

2025 年 10 月 31 日

## 虛實整合系統對於高樓建築形狀最佳化設計

盧威廷<sup>1\*</sup> Brian M. Phillips<sup>2</sup> Zhaoshuo Jiang<sup>3</sup><sup>1\*</sup>國立中山大學機械與機電學工程學系 助理教授<sup>2</sup> Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida 教授<sup>3</sup> School of Engineering, San Francisco State University 教授

### 摘要

本研究提出了一套使用代理模型輔助高樓形狀最佳化設計的虛實整合系統，包含了三項元件，分別為(1)適應性的模型切削技術、(2)高吞吐量的邊界層風洞試驗技術、以及(3)靈活的代理模型最佳化演算法。系統的強健性已由一個擁有雙層縮進的高樓形狀最佳化問題來證明。搜尋過程總共對 173 個模型進行風洞試驗，並在疊代過程中在最佳化設計的表現目標以及代理模型預測的預測準確性之間找到理想平衡。所測試的物理模型使用一台 7 軸機械手臂進行切削製造，其平均製造時間為 10 分鐘。所開發的風洞測試系統每天可測試 17 個模型，其平均測試時間為 25 分鐘(包含模型安裝、移除、以及 10 個風向角)。相較於標竿模型，搜尋所得的最佳解可降低目標函數高達 36%。本研究所開發的虛實整合系統預期將能夠在業主、建築師、以及結構工程師之間提供一個有效的溝通平台，在初始階段即能在設定的設計區間中找到理想的方案。此外，本研究所開發的三項元件亦能被獨立應用在不同研究方向。

**關鍵字：**虛實整合系統，最佳化設計，代理模型，風洞測試，切削製造、抗風策略  
**Keywords:** cyber-physical system, optimization, surrogate model, wind tunnel testing, subtractive manufacturing, aerodynamic strategy

### 1. 前言

對於高樓建築物，透過修改其外觀來降低風力反應是一種廣為人知的抗風策略。修改策略可粗略劃分為(1)斷面修改和(2)高度修改。斷面修改可改變建築物受風時的流場特性，包含氣流分離、氣流附著、與渦流頻率。常見的斷面修改策略包含改變建築物角隅形狀(Kwok et al., 1988)或是側邊形狀(Lu et al., 2023)。高度修改則是沿著建築物高度改變其斷面形狀，用以破壞渦流的連貫性，達到降低橫風向的風力反應的目的。實現高度修改的方法包含:扭轉(twisting) (Li et al., 2021)、漸變(tapering) (Chen et al., 2021)、與縮進(setback) (Tanaka et al., 2012)。相較於其他高度修正策略，目前為止尚未有研究報告針對縮進策略詳細進行系統化的比較與分析。舉例來說，結構工程師對於高樓理想的縮進高程位置以及其適合的斷面形狀尚未有清楚的了解。因此，如何有效的使用縮進策略是需要進行的研究課題。然而，由於該策略涉及許多設計參數，參數化研究並不是一個合適的研究方法。

相較來說，最佳化設計為一種能夠使用有限的資源在龐大的設計區間找到最佳解的理想手段。傳統的最佳化演算法可劃分為(1)區域搜尋與(2)全域搜尋。區域搜尋的概念為持續在目前最佳解附近進行搜尋，直到無法得到改善解為止。其優點為可快速得到收斂結果，但缺點為容易被卡在區域最佳解中。對於全域搜尋，其概念為學習自然界的行為。常見的全域搜尋演算法包含基因演算法以及粒子群演算法。相較於區域搜尋，該搜尋方法通常需要顯著大量的疊代過

