

12.03-12.04

國立成功大學



中國機械工程學會第38屆
全國學術會議論文集

Part C.
| 固力與設計 |

主辦 / 中國機械工程學會、國立成功大學

承辦 / 國立成功大學 機械工程學系

指導單位 / 科技部、教育部

協辦單位 / 科技部工程司工程科技推展中心

結合仿生概念與最佳化方法進行無人機葉片改良

施驊宸¹、蔡惠雅¹、黃靖珈¹、吳欣璇¹、楊政融^{1*}

¹ 國立中山大學人文暨科技跨領域學士學位學程

*Email: cjyang0521@mail.nsysu.edu.tw

摘要

關鍵字：無人機葉片、三維掃描、三維列印、田口方法、最佳化設計

影響無人機飛行好壞的關鍵因素之一是葉片升力，本研究透過仿生概念鎖定桃花心木當作新葉片設計的目標。而為了比較性能差異，選定原本無人機葉片以及Thingiverse網站上的開源葉片做為比較對象。葉片製作採用三維列印，列印參數的調整共有填充率、線材種類、和葉片類型共三個因子，並利用田口方法來規劃與分析實驗。最後，由變異數的分析取得單純考慮升力和噪音的最佳設計參數；並從望想分析來考慮當升力及噪音共同影響時，在權重不同下綜合兩目標的最佳參數。

1. 導論

1.1 研究動機

從科技發展的趨勢來看，我們可以發現許多工程科技都會透過模仿生物的結構、功能或原理來開發出更好性能的產品。因此，當一個工程設計問題出現而無法獲得優化結果時，從大自然裡尋找解答就成為一個好策略。舉例來說，德國賓士一款車子的外型仿照 Boxfish 的造型結構，成功讓風阻值降到僅剩0.19，進而達成節省油量、提升車身剛性與減低車重，勝過其他車輛許多^[1]。

近年來，無人機在工業、農業、救災甚至是娛樂都受到高度的重視。而影響其飛航性能的關鍵因素之一就是葉片提供的升力。升力的控制不僅影響著起降，對於飛行過程中能迅速變換方向也是。目前的無人機都是靠著電池來提供飛行的動力，包括起降與飛行。因此在相同電池容量的情況下，葉片本身所表現出的特性就會影響到飛行效能與續航時間。

在自然界中有許多動植物身體構造具有提供升力的特性，能夠以更少的能量達到相同的運動效果。因此，本研究目標為嘗試葉片結合仿生學的可能性，提出一種新的葉片型式，比起現有的設計能在相同轉速下提供更多的升力，同時又不會產生過大的噪音。藉此來提升葉片效能，減少能源消耗，延長飛行時數。

1.2 文獻回顧

航太分析公司 Teal Group 針對商業無人機市場進行研究，並於2019年7月發布調查結果，預估全球無人機市場於2019年將接近500萬架合計49億美元，2028年時預期將接近800萬架合計143億美元。此商業市場的突破性成長主要是因為美國聯邦航空總署 (FAA) 開放領空的政策，導致商業領域使用大幅度的蓬勃發展，譬如亞馬遜就採用機隊來進行貨運投遞^[2]。

影響無人機飛行好壞最重要的就是升力，透過控制螺旋槳的轉速，使無人機可達成垂直升降、水平移動與傾斜側向飛行等行為，所以葉片的效能就格外重要^[3]。葉片的升力有兩大關鍵：一，影響升力最大的部分是靠近葉片前端的部分；二，改變葉片的攻角或弦，可以獲得更大的升力^[4]。然而，除了透過改善葉片局部的幾何特徵外，是否可以引入其他創新設計的方式來改善無人機葉片性能呢？

本研究思考透過仿生學來提高葉片效能，觀察現今各種善於滯空生物的飛行原理後，透過模擬(或模仿)的方式來引入無人機飛行。經過文獻搜尋與比較後，本研究提出將桃花心木作為仿生原型，原因有二^[5]。

- (1) 桃花心木特殊的構造可以藉由旋轉所產生的升力拉長滯空時間。
- (2) 二、桃花心木平行旋轉、不翻轉，若非平面狀態也會在飛行時自動導正，不會傾斜。

在獲得不同的葉片設計想法後，必須透過一套有系統的實驗設計來快速獲得驗證。本研究使用田口方法設計實驗，藉由統計學的方式來進行實驗管控，達成產品品質的改善的目的。此方法在生物學、行銷及廣告也常被利用^[6]。此方法依照設計參數(控制因子及其水準值)來選用適當直交表，並透過訊號/雜訊比(S/N)與變異數分析，得到設計參數對產品品質的影響程度，進而獲致特定操作條件之最佳化設計參數組合^[7]。

