

# 地面機械綠能量回收技術

## The Technologies of Ground Mechanical Green Energy Harvesting

蔡達毅、楊承諺、潘奕華、顏文奕、丁振卿

Da-Yi Tsai, Cheng-Yan Yang, Yi-Hua Pan, Wun-Yi Yan, Chen-Ching Ting

近年來，全世界出現各式各樣接連不斷的怪異天災，似乎是地球在向人類發出最後通牒，企圖讓人類了解現今能源已經被過度濫用，受污染的環境已造成異常的氣候，現今，如何節省能源與增加再生能源的使用率，是人類所該認真思考的一大議題。目前所被關注的再生能源技術大多都集中在太陽能、風力能、水力能、生質能、地熱能、海洋能及地面機械綠能等，其中，地面機械綠能在近幾年才開始逐漸被重視。這裡所指的地面機械綠能是由施予地面的正向力所造成，當行人或車輛行走於路面時，都會對路面施予正向力，此種能源大多以脈衝形式存在，當能源的狀態以脈衝形態出現時，就會變得非常難以利用，雖然如此，因為地面機械綠能累積起來十分龐大，許多技術紛紛加入開發行列。隨著科技進步，用來採集脈衝能的技術已有壓電效應、電磁感應、靜電容改變、脈衝轉成渦輪旋轉及熱／聲發電技術等，本研究在探討地面機械綠能回收技術，透過初步概算來了解地面機械綠能究竟有多龐大而如此值得被開發。

Recently, a variety of natural disasters appear world widely, which seems to give human an ultimatum and show the result of overused earth energy. The polluted environment has caused the exceptional climate. Today, how to save energy and how to increase the use ratio of renewable energy are the serious topics. The currently focused technologies of renewable energy are for solar energy, wind energy, hydraulic energy, biomass energy, geothermal energy, ocean energy, ground mechanical green energy, etc., where the ground mechanical green energy is developed in the recent years. The so-called ground mechanical green energy here is caused by the normal forces which are supported by walking people and running vehicles. In general, the ground mechanical green energy is the pulse energy which is difficult to be used. Even so, the summed ground mechanical green energy is extremely large and many technologies are therefore developed for harvesting. For example, piezoelectric effect, electromagnetic induction, varying capacitance, pulse to rotation, heat/sound electricity generation technologies, and so on. This study is focused on the ground mechanical green energy harvesting. Using preliminary study to estimate the energy and show its value in this work.

### 一、緒論

地面機械綠能就是由施予地面之機械力所造成，不論車輛或行人，甚至是風力，此種能源大多

以脈衝的形式存在<sup>(1)</sup>，當能源的形態被轉換成脈衝狀態時，就會變得非常複雜且難以利用，但其能量累積起來卻相當龐大<sup>(2)</sup>。隨著科技演進，用來轉換脈衝能的主要採集技術已有壓電效應、電磁感應、



圖 1. 日本 NNT 電信業者研發之發電鞋<sup>(3)</sup>。

靜電容改變、脈衝轉成渦輪旋轉及熱／聲發電技術等。路面能最常見的回收方式為壓電發電，壓電現象是距今 100 多年前居禮兄弟所發現的，如今被大量廣泛運用，例如：感測器、音響、麥克風與手電筒等物件。而近年來許多研究者利用壓電材料特性，更廣泛運用在發電鞋與道路發電上，讓人們在生活作息中也可不斷的發電。美國 Mark's Technology News 報導中指出，日本 NNT 電信業者研發出只要一邊走路即可發出 1.2 W 的電量提供身上的手機或 MP3 所需的電力，其內部發電原理是透過鞋子內部裝水，當行走壓縮內部水時，水會同時推動鞋子內部的渦輪，進而帶動發電機發電，如圖 1 所示<sup>(3)</sup>。發電鞋其實是 1925 年在美國就被 Barbieri 所提出的專利，如圖 2 所示，至今還有許多研究者在此領域不斷投入研究<sup>(4)</sup>。

日本電報電話公司 (NTT) 能源與環境實驗室所研發之發電鞋<sup>(5)</sup>雖可利用行人走動時壓縮鞋底流體，帶動鞋內渦輪發電機發電，但因行人走動時，流體在鞋底流動容易造成不舒服，且鞋內發電管路所能承受的衝擊壓力很低，因此即便最高可發出 2.5 W 的電力，距離上市普及化還是有很多的改良空間。此外，日本 SoundPower 公司也推出了一種新的發電地板，如圖 3 所示，以體重 40 kg 成年人為例，從 45 平方公分的地板上走過兩次，約可產生 0.5 W 的電力<sup>(3)</sup>。

科學時報 (Science Times) 中提到，美國芝加哥一位設計師 Elizabeth Redmond 於 2006 年在美國密西根州的 Ann Arbor 鬧區中裝設發電地板，利用

