

# 碳水化合物纖維複合材料風車

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

風力在過去幾十年中是發展最快的綠色能源，也是最成熟的綠色能源。世界各地風力發電所佔的比例逐年升高。台灣廢除核能之後，曾受燃煤發電之苦，開發新的綠色能源成為燃眉之急，因此曾經嘗試埤塘發電、地熱發電、洋流發電、波浪發電、甚至考慮海水溫差發電，但是至今都還沒有具體成果。於是台西外海的離岸風場發電，成為能源轉型的關鍵，也是近幾年來台灣最大的能源投資案<sup>[1]</sup>。

雖然台灣已經有許多大型風車，但一般人事實上多不了解風車運轉的原理；國內將來也必然需要發展本身的風車產業。因此，風力發電的科普教育，顯得十分重要。台灣有許多風力發電的科教活動，尤其實施探究與實作課綱之後，風力發電正如火如荼地進入學校課程之中，但非常可惜，相關活動中很少講解現代專業風車的原理與設計。

作者在 20 多年前首先推廣現代專業風車原理的科教活動，除了著有專書講解現代專業風車的運轉原理和設計流程<sup>[2,3,4,5]</sup>、開發系列教具(包括數項教具)<sup>[6,7]</sup>，由淺入深地演示專業風車的原理<sup>[8,9,10]</sup>之外，更推廣專業風車之自製

<sup>[11,12,13]</sup>，但當時所製作的風車，都以木材為原料，雖然在翼形剖面以及攻角合理等方面，能夠達到專業的要求，但是製作過程稍嫌困難，非一般人所能獨力完成。

時至今日，少數教師開始嘗試製作較合乎科學原理的專業風車(大多參考日本學者牛山泉的相關著作<sup>[14]</sup>)，作者也試圖簡化製作專業風車的過程，最近利用熱風槍加熱在木模中的 PVC 薄板，讓 PVC 板軟化，再帶著手套用手擠壓，以便 PVC 板貼合木模形狀，於是製成合乎現代風車葉片形狀的葉片，雖然稍微減損了翼形剖面(airfoil)的完美性，但因為基本上合乎現代風車的原理，直徑約 50 公分的 PVC 兩葉風車，拿在手上行走(每秒 3 公尺)，風車就可以快速旋轉起來，並且驅動微型發電機發出電力，點亮超亮 LED 燈<sup>[15]</sup>。

因為參加科學教育活動的人可以親手製作整具風車，又可以走路的方式來測試風車，大致上都能達到科學教育寓教於樂的目的。雖然在製作的過程中不至於造成粉塵汙染，製程也更為簡單，但是 PVC 葉片風車的成本還是太高，大規模推廣時困難度較大。

最近作者終於發展出更為兩全其美的辦法，用紙張與白膠(樹脂)、巴沙木薄

片與 AB 膠，製成複合材料葉片，就可以組合完成相當精美的專業風力發電機。

常見的複合材料多以碳纖布與特殊的膠構成，較為昂貴，碳纖布也較不容易處理。作者基於複合材料的基本原理，將碳水化合物纖維與膠結合後，形成更堅硬的材料(碳水化合物纖維指的是：厚度 1 公釐的巴沙木薄片，和厚度 0.5 公釐表面有微小起伏凹凸的水彩紙)，同時利用白膠含有水份的特性，以及水彩紙質地較鬆軟，遇水之後可以有較大的變形的特徵，結合兩者的特點，可以使原先平面的紙，順利貼合木製含蠟模子的曲面形狀，而製作出專業風車葉片。巴沙木薄片本身因為質地疏鬆，本來就可以有相當大的變形，搭配 AB 膠硬化後的硬度，也可製成專業風車葉片的形狀。

雖然碳水化合物纖維不如碳纖維強韌，但是利用複合材料的原理所製作的風車葉片，一方面，巧妙地讓學習者大致體驗複合材料之製作與原理，另一方面，可將講解風車原理與設計流程、一系列演示教具的書籍文章、以及可行普及的實作專業風車，整合成完整的教學資源。