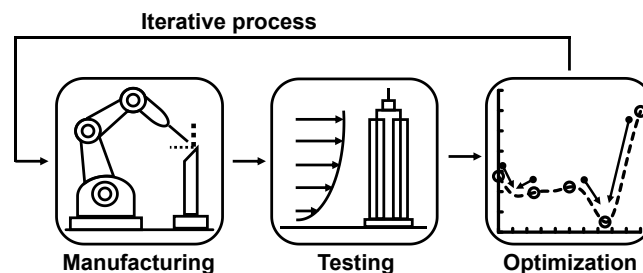
2025 年 10 月 31 日

程，意味著需要更多的資源花費，並不利於需要使用昂貴評估工具(例如: 風洞試驗或是計算流體動力學)的最佳化問題。

對於設計參數為連續的最佳化問題，鄰近解之間有關連性為一個合理的假設。根據此特性，研究人員可使用有限的資料，並透過代理模型(surrogate modeling) 技術來預測設計區間的整體行為。常見的代理模型包含徑向基底函數(radial basis function)、支援向量機(support vector regression)、類神經網路(artificial neural network)、以及克里金模型(kriging model)。為了提高代理模型預測的精準度，研究人員可使用自適性的填充策略在疊代過程增加蒐集的資料點，此技術稱之為代理模型最佳化演算法(surrogate-based optimization procedure)。此技術將更有效率且可克服傳統最佳化演算法所遭遇的侷限(Forrester and Keane, 2009)。代理模型形狀最佳化演算法已被研究人員廣泛應用於不同的受風敏感結構物，包含:橋面板(Xu et al., 2020)、大跨度結構物(Qiu et al., 2022)、以及高樓建築物(Elshaer and Bitsuamlak, 2018)。

在最佳化問題中，評估工具的成本與可靠度將顯著影響搜尋過程以及收斂結果。對於空氣動力學問題，評估工具主要可分物理實驗(風洞實驗)或是數值模擬(計算流體力學或 CFD)。對於高樓結構物，由於複雜的外型以及流場條件，邊界層風洞實驗為目前最可靠且唯一被耐風設計規範(ASCE-7-22, 2022)允許的評估工具。然而，目前為止，尚未有研究人員將代理模型演算法與風洞試驗進行整合，其概念稱之為代理模型虛實整合最佳化程序。相較於使用 CFD 做為最佳化程序的評估工具，虛實整合系統將需要克服更多挑戰，包含 (1)模型製造的速度(2) 實驗結果的不確定性以及(3)搜尋過程的收斂性。

本研究的目的是為建立一套針對高樓建築物的代理模型虛實整合形狀最佳化(surrogate-based cyber-physical aerodynamic shape optimization, SB-CP-ASO)程序，其通用流程如圖一所示。此程序為一個反覆疊代的過程，並將模型製造、風洞測試、以及最佳化演算法進行整合。在實體系統部分，本研究發展了一套可製造高樓複雜模型的 CNC 製造技術。此技術可根據目標模型以及現有模型的形狀差異，以參數化的方式建立切削路徑，優點為縮短製造時間以及減少材料使用量。製造的模型將會使用高頻力平衡風洞實驗 (high-frequency force-balance wind tunnel testing) 進行測試。在演算法部分，本研究發展了一套使用代理模型進行區域搜尋的自適性的搜尋策略，其特性將能夠兼顧全域探索(global exploration)與區域探勘(local exploitation)，為最佳化設計的關鍵目標。所發展的演算法將會根據風洞測試結果建議下一次疊代所需要製造與測試的模型，其流程將持續至觸發使用者所制定的中止條件。為了展示所發展程序的強健性，本研究針對一個擁有三個設計參數的雙層縮進策略的高樓，進行最佳化設計。本研究亦最佳化搜尋結果建議高樓如何使用縮進抗風策略，為實務應用提供重要參考資訊。