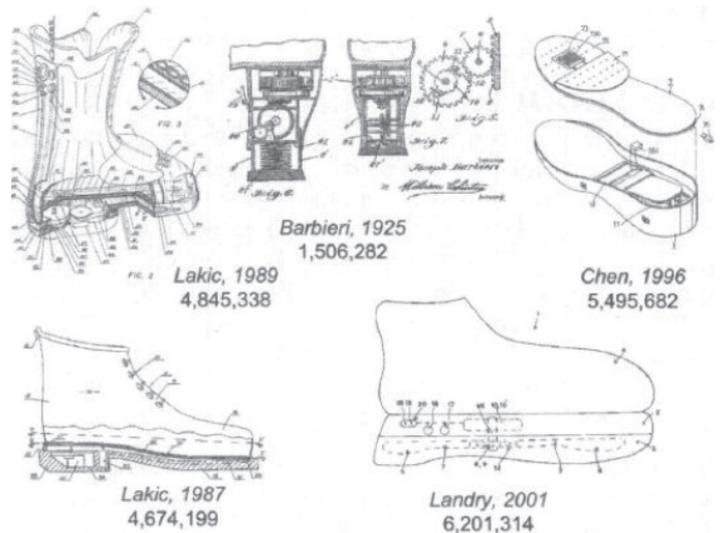


圖 2. 美國發電鞋相關專利與研究歷史<sup>(4)</sup>。

四片  $2 \times 4 \text{ inch}^2$  面積大的壓縮面積，內部裝設壓電陶瓷 (PZT) 並結合銅板固定，經由機構上的設計，平均每次壓縮約能產生 5.5 W 的電量，而此設計成本約為 1000 美元，如圖 4 所示<sup>(6)</sup>。

## 二、路面能擷取技術

根據 J. A. Paradiso 的研究指出，一般人鞋底的壓縮衝程約為 1 cm，而一個成年人行走時所能產



圖 3. 日本街頭發電地板實景圖<sup>(3)</sup>。

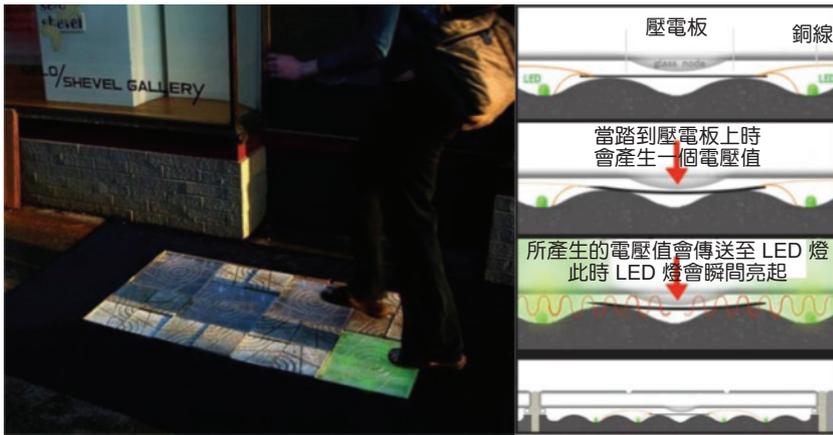


圖 4。  
美國 Elizabeth Redmondy 地面發電設計<sup>(6)</sup>。

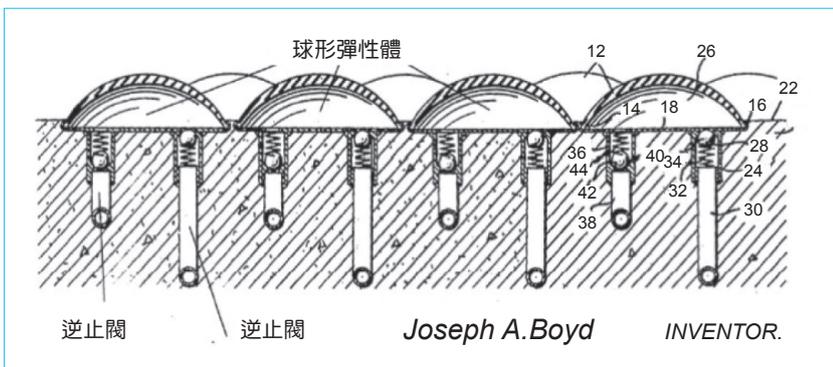


圖 5。  
J.A Boyd 幫浦系統示意側視圖<sup>(8)</sup>。

生的能量估計約為  $7 \text{ W}^{(4)}$ 。以色列因諾瓦太克公司以壓電材料開發的地面發電系統，行人走在由壓電材料鋪設的地面發電系統上，每一步約可產生  $0.0002$  焦耳的能量<sup>(7)</sup>。有關地面能量擷取的研究，最早可追溯到 1943 年，由 J. A. Boyd 所設計的幫浦系統<sup>(8)</sup>，如圖 5 所示，其原理是利用壓縮空心球形彈性裝置，並將壓縮後所產生的壓縮氣體儲存至儲氣槽中。

