

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160020

參展科別 物理與天文學

作品名稱 **An Easy Method to Discuss Properties of
Simplified Solid-state Tesla Coil**

就讀學校 臺南市私立瀛海高級中學

指導教師 黃勤展、薛龍

作者姓名 林子瀟、蘇健勳、陳苡禎

關鍵詞 **Electroscope、Induct、Pulse Current**

作者簡介



大家好，我們是來自瀛海中學的科展團隊，很榮幸可以參加這次的國際科展。這是我們第一次來到國際科展，希望可以在這個聚集眾多科學菁英的地方嶄露頭角。

大家好，我是林子瀟，好高興有這個機會可以來參加國際科展，我認為科展最重要的莫過於團隊合作，雖然我們在實驗的過程中遭遇了許多挫折，但我們最後還是熬過來了。希望我們可以在這次的比賽中獲得好成績。

大家好，我是來自瀛海中學的蘇健勛，這是我第一次站上偌大的科學舞台，希望可以與各位科學家一起交流科學的知識，一起精進自我。我認為科展最重要的是如何在實驗的失敗後重新爬起來，繼續朝著目標邁進，我認為這是不可獲缺的能力。希望可以在這次比賽中取得佳績。

大家好，我是瀛海中學的陳苡禎，以前我都是站在國語文競賽的舞台上，這是我第一次站在科學的舞台，難免有點緊張，希望可以藉由這次的經驗，學到更多的科學知識。我覺得科展跟國語文競賽最大的不同是科展是仰賴團隊合作的比賽，並非單打獨鬥就可以完成的。希望在這次的比賽可以有嶄新的收穫。

摘要

無線傳電是現今發展趨勢。本研究旨在拼裝簡易裝置探究特斯拉線圈性質。實驗自製簡化電路、建立方法學並使用多種電晶體結果歸納：管柱幾何形狀會影響其傳電效果。

過去科展未曾探究過特斯拉周圍電波場情況。我們依網路製作並簡化電路，排除燈管偵測電場不夠靈敏及手持或移動方式等系統誤差與隨機誤差，終以絕緣驗電筆建立具有鑑別度的標準流程。從網上挑選 14 種 NPN 電晶體試驗，發現電晶體啟動特斯拉的低限電壓約 3V，崩潰電壓約 12V，實驗以 8V 測量特斯拉電波場在垂直高度分布並使用 GeoGebra 繪製電波圖。還發現有等長電線時，增加管長的增益效果優於管徑。而管柱幾何形狀在天線延伸一倍管高內幾乎不影響輸出電波的保留率，管柱形狀也不影響輸出的無線電波頻率。

實驗也成功將自製特斯拉應用於無線傳電，並得知感應電壓隨距離函數遞減。

Abstracts

Wireless transmission products are widely used in our daily life. In this research, we focus on knowing how solid-state tesla coil works in different conditions and finding the best parameters through an easy way. In our work, a commercial electroscope was used as detector for measuring the strength of radio wave created by our simplified tesla coils.

In fact, many factors would lead to experimental errors such as detectors, selected types of NPN BJT components, applied voltage and measuring position of height. Therefore, all of the factors were under control to make sure of accuracy and precision for our designed measuring method. In our experiment, graphics of radio wave distribution around tesla coils were drawn by mathematic software of GeoGebra. It shows the BJT types of 2n2222 had good performance for wireless transmission efficiency. To our surprised, we found the extended wires (called antenna) from the top of tesla coil also had an ability to transfer electromagnetic energy, and had good retention if the extended wires were within the length of main coil's height. Finally, the shape's and size's effect was determined by our testing work. The result shows that pipe's length, pipe's diameter and turns ratio of two coils had great influence on tesla coil's transmission efficiency. It was found that the tesla's performance would be more efficient if wire was used to make the length twice rather than make the diameter twice. However, the turns ratio of secondary coil to primary coil would change while making the length twice. To avoid that, we fixed the length and decrease the turns of primary coil. At last, we found tesla coil must work at the turns of primary coil higher than two. Furthermore, the frequency of radio wave not only had less relationship with their length or diameter but also had less relationship with types of BJT

In our study, our handmade tesla coil was successfully applied for wireless charging and we find that the induced voltage decrease in proportion to cube root of distance between tesla coil and induced coil.

1.Introduction

Wireless transmission products are widely used in our daily life such as Air pods and so on. In Disney, they devoted to create a wireless transmission environment for consumers. However, to build a homogeneous electrical field is too difficult to achieve, that was just an idea dream. If it is possible, the only chance is to have a revolution for tesla coil. In this research, we focus on knowing how solid-state tesla coil works in different conditions and finding the best parameters through an easy way. In this study, the relationship between radio wave's properties and shapes of tesla coils was obtained.

2.Experiment method and findings

In order to make the observed radio wave's strength become data, we established an easy way to detect the strength of radio wave produced by tesla coil. Our designed circuit (Figure 1) was referred to simplified solid state tesla from the Internet. At first, we use fluorescent tube to measure radio wave's strength of tesla coil, but it was not accurate enough because fluorescent tube was less sensitive. Thus, it's necessary to find a better one for detection. After several test, fluorescent tube was replaced, electroscopes were selected as a candidate for more sensitive detector. Experiment set "the radio wave's strength of tesla coil" as "the distance (cm) from main coil" where the electroscopes could receive mounts of electromagnetic signals enough to respond.

2.1 Measuring error from operators

In the beginning, we got into the biggest difficulty. We found the data uncertainty depends on individual difference between people who were measuring. Due to electrical conductivity of human being, we had to eliminate the interference from human's body. Thus, instead of holding directly, the electroscopes were stuck to PVC pipe. Thanks to the insulation of PVC, as shown in Figure 2, the random error decreased by isolating conducting hand from measuring device and tesla coil. In addition, the experiments were carried out three times for electroscopes getting close to main coil to measure the distance where electroscopes respond. Also, the experiments were carried out three times for electroscopes getting away from main coil to measure the distance where electroscopes stop responding. An average was obtained to eliminate the system error caused by electroscopes's detection limit.

