

風力發電科學教育之深入內容

周鑑恆^{1,*}、卓世宏²

¹萬能科技大學航空機電系、²台東縣初鹿國民中學
*chou0717@gmail.com

(投稿日期：民國 104 年 01 月 29 日，接受日期：104 年 08 月 04 日)

摘要：本文介紹一項用於科學教育創新風力發電機的製作與設計。這項風力發電機之風車構造符合現代專業風車之設計要求，學習者經由製作此風力發電機，能夠從做中注意到專業風車的構造特徵，並探索專業風車的工作原理。以此風力發電機為主題，曾於台東縣舉辦三屆國中生製作競賽，證實此風力發電機應用於國中以上程度科學教育之可行性。

關鍵詞：揚力、風車、科學教育

壹、前言

風力發電是目前最為成功、發電容量最大的綠色能源，目前最常見的風力發電系統絕大多數採用水平軸式的揚力型風車，此型風車可謂當下最為成熟的風車。當然，目前尚有諸如整流罩式風車^[1]，據說可以超過貝茲極限；空中風力發電(Airborne Wind Turbine)以擷取高空強勁且穩定的風能等新構想，但基本上都以水平軸式的揚力型風車作為主要的風能轉換器。

國內許多綠色能源科學教育活動，也都以風力發電機為主題，但可惜之處有二：(一)風車之設計太過簡陋，仍停留在傳統風車之

內容，目的也只是使風車轉動，而未能充分展露目前已經商業運轉發電的現代風車之工作原理，也不明白為何專業風車要製成其特殊形狀；(二)理工科老師及部分民眾似乎都知道發電機原理，但要根據法拉第定律設計不同形式的發電機，仍是一項充滿創意與挑戰的科教活動，一般的活動中常用現有市售的微型發電機或乾脆以馬達改裝，使參與者失去徹底了解法拉第定律和設計各種發電機（有鐵蕊、無鐵蕊、有刷、無刷）的機會，非常可惜。

作者根據現代專業風車的原理，設計一款利用一般木板經較簡單的製程而可完成的風車，此風車的構造與形狀符合現代專業風

車的工作原理，性能遠較僅用平板或單調的曲面製成的風車好，發電機的部分也不用現成的而自行設計，加深風力發電的科教內容。

貳、現代風車的工作原理與設計要點

許多人小時候都玩過的紙風車，在風中會旋轉，但用於現代風力發電的風車與紙風車有何不同呢？其實兩者的最大不同之處在於：從風中取出能量（功率）的比例。現代風車之設計目的在：使風對風車做正功，避免風車對風（流動的空氣）做正功而將能量又傳回到風中；此外，要盡量從風中取得最大的能量，但依貝茲極限(Betz' Law)，最多能夠取出 59% 的風能。

現代水平軸式揚力型風車所指的揚力到底是什麼？揚力型風車又是如何運轉呢【2.3.4】？要回答這些問題，首先得談談揚力。

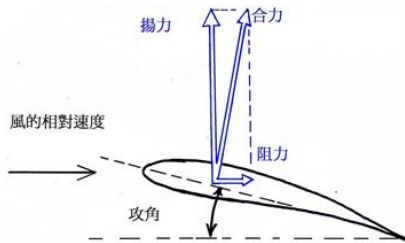


圖 1：風相對機翼的流動情形決定機翼所受的揚力和阻力

圖 1 顯示一般飛機機翼的翼形剖面 (airfoil)。連接機翼前緣 (leading edge) 和後緣 (trailing edge) 的連線，稱為翼弦線 (chord line)，翼弦線與氣流流向的夾角稱為攻角 (attack angle)。如果攻角不太大，也不是負值，則機翼會受到垂直氣流流向的揚力 (lifting force) 和平行氣流流向的阻力 (drag force)，只要翼形剖面適當，通常揚力會比阻力大許多倍。

飛機主要就是靠揚力騰空飛行。飛機的推進器，只要能夠抵銷飛機飛行時所受的阻力（包括機翼所受的阻力和機身其他部分所受的阻力），使飛機以適當的速度飛行，以便機翼所受的揚力足以抵銷機身的重量，飛機就能飛行。因為揚力比阻力大許多，所以即使推進器之推力比飛機重量小，只要推進器之推力足夠抵銷飛機以一定速度飛行時所受的阻力，而在此同時因此機翼所受的揚力大比阻力大好多倍，揚力即足以抵銷飛機重量，於是飛機能夠飛行，一般民航機（如波音 747，A300 空中巴士）均是如此，只有軍用戰機的推力可能大於其重量。因戰機需要高速飛行的要求，它的噴射引擎的推力設計得非常大，有些戰機的噴射引擎的推力，甚至大於整架戰機的重量。

