

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

創新微型高能量密度換能器設計與實現

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC97-2221-E-009-085-MY3

執行期間：97年 8月01日至 98年 7月 31日

計畫主持人：林錫寬

共同主持人：宋震國 國立清華大學動力機械工程學系
黃建生 中原大學機械工程學系

計畫參與人員：邵啟意、蔡哲弘

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系

中華民國 98 年 05 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

總計畫：創新微型高能量密度換能器設計與實現

計畫編號：NSC97-2221-E-009-085-MY3

執行期限：97年08月01日至98年07月31日

主持人：林錫寬 國立交通大學電機與控制工程學系

共同主持人：宋震國 國立清華大學動力機械工程學系

黃建生 中原大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫針對呼啦圈 (Hula Hoop) 系統產生之微小能量，藉由呼啦圈運動推導 X, Y 方向之自由質量動態系統方程式，並利用 Lagrange' s equation 求系統解，採用 Homotopy Perturbation 推導系統近似解析解，並完成呼啦圈系統動態分析與穩定度分析。在微發電機的製作與儲能電路設計與晶片製做均已獲致相當成果，也證實以呼啦圈系統為主的微發電機儲能電路的可行性，也提供另一項新能源發展的契機。

關鍵詞：複合式能量獵取系統、呼拉圈、動態方程式、穩定度分析、微型發電機，儲能電路、直流對直流轉換器、低功率

Abstract

The project is point to development of Hula Hoop system which products micro-energy and stroes. We have developed the Hula Hoop dynamic system with free mass in X, Y direction. We also have found the solution of system and first order numerical solution by using Lagrange' s equation and Homotopy Perturbation method, respectively. On the other hand, we have implement the circuit design and proved the possible of

making up micro-generator of Hula Hoop system. The ideal provided another view point in new energydevelopment.

Keywords: energy harvesting circuit, DC-to-DC converter, low power, Hula Hoop system, filament winding method, micro-generator, Lagrange' s equation, Homotopy Perturbation

二、緣由與目的

新興國家崛起，對能源消耗相對增加，各國在新能源開發探求上一直以所居之地理天然環境為新能源的重要依據。例如：太陽，風能，地熱，天然氣等為主要開發之新能源。但卻忽略一般日常週遭最易產生的微小能量，例如：往復式的振動，身體的來回擺盪或複合規律性的運動，皆是最容易利用其來回運動的模式對磁通造成變化而產生電動勢，這些微小電動勢可以透過儲能電路被有效收集俟於應用端系統結合為其提供電力來源[4-6]。

本計畫既是以此概念為出發點，透過子計畫二，利用呼啦圈 (Hula Hoop) 系統乃是一種複合式運動型態，藉直線外力的震盪為運動源，將其轉成一個旋轉運動，其旋轉運視為一微小發電機，經由此特殊的方式提升發電機的發電效率 [15, 16]。子計畫一則針對

多種動力源之複合式運動型態轉換機構進行設計、分析與實作。轉換機構之設計概念乃經由呼拉效應原理將外力造成之直線運動轉換為旋轉運動，以作為發電裝置之輸入。透過此一機構可將振動能量轉換為可利用之電力 [5]。

為有效收集呼啦圈 (Hula Hoop) 系統微小能量，子計畫三設計出以直流對直流轉換器為主架構的回授式儲能電路，以數百 μW 到數 mW 等級的低功率能量為主要收集目標，並使用超級電容當作能量儲存元件。子計畫三之電路設計初始條件是以子計畫二之微型發電機所產生的不穩定電壓源當做輸入，而設計目標是以儲能元件的額定電壓當作電路輸出電壓。

該儲能電路透過比較輸入電壓而產生的開關訊號來控制電路 [26]，使得不穩定的微小能量源經過儲能電路後能夠穩定在固定電壓，進而提高儲能元件的儲存效率。經由各子計畫的整合構成一完整的微發電能量轉換儲能系統，達到以直線外力的震盪為運動源，透過轉換電路轉換成微小能量，再由特別設計之電路達到收集能量的目的，而成微型高能量密度轉換器並進一應用成為一高效能之儲能系統。

