

具土壤能源供電之無線溫度／溼度監測系統

A Wireless Temperature/Humidity Monitoring System Using Soil Energy

楊佳評 李瑜 廖育德 蔡昆儒 鄭乃禎
Jia-Ping Yang, Yu Lee, Yu-Te Liao, Kun-Ju Tsai, Nai-chen Cheng

中文摘要

在發展戶外環境監測系統時，如何取得穩定的電力來源供給系統運作，一直是相關應用當中最重要技術挑戰。本文針對上述技術挑戰，設計利用土壤能源，來讓無線感測系統達到能量自主化。本系統包含可提供60~100 μ W的雙電極土壤電池、溫溼度感測器、低功耗藍芽傳送機、微處理機和客製化的低功率電容式讀取電路。其中電容式讀取電路功率消耗僅需3 μ W。整體系統在待機及傳輸模式時所需的功率消耗分別為20 μ W和1 mW。本系統克服了傳統環境監測需要經常性地更換電池的缺點，實現出一低成本且能自我能量維持之環境監測系統。

Abstract

Limited energy source dominates the use of sensor system, especially for outdoor environment monitoring. This paper presents a self-sustaining moisture and temperature monitoring system using soil energy. The proposed sensor system includes the soil energy cell, which can produce 60~100 μ W, a temperature/humidity sensor, a Bluetooth low-energy transmitter, a microcontroller and a custom low-power capacitive sensor readout silicon chip. The system is demonstrated measuring temperature and air moisture changes directly using inexpensive and renewable soil energy without external power supply. The capacitive sensor readout chip is only consumes 3 μ W. The total power consumption of the wireless temperature and air moisture monitoring system is 20 μ W and 1 mW in the sleep mode and the active wireless data communication operations, respectively. This technology enables remote field environment monitoring with less labor-intensive work and battery replacement.

關鍵詞(Key Words)

可再生能源 (Renewable energy)
土壤電池 (Soil battery)
能量擷取 (Energy harvesting)
無線監控 (Wireless monitoring)
智能感測 (Smart sensing)
土壤含水量 (Soil Moisture)

1 · 前言

近幾年全球因糧食危機與極端氣候變化等問題，造成許多國家面臨糧食短缺與遭遇大規模的環境災害，如土石流、水災等。為了預防此類問題，各國目前大多採用無線感測網路 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 技術進行環境監控與融合處理，藉此達到預警或預處理之目的。然而無線感測節點會被廣泛的佈署至預監控環境中，此類環境通常是偏僻或充滿危機的場域，電力佈線不易，大多採用電池供電，因此經過數月或數年後便需透過人工方式進行更換。此外，化學電池於惡劣環境使用下容易變質並產生環境汙染，有鑑於此，為了降低人力維護成本與符合環保議題下，如何能長時間且穩定的提供系統電能將是一大挑戰。

2 · 環境能源簡介

表1為近年來被廣為討論的能源提供方式，但若於環境監控場域中，大多採用環境能源供電，如太陽能、潮汐、風力發電等(圖1)，但這些方式會受限於天氣與季節，且效能在白天與夜間也會有很大的差異，因此許多研究單位仍努力地尋找與開發新替代能源之方案。

氫氧燃料電池就是一種無汙染且高效率的發電方法[1]，其利用氫和氧化合反應產生能量，而所生成附加物質即為純水。由於此種產能方式無汙染且具有高轉換效率特性，因此受到許多人青睞。但在實際技術面上，要從空氣中分離出氫並非那麼容易，且氫是一種易燃物質，在維護與保存上相當不易，導致產能成本昂貴。

表1 能源優劣比較表

	化學電池	太陽能	樹能
能量自主	X	10~30 Years	Tree's Life
能量/面積	High	Medium	Low
環境限制	Low	High	Medium
花費	High	Medium	Low
汙染	High	Medium	Low

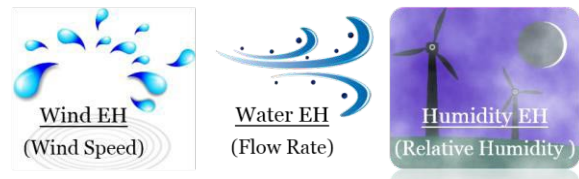


圖1 環境能源示意圖

另一種近期熱門的能源取代方案為微生物燃料電池，其是利用微生物代謝作用來產生能量。此產能方法是在1911年被一名英格蘭科學家所發現，其在培養細菌時透過白金電極測試到養液中竟有電能產生，從此開啟了微生物發電之議題，且陸陸續續有數個微生物電池的研究及開發。但因為透過微生物所產生的能量非常微小，因此初期並不受到重視。直到1980年代，科學家透過在陽極處添加各種電子梭子 (electron shuttle)，大幅提升電子傳遞效率，微生物燃料電池因產能效率提升才開始受到重視，且隨著材料與製程的進步，亦有許多無需添加電子梭子但能提高電子轉換效率的技術被發明[2]。

