

排除廢熱提升發電效率

Removing Waste Heat, Improving Efficiency of Power Generation

丁致良*

Ting, Juhi-Lian Julian*

摘要

本研究引介兩種藉由輻射散熱提升發電效率的方法：第一是利用特殊材料提供藉由熱轉換機械能的發電系統的散熱方法；第二是利用奈米顆粒提供分頻利用太陽光源的方法。本文並藉由細菌光合作用系統提供分頻奈米顆粒的具體解決方法。

Abstract

Two methods to remove unnecessary heat through radiation to increase the efficiency of power plants are proposed: Firstly, special materials are used to improve the heat radiation for those power plants that requires heat conversion is mentioned; secondly, a frequency-separation method using nano-particles to increase the efficiency of solar cells is introduced. We propose also the best nanoparticle shape for the second method through light harvester designs of bacteria.

*德豐研究院，台中市 (De-Font Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.)
E-mail: tingjulian@gmail.com

關鍵詞 太陽能電池 (Solar Cell)、奈米天線 (Nanoantenna)、散熱(Heat dissipation)

壹、前言

除了風力發電、太陽能發電、水力發電以外，絕大多數的發電方式，如核能發電、火力發電都必須產生熱能以後，轉換為機械能再產生電力。熱能轉換成機械能的過程是熱力學上著名的卡諾機問題。熱機的效率由高、低兩個熱庫 (heat reservoir) 的溫度差決定，且熱機必須排放廢熱。高溫熱庫是系統特性很難改變，因此低溫熱庫的溫度影響熱機的效率甚大。而低溫熱庫的溫度就是由散熱問題決定。

無可否認的散熱問題對提升電廠效率非常重要。通常發電系統靠水冷卻，例如核能發電，排放溫度就是周遭海水溫度。但是水是一個有限的資源，因此核能發電廠必須建在水資源容易取得的地方，例如海邊。而且水的循環通常需要幫浦消耗部分能源。氣冷通常靠風扇，此種系統通常很貴，而且也需要消耗額外的電力。更重要的是，無論使用哪一種方法，排放廢熱，例如可能造成珊瑚礁死亡，都會遭到環保人士的抗議。還有，氣冷這種系統的排放溫度就是周遭氣溫。不巧的是，在夏天對電力需求極高時，排放溫度也變高，因此效率必然更差！

太陽能電池也有散熱問題。太陽能電池的標準工作溫度大約是 25°C 。此後溫度每提高 1°C 效率就會降低 $0.4\text{-}0.5\%$ ^[1]。問題是太陽能電池吸收進來很多無用的能量，必然會增加太陽能電池的溫度。如何處理這些不必要的能量是一個大問題。

貳、被動式散熱系統

除了本文開宗明義提到的散熱方式以外，有沒有別的方法可以達成散熱的要求，又能夠不需要消耗額外的能量？

熱力學、普通物理甚至在高中物理中我們還學過，熱傳遞有三種方式：傳導、對流及輻射。本文一開始所說的水冷、氣冷靠的是傳導、對流。如果這兩個方式都嫌不好，就只能採取輻射的方式散熱了。

輻射是一種電磁波。能增強電磁波吸收或放出的設備我們稱為天線。問題是甚麼是天線？即使是電機系畢業的，很多人其實一知半解。天線是藉著特殊的幾何形狀來增強接收或發射的訊號；至於材料可能還只是次要配合的因素。如果一個系統放出的電磁波多於吸收的就能散熱。但是輻射出去的熱量如果被周遭空氣吸收，空氣還是會變得很熱！

幸運的是，大氣的吸收光譜剛好有一個缺口 (稱為 infrared window)。缺口的波長大約是 $8\text{-}13$ 微米；在紅外光譜範圍內。這件事從事衛星遙測的人都知道。如果輻射出去的波長在這個範圍內就可以直接進入外太空；不會使周遭空氣變熱。而且這個範圍與室溫下的熱輻射波長範圍相同 (300K 時的黑體輻射頻率)。

