

# 繩柱風車發電系統

周鑑恆

萬能科技大學 光電工程系

(投稿日期：民國 98 年 07 月 25 日，修訂日期：99 年 01 月 05 日，接受日期：99 年 02 月 01 日)

**摘要：**風力發電的商業運轉先天上有兩項主要缺點：一、地面風速較小，風能密度不高，以致於功率較大的風車尺寸都必須很大，且須裝設在塔柱上；二、地面風速變化相當大，有時甚至無風，因此一般風車的利用率，約僅為預計利用率的 19% 至 35% 左右。氣象研究顯示：高空長年吹拂強勁且穩定的風。本研究提出繩柱風車的構想，利用風箏將風車拉升至空中，使風車穩定平衡而迎風發電，產生穩定可靠且功率較符實用的電力輸出，滿足一般用電的需求。這項創作涉及電磁學、力學的重要概念以及氣象知識，啟發風力發電之創新；適合學生組隊研製，寓教於樂，經實際操作，發展出一種效果頗佳的教學模式。

**關鍵詞：**風力發電、風箏

## 壹、前言

太陽光照射地表，引起大氣的流動，於是形成風，地球獲得的太陽能約有 2% 轉變成風能，因此風力也是一種太陽能。人類利用風力的歷史極長，從在海上航行的各種帆船，到鄉間用來抽水、磨麵粉的古老風車，都是發思古幽情的傑作。

由於大量使用化石能源，使得近年來二氧化碳排放量和大氣中二氧化碳濃度都創了歷史新高，溫室效應使得地球暖化的現象日益嚴重，所衍生的氣候異常、糧食欠收、生態破壞等問題，後果堪慮；再加上各國競

相使用化石能源，造成油價節節上漲，國際關係緊張，潔淨的風力能源又再度受到重視。

風車<sup>1,2,3</sup>大致可分為揚力（lifting force）型和阻力（drag force）型兩種。考慮風能的轉換效率，現代的風力發電機大都採用揚力型風車，並且大量借助航太科技，使得風車的材料、構造等均臻於完善。揚力型風車包括達利歐（Darrieus）型的垂直軸風車和常見的水平軸式旋槳風車。台灣有廠商生產販售達利歐（Darrieus）型的垂直軸風車，詳見參考文獻 5。

然而風能的利用有其特徵：（1）空氣的流動造成風。質量為  $m$  的空氣，如果它的速

度為  $v$ ，則它的動能為  $\frac{1}{2}mv^2$ 。單位時間流過風車旋轉面的空氣體積，可以表示成風車旋轉面之面積  $A$  與風速  $v$  之乘積，這個空氣體積  $Av$  再乘空氣密度  $\rho$ ，即得單位時間流過的空氣的質量  $m$ ，此時風的動能流過風車旋轉面的功率為：

$$P_r = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} (\rho Av) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots (1)$$

風車截獲風的動能而輸出的功率  $L$  可表示為：

$$L = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots (2)$$

其中  $C_p$  為由風車性能決定的輸出係數，亦即風車得到風能之功率正比於風車的受風面積，也正比於風速的三次方。這說明風速對風力發電的重要性。

氣象研究顯示：高空長年吹拂強勁且穩定的風<sup>4</sup>。風速隨高度變化的情形，由各種實驗得知一般可用下列方程式表示<sup>5</sup>：

$$v(h) = v_1 \frac{\log \frac{h}{h_0}}{\log \frac{h_1}{h_0}} \dots (3)$$

其中， $v_1$  為高度  $h_1$  的風速， $h_0$  為風速零的高度。假若距離地面  $h_0=1$  公尺處的風速為零，高度  $h_1=100$  公尺處的風速為 10 m/s，則高度  $h=1000$  公尺處的風速為 15 m/s，忽略空氣密度的變化，1000 公尺高空的風能功率約是 100 公尺高處風能功率的 3.4 倍。(2) 更重要的是，接近地面的風速時大時小，這使得風力發電設備有時無法正常發電，閒置風力發電設備的時間因此常相當長，風力發電的不穩定性也成為實用的障礙和困擾；高空的風速也較穩定，例如：統計美國田納西州