圖一：虛實整合最佳化通用流程圖

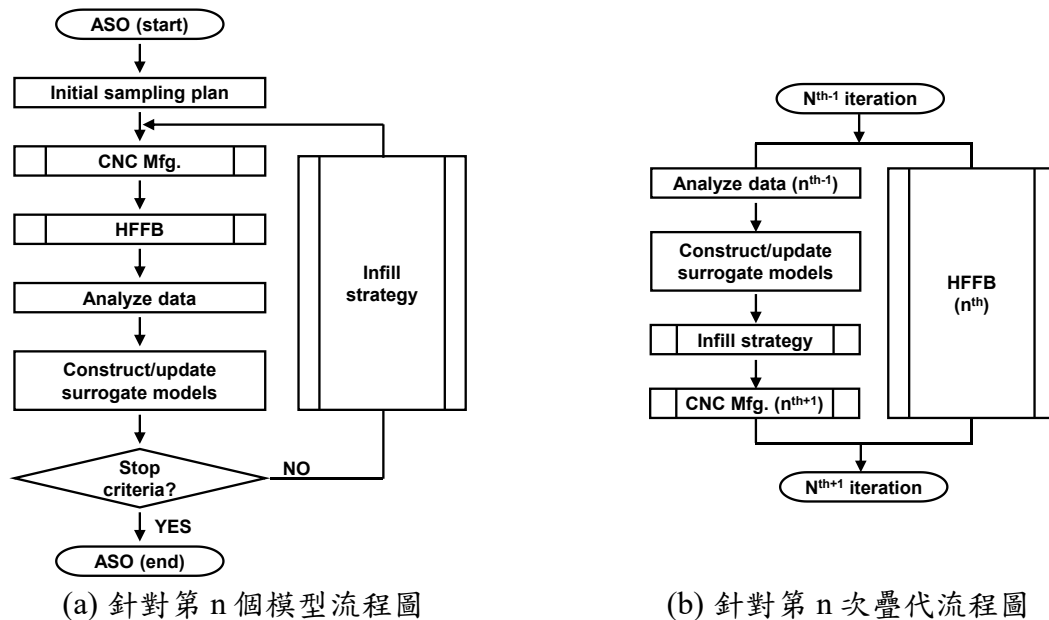
## 2. 研究方法

### 2.1 SB-CP-ASO 流程圖

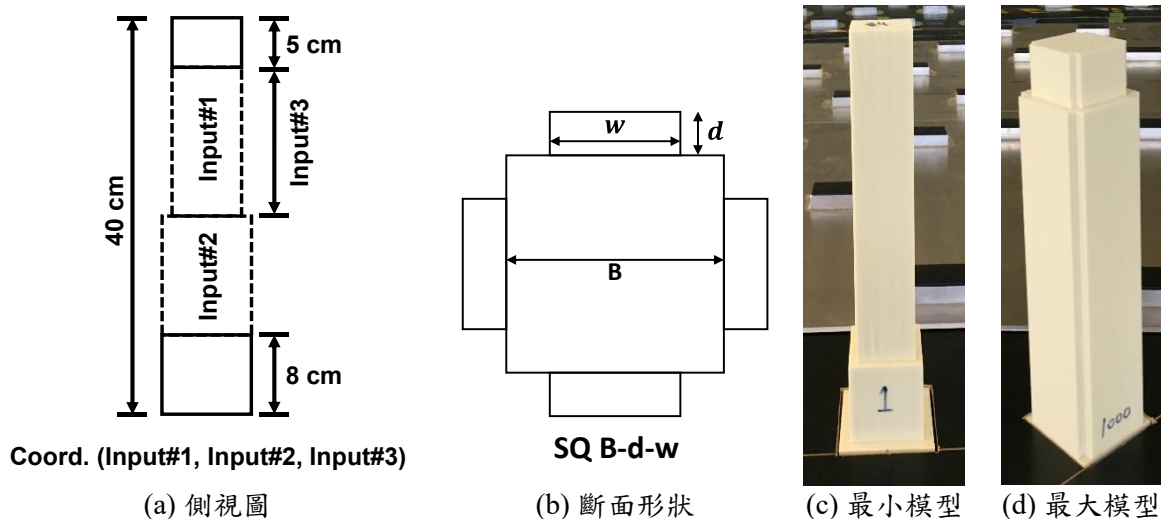
圖二 (a)顯示的是本研究所建立的 SB-CP-ASO 流程圖。在疊代過程開始之前，研究人員需要先決定初始位置。為了提高虛實整合系統的整體效率，本研究提出了平行製造與測試的概念(parallel manufacturing and testing, IIM&T)，所對應的流程如圖二 (b)所示。值得一提的是，圖二 (a)與 (b)之間代表的是相同的流程順序，但從不同角度進行描述，分別為從第幾個模型(圖二

2025 年 10 月 31 日

(a))以及第  $n$  次疊代(圖二 (b))。IIM&T 的概念為當第  $n$  個模型在進行風洞測試時，製造機器同時在製造第  $n+1$  個模型。若是製造模型所需的時間比風洞測試的時間短，本程序將可在預定的時間內最大化收集風洞試驗所能收集到的資料點，以便進行更多次的疊代。在每次疊代過程，研究人員將會根據所蒐集到的新資料點重新建立代理模型。演算法則會目前所掌握的資訊建議下一個，直到疊代過程滿足研究人員所定義的中止條件。