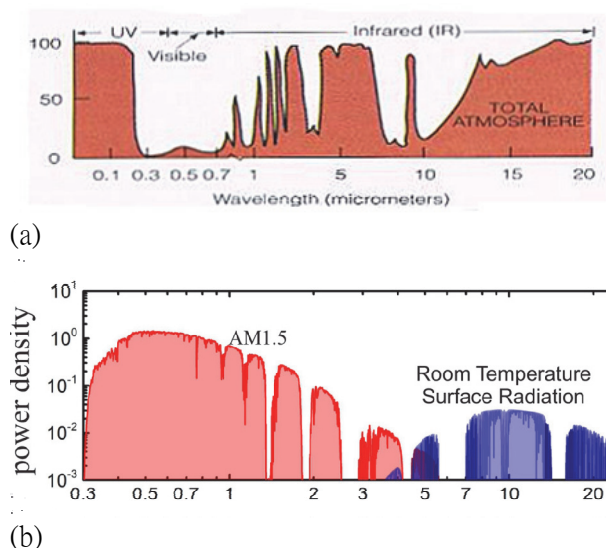


圖 1 (a) 大氣的吸收光譜^[2] (b) 熱輻射範圍^[3]

因此我們的目標就是設計一種能夠在吸收物體表面溫度後放出特定波長電磁波的裝置。

2017 年科羅拉多大學的幾個中國人就用玻璃聚合體製造了一種薄膜達成目標^[3]。不過，

他們並沒有將薄膜當成天線設計；也就是沒有考慮它的幾何形狀。他們只是找了某一種在吸收能量激發後能放出特定波長的分子（聚合物）。因此他們的研究的確還有改善的空間。這個方法還可以用於其它機械的散熱。

參、光學天線

太陽能電池的散熱問題其實最常被人忽略。太陽能電池發展至今已經多年，各種技術都已經相當成熟，國內外各大廠都已量產。在這種情況下希望再提高太陽能電池效率並不容易。從材料方面改善，就如同高溫超導的研究一樣，是一種煉金術士的手法。要將效率提高1%都非常困難。更何況這個效率還有其理論極限（稱為 Shockley-Queisser 極限）^[4]。

另一種改善太陽能電池的效率的方法也是將太陽能電池當成天線來考慮，藉以改善太陽能電池的吸收效率。比較特別的是現在考慮的是光學天線，而不是 20 世紀前半發展的 RF 天線或 20 世紀中葉發展的微波天線。

天線理論中，如果一個天線的性能要好，它的大小必須與波長匹配；不能小於四分之一個波長。如果小於這個數字，通常只能做接收天線用。但是光學天線卻是在遠小於波長的範圍工作。這些理論是最近二十年才發展出來的^[5]。

因為它的大小，光學天線又稱為奈米天線。我們考慮的天線，如圖 2，大小大約就是十個奈米左右（詳細請見第肆節說明）。這方面的研究的確早就有人在做。很多商用軟體，如 COMSOL、HFSS、CST，都有提供這方面的計算功能。不過大多數研究並不是朝著接收太陽光著手，而且早期大多採用導體或者近似於導體的材料來做。以導體來做奈米天線時，表面在強光照射下會變成電漿態，近年逐漸有人採用絕緣體。但是通常絕緣體的介電常數也有限制！能找得到的最好絕緣體大致就是陶瓷材料。

你說我們的太陽能電池就是一片平板，哪有甚麼幾何形狀？各位可以看看你的手機天線，的確就是一片平板。你說天線要用銅、鋁等導體來做。各位回去把你的手機拆了，看看它用甚麼材料做？這是近代先進的天線設計觀念。

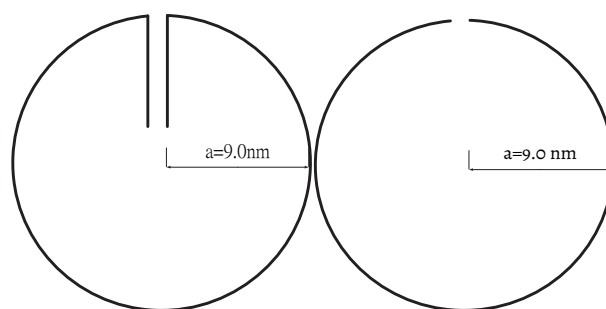


圖 2 環形天線

肆、細菌受光體

生物界也運用奈米天線。光合作用的葉綠體就是一個奈米天線。我們希望從生物界學到大自然經過數百億年演化後的精髓。

自然界能進行光合作用的生物有植物、藻類及細菌。這三類生物的光合作用機制並不太一樣；尤其細菌與其它兩類截然不同。植物與藻類的光合作用機制都非常複雜，但是細菌的卻非常簡單。這是 X 光結晶學家選擇從細菌下手的原因。