三、研究成果與討論

(一)、呼拉圈系統運動模型之建立-子計畫一

目前子計畫一完成各種不同型式換能器的比較與評估(表一)與系統動態響應與穩定度分析 [1-5]。

表一、動力源比較

	Power Density ($\mu\text{KW}/\text{cm}^3$) 1 Year Lifetime	Power Density ($\mu\text{KW}/\text{cm}^3$) 10 Year Lifetime
Solar (Outdoors)	15,000 direct sun 150 cloudy day	15,000 direct sun 150 cloudy day
Solar (Indoors)	6 office desk	6 office desk
Vibrations	200	200
Acoustic Noise	0.003 @ 75dB 0.96 @ 100dB	0.003 @ 75dB 0.96 @ 100dB
Temperature Gradient	15 @ 10^0C gradient	15 @ 10^0C gradient
Shoe Inserts	330	330

Batteries (nonrecharge Lithium)	45	3,5
Batteries (rechargeable Lithium)	7	0
Fuel Cells (methanol)	280	28
Nuclear Isotopes (Uranium)	6×10^6	6×10^5

由圖一呼拉圈系統構型圖，推導出 X, Y 方向之自由質量動態系統方程式 [9]。

$$\dot{x}_f = -R_m \dot{\theta} \sin \theta \quad (1)$$

$$\dot{y}_f = \dot{y} + R_m \dot{\theta} \cos \theta \quad (2)$$

其中， x_f 與 y_f 分別代表自由質量在 X 與 Y 方向之絕對位移。利用 Lagrange's equation.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_k} \right) = Q_{qk} \quad (3)$$

其中 $L=T-V$ ， Q_{qk} 為非保守力作用項。

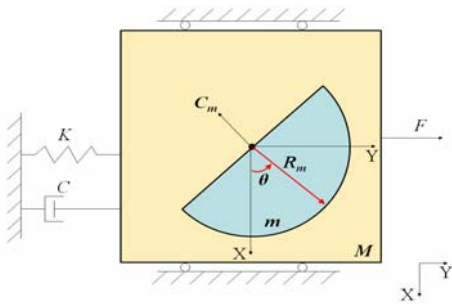
求解的過程中，採用 Homotopy Perturbation 推導近似解析解 [10, 11]，如圖二所示。最後完成呼拉圈系統運動模型之建立。其一次近似解為：

$$V_{\theta}(\tau) = V_{0\theta} + V_{1\theta} = \alpha\tau + u_1 \cos(2\alpha\tau - \gamma) \quad (4)$$

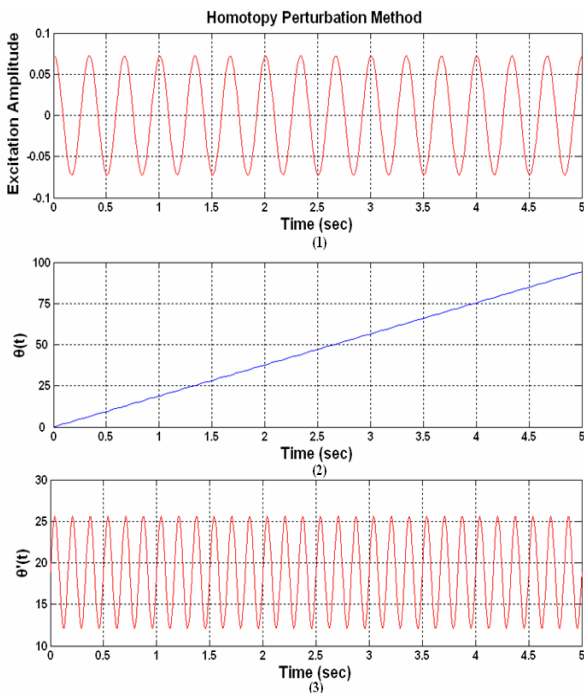
接著，以 MATLAB 來進行數值模擬呼拉圈運動之系統動態響應，系統模擬參數與初始條件設定，如表二。所謂呼拉圈運動是指在得到主質量與自由質量之一次近似穩態解後，必須判讀此解之穩定情況：即呼拉圈運動可持續繞轉。子計畫一採用 Floquet 理論，於近似解加入微擾量並代入原方程式中，判斷系統穩定度 [14]。其模擬結果如圖三；很明顯在 0 到 1.5 秒內，系統有暫態行為，其後系統發生呼拉圈運動。可得近似解響應與數值模擬圖形，系統皆有呼拉圈運動發生，且自由質量作動上：維持旋轉運動，