圖二：SB-CP-ASO 流程圖



圖三：雙層縮進形狀最佳化問題

## 2.2 最佳化問題

圖三顯示的是本研究所設計的高樓最佳化問題，模型高度為 40 cm。其設計區間由一個雙層縮進的抗風策略所組成，其側視圖如圖三(a)所示，一共擁有三個設計參數，分別為高樓下層的斷面形狀、上層斷面形狀、以及上層與下層之間的轉換位置。上層與下層的斷面形狀如圖三(b)所示，不同的斷面可使用 SQ B-d-w 描述。在該圖中，唯一的設計參數為  $w$ ，其大小介於  $0-B$  之間。下層斷面的  $B$  與  $d$  為 56 mm 與 7mm，上層斷面則為 70 mm 與 10mm。觀察設計參數可發現上層斷面將始終小於下層斷面，意味著任何組合皆為合理的高樓縮進抗風策略。對於第

2025 年 10 月 31 日

三個設計參數，上下層的轉換位置則介於距離底邊 8 cm 至 35 cm 之間。根據上述三個變數，設計區間中最小的模型與最大的模型(如圖三(c)與(d)所示)所對應的體積分別為  $1397 \text{ cm}^3$  與  $2930 \text{ cm}^3$ 。設計區間模型的風力反應將與一個擁有  $70\text{mm} \times 70\text{mm}$  的正方形斷等截面模型(SQ70,  $1960 \text{ cm}^3$ )進行比較(本研究的標竿模型)，用以量化各模型的性能表現。值得一提的是，雖然設計區間中最大與最小體積的變化顯著，但最佳解並不會預期發生在這些模型上。此外，在實務應用上，除了風力反應外，仍有其他設計因素需要考量，例如：使用目的、建築成本、抑或是投資報酬率。若不同的模型展現出類似的耐風性能，將能提供設計者更多的選擇以及參考。

### 3. 研究成果

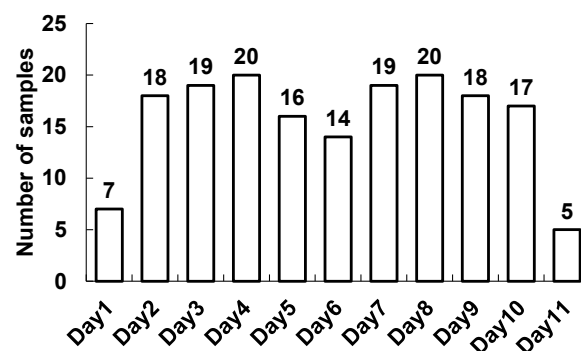
本章節探討雙層縮進的抗風策略最佳化搜尋的結果，並分別就模型製造、風洞測試、以及最佳化搜尋結果三個面向進行討論。

#### 3.1 模型製造與風洞測試

最佳化疊代過程總共進行了 11 個工作天，在演算法收斂前，一共測試了 173 個不同的實體模型。圖四顯示的是每天進行風洞測試模型的數量，在第一天，由於測試設備的安裝，僅測試 7 個模型。在最後一天，由於搜尋結果已收斂，僅測試 5 個模型。排除前述原因，本研究所建立的高頻力平衡風洞測試系統每天的吞吐量為 17 個模型，每個模型平均所需的測試時間為 25 分鐘，其中包含：模型安裝、模型拆除、量測儀器歸零、確認風場狀況、以及每個模型皆承受 10 個風向角( $0^\circ$ - $45^\circ$ ，增量為  $5^\circ$ )的風力反應。得益於本研究所發展的自適性切削技術，上述模型由 68 個獨立的試體實現(重複使用)，共節省 60% 的材料使用量。圖五顯示的是上述 68 個模型被重複使用的次數。如圖所示，有 13 個獨立模型沒有被重複使用，21 個獨立模型被重複使用 1 次，20 個模型被重複使用 2 次，12 個模型被重複使用 3 次，2 個模型被重複使用 4 次。平均來說，每個模型被重複使用 2.54 次。圖六(a)顯示的是疊代過程中製造每個模型所需的時間。每個模型平均製造時間為 10 分鐘，所需時間小於每個模型測試時所需的時間(25 分鐘)。因此，在疊代過程中，風洞測試的平均閒置時間為 45 秒(圖六(b))，此數據代表(1)製造模型所需的時間幾乎可忽略，以及(2)製造模型於虛實整合系統的挑戰已被克服。