人類對光合作用的研究開始得很早，至少 20 世紀初就有。但是大致只能進行到細胞層級。高中生物課本也只講到這裡。由於內部結構太小，無法直接觀察，化學家們就使用光譜學，藉由激發內部分子放出的光來做推論；正如同物理學家製造加速器以觀察原子核內部結構一般。如今我們知道的絕大多數光合作用機制都是來自光譜學。

植物、藻類甚至細菌的受光體 (light harvestor) 大致都是由葉綠素 (chlorophylls) 所組成的。葉

綠素是一種長形的分子，如圖 3。葉綠素的分子尾巴長鏈中交錯出現的雙鍵結構使它成為自然界中少數能與光產生強烈交互作用的分子；這也是多數化學家企圖模擬的對象。

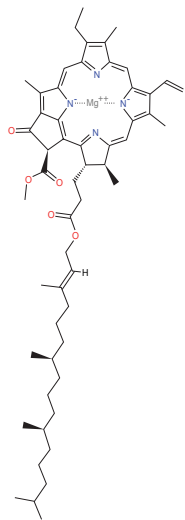


圖 3 典型葉綠素分子結構

葉綠體的結構化學家很早就知道了。但是，由於 X 光儀器解析度的限制，細菌受光體的原子結構一直到 1995 年才由 McDermott 等人解得^[6]。此後有多種細菌受光體結構陸續被解出來都大同小異。

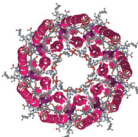

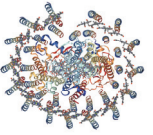
表 1 列出幾種已知細菌的受光體結構。這種受光體形狀大致都是圓柱形的，比較精確的說法應該是鈴鼓形或者救生圈形。這個圓圈由大約 9 到 13 個模組組合而成；所以用鈴鼓來形容似乎最為恰當。每一個模組又由幾個葉綠素像密麻花一樣絞在一起組成；通常還會加上一些胡蘿蔔素或者固定用的蛋白質。

其實這些受光體還分為兩類：表 1 前兩個受光體稱為第二類受光體 (light harvester 2, 簡寫成 LH2)，它們只是外圍的媒體，負責接收及傳遞；另外，如表 1 第三圖 1PYH，為第一類受光體 (簡寫成 LH1)，它的中間有一個反應中心 (reaction center, 簡寫成 RC)。具備反應中心的 LH1 才是真正完整的天線；可以將所收到的光能轉換成為化學能。

反應中心的中央有一個特殊的鐵離子存在；

它是靠配位鍵與周遭的原子結合。人們對反應中心結構的了解比對整個受光體的了解早很多。1984 年 Deisenhofer 等人解出了 Rhodospseudomonas 細菌的反應中心結構，次年就獲得了諾貝爾獎^[10]。

表 1. 幾種細菌受光體均具有對稱性結構。更多類似結構可在 PDB(protein databank)中找到。

Protein	PDB ID	對稱性 symmetry	cartoon
LH2 B800-850 from Rhodospseudomonas acidophila ^[7]	1NKZ	C9	
LH2 B800-850 from Rhodospirillum molischianum ^[8]	1LGH	C8	
LH1-RC from Rhodospseudomonas palustris ^[9]	1PYH		

1PYH 如果從側面看，如圖 4。在環形缺口處通常會有一個稱為 PufX 的蛋白質存在。PufX 的功能對研究光合作用的人來說，即使不是未知也是存在爭議。

更有趣的是，實驗上有時候會觀察到 S 型的受光體。這到底是新型態的受光體還是既有型態轉換而來的也令學化學、生物的人非常困擾。我提出過一個理論認為這是兩個 O 形放在一起的結果^[11]。

對學化學、生物的人來說，這個系統已經很簡單了。但是對學物理的人來說，還是很複雜。我們當然會希望更進一步簡化，但是卻必須保有原來最基本的特性，以便了解它的特性。

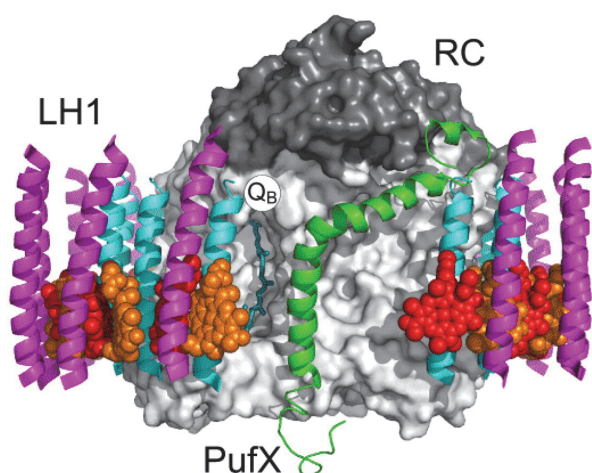


圖 4 1PYH 側視圖

我用圖 2 的環形天線來近似 LH1/LH2；圖 2 左邊的看起來雖然比較像 LH1 但是對學天線的人來說，其實與右圖並無其它差異，除了因為周長不同導致共振頻率不同以外；但是學生物或化學的人卻喜歡左邊那個有尾巴的圖，因為實驗上觀察到的確有一個稱為特殊對(special pair)的尾巴直通反應中心。

十九世紀末，Hertz 進行電磁波實驗就是用這種天線；如今在絕大多數電磁學課本或者天線教科書中也都有討論。這個天線有一個開口，對學電磁學的人說來一點都不奇怪，當然要有開口。沒有這個開口，訊號沒有辦法輸入；或者說接收到的能量也沒有辦法拿出來。但是 LH1 這個開口的功用卻困擾學化學或生物的人很久。

我們發現這個簡單的模型能解釋絕大多數觀察到的現象。在這個模型中，天然受光體的幾何特徵，尤其是那個缺口，自動就會出現或者說它必然會存在，而且模型中不需要人為的放入任何參數^[11]。這是我的模型不同於他人的重要地方！

我們的模型可以輕易的解釋：

- 反應中心內的鐵離子是促成單向接收天線不可逆的重要元件；
- 1PYH 分子的開口等於是環型天線的缺口，這是能量的出口；
- 開口處可以插入其它的介電質以調節天線的共振頻率，正如 1PYH 分子在此處存在著 PufX/W 的功能一般；
- 分子形狀必須近似救生圈型狀，但是不可完全

對稱，如此才能促成電磁波的吸收與輻射；

- 奈米天線必須採用非導體材料，葉綠素的確是非導體；
- 由於採用非導體材料，可以確保分子在強光照射下不會受損；
- 分子會形成 S 型雙體的原因也是為了減少光照強度，證明其的確具有天線的特性；
- 分子由模組化的葉綠素組成也符合天線設計的條件；

等等。我還能解釋很多光譜學上觀察到的現象。能夠解釋這些現象證明我的模型正確。我更提出了一個實驗有待生物學家驗證^[11]。

要如太陽能電池板般矩形的平板光學天線自然界中也有。有一種能夠進行光合作用的古菌(Haloquadratum Walsbyi) 就是扁扁的方形^[13]。

了解了細菌如何進行光合作用，我們可以製造人造的受光體。這種研究更可以用於製造無線充電設備及各種感應器。現今的無線充電設備其實只是一個分離式的變壓器而已；人們並沒有將線圈當成天線來考慮。

伍、仿生受光體

太陽能光譜大致如圖 5 中紅色部分。但是太陽能電池的轉換效率則是圖中黑線部分。明顯的，只有中間部分效率較好。大約 1250 奈米以上的紅外線部分，效率更降為零。效率差的部分，多餘的能量都會變成熱，增加太陽能電池的溫度而降低其效率。

2017 年有一組澳洲的研究團隊提出一種方法將太陽光分類利用的想法^[1]。他們設法將太陽能光譜中太高頻或者太低頻的能量過濾掉，變成水中的熱能。

他們提議在太陽能電池前方加上一個太陽能熱水器。水本來就能吸收紅外線。但是這還不夠。於是他們在水裡面加入了一些奈米顆粒。他們稱這是一種濾光器。吸收到水中的熱能就

變成太陽能熱水器的熱能；當然這種熱水不能直接拿來使用，因為裡面有奈米顆粒，還必須經過熱交換後才能使用。當熱水溫度達到 100°C 以上時甚至還能夠再用來發電。

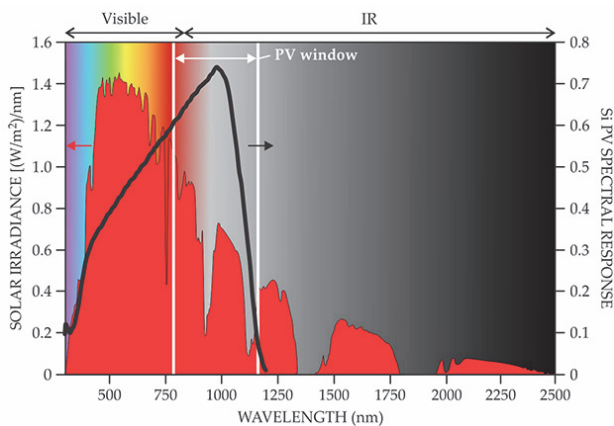


圖 5 太陽能光譜 (黑線表示太陽能電池能利用的部分。明顯的太高頻或太低頻都無法為太陽能電池利用。兩條白線中間是太陽能電池可以有效利用的範圍。)

問題是他們完全是依靠實驗嘗試錯誤得到結果的。他們根據上個世紀研究 RF 天線所得到的直覺，認為製造天線需要使用(優良)導體，因此選用銀製造奈米顆粒。但是卻發現奈米銀在日光照射下非常容易熔化。於是他們在銀的外面鍍上一層絕緣體。事實證明，他們並沒有找到最適合的奈米顆粒；材料不適當、形狀也不恰當。

澳洲這組人所需要的奈米顆粒要能將太陽能光高頻及低頻的部分吸收。因此這個奈米顆粒需要兩個可以調節的參數才能決定兩個頻率。

根據我們研究細菌光合作用受光體的結論，我們知道必須使用絕緣材料而不是導體來製造這種奈米顆粒，而且形狀必須是近似於甜甜圈形狀^[11, 12]。今日竹科切削晶圓的廢料頗適合製造此種奈米顆粒。至於甜甜圈的大小、內徑及外徑，則需依照操作頻率設計。

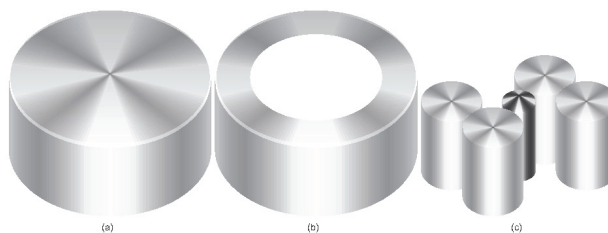


圖 6 幾種近似天線：(a) 用柱狀體模擬細菌受光體；(b)用環狀柱來模擬細菌受光體；(c)用分離的環形天線來模擬細菌受光體。

因此我們提出更進一步的理論，將圖 2 中無限細的環形天線變成有限寬度，如圖 6(b)。這個形狀更接近圖 2。有限寬度環狀體有內徑與外徑兩個參數，這與無限細的環型天線只有一個半徑完全不同。實際上觀測到的細菌受光體的確也有兩個吸收峰，如圖 7^[14]。

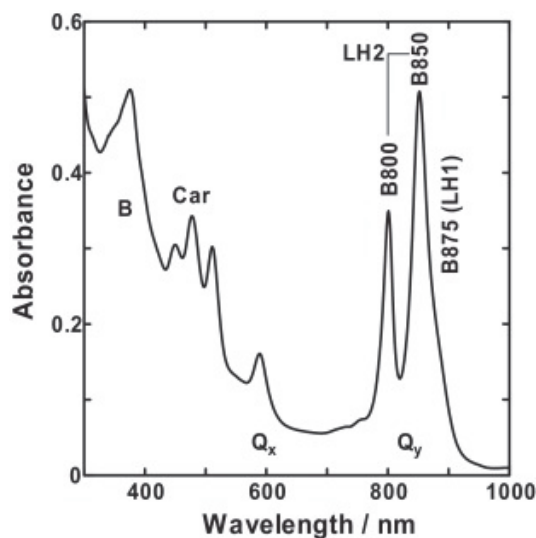


圖 7 細菌受光體的典型吸收光譜^[14]

其他人的研究顯示，如果將環狀切分成如圖 6(c) 一般，效果會更好。這種分離式環形天線在微波工程中經常使用，但是若要奈米天線還能分段實際製造恐怕比較困難。

陸、結論

移除發電過程產生的廢熱是提高發電效率的必要步驟。光學奈米天線提供新的光輻射捕捉、釋放技術。本文所介紹的兩種被動式裝置，也就是說它們達成目標並不需要消耗額外的能量。不需要消耗額外的能量當然有絕對的優勢。

柒、參考文獻

- [1] N. Hjerrild and R. Taylor “Boosting solar energy conversion with nanofluids”, *Physics Today*, Vol. 70 (12), pp 40-45 2017.
- [2] J. P. Peixoto and A. H. Oort “Physics of Climate”, American Institute of Physics, New York 1992.
- [3] Y. Zhai, Y. Ma, S. N. David, D. Zhao, R. Lou, G. Tan, R. Yang, and X. Yin “Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling”, *Science*, Mar 10, pp 1062-1066 2017.
- [4] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells”, *J. App. Phys.*, Vol. 32, pp 510-519 1961.
- [5] L. Novotny, B. Hecht, *Principles of nano-optics*, Cambridge University Press 2017.
- [6] G. McDermott, S. M. Prince, A. A. Freer, A. M. Hawthornthwaite-Lawless, M. Z. Papiz, and R. J. Cogdell, N. W. Isaacs, “Crystal structure of an integral membrane light-harvesting complex from photosynthetic bacteria”, *Nature*, Vol. 374, 6522 pp 517-521 1995.
- [7] M. Z. Papiz, S. M. Prince, T. Howard, R. J. Cogdell, and N. W. Isaacs, “The Structure and Thermal Motion of the B800 – 850 LH2 Complex from *Rps. acidophila* at 2.0 Å Resolution and 100 K: New Structural Features and Functionally Relevant Motions”, *J. Mol. Biol.*, Vol. 326 (5) pp 1523-1538 2003.
- [8] J. Koepke, X. Hu, C. Muenke, K. Schulten, and H. Michel “The crystal structure of the light-harvesting complex II (B800-850) from *Rhodospirillum molischianum*”, *Structure*, Vol. 4 (5) pp 581-597 1996.
- [9] A. W. Roszak “Crystal Structure of the RC-LH1 Core Complex from *Rhodopseudomonas palustris*”, *Science*, Vol. 302 (5652) pp 1969-1972 2003.
- [10] J. Deisenhofer, O. Epp, K. Miki, R. Huber, and H. Michel “X-ray structure analysis of a membrane protein complex”, *J. Mol. Biol.*, Vol. 180 (2) pp 385-398 1984.
- [11] J. Ting “Proposal for verifying dipole properties of light-harvesting antennas”, *J. Photochem. and Photobiology B: Biology*, Vol. 179, pp 134-138 2018.
- [12] J. Ting, “Non-reciprocal light-harvesting nanoantenna made by nature”, arXiv 1702.06671
- [13] A. Oren, A. Ventosa, M. C. Gutierrez, and M. Kamekura, "Haloarcula quadrata sp. nov., a square, motile archaeon isolated from a brine pool in Sinai (Egypt)", *Int. J. Sys. Bac.*, Vol. 49 (3): pp 1149-1155 1999.
- [14] H. Hashimoto, Y. Sugai, C. Urugami, A. T. Gardiner, and R. J. Cogdell “Natural and artificial light-harvesting systems utilizing the functions of carotenoids”, *J. Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Vol. 25, pp 46-70 2015.