奧克里奇上空 1.6 公里處五年間每日的平均風速，和同一地點其他高度處五年間每日的平均風速<sup>5</sup>，顯見高度愈高，風速愈穩定，由數據曲線可知風車若設在 1.6 公里的高空，風車即 24 小時連續不斷受到風速 8-10 m/s 的風吹拂，即可發出較穩定的電力，而可 24 小時不停發電。先進國家投入龐大的人力物力開發高空風能，有不少創新的構想<sup>6</sup>。

## 貳、研究動機以及涉及的科學概念

### 一、在綠能研發上的價值

針對風力發電輸出功率不穩定、風力發電設備利用率偏低、以及風能密度低、大型風車造價昂貴、風車之塔柱高度有限、成本較高、受地形與地貌限制、須設置追隨風向的裝置等缺點，本文研發利用風箏（或其他飛行器）吊掛空中風力發電機至高空的繩柱風車系統<sup>7</sup>，利用高空穩定且強勁的風力轉動空中風力發電機，產生穩定可靠的電力。

### 二、在物理學的教學方面

因為技職校院學生在學理和理論之掌握較生疏，再加上許多學生由於語文能力弱，閱讀和理解造成困難，因為數學能力不足，以致於公式或抽象的概念無法建立，課堂上較為死板、理論推導或數學公式計算的傳統教學方式，實有強人所難之嫌，於枯燥又不易理解的課堂講演之中，往往抹殺了學生的興趣，非但勤苦難成，事倍功半，有時甚至徒勞無功，學生除了沒有長進和收穫之外，還養成對學習望而生畏、排斥和恐懼學習的心理，尤其充分實證了黑板教學的失敗和無能為力。

加上大環境的改變，學生在求學期間，始終未能面對學習的困難，並加以克服，從而建立成功學習的經驗。學習成功的經驗其實是學生最重要的收穫。學習成功的經驗就像任何成功的經驗一樣，根據學習成功的經驗，學生會知道：(1)自我能力的優缺點，(2)善用自我能力的方式和整個學習過程，(3)克服挫折感，四、學習的要訣等等。但目前的技職校院的學生鮮少建立學習「成功的經驗」。缺少「成功的經驗」，學生反而養成許多不良的習慣，例如逃避學習、恐懼學習、負面自我的暗示等，更是雪上加霜。

此外，技職校院的學生程度參差不齊，各項能力在同班同學之間其實相差很大，同一班級中有程度頗佳的學生，也有素質較差的學生，教師教材的取捨成了兩難，在課堂上藉由相同的教學方式，使用單一教材，在同一進度下教學，極不合理也造成極大的困擾和許多學生的挫折感。

藉著組成專題研製小組研製繩柱風車系統，研究其原理、開發其創意、動手實做完成、加以測試、並構思未來的發展和改良，在教學上有以下之功能：(1)從實物入手，可以排除恐懼感，從做中學，動手動腦，實驗和理論並重，從實驗和從學理對該主題做全盤理解，過程寓教於樂。(2)針對的是一個實際的繩柱風車系統，而此主題涉及許多理論，甚至科目，與一般教科書常針對某個學理或理論的安排不同。(3)學習和參與的方式非常多元，例如：同儕之間互相指教傳授、依個人所需求理解的途徑自主尋找相關資料，從不同的角度，不同的程度參與學習活動，使程度不同的學生都可以受益於此教學活動。(4)培養學生探索、主動的求學態度，累積學生獨立思考，研究的能力，激發學生創新發明的企圖心和信心。

### 三、這項主題涉及物理學中幾項重要概念<sup>8</sup>

1. 流體力學中揚力、阻力的產生，以及風與風箏之相對運動與攻角之關係。
2. 靜力平衡的問題。如何利用重力、風造成的揚力和阻力、以及拉索拉力之間的平衡，使風力發電機維持穩定向前迎風。
3. 應用電磁學中法拉第定律，設計輕巧簡單可靠的發電機，及探討各種發電機原理和設計，評估其於此系統中的應用價值。
4. 熟悉電路學中二極體和橋式整流器的整流功能，電力傳輸、負載匹配等問題。
5. 了解能量轉換、功率等概念。

### 參、繩柱風車系統

繩柱風車系統由原型機(見圖 1)改良發展出來，主要由(1)風箏和(2)空中風力發電機構成。乘著強風騰空的風箏(或其他飛行器)以連接地面的拉索繫留；由拉索吊掛在高空風場中的空中風力發電機，主要的組件則包括迎風穩定平衡機構、風車、無刷



