



# 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：98年08月01日至99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作均已獲致相當成果，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、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 [鍵入文字]

system. The ideal provided another view point in new energydevelopment.

**Keywords:** energy harvesting circuit, 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]。子計畫一針對呼拉效應原理，將外力造成之直線運動轉換為旋轉運動，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]。

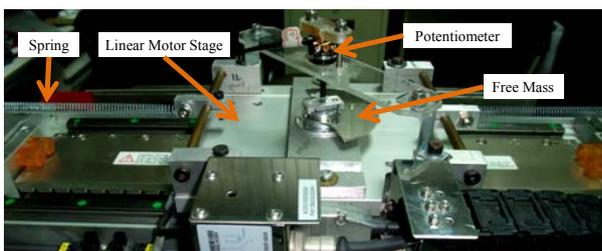
為有效收集呼啦圈 (Hula Hoop) 系統微小能量，設計出一高效率之儲能電路，以數百  $\mu\text{W}$  到數  $\text{mW}$  等級的低功率能量為主要收集目標。子計畫三之電路設計初始條件是以子計畫二之微型發電機所產生的不穩定電壓源當做輸入，而設計目標是以儲能元件的額定電壓當作電路輸出電壓。

該儲能電路無須外部供給能源，能達到無源控制，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而應用成為一高效能之儲能系統。

### 三、研究成果與討論

#### (一)、呼拉圈系統分析與實驗-子計畫一

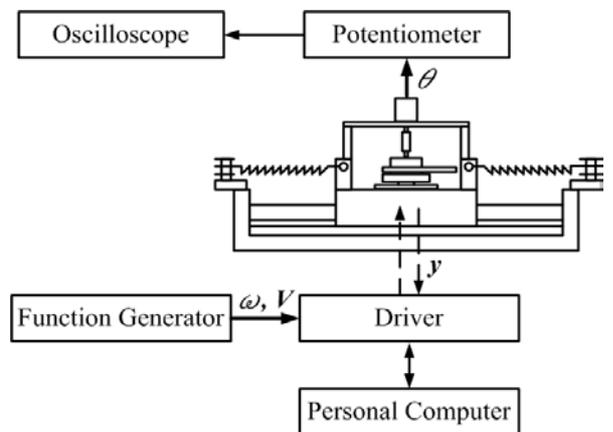
由先前所完成之穩定度分析與數值模擬得知，近似解穩定度與數值積分上有很好的結果，進而以實驗進行驗證。首先，在實驗部分，根據已知物理模型，建立相關呼拉圈實驗架構；在主質量部分，以 HIWIN 線性馬達搭配線性馬達乘載座作為主質量，中間半圓形結構則視為自由質量。



圖一、呼拉圈實驗構造

在實驗架構部分，線性馬達設定於力量模式下作動，搭配產波器以單位力量輸出  $40\text{N/V}$  進行致動。在不同外力與頻率下，觀察在主質量往復運動情況下，自由質量運動行為；為得到主質量響應結果，主質量位置可透過光學尺，經由電腦 RS-232 連接埠得

到。為模擬設定之物理模型，於主質量兩旁安裝對等之彈簧，；此外，藉由彈簧拘束，主質量可安置於線性馬達行程中間位置，以利進行往復運動。針對自由質量轉動阻尼部分，以轉速計量測單位時間其繞轉速度得到。整體實驗架構說明，如二所示：當主質量以外部產波器得到往復運動同時，自由質量響應波型可藉由示波器觀察。在非線性運動中，初始條件對於系統響應行為具備相當的影響；不同的初始條件，可能導致不同的響應行為。雖然在此實驗中，自由質量初始位置可經由擺放位置決定，但對於其初始速度給定部分，則較為困難。因此，在本計畫中，尚未進行控制；這也是本計畫後續可改進之處。但在調整外力頻率與振幅下，呼拉圈行為依然可以觀察得到；但於暫態時，自由質量會伴隨較多的反轉行為，不過，由實驗得到，較大的外力振幅，較易得到呼拉圈行為，此也可由數值積分結果證明。

