

第十一屆全國風工程學術研討會

結合CFD模擬與AI最佳化技術之Savonius垂直軸風機導流設計



謝旻叡^{1*}、林正釗^{1,2}

¹國立臺北科技大學，製造科技研究所

²國立臺北科技大學，機械工程系

*通訊作者E-mail：t113568058@ntut.edu.tw

摘要

屋頂及都市近地層環境中常出現多方向、低風速且高度紊流的風場特性。Savonius 垂直軸風機因具備免對風與高啟動扭矩等優勢，特別適合小型化分散式風能系統的部署。然而，其典型功率係數（ C_p ）普遍偏低，限制了實際應用效益。近年相關研究多著重於利用被動式導流裝置改善入流特性並抑制回程葉片所產生的阻力，以降低負扭矩與動量損失。本研究針對屋頂應用之二維 Savonius 風機模型，於風機前方配置定徑圓柱導流體，進行計算流體力學（CFD）模擬分析，並結合人工智慧（AI）技術進行效能最佳化設計。研究中考量圓柱的水平與垂直位置（HD、VD）及葉尖速比（TSR）三項關鍵參數對風機性能的影響，旨在提升系統的發電效率。透過 CFD 模擬建立資料集後，採用 XGBoost 演算法進行訓練並建構可準確預測功率密度的代理模型，其決定係數（ R^2 ）**高達 0.9296**。隨後，對特徵與目標變數進行 z-score 正規化處理後進行參數搜尋與設計優化，結果顯示最佳化配置可使功率密度提升**約 1.8%**。本研究提出的「CFD 模擬結合 AI 最佳化」設計流程，不僅可有效導引參數配置策略並提升風機效能，亦可為未來 Savonius 垂直軸風機的設計與應用提供重要參考。

研究目的與動機

- 風力發電等再生能源將成為未來重要能源並受到廣泛研究。
- 其中，城市風能具就地取用與低環境衝擊等優點，但因風場多變且紊流強，需針對其特性設計並優化風機以提升效率。
- 本研究根據[1]提出之導流圓柱設置，藉以提升功率係數，如圖1之示意圖。
- 研究動機**: 由於決定導流圓柱設置之參數眾多，包含(1)HD(2)VD(3)TSR，本研究採用AI之XGBoost代理模型技術進行風機效能之預測，並導入最佳化策略藉此決定此些參數之優化值。

實驗設計

- 本研究採用Ansys Fluent模擬探討風機建置在建築屋頂並評估其效果，數值模型如圖1所示。
- Savonius風機透過阻力和側向力的共同作用產生力矩，通常由兩個或三個弧形葉片組成如圖2。模型尺寸如表1所示。
- 壓力分佈與風場中的氣流密切相關。風進入流場後，會分別撞擊前進葉片和回程葉片，並透過動量交換將動量傳遞至葉片，圖3圖4所示。

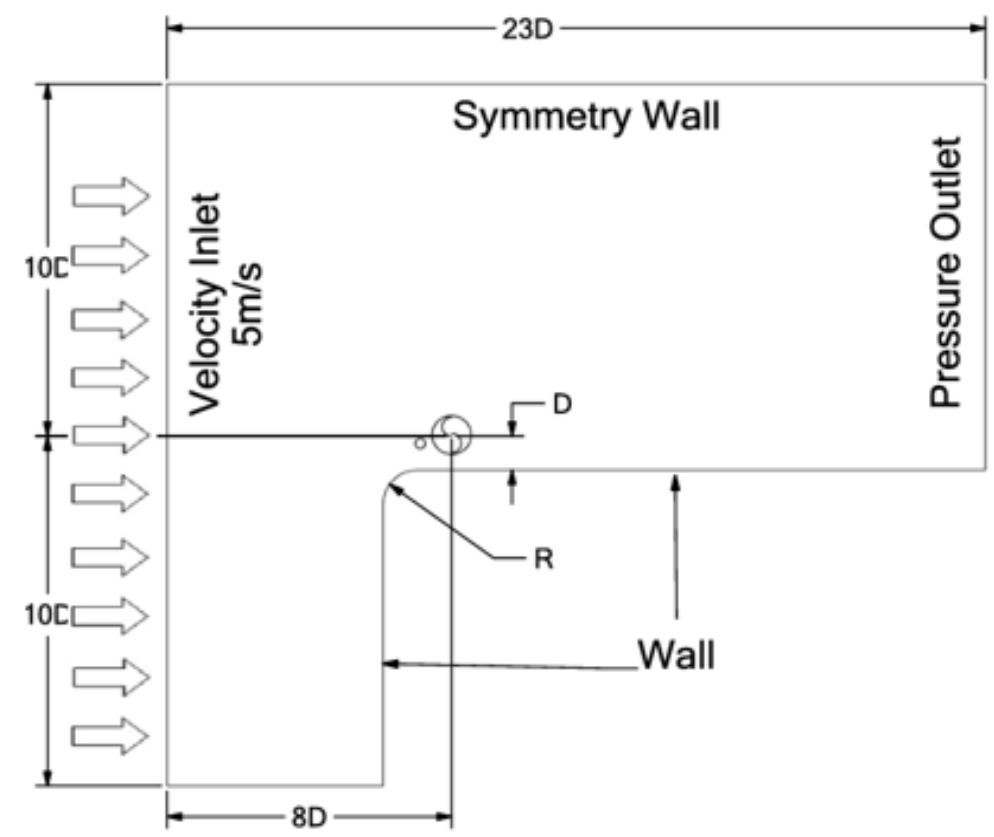


圖1.風機模型設置於導圓角建築屋頂

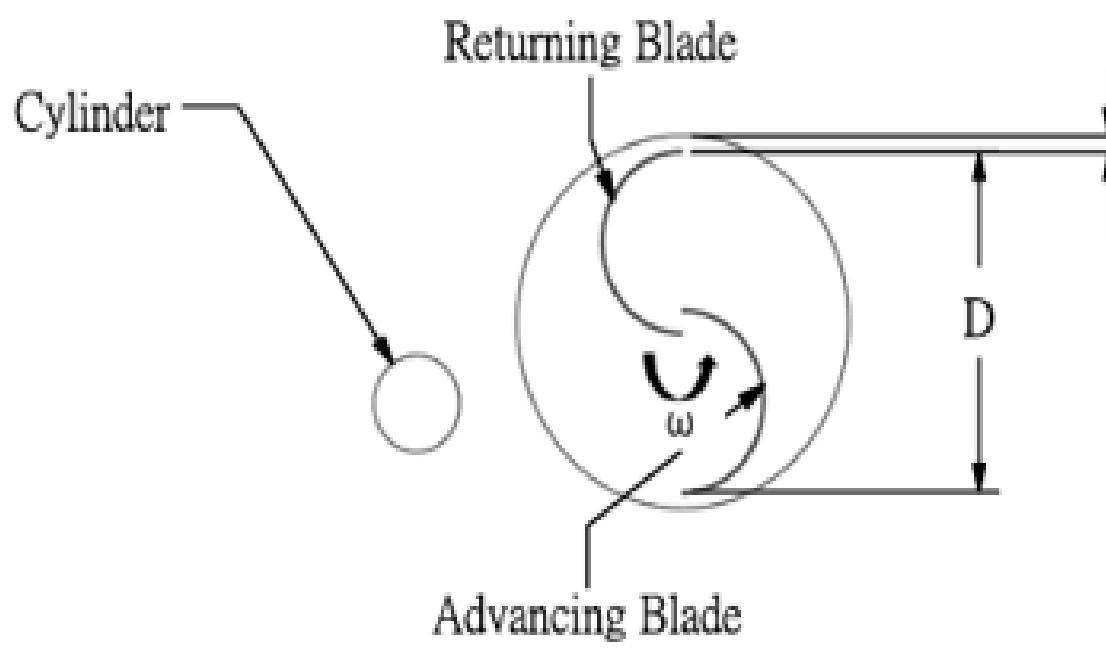


圖2.風機與導流圓柱模型規格

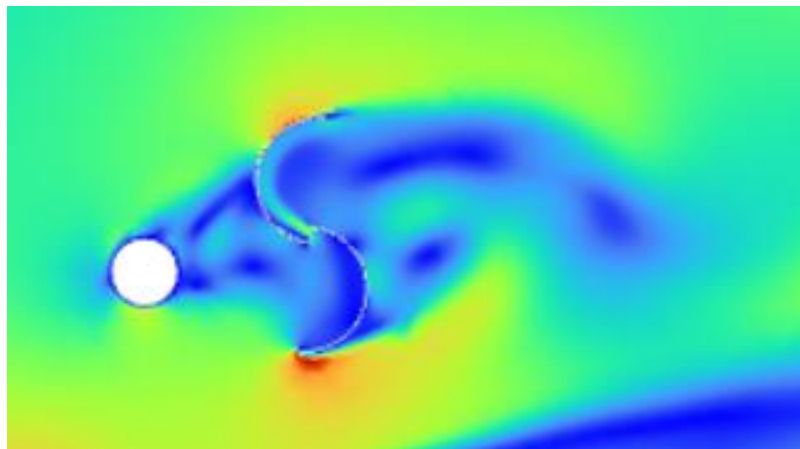


圖3. HD=225, VD=50, TSR=0.6葉片周圍的速度分佈

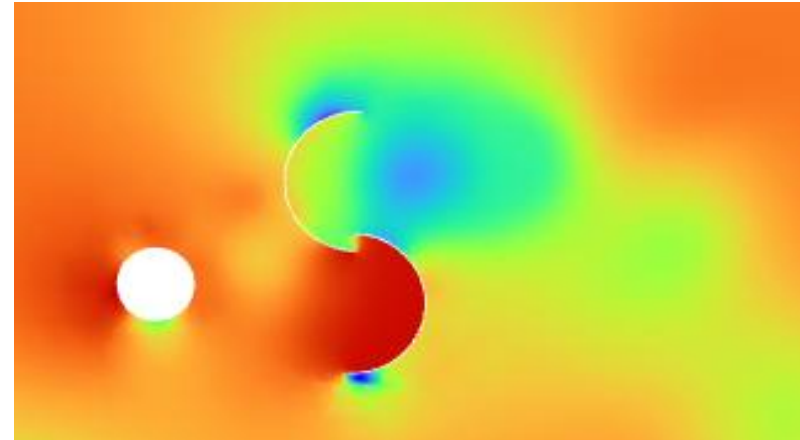


圖4. HD=225, VD=50, TSR=0.6葉片周圍的壓力分佈

幾何參數Parameter	參數值Values
風機直徑Diameter of rotor (D)	311.4 [mm]
葉片直徑Blade Diameter (d)	165.2 [mm]
建築角隅半徑Corner type (R)	300 [mm]
設置高度Height of location	311.4 [mm]
圓柱直徑Diameter of cylinder (Dc)	88.5 [mm]

表1.風機與導流圓柱幾何尺寸

資料收集

- Ansys Fluent 建立 2D 幾何依照圖5風機特徵建立共 105 組案例如表2所示。
- 為求訓練穩定性與比較公平，X 與 Y 都做標準化（z-score； $\mu=0$ ， $\sigma=1$ ）。
- 繪製了三個特徵與功率 C_p 的相關性與影響如圖7至9所示。

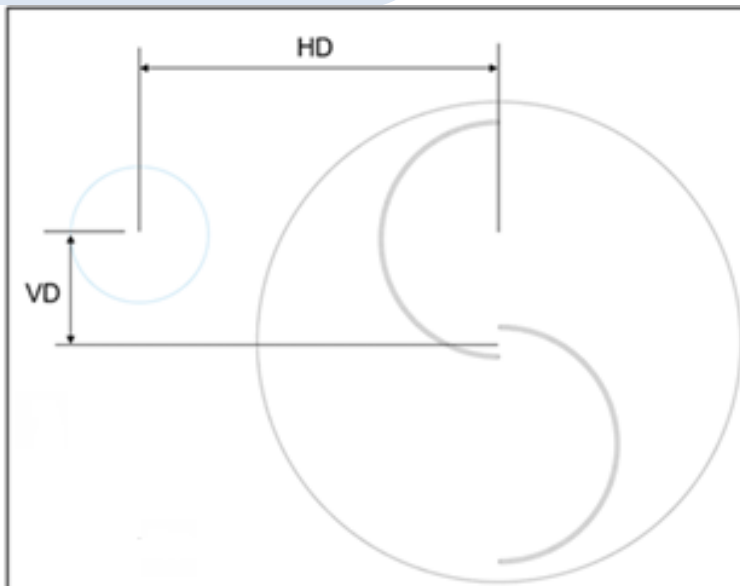


圖5.風機特徵

HD(mm)	VD(mm)	TSR
225,250,275,300	0,25,50,75,-75	0.4,0.6,0.8,1.0,1.2

表2.研究案例彙整

圖6.TSR與 C_p 的關係

圖7.VD與 C_p 的關係

圖8.HD與 C_p 的關係

結果與討論1:XGBoost模型與驗證

- 資料拆分
- 將105筆資料以8:2拆分成訓練集和測試集。
- 分層交叉驗證
- 將訓練資料進行5折交叉驗證(5-Fold)。
- 劃分候選點
- 每個 TSR 先做網絡劃分，挑出分數最高的區域後在進行細網絡劃分形成候選集。
- 選點方式
- 透過預測的功率值、局部預測誤差、外插距離判斷選點。
 $Score = C_{p,predict} \cdot \beta_1 \cdot local_{err} - \beta_2 \cdot d_{min,z}(x)$
- 穩定性與診斷
- 多種隨機種子進行隨機抽樣。

	訓練(CV/OOF)	測試
標準化均方根誤差(nRMSE)	0.3443	0.2653
斯皮爾曼等級相關係數(Spearman)	0.9426	0.9444
決定係數(R^2)	0.8814	0.9296

表3.訓練分數與測試分數

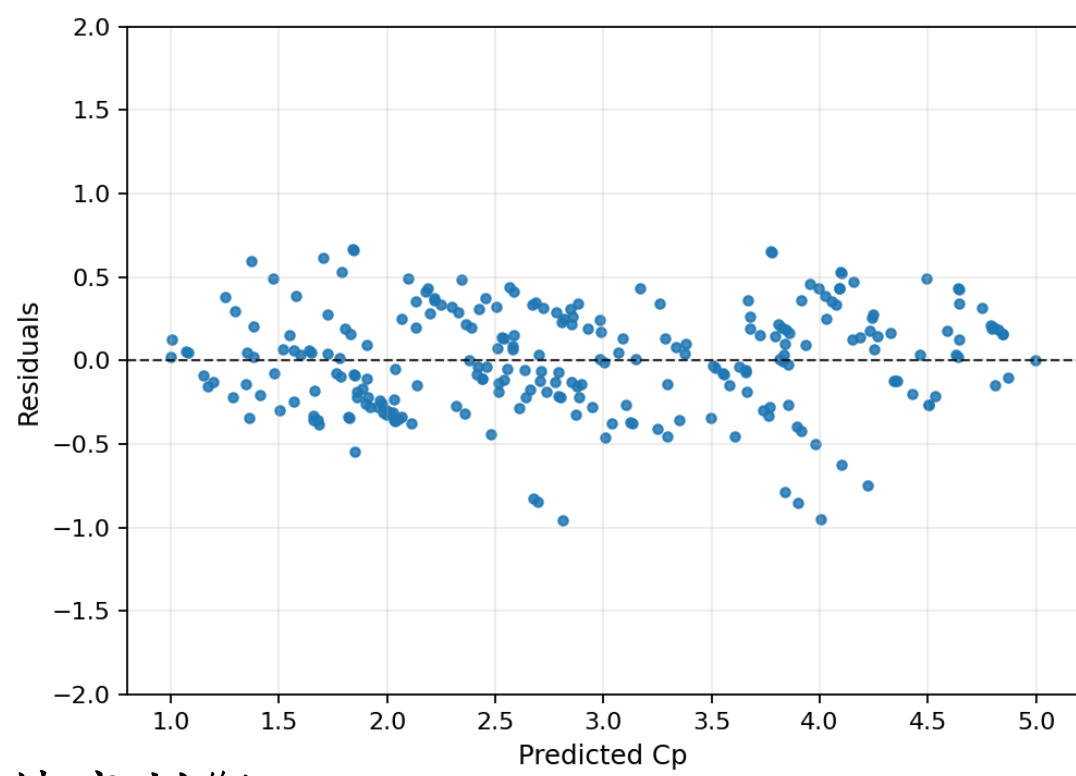


圖9.模型殘差 vs 預測值 C_p

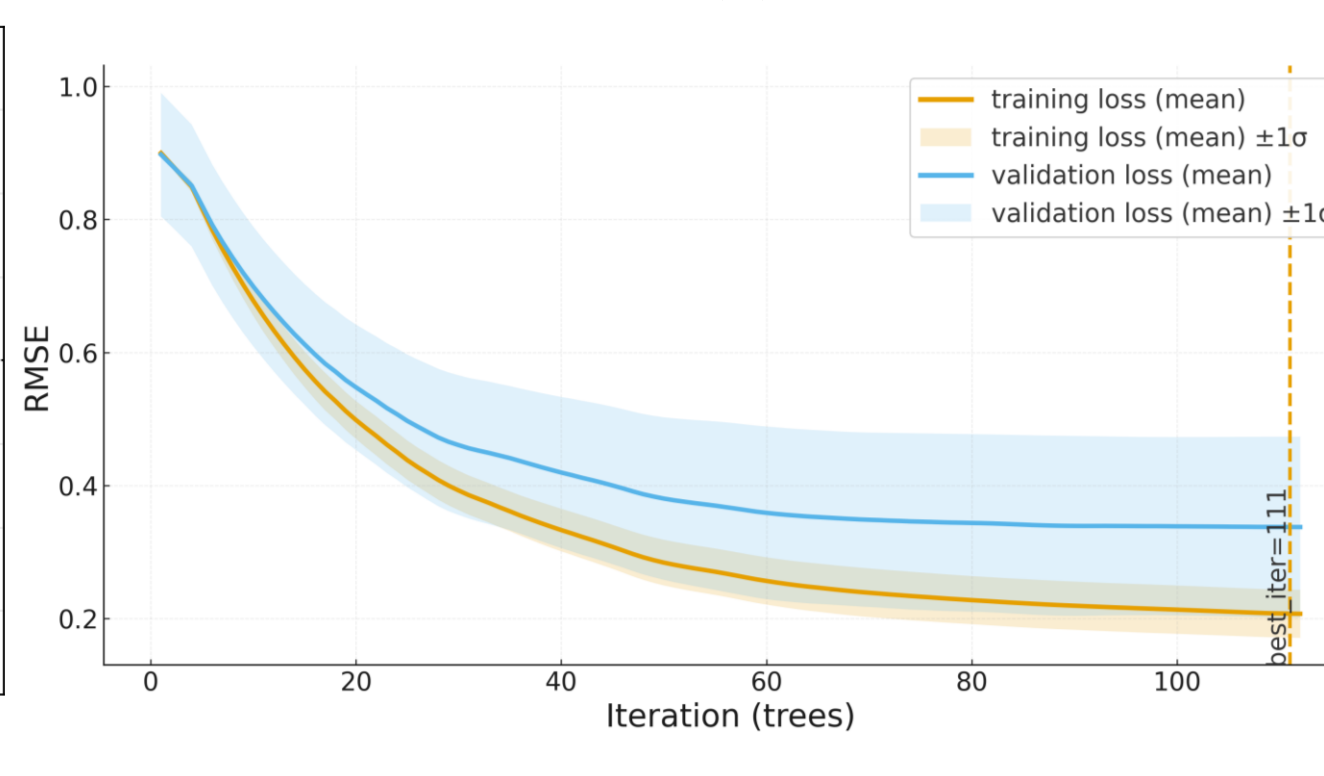


圖10.早停學習曲線

結果與討論2:CV最佳化步驟與流程

- 研究流程如下圖12。
- 主要步驟流程為:1.基礎模型的建立與訓練 2.用模型預測輸出功率 3.最佳化補點循環。

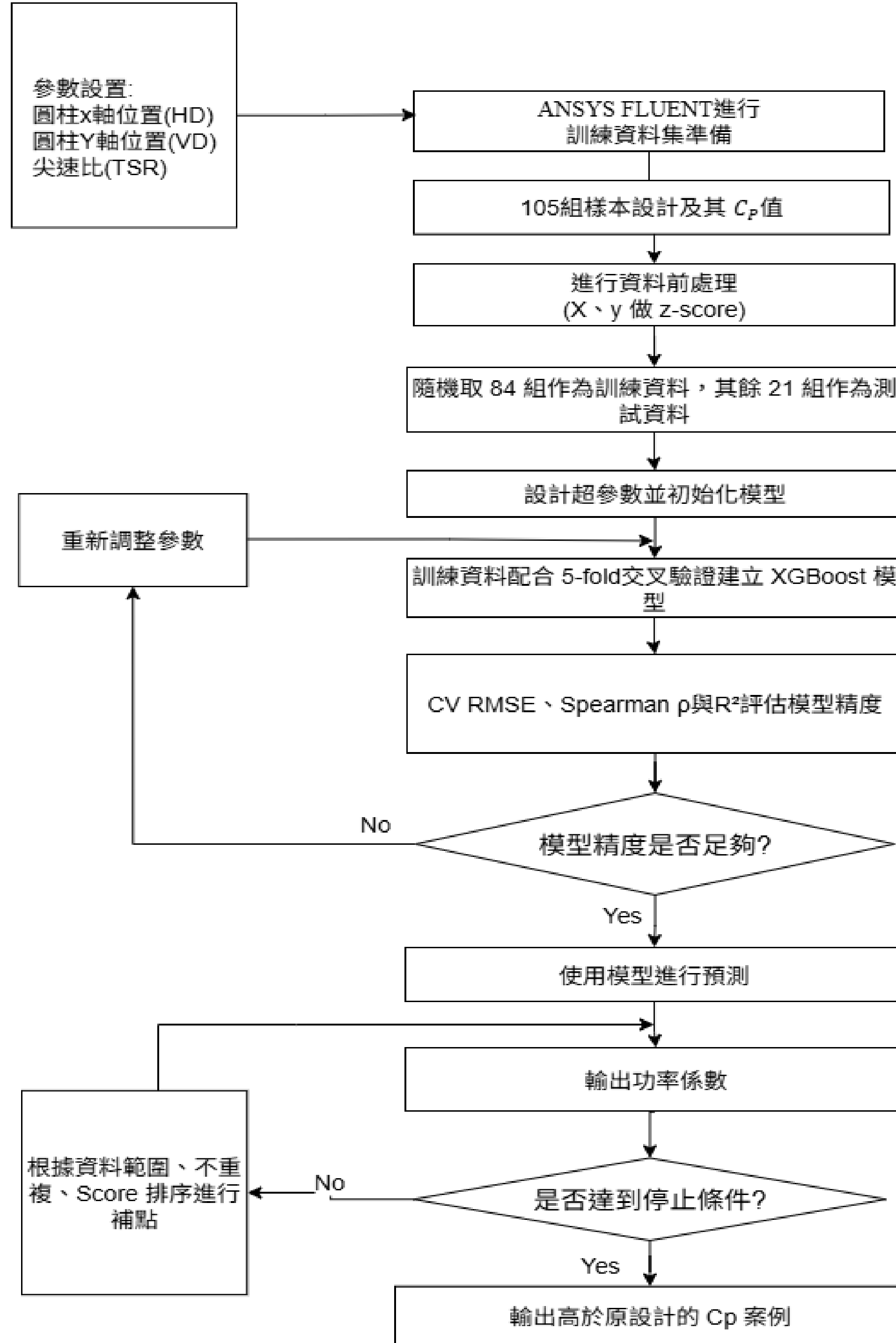


圖11.實驗最佳化之流程

HD(mm)	VD(mm)	TSR	ΔC_p (%)
227.403	-45.02	1.2	1.798%
227.403	-57.02	1.2	1.466%
227.132	-48.49	1.2	1.214%

表4.最佳化之結果

結果與討論

- 本研究建立一低成本、高穩定的最佳化模型用以提升風機功率係數的參數配置策略。能夠在特定的設計空間內預測風機性能。
- 現階段最佳化已得到功率係數相對於原數據集提升**約1.8%**。
- 鑑於本研究採用二維 CFD 分析，後續工作可進一步發展三維建模，以捕捉葉尖效應與渦旋動力學並對耦合角與方位角位置進行詳細評估

參考文獻

- [1]張名量,“圓柱對垂直軸風機在建築屋頂之空氣動力學性質優化研究,”碩士,製造科技研究所,國立台北科技大學,台北市,2023.
- [2] M. Stone,“Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions,”*Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 1974