但是，如果攻角是負值，揚力就會變小，甚至使機翼反而受向下之力；相反的，如果攻角太大，就會發生失速 (stall) 的現象，揚力也會大幅減少，而阻力卻大大增加。

值得一提的是：任何物體（包括機翼、風帆、風車葉片）所受到空氣的力量（包括揚力和阻力），決定於空氣相對該物體的運動狀況。也就是說，靜止或正在運動的物體所受的空氣的作用力（包括揚力或阻力），決定於當該物體在某運動狀態時，空氣相對該物體流動的情形。例如：空氣是靜止的，但在無風的情況下騎自行車，空氣相對自行車以一定速度大小向後流動，行進中的自行車就會受到向後的空氣阻力。例如：順風奔跑時，如果風速等於奔跑的速度，風相對於人體的速度為零，人就不會受到風的力量。又例如：機場跑道多平行盛行風的方向，以便增加逆風起降時風相對機翼的速度，而使對地慢速飛行的飛機能獲得較大的揚力，較為安全。又例如，靜止站在地面，有來自左方的側風吹拂，當然就受到來自左側氣流的阻力（或

稱之為拖曳力，比較傳神一些)；但如果向前跑動，氣流相對跑者來看即來自左前方，跑動的人於是受到來自左前方的風力。

揚力是比空氣密度大很多的飛機騰空飛行的關鍵。多數學習者事先不知道的是，現代風車及高速帆船居然也是利用相同的原理運作。只是相較於機翼，風車及船帆【5】利用揚力和阻力的方式更為奇異而已。

風車葉片大致不會有很大的形變。因此以某角速度旋轉時，葉片尖端的切線速度遠大於葉片根部的切線速度。所以從葉片根部到尖端，風相對於葉片各區段的速度之大小和方向，均不相同。

假設在風車旋轉範圍之內，風速都差不多。如圖 2(c)所示，則對葉片尖端而言，風並不是從垂直旋轉面的方向吹來，而是從與旋轉面夾一個不大的角度吹來；因為葉片各個區段的切線速度不同，風相對於各區段的速度也不同。越接近轉軸的葉片區段，它的切線速度愈小，風相對於這區段吹來的方向與旋轉面的夾角越大，如圖 2(b)所示。風相對於葉片根部吹來的方向與旋轉面的夾角最大，如圖 2(a)所示；風相對於葉片尖端吹來的方向和旋轉面的夾角最小。但對葉片各區段而言，所受的揚力都要盡可能大，阻力均要盡可能小，所以風對各區段的攻角都要在合理範圍。風車葉片各區段，都不能發生因攻角過大而失速、或攻角為不合理負值的情形。於是風車葉片個各區段扭轉的角度(也稱安裝角)，也就必須配合風相對於葉片各區段吹來的方向，而由根部至尖端逐漸變小。

在風車旋轉時，若葉片各區段所受的揚力和阻力都能如預期 ---- 揚力遠大於阻力，所產生的合力，就有平行葉片運動方向的分量。風車葉片受力的情形如圖 2(c)所示。事實上，葉片各區段所受合力，都有平行葉片運動方向的分量，都能產生使風車葉片旋轉

