

4 第四章：為城市環境設計之微型風力發電機系統

梁耀彰博士¹，梁國熙博士²，Gambarota, L.³，鄧昀¹

¹香港大學機械工程系

²香港城市大學能源及環境學院

³Motorwave Group (Holding) Ltd.

4.1 摘要

風力發電擁有巨大潛力，可廣泛在許多國家發展以減少化石燃料之使用。傳統的三葉片風力發電機常用於風能密度高的地方，小型風力發電機則專為風量低的地點而設計，例如市區及面積較小的平地等。本項研究專為風速通常較低的都市環境開發一部創新的微型風力發電機。傳統的風力發電機可直接連接到輸電網，這個系統則可連接到小型發電機和蓄電池並主要在設置系統的地方使用。微型風力發電機的優點包括低成本和低切入風速，並可靈活調節大小。這項研究進行了計算流體動力學（CFD）的模擬分析和實驗，以幫助評估設有不同配置的個別微型風力發電機的性能，以及多個微型風力發電機系統的發電特性。關鍵詞：發電，空氣動力學，功率係數



圖 4-1 梁耀彰博士與微型風力發電系統

4.2 簡介

過去十年，全球暖化和氣候變化的問題推動全球發展可再生能源。到目前為止，有超過八十個國家已設定其可再生能源之長遠目標並已制定相關的可再生能源政策，以減少其碳排放量[REN21]。表一顯示了世界主要國家通過的可再生能源目標。這些數字顯示我

們在未來十到十五年將會擴大使用可再生能源。

| 國家 | 可再生能源目標 | 年份 |
|-----|---------|-------|
| 歐盟* | 20% | 2020年 |
| 美國 | 25% | 2025年 |
| 中國 | 15% | 2020年 |
| 澳洲 | 20% | 2020年 |
| 俄羅斯 | 4.5% | 2020年 |
| 日本 | 1.63% | 2014年 |

*基準目標（歐盟各國或有所不同）
[2011年維基百科]

表 4-1 主要國家的可再生能源目標

在各種可再生資源中，風能可作為替代燃煤發電廠發電的主要驅動力，故從短期和長期來看，許多國家把風能視為最可快速發展的可再生資源。由二零零一年至二零一零年間的十年內，全球風力發電裝機容量由約 20 GW 提高到 200 GW（GWEC）。多年來，風能技術在許多新的層面上發展，例如空氣動力學，結構力學和機電工程學。另外，主要有大型和小型兩個發展方向 [Jureczko et al. 2005 年]。風力發電機的主要趨勢

在於在風能密度高的海上或陸上風力發電場實行大規模的風力發電系統。在這些系統中使用的風力發電機由幾百千瓦至幾千千瓦不等，而車葉直徑則由幾十米至逾百米不等。

另一方面，在低風速地區和擁擠的城市地區，由於空間限制和低切入風速（風力發電機產生電力的最小風速）之要求，微型風力機或小型風力機更為適合。車葉直徑小至一米或以下的小型風力發電機通常可以獨立設置在房屋和建築物的頂部及平地上。為了可以更靈活使用，這種風能發電機通常會直接連接電池或電池系統，而非直接連接到輸入、電網上。由於其功率不大（通常少於一千瓦），因此其基本成本也不是很高，所以許多家庭均可負擔使用。這種小規模風力發電機近年來受到重視，已進行了許多研究工作，主要是為了優化其性能及減低成本。

研究使用了各種理論方法，如空氣動力學，以確定風速在水平軸風力發電機（HAWT）葉片所起之作用。這次研究採用了計算流體動力學（CFD）技術評估特別設計的低成本小型風力發電機的性能，該技術也在風洞中進行物理測試驗證（Deng 2008 年）。

4.3 創新的微型風力發電機設計

正如圖 4-2 所示，研究中的風力發電機乃是基於拖動裝置的微型風力發電機。不同於傳統的雙葉片或三葉片風力發電機，這個微型風力發電機採用風扇型而非機翼型葉片配置，從而產生有用的功能，文獻指出這設計可提高微型風力發電機的能量功率[Hirahara et al. 2005 年]。

