

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(一)科

佳作

032810

風起「電」湧 - 人工智慧於風力發電效率探討

學校名稱：新竹縣立東興國民中學

作者： 國二 李宣毅 國二 陳敬霈 國二 李宜璟	指導老師： 李易儒 李祥菁
---	-----------------------------

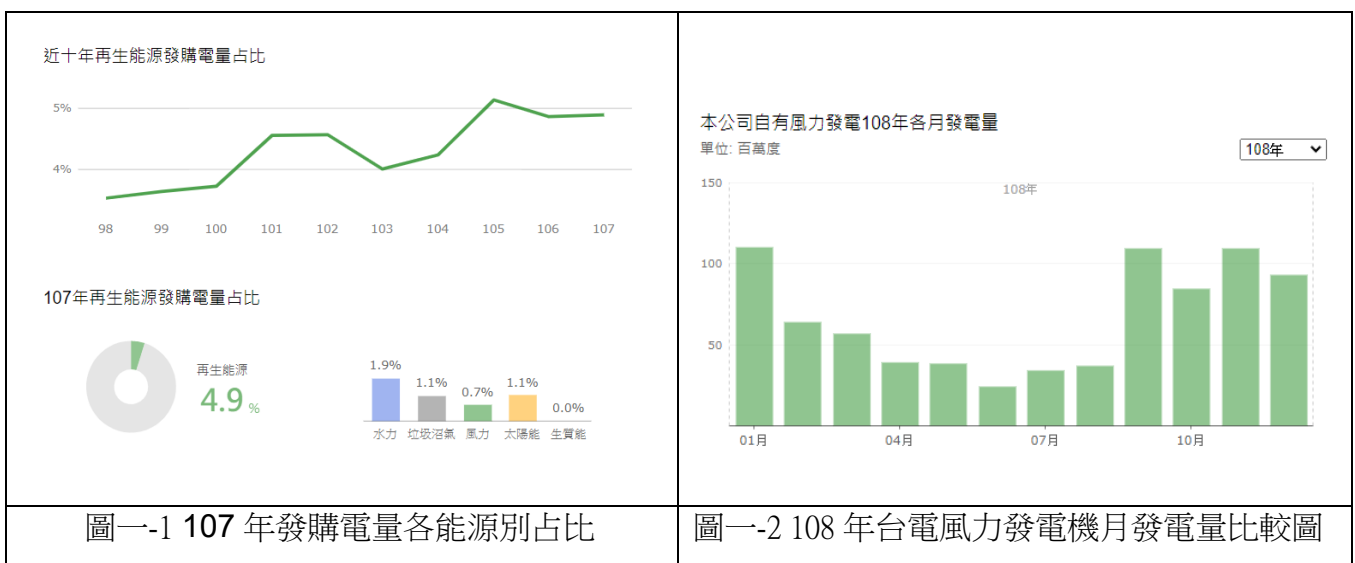
關鍵詞：風力發電、翼型、升力

摘要

本研究的目的是探討：運用人工智慧輔助設計風力發電機的葉片，以提升發電的效率。我們從二維葉片剖面出發，以 NACA5410 翼型為原型，利用 XFoil 翼型設計軟體與人工智慧找尋最佳升力與最佳升阻比之剖面形狀，經由風洞實驗得到理論值與本文實驗具有相似的趨勢；接著我們基於該剖面形狀用 3D 列印製作了長方翼，實際裝上發電機後也證實，最佳化後的葉片顯著比原型表現更好；我們接著把實驗擴展到三維，即漸縮翼與翼尖小翼，透過實驗證實這些技巧對於風電效率有顯著的助益；而除了幾何形狀外，因配重可儲存動能的特性，我們也探討葉片設計的結果對配重的影響；最後，由於最佳升阻比之葉片有較低的能量損耗，排列風電機組的組合也得到更好的效果。

壹、研究動機

國中一年級下學期時，曾經學過有關環境保育的單元，在第六章提到人類為了發展而破壞環境，產生全球暖化、臭氧層破洞等問題，令我們聯想到國內爭論不休的核能發電議題：有人覺得廢除核能發電可以避免核廢料排放問題，但也有人認為廢核將會提高火力發電廠的負荷量，進而產生空氣汙染等問題；曾有新聞報導，台灣處於季風氣候區，理論上用風力發電可以產生大量的電力，但實際到現場偵測後，才發現夏天時風力較小，大多數的發電機都沒有運作，使得風力發電量僅占再生能源中的 0.7%(圖一-1、圖一-2)。這問題引起我們的好奇，想實驗能否透過類神經網路等方法，找出在低風速時啟動的葉片弧形與形狀，使發電更穩定以解決缺電的問題。



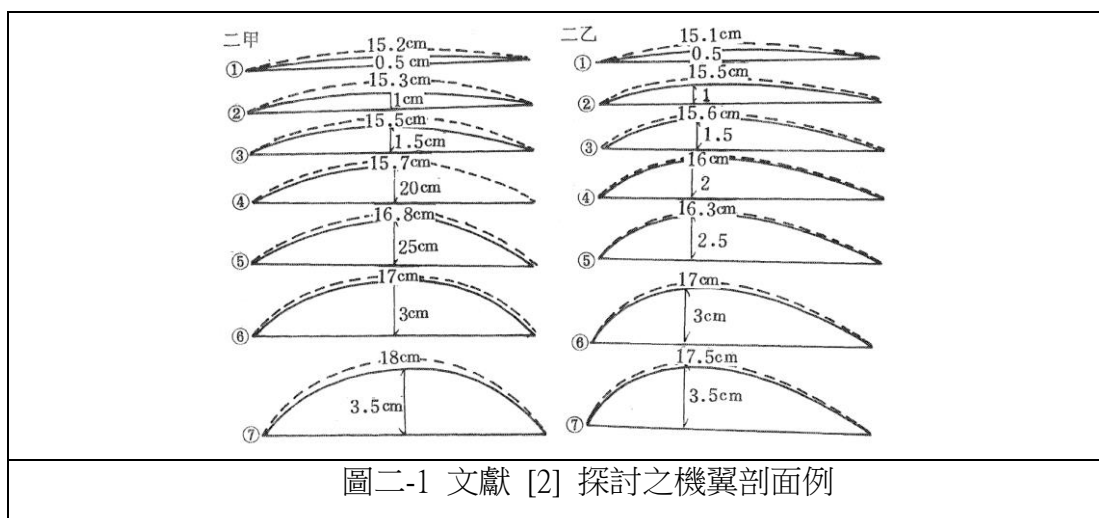
貳、文獻探討

我們的研究是期望藉由人工智慧設計葉片的剖面形狀，透過 3D 列印呈現出來，並實際在風洞與風力發電機上運作，搭配三維形狀、配重、不同葉片之風力發電機組合探討發電效益；更重要的是，期待本研究運用之人工智慧，不僅像 AlphaGo 發展出有異於傳統的解法，亦能啟發我們思考新的方向。

科展作品資源網站「科展群傑廳」[1] 網羅了歷屆國小、國中與高中的科展作品，與風力發電相關的題目共有 60 筆。研究範圍包含葉片數目、葉片形狀、葉片重量…等，關於葉片剖面形狀部分，多用簡單的幾何形狀：由於葉片剖面之設計與飛機的機翼剖面有相似的概念，我們也搜尋了與機翼相關的研究，共有 32 筆，其中針對剖面形狀有稍多討論者只有 3 篇 [2][3][4]，如表二-1 所示，且其剖面形狀仍是用較簡單的幾何做些許的變化，如圖二-1 所示，與本研究所想要探討者有所差別。

表二-1 歷屆台灣科展翼形研究

文獻	研究內容	翼型產生方式
本研究	葉片的剖面形狀藉由人工智慧做出精細的設計	利用人工智慧訓練結果，3D 列印機翼
機翼浮力研究[2]	迎角、弧度、風速對升力的關係	使用鐵片製作不同弧度高度與位置之機翼
翱翔天際[3]	迎風面、弧面、配重與升力之關係	使用西卡紙製作方形、圓柱、水滴形機翼
如鷹展翅上騰[4]	觀察不同弧形漸縮比、展弦比、攻角對升力影響	使用鋁片彎曲製成各種弧型機翼

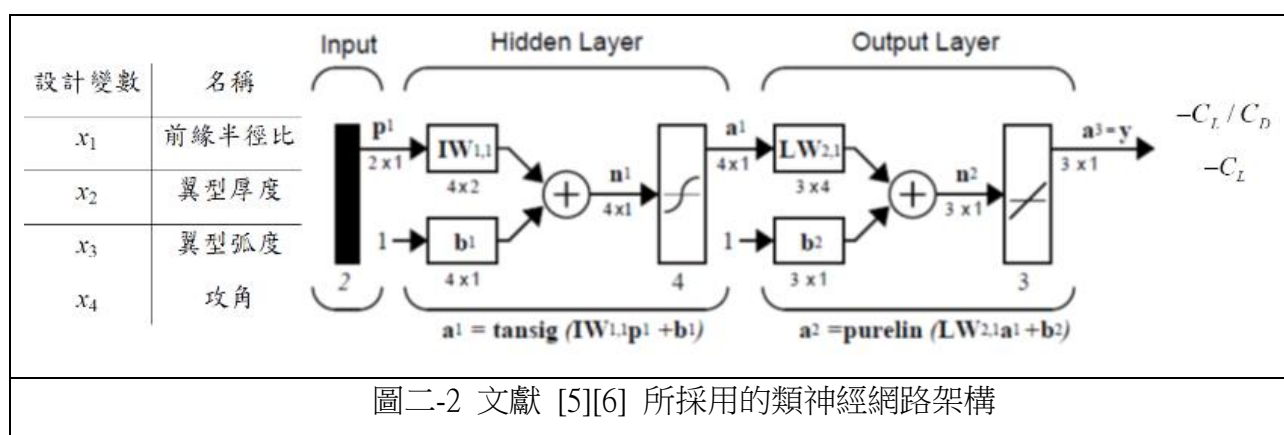


[5]、[6] 兩篇文獻，關於葉片分析與模擬，三位教授已建立了相當完善的工具，如表二-2 所示。由此兩篇報告得知，由於 XFoil [7] 在數值計算上經常遇到數值無法收斂的狀況，因此計畫訓練一個類神經網路來取代 XFoil 此等計算工具，其網路架構如圖二-2 所示：由 XFoil 產生

訓練與測試資料庫訓練類神經網路，輸出升力係數與阻力係數，達到類神經網路取代 XFOIL 的目的。

表二-2 與人工智慧有關之葉片形狀研究

文獻	人工智慧扮演角色	人工智慧訓練方法
本研究	尋找較佳之機翼形狀與攻角	增強式學習 (漸進隨機搜尋)
風機動力系統[5][6]	取代 XFOIL	監督式學習(有訓練資料庫)
ANN utilize GA[8]	建立幾何參數對應升阻係數之模型	監督式學習(有訓練資料庫)
ATR42 aerodynamics analysis[9]	建立幾何參數對應空氣動力之模型	監督式學習(有訓練資料庫)
Trailing edge flap through ANN[10]	建立襟翼長度角度、攻角之模型	監督式學習(有訓練資料庫)

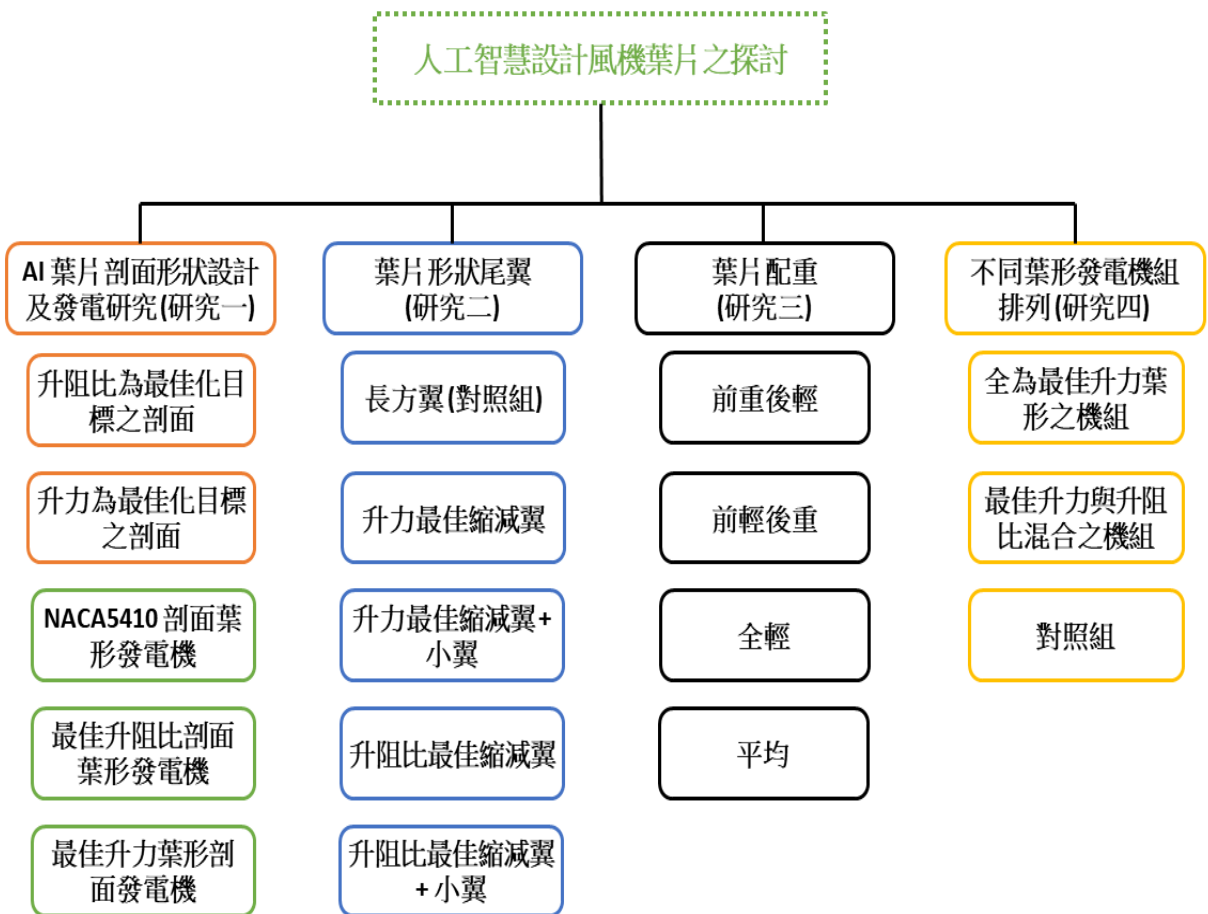


此外，我們亦發現文獻 [8] [9] [10] 也是將類神經網路訓練成機翼幾何形狀與空氣動力係數之轉換函式，在找尋最佳化空氣動力係數部分，則需要其他方法如基因演算法輔助，如表二-2 所示。

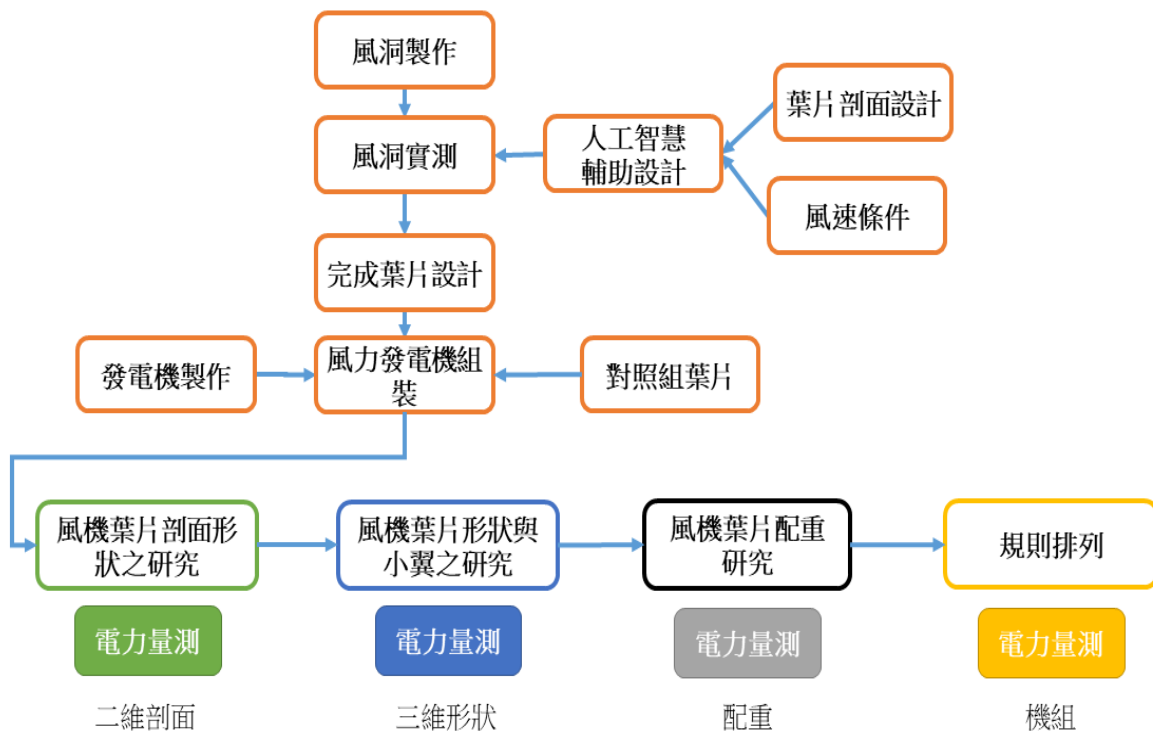
由以上之文獻可知，類神經網路在過去大多扮演著取代 XFOIL 的角色，輸入機翼幾何形狀控制參數之後便可以得到空氣動力係數，這樣的作法可以得到一穩定的數值結果，不過我們希望找尋的機翼幾何形狀控制參數，能夠不受限於人類既有的經驗，並且具備找尋最佳空氣動力係數之功能，因此增強式學習 (reinforcement learning) 的框架似乎是可行的選項。

參、研究目的

- 一、如何用人工智慧訓練出在低風速條件下，升力大而阻力小 (升阻比高) 的葉片剖面，並試著了解各式葉片對發電的幫助與差異，其控制因子為二維幾何。
- 二、葉片形狀 (長方翼與漸縮翼形) 與翼尖小翼對發電的影響，控制因子擴展至三維幾何。
- 三、葉片配重對發電之影響，操作因子為配重。
- 四、不同葉形之風力發電機的排列對發電的影響，考慮整體機組發電。



圖三-1 實驗架構圖



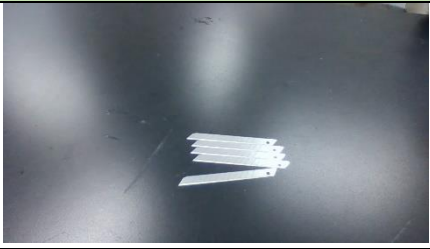



圖三-2 實驗流程圖

肆、研究設備與器材

一、硬體及基本材料

名稱	紙板	珍珠板	吸管
數量	36 片	1 片	484 根
照片			
名稱	碳棒	3D 列印機(CR-10)	PLA 列印軟性線材
數量	2 根	1 台	2 捆
照片			
名稱	三用電表	壓克力	馬達
數量	1 台	2 片(25*25)	6 顆
照片			
名稱	電池	水霧製造器	遙控器
數量	1 顆	3 顆	1 台
照片			

名稱	無刷馬達+伺服器	名稱	防水噴霧	美工刀片
數量	1 組	數量	1 罐	30 片
照片				
名稱	Arduino Uno			
數量	1 片			
照片				

二、使用之電腦軟體

(一) Python 3.7 (base : anaconda 3)

(二) OpenAI Gym [11]

OpenAI Gym 是一款用於研發和比較強化學習算法的工具包，由特斯拉執行長伊隆·馬斯克創立。開發者可上傳自己的人工智慧數據演算法到 OpenAI Gym，測試其演算法效能，並與其他開發者交流。OpenAI Gym 提供各種測試環境，例如圍棋、電子遊戲到數學計算、物體控制。人工智慧系統能透過不斷測試，提高能力。目前此環境支援的程式語言為 Python，未來也將支援其他語言。

(三) XFOIL 1.1.1 [7]

