

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：工程學

作 品 名 稱：電源線磁場再生能源的研究與應用

學校 / 作者：臺北市私立開南高級商工職業學校 蘇炤庭
臺北市私立開南高級商工職業學校 陳冠豪

電源線磁場再生能源的研究與應用

目錄

作者簡介及照片	1
中英文作品摘要	3
壹、前言	4
貳、研究方法與過程	4
一、本研究雙環形管所用到的學理探討	4
二、本研究雙環形管學理推導	6
三、選定實驗器材	7
四、高導磁環形鐵粉芯送測	8
五、從理論推導出來的電動勢式子中選定參數進行 6 項實驗	8
六、實例應用測試	13
1. 測試一：照明	13
2. 測試二：電流過載警示	13
3. 測試三：串聯測試	14
4. 測試四：並聯測試	15
參、研究結果與討論	16
肆、結論與應用	18
伍、參考文獻	18

作者簡介及照片



我姓陳名冠豪，出生於台北市，是一位樂觀進取、積極勤奮的高中生。熱愛閱讀電機資訊的書籍，從其中領略到不同的科學新知，並設法運用於日常生活。由於家父從事電子製造業，自我年幼時期即耳濡目染，很早就對電機與電子科技產生興趣！調皮的我還拿螺絲起子往插座戳，因而感受到電的滋味，日後父親還不斷地指導我進行電子相關實驗，奠定了良好的基礎。進入高中求學之後，更是時常探索科學新知，如有不解即努力搜尋相關資料，將不了解的疑點明瞭後才善罷甘休，期盼我的積極努力，能有豐碩的成果。

作者簡介及照片



我是蘇炤庭，出生於台北縣，生性開朗活潑，是一位積極向上的高中生。平日雅號閱讀文學小說、打籃球，雖然球技十分平凡，但我基於運動家的精神仍然樂在其中。我從國中三年級起，即對「電」產生極大的興趣，因為身旁的親人有多位從事電子相關行業，所以常常看他們做一些電學實驗，令我非常好奇。隨著知識的累積，我一一明瞭電晶體、電容、電阻、二極體等電子零件的原理與運用，希望有朝一日能有良好的成績。

電源線磁場再生能源的研究與應用

中英文作品摘要

目前正逢能源危機之際，能源再生成為全球關注的課題。有鑒於此，本研究應用高導磁環形鐵粉芯，在表面纏繞多圈漆包線，形成環形管(Toroid)。環形管外圍再繞上交流電源線，電源線內電流產生的磁場，被高導磁環形鐵粉芯所引導，產生較強而均勻的磁場，傳遞至內圈的單心漆包線環形管，依法拉第定律產生電動勢，達到能源再生的目的。

藉由六項實驗，驗明我們研究雙環形管理論，推演所得的電動勢公式 $\varepsilon = \frac{\mu N_1 N_s}{2 r} a^2 \omega I_0 \cos \omega t$ 是正確的。再生的電動勢能驅動高亮度的發光二極體提供照明、電器產品充電；還能提供電流過載警示，防止電路過載起火的危險；串、並聯使用則可產出較大功率，深具應用與研究的價值。

Abstract

During mankind are urgent developing of new energy, recycle energy are also one of the global topics; we are using single-heart-Turn around how the high permeability enameled wire ring formation of iron powder core ring solenoid, from the external power supply line also used around - Ring solenoid (Toroid), due to changes current power supply lines of magnetic field generated by the high-permeability core Ring guided iron powder, and can produce more uniform magnetic field so that the inner ring of single-heart enameled wire Ring solenoid, according to Faraday's Law electromotive force can be generated to achieve purpose of recycle energy, we will be divided into six experimental studies to confirm this theory deductions obtained by electromotive force $\varepsilon = \frac{\mu N_1 N_s}{2 r} a^2 \omega I_0 \cos \omega t$ is correct, this electromotive force will enable to supply high brightness LED Optical lighting, can also be used for current overload warning system, if use on series-parallel connection that will produce larger power output, it has great application potential, so the subject is worth to research and development.

壹、前言

當全球致力於各項自然能源開發時，我們似乎忽略了電器產品電源線走過的磁場源，如果我們能善加利用這些磁場，可以再生部分電能並且減少空間磁場的干擾，可稱為一舉數得。

我們將高導磁性的環形鐵粉芯表面，利用繞有多匝漆包線形成環形管，再將其外圍電源線也繞成環形管。由於電源線的變動電流所產生的磁場，被高導磁環型鐵粉芯所引導，可產生較強且均勻的磁場，使內圈的單心漆包線環形管，依法拉第定律就可產生電動勢達到能源再生的目的。

本研究藉由六項實驗，證實我們雙環形管理論推演所獲得的電動勢 $\varepsilon = \frac{\mu N_1 N_2}{2r} \dot{I}^2 \omega L \cos \omega t$ 是正確的，此電動勢可使高亮度的LED發光提供照明，也可用於電流過載警示，防範室內配線過載所引起的火災；若串、並聯使用則可產出較大的輸出功率，其應用潛能很大，是值得研究開發的課題。

貳、研究方法與過程

一、本研究雙環形管所用到的學理探討

1. 安培環路定理

真空中的磁場中，沿任何閉合路徑 L 一周的 \vec{B} 向量的線積分（即 \vec{B} 的環流），等於閉合路徑內所包圍並穿過的電流的代數和的 μ_0 倍，而與路徑的形狀大小無關。

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_{(內)}$$

2. 載流環形螺線管的磁場分佈

設環形管軸線半徑為 R ，環上均勻地緊密繞上 N 匝線圈，通過電流 I 。

a. 求環內磁場分佈

如（圖一）所示，導磁性物質所製成的圓環，環內的 \vec{B} 線為一系列與環同心的圓周線，在環內任取一點 P_1 ，取過 P_1 點作以 O 點為圓心，半徑為 r 的圓周為積分迴路 L ，方向與電流 I 構成右手螺旋方向，由安培環路定理得 \vec{B} 的環流為

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI \quad , \quad \text{即} \quad B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi R} = \mu_0 n I \quad ; \quad n = \frac{N}{2\pi R}$$

