

# 適於推廣的微型風力發電機實作教具

周鑑恒

萬能科技大學 航空光機電系

本文介紹一種適於推廣的創新風電實作教具。首先略述過去發展的兩組系列教具，這其中一組系列教具用來演示風車葉片受升力而轉動的各项細節、另一組則闡釋設計風車的既定步驟和考慮要點。此外，簡介之前實作微型現代風車各方案的實施經驗。本文主要報導新近研發的微型風力發電機實作教具，並介紹其中的巧思和優點。這項實作教具，可望突破推廣風電科教之瓶頸。

**關鍵字:**風車、風力發電、動手做教具、模具、翼型、升力

## 壹、前言

過去一、兩個世紀以來，過度使用化石能源，造成氣候變遷並衍生態問題。此外，化石能源的蘊藏量有限，過度使用也會使化石能源提早枯竭。所以現在世界各國都積極尋找新的綠色能源，其中風力發電是成長最快的綠色能源，許多國家風力發電的規模越來越大，所占發電的比例也越來越高(見參考文獻 1)。

台灣決心廢止使用核能，但是台灣並沒有天然的傳統能源，所以風力發電成為台灣能源轉型的重要基礎，現在台灣正進行一項規模驚人的風力發電計畫，將在台灣西部海域，建立龐大的風力發電廠，希望在未來提供相當比例的台灣電力。

這項風能計畫，影響深遠，成敗之間，左右台灣的發展。所以政府動員了所有力量，在各方面積極推動這項規模空前的綠色能源計畫。換言之，這項計畫只許成功，所以台灣各界應盡力合作共襄盛舉。

其中科學教育當然是很重要的一環，因為未來本土風電人才的需求、風力發電相關產業本土化、風電技術的移轉，都需要許多本土專家共同參與。其中重要的一環是培養年輕人投入這項產業，所以風力發電的科學教育，在世界各國都如火如荼地進行。當然台灣也不例外，台灣各地的風電科教活動如雨後春筍。

此外，探究實作課程，也要求針對跨領域、接近生活實務的主題，所以許多學校都選擇風力發電作為探究實作課程的主題。但是，因為風力發電涉及的變數很多，如果完全沒有背景知識，試誤(trial and error)的結果往往會被誤導，或者淪為徒勞無功。雖然經驗是無價的，但探究與實作過程中如果有更具體的進步，對學生是一項正面的鼓勵，同

時更彰顯了探究實作課程的精義。

作者多次協助舉辦風力發電競賽、或者擔任風力發電競賽的裁判，從實際經驗可知，如果能夠提供參加學生若干有關風力發電的背景知識，相信整個比賽的內容、探究與實作的過程，學生最終的收穫，都會更為豐盛。然而，在坊間或者是教科書中，對於風力發電的科學知識，卻甚少著墨，或為了銷售量的考慮，常常輕描淡寫比較關鍵但不容易理解的科學內容。

因此，作者嘗試發展一套風電教學資源，讓學習者經過更有趣、更輕鬆的過程，例如：動手做、進行演示實驗、討論、觀察等等，深入淺出地了解風力發電的重要細節以及完整原理。

## 貳、兩組系列演示教具

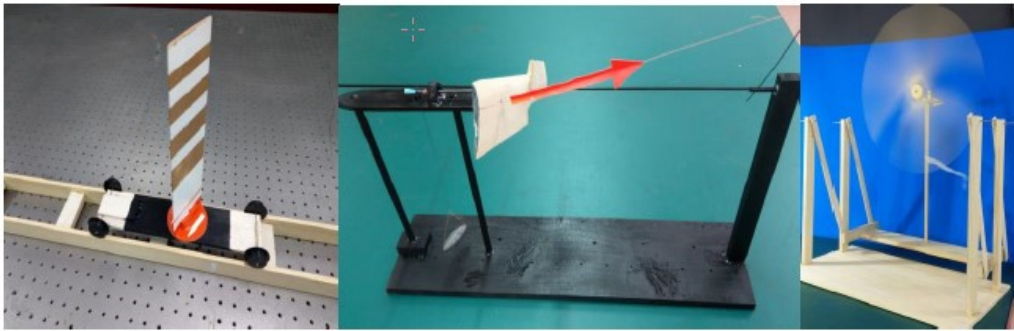
作者將風力發電科學教育的內容大致分為三部分：(1)探討現代風車利用升力而轉動的細節，(2)闡釋設計現代風車的目的為何？設計現代風車的步驟以及考慮要點，(3)動手做教具。

針對這三個面向，作者之科教策略包括：研製完整的系列教具，凸顯教學內容之重點，並力求教學內容之完整性。同時並撰寫配套的文字資料，包括針對不同程度讀者的書籍、文章等，以便形成多元而相輔相成之完整、實用教學資源。