XFOIL 是麻省理工學院馬克·雷拉教授在 1986 年寫的一套翼型開發工具，輸入機翼形狀參數、攻角、雷諾數或馬赫數等資訊，就可以計算出該機翼之浮力、阻力、以及扭力等結果，是一套容易操作的翼型開發軟體。由於已有 python 版本的 XFOIL，可以與多數的人工智慧軟體相結合，因此我們選擇 XFOIL 為我們的開發軟體套件。

(四) Autodesk Fusion 360

(五) Arduino IDE

本研究將以 python 為主要程式撰寫語言，並結合 OpenAI Gym 以及 XFOIL，其中 OpenAI Gym 將會在訓練過程中產生機翼相關設計參數，包含機翼形狀與攻角等，透過 XFOIL 計算升力與阻力之結果，回饋給 OpenAI Gym，用以判斷該設計參數之好壞，經過數次的學習，OpenAI Gym 會逐漸產生升力佳且阻力小之設計參數，達到收斂之後，該參數將用來實際

製造機翼形狀。

在列印模型方面，我們會使用 Autodesk Fusion360 當作設計軟體。將人工智慧訓練出的參數輸入，並且列印出翼形。研究四將會設計 Arduino 程式來監控電壓。

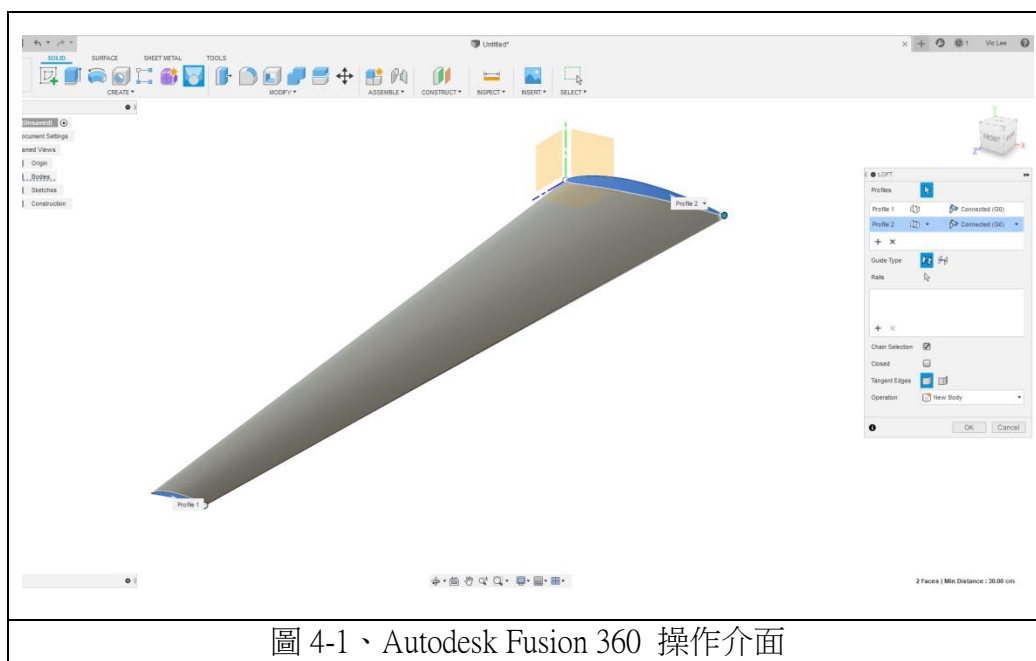


圖 4-1、Autodesk Fusion 360 操作介面

三、自製風洞測試機的製作流程

(一) 主要製作步驟

1. 將 484 根吸管以 22*22 的方式用雙面膠黏起來。
2. 將 36 片紙板黏起來。
3. 切割壓克力，將它分割成 15*15 公分。
4. 組裝動力組，將伺服器、接收器、馬達、變壓器組裝起來。
5. 開始測試，將製煙器放在動力組後方，啟動馬達，調整測試台的角度，即可開始測試。

(二) 製煙器的演變

第一次測試使用線香當作煙霧來源，但燃燒後濃度低，無法看見流場，且味道也不好聞，所以我們想出使用紋影法或水霧測試。

紋影法利用溫度的不同使空氣產生密度差，接著使用透鏡將影像成像在屏幕以觀察空氣流動情形。此方法廣泛使用於航空界，可以做精確的流場分析。本實驗原先打算使用此法，但透鏡與面鏡造價昂貴，加上在臺灣此技術尚未成熟，最後我們選擇水霧作為製煙器。



圖四-2 、製作整流段



圖四-3 、接上馬達及伺服器



圖四-4 、煙霧器的擺放



圖四-5 、風洞測試機完成圖

(三) 校正、量測與發電機

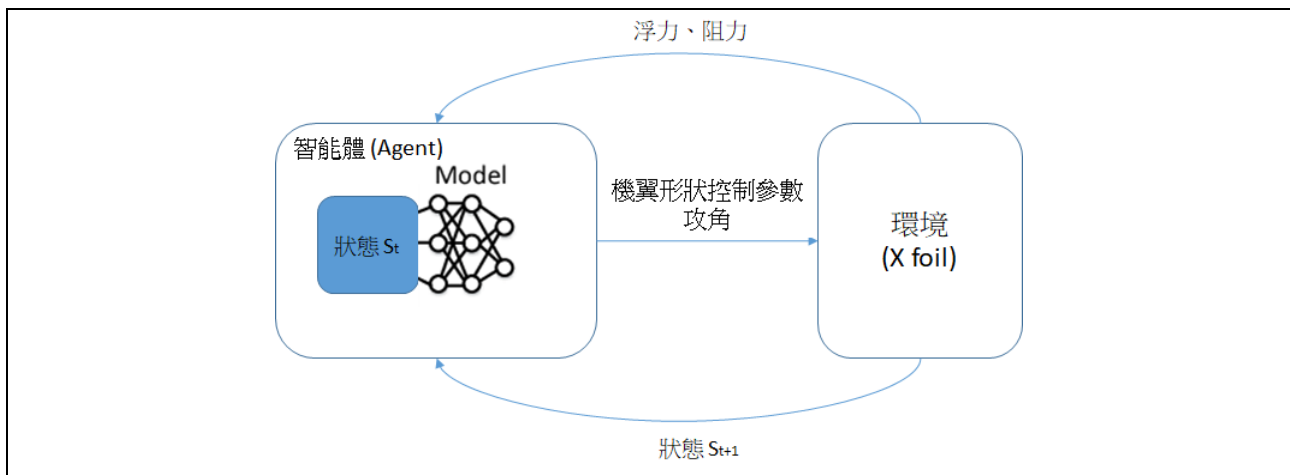
負載與台電輸配電是很複雜的過程，由於本實驗的主軸在於葉片效率，不需量測絕對功率大小，僅需要知道相對好壞，因此本研究以量測發電機感應電動勢為主要指標，其中發電機為有刷直流馬達，實驗前所有相關元件均經過篩選，降低元件差異所帶來的誤差。

伍、研究過程與結果

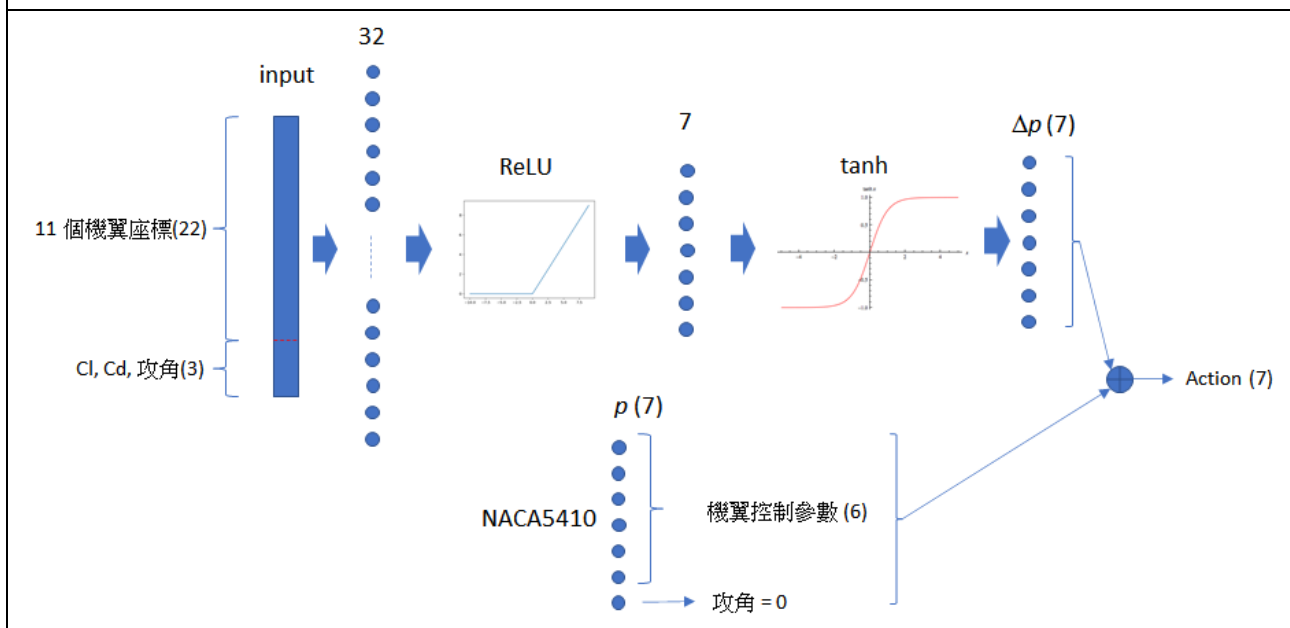
人工智慧架構說明

本研究計畫應用人工智慧於葉片剖面設計之架構如圖五-1，我們套用增強式學習 (reinforcement learning) 的框架，將 Xfoil 銜接到增強式學習的“環境”，但由於 Xfoil 在數值計算上會遇到無法收斂之問題，因此在訓練上我們是用較簡單的“隨機搜尋”來實現。

1. 智能體(Agent)：智能體內為一待訓練之類神經網路，架構如圖五-2 所示，網路的輸入為狀態 (state)，一共有 25 個神經元，其中 22 個神經元為機翼翼型 11 個抽樣點之座標 (x, y)，兩個神經元為 C_l , C_d ，以及攻角。類神經網路之輸出為 Δp (六個機翼形狀控制參數加上攻角)，真正的 Action 為 $p + \Delta p$ ，其中 p 是 NACA5410 之機翼形狀控制參數與零攻角組合而成。



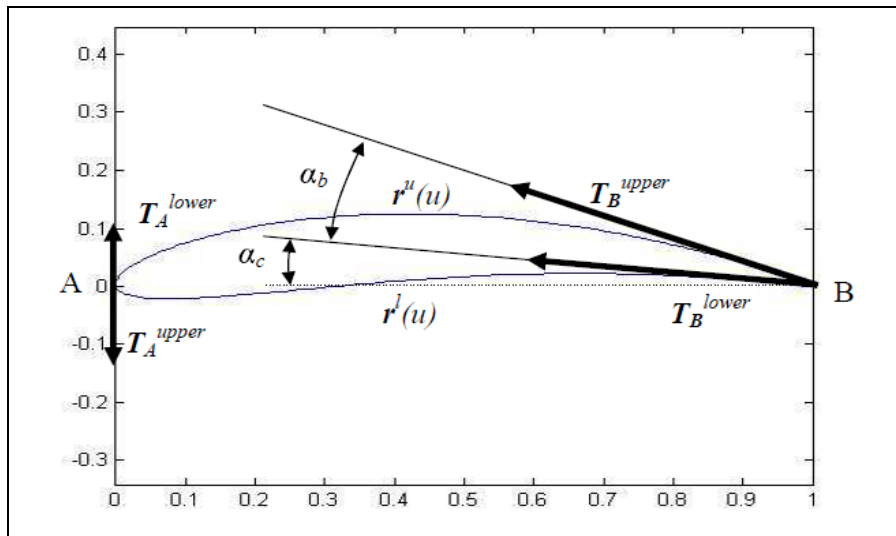
圖五-1、OpenAI 訓練流程圖



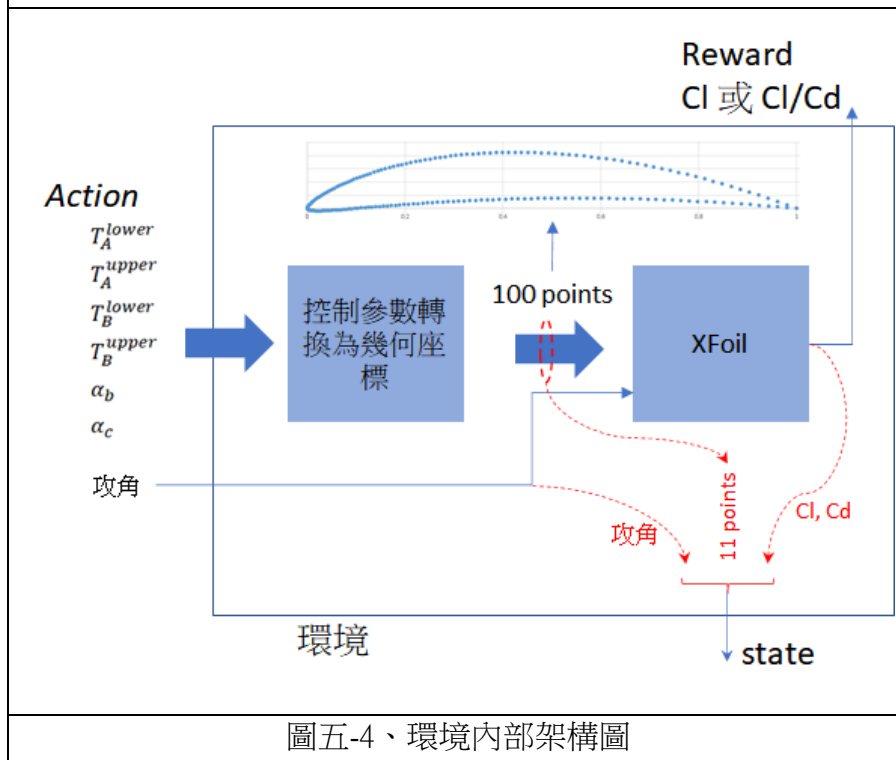
圖五-2、智能體內之類神經網路架構

2. 環境: 環境包含兩個模組，機翼控制參數轉換機翼幾何座標 [10] 與 Xfoil，二者都是開

源程式，其中機翼控制參數與機翼幾何形狀關係如圖五-3 所示，控制參數為 T_A^{lower} 、 T_A^{upper} 、 T_B^{lower} 、 T_B^{upper} 、 α_b 、 α_c ，環境的細部架構如圖五-4 所示。



圖五-3、機翼控制參數與機翼幾何形狀關係



圖五-4、環境內部架構圖

人工智慧訓練說明

本研究之訓練法採用隨機搜尋，如圖五-5 所示，**weight** 為圖五-2 內所述類神經網路之參數。完成圖五-5 的計算即可產生一回合的訓練結果，因為 **weight** 是隨機產生，所以對應出來的機翼幾何形狀就不一定是已知範圍，不過卻也可能引起 XFOil 數值無法收斂，如果遇到該情況，我們會在該組 **weight** 附近重新找一組 **weight**，直到 XFOil 數值收斂為止，超過 1000 都找不到，該 **weight** 就直接放棄，直接進行下一組 **weight** 的測試。此外，為了數值的穩定，我們以 NACA5410 翼型為起始點，先求出 NACA5410 對應的機翼控制參數，在該組參數附近隨機產

生一組初始狀態 (state)，再以該狀態展開後續的訓練過程。



每個回合訓練可以找到一個局部最佳值，為了得到更好的結果，本研究進行了二十回合的訓練，以求得更佳的結果。

研究過程根據前述之「參、研究目的」的四個部份分別闡述：

一、 研究一：使用人工智慧設計出效率高效率之翼型，並測試其功角與升力之關係。

(一) 實驗說明：人工智慧已廣泛應用到各個領域，最著名的就是下圍棋：當電腦看到棋盤上現在的狀況，會自動算出最佳的落子位置，同樣的道理，我們想試著讓電腦在得知一定的風速條件下，可以算出最佳的機翼形狀與攻角。

(二) 實驗器材：電腦、Xfoil、OpenAI Gym、python、風洞測試機、Autodesk Fusion 360

(三) 實驗步驟：

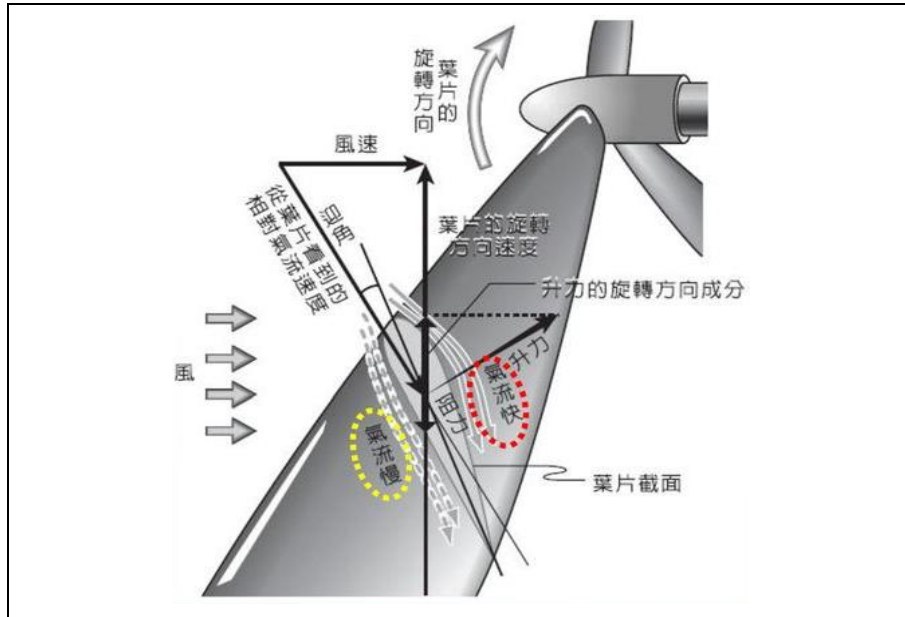
1. 設計程式，使它能夠循環訓練，如圖五-1 所示。第 10 頁述及智能體由一類神經網路所組成，會以狀態為輸入，並產生一組機翼設計參數，包含形狀與攻角，將這些參數傳遞至 Xfoil，計算出升力與阻力值以及“獎勵值”，經過多次的訓練，智能體最後學會產生最大獎勵值的機翼相關參數。

2. 機翼設計參數與訓練方式: 參考第 10 頁之人工智慧架構與訓練說明。

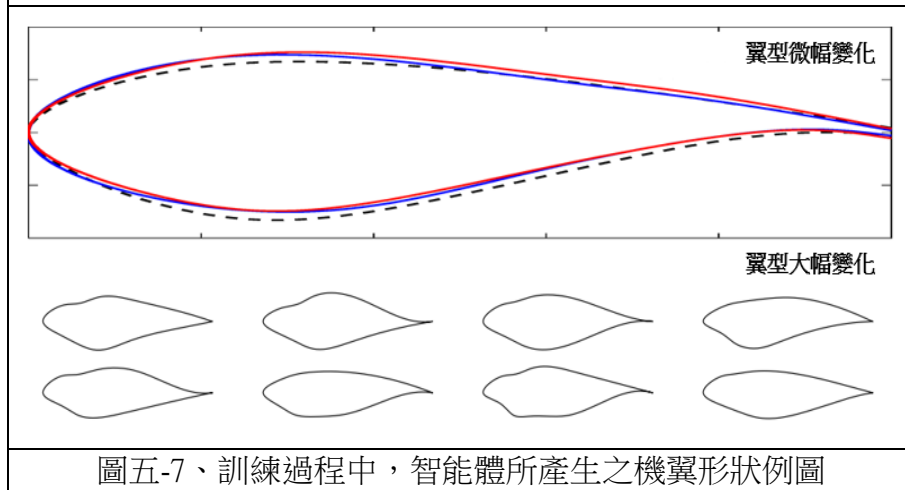
3. 定義獎勵值

由於風力與葉片的運動，真正受力的狀況如圖五-6 所示，如果只考慮升力最大，此時阻力也可能跟著變大 (由風速與葉片轉動速度所形成之夾角決定)，真正產生的轉動力量恐怕反而變小 (阻力與垂直方向的夾角小)，因此我們定義了兩種獎勵值，一是升阻比 (C_L/C_d)，另一個是升力係數 (C_L)，透過後續的實驗來了解何者是