完成所有規畫之實驗組合後，依照田口方法之公式，使用Minitab軟體來進行推算^{[8][9]}，找出所有實驗組合中性能最佳的參數，並預測最好的參數組合^[10]。

1.3 本研究目的

為了符合能在相同電池容量下藉由改變葉片型

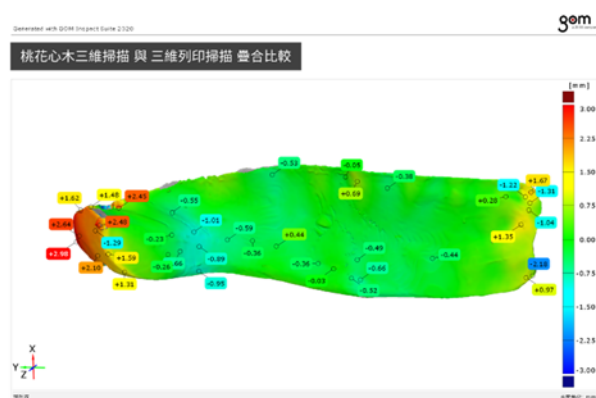
式提供無人機更長的續航力，本研究藉由結合仿生學進行葉片幾何設計，以相同的馬達轉速來探討多種無人機葉片在升力效能上的差異，最後由田口方法來獲得最佳的葉片設計參數。

2. 研究方法

2.1 實驗工具

2.1.1 三維掃描

本研究採用 ATOS Core 高精度光學掃描系統進行物件的掃描。除了用來掃描、製作桃花心木翻印模型，也用來比較三維列印得到的桃花心木與原始桃花心木外觀與形體的差別，確保幾何誤差範圍，如圖一。ATOS Core 掃描器使用細條藍光投射到物體表面上，可以過濾掉環境的光線干擾，並透過左、右兩台攝像鏡頭來蒐集物體數據。匯集蒐集到的各個點資料後，即可生成一個完整的物品掃描檔。



圖一：桃花星木原始掃描 vs. 三維列印掃描檔

在開始掃描前，先將欲掃描的桃花心木噴上鈦粉，並視情況貼上定位點，讓機器更容易地識別物件的位置、記錄物件幾何特徵。前置作業準備就緒後，即可開始掃描。一個掃描階段結束後，要接續掃描下個部位時，可以自行移動物件到要掃描的區域繼續掃描，機器會識別定位點並接續記錄，最終完成整體物件的掃描資料。掃描完成的檔案可以透過 GOM Inspect Suite 參數式檢測軟體來做各項檢測，比較原始檔案與掃描檔案的差異，並可以輕鬆地將測量的結果導出成報告，展示各項測量結果。

2.1.2 三維列印

三維列印是透過一層層堆積出需求物件的製造方式，早期常用於零件打樣。近年來由於材料科學與製程科技的進步，包括航太、汽車、醫療、藝術等產業的採用率大為提高。

本研究使用的三維列印機器是INFINITY 3DP New X1，線材直徑1.75mm，材質適用PLA(Polylactide)及ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)。切片軟體採用開源的Cura15.04，在整個實驗裡製程參數除了作為操作變因的填充率、熱床溫度及噴頭溫度這三項外，

其他參數的設定值皆相同。

列印的物件包括用來實驗無人機升力與噪音的葉片和葉片連接馬達的轉接頭。其中葉片型式包含透過三維掃描獲得的大疆原廠葉片(DJI, 型號:8743F)、桃花心木葉片以及在Thingiverse網站提供用的無人機葉片；而轉接頭的部分則是依據葉片幾何尺寸自行使用繪圖軟體Inventor繪製並列印出。

2.1.3 量測儀器

使用儀器包括量測風速的測風儀以及噪音測量的分貝儀，以下依序介紹。

(1) BENETECH GM816測風儀是一款扇葉型風速計，測量範圍為0~30m/s，精確度： $\pm 5\%$ ，解析度：0.2m/s。此風速儀讓流動空氣經過一預設的風洞，藉由風洞中扇葉的轉動速率來計算出風速。由於擺設距離和角度的不同會導致測出的風速不同，所以在測量過程中扇葉必須盡量與風向保持90度角。此儀器可量測出風量的最大值、最小值和平均值。

(2)分貝儀是一款結合Android手機系統的手機分貝測量APP。透過手機麥克風接收音源，可以錄製須測量的音訊，並同時即時顯示聲音分貝。此儀器可量測音訊最大分貝值、最小分貝值以及平均分貝值。