這三方面都具有一定的重要性。首先讓學習者了解：風車葉片利用升力而轉動的方式，非常類似帆船受到側風而向前行駛時利用升力的情形。其次，設計風車的目的並不僅僅是為了讓風車轉動，而是希望藉由風車從風中取得最大比例的風能。為了這個目的，設計風車有一定的步驟以及考慮要點，這部分在風電科普教育相關資料中相當罕見。最後畫龍點睛的是，在風力發電的科普教育中，動手實作的部分不可或缺，因為動手實作的過程，學習者自然會注意到若干有關現代風車以及發電的重點。所以這三部分才能構成比較完整、有趣、而有應用價值的風電科學教育內容。

為了回答現代風車如何受升力而轉動，作者實際發展了第一組系列教具(請見**參考文獻 2,3,4,5**)，以便逐步以演示的方式讓學習者由淺入深了解相關重點。這組系列教具包括：陸上風帆船、風車受升力而轉動演示儀、以及風車所受升力演示儀(見**圖一**依序從左至右)(見**參考文獻 5**)。

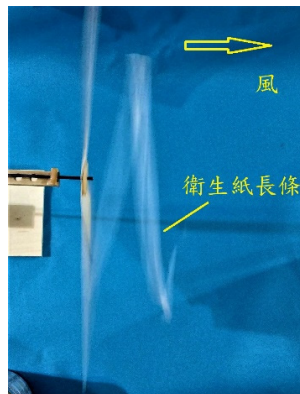
其中陸上風帆船用套在帆上的解說圖，說明風的原始方向，相對風的方向、升力、阻力和合力的方向，以及行駛的方向，凸顯風帆船如何利用帆受到的升力來運動；並真的用橡皮筋提供張力，模擬風帆所受之合力，真的拉動風帆船。風帆船也可用側風吹拂，實際讓它受到風而向前行駛。



圖一：此三項教具已形成完整說明風車如何受升力而轉動的系列教具。由左至右分別是：陸上風帆車、風車受升力而轉動演示儀、風車所受升力演示儀。

風車受升力而轉動演示儀，是一具真的微型風車，當然可以用風直接吹動。之後再同樣將解說圖套在風車葉片上，在解說圖上標示葉片受到的相對風之方向，葉片受到的升力和阻力(升力與阻力形成合力)，以及葉片運動的方向；接著再用橡皮筋模擬合力的方向，真的利用此合力(橡皮筋提供之張力)轉動風車。

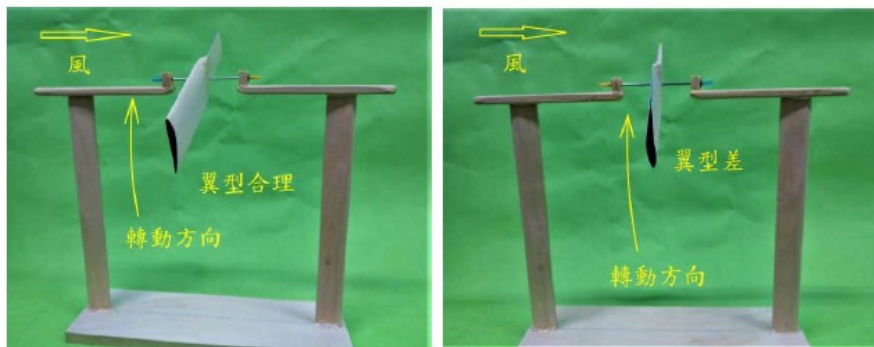
最後一項教具是風車所受升力演示儀，因為風車所受之升力(合力)有很大的分量向著下風方向，但總有一部分分量推動風車葉片轉動，然而在此同時，也有很大部分的分量向著下風方向，這是風車葉片和帆船受升力而運動的特徵。此教具由一安裝在鞦韆平台上的風車構成，可以很明顯看出：風車受升力轉動時葉片所受之升力，確有很大向下風方向的分量，使鞦韆平台向下風方向擺動。



圖二：受擾動氣流演示儀，演示經葉片取出部分動能的風之流動情形。

為了闡釋設計現代風車的具體步驟和考慮要點，作者開發第二組系列教具。其中包括葉片安裝角和周速比關係演示儀(參見參考文獻 6,7)、以及新近開發的「受擾動氣流演示儀」(見圖二)、「翼型重要性演示儀」(見圖三)等等。受擾動氣流演示儀，主要演示被

葉片切過之後的風會如何流動。此教具將單張極輕柔的衛生紙剪成長條，黏在葉片上，隨著葉片在風中轉動，衛生紙長條的形狀有如螺線，顯示被葉片切過後風流動的情形。翼型重要性演示儀其實只是一具可從兩相反方向受風的風車，當風從風車任一側吹來時，葉片各區段安裝角都一樣，轉動的方向甚至都一樣，在此兩種狀況下翼型(airfoil)就不相同。如果翼型合理，風車可以轉得很快，如果翼型不對勁，同一具風車不但轉得慢、扭力又小。這一部分的工作仍有待更完整的組織、表述、在教學現場實際測試、磨合與調整；若干系列教具仍有待補齊，目前正在積極備齊改進中，在此就不再贅述。



圖三：翼型重要性演示儀，翼型會影響升力，是影響風車性能的重要因素。

### 參、動手做實作教具

在風力發電科學教育活動中動手做實作教具至關重要，眾多學習者都對這項活動深感興趣，一方面能提高學習的樂趣，另一方面，動手做本身具有極高的教育價值。從做中學是一種非常有效的教育方式，根據統計，以演講方式所傳達的知識很容易被遺忘，從實際操作中學得的科學知識，往往令人印象深刻，歷久彌新。

動手做教具必須滿足不少條件(國內也有學者作這方面之努力，見**參考文獻 8**)，這項教具才能在科教活動中推廣。例如：準備的過程不能太冗長、經費不能太昂貴、人力消耗不能太大，現場製程不能太複雜、成功率更須盡可能高。

作者針對這些目標，多年以來發展了幾種製作現代風車的方案，包括：木製風車、PVC 製風車、白膠/紙(或巴沙木)製風車(其中白膠也可用 AB 膠取代，也稱膠/碳水化合物纖維製風車)、碳纖維複合材料風車等等。各有優劣之處如**表一**所示，為各方案不同面向的優缺點(見**參考文獻 9,10,11,12**)。

其中：木製風車，在翼型(airfoil)、安裝角等方面都能做到近乎理想的情形，所以在同一風速的情形下，木製風車轉得最快。但是木製風車之準備工作頗麻煩，木材要經過仔細挑選，不能有特別的木紋或蛀蝕的部分，要動用水刀切割、又要使用砂輪機、砂紙等打磨風車葉片的形狀，場地與參與人員都嚴重受到木屑粉塵污染。製作成敗決定於製

作者的工藝能力，所以研製成功率無法達到百分之百。

PVC 板製作專業風車方案，現場幾乎不會留下任何汙染，且組裝完全無需用膠(最多用膠固定螺絲帽，避免鬆脫)。作品也基本符合現代專業風車的特徵，但翼型僅為厚度不變的 PVC 板，類似萊特兄弟飛機初期的翼型，不利於非常高速地轉動，發電的性能差強人意；如果使用自製發電機發電，效果好很多，但耗時巨大，且價格不斐，都不划算，但仍能吸引學習者之興趣。

價格昂貴是用 PVC 板製作專業風車最大的弱點，PVC 板厚度 1~2mm，須用水刀切割，因 1~2mm 的 PVC 板已經稍重，須用螺絲將 PVC 葉片和同樣用 PVC 製成的風車轂部結合在一起。這些都大大增加了成本。因此，推廣 PVC 葉片專業風車自製活動也受到限制。

若是使用模具成形的辦法，兼採複材科技的要領，以很容易用剪刀剪裁的含棉量 100% 的稍厚白紙、或可用小刀切割的巴沙木薄片(厚 1mm)，製成葉片，取代碳纖維布，以白膠或 AB 膠黏合巴沙木或紙葉片，再用夾子把葉片夾在模具中，待膠硬化而定型，仍可形成專業風車的特徵。此方案製成的風車性能也不錯。

雖然紙和巴沙木製成的葉片都會因種種原因而變形或部分受損，但仍然堪用。真正的問題是：等待白膠或複合材料專用的 AB 膠硬化需 24 小時，實在太不方便了。

作者採用複合材料的標準製法製作風車，但過程太麻煩，甚至無法融入一般科教活動中。然而此方案可介紹目前複材製作大型風車的產業科技。

表一：作者之前開發的各項實作方案和其實際運用之得失經驗。

實際運用的情形 作者開發的製作方案	經費	準備	製程	成功率 /教學情形	備註
木製	稍貴	麻煩	麻煩，非經練習，不能完成	大約 70% /能引起好奇與驚奇	操作容易，也容易破壞，轉速很快。
PVC	昂貴	麻煩	簡易	大約 80~100% /能引起探索之動機	高溫環境下會變形(例如：在夏季汽車車廂中)。
白膠/紙(或巴沙木)	便宜	稍簡單	稍麻煩	大約 85~90% /能引起探索之動機	葉片容易損壞。但十分安全。
碳纖	最貴	非常麻煩	非常麻煩	大約 70% /能引起好奇與驚奇	風車高速轉動，具危險性。
最新	便宜	簡單	簡單	大約 75~85% /能引起好奇與驚奇	高溫環境下也同樣會變形。安全。

## 肆、最新設計的 PVC 微型風力發電機

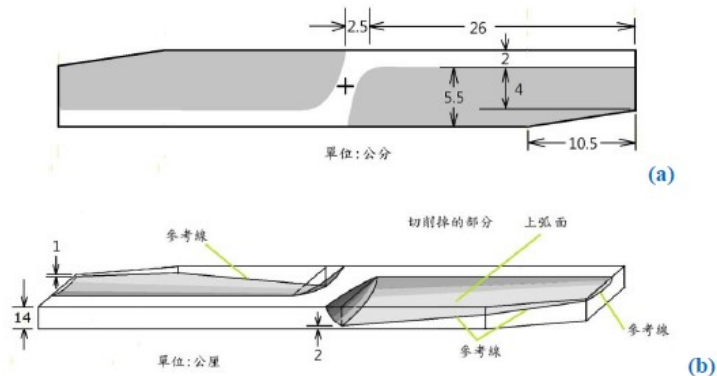
有鑑於上述各項動手做專業風車方案的優缺點在推廣時或多或少造成一定的阻力，作者綜合擷取各方案之優點，開發出這款簡易動手做微型專業風車發電教具。在準備風電科教活動中，此款套件價格低，人力負荷輕；在活動現場，參與人員容易操作，完全沒有汙染、成功率高，是目前大量推廣條件最為成熟的製作方案。

雖然，製作木模仍然是個人工藝能力要求較高的工作，但木模可以重覆使用，而且可以累積，並非耗材，只要約 7~8 具木模即可舉辦 30 人左右的科教活動。總和計算下來，經費和人力成本均不高。又因為只需製作木模中單一的弧面(類似 Clark Y 翼型之上弧面)，雖須手工研製，但對有經驗的人而言並不困難；必要時，還可以請模具加工廠商代為製作，更為方便。

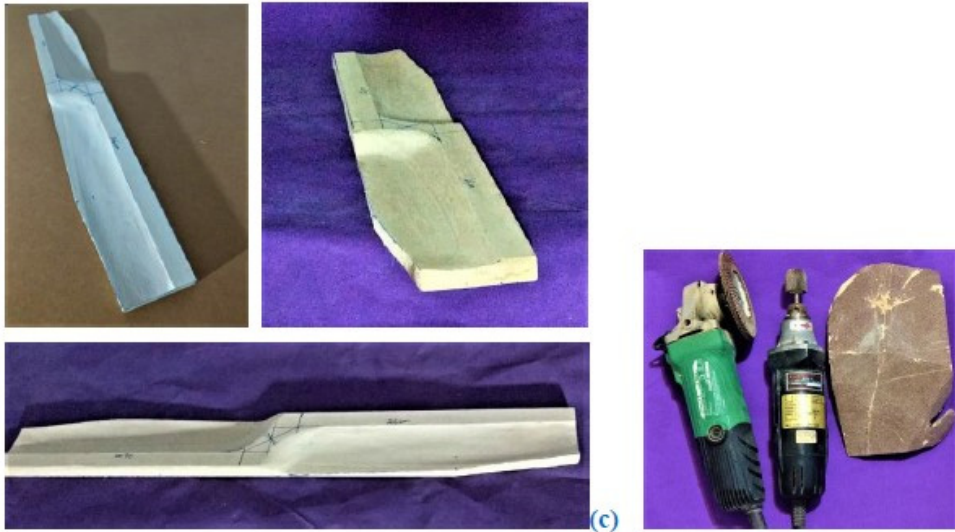
在這項製作方案中，使用到的主要材料如下：(1)厚約 0.5~0.6mm 的 PVC 片、熱熔膠、白楊木塊(製作葉片)、(2)桐木塊(製作模具)、(3)長軸發電機、螺絲釘、白楊木條、LED、AB 膠(製作底座/把手)等。所使用的工具包括：鑽台、剪刀、砂輪機、熱風槍、熱熔膠槍和熱熔膠等。

首先製作桐木模具。先用線鋸，將桐木板(厚 14mm)成圖(四)a 所示的形狀和尺寸(圖(四)a 所示為木模的俯視圖)。再畫出代表木模形狀的參考線(見圖(四)b)，參考線的功能是：製作時以參考線為依據，逐漸形成模具最後的形狀。注意：製作時不可損及參考線，以免失去參考依據，用線鋸、砂輪機和砂紙(見圖五)，逐漸削掉模具中多餘的部分，形成凹入的弧面(事實上是翼型的上弧面(upper camber))。

模具的設計形狀從圖(四)b 中可見；經切削、打磨最終的形狀如圖(四)c 所示。為了顯示完工後木模的形狀，圖(四)c 顯示從三個方向拍攝的特寫。從光影對比之中，不難看出最終完工的木模正如同圖(四)b 所示的形狀。

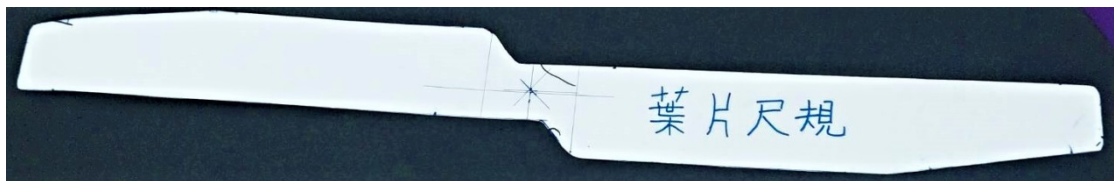


圖四-1：俯視木模的形狀(a)；木模上的參考線和凹入的弧面(b)；完成的桐木模。



圖四-2:從三個方向特寫,以充分顯示其凹入的弧面(c)。 圖五:使用的兩種砂輪機和砂紙。

因為 PVC 片通常是卷起來儲放,所以難免會卷曲,而不是平面,不方便在 PVC 片上仔細作圖;另一方面,在 PVC 片上量測也不方便。此外,為了方便快速重覆繪出 PVC 葉片的形狀,所以先製作一厚紙製的葉片尺規(見圖六)。

