

單座棚架式屋頂光電系統之氣動力特性評估

劉穎陽¹ 李紹緯² 羅元隆³ 陳祈彰⁴ 黃朝揚⁵ 楊証皓⁶

¹ 國立臺北科技大學土木工程系碩士生

² 國立臺北科技大學土木工程系博士生

³ 國立臺北科技大學土木工程系教授

⁴ 工業技術研究院綠能與環境研究所先進光電與整合應用技術組資深工程師

⁵ 工業技術研究院綠能與環境研究所先進光電與整合應用技術組組長

⁶ 工業技術研究院綠能與環境研究所先進光電與整合應用技術組經理

摘要

本研究針對設置於平屋頂的單座棚架式太陽能光電系統進行氣動力特性評估，以彌補現行規範對此類附屬結構物所提供的設計參數之不足。有鑑於台灣地狹人稠、建物環境密集且需兼具多功能性，單座棚架式的光電系統經常被架設於違建或輕鋼構屋頂，因而潛藏風害風險。本研究進行一系列縮尺風洞實驗，其中一般案例的設計參數包含面板深寬比（0.5、1.0、2.0）與面板仰角（10 度至 25 度），並進一步探討三種特殊案例，如底部阻擋物存在、設置女兒牆、以及面板退縮於建物立面。實驗結果顯示，風攻角對平均與擾動淨風壓係數影響顯著。在風攻角 0 度時產生了對面板的最大下壓力，在 140 度時則為最大上揚力。隨著仰角增加，風壓係數的絕對值上升。另外，隨著深寬比變小，對風攻角的變化越顯敏感。整體而言，面板深寬比為 0.5 時會產生最大的下壓力，當變為 2.0 時，則會產生最大上揚力。而三種特殊案例的實驗結果顯示，「底下有阻擋物」與「女兒牆」案例受上揚力主導，須關注面板掀起的風險。「面板退縮」則為下壓力主導，須關注桿件屈曲風險。整體調整係數範圍介於 0 至正負 1.5 之間。綜合評估而言，最具風險者為面板深寬比為 2.0 且仰角為 25 度的「底部有阻擋物」特殊案例，其上揚力的影響最為顯著。

關鍵字：平屋頂、太陽能光電、深寬比、風壓量測

1. 前言

在全球追求淨零碳排與能源轉型的共同目標下，發展再生能源已是不可逆的國際趨勢。台灣在邁向 2050 淨零排放的進程中，積極推動太陽能等綠色能源，其中尤以屋頂型太陽光電系統為重要推動方向。受限於有限的土地資源，此類系統不僅有效利用既有建築空間，亦有助於強化分散式電力架構。然而，目前國內常見的棚架式光電系統，尤其是安裝於輕鋼構或違建屋頂上的形式，其耐風行為在設計準則與風壓數據上仍屬薄弱，面對日益嚴峻的極端氣候挑戰，潛藏安全疑慮。

隨著地方政府積極推動綠能政策，包括提供補助、制定設置規範，屋頂光電已從技術選項

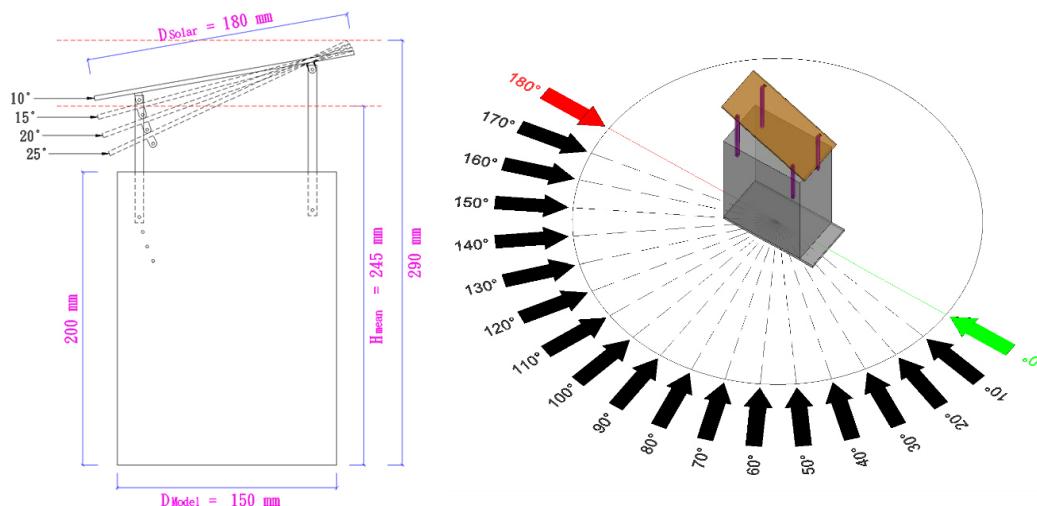
演變為城市能源轉型的重要工具。本研究亦呼應聯合國永續發展目標 (SDGs)，放眼潔淨能源、創新建設、永續城鄉與氣候行動之核心訴求，強調能源發展應兼顧安全、效率與永續性。