2.2 實驗設計

本研究目的為比較仿生設計的葉片跟現有DJI無人機葉片和Thingiverse共享葉片的優劣。此三種不同造型的葉片設計，利用田口實驗方法來反映出在升力與噪音的好壞，並確認無人機葉片創新的可行性。

實驗參數為列印材質、葉片樣式和3D列印密度，並使用田口方法直交表來設計實驗，以下對各參數做說明：

1. 列印材質：以三維列印不同材質所對應的機械強度，評估製作新葉片的可行性。
2. 葉片樣式：透過三維掃描與三維列印複製葉片，比較無人機葉片創新的可能性。
3. 3D列印密度：藉由高、中、低密度的填充率查看彈性與饒度對於升力和噪音的關聯性。

田口實驗中我們的控制因子A設定為列印材質，水準分別為PLA (A1) 和ABS (A2)；控制因子B為葉片樣式，水準分別是DJI原廠葉片(三維掃描翻印) (B1)、Thingiverse葉片掃描(B2)、桃花心木葉片(三維掃描翻印) (B3)；控制因子C為3D列印填充密度，包括100%填充(C1)、85%填充(C2)和70%填充(C3)。接下來運用田口方法L18直交表進行實驗。升力採取望大特性(數值越高越好)；噪音則是採取望小特性(數值越低越好)。實驗量測方法採每組實驗三次，每次實驗計時二十秒，並於密閉無風和雜音環境進行測試。每次實驗前皆歸零數值，實驗時皆保持固定距離、高度、轉速，以確保實驗數值之準確性。

升力越大為升力實驗目標，故採用望大特性雜

訊比(Signal-to-noise ratio, S/N)，如公式(1)；噪音越小為噪音實驗目標，故採用望小特性雜訊比，如公式(2)。其中n為實驗數。

$$S/N = -10\log((\sum_{i=1}^n 1/y_i^2)/n) \quad (1)$$

$$S/N = -10\log(\sum_{i=1}^n y_i^2 / n) \quad (2)$$

3. 結果與討論

3.1 田口單目標最佳化

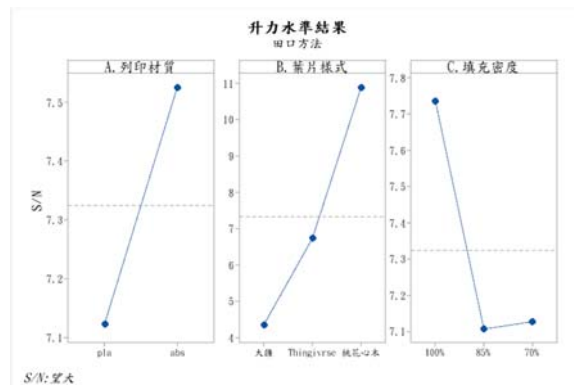
本次實驗採取田口方法-L18直交表，針對可能影響無人機葉片升力和噪音的三個控制因子(列印材質、葉片樣式和填充密度)來計進行實驗設計。升力由於希望在同樣的輸出功率下得到更大的數值，因此採望大特性(數值越高越好)；噪音則是希望越小越好，故採用望小特性(數值越低越好)。以下依序說明單目標最佳化的實驗結果。

3.1.1 單目標—升力

18組實驗數據與對應雜訊比如表一。各因子對應的水準如圖二和各因子對應的水準差距表二。

表一：升力實驗數據與對應雜訊比

實驗號碼	第一次實驗	第二次實驗	第三次實驗	信噪比
1	1.6	1.6	1.6	4.082
2	1.6	1.5	1.7	4.048
3	1.5	1.5	1.5	3.522
4	2.3	2.5	2.3	7.463
5	2.2	2.2	2.3	6.973
6	2.4	2.3	2.2	7.218
7	4.0	4.1	4.1	12.183
8	2.7	2.7	3.0	8.911
9	2.9	3.2	3.1	9.711
10	1.7	1.6	1.8	4.579
11	1.7	1.7	1.8	4.768
12	1.8	1.8	1.8	5.105
13	2.0	1.9	2.1	5.999
14	2.3	2.1	2.2	6.830
15	1.8	2.0	2.2	5.933
16	4.0	4.0	4.1	12.112
17	3.7	3.5	3.6	11.119
18	3.6	3.7	3.7	11.283



圖二：各因子對應的水準—升力

表二：各因子對應的水準差距

	A	B	C
水準1	7.124	4.351	7.736
水準2	7.525	6.736	7.109
水準3	-	10.887	7.129
最大差距	0.402	6.536	0.628

