

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

(鄉土)教材獎

030102

原鄉蜻蜓夢 一時間停留術

學校名稱：臺東縣立大王國民中學

作者： 國一 雷幃捷 國一 賴品好	指導老師： 周彥維 吳筱涵
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：竹蜻蜓、康達效應、空中停留時間

摘要

實驗構想來自部落耆老童年玩具，從製作竹蜻蜓與發射系統，過程中嘗試解決許多實作上的問題，最後用手電鑽帶動漁網線，透過線和竹蜻蜓尾桿的摩擦力讓它本身旋轉。在它旋轉時打擊空氣分子產生康達效應，因失去能量而產生升力，當升力比它的重力加空氣阻力大時，它會慢慢脫離發射台，最終目標讓竹蜻蜓停留在空中時間最長。實驗中設計不同對葉片竹蜻蜓在尾桿纏繞線不同圈數下，觀察它停留在空中的時間，最後結果發現在穩定條件下，因為二對葉片具有比一對葉片大的升力，且比三對葉片輕之特性，所以二對葉片停留空中時間最長。此次研究不僅能讓實作加入物理基本原理，更能探究實務與理論上差別，且融入到原住民文化課程中，從中思辨出文化與科學的智慧。

壹、研究動機

近年在我們金崙部落的文建站開設教導部落耆老們製作童年樂趣的手工玩具



課程，其中一項玩具為竹蜻蜓，課程結束後開始在教會、村子裏會看到有小孩子在玩竹蜻蜓。過程裡有的飛不起來，有的拉動太大力直接爆裂，我們所以在想有什麼方法，才能讓它停留在空中時間最長。透過老師解說才知道竹蜻蜓飛行的原理和 8、9 年級力學

與運動學有關；原鄉部落的藝術和科學往往都是兩條平行線，期待透過落實的教育才能找到交叉點，所以我們夢想讓更多竹蜻蜓飛在太麻里蔚藍的天空，才會開啟本次研究課題。

貳、研究目的


一、 運用科學方法讓竹蜻蜓能在空中停留時間最長

- (一) 建立竹蜻蜓的製作方式與材料的選配
- (二) 發射系統條件的建置

(三) 不同對葉片的竹蜻蜓，改變發射時纏繞在尾桿上線圈數，對其停留在空中時間的影響









參、研究設備及器材

一、研究材料

			
冰棒棍	瞬間接著劑	免洗筷	
			
魚網線	熱熔膠	廢棄的課桌椅	捲線筒

二、研究工具

		
游標尺	2B 鉛筆	美工刀

			
水平儀	線鋸機	鑽床	雷射轉速計
			
F 夾	熱熔膠槍	手電鑽	Apple ipad

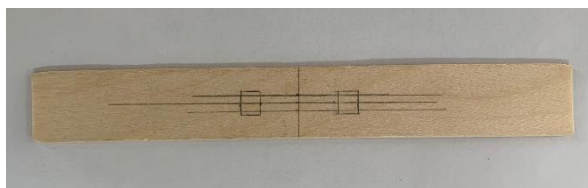
三、竹蜻蜓的製作步驟

步驟一：取如圖 1 中的冰棒棍一隻，之後用游標尺測量冰棒棍的基本物理參數；長：137 mm、寬：18 mm、厚度：2 mm。



▲圖 1 游標尺量測冰棒棍圖

步驟二：找到冰棒棍的中心，找尋方式必須透過圖 1 所量測的物理參數，將其長與寬的數值各別除以二找到中心點，並用鉛筆進行標定。最後找到冰棒棍的中心點位在長為 $\frac{137}{2} = 68.5 \text{ mm}$ 與寬 $\frac{18}{2} = 9 \text{ mm}$ 的中心點。



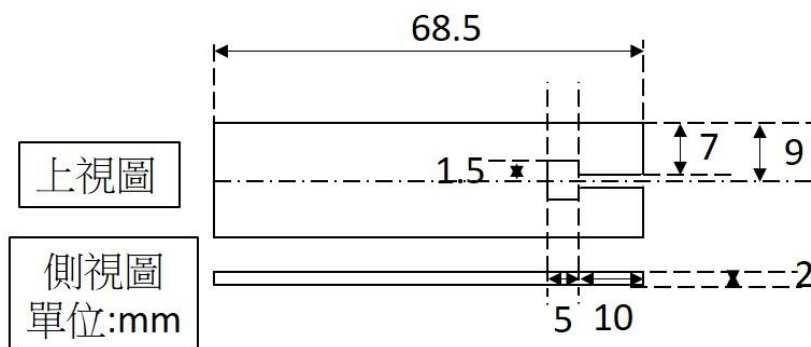
▲圖 2 標定冰棒棍中心圖

步驟三：將冰棒棍對切如圖 3，形成邊長分別為68.5 mm與寬9 mm的竹蜻蜓葉片的部分。



▲圖 3 把冰棒棍對半切圖

步驟四：將圖 3 中的木片用美工刀切割出具有凹槽的葉片其尺寸設計如圖 4，而成品如圖 5。

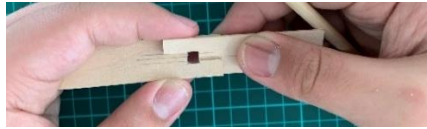


▲圖 4 葉片設計上視、側視圖



▲圖 5 葉片實物圖

步驟五：利用兩片圖 5 中的凹槽中兩個相互接合形成葉片如圖 6，並且利用分度規量測並調整讓葉片間的夾角為 45°如圖 7。



▲圖 6 葉片組裝圖



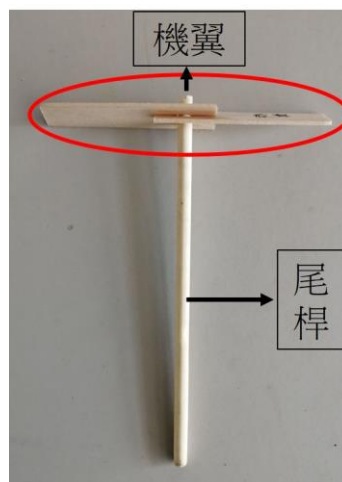
▲圖 7 分度規確認葉片 45 度夾角圖

步驟六：竹蜻蜓尾桿的部分如圖 8 是使用直徑為 5 mm 的免洗筷，將其用線鋸機裁成長度為 150 mm 的竹蜻蜓尾桿。



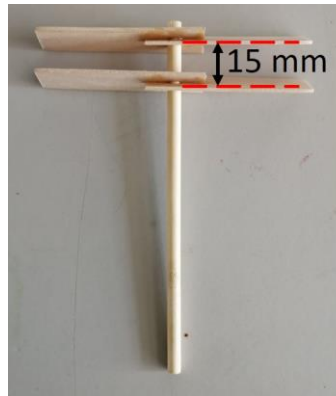
▲圖 8 竹蜻蜓尾桿圖

步驟七：如圖 9 中，將其圖 6 的兩片葉片交錯並在中間放入圖 8 的直徑為 5 mm 的免洗筷當作尾桿，最後用瞬間接著劑固定完成竹蜻蜓的製作。一對葉片竹蜻蜓的重量在 5.4 ± 0.5 公克。

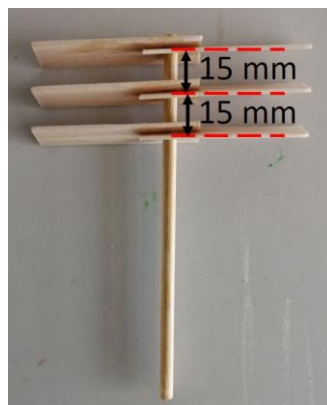


▲圖 9 一對葉片的竹蜻蜓

步驟八：如果要製作二對或三對葉片竹蜻蜓，請重複步驟一到五，之後將新的葉片固定到圖 9 中，可以製成二對葉片的竹蜻蜓如圖 10 (7.9 ± 0.5 公克)，或三對葉片的竹蜻蜓如圖 11 (10.6 ± 0.5 公克)，其中每對葉片間的距離為 15 mm。



▲圖 10 二對葉片的竹蜻蜓



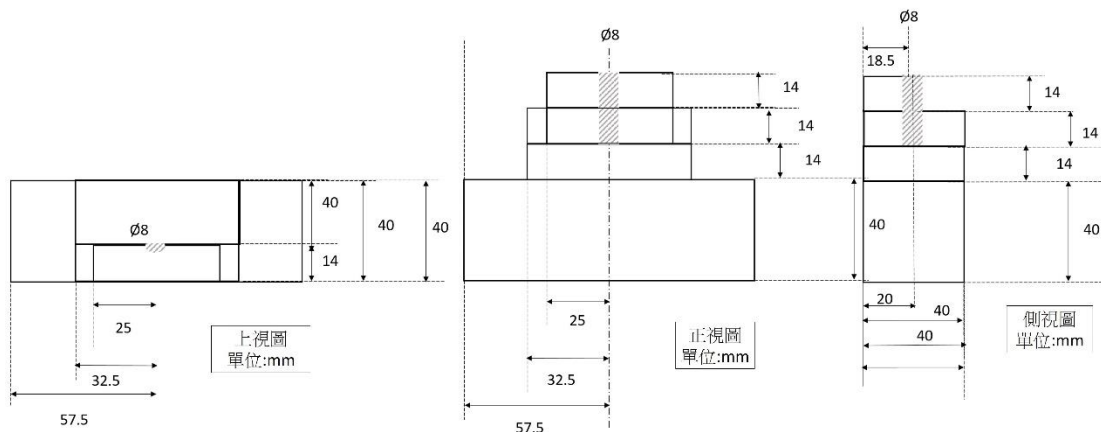
▲圖 11 三對葉片的竹蜻蜓

四、發射台製作

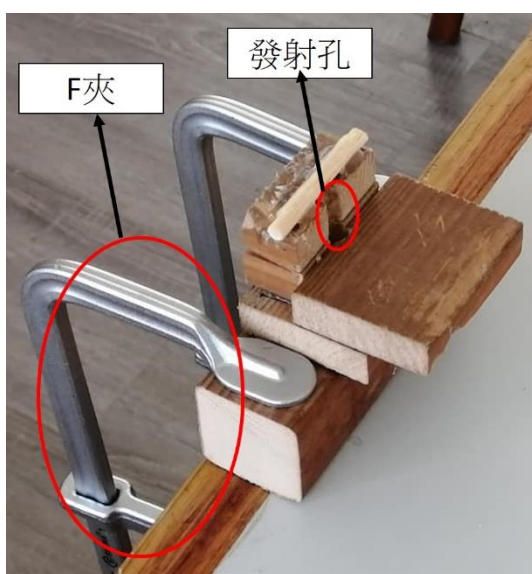
步驟一：利用學校廢棄的課桌椅，透過線鋸機加工成兩塊長、寬、高分別為 50 mm、14 mm、14 mm 的木塊，與兩塊長、寬、高分別為 65 mm、50 mm、14 mm 的木塊，和一塊長、寬、高為 115 mm、40 mm、40 mm 的木塊。

