

目錄

目錄	I
中文摘要	II
Abstract	II
一、研究目的	1
二、文獻探討	1
三、研究成果與討論	2
3.1 呼拉圈系統分析與實驗-子計畫一	2
3.1.1 物理與運動方程式	2
3.1.2 系統動態響應	3
3.1.3 系統動態分析	4
3.2 呼拉圈微發電機設計-子計畫二	7
3.2.1 系統感應電動勢與發電量	7
3.2.2 實驗設備與響應結果比較	7
3.2.3 呼拉圈獵能裝置之發電量	9
3.3 呼拉圈式換能器之儲能電路設計與晶片實現-子計畫三	9
3.3.1 切換式電容升壓電路	10
3.3.2 功率管理電路	10
3.3.3 低壓降穩壓電路	11
3.3.4 實驗結果	12
3.4 系統整合之實驗結果	12
四、成果自評	13
五、參考文獻	14
國科會補助專題研究計畫成果報告自評表	16
國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表	17

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100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
黃健生 中原大學機械工程學系

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 system. The ideal provided another view point in new energy development.

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

一、研究目的

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於應用端系統結合為其提供電力來源[1-6]。

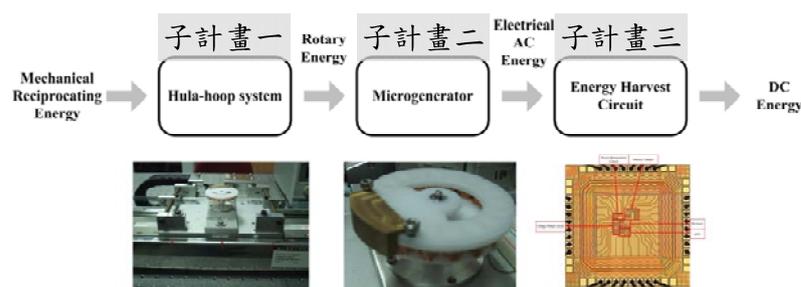
本計畫既是以此概念為出發點，透過子計畫二，利用呼啦圈（Hula Hoop）系統乃是一種複合式運動型態，藉直線外力的震盪為運動源，將其轉成一個旋轉運動，其旋轉運視為一微小發電機，經由此特殊的方式提升發電機的發電效率 [7, 8]。子計畫一針對呼拉效應原理，將外力造成之直線運動轉換為旋轉運動，作為發電裝置之輸入。透過此一機構可將振動能量轉換為可利用之電力。

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 μW 到數 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，如圖一所示。

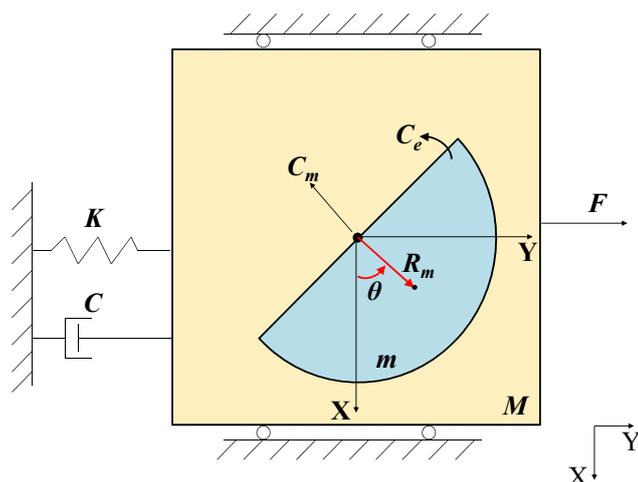
二、文獻探討

能量獵取始為許多學者研究討論之話題；其不僅在於本身應用之多樣性，重點更於自我發電之功能優勢；藉所發之電量，以提供搭配之裝置動力來源。此亦為本計畫未來研究之目標。本計畫主要針對振動式發電機制進行討論，而現今主要有三種振動發電機制：(1)靜電式發電；(2)電磁式發電；(3)壓電式發電[9]。近期已有學者，藉振動式發電機構，搭配人體日常行為進行獵能，並提供搭配之感測器，如：人體溫度與濕度感測、心跳檢測等等，之所需動力來源。然而，各式發電裝置也因其應用地點與本身機構限制，而有不同之發電大小；故，如何設計適當裝置以產生最大發電量，便為研究重點。在本計畫中，不同於直線振動之發電機制，採用以旋轉運動來進行發電，因其不受限之運動機制[10]，其中又以電磁式發電可由旋轉運動來運作。故本研究希望搭配電磁式發電裝置來進行後續獵能[11]。

大部分的電磁機制亦採用直線式振動，藉振動磁鐵或線圈本身，進行發電。目前，已有學者設計並實際應用於車內引擎[12]。此外，學者 Holmes[13]透過 MEMs 技術，設計出旋轉式發電裝置；Arnold 等[14]提出三種電磁式發電裝置，亦說明旋轉式電磁發電的可能性，且最大發電量可到幾十瓦。日本學者 Sasaki 等[15]亦設計旋轉式發電之機構，並應用於人體日常行為進行獵能，且亦利用直線振動發電之特性，應用於汽車引擎；探討系統於共振與非共振情況下，發電量之大小。同時，Spremann 等



圖一、整體計劃之系統架構



圖二、呼拉圈能量獵取裝置運動模型

人[16]更透過 MEMs 技術，製作出一旋轉式電磁發電裝置，應用於汽車引擎。上述此兩種裝置皆呈現：透過直線振動，進而帶動系統產生旋轉運動之例子。

此外，有學者將電磁裝置應用於高頻率之外力輸入，探討系統之發電量大小[17-19]。Yoshitake 等人[20]提出以呼拉圈運動搭配電磁機制，應用於減輕機台或大樓振動，同時進行發電。而在本計畫中，主要利用低頻之外力來源與較低之外力大小之情況，如：人體運動，為本研究拉圈獵能裝置之動力來源。