然而，J. A. Boyd 幫浦系統真正使用在發電上卻是到了 1982 年，由 J. Dikess 將氣壓馬達合併此系統後才得以用來發電<sup>(9)</sup>。雖然儲氣槽成功，使此系統得以發電，但由於儲氣槽效率低，本 CCT 實驗室在開發機械式地面發電裝置的先期研究中，嘗試以液壓傳動的方式來提升地面發電之效率<sup>(10)</sup>，然而其機構過於龐大且複雜，加上液壓傳動用於車道時會有液體洩漏、安裝不易、機構厚度過大、管路進氣造成效率下降、以及維修成本高等問題，之後研究改以電磁感應式發電裝置進行發電<sup>(11)</sup>。

在 2012 年英國倫敦奧運時由 Pavegen 公司所展示的發電地磚，如圖 6 所示<sup>(12)</sup>，其內部所使用的能量擷取方式，是透過盤式發電機以及些許複雜的傳動機構來進行發電，發明人 Laurence Kemball Cook 透過所擷取之能量的 5% 來讓發電地磚中心的 LED 燈發亮<sup>(12)</sup>，藉此吸引行人進行踩踏，並可確認發電地磚的運作情形是否正常。



圖 6. Pavegen 公司所研發之發電地磚實景圖<sup>(12)</sup>。

前述之能量擷取方式皆是透過裝設能量擷取地磚的方式來擷取路面上的能量，而另一種形式的路面能擷取方式，是透過使用者自行擷取與利用的發電鞋，除了日本電報電話公司 (NTT) 能源與環境實驗室所研發之發電鞋外，近年來發電鞋的概念也逐漸被重視，美國德克薩斯州休斯頓市萊斯大學 (Rice University) 的四名學生研發出一款名為 PediPower 可發電的鞋，如圖 7 所示<sup>(13)</sup>，穿戴者在行走時，產生的動能將會被這款鞋轉成電能儲存起來。

發電鞋還有另一項技術，來自美國威斯康辛大學的一批工程師們利用電濕潤的技術，從簡單的散步過程中產出 10 W 的電力。電濕潤通常使用有疏水性的水油混合液體，這種混合液體在電流的作用下會產生流動。此鞋子利用電濕潤的相反原理，藉由踩踏過程迫使這些混合液體穿過電極，進而生成電流，其內部元件如圖 8 所示<sup>(14)</sup>。

### 三、路面能價值

當人行走時，施加於地面的動能具備極佳的開發價值，而且此動能大小隨著人行走速度加快而加



圖 7. PediPower 發電鞋<sup>(13)</sup>。



圖 8. InStepNanoPower 公司研發之發電鞋內部元件<sup>(14)</sup>。

大，特別是在跑步及上下樓梯時，對地面的衝擊更大，在此以一個 80 kg 的人進行解釋與估算。當一個 80 kg 的人對踏板進行 5 mm 衝程時，所產生的位能 (U) 約為

$$U = mgh \approx 80 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 0.005 \text{ m} = 3.92 \text{ joule} \quad (1)$$

其中， $m$  為人體質量、 $g$  為重力加速度、 $h$  為衝程。另外，當此人以約一秒兩步的速度行走，其腳跟以約 0.1 s 的時間衝撞地面，腳跟達地面的速度 ( $v$ ) 與人體對地面施加的動能 ( $E$ ) 約為：

$$v = v_0 + at \approx 9.8 \text{ m/s}^2 \times 0.1 \text{ s} \approx 1 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \approx \frac{1}{2} \times 80 \text{ kg} \times 1^2 \text{ m}^2 / \text{s}^2 = 40 \text{ joule} \quad (3)$$

其中， $v_0$  為腳跟下壓至地面的初始速度，這裡假設為 0； $a$  為腳跟下壓至地面的加速度，由於腳跟下壓至地面的動作為主動且非自由落體，也就是  $a > g$ ，這裡假設為  $g$ 。從以上的分析與估算，一般行進中的人在進行 5 mm 衝程時，約提供 44 joule 的地面機械綠能 (如式 (4) 所示)。

