SCCM)	50	100	150
F	Split Point(%)	35	45	55

操作溫度對電池性能影響甚著, 燃料電池之電化學反應為放熱反應, 當電壓降低會使電池溫度慢慢提高。另一方面, 擴散係數增大, 離子導電度隨著溫度的升高而變大, 進而增加燃料電池的性能。但當溫度過高, 質子交換膜容易脫水乾燥, 阻礙質子傳送, 從而降低電池的性能。相關文獻顯示適當的燃料電池工作溫度範圍從室溫到約 80°C 。本研究溫度的操作因子水準設定 Level 1 至 Level 3 分別為 50°C 、 65°C 和 80°C 。

加濕溫度影響質子交換膜燃料電池電滲力作用, 電滲是因為水分子被質子攜帶, 由電池陽極向陰極運動。反應過程中, 陽極形成的 H^+ 透過膜來到陰極, 因質子都處於水合狀態, 所以質子進行遷移時受到電滲力作用會將部份水帶至陰極, 越過膜的質子數愈多(電流密度愈大), 質子攜帶的水分子也愈多, 故隨同質子從陽極遷移至陰極的水也增多。對應於膜中水的不同存在形式, 電滲係數也不同, 當水以氣態形式存在時, 電滲係數為 $1.0\text{H}_2\text{O}/\text{H}^+$; 當水以液態形式存在時, 電滲係數則為 $2.5\text{H}_2\text{O}/\text{H}^+$ 。在不同電流密度條件下, 高電流密度之電滲作用較為顯著, 質子交換膜的陽極端容易乾燥。因此加濕溫度控制因子水準分別為 55°C 、 70°C 和 85°C 。

當電池處高電流負載時, 陽極燃料氫與陰極燃料氧氣必須適當的傳遞至電極表面(觸媒分散處)才可維持電池高負荷狀態下對燃料的強烈需求, 但若燃料配給無法有效供給電

化學反應所需時, 則會產生濃度極化現象。本研究透過第二入口注入反應氣體使濃度提高, 增加其內部反應均勻性, 進而提高燃料電池效率及改善電流密度, 選取分流流率為 50 SCCM、100 SCCM 及 150 SCCM; 第二注入口位置設置 Level 1 為流道總長 35%、Level 2 流道總長 45% 及 Level 3 流道總長 55%, 本文使用 $L_{27}(3^{13})$ 直交表實驗規劃, 相較於 L_{18} 直交表, 可經增加實驗樣本而提升統計分析之客觀性。

(十一) 變異數分析及 F 檢定

變異數分析 (ANOVA) 的主要目的是為了比較多個群組的母體平均數是否有所差異, 探討差異性可以使用常態分配或 t 分配進行比較, 但在較多群組的母體平均數情況下, 必須改用變異數分析。變異數代表觀測參數資料與平均數之間的離散程度, 變異數越小代表資料分佈越集中, 變異數越大則代表資料分佈越離散。進行變異數分析時, 須找出個別群組中的總平均數及平均數。利用觀測值及總平均數間的差距平方總和, 找出總變異。常見的變異數分析可分為一因子變異數分析與二因子變異數分析, 前者僅能用單一類別的解釋變數, 後者用兩種類別的解釋變數, 且能同時研究兩個因子故效率較高, 若因子間有交互作用, 可研究其因子間的影響。

F 分佈 (F distribution) 的 F 值分母 MSTR 代表直接由原樣本所估計的變異數 (Variance, 等於標準偏差的平方), 而分子 MSE 代表經由樣本平均值所估計的原樣本變異數, 亦即