本研究針對安裝於平屋頂的棚架式太陽能系統進行風洞實驗，模擬不同幾何配置與風向條件下的風壓分佈行為，深入分析面板角度、比例關係及特殊安裝條件對風載反應的影響，並彙整實驗結果建立具代表性的設計風壓係數。藉此補強現行建築耐風規範在光電系統應用上的不足，提升系統整體的結構安全與長期運行穩定性。

2. 研究方法

研究方法結合物理風洞實驗、統計極值分析與規範比較三大部分。風洞實驗於淡江大學風工程研究中心第一號大氣邊界層風洞進行（試驗斷面 $15\text{ m} \times 2.2\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ ），以錐形導流板、龍齒與粗糙元素模擬出符合指數律 $\alpha = 0.15$ 的 C 地況（鄉村地形）邊界層流場，並藉由 Cobra Probe 量測參考風速剖面與紊流環境。

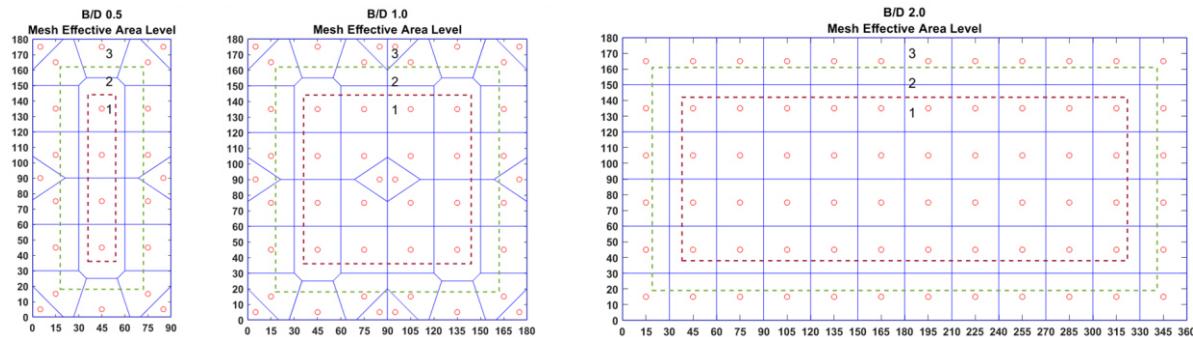
模型製作採 1:50 縮尺，設計三組不同深寬比 B/D (0.5 、 1.0 、 2.0) 以及四種面板傾角 (10° 、 15° 、 20° 、 25°)。每個模型在面板上鑽設多組風壓孔，並以 Scanivalve 多通道壓力量測系統與 RADBASE4000 資料擷取系統同步記錄瞬時風壓信號。風攻角 θ 由 0° 至 180° ，每個角度測試時長為 10 分鐘，採樣頻率與濾波設定以確保能擷取至所需頻帶之擾動能量。



圖一：模型架設參數示意圖(左圖為模型尺寸及變化，右圖為轉置示意圖)

數據處理流程包含：壓力訊號校正（管路校正與零點校正）、非維化成淨風壓係數 (C_p)、計算時序之平均與標準差以取得平均淨風壓係數與擾動淨風壓係數，進一步擷取極值樣本並以甘保 (Gumbel) 極值分布進行擬合，取得設計極大值與極小值。最後將 $0^\circ - 180^\circ$ 之設計結果左右對稱外插為 $0^\circ - 360^\circ$ 之設計包絡值，以利與規範之全向設計值比較。此外，針對特殊案例建立調整係數 (Adjustment Coefficient)，定義為特殊案例設計值除以對應一般案例設計值，以量化特殊構造造成之增減效果。