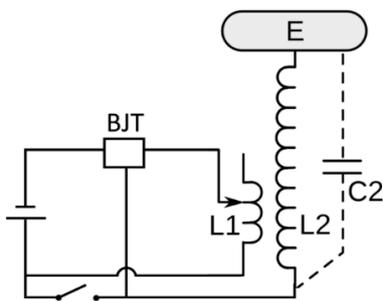


Figure 1 The designed circuit in this research

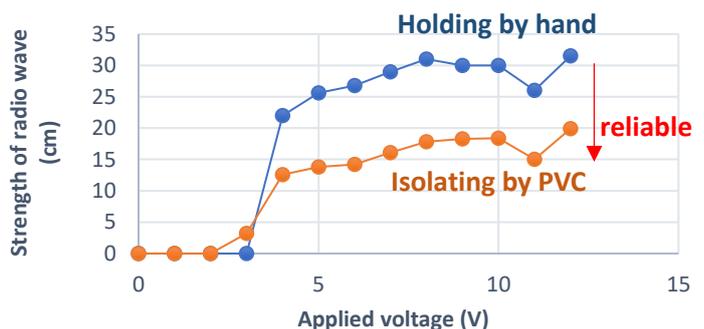


Figure 2 Two opposite situation for electroscopes measuring

2.2 Measuring error from BJT (bipolar function transistor)

To make the experiment reliable, 14 kinds of NPN type bipolar function transistor were chosen to run the circuit. As shown in Figure 3, we found that the lowest voltage to run the circuit is about 3 volt, and most of transistor would burn out at 12 volt. Table lists 14 kinds of BJT as mother group of transistor we've used in this experiment. As the applied voltage increased, the radio wave's strength of tesla coil assembled by every kind of BJT increased. Therefore, it is necessary to fix the voltage to be sure to make all of the BJT work

normally. Thus, 8 volt was selected to apply to the following parameters.

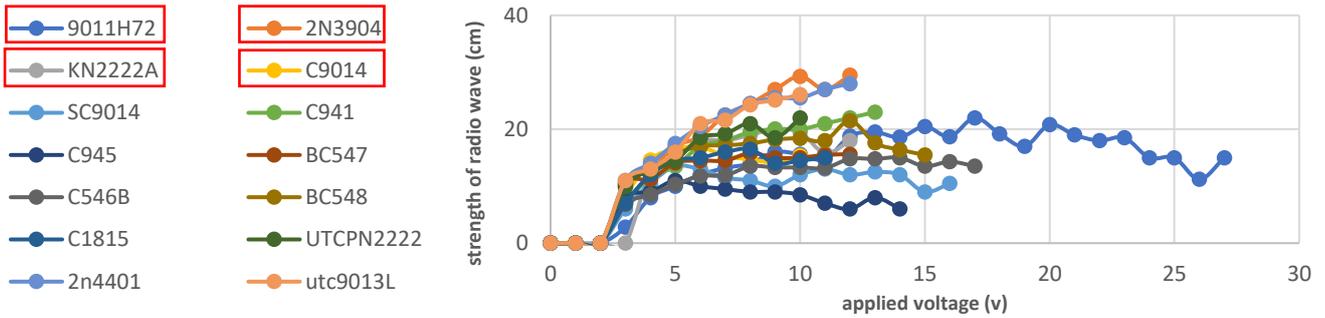


Figure 3 The voltage demand and tolerance for 14 types of BJT while working in our designed circuit

After that, we selected four of them as experimental representatives of four different characteristics. Type of 3904 take on a role as a representative of higher radio wave’s strength, type of 9011 as a representative of higher tolerance for applied voltage, types of 9014 as a representative of lower voltage-driven demand on work and type of 2222 as a control group. It was believed that if their behavior tend to satisfy certain rule or trend for electromagnetic performance, these result might be generalized a conclusion, even a principle.

2.3 Measuring error from position

The radio wave’s strength became stronger as height goes up. The top of the main coil had the strongest signal detected by electroscope’s response. According to assembly structure of tesla coil, analysis was divided into three parts (antenna zone, main coil zone and overlapped zone by primary coil and secondary coil, as shown in Figure 4 (a)) to discuss the performance caused by different BJT driven. The radio wave’s strength against the vertical position was draw as shown in Figure 4 (b). It was concluded that overlapped zone had the weakest signal. However, at the bottom of main coil zone, the strength would increase largely as the height goes up, and finally achieve a maximum saturated as the height near the top. Over the top of main coil, if wire extended a distance from the top, the signal of strength would fade out slightly rather than just disappeared. After confirming the radial symmetry for radio wave emission, we used mathematic software of GGB to draw graphics of radio wave distribution around tesla coils as shown in Figure 4 (c). It was easy to show a visiblized field for comparison between different parameters.

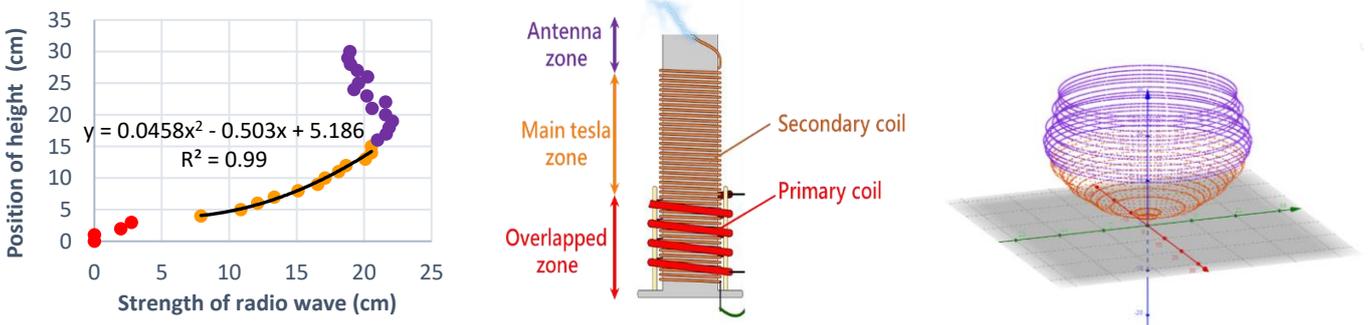


Figure 4 (a) Plot of strength of radio wave measured at different position of height (b) Assembly structure of tesla coil, divided to three zones (c) Graphic of radio wave field drawn by GeoGebra Software