沿以上之側視圖可確定在葉片長度上的葉片厚度分佈。許多大型風力發電機從根部到尖端都會使用堅硬的線性錐形葉片[Habali & Saleh 2000 年]。由於微型風力發電機的葉片不是很長，故設計葉片的厚度一致。扭曲之葉片可在不同風速的情況下獲取較高的力矩，這與大部分風力發電機相似。圖 4-2 可清晰地展示渦輪葉片的扭曲度。微型風力發電機的葉片扭角是這次計算和優化工作中的一個關鍵參數，並與微型風力發電機的葉片圓心角有緊密的關係。典型的微型風力發電機的重要幾何參數見於表 4-2。

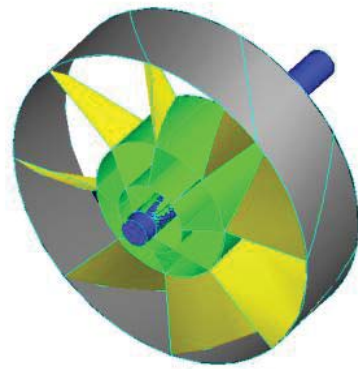


圖 4-2 研究之微型風力發電機渦輪

這個微型風扇型葉片風力發電機設計的優點是可方便地為其設置一個終端電力需求的系統，該系統則包含多個通過

其外齒輪連接在一起的渦輪（見 4-1 部分）。這種葉片和渦輪設計可透過注射成型大規模生產；因此，該系統的成本僅約為傳統風力發電機系統設計的三分之一。

| 說明 | 数值 |
|--|--------|
| 微型風力發電機渦輪直徑 | 234 毫米 |
| 葉尖圓的半徑 | 115 毫米 |
| 葉根圓的半徑 | 50 毫米 |
| 葉片圓心角（前視圖中葉片兩邊之間的角度）（ α ） | 30° |
| 渦輪葉片的扭角（葉尖弦線及葉根弦線兩者之間的角度）（ β ） | 21° |
| 葉片的濶度（Z） | 60 毫米 |
| 葉片數目（ N_B ） | 8 |
| 葉片實積率（ Σ ）（ $\sigma = N_B \times A_s / \pi R^2$ ） | 52.2% |

表 4-2 典型的微型風力發電機的幾何參數。

4.4 設計微型風力發電機的考慮因素

渦輪葉片圓心角的效果以及渦輪葉片數目等許多因素會影響風力發電機的功率係數。

這次研究已按 CFD 技術使用各種參數進行若干次模擬分析，獲知下列特性：

- 微型風力發電機在不同風速下的最大角速度；
- 當其靜止以及在不同風速下以一定角速度轉動時，力矩對微型風力發電機所起之作用；
- 在不同風速下由微型風力發電機產生的機械能。

這篇論文呈示並討論若干實例以作論證。更多資料可在鄧昀的文獻中找到 [Deng 2008 年]。

4.4.1 葉片尖端速度與風速比率（TSR）

圖 4-3 展示微型風力發電機渦輪功率係數（ C_p ）和 TSR（ λ ）之間的計算值關係。結果發現，小型多葉片風力發電機通常以介乎零至二的 TSR 運行，而大型的雙葉片或三葉片風力發電機以高於四的 TSR 運行 [Johnson 1985 年]。如上

所述，目前的三十度葉片圓心度微型風力發電機的 TSR 介乎零至一之間，非常符合傳統小型多葉片風力發電機的 C_p - λ 特性。此外，所研究的微型風力發電機之最大功率係數顯示，從風的動能轉換為機械能的功率僅約為 12%。

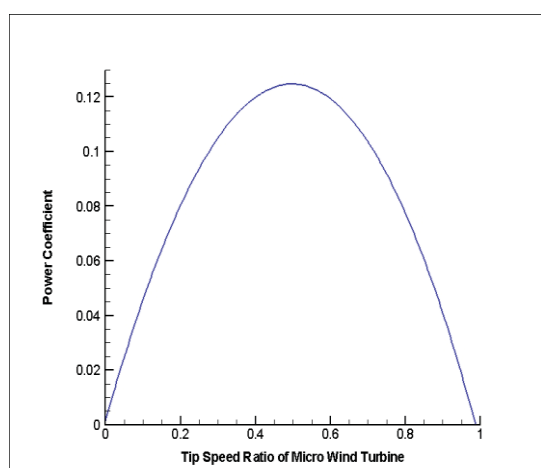


圖 4-3 微型風力發電機的 C_p - λ 特性。

4.4.2 葉片圓心角的效能

為了比較不同葉型的渦輪性能，會按照葉片圓心角將其分為幾個系列。各系列的葉片數目不一，由三葉片至渦輪的葉片面全為葉片投影所覆蓋的數目不等。

至於三十度圓心角葉片，葉片數目由三至十二片不等。正如圖 4-4 所示，可

觀察到八葉片或以上葉片的微型風力發電機的最大能量輸出並無顯著差異，而其最大能量輸出則遠高於使用較少葉片發電機的能量輸出。三十度圓心角葉片發電機的最佳功率係數約為 12.5%，而八葉片至十二葉片配置的最佳尖端比率（TSR）約為 0.5。另外，值得注意的是，這些數據顯示，不同葉片數目的微型風力發電機的最大 TSR 都是差不多，介乎 0.5 和 0.6 之間。

為了確定最理想的風力發電機葉片設計，需要考慮啟動發電機所需的力矩（扭力）。產生的力矩越大，越容易克服發電機的靜態平衡。圖 4-5 同樣顯示，八葉片或以上的微型風力發電機所產生的力矩沒有明顯差異。另一方面，一個較少葉片的渦輪產生較小的力矩，因而不利於能源轉換。

其他葉片圓心角的結果可參閱相關的文獻[Deng 2008 年]。就特定的葉片圓心角而言，更多葉片一般會產生較佳的性能。不過，完全佔據渦輪轉面不利於微型風力發電機的能量輸出和起動效果。另外，由於圓心角大於九十度的葉片的起動性能欠佳，因而不推薦應用於微型風力發電機的設計上。

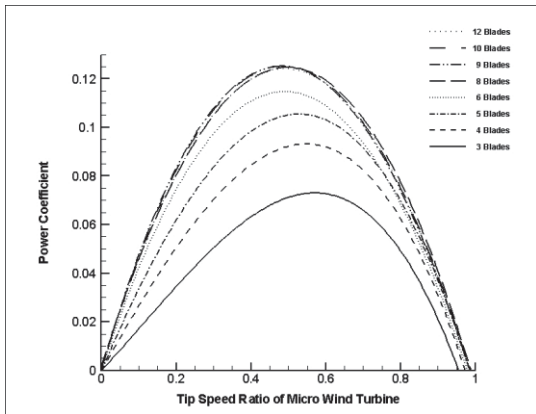


圖 4-4 不同葉片數目的電機功率係數
(三十度葉片圓心角)

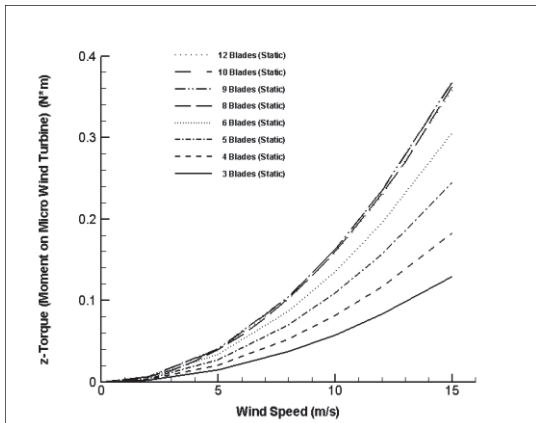


圖 4-5 不同數目葉片量度的發電機啟動力矩
效果。
(三十度葉片圓心角)

4.4.3 葉片實積率之效果

表 4-3 列出微型風力發電機的葉片實積率及其最大功率係數。這些數據顯示高葉片實積率的渦輪功率係數一般高於較低葉片實積率的渦輪。

| 葉片實積率 | 葉片圓心角 | 葉片數目 | 最大功率係數 |
|-------|-------|------|--------|
| 19.6% | 30° | 3 | 0.073 |
| 26.1% | 40° | 3 | 0.103 |
| 29.4% | 45° | 3 | 0.120 |
| 32.6% | 30° | 5 | 0.105 |
| 34.8% | 40° | 4 | 0.131 |
| 39.2% | 45° | 4 | 0.149 |
| 43.5% | 40° | 5 | 0.145 |
| 47.0% | 72° | 3 | 0.170 |
| 49.0% | 45° | 5 | 0.163 |
| 52.2% | 80° | 3 | 0.188 |
| 58.8% | 90° | 3 | 0.186 |
| 62.7% | 72° | 4 | 0.189 |
| 65.3% | 60° | 5 | 0.193 |
| 69.6% | 80° | 4 | 0.203 |
| 71.8% | 110° | 3 | 0.185 |
| 78.4% | 72° | 5 | 0.191 |

表 4-3 微型風力發電機的葉片實積率及其最大功率係數。

根據上表，八十度葉片圓心角的四葉片渦輪錄得最高的功率係數。不過，由於其相對較弱的起動力矩，這並非微型風力發電機的最佳配置。圖 4-6 顯示的是在靜止狀態下那些高功率渦輪所產生的力矩。在這些功率係數高於 0.18 的渦輪之中，帶有六十度葉片圓心角五葉片轉子可說是最佳的微型風力發電機裝置。相對於原來的微型風力發電機裝置（三十度葉片圓心角及八葉片），設有六十度葉片圓心角五葉片渦輪的最大功率係數由 12.5% 提升至 19.3%。

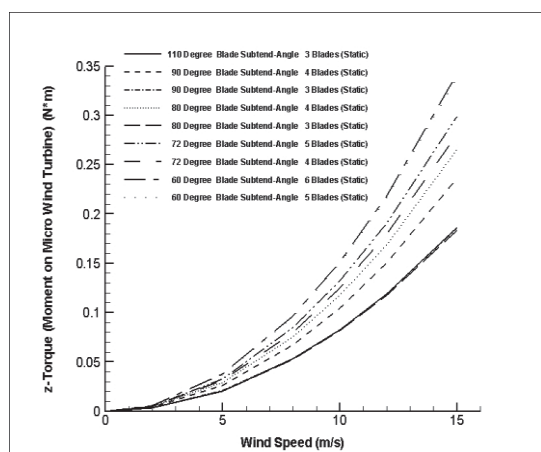


圖 4-6 若干高功率係數微型風力發電機的啟動效果。

4.4.4 微型風力發電機系統

前文描述了單一微型風力發電機渦輪的性能，即使在高風速的情況下只可產生的功率是有限的。為了提高發電量，多個渦輪可以通過其外部齒輪連接在一起，因而可透過增大捕獲的風量而產生更大的能量（圖 4-7,4-8）。為了找出所產生的能量和連接在一直線的渦輪數目之間的關係，在風洞進行了一項實驗。表 4-4 列出隨著渦輪數目增加而提高的能量（按風速為每秒六點五米計算）。

| 數目(n) | 提高功率(%) |
|-------|---------|
| 1 | 0 |
| 2 | 132 |
| 3 | 275 |
| 4 | 436 |
| 5 | 525 |

表 4-4 能量隨著渦輪數目增加而提高（按風速為每秒 6.5 米計算）

據觀察所得，能量隨著渦輪數目增加而提高。不過，結果發現能量並非直線增加，特別是數目超過五個的，而超過十個渦輪數目並沒有增加能量[Leung 2009 年]。因此，為了令發電量增加至最佳效果，建議不應將超過十個微型風力機渦輪一起連接於同一個發電機上。



圖 4-7 微型風力發電機系統的風洞測試

| 風速 (米 / 秒, m/s) | 功率 (瓦特) |
|-----------------|---------|
| 2 | 0.4 |
| 3 | 1.3 |
| 4 | 3 |
| 5 | 6 |
| 6 | 10 |
| 7 | 17 |
| 8 | 25 |
| 9 | 36 |
| 10 | 50 |

表 4-5 八葉片微型風力發電機在不同風速下獲得的功率

表 4-5 顯示了一個八葉片渦輪在不同風速下計算所得的發電量。根據觀察所得，低風速的情況下也可產生能量，而在風速較大時能量會迅速增加。如若干數目的渦輪連接在一起，則可產生足夠的電能使用。