力矩的分量。揚力型風車就是利用此分量對正在旋轉的葉片做功，因為此力矩出現在風車葉片轉速不低時，根據輸出功率之公式

$$P = \tau\omega \dots\dots\dots (1)$$

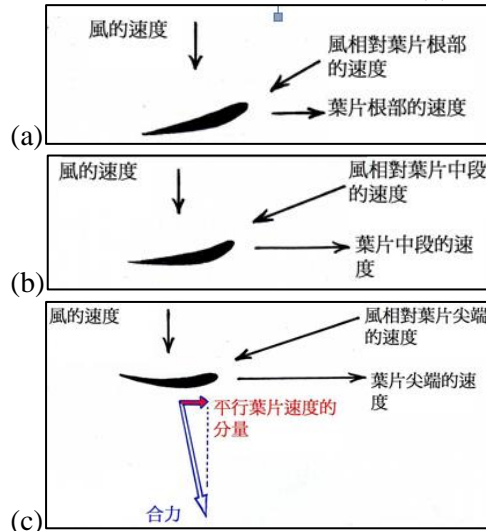


圖 2：從接近轉軸的葉片根部(a)到葉片尖端(c)，攻角都要在合理範圍內。

力矩 τ 乘以角速度 ω 等於輸出功率 P 。當角速度 ω 不小，力矩 τ 也不小，揚力型風車的輸出功率 P 就不會小。此點使揚力型風車明顯優於阻力型風車。

也像帆船行駛時會受到很大的側向力那樣，正在全速轉動的揚力型風車也會承受向下風方向不小的力量(此分量不做功)，在實驗時能非常清楚地感受到。

設計風車時至少考慮以下四項要點，其中第一點已如前述，前兩點製作時必須多費周章，小心研製；後兩點則較容易掌握：

- (1)風車葉片每一部份的安裝角，都要配合攻角大小加以調整(見圖 2)，以使得風吹風車葉片每一部分的攻角，都不至於造成失速，也要避免攻角不合理的現象。
- (2)由於翼形剖面(air foil)對於風車葉片所受的阻力和揚力之比例很有影響，設計的要求是：揚力盡可能大而阻力盡可能小，因此翼形剖面除了要考虑葉片強度之外，也

要注意其空氣動力方面之考慮。風車常見的翼形剖面之一如圖 3 所示。

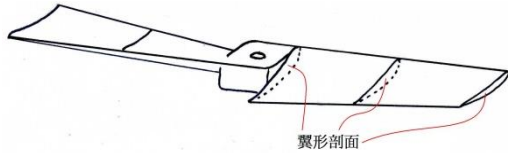


圖 3：簡易風車葉片立體圖。

- (3) 葉片本身面積和葉片掃過截風面積的比例要適當。通常葉片轉速愈快，葉片本身面積和截風面積的比例愈小。如果此比例不適當也會降低風車運轉的效能。
- (4) 葉片的形狀，也就是正對風車觀察時，看到的葉片形狀。此形狀可以加以最佳化，以獲得最佳的性能，但所費不貲、製程複雜，常不實用。通常只是將翼尖部份的寬度縮小一些，使翼尖快速滑過空氣時，紊流的現象較小。產生紊流也會降低風車的性能。

參、風力發電機所涉及的科學原理

此項專業風車製作活動，涉及真實風車與發電機之工作原理，比僅僅以面板製作風車、或直接以現成的小發電機及馬達作為發電機的一般相關科普活動，增添了若干重要內容。茲摘要如下：

- (1) 相對速度：風車葉片在風中所受的力，不完全決定於風之速度（方向和大小），卻決定於風對葉片的相對速度。要了解風車葉片為何有特別的扭曲角度，就必須了解風對風車葉片各部份的相對速度。因此學習者必須學會如何決定相對速度。
- (2) 角速度與速度的關係：葉片如同一個剛體，通常不會有大大的變形，以某一角速度 ω 旋轉的葉片，葉片翼尖部分因為距離轉軸較遠，所以切線速度 v 較大；翼根部分因為距離轉軸很近，所以切線速度 v 很小。可以公式決定：

$$v = \omega \times r \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中 r 為葉片各部份距轉軸的垂直距離。知道了葉片各部份的切線速度，同時確定風的速度，才知道風相對葉片各部份的速度。

- (3) 機翼運作原理：風流過機翼時，風的方向與機翼的弦線之夾角稱為攻角，攻角大於臨界角之後，機翼上方之層流剝離，產生紊流，此現象稱為失速。失速發生之臨界角、以及不發生失速時機翼揚力和阻力之比值，都與翼形剖面有關，翼形剖面有許多種，各有其優缺點。
- (4) 作功與能量的原理：風車工作時，盡可能使空氣（風）對葉片作功，而避免風車葉片對空氣作功。從能量和功的意義不難了解為何葉片在風中盡可能防止產生紊流。從葉片各部分都要避免失速，到某些風車葉片尖端避免渦流（vortex）的設計，均是避免風車葉片對空氣作功。
- (5) 功率的概念：風車(或其他動力機械)的輸出功率，等於為風車提供的力矩與風車轉動的角速度的乘積。角速度不小時，仍可提供一定的扭力矩，就能增加風車(或其他動力機械)的輸出功率。
- (6) 法拉第定律與發電機原理：法拉第定律指出：通過線圈之磁通量變化率，正比於線圈中的感應電動勢；另一個角度來說，線圈以越快的速度切割越多磁力線，產生的感應電動勢越大。此外：當線圈與磁場有相對運動時，如果線圈中有感應電流，則會產生磁阻現象。此磁阻造成的阻滯力矩和當時線圈的角速度的乘積，決定發電機將動能轉換成電能的功率。但生成的電能在發電機線圈中的熱消耗要盡可能小，因此發電機線圈中的電流不宜太大，所以一般發電機均以高速運轉，以使電流減少而電壓增加。從力學的角度來看，轉速很大