圖 1：最原始的繩柱風車

式發電機、電力傳輸裝置與負載。

### 一、風箏（或其他以拉索牽引的飛行器）

風箏的功能在於將空中風力發電機吊掛至高空。雖然在國外也有科學家，利用氣球將其他阻力型的風力發電機吊掛至高空，但氣球的浮力大小，不會因為風力變大而變大，但氣球所受的風阻力卻會因風力變大而變大，所以風力變大時，以連接地面的拉索繫留空中的氣球，會因強風吹拂，高度反而變小，並不利於利用高空強勁且穩定的風力。風箏（或其他飛行器）是利用揚力（升力）而滯留高空，風箏所受的揚力通常遠大於阻力，但揚力（升力）和阻力並有一定的

比例，亦即風速增加時，揚力和阻力同時增加，因此風速增加時風箏拉索與地面所夾的角度不會變小，風箏能保持一定的高度，而能有效將空中發電機吊掛在高空強勁風場之中，擷取風能。

### 二、空中風力發電機

#### （一）迎風穩定平衡機構

迎風穩定平衡機構的姿勢和方向由拉索拉力、重力和風力共同決定。為了使空中風力發電機以最高的效率發電，本創作巧妙利用拉力、重力和風力，使空中風力發電機在高空風場中穩定平衡，同時迎風發電。

圖 2 為空中風力發電機的機型之一。因

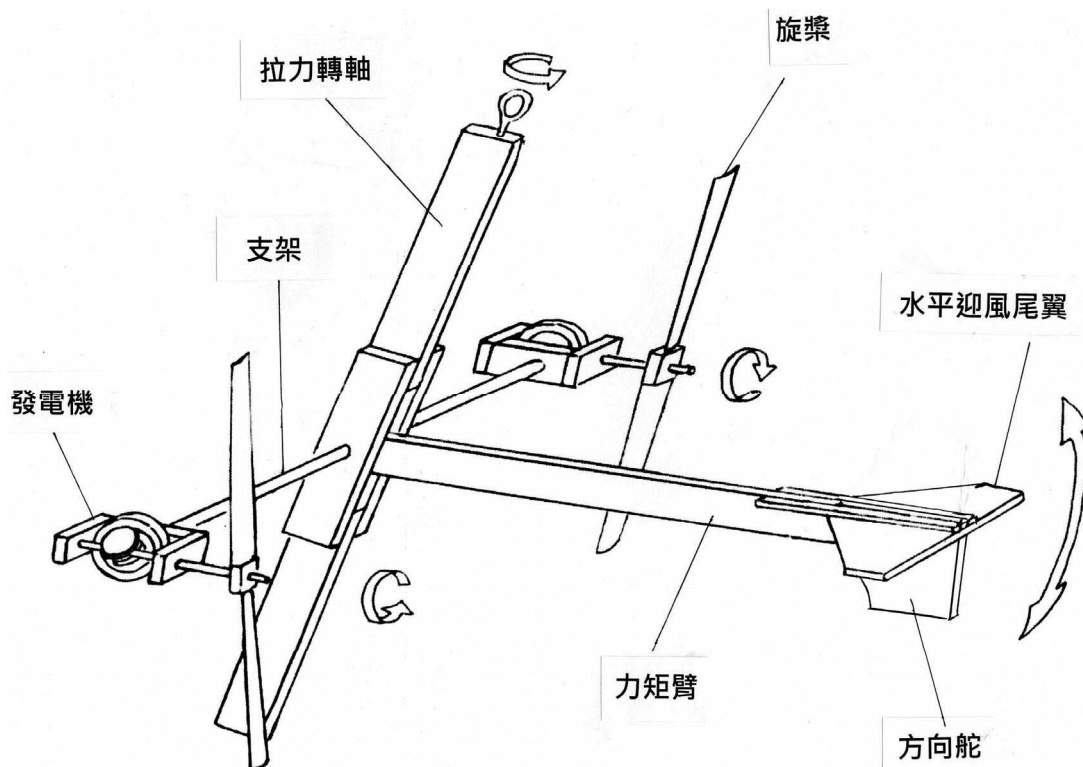


圖 2：改良的繩柱風車結構圖：拉力轉軸（圖中向右上方傾斜）的上端指向風的去向，與地面夾角會因風箏飛行的狀態而改變。兩具旋槳和發電機經由可動支架結合成一體，可動支架加裝一力矩臂，力矩臂另一端裝設水平迎風尾翼及方向舵，可動支架在拉力轉軸中可以轉動，拉力轉軸與地面的夾角改變時，水平迎風尾翼及方向舵仍可調整可動支架與地面的夾角，使旋槳迎風。