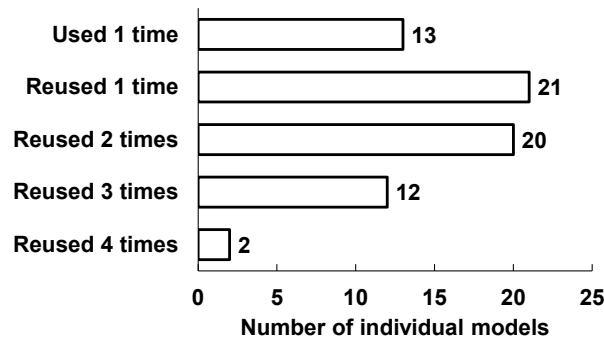
#### 3.2 最佳化收斂過程

圖七顯示的是最佳化問題在橫風向基底彎舉變異數( $\sigma_{CML}$ )的收斂過程。與標竿模型比較，最佳解在收斂過程中一共改善了 9 次(分別在疊代過程的第 14, 15, 17, 33, 41, 47, 53, 57, 與 107 次)，最終解可減少風力反應達 36%。此外，由圖中可發現代理模型的預測經常會有不保守的情形發生，這是一個在使用代理模型輔助最佳化設計時不可忽視的問題。此現象可藉由驗證最佳解的方式來辨識，優點為演算法可立刻更正不正確的預測值，避免在不必要的區間浪費其他資源。