## 貳、所需的材料與工具如下

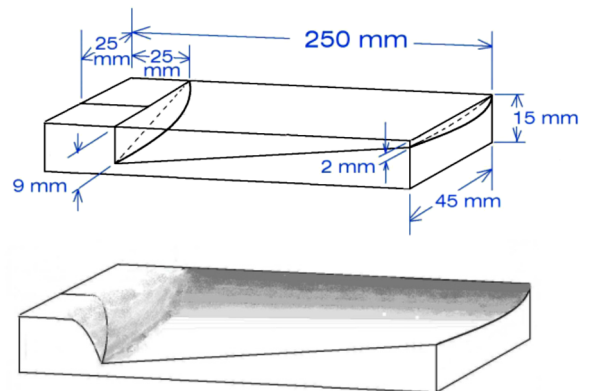
剪刀、美工刀、夾子 5~7 個，白膠(即樹脂)、厚 0.5 公釐水彩紙、AB 膠、巴沙木薄片(厚 1mm)、尺、木板、砂輪機、砂紙、蠟、熱風槍。所有材料與工具都是文具或生活用品，無須動用專業的工具，是本創作的優點之一。

## 參、製作過程

分別製作：甲、巴沙木-AB 膠葉片；乙、水彩紙-白膠葉片；丙、甲乙混合形葉片。製作過程都不難，有以下幾個步驟：

### 甲、巴沙木-AB 膠葉片

1. 先製作一個木製的模子。在桐木板上畫出參考線，見圖一，再根據參考線，用砂輪機磨掉不需要的部分，再用砂紙把曲面磨得更平滑，最終就能完成如圖二所示的木模(尺寸如圖所示，並不大，所以製作並不費時。作者選用 CLARKY 的翼形，最厚處約在弦長前方 1/3 處，木模只需做出葉片的上弧面(Camber of Upper Surface))。因為桐木其實並不太硬，所以製作並不困難(需一些經驗，試幾次即能熟悉)，而且因為只需製作一個曲面，所以製程也相對簡單，所製造出來的汙染物也較少。一個模子可以重複使用，所以成本上也划算。

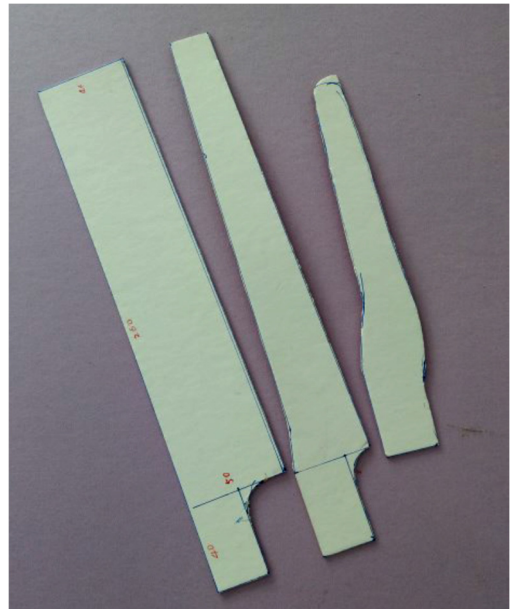


圖一、模子的尺寸與形狀。原本是一塊桐木板，桐木板上先畫出參考線，再用砂輪機磨除不需要的部分，就變成最後的形狀(下)



圖二、用桐木製成的模子。為了避免膠沾到模子上造成困擾，所以要將蠟滲入整個木模中

2. 完成木模之後，再用熱風槍，加熱木模與蠟，使蠟滲入木模當中。這個步驟不可省略。因為之後要用碳水化合物纖維與膠，在木模中製作出風車葉片，為了避免膠沾在模子上，而與模子黏在一起，所以必須在模中滲入蠟，以免黏合在一起。
3. 再用普通的厚紙板畫出風車葉片的形狀，另外畫出較原來風車葉片逐漸縮小的兩個形狀，製作三個尺規。見圖三，圖右側兩片尺規尺寸就較小，剪出這些形狀的厚紙片，做成尺規。
4. 利用這組尺規(這組尺規含三片厚紙板尺規)，在巴沙木上，畫出風車葉片不同層所需的形狀。當然最大的形狀也就是風車葉片的形狀，其它層的尺寸可以較小，一方面可以考慮幾層巴沙木結合在一起之後，就能改變葉片下弧面的形狀，以致於所形成的翼形剖面，能接近較完美的翼形剖面，同時也可以使葉片強度足以克服高速運轉時所受到的力量，同時它的重量又不會太重。再用美工刀，把巴沙木薄片上的的葉片形狀裁切下來(見圖四)。



