



## 壓電振動能量擷取系統介紹

### Introduction to Vibration-Based Piezoelectric Energy Harvesting

連益慶 I. C. Lien<sup>1</sup>、舒貽忠 Y. C. Shu<sup>2</sup>

國立臺灣大學(National Taiwan University) 應用力學研究所<sup>1</sup> 博士候選人、<sup>2</sup> 教授

本文除了介紹壓電振動能量擷取系統的最新發展趨勢之外，亦配合筆者近年來在國際期刊上所發表的一系列論文，從『壓電振動子設計』、『能量儲存電路』與『能量擷取介面電路』三方面對整體系統的識別、設計與分析做一深入淺出的探討。壓電振動子的設計與材料選取和幾何形狀兩方面息息相關，以標準交流轉直流輸出功率而言，其大小與外部震源形式、振動子的機電性質(質量、阻尼、勁度、力電耦合、寄生電容)及所銜接的外部負載等有密切的關聯。能量儲存電路方面，筆者提出傳統設計上認為提高電致阻尼即等同於提升效能與功率之觀念，並不適用強力電耦合之壓電振動子。而在能量擷取介面電路方面，除了介紹標準電路外，亦與近年來相當受到矚目的SSHI (Synchronized Switch Harvesting in Inductor) 電路做比較。筆者發現SSHI電路除了能夠有效提升弱力電耦合振動子的功率輸出上限外，亦指出該技術具有鈍化共振頻率飄移所造成輸出功率衰減的效果，而且該鈍化效果在中力電耦合強度的振動子上特別顯著。

This document provides an introduction to vibration-based piezoelectric energy harvesting. It summarizes the recent research activities of the authors in this field. The contents are divided into three parts: the design of piezoelectric power structures, energy-storage circuits and harvesting electronic interfaces. The electrical behavior of an energy harvesting system is able to be predicted based on the proposed analysis; moreover, some opportunities for new devices and improvements in existing ones are also indicated here.

#### 關鍵詞 /Key Words

電致阻尼(Electrical Damping)、能量擷取(Energy Harvesting)、壓電材料(Piezoelectric Materials)、SSHI 介面電路(Synchronized Switch Harvesting on Inductor)、壓電振動能量擷取(Vibration-based Piezoelectric Energy Harvesting)

## 導 論

近年來由於再生能源議題不斷受到重視與多點分佈無線監測網路的迅速發展，如何有效地供給這些數目龐大自主性微感測器所需要之能源，是首要面對的棘手問題。隨著無線通訊技術的成熟和低功率消耗電路的開發，將環境中潛在能源轉化為電能，已是自我供電系統中不可或缺的一環。其中利用智慧型材料作為能量轉換機制的能量擷取器，並供給足夠用電量的概念不再是遙不可及<sup>(34,35,42)</sup>。然而欲達到此一目標的前提是，這些能量擷取器必須在最佳化設計下運作，這正是本文所要探討的核心課題。

環境中的每一處都充斥著各種形式的能量，如：熱能、太陽能、動能等。其中，振動能量的來源受限於外在環境因素的影響較小，因此吸收外部振動能量並轉化為電能等相關議題，在最近受到廣泛地重視並被諸多國際實驗室訂為重點研究領域。雖然理論上有許多機制可以將動能轉換成電能；例如：電磁線圈機制、可變電容、壓電效應等<sup>(3,4,29,37,46)</sup>，但以壓電為轉換媒介之發電器，卻已受到當今不少國際研究團

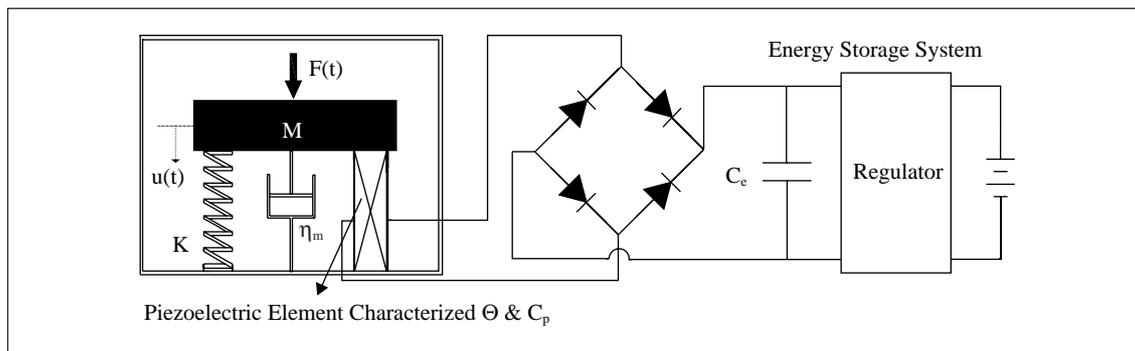
隊重視。這是因為壓電材料作為能量轉換材料時，具有較高的力電耦合效應、好的品質因子並且在微小化過程中可配合標準半導體製程和積體電路做整合等多項好處，近年來已成為機械能與電能之間的轉換媒介首選<sup>(2,7,8,13,38)</sup>。雖然我國在此領域上尚在起始階段，但是秉持著所累積的完整機械電子上下游整合和研發能量，對於跨入此領域並趕上領先國是指日可待的。以下將針對壓電振動能量擷取系統做一概況介紹。