步驟二：利用如下圖 12 的三視圖，將其組合並利用熱融膠將其黏合。

步驟三：最後參考圖 12 中所定位的位置，利用鑽床將其位置鑽出直徑 8 mm 深度為 28 mm 的孔，此孔即為竹蜻蜓的發射孔，在底座左右兩旁多出來的部分是用來讓 F 夾固定在桌上所設計，如圖 13、14 為發射台整體最終完成圖。



▲圖 12 發射台三視圖依序為上視、正視、側視圖



▲圖 13 發射台上方圖



▲圖 14 發射台側方圖

五、發射器製作

步驟一：將捲線筒與六角多功能鑽頭利用熱熔膠黏合後，製成本實驗中的捲線器（直徑為 20 mm）如圖 15。

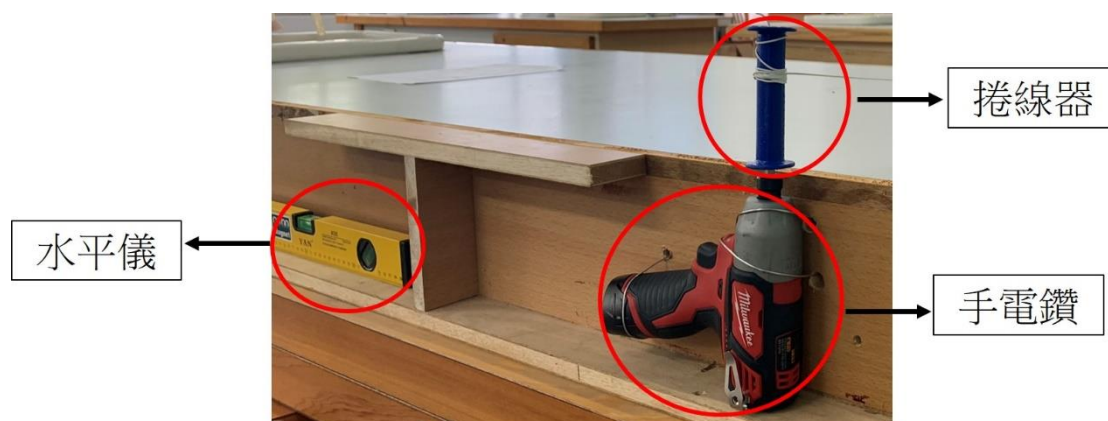


▲圖 15 捲線器

步驟二：在 L 型廢棄木板上鑽出 5 個直徑 8 mm 的孔，並用鐵絲將手電鑽固

定在 L 型廢棄木板上。

步驟三：利用水平儀調整整體的水平，並在手電鑽裝上圖 14 中捲線器，完成整體發射器製作如圖 16；手電鑽旋轉時帶動漁網線（線粗 1 mm），最後由漁網線帶動竹蜻蜓旋轉，整個系統的設計如圖 17。



▲圖 16 竹蜻蜓的發射器圖



▲圖 17 完整的發射器和竹蜻蜓發射台

肆、研究過程或方法

一、實驗原理

（一）牛頓第二運動定律

當物體受到外力作用所產生的運動，可以用 $F = ma$ 的式子來描述，其中 F 為物體所受到的合力、 m 為質量、 a 為加速度，此式又可稱為加速度定律。假設物體在運動過程中質量不變的條件下，物體所受到的合力與加速度成正比，如果在物體所受到合力不變的條件下，其質量和加速度成反比。

（二）牛頓第三運動定律

可稱為作用力與反作用力，在兩物體間交互作用下，彼此間施加於對方的力量，其方向相反、大小相等且必須作用在同一條線上。其中任何一力都可為作用力，其相對應力自然成為反作用力，而成對的作用力與反作用力就稱為配對力。

（三）康達效應

本研究中竹蜻蜓飛行如同飛機的升力，從早期的文獻中常常提到飛機的升力可以用白努力方程式解釋，白努力方程式為 $P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{常數}$ ；其中 v 為速度， ρ 為密度， g 為重力加速度， h 為相對於基準點的高度， P 為壓力。這個方程式必須在不可壓縮、沒有黏滯力的穩定流體下才成立，但 Babinsky 的研究中提出三點反駁這樣的想法；其中第一點當機翼上層和下層的氣流，本身不算同一道流體，故本身的假設就違反白努力的限制條件；第二點根據實驗證據顯示，氣流通過機翼上層與下層，並不會同時到達尾端，所以運用上層流速快的推論也站不住腳；第三點白努力的公式僅顯示速度與壓力的大小關係，並未清楚解釋兩者之因果關係，如果從牛頓運動定律的觀點來看，壓力差異應該是速度變化的原因，並非結果，故正確的想法應為壓力大則速度小。

因此，竹蜻蜓和飛機的升力必須改用 Eastwell 所提出的康達效應（Coanda effect）來解釋，康達效應為當流體遇到障礙物如葉片時，會沿著障礙物的曲面流動傾向，因流線的彎曲需要向心力（向下，作用於流體），而相對應的反作用力（向上，作用於機翼），機翼便會受到提拉，讓飛機上升；由此可知竹蜻蜓的升力其來源與空氣作用在葉片上的機制也是如此。

康達效應生活化的例子如打開自來水的時候，用筷子觸碰水柱，水會隨著筷子向下淌，而不是依照重力的方向從水龍頭直接往下流。

二、研究方法與模型

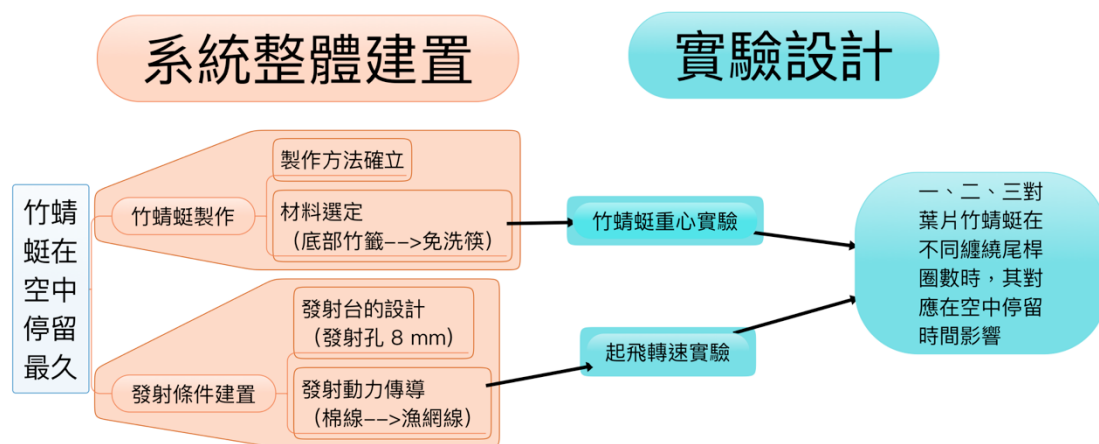
參考第 23 屆的中小學科展「竹蜻蜓怎樣做才會飛得高，飛得遠，飛得久」，該研究就提到竹蜻蜓的葉片夾角在 45° 時升力最大，且在夾角 0° 與 90° 時升力最小。加上第 48 屆的中小學科展「會來回的竹蜻蜓」與 52 屆的中小學科展「平步蜻雲」的研究發現，必須將製作竹蜻蜓規格化與建置發射台，才能讓整體的數據相互客觀比較；在第 58 屆彰化縣中小學科展「蜻蜓飛啊飛-自製發射器與竹蜻蜓飛行關係之探討」，其中更是嘗試改變在相同平面下增加葉片數量，討論如何讓竹蜻蜓飛更久。

藉由前人的研究結果，使得本研究在製作竹蜻蜓與其發射系統建置過程中更加系統化，其中將竹蜻蜓的葉片夾角固定在 45° ，且嘗試於縱軸方向增加葉片數量（如圖 9、10、11），探討如何讓竹蜻蜓停留在空中時間最久。最後嘗試在我們的量測條件，且配合物理條件簡化下，驗證竹蜻蜓停留在空中的時間數據是否具有可靠性。

本研究的過程與方法如圖 18，課題是如何將竹蜻蜓停留在空中時間最久，主要分成兩個部分：第一部分為系統建置，其中第一子部分包含竹蜻蜓的製作方式與材料的選配；另一子部分為發射條件的建置，因為實驗要求科學化，所以動力來源不能用手來發射，如果每次都用人手發射時，其參數都會不同，無法比較數據，最後設計出竹蜻蜓發射系統，讓手電鑽帶動漁網線發射放在發射台上的竹蜻蜓。

第二部分為實驗設計，其中第一個子部分為竹蜻蜓運用不同尾桿材料，觀察重心的變化，實驗早期用竹籤當作尾桿材料時，發射後很容易扯斷，且會容易發生反轉現象，所以後期更換為免洗筷改善竹蜻蜓發射後反轉現象，所以設計更換尾桿材料對重心改變設計實驗；第二子部分為用不同線材（棉線、漁網線）測試竹蜻蜓在發射時尾桿在不同纏繞圈數下轉速的穩定性，實驗早期發射竹蜻蜓在用棉線多次發射後，常常會觀察到棉線很容易出現分岔狀態，進而影響竹蜻蜓發射後飛行軌跡常常不穩定，且升力與轉速有關，其中轉速的來源與線材更有密不可

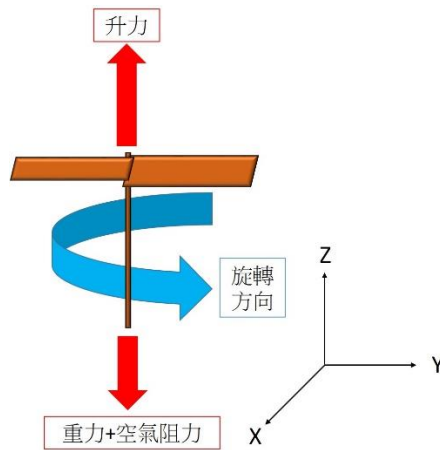
分關係，所以設計棉線、漁網線測試對竹蜻蜓轉速影響的實驗；最後實驗部分為讓不同對葉片的竹蜻蜓，調整發射時纏繞在竹蜻蜓尾桿上漁網線的圈數，記錄其停留在空中的時間，並討論其中之間的物理關係。