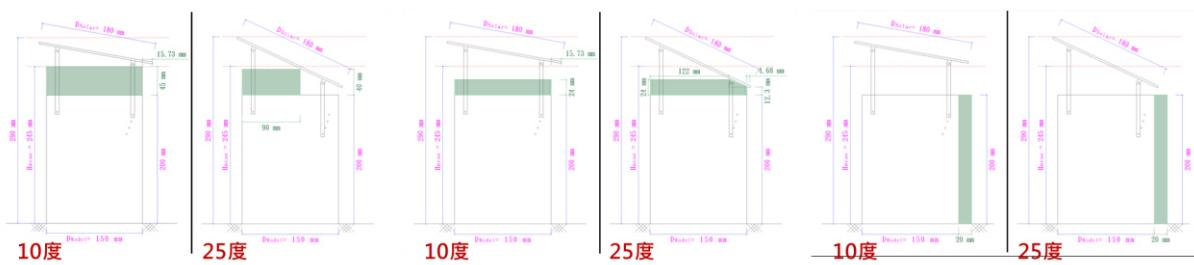
本研究在模型製作與量測配置上採用嚴謹程序以降低實驗誤差。模型之主要尺度與參數：面板寬(B)與深(D)依真實單座棚架型光電板之比例製作，並確保板與支撐桿之相對位置可調以模擬退縮或底部阻擋物。壓力孔位佈局參照面板上表面與下表面之等距網格，重點區域（前緣、角隅與邊緣）密度提高以捕捉局部極值。



圖二：三種不同寬深比($B/D=0.5$ 、 1.0 、 2.0)模型之風壓孔位分布及代表面積示意圖

量測系統採用 64 通道壓力感測模組配合 RADBASE4000，並由 Scanivalve 進行多路壓力分流，系統在實驗前以噴槍逐孔測試確保連接良好；管線延伸與阻尼效應在試驗前以標準訊號進行校正，取得修正係數後再行應用於原始資料。風場驗證方面，以 Cobra Probe 衡量風速剖面與紊流能譜，確認與設計邊界層譜相符（包括平均風速剖面與紊流強度分布）。

特殊案例設計包含三類情形：一、面板底下有阻擋物（模擬佈置於屋頂之機電設備或屋脊等），二、建物邊緣設置女兒牆（parapet），三、面板退縮（inward-offset，板面向屋頂內退縮之配置）。每一特殊案例於代表性幾何組合（ B/D 與傾角）下進行完整風攻角掃描，以獲取全面性調整係數。



圖三：三種不同特殊案例之不同傾角示意圖
(左圖為有阻擋物，中間為女兒牆，右邊為板面退縮)

3. 實驗結論與討論

實驗結果首先呈現出風攻角對平均淨風壓係數 C_p_{mean} 與擾動淨風壓係數 C_p_{rms} 顯著影響。以一般案例為例（無底下阻擋， $B/D = 1.0$ ， $\theta = 10^\circ \sim 25^\circ$ ），當風攻角為 0° 時，下壓力佔優（ C_p_{mean} 為正值，表示風壓指向面板），最大下壓力通常出現在 $0^\circ - 40^\circ$ 範圍；而在約 140

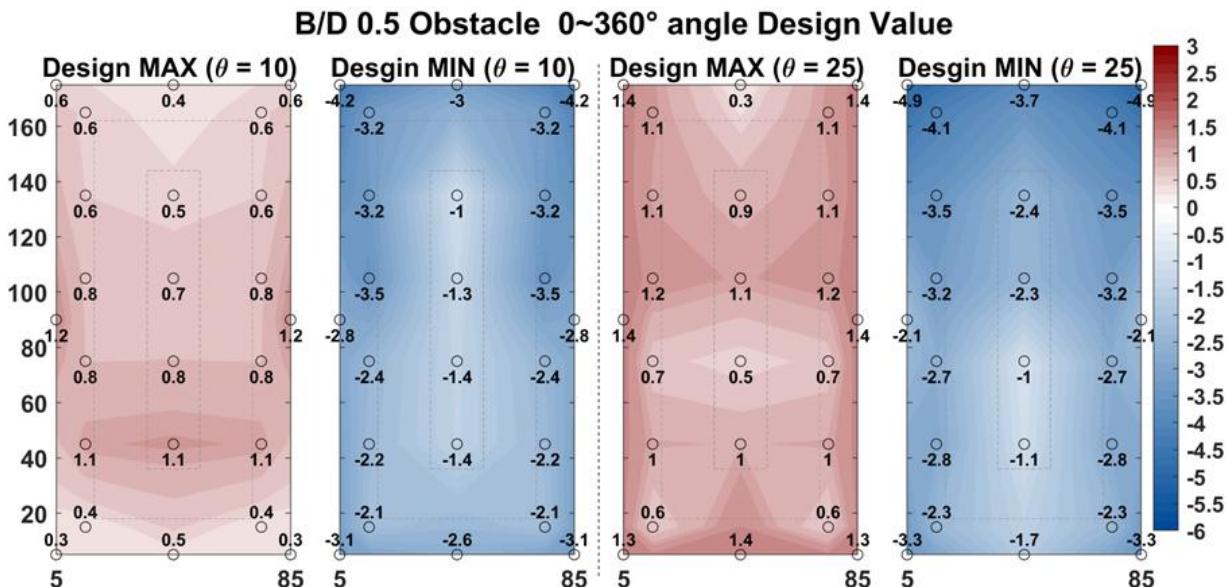
°附近觀測到最大上揚力 (C_p _mean 負值達峰值)，顯示迎風與逆風時之流場分離與渦流生成機制不同，導致面板受力方向反轉。