（磁場集中在環內，且均勻分佈）

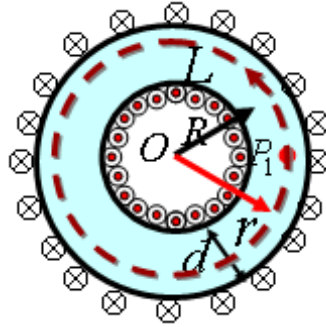


圖 1. 螺線管內磁性物質環內積分路徑

b. 求環外磁場分佈

如（圖二）所示，任取一點 P_2 ，過 P_2 作扇形積分迴路 $abcd$ ，其繞行方向符合右手螺旋定則，由安培環路定理， \vec{B} 的環流為：

$$\oint_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{ab} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{bc} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{cd} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{da} \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

$$= B_{ab} \widehat{ab} + B_{cd} \widehat{cd}$$

$$B_{ab} \widehat{ab} + B_{cd} \widehat{cd} = \mu_0 n a b I$$

注意到： $B_{ab} \widehat{ab} = \mu_0 n a b I$ ，故得 P_2 處的磁感應強度為： $B_{cd} = 0$ ，即環管外無磁場： $\vec{B} = 0$ 。

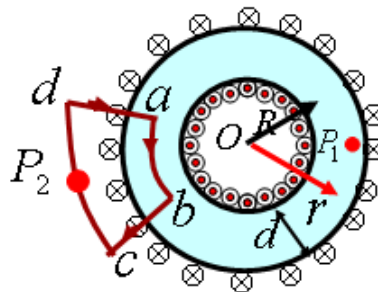


圖 2. 求螺線管外磁場積分路徑

c. 電磁感應--法拉第定律

法拉第定律描述當一磁場瞬間經過一線圈時，在線圈中會產生一感應電動勢， ε

$$\varepsilon = -N(d\Phi_B/dt)$$

N 為線圈中電線繞的匝數， $(d\Phi_B/dt)$ 代表磁通量(Φ_B)的變化率。磁通量和磁場大小 B 、線圈面積 A 有關。

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B(\cos\theta)(dA)$$

二、本研究雙環形螺線管學理推導

1. 電源線環形螺線管(Toroid)之磁場分布

假如將電源線螺線管繞成環形，已知磁力線將都包在線圈（有 N_s 匝）之中。

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \cdot 2\pi r = \mu N_s I_o \sin\omega t; \text{即 } B = \frac{\mu N_s I_i \sin\omega t}{2\pi r} \quad (1)$$

其中， μ ：高導磁環型鐵粉芯導磁係數。

N_s ：電源線繞在高導磁環型鐵粉芯外圍匝數。

$I_i \sin\omega t$ ：電源線電流。

r ：是距大環圓心的距離。

磁通量和磁場大小 B 、感應線圈面積 A 有關

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = B \int d\mathbf{A} = B A = \frac{\mu N_s I_i \sin\omega t}{2\pi r} A = \frac{\mu N_s I_i \sin\omega t}{2r} a^2 \quad (2)$$

其中 a 是高導磁環型鐵粉芯半徑

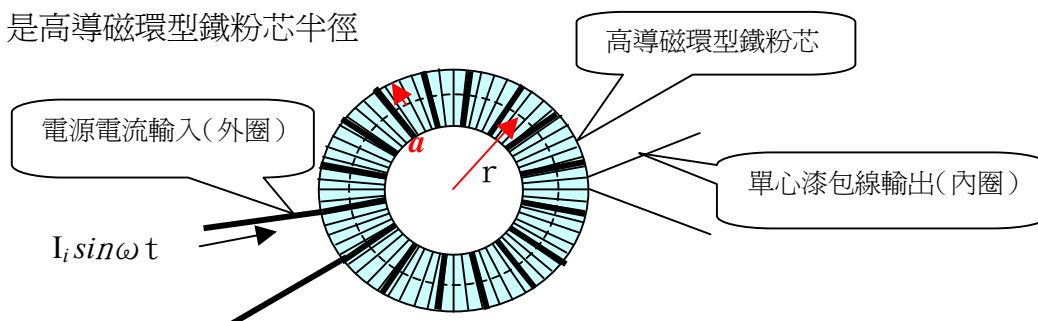


圖3. 本研究的雙環形螺線管

2. 電磁感應--法拉第定律

磁場瞬間經過繞在高導磁環型鐵粉芯線圈時，在線圈中會產生一感應電動勢， ε

$$\varepsilon = -N_1(d\Phi_B/dt) \quad (3)$$

將第(2)式代入(3)式可得

$$\varepsilon = \frac{\mu N_1 N_s}{2\pi r} A \omega I_i \cos\omega t \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu N_1 N_s}{2r} a^2 \omega I_i \cos\omega t \quad (5)$$

※若選定的環型鐵粉芯截面積是矩形時採第(4)式；環型鐵粉芯截面積是圓形時採第(5)式。

三、選定實驗器材

1. 不同尺寸的高導磁環型鐵粉芯：

「華邦電子 <http://anking.diytrade.com/>」



圖 4. 各式磁環

a. 功率型（通常說的 Power 材質 3000ui 以下初始磁導率，1400ui-3000ui 我司都有）適用於 PC 電源主變壓器、電源適配器等產品。

b. 高導磁型（通常說的通訊材質 4000ui-15000ui 初始磁導率）廣泛適用於通訊電源、各種電源適配器、濾波器等產品。

2. 高瓦特數假負載。

3. 不同線徑漆包線、電源線。

4. 高亮度 LED。



圖 5. 5mm Super Flux LED
 $V_F(V)I_f=20mA$ (2.9V—3.5V)
 $I_V(mcd)I_f=20mA$ (3300—4000)

<http://www.hyledchina.com.cn/led-lamps/super-flux-5mm.html>



圖 6. 5mm Backlighting LED
 $V_F(V)I_f=20mA$ (2.9V—3.5V)
 $I_V(mcd)I_f=20mA$ (500—1200)

5. 數位電錶、示波器、信號產生器。

四、高導磁環型鐵粉芯送測

將購買的高導磁環型鐵粉芯送國立台北科技大學奈米光電磁材料技術研發中心，使用「振動樣品 磁力計 Vibrating Sample Magnetometer(VSM)」做磁特性質量測