比較水準的差距可得出影響升力因子重要程度排序是：B(葉片樣式) > C(填充密度) > A(列印材質)，最佳配方推算則為A2B3C1。在進一步利用變異數分析(ANOVA)則可以看出可得知各項因子之升力貢獻率(影響程度)，如表三。

表三：變異數分析—升力

ANOVA	自由度	平方和	均方	淨平方和	貢獻度
A	1.000	0.727	-	-	-
B	2.000	131.265	65.633	129.621	0.903
C	2.000	1.527	-	-	-
誤差	12.000	10.082	-	-	-
合併誤差	5 (1+2+12)	12.336	0.822	13.980	0.097
總和	17.000	143.601	-	143.601	1.000

由於因子A與因子C兩者數值過小，平方和納入合併誤差計算，均方、淨平方和與貢獻度則不計。而貢獻率為因子B(葉片樣式)最高，代表控制因子B影響葉片升力數值最大；反之，因子A與因子C則影響最小。最後，由田口最佳推算出的參數組合A2B3C1進行實驗所得到的升力是4.1 m/s。

3.1.2 單目標—噪音

18組實驗數據與對應雜訊比如表四。各因子對應的水準如圖三和各因子對應的水準差距表五。

表四：噪音實驗數據與對應雜訊比

實驗號碼	第一次實驗	第二次實驗	第三次實驗	信噪比
1	64.9	65.3	66.7	-36.343
2	67.8	64.8	64.5	-36.354
3	67.3	64.5	68.7	-36.503
4	54.7	55.3	60.6	-35.107
5	61.1	62.2	60.4	-35.740
6	60.7	60.7	61.6	-35.707
7	67.8	61.8	67.5	-36.359
8	62.6	73.3	70.3	-36.762
9	75.3	62.3	66.1	-36.665
10	60.7	60.3	60.4	-35.630
11	59.3	60.1	60.0	-35.534
12	59.1	60.1	59.9	-35.520
13	57.9	59.1	58.8	-35.358
14	58.9	59.6	59.3	-35.456
15	58.6	58.0	58.5	-35.323
16	66.4	64.0	63.8	-36.224
17	68.4	70.4	69.9	-36.849
18	70.3	70.7	68.1	-36.866

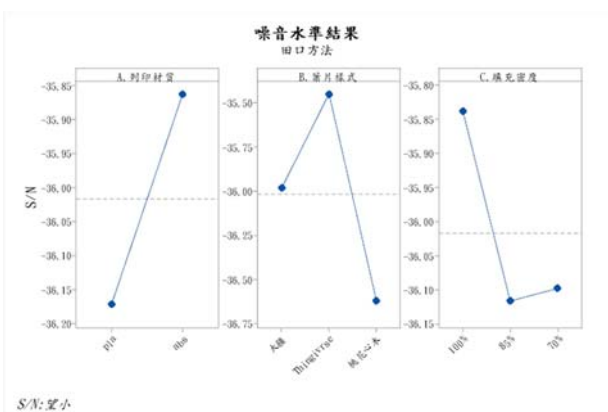
ANOVA	自由度	平方和	均方	淨平方和	貢獻度
A	1.000	0.429	-	-	-
B	2.000	4.134	2.067	3.903	0.666
C	2.000	0.292	-	-	-
誤差	12.000	1.009	-	-	-
合併誤差	5 (1+2+12)	1.730	0.115	1.957	0.334
總和	17.000	5.864	-	5.860	1.000

由於因子A因子C兩者數值過小平方和納入合併誤差計算，均方、淨平方和與貢獻度則不計。而貢獻率為因子B(葉片樣式)最高,代表控制因子B影響葉片噪音數值最大;反之,因子A與因子C則影響最小。最後,由田口最佳推算出的參數組A2B2C1合進行實驗所得到的噪音58.6dB。然而,田口最佳推算輸給L18實驗中最佳的第四組與次佳的第十五組結果,但差距僅有2%多,尚在可接受範圍內。

3.2 多目標最佳化設計分析

從上述單目標最佳化結果可以看出,其實升力跟噪音除了彼此不是相同特性的目標函數外,從最佳推算結果參數也看出要找到同時達成兩項目標最佳化的結果的參數必須要在進行深入研究。為了得出一個在升力及噪音上綜合表現最佳的結果,本研究使用望想研究來得到這項結果。

