2014 年臺灣國際科學展覽會
優勝作品專輯

作品編號　100033

參展科別　工程學

作品名稱　蟬翼翅脈結構分析與振翅試驗

得獎獎項　大會獎：三等獎

就讀學校　臺北市立成功高級中學

指導教師　蔡豐光、魏蜀芬

作者姓名　洪崴

關鍵字　翅脈、結構、振翅

作者簡介

我是洪崴，目前就讀成功高中。從小，我就對昆蟲充滿興趣，我也很好奇為什麼這些看似微小的生物，卻擁有比人類還要出色的特殊能力，但這些都只是好奇而已。

升上國中和高中後，實驗課程多了不少，也讓我從思考逐漸變成實際操作。這讓偏好動手多於觀察的我著實開心不少，也從實驗中得到不少知識。

很高興這次能夠參加２０１４年台灣國際科展，期望能藉由這次的展覽，讓我與世界各地的科學同好交流，並拓展個人的國際觀。

摘要

一、　中文摘要

以不銹鋼、鋁、壓克力暨熱熔膠膜仿製高砂熊蟬之翅脈結構，於完成覆膜後，作為實驗之五種仿翅測體。另設計製作兩種不同控制功能之四連桿振翅機構，再搭配其他觀測儀器、設備與簡易器材，依振翅幅度、振翅頻率、攻角及風速等影響飛行的變因控制組合成 72 個實驗模組。每種仿翅測體的 72 個模組各執行 4 次每次 10 秒鐘之振翅實驗，觀測與計算出各組測體之翼緣撓度、升力、推距與翅面壓力等合計 1440 個模組數據並配合相關理論公式加以比較分析、論證。另外，針對蟬翼翅室〈脈〉的結構形抗加以分析，並設計四款不同之翅室〈脈〉結構組合型態，分析比較其應力與應變關係，找出最佳的肋膜結構組合，以作為人類生活與科技運用器材結構設計與運用之參考，例如降落傘、風帆船、薄膜建築結構、微機電系統〈MEMS〉、太陽能光電建築〈BIPV〉與人工飛行振翅翼等。

二、 英文摘要

Imitates wing vein structure of *Cryptotympana takasagona* by the stainless steel,aluminum, acrylic and the hot melt adhesive film, after completing the covered film, finishing made into five kinds imitates wings as experimental object. The other designed two different control functions of the four-bar linkage Flapping Wings equipment, and then with the observation instruments and simple equipment, combined into 72 experimental module in accordance with the change of affect flight control about wings amplitude, frequency of flapping wings, the angle of attack and wind speed. The each of imitation wings measured 72 modules each perform four times every 10 seconds wings flapping, observations and calculated the each of imitation wings deflection of wing tip, lifting force, moving distance and the wing surface pressure, collected total 1440 modules data and cooperated with relevant theoretical formula to comparative analysis and demonstration. In addition, the analysis Securidaca wing room <veins> Anti-shaped structure, and designed four different combinations of wing room <veins> structure patterns, comparative analysis of the relationship between stress and strain, in order to find the best combination of pleural structure, as a reference of structural design for human life and use of technology equipment, for example parachute, wind sailing, film structures, Micro-Electro Mechanical Systems <MEMS> ,Building Integrated Photovoltaic <BIPV> and artificial flapping wing aircraft, etc.

蟬翼翅脈結構分析與振翅試驗

壹、 前言

絕大部份的飛行生物，對其飛行特性的探討模式，依生物體構造可粗略概分為身軀、翅翼與其間的連動機構等三大部份；此三大部份透過生物體的自主與交感神經系統組成複雜精密的振翅連動機制與結構，而在所有飛行生物中，昆蟲即以其完美的演化與機能馳騁於天空。不論是乘風展翅或是臨敵避險，在欣賞昆蟲優美與機動的振翅之際，總不時瞥見那高速的振翅幅度與流線型的翅膀，於渴望如其自由飛翔的同時，我也不免好奇──到底昆蟲的翅膀擁有什麼特異的性能與結構，使牠歷經萬年仍能持續的遨遊空中。

一、研究動機

在去年暑假一次野外露營的偶然機會中，我發現高砂熊蟬羽化的過程，破殼未久即逐漸展開美麗的翅膀 (紀錄影片網址 http://www.youtube.com/watch?v=HSaN9U0db9I)。

散發翠綠色光澤的翅脈分布在燈光下清晰可見，驚嘆之餘，也引發為何看似薄弱的蟬翼，能承受振翅時的強大風壓？又蟬翼上美麗的翅脈分布，純粹只是美麗的造型，還是會為牠的飛行帶來何種影響？在見到這隻高砂熊蟬羽化的過程時，我的內心也萌生了探索高砂熊蟬翅翼結構的想法。

二、研究目的

嘗試以現今科技材料並參考高砂熊蟬翅翼的結構特性仿製不同斷面尺寸與幾合結構翅脈的蟬翼，並在相關影響飛行的變因控制下，以四連桿振翅機構實驗觀測及計算出其相關數值並配合理論公式加以分析論證，以作為人類生活與科技運用器材結構設計與運用之參考，例如降落傘、風帆船、薄膜建

築結構、微機電系統〈MEMS〉、太陽能光電建築〈BIPV〉與人工飛行振翅翼等；相信未來以科技的發展亦能夠創造出比昆蟲翅翼更具效能的仿生型微飛行器。

貳、 研究方法與過程

一、研究設備與材料準備

1. 設備類

(1) OLYMPUS CX-21 光學顯微鏡：如圖 1

(2) 簡易風洞實驗箱：如圖 2、3

(3) 標本翻拍燈架：如圖 4

(4) 0.01mm~150mm 游標卡尺：如圖 5

(5) 電熨斗

(6) 0.1g~5kg 電子磅秤

(7) 風速計：如圖 6

(8) HITACHI 電鑽

圖 1

(9) SONY PC-350 DV 攝影機 & PANTEX 數位照相機

(10) Power Director 10 威力導演影音編輯軟體

(11) 電腦 & 繪圖、FPD-8010E 測壓分析軟體：如圖 7

圖 2

圖 3

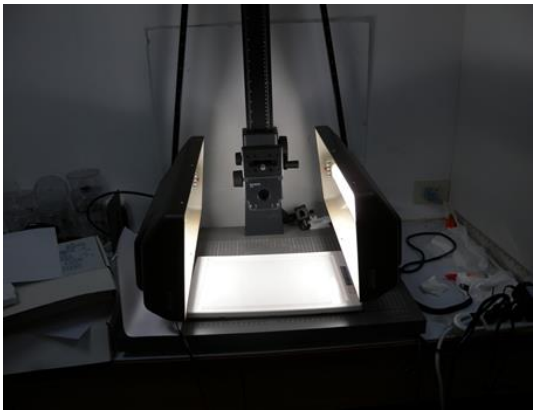


圖 4

圖 5

圖 6

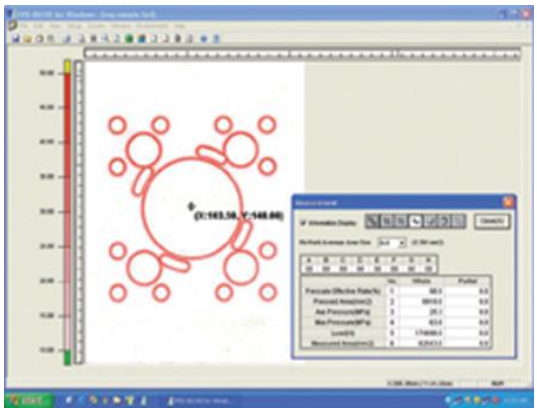


圖 7

2. 材料類

(1) 高砂熊蟬標本 9 隻：如圖 8

(2) 1mm 鋁片、2mm 壓克力、0.5mm~1.5mm 厚不銹鋼片 〈翅翼仿製構件〉

(3) 日製 12V 減速馬達，150 rpm 〈A 型振翅機構組件〉 ：如圖 9

(4) 台製 6V 減速馬達，300 rpm〈B 型振翅機構組件〉

(5) 3~12V 變速整流器：如圖 9

(6) 雙片式 4LW 富士感壓薄膜 〈翅面測壓〉：如圖 10

(7) 0.04mm~0.12mm 熱熔膠膜〈翅翼構件〉

(8) 測推距滑動車台〈模型組件〉：如圖 11

(9) 1mm 格目方格紙

圖 8

圖 9

圖 10

圖 11

二、研究方法

1. 實驗構想

(1) 高砂熊蟬翅脈結構呈現出絕佳的力學美感〈如圖 12〉，由翅基之 5 條寬厚縱翅脈沿翅面軸線分支且逐漸縮小脈管斷面，一直均佈到翼尖再配合翅型收攏；橫向則輔以橫翅脈之連結，形成十數個大小不一且約略平行於翅面之翅室。

比較其他台灣常見的蟬科標本〈可禮大蟬、北埔蟬、台灣虎翅蟬、其他熊蟬屬等〉發覺亦都有著幾乎一樣或相似的翅脈結構佈局，由此看來，蟬翼的翅脈結構必定潛藏著不為人知的昆蟲密碼。其縱向翅脈的分佈主要係利於揮拍力量的傳導與抵抗風阻，橫向翅脈則分佈於翅面的質心或翅面扭轉線上，與縱脈相連後形成十數個大小不一且約略平行於翅面之翅室；接近翼緣的翅室較小，而接近翅面質心或翅基部的翅室則較大。這些大小不一的翅室於蟬翼振翅時，可提供不同的功能。於完成仿製翅脈之振翅測驗後，再輔以理論公式驗證；另外，再設計四種不同幾何結構之翅脈膜型態加以分析計算，期望能獲得較佳的平面肋膜形抗結構設計上之參考。

圖 12

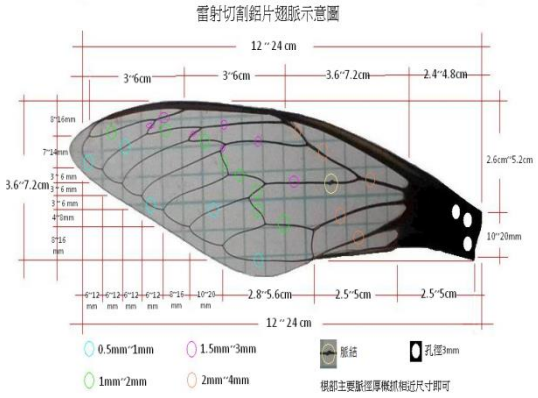


圖 13

(2) 將高砂熊蟬標本置於方格紙上，取得照片後以繪圖軟體標出翅翼及翅脈之平面尺寸〈如圖 13〉，再等倍放大至長約 13cm、翅腹最寬處約 4cm 的實驗所需之尺寸後，交給雷射切割工廠〈如圖 14〉依照圖樣翻製輸出切割；比例尺寸之選擇主要係考量配合振翅機構的搭配及便於操作與觀察。在材質選定方面，以五種不同厚度〈0.5mm~1.5mm〉之鋁片、壓克力與不銹鋼片作成仿翅翼完成雷射切割〈如圖 15〉。在翅膜部份選定以 0.04mm~0.12mm 厚之熱熔膠膜雙面包覆，完成翅膜之仿製〈如圖 16~18〉。最後完成之 1.5mm 不銹鋼翅重 13g〈如圖 19〉、1.0mm 不銹鋼翅重 9g、0.5 mm 不銹鋼翅重 4.5g、1.0mm 鋁翅重 4.5g、2mm 壓克力翅重 10g。