進行呼拉圈獵能裝置相關實驗之前，首先須針對呼拉圈運動之機制進行探討，而本計畫已將相關結果於先前計畫報告中進行呈現[21]。本計畫主要透過人搖呼拉圈運動，進行研究設計；由運動中可得知：人體前後擺動行為與呼拉圈旋轉運動之互動關係；藉 Lagrange's 方法推得後續運動方程式，且進行後續穩定度探討與數值積分，以尋找設計之呼拉圈運動。

除此為能有效率進行電能轉換，本研究提出一新式電荷幫浦，取代傳統 Dickson 式的架構[22]，降低電路複雜度以提升效能。

三、研究成果與討論

3.1 呼拉圈系統分析與實驗-子計畫一

3.1.1 物理與運動方程式

本計畫之物理模型裝置，設計如圖二所示[21]。人體可視為一主質量(M)，運動受限於 Y 方向上之簡諧外力影響，進而帶動上方呼拉圈，即自由質量(m)，進行旋轉運動。

前述作用外力主要為簡諧外力型式，然而，日常生活運動中，除規律性擺動行為外，亦包括單一搖擺行為，如：舉手或放下等行為運動。故，此節中即討論脈衝外力下之系統運動方程式，進而探討其動態行為。

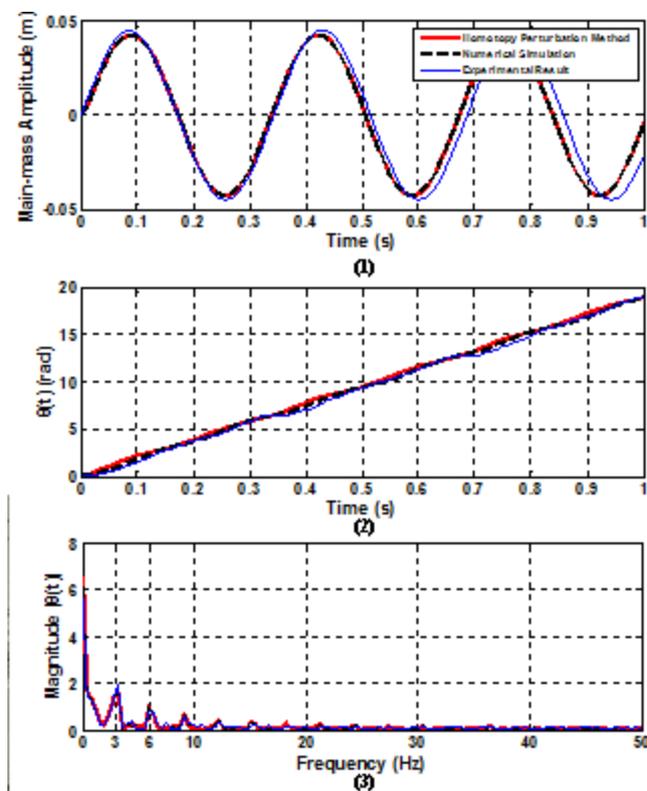
脈衝外力為極短時間下之一作用外力，故首先將脈衝外力視為： $\hat{F}\delta(t)$ 。進而，針對運動方程式與時間有關之各項進行積分，並取時間趨近於 0。主質量初始速度於脈衝外力下之直接影響，且自由質量對於主質量初始速度的間接影響。自由質量其初始速度亦受到主質量初始速度的影響，且亦關係到自由質量的初始位置。

3.1.2 系統動態響應

首先觀察呼拉圈獵能裝置實驗構造如圖三所示，在外力大小 60N 與頻率 3Hz，系統動態響應圖形。透過數值模擬、近似解推導與實驗結果，判定參數與系統動態方程式之可行性，同時觀察電磁阻尼對系統運動之影響。

由圖四觀察得到，近似解以紅色實線表示、數值積分以黑色虛線代表，最後藍色實線代表為實驗結果。由圖四-1 觀察到，主質量響應圖形於三者結果是吻合的，皆以頻率 3Hz 進行往復運動，但於實驗與理論結果中，存在些微相位偏差的情況，主要為不穩定之外部電壓導致，其次亦可能為裝配與阻尼推估誤差所造成；但自圖四-2 中，可判讀自由質量皆發生轉動行為；除實驗部分，存在些微角度變化偏差，主要由裝配誤差所導致，但三者皆於特定時間內，達到一定之轉動角度。亦可自圖四-3 所得之 FFT 結果中觀察，自由質量除以外力頻率 ω 進行繞轉外，同時存在一 2ω 之微小震動頻率。

故由上述系統之動態響應結果得到；近似解、數值積分與實驗結果三者，皆有很好的對照；且於考慮電磁阻尼後，對於系統自由質量轉動行為上，其影響甚小。亦可由前述理論依據作驗證比較。對於自由質量在旋轉行為方面，可得到其旋轉頻率與外力頻率之一致，並存在 2 倍頻率之變化量，亦與本計畫先前理論結果一致。