時即便阻滯力矩不太大，驅動力輸入的功率也不小。

肆、比賽用的風力發電機

雖然理論上的解釋頗費唇舌，但在實作上卻不難製出攻角合理的風車葉片，見圖4，先將木板切成如圖所示的形狀，再畫上參考線，其一為風車葉片之前緣，另一參考線代表由葉片的後緣，為一對角線。此兩條參考線在研製時不可磨掉，否則即失去參考標準而做不出預定的正確形狀。必要時在木板正面標上迎風面，以便時時提醒製作者何方是迎風面，並畫出風車旋轉的方向，在木板兩端大致畫出翼形剖面，也便於施工時備忘。

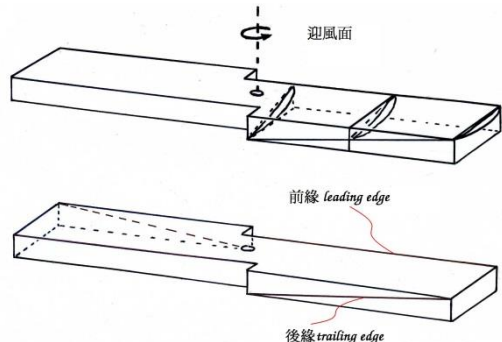


圖 4：從木板製成風車葉片。

施工的過程與製作木製飛機螺旋槳的方式非常相似。雖然飛機螺旋槳和風車葉片橫豎就是不相同，無法以飛機螺旋槳充當風車葉片，但兩者都要製作出光滑平順的弧面，所以都須要利用砂輪機，逐步把基本上是長方形的木板研製成風車葉片的形狀。

若能使用帶鋸機，事先切削掉不必要的部份，可大量減少木屑和粉塵，並加快工作進度(見圖5)。



圖 5：先用帶鋸機大致切削掉多餘的木材，再用砂輪機做較細微的加工，最後用砂紙做最後的修整。

翼形剖面(見圖3)之控制，多少須靠一些經驗。大致而言，迎風面要略為凹入，背風面則為圓滑的曲面。大約在距離前緣三分之一寬度的地方最厚。

作者故意稍微放大風車葉片的尺寸，風車葉片之長度達 60 公分~70 公分(見圖6)，如此一來，即使初學者不慎弄錯或弄壞了一小部份風車葉片，均無傷大雅，自製的風車仍能有不少的表現。

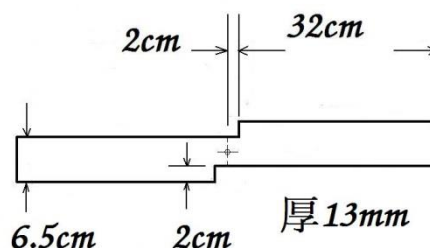


圖 6：正對風車觀察時看到的葉片形狀。

此風車的尺寸顯然不小，但在微風中(3m~4m/sec)也能轉動得相當快(這點也令學生們非常開心)，因此平衡十分重要，否則稍微轉得快些，就會發生劇烈振動。在最後修整時，務必逐漸將葉片之質心調到風車中間穿孔($\phi 6mm$)的位置，以避免高速轉動時可能破壞風力發電機、或導致人員受傷的振動。

伍、風力發電機製作競賽

為增強各校老師指導學生參賽製作的的能力，台東縣國中小能源科技教育推動中心分別於民國 101 年與 102 年，各辦理一場木製

風力發電機製作教師工作坊，參與的老師們並現場完成一具風力發電機，散場後還發給兩組完整材料，帶回各校作為教具。派出老師參與活動的國中達 17 所以上，佔全縣國民中學總數約百分之七十七，幾近八成。

民國 101 年，試探性辦理三場學生能源科技機具製作計競賽，分別是針對全縣國中學生辦理的溫差引擎組裝競賽、工業型木製風力發電機製作競賽，以及對全縣高中職學生辦理的溫差引擎製作競賽。三場競賽，均由學生自行組隊訓練，全縣各校參與踴躍，參賽師生均獲肯定，深受鼓舞。

民國 102 年、103 年，針對國中生，繼續辦理第二次、第三次全縣性工業型木製風力發電機製作競賽，各校報名踴躍。因為累積了第一屆比賽的經驗，在第二屆比賽中，部份學生開始設計出專用的工具與提升方法。在第三屆比賽中，部份學生開始改良風車轉動發電機的傳動方式。