$$F = \frac{MSTR}{MSE} \quad (2)$$

貢獻度 (contribution) 是指每個因子的平方和 (SS) 所佔的比例, 貢獻度具有統計上的意義, 它代表該因子的變異造成總品質損失的比例, 亦即

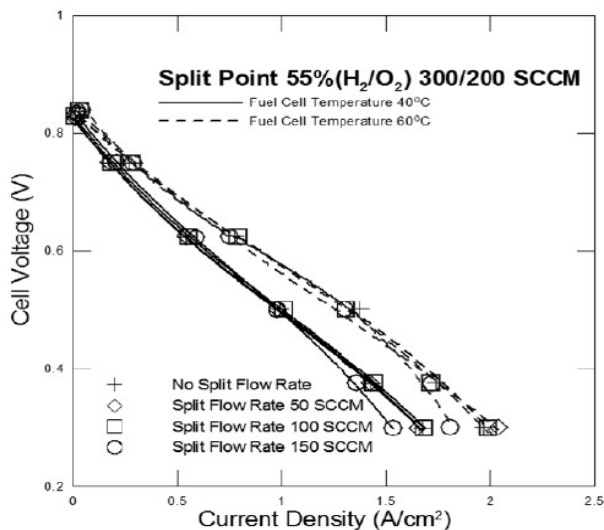
$$\text{Contribution} = SS_{\text{factor}} / SS_{\text{total}} \quad (3)$$

參、結果

本文首先探討氣體分流量及第二氣體入口位置對質子交換膜燃料電池的性能影響, 在選定之陰陽極氣體流率與操作溫度條件下, 比較各情況下的電池極化曲線變化趨勢與差異, 了解各操作與設計參數對電池輸出電能之效應。接著以田口實驗規劃法, 輔以變異分析及 F 檢定, 以詳細觀察各因子的貢獻度。品質特性為電壓 0.85~0.40 伏特間的最大功率重複試驗平均值, 同時針對電池實際運轉時之操作參數以最大功率輸出為目標進行最佳化設計。

一、分流率對質子交換膜燃料電池之效應

實驗中為觀察不同溫度、分流率及分流位置對燃料電池影響，圖七表示電池溫度 40°C 及 60°C 氫氣 300 SCCM 與氧氣 200 SCCM，於流道分流供氣位置 55%時，不同分流供氣比例之極化曲線比較。由於分流供氣 55%位置在流道後半部，當電池溫度 40°C 時，可以發現分流量 150SCCM 之極化曲線在電壓 0.5V 時開始衰退，此一情況與前面兩者有極大的不同。由於電池反應過程中所產生之液態水通常受到氣流剪切力作用而累積於出口末端，使得該處之反應氣體於擴散進入觸媒層之過程受到阻礙而造成較大之局部濃度極化情況，因此當以 150 SCCM 之流率注入氧氣於流道 55%位置而於前端較無濃度極化區域只提供原有 1/4 之供氣 50 SCCM(為原流量減掉 150 SCCM 分流量)時，對於局部與整體電池性能，雖在低操作溫度下對於反應氣體需求量不大仍產生重大影響，而在 60°C 之較高反應速率下之性能變化較為明顯 不僅差異量加大並且提早發生於高電壓情況下。此圖所顯示另一項有趣現象為原本以 100 SCCM 注入 35%與 45%位置均產生之負面效果，於本圖中之性能卻呈現較大之進展，甚至於 0.3V 時略優於原始未分流情況，顯示分流位置與分流率兩項參數的確在電池高反應速率下會產生相當程度之影響，在未來設計電池組時若能加以納入考慮對電池之動態反應可產生一定的操控效果。



圖七 電池溫度 40°C 與 60°C，氫氣 300 SCCM、氧氣 200 SCCM，分流流道位置 55%與分流比例變化對電池極化曲線影響

二、田口實驗方法實驗結果

為進一步探討各實驗參數對具分流流道之燃料電池性能影響，獲得主要影響因素，本節討論田口方法與變異數分析所做的結果。表二及表三分別為 L₂₇ 直交表的操作參數組合及分流供氣對 PEMFC 性能影響之實驗數據及經計算獲得之

S/N ratio 值，以計算及評估電池溫度(A) 陽極增濕溫度(B) 氫氣流量(C)、氧氣流量(D)、陰極分流率(E)及分流位置(F)等燃料電池主要操作參數對 PEMFC 性能影響。經由變異數分析 (ANOVA) 及 F 檢定，可求出各質子交換膜燃料電池操作參數對實驗觀察值影響的顯著程度及燃料電池操作參數對具分流供氣 PEMFC 性能影響實驗觀察值之最佳水準組合。