$$U + E \approx 4 + 40 = 44 \text{ joule} \quad (4)$$

另外，對於跑步跳躍高度約 20 cm 的情形所施加的地面機械綠能大小之估算部份，可以自由落體進行

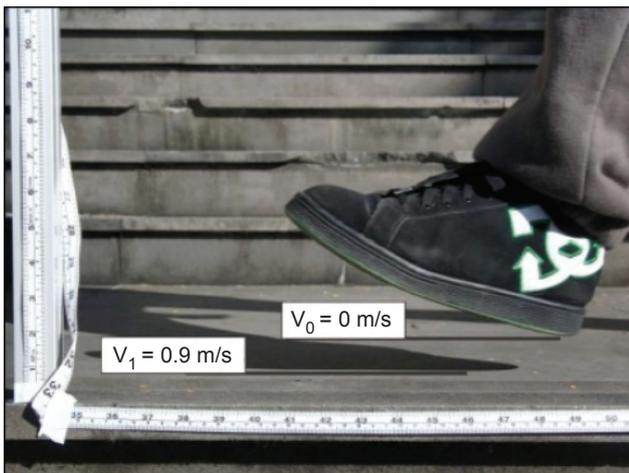


圖 9. 平地行走之腳跟碰觸地面速度量測相片。

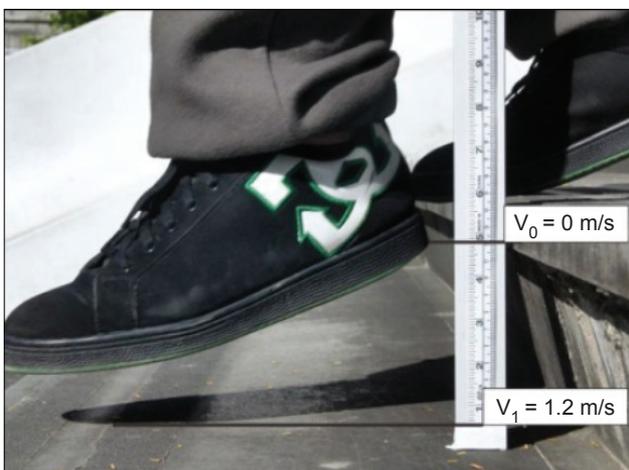


圖 10. 下樓梯之腳碰觸地面速度量測相片。

$$E = \frac{1}{2} \times 160 = 80 \text{ joule} \quad (9)$$

$$U + E \approx 84 \text{ joule} \quad (10)$$

也就是上下樓之階梯高度約 20 cm 的情形所施加的路面能大小約 84 joule。以上為理論進行的能量估算。底下進一步進行實務量測，圖 9 與 10 分別為進行平地行走與下樓梯過程之動能量測，以高速攝影機量測平地行走之腳跟碰觸地面速度與下樓梯之腳碰觸地面速度，再帶入動能公式計算，其結果非常接近理論估算值。實務量測值分別為平地行走速度  $v = 0.9 \text{ m/s}$ 、 $U + E = 36.4 \text{ joule}$ ，約為理論值的 82%；下樓梯行走速度  $v = 1.2 \text{ m/s}$ 、 $U + E = 61.6 \text{ joule}$ ，約為理論值的 73%。

由以上理論推估與實際量測發現，人行走於路面上的能量若能有效回收再利用，其發電量將不容忽視，此外，車道施予路面之能量更勝於人行道，然而，當發電裝置安裝於路面上，對於車輛行走於路面時會產生一摩擦阻力，進而增加車輛行走時的油耗，因此，鋪設於車道的發電裝置，必須考量放置於煞車減速路段，透過回收車輛動能與位能，進而減少開車者踩踏煞車次數，達到真正回收地面機械綠能之目的。以減速下坡路段為例，考量裝置摩擦阻力之情形下，其下滑力 ( $F_a$ ) 如圖 11 所示。其中， $m$  為汽車之質量、 $g$  為重力加速度、 $\theta$  為下坡路段之角度、 $\mu_r$  為滾動摩擦係數。當車輛向下分力 ( $F$ ) 遠大於裝置滾動摩擦力 ( $F_r$ ) 時，表示車輛行

估算，則腳衝擊地面花的時間 ( $t$ ) 為：

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \rightarrow t \approx 0.2 \quad (5)$$

$$v = v_0 + g t \approx 2 \text{ m/s} \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \approx 160 \text{ joule} \quad (7)$$

$$U + E \approx 164 \text{ joule} \quad (8)$$

由式 (8) 可知，跑步跳躍高度約 20 cm 的情形所施加的路面能大小約 164 joule。還有，對於上下樓之階梯高度約 20 cm 的情形所施加的路面能大小之估算部份，以約 1/2 的自由落體動能進行估算，則所施加的路面能大小為：