圖一簡單地描繪一個完整的壓電振動能量擷取系統，其中左半部為壓電振動子的等效模型，右半部則代表電壓調節能量儲存機制(Regulator)，兩者之間利用全橋二極體電路做連結。以壓電振動子而言，其原理為藉由應變場所產生的再極化作用，導致電極兩端產生電位差，其等效數學模型可用下面的方程式表示<sup>(39)</sup>

$$M\ddot{d}(t) + \eta_m \dot{d}(t) + K_e d(t) + \Theta V_p(t) = F(t),$$

$$-\Theta d(t) + C_p V_p(t) = Q(t)$$

其中， $d(t)$ 為廣義座標下的位移量， $V_p(t)$ 為壓電振動子電極兩端電壓差， $Q(t)$ 則為壓電電極上的電荷， $F(t)$ 則來自於外部震源施加



▲圖一 完整的壓電能量擷取系統示意圖

於振動子之廣義力。 $M$ 、 $\eta_m$ 、 $K_F$  為原本機械結構上所存在的廣義質量、阻尼及勁度； $\Theta$ 、 $C_p$  則分別為廣義的壓電係數及本身的寄生電容。以上這些參數決定了壓電振動子和外部電路之間的耦合行為，而參數本身與壓電材料的選取及振動子的幾何形狀設計有密切的關聯。

壓電振動子的原始輸出為交流信號，因此傳統上的文獻大多數著重於振動子單純的外接一線性電阻負載，來探討其交流輸出功率<sup>(16,26,33)</sup>。然而在實際應用時，後端電子元件需要的，往往為一穩定的直流電壓源，因此其中必然牽涉到諸多非線性元件電路的相關分析。近年來更有越來越多的文獻，針對非線性架構的壓電能量擷取系統做分析研究，如賓州州立大學 Ottman 等學者首先於 2002 年以弱力電耦合效應為假設，建立了一個簡單卻實用的數學模型，並提出壓電能量擷取器交流轉直流的初步分析<sup>(27,28)</sup>。然而該模型因無法對振動子和外部電路環境等之間的耦合做精確描述，有鑑於此，筆者於 2006 年之後即針對此缺憾進行分析改良，並將一系列結果發表於國際知名學術期刊<sup>(39,40,41)</sup>。簡單而言，筆者首次提出在穩態振動下交流轉直流系統之完整模型，並針對壓電振動子之頻率響應與機電行為，提出相當準確且具指標性的分析。若以這套理論為基礎做進一步延伸，整個能量擷取系統大致上可以分成『壓電振動子設計』、『能量儲存電路』與『能量擷取介面電路』等三個主要部分。以壓電振動子設計而言，藉由無因次化的力電耦合與機械阻尼係數兩者之間比值的大小，大致上可區分為強、中、弱等三種不同力電耦合強度之振動子，並可針對每一種振

動子進行最佳功率輸出設計。另外能量儲存電路著重於外部能量儲存的相關電路設計，通常這些電路具有電壓或是電阻值調整的功能，但電路本身並不會主動改變壓電振動子固有的機電特性。而能量擷取介面電路，則有別於上述的能量儲存電路，會主動地改變壓電振動子的機電性質，而達到“等效上”調整系統參數的目的，如近來受到相當矚目的 SSHI 介面電路便是一個很好的例子<sup>(1,2,12,20,21)</sup>。最後筆者必須強調上面三個環節之間實環環相扣且密不可分，因此接下來的內容，便分別以此三個部份為主軸，對整個壓電振動能量擷取系統做簡單且清楚的介紹。

## 壓電振動子

壓電振動子的設計，大體上可以從壓電材料選取與振動子的幾何形狀兩方面著手。一般常見的壓電材料，不外乎 PVDF、ZnO 和 PZT 等材料。其中 PVDF 為聚合物，然而其因較低的壓電係數致使在此領域上較少被使用<sup>(24)</sup>。ZnO 多在半導體製程上使用，雖然其壓電係數並不大，但是卻有著製程方便等優點，可用於奈微米壓電振動子上<sup>(30)</sup>。PZT 和前兩者相比，具有超出兩個數量級以上的壓電係數，是最適合也是最常被使用來當作塊體振動能量轉換子的媒介材料。在實際使用上，通常會搭配軟性金屬材料作為基材，以彌補陶瓷材料在以塊材形式使用時，因勁度過大而易損壞破碎的缺陷。一般來說，尺寸  $40 \times 25 \times 0.3 \text{mm}^3$  的 PZT 複合樑振動子，在  $0.1g$  加速度週期振動下（約  $100\text{Hz}$ ），其共振輸出功率大至介於數百至數千微瓦 ( $\mu\text{W}$ )。而在工業應用上，市面上已有許多公司設計了具相關周邊電路之 PZT

壓電振動子，並將其商品化，可參考 PMG Perpetuum (www.perpetuum.co.uk)、 FERRO Solutions (www.ferrosi.com) 及 MIDE (www.mide.com) 等。