圖 14

圖 15

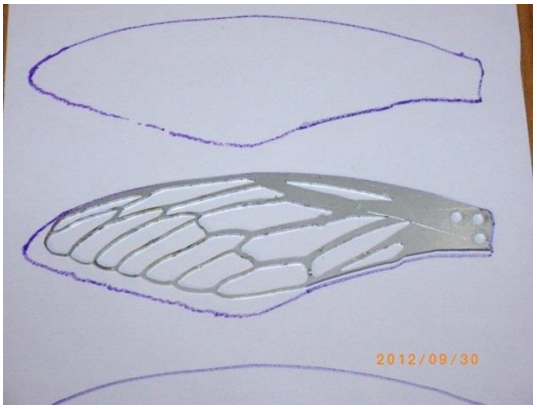


圖 16

圖 17

圖 18

圖 19

(3) 其次，參考相關文獻，以四連桿動作機制設計振翅機構，先繪製構體的圖示尺寸〈如圖 20〉，再拆解繪製零件詳圖〈如圖 21〉，以壓克力為主要構材，經雷射切割後搭配不同轉速與輸出功率之馬達與五金零件組裝完成〈如圖 22、23〉。另外，考慮振翅之慣性、撓度與翅面壓力測試時需要較為穩定的測體，所以設計兩款機型，A 型振翅機構本體較重，用以測試撓度與翅面壓力為主；B 型振翅機構本體較輕，用以測試升力與推距為主。完成後之 A 型振翅機〈雙對翅〉本體重 456g〈如圖 24〉，B 型振翅機本體重 175g〈如圖 25〉。

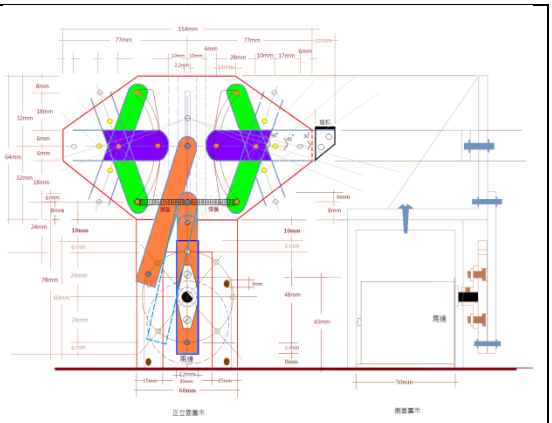


圖 20

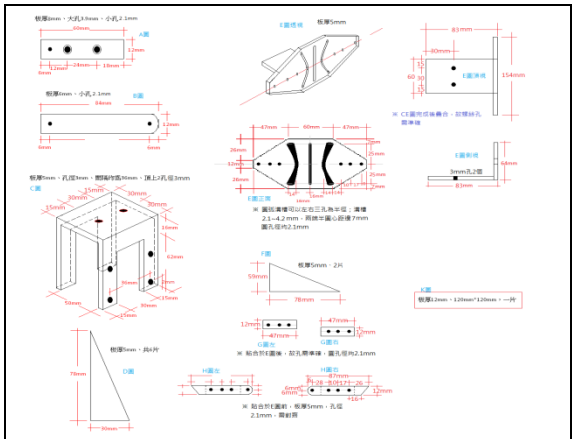


圖 21

圖 22

圖 23

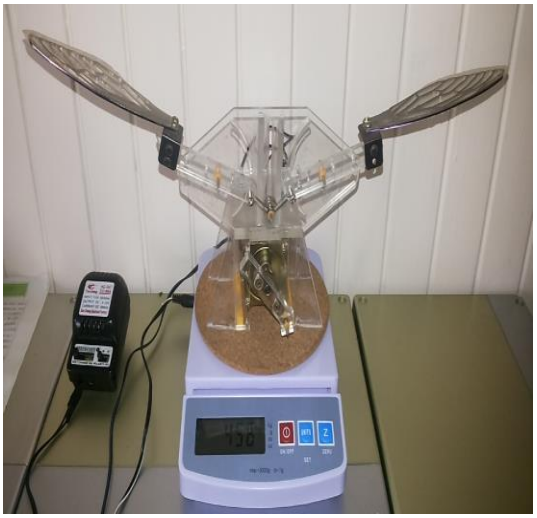


圖 24

圖 25

2. 設定變因與實測方法

五款仿製翅翼主要需在不同的測試條件下〈變因的控制〉測出主要之振翅性能指標，包括升力與推距暨相關應力與應變〈翼緣撓度與翅面壓力〉之數值,比較分析後可以得出不同厚度之五款仿製翅翼其振翅性能之綜合展現，亦可以取得各項數值在各種變因組合下之線性比例關係。而主要變因之設定係參考相關研究文獻後決定選擇振翅幅度、振翅頻率、攻角與風速這四項作為主要操控之變因，分別說明如下：

(1) 振翅幅度：設定受測幅度為 30˚、45˚、90˚三種振幅。於 AB 兩型之振翅機構上直接設計簡易之調整方式，以便於操作與變換 〈如圖 26、27〉。

模擬操作影片已上傳 YOUTUBE，網址 http://www.youtube.com/watch?v=PjxTGNtyOi8 。

圖 26

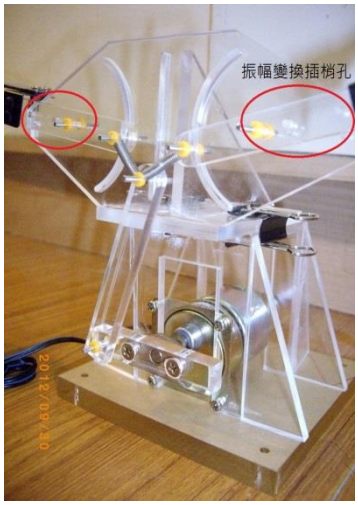


圖 27

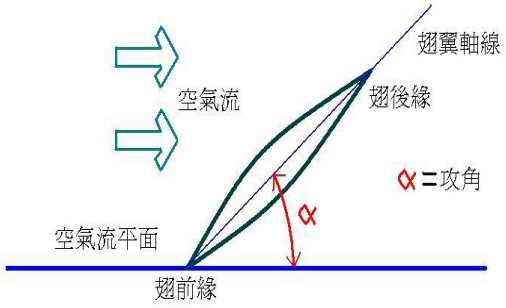
(2) 振翅頻率：設定受測頻率為 1 次/sec、2 次/sec、3 次/sec 三種頻率。以變速整流器(A 型振翅機構)或電池組〈B 型振翅機構〉調整馬達之供電電壓，以達到頻率控制之需求。

(3) 攻角〈Angle of attack〉：攻角為翅翼之軸線與空氣流（或是相對風流的方向〉之夾角〈如圖 28〉；設定受測攻角為 0˚與 10˚兩種攻角，0˚攻角時，振翅機構為水平置放；10˚攻角時，調整振翅機構之前傾固定角度。

(4) 風速：設定受測風速為 0m/s、0.5m/s、1m/s、2m/s 四種受測風速；以 PVC 管狀型燈罩作為風洞箱體，其內以直徑 1.5 英吋之 PVC 截管作成導流槽，風源供應則以 12V 小型車用風扇搭配 12V 可攜式電池〈超

級電匠〉組裝成簡易型風洞實驗箱。受測前以風速計測定所需風速之受測體擺放位置〈如圖 2、3、29〉。

以上四類變因合計共 12 個單項，經交叉組合後即為 72 組測試組態〈表列如後〉，亦即五款仿製翅翼均要經過此 72 組測試組態之振翅實驗，以取得振翅性能主要指標數值。



昆蟲翅斷面之攻角示意圖

圖 28

圖 29

3. 主要性能指標

包括材質性能指標與飛行性能指標；材質性能指標包括翼緣撓度與翅面壓力，飛行性能指標包括升力與推距〈飛行距離〉。

(1) 翼緣撓度：主要係測得翅翼在各種變因組合測試時，以翅脈結構不破壞且能展現最佳飛行性能展現為原則之最大翼緣彈性撓度，以確認五款翅翼在仿製其翅脈結構下之最佳構材斷面尺寸。

將測試模組置放於背景為小格目之方格紙前，方格紙上標出其應有之振翅幅度標線位置，再利用攝錄影機全程拍攝其正面與側面的振翅狀態後，於威力導演軟體上以低倍數播放，即可觀測出每一次測試模組振幅兩端的翼緣撓度，單位 cm。

(2) 翅面壓力強度：求取各測試模組之翅面壓力強度。以雙片式富士感壓薄膜(如圖 30)裁切成符合翅腹寬度之尺寸，再將其黏貼於測試模組之下翅面〈如圖 31〉，於振翅測試完成後，感應膜上即會呈現受壓之色澤分佈狀態圖示〈如圖 32、33〉，透過專用掃瞄器掃瞄此色澤分佈狀態圖示，再以專用之分析軟體 FPD-8010E 載入圖檔分析計算，即可得出單位之翅面壓力強度，單位 gf/cm^2。有關感壓薄膜之特性與詳細使用說明，請參考代理公司官網 http://www.isin.com.tw/ps-film.htm 。

圖 30

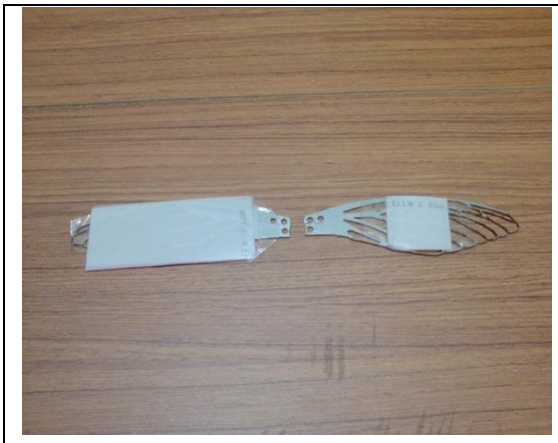


圖 31

圖 32

圖 33

(3) 升力：求取最大上升力之測試模組及變因組合。將測試模組先置於電子磅秤上〈如圖 34〉，測得重量後啟動振翅，並以攝錄影機全程拍攝磅秤之液晶顯示重量之變化，再於威力導演軟體上以低倍數播放觀察

運動週期內，每次向下拍翅時所減輕之重量，即為其週期升力數值，單位 g。

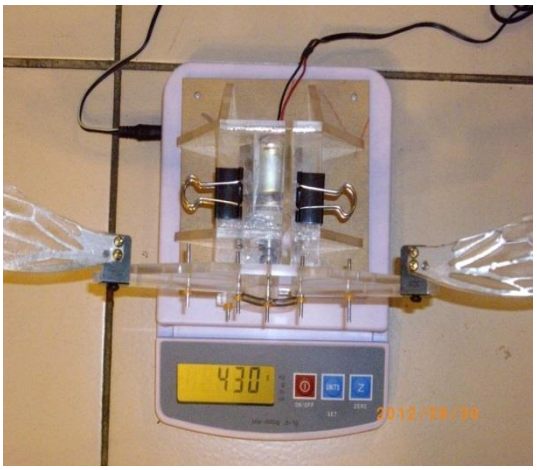


圖 34

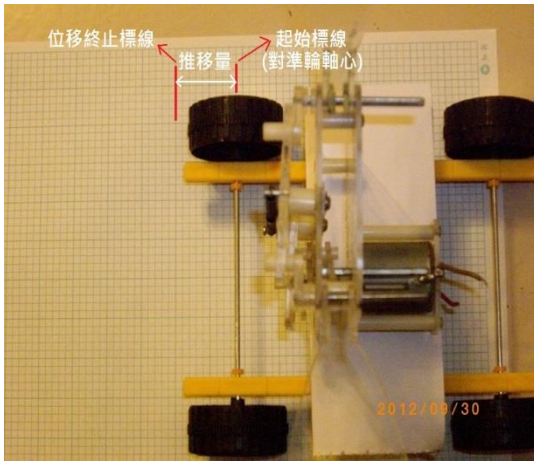


圖 35

(4) 推距：求取最大位移之測試模組及變因組合。將滑動車台先置於方格紙上，標明起始標線〈如圖 35〉，再將測試模組緊固於滑動車台上後起動振翅，於測試結束後紀錄滑動車台前移之距離即為推距，單位 mm。

五款仿製翅翼材質在 72 組測試組態之振翅實驗後，每組均需測得以上 4 項數值，總計為 5x72x4= 1440 次測試，共取得 1440 項數值〈表列如後〉。每項之測試以 10 秒鐘為基準，以能求得數值即可，全部測試不含備料與環境準備，共計 4 小時，實際上全程實驗時間共計 5 天約 40 個小時才得以完成，主要均花在測試之環境、設備與料材的準備時間。