為空中風力發電機所受的外力中拉索的拉力最大，所以拉索拉住的拉力轉軸可視為固定轉軸，拉索和拉力轉軸均必然傾向下風方向，亦即拉索和拉力轉軸指向風的去向，並與地面夾某個小於  $90^\circ$  的角度，此角度會因風力大小和風箏飛行的狀態而改變。兩具風車旋槳和發電機經由可動支架結合成一體，可動支架加裝一力矩臂，力矩臂另一端裝設有水平迎風尾翼及方向舵，可動支架穿過拉力轉軸，可動支架在拉力轉軸中可以轉動，亦即拉力轉軸與地面的夾角改變時，風車與水平迎風尾翼及方向舵仍可調整其與地面的夾角。

拉索和拉力轉軸與地面夾小於  $90^\circ$  的角度，整個水平迎風尾翼、方向舵因為重力作用下垂，仔細調整重心的位置，重力經由力矩臂產生的力矩，使風車對準風向準備迎風。但重力僅產生的微弱的力矩使水平迎風尾翼、方向舵下垂（風車即對著風向，但風車轉軸仍未水平）。水平迎風尾翼受風後，因風造成的力矩經力矩臂使風車轉軸轉向水平方向，方向舵因風產生的力矩，則更加使風車穩定在迎風方向。亦即利用風力和重力產生的力矩共同穩定風車的方向，因此風力發電機能穩定迎風發電。

### （二）風車

揚力型水平軸式風車之旋槳採用 FX 72-MS-150B 翼形剖面<sup>9</sup>，從近轉軸部到翼尖旋槳的安裝角逐漸變小，使風車轉動時氣流對旋槳各部分的攻角合理，儘可能從風中擷取動能。風車的材質採用質輕又容易加工的白楊木（或桐木），以美工刀、一般木工工具和砂紙製作。

### （三）無刷發電機

自製的無刷式發電機由鈷鐵硼超強磁鐵和感應線圈構成。直徑約  $0.5\text{ mm}$  的漆包線先纏在尺寸適當的圓棒形物體上，纏完一層約

15 匝，再在外層黏上一層雙面膠，在雙面膠之上再纏另一層約 15 匝漆包線，如此重覆纏 20 層，總共大約有 225 至 300 匝漆包線。兩塊直徑  $23\text{ mm}$ ，厚  $5\text{ mm}$  的圓餅形鈷鐵硼超強磁鐵，互相吸引並夾住直徑  $1.9\text{ mm}$  的鋼棒，作為轉子，鋼棒以支架上的軸承固定，作為轉軸，使鈷鐵硼超強磁鐵得以在感應線圈中旋轉，轉軸與風車旋槳牢牢結合，由風車旋槳驅動鈷鐵硼超強磁鐵在感應線圈中快速旋轉，造成感應線圈中的通量改變而發電(見圖 3)。

### （四）電力傳輸與負載

無刷發電機發出的電力，可以簡短線路直接驅動安裝在空中風力發電機上的 LED；在風速較大的風場中同時動用空中風力發電機上的兩具發電機發電，發出的電力則先經橋式整流，經電容穩壓，再並聯供電。空中風力發電機可發出  $15\text{ V}$  以上的電壓，輸出功率足可點亮多顆 LED(見圖 4)。

## 肆、繩柱風車的實用性

### 一、優點

1. 繩柱風車系統在高空較穩定的風場中可

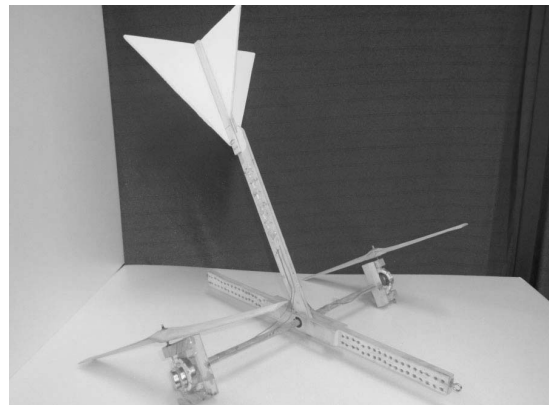


圖 3：迎風穩定平衡機構、風車、無刷發電機的實物攝影



圖 4：實驗室測試時點亮多顆 LED

終年不斷發電，發電設備利用率較佳，合乎成本，而一般在地面風場中的風力發電機組只有 19-35 % 的發電利用率；空中風力發電機發出的穩定電力更接近一般商業運轉的電力。