▲圖 18 研究過程示意圖

一開始竹蜻蜓受到漁網線和竹蜻蜓尾桿間的摩擦力帶動旋轉，在它旋轉時打擊空氣分子產生康達效應，因而失去能量產生升力，當升力比它的重力加空氣阻力大時，此時竹蜻蜓會慢慢脫離發射台，當漁網線完全離開竹蜻蜓的尾桿時，竹蜻蜓的轉速便會開始慢慢下降。假設在沒有空氣的環境下，竹蜻蜓只會在發射處空轉，轉動動能不會轉成位移動能與重力位能，所以空氣的角色很重要，是升力（轉速有關）也是阻力。

竹蜻蜓的整體飛行軌跡為三維運動，在理想的狀態下應該只有 Z 軸方向的等加速度運動，其中受到向上由康達效應提供的升力與向下的重力如圖 19，但本實驗的竹蜻蜓在發射到空中時往往會有傾斜角，造成運動軌跡如三維的斜拋運動，再細分下去可以分成 X、Y 軸的等速度運動和 Z 軸的等加速度運動的總和，但回歸整個運動過程中時間這個物理量皆是相同。因此，本實驗中最後實驗的部分運用調整一些相對應參數如線纏繞圈數（轉速）、葉片數，來對竹蜻蜓停留在空中的時間做討論。

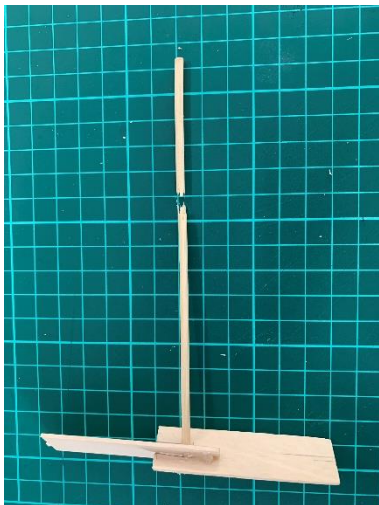


▲圖 19 竹蜻蜓受力示意圖

伍、研究結果

一、系統建置的結果

系統建置的結果中，所有的實驗測試皆在室內，且在窗戶全關與未開電扇的環境下操作。我們前期竹蜻蜓的製造方式，為了減輕竹蜻蜓的重量，所以在竹蜻蜓尾桿選用材料為直徑3 mm的竹籤，但在我們的發射系統多次發射後，觀察到用竹籤的尾桿會斷裂如圖 20 中的狀態。加上一開始在測試適當的尾桿長度時，發現低於160 mm時，竹蜻蜓會有反過來旋轉的狀態如圖 21，而後馬上掉落到地面，所以後期將直徑3 mm竹籤更換直徑為5 mm的免洗筷，並固定竹蜻蜓尾桿長度為150 mm。



▲圖 20 竹籤當尾桿竹蜻蜓斷裂圖



▲圖 21 竹蜻蜓反轉圖

圖 8 中竹蜻蜓尾桿免洗筷的直徑為 5 mm，當圖 13 中的發射孔鑽洞的直徑為 5 mm 時，讓竹蜻蜓旋轉時會非常不順，但如果鑽洞直徑大於 8 mm 時，我們常常觀察到竹蜻蜓在起飛後軌跡會不穩定，所以多次的測試後才會鑽直徑 8 mm 的洞。

前期使用手電鑽發射竹蜻蜓時，所使用的線材是棉線，但在多次發射後常常會觀察到線頭鬆脫或分岔的現象如圖 22。所以後期改用外面具有一層塑膠皮保護的漁網線，且每次用剪斷線後都會在切面上用火燒，然後壓實，使切面也受到漁網線外塑膠層完整保護如圖 23。



▲圖 22 棉線頭鬆脫或分岔圖



▲圖 23 漁網線切面火燒後壓實圖

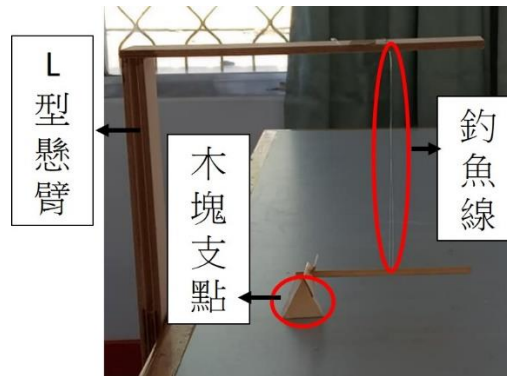
二、實驗設計的結果

本實驗條件在溫度約在 27~28°C，濕度約 60%~70%的室內，且未開任何空調設備與窗戶下操作。發射竹蜻蜓時，會用 Apple ipad 錄下竹蜻蜓的飛行過程，與用雷射轉速計量測竹蜻蜓離開桌面時的轉速，而後運用 tracker 軟體去分析竹蜻蜓停留在空中的時間數據。

(一) 竹蜻蜓尾桿在不同材料（竹籤、免洗筷）下重心改變

我們運用支撐法尋找一對葉片竹蜻蜓的重心，假設竹蜻蜓為不均勻的棒子，儀器系統如下圖 24，用一個三角形的木塊當作支點支撐物體，支點放置的位置從頂端往下 3 mm 處，測試竹蜻蜓尾桿長度皆為 150 mm 分別用直徑 3 mm 的竹籤或直徑 5 mm 的免洗筷，不斷改變上方釣魚線的位置，越穩定的位置，就越接近重心。實驗中一對葉片竹蜻蜓，測得用竹籤當尾桿的竹蜻蜓其重心由頂端（葉片端）往下 68 mm，而用免洗筷當尾桿的竹蜻蜓其重心由頂端（葉片端）往下 116 mm，其中一對葉片重 5.0 g，竹籤重 1.2 g，免洗筷

重3.4 g。由此可以得知用竹籤當尾桿的竹蜻蜓，常常發射後會反轉，主要是因為用竹籤當尾桿時，葉片重量對尾桿重的比值為4.16，導致重心過高，所以發射後容易反轉；當用免洗筷當尾桿時，葉片重量對尾桿重的比值為1.47，其重心較低，所以發射後不會反轉，最後竹蜻蜓尾桿皆選用免洗筷當作材料。

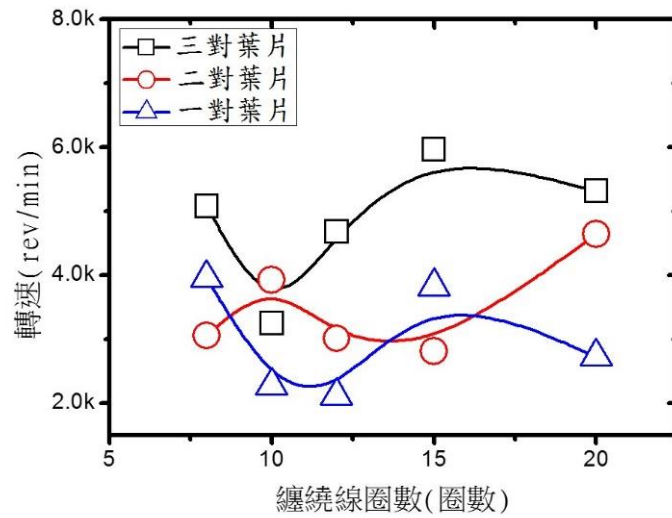


▲圖 24 重心系統設置圖

(二) 不同對葉片竹蜻蜓在不同帶動線材下的起飛轉速

1. 不同對葉片竹蜻蜓在棉線帶動下起飛轉速數據

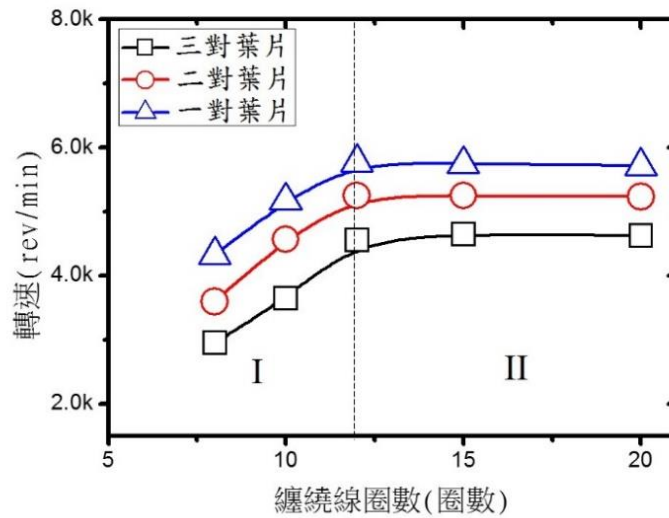
圖 25 為用棉線當作帶動線材，不同對葉片竹蜻蜓發射時的起飛轉速圖，其中橫軸為竹蜻蜓尾桿纏繞圈數，縱軸為竹蜻蜓起飛時的轉速。在圖 25 中可以觀察到隨尾桿纏繞圈數增加，一對葉片竹蜻蜓的轉速在 2115~3958 rev/min 間震盪；二對葉片竹蜻蜓的轉速在 2814~4643 rev/min 間震盪；三對葉片竹蜻蜓的轉速在 3246~5968 rev/min 間震盪。



▲圖 25 一~三對葉片竹蜻蜓用棉線纏繞不同圈數下起飛轉速圖

2.不同對葉片竹蜻蜓在魚網線帶動下起飛轉速數據

圖 26 為用漁網線當作帶動線材，不同對葉片竹蜻蜓發射時的起飛轉速圖，其中橫軸為竹蜻蜓尾桿纏繞圈數，縱軸為竹蜻蜓起飛時的轉速。在圖 26 中可以觀察到在相同纏繞圈數下，竹蜻蜓的葉片數由一對增加到三對時，其對應起飛轉速也就越低。在 I 部分纏繞圈數由 8 增加到 12 圈時，可以觀察到一對葉片起飛轉速由 4329 rev/min (圈數/分鐘) 增加到 5774 rev/min；二對葉片起飛轉速由 3600 rev/min 增加到 5248 rev/min；三對葉片起飛轉速由 2954 rev/min 增加到 4554 rev/min，整體起飛轉速皆增加。在第 II 部分纏繞圈數由 12 增加到 20 圈時，其中一對葉片起飛轉速在 5717 ~ 5774 rev/min 間；二對葉片起飛轉速在 5237 ~ 5248 rev/min 間；三對葉片起飛轉速在 4554 ~ 4651 rev/min 間，整體起飛轉速變化趨緩。