測試結果：導磁率 0.003 emu/Oe

五、從理論推導出來的電動勢式子中選定參數進行實驗

1. 實驗一：

不同 r ，相同 N_1 、 N_s 、 ω (f)、 A 、 I_i 來證實電動勢與 r 成反比。

表一

r (mm)	ε (V) 並聯示波器 高阻抗 (大於1M Ω)	ε (V) 並聯47 Ω 電 阻	ε (V) 並聯47 Ω 電阻 ($r=9$ mm截面積修正 與 $r=10$ mm相同時)	備註
9 (圖8)	0.3V	0.17V	0.32 V $(0.17V \times \frac{45 \text{ mm}^2}{24 \text{ mm}^2})$	$N_1 = \underline{100}$ 匝 (線徑0.11mm) $N_s = \underline{1}$ 匝 I_i (rms) = <u>4.8</u> A $f = 60$ Hz $r = 9$ mm $A_1 = \underline{24}$ mm ² $r = 10$ mm $A_2 = \underline{45}$ mm ²
10 (圖9)	0.3V	0.2V	0.2V	

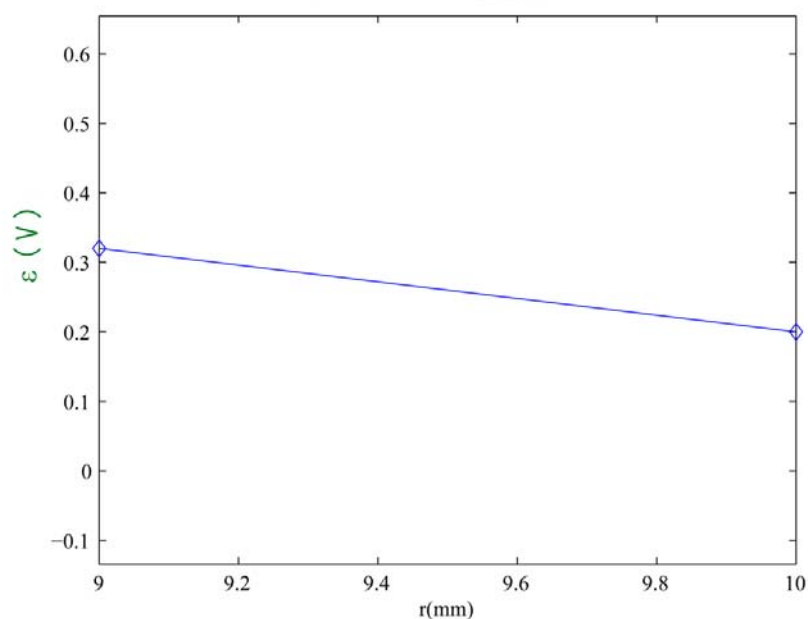


圖7. r 對感應電勢 ε 曲線

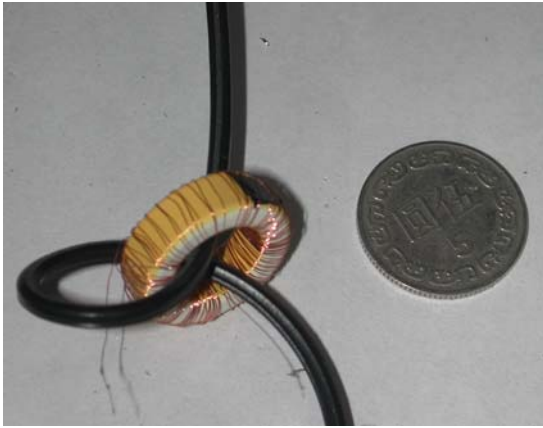


圖8. $r = 9\text{mm}$ 環型鐵粉芯線圈

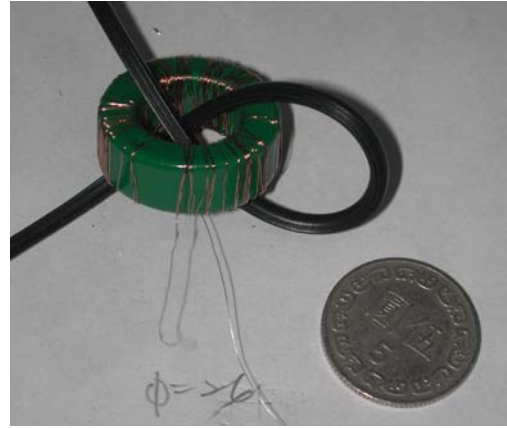


圖9. $r = 10\text{mm}$ 環型鐵粉芯線圈

2. 實驗二：

不同 I_i ，相同 N_1 、 N_s 、 ω (f)、 A 、 r 來證實電動勢與 I_o 成正比。

表二

I_i (rms)	ε (V)	備註
0.25A	1.00V	$N_1 = \underline{200}$ 匝 (線徑0.11mm) 並聯指針式三用 電錶內阻99k Ω 電 阻 $N_s = \underline{3}$ 匝 $r = \underline{25}$ mm $f = 60\text{Hz}$ $A = \underline{75}$ mm ²
0.60A	1.60V	
1.00A	1.85V	
1.30A	1.90V	
2.00A	1.95V	
2.75A	2.00V	
4.60A	2.20V	

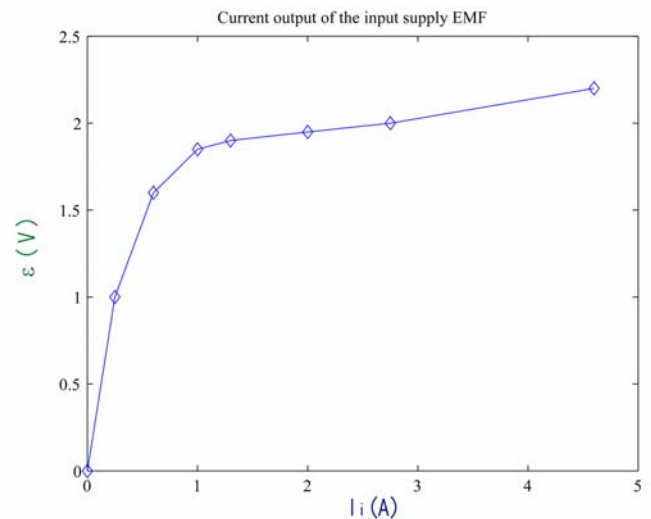


圖10. 電源輸入電流對輸出感應電動勢曲線 (輸出並聯99K Ω 電阻)

表三

I_i (rms)	ε (V)	備註
0.25A	0.00V	$N_1 = \underline{200}$ 匝 (線徑0.11mm) 輸出並聯50 Ω 電阻 $N_s = \underline{3}$ 匝 $r = \underline{25}$ mm $f = 60\text{Hz}$ $A = \underline{75}$ mm ²
0.60A	0.20V	
1.00A	0.50V	
1.30A	0.70V	
2.00A	1.10V	
2.75A	1.20V	
4.60A	1.40V	

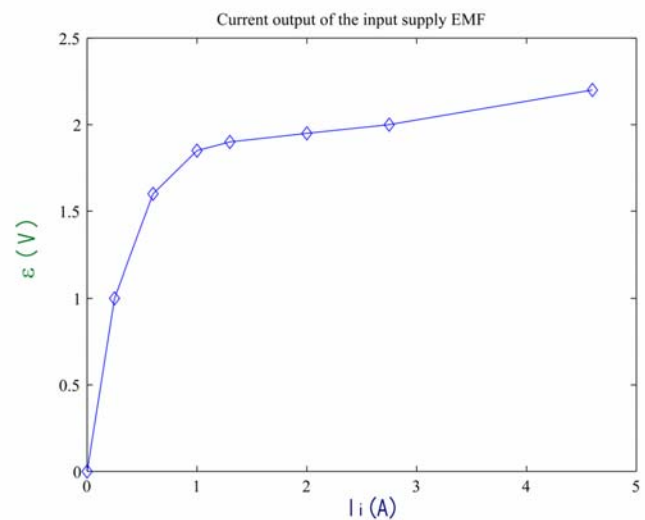


圖11. 電源 I_i 對輸出感應電動勢曲線 (輸出並聯50 Ω 電阻)

3. 實驗三：

不同 N_s ，相同 I_i 、 N_1 、 ω (f)、 A 、 r 來證實電動勢與 N_s 成正比。

表四

N_s (匝)	ε (V) 輸出並聯 47 Ω 電阻	備註
1(圖13)	1.3V	$N_1 = \underline{800}$ 匝 (線徑0.11mm) I_i (rms) = <u>10</u> A $r = \underline{12,5}$ mm $f = 60$ Hz $A = \underline{75}$ mm ²
2	1.8V	
3(圖14)	2.4V	
4	2.8V	

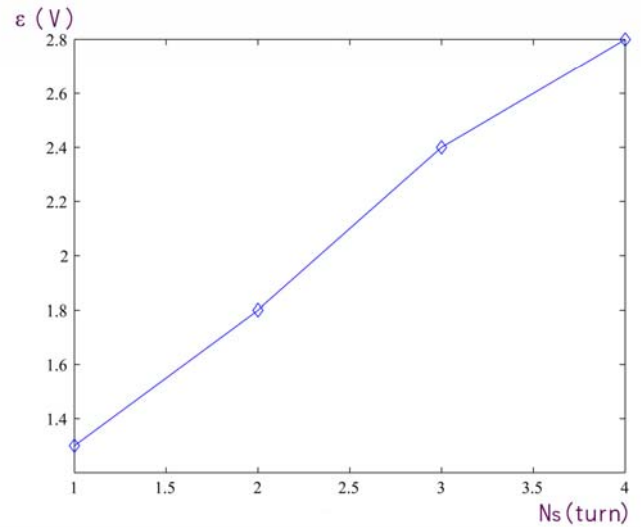


圖12. 電源線匝數對輸出感應電動勢曲線

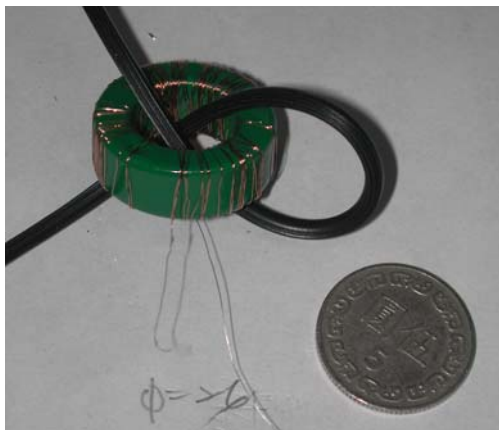


圖13. $r = 10$ mm環型線圈 $N_s = 1$ 匝



圖14. $r = 10$ mm環型線圈 $N_s = 3$ 匝

表五

N_s (匝)	ε (V) 輸出並聯50 Ω 電阻	感應所得電功率	備註
2	0.05V	0.05mW	$N_1 = \underline{100}$ 匝 (線徑0.11mm) I_i (rms) = <u>4.8</u> A $r = \underline{15.5}$ mm $f = 60$ Hz $A = \underline{117}$ mm ²
3	0.20V	0.80mW	
4	0.40V	3.20mW	
5	0.60V	7.20mW	
6	0.80V	12.80mW	

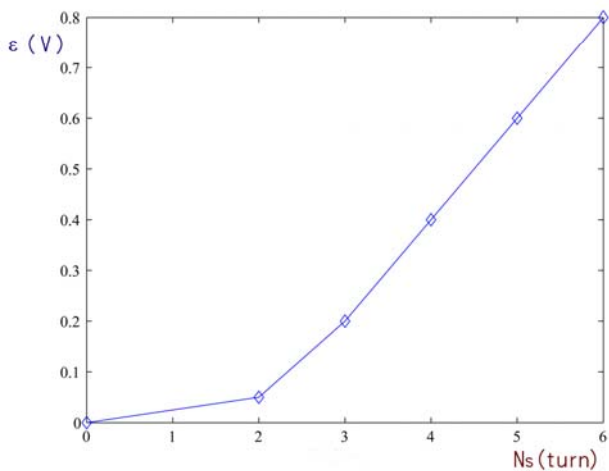


圖15. 電源線匝數對輸出感應電動勢曲線

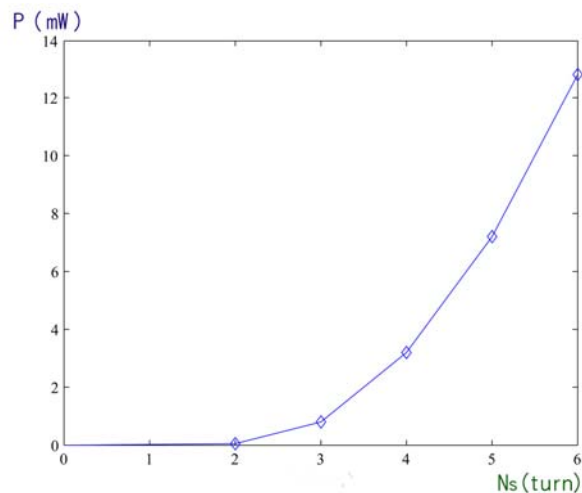


圖16. 電源線匝數對輸出感應感電功率曲線
(輸出並聯50Ω電阻)

4. 實驗四：

不同 N_1 ，相同 I_i 、 N_s 、 ω (f)、 A 、 r 來證實電動勢與 N_1 成正比。

表六

N_1 (匝)	ϵ (V) 並聯示波器高阻抗 (大於 $1M\Omega$)	ϵ (V) 並聯 47Ω 電阻	備註
100	0.6V	0.6V	$N_s = \underline{3}$ 匝 $I_i(\text{rms}) = \underline{3.6}$ A $r = \underline{12.5}$ mm $f = 60\text{Hz}$ $A = \underline{75}$ mm ²
200	2V	1V	
300	3.6V	1.8V	

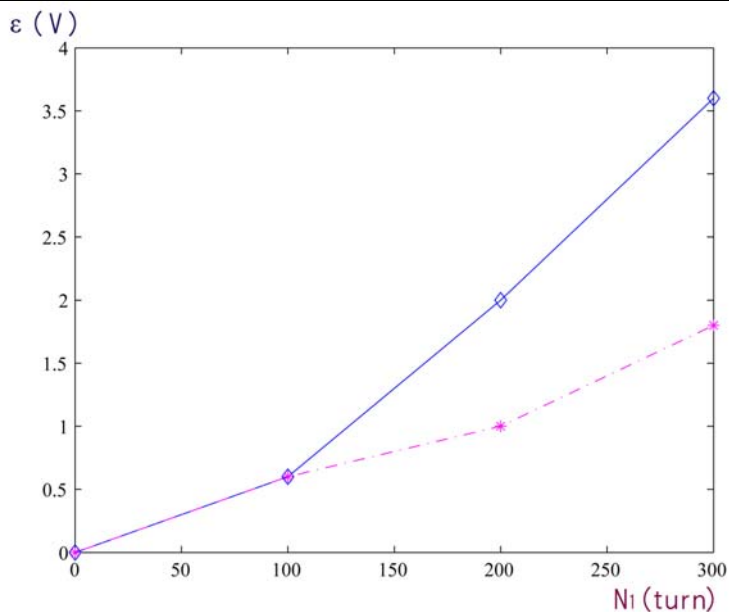


圖17. 感應線匝數對輸出感應電動勢曲線

5. 實驗五：

不同 ω ，相同 I_i 、 N_1 、 N_s 、 ω (f)、 A 、 r 來證實電動勢與 ω 成正比。

表七

$\omega = 2\pi f$ f (Hz)	ε (V _{p-p})	備註
100	0.8	$N_1 = \underline{100}$ 匝 $N_s = \underline{6}$ 匝
1000	8	$I_i(\text{rms}) = \underline{96\text{mA}}$ $r = \underline{10}$ mm
5000	37.5	$A = \underline{45}$ mm ²

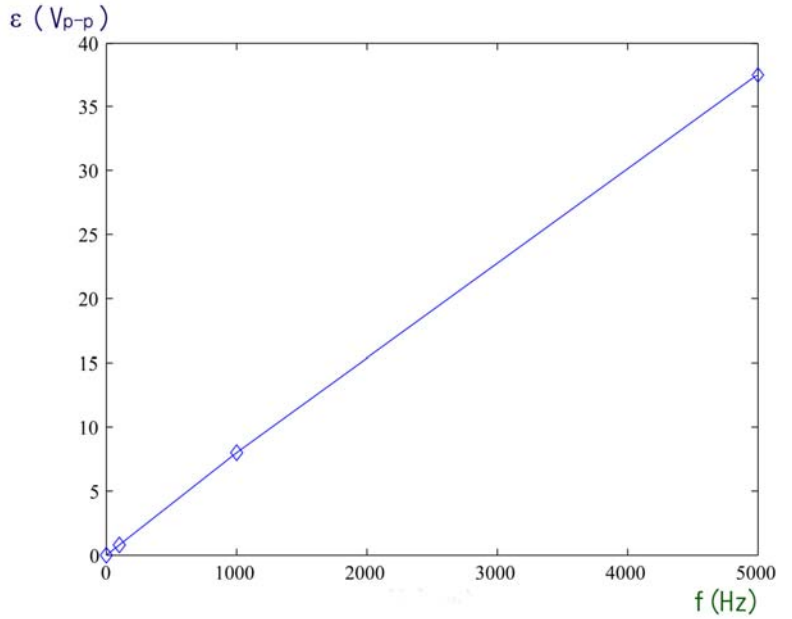


圖18. 輸入電源頻率對輸出感應電動勢曲線

6. 實驗六：

不同 A ，相同 I_i 、 r 、 N_1 、 N_s 、 ω (f) 來證實電動勢與 a^2 成正比。

表八

A (mm ²)	ε (V) 並聯示波器高阻抗 (大於 1M Ω)	ε (V) 並聯 47 Ω 電阻	備註
35	0.18V	0.1V	$N_1 = \underline{100}$ 匝 $N_s = \underline{1}$ 匝
60	0.30V	0.2V	$I_i(\text{rms}) = \underline{4.6}$ A $r = \underline{10}$ mm
96	0.60V	0.4V	$f = \underline{60}$ Hz

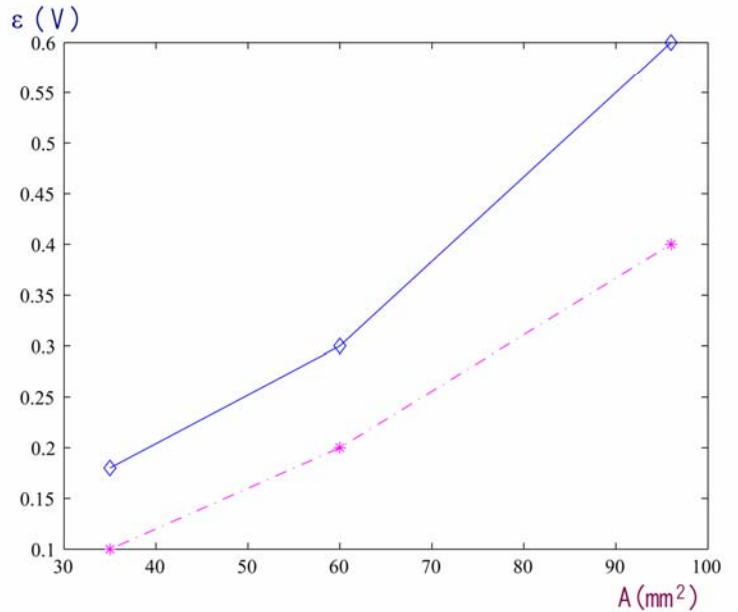


圖19. 感應線圈面積A對輸出感應電動勢曲線

六、實例應用測試

1. 測試一：照明

使用單一環形螺線管 $I_i = 4.6 \text{ A}$; $r = 12.5 \text{ mm}$; $N_1 = 300 \text{ 匝}$; $N_s = 3 \text{ 匝}$;
 $a = 75 \text{ mm}^2$, 可使 10 個白光 LED 發亮。

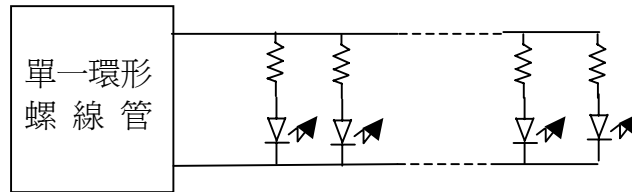


圖 20. 照明接線圖

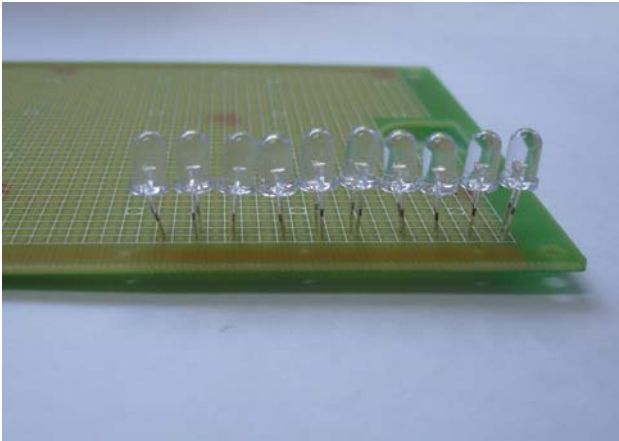


圖21.待驅動的白光LED

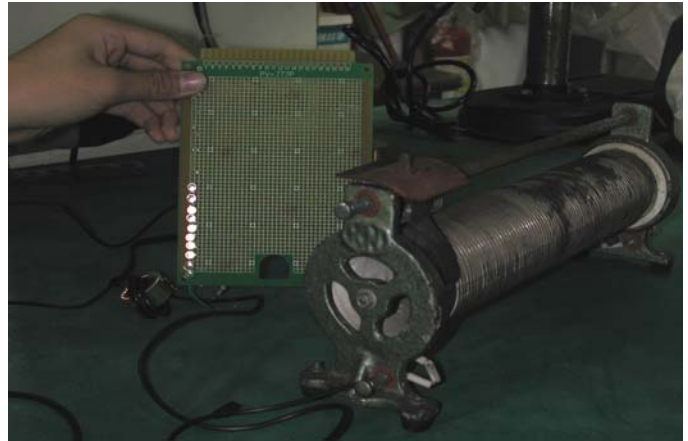


圖22. 單環驅動10顆白光LED測試

2. 測試二：電流過載警示

a. 使用單一環形螺線管 $r = 12.5 \text{ mm}$; $N_1 = 300 \text{ 匝}$; $N_s = 1 \text{ 匝}$; $a = 75 \text{ mm}^2$
可使 $I_i = 10 \text{ A}$ 使紅色LED發亮且使蜂鳴器發出警告聲。

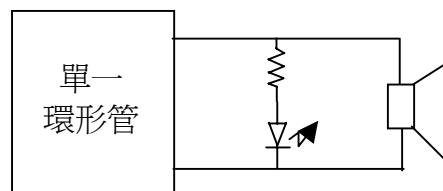


圖 23.電流過載警示

3. 測試三：串聯測試

表九：單顆測試（對照組）

I_i (rms)	ε (V) 並聯示波器高阻抗 (大於 $1M\Omega$)	ε (V) 並聯 47Ω 電阻	備註
4.6A	2.5V	1.5V	磁環1 $N_1 = \underline{\quad 300 \quad}$ 匝 $N_S = \underline{\quad 6 \quad}$ 匝 $r = \underline{\quad 12.5 \quad}$ mm $a = \underline{\quad 75 \quad}$ mm ² $f = \underline{\quad 60 \quad}$ Hz
2.8A	2.5V	1.4V	
2.0A	2.4V	1.4V	
1.3A	2.3V	1.0V	
1.0A	2.2V	0.6V	
0.8A	2.2V	0.5V	

表十：雙顆串聯測試（實驗組）

I_i (rms)	ε (V) 並聯示波器高阻抗 (大於 $1M\Omega$)	ε (V) 並聯 47Ω 電阻	備註
4.6A	5.4V	2.4V	磁環1、2 $N_1 = \underline{\quad 300 \quad}$ 匝 $N_2 = \underline{\quad 300 \quad}$ 匝 $N_S = \underline{\quad 6 \quad}$ 匝 $r = \underline{\quad 12.5 \quad}$ mm $a = \underline{\quad 75 \quad}$ mm ² $f = \underline{\quad 60 \quad}$ Hz
2.8A	5.2V	2.3V	
2A	5.1V	1.9V	
1.3A (圖24)	5V	1.1V	
1A	4.9V	0.6V	
0.8A (圖23)	4.8V	0.4V	

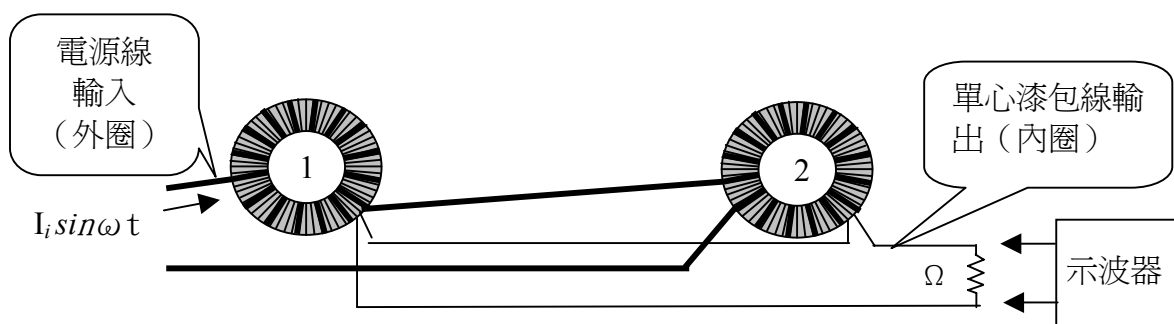


圖 24. 串聯測試接線圖

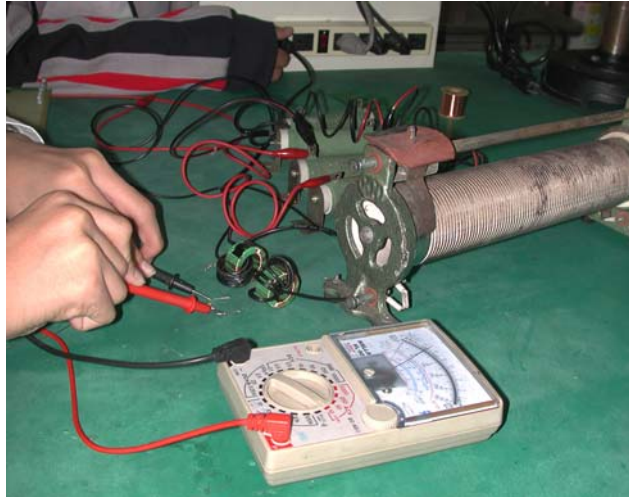


圖25. 串聯測試

4. 測試四

表十一：雙顆並聯測試（實驗組）

I_i (rms)	ε (V) 並聯示波器高阻抗 (大於 $1M\Omega$)	ε (V) 並聯 47Ω 電阻	備註
4.6A	2.6V	1.9V	磁環1、2 $N_1 = \underline{300}$ 匝 $N_2 = \underline{300}$ 匝 $N_s = \underline{6}$ 匝 $r = \underline{12.5}$ mm $a = \underline{75}$ mm ² $f = \underline{60}$ Hz
2.8A	2.5V	1.9V	
2.0A	2.4V	1.8V	
1.3A	2.4V	1.7V	
1.0A	2.3V	1.5V	
0.8A (圖25)	2.2V	1.2V	

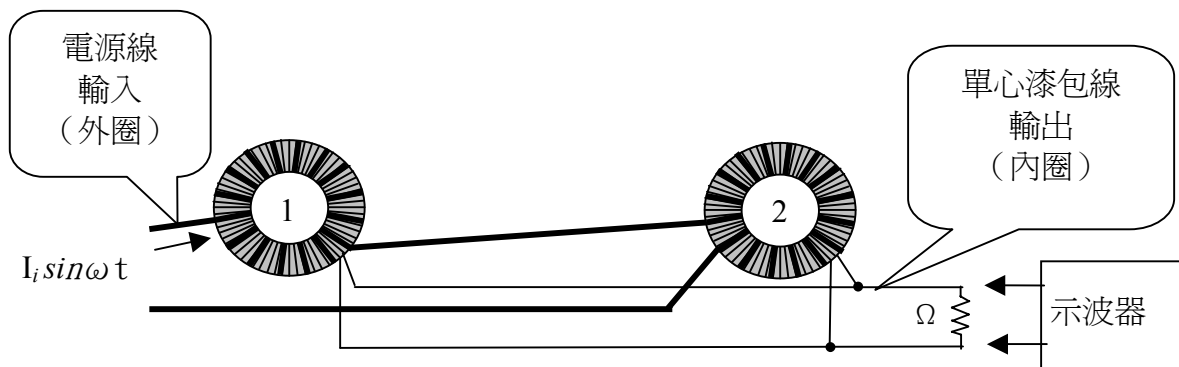


圖 26. 並聯測試接線圖

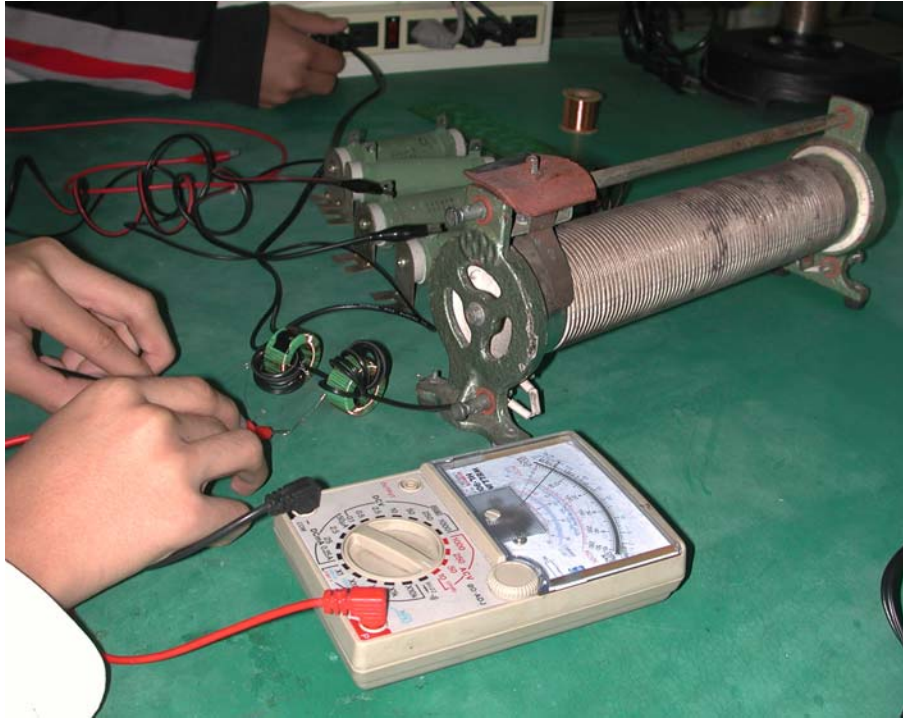


圖27. 並聯測試

叁、研究結果與討論

一、實驗結果

1. 實驗一：

從表一及圖7可得知不同 r ，相同 N_1 、 N_s 、 f 、 A 、 I_0 證實電動勢與 r 成比。

2. 實驗二：

從表二、圖10及表三、圖11可得知不同 I_0 ，相同 N_1 、 N_s 、 f 、 A 、 r 證實電動勢與 I_0 成正比。

3. 實驗三：

從表四、圖12及表五、圖15、圖16可得知不同 N_s ，相同 I_0 、 N_1 、 f 、 A 、 r 證實電動勢與 N_s 成正比。

4. 實驗四：

從表六、圖17可得知不同 N_1 ，相同 I_0 、 N_s 、 f 、 A 、 r 來證實電動勢與 N_1 成正比。

5. 實驗五：

從表七、圖18可得知不同 f ，相同 I_0 、 N_1 、 N_s 、 A 、 r 來證實電動勢與 ω 成正比。

6. 實驗六：

從表八、圖19可得知不同 A ，相同 I_0 、 r 、 N_1 、 N_s 、 f 來證實電動勢與 A 成正比。

二、實例應用測試結果

1. 測試一：

實驗測試可得知可應用於白光LED照明設計。

2. 測試二：

實驗測試可得知電源電流過載警示作用達到防災效果。

3. 測試三：

從表九、十可得知，串聯確實可提高感應電動勢。

4. 測試四：

從表九、十一可得知，並聯確實可提高供應電流使感應電動勢在 47Ω 負載仍可維持。

三、討論

1. 從上面六項實驗證實本研究利用電源磁場所推導之感應電勢與 A 、 I_0 、 r 、 N_1 、 N_s 、 f 之關係。

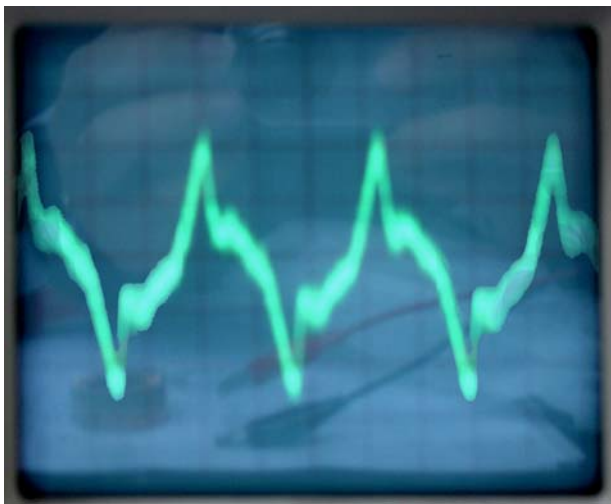


圖28. 磁飽和輸出電動勢波形

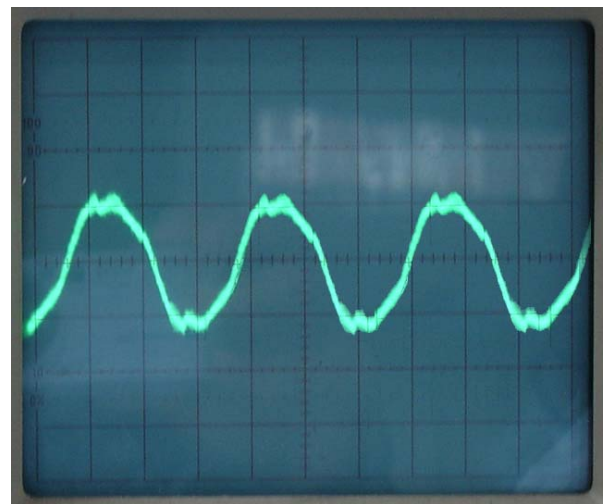


圖29. 未磁飽和輸出電動勢波形

2. 圖28及圖29分別為磁飽和輸出電動勢波形與未磁飽和輸出電動勢波形，是未來考量選定電源電流大小與磁環大小有關。
3. 本次實驗感應線圈均採用線徑 0.11mm ，電源電流 10A 以下，若再高的電流可使用較大線徑測試。
4. 磁環導磁係數及導磁截面積，是本次實驗較無法掌控，因為市面上可買到的有限，無法做不同磁性材料比對是最大的遺憾。
5. 本次實驗未作最佳化測試，希望能在入選參賽前找出定的模式。

肆、結論與應用

從上述六個實驗證實本研究理論推演所獲得的電動勢 $\varepsilon = \frac{\mu N_1 N_s}{2 r} a^2 \omega I_0 \cos \omega t$ 是正確的，並從四項實例應用測試當中，證實此電動勢可使高亮度的LED發光提供照明，也可用於電流過載警示，若串並聯使用可產出較大瓦特功率，其應用潛能很大，但如何找出磁環及各參數之最佳化設計，是值得研究開發的課題。

伍、參考文獻

- 一、孫允武 電磁學 『環形螺線管(Toroid)之磁場分布』 電磁感應－18
<http://140.120.11.15/rara1/4m9.pdf>
- 二、賈至達、王雅芬，2001物理教學及示範研討會，『螺線管中磁場分析』
http://南e網.tw/big5/content/2004-01/01/content_20055.htm
- 三、林菲，『CH 23：電磁感應與法拉第定律』
[http://www.photonics.fcu.edu.tw/flin/Faraday's%20Law\(Web94\).pdf](http://www.photonics.fcu.edu.tw/flin/Faraday's%20Law(Web94).pdf)
- 四、黃秉鈞，台大校訊862號專題報導，「高亮度LED 照明時代來臨推動能源節約台大LED研發與校園示範帶動全球照明革命」，2006年12月27日
http://www.me.ntu.edu.tw/~nec/NTUNews95-12-27_.pdf

評語

本作品利用感應線圈因與電源線之間的電磁作用所產生的電動勢，而使發光二極體(LED)發光的研究。這是古典電磁原理的應用，是可行及成功的，但是否具實用價值，有待進一步分析。