表二 直交表的實驗參數組合及實驗觀察值的 S/N ratio

	A	B	C	D	E	F	Average	η(db)
1	50	55	200	200	50	35	14.21	20.04
2	50	55	200	200	100	45	14.60	20.27
3	50	55	200	200	150	55	14.18	20.01
4	50	70	250	250	50	35	16.26	21.21
5	50	70	250	250	100	45	16.54	21.35
6	50	70	250	250	150	55	16.87	21.53
7	50	85	300	300	50	35	18.27	22.22
8	50	85	300	300	100	45	17.55	21.87
9	50	85	300	300	150	55	17.73	21.96
10	65	55	250	300	50	45	17.52	21.86
11	65	55	250	300	100	55	17.31	21.75
12	65	55	250	300	150	35	17.40	21.80
13	65	70	300	200	50	45	18.22	22.20
14	65	70	300	200	100	55	17.58	21.89
15	65	70	300	200	150	35	17.70	21.94
16	65	85	200	250	50	45	15.78	20.95
17	65	85	200	250	100	55	15.68	20.89
18	65	85	200	250	150	35	15.80	20.96
19	80	55	300	250	50	55	13.86	19.81
20	80	55	300	250	100	35	11.79	18.20
21	80	55	300	250	150	45	10.19	16.69
22	80	70	200	300	50	55	16.41	21.29
23	80	70	200	300	100	35	13.84	19.81
24	80	70	200	300	150	45	13.12	19.32
25	80	85	250	200	50	55	16.87	21.52
26	80	85	250	200	100	35	16.34	21.25
27	80	85	250	200	150	45	14.97	20.49

表三 各參數水準下的 S/N ratio

	A	B	C	D	E	F
Level 1	21.16	20.05	20.39	21.07	21.23	20.83
Level 2	21.58	21.17	21.42	20.18	20.81	20.56
Level 3	19.82	21.35	20.75	21.32	20.52	21.18

表四為分流供氣對電池功率影響之變異數分析及 F 檢定表，其中 error 為誤差值變異項目，total 為各欄位加總，*表示 F 之最大值。圖八為分流供氣對電池功率影響之變異數分析及 F 檢定的 S/N ratio 回應圖。由分析所得的結果可以看

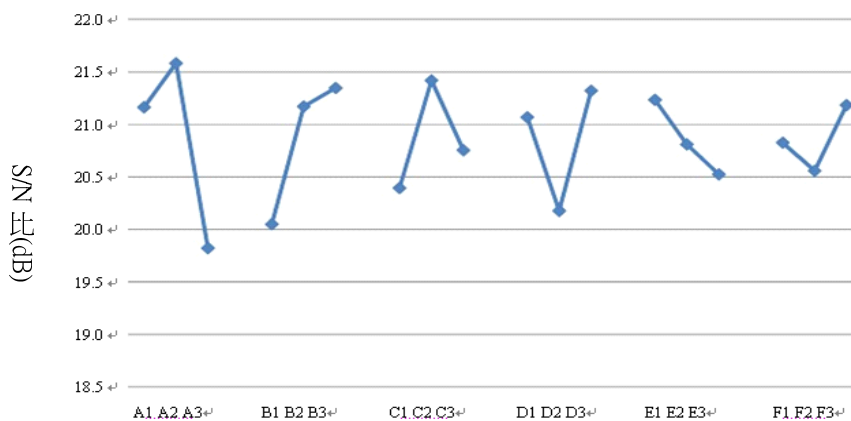
出，在操作參數對具分流供氣 PEMFC 對電池輸出功率影響較為顯著的各因子有操作溫度(A)、加濕溫度(B)及分流位置(C)。而由 S/N ratio 回應圖中可以得知，在電池溫度(A)設定為 65°C、陽極增濕溫度(B)設定為 85°C、氫氣流量(C)設定為 250 SCCM、氧氣流量(D)為 300 SCCM、陰極分流率(E)為 50 SCCM 及分流位置(F)設定為流道總長 55%，亦即在 A2B3C2D3E1F3 之實驗組合下，可以得到較大功率，因此該操作條件為初步最佳的操作參數組合，而由 F 檢定結果顯示各參數中以操作溫度為最主要影響因素。

在獲得初步最佳的操作參數組合與最主要影響因素後，在其餘條件不變之下將電池溫度提高至 70°C 以進行穩健化

參數設計實驗。表五所列之三組實驗設定中，Exp1 別為初始實驗參數組合(A₂B₂C₂D₂E₂F₂)，Exp2 為初步最佳的操作參數組合 A₂B₃C₂D₃E₁F₃，Exp3 為前者改變參數 A 後之組合，此乃由 F 檢定中得知主要影響因素為操作溫度，而透過微調該參數最大訊噪比處之水準值，檢視其輸出功率是否優於 Exp2。實驗結果列於表六，其中 y1-y4 代表每次實驗規劃取樣次數，*代表最大訊噪比值。由結果顯示將電池溫度由 65°C 提高至 70°C 時，電池平均輸出最大功率由 17.83W 提高至 19.05W，並且優於對照組之 17.06W。實驗獲得之電池功率曲線如圖九所示。

表四 分流供氣對 PEMFC 性能影響之變異數分析及 F 檢定

Parameter (A)	Degree (f _A)	Square sum (S _A)	Variance (V)	F _{A0}	F _{0.05}	Contribution (%)
A	2	15.23	7.62	29.07*	3.74	38.48
B	2	8.92	4.46	17.02	3.74	22.53
C	2	4.86	2.43	9.28	3.74	12.28
D	2	6.50	3.25	12.41	3.74	16.42
E	2	2.30	1.15	4.39	3.74	5.80
F	2	1.77	0.89	3.39	3.74	4.48
error	14	3.67	0.26			0.01
Total	26	43.25	19.79			100.01



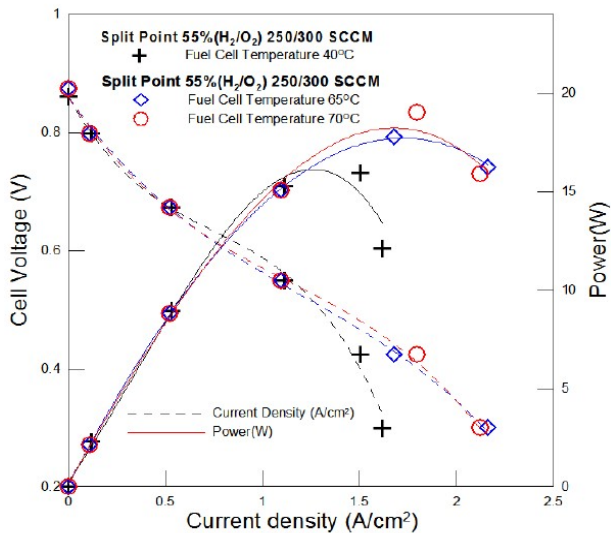
圖八 分流供氣對 PEMFC 性能影響 S/N ratio 回應圖

表五 驗證實驗操作參數

Exp.	A	B	C	D	E	F
1	65	70	250	250	100	45
2	65	85	250	300	50	55
3	70	85	250	300	50	55

表六 穩健化參數設計實驗結果

Exp.	y1	y2	y3	y4	Avg.	η(db)
1	16.92	17.18	17.03	17.12	17.06	21.63
2	18.01	17.65	17.79	17.86	17.83	22.01
3	19.04	18.97	19.01	19.18	19.05	22.59*



圖九 最佳化與穩健化操作參數極化曲線實驗比較

肆、結論

本文有關分流流道對質子交換膜燃料電池性能影響研究，經由一系列的實驗及分析探討，可獲得下列幾點結論：

- 一、本研究以具有雙進氣口供氣設計之燃料電池，實驗探討不同分流比例、位置與操作溫度下對電池性能影響之效應。結果顯示在低操作溫度時因反應速率較緩慢，對於反應物濃度之需求不大，使用分流供氣對性能影響不大，且在高分流率與第二進氣分流點靠近下游時產生較為不均勻的效果。當電池溫度提高致使反應速率加快時，分流點與分流量的正面效果逐漸顯現。此時在流道前端附近適量提供分流氣體，可以改善反應之均勻程度，於低電壓下之性能隨之提升。但過高的操作溫度下因膜之乾化影響其導電度，電池性能受到歐姆極化主導，而未有明顯的增加及改善。
- 二、在分流流道對質子交換膜燃料電池功率影響較為顯著的操作參數有操作溫度(A)、加濕溫度(B)及分流位置(C)。同時，經由分流流道對質子交換膜燃料電池功率影響之變異數分析及 S/N ratio 回應圖得知，在電池溫度(A)設定為 70°C、陽極增濕溫度(B)設定為 85°C、氫氣流量(C)設定為 250 sccm、氧氣流量(D)為 300 sccm、陰極分流率(E)為 50 sccm 及分流位置(F)設定為流道總長 55%，可以得到最佳的功率表現。
- 三、經由田口實驗分析，所得到的最佳功率操作參數組合水準，進行穩健化參數設計實驗驗證，並與分流流道對質子交換膜燃料電池功率影響初始設定值(A₂B₂C₂D₂E₂F₂)

做比較，其功率表現之 S/N ratio 提升了 0.58 dB，由實驗成果顯示，田口方法用於分流供氣對 PEMFC 性能影響進行參數最佳化之性能實驗規劃甚有助益。

參考文獻

- 林育昇 (2008)。界面壓力對質子交換膜燃料電池堆之性能影響。未出版之碩士論文，台南市，國立成功大學航空太空工程學系碩士班。
- 陳龍正、洪敏發、李明三 (2007)。流道設計對質子交換膜燃料電池性能的影響。技術學刊，22卷1期，71-76頁。
- 梅聖鑫 (2009)。質子交換膜燃料電池局部電流密度量測及分析。未出版之博士論文，台北縣，華梵大學機電工程學系博士班。
- Geng Bo, Mills, J. K., & Sun Dong. (2012). Two-stage energy management control of fuel cell plug-in hybrid electric vehicles considering fuel cell longevity vehicular technology. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(2), 498-508.
- Hwang, J. J., Chang, W. R., Peng, R.G., Chen, P. Y., & Su, A. (2007). Experimental and numerical studies of local current mapping on a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 5718-5727.
- Kon, X., Khambadkone, A. M., & Thum, S. K. (2005). A hybrid model with combined steady-state and dynamic characteristics of PEMFC fuel cell stack. *Institute for Advanced Study*, 3, 1618-1625.
- Liu, Z.X., Mao, Z.Q., Wu, B., Wang, L.S., & Schmidt, V.M. (2005). Current density distribution in PEFC. *Journal of Power Sources*, 141, 205-210.
- Nishikawa, H., Kurihara, R., Sukemori, S., Sugawara, T., Kobayasi, H., & Abe, S. (2006). Measurements of humidity and current distribution in a PEMFC. *Journal of Power Sources*, 155, 213-218.
- Shafiee, S & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37, 181-189.
- Sun, H., Zhang, G. S., Guo, L. J. & Liu, H. (2006). A novel technique for measuring current distributions in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 158, 326-332.

Effects of Twin Inlet Flow Field on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Mu-Sheng Chiang¹, Ying-Pin Chang², Po-Jen Cheng³, Zhi-Wei Hsu⁴

¹ Graduate School of Vehicle & Mechatronic, Nan Kai University of Technology

² Department of Electrical & Information Engineering, Nan Kai University of Technology

³ Institute of Electronic Engineering, Nan Kai University of Technology (graduate student)

⁴ Ken Sean Industries Co., Ltd

Abstract

In this study, a cathode flow field was designed with multi-ports as inlet split points. Besides the original inlet port, the reactant gas can be supplied from these split points. The effects of split point position and split flow rate on the polarization curve was discussed and compared with those of traditional flow field. The results showed that the influence of using the split flow scheme in a fuel cell was not obvious when the operating temperature was low since the requirement of even reactant concentration was not so important. However, when the reaction rate was increased as a result of temperature rises to 60°C, the effect of split flow supply became obvious. Therefore, suitable split flow rate around the frontal region of flow channel had a positive effect on cell performance when the cell voltage was low. Subsequently, this study revealed that through the experiments at different temperature and flow ratio setting, the uniform cell reaction was achieved by using the split flow field in a PEMFC. Also by using the Taguchi method, prediction model of major operation parameters influencing the performance of a PEMFC with split flow field was developed. The optimal operating level was found from the analysis of S/N ratio and the level of cell power was increased.

Keywords: PEMFC, split flow, Taguchi, ANOVA