對塊材形式的壓電振動子而言， $d_{31}$  模式（即電場方向與應變方向垂直）是最常被使用的力電轉換模式，而其中又以懸臂樑型的幾何結構振動子最為常見<sup>(7,13,16,36)</sup>。當然亦有部分的文獻以二維的平板型<sup>(5,6,18,19)</sup>為基礎，來設計壓電能量擷取系統，但相較於樑形式，二維形式具較高共振頻率，複雜的振動模態特性與需考量特殊電極分佈，因此在設計及分析上亦較為不容易。其他特殊幾何形狀與用途之壓電振動子，可參考文獻<sup>(10, 14, 17, 31, 43, 44)</sup>。

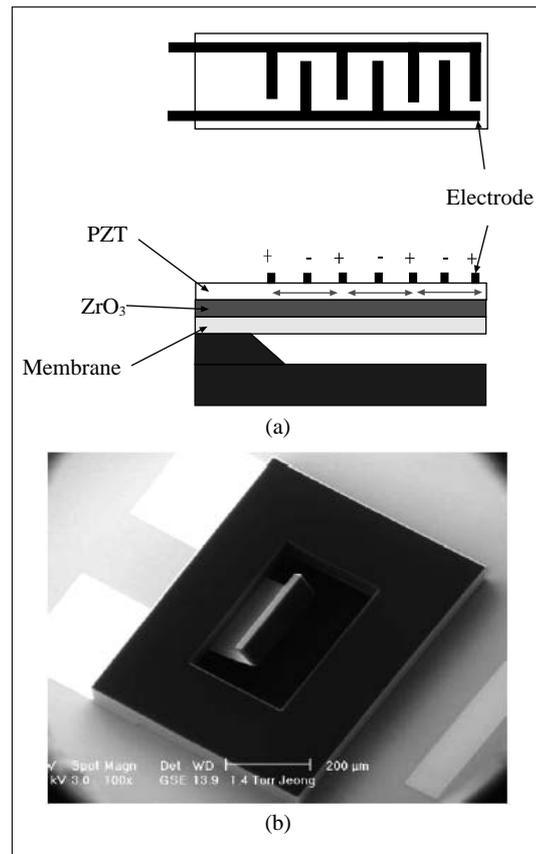
在電子裝置越做越小的趨勢驅使下，壓電振動子勢必要朝微小化尺度邁進，然而縮小尺寸所伴隨而來的問題是系統共振頻率大幅提高，可達數 10kHz，造成實際應用上的不便。另一方面由於微製程等因素導致壓電效應降低與能量密度驟降。因此受限於用途與良率上的限制，如何在有限的體積下降低共振頻率與提高整體力電耦合係數，便是現階段微型壓電振動子設計上必須面對的問題。前者方面可藉由加大懸臂樑尖端質量塊而有效改進，可參考文獻<sup>(9, 25, 45)</sup>；後者方面，因一般而言  $d_{33} > d_{31}$ ，故可藉由指叉電擊 (Interdigitated Electrode) 造成  $d_{33}$  壓電振動模式（即電場方向與應變方向平行），提升整體力電耦合效果。舉例來說，圖二的微型壓電振動子來自於美國麻省理工學院的傑出研究團隊<sup>(15)</sup>。在約 10g 加速度與約 13.7 kHz 共振頻率振動下，可以達到 5V 的電壓輸出。另外再接上一般的整流濾波電路，與在電阻負載

下，可以達到 1 $\mu$ W 的功率輸出。

在奈米壓電振動子方面，以喬治亞理工學院華裔科學家王中林教授所研發之發電奈米衣為代表<sup>(30)</sup>。利用 ZnO 本身原本所具有的半導體特性，並對受力下壓電導通極性通道做限制，可進而達到雖然非同步變形，卻可以同步直流輸出的效果。圖三為摘錄自文獻<sup>(30)</sup>的壓電奈米纖維照片，可達到每平方公尺 20~80mW 的功率輸出效果。

### 外部能量儲存電路

一般來說，外部電阻對於壓電振動子的效果可簡化為由外部並聯一阻尼機制<sup>(22)</sup>。



▲圖二  $d_{33}$  壓電振動模式之微型單層結構壓電振動子(a)元件設計圖；(b)高倍率顯微鏡下成品放大圖<sup>(15)</sup>

<sup>33,46</sup>)。進一步參照筆者在文獻(40)中所做的分析，輸出功率的最佳化主要由無因次化電致阻尼  $\zeta_e$  及無因次化機械組尼  $\zeta_m$  兩個關鍵參數所把持。過去慣例上均認為提高電致阻尼效應便等同於最佳化輸出功率與效率提升<sup>(22,33,46)</sup>。然而這樣的結論對於力電耦合效應強的壓電振動子而言其實並不適用，必須進一步將高電致阻尼效應下所衍生的剛性過高效應，所導致的外部輸入功率降低效應納入考慮，以求得最佳的無因次化電致阻尼係數  $\zeta_e$ ，最後反推出適合的外部負載阻抗<sup>(40)</sup>。然而在實際應用上，外部電子裝置本身電致阻抗往往並非壓電振動子所設定的最佳化阻抗。為了解決上述問題，在 2002 年賓州州立大學 Ottman 等學者使用如圖四的降壓電路(Step-Down Converter)作

