

專業風車系列教具

周鑑恆

萬能科技大學 航空暨工程學院航空光機電系

壹、前言

現代專業風車的造型大都很相似，因為利用升力轉動的現代風車，在設計上已有定論。現代專業風車運轉的原理，類似帆船行駛的原理，並且涉及剛體轉動、相對速度、升力、攻角、做功等重要物理原理。

風力發電可以說是近年來最為成熟、發展最快的綠色能源科技。在不久的未來，台灣將建設大規模的離岸風力發電廠，成敗之間影響深遠。發展本土的風力發電技術，也成為當務之急，益發突顯風力發電科學教育之重要性。

世界各地的風力發電科教活動中，多製作簡易粗糙的風車，遺漏掉有關風車的許多重要原理，也使得參與者學不到現代專業風車的原理。筆者在台灣首倡現代風車的科教活動。在活動中循序漸進地探索現代風車的原理。

首先，1. 要瞭解升力的特徵和其限制、升力與攻角的關係、以及失速(stall)現象。其次，2. 強調升力決定於風相對於風車葉片或機翼的速度。3. 因為風對葉片或機翼的相對速度，決定於風速，也決定於葉片及機翼本身的速度。風車葉片旋轉時，近轂部區段的速度一定比近尖端區段的速度

慢，所以相同的風速時，風相對於近轂部區段的速度，不同於風相對於近尖端區段的速度。4. 葉片和風帆利用升力的方式非常類似，因此兩者所受到的升力，有很大的分量向著垂直葉片或船的行駛方向，只有小部分之分量平行行駛方向。這是葉片和帆利用升力時的特徵。這也正是船以高速行駛時(此時風從側面吹來)，帆船受到很大向側面的力之原因。作者特別設計一項教具，演示出高速轉動的風車也同樣受到這樣向著側面的力。5. 設計風車的步驟：

- [1] 先決定葉片的數目和最佳的周速比(葉尖轉速)。
- [2] 於是就決定了風車各區段速度與風速的比值，也就決定了各區段相對風速的方向，為了正常使用升力，因此就決定了各區段的傾斜角。
- [3] 最後最佳化葉片的形狀。逐漸揭露現代風的工作原理。

專業風車系列教具的功能，在於逐步闡釋或演示有關現代風車的原理，大概包括：① 升力演示儀(筆者曾自製，國外也有類似的作品)；② 作用在物體上的施力，只要有向前進方向的分量，即可驅動物體前進。此演示儀很容易製作，在此即不贅

述；③ 演示帆船原理的軌道風帆車；④ 周速比與傾斜角的關係演示儀（可變螺距風車）；⑤ 專業風車製作。

本文主要介紹：① 演示帆船原理的軌道風帆車教具，因在水中演示帆船的原理十分不容易，因此改以軌道車代替船身和船下的中央板，風帆安裝在軌道車上，並且可以調整角度，可以演示風從軌道（即行進方向）之側面吹來時，帆船如何可以從靜止起動，如何可以持續運動。② 葉片受到升力的演示儀，因為風車葉片利用升力的方法與風帆一樣，所以葉片正常旋轉時會受到向著下風方向很大的升力分量，這項儀器可以演示出葉片受到這樣的升力。③ 可變傾斜角風車，可以演示傾斜角和葉片轉速的關係。

貳、風車的設計與原理

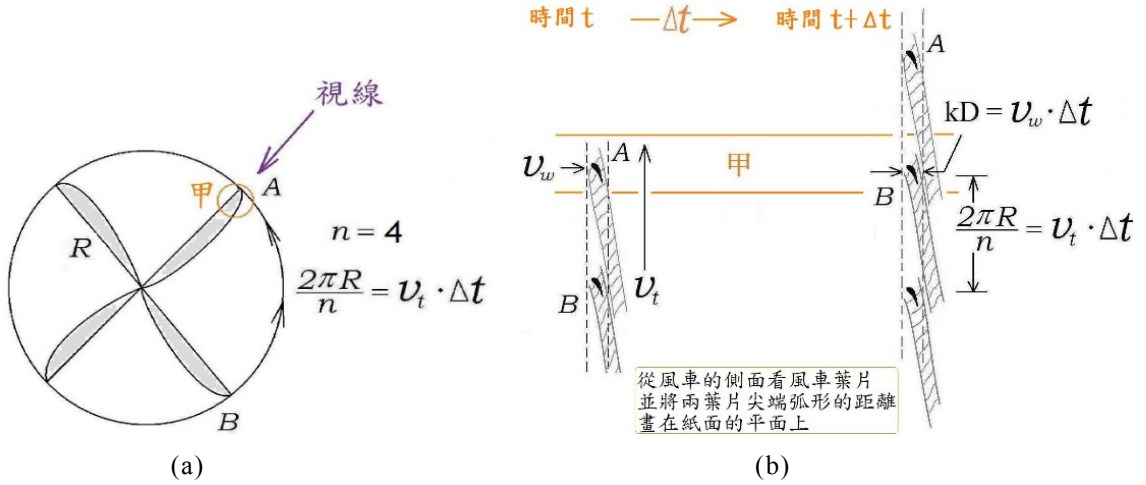
風車運轉的原理和帆船行駛的原理非常類似，兩者都是利用所受的升力（lift）來進行工作，而兩者受到的升力都不平行運動的方向。行駛帆船時面臨許多種狀況，例如：風吹來的方向未必平行帆船將往的方向，在此狀況下，當如何駕駛帆船？又例如：帆受到來自與航向垂直的風，當帆船靜止啟航與高速航行時，船帆當如何調整角度，使帆船受到升力驅動而航行。這些問題都十分有趣；駕駛帆船又饒具娛樂、運動的價值，所以很受大眾喜愛，而駕駛帆船面臨的各種狀況，又恰巧可以用來解釋風車運轉原理的許多細節。

風車和帆船不同之處在於，風車要盡可能取出風車葉片掃到範圍之內的風能（動能）。所以，風車轉動的情形，要配合風車葉片的數目。具有某數目葉片（長條形的葉片）的風車，必須以特定不太快也不太慢的轉速轉動，才能取出最大比例的風能。因為，風車轉得太快，葉片會受到前方葉片造成慢速風的不良影響，風車轉太慢，又會漏掉風能。

這個問題就是：風車葉片的密實度，如何決定風車的最佳周速比呢？所謂密實度是指，葉片總面積與風車掃過面積之比值，所以密實度正比於風車葉片的數目；所謂最佳周速比是指，風車葉片尖端速度與風速的最佳比值，最佳周速比正比於風車最佳轉速。

在此做一簡單計算，概估一下密實度和最佳周速比的關係。先假設：「風車葉片是長條狀的，而且葉片各部分（區段）的傾斜角、翼形（airfoil）等都在最佳狀態」，純粹就風能取得的情形來考慮。為了研究風車葉片如何轉動才能獲得最大比例的風能，先仔細看一下風車葉片如何取得風能和如何轉動，見圖一(a)風車葉片受到風力而轉動，取得風的能量，風的能量因而損失了，所以會產生一縷能量較小的氣流，如圖一(b)灰色斜線部分所示。

假設此受 A 葉片影響而能量變小的氣流厚度 kD ，正比於葉片寬度 D 。則風速 v_ω ，經某段時間 Δt 之後，才會騰空出 $v_\omega \Delta t$ 厚度、尚未被取走能量的風（見圖一(a)(b)中甲的位置），即 $v_\omega \Delta t = kD$ 。“最



圖一、(a) 從風車側面觀察風車葉片轉動的情形，箭頭代表觀察的方向。所看到風車運轉之情形如 (b) 所示。

(b) 所示為， t 時的葉片位置。 A 葉片大概在甲的位置， A 葉片、 B 葉片尖端均以 v_t 的速度運動。右側圖所示為：經過 Δt 的時間間隔之後， $t + \Delta t$ 時， A 葉片、 B 葉片的位置。

理想”的情形是，此時後方的葉片（ B 葉片）要剛好來到此位置（圖一(b)中標示為甲），來取出 $v_w \Delta t = kD$ 厚度風的部分能量。因為風的吹動，剛好有 $v_w \Delta t = kD$ 厚度、未受 A 葉片影響的風，而 B 葉片也正好需要這樣厚度、具原始能量的風來驅動，進而獲得這 kD 厚度風的部分能量。

但 B 葉片必須及時到甲的位置，所以葉片的「最佳速度」，是要能夠在 Δt 時間內使 B 葉片到達甲位置。如果風車葉片尖端的速度為 v_t ，則

$$v_t \Delta t = \frac{2\pi R}{n} \dots\dots\dots(1)$$

其中： R 為風車半徑， n 為葉片數目。考慮 $v_w \Delta t = kD$ ，則可得：

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{v_t n} = \frac{kD}{v_w} \dots\dots\dots(2)$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi R^2}{v_t n} = \frac{kDR}{v_w} \dots\dots\dots(3)$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi R^2}{knRD} = \frac{v_t}{v_w} = \text{最佳周速比} \dots\dots(4)$$

其中： nRD 為葉片總面積， RD 為某一葉片的面積， k 為猜想的某一比例（葉片影響的空氣厚度正比於葉片寬度，是頗為合理的假設）， $nRD / \pi R^2$ 即為葉片總面積和掃過面積的比值，即為密實度（Solidity），於是可得：

$$\frac{2/k}{(nRD/\pi R^2)} = \frac{v_t}{v_w} \dots\dots\dots(5)$$

即 $\frac{\text{常數}}{\text{密實度}} = \text{最佳周速比}$

葉片其他區段的情形也是如此：騰空出 $v_w \Delta t$ 厚度、尚未被取走能量的風時，葉

片其他區段要剛好來到此位置。葉片其他區段的速度 v_i ，小於葉片尖端的速度 v_t ，但葉片其他區段必須運動的距離，也等比例地小於葉片尖端運動的距離（比例係數為 $\lambda < 1$ ），可寫成

$$v_i = \lambda v_t ; \lambda < 1$$

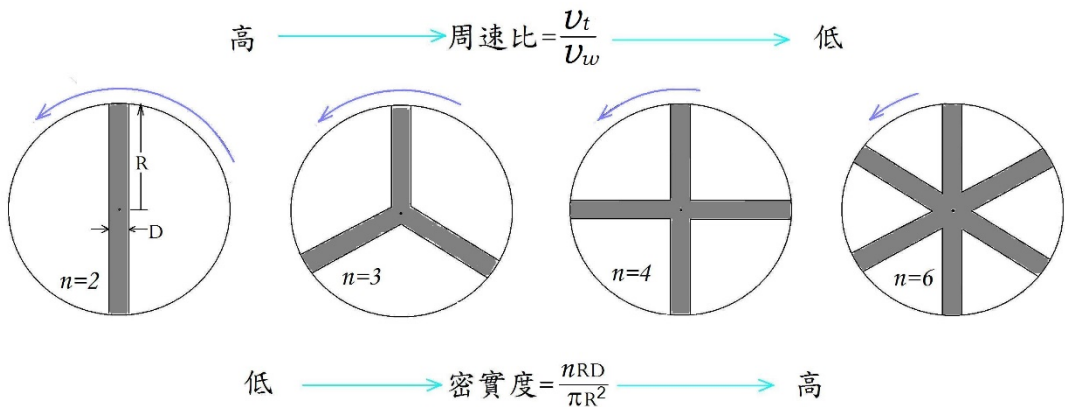
$$v_{\omega} \Delta t = kD$$

$$\lambda v_i \Delta t = v_t \Delta t = \frac{2\pi\lambda R}{n} \dots\dots\dots(6)$$

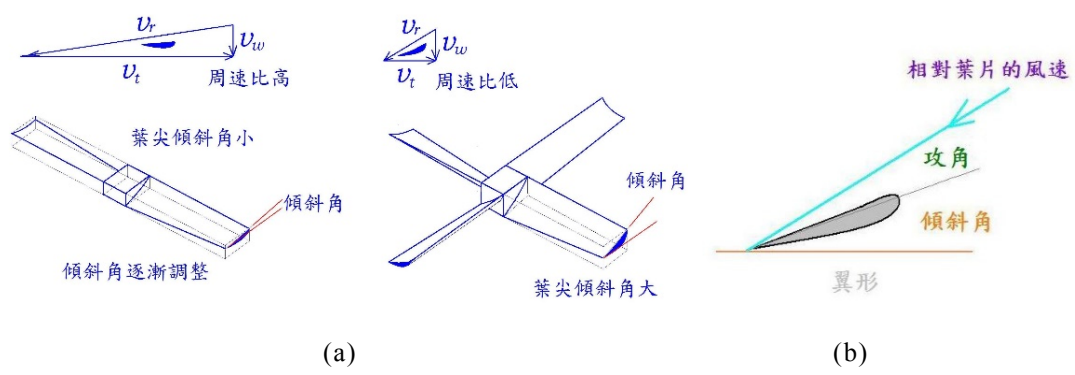
$\frac{2\pi\lambda R}{n}$ 為葉片該區段移動的距離，可以得到相同的結果((5)式)：即密實度與最佳周速比成反比（見圖二）。

也就是說，風車取得最大比例風能時，風車葉片之最佳周速比（葉片尖端速度和風速的最佳比值）和風車葉片總面積的密實度（即風車葉片總面積與掃過面積的比值）要搭配得當。【見參考文獻 1】

決定最佳周速比之後，就決定了風相對葉片尖端的相對速度 v_r ，也就決定了風相對葉片尖端的速度「方向」。見圖三(a)左上兩圖，風的相對速度 v_r 方向決定了之後，就必須要決定風車葉片尖端的傾斜角，以便使得尖端的攻角在適當的範圍之內（大約是升阻比最大值的攻角），見圖三(b)。



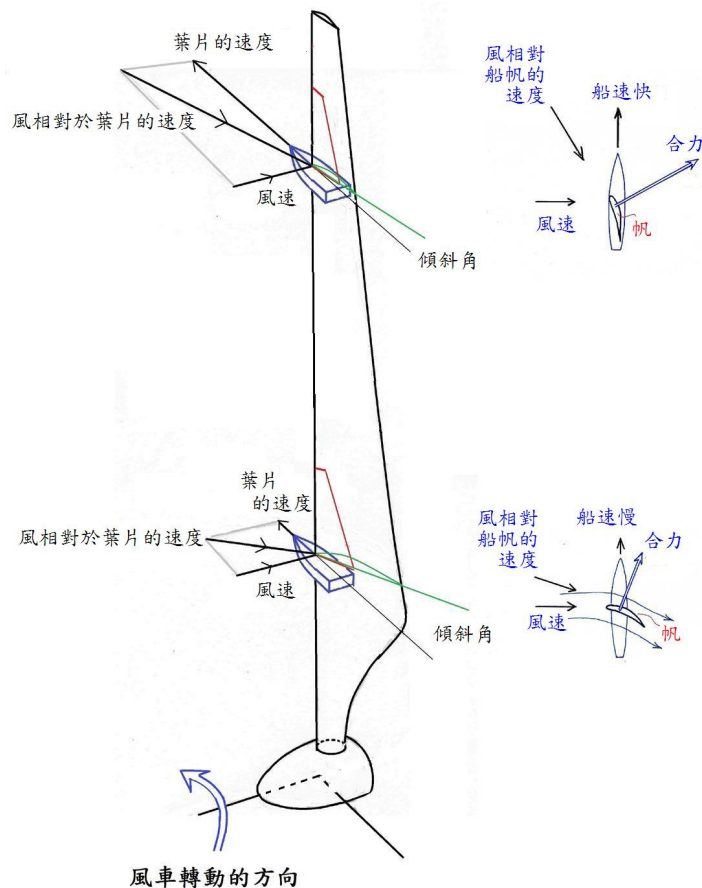
圖二、最佳周速比和葉片密實度成反比。



圖三、(a) 最佳周速比為風車葉片尖端速度與風速之最佳比值，左上方兩圖可見：最佳周速比時相對風速的方向，於是就要根據此方向（周速比決定）設計葉尖的傾斜角。葉片其他區段依此類推，於是其他區段傾斜角也要調整（見(a)左下兩圖），使攻角（見(b)圖）在最適當的範圍。

總而言之，最佳周速比與密實度依設計需求確認之後，就決定葉片尖端的傾斜角。此外，速度不同的葉片各區段，也要根據不同相對速度的方向，逐漸調整各區段的傾斜角（見圖三(a)）【見參考文獻 2，3，4】，所以葉片各區段在運轉時，攻角也合理。

密實度小（葉片少）的風車，周速比大，葉片各區段的傾斜角都相對較小，也比較不容易由靜止啟動。密實度大（葉片數目較多）的風車周速比小，葉片各區段的傾斜角都相對較大，較容易由靜止啟動。



圖四、帆船和風車利用升力的方式相似。

參、三項創新教具

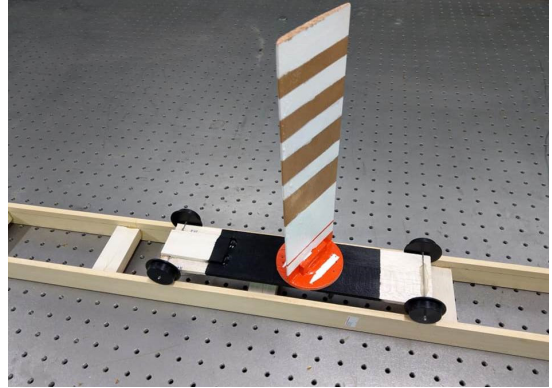
風車和帆船都是利用升力來運作，但這兩者利用升力的方式不同於飛機機翼。機翼所受的升力垂直機翼飛行的方向，只能讓飛機騰空。但帆船和風車葉片所受的升力與帆船和葉片運動方向的夾角小於 90° ，於是升力（或者嚴格地說是合力，因阻力相對很小，所以升力與合力相差無幾）有向著運動方向的分量，於是就可以利用升力來驅動帆船和風車（見圖四）。

圖四【見參考文獻 2, 3】右側圖為俯視的帆船。風從左側吹來，船向前方行駛（頁面上方）。船速不快時（或靜止時），風相對於帆是從左側吹來，為了利用升力，所以船帆的角度幾乎垂直運動方向（傾斜角較大）；當船速較快時，相對於帆，風就從左前方吹來，也為了利用升力，船帆就要調整角度（帆與行進方向的夾角），使帆的傾斜角較小（右側上方之圖）。

圖四左側為風車葉片，風從左側吹來，葉片利用升力的方式與帆船相同。圖四左側將帆船與葉片畫在一起，以強調兩者利用升力的方式相同。葉片轉動時，根部附近區段速度較慢，有如慢速帆船；近葉尖區段速度較大，有如快速帆船，依此類推，所以葉片各區段的傾斜角也要逐漸調整。

值得注意的是：因為帆和葉片巧妙利用升力的方式相同，所受的升力有一小部分向著行進方向（因帆和葉片正在運動，所以功率其實不小），卻有大部分分量垂直行進方向（亦即向著地面座標中原始風的下風方向）【見參考文獻 5, 6】。

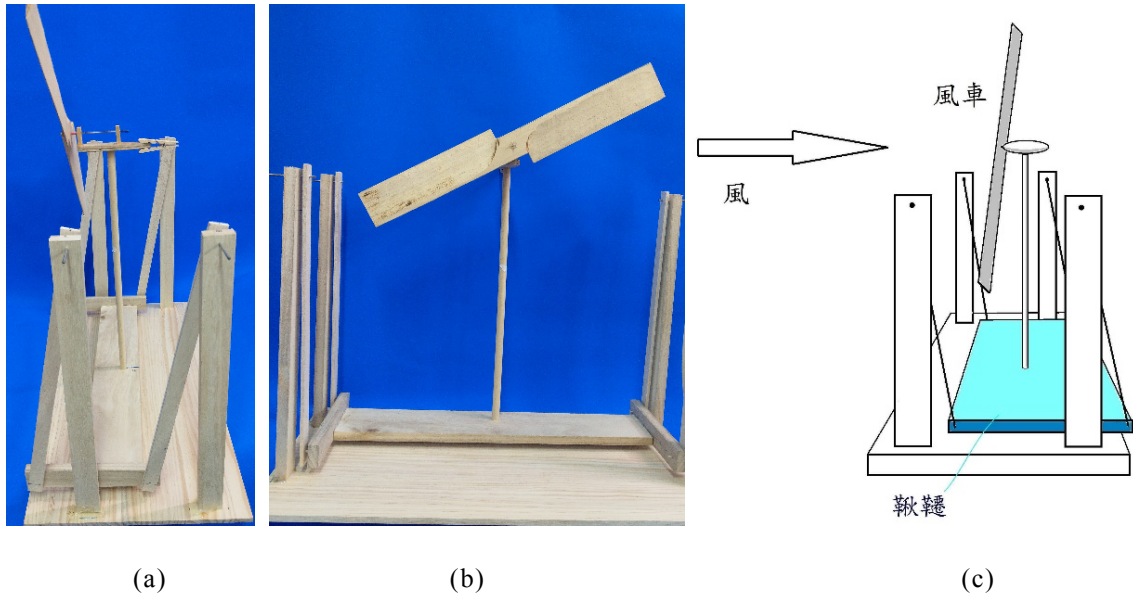
所謂風車原理系列教具就是逐步清楚說明風車原理的幾項教具。本文介紹的第一項教具軌道風帆車（見圖五），用來說明帆船行駛的原理。軌道風帆車教具利用四輪（圖五黑色四輪）在木軌上行駛，而且車體上的帆可以改變方向。



圖五、陸上風帆船教具。

但是風車和帆所受的風，是指相對葉片和帆運動的風。在帆和風車運動時很不容易測量或顯示出相對風速和升力。帆船受側風而高速行駛時，根據水手調整自身位置，利用自己的體重，平衡升力向著側方的力的操作方式，就可說明帆所受升力的特徵。而風車同樣利用此升力，有些分量驅動風車轉動，另一部分分量使得風車受到向後的力。

第二種教具見圖六，整個風車固定在可以前後擺動的鞦韆上。風車轉動時，因為葉片受到升力的特殊方式，風車會受很大的向後的升力分量，所以鞦韆擺高。用夾子夾住風車，使它不轉，因為升力不存在，向後的力分量就小了。從鞦韆向後的擺幅可以顯示葉片所受的升力（一大部分分量向著下風方向，一小部分分量驅動風車轉動）。



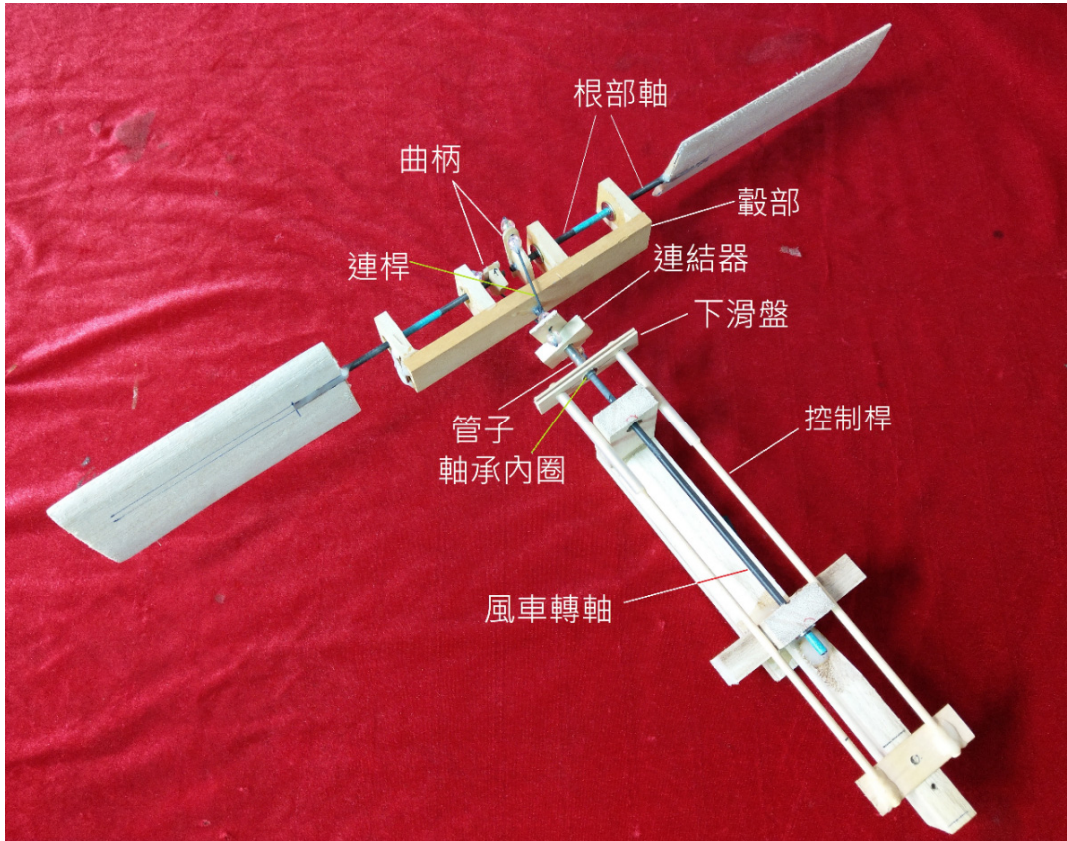
圖六、(a) 在鞞上的風車，鞞受水平方向的力，可以前後擺動（側視）；
 (b) 風車安裝在鞞上（正視）；
 (c) 風車轉動時，葉片受到升力，根據理論會受到向後方之力。

第三種教具比較複雜，製作難度雖不是特別高，但一般人不熟悉它的結構。利用此教具可以演示傾斜角和轉速（正比於周速比）的關係。如果傾斜角小，周速比（轉速）才能夠較大。換言之，周速比大的葉片（最佳周速比由葉片密實度決定），傾斜角就必須小。此教具也可演示：傾斜角小，則葉片不易從靜止起動。如果傾斜角度大，周速比（轉速）就小。換言之，周速比小的葉片，傾斜角就要大。而傾斜角大，則葉片容易從靜止起動。

作者參考直升機的斜盤（Swash plate）構造，並利用小型化帶來可能的簡化之便，

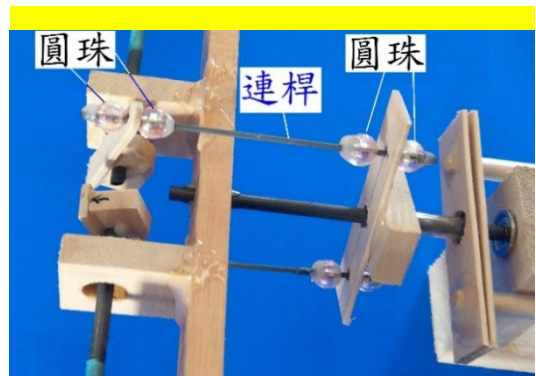
設計、製作這款教具，見圖七。其中類似斜盤的裝置，因為被簡化成不能傾斜，因此在本文中稱之為「滑盤」。滑盤由上滑盤和下滑盤構成，上、下滑盤用一軸承連接，上滑盤與轉軸一起轉動，但可沿軸向滑動。下滑盤不轉動，但受控制桿之力，也可以沿軸向運動。

上下滑盤之間藉軸承連接，軸承外圈固定於下滑盤。上滑盤由：軸承內圈中的管子（管子套住風車轉軸，隨轉軸一起轉動，可在軸向滑動）、固定在管子另一端的連結器、以及軸承內圈，共同構成。

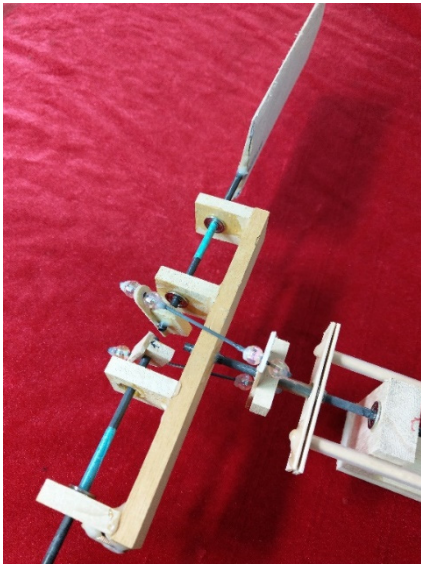


圖七、轉速和葉片傾斜角的關係演示教具。其中連結器、管子和軸承內圈形成上滑盤。上滑盤隨風車轉軸轉動。下滑盤受控制桿控制而沿軸向移動，並連動上滑盤。

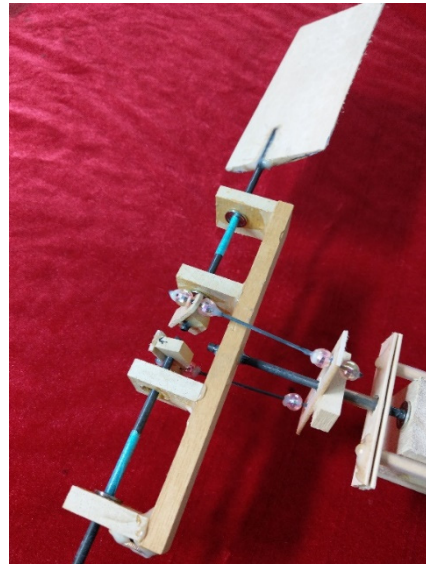
轉軸和轂部固定在一起，轉軸在支架中上的兩軸承中轉動。兩葉片可以改變傾斜角，由葉片本身和根部軸構成。根部軸在轂部兩軸承中，根部軸與一曲柄固定在一起。此曲柄絞接連桿，連桿再絞接上滑盤的連結器上。參見圖八、圖九與圖十，連桿「絞接」曲柄以及連桿「絞接」連結器的方式，都是連桿穿過連結器或曲柄的孔，再用固定在連桿上的兩顆直徑 8mm 的珠子（文具店有售），大致牽連住曲柄或連結器，使絞接能有類似萬向接頭的功能。



圖八、連桿穿過連結器與曲柄的孔，分別用固定在連桿上的兩顆圓珠，大致牽連曲柄與連結器。



圖九、滑盤控制葉片的傾斜角，使之變小。



圖十、滑盤使葉片的傾斜角變大。

因此只要沿軸向改變不轉動的下滑盤位置，就能改變隨轉軸轉動的上滑盤連結方吹向帆，以模擬運動中的風帆車所受到位置，連接器經連桿，即能經曲柄，改變根部軸和葉片的傾斜角。因此無論風車正在轉動或靜止，都可以隨時改變葉片的傾斜角。

風車轉軸和根部軸用直徑 4mm 的碳纖維管製成，連桿為直徑 2mm 的碳纖維桿。葉片用厚 8mm，寬 70mm，長 140mm 的巴沙木製成(Clark Y 翼形)。其餘零件如曲柄、控制桿等均為木製。

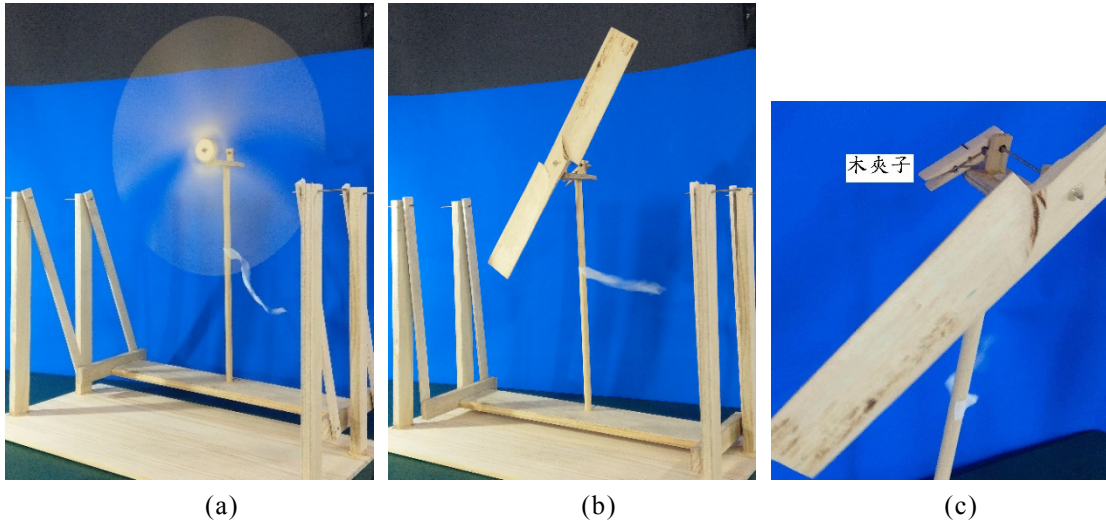
肆、用途

將風帆軌道車，置於軌道上，用電扇吹出垂直軌道（行進方向）的風，依圖四

右下圖調整帆的角度，軌道車即能向前行駛。

也可以讓風從靜止軌道風帆車的左前的相對風速。帆的角度大致如圖四右上圖所示。則靜止軌道車也會運動，表示在此情況下受到的升力也有向著軌道方向的分量，可以驅動風帆車（或帆船）前行。也就是說，運動中的風帆車受到垂直軌道的風時，風相對於帆是從左前方吹來，但帆在此狀況下所受的升力，仍有向著運動方向的升力。

也用風扇造成風，風吹向鞦韆上的風車時，如果用小木夾夾住風車轉軸（見圖十一(c)），使風車不能轉動，則會發現此情形下，風車受到向著下風方向的力其實不大，鞦韆向後的擺幅不大（見圖十一(b)）。



圖十一、風車轉動時，葉片受到升力，依理論會受到向後方之力(a)；
在同樣的風中，用木夾子夾住風車轉軸，使得風車不轉時，葉片不受升力(b)(c)，
所以鞦韆向後的擺幅較小。

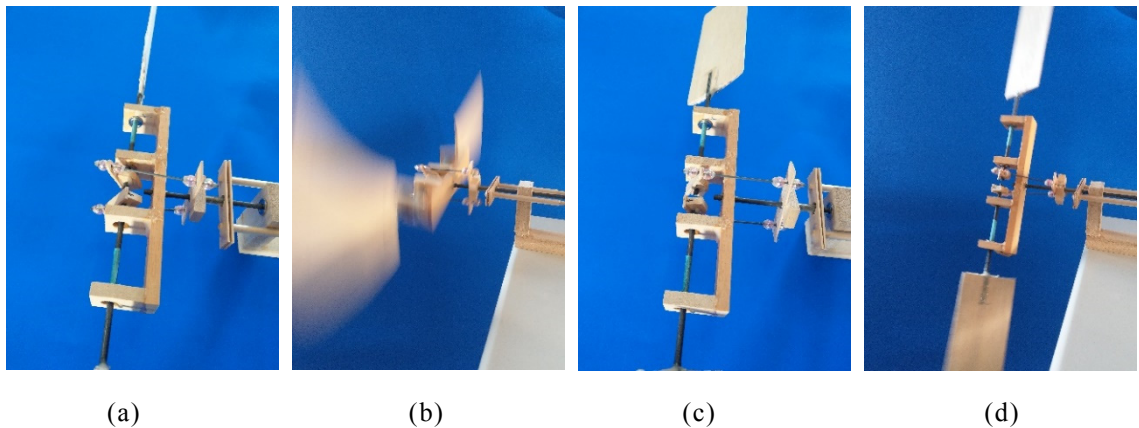
如果讓風車逐漸轉到最快，此時葉片受到升力，但此升力有其特有的性質，向著下風方向有較大的分量，於是鞦韆向後的擺幅明顯較大（見圖十一(a)）。

可變傾斜角風車教具，可以在轉動時調整葉片傾斜角。因此，可以做兩種實驗：

1. 先把葉片調到大傾斜角，由靜止開始，會發現大傾斜角的風車很容易起動。但若將葉片的傾斜角調到最小，受同

樣的風，就比較不容易從靜止起動。

2. 大傾斜角的風車葉片在風中就是轉不快（因為轉快，就會造成負攻角而使升力完全消失的情形），但轉動時若調成小傾斜角，風車就會明顯轉快，反之亦然（見圖十二）。說明由密實度決定了最佳周速比（轉速快慢）之後，就要根據已經決定的最佳周速比，相應地設計風車為各區段的傾斜角。



圖十二、葉片傾斜角小，則轉速快；傾斜角大(見(b)圖)則轉速慢。

伍、結論

所謂系列教具是指幾項教具形成完整的演示或實作教具，針對某項主題，逐步說明細節，而使學習者得以循序漸進地深入風車的原理。

風車的設計，首先要從能量捕獲的角度來決定周速比和密實度，決定周速比之後，可以先決定葉尖傾斜角大小，進而決定整支葉片各區段的傾斜角大小，最後最佳化葉片形狀（展弦比大者，較佳）和翼形剖面。於是風車葉片各區段都會受到升力，而使轉動中的葉片仍然受到平行其運動方向的升力分量，使風對風車做正功，將風能傳遞給風車。

本文所提的第一項教具可以演示帆船行駛的原理，使學習者從了解帆船行駛的原理，進而了解風車轉動的原理。將風車原理和帆船原理相提並論，使得風車的科學教育更為精彩有趣，因為至今帆船仍然被許多人喜愛，新式帆船又饒具創意，帆船運動仍是風靡各國的運動。

第二項教具演示「高速轉動時」風車葉片受到升力，而此升力有很大向著下風處的分量，這點說明風車與帆船運用升力的方式相當類似。

第三項教具演示葉片的傾斜角和轉速的關係，就好似風從側面吹來時，船速和帆的傾斜角之關係。如果要使葉片能在周速比較大的狀況下轉動（即轉速較快），葉片的傾斜角比較小；如果要求葉片在周速比相對較小的狀況下轉動（即轉速較慢），葉片的傾斜角就再根據周速比調得比較

大。

大規模的風力發電在台灣已勢在必行，但至今台灣尚無研製大型風車的廠商，為了厚植我國風力發電的科技實力，能夠讓人們了解專業風車原理的科學教育，也就顯得迫切。本文完整地闡釋設計風車的步驟和其中的原理，同時介紹三種教具，相信有助於國內風車科技教育。

致謝

感謝科技部計畫（編號：MOST-108-2511-H-238-001）經費支持以及專任秘書鈺婷的協助，使得這篇闡述風車設計原理和系列教具的文章能夠完成。

參考文獻

1. 牛山泉(2009)：風車工學入門：從基礎理論到風力發電技術。台灣：澎湖科大。
2. 周鑑恒(2016)：流體力學拾趣：飛機、帆船與風車。台北市：海峽前鋒文化事業有限公司。
3. 周鑑恒(2018)：以 PVC 製作專業風車的實作探究與科普活動。物理教育學刊 19 卷 1 期，43-58。中華民國一〇七年七月。
4. 周鑑恒(2019)：升力的實驗。科學教育月刊 422，40-49。中華民國一〇八年九月。
5. CNET(2012 October 24). Always On - Flying on the world's fastest sailboat. [Video file]. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?v=QP_9rFbvY_Q
6. Paul Larsen(2012 November 22). VESTAS Sailrocket 2. "The magic mile" world record*.... [Video file]. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=sZVIj5TUSKE>