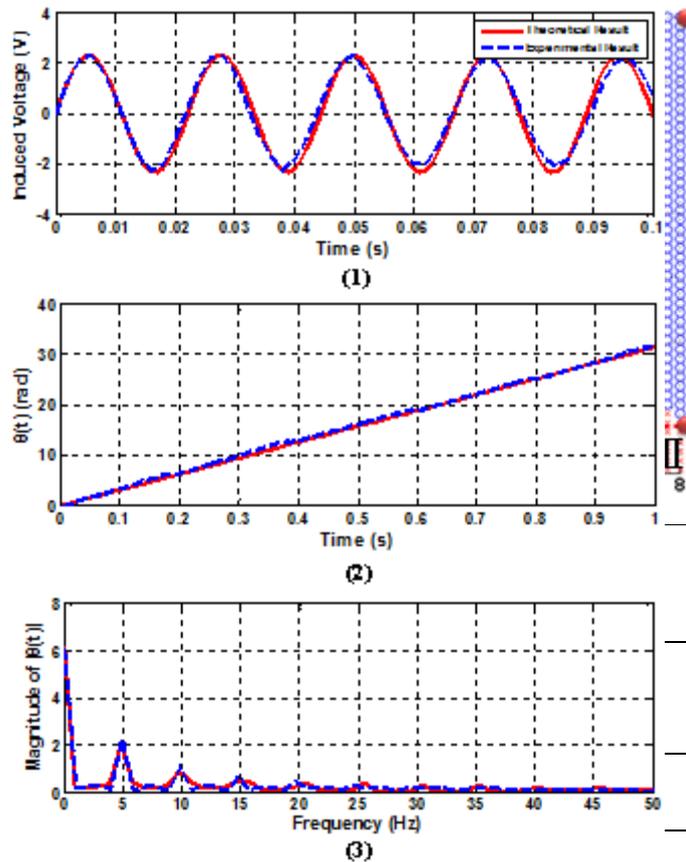


圖四、響應圖形結果比較：(1)主質量振幅大小；(2)自由質量轉動角度；(3)自由質量轉動角度之 FFT。

3.1.3 系統動態分析

3.1.3.1 簡諧外力

透過代表呼拉圈運動之近似解，藉由 Floquet 理論進行穩定度分析。圖六為直接數值積分與實驗結果，於不同外力頻率與振幅下，針對不同自由質量之位置與速度，搜尋呼拉圈行為之作動區域。圖中，藍色”o”的部分，代表系統發生呼拉圈行為，即為區域 I 和區域 III；其他區域 II 和區域 III 紅色”x”的部分，代表未產生呼拉圈行為；而紅色”o”部分，則為實驗結果。由結果得知，系統搭配電磁機制所產生之電磁阻尼，對系統呼拉圈動態行為影響相當小。於圖五中，除藍色”o”代表存在呼拉圈行為外，另存在青色作動區域，代表存在些許或大量反轉行為，故不為穩定之呼拉圈行為。此外，由實驗結果與數值模擬結果相比，亦得到很好的對照結果。圖六為外力頻率 5Hz 與大小 24N 下之感應電動勢實驗響應圖形。其中，紅色實線為理論值，藍色虛線為實驗結果。由圖形得知：在外力頻率 5Hz 下，平均輸出電壓為 2.3V ；且，隨著外力頻率增加，相對之輸出電壓亦增加。由關係式(5)可得知上述關係。此外，對於感應電動勢部分，實驗與理論存在些微之相位偏差量；此部份主要因系統之偏心質量影響，且亦受到線性馬達電壓不穩之因素，其次，電位計與獵能裝置之裝配誤差亦為影響因素。



圖六、實驗結果(外力頻率: 5Hz, 24N): (1)呼拉圈獵能器感應電動勢; (2)自由質量轉動圈數; (3)自由質量轉動量之FFT。

Exp. Frequency (Hz)	Amplitude (N)
2	4.8-40
3	5.2-80
4	6.8-140+
5	8.8-140+
6	9.2-140+
7	10.4-140+
8	11.2-140+

圖五、數值積分與實驗結果

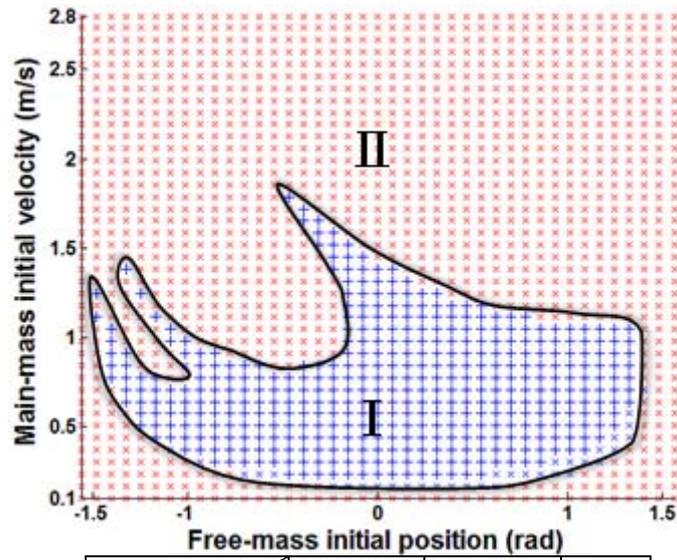
由圖六(1)可看出，感應電動勢振動頻率分為 45Hz，為外力頻率之 9 倍($N_m=9$)，且由圖六(3)之結果可得知；圖六(2)則是透過電位計，得到自由質量在 1s 內之轉動圈數，亦與外力頻率相符。當呼拉圈運動發生時，呼拉圈獵能裝置可有效輸出相對應之感應電動勢。且於圖六(3)亦得知，當呼拉圈其繞轉頻率與外力頻率相符，且同時存在 2 倍之轉動變化頻率，此部分與計畫先前之理論推導假設相符。

3.1.3.2 脈衝外力

由圖七可得知，系統於受到一脈衝外力下，系統發生呼拉圈運動之區域。其中，藍色”+”部分代表系統發生呼拉圈運動，且無任何反轉運動；而藍色”⊂”部分代表系統未發生呼拉圈運動，僅為部分轉動行為。紅色”⊂”部分，則代表系統未發生任何呼拉圈運動。本計畫目前僅先探討於何種初始條件下(自由質量初始位置與主質量初始速度)，系統較易發生轉動行為，故以一次脈衝外力下，自由質量繞轉 5 圈，為穩定呼拉圈運動發生之基本判定依據；但日後針對呼拉圈運動之目標行為，應為持續性繞轉運動為最佳情況。