風力發電最好的選擇。



圖五-6、真正受力情況



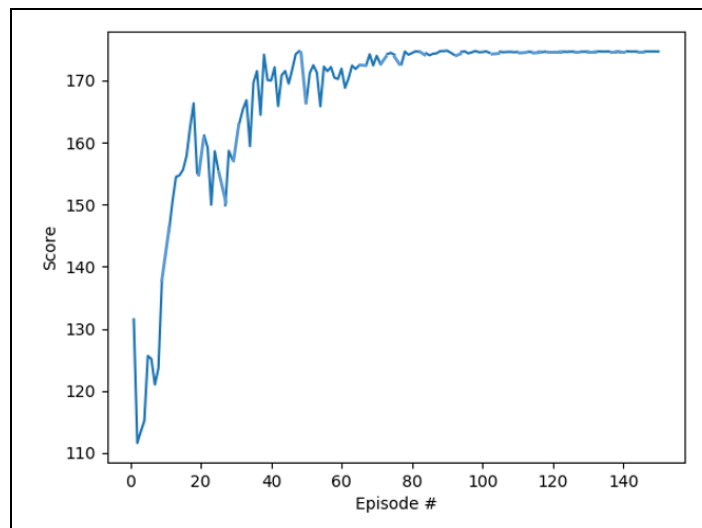
圖五-7、訓練過程中，智能體所產生之機翼形狀例圖

4. 圖五-7 為智能體在訓練過程中所產生的機翼形狀案例，由於智能體不受限於人類的經驗，因此所產生的形狀可能是人類所沒有想過的形狀。當然，雖然形狀奇怪，但仍都需要通過 Xfoil 之檢驗，確認可以計算出升力或升阻比才會繼續後面的訓練過程，否則都算是失敗形狀，需要再次找尋適當的參數值。
5. 為了有較好學習效果，我們以 NACA5410 翼型為基礎，利用人工智慧試著找升阻比最高以及升力係數最高之葉片形狀，並觀察其葉片形狀與物理之關聯性。其中，NACA5410 翼型是設計給低馬赫之機翼使用，與本實驗所需之低速環境較相近。
6. 風速條件：依照蒲福風級表，我們試著將發電條件設定在 0.01 馬赫，我們在這樣的風力條件下觀察發電效率。
7. 使用 Autodesk Fusion 360，將人工智慧訓練出來的座標輸入，並使用 3D 列印機印出。

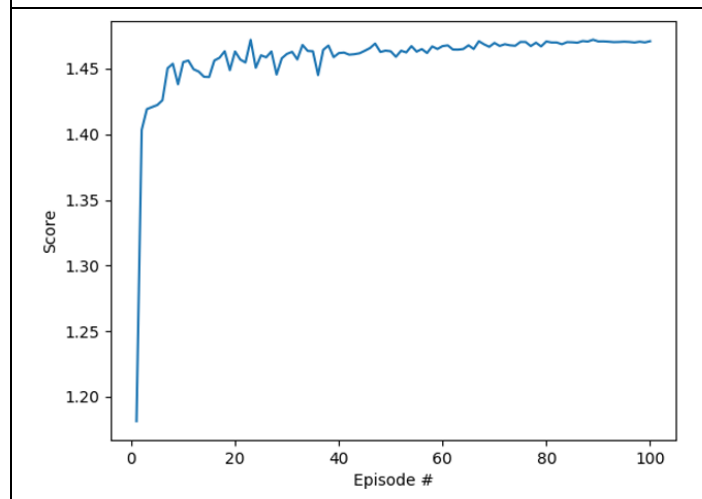
8. 將列印出來的模型放入測試段，以風速 2.4m/s (略低於 0.01 馬赫) 測試是否有亂流、升力大小、起步風速…等。
9. 將葉片插入發電機，以不同風速實際測試，並記錄穩定性與發電量。
10. 由圖五-6，風力發電葉片的夾角不僅與風向有關，需計算風向與葉片旋轉方向的合力後，在攻角的部分作調整。本實驗經計算合力後，葉片與風向夾角為 20 度。

(四) 實驗結果：

1. 人工智慧訓練：圖五-8 為以升阻比為獎勵值時訓練狀況，大約 100 次訓練後就已逐步收斂到最佳值 173.105。圖五-9 為升力係數是獎勵值時的訓練狀況，大約 60 次訓練後就已逐步收斂到最佳值 1.4721。

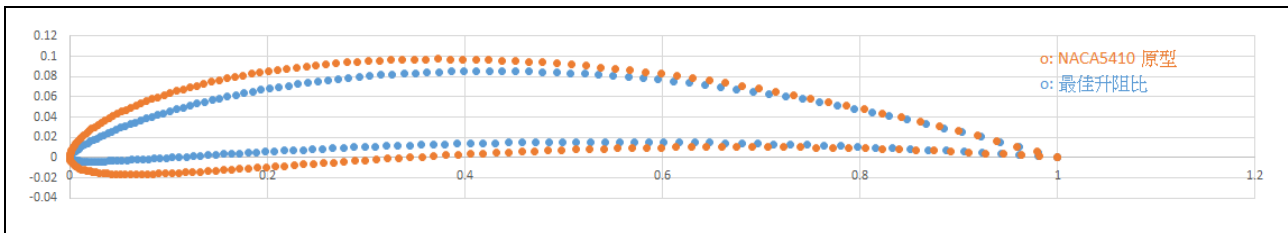


圖五-8 以升阻比為訓練目標之收斂狀況

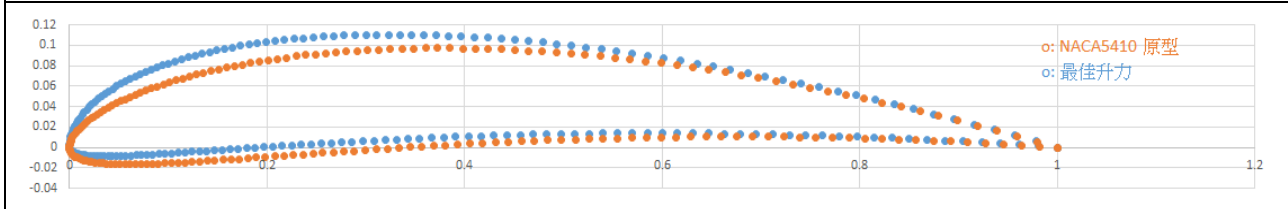


圖五-9 以升力係數為訓練目標之收斂狀況

如果以升阻比為獎勵值，經過人工智慧訓練學習所產生的葉片形狀如圖五-10 (繪製時攻角均為零度)；以升力係數為獎勵值之葉形如圖五-11。下圖座標均以翼長為準，等比例縮小到 0~1 之間。



圖五-10 NACA5410 與最佳升阻比葉片形狀之比較



圖五-11 NACA5410 與最佳升力葉片形狀之比較

2. 葉形結構與性能參考表三 (XFoil 計算之結果)

表三 NACA5410、最佳升阻比、最佳升力係數三種葉形之結構比較

	NACA5410 原型	最佳升阻比	最佳升力係數	NACA5410 原 型 3.3 度攻角	NACA5410 原 型 9 度攻角
升力係數	0.59391	0.935910	1.47210	0.94288	1.37630
阻力係數	0.00643	0.005430	0.01329	0.00639	0.01387
升阻比	92.36550	173.105000	110.76750	147.58370	99.20680
厚度	0.10069	0.071468	0.10718	0.10069	0.10069
最厚之位置	0.33314	0.392469	0.30821	0.33314	0.33314
上緣總長	1.03527	1.022881	1.05057	1.03527	1.03527
下緣總長	1.00581	1.001423	1.00294	1.00581	1.00581
上下緣比	1.02929	1.021427	1.04749	1.02929	1.02929
攻角	0°	3.31°	9°	3.31°	9°

3. 設計出二維之葉片形狀後，以 3D 列印機印出葉片，經過風洞測試量測升力值，如圖五-12；然後再依照該葉片形狀，印出更長的葉片，實際製造成風力發電裝置，用以量測發電狀況 (感應電動勢)，如圖五-13。



圖五-12 風洞實驗

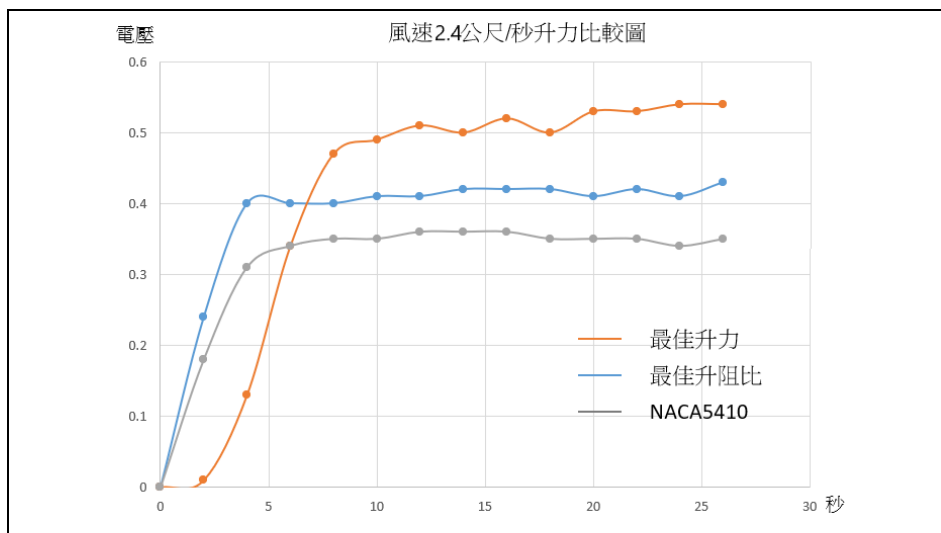


圖五-13 風力發電

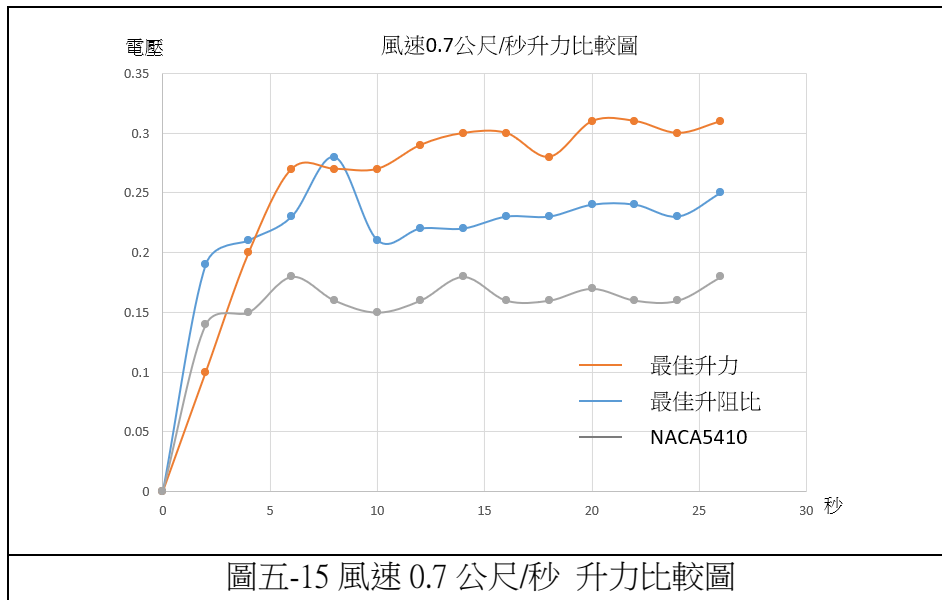
實際測試後的數據參考表四，我們可以觀察到，無論是最佳升阻比或是最佳升力係數，其升力與感應電動勢都比 NACA5410 有顯著的提升，如圖五-14、15。

表四 實際測試結果

	風洞測試 葉片重量	發電機葉 片重量	風洞測試 升力(克)	平均電動勢 (風速 0.7m/s)	平均電動勢 (風速 2.4m/s)
NACA5410 原型	18.26 克重	163 克重	1.9	0.17 伏特	0.35 伏特
最佳升阻比	13.48 克重	149 克重	2.11	0.23 伏特	0.41 伏特
最佳升力係數	15.41 克重	163 克重	2.85	0.30 伏特	0.53 伏特



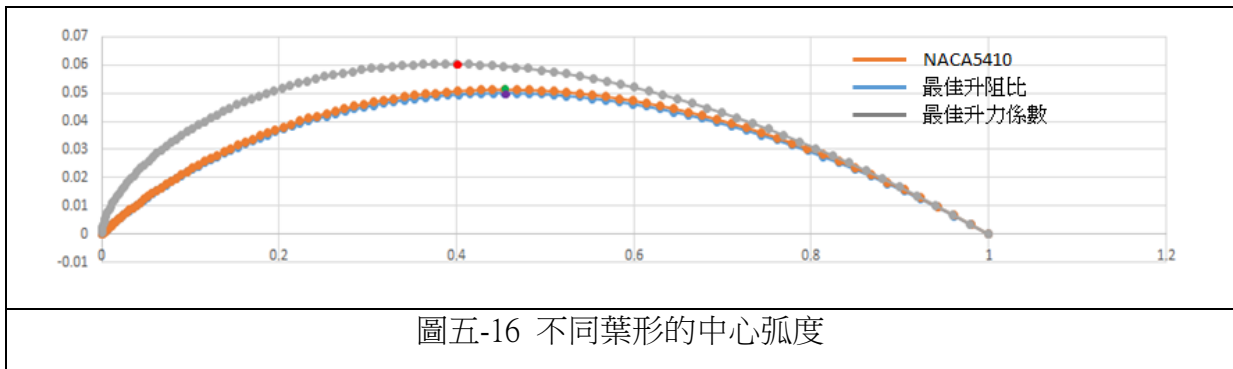
圖五-14 速 2.4 公尺/秒 升力比較圖



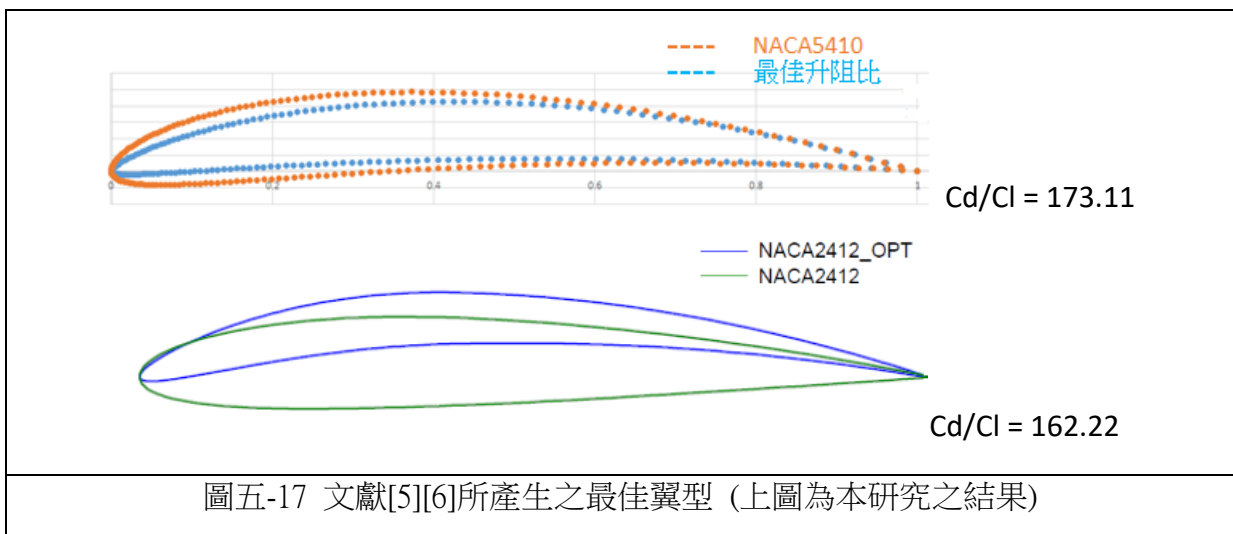
圖五-15 風速 0.7 公尺/秒 升力比較圖

(五) 討論發現：

1. 以升阻比為獎勵值之訓練結果，升力係數提升了 57%，而阻力係數降低了 15.5%，整體效率提升了 87% (即升阻比提升了 87%)。
2. 以升力係數為獎勵值之訓練結果，比原始 NACA5410 的升力係數 0.59391 提升了 149%，然而，阻力係數也從原本的 0.00643 提升到 0.01329。
3. 我們可以觀察到，表三藍色字部份，如果將 NACA5410 原型之攻角改成最佳升阻比的攻角，即 3.31 度，其升阻比也提升到 147.5837，卻又不如最佳升阻比的 173.105 那麼大；若 NACA5410 的攻角改成 9 度，其最大升力只到 1.3763，也比最佳升力之翼型小。
4. 觀察最佳升阻比的葉片形狀，我們發現葉片的**前端變尖了、厚度變薄**，這對降低阻力的確有幫助，此外，為了不讓阻力增加，攻角只微幅增加 3.31 度 (在一般例子中，攻角越大越容易增加阻力)。
5. 最佳升力的葉片形狀則是**增加上緣長度**來獲得較佳的升力，此外攻角也增加至 9 度 (訓練時人為設定的極限為 9 度)，其代價是阻力也增加了兩倍之多。
6. 觀察葉型弧度，如圖五-10 NACA5410 與最佳升阻比的弧度、最大值幾乎重疊，而最佳升力係數的結果，弧度變大，而且最大值往前移 (0.45 移到 0.4 附近)，這顯示最佳升力係數之葉形的升力，不少是靠葉形的改變獲得的。



7. 與文獻[5][6]相比，我們發現機翼幾何特性與本研究有相似之處，即，葉片變薄、前緣變尖，需要產生弧度，如圖五-17。



8. 我們發現，儘管人工智慧本身並不具備物理知識，然而經過訓練之後所得到的最佳化葉形，均與物理特性相符：若以升力係數為目標，則人工智慧的決策會是**增加弧度、增加上緣之總長度並降低下緣總長度、增加攻角**；若目標是最佳升阻比，則會**縮減厚度、前緣變尖、上下緣長度變短，攻角適度的增加**以避免提升阻力。
9. 觀察圖五-14、圖五-15，發現雖然在發電穩定後，最佳升阻比的電壓比最佳升力係數低，但也發現最佳升阻比的啟動速率比最佳升力係數還來的快，表示阻力的確會影響到啟動的加速度，但最終還是最佳升力係數轉速最快，因為升力係數較高的緣故。
10. 由實測可以得知，風洞實驗所得到的升力，其比值在風速 1.2m/s 時有很高的相似性；而在風力較弱時則誤差較大，有可能是風場較不穩定所致（圖五-15 也顯示電壓有高低起伏不太穩定之現象）

表五 風洞與風力發電機的測試比較表

	風洞測試 升力(克)	與原型 之比例	平均電動勢 (風速 0.7m/s)	與原型 之比例	平均電動勢 (風速 2.4m/s)	與原型 之比例
NACA5410 原型	1.9	-	0.17 伏特	-	0.35 伏特	-
最佳升阻比	2.11	1.11	0.23 伏特	1.35	0.41 伏特	1.17
最佳升力係數	2.85	1.5	0.30 伏特	1.76	0.53 伏特	1.51

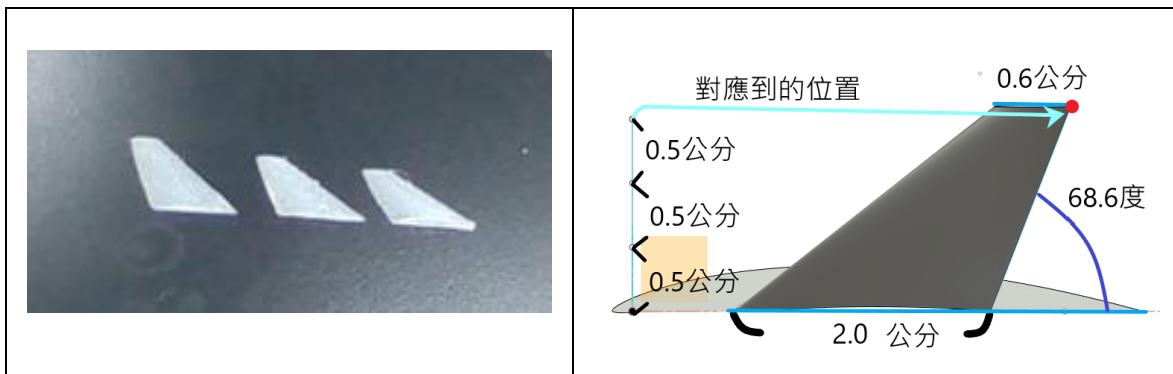
二、研究二：探討漸縮翼、小翼對發電之影響如何

(一) 實驗說明：在常見的機翼設計中，常看到利用翼尖小翼的設計，以抵銷翼尖渦流，增加升力。因此本研究將嘗試改變翼尖的大小 (漸縮翼)，如圖五-20 所示，並安裝小翼，觀察發電機之感應電動勢。小翼的實驗概念如圖五-21 所示，當一個升力為 L 之葉片加上一個升力趨近於零之小翼 (面積很小)，最後升力會變成多少? 如果升力增加，則表示該小翼消除了翼尖渦流。

(二) 實驗器材：珍珠板、3D 列印機、發電裝置、電力量測、風扇、整流器

(三) 實驗步驟：

1. 使用 Fusion 360 設計出 0.5、1.0、1.5 公分的小翼，如圖五-18
2. 將機翼的漸縮比 λ 調整成 0.33，以利與原型(1.0)做比較
3. 將實驗組(無小翼)與對照組(有小翼)葉片裝上風力發電機組實際運轉
4. 觀察不同風速 2.4 公尺/秒與 0.7 公尺/秒之發電狀況

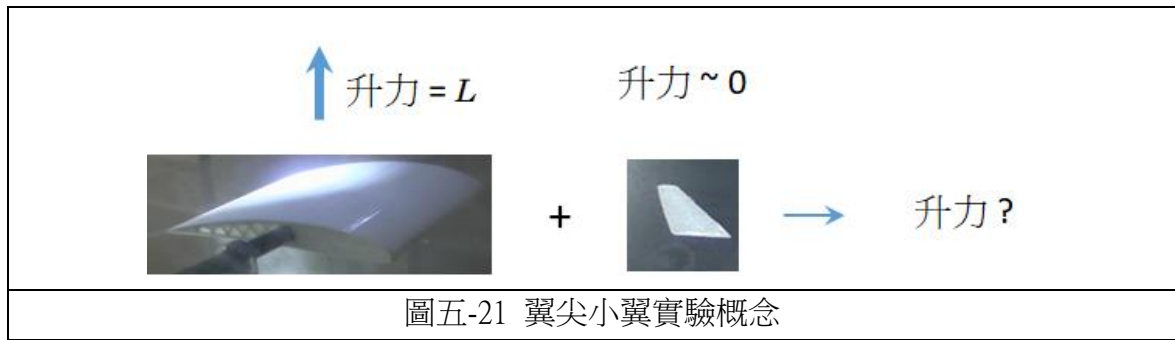


圖五-18 不同種類的小翼

圖五-19 翼尖製作說明



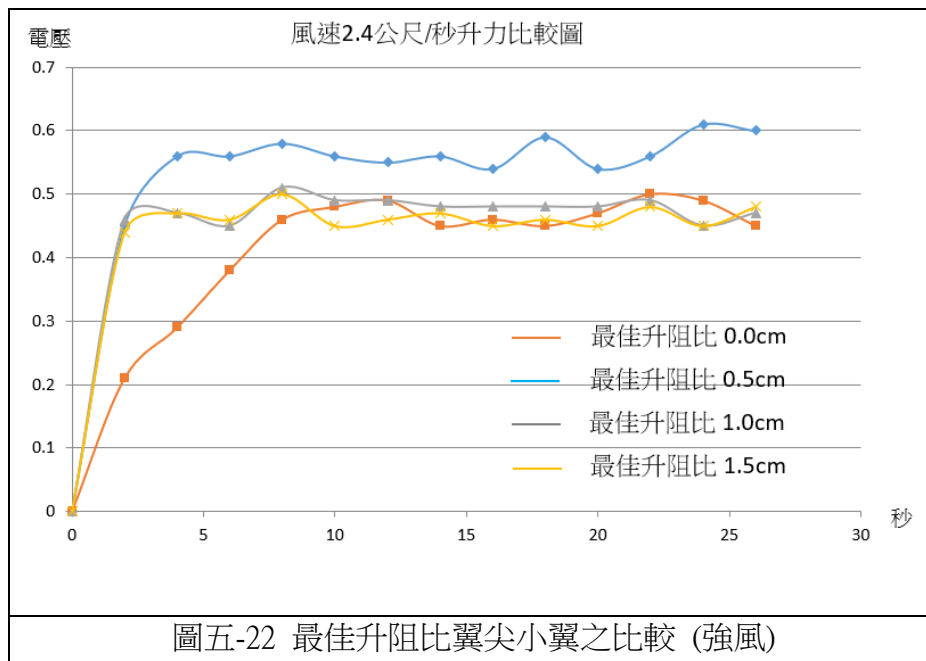
圖五-20 漸縮翼之形狀

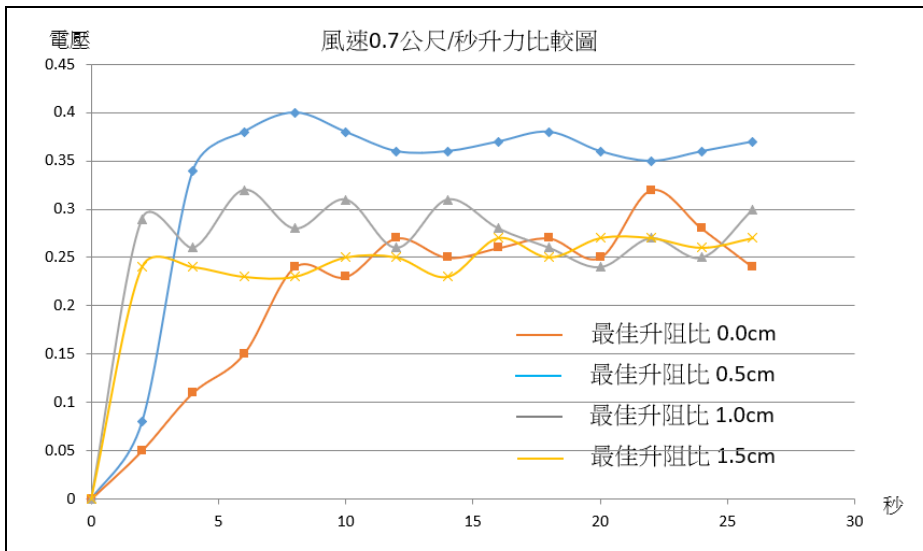


(四) 實驗結果與討論：

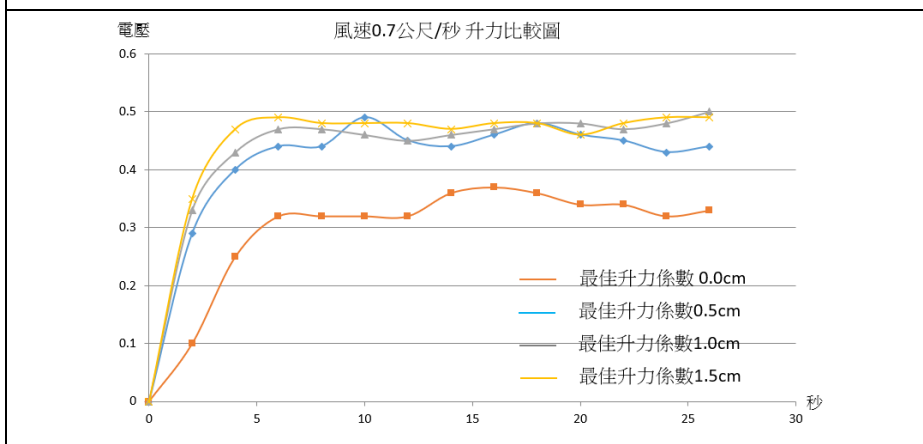
表六 翼尖小翼實驗結果比較表

	重量(克重)	平均電動勢 強風(2.4m/s)	平均電動勢 弱風(0.7m/s)
最佳升阻比 無翼尖	83.0	0.47	0.25
最佳升阻比 0.5 公分	84.6	0.58	0.38
最佳升阻比 1 公分	85.2	0.49	0.28
最佳升阻比 1.5 公分	86.5	0.47	0.27
最佳升力係數 無翼尖	93.0	0.65	0.34
最佳升力係數 0.5 公分	93.6	0.73	0.45
最佳升力係數 1 公分	94.2	0.77	0.47
最佳升力係數 1.5 公分	95.5	0.76	0.48

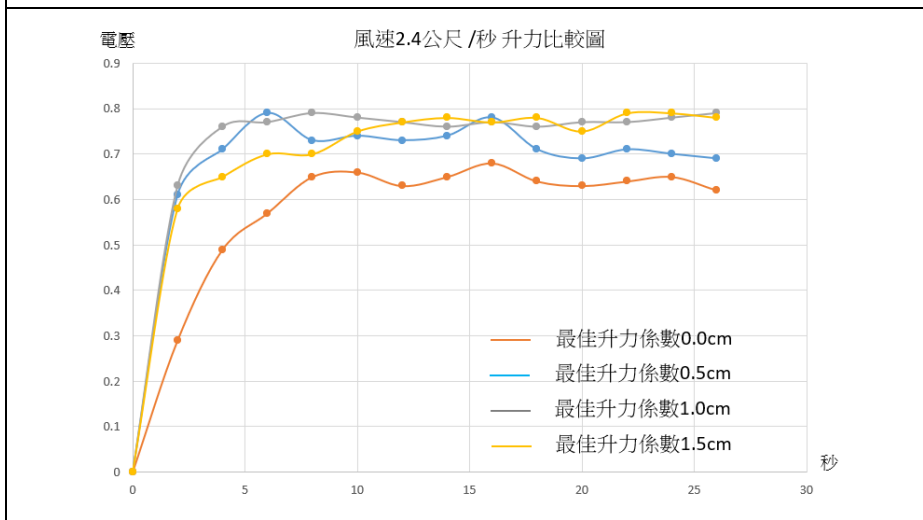




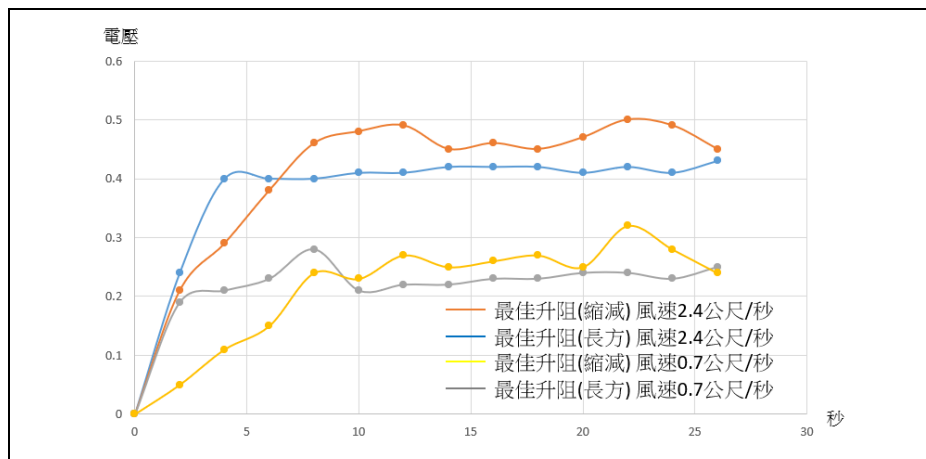
圖五-23 最佳升阻比翼尖小翼之比較 (弱風)



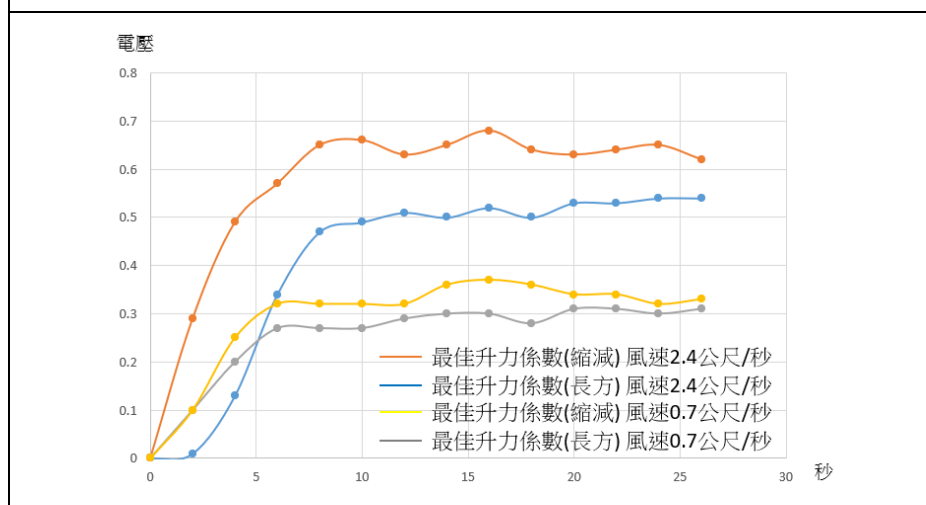
圖五-24 最佳升力係數翼尖小翼比較(弱風)



圖五-25 最佳升力係數翼尖小翼比較(強風)



圖五-26 最佳升阻比長方翼與漸縮翼之比較



圖五-27 最佳升力係數長方翼與漸縮翼之比較

1. 我們發現，將翼型縮小再加上小翼，其發電機之感應電動勢比長方翼好很多，由圖五-22 顯示，最佳升阻比之電動勢電壓為 0.4 伏，改成漸縮翼與安裝小翼之後，電壓居然可以提升至 0.57 伏左右，有相當大之長進。在圖五-24、25、26 也都能觀察到，小翼發揮了顯著的效果。
2. 然而，部分實驗的結果也超出預期的好，探討其原因在於：降低渦流影響並提高升力後，其穩定轉速不一定都相同，而造成圖五-6 所述之攻角不同，因此我們可以看到結果不僅是翼尖渦流的影響，也包含了攻角的影響。
3. 同時，我們也發現原先未加翼尖小翼時，最佳升力係數之葉片從靜止到穩定狀態所需要的時間較長，但加了翼尖小翼後，啟動時間大幅減少。
4. 若是比較漸縮翼與長方翼之差別，其結果可參考圖五-26、27，由這兩張圖可看出，即使無小翼，漸縮翼仍對升力的提升產生顯著作用。
5. 在最佳升阻比翼形部份，我們發現翼尖長度在 0.5 公分效果最明顯，而 1、1.5 公分的小翼在弱風時啟動速率較快，原因可能是因為翼尖較大時，翼尖渦流減少而

使啟動速率增加，但也加大質量，小翼面積也增加了阻力，因此發電機感應電動勢並不如預期。由於葉片在高速運轉時，翼尖的風阻會變大，如果可以將翼尖的攻角趨近於垂直則可改善。

6. 在最佳升力翼形部分，我們發現翼尖長度均能發揮效用，然而由於這已經牽涉三維流場，相當複雜，較難以直觀的討論得到結論，但可以肯定的是，小翼與縮小翼在風力發電機上都有效果。

三、研究三：探討葉片質量與質量分布影響機台穩定度之關係

(一) 實驗說明：將繩子尾端放置重物並連續用繩子形成圓周運動，接著停止施力，會觀察到有放重物時，會比沒放重物更久才停止運動。這令我們好奇，將質量分布在不同位置是否會影響到其穩定度，以及在無風的狀態下，是否能盡可能維持發電？

(二) 實驗器材：發電裝置、電力量測、風扇

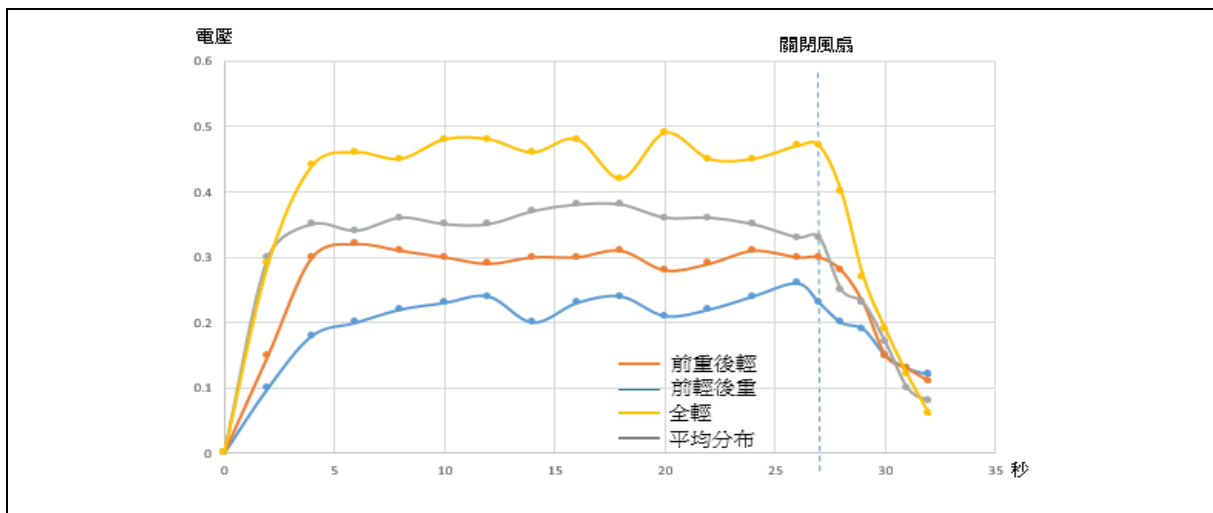
(三) 實驗步驟：

1. 本研究為公平，採用長方型翼型而不是漸縮翼，前（靠近發電機側）後（遠離發電機側）每邊分別使用 5 克的金屬放置在翼尖端。
2. 由於最佳升力係數之剖面最寬，較容易塞入金屬，因此挑選最佳升力係數當作本次實驗之翼型
3. 我們在葉片做不同配重：平均、輕、前輕後重、前重後輕，並實際運轉
4. 觀察運轉時的穩定度，並記錄風速不穩時，感應電壓的狀況。

(四) 實驗結果與討論：

表七 配重結果比較表

	強風 (2.4m/s)	所需時間 靜止到穩定	關電風扇 5 秒 後之電壓(強風)	穩定到關電扇 5 秒後之電壓差
最佳升力係數平均分布	0.30	2 sec	0.11	0.19
最佳升力係數全輕	0.46	4 sec	0.06	0.4
最佳升力係數前輕後重	0.23	6 sec	0.12	0.11
最佳升力係數前重後輕	0.36	4 sec	0.08	0.28



圖五-28 葉片配重之比較圖

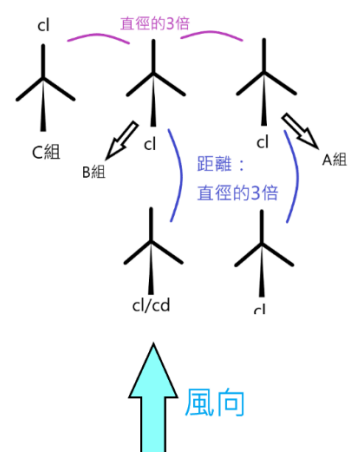
1. 由圖五-28 顯示，全輕與平均分布、前輕後重、前重後輕在平均電壓的部分存在著顯著差異，我們認為是因為轉動慣量的關係所造成的，其中轉動慣量由大至小分別為：前輕後重、前重後輕、平均分布、全輕，與感應電動勢強相關。
2. 四者在關閉風扇後電壓的差異，顯示轉動慣量不同，儲存的旋轉動能也不同因此電壓失去的速率也不同。而全輕與其他葉片的電壓差距則可驗證此論點。

四、研究四：不同葉片之發電機組合，並觀察其感應電動勢之變化

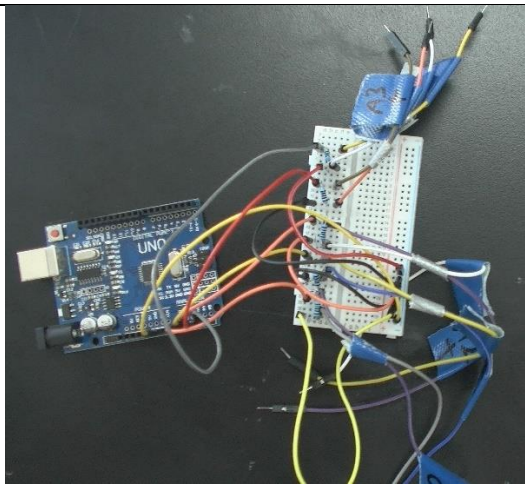
(一) 實驗說明：當發電機排列有前後重疊時，如圖五-29 所示，前述之升力最佳與升阻比最佳葉片對發電機組合是否有差異？



圖五-29 直線型風力發電排列機組



圖五-30 發電機排列說明



圖五-31 Arduino 配線圖



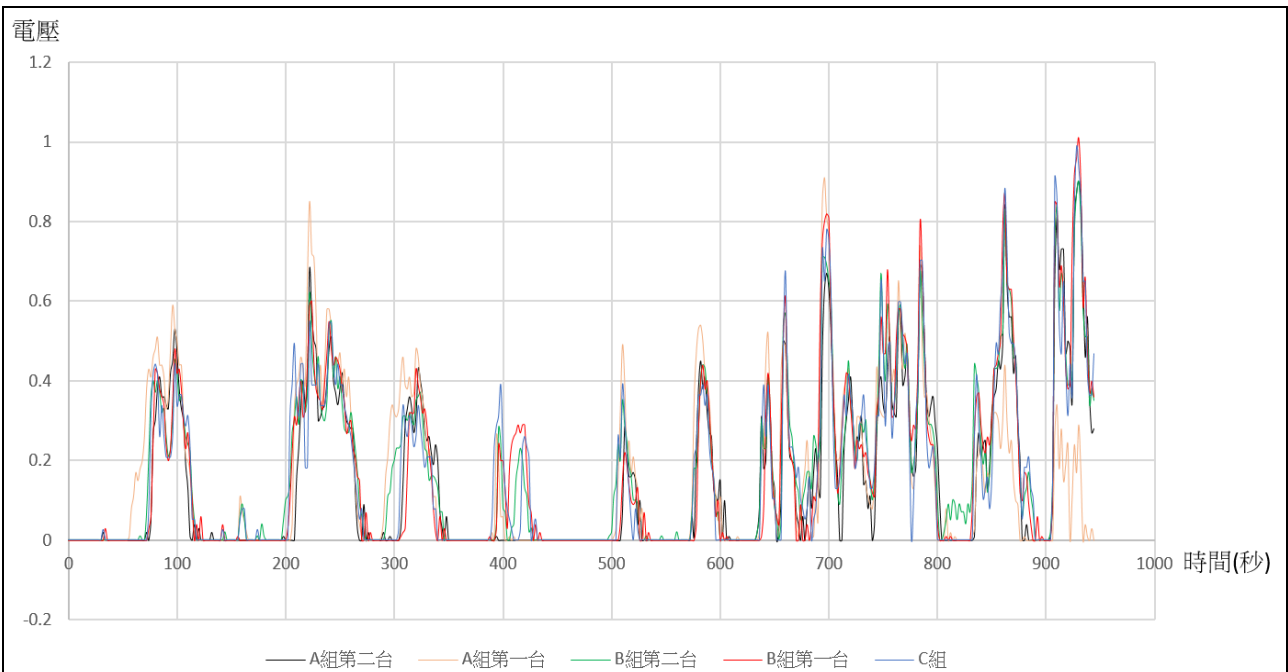
圖五-32 製作 Arduino 機殼

(二) 實驗器材：發電機、Arduino Uno、風速計

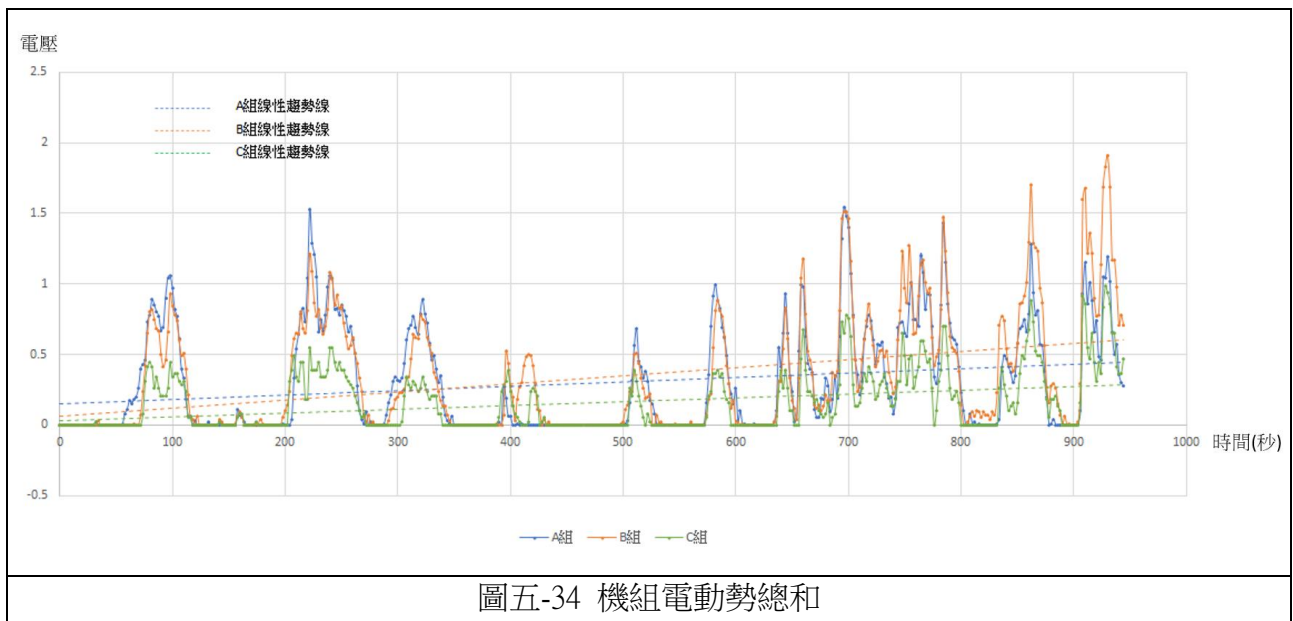
(三) 實驗步驟：

1. 為了得到充足的風力，我們在學校空曠處利用自然風測試。
2. 將 Arduino Uno 接上發電機，配線如圖五-31 所示。
3. 將發電機擺放 15 分鐘，並將 A、B、C 組同時測試，以確保其公平性。
4. 測試同時測量風速，並取平均值，並比較實驗結果

(四) 實驗結果與討論：



圖五-33 各個發電機產生之電動勢



表八 發電組合結果比較表

	第一台發電機 平均穩定電壓	第二台發電機 平均穩定電壓	平均電壓 總和	電壓總和
A 組	0.151	0.146	0.297	140.49
B 組	0.162	0.160	0.322	156.83
C 組	無	0.159	0.159	75.01

1. 由實驗可以觀察到，A 組 1 號機之電動勢最高，但二號機感應電動勢只有 0.146V，和對照 C 組的二號機 0.159V 差了將近 0.013V，我們認為**最佳升力係數的阻力較高，阻擋到後方的發電機，導致發電量較小**，因此我們認為最佳升阻比是比較好的選擇。
2. B 組 1 號機雖然沒有最大之感應電動勢，但因為最佳風阻比的設計，使風阻係數比 A 組 1 號機低，因此造就了 B 組 2 號機之電動勢比 A 組 2 號機之電動勢來得高，在總和部分，B 組總電動勢高於 A 組，這說明了最佳升阻比之葉片設計仍具有優勢
3. 依照實驗結果，我們認為在設計風場時，**最佳升阻比因為阻力較小，適合在前段，而最佳升力係數雖然阻力較大，但在弱風時發電量比最佳升阻比還要多**，因此適合放置在後段。
4. 承第三點，依照同樣的道理，若將最佳升力係數加裝小翼，由於阻力降低，一樣可以設計出和 B 組相同效果的風力農場。
5. 由圖五-34 可以發現，原先 A 組表現較 B 組優越，但在 300 秒後即被超越，而在

300 秒前平均風速為 0.7m/s，而之後平均風速為 4m/s。我們認為最佳升力係數在風較大時阻力比最佳升阻比還大，因此表現逐漸被最佳升阻比超越。

6. 雖然實際風力發電機在安裝時不一定會排成一直線，但在台灣，風力除了需要發電外，也擔任了氣候調節、吹散霧霾…等角色，風力發電機之風阻係數仍不宜太高，否則會造成天然資源的損耗。

陸、討論

- 一、經過訓練之後所得到的最佳化翼型，均與物理特性相符：儘管人工智慧本身並不具備物理知識，然而若要求升力係數最佳，則人工智慧決策會是增加弧度、增加上緣之總長度並降低下緣總長度、增加攻角；若目標是最佳升阻比，則會縮減厚度、前緣變尖、上下緣長度變短，攻角適度的增加以避免提升阻力。
- 二、在最佳升阻比翼形部份，翼尖長度在 0.5 公分效果最明顯：小翼長度為 1、1.5 公分在弱風時啟動速率較快，可能是因翼尖較大時，翼尖渦流減少而使啟動速率增加，但也因面積增大，使小翼增加阻力，因此發電機感應電動勢並不如預期，如果將翼尖的攻角趨近於垂直則可以改善。
- 三、加了翼尖小翼後，啟動時間顯著減少：原先未加翼尖小翼時，最佳升力係數之葉片從靜止到穩定狀態所需要的時間是較長的。我們認為，最佳升力係數在未加小翼的情況下，由於阻力較大，使啟動時間增加，但增加小翼後，因為渦流的抵銷使阻力降低，導致啟動時間減少。
- 四、由於轉動慣量的關係，重量分布可產生葉片不同之儲存能量：由研究三可知，全輕、平均分布、前輕後重、前重後輕在平均電壓的部分存在著一些差距；而在關閉風扇後電壓的變化也可說明儲存能量的不同。因此，葉片在沒有加任何重量的情況下，電壓失去的速率也是最快的。
- 五、最佳升阻比與最佳升力之選擇可以擴大適用範圍：例如最佳升阻比不僅對發電機組之組合有一定的貢獻，如研究四之結果，也能使風力在發電過程之損耗減少，最終也能降低對環境的負面影響。
- 六、風場設計之建議：依照研究四的實驗結果，我們認為在設計風場時，阻力較小的最佳升阻比因為阻力較小，適合在前段，而最佳升力係數雖然阻力較大，但在弱風時發電量比最佳升阻比還要多，因此適合放置在後段。

柒、結論

- 一、目前我們僅能以二維的葉片剖面設計出發，藉由人工智慧來輔助找尋最佳升力及最佳升阻比之剖面。透過風洞之實驗，發現在理論值與實驗值的趨勢是相似的。
- 二、接著將葉片實際裝到發電機上，透過電動勢的量測來觀察發電狀況，發現電壓與風洞實驗中的結果吻合。
- 三、葉片的前端變尖了、厚度變薄與減少攻角可以降低阻力；而增加弧度、增加上緣之總長度並降低下緣總長度、增加攻角可以增加升力。
- 四、我們靠著漸縮翼與翼尖小翼的實驗，發現**最佳升阻比適合 0.5 公分的翼尖，而最佳升力係數適合 1 公分的翼尖**。翼尖的長度不宜過長，否則阻力會過大，使電動勢減少。
- 五、除了幾何形狀，我們也探討了配重，發現轉動慣量會影響到平均電壓與無風時失去電壓的速率，因此必須依照實際狀況來進行配重。
- 六、在配置排列實驗中，最佳升阻比組合較適合放在最前面；而最佳升力係數組合因為阻力較大，比較適合放在後方。

捌、貢獻與延伸應用

- 一、本研究提出利用人工智慧來設計風力發電機葉片剖面形狀之方法，經由實驗，也證實了理論與實驗有一定程度的一致性；由於三維流場之計算相當複雜，本研究尚未能對三維流場進行精確的計算，但我們相信未來一定可以利用人工智慧的技巧在三維流場上，得到更準確的結果。
- 二、風力發電機之葉片設計若具有更高的彈性，我們甚至可以由最佳化過程，動態地隨著風力狀況來改變葉片之條件，如調整攻角...等，來達到更有效率的綠能。
- 三、風力發電的噪音也是另一個值得探討的主題，本研究的方法若適度的調整最佳化目標，設定適當的獎勵值，即可研發出新型的低噪音葉片。

玖、參考資料及其他

- 一、科展群傑廳 <https://www.ntsec.edu.tw/Science.aspx?cat=21&a=6821>
- 二、黃樂天、黃聖言 “機翼浮力的研究” 第 26 屆科展物理科第一名 民國 75 年
- 三、林鈺騏、江岱融、林博帆 “翱翔天際” 第 46 屆科展自然科 民國 95 年
- 四、黃柏涵、陳佳瑜、蕭雅馨、陳頌潔 “如鷹展翅上騰 - 重新得力” 第 45 屆科展理化科 民國 94 年
- 五、吳佩學、紀華偉、張顧耀 “風機氣動力系統的分析與模擬” 行政院原能會委託研究計劃研究報告 民國 100 年 11 月 30 日 計畫編號 1002001INER071
- 六、吳佩學、紀華偉、張顧耀 “風機氣動力系統的分析與模擬” 行政院原能會委託研究計劃研究報告 民國 99 年 11 月 29 日 計畫編號 992001INER054
- 七、XFoil <https://web.mit.edu/drela/Public/web/XFoil/>
- 八、Ismoyo Haryanto, et al., Optimization of Maximum Lift To Drag Ratio on Airfoil Design Based on Artificial Neural Network Utilizing Genetic Algorithm, Applied Mechanics and Materials, January, 2014
- 九、Abdallah Ben Mosbah, et al., New methodology combining neural network and extended great deluge algorithms for the ATR-42 wing aerodynamics analysis, Aeronautical Journal, May 2016
- 十、Igor Rodriguez-Eguia, et al., A Parametric Study of Trailing Edge Flap Implementation on Three Different Airfoils Through an Artificial Neural Network, Symmetry, May 2020
- 十一、Andras Sobester, Andy J. Keane. “Airfoil Design via Cubic Splines Ferguson's Curves Revisited” , *AIAA infotech@Aerospace 2007 Conference*
- 十二、OpenAI Gym <https://openai.com/>

【評語】 032810

作品涉及人工智慧、三維列印、風洞實驗等多面向工具與知識，對於參考文獻有相當研究，逐一設計二維幾何、三維形狀及配重，並能利用最新之增強式學習技術與流力模擬領域軟體整合出可運作系統。但是模擬環境與實際風力發電之狀況及效能會有一定差異，例如材料、所處位置等因素，特別是尺度上的差異，可能產生相當影響，大尺度與小尺度所產生之設計或有相當差異，雖然無法以實際模型驗證大尺度風機，建議仍可以系統產生實際尺度風力發電機之設計，觀察及討論其與小尺度設計之差異。

摘要

本研究的目的是探討：運用人工智慧輔助設計風力發電機的葉片，以提升發電的效率。我們從二維葉片剖面出發，以NACA5410翼型為原型，利用XFoil翼型與人工智慧找尋最佳升力與最佳升阻比之剖面形狀，經由風洞實驗得到理論值與本文實驗具有相似的趨勢；接著我們基於該剖面形狀用3D列印製作了長方翼，也證實最佳化後的葉片表現更好；接著用漸縮翼與加裝翼尖小翼，透過實驗證實這些技巧有顯著的助益；我們也探討葉片設計的結果對配重的影響；最後，由於最佳升阻比之葉片有較低的能量損耗，排列風電機組的組合也得到更好的效果。

壹、研究動機：

國中一下時，曾經學過有關環境保育的單元，第六章提到人類為了發展而破壞環境，產生全球暖化、臭氧層破洞等問題，令我們聯想到爭論不休的能源議題：再生能源到底是否可靠？台灣處於季風氣候區，實際到現場偵測後，卻發現夏天時風力較小且不穩定，風力發電量僅占再生能源中的0.7%，這問題使我們的好奇，能否透過類神經網路等方法，找出在低風速時啟動的葉片弧形與形狀，使發電更穩定以解決缺電問題。

貳、文獻探討：

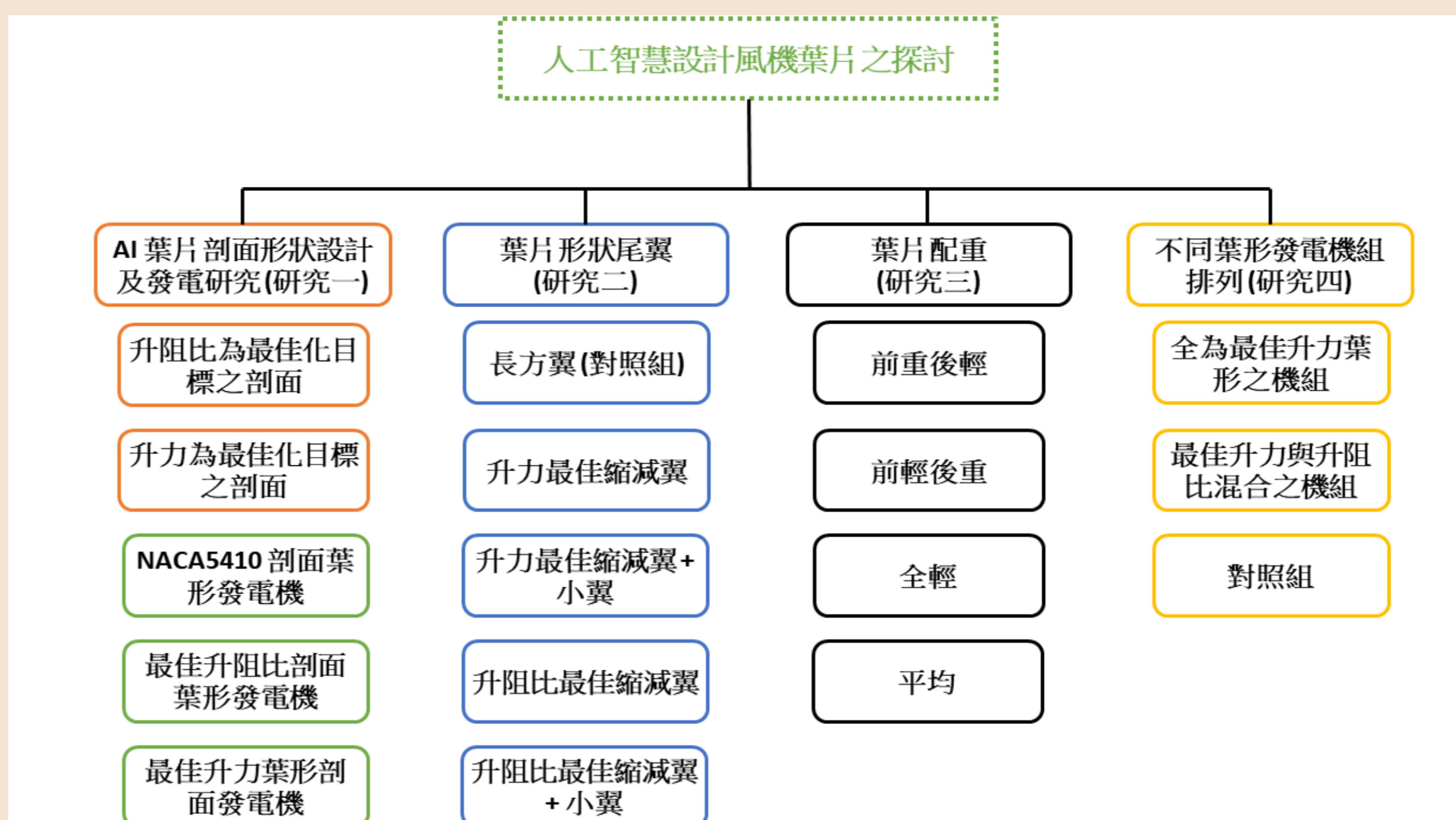
文獻 (歷屆科展)	研究內容	翼型產生方式
本研究	葉片的剖面形狀由人工智慧做出精細的設計	利用人工智慧訓練結果，3D列印機翼
機翼浮力研究[1]	迎角、弧度、風速對升力的關係	使用鐵片製作不同弧度高度與位置之機翼
翱翔天際[2]	迎風面、弧面、配重與升力之關係	使用西卡紙製作方形、圓柱、水滴形機翼
如鷹展翅上騰[3]	觀察不同弧形漸縮比、展弦比、攻角對升力影響	使用鋁片彎曲製成各種弧型機翼

文獻 (研究報告或論文)	人工智慧扮演角色	人工智慧訓練方法
本研究	尋找較佳之機翼形狀與攻角	增強式學習 (漸進隨機搜尋)
風機動力系統[4][5]	取代XFoil	監督式學習(有訓練資料庫)
ANN utilize GA[6]	建立幾何參數對應升阻係數之模型	監督式學習(有訓練資料庫)
ATR42 aerodynamics analysis[7]	建立幾何參數對應空氣動力之模型	監督式學習(有訓練資料庫)
Trailing edge flap through ANN[8]	建立襟翼長度角度、攻角之模型	監督式學習(有訓練資料庫)

參、研究目的：

- 一、如何用人工智慧訓練出在低風速條件下，以升力為主，以及升阻比高的葉片剖面，並試著了解各式葉片對發電的幫助與差異。
- 二、葉片形狀 (長方翼與漸縮翼形) 與翼尖小翼對發電的影響。
- 三、葉片配重對發電之影響。
- 四、不同葉形之風力發電機的排列對發電的影響，考慮整體機組發電。

圖三-1、研究架構圖



肆、研究器材

本實驗所使用之軟體列表：

1. Python 3.7 (base : anaconda 3)
2. OpenAI Gym
3. XFoil 1.1.1
4. Autodesk Fusion 360



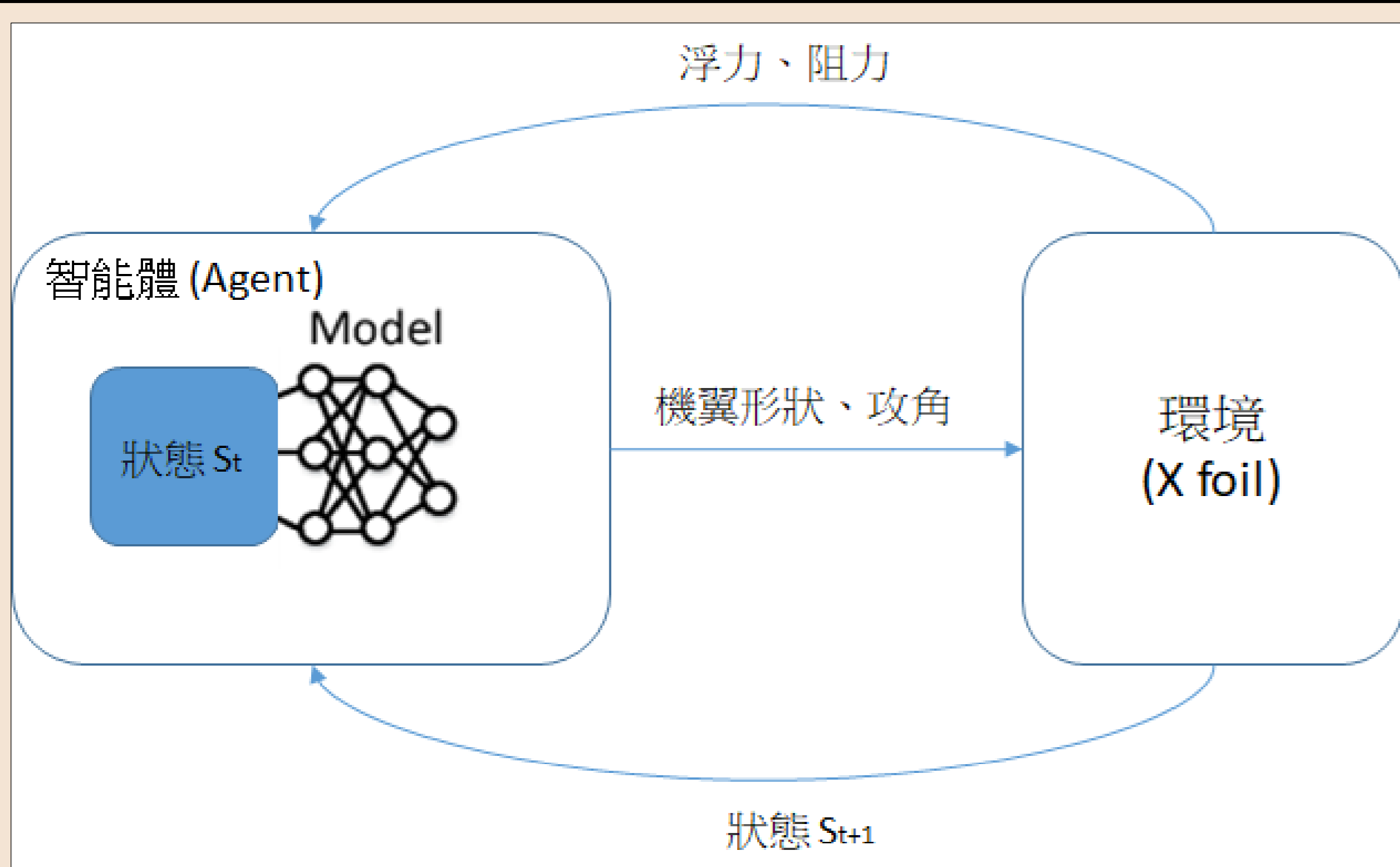
本研究使用的主要器材：

3D列印機(CR-10)	三用電表	馬達
1台	1台	6顆
無刷馬達+伺服器	遙控器	水霧製造器
1組	1台	3顆

伍、研究過程與結果

研究一：利用人工智慧設計高效率翼型及其性能探討

實驗說明：使用人工智慧設計出效率高效率之翼型，並測試其攻角與升力之關係。



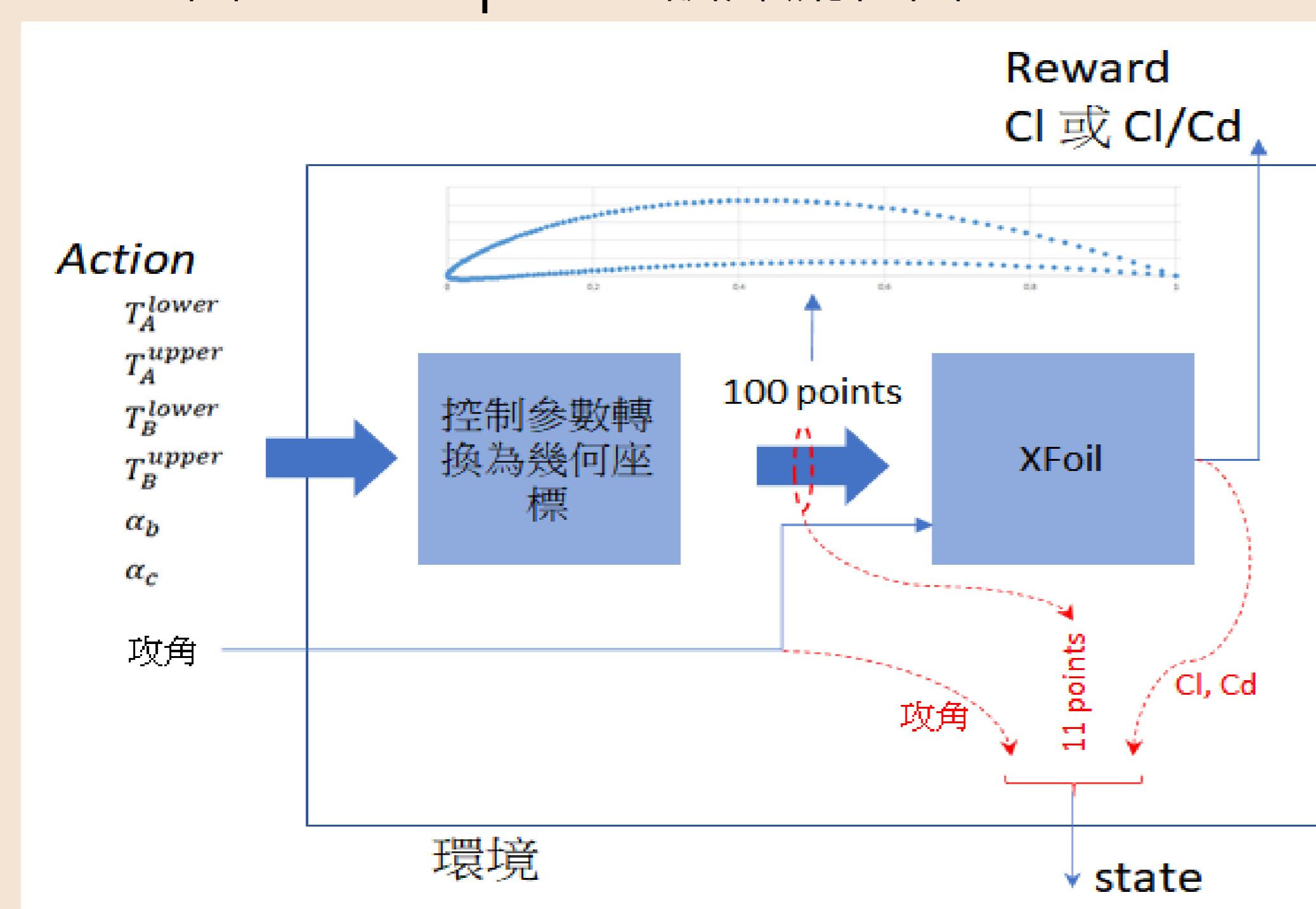
圖五-1、OpenAI 訓練流程圖



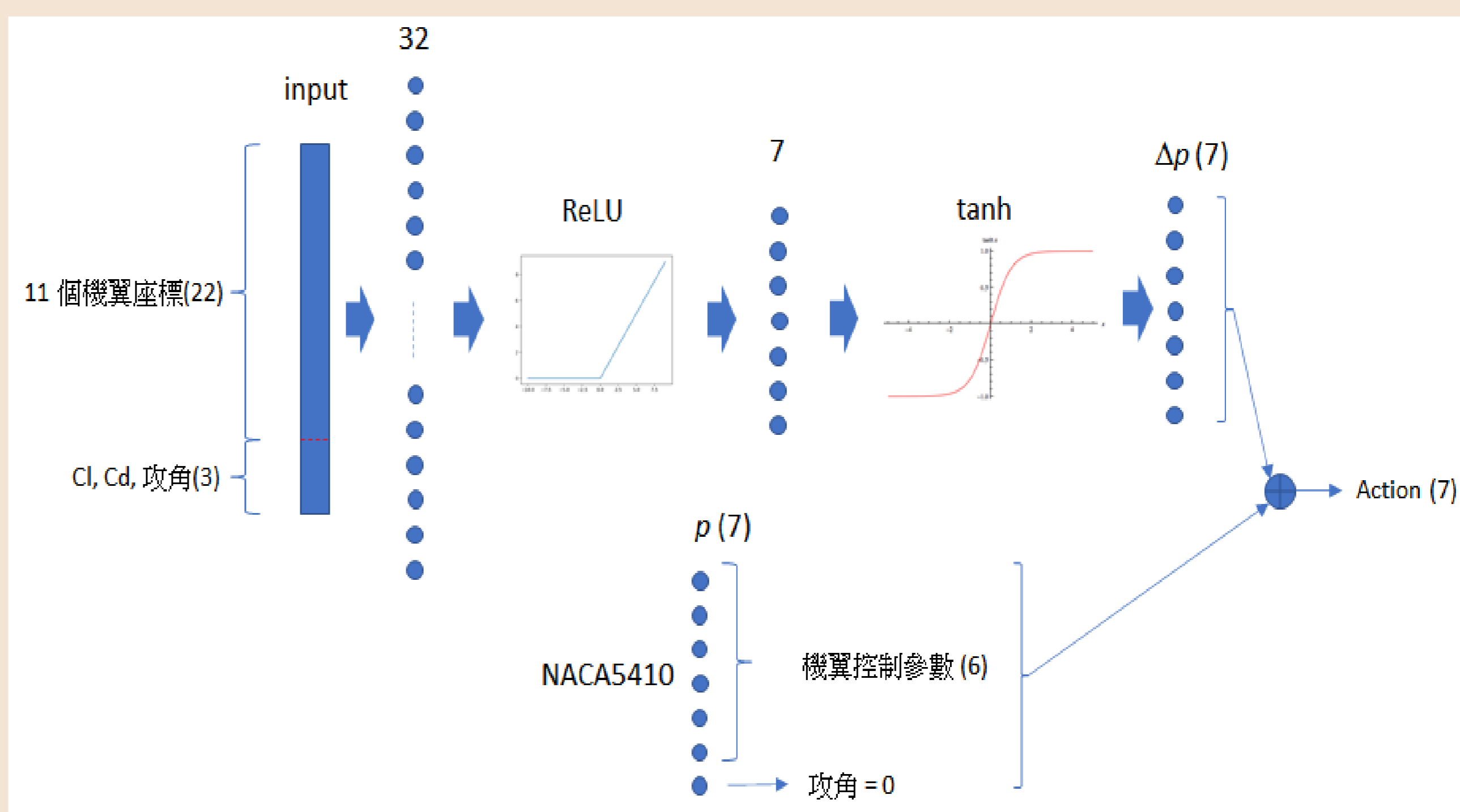
圖五-2 風洞實驗



圖五-3 風力發電



圖五-4、環境內部架構圖

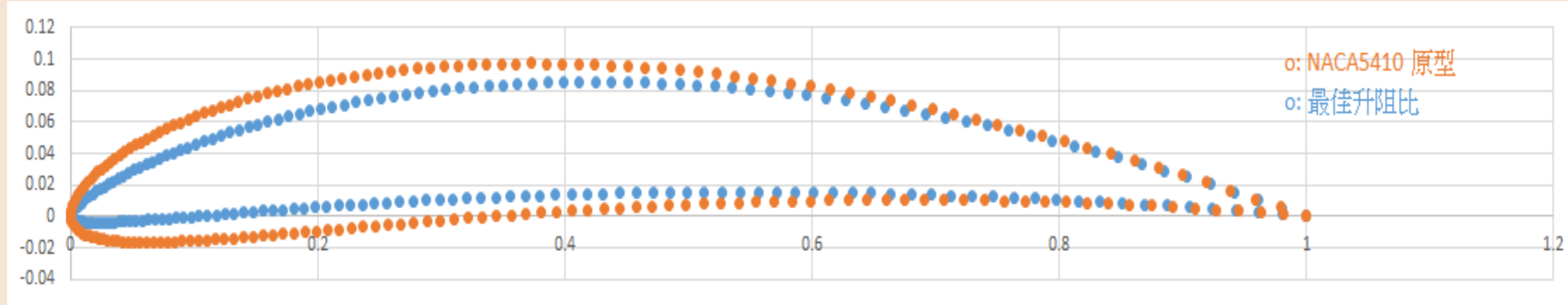


圖五-5、智能體內之類神經網路架構

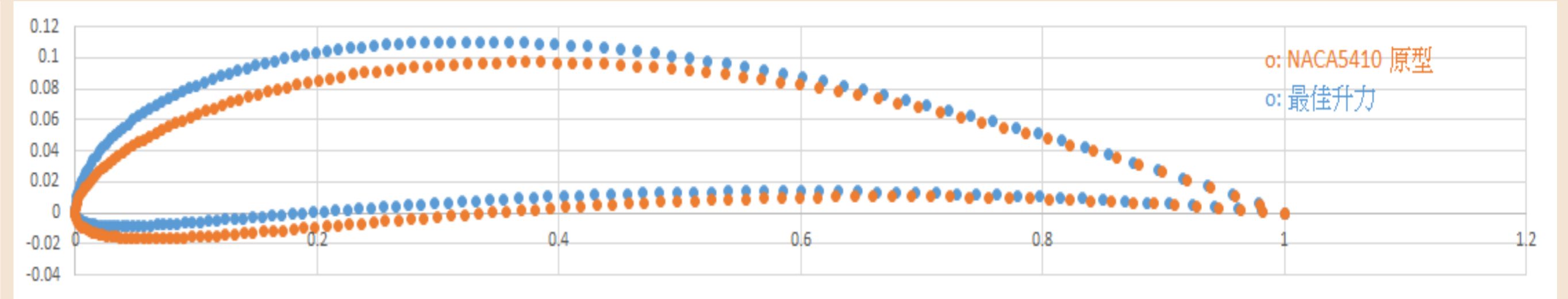
實驗器材：電腦、XFoil、OpenAI Gym、python、風洞測試機、Autodesk Fusion 360

- 實驗步驟：
- 1.設計程式，使它能夠循環訓練，如圖五-1所示。
 - 2.訓練方式：如圖五-4、圖五-5，初始狀態值與類神經網路參數隨機產生100組，經過測試留下最佳參數，以它為基礎，再隨機產生100組...，直到獎勵值收斂為止。
 - 3.我們定義了兩種獎勵值，一是升阻比 (Cl/Cd)，另一個是升力係數 (Cl)，透過後續的實驗來解何者是風力發電最好的選擇。我們又以NACA5410為基礎進行訓練。我們將發電條件設定在0.01馬赫，來模擬本實驗的環境。
 - 4.使用Autodesk Fusion 360，將人工智慧訓練出來的座標輸入，並使用3D列印機印出。
 - 5.接著先用風洞測試，接著用風力發電機實際測試，並設定不同的風速，觀察升力、起步風速等。
 - 6.本實驗經計算合力後，葉片與風向夾角為20度。

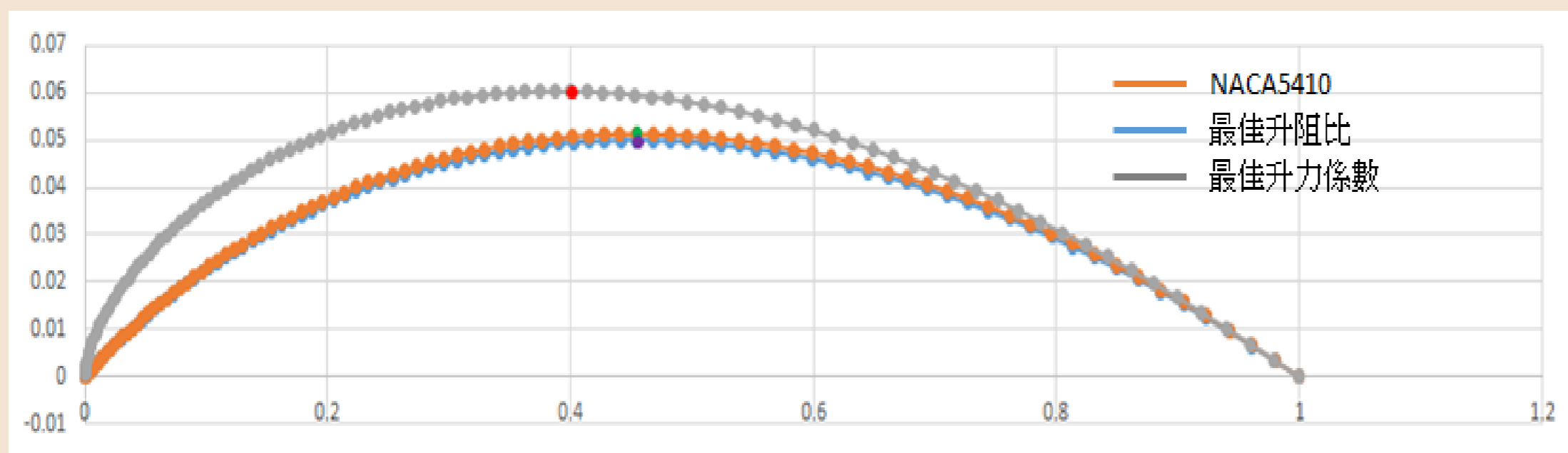
實驗結果：



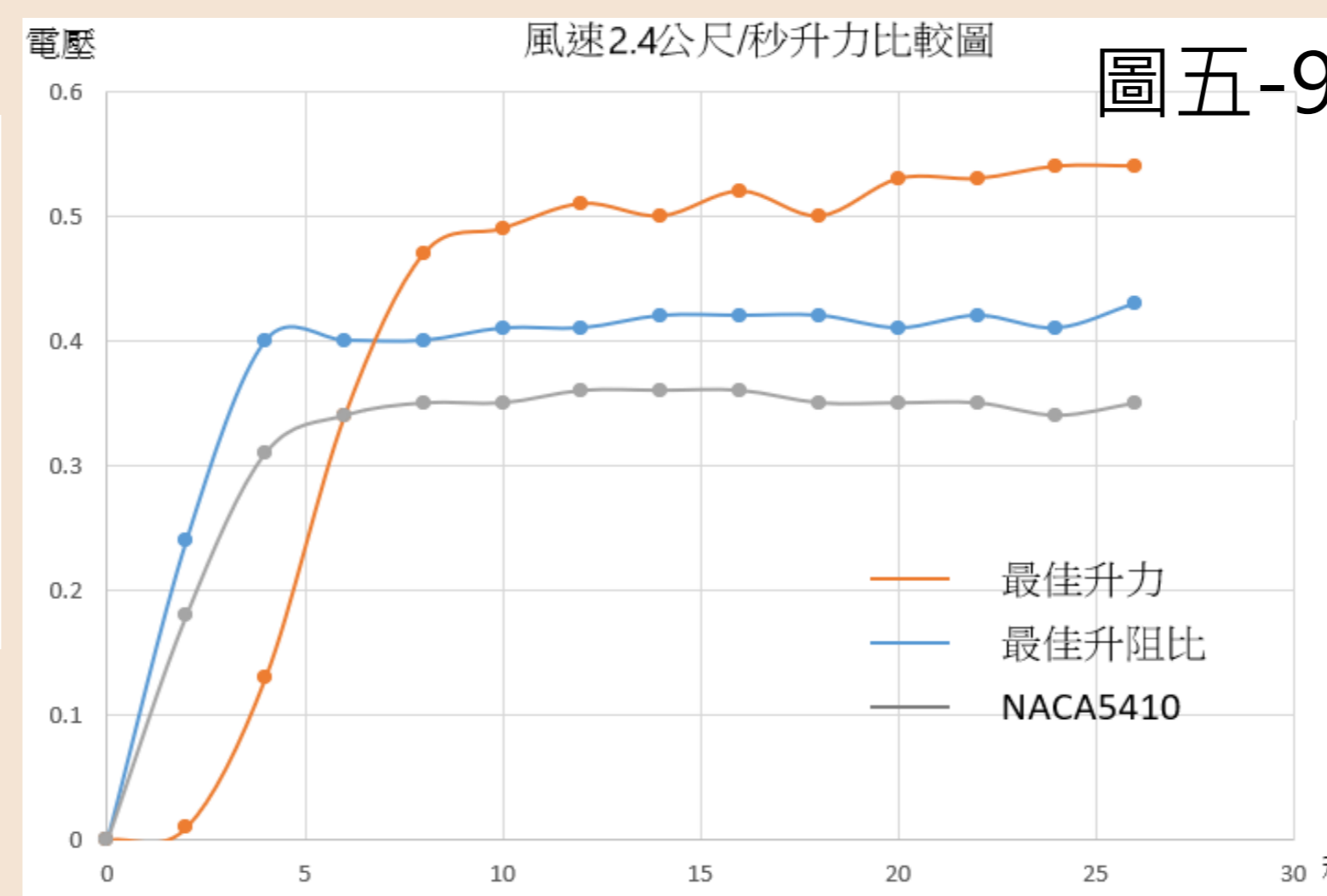
圖五-6 NACA5410與最佳升阻比葉片形狀之比較



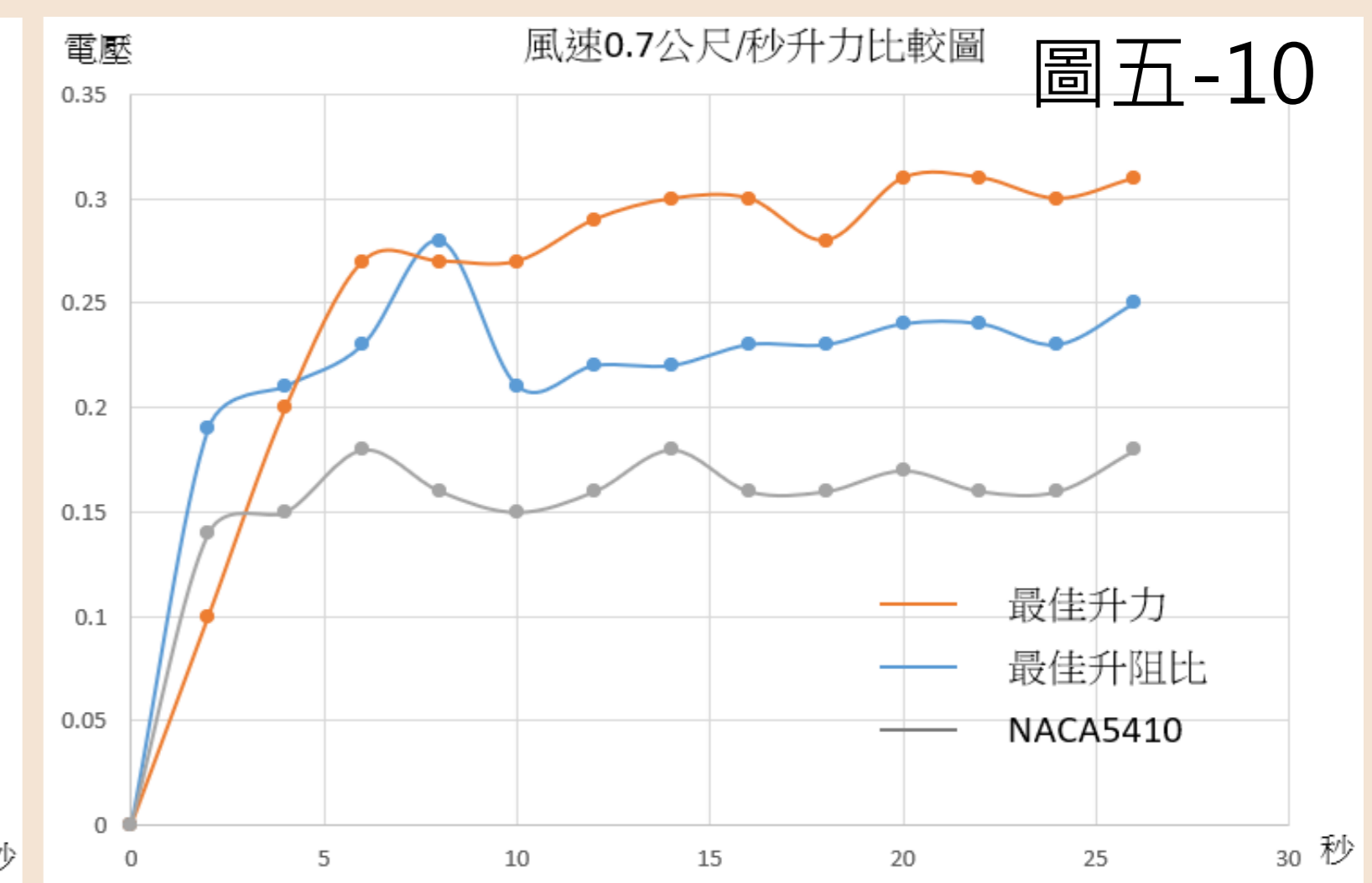
圖五-7 NACA5410與最佳升力係數葉片形狀之比較



圖五-8 不同葉形的中心弧度



圖五-9



圖五-10

討論發現：

1. 以升阻比為獎賞值之訓練結果，升力係數提升了57%，而阻力係數降低了15.5%，整體效率 (升阻比) 提升了87%。
2. 以升力係數為獎賞值之結果，比NACA5410的升力係數提升了149%，然而，阻力係數也提升 206%
3. 觀察最佳升阻比葉片形狀，前端變尖、厚度變薄這對降低阻力的確有幫助，為了不讓阻力增加，攻角只微幅增加3.31度。
4. 觀察弧度 (圖5-8)，NACA5410與最佳升阻比的弧度、最大值幾乎重疊，而最佳升力係數的結果，弧度變大，且最大值往前移 (0.45 → 0.4)，這顯示該葉形的升力，不少是靠葉形的改變獲得。
5. 觀察圖五-9、圖五-10，雖然在發電穩定後，最佳升阻比的電壓比最佳升力係數低，但最佳升阻比的啟動速率比最佳升力係數還來的快，表示阻力會影響啟動加速度，但最終還是最佳升力係數轉速最快，因為升力係數較高的緣故。

研究二：探討漸縮翼、小翼對發電之影響如何

實驗說明：本研究嘗試改變翼尖的大小 (漸縮翼)，並安裝小翼，觀察感應電動勢變化

- 實驗步驟：
1. 使用Fusion 360 設計出0.5、1.0、1.5公分的小翼，如圖五-13、14
 2. 將機翼的漸縮比調整成0.33，以利與原型(1.0)做比較
 3. 將實驗組(無小翼)與對照組(有小翼)葉片裝上風力發電機組實際運轉
 4. 觀察不同風速 2.4公尺/秒與0.7公尺/秒之發電狀況

實驗結果：

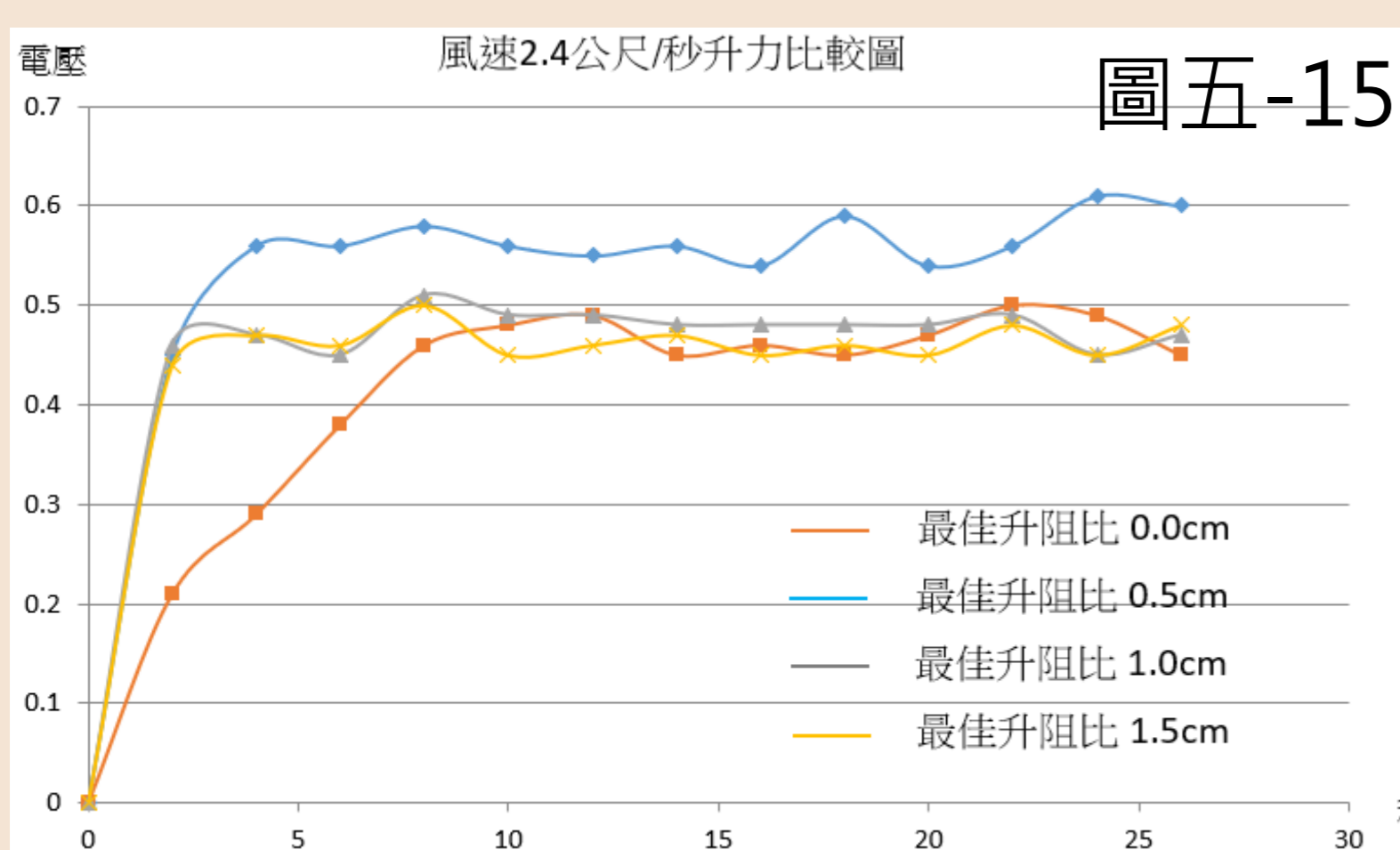
	重量(克重)	平均電動勢強風 (2.4m/s)	平均電動勢弱風 (0.7m/s)
最佳升阻比 無翼尖	83.0	0.47	0.25
最佳升阻比0.5cm	84.6	0.58	0.38
最佳升阻比1cm	85.2	0.49	0.28
最佳升阻比1.5cm	86.5	0.47	0.27
最佳升力係數無翼尖	93.0	0.65	0.34
最佳升力係數0.5cm	93.6	0.73	0.45
最佳升力係數1cm	94.2	0.77	0.47
最佳升力係數1.5cm	95.5	0.76	0.48



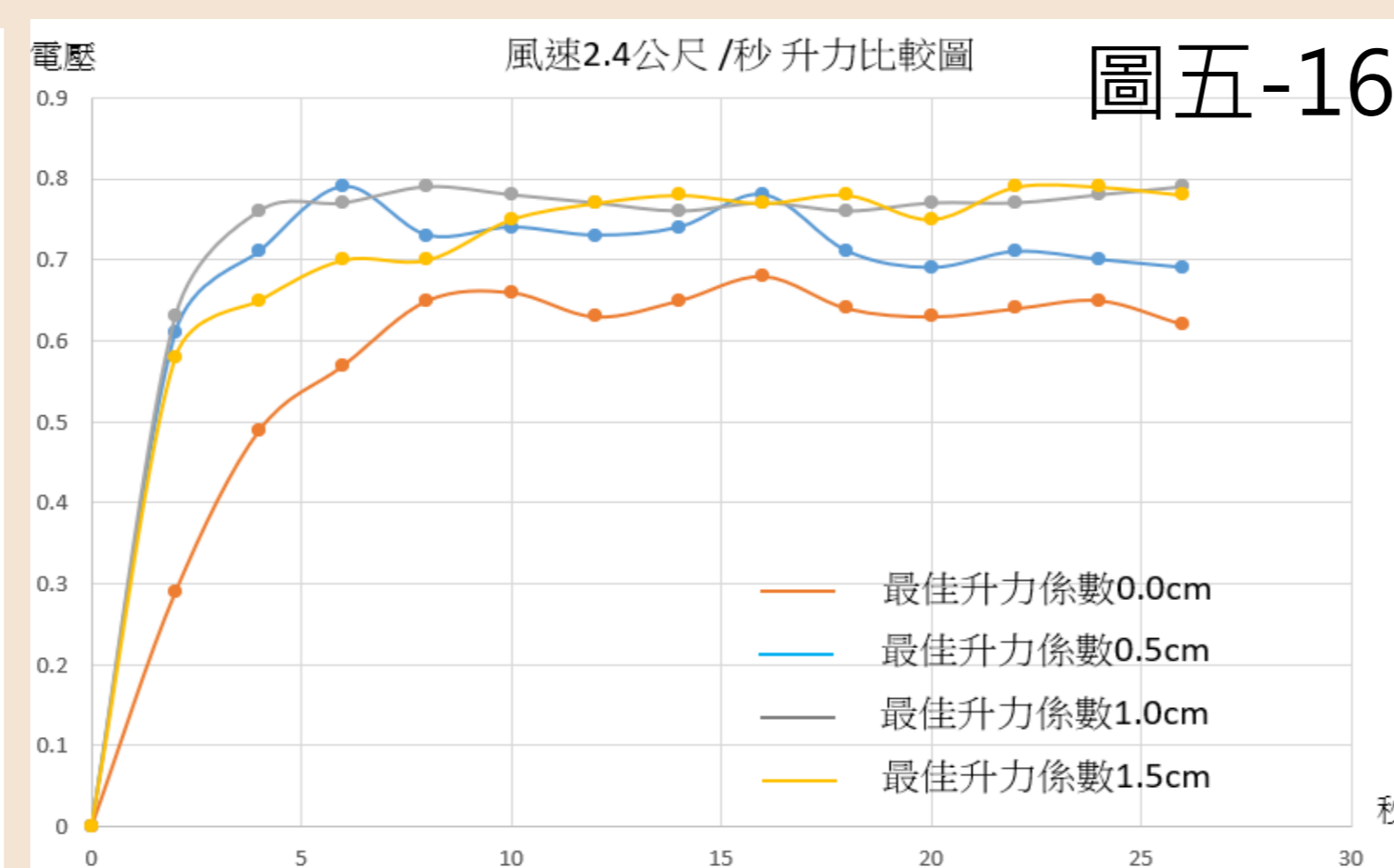
圖五-11 漸縮翼之形狀



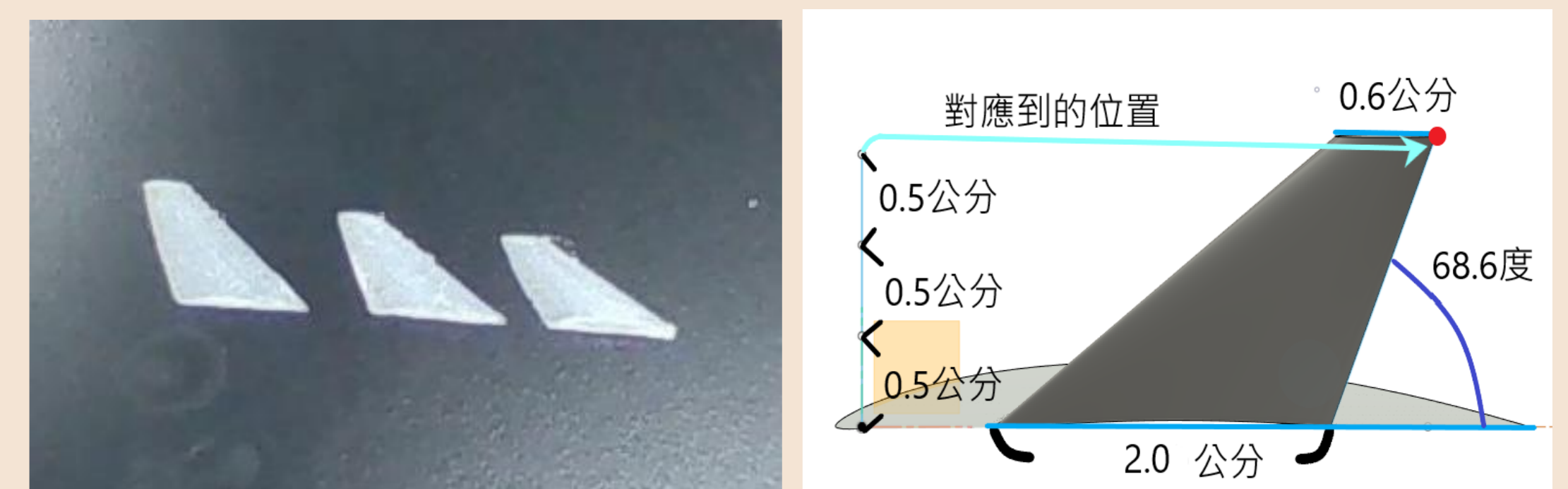
圖五-12 機翼小翼之實驗構想



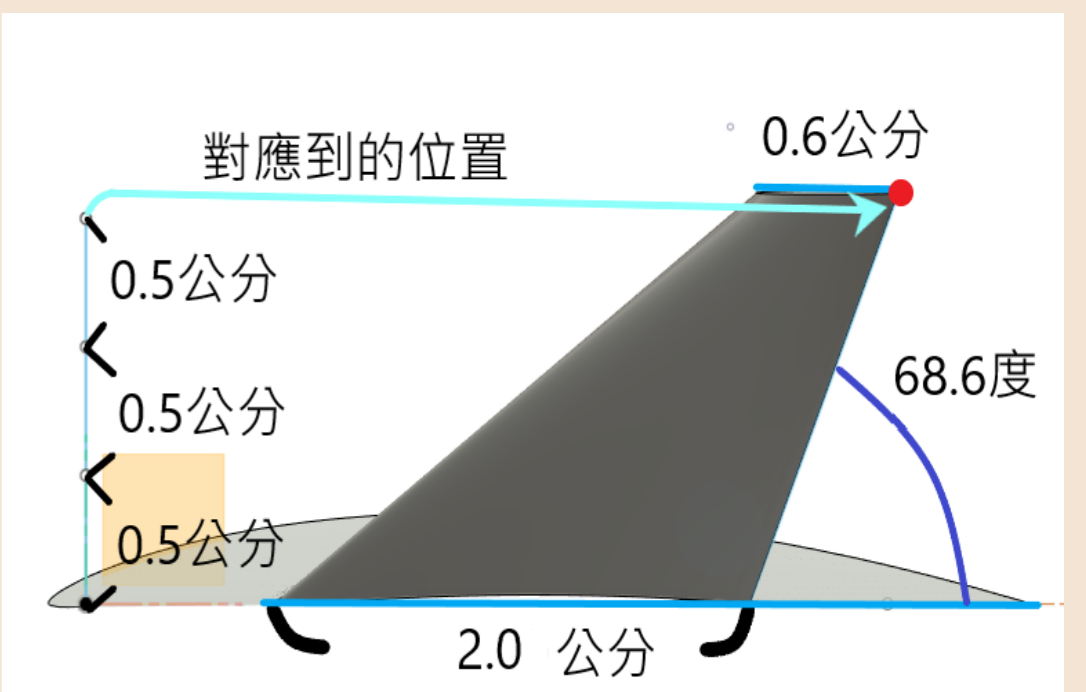
圖五-15



圖五-16



圖五-13 不同種類的小翼



圖五-14 翼尖製作說明

討論發現：

1. 我們發現，將翼型縮小加上小翼，其發電機之感應電動勢比長方翼好很多，由圖五-15顯示，最佳升阻比之電動勢電壓為0.4伏，改成漸縮翼與安裝小翼之後，電壓可以提升至0.57伏左右。
2. 未加翼尖小翼時，最佳升力係數之葉片從靜止到穩定狀態所需要的時間較長，但加了翼尖小翼後，啟動時間大幅減少。
3. 在最佳升阻比翼形部份，翼尖長度在0.5公分效果最明顯，而1、1.5公分的小翼在弱風時啟動速率較快，我們認為，其原因是因為小翼較大時，翼尖渦流減少而使啟動速率增加，但也加大質量，小翼面積增加阻力，因此發電機感應電動勢並不如預期。

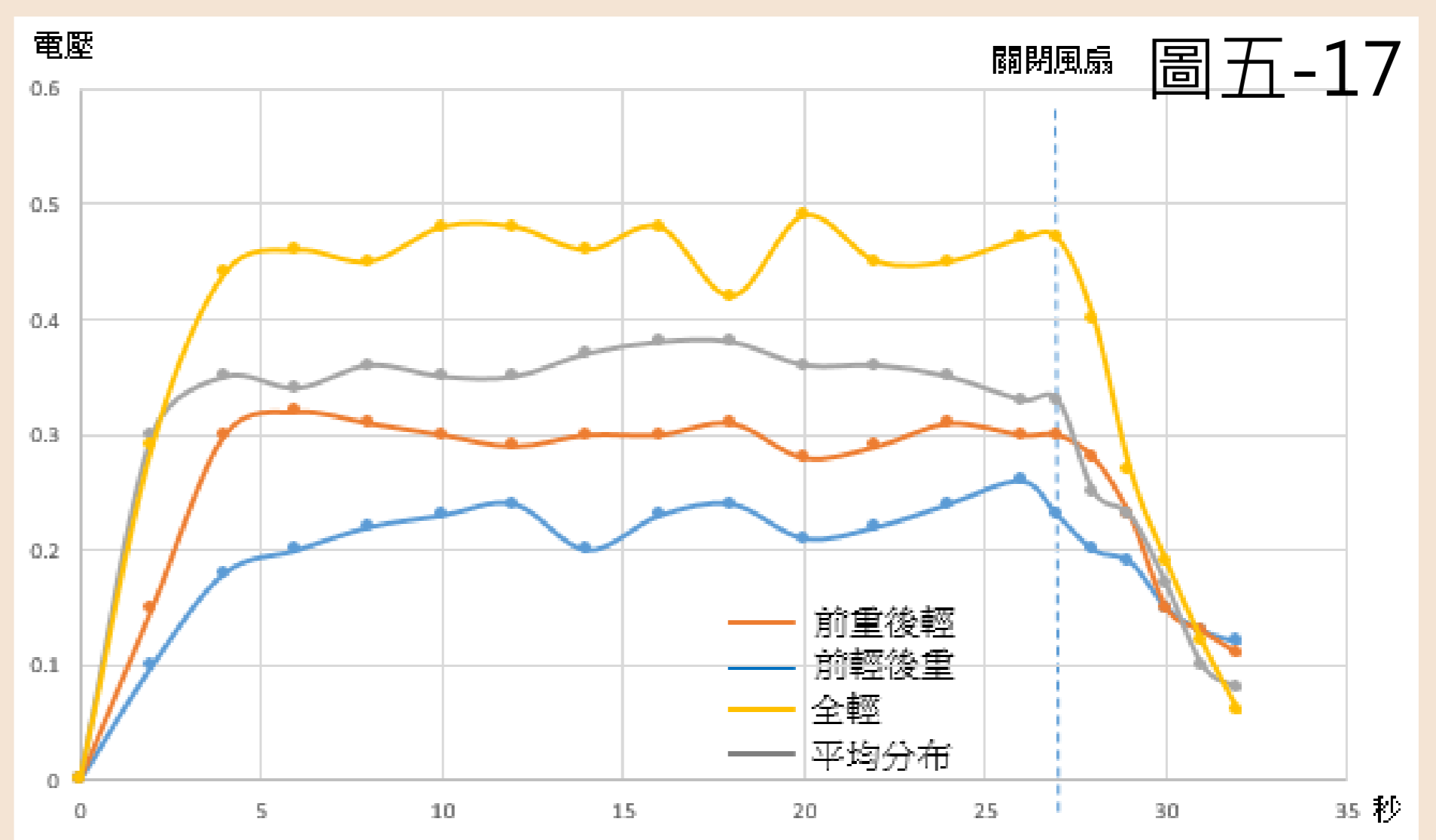
研究三：探討葉片質量與質量分布影響機台穩定度之關係

實驗說明：我們好奇將質量分布在不同位置是否會影響到其穩定度與電動勢，以及在無風的狀態下，是否能盡可能維持發電？

- 實驗步驟：
1. 採用長方型翼型而不是漸縮翼，前 (靠近發電機側) 後 (遠離發電機側) 每邊分別使用5克的金屬放置在翼尖端。
 2. 由於最佳升力係數之剖面最寬，較容易塞入金屬，因此挑選最佳升力係數當作本次實驗之翼型。
 3. 我們在葉片做不同配重：全重、輕、前輕後重、前重後輕，並實際運轉。
 4. 觀察運轉時的穩定度，並記錄關閉電風扇後，感應電動勢流失的狀況。

實驗結果：

	強風 (2.4m/s)	所需時間 靜止到穩定	關電風扇5秒後 之電壓(強風)	穩定到關電扇5 秒後之電壓差
最佳升力係數平均分布	0.30	2 sec	0.11	0.19
最佳升力係數全輕	0.46	4 sec	0.06	0.4
最佳升力係數前輕後重	0.23	6 sec	0.12	0.11
最佳升力係數前重後輕	0.36	4 sec	0.08	0.28



討論發現：

- 圖五-17顯示，全輕與平均分布、前輕後重、前重後輕在平均電壓的部分存在著顯著差異，主因是轉動慣量所致，其中轉動慣量由大至小分別為：前輕後重、前重後輕、平均分布、全輕，與感應電動勢強相關
- 四者在關閉風扇後電壓的差異，顯示轉動慣量不同，儲存的旋轉動能也不同。因此，全輕在沒有加任何重量的情況下，電壓失去的速率也是最快的。

研究四：不同葉片之發電機組合，並觀察其感應電動勢之變化

實驗說明：當發電機排列有前後重疊時，前述之升力最佳與升阻比最佳葉片對發電機組合是否有差異？

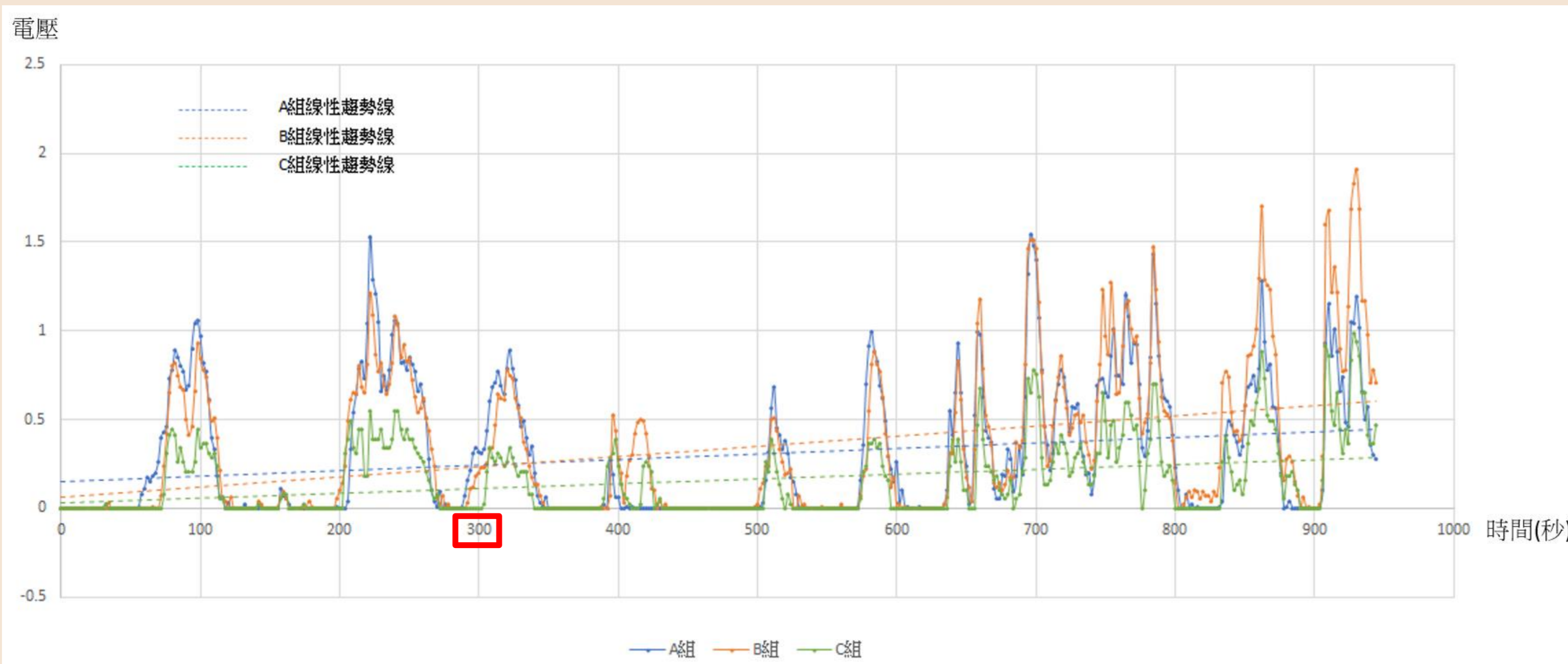
實驗器材：發電機、Arduino Uno、風速計

實驗步驟：1. 為了得到充足的風力，我們在學校空曠處利用自然風測試。

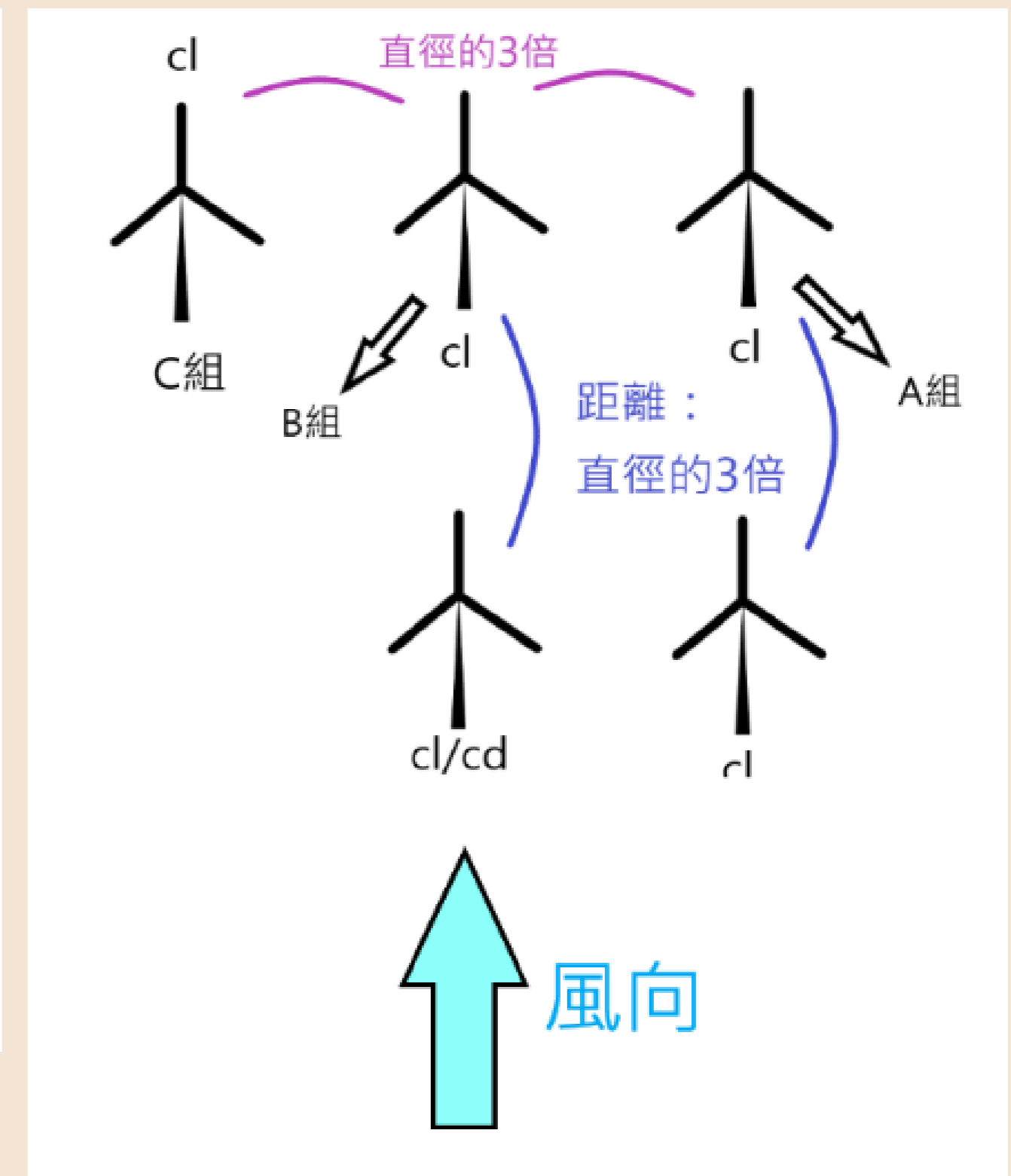
2. 將Arduino Uno 接上發電機。

3. 將發電機擺放15分鐘，並將A、B、C組同時測試，以確保其公平性。

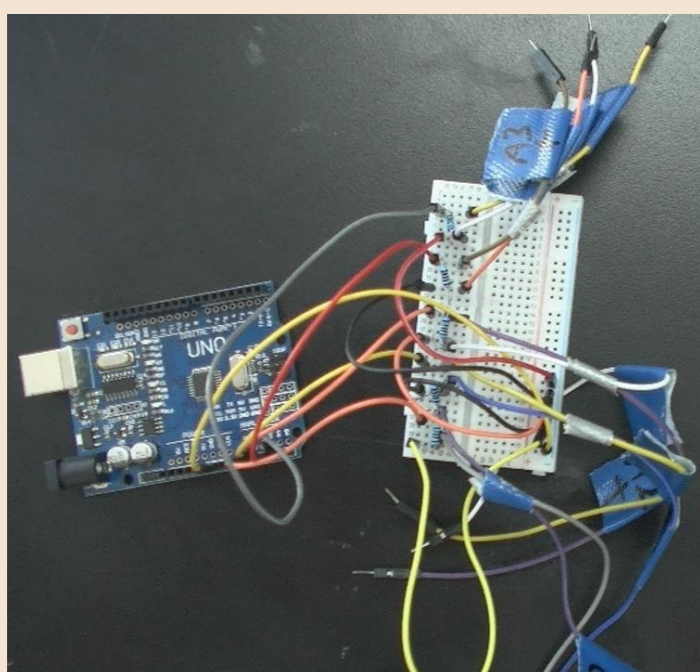
4. 測試同時測量風速，並取平均值，接著比較實驗結果



圖五-19、發電組合結果比較表



圖五-18、發電機排列說明



Arduino Uno 接上發電機測試紀錄



圖五-20 直線型風力發電排列機組

	第一台發電機 平均穩定電壓	第二台發電機 平均穩定電壓	平均電壓 總和	電壓總和
A組	0.151	0.146	0.297	140.49
B組	0.162	0.160	0.322	156.83
C組	無	0.159	0.159	75.01

討論發現：

- A組二號機感應電動勢只有0.146V，對照C組的二號機 0.159V差了將近0.013V → 最佳升力係數的阻力較高，阻擋到後方的發電機，導致發電量較小，因此最佳升阻比是比較好的選擇。
- 圖五-19發現，原先A組表現較B組優越，但在300秒後即被超越，而在300秒前平均風速為0.7m/s，而之後平均風速為4m/s。我們認為最佳升力係數在風較大時阻力比最佳升阻比還大，表現逐漸被最佳升阻比超越。
- 依照實驗結果，設計風場時，最佳升阻比適合在前段，最佳升力係數適合放置在後段。

陸、結論

- 我們先以二維的葉片剖面設計出發，藉由人工智慧來輔助找尋最佳升力及最佳升阻比之剖面。透過風洞之實驗，發現在理論值與實驗值的趨勢是相似的。
- 接著將葉片實際裝到發電機上，透過電動勢的量測來觀察發電狀況，發現電壓與風洞實驗中的結果吻合。
- 葉片的前端變尖了、厚度變薄與減少攻角可以降低阻力；而增加弧度、增加上緣之總長度並降低下緣總長度、增加攻角可以增加升力。
- 我們靠著漸縮翼與翼尖小翼的實驗，發現最佳升阻比適合0.5公分的翼尖，而最佳升力係數適合1公分的翼尖。翼尖的長度不宜過長，否則阻力會過大，使電動勢減少。
- 除了幾何形狀，我們也探討了配重，發現轉動慣量會影響到平均電壓與無風時失去電壓的速率，因此必須依照實際狀況來進行配重。
- 配置排列實驗中，最佳升阻比機台適合放在最前面；而最佳升力係數機台因為阻力較大，比較適合放在後方。

柒、貢獻與延伸應用

- 本研究提出利用人工智慧來設計風力發電機葉片剖面形狀之方法，經由實驗，也證實了理論與實驗有一定程度的一致性；由於三維流場之計算相當複雜，本研究尚未能對三維流場進行精確的計算，但我們相信未來一定可以利用人工智慧的技巧在三維流場上，得到更準確的結果。
- 未來風力發電機之葉片若具有更高的彈性，我們甚至可以由最佳化之設計，動態地隨著風力狀況來改變葉片之條件，如調整攻角、調整配重與小翼...等，來達到更有效率的綠能。
- 風力發電的噪音也是另一個值得探討的主題，本研究的方法若適度的調整最佳化目標，設定適當的獎勵值即可研發出新型的低噪音葉片。

捌、參考文獻

- 黃樂天、黃聖言 “機翼浮力的研究” 第26屆科展物理科第一名 民國75年
- 林鈺麒、江岱融、林博帆 “翱翔天際” 第46屆科展自然科 民國95年
- 黃柏涵、陳佳瑜、蕭雅馨、陳頌潔 “如鷹展翅上騰-重新得力” 第45屆科展理化科 民國94年
- 吳佩學、紀華偉、張顯耀 “風機氣動力系統的分析與模擬” 行政院原能會委託研究計劃研究報告 民國100年11月30日 計畫編號 1002001INER071
- 吳佩學、紀華偉、張顯耀 “風機氣動力系統的分析與模擬” 行政院原能會委託研究計劃研究報告 民國99年11月29日 計畫編號 992001INER054
- I. Haryanto, et al., Optimization of Maximum Lift To Drag Ratio on Airfoil Design Based on ANN Utilizing Genetic Algorithm, Applied Mechanics and Materials, January, 2014
- A. B. Mosbah, et al., New methodology combining neural network and extended great deluge algorithms for the ATR-42 wing aerodynamics analysis, Aeronautical Journal, May 2016
- Igor Rodriguez-Eguia, et al., A Parametric Study of Trailing Edge Flap Implementation on Three Different Airfoils Through an Artificial Neural Network, Symmetry, May 2020