圖三、用厚紙板製成的尺規，每一組尺規可以用來製作一片葉片所需的碳水化合物纖維片。要製作多少葉片，就用這三個尺規畫出多少組葉片所需的巴沙木薄片(一組三片)



圖四、用尺規畫出一片葉片所需的一組巴沙木薄片(三片)。因為要製作兩個葉片，所以用尺規畫出兩組圖中所示的巴沙木薄片，並且切割下來。

5. 再一層 AB 膠一層巴沙木薄片的方法層層疊上去，之後放在上蠟木模中，最後用夾具夾住(見圖五)，本文中只用三層巴沙木片，用夾具夾妥之後，迫使巴沙木的形狀與膜的形狀一致，等待 AB 膠硬化之後就成形了葉片(見圖六)。第二片葉片也依同樣的步驟完成。

當然，到底要疊加幾層巴沙木以形成專業風車葉片，可以由活動的時間以及方便性來決定。所以可以是 2 層、3 層、4 層，甚至 5 層都可以。這可根據科教活動的狀況來取捨。



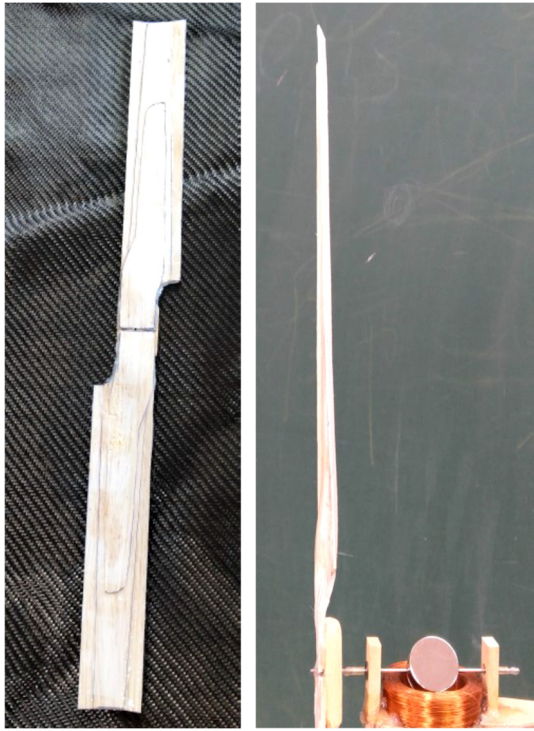
圖五、將巴沙木薄片塗上 AB 膠，黏合起來，先夾在用蠟滲透過的桐木膜子中，待兩片巴沙木薄片之間的 AB 膠硬化後，再加上第三片巴沙木薄片，也用 AB 膠黏合起來。同時用夾具將葉片每一部分與模子夾緊，葉片的形狀就會是模子的形狀，形成專業風車的葉片。



圖六、等待所有的 AB 膠都硬化之後，大約要花半小時到一小時，就可以取出一些形成專業風車葉片形狀的巴沙木薄片，也就完成了葉片的製作。圖中所示為成形的風車葉片之正反面。



6. 再將葉片用 AB 膠黏在木材製的風車穀部，就完成了整具風車(見圖七)。



圖七、以三片巴沙木片黏合的葉片，組成兩葉片風車。專業風車側面特寫(右)。

### 乙、水彩紙-白膠葉片

同樣依循以巴沙木薄片與 AB 膠製作風車葉片的過程，從製作木模、製作尺規、再用尺規，畫出組成葉片所須的兩片水彩紙片、到最後將兩片水彩紙用白膠黏合在一起，經過 3~4 分鐘之後，水彩紙會變得較為柔軟，此時再從容放入木模中，然後用夾子夾緊，迫使中間有一層白膠的兩片水彩紙完全貼合木模的形狀，形成專業風車的形狀。依此步驟製作兩片葉片之後，將中間有孔的木塊作為穀部，將兩葉片以 AB 膠黏在穀部，組合成風車。然後再結合自製的發電機或者是市售的發電機，即