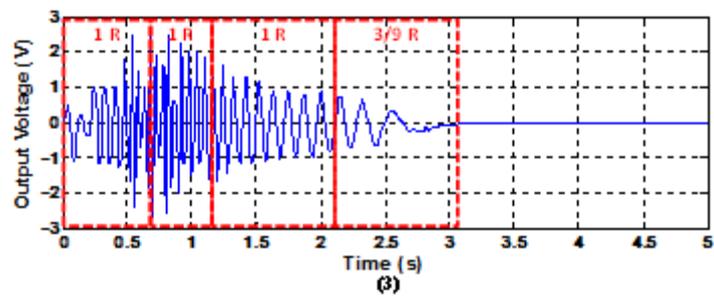
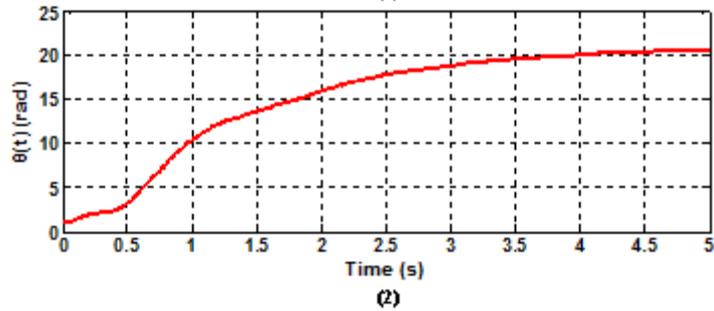
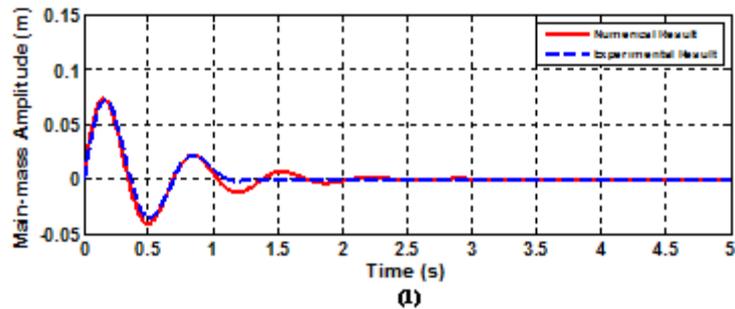
圖八為系統於脈衝外力下之響應圖形結果。紅線部分為理論結果，藍色部分為實驗結果；由圖八

(1)可觀察得到系統主質量振幅於 1s 內其大小是符合的。然而，後續因為線性導軌之本身摩擦因素，產生不同之摩擦阻尼，如：庫倫阻尼，且本計畫中僅討論黏滯阻尼之影響，故產生些許差異；但於呼拉圈運動之影響，主要以 1s 內之主質量振幅大小為影響因素。此外，圖八(3)為呼拉圈獵能裝置輸出電壓之實驗結果；由圖形結果可得到：自由質量此時繞轉接近 3.5 圈，與圖八(2)之自由質量角度變化理論結果相符，可得到系統運動模型與方程式之推導之正確性。



	Blue (+)	Blue (x)	Red (x)
Hula-hoop motion	Yes	No	No
Reversal	No	No	Yes
Revolution	$2 < R < 5$	$1 < R < 2$	$R < 1$

圖七、脈衝外力之數值積分結果



圖八、響應圖形結果比較：(1)主質量振幅大小；(2)自由質量轉動角度；(3)能量獵取裝置之感應電動勢(初始條件： $\theta(0) = 1.0472 \text{ rad}$;
 $y'(0) = 0.8976 \text{ m/s}$)。

3.2 呼拉圈微發電機設計-子計畫二

3.2.1 系統感應電動勢與發電量

根據法拉第感應定律，感應電動勢(EMF)等於穿過迴路磁通量的負時間變率，故可表示為：

$$V = -N_c \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

其中 N_c 為線圈個數。而單位迴路之磁通量則為單位時間內，導線掃過之面積：

$$\Phi = \int_s B \cdot ds = B_z A_c \sin(\theta) \quad (2)$$

因為 NS 磁極相間排列關係，感應電動勢之頻率與外力頻率與磁鐵個數呈倍數關係： $\omega_m = N_m \omega$ ，其中 N_m 為磁鐵個數[10]。故，最終得到感應電動勢為：

$$V = -\beta N_c \frac{d\Phi}{dt} = -\beta N_c \left[\sum_{L=1}^{N_L} \sum_{L_c=1}^{N_{Lc}} A_c B_z \right] \omega_m \cos(\omega_m t) \quad (3)$$

其中， β 為包含實際線圈圍繞圈數、線圈與磁鐵之實際距離和實際磁通量磁場分佈之幾何調變參數[5][9]，在本計畫中， $\beta = 0.59$ 。最後，系統均方根之感應電動勢為