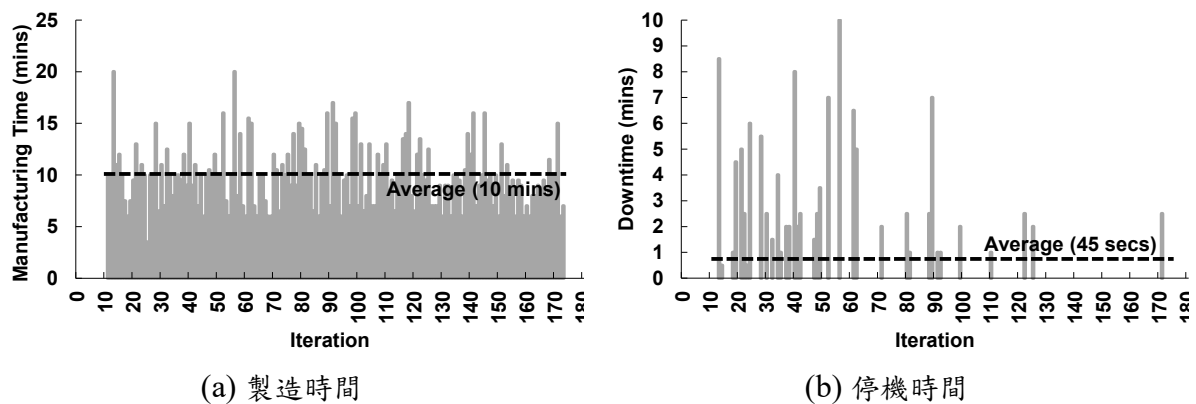


圖四：每日風洞測試模型數量

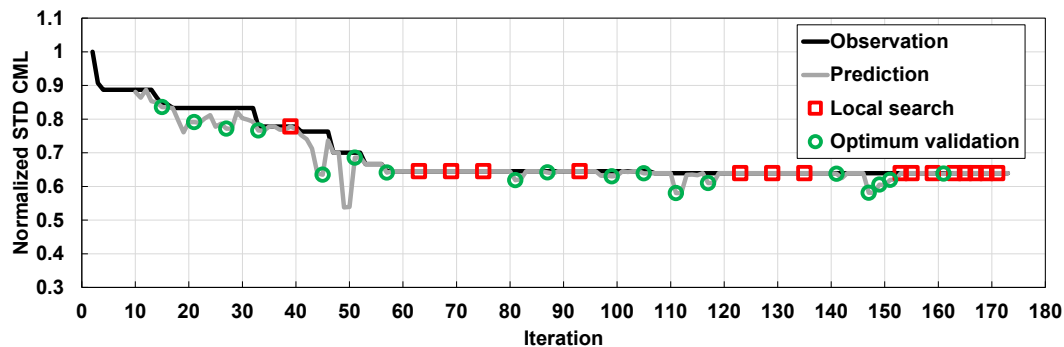
2025 年 10 月 31 日



圖五：模型重複使用次數



圖六：疊代過程所需製造時間與停機時間



圖七：目標函數疊代過程

### 3. 結論

本研究提出了一種針對高樓建築物使用代理模型輔助進行虛實整合形狀最佳化(SB-CP-ASO)的程序。SB-CP-ASO 由三個元件組成，分別為：(1)適應性減材製造技術，(2)高吞吐量的風洞測試程序，以及(3)靈活的最佳化搜尋策略。通過平行製造與測試(IIM&T)技術，最大程度減少風洞測試的停機時間。此外，本研究針對高樓設計了一個尚未探索的雙層縮進抗風策略，並使用所開發的程序進行最佳化設計與評估程序的強健性。

本研究一共測試了 173 個物理模型。得益於上述三項元件的巧妙整合，疊代過程節省 60% 的材料使用量，每個獨立模型平均被重複使用 2.5 次，平均製造時間為 10 分鐘。由於 IIM&T 的概念，風洞測試的平均停機時間僅有 45 秒，每日平均吞吐量為 17 個模型(包含 10 個風向角)，

2025 年 10 月 31 日

意味著製造模型在虛實整合系統中的挑戰已被克服。對於最佳化搜尋結果，相較於標竿模型，最佳解在橫風向的基底灣舉變異數可減少高達 36%。根據搜尋過程，本研究亦對代理模型輔助最佳化設計提出建議與改善方針。

本研究呈現了如何將 CNC 製造、風洞測試和適應性代理模型技術整合至高樓建築物的線上形狀最佳化程序。該程序預計將提供一個高效的平台，供業主、建築師和結構工程師在設計空間中尋找具有實際應用潛力的候選方案。此外，本研究開發的三個組件可以單獨應用於不同領域，並具有進一步的應用前景。

#### 4. 參考文獻

- [1] Kwok, K.C.S., Wilhelm, P.A., Wilkie, B.G., 1988. Effect of edge configuration on wind-induced responses of tall buildings. *Engineering Structures*. 10(2), 135-140.
- [2] Forrester, A.I.J., Keane A.J., 2009. Recent advances in surrogate-based optimization. *Progress in Aerospace Sciences*. 45(1-3), 50-79.
- [3] Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., Kim, Y.C., 2012. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 107-108, 179-191.
- [4] Elshaer, A., Bitsuamlak, G., 2018. Multiobjective aerodynamic optimization of tall building openings for wind-induced load reduction. *Journal of Structural Engineering*. 144(10), 04018198.
- [5] Xu, G., Kareem, A., Shen, L., 2020. Surrogate modeling with sequential updating: applications to bridge deck-wave and bridge deck-wind interactions. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 34(4), 04020023.
- [6] Chen, Z., Huang, H., Xu, Y., Tse, K.T., Kim, B., Wang, Y., 2021. Unsteady aerodynamics on a tapered prism under forced excitation. *Engineering Structures*. 240, 112387.
- [7] Li, Y.G., Yan, J.H., Li, Y., Xiao, C.X., Ma, J.X., 2021. Wind tunnel study of wind effects on 90° helical and square tall buildings: A comparative study. *Journal of Building Engineering*. 42, 103068.
- [8] ASCE 7-22, 2022. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- [9] Qiu, Y., Yu, R., San, B., Li, J., 2022. Aerodynamic shape optimization of large-span coal sheds for wind-induced effect mitigation using surrogate models. *Engineering Structures*. 253, 113818.
- [10] Lu, W.T., Phillips, B.M., Jiang, Z., 2023. Effects of side and corner modification on the aerodynamic behavior of high-rise buildings considering serviceability and survivability. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 233, 105324.