但其振動頻率為外力頻率 2 倍。

關於利用數值方法模擬呼拉圈運動系統穩定度分析，主要在於減少呼拉圈運動系統不穩定區域，圖四為自由質量加上慣量項後的數值模擬結果。數值模擬與近似解穩定度結果，是有吻合的。圖四結果中，區域 II 為呼拉圈作動區域，即滿足當初近似解之假設；在區域 I 紅色區塊部分，則代表系統並無呼拉圈運動發生。同時，在區域 I 與 II 之間，存在過渡區域，即為圖中青色“+”號之區域，此時自由質量運動為反覆搖擺作動，即不為呼拉圈運動。在區域 III 部分，青色“o”代表系統有暫態的呼拉圈運動。其他藍色“+”，則為系統雖在頻率上符合，但自由質量僅為反覆擺動

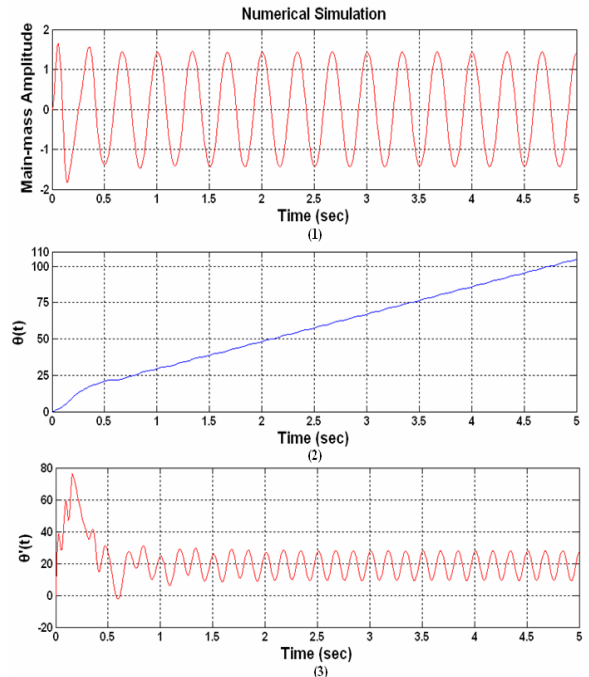


圖一、呼拉圈運動構型

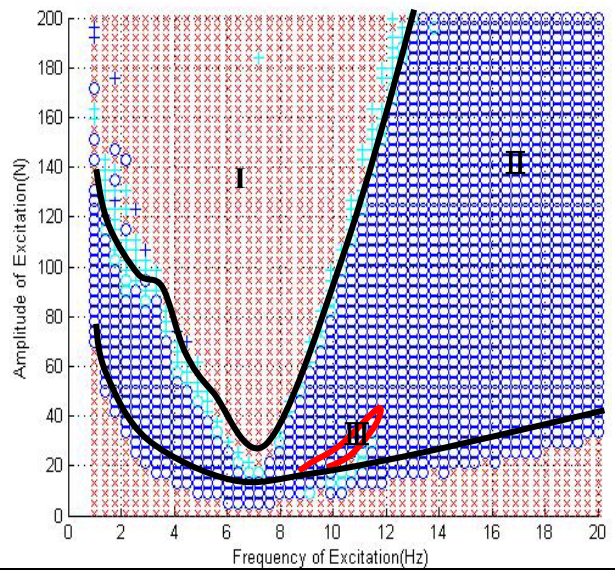


圖二、以 Homotopy Perturbation 方法所得近似解之響應圖形

應圖形：(1)主質量振幅大小；(2)自由質量轉動角度；(3)自由質量轉動速度。



圖三、數值模擬之響應圖形：(1)主質量振幅大小；(2)自由質量轉動角度；(3)自由質量轉動速度。



	Blue (o)	Blue (+)	Cyan (o)	Cyan (+)	Red (x)
Hula-hoop motion	Yes	No	No	No	No
Reversal	No	Yes	No	Yes	
Freq. α	$\cong 1w$	$\cong 1w$	$\cong 1w$	$\cong 1w$	
Freq. ω	$\cong 2w$	$\cong 2w$	$\neq 2w$	$\neq 2w$	