採用此法要設定參數-權重(所有目標的權重加總為1),調整這參數則可以得到不同要求的最佳結果。例如:希望著重在無人機的葉片在旋轉時噪音越小越好,而升力排在其次,這時可以將噪音的權重提高(例如:從0.5調至0.8),而升力權重則會對應下降(從0.5調至0.2)。本研究依序將權重以0.1為間格,將升力及噪音分別從權重0.1配置到0.9進行多目標最佳化分析,其結果如表七。



圖三：各因子對應的水準-噪音

表五：各因子對應的水準差距

	A	B	C
水準1	-36.171	-35.981	-35.837
水準2	-35.862	-35.449	-36.116
水準3	-	-36.621	-36.097
最大差距	0.309	1.172	0.279

比較水準的差距可得出影響噪音因子重要程度排序是：B(葉片樣式) > A(列印材質) > C(填充密度)及最佳配方推算：A2B2C1在進一步利用變異數分析(ANOVA)則可以看出可得知各項因子之升力貢獻率(影響程度),如表六。

表六：變異數分析-噪音

表七：不同權重下的最佳化參數

升力權重	噪音權重	最佳參數
0.1	0.9	A2B2C1
0.2	0.8	A2B2C1
0.3	0.7	A2B2C1
0.4	0.6	A2B2C1
0.5	0.5	A2B2C1
0.6	0.4	A1B2C1
0.7	0.3	A1B2C1
0.8	0.2	A1B3C1
0.9	0.1	A1B3C1

從結果得知當權重為0.5/0.5(升力/噪音)及0.4/0.6(升力/噪音)及0.3/0.7(升力/噪音)及0.2/0.8(升力/噪音)及0.1/0.9(升力/噪音)的最佳結果都是A2B2C1。而0.6/0.4(升力/噪音)及0.7/0.3(升力/噪音)最佳結果都是A1B2C1。最後0.8/0.2(升力/噪音)及0.9/0.1(升力/噪

音)最佳結果都是A1B3C1。

4. 結論

本研究透過田口方法與ANOVA整理實驗數據後
可得知以下兩點發現：

- (1)葉片樣式(因子B)影響升力與噪音最大。
- (2)列印材質(因子A)與填充密度(因子C)兩者影響不大。根據ANOVA可知兩因子(A與C)綜合起來在升力貢獻度也只有9.74%;噪音貢獻度則有33.4%。

此外，為了理解3D列印製造誤差對實驗真實性所帶來的可能衝擊，利用GOM檢測軟體比對後得到以下兩點推論：

- (1)桃花心木種子經過掃描再列印後，於葉片末端會有向上偏差的現象。當馬達給予葉片旋轉動力會使翼面彎曲所產生的上反角在受風時，因白努利原理產生下壓力。但因為有向上偏差使得上反角比原本的大(更接近最優角45度)，讓桃花心木表現最好。
- (2)經過掃描比對後發現Thingiverse葉片的列印誤差導致原本流線型的表面有一些小小的凸起或邊界的不順暢，造成風速實驗測試表現不如桃花心木；但也因為較不平整的表面使其在噪音實驗中的表現優良。

5. 誌謝

本論文為科技部計畫編號：MOST 108-2622-E-110-016-CC3之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. 張之杰, "Mercedes-Benz水族展? 仿生概念車跟條魚一樣!", U-CAR (2005). URL: <https://reurl.cc/Q69dgo>
2. 林正軒, "eVTOL無人機之發展與應用", 材料世界網 (2020). URL : <https://reurl.cc/dVMjad>
3. James Huang, "【最新無人機知識整理】2020年嶄新的無人機時代即將來臨, 您準備好了嗎!!!", DronesBoy 無人機男孩 (2019). URL: <https://reurl.cc/9ZKYWO>
4. G. Andria, A. Di Nisio, A.M.L. Lanzolla, M. Spadevecchia, G. Pascazio, F. Antonacci, G. M. Sorrentino, "Design and Performance Evaluation of Drone Propellers", 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace) (2018)
5. 楊雅晴, 黃婉筑, 吳舒婷, "乘風而上, 炫然而下—桃花心木種子", 私立德光中學 (2014).
6. 王慧君, "馬氏-田口系統之特性探討及其於信用評

分之應用", 國立交通大學 (2003).

7. 吳復強, "產品穩健設計 - 田口方法之原理與應用", 高立圖書 ISBN : 986-7953-89-4 (2005).
8. Vitarka Kadapa, "Desirability Function Analysis (DFA) Step by Step - WEDM", YouTube (2020).
9. 童超塵, "反應曲面法-Minitab操作", 國立雲林科技大學 (2008).
10. D.M. D'Addona, Sunil J Raykar, Dharmendra Singh, Davorin Kramar, " Multi Objective Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters with Desirability Function", 14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '20 (2021).