2. 高空較大的風速有利於設計尺寸較小的風車，使用風力發電功率更大，更具實用性。
3. 繩柱風車無需豎立塔柱，因此設置的地點有極大彈性(可以配合任何風場、或風力大的地點設置)，繩柱風車系統可架設在深海地區、偏遠山區、離島地區或其他風速大，但無法架設塔柱的地區，這點大大擴大了風力發電的應用範圍。許多風力資源豐富的地區，常因無法架設塔柱，而無法開發風力資源，但應用繩柱風車系統即可取得這些豐富的潔淨能源，供應沿海地區、偏遠山區、深海地區、離島地區以及其他區域的電力，其優勢無可取代。
4. (a)繩柱風車系統利用風箏拉升，風速大時反而可以飛的更高，Magenn 公司<sup>10</sup>利用氣球浮力，依作者專業判斷，風大時反而會因此傾斜，高度降低，所以只適用於微風。

(b)繩柱風車系統利用揚力型風車發電，可在較強的風中以較高的效率發電；Magenn 利用阻力型風車發電，效率較低。

5. 因省去塔柱和追隨風向裝置的安全考慮和所需的經費，整具風力發電系統造價較一般地面風力發電機低。
7. 因不須安裝塔柱，不會破壞地表和衍生破壞生態的問題。
8. 繩柱風車所發出的電力，也可直接提供應安裝在風箏上的大地攝影機和電訊中繼站所需的電力。

## 二、實際測試

實際測試(見圖 5)顯示：(1) 地面風速約 4.8 m/s 時，風箏拉索之仰角約在 35°至 45°之間，隨拉索長度增加而仰角增大；地面風速約 5.1 m/s 時，風箏拉索之仰角約在 35°至 60°之間，隨拉索長度增加而仰角增大，亦即風箏的高度愈高，受風的風速愈大，拉索仰角反而增大。(2) 地面風速 4.8 m/s，風箏高度約 100 m 左右，輸出電壓 15-18V；地面風速 6.2 m/s，風箏高度約 85 m 左右，輸出電壓 20-24 V，輸出功率均足以點亮上百顆 LED。

## 三、未來發展

繩柱風車不僅可作為學生專題題目，商業運轉的潛力無窮，挹注更大資源，其未來可能的改進如下：

1. 以合乎航空力學的巨大飛行翼代替風箏，巨大飛行翼並加裝襟翼或方向舵等有利於飛行翼穩定滯留空中的飛航裝置，以電腦控制拉索之張力以及飛行翼上的飛航裝置，使飛行翼穩定在高空滯留，提供拉昇風力發電設備的必要拉力；或結合空氣之浮力，在巨大飛行翼

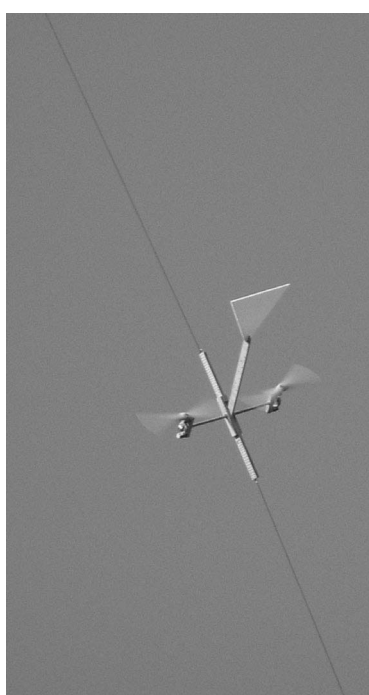


圖 5：繩柱風車系統在高空穩定發電

- 內充氦氣，使巨型飛行翼更穩定滯空，提供必要的拉力。
2. 可以串接多個風箏(飛行翼)，使風箏在高空中受風力而產生的拉力增加，並提高拉力的穩定性，以便懸掛更大型的風車、發電機和輸電器材。
  3. 一具設計精良的大型風箏(飛行翼)，在特別穩定的空域，也可以同時拉昇多個風力發電系統，以獲得更大功率的電力。
  4. 風箏(飛行翼)材質可以結合太陽能電