除了上述兩種新形態的產能技術外，目前亦有許多更貼近使用環境的能源擷取技術，例如植物、海洋底泥與土壤發電等。植物發電，是透過植物本身在運送水分時所產生的生物化學能作為產能來源，如圖2左所示。相較於傳統再生能源，植物的生物化學能較不受環境天候限制，能全天候提供穩定能量。然而，植物所能提供的能量太過微小(約為1 μW)，僅能透過長時間的儲能後才能供應後端系統使用，因此也不適用於需要連續性環境監控場域中，其充其量只能作為增加電池容量之輔助能源。

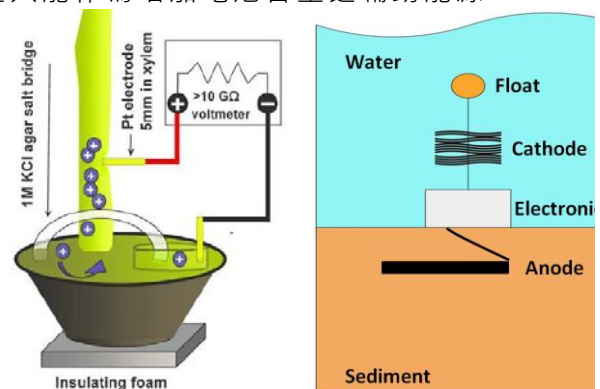


圖2 植物與海洋底泥發電示意圖

海洋底泥發電則是近幾年熱門的研究議題，如圖2右所示，文獻[4]採用大型碳纖維棒做為產能媒介，陽極插入海底泥，陰極置於海中，利用海洋底泥作為能量來源，並驅動水聽器(hydrophone)監聽水面下的聲音，且將相關訊息透過傳輸線傳送至海面上之設備中，此系統已成功運轉長達三個月之久；文獻[5]利用相同原理進行發電，並驅動溫度感測器以及無線傳輸系統；文獻[6]則提出海底微生物燃料電池技術，其分別以石墨棒以及碳纖維棒作為陽極與陰極並放置於海底，藉由微生物與海洋底泥混合發電方法，成功產生出 34 mW/m^2 之能量，且經過125天的長時間測試，其發電能力仍能維持穩定。然而，此類發電發法雖可產生足夠的電能，但其佈件方法不易，且運作場域受限，因此不適合應用在大範圍或地面上之無線環境監控網路系統中。

地球除了70%的海洋外，其餘部分就是含有豐富物質的土壤，其中包含了各種礦物、有機物以及眾多微生物等。一般來說，土壤會在植物光合作用下完成氧化還原反應，植物藉由光能，將二氧化碳、水或是硫化氫轉化為碳水化合物；而土壤則利用了光合作用所儲存的能量處置有機廢棄物，並產生 CO_2 以供另外的光合作用所需。當中有機廢棄物的處置者，即為微生物，腐葉或是動物殘餘物落在土壤上將被其氧化，不同於高等動植物需透過 O_2 進行反應，微生物亦可透過錳、氮、鐵等其他元素進行反應，並釋放出電子。有鑑於此，如此錯綜複雜的土壤化學與生物化學之氧化還原反應，亦可提供出較高的電能，此意味著土壤發電將有可能成為未來主要能源之一，如圖3所示。

舉例來說，像是非洲落後地區、高原或是深山中，這些地方多為土壤，但因地處偏僻而無法得到便利的電力系統，或是本身經濟條件無法負擔相關使用費用，採取隨處可得的土壤發電系統將可帶來一束曙光。此外對於環境監控系統之應用，如土石流檢測、溫濕度考察、空氣汙染感知等，只需將感知節點一次性地置放後，即可透過土壤能源進行驅動，並進行環境感知、融合處理與無線警示，如此將可大幅

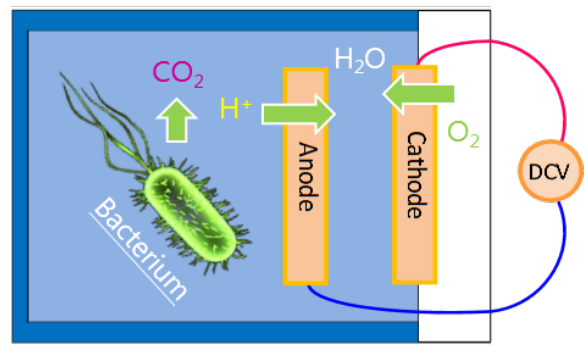


圖3 土壤微生物燃料電池示意圖

降低人力資源與成本。

基於上述土壤發電的發展潛力與能量，近幾年已有相關的研究與雛型產品。舉例來說，可將多組土壤單位能源，用電壓串聯與電流並聯觀念，將輸出能量提升至可驅動後端系統之等級，藉此應用在LED燈[7][8]或時鐘上[9]，如圖4所示。此外目前亦有一款較為實用性的概念產品E-Kaia [10] (圖5)，是由智利研究團隊所研發，其藉由一超級電容去儲存土壤能源，並引入電源管理技術將能源進行轉換，如此一來使用者便可以藉由土壤能源對3C產品進行充電，真正實現出環保與成本兼具之供電系統。