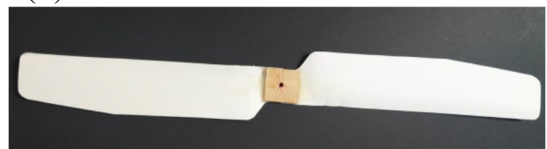
完成小型風力發電機，可進行實驗，見圖八。



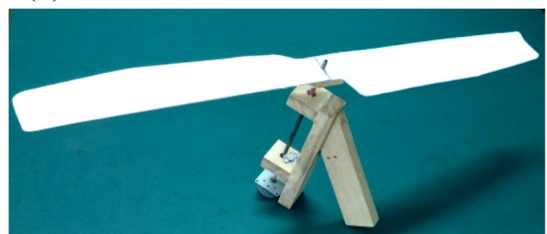
(a)



(b)



(c)



(d)

圖八、用兩片水彩紙製作葉片的過程。由上而下依序為:(a)水彩紙先裁成葉片形狀，兩水彩紙片接合面都塗上均勻的白膠；(b)稍待 3 分鐘，從容將接合後的兩片水彩紙壓在模中，並以夾子夾住，迫使水彩紙貼合模的形狀；(c)等待約 6 小時。即完成了風車葉片。以中間有孔的木塊作為穀部，將兩葉片以 AB 膠黏在穀部，即變成風車；(d)將市售發電機安裝在作者特別設計的支架把手上，以此風車驅動。手持此支架把手，可以走動的方式實驗；收

藏時，風車不必接觸桌面，較不易損壞。

### 丙、甲乙混合形葉片

作者汲取甲乙兩種製作方法的經驗，先用兩片水彩紙中間以白膠結合的方式，在木模中形成專業風車的形狀。之後再加上一層 1 公釐厚的巴沙木薄片，此巴沙木薄片依然要做成葉片有關的形狀，不過形狀略小，再用 AB 膠將木模中已經成型的水彩紙葉片與巴沙木薄片黏結在一起。以這種混成的方式，更能使葉片不容易變形，兼得甲、乙兩種方式的好處(見圖九)。



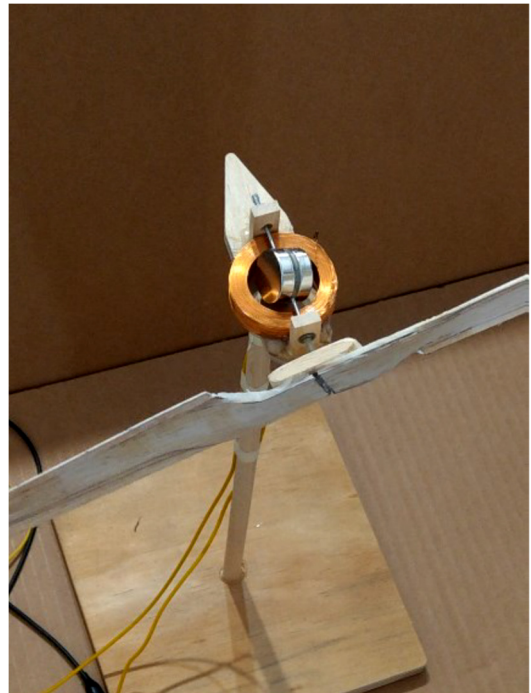
圖九、混合使用甲乙兩種辦法製成的葉片。兩層水彩紙再加上一層巴沙木片。上圖可見葉片具有專業風車特有的曲面與翼形。下圖可見水彩紙和巴沙木薄片結合在一起。

### 肆、測試

一共使用兩種發電機進行測試。一種是自製的發電機，如圖十所示；另外一種是市售的發電機，價格低於 100 元台幣。相較之下，市售的發電機造價較低，使用及準備材料也較為方便；而自製的發電機的優點是很容易開始轉動、轉速不快也足以點亮 LED 燈。

自製發電機的感應線圈，由直徑 0.3 公釐的漆包線纏繞 400~600 匝而形成，中間有磁鐵，此磁鐵由兩塊直徑 24 公釐、厚度 6 公釐的磁鐵構成，這兩塊磁鐵夾住一根直徑 1.9 公釐、長度約 10 公分的鋼棒，鋼棒兩側由內徑 2 公厘、外徑 6 公釐的滾珠軸承承載，使磁鐵可以在感應線圈中轉動，轉軸的一端與風車的穀部結合。

如何決定風速呢？簡易的方法就是在無風的室內，手持風力發電機向前行走，甚至跑步，很容易大概估計出人行走速度，也就概估出風速了。換言之，風相對於風車的速度就等於人行走的速度。



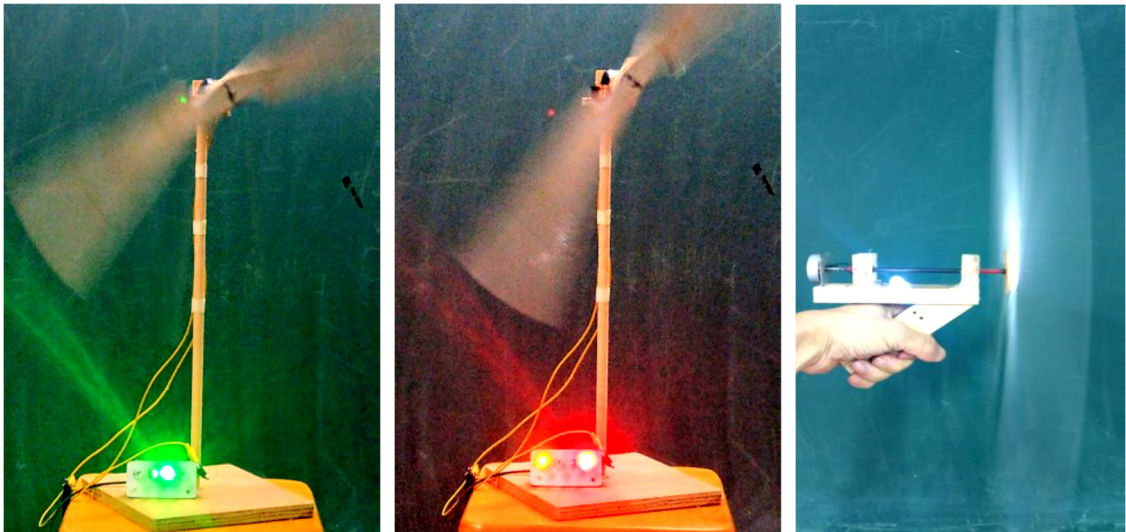
圖十、自製的微型發電機特寫。其中：兩塊直徑 24 公釐、厚度 6 公釐的鈦鐵硼超強磁鐵，夾在直徑 1.9 公釐的鋼棒轉軸上，轉軸兩端由內徑 2 公釐、外徑 6 公釐的滾珠軸承支持。0.3 公釐直徑的漆包線繞約 400~500 匝，製成感應線圈。

實驗結果顯示：以水彩紙與白膠製成的葉片所組成的風車、以及用巴沙木與 AB 膠製成葉片所組成的風車，兩者都可以在 3 公尺/秒的微風中(根據測試者行走的速度，就大約可以估計出是每秒 3 公尺)，輕易地啟動自製微型發電機或是市售的微型發電機，達到全速轉動時即可發出足以點亮 LED 燈的電力(圖十一)。

萬一風車在微風中自行啟動較為困難，可用手在開始的時候輕輕撥動一下，在持續行走的過程中風車自然會越轉越快，而使 LED 燈逐漸亮了起來。當然，風速更快(一般客廳用風扇吹出的風)，就都一定能自行從靜止啟動風車。

根據測試的結果，基於以下的理由，作者建議，在一般的科教活動中，用巴沙木薄片與 AB 膠製成葉片，組成風車，驅動市售的微型發電機發電，點亮 LED 燈的

設計。原因有四：第一，用巴沙木與 AB 膠製成的風車葉片，較不容易受空氣中水氣的影響而變形，紙製的風車葉片容易受空氣中的水分而變形，所以使用巴沙木與 AB 膠製成葉片的風車，比較容易掌握風車葉片的品質。第二，自製發電機雖然在測試中可以點亮好幾顆 LED 燈，但是實際成本昂貴，準備過程冗長，而且製作的過程也比較複雜，其實不太適合用於人數眾多的科學教育活動中。而市售的發電機，價格較低，且不容易損壞，方便使用。當然，如果參與者程度較高，作者大力推薦使用自製小型發電機。第三，因為巴沙木薄片與 AB 膠製成葉片的風車，組合市售微型發電機，在風速約 3~4 公尺/秒，就已經能夠發出點亮 LED 燈的電力。第四，白膠乾燥硬化需 6 小時以上，一般科教活動較不方便。



圖十一、巴沙木片與 AB 膠製成的風車(左一、左二)和水彩紙和白膠製成的風車(右一)測試的情形。市售微型發電機如右圖一所示。



## 伍、結果與討論

多年前，作者開始專業風車的科普教育，曾經與台東初鹿國中校長合作，在台東連續舉辦三年國中生專業風車製作競賽，台東縣將近七成的國中都派出隊伍參加，具體提高所有參與者對專業風車以及對風力發電的了解。更著有專書說明現代風車的原理與設計。

最近作者發展一系列的教具，從淺入深逐步地演示出專業風車的工作原理，在這一系教具當中，除了演示教具之外，例如：風帆車、升力裝置、可變更安裝角的風車、風車升力演示儀等等，更需要包括動手製作專業風車的教具。

在本文新創的方法中，作者考慮了複合材料的技術特點，以碳水化合纖維取代碳纖維，也就是以紙和極薄的巴沙木薄片取代碳纖維，再針對水彩紙以及巴沙木薄片的特性，搭配白膠及 AB 膠，能夠輕鬆製作出複合材料的專業風車葉片。

目前使用的一般大型風車葉片，都是利用複合材料製作的，所以推廣在本文所述之專業風車製作，非但說明了專業風車的科學原理、設計方法與製作，同時也揭示了複合材料的相關技術。雖然整個過程經過簡化，並加以廉價化，但是基本上已經揭示了複合材料製作風車葉片的要點。

平面的紙或巴沙木片要製成具有弧度的曲面風車葉片，當然並不容易，因為乾燥的紙張不具有伸縮性及變形的可能，平面要變成曲面，一定會發生皺褶或是拉扯的現象，所以作者特別利用白膠具有水

分的特性，塗在兩張水彩紙上，利用紙張吸收水分之後形狀容易改變的特性，就能夠巧妙地使得紙張在膠結合的同時，在木模中形成風車葉片的形狀。至於巴沙木薄片本身的彈性與變形的效果更好，雖然有稍微較大的彈性，但還是有很好的可塑性，用 AB 膠黏合之後，就能夠固定它的形狀，同時多疊幾層的過程當中，也考慮到增加它的強度以及翼型剖面盡可能接近較佳的翼型剖面。

除了利用碳纖和專業的膠製作複合材料之外，作者創作出此新的辦法，但也許還有更佳的組合。例如，水彩紙跟白膠也許可用另外的紙類及膠類取代，使得塑型更為容易，膠乾的速度更快，這樣就可以製作更完美的翼型，節省很多時間。目前用白膠的方法費時較多，因為要等白膠硬化的時間較長。用巴沙木與 AB 膠也可以加以改善，例如，利用更專業的膠，更容易從容塗覆在巴沙木上，並且滲入到巴沙木當中，更加強它的強度。

## 致謝

感謝科技部計畫的支持（編號 MOST108-2511-H-238-001）。

## 參考資料

- (1)<https://www.president.gov.tw/News/25026>
- (2)周鑑恆(2020)：風車的原理-設計與自製、三民書局、2020年；台北
- (3)周鑑恆(2018)：專業風車科學教育的一項進展，2018物理教育聯合會議。
- (4)周鑑恆(2017)：引擎的共同原理與現代



- 風車的奧秘，2017 年中華民國物理教育聯合會議。
- (5)周鑑恆(2001)：劉源俊，迷你風力發電機，**科學月刊**，2001 年 10 月號，第 888-891 頁。
- (7)周鑑恆：風車葉片周速比與安裝角度關係演示儀(已獲專利)。
- (7)周鑑恆：現代升力型風車之升力演示儀(正申請專利)。
- (8)周鑑恆(2018)：輕鬆學物理的第一本書增補版，民國 107 年，三民書局。
- (9)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)。
- (10)周鑑恆(2010)：繩柱風車發電系統，**物理教育學刊**，11 卷，2010 年秋季刊。
- (11)周鑑恆(2015)：風力發電科學教育之深入內容，**物理教育學刊**，2015 年 08 月。
- (12)周鑑恆(2009)：古老的風車換新裝，**國語日報科學教室版**，98 年 12 月 19 日。
- (13)周鑑恆(2016)：流體力學拾趣：飛機、帆船與風車，民國 105 年，三民書局。
- (14)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。
- (15)周鑑恆(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**，2018 年，第十九卷第一期。