4. 假設條件

(1) 僅作 2 向度之前翅振翅實驗量測。

(2) 不考慮翅翼軸變〈8 字翼〉之影響。

(3) 不考慮馬達扭力與振翅頻率控制之微差〈所有測體均為相同之微差〉。

(4) 攻角 0 度時不考慮迎風面風切之影響。

(5) 翅面壓力強度僅測試翅面中央翅脈部位。

5. 試驗所得數據依理論公式驗證

以變因相關之理論公式與試驗取得之四類數值進行驗證。在將誤差值納入考量與修正之下，進而得出最佳仿翅構材對應之飛行變因組合。例如：厚 0.5mm 不銹鋼翅在何種頻率、攻角、振翅幅度及風速下，可以使得重 100g 之飛行載具可以振翅上飛〈即左右翅獲得 100g 以上之合成升力〉。

(1) 公式說明

A. 翼緣撓度

(a) 懸臂樑公式

懸臂樑變位 $\delta = \langle P \times L^3 \rangle / \langle 3 \times E \times I \rangle$

其中：P 為施加於物體上之作用力；L 為懸臂樑〈翅〉長；E 為懸臂樑之楊氏係數；I 為材料之慣性矩。

(b) 馬達扭力計算公式

功率〈已知〉= 扭力×轉速〈已知〉

求得大馬達之輸出扭力 F 後，另由轉矩換算為拍翅向下之作用力 Pw，再減去空氣阻力後即為施加於翼端之向下作用力 P，再分別代入懸臂樑公式計算，即可求得翼緣撓度。

B. 空氣阻力計算公式(翅面壓力與升力)

C. 空氣阻力〈翅面壓力〉$F = \langle Cd \times \rho \times S \times V^2 \rangle / 2$

其中：Cd 是風阻係數，ρ 是空氣密度，S 是迎風面的橫截面積，V 是速度。

D. 求取推〈距〉力的公式

由 F=ma 求得 a；再將 a 代入 $at^2/2$ = 推距

其中：F 為振翅機構拍翅時，水平方向分力；m 為振翅機構重量；a 為施力產生之水平加速度；t 為翅翼下拍時所經過時間。不過，依本試驗條件所產生之推距的精確度不佳，故仍以計算水平推力大小為主。

(2) 計算分析說明

A. 翼緣撓度：

利用懸臂樑公式：懸臂樑變位 δ=〈$P\times L^3$〉/〈$3\times E\times I$〉〈靜定分析〉

(a) 依大馬達性能規格於振幅 30°、頻率 1 時轉矩為 38N-mm，轉桿半徑長 2.85cm，則馬達提供之扭力為 38/28.5=1.33N。假設在四連桿機構中，力的轉換過程無消耗，則單側翅翼向下拍動時，會產生 1.33N/4= 0.33N〈=33.65gf〉之力的數值大小；不同振幅與頻率組合後之轉矩大小則依比例類推。

(b) 懸臂樑〈翅〉長 L：130mm

(c) 楊氏係數 E：不銹鋼 19686kg/ mm^2、鋁 7036kg/ mm^2、壓克力 298 kg/ mm^2

(d) 材料之慣性矩 $I=bh^3/12$，其中 b 為懸臂樑截面積之長邊，因翅幅最寬處為 4cm，故取平均翅幅寬 2cm 為其長邊；h 為懸臂樑截面積之短邊即為仿翅的厚度。

經計算可得：

- I〈1mm 鋁〉=20×1×1×1/12=1.667
- I〈2mm 壓克力〉=20×2×2×2/12=13.34

- I〈0.5mm 不銹鋼〉=20×0.5×0.5×0.5/12=0.208
- I〈1.0mm 不銹鋼〉=20×1×1×1/12=1.667
- I〈1.5mm 不銹鋼〉=20×1.5×1.5×1.5/12=5.625

根據欲求之數值，將上列數據依序代入懸臂樑變位公式中，最後即能求出懸臂樑變位,即翅翼拍動時產生的翼緣撓度;其中，表列翼緣撓度為擴弧紅色數字者代表其因升力過高而產生反向之翼緣撓度。

B. 翅面壓力：即翅翼拍動時產生之阻力大小。利用空氣阻力計算公式：

空氣阻力 $F=\langle Cd\times\rho\times S\times V^2\rangle/2$

- Cd〔風阻係數〕，取 1.2
- ρ〔空氣密度〕，取 $1.29kg/m^3=0.00129g/cm^3=0.00000129g/mm^3$
- S〔翅翼迎風面面積〕：約 $35cm^2$
- V〔拍翅速度〕：頻率 1 時為 0.3m/s、頻率 2 時為 0.6m/s、頻率 3 時為 0.9m/s。

將以上數據代入公式中計算，即可求出在不同變因組合下，翅面壓力的數值大小。

C. 升力：升力的產生，是為對空氣阻力的反作用力。於不具攻角情況下，升力為翅面壓力之總合；而在具攻角的情況下，升力屬於垂直方向之分力，須將翅面壓力轉換為垂直方向之分力，即為其升力大小。

由附表 8 可知，0.5mm 不銹鋼翅在振幅 30°時，振翅頻率 4、攻角

10°、風速 2m/s 時，單翅升力為 212.56gw，其合成升力即可使 A 款振翅機構上飛〈即升力超過 100g〉。

D. 推力：在振翅的試驗過程中，測體幾乎均無往前推進的現象，主要係因振翅所產生之水平推力仍無法高於測體自重與摩擦力合重所致。已知靜摩擦係數為 0.5，滑動車台重 34g，A 型振翅機構重約 100g 最大靜摩擦力約為 0.5×0.134×9.8=0.6566N，即 67gw 大小的力，合重為 200g。而以公式推論計算為例〈附表 8~10〉，不論何種厚度之測體，振幅與振翅頻率為何，均在攻角 10°、風速 2m/s 的變因組合條件下，才能得出水平推力為 200gw 上下，是所有測試模組中，依理論唯一可讓滑動車台產生推距的變因組合。

以上理論公式分析所得數值如附表 8~10 所示。

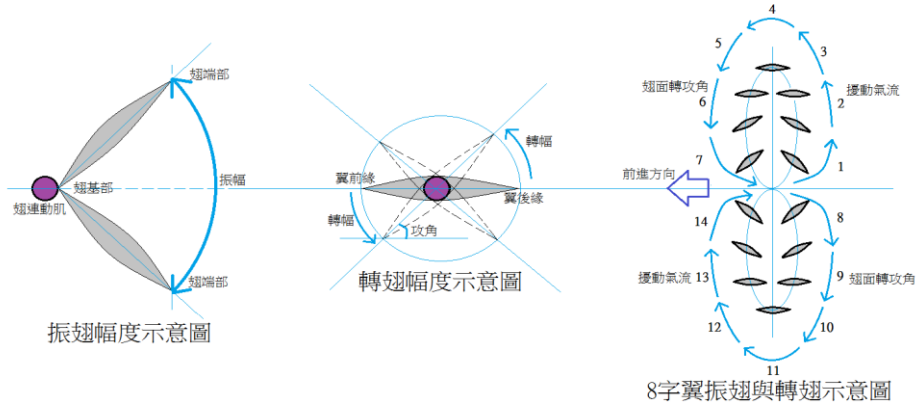
(3) 特殊條件說明

A. 在計算翼緣撓度與翅面壓力時，假設四連桿機構中，力的轉換過程無消耗。

B. 計算升力與推力時，只考慮翅膀下拍過程中產生力的大小，忽略空氣擾動〈轉翅〉的加成計算。

6. 蟬翼結構分析與設計

蟬翅翼於飛行時會展現多向度的運動模式，而主要之動作除上下拍翅外，攻角調整與翅面扭轉〈8 字翼〉為其主要功能〈如圖 36〉。



振翅與轉翅軌跡說明圖

圖 36

翅翼高性能的動作功能幾乎是在瞬間完成的，而蟬翼之韌性與彈性係取決於其翅脈膜〈翅室〉的組合型態。翅室於承受飛行所遭受之外力主要是由翅膜傳遞給翅脈來承受，翅室(脈)的排列組合有助於其拍翅力量的傳遞與導流，其應力與應變有其結構上的緊密關係〈如圖 37〉；另外，於飛行過程當中，接近翼緣的小翅室因翅脈管徑與翅膜較薄，於承受過度高速揮拍、翼緣氣流擾動時會先行破裂，但仍不會使得蟬於突然之間喪失飛行功能，所以小型翅室膜的破裂有飛行性能降低的預警功能；而靠近翅基部的大翅室則抵抗絕大部份的風阻與穩定轉翅時的上升氣流。蟬翼翅室〈脈〉的結構組合主要係為便於揮拍飛行，經數萬年演化而成，但是若不以揮拍上升、扭轉翅面及控制氣流而言，蟬翼的翅室〈脈〉結構組合並非較佳的肋膜形抗結構。

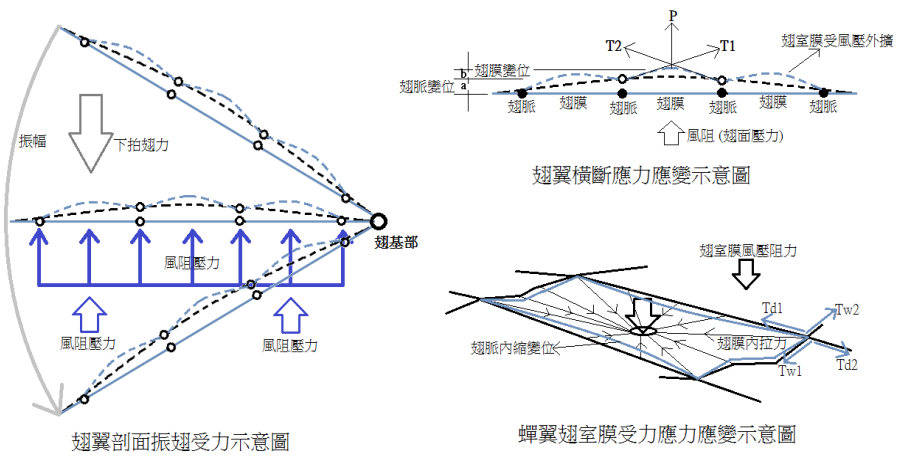
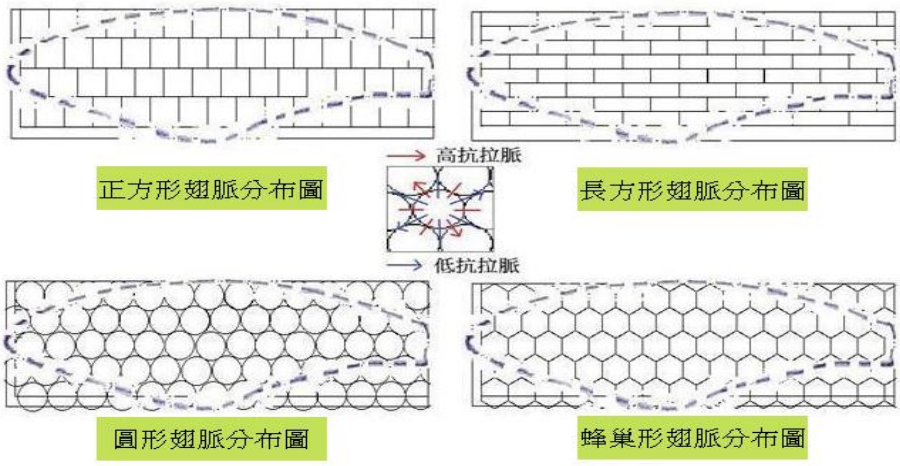
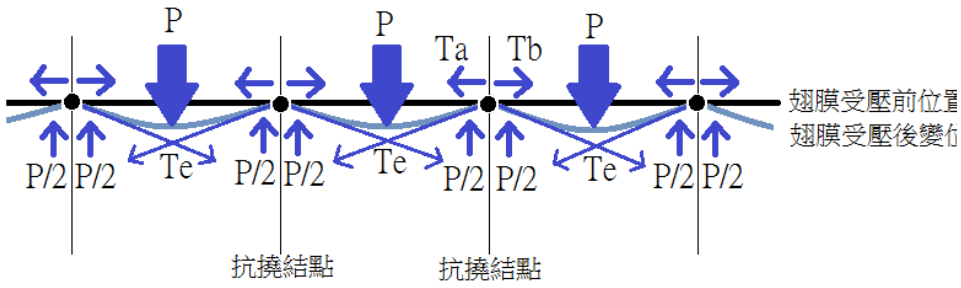


圖 37

為便於分析何種肋膜的組合型態才能產生最佳的形抗效果，所以設計四款不同的肋膜結構型態，分別為正方形翅室、長方形翅室、圓形翅室與正六角形〈蜂巢狀〉翅室共四種〈如圖 38〉並加以分析計算〈如圖 39~40〉。

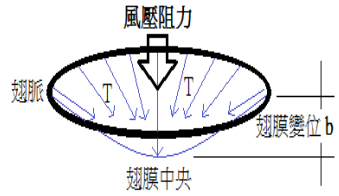


翅脈(膜)結構型態圖

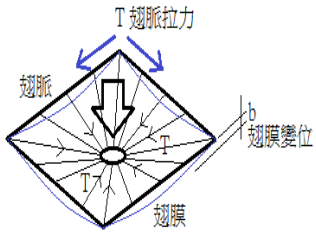


翅膜受壓應力分佈示意圖

圖 39



圓形翅室膜受風力應力應變示意圖



正方形翅室膜受風力應力應變示意圖

圖 40

(1) 翅膜拉應力公式計算說明

假設翅面壓力集中於翅室中心，可視為在翅室中心設置一重力場，對周圍產生拉力。

公式：$F=GMm/r^2$，其中 F 為翅室中心所受壓力；G 為重力常數 6.67×10^{-11}〔單位：$N\times m^2/kg^2$〕$= 6.67\times10^{-13}$〔單位：$N\times cm^2/g$〕；M 為翅室中心所受壓力；r 為翅脈各點與翅室中心的距離。

將已知數值代入公式中，即可得不同翅室形狀下各類變因組合的拉力變化。

今假設四種翅室形態之單一翅室面積皆為 $16cm^2$，分別計算如下：

A. 正方形翅室〈如圖 41〉

正方形每邊中點、四角與翅室中心距離比為 1：$\sqrt{2}$，代入公式計算，可得紅色箭頭與藍色箭頭兩力之比為 2：1。

正方形邊長為 4cm。

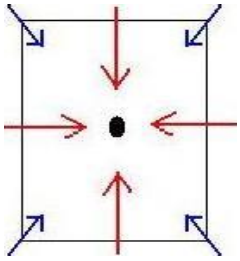


圖 41　正方形翅室拉力分佈

紅色箭頭表示最大拉力，藍色箭頭表示最小拉力。

計算數值如表 1 所示：

正方形翅室拉力數值表　表1

振翅幅度30°	振翅頻率1	振翅幅度30°	振翅頻率2	振翅幅度30°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(1.14)^2/2^2=2.1663*10^{-13}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(4.55)^2/2^2=3.447*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/2^2=1.737*10^{-11}$ N
最小拉力	$F=1.083*10^{-13}$N	最小拉力	$F=1.724*10^{-11}$N	最小拉力	$F=8.68*10^{-12}$N
振翅幅度45°	振翅頻率1	振翅幅度45°	振翅頻率2	振翅幅度45°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(2.56)^2/(0.6)^2=1.089*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/2^2=1.737*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(23.03)^2/2^2=8.802*10^{-11}$ N
最小拉力	$F=5.445*10^{-13}$N	最小拉力	$F=8.68*10^{-12}$N	最小拉力	$F=4.401*10^{-11}$N
振翅幅度90°	振翅頻率1	振翅幅度90°	振翅頻率2	振翅幅度90°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/2^2=1.737*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(40.94)^2/2^2=2.781*10^{-10}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(92.11)^2/(0.6)^2=1.404*10^{-9}$ N
最小拉力	$F=8.68*10^{-12}$N	最小拉力	$F=1.3905*10^{-10}$N	最小拉力	$F=7.02*10^{-10}$N

B. 圓形翅室〈如圖 42〉

圓形翅室，翅室中心至圓周上各點距離均相同，因此拉力相等。

圓形半徑為 2.26cm。

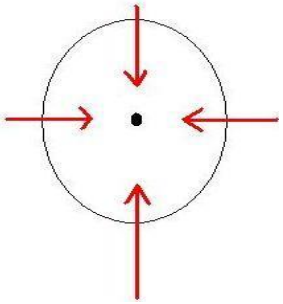


圖 42　圓形翅室拉力分佈

計算數值如表 2 所示：

圓形翅室拉力數值表						表2
振翅幅度=30°	振翅頻率=1	振翅幅度=30°	振翅頻率=2	振翅幅度=30°	振翅頻率=3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(1.14)^2/(2.26)^2=1.696*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(4.55)^2/(2.26)^2=2.7*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/(2.26)^2=1.36*10^{-11}$ N
振翅幅度=45°	振翅頻率=1	振翅幅度=45°	振翅頻率=2	振翅幅度=45°	振翅頻率=3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(2.56)^2/(2.26)^2=8.55*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/(2.26)^2=1.36*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(23.03)^2/(2.26)^2=6.892*10^{-11}$ N
振翅幅度=90°	振翅頻率=1	振翅幅度=90°	振翅頻率=2	振翅幅度=90°	振翅頻率=3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/(2.26)^2=1.36*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(40.94)^2/(2.26)^2=2.178*10^{-10}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(92.11)^2/(2.26)^2=1.1*10^{-9}$ N

C. 長方形翅室 〈如圖 43〉

長方形長邊為 8cm；短邊為 2cm。則長方形翅室長邊中點、四角與翅室中心之距離比為 1：$\sqrt{17}$ 。代入公式計算，可得紅色箭頭與藍色箭頭兩力之比為 17：1。

紅色箭頭示最大拉力，藍色箭頭表示最小拉力。

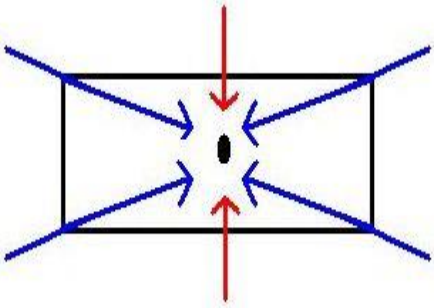


圖 43　長方形翅室拉力分佈

計算數值如表 3 所示：

長方形翅室拉力數值表						表3
振翅幅度30°	振翅頻率1	振翅幅度30°	振翅頻率2	振翅幅度30°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(1.14)^2/l^2=8.658*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(4.55)^2/l^2=1.377*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/l^2=6.975*10^{-11}$ N
最小拉力	$F=5.093*10^{-14}$N	最小拉力	$F=8.1*10^{-12}$N	最小拉力	$F=4.103*10^{-10}$N
振翅幅度45°	振翅頻率1	振翅幅度45°	振翅頻率2	振翅幅度45°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(2.56)^2/l^2=4.365*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/l^2=6.975*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(23.03)^2/l^2=3.537*10^{-9}$ N
最小拉力	$F=2.567*10^{-12}$N	最小拉力	$F=4.103*10^{-12}$N	最小拉力	$F=2.08*10^{-10}$N
振翅幅度90°	振翅頻率1	振翅幅度90°	振翅頻率2	振翅幅度90°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/l^2=6.975*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(40.94)^2/l^2=1.116*10^{-8}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(92.11)^2/l^2=5.652*10^{-8}$ N
最小拉力	$F=4.103*10^{-12}$N	最小拉力	$F=6.565*10^{-10}$N	最小拉力	$F=3.325*10^{-7}$N

D. 正六邊形翅室〈如圖 44〉

正六邊形中心至每邊中點距離為 2.15cm，則每邊中點、六角與翅室中心之距離比為 $\sqrt{3}$ ：2。最大拉力與最小拉力比為 4：3

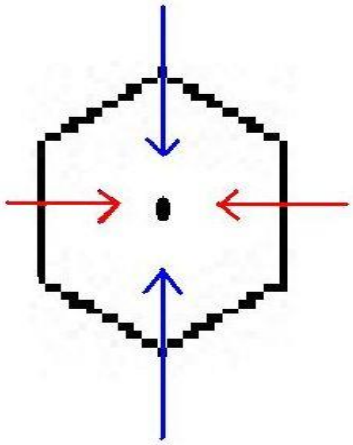


圖 44　六角形翅室拉力分佈

紅色箭頭表示最大拉力，藍色箭頭表示最小拉力。

計算數值如表 4 所示：

六角形翅室拉力數值表　表4

振翅幅度30°	振翅頻率1	振翅幅度30°	振翅頻率2	振翅幅度30°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(1.14)^2/(2.15)^2=1.874*10^{-13}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(4.55)^2/(2.15)^2=2.983*10^{-12}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/(2.15)^2=1.503*10^{-11}$ N
最小拉力	$F=1.405*10^{-12}$N	最小拉力	$F=2.237*10^{-12}$N	最小拉力	$F=1.127*10^{-11}$N
振翅幅度45°	振翅頻率1	振翅幅度45°	振翅頻率2	振翅幅度45°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(2.56)^2/(2.15)^2=9.423*10^{-13}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/(2.15)^2=1.503*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(23.03)^2/(2.15)^2=7.616*10^{-11}$ N
最小拉力	$F=7.067*10^{-12}$N	最小拉力	$F=1.127*10^{-11}$N	最小拉力	$F=5.712*10^{-11}$N
振翅幅度90°	振翅頻率1	振翅幅度90°	振翅頻率2	振翅幅度90°	振翅頻率3
最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(10.23)^2/(2.15)^2=1.503*10^{-11}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(40.94)^2/(2.15)^2=2.406*10^{-10}$ N	最大拉力	$F=6.67*10^{-13}*(92.11)^2/(2.15)^2=1.214*10^{-9}$ N
最小拉力	$F=1.127*10^{-11}$N	最小拉力	$F=1.804*10^{-10}$N	最小拉力	$F=9.105*10^{-10}$N

參、 研究結果與討論

一、0.5mm 不銹鋼翅振翅試驗列表

表 5 **0.5mm 不銹鋼片蟬翼模組測試組態列表(測試時間 10 秒)**

組別	振翅幅度(度)			振翅頻率(次/S)			振翅攻角(度)		風速(m/s)				週期動力分析			
	30	45	90	1	2	3	0	10	0	0.5	1	2	翼緣撓度(cm)	升力(g)	推距(cm)	翅面壓力(gf/cm²)
1	●			●			●		●				1.6	3.5	0.00	23.50
2	●			●			●			●			1.6	3.5	0.00	23.50
3	●			●			●				●		1.6	3.5	0.00	23.50
4	●			●			●					●	1.6	3.5	0.00	23.50
5	●			●				●	●				1.6	2.5	0.00	23.50
6	●			●				●		●			1.6	2.7	0.00	34.00
7	●			●				●			●		1.6	2.9	0.00	41.50
8	●			●				●				●	1.6	3.4	0.00	49.00
9	●				●		●		●				1.3	6.8	0.00	35.25
10	●				●		●			●			1.3	6.8	0.00	35.25
11	●				●		●				●		1.3	6.8	0.00	35.25
12	●				●		●					●	1.3	6.8	0.00	35.25
13	●				●			●	●				1.3	4.9	0.00	35.25
14	●				●			●		●			1.3	5.3	0.00	51.00
15	●				●			●			●		1.3	5.7	0.00	62.25
16	●				●			●				●	1.3	6.6	0.00	73.50
17	●					●	●		●				1	10.3	0.00	42.30
18	●					●	●			●			1	10.3	0.00	42.30
19	●					●	●				●		1	10.3	0.00	42.30
20	●					●	●					●	1	10.3	0.00	42.30
21	●					●		●	●				1	7.4	0.20	42.30
22	●					●		●		●			1	8.0	0.10	61.20
23	●					●		●			●		1	8.6	0.00	74.70
24	●					●		●				●	1	10.0	0.00	88.20
25		●		●			●		●				2	5.1	0.00	31.26
26		●		●			●			●			2	5.1	0.00	31.26