為了能深入了解土壤發電技術特點與瓶頸，因此本文將針對土壤產能量進行分析，亦即藉由不同介電材質與土壤含水量，觀測所對



圖4 藉由土壤發電之概念產品



圖5 土壤充電器E-Kaia

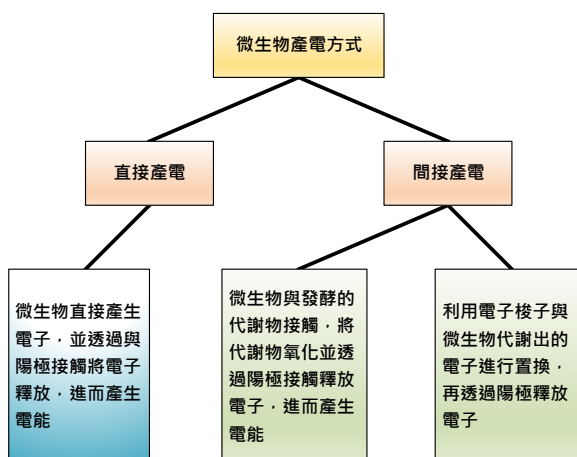


圖6 微生物產電方式示意圖

應的發電情形。此外，亦透過土壤發電，驅動後端感知系統，包含溫、溼度感測器與無線傳輸介面，期望在不使用化學電池條件下，打造出一不需維護、低成本與長效型之環境感知平台。

3. 土壤能源

3.1 微生物發電

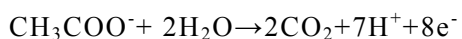
嚴格來說，土壤發電是透過微生物產能與電化學反應而來，因此若要分析發電原理，必需先了解微生物發電的過程與方法。

微生物產能是透過微生物代謝來產生電能，此方法除了具有低成本之優勢外，亦是一種綠色能源。其產電方法可略分為兩種，間接產電與直接產電，如圖6所示，分述如下：

間接產電方式通常藉由添加 thionine、neutral red 等電子梭子，其會進入細胞膜與微生物代謝之電子進行置換，並透過與陽極接觸將電子釋放，進而產生電能[11]。但是此種以添加電子梭子的方式將會造成系統設計上的諸多限制。

直接產電方式即微生物直接吸取周遭環境的糖類或其它營養物，如：胺基酸、乙酸鹽葡萄糖、蛋白質等[12]，並釋放出所含電子。以乙酸鹽葡萄糖反應過程為例，其反應式如下：

陽極反應式：



陰極反應式：

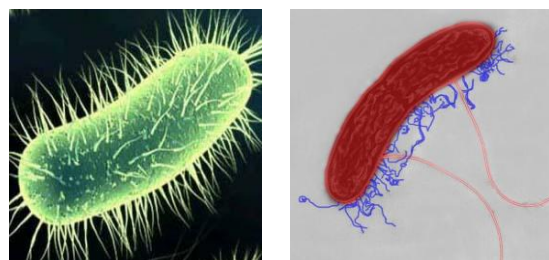
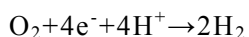


圖7 Shewanella與Geobacter Sulfurreducen

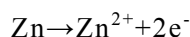
此外在土壤中最常見的兩種微生物分別為希瓦氏菌 (Shewanella) [13] 以及 Geobacter Sulfurreducen [14]，如圖7所示，它們可以輕易地代謝各種金屬化合物，並直接將電子透過其特殊細胞膜傳送至電極。除此之外，這兩種微生物具有導電性的纖毛，因此亦可增加電子傳遞之效率。

有鑑於此，若要在土壤中取得電能，只需置入正極與負極導線，藉由植物的光合作用配合微生物分解腐物產生電子、纖毛傳遞電子，再透過外部電路跟負極形成迴路，進而產生電流(圖3)。此電能在此循環下將可生生不息，且不會造成環境的任何污染與危害。

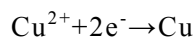
3.2 電極材料對於土壤發電之影響

電池通常使用不同材料作為陽極與陰極，活性較大的材料較容易失去電子，其會有電流流出，稱為陰極；而活性較小的材料較容易得到電子，故為陽極，當中放出電子稱之為氧化反應，而獲得電子則稱為還原反應。以鋅銅為例，鋅金屬活性大於銅金屬，鋅將發生氧化反應失去2莫耳電子，反之銅則發生還原反應獲得2莫耳電子。電子由鋅經導體媒介進到銅，而電流則由銅至鋅。其氧化還原式如下：

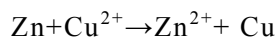
陰極反應式：



陽極反應式：



總反應式：



因此，不同電極材料將會影響電子的傳輸效率以及能階。表2列出目前常見的幾種材料，圖8、圖9分別為實驗環境與不同材料組合之產能實

表2 不同金屬電位差

Material	Potential(V)
鋅 Zinc	-1.1
鋼 Steel	-0.5 ~ -0.8
銅 Copper	-0.2
碳 Carbon	+0.3



圖8 測試環境示意圖

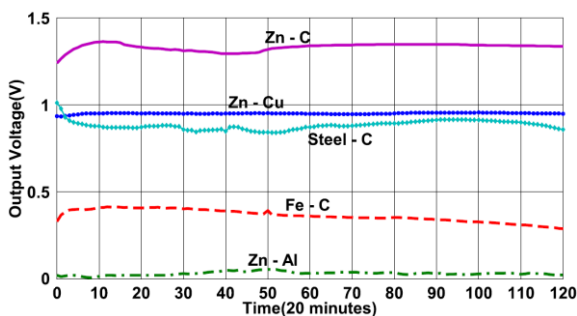


圖9 不同電極組合所產生之開路電壓

驗示意圖。結果顯示，鋅-碳能提供最高的輸出電壓(1.3 V)、鋅-銅電壓雖略低於鋅-碳(0.9 V)，但其穩定性較高、鋼-碳電壓較不穩定、鐵-碳則為實驗組中電壓衰減最快的組合，其將不適合作為長時間供電使用。

3.3 土壤發電效能分析

一般來說，在產能元件中，若能提升導電率，加速電子移動，則其將會有較佳的效率。土壤發電也具有相同特性，發電效率將與土壤導電性有密不可分的關係，而影響導電性的主要因素有：土壤溼度(Soil Moisture)、鹽分、黏性、溫度、礦物與微生物數量等，其可由簡單的推論即可得知發電效率的好壞：

- 水，具有良好的導電性，電子移動較不受阻礙，因此在含水量高的土壤中，會具有較佳的發電效能。
- 溫度，會影響微生物活動能力與土壤原子間

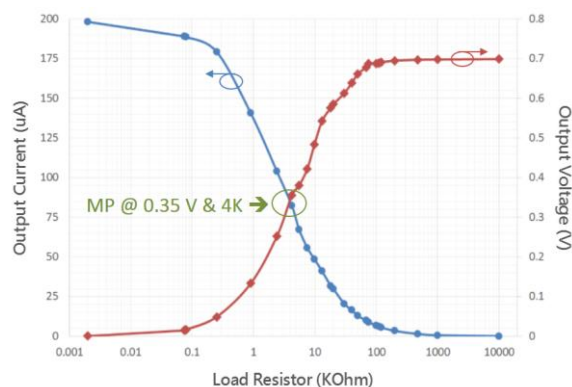


圖10 不同負載對輸出電壓/電流之影響

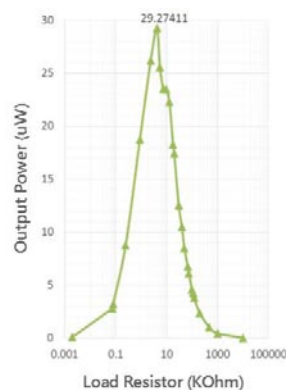


圖11 不同負載對輸出功率之影響

距。溫度低，微生物反應變慢，原子間距變寬，因此效能將隨溫度變低而下降。

- 黏性，可將其視為原子間距，黏性越大代表間距越小，電子越容易穿越土壤進行移動，此時發電效率亦會提升。
- 鹽濃度，在植物摘培中最常被拿出來討論的條件之一，其就是pH值。土壤養分越多，電導度高，發電效率越佳；但如果發現效率極高，即可反推此時植物會有鹽害，對生長不利。

由文獻[15]結論可得，潮濕以及高鹽分的土壤將會有較好的導電性。為了佐證發電效能，本文將在不同條件下針對土壤發電量進行實際測試。測試環境如圖3與圖8所式，將兩根不同材質的導電棒插入土壤中，再藉由導線將其接至後端等校負載上。但因為受限於土壤內阻，所以在不同負載條件下，將會對應到不同的電壓、電流與能量(Power)。此外，為了確保實驗數據的正確性，環境溫度與測試時間分為訂為26 °C以及30分鐘。

圖10、圖11即為在不同負載電阻條件下土壤電池的產能狀態。由圖10可得知，當低負載操作時，其值遠低於土壤內阻，此狀態下將會得到最大電流與最低電壓；反之若操作於高負載條件下，將會得到最小電流與最高電壓，其中最大電壓與最大電流分別會被電極材質及土壤條件所決定。但在實際操作時，後端系統皆期望能接收到最大能量，有鑑於此，將圖10轉換成圖11之功率圖表，從中可以輕易觀察到，以此測試條件下，當負載落在4 kΩ、電壓為0.35 V之操作點時，土壤電池可提供出最大的輸出功率29.27 μW。換句話說，若於土壤電池與系統間插入一最大功率追蹤電路，依操作狀態去適應性地調整往系統端看到的阻值，如此將可獲得最高的能量轉換。

圖12、圖13則為在不同土壤含水量條件下土壤電池的產能狀態。實驗結果如同先前的推論，當含水量低時，導致土壤原子間距寬、微生物反應慢、導電性差，進而影響發電效能；但若含水量超過20 %後，電壓將急遽上升至最大值附近，而電流則呈線性增加；而含水量大於70 %後，電壓與電流皆到達最大值，此意味著，超過此操作點後，土壤電池將持續提供最大能量供後端系統使用。如圖14所示，土壤發電其實亦可稱為具有事件驅動之含水量感知器，可透過輸出電流或能量去反推目前土壤含水量，並應用在環境監測(如土石流)系統中。當土壤極度乾燥時，此時因環境不具有即刻危害之條件，感知器與系統皆可進入休眠狀態(電壓、電流、能量皆約為0)；當含水量逐漸上升，土壤電池便可開始產能與儲存能量，並供系統作即時性的檢測與判斷；若含水量超乎預設值後，此時將會以全能量供電，而系統也將啟動無線收發機制，進行環境危害之預警。此種具事件驅動之供電與檢測方式，將可兼顧用電量與資料安全性，未來亦可廣泛應用至固定式之低成本感知節點中。

此外，本文亦透過添加鹽份的方式，去觀測土壤鹽濃度與發電量間之關係。如圖15可得，當土壤pH值上升，此將提升導電性，土壤發電量亦隨之增加。如同含水量感知，若適當

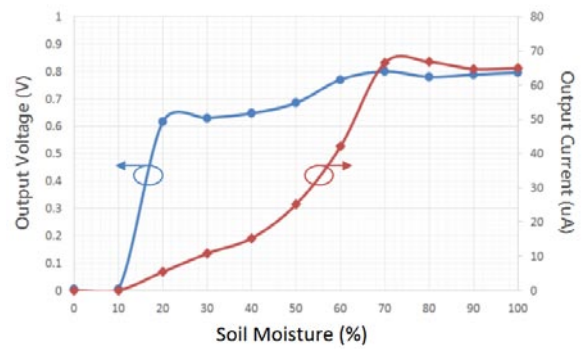


圖12 土壤含水量對輸出電壓/電流之影響

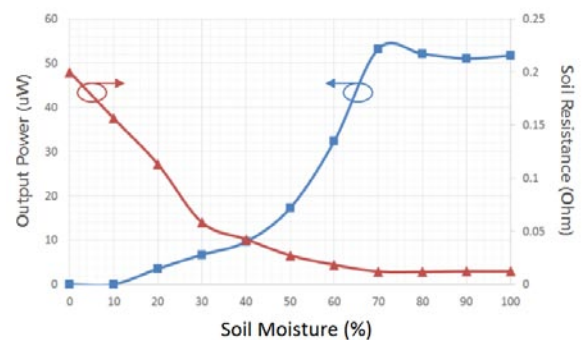


圖13 土壤含水量對輸出功率之影響

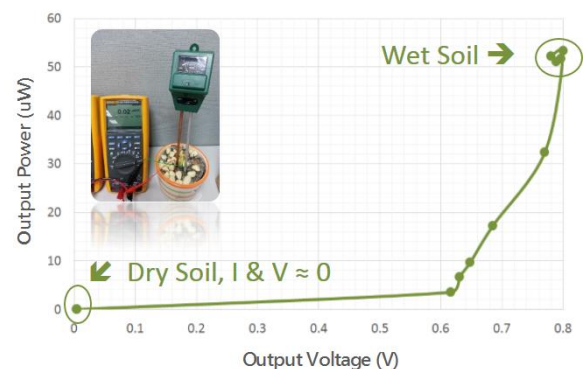


圖14 輸出電壓與輸出功率關係圖

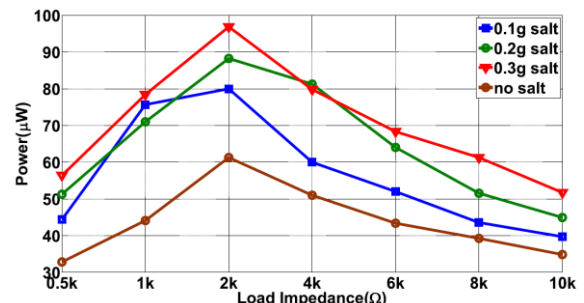


圖15 土壤鹽分對輸出功率之影響

地進行電量與鹽濃度轉換，亦可在同一場域與同一裝置下，開發出具有事件驅動之含水量/pH值之感知系統。

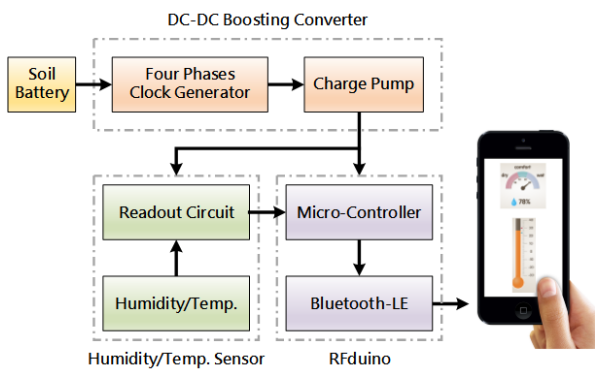


圖 16 自供電之環境監測(溫濕度)架構圖

4 · 自供電環境監測系統開發[19]

4.1 系統架構

圖 16 是本文提出的自供電環境監測系統架構，其包含了土壤電池、直流升壓電路、低功耗溫溼度感測器與 RFduino[20]。在電源的部分，由於一般電路工作電壓約 3 V，而土壤電池於開路條件下僅能提供 1 V 左右之電壓，因此必需透過直流升壓轉換器將電壓提升並供給感測器與 RFduino 使用。而在感測端，本文則提出低功耗讀取技術，藉此以最低能量去轉換溫/濕度造成的電容變化量，並轉換成數位資訊。最後 RFduino 中的微控制器會進行資料處理，且將蒐集到的溫溼度資訊透過 RFduino 中的低功率藍芽傳輸機上傳至手機，並進行顯示與紀錄。此一感知系統，將可廣泛應用在環境監控或是智慧農業檢測中。

然而傳輸系統運作時需大量能源，而以目前實驗性質的土壤電池所能產生之瞬間能量並不足以讓整體系統維持連續性地運作。除了藉由增加電極體積提升能量外(串聯提升電壓；並聯提升電流)，使用一超級電容先進行儲能亦是解決方案。因此實際系統操作時會先進行土壤能源儲能，充至所需能量後，便會啟動溫溼度檢測，但因為此二環境因子不會瞬間變化，因此系統中採用了工作週期調變方式，讓能源能有最佳化的使用。

4.2 超低功耗讀取電路與升壓電路

本文除了針對土壤發電進行相關探討與研

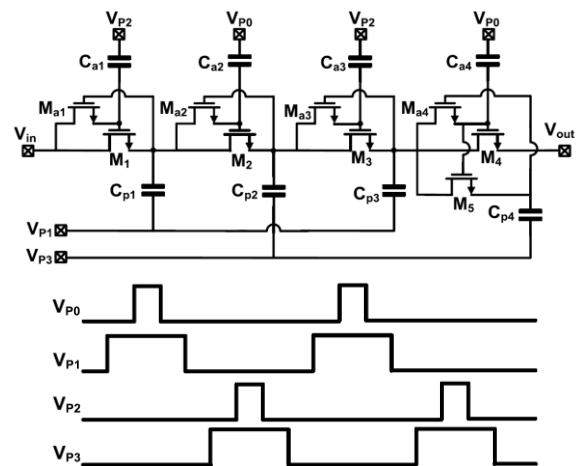


圖 17 四相位電荷幫浦電路圖與時序圖

究外，亦針對感知器讀取電路進行研發，期望能進一步降低感知器之耗能，延長環境監測系統的使用時間。

上節提到，土壤輸出電壓僅 1 V 左右，因此為了讓系統正常啟動，當務之急就是需藉由電荷幫浦進行升壓，而本文所採用的架構為狄克森電荷幫浦，其不需使用電感，此將可大幅降低晶片面積。其等校輸出電壓為：

$$V_{out} = V_{in} + N * (V_a - V_{th}) - N * (IT/C)$$

其中 V_{in} 是輸入電壓、 V_{th} 為電晶體臨界電壓、 N 代表電荷幫浦階數、 T 是時脈週期、 V_a 與 I 則分別代表時脈訊號振幅與輸出電流量。傳統狄克森電荷幫浦由於受到二極體固定跨壓影響，其轉換效率約為 30-50 %。

為了降低二極體消耗之能量，本文採用四相位架構[16]，如圖 17 所示，透過時序上的控制，將可大幅提升轉換效率[17]，其等校輸出電壓為：

$$V_{out} = V_{in} + N * V_a - N * (IT/C)$$

有別於傳統架構， M_i 電晶體作為開關而非二極體，透過一階升壓將電晶體完全導通，並藉此降低開關電阻，減少電晶體上之跨壓；此外加入 M_5 來降低反向漏電流，進而提升電壓轉換效率。

讀取電路部分，本文採用了電容式感測架構，如圖 18 所示，為了降低效能受環境雜訊的影響，因此透過穩壓型 RC 振盪器[18]來實現之。

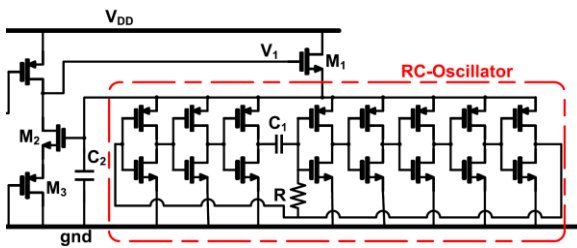


圖 18 穩壓型RC振盪器電路圖

此RC振盪器時間常數如下：

$$T = R \cdot C \cdot \ln \left\{ \frac{(1 + K_{SW})(2 - K_{SW})}{K_{SW}(1 - K_{SW})} \right\}$$

$$K_{SW} = V_{SW} / V_{DD_REG}$$

其中 V_{SW} 代表開關閘極電壓、 V_{DD_REG} 則為穩定後電壓。由上式可得，製程相關常數可以相抵消，因此時間常數對於製程變異敏感度較低。此外透過 PTAT 電路以及負回授 (M_1-M_3) 機制將可以得到穩定電壓，並降低溫度對頻率之影響。有鑑於此，將外部電容式溫濕度感測器與 C_1 並聯後，則可針對不同的電容值轉換成不同頻率，再透過量測頻率即可推算出相對應的溫濕度。

5. 實驗結果

圖 19 為自供電環境監測系統板，其中包含上章節中所敘述的電容式讀取電路。當系統實際操作時，讀取電路、睡眠模式微處理器以及傳輸模式下的耗能分別約為 $3 \mu W$ 、 $17 \mu W$ 及 $1 mW$ 。圖 20 為在 $1 mF$ 的儲存電容下，每十秒啟動一次資料傳輸(傳輸能量為 $-20 dbm$)之量測結果，從中可觀察到，操作電壓僅於藍芽啟動資料傳遞時微幅降低 $70 mV$ ，但之後馬上藉由土壤能源將超級電容回充至 $3.15 V$ ，此現象將不影響系統操作。圖 21、圖 22 分別為回傳至手機顯示的濕度與溫度資訊。



圖 19 自供電之環境監測(溫濕度)系統板

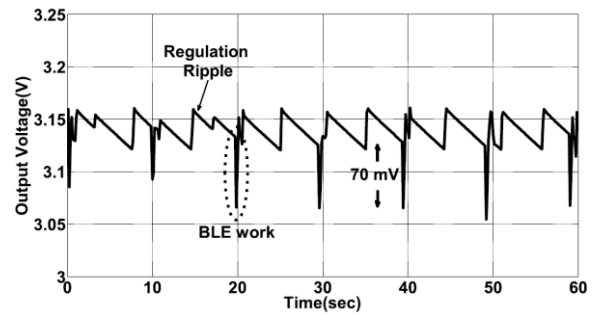


圖 20 系統能量消耗測試圖

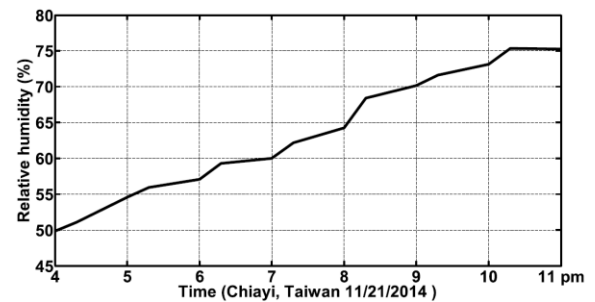


圖 21 濕度測試結果

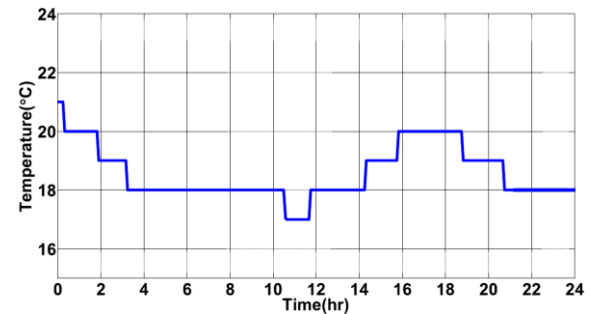


圖 22 溫度測試結果

6. 結論

本文提出一利用土壤能源供電之無線溫度/溼度監測系統。其中利用實驗性的土壤電池初步可採集到 $60 \sim 100 \mu W$ 能量，相較於其它傳統再生能源，土壤不但容易取得，受環境限制影響較小，且可提供足夠的能量供系統運作。此外搭配所提出之電容讀取技術與低功率藍芽系統，將可整合實現出一低成本、可長時間運作且無需額外能源之無線感測系統。

參考文獻

- [1] Brian Cook, "An introduction to fuel cells and hydrogen," www.miniHYDROGEN.com,