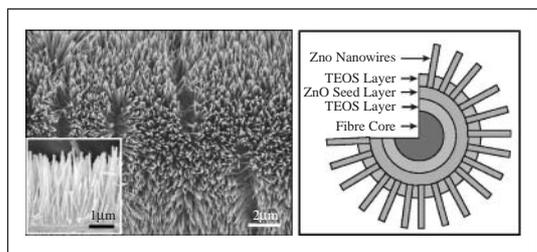
為外部阻抗調整匹配電路<sup>(27,28)</sup>，並且由實驗上的結果，其可以將直流輸出功率提升至將近 400%。

基本上這樣的電路並不會改變壓電振動子本身所具有的機電特性，加上構造簡單且只需藉由改變外部開關的責任週期(Duty Ratio)即可。因此自從被提出之後，一直被沿用至今，並多使用在外部負載之前的末端輸出，以當作緩衝機制使用。

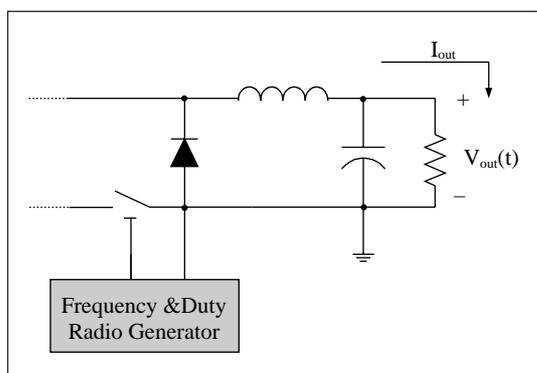
### 能量擷取介面電路

壓電能量擷取介面電路因會主動地改變振動子的機電性質，因此相關介面電路的設計便成為最為重要的部份。壓電振動子在交流轉直流介面電路與負載之間的交互作用機制，較純交流介面電路複雜許多<sup>(11,12,14,27,39)</sup>。而其中常見的介面形式不外乎電阻性、電感性及電容性三種介面負載。相較於第一種，後兩種型式的架構會強烈影響著整個振動子的機電行為。大部分文獻在處理交流轉直流等非線性壓電能量擷取系統時，均藉由搭配特定的簡化模型來進行分析，如從早期的『非耦合模型』(Uncoupled Model)<sup>(8,15,26,27)</sup>或是最近的『同相模型』(In-phase Model)<sup>(2,12,20,21)</sup>。前者會造成壓電振動子的機電行為失真，後者無法針對因頻率偏移導致功率輸出大幅降低做進一步分析<sup>(23)</sup>。因此筆者於 2006 年首創一完整的交流轉直流電路架構數學模型，成功地改進了上面所述的種種缺陷<sup>(39)</sup>。

簡單來說，參考圖五標準介面架構，引用筆者在文獻(39)所建立的全頻域模型，其單位質量直流功率輸出形式可由下面的方程式表示：



▲圖三 ZnO 壓電奈米纖維(a)奈米纖維相片；(b)製程上各層結構<sup>(30)</sup>



▲圖四 Step-Down Converter 電壓調控電路<sup>(27,28)</sup>

$$\frac{P}{M} = \frac{A^2}{\omega_n} \bar{P}(r, \Omega, k_e^2, \zeta_m)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{\left(r\Omega + \frac{\pi}{2}\right)^2} \times \frac{k_e^2 \Omega^2 r}{\left\{ \left( 2\zeta_m + \frac{2k_e^2 r}{\left(r\Omega + \frac{\pi}{2}\right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left( 1 - \Omega^2 + \frac{k_e^2 r \Omega}{r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2 \right\}}$$

其中  $\frac{P}{M}$  為單位質量直流輸出功率，A 為震源加速度， $\omega_n = \sqrt{\frac{K_E}{M}}$  為系統閉路共振頻， $\bar{P}$  為無因次化直流輸出功率。而其他相關的無因次化係數分別為：無因次化力電耦合係數  $k_e^2$ 、無因次化機械阻尼係數  $\zeta_m$ 、無因次化電阻  $r$  及無因次化頻率  $\Omega$ 。其對應形式如下：

$$k_e^2 = \frac{\Theta^2}{K_E C_p}, \zeta_m = \frac{\eta_m}{2\sqrt{K_E M}}, r = C_p \omega_n R, \Omega = \frac{\omega}{\omega_n}$$

上面這些無因次化係數表面上相互獨立，實則相互耦合，例如改變系統勁度  $K_E$  將牽連數個無因次化係數，因此無論是設計或是分析上均需要非常小心注意。針對上式，筆者提出幾個設計上必須注意的重點：

①單位質量輸出功率與激震源加速度大小 A 的平方成正比，而與壓電振動子的本身閉路自然共振頻率  $\omega_n$  成反比。後者的結果意味著，隨著壓電振動子的尺寸縮小，自然頻率  $\omega_n$  的增加將會導致單位質量能量

