

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

質子交換膜燃料電池組之組裝端板最佳化設計 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型

計畫編號：NSC 95-2221-E-002-246-

執行期間：95年08月01日至96年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：鄭榮和

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：陳丁銓、林逸祥

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 96 年 12 月 07 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

質子交換膜燃料電池組之組裝端板最佳化設計

Optimization of the end plate of PEMFC stack

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-002-246-

執行期間：95 年 8 月 1 日至 96 年 7 月 31 日

計畫主持人：鄭榮和

共同主持人：

計畫參與人員：陳丁銓、林逸祥

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學機械工程研究所

中 華 民 國 九 十 六 年 八 月 二 十 九 日

(一) 研究內容

本研究為一年期計畫，針對質子交換膜燃料電池的電池堆端板夾持壓力與接觸電阻的相互關係進行探討；而後利用有限元素分析軟體進行接觸電阻值預測，並探討壓力分佈情形對接觸電阻的影響。主要研究成果如下所述。

1. 前言

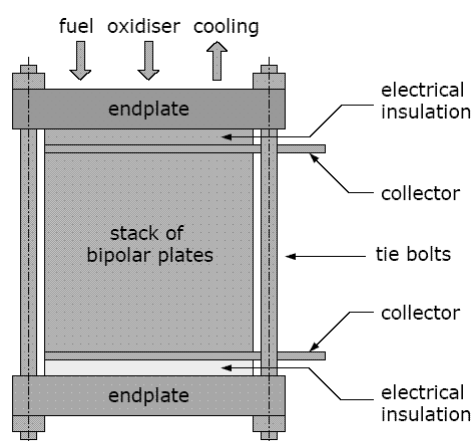
近年來，溫室效應以及能源耗竭的威脅與日劇增，氣候異常、生態環境破壞、石油價格波動等慘況，讓全世界受到一波波重大衝擊。許多科學家都已明顯指出，二氧化碳的濃度、全球溫度以及海平面高度都在年年上升，種種跡象顯示危機早就來臨。

為了解決這些問題，我們必須減少使用石化能源外，並盡快開發替代能源，燃料電池是目前最具發展遠景的新能源，它的效率高，只要補充氫燃料就能持續發電，發電過程不需燃燒，不僅噪音低，反應後產物也不會造成污染；綜合以上優點，燃料電池是非常值得投資、發展的新能源。

2. 研究動機與目的

本實驗室組成燃料電池汽機車開發團隊，進行新能源車輛的研發及製作。目前主要的燃料電池種類中，以質子交換膜燃料電池（PEMFC）最適合使用在車輛動力上，所以選擇質子交換膜燃料電池做為車輛的動力來源。

質子交換膜燃料電池是一個多層結構體，由許多單電池（cell）組合成為電池組。單電池可分解成七層對稱結構，由外到內分別是：雙極板、氣體擴散層、觸媒層、質子交換膜；最後將大量單電池串聯，組成可提供足夠電壓及功率的燃料電池組，夾持這些單電池的元件是位於電池組兩端的端板（endplate），夾持力量則由螺栓提供（見圖一）。

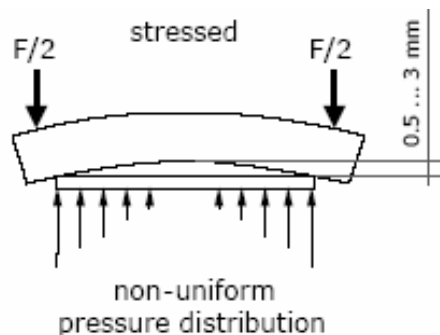


圖一 燃料電池組組裝示意圖

端板的重要功能有下列幾項：

- 維持燃料電池結構之完整性；
- 提供夾持壓力，降低元件間之接觸電阻，提升電流輸出及效率；
- 提供密封力，防止燃料外洩；
- 連結燃料氣體及冷卻水的管路系統。