池，在高空擷取太陽能，太陽能搭配風能提供更穩定的電力。

5. 同一區域可設置多組繩柱風車發電系統，藉由風力田(wind farm)的方式提供電力。

## 伍、結論

### 一、寓教於樂的物理教學

作者在萬能科大光電系指導專題學生製作並測試繩柱風車，在學生參與的過程中發現：(1) 學生對於利用風箏將空中發電機吊掛至高空發電，直接點亮空中的發二極體，或利用傳輸線將電力傳輸至地面的創意，均極感興趣，在動手做中不知不覺克服學習的障礙，逐漸熟悉相關學理，寓教於樂的成績斐然。(2) 所有零組件均相當便宜、製程簡單但饒富趣味，所有加工過程都可利用一般學校常用的工具完成，非常適合一般學校學生組隊研製，繩柱風車這項作品頗有參考價值。(3) 相關學理涵蓋：靜力平衡、流體力學、電磁學、電路學，非常有益於物理教學。

### 二、頗具商業潛力的創新設計

經由不斷測試，證明繩柱風車發電裝置的各項性能，確實與創意構想相吻合。同時克服了風力發電的兩項困難：(1) 風能密度低，風速不大時，風車尺寸必須很大；(2) 風力發電之輸出時大時小，一方面不符穩定供電的要求，另一方面也使風力發電設備閒置，利用率偏低。繩柱風車發電系統是風力發電新的可行構想，使風力發電更具商業運轉的潛力，這項創作不止於物理教學的用途，也是風力發電更臻實用的進步。

## 誌謝

感謝中央氣象局周鑑本博士提供氣象方面之寶貴資料，以及萬能科技大學光電系陳元培、吳穎彥、趙偉健、楊子賢、邱宣圍等專題學生，組成專題製作小組共同參與，並以此項創作參加 2009 年全國新興能源與綠色能源競賽，榮獲金獎。

### 參考文獻

1. 牛山泉、三野正洋合著，賴耿陽譯，「小型風車設計及製造」第二章，1982 年一月，復漢出版社，書中有達利歐(Darrieus)型的垂直軸風車的資料；達利歐(Darrieus)型的垂直軸風車的資料亦可參考『新高能源科技股份有限公司』網站。
2. 林輝政編，基礎風力能源，國立澎湖科技大學出版，民國 98 年 06 月。
3. 周鑑恆，繩柱風車，民國 98 年 3 月 12 日，2009 中華民國物理教育學術研討會。
4. 蒲金標，台灣北部高空風季節演變之初步分析，「飛航天氣」第四期，2005 年 7 月。
5. D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, Fundamentals of Physics 7<sup>th</sup> edition, Wiley, June 14, 2004.
6. <http://www.caile.tw/BBS/ShowPost.asp?ThreadID=3185>
7. [http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html](http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html)
8. <http://www.magenn.com/>
9. T. Jochen, G. Robert, Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, 經銷商 Amazon (2004).
10. V. Akhmatov, Induction Generators for Wind Power, Multi-Science Publishing Company,經銷商 Amazon (2006).



## **Airborne wind turbines**

**Chien-Heng Chou**

Vanung University

### **Abstract**

Commercial wind-powered electricity has at present two inherent defects. 1) The wind speed near the ground is small, and the density of energy of the wind power is also small. The size of a wind turbine to generate adequate power must therefore be large and the wind turbine must be placed at the top of a tower. 2) The speed of the wind near the ground is generally variable, with sometimes no wind at all. The period in which a wind turbine is available to produce electricity is consequently about 19%-35% of the period that is expected.

According to meteorology, it is well known that at high altitude the wind blows strongly and stably. We propose an innovative design for a wind- turbine system. Utilizing kites, we raise twin wind turbines into the sky. The twin wind turbines, working in the wind at a high altitude, drive generators to produce electricity successfully with sufficient power.

The new design and related experiments relate to mechanics, electromagnetism and meteorology, and inspire scientists to create a new wind-powered electricity system.

Students forming a research group to build such a system benefit from science education in a pleasant manner. After we finished several such systems in our school, we developed a new teaching strategy that provides to all students opportunities to enhance their scientific knowledge.

**Key words:** wind power, kite