密度的下降。

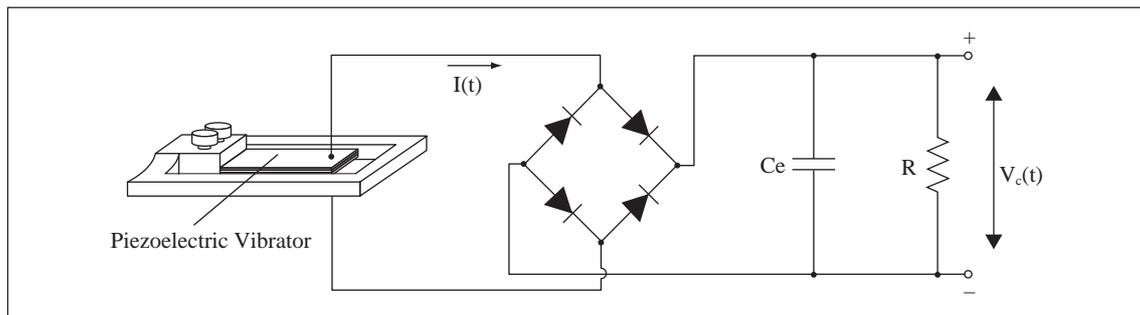
②由無因次化輸出功率  $\bar{P}$  的分母式子中可以看出，壓電振動子的共振頻率可變範圍介於閉路共振頻  $\Omega_{sc}$  ( $\Omega_{sc} = 1$ ) 與開路共振頻  $\Omega_{oc}$  ( $\Omega_{oc} = \sqrt{1+k_e^2}$ ) 之間。換句話說，給定特定的負載  $r$ ，亦必定對應到一個介於閉路與開路共振頻之間的特定最佳共振頻率  $\Omega$ 。

③由筆者文獻(39)中的分析，在閉路共振頻和開路共振頻之間，依照  $k_e^2$  和  $\zeta_m$  的比值大小，大致上可以將壓電振動子分成強 ( $\frac{k_e^2}{\zeta_m} \gg 1$ )、中 ( $\frac{k_e^2}{\zeta_m} \cong 1$ )、弱 ( $\frac{k_e^2}{\zeta_m} \ll 1$ ) 三種不同力電耦合強度的類型。由輸出功率分析中發現，中等力電耦合強度以下的壓電振動子只存在一個最大功率輸出工作點。然而對於強力電耦合振動子而言，則存在著兩個不同的工作點，分別對應在兩個不同的負載和頻率下，即  $(r_1^{opt}, \Omega_1^{opt})$ 、 $(r_2^{opt}, \Omega_2^{opt})$ ，但卻具有相同的最大直流輸出功率。換句話說，

$$\bar{P}(r_1^{opt}, \Omega_1^{opt}, k_e^2, \zeta_m) = \bar{P}(r_2^{opt}, \Omega_2^{opt}, k_e^2, \zeta_m)$$

$$\Omega_1^{opt} \approx \Omega_{sc}, \Omega_2^{opt} \approx \Omega_{oc}, r_1^{opt} \ll 1, r_2^{opt} \gg 1$$

④最大直流輸出功率與無因次化機械阻尼係數  $\zeta_m$  大小成反比，但與無因次化力電耦合係數  $k_e^2$  大小成正比。然必須注意的是若  $k_e^2$  大小超過某特定數值後，輸出功率



▲圖五 標準交流轉直流介面電路圖

將不再隨  $k_c^2$  的提高而有所增加（參見文獻(41)內之附圖三）。

⑤無因次化力電耦合係數  $k_c^2$  和壓電材料參數  $d_{31}$  或  $d_{33}$  的平方成正比，和介電係數  $\epsilon_{31}$  或  $\epsilon_{33}$ （或寄生電容  $C_p$ ）成反比。這樣的結果意味著，調整壓電寄生電容  $C_p$  將會等效上改變開路共振頻與  $k_c^2$  之大小，進而達到間接改變最大直流輸出功率與其所對應的最佳工作負載及頻率的大小。

把上述⑤的結論作進一步探討，可藉由外部並聯一電感  $L$  的方式，來調整壓電振動子的寄生電容  $C_p$ ，然而受限於其狹窄的工作頻率（ $\omega_{work} \approx \sqrt{1/LC_p}$ ）與過高的電感值  $L$ ，在實際應用上較難被實現。然而在 2005 年卻首次被法國 Guyomar 等知名學者利用 SSHI (Synchronized Switch Harvesting in Inductor) 技術，解決了上述傳統上直接並聯電感所造成的問題<sup>(12)</sup>。SSHI 技術之前身為 SSD (Synchronized Switch Damping)，為 1998 年由法國 Richard 等學者研究結構減震時所提出之介面電路<sup>(32)</sup>。由於 SSHI 技術乃藉由單純偵測極值的方式做振動同步控制，因此使用時對於震源穩定的要求便相對寬鬆<sup>(1)</sup>，而且由文獻(12)中的實驗結果顯示，輸出功率被提高了 400~900% 之多。接下來筆者將針對幾個常見的 SSHI 架構作初步介紹。

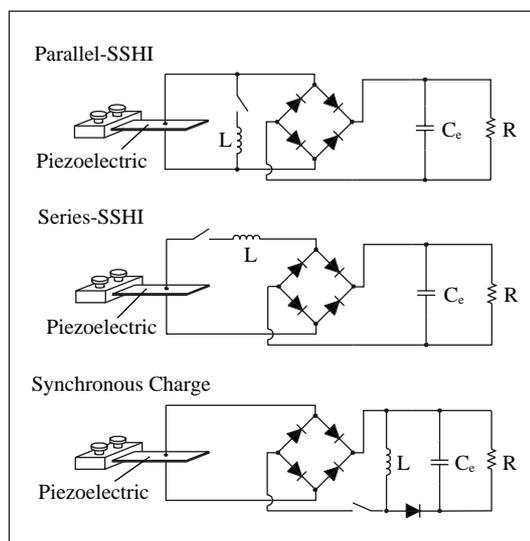
圖六為三個常見的 SSHI 架構簡圖，其中以 Parallel-SSHI 最具有代表性且發展得最早，其他的型態均可以說是其架構之延伸。Parallel-SSHI 的主要精神為減少寄生電容大小，相關全頻域的完整分析結果可參考筆者於 2007 年所發表的論文<sup>(41)</sup>，在此僅作結果討論。首先若假設壓電電壓逆轉為百分之一百之理想情況，其無因次化直流功率輸出為

$$\bar{P}_{\text{ParallelSSHI}} = \frac{4}{\pi^2} \frac{k_c^2 \Omega^2 r}{4 \left( \zeta_m + \frac{4k_c^2 r}{\pi^2} \right)^2 \Omega^2 + (1 - \Omega^2)^2}$$

由上面的方程式，可以推論出數個相當重要的結論：

①不論壓電振動子本身實際力電耦合係數的大小為何，在採用了 Parallel-SSHI 介面電路之後，寄生電容  $C_p$  效應會被該電路消除，導致力電偶合係數  $k_c^2$  會等效地被提高至無限大。這也進一步解釋鋪設壓電層面積較小的振動子，雖然呈現弱力電耦合效應，但仍可達到功率大幅提升的效果<sup>(12,21)</sup>。然而必須注意的是這樣的結果，通常會附帶更高的最佳阻抗值。

②依照前面標準電路分析第 3 點的結論，強力電耦合振動子搭配 Parallel-SSHI 電路使用，對功率提升並無太大的用處。反之，由於在加入 Parallel-SSHI 之後，廣義開路共振頻率變成無限大，導致最佳輸出功率集中在閉路共振頻率  $\Omega_{sc}$  附近，整體輸出



▲圖六 三種常見 SSHI 架構電路

功率沒有被提升，但最佳負載卻有可能低於濾波阻抗而無法實現。

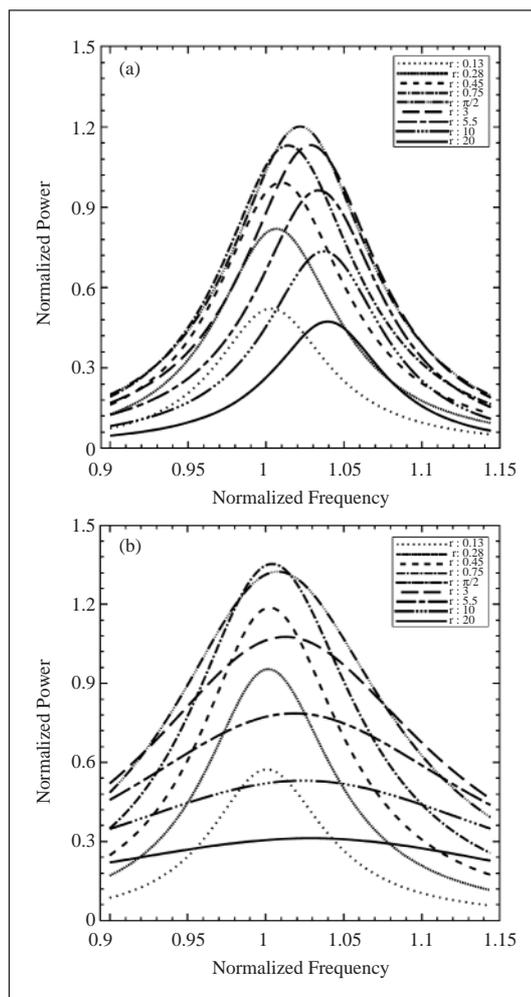
早先 Guyomar 等學者在發展此技術時，均假設震源和振動子之間為同相位振動，對於共振頻率偏移導致 SSHI 功率輸出大幅降低效應並未分析。有鑑於此，筆者在 2007 年發表的論文中<sup>(41)</sup>，即對此引入頻率偏移的效應分析，並提出完整的全頻域解析模型。結果顯示除了功率提升的效果外，Parallel-SSH 電路對於壓電振動子在共振頻偏移所導致的輸出功率驟降，有鈍化的效果，尤其在外加負載超越最佳阻抗後的效果特別明顯，可由圖七的比較結果中看出。圖七為中等力電耦合壓電振動子在使用標準電路(a)與 Parallel-SSH 電路(b)下的功率輸出頻率響應分析比較<sup>(41)</sup>。兩者最佳功率輸出幾乎相當，但若仔細比較，在 5% 的頻率偏離量下，使用標準介面的無因次功率輸出從 1.2 衰減至 0.6，而使用 Parallel-SSH 介面的輸出功率衰減則較少，從 1.3 衰減至 1.0。而在 10% 的頻率偏離量下，兩者的效果差異更加明顯。在標準介面下的無因次化功率輸出由 1.2 衰減至 0.2，而 Parallel-SSH 介面的卻只有原來一半左右的衰減量。這樣的情形顯示 Parallel-SSH 技術確實有辦法鈍化頻率飄移對輸出功率降低所產生的負面影響。而文獻中<sup>(41)</sup>更進一步指出，若使用能量損耗較低之介面電路，此一鈍化現象在中力電耦合強度的壓電振動子上會更加顯著。

相對於 Parallel-SSH，圖六 Series-SSH 技術主要則是藉由瞬間抽取能量的方式來保持寄生電容  $C_p$  的效應，使壓電振動子的共振頻率永遠被鎖定在原來的開路共振頻上，而不受外加負載之影響，效果上完全

異於前面所述 Parallel-SSH 介面電路<sup>(21)</sup>。至於圖六第 3 類 Synchronous-Charge 的方式，則是先將儲存在寄生電容  $C_p$  內之能量儲存於外部電感  $L$  中，之後再將能量釋放給外部負載  $R$ ，如此一來壓電振動子和外部負載  $R$  之間的影響，便成功地被獨立出來<sup>(20)</sup>。

## 結 論

本文除了介紹壓電振動能量擷取系統的最新發展趨勢之外，亦配合筆者近年來在



▲圖七 功率輸出之頻率響應(a)標準；(b) Parallel-SSH 電路<sup>(41)</sup>

國際期刊上所發表的一系列論文<sup>(39,40,41)</sup>，從『壓電振動子設計』、『能量儲存電路』與『能量擷取介面電路』三方面對整體系統的識別、設計與分析做一深入淺出的探討。首先筆者指出壓電振動子和介面電路與負載的耦合效應不能被忽略，而精準完備的阻抗及頻率分析，將是決定整個系統最佳化設計的重要關鍵。以標準交流轉直流輸出功率而言，其大小與外部震源形式、振動子的機電性質（質量、阻尼、勁度、力電耦合、寄生電容）與所銜接的外部負載等有密切的關聯。設計者可依照不同需求，選用適當的幾何形狀與材料，並配合阻抗匹配電路，將工作點鎖定在特定的最大輸出功率點上。另外，筆者更進一步依力電耦合與機械阻尼係數之間的不同比值，將系統區分為強、中、弱力電耦合 3 種不同強度之壓電振動子。不同力電耦合強度的振動子，必須搭配不同的能量擷取電路做匹配，而傳統上的能量擷取電路設計概念，多以弱力電耦合強度振動子為對象，對於強力電耦合之振動子並不適用。而在能量擷取介面電路方面，除了介紹標準電路外，亦與近年來相當受到矚目的 SSHI 電路做比較。筆者發現 SSHI 電路除了能夠有效提升弱力電耦合振動子的功率輸出上限外，亦指出該技術具有鈍化共振頻率偏移所造成的輸出功率衰減的效果。筆者並且進一步指出，該鈍化效果在中力電耦合振動子上將更形顯著。最後，國內在機械設計、材料開發與電力電子等工業技術水準上，與先進國家差異不大，然而對於三種不同領域的整合性發展卻是不多。因此跨領域的有效整合，將是壓電振動能量擷取能否有效突破極限並符合業界需求之重大關鍵因素。☒

## 參考文獻

1. Badel A, Guyomar D, Lefeuvre E and Richard C 2005 Efficiency enhancement of a piezoelectric energy harvesting device in pulsed operation by synchronous charge inversion J. Intell. Mater. Syst. Struct. 16 889-901
2. Badel A, Benayad A, Lefeuvre E, Lebrun L, Richard C and Guyomar D 2006 Single crystals and nonlinear process for outstanding vibration-powered electrical generators IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 53 673-684
3. Cheng S, Wang N, and Arnold D P 2007 Modeling of magnetic vibrational energy harvesters using equivalent circuit representations J. Micromech. Microeng. 17 2328-2335
4. Chiu Y and Tseng V F G 2008 A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches J. Micromech. Microeng. 18 104-004
5. Cho J, Anderson M, Richards R, Bahr D and Richards C 2005 Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I Modeling J. Micromech. Microeng. 15 1797-1803
6. Cho J, Anderson M, Richards R, Bahr D and Richards C 2005 Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: II Experiment J. Micromech. Microeng. 15 1804-1809
7. duToit N E, Wardle B L and Kim S G 2005 Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters Integrated Ferroelectr. 71 121-160
8. Elvin N G, Elvin A A and Spector M 2001 A self-powered mechanical strain energy sensor Smart Mater. Struct. 10 239-299
9. Fang H B, Liu J Q, Xu Z Y, Dong L, Chen D, Cai B C and Liu Y 2006 A MEMS-based piezoelectric power generator for low frequency vibration energy harvesting Chin. Phys. Lett. 23 732-734
10. Feng G H 2007 A piezoelectric dome-shaped-diaphragm transducer for microgenerator applications Smart Mater. Struct. 16 2636-2644
11. Guan M J and Liao W H 2007 On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages Smart Mater. Struct. 16 498-505
12. Guyomar D, Badel A, Lefeuvre E and Richard C 2005 Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 52 584-595
13. Hu H P, Cao J G and Cui Z J 2007 Performance of a piezoelectric bimorph harvester with variable width J. Mech. 23 197-202
14. Hu H P, Xue H and Hu Y T 2007 A spiral-shaped harvester with an improved harvesting element and an adaptive storage circuit IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 54 1177-1187
15. Jeon Y B, Sood R, Jeong J H and Kim S G 2005 MEMS power generator with transverse mode thin flim PZT Sensors Actuators A 122 16-22