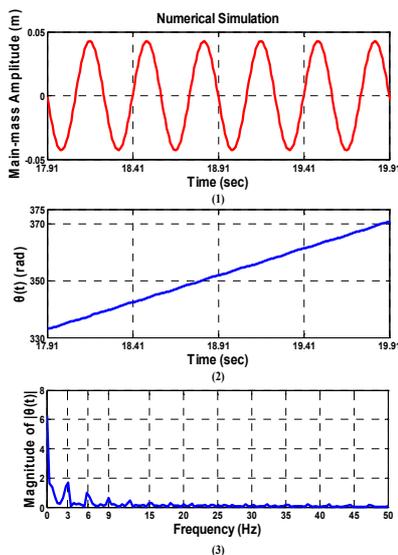


圖二、呼拉圈設備架構圖

因此，在觀察自由質量響應行為時，可先由較大的外力振幅來進行，此時較易得到呼拉圈行為；藉由調變外力振幅由大至小，進而觀察自由質量響應動作，若持續有呼拉圈行為，也代表此時系統是可具備該行為的，但相對的，其對初始速度的需求也會增加。故，越大的外力振幅，系統產生呼拉圈行為時的初始速度需求影響也越小；相對

的，便會增加。此外，在進行實驗時，本計畫盡可能針對數值模擬所設定之外力振幅與頻率進行實驗，但由於在外力頻率或振幅過大所導致振動量之問題，亦需考量；因為此振動量也影響到整體機台的穩定性，使得數據誤差過大。所以，在此機台線性承載台往復行程設定為 0.11m，進而限定外力振幅大小。而隨著外力頻率增加，相對的外力振幅也越小；在衡量系統本身振動量問題，在本實驗外力振幅僅設定至 140N，而外力頻率至 8Hz。

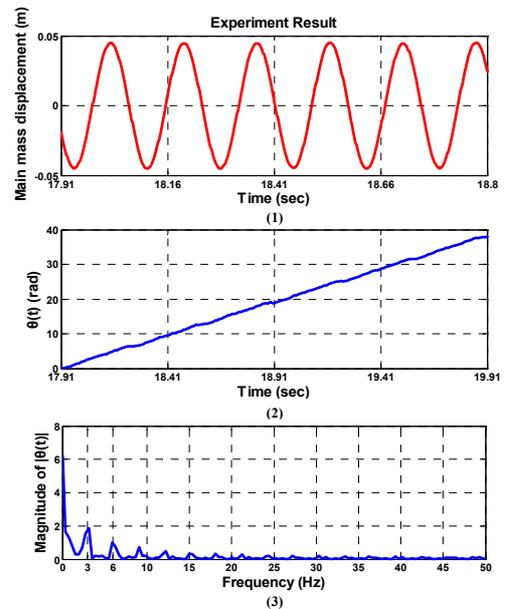
以外力頻率 3Hz 與振幅 60N 為例，如圖所示，得到主質量與自由質量，在穩態情況下，系統響應行為。為方便觀察與實驗結果之對照，在此，以穩態後之其中 2 秒進行比較。由圖 3-1 結果得到，主質量以接近外力頻率  $\omega$  進行反覆運動；由圖 3-2 觀察，此時自由質量隨著時間角度逐步增加，且增加頻率亦近似外力頻率  $\omega$ ；再由圖 3-3 結果，針對自由質量轉動角速度進行快速傅立葉轉換 (FFT)，得到自由質量除以外力頻率  $\omega$  進行繞轉外，亦伴隨  $2\omega$  的振盪頻率。此外，由圖形中，亦觀察到有  $3\omega$  的頻率振盪，但於本計畫中僅考量  $2\omega$  的振盪行為，故  $3\omega$  振盪頻率是忽略的。



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

量角速度 FFT。

圖四四為實驗結果；由結果可得到：實驗與數值積分有很好的對照。實驗結果是以在穩定呼拉圈行為發生情況下，進行數據擷取。由圖 4-1 也得知，主質量以外力頻率  $\omega$  進行運動，同時，自由質量亦持續有穩定繞轉行為，並以接近外力頻率  $\omega$  運作，如圖 4-2 可知；並同時帶有  $2\omega$  振盪頻率，且於實驗結果中，亦觀察到  $3\omega$  的自由質量振盪頻率的產生，如圖 4-3。但，相對來說，其振幅影響則小於  $2\omega$  的振盪頻率。然而，也因為主質量阻尼影響，使得實驗結果與外力部分產生相位差，但主質量依然是執行往復運動的。