比賽場地均設在初鹿國中，由於現場難免產生木屑粉塵，因此搭建臨時棚架，以容納參賽各隊，避免日曬雨淋，參賽各隊均有專屬工作桌與電源。實際運作的結果，證實這樣的場地安排非常妥當。

為求活動之平安順利，主辦單位還替每位參賽學生投保活動及場地意外險，選手每人並配發護目鏡、防塵口罩和工作手套，現場並有醫護人員和器材待命，以備萬一。幾乎全台東縣的所有國民中學均曾派隊參加，所有參與學生的表現都不俗，其中均一中學、大武國中、長濱國中、大王國中、桃園國中、瑞源國中、綠島國中、蘭嶼國中、新生國中、豐日國中、卑南國中、初鹿國中、東海國中、泰源國中的學生作品在比賽中都曾脫穎而出。

台東縣政府也非常重視此項活動，第一及第二屆活動中，均由台東縣政府教育處處

長親自主持頒獎，鼓勵與督促之情溢於言表。圖 7 為第一屆參賽師生與台東縣教育處處長在初鹿國中合影，前方為學生作品。這項前所未有的風力發電科教活動，也曾經獲得中國時報、聯合報、自由時報和更生日報等平面媒體之報導，同時也獲得教育廣播電台(見圖 8)等電子媒體的採訪報導。



圖 7：第一屆參賽師生與台東教育處處長在初鹿國中合影。



圖 8：教育廣播電台現場採訪報導。

陸、進步與前瞻

這項針對科學教育而發展的風力發電機之設計與製作活動，有幾項值得紀錄的成績：

(一)充分揭露現代風車之工作原理，從做中學，寓教於樂，讓學生有機會理解其中奧妙，使學生具備先進的風車技術進而能有創新的機會，在科學教育與綠能工程技術之科普教育上，意義非凡。將過去未能呈現的重要科學內容，在臺灣首度帶到風力發電之科普教育中，成功引導風力發電科普教育至更為精深的水準。

(二)連美國都感受到動手做教學逐漸式微的重大缺陷與危機，於是而有 Maker movement^{【6】} 的社會運動以及恢復工藝課之呼聲，同時更有雖須注意學生安全但不可因噎廢食的覺醒。此一系列活動中製作過程不可謂輕而易舉，而學生卻漸漸都能輕鬆勝任，初鹿國中不啻為響應這樣的教育脈動，在臺灣率先揭開了序幕。

這項針對科學教育而發展的風力發電機之設計與製作方法，凸顯法拉第定律、發電機原理、白努利定律、飛機飛行原理等正規教學的重要學理；這些作品曾於東南亞國家和印度等國際科教活動中演示，引起熱烈的迴響與興趣，又極具趣味性，這項得來不易的教學資源價值不言可喻，希望能獲得民間及政府更為穩定的支持，使其可長可久，真正落實能源科技人才之培育與輔導。

致謝

作者卓世宏感謝台東縣政府教育處、台達電子文教基金會、以及教育部顧問室之經費支持和各級長官的溫馨鼓勵。作者周鑑恆感謝科技部 NSC102-2511-S-238-001-計畫經費支持以及助理怡廷細心幫忙。我們更感謝全台東縣無數默默耕耘的國中老師熱心投入，共襄盛舉。

參考文獻

1. 整流罩式風車
<http://wattnow.org/1891/flodesign-wind-turbine-theres-change-in-the-wind>。
2. 周鑑恆(2005). **輕鬆學物理的第一本書**，臺北，如何出版社。
3. 周鑑恆(2002). **利用微型風車演示風力發電和其負載**，科學教育月刊，91年4月第248期，65-66頁（含封底）。
4. 牛山泉(2011). **風力能源與風力發電系統設計**，科技圖書股份有限公司，臺北。
5. 速度最快的帆船之一
<https://www.youtube.com/watch?v=2boayPZ3GbE>
6. 創客運動 Maker movement
https://en.wikipedia.org/wiki/Maker_culture:
<http://www.techopedia.com/definition/28408/maker-movement>。

Deeper content of the science education of wind-powered generators

Chien-Heng Chou^{1*}, Shi-Hong Zhuo²

¹Department of Aviation Mechanical Engineering

²Taitung County Chulu Junior High School

*chou0717@gmail.com

Abstract

We propose an innovative design and fabrication of wind turbines for science education. The educational wind turbine structures are in line with the design requirements of modern professional wind turbines. By making this wind turbine, learners can learn the structural features of professional wind turbines and explore how modern wind turbines work. We held three junior high school student contests for making wind turbines in Taitung County. We confirm the feasibility of science education based on making this wind turbine by junior high school students.

Key words: lift force, wind turbine, science education