16. Jiang S, Li X, Guo S, Hu Y, Yang J and Jiang Q 2005 Performance of a piezoelectric bimorph for scavenging vibration energy *Smart. Mater. Struct.* 14 769-774
17. Kim H W, Batra A, Priya S, Uchino K, Markley D, Newnham R E and Hofmann H F 2004 Energy harvesting using a piezoelectric "Cymbal" transducer in dynamic environment *Japan. J. Appl. Phys.* 43 6178-6183
18. Kim S, Clark W W and Wang Q M 2005 Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: analysis *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 16 847-854
19. Kim S, Clark W W and Wang Q M 2005 Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: experiment study *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 16 855-863
20. Lefeuvre E, Badel A, Richard C and Guyomar D 2005 Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 16 865-876
21. Lefeuvre E, Badel A, Richard C, Petit L and Guyomar D 2006 A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems *Sensors Actuators A* 126 405-416
22. Lesieutre G A, Ottman G K and Hofmann H F 2004 Damping as a result of piezoelectric energy harvesting *J. Sound Vib.* 269 991-1001
23. Leland E S and Wright P K 2006 Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload *Smart Mater. Struct.* 15 1413-1420
24. Liao W H, Wang D H and Huang S L 2001 Wireless monitoring of cable tension of cable-stayed bridges using PVDF piezoelectric films *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 12 331-339
25. Marzinski M, Basrour S, Belgacem B, Murali P and Colin M 2007 Comparison of piezoelectric MEMS mechanical vibration energy scavengers, *Nanotech, Proc.* 3, 21-24
26. Ng T H and Liao W H 2005 Sensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 16 785-797
27. Ottman G K, Hofmann H F, Bhatt A C and Lesieutre G A 2002 Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply *IEEE Trans. Power Electron.* 17 669-676
28. Ottman G K, Hofmann H F and Lesieutre G A 2003 Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode *IEEE Trans. Power Electron.* 18 696-703
29. Poulin G, Sarraute E and Costa F 2004 Generation of electric energy for portable device : comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system *Sensors Actuators A* 116 461-471
30. Qin Y, Wang X and Wang Z L 2008 Microfibre-nanowire hybrid structure for energy scavenging *Nature* 451 809-814
31. Renaud M, Fiorini P and Hoof C V 2007 Optimization of a piezoelectric unimorph for shock and impact energy harvesting *Smart. Mater. Struct.* 16 1125-1135
32. Richard C, Guyomar D, Audigier D and Ching G 1998 Semi passive damping using continuous switching of a piezoelectric device *Proc. SPIE* 3672 104-111
33. Richards C D, Anderson M J, Bahr D F and Richards R F 2004 Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component *J. Micromech. Microeng.* 14 717-721
34. Rome L C, Flynn L, Goldman E M and Yoo T D 2005 Generating electricity while walking with loads *Science* 309 1725-1728
35. Roundy S, Wright P K and Rabaey J M 2004 *Energy Scavenging for Wireless Sensors Networks with Special Focus on Vibrations* (Boston, MA : Kluwer-Academic)
36. Roundy S and Wright P K 2004 A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics *Smart Mater. Struct.* 13 1131-1142
37. Roundy S, Leland E S, Baker J, Carleton E, Reilly E, Lai E, Otis B, Rabaey J M, Wright P K and Sundararajan V 2005 Improving power output for vibration-based energy scavengers *IEEE Pervasive Comput.* 4 28-36
38. Shenck N S and Paradiso J A 2001 Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics *IEEE Micro* 21 30-42
39. Shu Y C and Lien I C 2006 Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems *Smart Mater. Struct.* 15 1499-1512
40. Shu Y C and Lien I C 2006 Efficiency of energy conversion for a piezoelectric energy harvesting system *J. Micromech. Microeng.* 16 2429-2438
41. Shu Y C and Lien I C 2007 An improved analysis of the SSHI interface in piezoelectric energy harvesting *Smart Mater. Struct.* 16 2253-2264
42. Sodano H A, Inman D J and Park G 2004 Review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials *Shock Vib. Digest* 36 197-205
43. Taylor G W, Burns J R, Kammann S M, Powers W B and Welsh T R 2001 The energy harvesting ell: a small subsurface ocean/river power generator *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 539-547
44. Wang S, Lam K H, Sun C L, Kwok K W, Chan H L W, Guo M S and Zhao X Z 2007 Energy harvesting with piezoelectric drum transducer *Appl. Phys. Lett.* 90 113506
45. White N M, Glynn-Jones P and Beeby S P 2001 A novel thick-film piezoelectric micro-generator *Smart Mater. Struct.* 10 850-852
46. Williams C B and Yates R B 1996 Analysis of a micro-electric generator for microsystems *Sensors Actuators A* 52 8-11