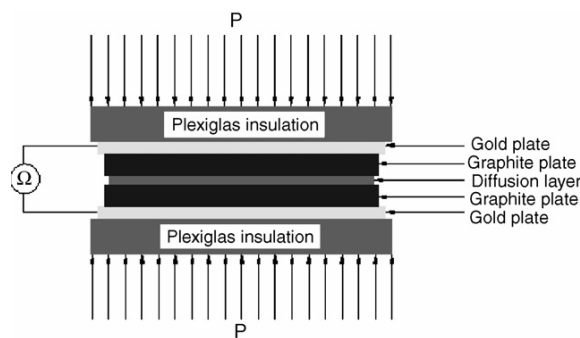
端板必須將電池組內各元件緊貼的關係有效維持住，但在夾持過程中，端板會發生如圖二所示的彎曲現象，造成中央拱起，而使夾持壓力分佈不均勻，對電池組造成許多負面影響。基於上述理由，本研究針對端板彎曲的現象進行改良設計，以提供均勻夾持壓力目標；此外，壓力分佈均勻性對接觸電阻之影響，亦將一併探討。



圖二 端板中央拱起示意圖

3. 理論背景

圖三為接觸電阻量測之實驗設置圖[1]，由此設置方式量出之電阻值為五項電阻之和，分別是金板、雙極板、氣體擴散層之片電阻，以及金板/雙極板、雙極板/氣體擴散層間之接觸電阻；接觸電阻均為未知數，故需另一校準實驗，才可求得雙極板和氣體擴散層間之接觸電阻。



圖三 接觸電阻量測實驗設置圖

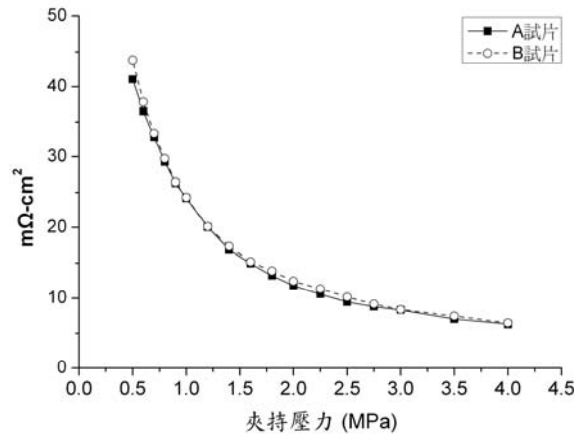
2006 年, P. Zhou 等人[2]以及 L. Zhang 等人[3]使用有限元素分析軟體模擬燃料電池元件間之接觸，並搭配接觸電阻量測實驗進行接觸電阻之預測，得到相當準確的結果。之後，他們分別探討夾持壓力分佈對接觸電阻的影響，並得到不同的結論：P. Zhou 等人做出當夾持壓力完全平均時，接觸電阻會最小之結論；而 L. Zhang 等人則認為夾持壓力分佈並不會造成什麼影響。

除了接觸電阻之外，亦有其他文獻[4、5、6]指出，夾持壓力分佈的均勻性對電池組內之熱管理、水管理以及燃料輸送也會造成影響。

4. 建立有限元素模型

進行端板改良設計前，須先建立正確的有限元素模型，以模擬實際夾持壓力的分佈情形，所以本研究透過接觸電阻的預測，驗證有限元素模型的準確性。

圖四為夾持壓力和接觸電阻率之關係曲線圖，由實驗求得，求得此曲線後，接著建立有限元素模型，然後進行接觸電阻預測以及實驗驗證。

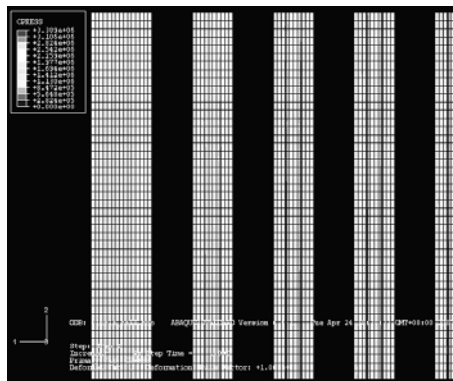


圖四 接觸電阻率—夾持壓力關係曲線圖

實際電池組結構跟材質相當複雜，故建立模型時需適當簡化，簡化主要有下列兩點：

- 假設氣體擴散層為等向性且均質之材料，減少材料性質設定的麻煩，而且分析重點在單一方向上，所以此簡化對分析結果影響不大。
- 忽略接觸面上之摩擦力：燃料電池內有多種接觸面，實際上摩擦力也不大，故忽略所有接觸面上之摩擦力，縮減計算時間。