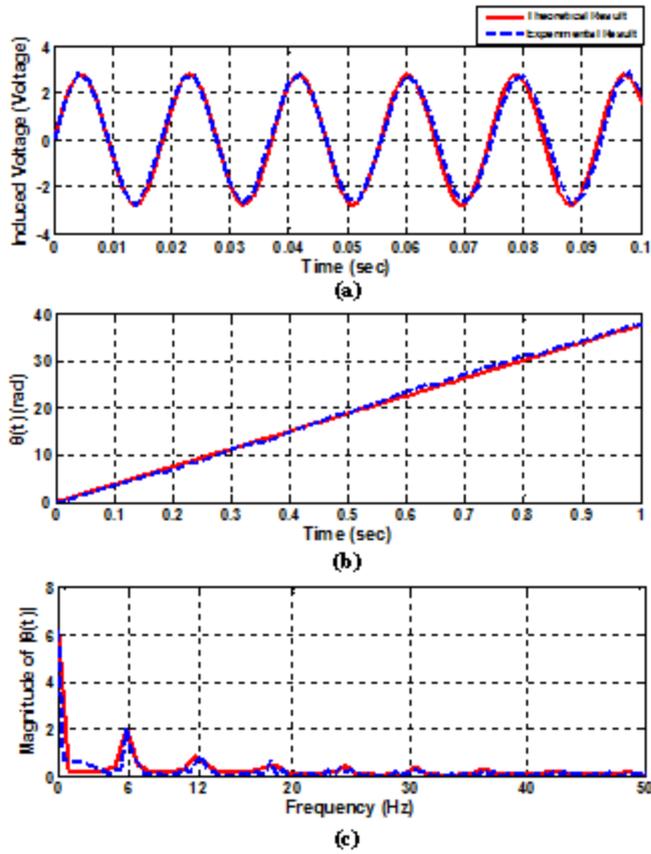
$$V_{rms} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \beta N_c \left[\sum_{L=1}^{N_L} \sum_{L_c=1}^{N_{Lc}} A_c B_z \right] \omega_m \quad (4)$$

進一步推得輸出能量為：

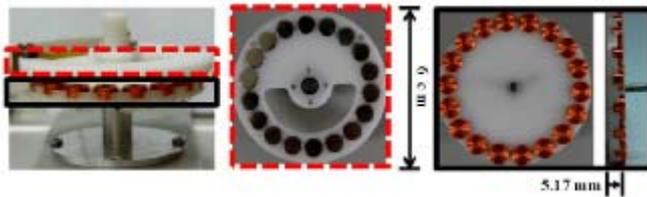
$$P = \frac{V_{rms}^2}{R_c + R_L} = \frac{\left\{ \beta N_c \left[\sum_{L=1}^{N_L} \sum_{L_c=1}^{N_{Lc}} A_c B_z \right] \omega_m \right\}^2}{2(R_c + R_L)} \quad (5)$$

3.2.2 實驗設備與響應結果比較

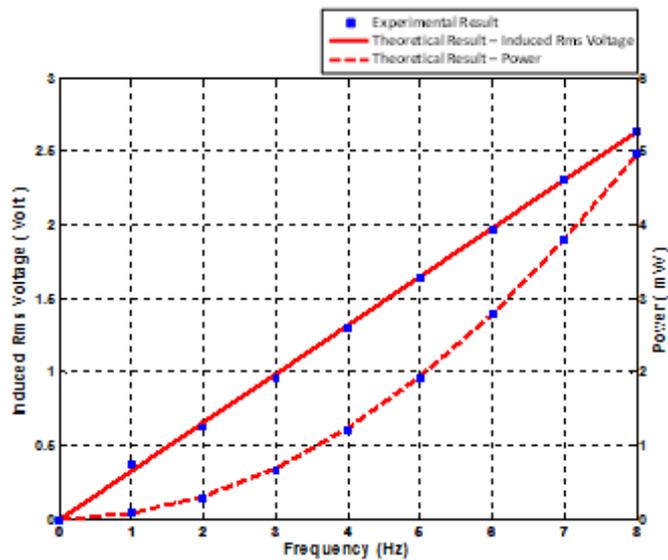
圖九為外力頻率 6Hz 與大小 24N 下之實驗響應圖形。紅色實線為理論結果，藍色虛線為實驗結果；由圖形得知：當呼拉圈運動發生時，呼拉圈獵能裝置如圖十所示，可有效輸出相對應之感應電動勢；在外力頻率 6Hz 下，平均輸出電壓為 2.8V。其中，隨著外力頻率增加，相對之輸出電壓亦增加，此亦由關係式(3)可判讀得知。此外，於實驗與理論之結果得知，於感應電動勢之響應結果部分，存在一些微之相位偏差量；此部份主要因系統之偏心質量導致自由質量運作上發生轉動速度不穩之情況，且亦受到線性馬達電壓不穩的影響，其次，電位計與獵能裝置之裝配誤差亦會影響。但由圖九(a)可看出，感應電動勢振動頻率分為 54Hz，為外力頻率之 9 倍($N_m=9$)，且由圖九(c)之結果可得知；圖九(b)則是透過電位計，得到自由質量在 1s 內之轉動圈數，亦與外力頻率相符。