圖四、以半圓盤為自由質量加上慣量項後的數值模擬結果

表二、系統參數與初始條件

參數設定	符號	數值 (單位)
主質量	M	0.45 kg
自由質量	m	0.045 kg
質量比 ($m/(M+m)$)	ε	0.1
自由質量旋轉半徑	Rm	0.05 m
系統阻尼比	c	0.1
彈簧剛性	k	1000 N/m
自由質量阻尼比	cm	0.01
主質量初始位置	$y(0)$	0 m
主質量初始速度	$y'(0)$	0 m/sec
自由質量初始位置	$\theta(0)$	0.0 rad
自由質量初始速度	$\theta'(0)$	0.0 rad/sec

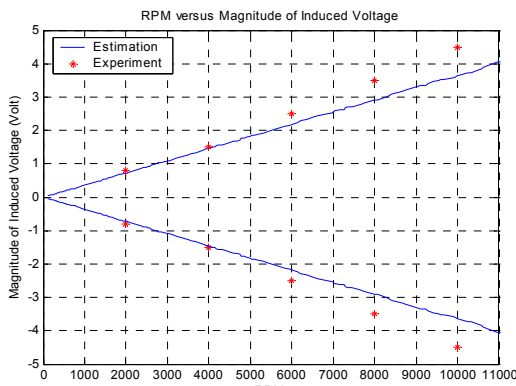
(二)、呼拉圈微發電系統系統設計-子計畫二

呼拉圈 (Hula Hoop) 系統線圈則由纏繞方式(filament winding method)繞成以及微機電製程方式實現，此兩種方法為最新繞線技術，可以大幅的縮小線圈體積，製作出僅約 $2 \times 2 \times 1 \text{mm}^3$ 之微小型發電機；以及採用 NdFeB 磁性材料，此種材料擁有非常高的磁能積(53 MGOe)，能夠供應強大的磁場提昇發電功率。經由上述幾種方法，可有效達成縮小體積、發電效率提昇之理想化。其應用方法乃是法拉第定律 [27]。

$$emf = -\frac{d\phi}{dt} \text{ V} \quad (5)$$

當 $\phi = \int_S B \cdot dS \text{ Wb}$ 時 emf 改寫為

$$emf = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot ds \quad (6)$$



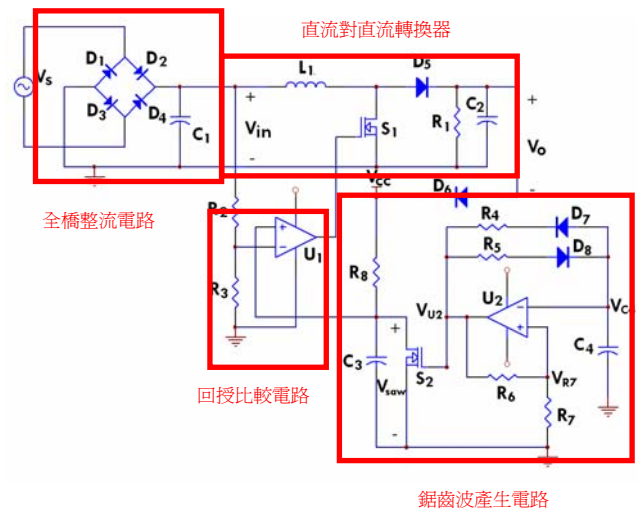
圖五、轉子轉速與輸出感應電動勢之理論與實驗值之比較

法拉第定律應用於微小型發電機，可得到轉子轉速與輸出感應電動勢之關係，圖五為微小型發電機之轉子轉速與輸出感應電動勢之理論與實驗值之比較。

(三)、呼拉圈式換能器之儲能電路設計與晶片實現-子計畫三

子計畫三以儲能電路設計為目標，圖六為其電路架構。以不穩定的電壓源 V_s 當作系統輸入，經過儲能轉換電路後在輸出端產生一個固定的電壓 V_o 。對儲能元件 C_2 進行充電。理想儲能系統之轉換效率 $\eta_{system} = 1$ ，其定義如下 [22, 24, 25]：