$$F_a = F - F_r = mg \sin \theta - mg \cos \theta \mu_r$$

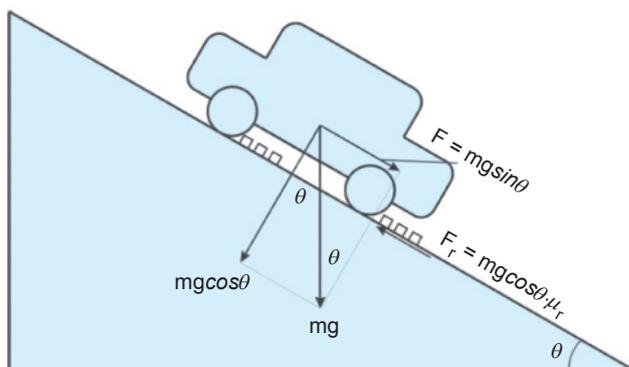


圖 11. 汽車行駛於減速下坡路段與力量分析示意圖<sup>(1)</sup>。

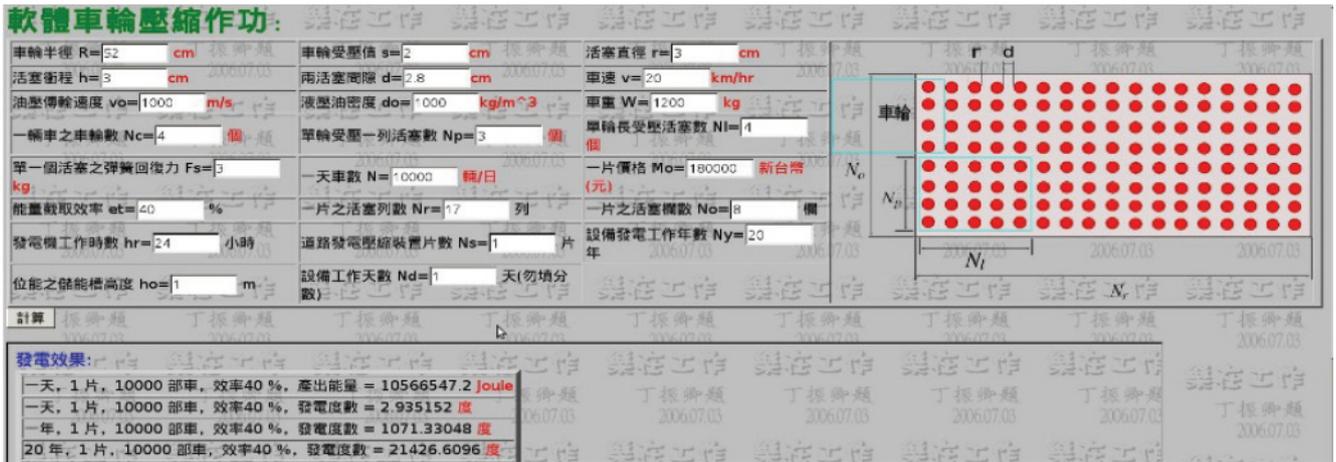


圖 12. 車行走之地面機械能擷取估算程式。

駛於此路段之發電裝置時，不需要額外消耗車子的能量。有關擷取車行走之路面能部份，一般道路液壓傳動發電裝置以擷取位能為主，此部份在本 CCT 實驗室先期研究過程中均已進行理論與實務的能量估算<sup>(1)</sup>，圖 12 為車行走之路面能擷取估算程式，其中，車重 1200 kg、受壓裝置衝程 3 cm、受壓裝置每 1 m 有 17 列活塞 (piston)，也就是車行進 1 m 將對地面受壓塊做 17 次的功。由圖 12 顯示，當發電裝置效率達 40% 時，每一萬車次壓過一片長 1 m 之受壓裝置時，可產生約 2.93 度電，因為車子有兩排輪子，也就是說，車壓過兩片地面受壓塊行進 1 m 時，可產生約 5.86 度電。對於擷取車道能量部份，單就以擷取位能便已非常有開發價值，若再設計擷取動能，則將更具吸引力。車子對地面施加動能主要來自車輪滾動切線速度及車輪形變，因為車輪屬於彈性體，而車輪因受壓而變形，當車輪碰觸具有衝程的可壓縮地面瞬間，車輪的形變位能瞬間釋放，而產生衝擊地面能。擷取車道動能的技術目前大多都採用壓電材料，但壓電材料目前因為發電效率偏低，且維修不易，而沒有立即商品鋪設於世界各地，而使用一般電磁感應發電機擷取能量時，又有最佳轉速及能量來源不穩定等問題，對此，本 CCT 實驗室自行開發一種即動發電機，透過磁鐵來回穿梭線圈管，進而產生電能，因穿梭於線圈管之間的感應磁鐵理論上不受即動發電機轉速影響，從發電機轉動到停止的過程中，即動發電機所擷取的能量效率皆維持一固定值，圖 13 為即動發電機工作原理示意圖。