圖九、實驗結果(外力頻率：6Hz, 24N)：(a)呼拉圈獵能器感應電動勢；(b)自由質量轉動圈數；(c)自由質量轉動量之FFT。



圖十、呼拉圈獵能裝置



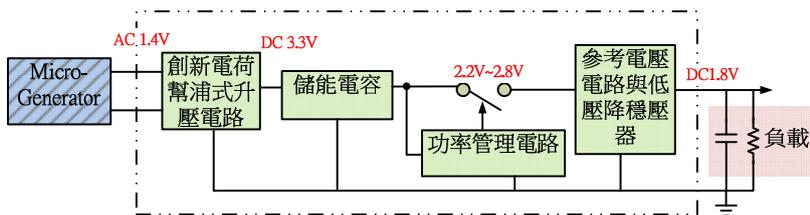
圖十一、系統感應電動勢與發電量之比較(外力頻率：1 Hz - 8 Hz)。

3.2.3 呼拉圈獵能裝置之發電量

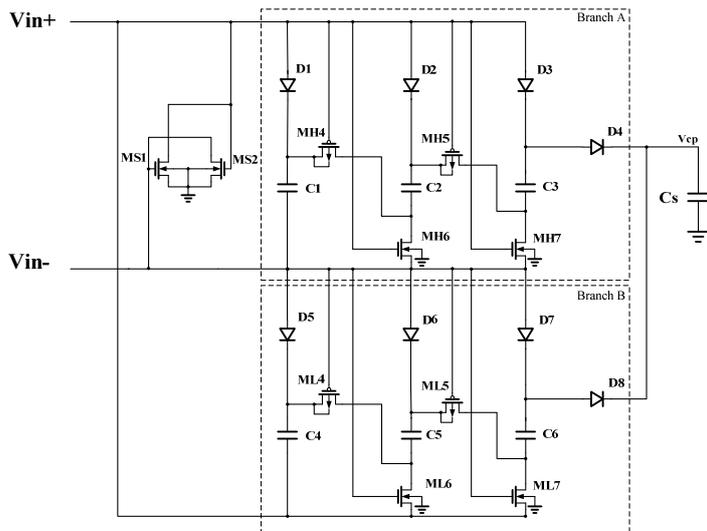
圖十一呈現呼拉圈獵能裝置之感應電動勢與發電量，在外力頻率為 1Hz 到 8Hz 之結果比較；其中，紅色實線部分為感應電動勢、紅色虛線為發電量，而藍色方形則代表實驗結果。由圖形可得知，隨著外力頻率增加，系統感應電動勢與發電量亦隨之增加，此可由先前推導之公式(4)與(5)可分別得知。由實驗與理論之結果，兩者皆有很好的對照；此也進一步驗證本計畫針對系統發電之相關公式其正確性。最終，由實驗結果得知：在外力頻為 8Hz 與外力大小 11.2N 時，呼拉圈獵能裝置之最大發電量為 5mW 。

3.3 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，



圖十二、整體電路架構功能圖



圖十三、所提出之新式切換式電容升壓電路



圖十四、整體系統之測試平台

並透過國家系統晶片中心(CIC)成功下線。整體架構如圖十二所示，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。

3.3.1 切換式電容升壓電路

考量到一般轉換電路設計，對於低輸入擺幅之交流能量，在電路設計上需先使用整流電路進行整流，而後採用升壓電路進行升壓以符合後端需求。然而對於電容式升壓電路而言，考慮到一般之 Dickson Charge Pump 需要外部訊號控制，此舉無法達成無源升壓，且其前端需額外設計一整流電路以符合規格所需，在成本、體積以及效率上來說有其缺陷。因此針對此種低擺幅輸入之交流能量，設計出一兼具整流以及升壓之創新電荷幫浦式電路，也透過使用 T25HV 製程的蕭基二極體大大的減少電流經過一般二極體與 MOS Diode Connect 使所產生的壓降。由於蕭基二極體之壓降小，特別適合用於輸出低交電電壓之微發電機，使效率較佳。此電路之目的為將 AC (1.2~1.5V)之電壓整流並升壓至 DC (3.3~4.5V)之電壓。其電路如圖十三所示， V_{in+} 與 V_{in-} 分別接至微發電機兩端；分支 A 部份以及 B 部份為相同之電路設計，用以達成雙相位輸出，能有效轉換正半週期以及負半週期之能量，且具低漣波輸出之特性；其中，D1~3 以及 D4~6 為 Schottky Barrier Diode，而其簡單概念為：**充電時電容並聯充電，放電時電容串聯放電**，並由 A 部份以及 B 部份交互進行充放電，分析步驟如下：

1. 第一步(State1)：當正半週期時，MS2、MH6、MH7、ML4、ML5 導通，此時 A 部份電容為並聯充電至 $V_p - V_{sd}$ (V_p 為輸入訊號之 peak 值)，B 部份電容為串聯放電。
2. 第二步(State2)：當負半週期時，MS1、MH4、MH5、ML6、ML7 導通，此時 A 部份電容為串聯放電，B 部份電容為並聯充電。

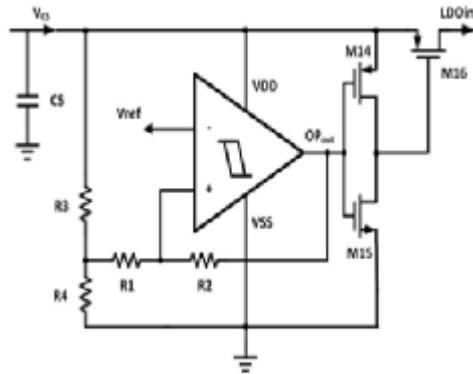
除此，透過 MS1 以及 MS2 來整流如圖十四所示，使得在電容串聯放電時，其能量由前端之微發電機向後端推送，簡單的說，電容串聯時可視為一增壓工具，能量來源由前端提供，因此將更具驅動能力，而不是單純的由電容放電，其輸出電壓最大值公式如下：

$$V_{cpout} = 3(V_p - V_{sd}) + V_p - V_{sd} \quad (6)$$

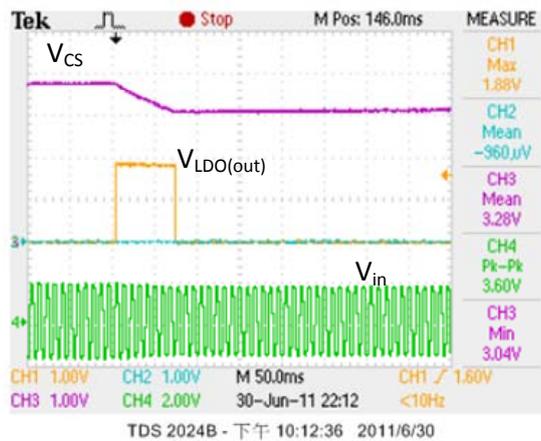
其中 V_p 為輸入訊號之 peak 值， V_{sd} 為蕭基二極體之導通電壓。