2.4 Discussion of antenna effect

The antenna is an extra segment of wire which extended a distance along the vertical direction from the top of the main coil. To our surprised, we found the extend wires (called antenna) also acted as an emission source capable of transferring electromagnetic energy. Among four types of BJT we choosed, types of 9011 had the worst retention (retention% = strength measured at certain height over the top / strength measured at

the top of the main coil × 100%) of radio wave's strength as the height goes up. The others had good retention if the extended wires were within the length of main coil's height. Besides, the shapes of tesla coils had no effect on radio wave retention.

2.5 Shape's and size's effect on efficiency

The shape's and size's effect of the coil was determined by our testing work. As shown in Figure 5, the result shows that pipe's length, pipe's diameter and turns ratio of two coils had great influence on tesla coil's transmission efficiency. It was found that the tesla's performance would be more efficient if wire was used to make the length twice rather than make the diameter twice. However, the turns ratio of secondary coil to primary coil would change while making the length twice. To avoid that, we fixed the length and decrease the turns of primary coil. At last, we found tesla coil must work at the turns of primary coil higher than two.

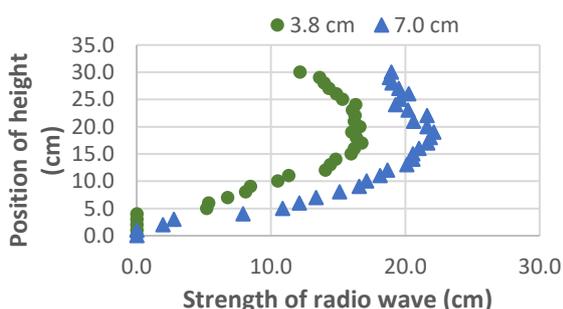
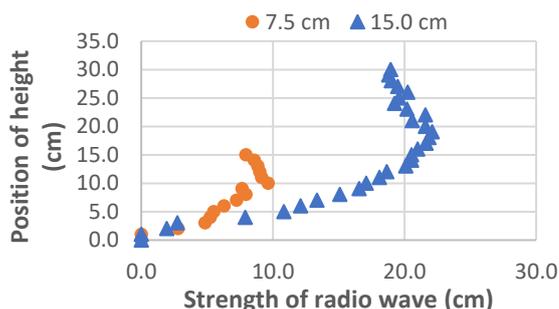


Figure 5 (a) Pipe's diameter effect on the strength of radio wave



(b) Pipe's length effect on the strength of radio wave

2.6 Shape's and size's effect on frequency of radio wave

The frequency of radio wave, created by different parameters of tesla coils, had less relationship with their length or diameter. In addition, the frequency had less relationship with types of BJT. In fact, if turns of primary coils were lower than 3, the signals would be too unstable to detect. The method was shown in Figure 6. The frequency was detected by the oscilloscope with two ports, one was linked to the point A and another was linked to point B. (in principle, the frequency of induced coil is the same as the frequency of pulse on BJT)

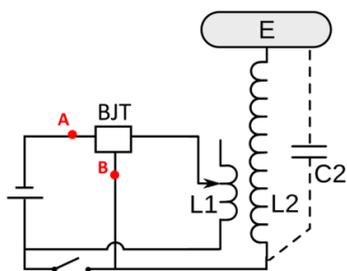


Figure 6 The method to measure the frequency of the pulse voltage by the instrument of oscilloscope

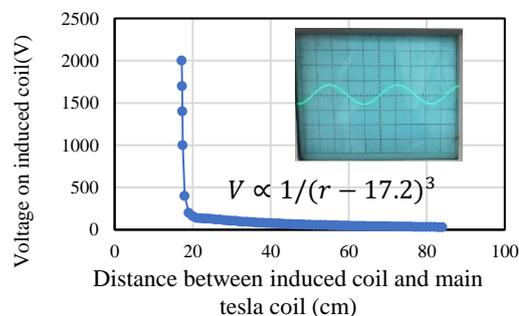
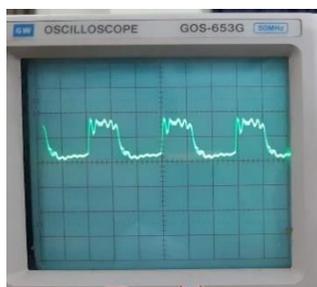


Figure 7 The plot of induced voltage against the distance from main coil

3 Result and Conclusion

In our study, our handmade tesla coil was successfully applied for wireless charging and we find that the induced voltage decrease in proportion to cube root of distance between tesla coil and induced coil, as shown in Figure 7.

壹、研究動機

近年來，生活中有愈來愈多無線傳電裝置的發明，如手機、電動車等等，使得人們的生活愈來愈便利。我們便想對無線傳電有進一步的了解並探究其運作原理，經過我們的調查，發現十九世紀末時，特斯拉便著手進行了此研究，而他所使用的正是特斯拉線圈。因此，我們便想藉由探討此特斯拉線圈一解無線傳電之謎。探究過程中最使我們好奇的，就是到底管子的粗細到底有沒有關係？如何證明？不同電晶體到底有沒有關係？如果將電路簡化至只接幾條電線是否還能夠無線電成功？

貳、研究目的

1. 簡化本研究所使用的特斯拉線圈模型並探討可行性
2. 建立能夠定量並具有信度的電波強度測量標準流程
3. 從市售 TOP50 的 NPN 三極體挑選 14 種作為母群體並從中挑選出 4 種作為子群體
4. 探討施加電壓對電波強度的影響
5. 探討特斯拉管在不同高度的電波強度分布
6. 探討主/副線圈比對電波強度的影響
7. 探討特斯拉天線延伸效率及意義
8. 探討特斯拉管管徑對電波強度的影響
9. 探討主線圈數的適當範圍
10. 探討周圍感應電壓與特斯拉距離的關係

參、研究器材與藥品

電晶體型號

名稱	名稱	名稱	名稱
9011 型	4401 型	548 型	945 型
SC9014 型	3904 型	9013 型	1815 型
546 型	941 型	KN2222 型	C9014 型
547 型	PN2222 型		

設備或器材

名稱	英文名稱	名稱	英文名稱
漆包線(1.5 mm)	Enameled wire	驗電筆	Test pencil
紙管(3.8 cm)	Paper tube(3.8cm)	三用電表	Multimeter
PVC 管(7.0 cm)	PVC pipe(7.0cm)	剪刀	Scissors
PVC 管(11.5 cm)	PVC pipe(11.5cm)	鋸子	Saw
線材	Wire rod	膠帶	Tape
鱷魚夾	Crocodile clip	9V 電池	9V battery
電容	Capacitor	電源供應器	Power supply
散熱片	Cooling fin	熱熔膠	Hot glue
皮尺	Measuring Tape	絕緣膠帶	Insulation Tape

圖示



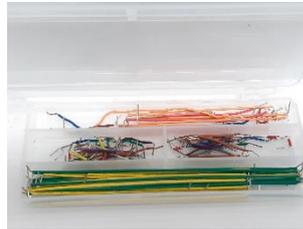
說明

漆包線

紙管(3.8cm)

PVC 管(7.0cm)

圖示



說明

PVC 管(11.5cm)

線材

鱷魚夾

圖示



說明

電容

散熱片

驗電筆

圖示



說明

三用電表

剪刀

鋸子

圖示



說明

膠帶

9V 電池

電源供應器

圖示



說明

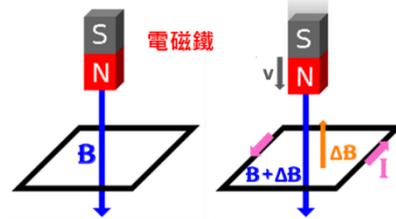
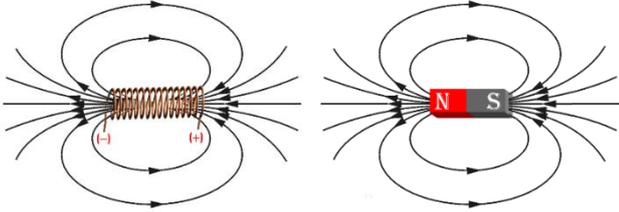
熱熔膠

皮尺

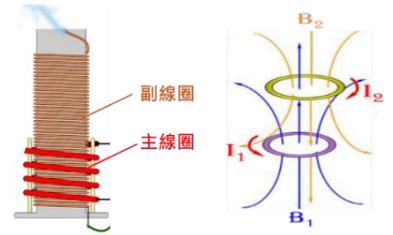
絕緣膠帶

肆、研究方法-使用原理

互感原理：安培定律告訴我們，對螺線管通以電流可以在內部及周圍產生磁場，也就是線圈內會產生磁力線，若電流穩定則可以在線圈內部生成數目固定、方向固定的磁力線，俗稱電磁鐵。若我們將這個穩定通電的電磁鐵線圈快速套向另一個自由線圈(空導線)，則自由線圈將會產生感應電流，稱為冷次定律。反之，若電流固定的電磁鐵線圈，沒有靠近自由線圈的話，就不會有感應電流。



在特斯拉線圈的例子裡，連接電源的電磁鐵線圈稱為主線圈，自由線圈稱爲副線圈(特斯拉管)，主線圈直接纏繞在副線圈之外，啟動電磁感應的過程中兩線圈並沒有相對移動(主線圈套在副線圈外形成同軸電纜線)，那特斯拉啟動的過程中是如何在副線圈中產生電動勢呢？

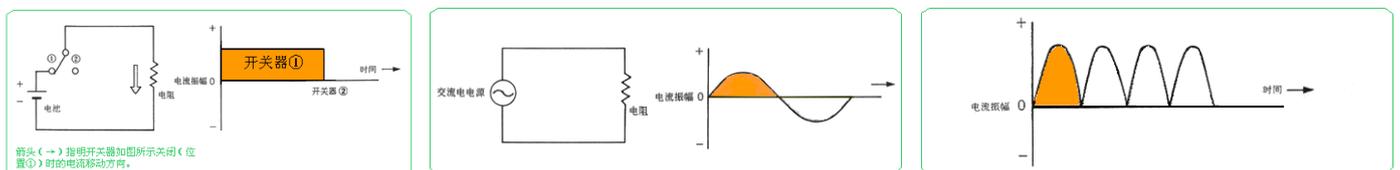


根據冷次定律，當自由線圈內的磁力線突然增加時，例如：電磁鐵突然靠近自由線圈，由於自由線圈具有電磁慣性，會為了抵抗突然增加的磁力線，而瞬發產生相反方向的感應磁力線來將其抵銷，這個感應磁力線不是無中生有，而是透過安培定律的電流磁效應而生，也就是說，自由線圈需要先產生感應電流來生成感應磁力線。然而特斯拉線圈屬於同軸電纜線，電磁鐵(主線圈)與自由線圈(副線圈)都是相對靜止的狀態，那麼若要使自由線圈內的磁力線突然增加，可行的方法就是使主線圈的電磁鐵線圈內部磁場隨時間增強，磁力線就會隨時間增加，由於同軸電纜線的構造使得增加的磁力線就會通過自由線圈，當自由線圈內磁力線數目發生變化就會發生電磁感應，產生感應電動勢。因此我們需要隨時間變化的電流通過主線圈，就可以在副線圈生成感應電流。在同軸電纜線中，感應電流的大小主要由主線圈電磁鐵的電流、及主副線圈雙方的匝數決定，稱爲互感原理。根據互感原理得到感應電流倍率後，再依據能量傳輸守恆 $P=I_1V_1=I_2V_2$ ，就可計算出副線圈電壓提升之倍率。

	<p>圖爲常見的電磁感應題型，以鐵棒傳導磁力線概念，當左側線圈的開關快速開合，則會在右側線圈感應出交流電</p>		<p>圖爲特斯拉線圈的簡化概念，是以左方模型延伸出來，便於理解：當主線圈開關快速開合，副線圈將感應出交流電</p>
--	--	--	---

在理論中，若主線圈與副線圈內的磁力線變化週期相匹配，能量轉換效率最高，事實上，互感(變壓器工作)發生的過程，會發生能量耗損情形，這是因為副線圈的構造可能影響能量轉換效率，我們並沒有在文獻中找到「副線圈形狀對轉換效率的影響」，因此，希望透過實驗數據統計，來尋找其規則。

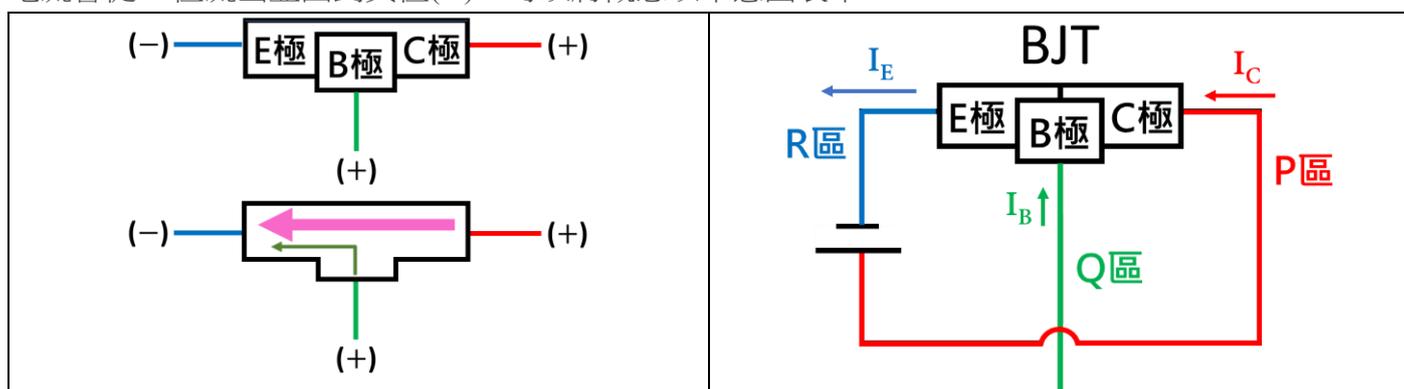
能夠產生隨時間變化的電流源有兩種，交流電及脈衝電。在本研究中，電源連接主線圈透過裝置設計連接開關(火花間隙、或三極體)所產生的電是脈衝電，與交流電一樣具有電流遞增與遞減的週期特性，可產生隨時間改變的電流，進而在線圈周圍產生隨時間變化的磁場，經由互感，也可用於線圈升壓。



肆、研究方法-三極體 BJT 的開關原理(補充)

在本研究中只會使用三極體的簡易操作，就像 office 軟體我們不需要知道程式碼如何設計，只要知道怎麼使用即可；正如三極體作為電流開關的使用模式，只要熟悉用法即可，無須有太深刻的認識。

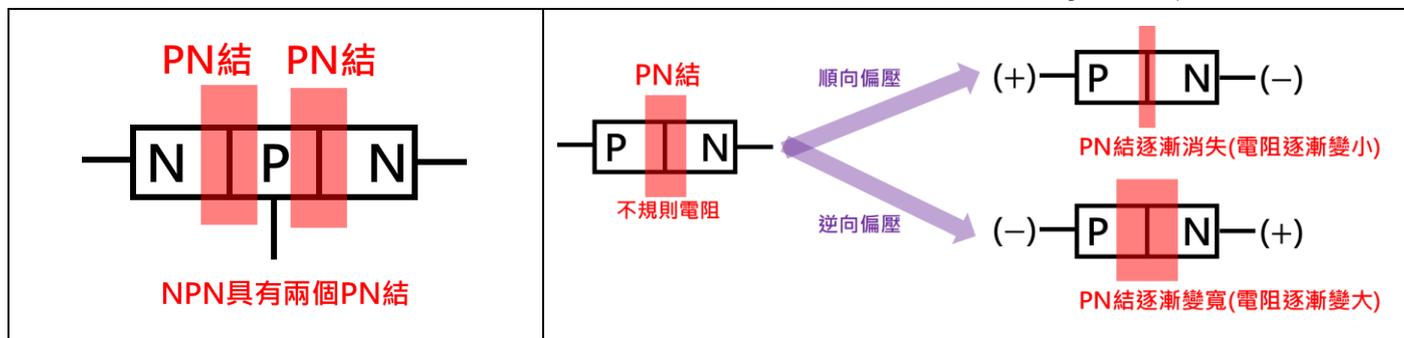
本研究所使用的三極體的三支腳 E(射極)、B(基極)、C(集極)的 C、E 兩腳分別連接電源之正極(+)、負極(-)，此時迴路為 OFF；若在 B 極有微小電流流入，此時迴路為 ON。可以將 B 極視為一靈敏的閘門，只要有微量電流進入，則閘門就會開啟，使得連接正極(+)的 C 極處的電流得以流入三極體中，電流會從 E 極流出並回到負極(-)，可以將概念以示意圖表示：



根據電流出現的位置，我們將電路分成 P、Q、R 三區，對應的電流分別為 I_C 、 I_B 、 I_E ，要注意的地方是，為了保持 B 極的靈敏度，電路必須將 R 區淨空(這是因為 B 極作為閘門開關的要素是，當正極(+)的微量電流流入 B 極時，必須從 E 極流出回到負極(-)，所以這段路上最好只有導線)。因此主線圈要設在 P 區。換句話說，當 Q 區出現電流時，P 區與 R 區就會出現電流，因為 R 區沒有東西，所以我們先忽略 R 區，就變成：Q 區出現電流時，P 區就會出現電流(ON)；同理，Q 區沒有電流時，P 區就沒有電流(OFF)，這就是一個利用三極體作為開關的簡易概念，值得一提的是，根據不同三極體內部設計的性質，P 區的電流 I_C 與 Q 區的微小電流 I_B ，會是一個倍數關係(可以由三用電表測得)，意思是當 I_B 越大 I_C 就會越大，而 I_C 會有一個上限，超過之後三極體可能因為過熱而燒毀。

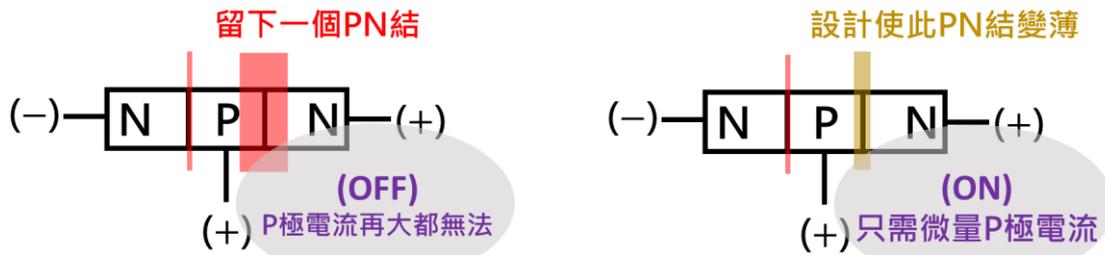
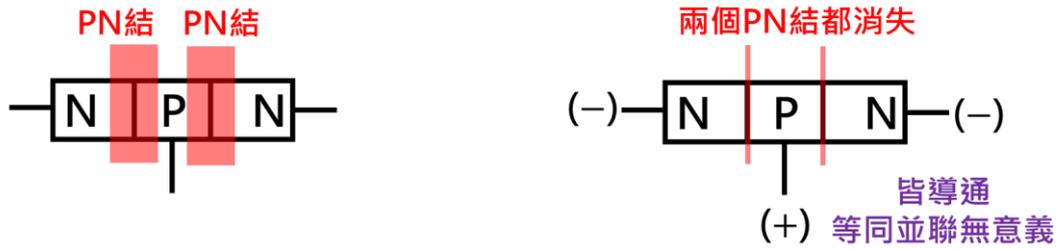
本研究之主線圈設置在 P 區，因此可透過 Q 區的電流調控，來改變 P 區的電流型態，產生脈衝電。

三極體的英文是 bipolar junction transistor 雙極電晶體(BJT)顧名思義是有兩個 PN 結，以本研究所設計的電路來說，適合 NPN 來進行實驗，就是有一個 N-P 及一個 P-N 方向的結(junction)。

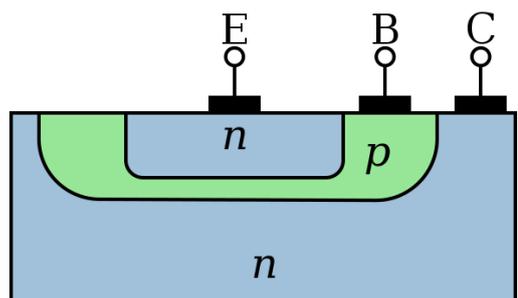
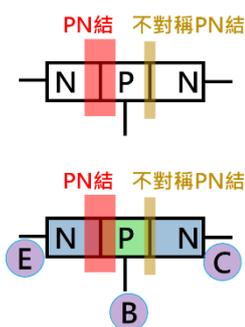
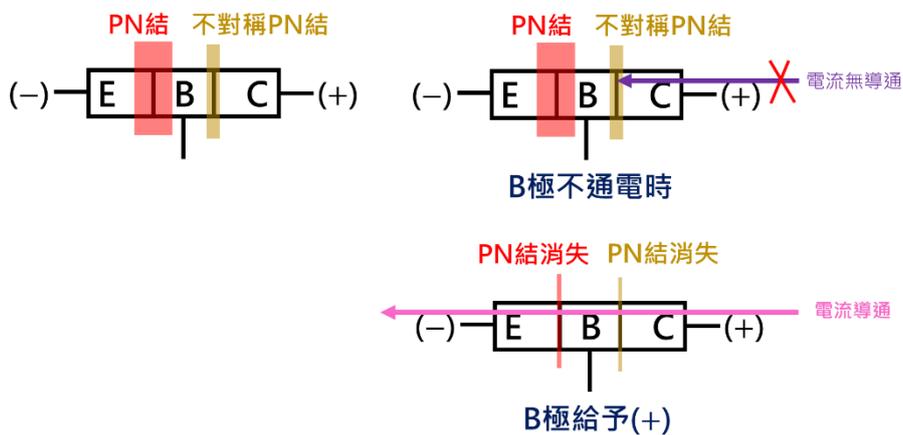


每一個 PN 結都像是一個獨立的二極體，意味著該處附近的電子分布不均勻，使得導電程度下降，用比較簡單的概念來說，PN 結的存在就像是元件內部一個不規則的電阻，如果你不對它做任何事的話，那它的電阻非常大，若你對它施加電壓，則有一半的機會使它變成導體，也有一半的機會變成非導體，決定因素在於：施加電壓的方向。若對 P 極施以(+)、而 N 極施以(-)，則會創造出一個導體(此時電壓方向為順向偏壓)，並且這個導體的不規則電阻會根據施加的電壓越大而下降，不符合歐姆定律(歐

姆導體指的是其電阻為定值，與電壓無關)；反之，若對 P 極施以(-)，而 N 極施以(+)，則會創造出一個非導體(此時電壓方向為反向偏壓)，由於電阻太大，而電流無法流通，值得一提的是，它與絕緣體很類似，若施加電壓太大，會擊穿 PN 結，發生非導體變成導體的情況，就像高壓放電擊穿空氣產生電弧、閃電的概念很像，一般來說，PN 結會因此被破壞而無法復原，也就是俗稱二極體燒毀。



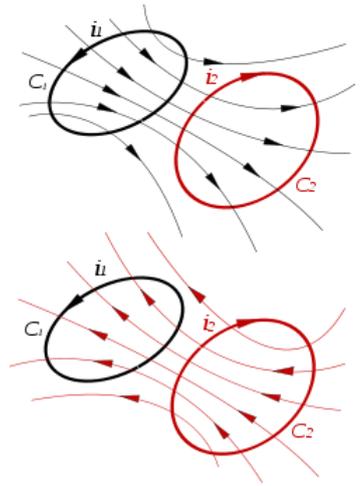
在本研究中，三極體 NPN 有兩個 PN 結，若我們對 P 極施以(+)，而兩端的 N 極都施以(-)，則這個三極體就永遠是導通狀態(ON)，而不具有「開關」的特性。因此設計上，我們對其中一端 N 極施以 (+)時，該端就有機會變成無法導通的狀態(OFF)，符合斷路需求，接著，透過改變兩側 PN 結的厚度，根據理論，若施以(+)的那端 N 極所在的 PN 結設計得「脆弱」一些，可以在 P 極施以微弱(+)的時候就輕易擊穿，讓施以(+)的那端 N 極的電流得以流入，並從另一側施以(-)的 N 極流出，那麼此時 NPN 就會變成一個導體狀態(ON)；反之，若 P 極不給電時，即使仍是薄(較脆弱)的 PN 結存在同樣使得 NPN 維持非導體狀態(OFF)，因此，對於中間的 P 極給電與否，就成為了電流開門開關。



肆、研究方法-互感原理的數學基礎

國中所說的線圈或螺線管是一種稱為「電感器」的電路裝置。電感器具有電磁慣性，具有自感與互感的性質。

當「電感器」通以具有頻率的電流時，在線圈周圍會生成一隨時間變化的磁場，若這個磁場變化又影響到自身的線圈，根據冷次定律，電感器會生成一感應的反向電流以抵抗原本的電流，原電流頻率越高，磁場變化的頻率越快，則感應出的反向電流越大，換句話說，自己線圈感應出的磁場變化，會阻擋高頻率(高頻率指的是電流隨時間變化快速)的電流通過(即電流的振幅會下降)，阻擋自己高頻電流通過的趨勢大小，稱為自感值，與自己線圈的匝數成正比、與線圈的面積成正比。不過這與特斯拉線圈的升壓效果較無關。



一電感器未連接電源，當其周圍有隨時間變化的磁場通過時，根據冷次定律，則電感器會生成感應電流，若周圍隨時間變化的磁場是由另一個通以具有頻率電流(交流電或脈衝電)的線圈所引發的話，此現象稱為互感。兩個線圈(通電的稱主線圈，感應出電的稱副線圈)彼此因為磁場變化交互作用而整合成一個大電路元件，彼此共通的磁場變化像內力一樣，譬如 A 推 B，B 則反推 A，剛開始作用不穩定，形成穩定作用後，主線圈的電能將可透過磁場交互作用進行能量遠距離轉移，並傳輸給副線圈，在完美的情況下，主線圈在單位時間所轉移的能量=副線圈在單位時間所接收到的能量，即功率守恆 $P_1=P_2$ ，由於 $P=I_1V_1=I_2V_2$ ，可推導出 $I_1/I_2=V_2/V_1$ =主副線圈電壓提升之比，那麼透過磁場交鏈的線圈互感過程，是如何計算出 I_1/I_2 =主線圈電流/副線圈電流之比值的呢？

根據安培定律可知，螺線管在內部生成的磁場 B 與電流 I 成正比、與單位長度的匝數 N 成正比，因此磁場可以表示成 $B_1 = k \times I_1 \times N_1$ ，因為磁場=磁力線密度=單位面積的磁力線數目，假設主線圈面積 A ，因此主線圈中的磁力線數目為 $\phi = B_1 \times A$ 。

電感指的是：線圈內在一瞬間獲得 x 條磁力線，會在線圈導線中感應多大的應電流 i ，或單位電流 i 可生成 x 條磁力線，表示成一比值 L ：

$$L = \frac{x}{i}$$

討論互感時，螺線管中的磁力線概念較複雜，螺線管就是多重線圈，若一圈可以產生 ϕ 條磁力線， N 圈並不會讓磁力線數目增加，而是生成經過強化 N 次的 ϕ 條磁力線，這個物理現象稱為交鏈(linkage)，經過交鏈後磁力線，稱為交鏈磁力線，我們可以想像成較粗的磁力線，較粗的磁力線會從主線圈一端射入另一端副線圈，將電能以交鏈磁力線送過去。假設是兩線圈是同軸螺線管，因此主線圈發出 ϕ 條磁力線，且副線圈收到 ϕ 條磁力線，之間的互感可以表示成

$$L_{12} = \frac{N_1 \phi}{I_2}$$

(線圈 1 將磁力線強化 N_1 級後送到線圈 2 並生成感應電流 I_2)

$$L_{21} = \frac{N_2 \phi}{I_1}$$

(線圈 2 將磁力線強化 N_2 級後送到線圈 1 並生成感應電流 I_1)

根據互感原理

$$L_{12} = L_{21}$$

因此

$$\frac{N_1 \phi}{I_2} = \frac{N_2 \phi}{I_1}$$

消去 ϕ 後得到

$$\frac{N_1}{I_2} = \frac{N_2}{I_1}$$

整理後得：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \phi$$

根據能量傳輸守恆可知

$$P_1 = P_2$$

$$I_1 V_1 = I_2 V_2$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} \dots \dots \phi$$

由 ϕ 、 ϕ 得

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

(升壓比與線圈匝數成正比)