$$\eta_{system} = \frac{P_{harvest}}{P_{generator}} \quad (7)$$

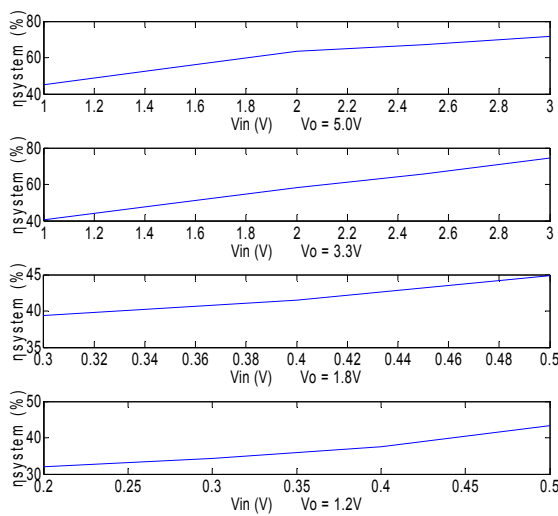


圖六、儲能轉換電路架構

電容 C_2 為儲能效果高的超級電容。本電路的特性不同於一般穩壓 IC 需要一個高於輸出電壓的工作電壓輸入，當電路中輸入端電壓低於儲能元件額定電壓，也可以經由調整電路的電壓增益來達到升壓、穩壓的效果，並且電能的轉換效率較穩壓 IC 為佳[25-27]。

子計劃三分別對 (a) V_{in} 小於 5V, V_o 穩定在 5V (b) V_{in} 小於 3.3V, V_o 穩定在 3.3V (c) V_{in} 小於 1.8V, V_o 穩定在 1.8V (d) V_{in} 小於

1.2V， V_o 穩定在 1.2V 四種不同狀況下做實驗，不同條見下的系統轉換效率顯示於圖七。



圖七.不同狀況下的系統轉換效率

四、成果自評

透過呼拉圈運動搭配電磁式裝置，將直線運動轉換為旋轉運動，作為電磁式換能器之能源輸入並進行發電，設計一複合式能量轉換系統；隨著發電量與動態之特性，透過機電整合設計，本獵能器裝置有效應用於日常攜帶之 3C 產品，為未來可研究的方向。同時，此獵能器裝置除可搭配電磁式換能器，作為本系統主要發電機制外，亦可搭配其他發電機制以彌補能量轉換間之流失現象，可為後續探討的。

欲設計獵能器裝置達到最大發電效用與廣泛應用，設計物理模型且建立代表之數學關係式。由關係式求呼拉圈運動物理模型動態響應與穩定度分析。未來在設計複合式獵能器方面，在相關作動之外力源環境與本身機構匹配問題上，可提供一完整確切之設計依據。

微型發電機設計分析已將相關理論經過推導後朝最佳化的演算法則進行修正，平面線圈以配合永久磁鐵設計完成即可完成發電機設計。另外，針對微型發電機設計分析組裝時易產生線圈與磁場之間同心圓之偏差量、線圈與磁鐵間距亦產生影響，此等皆可

作為未來相關之研究討論與實驗測試。

呼拉圈式換能器之儲能電路設計與晶片實現的計畫執行中主要面臨的問題，由於微型發電機所產生的能量源多不穩定，故產生的電壓也一直變動，要達到能量儲存，則必須經過有效的儲能系統來將此能量轉換成適合儲存在儲能元件的形式。本計畫所設計的儲能電路能夠將輸入端不穩定的電壓經過電路自動回授補償後控制電路的電壓增益大小來使輸出電壓穩定在儲能元件的額定電壓值，藉此達到將能量儲存在儲能元件的目的。