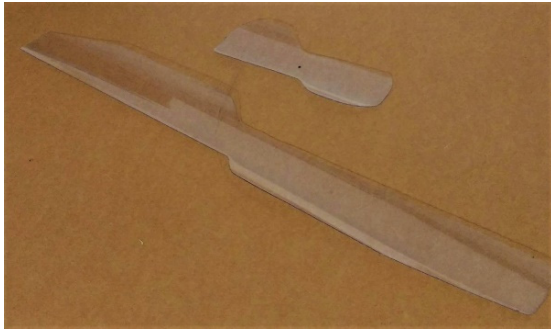


圖六:厚紙製成的葉片尺規。

再用此厚紙製成的葉片形狀尺規,用油性筆在厚 0.5mm 的 PVC 片上畫出葉片的形狀(見圖七)。依 PVC 片上的葉片輪廓線,用一般剪刀剪出葉片的形狀(大一點的剪刀用起來更方便)。並同樣用 PVC 片製作葉片「轂部加強片」(見圖八)。



圖七:將 PVC 片、尺規都夾在平木板上,然後用尺規在 PVC 片上畫出葉片形狀。



圖八:PVC 雙葉風車和韌部加強片。



圖九:熱風槍和熱熔膠。

因為 0.5~0.6 公厘厚的 PVC 片可以用剪刀剪裁，這是一大省錢優點，但缺點是強度不太夠，所以必須將一片形狀略小於風車葉片、長度只有 16 公分左右的「韌部加強片」與風車葉片韌部區域，用熱熔膠牢牢黏合起來。

在韌部加強片的兩端先塗上充分加熱後之熱熔膠(見圖九)，最後才在加強片中央塗上高溫的熱熔膠，迅速貼在一體成型的雙葉風車中心。

將韌部加強片和風車葉片韌部結合的這個過程，可以在完全平坦的桌面、或平的木板上完成，配合各種輔助工具(例如：夾具)，儘可能適當加熱兩片 PVC 片互相結合的部分和夾在兩者之間的熱熔膠，儘可能擠出熱熔膠之間的空氣，使得兩 PVC 片緊密均勻地由熱熔膠黏合在一起。

此過程稍有閃失無妨，一樣能成功製成這款微型風力發電機。只不過因為製程簡單合理，操作人員不由得會企圖製作得更為完美。

用夾具，將韌部加強片和雙葉風車的中心點夾在桐木模中心，同時注意兩側葉片要安放在模具對應的位置(見圖十)。為了方便和準確，可以用小夾子先以不使 PVC 葉片變形的的方式，把葉片兩端夾在模具對應的位置，之後再用強力夾具夾住韌部加強片和雙葉風車中心點在桐木模的中心。



圖十:韌部加強片和 PVC 葉片已黏在一起。先把葉片兩端夾在模具上對應的位置，再用強力夾具夾住雙葉風車的中心。



用熱風槍均勻加熱整片葉片(約需 25 秒)，避免加熱某區域至太高溫度，而其它區域還是冷的，均勻加熱是要訣之一(見圖十一)。再戴上手套將軟化的熱 PVC 葉片輕輕壓在模具中，加強片和雙葉風車之間的熱熔膠會融化，更均勻地黏結二者。