3.3.2 功率管理電路

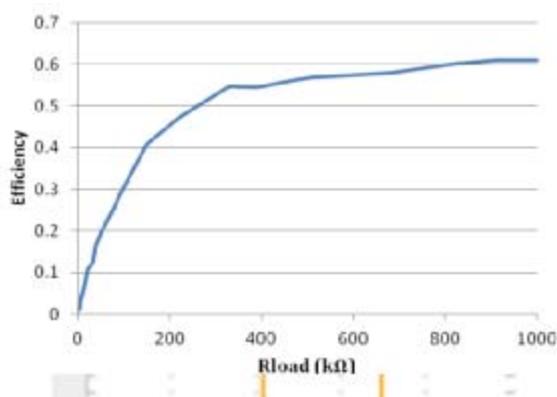
由於發電機產生的能量是間歇性，其能量不足以隨時供電給負載設備，電路甚至在高負載電流時不會工作，當負載設備直接連接到電荷幫浦電路時。基於此原因，功率管理電路是為解決這一問題必要的設計，可以監視儲能電容的能量和控制能量傳遞給負載與否，電源管理電路操時無需外接電源。由於微發電機所產生之能量微小約 500uW 左右，且其頻率約只有幾十赫茲到幾百赫茲左右，因此針對此種狀況之下，我們將能量轉換電路設計成夠允許低電壓低功率輸入，且由於所獲得的能量展現出不規則的隨機性低能量突發模式，因此在設計考量上，我們設計一功率管理電路，如圖十五所示，透過一過渡之電容先針對前端所產生之能源進行儲存，待累積了足夠的能量之後，再將其所收集之能量往後端運送。本系統分為兩種模式：1.待機模式：過渡電容充電，後端低壓降穩壓器不運作。2.供電模式：過渡電容對後端放電，低壓降穩壓器輸出 3.3V 之穩定電壓。此電路所使用之基本原理為史密特觸發比較電路，其電壓上升與電壓下降的直流掃描曲線是不同的，因此可以打開開關與關閉開關的



圖十五、功率管理電路



圖十六、輸出結果暫態響應

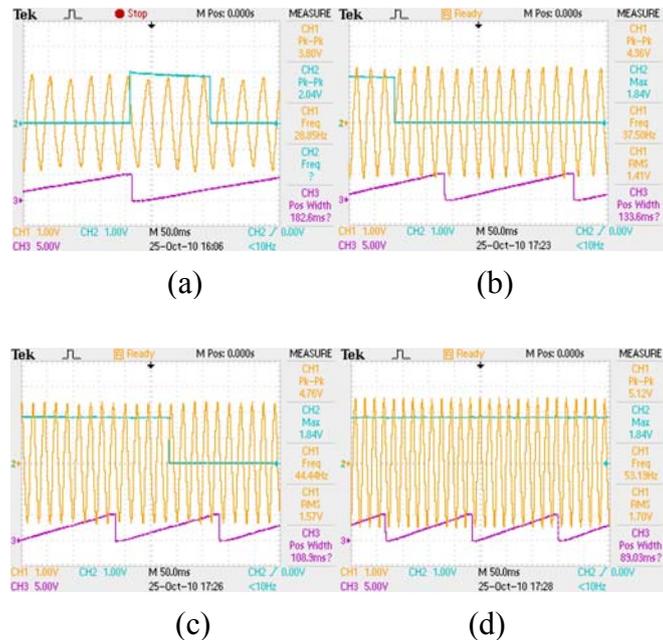


圖十七、效率分析圖

電壓點不同。

3.3.3 低壓降穩壓電路

低壓降穩壓電路接在功率管理電路之後，提供給負載一個DC穩態電壓，其還有降低負載效應的效果。透過一個線性穩壓器使輸入由高直流電壓轉換到輸出較低直流電壓，線性穩壓器是由一個運算放大器非反相配置和其外部電路所構成的。低壓降（LDO）穩壓電路適合許多應用，如可攜式裝置，工業和能源獵能器。他可以使輸入和輸出的電壓差縮小，並提供一個穩定的直流電壓。



圖十八、整合之微獵能系統實驗圖
(a) 3Hz; (b) 4Hz; (c) 5Hz; (d) 6Hz

3.3.4 實驗結果

整體電路設計使用台積電 $0.25\mu\text{m}$ 高壓 CMOS 製程，其功率消耗約 $25\mu\text{W}$ ，晶片所使用面積約 0.3025mm^2 。由於在實際微發電機之應用下，其輸入交流訊號之頻率不固定，因此針對此種變動頻率考量，輸入測試訊號的部分，從 100Hz 到 5Hz 皆能成功整流升壓並穩定輸出，顯示出此設計之可靠性與泛用性。圖十六黃色訊號則為整體電路之輸出波形圖，紫色訊號為過渡(儲能)電容之電壓波形圖，綠色訊號則為預測之輸入波形圖。由實際量測結果圖來看，電容電壓會介於 3.3V 以及 2.8V 之間變動，當電壓高於 3.3V 時，系統開始輸出穩定之 1.8V 直流電壓，而當電容電壓低於 2.8V 時，系統則進入待機模式，讓前端輸入持續對電容進行儲能充電， 2.8V 和 3.3V 的上下限值可經由電阻適當調整。同時，針對不同負載進行效率分析測試，如圖十七所示，其電能轉換效率最高可達 61% ，對於微小能量的轉換而言，為非常佳之結果。

3.4 系統整合之實驗結果

此呼拉圈式之微獵能系統已整合成功，整體系統架構如前述之圖一。此系統先將呼拉圈與微發電機整合成一圓形之模組，再與微型化之獵能電路整合，其測試平台如圖十四所示。為模擬人體之晃動頻率，實驗將從 3Hz 到 6Hz 進行測試。如圖十八所示，紫色線為呼拉圈系統之轉動角度，當轉換角為 360 度後歸零，意即每一個三角波代表轉動一次；黃色線代表發電機所發出之交流能源，由於單一呼拉圈系統配置數發電機於一圈中，因此其頻率高於轉動頻率；綠色線為微獵能電路所轉換出直流電壓，其中電壓為零時代表系統進行儲能狀態，以確保能量能夠驅動後方負載。整合之系統在 6Hz 時可持續對負載供電，此時輸出功率為 9.71mW 。由實驗結果觀察，此呼拉圈式創新微獵能系統，可在不同晃動頻率下，系統皆能正常運作，符合最初設計之目標。