▲圖 26 一~三對葉片竹蜻蜓用漁網線纏繞不同圈數下的起飛轉速圖

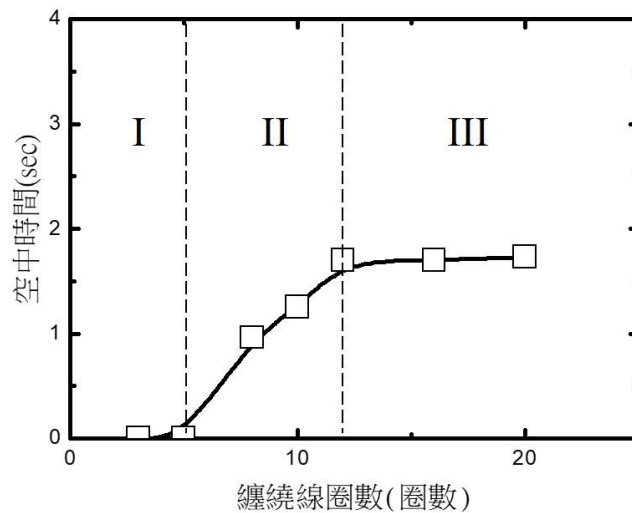
(三) 實驗三：不同對葉片竹蜻蜓數據

1. 一對葉片竹蜻蜓數據

本實驗為一對葉片的竹蜻蜓 (5.4 ± 0.5 公克) 在不同纏繞圈數下，對應其在空中停留的時間，其數據點在表 1 中，將表 1 中的數據轉成圖 27，其中橫軸為纏繞在竹蜻蜓尾桿上的線圈數，且縱軸為竹蜻蜓停留在空中的時間。在圖 27 中數據可以區分成三段討論，第 I 段為 3~5 圈，可以觀察到竹蜻蜓在空中的時間皆為 0 秒，代表竹蜻蜓無法起飛；第 II 段為 5~12 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間由 0 秒增加到 1.70 秒；第 III 段為 12~20 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其在空中停留時間變化趨於穩定在 1.70~1.73 秒間。

■表 1 一對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數下，其空中停留時間表

圈數	在空中停留時間 (sec)
3	0
5	0
8	0.96
10	1.25
12	1.70
16	1.70
20	1.73



▲圖 27 一對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數，其空中停留時間圖

(1)一對葉片竹蜻蜓誤差

實驗條件為一對葉片竹蜻蜓，且在尾桿纏繞 12 圈的條件下，重複發射竹蜻蜓四次，其分別停留在空中的時間如表 2。

■表 2 一對葉片竹蜻蜓纏繞 12 圈時發射四次，其空中停留時間表

實驗次數	在空中停留時間 (sec)
1	1.70
2	1.74
3	1.76
4	1.73

其利用四次的數據取其平均值為1.73秒，最後選1.76秒的實驗

值，帶入方程式 1 可以得到此條件下最大的實驗誤差值為1.73%。

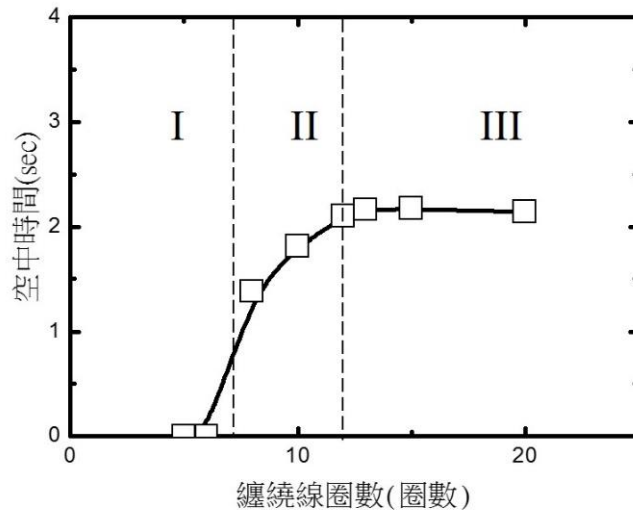
$$\text{實驗誤差百分比} = \frac{|\text{實驗值}-\text{平均值}|}{\text{平均值}} \times 100\% \quad \text{方程式 1}$$

2.二對葉片竹蜻蜓數據

本實驗為二對葉片的竹蜻蜓（ 7.9 ± 0.5 公克），其數據點在表 3，將表 3 中的纏繞在竹蜻蜓尾桿上的線圈數當作橫軸，且將飛行在空中的停留時間當作縱軸作圖得到圖 28。在圖 28 中數據可以區分成三段討論，其中第 I 段為 5~6 圈，可以觀察到竹蜻蜓在空中的時間皆為 0 秒，代表竹蜻蜓無法起飛；第 II 段為 6~13 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間由 0 秒增加到 2.10 秒，第 III 段為 13~20 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其在空中停留時間變化趨於穩定在 2.14~2.17 秒間。

■表 3 二對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數下，其空中停留時間表

圈數	在空中停留時間 (sec)
5	0
6	0
8	1.38
10	1.81
12	2.10
13	2.16
15	2.17
20	2.14



▲圖 28 二對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數，其空中停留時間圖

(1)二對葉片竹蜻蜓誤差

實驗條件為二對葉片竹蜻蜓，且在尾桿纏繞 12 圈的條件下，重複發射竹蜻蜓四次，其分別停留在空中的時間如表 4。利用四次的數據取其平均值為 2.14 秒，最後選 2.17 秒的實驗值，帶入方程式 1 可以得到此條件下最大的實驗誤差值為 1.40%。

■表 4 二對葉片竹蜻蜓纏繞 12 圈時發射四次，其空中停留時間表

實驗次數	在空中停留時間 (sec)
1	2.10
2	2.17
3	2.10
4	2.17

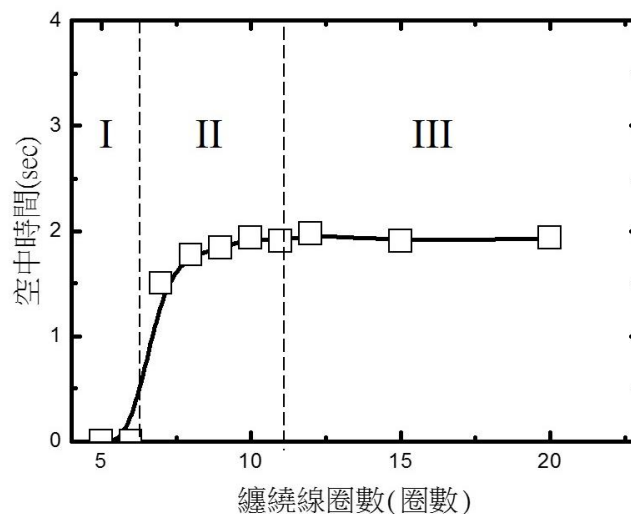
3.三對葉片竹蜻蜓數據

本實驗為三對葉片的竹蜻蜓(10.6 ± 0.5 公克)，其數據點在表 5 中，將表 5 中的纏繞在竹蜻蜓尾桿上的線圈數當作橫軸，且將飛行在空中的停留時間當作縱軸作圖得到圖 29。在圖 29 中數據可以區分成三段討論，第 I 段為 5~6 圈，可以觀察到竹蜻蜓在空中的時間皆為 0 秒，代表竹蜻蜓無法起飛；第 II 段為 6~9 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈

數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間由 0 秒增加到 1.84 秒；第 III 段為 9~12 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其在空中停留時間變化趨於穩定在 1.90~1.97 秒間。

■表 5 三對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數下，其空中停留時間表

圈數	在空中停留時間 (sec)
5	0
6	0
7	1.50
8	1.77
9	1.84
10	1.93
11	1.90
12	1.97
15	1.90
20	1.93



▲圖 29 三對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數下，其空中停留時間圖

(1)三對葉片竹蜻蜓誤差

實驗條件為三對葉片竹蜻蜓，且在尾桿纏繞 12 圈的條件下，重複發射竹蜻蜓四次，其分別停留在空中的時間如表 6。利用四次的數據取其平均值為 1.95 秒，最後選 1.97 秒的實驗值，帶入方程式 1 可以得到此條件下最大的實驗誤差值為 1.02%。

■表 6 三對葉片竹蜻蜓纏繞 12 圈時發射四次，其空中停留時間表

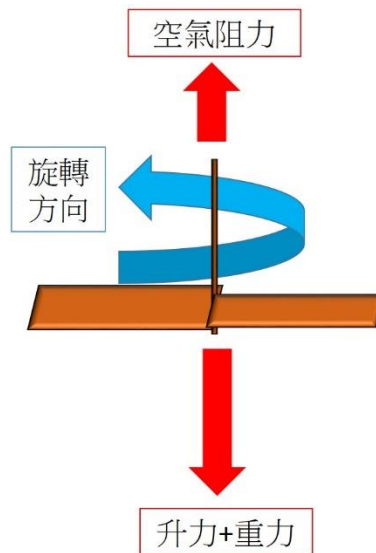
實驗次數	在空中停留時間 (sec)
1	1.97
2	1.94
3	1.97
4	1.90

陸、討論

一、系統建置的討論

(一) 竹蜻蜓製作

前期在製作竹蜻蜓時因為要減輕其重量，所以竹蜻蜓的尾桿選用竹籤當材料，但在本系統上發射用竹籤當尾桿的竹蜻蜓，常常發現竹蜻蜓在多次發射後，因為尾桿不夠堅固，所以出現斷裂的現象如圖 22。加上尾桿長度在 150 mm 時，竹蜻蜓會有反過來旋轉的狀態，主要是因為竹蜻蜓上半部葉片的重量大於下半部的尾桿重量，所以重心過高，導致竹蜻蜓脫離發射台後會有反過來旋轉的狀態如圖 30，也因為反轉過來的關係，使得原本的升力方向轉向地心，造成竹蜻蜓反轉時同時受到指向地心的重力加升力作用，所以馬上掉落到地面。因此，後期改用直徑 5 mm 的免洗筷，除了能解決在本系統多次發射後竹蜻蜓尾桿斷裂的現象，且可避免竹蜻蜓上半部葉片重量的比過大於下半部尾桿重量的導致重心過高，造成竹蜻蜓會有反過來旋轉的情況，進而影響到竹蜻蜓在空中停留的時間。