December, 2001

- [2] H. Bennetto, "Electricity generation by microorganisms." *Biotechnology Education*, vol. 1, no. 4, pp. 163-168, 1990
- [3] C. Himes, E. Carlson, R. J. Ricchiuti, B. P. Otis, and B. A. Parviz, "Ultra low Voltage Nanoelectronics Powered Directly, and Solely, From a Tree," *Nanotechnology*, IEEE Transactions on, vol. 9, pp. 2-5, January 2010.
- [4] Q. Wotawa-Bergen, D. B. Chadwick, K. E. Richter, L. M. Tender, C. E. Reimers, Y. Gong, "Operational Testing of Sediment Microbial Fuel Cells in San Diego Bay," *Oceans Conference*, pp. 1-6, September 2010
- [5] Donovan, A. Dewan, D. Heo and H. Beyenal, "Batteryless, Wireless Sensor Powered by a Sediment Microbial Fuel Cell," *Environment Science & Technology*, vol. 42, no. 22, pp. 8591-8596, October 2008
- [6] E. Reimers, P. Girguis, H. A. Stecher, M. Tender, N. Ryckelynck, P. Whaling, "Microbial fuel cell energy from an ocean cold seep," in *Geobiology*, pp. 123-136, April 2006
- [7] <http://inhabitat.com/soil-lamp-is-powered-by-dirt/>
- [8] <http://plant-e.com/index.html>
- [9] <http://www.trendhunter.com/trends/timeless-garden-eco-friendly-mud-clock-powered-by-plant>
- [10] <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3078365/The-ultimate-power-plant-Bio-circuit-harnesses-electricity-soil-houseplant-charge-mobile-phone.html>
- [11] E. Katz, A. Shipway, and I. Willner, "Biochemical fuel cells, Handbook of Fuel Cells- Fundamentals, Technology and Applications," John Wiley & Sons, 2003
- [12] Tardast, G. Najafpour, M. Rahimnejad, A. A. Ghoreyshi, H. Zare, K. Pirzadeh, "Bioelectricity production by air cathode microbial fuel cell," in the *Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, pp. 162-166, March 2012
- [13] Yuri A. Gorby, "Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms," *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, no. 30, pp. 11358-11363, June 2006
- [14] Weijie Yi, Dong Qu, Baoli Wang, Chao Zhu, "Regulation mechanism of microbial Fe (III) reduction on heavy metals pollution in paddy soil," *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP)*, pp. 1757-1760, January 2011
- [15] N. Khan, Z. Saleem and N. Abas, "Experimental Study of Earth Batteries," *Second International Conference on Electrical Engineering*, pp. 25-26, March 2008,
- [16] Y. Kai, Z. Xuecheng, L. Dongsheng, Y. Guoyi, L. Jianming, and C. Yue, "Clock control strategy of four-phase Dickson charge pump for power efficiency improvement," *Circuits and Systems, IEEE Asia Pacific Conference on*, pp. 1856-1859, December 2008
- [17] Y.-C. Shih and B. P. Otis, "An Inductorless DC-DC Converter for Energy Harvesting With a 1.2uW Bandgap-Referenced Output Controller," *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 832-836, December 2011.
- [18] D. Griffith, P. T. Roine, J. Murdock, and R. Smith, "A 190nW 33kHz RC oscillator with $\pm 0.21\%$ temperature stability and 4ppm long-term stability," in *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*,

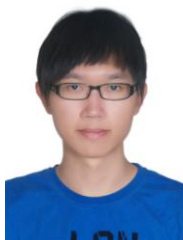
2014, pp. 300-301.

[19] F.-T. Lin, Y.-C. Kuo, J.-C. Hsieh, H.-Y. Tsai, Y.-T. Liao, and H.-C. Lee, "A self-powering wireless environment monitoring system using soil energy," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 3751-3758, July 2015.

[20] <http://www.hwdio.com/shrunk-down-arduino/>

作者簡介

楊佳評



於2014年從國立中正大學電機工程學系取得學士學位，現在於國立交通大學電機所攻讀碩士學位，專長為類比積體電路與能源管理電路。

[E-mail:itri452921@itri.org.tw](mailto:itri452921@itri.org.tw)

李瑜



資訊與通訊研究所 / 生醫與工業積體電路技術組 / 低功耗混合訊號部副經理，2005年取得國立中興大學電機工程研究所碩士學位。2006年起於工業技術研究院服務，主要專長為類比積體電路與高速介面電路設計與自我測試技術、超低電壓混合訊號電路設計技術。

[E-mail: YuLee@itri.org.tw](mailto:YuLee@itri.org.tw)

廖育德



於2003年獲得成功大學電機系學士學位，2005年獲得台灣大學電子工程研究所碩士學位，主修類比以及射頻積體電路設計。2011年獲得美國華盛頓大學電機工程系博士學位，主要的研究方向為無線感測器系統以及電路設計。畢業後，任教於中正電機系，從事生醫積體電路設計以及感測器介面電路設計。在2013年八月加入交通大學電機系擔任助理教授。在類比以及射頻積體電路領域耕耘多年，共發表期刊論文12篇以及會議論文16篇。另外，獲得一項美國專利。

[E-mail: yudoliao@g2.nctu.edu.tw](mailto:yudoliao@g2.nctu.edu.tw)

蔡昆儒



資訊與通訊研究所 / 生醫與工業積體電路技術組 / 低功耗混合訊號部工程師，2008年取得國立雲林科技大學電子工程研究所碩士學位。2008年起於工業技術研究院服務，主要專長為超低功耗全數位式溫度感測技術。

[E-mail:timothy_tsai@itri.org.tw](mailto:timothy_tsai@itri.org.tw)

鄭乃禎



資訊與通訊研究所 / 生醫與工業積體電路技術組 / 低功耗混合訊號部工程師，2005年取得國立成功大學電機工程研究所碩士學位。2006年起於工業技術研究院服務。主要專長為類比積體電路設計與測試。

[E-mail:M.Perrott@itri.org.tw](mailto:M.Perrott@itri.org.tw)