#### 四、即動發電機

即動發電機為本 CCT 實驗室所研發之不受轉速影響的發電機，其運作方式乃透過兩磁鐵盤旋轉運動，以同性相斥之原理，使線圈管內之磁鐵受斥力來回作動，進而產生感應電動勢，而發電功率則取決於線圈管之線圈及內部作動磁鐵之磁力強度，圖 14 為即動發電機工程示意圖。

法拉第在 1831 年透過一放置在通有電流線圈管附近之指南針擺動變換，進而發現電磁感應現

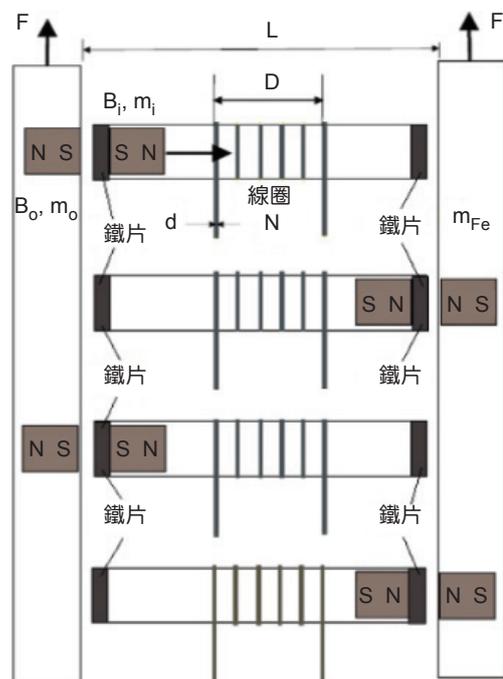


圖 13. 即動發電機工作原理示意圖。

象，而該研究成果如今被廣泛運用在各種不同的領域內，小至微型麥克風，大至大型交流發電機，其原理為當一導線與磁場進行相對運動時，導線兩端將產生感應電動勢，此現象即為電磁感應。本即動發電機主要是由電磁感應產生電壓與電流，由法拉第電磁感應定律可知，當線圈發生磁通變化時，在線圈內感應之感應電動勢 ( $\varepsilon$ ) 之大小與單位時間內貫穿過線圈之磁通變化率 ( $\Delta\Phi/\Delta t$ ) 成正比。

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (11)$$

假設線圈之圈數為  $N$  時，則式 (11) 可改寫成：

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (12)$$

式 (12) 為法拉第電磁感應定律，負號是指感應電動勢所產生之感應電流具有一效應電壓反抗感應作用之產生，亦即反對原有磁通變化之方向，此反抗效應稱為楞次定律 (Lenz's law)。另外，將一導體放在均勻磁場 ( $B$ ) 中，施力 ( $F$ ) 於導線上使其運動，則導線將感應產生電流 ( $I$ )，若有一匝長方形的導體環，以  $v$  的速度在磁場中運動，此時導體環內的磁通量 ( $\Phi$ ) 將發生變化，如式 (13) 所示：

$$\Phi = B \times A \quad (13)$$

其中，導線環所圍繞的面積 ( $A$ ) 為導線的寬度 ( $L$ ) 和導線在磁場中的長度 ( $S$ ) 之乘積，則式 (13) 可改寫成：

$$\Phi = B \times L \times S \quad (14)$$

由法拉第與楞次感應定律得知，此導線感應電動勢 ( $\varepsilon$ ) 為

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta BLS}{\Delta t} \quad (15)$$

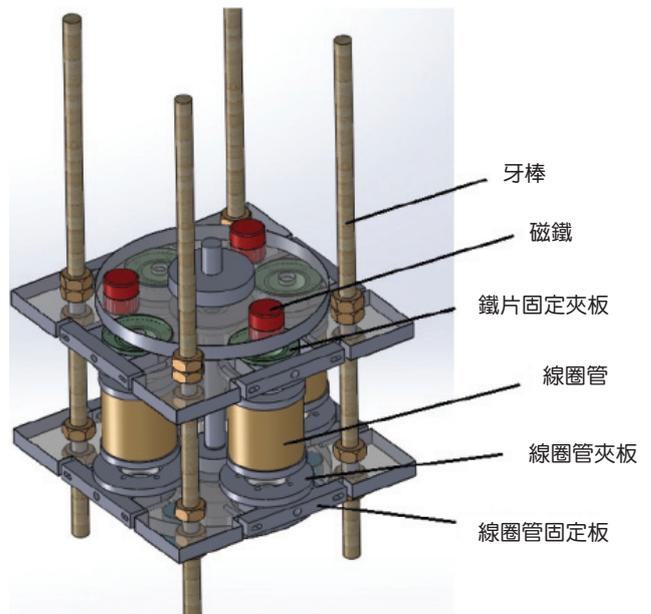


圖 14. 即動發電機工程示意圖。

因  $B$  與  $L$  皆為常數，當單一匝導線 ( $N = 1$ ) 時，感應電動勢 ( $\varepsilon$ ) 為

$$\varepsilon = -BL\frac{\Delta s}{\Delta t} = -BLv \quad (16)$$

其中， $v$  為導線環之位移速度。由此可知，導線 ( $L$ ) 在磁場 ( $B$ ) 中以  $v$  的速度移動時，或是磁場 ( $B$ ) 以  $v$  的速度移動通過導線 ( $L$ ) 時，導線的兩端會產生感應電動勢，此導線兩端若連接至外部電路，則會有感應電流流通。