▲圖 30 竹蜻蜓反轉示意圖

(二) 發射系統建置

竹蜻蜓尾桿免洗筷的直徑為5 mm，如果在圖 13 的發射孔鑽的直徑為5 mm時，會發現竹籤和發射台間的接觸面摩擦力過大，所以當漁網線在帶動竹蜻蜓旋轉時非常不順。但如果發射孔鑽的直徑比8 mm大時，又因為竹蜻蜓旋轉時的自由度過大，會造成竹蜻蜓在起飛後軌跡不穩定，所以最後我們才會鑽直徑為8 mm的洞。由此可以推論當在此系統下要穩定發射竹蜻蜓時，發射孔的直徑等於尾桿直徑+3.0 mm。

前期使用手電鑽帶動棉線，常常觀察到在多次發射後，其中線頭有鬆脫或分岔的現象如圖 23，當線頭鬆脫時會影響到原本棉繩上纏繞時原本的狀態，進而影響繩子和竹蜻蜓尾桿間每次發射時的摩擦力，因此後期改用外面具有一層塑膠皮保護的漁網線如圖 24，即使多次發射後，線材也會因為外層塑膠皮的保護，可以穩定的提供漁網線和竹蜻蜓尾桿間每次發射的摩擦力。

二、實驗設計的討論

(一) 竹蜻蜓尾桿在不同材料下重心改變討論

運用支撐法測試一對葉片竹蜻蜓的重心，其中可以發現竹蜻蜓尾桿材料用竹籤比用免洗筷的重心高很多。因此，用竹籤當尾桿的竹蜻蜓，常常發射

後會發生反轉現象；而用免洗筷當尾桿時，發射後不會出現反轉現象，讓竹蜻蜓能夠停留在空中的時間更長，且在多次發射後尾桿不會斷裂，最後竹蜻蜓尾桿皆選用免洗筷當作材料。

(二) 不同對葉片竹蜻蜓在不同帶動線材下的起飛轉速討論

圖 25 中觀察到隨著尾桿纏繞圈數增加時，一～三對葉片竹蜻蜓的轉數只有在一個範圍內震盪，主要是因為使用棉線當作帶動線材在多次發射後棉線都會出現分叉的現象如圖 23，所以無法提供穩定的摩擦力，導致竹蜻蜓每次發射的時候轉速都不穩定。

圖 26 中觀察到在相同纏繞圈數下，竹蜻蜓的葉片數越多時，其對應轉速就越低。推估因為漁網線纏繞在尾桿圈數相同時，代表給予的能量皆相同，當竹蜻蜓葉片越多，代表它就越重（轉動慣量較大），它就越不容易被轉動，所以在相同纏繞圈數下葉片數增加，其對應起飛的轉速就越低；而在 I 部分時，可以觀察到不同對葉片竹蜻蜓纏繞在尾桿圈數上升時，其對應起飛轉速也隨之上升，推測當纏繞圈數增加代表竹蜻蜓受到手電鑽加速帶來的能量就越大，所以竹蜻蜓脫離桌面的起飛轉速就越快；在圖 26 中第 II 部分不同對葉片竹蜻蜓在尾桿纏繞線圈數增加時，其對應起飛轉速變化趨向平緩，推估因為手電鑽的轉速所提供的能量到達上限緣故，因為本實驗中所使用手電鑽的產品說明書，如圖 30 上表明在無負重狀態下轉速為 0~2500 rev/min。

Milwaukee #MILWAUKEETOOL
milwaukeetool.eu

M12 BID-202C | M12™ sub compact 1/4" Hex impact driver



- High performance sub compact impact driver measures 165 mm in length making it ideal for working within confined spaces
- REDLINK™ overload protection electronics in tool and battery pack deliver best in class system durability
- Heavy duty full metal gearbox and gears for superior durability and maximum torque
- 1/4" Hex chuck for quick and easy bit change
- Optimised handle for better control and improved grip
- Individual battery cell monitoring optimises tool run time and ensures long term pack durability
- On board fuel gauge and LED light - added user convenience and illumination in low lit working conditions

No load speed (rpm)	0 - 2500
Impact rate (ipm)	0 - 3300

▲圖 31 手電鑽闡明說明書

實測手電鑽加上捲線筒如圖 16 最高轉速 $v_1 = 2250 \text{ rev/min}$ ，並結合已知的參數（捲線桶直徑 $D_1 = 20 \text{ mm}$ 、蜻蜓尾桿寬 $D_2 = 5 \text{ mm}$ 、漁網線粗 $t = 1 \text{ mm}$ ），運用帶輪之傳動速比的方程式 2

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{D_2+t}{D_1+t} \quad \text{方程式 2}$$

求出理想狀態下竹蜻蜓最高轉速（ v_2 ）約在 7875 rev/min ，但在真實狀態下一定會比 7875 rev/min 低，因為能量不會完全轉換，所以在纏繞圈數在 12~20 圈時，觀察到轉速的變化趨緩是受到轉速能量轉換上限的緣故；而同時比較圖 25、26，可以得知漁網線比棉線更能提供穩定摩擦力，使得竹蜻蜓起飛時的轉速也穩定。故本實驗最後所有跟竹蜻蜓停留時間有關的實驗皆選用漁網線當做帶動線材。

（三）不同對葉片竹蜻蜓討論

因為溫度、濕度等皆會影響空氣中的參數，進而影響竹蜻蜓停留在空中的時間。在圖 32 中竹蜻蜓在尾桿纏繞 12 圈數時，該數據點具有變化進入穩定的特性，所以定此點數據當作每次實驗前的校正原點，且在一~三對葉片

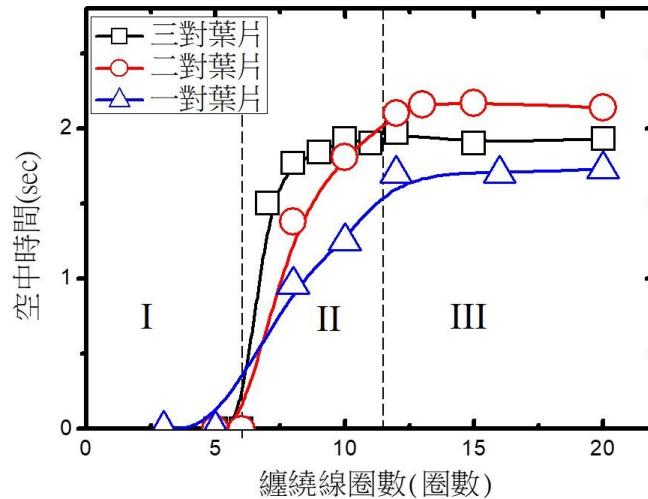
的竹蜻蜓在尾桿纏繞 12 圈的誤差實驗中，一對葉片的誤差值最大，所以將其當作本實驗中的最大實驗誤差值。在圖 27~29 與圖 32 中，其中每一個數據點的縱向高度本身就包含有 1.73% 的誤差值在內。

圖 32 是將圖 27~29 中所有數據放在同一座標軸上，圖 32 橫軸為纏繞在發射竹蜻蜓尾桿上的圈數，縱軸為竹蜻蜓飛行在空中的停留時間。該圖中可以觀察到一、二、三對葉片竹蜻蜓，由纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數對應其停留在空中的時間，該圖中皆可以區分成三段，其中第 I 段在條件為一、二、三對葉片竹蜻蜓，分別纏繞 5、6、6 圈以下，可以觀察到竹蜻蜓在空中的時間皆為零，其中因為纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數太少，讓它旋轉時加速不足，所產生的升力不足以克服重力，所以竹蜻蜓無法起飛。

第 II 段為在一、二、三對葉片，所對應的纏繞圈數分別為 5~12、6~13、6~9 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間增加。因為竹蜻蜓的圈數增加，就能增加竹蜻蜓旋轉時的速度，所以增加圈數會給予竹蜻蜓更大的升力，使其可以停留在空中的時間增加。而在不同對葉片的竹蜻蜓，皆可以在線纏繞尾桿 8 圈時起飛，但從數據中發現一對葉片的竹蜻蜓比二、三對葉片的竹蜻蜓更早掉落到地面，推估可能因為竹蜻蜓的葉片數量增加時，所提供的升力也增加且觀察到它的飛行軌跡更穩定，所以讓整體在飛行時的高度增加，導致它能在空中停留的時間增加。

第 III 段條件為在一、二、三對葉片，所對應的纏繞圈數分別為 12~20、13~15、9~12 圈，可以觀察到隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間變化趨緩。原因可能為手電鑽轉速所提供的能量轉換達到上限，所以在增加圈數時，造成竹蜻蜓停留在空中的時間變化趨緩。最後，在比較竹蜻蜓停留在空中的時間，發現當竹蜻蜓為二對葉片時停留在空中的時間優於一、三對葉片竹蜻蜓，推估為葉片數量增加會讓升力提升且觀察到飛行軌跡更穩定，此時竹蜻蜓的升力影響大於重力，所以二對葉片竹蜻蜓停留在空中的時間優於一對葉片的竹蜻蜓；而當葉片由二對增加到三對時，因為

三對葉片的竹蜻蜓的重量比一對葉片重約1.96倍且又比二對葉片重約1.34倍，此時重力的影響大於升力，所以二對葉片停留在空中的時間優於三對葉片的竹蜻蜓。



▲圖 32 一、二、三對葉片竹蜻蜓在不同纏繞圈數，其空中停留時間圖

三、簡單物理條件下近似

本實驗中竹蜻蜓的飛行軌跡如三維的斜拋運動，簡化成用一個等重量的鋼球做斜拋運動，其中將鋼球當作質點且整個運動過程中只受到保守力作用，嘗試近似鋼球停留在空中的時間，且結合本實驗的物理參數如下圖 33。

斜拋運動可以拆成在 X、Y 軸的等速度運動，與 Z 軸上的等加速度運動，直線的等加速度可以用方程式 3、4、5 描述，其中 V 為末速度， V_0 為初速度， t 為時間， a 為加速度， H 為高度；Z 軸的等加速度運動的後半段可以當成自由落體運動。

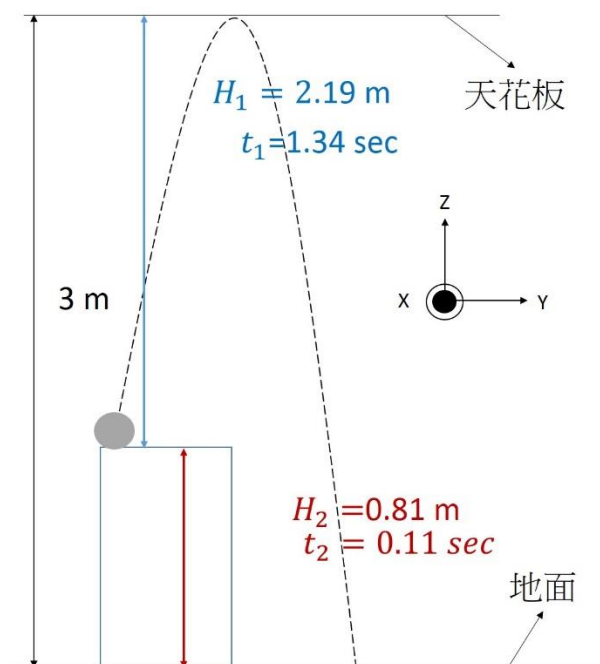
$$V = V_0 + at \quad \text{方程式 3}$$

$$H = V_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad \text{方程式 4}$$

$$V^2 = V_0^2 + 2aH \quad \text{方程式 5}$$

在圖 33 中教室的高度 3 m、發射台的桌面離地面高度為 0.81 m。實驗中觀察竹蜻蜓在第 III 部分飛行高度約接近 2.19 m，運用以上的觀念和條件，我們嘗試

分別找出理想狀態下在 H_1 部分，與其對應竹鋼球在空中的停留時間(t_1)和在 H_2 部分時，鋼球在空中的停留時間(t_2)，最後整體飛行的時間 $T = t_1 + t_2$ 。



▲圖 33 鋼球斜拋運動與實驗環境條件示意圖

求 t_1 ，在 H_1 的由最高點掉落到與桌面由同高處的自由落體運動，推算其運動時間 t ，所以將 $V_0 = 0 \text{ m/s}$ 、 $H_1 = 2.19 \text{ m}$ 、 $a = g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 帶入方程式 4，解出 $t = 0.67 \text{ sec}$ ，且斜拋運動本身在 Z 軸上就具有對稱性，得出 $t_1 = 2t = 1.34 \text{ sec}$ 。

求 t_2 ，用 H_1 的運動後半部分的自由落體運動，先計算出鋼球由最高點掉落到與桌面一樣高時 Z 軸方向上的速度，此速度可以當作在 H_2 的初速(V')，將 $V_0 = 0 \text{ m/s}$ 、 $H = H_1 = 2.19 \text{ m}$ 、 $a = g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 帶入方程式 5，解出 $V' = 6.55 \text{ m/s}$ 。假設整個運動過程，只有在保守力作用下，運用力學能守恆公式 6，其中 M 為質量， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ， h 為初始高度， h' 為末高度；令地表為零位能面，且運動過程中質量皆不變，將 $V_0 = V' = 6.55 \text{ m/s}$ 、 $h = H_2 = 0.81 \text{ m}$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $h' = 0 \text{ m}$ 、 $V = V_2$ 帶入方程式 6，推算出鋼球撞到地面前瞬間的速度 $V_2' = 7.67 \text{ m/s}$ 。

$$\frac{1}{2}MV_0^2 + Mgh = \frac{1}{2}MV^2 + Mgh' \quad \text{方程式 6}$$

爾後用 $V = V_2' = 7.67 \text{ m/s}$ 、 $V_0 = V' = 6.55 \text{ m/s}$ 、 $a = 9.8 \text{ m/s}^2$ 帶入方程式 3，

計算出 $t_2 = 0.11 \text{ sec}$ ，最後可以推算出理想條件下鋼球停留在空中的時間 $T = 1.34 + 0.12 = 1.45 \text{ sec}$ 。而於理想狀態下與竹蜻蜓等重鋼球近似出來的時間與前面第 III 部分由實驗得到竹蜻蜓停留在空中的時間，兩者在相同因次上，在此可以證明我們數據具有一定的可信度。

柒、結論與未來展望

一、系統建置的結論

- (一) 將竹蜻蜓的尾桿從直徑3 mm竹籤換成直徑5 mm免洗筷，可以讓尾桿承受多次的發射，且重心較低，可以克服尾桿於發射後，因為頭重腳輕，造成反轉現象，進而縮短竹蜻蜓在空中停留的時間。
- (二) 在本系統發射系統下，要穩定發射竹蜻蜓時，發射孔的寬度等於尾桿直徑+3.0 mm。
- (三) 將帶動線材由棉線更換成漁網線時，主要因為漁網線外有塑膠層的保護，可以承受多次手電鑽轉動時拉扯，讓竹蜻蜓尾桿和漁網線間有穩定的摩擦力，進而提供穩定的轉速。

二、實驗設計的結論

- (一) 竹蜻蜓纏繞在尾桿圈數，對應於在空中停留時間的狀態主要可以分成三個部分討論，其中 I 部分為竹蜻蜓空中的時間皆為零，因為纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數太少，讓竹蜻蜓轉速不足，所產生的升力不足以克服重力，所以竹蜻蜓無法起飛。
- (二) 竹蜻蜓纏繞在尾桿圈數，對應於在空中停留時間的狀態主要可以分成三個部分討論，其中的 II 部分中隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間增加，因為竹蜻蜓的圈數增加，能增加竹蜻蜓轉速，造成葉片打擊空氣分子產生康達效應的升力更大，使其可以停留在空中的時間增加。
- (三) 竹蜻蜓纏繞在尾桿圈數，對應於在空中停留時間的狀態主要可以分成三

個部分討論，其中的 III 部分中隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應竹蜻蜓在空中的時間變化趨緩，因為本系統是用手電鑽帶動漁網線，讓漁網線帶動竹蜻蜓旋轉，加上手電鑽轉速所提供的能量轉換到達上限的關係，所以在增加線圈數時，竹蜻蜓停留在空中的時間變化趨緩。

(四) 一、二、三對葉片的竹蜻蜓，皆可纏繞在竹蜻蜓尾桿 8 圈時起飛，但從數據中發現具有一對葉片的竹蜻蜓比二、三對葉片的竹蜻蜓更早掉落到地面。可能因為竹蜻蜓的葉片數量增加時，所能提供的升力也增加且讓飛行時更加穩定，所以會讓整體在飛行的高度增加，導致其在空中停留的時間增加。

(五) 在第 III 部分中，同時比較不同對葉片的竹蜻蜓停留在空中的時間發現，其中二對葉片停留在空中的時間優於一、三對葉片竹蜻蜓，因此部分轉速所能提供的能量已達上限，且葉片數量增加會讓升力提升且觀察到飛行軌跡更穩定，此時竹蜻蜓的升力影響大於重力，所以二對葉片竹蜻蜓停留在空中的時間優於一對葉片的竹蜻蜓；而當葉片由二對增加到三對時，因為三對葉片的重量比一對葉片重約 1.96 倍且又比二對葉片重約 1.34 倍，此時重力的影響大於升力，所以二對葉片停留在空中的時間優於三對葉片的竹蜻蜓。

(六) 利用我們的在第 III 部分的實驗條件和在理想狀態下的假設，可以推算鋼球斜拋運動近似停留在空中的時間與實驗上竹蜻蜓所測得的時間，兩者在相同因次上，在此可以證明我們數據具有一定的可信度。

三、未來展望

我們希望下一代的竹蜻蜓是可以將發射系統改為直接在竹蜻蜓尾桿上加速並自動化，使竹蜻蜓不會受到能量轉換的影響。如果可以，希望能在竹蜻蜓上裝上感測器晶片，且透過高速攝影機 (GoPro) 的拍攝，我們或許就可以更完整收集竹蜻蜓的飛行時完整的物理數據與最終的原理建模。

在我們的偏遠原鄉部落中要能讓科學能推行，就必須要把複雜內容變簡單，

簡單的內容變容易，容易的內容變有趣，有趣的內容變好玩。本研究內容雛型竹蜻蜓來自部落中耆老們童年玩具，此題目不僅能讓實作中加入物理基本原理，之後更可探究實務與理論上的差別，且能融入到原住民文化課程中，最後能讓我們能思辨出文化與科學的智慧。

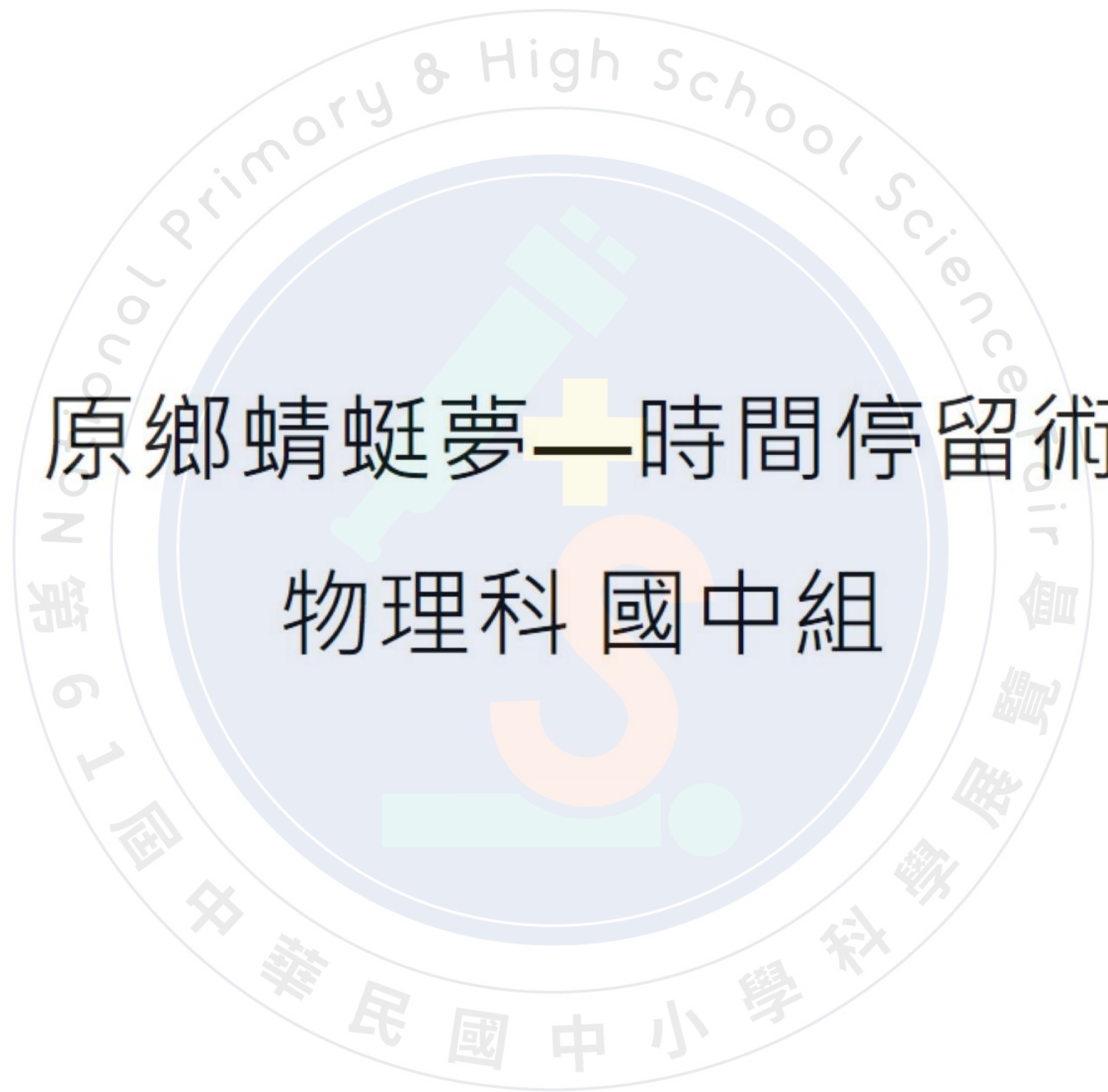
捌、參考文獻資料

- 一、Babinsky, H. (2003). How do wings work? *Physics Education*, 38(6), 497.
- 二、Kamela, M. (2007). Thinking about Bernoulli. *The Physics Teacher*, 45(6), 379-381.
- 三、Eastwell, P. H. (2007). Bernoulli? Perhaps, but what about viscosity. *The Science Education Review*, 6(1), 1-13.
- 四、張慧貞 (2016)。白努力定理的誤解與錯誤應用。 *物理雙月刊*, 37(3).取自 https://pb.ps-taiwan.org/catalog/ins.php?index_m1_id=3&index_id=192
- 五、Halliday, D. (2013). *Fundamentals of Physics (Revised) 10th ed.* John Wiley & Sons Inc.
- 六、盧俊樑、李怡慧、趙一先：竹蜻蜓怎樣做才會飛得高，飛得遠，飛得久。中華民國第 23 屆中小學科學展覽會。
- 七、陳薇旦、李欣耘、鄭偉瑜、于佑民：會來回轉動的竹蜻蜓。中華民國第 48 屆中小學科學展覽會。
- 八、彭勇誠、林昱勳、謝竣宇：平步蜻雲。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會。
- 九、王立旭、王立昇：蜻蜓飛啊飛-自製發射器與竹蜻蜓飛行關係之探討。彰化縣第 58 屆中小學科學展覽會。

【評語】 030102

實驗的設計與觀測相當嚴謹。不過因其未學過轉動慣量相關公式，所以在分析上有所缺憾。但就其所觀察到的現象與分析仍相當有可取之處。

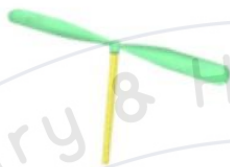
作品簡報



原鄉蜻蜓夢—時間停留術

物理科 國中組

研究動機



圖片來源：
<https://maskingdom.pixnet.net/blog/post/27498780-讓歌聲昂首出列—卑南族>

近年部落文建站開設教部落耆老們製作童年樂趣的課程，其中一項玩具是**竹蜻蜓**，後來在教會、部落裡慢慢看到有小孩子在玩竹蜻蜓，有的飛不起來或在拉動太大力下直接爆裂。

原鄉部落的藝術和科學往往都是兩條平行線，期待藉由科學教育的落實，找到交叉點。所以我們夢想讓更多竹蜻蜓飛在太麻里蔚藍的天空。



研究目的與方法

一、運用科學方法讓竹蜻蜓能在空中停留時間最長

- (一) 建立竹蜻蜓的製作方式與材料的選配。
- (二) 發射系統條件的建置。
- (三) 不同對葉片的竹蜻蜓，改變發射時纏繞在尾桿上線圈數，對其停留在空中時間的影響。

系統整體建置

實驗設計

竹蜻蜓在空中停留最久

竹蜻蜓製作

製作方法確立

材料選定
(底部竹籤-->免洗筷)

竹蜻蜓重心實驗

發射條件建置

發射台的設計
(發射孔 8 mm)

發射動力傳導
(棉線-->漁網線)

起飛轉速實驗

一、二、三對葉片竹蜻蜓在不同纏繞尾桿圈數時，其對應在空中停留時間影響

研究結果：系統整體建置



◆竹蜻蜓製作



圖1 葉片實物圖



圖2 葉片組裝圖



圖3 分度規確認葉片45度夾角圖

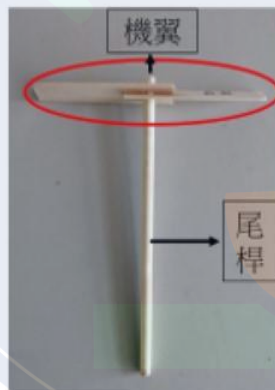


圖4 一對葉片竹蜻蜓



圖5 二對葉片竹蜻蜓

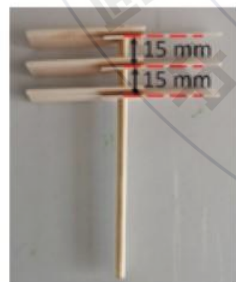


圖6 三對葉片竹蜻蜓

◆發射系統設立



圖7 發射台上方面圖



圖8 發射台側方面圖



圖9 完整的發射器和竹蜻蜓發射台

研究結果：系統建置演進



尾桿：竹籤 → 免洗筷



圖10 竹籤當尾桿
竹蜻蜓斷裂圖



圖11 竹蜻蜓反轉圖

竹蜻蜓重心實驗

L型懸臂

木塊支點

釣魚線

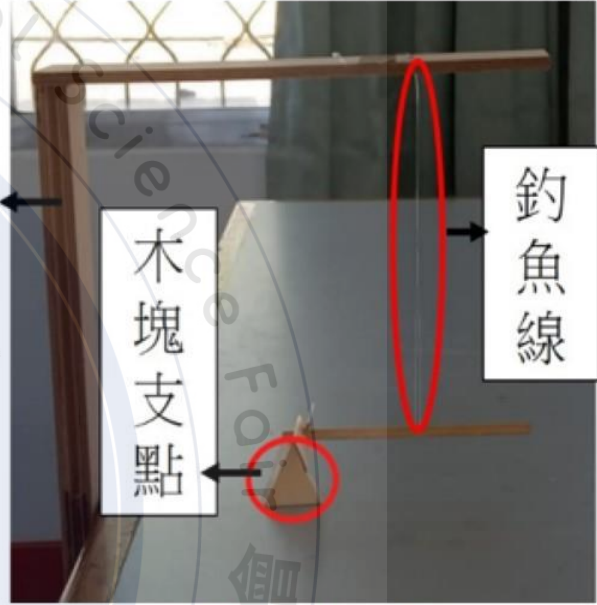


圖13 重心系統設置圖

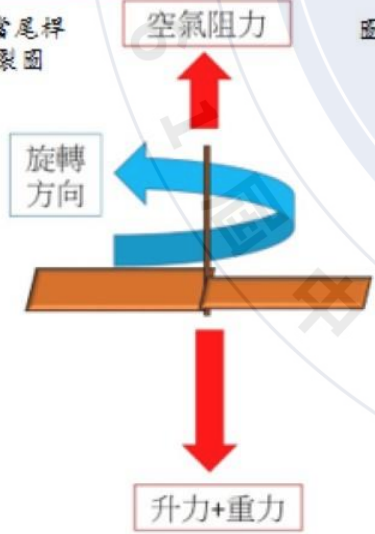
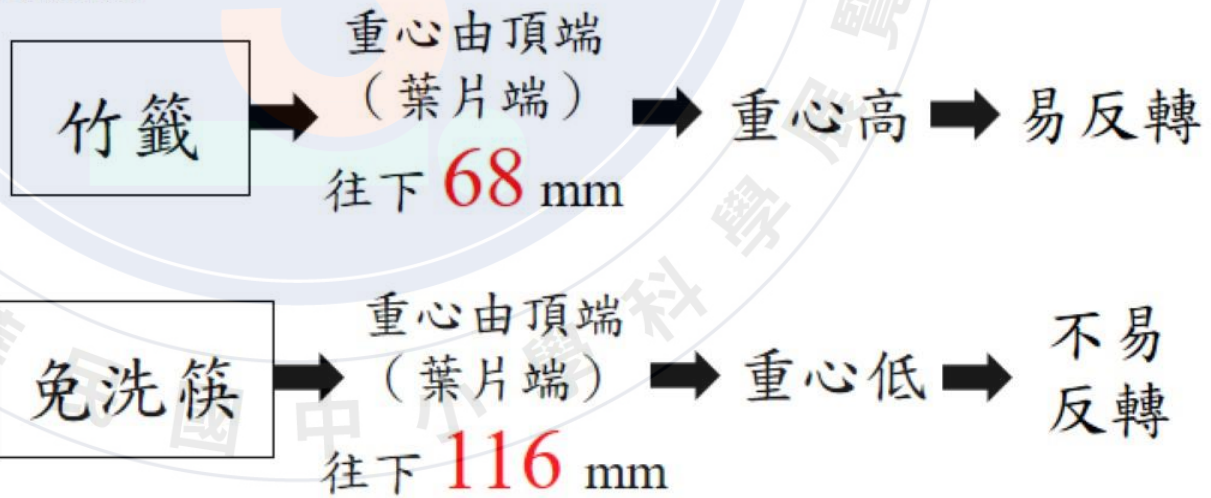


圖12 竹蜻蜓反轉示意圖



研究結果：系統建置演進



帶動線材：棉線 → 漁網線

起飛轉速實驗



圖14 棉線分岔圖

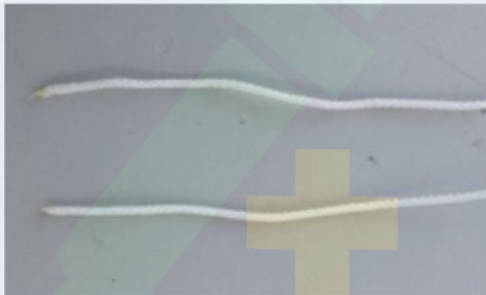


圖15 漁網線切面火燒後壓實圖

圈數相同=>能量相同=>葉片越多就越重=>越不易轉動=>轉速低

一定範圍內震盪=>線分叉=>摩擦力不穩定=>轉速不穩定

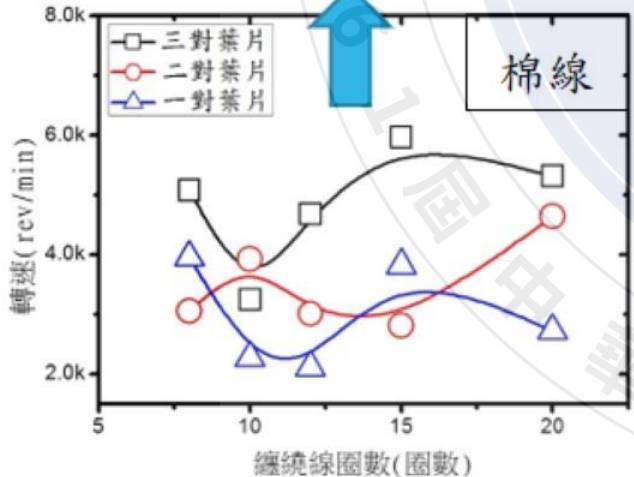


圖16 一~三對葉片竹蜻蜓用棉線纏繞不同圈數下起飛轉速圖

I：圈數增加=>能量越大=>轉速就越快

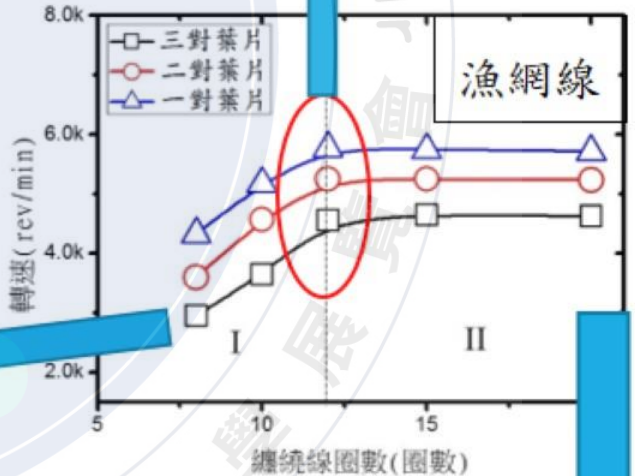


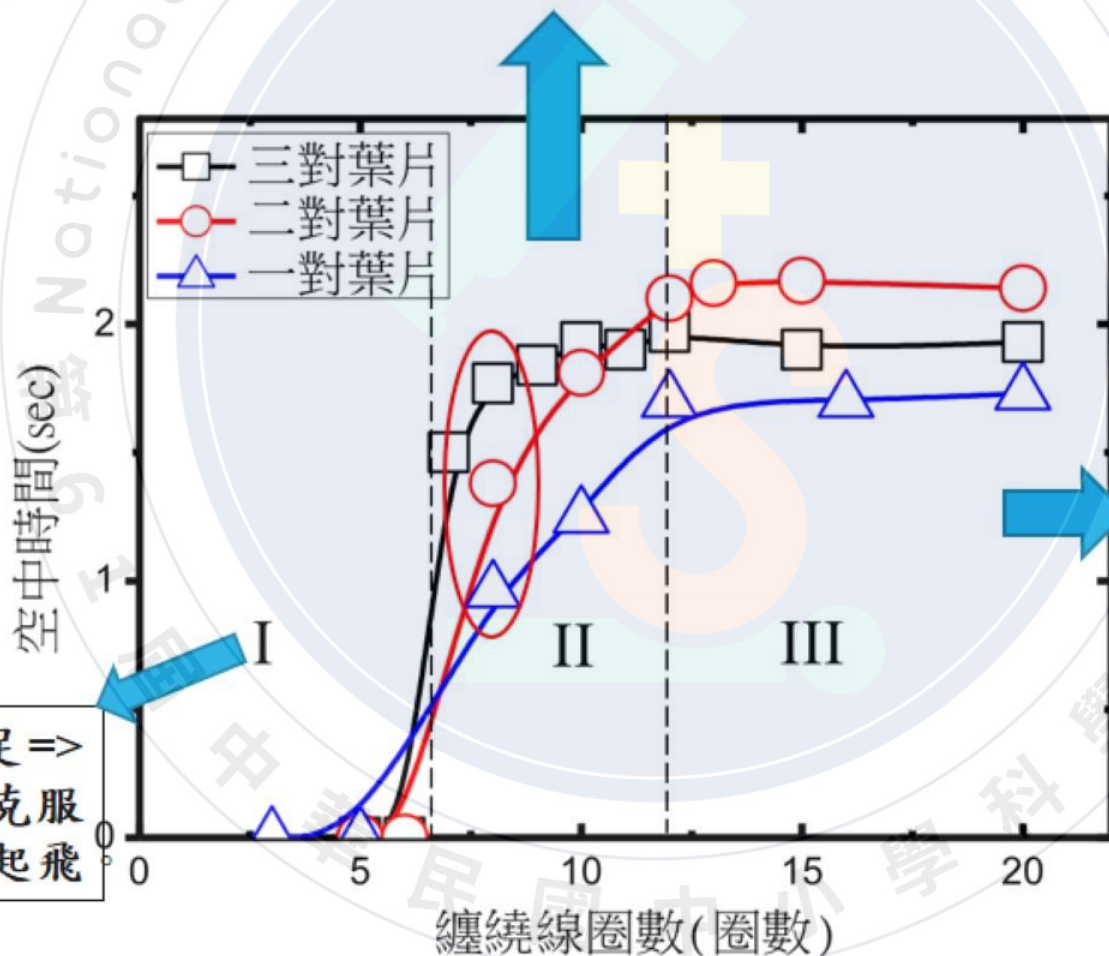
圖17 一~三對葉片竹蜻蜓用漁網線纏繞不同圈數下的起飛轉速圖

II：手電鑽轉速提供能量到達上限

研究結果與討論



II：圈數增加=>升力增加=>停留時間增加
II：8圈時=>葉片數增加=>升力增加=>停留時間增加



III：手電鑽能量間的轉換有上限=>停留在空中的時間變化趨緩。

III：二對>一對停留在空中的時間=>葉片數量增加=>升力影響大於重力。
二對>三對停留在空中的時間=>重力的影響大於升力。

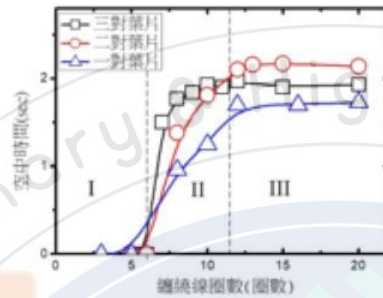
I：轉速不足=>升力不足以克服重力=>無法起飛

圖18 一~三對葉片竹蜻艇在不同纏繞圈數，其空中停留時間圖

研究結論



系統建置的結論



簡單物理條件近似

理想條件下近似竹蜻蜓停留在空中的時間與實驗值在相同因次，提升數據可性度。

實驗設計的結論

如何讓竹蜻蜓停留在空中時間最長

竹籤、免洗筷當竹蜻蜓尾桿對其重心改變實驗

將尾桿由竹籤換成免洗筷

避免竹蜻蜓反轉。

尾桿不容易多次發射後斷裂

發射孔直徑剛好等於尾桿直徑，兩者間摩擦力過大竹蜻蜓無法旋轉。

發射孔直徑為尾桿直徑+3 mm

發射孔直徑遠大於尾桿直徑，竹蜻蜓發射自由度過大，飛行軌跡不穩定。

棉線、漁網線的起飛轉速實驗

帶動線材由棉線換成漁網線

漁網線外有塑膠層的保護，可以承受手電鑽多次拉扯，讓竹蜻蜓尾桿和魚網線間有穩定的摩擦力。

I部分為竹蜻蜓在空中的時間皆為零

纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數太少，導致轉速不足，所產生的升力不足以克服重力，所以竹蜻蜓無法起飛。

II部分中隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加其對應在空中的停留時間增加

纏繞線圈數增加，能增加竹蜻蜓轉速，造成葉片打擊空氣分子產生康達效應的升力更大，使其可以停留在空中的時間增加。

II部分中不同對葉片的竹蜻蜓，在尾桿8圈時，發現具有一對葉片的比二、三對葉片更早掉落到地面

葉片數量增加時，所能提供的升力也增加且讓飛行時更加穩定，所以會讓整體在飛行的高度增加導致其在空中停留的時間增加。

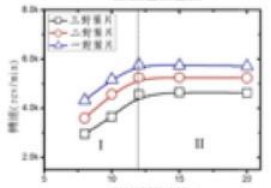
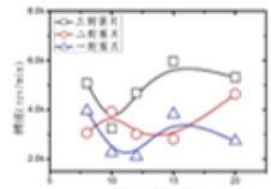
III部分中隨纏繞在竹蜻蜓尾桿圈數增加，其對應在空中的時間變化趨緩

用手電鑽帶動漁網線，之後漁網線帶動竹蜻蜓旋轉，因手電鑽的能量轉換上限的關係，所以在增加圈數時，竹蜻蜓停留在空中的時間變化趨緩。

第III部分中，同時比較不同對葉片的竹蜻蜓停留在空中的時間發現，其中二對葉片停留在空中的時間優於一、三對葉片。

葉片數量增加會讓升力提升，此時竹蜻蜓的升力影響大於重力，所以二對葉片竹蜻蜓停留在空中的時間優於一對葉片的竹蜻蜓。

葉片由二對增加到三對時，此時重力的影響大於升力，所以二對葉片停留在空中的時間優於三對葉片的竹蜻蜓。



參考文獻資料

- 一、Babinsky, H. (2003). How do wings work? *Physics Education*, 38(6), 497
- 二、Kamela, M. (2007). Thinking about Bernoulli. *The Physics Teacher*, 45(6), 379-381.
- 三、Eastwell, P. H. (2007). Bernoulli? Perhaps, but what about viscosity. *The Science Education Review*, 6(1), 1-13.
- 四、張慧貞 (2016)。白努力定理的誤解與錯誤應用。物理雙月刊, 37(3).
取自 https://pb.ps-taiwan.org/catalog/ins.php?index_m1_id=3&index_id=192
- 五、Halliday, D. (2013). *Fundamentals of Physics (Revised) 10th ed.* John Wiley & Sons Inc.

Thank you for your attention