面板傾角對風壓係數之影響呈顯著正相關：傾角越大，面板迎風投影面積變大，且上表面與下表面的流場分離更容易發生，導致 C_p _mean 與 C_p _rms 絶對值增加。此一趨勢在 $B/D = 2.0$ (長而窄) 時尤為明顯， 25° 傾角下的局部負壓峰值大幅增加，風險最高。

關於深寬比之影響， $B/D = 0.5$ (寬而短) 之模型在多數風攻角下表現出較佳之穩定性， C_p _mean 變化較平緩；相對的， $B/D = 2.0$ 之模型對風向改變較敏感，於某些角度出現較大負壓波動，顯示長窄面板在特定攻角下容易產生集中式吸力區域，對支撐構件之局部失效風險提高。

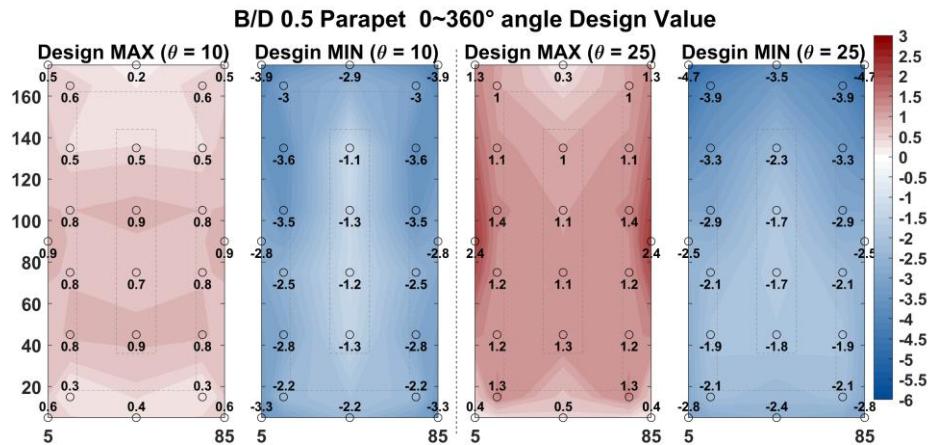
特殊案例分析顯示：

(1) 面板底下有阻擋物：於迎風方向 (θ 接近 0°) 會降低板下的下壓力，但在某些角度卻增強面板整體之上揚力 (負壓)，尤其當阻擋物前緣距離近且阻塞比高時，形成回流鼓起或二次渦旋，導致板體易被掀起。此情境於 $B/D=2.0$ 與高傾角下效果最顯著。