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。

研究中已建立相關物理模型，並推得其運動方程式、感應電動勢與發電量等關係式，且觀察後續近似解穩定度實驗設備，進行呼拉圈行為與發電結果之探討與研究，藉實驗進一步驗證相關理論依據與推導。分別探討系統於簡諧外力與脈衝外力下，藉系統運動方程式，透過不同之主質量與自由質量初始條件，得到在呼拉圈運動之作動區域之存在；且亦由實驗呈現相符之結果。本篇研究中，亦提供一微獵能處理電路，針對呼拉圈發電系統進行電能處理。本電路包含一新式電荷幫浦，能夠有效轉換交流能量，並克服環境能量有間歇特性之問題。搭配後端之電能管理電路，可對間歇性之能源做最佳化處理。與直接數值積分結果，建立呼拉圈運動發生之區域圖形。後續搭配線性馬達等

本呼拉圈之微獵能系統設計已完成：

- (1)呼拉圈系統之完整理論模型建立與實驗驗證。
- (2)發電線圈與呼拉圈系統進行環繞結合之設計，可節省體積與效能最佳化。
- (3)搭配呼拉圈系統之微獵能電路設計，融合新式電荷幫浦之架構並進行優化設計。

此整體之呼拉圈系統已透過實驗驗證理論，並已完成實體化之整合，是為一完整之研究。且於未來，將有機會使此微獵能系統實際應用於生醫、軍用……等電子領域。

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] C. B. Williams and R.B.Yates, "Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems," Sensors and Actuators, A 52, pp.8-11, 1996.
- [8] 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.
- [9] 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(11), pp. 1131-1144.
- [10] M. E. Hami, P. G. Jones, N. M. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, A. D. Brown, and J. N. Ross, 2001, "Design and Fabrication of a New Vibration-Based Electromechanical Power Generator," Journal of Sensors and Actuators A, 92(1-3), pp. 335-342.
- [11] Y. J. Wang, C. D. Chen, and C. K. Sung, "Design of a frequency-adjusting device for harvesting energy from a rotating wheel," Journal of Sensors and Actuators A, Vol. 159, pp. 196-203, 2010.
- [12] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. G. Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, and S. Roy, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting," Journal of Micromech. Microeng, Vol. 17, pp. 1257-1265, 2007.
- [13] Andrew S. Holmes, Guodong Hong, and Keith R. Pullen, "Axial-Flux permanent magnet machines for micropower generation," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, pp. 54-62, 2005.
- [14] D. P. Arnold, 2007, "Review of Microscale Magnetic Power Generation," IEEE Trans. On Magnetics, 43(11), pp. 3940-3951.
- [15] K. Sasaki, Y. Osaki, J. Okazaki, H. Hosaka, and K. Itao, "Vibration-based automatic power-generation system," Microsyst. Technol., Vol. 11, pp. 965-969, 2005.
- [16] D. Spreemann, Y. Manoli, B. Folkmer, and D. Mintenbeck, 2006, "Non-resonant Vibration Conversion," Journal of Micromech. Microeng, 16(9), pp. 169-173.
- [17] C. T. Pan and T. T. Wu, "Development of a rotary electromagnetic microgenerator," Journal of Micromech. Microeng, Vol. 17, pp. 120-128, 2007.
- [18] L. D. Liao, P. C.-P. Chao, J. T. Chen, W. D. Chen, W. H. Hsu, C. W. Chiu, and C. T. Lin, "A miniaturized electromagnetic generator with planar coils and its energy harvest circuit," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 45, pp. 4621-4627, 2009.
- [19] Paul C.-P. Chao, C. I. Shao, C. X. Lu and C. K. Sung, "A New Energy Harvest System with a Hula-Hoop Transformer, Micro-generator and Interface Energy-Harvesting Circuit," Microsyst. Technol., 2011. (In press)

- [20] 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.
- [21] C. X. Lu, C. C. Wang, Paul C.P. Chao, and C. K. Sung, "Dynamic analysis of a motion transformer mimicking a hula hoop," *J. Vib. Acoust.*, Vol. 133, 2009. (In press)
- [22] J. F. Dickson, "On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved voltage multiplier technique," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 11, pp. 374-378, 1976.
- [23] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1992, pp. 307-321.

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

本呼拉圈之微獵能系統設計已完成：

(1)呼拉圈系統之完整理論模型建立與實驗驗證。

(2)發電線圈與呼拉圈系統進行環繞結合之設計，可節省體積與效能最佳化。

(3)搭配呼拉圈系統之微獵能電路設計，融合新式電荷幫浦之架構並進行優化設計。

此整體之呼拉圈系統已透過實驗驗證理論，並已完成實體化之整合，是為一完整之研究。且於未來，將有機會使此微獵能系統實際應用於生醫、軍用……等電子領域。

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利：已獲得 申請中 無

技轉：已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本呼拉圈之微獵能系統設計已完成：

(1)呼拉圈系統之完整理論模型建立與實驗驗證。

(2)發電線圈與呼拉圈系統進行環繞結合之設計，可節省體積與效能最佳化。

(3)搭配呼拉圈系統之微獵能電路設計，融合新式電荷幫浦之架構並進行優化設計。

此整體之呼拉圈系統已透過實驗驗證理論，並已完成實體化之整合，是為一完整之研究。且於未來，將有機會使此微獵能系統實際應用於生醫、軍用……等電子領域。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期：100年09月29日

國科會補助計畫	計畫名稱：創新微型高能量密度換能器設計與實現－總計畫 計畫主持人：林錫寬 計畫編號：NSC 97-2221-E-009-085-MY3 領域：自動化學門
無衍生研發成果推廣資料	