圖五為當夾持壓力為 1.5MPa 時，雙極板與氣體擴散層接觸面上之夾持壓力分佈圖，得到各元素上之夾持壓力後，即可進行接觸電阻之預測。



圖五 雙極板與氣體擴散層接觸面之夾持壓力分佈圖

得到預測值後，接著進行實驗驗證，從表一可看出，預測值和實驗值的誤差在正負 10% 以內，由此可證明有限元素模型之準確性。

表一 接觸電阻率之預測值、實驗值及誤差百分比

夾持壓力 (MPa)	預測值 (mΩ)	實驗值 (mΩ)	誤差 (%)
1.5	0.361207	0.336814	7.24
2.0	0.278939	0.292236	-4.55

5. 壓力分佈均勻性探討

從有限元素模型可以快速得到夾持壓力數據，並算出接觸電阻值；同樣的，也能夠迅速得知壓力分佈的情形，本研究選擇標準差作為壓力分佈均勻性之判準，公式如式 (1) 所示。

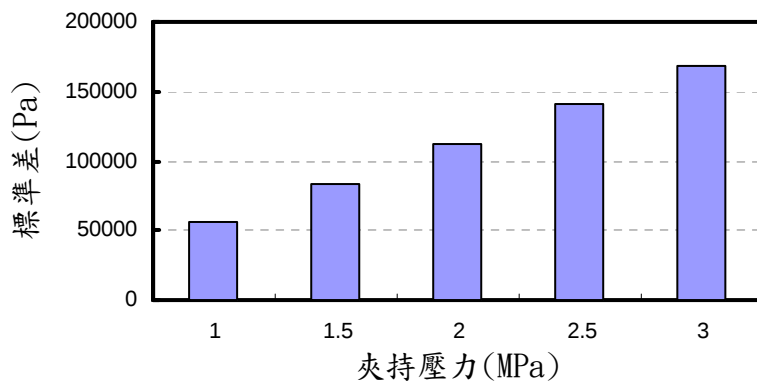
$$S = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

端板的設計目標是均勻地傳遞夾持壓力，根據此目標，本研究設定一個理想夾持狀況，假設端板施加的夾持壓力在雙極板上均勻分佈，為了瞭解在此狀況下，標準差和夾持壓力之關係，選用 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0MPa 五個壓力值來比較其標準差。

圖六為五個夾持壓力值對應之標準差，夾持壓力增加會讓標準差增加，代表夾持壓力分歧的程度上升，而標準差和夾持壓力幾乎成正比；若進一步求出兩者間之比例關係，也就是把標準差除以當時的夾持壓力，可發現不管壓力多大，標準差大約為當時夾持壓力的 5.61% (見表二)，此比例稱為 S_R 值 (ratio of standard deviation)。 S_R 值較標準差更能迅速、具體的表現出夾持壓力不均的程度，所以此比例將取代標準差作為壓力分佈均勻性之判準。

根據理想夾持狀況得到之 S_R 值大約為 5.61%，若是改良後之端板能將 S_R 值逼近 5.61%，就代表改良效果越好。

在理想夾持狀況下 S_R 值為 5.6%，那麼使用一般端板時 S_R 值大約是多少呢？接下來將比較使用一般端板以及在理想夾持狀況下之 S_R 值，為了增加樣本數，選用三種端板厚度，以及兩種夾持壓力，計算其 S_R 值以及對應的接觸電阻值。



圖六 理想夾持狀況下，不同壓力之標準差值

表二 理想夾持狀況下，不同壓力之 S_R 值

夾持壓力 (MPa)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
S_R (%)	5.6183	5.611133	5.60855	5.61372	5.614433

表三及表四分別為 1.5MPa 以及 2.0MPa，各種端板厚度之 S_R 值以及接觸電阻值，最後兩列也將理想夾持狀況 (ideal condition) 以及 S_R 值等於零之極限狀況的接觸電阻值一起列出；從兩表中可以看出，一般端板的 S_R 值約是理想狀況的四到五倍， S_R 值越小，接觸電阻值就越小，當 S_R 值為零時，接觸電阻出現最小值，但是最佳和最差的狀況相比，接觸電阻也只改善約 0.35%；另外，當夾持壓力改變時，接觸電阻差距和 S_R 值間的趨勢關係，並沒有改變（見圖七）。

表三 夾持壓力為 1.5MPa 時之各類數據

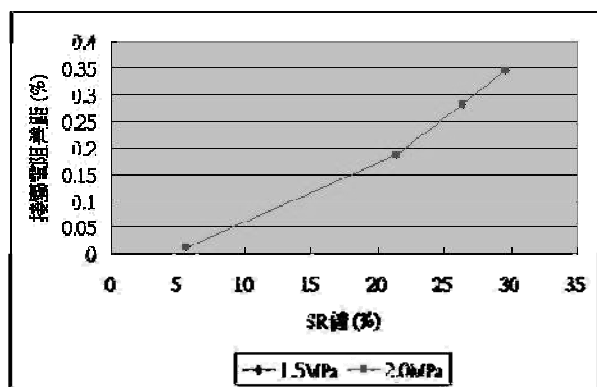
端板厚度	S_R (%)	接觸電阻值 (mΩ)	接觸電阻差距 (%)
10mm	29.57	0.36554007	0.34548581
12.5mm	26.37	0.36530937	0.28215676
15mm	21.36	0.36496066	0.18643074
I.C.	5.61	0.36432586	0.01217
$S_R=0$	0	0.36428153	0

表四夾持壓力為 2.0MPa 時之各類數據

端板厚度	S_R (%)	接觸電阻值 (mΩ)	接觸電阻差距 (%)
10mm	29.57	0.2810835	0.345471
12.5mm	26.37	0.2809061	0.282138
15mm	21.36	0.2806380	0.18643
I.C.	5.61	0.2801498	0.012147
$S_R=0$	0	0.2801158	0

6. 端板改良設計

S_R 值可以用來表示夾持壓力分佈的情形，和接觸電阻間的關係也非常明顯，所以端板的改良設計可以使用 S_R 值來判斷改良成效。



圖七 接觸電阻差距和 S_R 值之趨勢關係

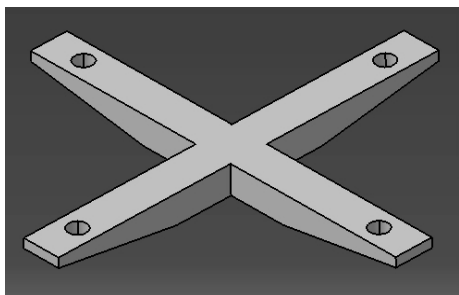
為了避開電池組中央的眾多元件，螺栓只能鎖固在端板的周圍，故中央拱起的現象才如此嚴重；針對此彎曲現象，提高端板剛性可稍微改善，但效果有限；另外也有些特殊的端板改良方法[7]，亦是以彎曲現象為著眼點進行改善。

端板彎曲確實無法避免，但改良設計若只侷限在端板上，改良成果將非常有限；基於此原因，本研究認為必須跳脫端板之外，另外設計輔助元件，才能達成更好的改善效果。

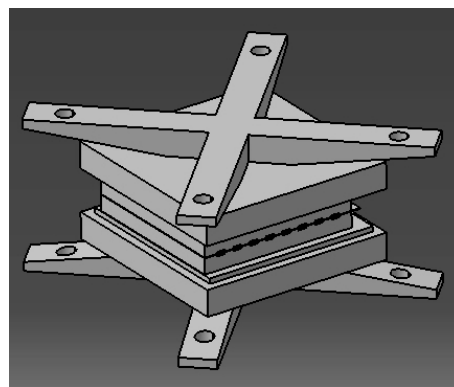
6.1 改良雛形

圖八為輔助元件的設計圖，此元件和端板並非連結在一起，而是放置在端板上，代替端板被螺栓鎖固（見圖九）。螺栓鎖固後，此元件同樣會發生彎曲，彎曲後此元件和端板的接觸僅剩下斜角部分（見圖十圈起處，以下稱施力斜角），透過施力斜角，可將夾持力傳遞到端板上。

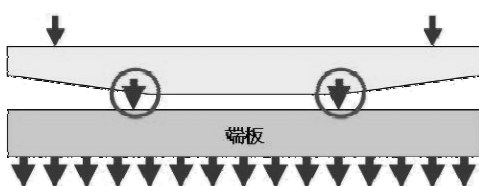
使用輔助元件有兩個優點，第一是彎曲由輔助元件承受，不再直接影響端板；第二是更改端板受力的位置，因為以往端板都是邊緣受力。本研究將此元件命名為壓力分散件，希望可將夾持壓力均勻分散。



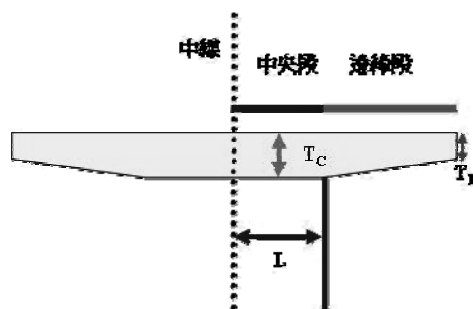
圖八 輔助元件設計圖



圖九 輔助元件組裝示意圖



圖十 輔助元件作用圖



圖十一 壓力分散件部位說明圖

圖十一為壓力分散件的部位說明圖。 L 代表施力斜角至端板中心之距離， L 決定端板上受力點之位置，是最重要的參數； T_C 為分散件中央段之厚度，用來抵抗中央段承受的力矩； T_E 代表邊緣段外緣之厚度，也是用來承受力矩。

6.2 趨勢分析

使用壓力分散件能將端板的受力點移動到適當的位置，而哪裡是適當的位置呢？偏中央或偏邊緣等狀況都是不恰當的，所以 L 的初始值訂在受夾持元件的中心及外緣的中點上，此時 $L=32\text{mm}$ ；在初始值前後 10mm 的範圍內，各取兩點進行比較， T_C 、 T_E 則設為定值， $T_C=15\text{mm}$ ； $T_E=5\text{mm}$ 。

表五列出不同 L 值對應之 S_R 值，使用壓力分散件後， S_R 值都較使用一般端板為低，在 $L=32\text{mm}$ 時， S_R 值出現最小值，甚至比理想夾持狀況之 S_R 值還低，這表示理想夾持狀況並非最理想的夾持方式。

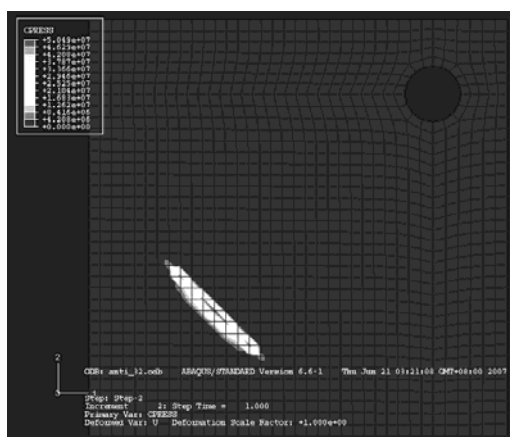
表五 不同 L 值對應之 S_R 值

L 值 (mm)	S_R (%)
22	6.834
27	5.486
32	4.770
37	4.799
42	5.758

6.3 端板減重

從圖十二可看出，使用壓力分散件後，端板上的受力區域遠小於端板大小，所以這些不必要的部分必須縮減以減輕重量；本研究設定的尺寸，端板原本的長寬為 150mm ，而受夾持元件的長寬最大為 100mm ，所以將端板尺寸修改為 110mm ，然後比較不同厚度時之 S_R 值，表六為 $L=32\text{mm}$ ，尺寸縮減後之端板，在厚度分別為 10 、 12.5 、 15mm 時之 S_R 值；當厚度和之前相同時， S_R 值等於 4.877 ，幾乎等於原本的 4.770 ，所以長寬方面的縮減對 S_R 值的影響並不大；而在厚度減少的過程中， S_R 值略為上升，這表示厚度會稍微影響夾持壓力的傳遞，但是 S_R 值依然遠低於使用一般端板。

另外，若計算減重後之端板和壓力分散件之重量總和，可發現比使用一般端板還輕（見表七）。



圖十二 使用壓力分散件時，端板上之受力圖

表六 尺寸縮小之端板，不同厚度之 S_R 值

端板厚度 (mm)	S_R (%)
10	6.664
12.5	5.511
15	4.877

表七 減重後端板和壓力分散件重量總和與一般端板之重量比例

減重後端板厚度 (mm)	重量比例 (%)
10	66.4
12.5	76.0
15	85.6

7. 結論

本研究主要有以下成果：

- 使用有限元素分析軟體建立燃料電池之接觸模型，分析後得到雙極板和氣體擴散層間之夾持壓力數據，然後配合實驗獲得之接觸電阻率關係曲線進行接觸電阻預測，實驗驗證後誤差在正負 10% 內。
- 使用夾持壓力標準差和夾持壓力的比例 (S_R 值) 來描述壓力分佈之均勻性，並建立此比例和接觸電阻間的關係。在比較不同狀況下之 S_R 值及接觸電阻後，發現壓力分佈最均勻時，接觸電阻會降到最小；但只改善約 0.35%；另外，接觸電阻值差距和 S_R 值間的趨勢關係不受夾持壓力影響，因此可用來預測接觸電阻值的落點，前提是 S_R 值在特定範圍內。
- 進行端板的改良設計，使受夾持元件上之壓力分佈更均勻，本研究跳脫端板之外，設計一壓力分散件輔助端板夾持，分析結果顯示，使用壓力分散件，即使在最差的狀況下，其 S_R 值也遠低於使用一般端板，而且還能減輕電池組的重量。

8. 参考文献

- [1] V. Mishra, F. Yang, R. Pitchumani, "Measurement and prediction of electrical contact resistance between gas diffusion layers and bipolar plate for applications to PEM fuel cells", Transactions of the ASME, Vol. 1, Nov. 2004.
- [2] P. Zhou, C. W. Wu, G. J. Ma, "Contact resistance prediction and structure optimization of bipolar plates", J. Power Sources 159, 1115-1122, 2006.
- [3] L. Zhang, Y. Liu, H. Song, S. Wang, Y. Zhou, S.J. Hu, "Estimation of contact resistance in proton exchange membrane fuel cells", J. Power Source 162, 1165-1171, 2006.
- [4] J. Ihonen, M. Mikkola, G. Lindbergh, "Flooding of gas backings in PEFCs", J. the Electrochemical Society, 151 (8) A1152-A1161, 2004.
- [5] Y. L. Tang, M. H. Santare, A. M. Karlsson, S. Cleghorn, W. B. Johnson, "Stress in proton exchange membranes due to hygro-thermal loading", J. Fuel Cell Science and Technology, Vol. 3 119-124, May 2006.
- [6] P. Zhou, C. W. Wu, G. J. Ma, "Influence of clamping force on the performance of PEMFCs", J. Power Sources 163, 874-881, 2007.
- [7] J. Evertz, M. Günthart, "Structural Concepts for lightweight and cost effective end plates for fuel cell stacks", Tribecraft AG, Zurich.

(二) 計畫成果自評

完成項目

1. 收集燃料電池結構力學相關文獻，瞭解其內部電池組與相關組件之力學特性及相關判準。
2. 建立夾持端板性能判準。
3. 建立燃料電池夾持端板與電池堆之三維實體幾何模型。
4. 以有限元素分析軟體 ABAQUS 建立燃料電池之接觸模型，分析以取得雙極板和氣體擴散層間之夾持壓力數據。
5. 完成端板夾持力與接觸阻抗之實驗，並與有限元素模擬分析結果進行驗證
6. 使用夾持壓力標準差和夾持壓力的比例 (S_R 值) 來描述壓力分佈之均勻性，並建立此比例和接觸電阻間的關係。
7. 完成一壓力分散件輔助端板夾持之設計，達成受夾持元件之壓力分佈更均勻的目的。