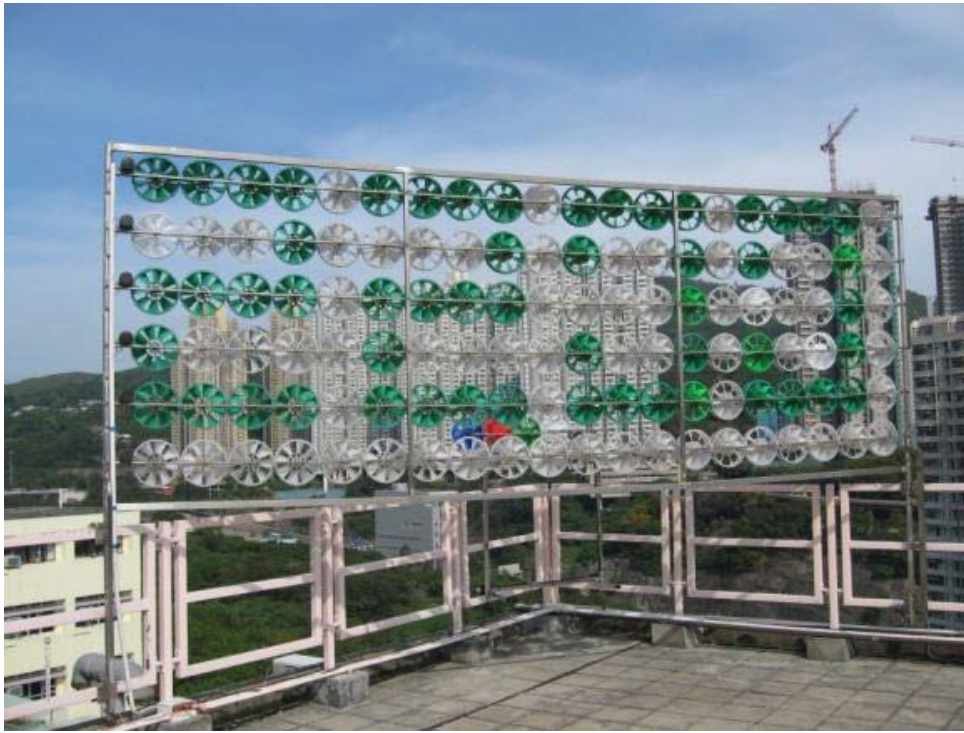


圖 4-8 微型風力發電機系統測試

4.5 結論

本研究採用 CFD 方法分析特別設計的微型風力發電機的性能變化。結果顯示，高葉片實積率風車渦輪的性能優於低葉片實積率風車渦輪。優化的結果顯示，微型風力發電機渦輪的較佳葉片實積率高於 50%。通過 CFD 的方法分

析，結果發現帶有更多葉片的渦輪可產生較高的力矩。結果，多葉片的渦輪有利於微型風力發電機系統。考慮到有關的功率係數和起動效果，結果發現擁有六十度葉片圓心角及五葉片渦輪之微型風力發電機是最理想的發電機裝置。其最大功率係數遠高於初步設計的發電機渦輪（三十度葉度圓心角及八葉片）。

4.6 參考文獻

1. Deng Y., 2008. MPhil thesis, Design Optimization of a Micro Wind Turbine using Computational Fluid Dynamics. The University of Hong Kong, 169 pp.
2. Duquette, M. M., Visser, K. D., 2003. Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines. J. Solar Energy Engineering, November 2003, 125, 425-432.
3. GWEC, Global Wind Energy Council (2011) www.gwec.net
4. Habali, S. M., Saleh, I. A., 2000. Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root. Energy Conversion & Management 41, 249-280.
5. Hirahara, H., Hossain, M. Z., Kawahashi, M., Nonomura, Y., 2005. Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes. Renewable Energy 30, 1279-1297.
6. Johnson, G. L., 1985, Wind Energy Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Leung, W.K., 2009, Micro-wind Turbine, BEng dissertation, the University of Hong Kong, 71 opp.
8. REN21 (2010). Renewables 2010 Global Status Report, <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/tabid/5434/Default.as>
9. Wikipedia (2011). http://en.wikipedia.org/wiki/Mandatory_renewable_energy_target