即動發電機的輸入能量主要用來抵抗斥推磁鐵與線圈管內之鐵片的吸引力及與線圈管內之感應磁鐵的斥推力。現今一般電磁感應發電機是根據佛來銘右手定則 (Fleming's right hand rule)<sup>(15-17)</sup>，為一導體放置於均勻磁場中，施力使其運動，進而產生感應電流與感應電動勢，而本發電機則是透過移動感應磁鐵產生感應電動勢。圖 15 與 16 為斥推磁鐵受力分析示意圖，由圖 15 與 16 可知，當外部斥推磁鐵欲將線圈管內感應磁鐵斥推至線圈管另一端，及其將感應磁鐵斥推至線圈管另一端後欲離開鐵片時，皆有阻力產生。斥推磁鐵欲將感應磁鐵斥推至線圈管另一端時，兩磁鐵間有一磁力相斥，而斥推

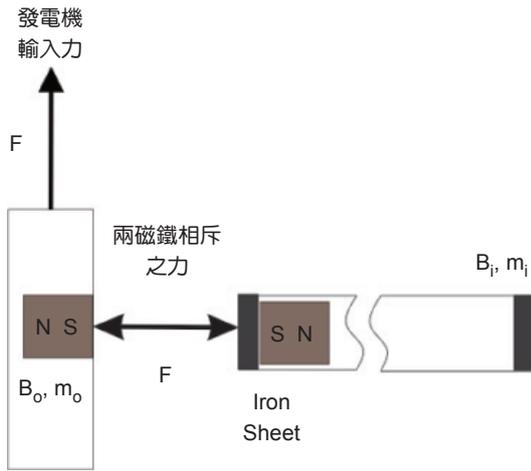


圖 15. 斥推磁鐵斥推力分析示意圖。

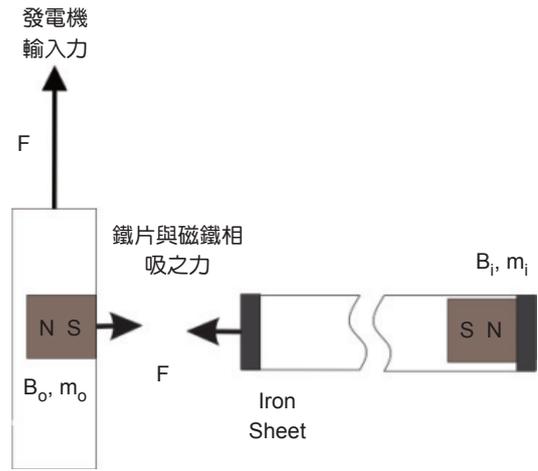


圖 16. 斥推磁鐵吸引力分析示意圖。

磁鐵欲離開鐵片時，鐵片與磁鐵間有一磁力相吸，此兩種力之和等於即動發電機之輸入力。即動發電機之輸入力矩  $\tau$  為

$$\tau = r \times F \quad (17)$$

其中， $F$  為輸入力， $r$  為發電機之旋轉半徑。因此，發電機旋轉一周所需輸入功 ( $E_i$ ) 為

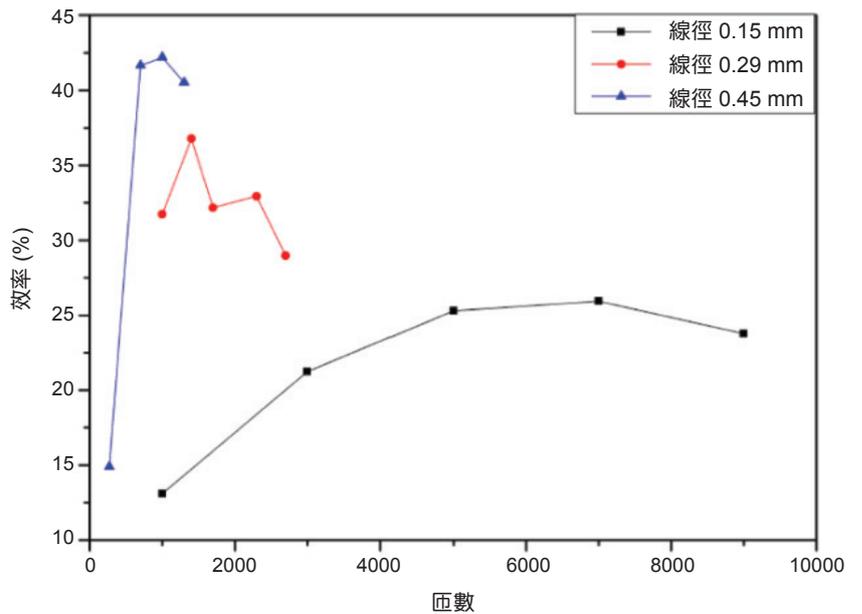
$$E_i = \tau \times 2\pi \quad (18)$$

即動發電機之效率 ( $\eta$ ) 為

$$\eta = \frac{E_t}{E_i} \times 100\% \quad (19)$$

其中， $E_t$  為發電機的輸出能量。影響即動發電機的效率主要參數為  $L$ 、 $D$ 、 $d$ 、 $N$ 、 $m_{Fe}$ 、 $m_0$ 、 $B_0$ 、 $m_i$ 、 $B_i$ ，如圖 13 所示。 $L$  為繞有線圈之線圈管管長、 $D$  為線圈寬度、 $d$  為線圈的線徑、 $N$  為線圈匝數、 $m_{Fe}$  為鐵片質量、 $m_0$  為外部磁鐵質量、 $B_0$  為外部磁鐵磁場密度、 $m_i$  為管內磁鐵質量、 $B_i$  為管

圖 17. 不同線徑與線圈匝數之即動發電機效率曲線圖。



內磁鐵磁場密度。圖 17 為不同線徑與線圈匝數之即動發電機效率曲線圖。

## 五、結論

本 CCT 實驗室成功開發出一不受轉速影響之即動發電機，發電機本身效率約 40%，相較於一般電磁感應發電機而言，本即動發電機對於脈衝式能量擷取部份，具備更穩定的擷取效率。目前正積極以此即動發電機結合傳動機構製作新型發電地磚並測試，測試項目包括效率與壽命，相信在經過長時間壽命測試與改良後，此一型式發電機技術將有助於路面能或脈衝式能量擷取，對未來綠能擷取回收技術提供更進一步的貢獻。

## 誌謝

感謝行政院國家科學委員會的支持，以及合作廠商光歲精密工業有限公司，使得本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意，計畫編號 NSC102-2622-E-027-002-CC2。

## 參考文獻

1. C. C. Ting, D.Y. Tsai, and C.C. Hsiao, *Applied Energy*, **92**(1)-(8) (2012).