27		●		●			●				●		2	5.1	0.00	31.26
28		●		●			●					●	2	5.1	0.00	31.26
29		●		●				●	●				2	3.6	0.00	31.26
30		●		●				●		●			2	3.9	0.00	45.22
31		●		●				●			●		2	4.2	0.00	55.20
32		●		●				●				●	2	4.9	0.00	65.17
33		●			●		●		●				1.6	14.3	0.00	62.35
34		●			●		●			●			1.6	14.3	0.00	62.35
35		●			●		●				●		1.6	14.3	0.00	62.35
36		●			●		●					●	1.6	14.3	0.00	62.35
37		●			●			●	●				1.6	10.2	0.10	62.35
38		●			●			●		●			1.6	11.1	0.00	90.21
39		●			●			●			●		1.6	11.9	0.00	110.11
40		●			●			●				●	1.6	13.9	0.00	130.01
41		●				●	●		●				1.2	21.7	0.00	74.82
42		●				●	●			●			1.2	21.7	0.00	74.82
43		●				●	●				●		1.2	21.7	0.00	74.82
44		●				●	●					●	1.2	21.7	0.00	74.82
45		●				●		●	●				1.2	15.5	0.40	74.82
46		●				●		●		●			1.2	16.7	0.30	108.26
47		●				●		●			●		1.2	18.0	0.20	132.14
48		●				●		●				●	1.2	21.1	0.00	156.02
49			●	●			●		●				2.8	6.8	0.00	47.00
50			●	●			●			●			2.8	6.8	0.00	47.00
51			●	●			●				●		2.8	6.8	0.00	47.00
52			●	●			●					●	2.8	6.8	0.00	47.00
53			●	●				●	●				2.8	4.9	0.00	47.00
54			●	●				●		●			2.8	5.3	0.00	68.00
55			●	●				●			●		2.8	5.7	0.00	83.00
56			●	●				●				●	2.8	6.6	0.00	98.00
57			●		●		●		●				2.2	26.0	0.00	141.00
58			●		●		●			●			2.2	26.0	0.00	141.00
59			●		●		●				●		2.2	26.0	0.00	141.00
60			●		●		●					●	2.2	26.0	0.00	141.00
61			●		●			●	●				2.2	18.5	0.30	141.00
62			●		●			●		●			2.2	20.0	0.10	204.00
63			●		●			●			●		2.2	21.5	0.00	249.00

64			●		●			●				●	2.2	25.2	0.00	294.00
65			●			●	●		●				1.6	39.3	0.00	253.80
66			●			●	●			●			1.6	39.3	0.00	253.80
67			●			●	●				●		1.6	39.3	0.00	253.80
68			●			●	●					●	1.6	39.3	0.00	253.80
69			●			●		●	●				1.6	28.0	0.60	253.80
70			●			●		●		●			1.6	30.3	0.40	367.20
71			●			●		●			●		1.6	32.5	0.30	448.20
72			●			●		●				●	1.6	38.1	0.00	529.20

二、1mm 不銹鋼翅振翅試驗列表

表 6　**1mm 不銹鋼片蟬翼模組測試組態列表(測試時間 10 秒)**

組別	振翅幅度(度)			振翅頻率(次/S)			振翅攻角(度)		風速(m/s)				週期動力分析			
	30	45	90	1	2	3	0	10	0	0.5	1	2	翼緣撓度(cm)	升力(g)	推距(cm)	翅面壓力(gf/cm²)
1	●			●			●		●				0.9	3.5	0.00	23.50
2	●			●			●			●			0.9	3.5	0.00	23.50
3	●			●			●				●		0.9	3.5	0.00	23.50
4	●			●			●					●	0.9	3.5	0.00	23.50
5	●			●				●	●				0.9	2.5	0.00	23.50
6	●			●				●		●			0.9	2.7	0.00	34.00
7	●			●				●			●		0.9	2.9	0.00	41.50
8	●			●				●				●	0.9	3.4	0.00	49.00
9	●				●		●		●				0.6	6.7	0.00	35.25
10	●				●		●			●			0.6	6.7	0.00	35.25
11	●				●		●				●		0.6	6.7	0.00	35.25
12	●				●		●					●	0.6	6.7	0.00	35.25
13	●				●			●	●				0.6	4.8	0.00	35.25
14	●				●			●		●			0.6	5.1	0.00	51.00
15	●				●			●			●		0.6	5.5	0.00	62.25
16	●				●			●				●	0.6	6.5	0.00	73.50
17	●					●	●		●				0.3	10.2	0.00	42.30
18	●					●	●			●			0.3	10.2	0.00	42.30
19	●					●	●				●		0.3	10.2	0.00	42.30
20	●					●	●					●	0.3	10.2	0.00	42.30

21	●					●		●	●				0.3	7.3	0.00	42.30
22	●					●		●		●			0.3	7.8	0.00	61.20
23	●					●		●			●		0.3	8.4	0.00	74.70
24	●					●		●				●	0.3	9.9	0.00	88.20
25		●		●			●		●				1.2	4.9	0.00	31.26
26		●		●			●			●			1.2	4.9	0.00	31.26
27		●		●			●				●		1.2	4.9	0.00	31.26
28		●		●			●					●	1.2	4.9	0.00	31.26
29		●		●				●	●				1.2	3.5	0.00	31.26
30		●		●				●		●			1.2	3.8	0.00	45.22
31		●		●				●			●		1.2	4.1	0.00	55.20
32		●		●				●				●	1.2	4.8	0.00	65.17
33		●			●		●		●				0.8	13.0	0.00	62.35
34		●			●		●			●			0.8	13.0	0.00	62.35
35		●			●		●				●		0.8	13.0	0.00	62.35
36		●			●		●					●	0.8	13.0	0.00	62.35
37		●			●			●	●				0.8	9.3	0.00	62.35
38		●			●			●		●			0.8	10.1	0.00	90.21
39		●			●			●			●		0.8	10.8	0.00	110.11
40		●			●			●				●	0.8	12.7	0.00	130.01
41		●				●	●		●				0.4	19.9	0.00	74.82
42		●				●	●			●			0.4	19.9	0.00	74.82
43		●				●	●				●		0.4	19.9	0.00	74.82
44		●				●	●					●	0.4	19.9	0.00	74.82
45		●				●		●	●				0.4	14.2	0.00	74.82
46		●				●		●		●			0.4	15.3	0.00	108.26
47		●				●		●			●		0.4	16.5	0.00	132.14
48		●				●		●				●	0.4	19.3	0.00	156.02
49			●	●			●		●				1.8	6.7	0.00	47.00
50			●	●			●			●			1.8	6.7	0.00	47.00
51			●	●			●				●		1.8	6.7	0.00	47.00
52			●	●			●					●	1.8	6.7	0.00	47.00
53			●	●				●	●				1.8	4.8	0.00	47.00
54			●	●				●		●			1.8	5.1	0.00	68.00
55			●	●				●			●		1.8	5.5	0.00	83.00
56			●	●				●				●	1.8	6.5	0.00	98.00
57			●		●		●		●				1.3	24.0	0.00	141.00

58			●		●		●			●			1.3	24.0	0.00	141.00
59			●		●		●				●		1.3	24.0	0.00	141.00
60			●		●		●					●	1.3	24.0	0.00	141.00
61			●		●			●	●				1.3	17.1	0.10	141.00
62			●		●			●		●			1.3	18.5	0.00	204.00
63			●		●			●			●		1.3	19.9	0.00	249.00
64			●		●			●				●	1.3	23.3	0.00	294.00
65			●			●	●		●				0.8	36.6	0.00	253.80
66			●			●	●			●			0.8	36.6	0.00	253.80
67			●			●	●				●		0.8	36.6	0.00	253.80
68			●			●	●					●	0.8	36.6	0.00	253.80
69			●			●		●	●				0.8	26.2	0.20	253.80
70			●			●		●		●			0.8	28.3	0.10	367.20
71			●			●		●			●		0.8	30.4	0.00	448.20
72			●			●		●				●	0.8	35.6	0.00	529.20

三、1.5mm 不銹鋼翅振翅試驗列表

表 7　**1.5mm 不銹鋼片蟬翼模組測試組態列表(測試時間 10 秒)**

組別	振翅幅度(度)			振翅頻率(次/S)			振翅攻角(度)		風速(m/s)				週期動力分析			
	30	45	90	1	2	3	0	10	0	0.5	1	2	翼緣撓度(cm)	升力(g)	推距(cm)	翅面壓力(gf/cm²)
1	●			●			●		●				0.7	3.5	0.00	23.50
2	●			●			●			●			0.7	3.5	0.00	23.50
3	●			●			●				●		0.7	3.5	0.00	23.50
4	●			●			●					●	0.7	3.5	0.00	23.50
5	●			●				●	●				0.7	2.5	0.00	23.50
6	●			●				●		●			0.7	2.7	0.00	34.00
7	●			●				●			●		0.7	2.9	0.00	41.50
8	●			●				●				●	0.7	3.4	0.00	49.00
9	●				●		●		●				0.5	6.6	0.00	35.25
10	●				●		●			●			0.5	6.6	0.00	35.25
11	●				●		●				●		0.5	6.6	0.00	35.25
12	●				●		●					●	0.5	6.6	0.00	35.25
13	●				●			●	●				0.5	4.7	0.00	35.25
14	●				●			●		●			0.5	5.1	0.00	51.00

15	●				●			●			●		0.5	5.5	0.00	62.25
16	●				●			●				●	0.5	6.4	0.00	73.50
17	●					●	●		●				0.3	10.1	0.00	42.30
18	●					●	●			●			0.3	10.1	0.00	42.30
19	●					●	●				●		0.3	10.1	0.00	42.30
20	●					●	●					●	0.3	10.1	0.00	42.30
21	●					●		●	●				0.3	7.2	0.10	42.30
22	●					●		●		●			0.3	7.8	0.00	61.20
23	●					●		●			●		0.3	8.4	0.00	74.70
24	●					●		●				●	0.3	9.8	0.00	88.20
25		●		●			●		●				0.9	4.8	0.00	31.26
26		●		●			●			●			0.9	4.8	0.00	31.26
27		●		●			●				●		0.9	4.8	0.00	31.26
28		●		●			●					●	0.9	4.8	0.00	31.26
29		●		●				●	●				0.9	3.5	0.00	31.26
30		●		●				●		●			0.9	3.7	0.00	45.22
31		●		●				●			●		0.9	4.0	0.00	55.20
32		●		●				●				●	0.9	4.7	0.00	65.17
33		●			●		●		●				0.6	12.5	0.00	62.35
34		●			●		●			●			0.6	12.5	0.00	62.35
35		●			●		●				●		0.6	12.5	0.00	62.35
36		●			●		●					●	0.6	12.5	0.00	62.35
37		●			●			●	●				0.6	9.0	0.00	62.35
38		●			●			●		●			0.6	9.7	0.00	90.21
39		●			●			●			●		0.6	10.4	0.00	110.11
40		●			●			●				●	0.6	12.2	0.00	130.01
41		●				●	●		●				0.3	19.2	0.00	74.82
42		●				●	●			●			0.3	19.2	0.00	74.82
43		●				●	●				●		0.3	19.2	0.00	74.82
44		●				●	●					●	0.3	19.2	0.00	74.82
45		●				●		●	●				0.3	13.7	0.10	74.82
46		●				●		●		●			0.3	14.8	0.10	108.26
47		●				●		●			●		0.3	15.9	0.00	132.14
48		●				●		●				●	0.3	18.6	0.00	156.02
49			●	●			●		●				1.2	6.6	0.00	47.00
50			●	●			●			●			1.2	6.6	0.00	47.00
51			●	●			●				●		1.2	6.6	0.00	47.00

52			●	●			●					●	1.2	6.6	0.00	47.00
53			●	●				●	●				1.2	4.7	0.00	47.00
54			●	●				●		●			1.2	5.1	0.00	68.00
55			●	●				●			●		1.2	5.5	0.00	83.00
56			●	●				●				●	1.2	6.4	0.00	98.00
57			●		●		●		●				0.8	23.3	0.00	141.00
58			●		●		●			●			0.8	23.3	0.00	141.00
59			●		●		●				●		0.8	23.3	0.00	141.00
60			●		●		●					●	0.8	23.3	0.00	141.00
61			●		●			●	●				0.8	16.6	0.10	141.00
62			●		●			●		●			0.8	17.9	0.00	204.00
63			●		●			●			●		0.8	19.3	0.00	249.00
64			●		●			●				●	0.8	22.6	0.00	294.00
65			●			●	●		●				0.4	35.6	0.00	253.80
66			●			●	●			●			0.4	35.6	0.00	253.80
67			●			●	●				●		0.4	35.6	0.00	253.80
68			●			●	●					●	0.4	35.6	0.00	253.80
69			●			●		●	●				0.4	25.4	0.20	253.80
70			●			●		●		●			0.4	27.5	0.10	367.20
71			●			●		●			●		0.4	29.5	0.00	448.20
72			●			●		●				●	0.4	34.6	0.00	529.20

四、0.5mm 不銹鋼翅公式驗證列表

表 8　0.5mm 不銹鋼片仿蟬翼模組公式驗證列表

組別	振翅幅度 (度)			振翅頻率 (次/S)			振翅攻角 (度)		風速 (cm/s)				翼緣撓度 mm	翅面壓力 gw/cm^2	升力 gw	水平推力 gw
	30	45	90	1	2	3	0	10	0	50	100	200				
1	●			●			●		●				1.66	0.70	24.38	0.00
2	●			●			●			●						
3	●			●			●				●					
4	●			●			●					●				
5	●			●				●	●				1.72	0.69	24.02	4.24
6	●			●				●		●			(0.38)	1.02	35.80	16.03
7	●			●				●			●		(6.71)	2.03	71.15	51.38
8	●			●				●				●	(32.00)	6.07	212.56	192.79

9	●				●		●		●				(5.41)	2.79	97.52	0.00
10	●				●		●			●						
11	●				●		●				●					
12	●				●		●					●				
13	●				●			●	●				(5.14)	2.74	96.06	16.97
14	●				●			●		●			(7.25)	3.08	107.85	28.75
15	●				●			●			●		(13.57)	4.09	143.20	64.11
16	●				●			●				●	(38.87)	8.13	284.61	205.52
17	●					●	●		●				(21.19)	6.27	219.43	0.00
18	●					●	●			●						
19	●					●	●				●					
20	●					●	●					●				
21	●					●		●	●				(20.60)	6.18	216.14	38.18
22	●					●		●		●			(22.71)	6.51	227.92	49.96
23	●					●		●			●		(29.03)	7.52	263.27	85.32
24	●					●		●				●	(54.32)	11.56	404.68	226.73
25		●		●			●		●				4.67	0.70	24.38	0.00
26		●		●			●			●						
27		●		●			●				●					
28		●		●			●					●				
29		●		●				●	●				4.73	0.69	24.02	4.24
30		●		●				●		●			2.62	1.02	35.80	16.03
31		●		●				●			●		(3.70)	2.03	71.15	51.38
32		●		●				●				●	(28.99)	6.07	212.56	192.79
33		●			●		●		●				0.61	2.79	97.52	0.00
34		●			●		●			●						
35		●			●		●				●					
36		●			●		●					●				
37		●			●			●	●				0.87	2.74	96.06	16.97
38		●			●			●		●			(1.23)	3.08	107.85	28.75
39		●			●			●			●		(7.56)	4.09	143.20	64.11
40		●			●			●				●	(32.85)	8.13	284.61	205.52
41		●				●	●		●				(12.16)	6.27	219.43	0.00
42		●				●	●			●						
43		●				●	●				●					
44		●				●	●					●				
45		●				●		●	●				(11.57)	6.18	216.14	38.18

46		●				●		●		●			(13.68)	6.51	227.92	49.96
47		●				●		●			●		(20.00)	7.52	263.27	85.32
48		●				●		●				●	(45.30)	11.56	404.68	226.73
49			●	●			●		●				13.69	0.70	24.38	0.00
50			●	●			●			●						
51			●	●			●				●					
52			●	●			●					●				
53			●	●				●	●				13.76	0.69	24.02	4.24
54			●	●				●		●			11.65	1.02	35.80	16.03
55			●	●				●			●		5.33	2.03	71.15	51.38
56			●	●				●				●	(19.96)	6.07	212.56	192.79
57			●		●		●		●				18.67	2.79	97.52	0.00
58			●		●		●			●						
59			●		●		●				●					
60			●		●		●					●				
61			●		●			●	●				18.93	2.74	96.06	16.97
62			●		●			●		●			16.82	3.08	107.85	28.75
63			●		●			●			●		10.50	4.09	143.20	64.11
64			●		●			●				●	(14.79)	8.13	284.61	205.52
65			●			●	●		●				14.92	6.27	219.43	0.00
66			●			●	●			●						
67			●			●	●				●					
68			●			●	●					●				
69			●			●		●	●				15.51	6.18	216.14	38.18
70			●			●		●		●			13.40	6.51	227.92	49.96
71			●			●		●			●		7.08	7.52	263.27	85.32
72			●			●		●				●	(18.21)	11.56	404.68	226.73

※　翼緣撓度為擴弧紅色數字者代表其因升力過高而產生反向之翼緣撓度。

五、1.0mm 不銹鋼翅公式驗證列表

表 9　1.0mm 不銹鋼片仿蟬翼模組公式驗證列表

組別	振翅幅度(度)			振翅頻率(次/S)			振翅攻角(度)		風速(cm/s)				翼緣撓度 mm	翅面壓力 gw/c m²	升力 gw	水平推力 gw
	30	45	90	1	2	3	0	10	0	50	100	200				
1	●			●			●		●				0.21	0.70	24.38	0.00

2	●			●			●			●						
3	●			●			●				●					
4	●			●			●					●				
5	●			●				●	●				0.22	0.69	24.02	4.24
6	●			●				●		●			(0.05)	1.02	35.80	16.03
7	●			●				●			●		(0.84)	2.03	71.15	51.38
8	●			●				●				●	(3.99)	6.07	212.56	192.79
9	●				●		●		●				(0.67)	2.79	97.52	0.00
10	●				●		●			●						
11	●				●		●				●					
12	●				●		●					●				
13	●				●			●	●				(0.64)	2.74	96.06	16.97
14	●				●			●		●			(0.90)	3.08	107.85	28.75
15	●				●			●			●		(1.69)	4.09	143.20	64.11
16	●				●			●				●	(4.85)	8.13	284.61	205.52
17	●					●	●		●				(2.64)	6.27	219.43	0.00
18	●					●	●			●						
19	●					●	●				●					
20	●					●	●					●				
21	●					●		●	●				(2.57)	6.18	216.14	38.18
22	●					●		●		●			(2.83)	6.51	227.92	49.96
23	●					●		●			●		(3.62)	7.52	263.27	85.32
24	●					●		●				●	(6.78)	11.56	404.68	226.73
25		●		●			●		●				0.58	0.70	24.38	0.00
26		●		●			●			●						
27		●		●			●				●					
28		●		●			●					●				
29		●		●				●	●				0.59	0.69	24.02	4.24
30		●		●				●		●			0.33	1.02	35.80	16.03
31		●		●				●			●		(0.46)	2.03	71.15	51.38
32		●		●				●				●	(3.62)	6.07	212.56	192.79
33		●			●		●		●				0.08	2.79	97.52	0.00
34		●			●		●			●						
35		●			●		●				●					
36		●			●		●					●				
37		●			●			●	●				0.11	2.74	96.06	16.97
38		●			●			●		●			(0.15)	3.08	107.85	28.75

39		●			●			●			●		(0.94)	4.09	143.20	64.11
40		●			●			●				●	(4.10)	8.13	284.61	205.52
41		●				●	●		●				(1.52)	6.27	219.43	0.00
42		●				●	●			●						
43		●				●	●				●					
44		●				●	●					●				
45		●				●		●	●				(1.44)	6.18	216.14	38.18
46		●				●		●		●			(1.71)	6.51	227.92	49.96
47		●				●		●			●		(2.50)	7.52	263.27	85.32
48		●				●		●				●	(5.65)	11.56	404.68	226.73
49			●	●			●		●				1.71	0.70	24.38	0.00
50			●	●			●			●						
51			●	●			●				●					
52			●	●			●					●				
53			●	●				●	●				1.72	0.69	24.02	4.24
54			●	●				●		●			1.45	1.02	35.80	16.03
55			●	●				●			●		0.66	2.03	71.15	51.38
56			●	●				●				●	(2.49)	6.07	212.56	192.79
57			●		●		●		●				2.33	2.79	97.52	0.00
58			●		●		●			●						
59			●		●		●				●					
60			●		●		●					●				
61			●		●			●	●				2.36	2.74	96.06	16.97
62			●		●			●		●			2.10	3.08	107.85	28.75
63			●		●			●			●		1.31	4.09	143.20	64.11
64			●		●			●				●	(1.85)	8.13	284.61	205.52
65			●			●	●		●				1.86	6.27	219.43	0.00
66			●			●	●			●						
67			●			●	●				●					
68			●			●	●					●				
69			●			●		●	●				1.94	6.18	216.14	38.18
70			●			●		●		●			1.67	6.51	227.92	49.96
71			●			●		●			●		0.88	7.52	263.27	85.32
72			●			●		●				●	(2.27)	11.56	404.68	226.73

※　翼緣撓度為擴弧紅色數字者代表其因升力過高而產生反向之翼緣撓度。

六、1.5mm 不銹鋼翅公式驗證列表

表 10　1.5mm 不銹鋼片仿蟬翼模組公式驗證列表

組別	振翅幅度(度)			振翅頻率(次/S)			振翅攻角(度)		風速(cm/s)				翼緣撓度 mm	翅面壓力 gw/cm^2	升力 gw	水平推力 gw
	30	45	90	1	2	3	0	10	0	50	100	200				
1	●			●			●		●				0.06	0.70	24.38	0.00
2	●			●			●			●						
3	●			●			●				●					
4	●			●			●					●				
5	●			●				●	●				0.06	0.69	24.02	4.24
6	●			●				●		●			(0.01)	1.02	35.80	16.03
7	●			●				●			●		(0.25)	2.03	71.15	51.38
8	●			●				●				●	(1.18)	6.07	212.56	192.79
9	●				●		●		●				(0.20)	2.79	97.52	0.00
10	●				●		●			●						
11	●				●		●				●					
12	●				●		●					●				
13	●				●			●	●				(0.19)	2.74	96.06	16.97
14	●				●			●		●			(0.27)	3.08	107.85	28.75
15	●				●			●			●		(0.50)	4.09	143.20	64.11
16	●				●			●				●	(1.44)	8.13	284.61	205.52
17	●					●	●		●				(0.78)	6.27	219.43	0.00
18	●					●	●			●						
19	●					●	●				●					
20	●					●	●					●				
21	●					●		●	●				(0.76)	6.18	216.14	38.18
22	●					●		●		●			(0.84)	6.51	227.92	49.96
23	●					●		●			●		(1.07)	7.52	263.27	85.32
24	●					●		●				●	(2.01)	11.56	404.68	226.73
25		●		●			●		●				0.17	0.70	24.38	0.00
26		●		●			●			●						
27		●		●			●				●					
28		●		●			●					●				
29		●		●				●	●				0.17	0.69	24.02	4.24

30		●		●				●		●			0.10	1.02	35.80	16.03
31		●		●				●			●		(0.14)	2.03	71.15	51.38
32		●		●				●				●	(1.07)	6.07	212.56	192.79
33		●			●		●		●				0.02	2.79	97.52	0.00
34		●			●		●			●						
35		●			●		●				●					
36		●			●		●					●				
37		●			●			●	●				0.03	2.74	96.06	16.97
38		●			●			●		●			(0.05)	3.08	107.85	28.75
39		●			●			●			●		(0.28)	4.09	143.20	64.11
40		●			●			●				●	(1.21)	8.13	284.61	205.52
41		●				●	●		●				(0.45)	6.27	219.43	0.00
42		●				●	●			●						
43		●				●	●				●					
44		●				●	●					●				
45		●				●		●	●				(0.43)	6.18	216.14	38.18
46		●				●		●		●			(0.51)	6.51	227.92	49.96
47		●				●		●			●		(0.74)	7.52	263.27	85.32
48		●				●		●				●	(1.67)	11.56	404.68	226.73
49			●	●			●		●				0.51	0.70	24.38	0.00
50			●	●			●			●						
51			●	●			●				●					
52			●	●			●					●				
53			●	●				●	●				0.51	0.69	24.02	4.24
54			●	●				●		●			0.43	1.02	35.80	16.03
55			●	●				●			●		0.20	2.03	71.15	51.38
56			●	●				●				●	(0.74)	6.07	212.56	192.79
57			●		●		●		●				0.69	2.79	97.52	0.00
58			●		●		●			●						
59			●		●		●				●					
60			●		●		●					●				
61			●		●			●	●				0.70	2.74	96.06	16.97
62			●		●			●		●			0.62	3.08	107.85	28.75
63			●		●			●			●		0.39	4.09	143.20	64.11
64			●		●			●				●	(0.55)	8.13	284.61	205.52
65			●			●	●		●				0.55	6.27	219.43	0.00
66			●			●	●			●						

67			●			●	●				●				
68			●			●	●					●			
69			●			●		●	●				0.57	6.18	216.14	38.18
70			●			●		●		●			0.50	6.51	227.92	49.96
71			●			●		●			●		0.26	7.52	263.27	85.32
72			●			●		●				●	(0.67)	11.56	404.68	226.73

※　翼緣撓度為擴弧紅色數字者代表其因升力過高而產生反向之翼緣撓度。

七、振翅試驗翼緣撓度之比較

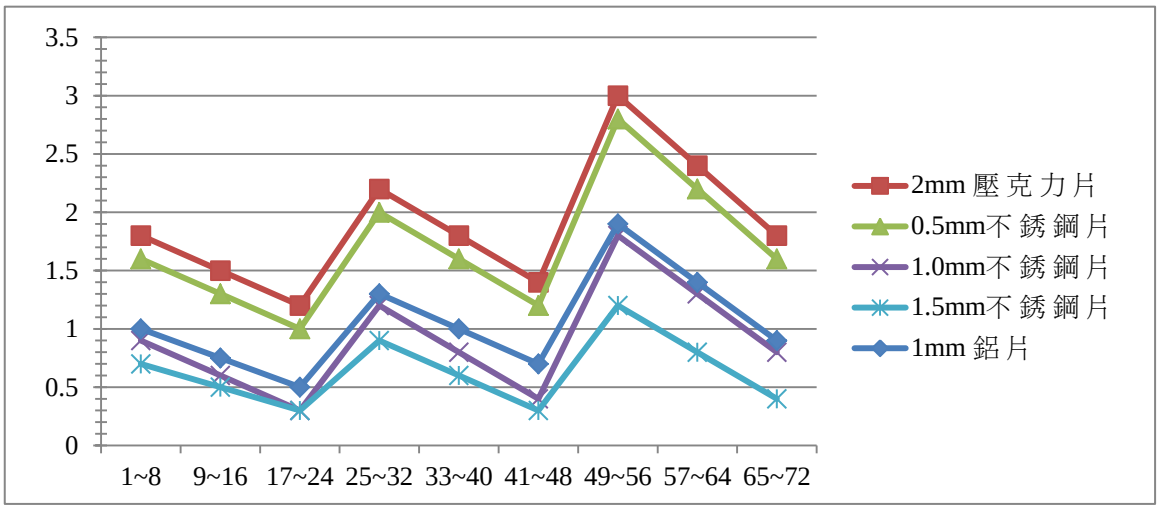


圖 45　翼緣撓度數值變化圖

(x 軸代表模組編號；y 軸代表翼緣撓度的大小，單位為 cm)

1. 變化程度與材質及斷面有絕對關係。

2. 與振幅呈正相關，與頻率呈負相關（但在振翅試驗的條件下，影響非常細微）

3. 振幅與頻率的組合可達到撓度控制的方法。

八、振翅試驗升力比較

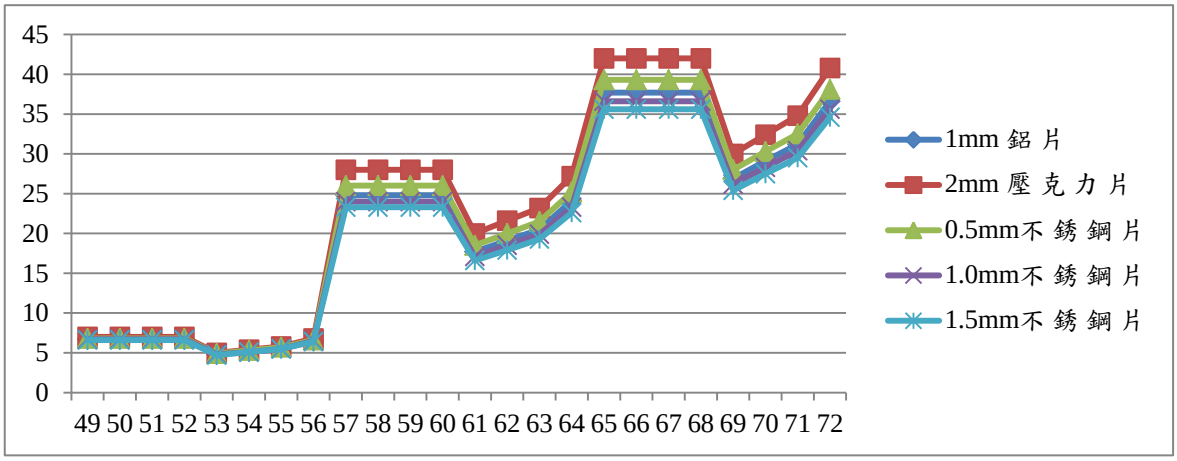


圖 46　升力數值變化圖（振翅幅度 90∘）
(x 軸代表模組編號；y 軸代表產生升力之大小，單位為 gw)

1. 影響升力的關鍵變因為振幅與頻率。

2. 材質的影響不大，並無顯著差異，壓克力略佔優勢（翼緣撓度越大者易產生空氣擾動，對升力有加成作用）。

3. 高頻率之攻角角度越大，則升力降低愈趨明顯。

九、振翅試驗推距比較

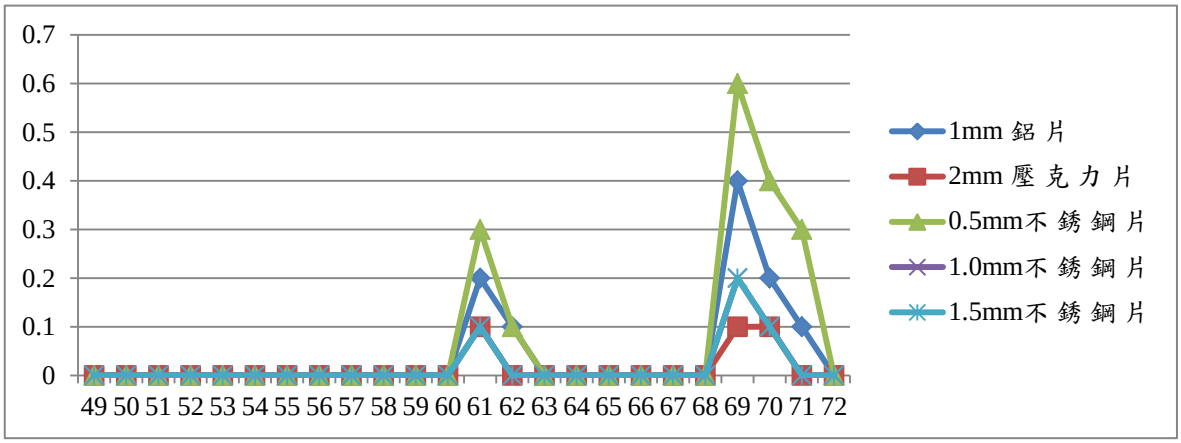


圖 47　推力數值變化圖（振翅幅度 90∘）
(x 軸代表模組編號；y 軸代表產生推距之大小，單位為 cm)

1. 攻角為推力之必要因素。

2. 振幅與頻率對翅面壓力之影響均呈正相關。

3. 風速在振翅頻率越高的情況下，對推力的影響越細微。(此點與公式驗證所得結果不同，公式驗證結果為高風速下其推力則異常增加。)

十、振翅試驗翅面壓力比較

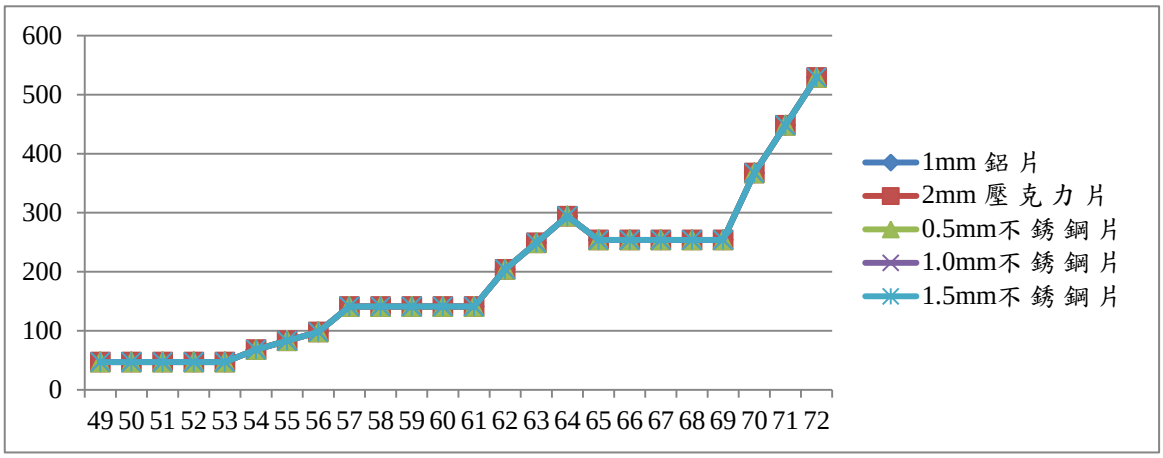


圖 48　翅面壓力數值變化圖（振翅幅度 90°）
(x 軸代表模組編號；y 軸代表翅面壓力之大小，單位為 gf/cm²)

1. 與材質及斷面無關，與迎風面面積有關。

2. 高頻率與高振幅下之壓力加劇，呈現非線性比例之增幅。

3. 攻角逆風具加成作用，角度越大愈增壓力。

十一、　試驗數值與公式驗證數值比較

依據試驗數值與經公式計算後得出的數值：

1. 翼緣撓度

經比較之後發現，1.0mm 不銹鋼蟬翼與 1.5mm 不銹鋼蟬翼，幾乎觀察不到翼緣撓度。與公式驗證數值的結果吻合。

1.0mm 鋁翼，觀察到的翼緣撓度在 1.0mm~2.0mm 之間。

0.5mm 不銹鋼翼，觀察到的翼緣撓度在 2.0mm~5.0mm 之間。

2.0mm 壓克力翼，觀察到的翼緣撓度在 4.0mm~12.0mm 之間，誤差

值最大。

造成此誤差的原因，應是振翅機構在四連桿機制上，動力的轉換不完全。且翅翼的厚度、彈性，亦會對拍翅運動的完整性造成些微影響。

2. 升力

經比較後發現，翅翼厚度越大，且構材彈性小者，誤差越明顯。其中，高頻率的升力誤差，又較低頻率的升力誤差大。因此推測誤差產生的原因有：

(1) 動力輸出過程中有損失

(2) 馬達扭力對升力數值造成影響

(3) 電子磅秤感應靈敏度不足，無法精確掌握升力數值

(4) 彈性小者，不易產生翼緣撓度，無法在周圍形成空氣擾動

3. 推〈距〉力

試驗過程中，幾乎無法觀察到滑動車台產生推距，與公式驗證結果吻合。而出現些微誤差的情況，應是馬達振動促使滑車向前推進，或是方格紙滑動，造成視覺上的錯覺。

4. 翅面壓力

經比較後發現，翅翼厚度越薄、彈性越佳者，試驗數值與公式驗證數值差異性最小。另外，公式驗證中，在不同振翅幅度和振翅頻率的組合下，會有相同數值的模組〈例如 0.5mm 與 1.0mm 與 1.5mm 在振翅頻率相同時其翅面壓力與升力均相同〉，在實際試驗中，卻是以振翅頻率較高的模組，會產生較大的翅面壓力。

推測誤差產生的原因應是：

1. 馬達動力轉換過程中有損失。

2. 實際振翅幅度並不等於變因條件中設定的幅度大小。

3. 薄膜感應靈敏度與軟體測量精確度仍有些微誤差。

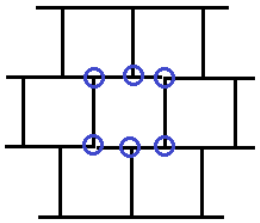
4. 薄膜無法完全貼合在翅翼上，使得拍翅時，薄膜些許部分與翅翼發生分離。

十二、 翅室面性組合型態結構力學分析成果探討

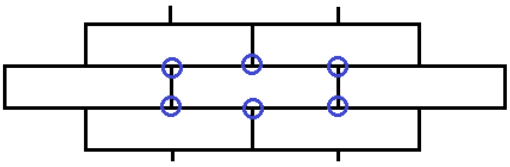
在四種不同形狀但相同面積的翅室上施加垂直於翅面相同的壓力，會對四種不同形狀翅室的周邊翅脈產生不同的拉力大小。依理論公式代入分析，得知最大拉力與最小拉力差距較小的圓形及六角形翅室是比較合適的面性組合結構型態〈如表 2、4〉，且以形抗表現〈如表 11〉亦是以圓形及六角形翅室的結構型態較佳。其中，由各別之形抗結點來看〈如圖 49〉，圓形翅室的組合結構尚會形成一個類三角的小翅室（如圖 50），更加強了圓形翅室組合結構的應力與應變的彈性；而且在翅脈的分佈數量與翅脈軸拉力（如圖 51）上，亦以圓形翅室為最少，因此圓形翅室應是四種翅室中展現最好性能的翅室結構形態。

表 11 不同翅室形狀之翅脈膜應力形抗比較表 （假設翅室面積與翅脈斷面積均相同）

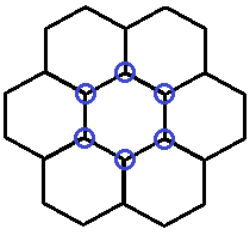
項目 / 翅室形狀	翅室面積	翅脈邊長		半徑	翅脈周長	拉力分佈角度		翅脈單側軸拉力		翅脈平均單位軸拉力		翅膜下拉力		翅膜平均單位下拉力		形抗比較
		長邊	短邊			長邊	短邊	長邊	短邊	長邊	短邊	長邊	短邊	長邊	短邊	
正方形	X^2	X			4X	90		T		0.5T/X		0.25P		P/X^2		良
正六方形		0.62X			3.72X	60		0.67T		0.54T/X		0.17P		P/X^2		佳
長方形		2X	0.5X		5X	152	28	1.69T	0.31T	0.42T/X	0.31T/X	0.42P	0.08P	$1.68P/X^2$	$0.32P/X^2$	差
圓形 (1/4 周長)		0.885X		0.564X	3.54X	90		0		0		0.25P		P/X^2		優



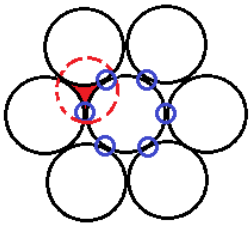
正方形翅室抗撓架構點



長方形翅室抗撓架構點



蜂巢形翅室抗撓架構點



圓形翅室抗撓架構點

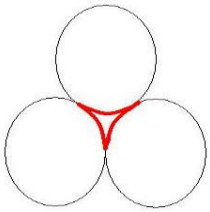
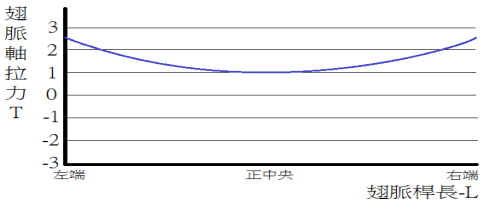
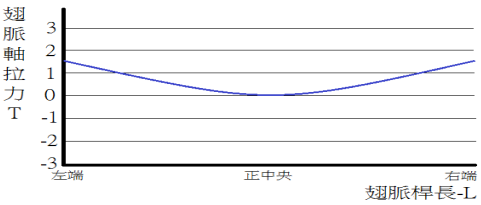


圖 50

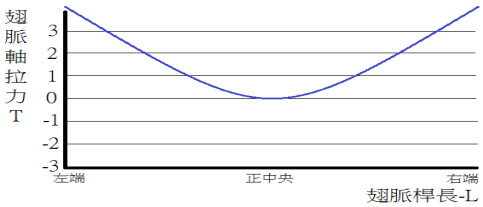
圖 49



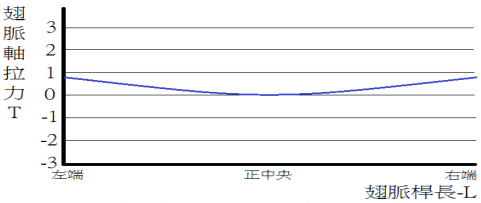
正方形翅室脈軸拉力曲線示意圖



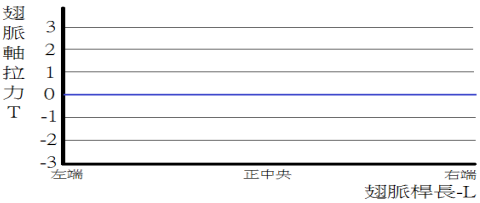
蜂巢形翅室脈軸拉力曲線示意圖



長方形翅室長脈軸拉力曲線示意圖



長方形翅室短脈軸拉力曲線示意圖



圓形翅室脈軸拉力曲線示意圖

圖 51

肆、　結論與應用

一、**翅室的結構奧妙：**本研究最終目的是希望在仿製蟬翼翅脈結構施以振翅試驗後，能解開蟬翼翅室〈脈〉排列組合的奧妙與最佳肋膜結構的分析設計。依實驗與分析結果觀察，翅室於承受飛行所遭受之外力主要是由翅膜傳遞給翅脈來承受，翅室〈脈〉的 排列組合有助於其拍翅力量的傳遞與導流；其應力與應變有其結構上的緊密關係〈如圖 37〉；另外，於飛行過程當中，接近翼緣的小翅室因翅脈管徑與膜厚較薄，於承受過度高速揮拍、翼緣氣流擾動時會先行破裂，但仍不會使得蟬於突然之間喪失飛行功能，所以小型翅室膜的破裂有飛行性能降低的預警功能；而靠近翅基部的大翅室則抵抗絕大部份的風阻與穩定轉翅時的上生升氣流。蟬翼翅室〈脈〉的結構組合主要係為便於揮拍飛行，經數萬年演化而成，但是若不以揮拍上升、扭轉翅面及控制氣流而言，蟬翼的翅室〈脈〉結構組合並非較佳的平面肋膜形抗結構。

二、**撓度與振翅頻率的關係：**振翅翼需具備一定的柔軟度與彈性，尤其在高速振翅時的翅面扭轉與攻角調整，由翼緣撓度的測試比較〈如圖 45〉可以看出 1mm 鋁片、2mm 壓克力片及 0.5mm 不銹鋼片之撓度差異並不大，而 0.5mm 不銹鋼片又更為輕薄，因此應較適合充當此類翅翼尺寸的構材。另外，撓度與振翅頻率似乎呈反比關係，於公式驗證時亦同，與一般認知有所不同，主要是高風阻的抵銷或甚至使得翼尖呈現反翹。

三、**變因的綜合影響：**由公式驗證比較表可以看出，不論是翅面壓力、升力與推力的展現均與翼材厚度及振幅無關，而與振翅頻率〈拍翅速度〉、攻角與風速的遞增而增加，尤其高風速的加成使得這三項的性能差距愈趨明顯，而翼緣撓度則相反甚至會反翹〈如表 8~10 擴弧中紅字所示〉。

四、**圓形肋膜的組合結構特性：**由幾合翅室之結構分析可知，圓形及六角形翅室是比較合適的面性組合結構型態，且以形抗表現〈如表 11〉亦是以圓形及六角形翅室的結構型態較佳。其中，由各別之形抗結點來看〈如圖 49〉，圓形翅室的組合結構尚會形成一個類三角的小翅室（如圖 50），更加強了圓形翅室組合結構的應力與應變的彈性；而且在翅脈的分佈數量與翅脈軸拉力（如圖 51）上，亦以圓形翅室為最少，因此圓形翅室應是四種翅室中展現最好性能的翅室結構形態。

五、**生活與科技的運用：**以圓形翅室所形成的翅脈膜平面結構系統，未來應可運用於降落傘、風帆船、薄膜建築結構、微機電系統〈MEMS〉、太陽能光電建築〈BIPV〉與人工飛行振翅翼之設計與運用〈如圖 52~57〉，相信未來以科技的發展亦能夠創造出比昆蟲翅翼更具效能的微飛行器翼，而人類可以開始自由自在遨翔於空中的願望或許在這個世紀結束前就可以實現了。

圖 52

圖 53

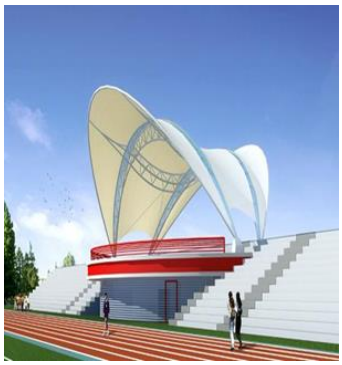


圖 54

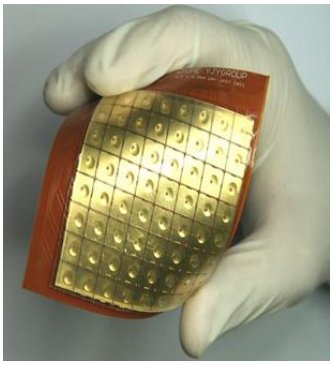


圖 55

圖 56

圖 57

伍、 參考文獻

1. 王少甫(民 94)。振翅翼之空氣動力分析。台灣博碩士論文知識加值系統。民 101 年 10 月 13 日，取自：http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22093NCKU5295050%22.&searchmode=basic

2. 徐振貴（民 96）。拍翼式微飛行器之設計、製造與測試整合。電子學位論文服務。民 101 年 10 月 14 日，取自：http://etds.lib.tku.edu.tw/etdservice/view_metadata?etdun=U0002-2108200814054600

3. 伍庭曄（民 98 年）。昆蟲振翅最大垂直升力及相關參數研究。中華民國第 49 屆中小學科學展覽會 參賽作品專輯。民 101 年 10 月 14 日，取自：

4. http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/040113.pdf

5. 歐亦泰（民 96 年）。振翅翼翅膀結構對升力之影響。台灣博碩士論文知識加值系統。民 101 年 10 月 13 日，取自：http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22095NCKU5295022%22.&searchmode=basic

6. 傅裕鈞（民 96 年）。振翅翼微飛行器之氣動力分析探討。台灣博碩士論文知識加值系統。民 101 年 10 月 13 日，取自：http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22095CHPI5598031%22.&searchmode=basic

7. 詹景翔（民 98 年）。多孔質陽極氧化鋁模板製作似蟬翼抗反射結構。台灣博碩士論文知識加值系統。民 101 年 10 月 13 日，取自：

http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22097NTUS5489051%22.&searchmode=basic

8. 余永亮、童秉綱（民 93 年）。拍翼軌跡對昆蟲前飛氣動性能的影響。大陸學術期刊。

9. 程暮林（民 90 年）。昆蟲振翅飛行原理的數值模擬研究。大陸碩士論文。

10. 苗文博、程暮林（民 94 年）。昆蟲振翅三維情形數值分析。大陸學術期刊。

11. 林江財（民 101 年）。太陽光電與建築的結合應用與發展。太陽光電產業協會期刊論文。

12. 劉高瑋 （民 98 年）。聚二甲基矽氧烷(PDMS)薄膜形變行為之研究。台灣博碩士論文知識加值系統。取自：http://tw.search.yahoo.com/r/_ylt=A8tUwYK9qNJSa3wAAchr1gt.;_ylu=X3oDMTE2M2NmdDFjBHNlYwNzcgRwb3MDMQRjb2xvA3R3MQR2dGlkA1ZJUFRXNThfNTA4/SIG=142hndcj6/EXP=1389566269/**http%3a//ethesys.isu.edu.tw/ETD-db/ETD-search/getfile%3fURN=etd-0116109-110253%26filename=etd-0116109-110253.pdf

13. 余維漢（民 72 年）。翼尖的奇妙功能。科學月刊雜誌 1983 年 6 月第 162 期。

評語

蟬翼結構的放大製作需理解 Scaling Law 才可理解風洞試驗的結果。未來的工程應用及仿生飛行(加上壓電材料)是值得開發的重點。