圖四、實驗結果：(1)主質量振幅大小；(2)自由質量轉動角度；(3)自由質量角速度 FFT。

在嘗試不同外力振幅與頻率後，呼拉圈行為作動區域可自錯誤！找不到參照來源。得知。其中，對於外力頻率為 2Hz 時，其外力振幅自 5.2N 到 52N，皆發生呼拉圈行為。

然而，當外力頻率為 2Hz 時，外力振幅達到 60N 時，此時系統並未發生呼拉圈運動，進而轉換為反覆擺動與呼拉圈行為接連發生的情況，但最終，僅剩下反轉行為與不

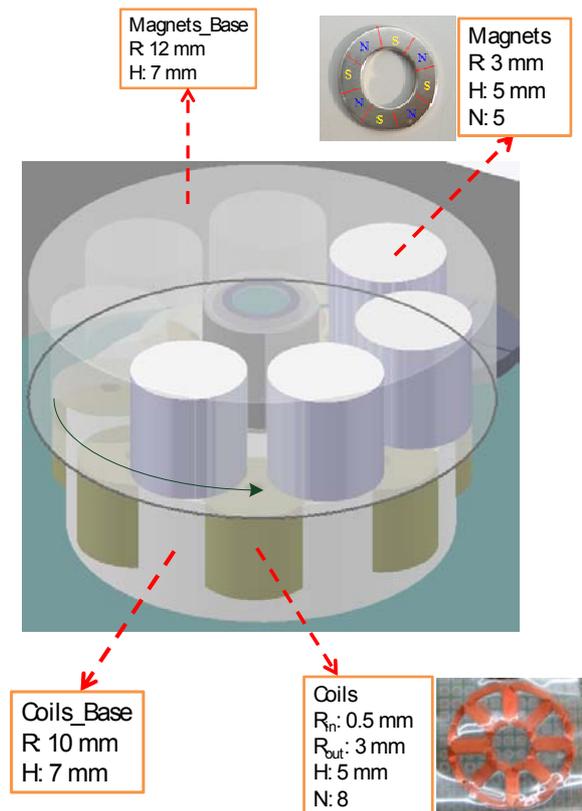
定期的繞轉運動。在此計畫中，是無法滿足為呼拉圈行為的。此外，當外力頻率為 3Hz 到 8Hz 時，考量到實際機台振動量過大問題，最大實驗外力振幅僅到 140N；但實際情況下，可推斷：在此頻率範圍下，振幅大於 140N，系統可能會發生呼拉圈行為。且由結果可得知，外力頻率越大，呼拉圈行為對於最低的外力振幅亦逐步增加。由此可看出，外力振幅對呼拉圈行為發生的影響。

在此計畫中，對於相關物理模型的建立、運動方程式推導、以 homotopy perturbation method 得到之近似解析解、相關穩定度與數值積分結果，至建立實驗設備等，皆進行探討研究。承上述，不僅近似解穩定度與數值模擬有不錯的比較結果，在數值模擬與實驗結果部分，亦有很好的對照。此亦代表，在不同外力頻率與振幅作用下，呼拉圈作動區域之存在。因此，透過設計、理論與實驗的驗證得知，本計畫對於微型複合式呼拉圈獵能器，在設計與實驗上，都有一定的正確性；不僅提供可靠的設計依據與方向，亦使本研究可更進一步地，針對相關設計與應用進行改善，使其於人體日常運動應用更佳適切。

## (二)、呼拉圈微發電機設計-子計畫二

本子計畫，第一年已完成針對微發電機發電量的估測，以電磁學理論確立感應電動勢之來源與計算方法，再針對應用於轉子系統中藉由高速主軸轉動所造成之形式作深入探討，並進行模擬高速轉軸之實驗，由工研院機械所所提供現有之發電機模組，以及本執行單位所設計之模擬高速主軸轉動造成磁力線切割發電之之直流馬達和磁鐵固定座，並輔以電源供應器以及檢視發電機感應電動勢輸出之示波器，由實驗量測結果與先前所估測出之模擬量做一比較與探討，已完成初步結果。本年度以原先所設計之微發電機架構與理論推導，更進一步深入設計，針對子計畫一所設計複合式能量獵取系統之機構，