五、參考文獻

- [1] S. Chalasani, J. M. Conrad, 2008, "A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems," IEEE Southeastcon, pp. 442-447.
- [2] M. Pereyema, 2007, "Overview of the Modern State of the Vibration Energy Harvesting Devices," MEMSTECH, pp. 23-26.
- [3] Shad Roundy, 2005, "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers," IEEE Pervasive Computing, 4(1), pp. 28-36.
- [4] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, 2003, "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes," Computer Communications, 26, pp. 1131-1144..
- [5] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," 2005, IEEE Pervasive Computing, 4(1), pp. 18-27.
- [6] E. M. Yeatman, 2006, "Rotating and Gyroscopic MEMS Energy Scavenging," IEEE Proc. of BSN, pp. 42-45.
- [7] Y. Yoshitake, T. Ishibashi, and A. Fukushima, 2004, "Vibration Control and Electricity Generating Device Using a Number of Hula-hoops and Generators," Journal of Sound and Vibration, 275(1-2), pp. 77-78.
- [8] Y. C. Kang, 2007, "An Investigation into the Hula-Hoop Motion due to Impulsive Excitation," M. S. thesis, National Tsing Hua University, Hsinchu..

- [9] C. C. Wang, 2004, "Dynamic of Hula Behavior and its Engineering Design," M. S. thesis, National Tsing Hua University, Hsinchu.
- [10] J. H. He, 2000, "A Coupling Method of a Homotopy Technique and a Perturbation Technique for Nonlinear Problems," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 35, pp. 35-43.
- [11] J. H. He, 2003, "Homotopy Perturbation Method: A New Nonlinear Analytical Technique," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 135, pp. 73-79
- [12] H. Hatwal, A. K. Mallik, and A. Ghosh, 1983, "Forced Nonlinear Oscillations of an Autoparametric System – Part 1: Periodic Responses," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 657-662.
- [13] J. H. He, 1999, "Variational Iteration Method – A Kind of Nonlinear Analytical Technique: Some Examples," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 34, pp. 699-708
- [14] T. Kapitaniak, S. R. Bishop, 1999, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, Wiley, England
- [15] C. B. Williams and R.B.Yates, "Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems," *Sensors and Actuators, A* 52, pp.8-11, 1996.
- [16] Li, Wen J.,2000, "A Micromachined Vibration-induced Power Generator for Low Power Sensors of Robotic System," World Automaton congress: 8th Interational Symposium on Robotics with Applications.
- [17] Low Power Sensors of Robotic System," World Automaton congress: 8th Interational Symposium on Robotics with Applications.
- [18] Li, Wen J.,2000,"Infrared Signal Transmission by a Laser-Micromachined Vibration-Induced Power Generator," Proc.43rd IEEE Midwest Symp. On Circuits and systems.
- [19] P.Glynne-Jones, "Towards a Piezoelectric Vibration-power Microgenerator," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 148, No.2, 2001, pp.68-72.
- [20] Amirtharajah, R., "Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Generation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 33, No.5, 1998, pp. 687-695.
- [21] P. B. Koeneman, Ilene J. Busch-Vishniac, and K.L. Wood, "Feasibility of Micro Power Supplies for MENS," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.6, No.4, December 1997.
- [22] M. J. Guan and W. H. Liao, "On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages," *Smart Materials and Structures*, vol. 16, pp. 498-505, 2007.
- [23] P. Spies, M. Pollak, and G. Rohmer, "Power Management for Energy Harvesting Applications," *Proceedings of 1st Annual nanoPower Forum*, pp.6-11, 2007.
- [24] H. A. Sodano, G. Park, D. J. Leo, D. J. Inman, "Use of piezoelectric energy harvesting devices for charging batteries," *Proceedings of SPIE*, vol.5050, pp.101-108, 2003.
- [25] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gerhenfeld, "Parasitic power harvesting in shoes," in *Proc. 2nd IEEE Int. Symp. Wearable Comput.*, pp. 132-139, October 1998.
- [26] E. Lefeuvre, D. Audigier, C. Richard, and D. Guyomar, "Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester," *Power Electronics, IEEE Transactions*, vol.17, No.5, pp. 669-676, September, 2002.
- [27] Mohan, N., Undeland, T. M., and Robbins, W. P. (2002). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley.