

風力場址規劃：基於深度學習的跨尺度風場超解析模型

Wind Farm Siting: Deep Learning-Based Cross-Scale Super-Resolution Modeling

丁俊瑋¹ (Jun-Wei Ding), 謝依芸^{1,2,*} (I-Yun Lisa Hsieh)

¹國立臺灣大學土木工程系 ²國立臺灣大學化學工程學系

¹ Department of Civil Engineering, National Taiwan University

² Department of Chemical Engineering, National Taiwan University

* iyhsieh@ntu.edu.tw

摘要

隨著再生能源，特別是風力發電，成為全球能源策略的核心，風力預測模型的準確性對電網穩定性與經濟效率產生關鍵影響。本研究提出一套創新深度學習框架，旨在提升風場資料的空間解析度與預測準確性，進而增強風力發電預測模型的效能。該框架融合高解析度的數值天氣預報 (Numerical Weather Prediction, NWP) 與低解析度的重分析資料 (Reanalysis)，重建符合風場規劃與調度需求的高解析度風力場。透過快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 與徑向平均功率譜密度 (Radially Averaged Power Spectral Density, RAPSD) 分析，模型能掌握風場在不同空間尺度下的變異特性，涵蓋自大氣環流至區域性微氣象現象。為有效區分大尺度背景與小尺度結構，我們於空間域中導入均勻濾波器 (Uniform Filter)，協助模型保留天氣型態整體脈絡之餘，精準捕捉局部細節特徵。核心架構採用生成對抗網路 (Generative Adversarial Network, GAN)，以學習與重建風場小尺度特徵的統計分布，確保輸出資料具備物理一致性與統計合理性。此外，模型結合隨機性與確定性訓練策略，不僅強化風場細節的多樣性表現，亦維持大尺度結構的連續性與邏輯一致性，實現兼具穩定性與靈活性的風力場重建能力。驗證結果顯示，本模型在風速預測上的均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) 為 1.82 m/s，較基準模型 ERA5 改善了 0.16 m/s。在實際風場應用中，風力發電預測的標準化平均絕對誤差 (Normalized Mean Absolute Error, NMAE) 為 0.17，預測精度提升 23%，顯著增強了風力專案的可靠性與經濟可行性。本研究不僅推進風場資料建模的技術能力，更提供一套可落地應用的風力預測框架。所提出的深度學習方法展現高度潛力，有望轉變風能的管理與部署模式，為再生能源技術樹立更高的精準標準。

關鍵字: 風場超解析度重建、風場降尺度、多尺度特徵整合、氣象網格化資料、深度學習、風力場址規劃與評估