2. 吳國光, 張育誠, 焦鴻文, 經濟部能源局能源報導, 第十四期 (2010).
3. <http://www.soundpower.co.jp/>
4. J. A. Paradiso, *Designing Automation Conference*, **43**, 645 (2006).
5. NTT Develops Shoes That Power Gadgets, *Mark's Technology News*, Oct 17, (2008).
6. Powerleap, <http://www.powerleap.net>
7. <http://www.innowattech.co.il>
8. J. A. Boyd, "Pump System", U.S. Patent 2333614 (1941).
9. J. Dukess, U.S. Patent 4322673 (1982).
10. 張宏銘, 李志洋, 張鴻威, 丁振卿, 第三十三屆全國力學會議, 11 月 13 日, 苗栗 (2009).
11. 黃建邦, 即動發電機研發及其應用研究, 碩士論文, 國立臺北科技大學製造科技研究所, 台北 (2012).
12. <http://www.pavegen.com/>
13. <http://news.rice.edu/2013/05/06/prototype-provides-pedestrian-power/>
14. <http://www.instepnanopower.com/>

15. 鍾玉堆, 林光燦, 黃顯文, 董永財, 電機學, 台北市: 新科技書局, 85 (1988).
16. 戴文正, 特殊電機, 台北市: 文笙書局, 10 (1995).
17. 馬乃孝, 王慶善, 直流/交流電路 (上冊), 台北市: 儒林圖書有限公司, 460 (1988).



蔡達毅先生為國立台北科技大學機械工程系博士班學生。

Da-Yi Tsai is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.



楊承諺先生為國立台北科技大學機械工程系碩士班學生。

Cheng-Yan Yang is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.



潘奕華先生為國立台北科技大學機械工程系碩士生。

Yi-Hua Pan is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.



顏文奕先生為國立台北科技大學機械工程系碩士班學生。

Wun-Yi Yan is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.



丁振卿先生為德國阿亨工業大學機械系工程博士，現任國立台北科技大學機械工程系教授。

Chen-Ching Ting has received his Ph.D. in mechanical engineering from RWTH Aachen, Germany. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.