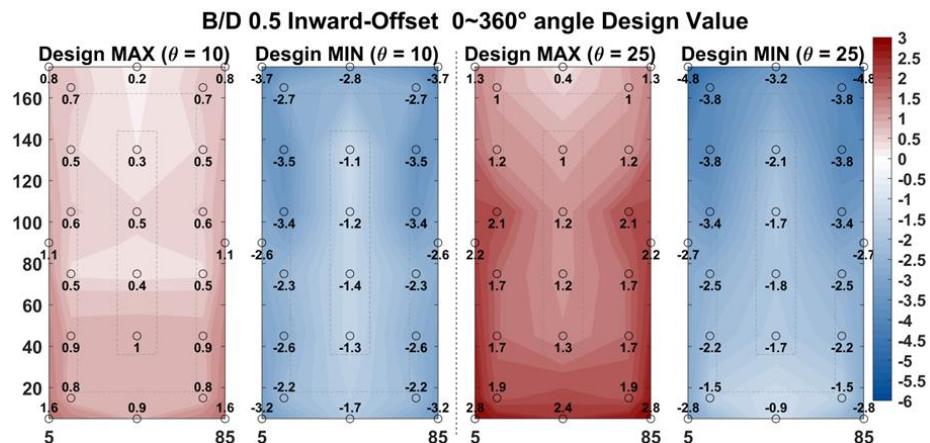
圖四：B/D 0.5 面板底下有阻擋物之設計值

(2) 女兒牆：短高度女兒牆能改變板前緣流場，減少前緣負壓，但亦可能在邊角區域形成強局部渦流，導致角隅壓力增加。女兒牆高度與板傾角之交互作用會影響整體風壓分布，需根據實際配置進行調整。



圖五：B/D 0.5 面板底下有女兒牆之設計值

(3) 面板退縮：將面板退縮於屋頂面內側，普遍觀察到下壓力增加（正壓效應），上揚力減少，整體對掀起之風險有抑制效果，但同時增加桿件受壓與屈曲之可能，對結構內力分配造成不同挑戰。



圖六：B/D 0.5 面板有退縮之設計值

基於上述觀察，本研究計算出各特殊案例相對於一般案例之調整係數，數值範圍約介於 0 至 1.5 之間（絕對值視上下壓取向而定），並針對不同 B/D 與 θ 提供了角度依賴之修正曲線，建議在實務設計時考量最大負值或正值之保守取法。

3.1 與現行規範比較

將實驗所得設計極值與國內「建築物耐風設計規範」(2015)、日本 JIS C8955 及美國 ASCE 7-22 之對應設計值進行比較時，發現棚架型單座屋頂系統在某些攻角與高傾角條件下，實驗值高於規範建議值。特別是高傾角 ($20^\circ \sim 25^\circ$) 與 $B/D=2.0$ 之組合，其負壓峰值超出規範值幅度達數十百分比，顯示規範直接套用地面式或貼附式模組之數值可能低估棚架型系統之風載風險。

因此，對於單座棚架型光電系統之設計，應引入專屬之設計參數或在現有表格中加入調整係數以防範潛在風害。

表一：實驗與國外規範值比較(實驗/國外)

Case		Experiment Design Value		JIS Design Value		Ratio (Exp. / JIS)	
B/D	θ	C_{fn}^+	C_{fn}^-	C_w^+	C_w^-	C_{fn}^+ / C_w^+	C_{fn}^- / C_w^-
0.5	10	0.51	-1.23	0.79	-0.95	0.65	1.30
	15	0.71	-1.38	0.79	-0.95	0.91	1.46
	20	0.99	-1.55	0.83	-1.03	1.20	1.51
	25	1.21	-1.68	0.88	-1.11	1.38	1.52
1.0	10	0.47	-1.00	0.79	-0.95	0.60	1.05
	15	0.67	-1.22	0.79	-0.95	0.85	1.29
	20	0.83	-1.56	0.83	-1.03	1.00	1.51
	25	0.86	-1.76	0.88	-1.11	0.98	1.59
2.0	10	0.33	-1.08	0.79	-0.95	0.42	1.14
	15	0.65	-1.42	0.79	-0.95	0.83	1.49
	20	0.79	-1.69	0.83	-1.03	0.96	1.64
	25	0.82	-1.78	0.88	-1.11	0.94	1.60

4. 致謝

致謝：研究工作承蒙經濟部能源署研究計畫(契約編號 114-S0302)及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。

5. 參考文獻

- [1] 羅元隆，棚架型及距置型太陽光電系統結構風洞試驗與分析研究，2017 年，工業技術研究院。
- [2] 羅元隆，「棚架型太陽能光電系統之耐風設計研究」，2019 年，國立臺北科技大學碩士論文。
- [3] 李勝雄，「屋頂型太陽能板之風力載重分析」，2013 年，國立成功大學碩士論文。
- [4] 陳若華，包匡，曾亮，李旻原，「太陽能板設置於不同斜屋頂上所受風壓之初探」，2012 年。
- [5] 鄭于涵，「獨立式單斜屋蓋結構風載有效受風面積影響之研究」，2020 年，淡江大學土木工程學系碩士學位論文。
- [6] AIJ, Architectural Institute of Japan Recommendations for Loads on Buildings ,2015.
- [7] ASCE, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-22) ,2022 .
- [8] 經濟部標準檢驗局，太陽光電系統之設計風載重估算指引(CNS 16189)，2022 年。
- [9] 中華民國風工程學會，建築物耐風設計規範及解說，2015 年。