將微發電機與複合式呼拉圈獵能裝置結合設計出一新型微發電裝置，如圖五所示並於後端設計一微獵能電路做為發電機之測試，針對此發電裝置所發出之電量進行轉換，搭配所設計之微發電計以及呼拉圈獵能裝置，整合成一微型高能量密度換能器。

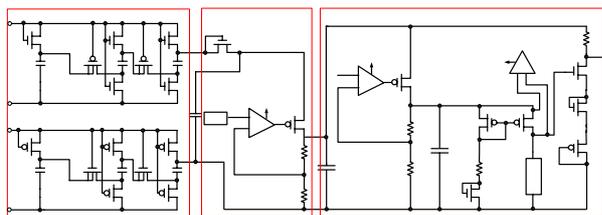


圖五、微發電機架構圖

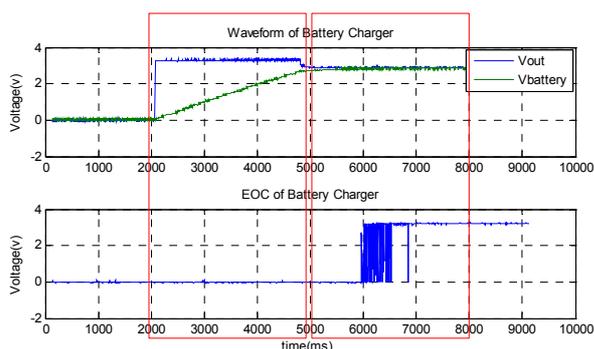
## (三)、呼拉圈式換能器之儲能電路設計與晶片實現-子計畫三

子計畫三以設計後端儲能電路為目標，針對前端微發電機所發出之微小能量加以收集儲存，由於前端能量為週期或非週期性訊號，因此在電路設計上必須要考量能量轉換之匹配性，本年度已完成整體後端轉換電路之設計、模擬，包含創新高速充電泵設計、低壓降穩壓器設計以及充電電路設計等，並透過國家系統晶片中心(CIC)成功下線，已完成初步量測，待子計畫一、子計畫二整合完成後，搭配本子計畫所設計之儲能電路 IC，

整合成一創新微型高能量密度換能器。整體電路如圖六所示，考量前端換能裝置實際輸出能量極小，約為 2V 以下之交流訊號，因此首先進行整流升壓，設計一新型高速充電泵(Charge Pump)，此電路能將輸入微小之交流電壓訊號升壓並整流成直流訊號，透過新型高速充電泵，只需要一個週期即能達到升壓整流效果，且無需外部控制訊號，相較於一般 Dickson charge pump，此電路設計更能達到高速低耗能之特性，接著後端設計一低壓降穩壓電路(LDO)，透過此電路，降低負載效應，於後端輸出一穩定之 DC 電壓源提供給充電電路(Battery Charger)使用，最後設計一充電電路，其輸出結果如圖七所示，將所轉換之能量儲存在電池或是大型儲能裝置上。



圖六、儲能電路設計



圖七、充電電路波形圖

#### 四、成果自評

透過呼拉圈運動搭配新設計之電磁式換能裝置，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，對於相關物理模型的建立、運動方程式推導、以 homotopy perturbation method 得到之近似解析解、相關穩定度與數值積分結果，至建立實驗設備等，皆進行探討研究。承上述，不僅近似解穩定度與數值模擬有不錯的比較結果，在數值模擬與實驗結果部分，亦有很好的對照。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發電機設計。另外，針對微型發電機與呼拉運動裝置之結合，設計分析組裝時易產生線圈與磁場之間同心圓之偏差量、實際產生能量誤差，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。目前本計劃所設計的儲能電路已經成功下線，能夠將輸入端不穩定的電壓經過高速充電泵以及低壓降穩壓器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. Pereyma, 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. Koенeman, 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.