圖十一：較長時間均勻加熱整片 PVC 葉片。

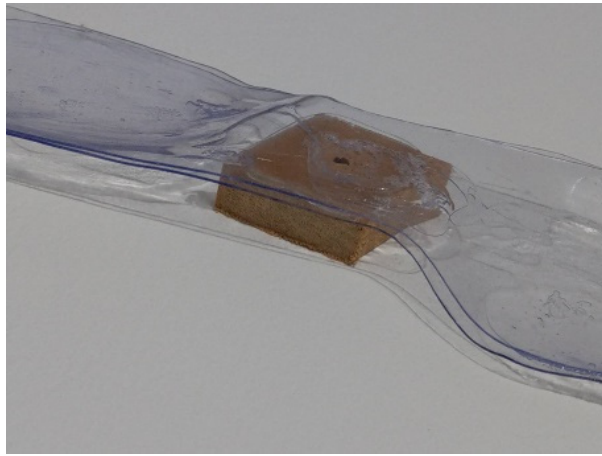


圖十二：靠重力即可使 PVC 葉片貼合模具，只有雙層 PVC 片夾熱熔膠的轂部之若干區域須輕輕施壓

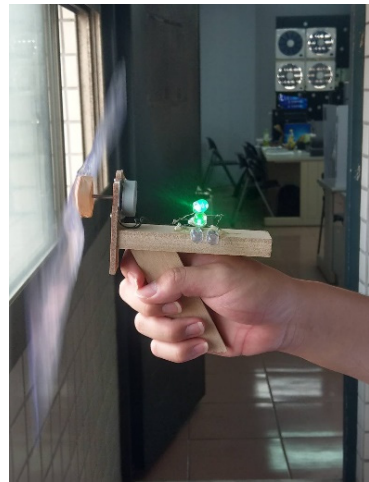
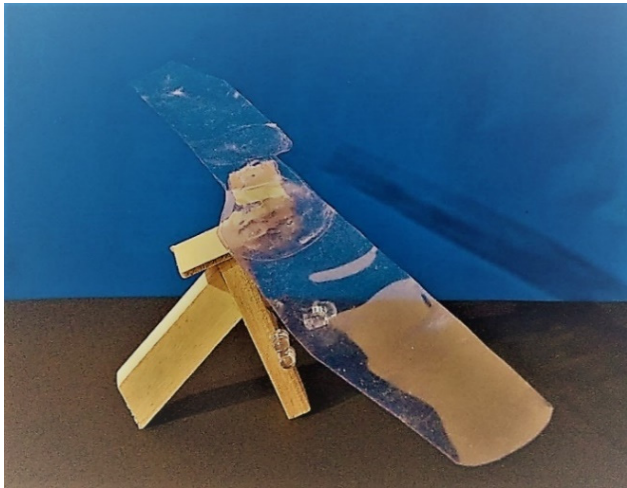
因為 PVC 片很薄，只有由兩片 PVC 合成的轂部稍厚。所以如果均勻加熱，並且刻意加長加熱時間(但溫度不要升得太高)，PVC 片會因為較長時間軟化而完全失去回復力和彈性。如果平放模具，模具中的 PVC 片會受重力而自然貼合模具。只須針對較厚的轂部不服貼模具的若干小區域，用戴手套的手指輕輕按壓，即可使 PVC 葉片服服貼貼地在模中塑形，隨即終止加熱。再等 5~10 分鐘，PVC 冷卻後即定型形成風車(見圖十二)。

形成雙葉風車之後，同樣用熱熔膠將一小塊木塊加壓黏在風車中心(見圖十三)，此木塊中間有一直徑緊配發電機轉軸的圓孔。將安裝在把手/底座(見圖十四)上的長軸發電機的轉軸，插入 PVC 風車木塊中心的圓孔中。

長軸發電機接上 LED 燈，即完成了此具微型風力發電機(見圖十四)。有趣的是：這樣完成的風力發電機握在手中，靠行走引起的相對風，就足以使風車轉動，而使發電機發電，點亮 LED 燈。

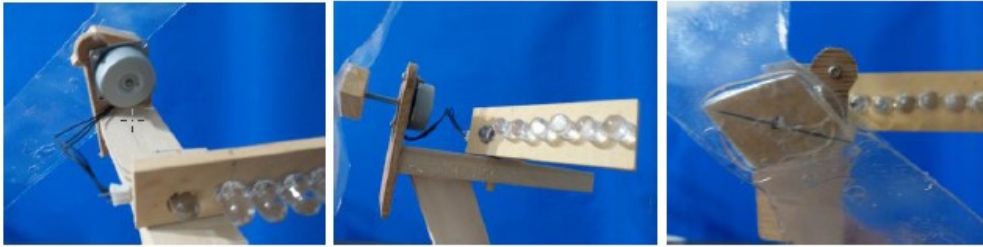


圖十三：木塊、加強片和葉片都有熱熔膠黏結。



圖十四：微型風力發電機實物特寫(左)，把手可以充當底座；此微型風力發電機發電點亮 LED(右)。

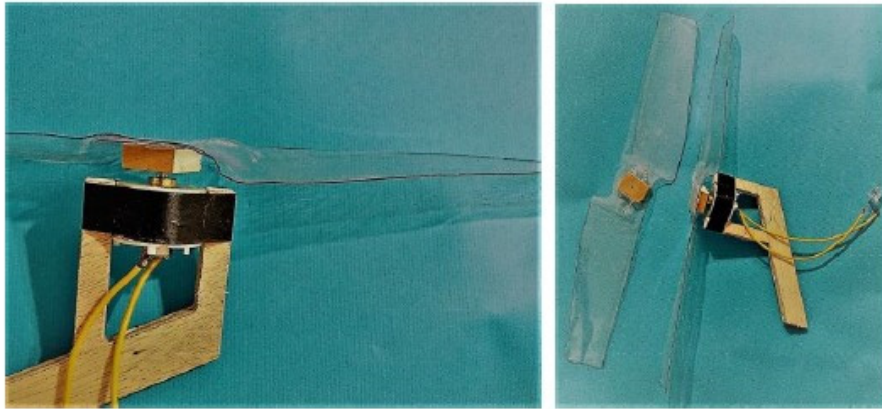
因為長軸發電機在被本文所述大尺寸現代風車轉動時，不只可以點亮一顆 LED 燈，為了充分發揮風車和發電機的性能，進一步提高親自動手自製、而演示效果令人驚奇的樂趣，作者在既有的把手/底座上加裝一片 LED 顯示牌，牌上總共有 8 顆 LED，牌子有一轉軸插入把手/底座的孔中，並藉此轉軸改變牌子面對的方向，在各種操作場合中，方便觀眾或實驗者觀察，(見圖十五)。



圖十五:此動手做教具可以點亮牌子上的 LED，牌子可以朝向指定的方向。

圖十六所示，為用同一方法研製的小尺寸風車(直徑約 34 公分)。此風車也可驅動長軸發電機或一般小馬達充當的發電機，來發電點亮 LED 燈，但必須用一般家用電扇吹風或手持此作品跑步才能點亮 LED 燈。

因為風車尺寸較小，可以轉得很快，才能使馬達充當的發電機轉得夠快，而發出足以點亮 LED 燈的電壓。好處是市售馬達較長軸發電機便宜，約為長軸發電機三分之一的價格；壞處是，必須跑步或使用家用電扇才能點亮 LED 燈，比較不能突出專業風車優越之處。



圖十六:完成的 PVC/熱熔膠風車及發電系統。

## 伍、實驗測試

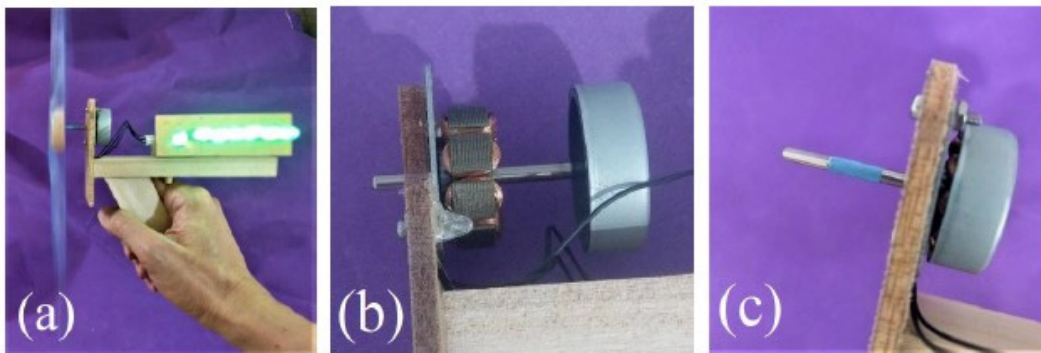
本文所述風力發電機動手做教具，採用兩種現成的發電機，並研製大、小兩種尺寸的風車。製作風車的方法都要用到木質模具和 0.5~0.6 公厘的 PVC 片。

小尺寸風車(直徑 34 公分)既可以驅動長軸發電機，也可以驅動馬達充當的發電機，但都須以手持風力發電機跑步，以造成相對風的方式，使風車有足夠的轉速及足夠的扭力。自製小尺寸風車也頗具科學教育之意義，因為馬達價格較低，所以經費也稍低，但實驗之神奇感略遜，轉速之快卻出乎一般人意料之外。

大尺寸風車只適合驅動長軸發電機(參見圖十七(b)、(c))，則非常容易轉動而發出足以點亮 7~8 顆線光 LED 的電力(見圖十七(a))。實驗結果發現，只要步行速度達每秒 2~3 公尺即可使 LED 發出相當亮的光。當然，如果快走或跑步至每秒 3 公尺以上，手持大尺寸風車發電機就足以點亮 20 顆 LED 燈。此外，在家用電扇吹出的風中，也一定可以點亮 20 顆以上的 LED。

這樣的性能特別適用於室內的活動，對教師研習營的參加老師、科學營的參加學生或親子營的社會大眾，寓教於樂的效果特別好。從操作簡易、有趣、令人驚奇、和老少咸宜、一目了然、成功率各方面來看，這項作品都非常有利於科學教育活動之籌辦。

當然，相較於小尺寸的風車，大尺寸風車在強風中可能被吹變形(可以復原)；也可因風力太大而使長軸發電機分開(也可以復原)。在長軸上纏一小截紙膠帶，即可以使已分開不遠的長軸發電機因磁力又迅速組合起來(見圖十七(c))。從科學教育之需求來看，此動手做教具的耐用程度也合格。



圖十七:(a)此項動手做教具風車可以點亮多顆 LED。(b)長軸發電機的感應線圈和外側的磁鐵可以分開。(c)利用外側磁鐵和感應線圈中鐵芯之間的吸引力，兩者又可組合在一起。

## 陸、結論

本作品之所以有利於大量推廣，其成功之處在於：

- (1)選用厚度約 0.5~0.6mm 的 PVC 薄片作為葉片材料。因為此等厚度的 PVC 片可用剪刀剪出所需的形狀，這大大降低準備套件的成本。
- (2)巧妙利用熱熔膠與 PVC 片黏合強度不錯的條件，以及熱熔膠和 PVC 片被加熱均會軟化的特點，製作出韌部有足夠的強度、整具風車葉片也足夠堅固、足以驅動長軸發電機發電的風力發電機。
- (3)模具為雙葉風車一體成型的模具，一道工序即完成這具雙葉風車，而風車中心用

熱熔膠牢牢黏住可容發電機轉軸插入的木塊，使製作風車省時省力。

- (4)因為手持這具直徑約 57cm 的大尺寸風車，在無風的狀態下行走引起的風，就足以吹動這具風車而轉動長軸發電機，點亮 LED 燈。相反的，長軸發電機取巧節約的組合方式，並不適於在強風中實驗，而 PVC 片製作的風車強度也不足以忍受強風。手持風力發電機“行走”發電點亮 LED 燈，恰恰好成為亮點，又巧妙避開了此作品的限制。
- (5)把手與底座結合，使此教具之把手可充當底座。放置此風車時，以把手作為底座，靜置於桌面，避免擠壓葉片而損壞葉片。
- (6)為了提高演示效果，充分發揮長軸發電機之發電性能，在把手/底座上還加裝可以轉動的多數個 LED 燈，一樣靠行走引起的相對風即足以同時點亮 7~8 顆 LED(其實同時點亮 20 顆 LED，也沒問題，只須走路的速度稍加快即可。當然，若慢跑則一定可以使 LED 燈發亮)。此 7~8 顆 LED 燈藉發電機本身原有之柔軟電線連接發電機，還可以轉向，方便觀眾或實驗者觀察。

雖然作者之目的在於：完整深入傳達現代風車受升力而轉動之細節，以及探討設計現代風車之步驟和考慮要點，但相關風電活動中。若有包含本文所述的微型風力發電機實作，對於該科教活動，從吸引人們參與、活絡活動氣氛、提高教學效果，均有助益。

本文所述的微型風力發電機，以手持行走的方式，即可使能夠轉向指定方向的 7~8 顆 LED 燈亮，具有匠心獨運的特色。更重要的是：

- (1)所需的經費大幅下降，因為 0.5~0.6 公厘厚的 PVC 片並不貴，用剪刀裁剪更省去專業切割的經費。把手/底座其實都可自製(為求美觀，目前尚有安裝發電機的一小片木片用水刀切割，但若稍放鬆對美觀的要求，也很容易自製這一小片木片)。而長軸發電機雖稍貴，但尚不致於使總經費高到不易推廣。
- (2)活動準備已在少數人力在可承受的範圍之內。因為絕大部分零件，都可以讓參與者當場製作，無須事前準備太多自製的零件，這情形大大減輕準備工作的各項負擔。
- (3)雖須參加者現場製作若干零件，但難度均不高，製作風車葉片的過程甚至相當有趣。親手操作、看著葉片成型，成功率又高，無中生有的成就感油然而生。

雖然主辦者仍須自製此製作方案所需的木模，但數量不必太多，可重覆使用，製作難度也不會很大，必要時，甚至值得請廠商代製。

作者多次改良自製風車的方案，雖與眾不同，但各有獨特的樂趣。本文所述的這項最新方案，終於在各方面都達到可接受的程度，更進一步排除了推廣的障礙。

## 參考文獻：

- 牛山泉，圖解風力發電入門，2010 年，世茂出版社。
- 吳明德，風力渦輪葉片原理與實作，物理教育學刊，2012 年，第 13 卷第 1 期，第 51-57 頁。
- 周鑑恒、劉源俊，迷你風力發電機，科學月刊，2001 年 10 月號，第 888-891 頁。
- 周鑑恒，風力發電科學教育之深入內容，物理教育學刊，2015 年 08 月。
- 周鑑恒，機翼所受揚力的簡單推導，物理教育學刊，2016 年，17 卷 2 期。
- 周鑑恒，以 PVC 製作專業風車的實作探究與科普活動，物理教育學刊，2018 年，第十九卷第一期。
- 周鑑恒，風車與帆船的原理探討與科學教育，物理教育學刊，2020 年，第 21 卷第 2 期，23-42。
- 周鑑恒，專業風車系列教具，科學教育月刊，2020 年 11 月，第 434 期，37-47 頁。
- 周鑑恒，科學的奧秘—工程的應用探索，影片，教育雲。  
[https://video.cloud.edu.tw/video/co\\_video\\_content.php?p=383776&fbclid=IwAR0-0pmO4jI5w\\_e4Xyb1VpL7cRvtceF8vBjWTTAX3lMIG5dH1GFhK7MwBpg](https://video.cloud.edu.tw/video/co_video_content.php?p=383776&fbclid=IwAR0-0pmO4jI5w_e4Xyb1VpL7cRvtceF8vBjWTTAX3lMIG5dH1GFhK7MwBpg)
- 周鑑恒，風力發電 20 問，民國 110 年，海峽前鋒文化事業有限公司。
- 周鑑恒，風力發電的效率如何決定？設計風車可不簡單，科學月刊，2021 年 5 月號，第 56-61 頁。
- 周鑑恒，碳水化合物纖維複合材料風車，科學教育月刊，即將於 2021 年 9 月，第 442 期刊登。