伍、研究方法-實驗設計

特斯拉線圈的概念，我們試著用國中程度來理解，就是個變壓器而已。變壓器是個能量轉換裝置，它的轉換效率一定與它的電路零件有關、與電壓有關，而我們認為：「螺線管的形狀」也應該具有相當程度影響，為了瞭解螺線管的形狀，例如管徑等是怎麼影響，而它的數學模型為何，我們嘗試利用實驗統計，來找到其規則性。

在實驗開始以前，我們在網路上找到一些電路圖，但是那都太複雜了，完全看不懂，因此請老師幫忙我們簡化電路，希望能用一個最簡單的電路來做實驗就好。花了大約一個月摸索成功做出特斯拉線圈也測試其能讓日光燈管發光後，因為網路上大多是使用 2222 型電晶體，我們想更換不同的電晶體看看是否可以讓日光燈管更亮，但是嘗試了之後，卻發現沒什麼太大差別。

因此有兩個推論：1.電晶體不會影響特斯拉線圈 2.日光燈管是一個不夠靈敏的偵測器

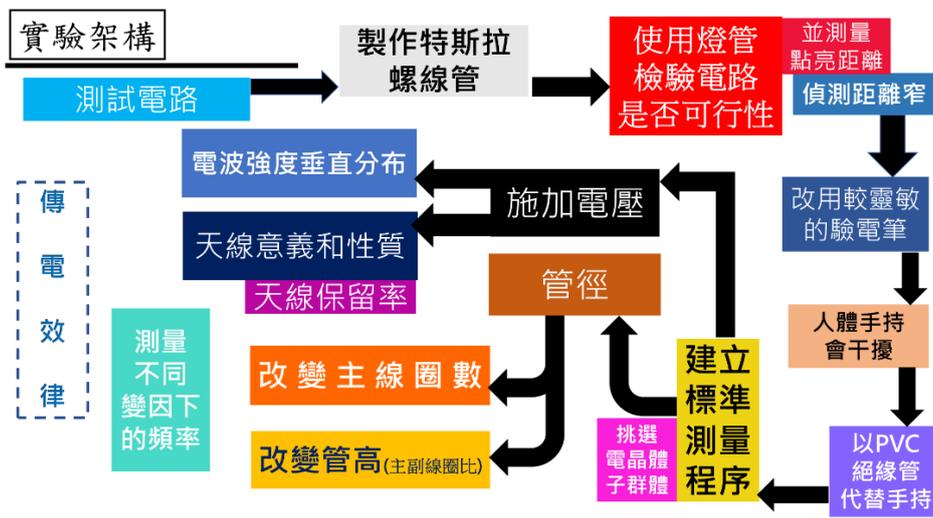
我們認為應該是後者，而且日光燈管由於太不靈敏，亮與不亮有時候差異很大，老師說，這叫做「沒有鑑別度」，後來我們在網路上找到了可以用來測試是否有電存在的「驗電筆」，因為特斯拉線圈可以讓有一段距離的燈管發光，那麼肯定也可以讓驗電筆發光，事實證明是的。

接著我們就改成用驗電筆來作為偵測器，用來偵測不同電晶體作為開關所製成的特斯拉線圈，看它多遠就可以讓驗電筆發光，那麼就可以將特斯拉造成的「電波強度」轉換成「電可以傳的距離」來數據化，只要知道發光距離，就可以鑑別出這個電晶體是不是適合用來作為特斯拉的開關，不過，我們在這邊遇到了瓶頸。

首先我們發現幾件事情：

1. 不同人拿驗電筆測到的距離，有很大的誤差
2. 特斯拉線圈非常耗電，電池一下就沒電了，若電壓沒有恆定，再現性會出問題
3. 特斯拉的螺線管很長，在不同高度測的也差很多
4. 若改變電晶體，卻沒有固定上述變因，根本無法比較

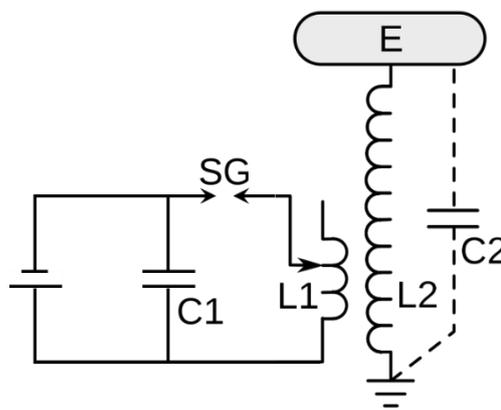
因此，實驗必須先建立一具有信度的標準測量流程，然後，才能繼續探討我們需要的變因。我們陸續找到驗電筆手持與否、電壓大小、電波強度在高度上分布的影響等，然後都將其固定後，就可以用來鑑別不同的電晶體開關，為了要使實驗數據在解釋我們所發現的一些現象或是數學模型更具有說服力，我們從網路上的 TOP50 電晶體中挑選一些作為母群體，根據它的效果好壞，再從母群體中挑選 4 種作為子群體，然後再以這四種電晶體代表市售所有的電晶體，觀察它們在不同參數時的實驗數據是否都滿足相同的數學模型。除此之外，我們還進一步研究了特斯拉天線、電波分布、螺線管形狀、主線圈匝數等影響，最後希望再去找到轉換效率與這些參數的關係。



陸、研究方法-電路設計

最原始的特斯拉線圈如圖，是利用火花間隙(spark gap)與電容器搭配作為電路開關，透過高頻率切斷迴路，進而在主線圈產生隨時間變化的電流，有了磁力線變化後，就會在副線圈產生感應電動勢，根據變壓器原理(互感原理)，改變副線圈與主線圈比值，可以將電壓放大。值得一提的是，由於受到火花間隙開關的影響，主線圈中隨時間變化的電流是一陣子遞增(間隙被擊穿)與一陣子遞減(間隙被復原)交互出現，因此透過磁場變化傳達到副線圈，所感應出的電動勢將會隨時間改變方向，也就是交流電。

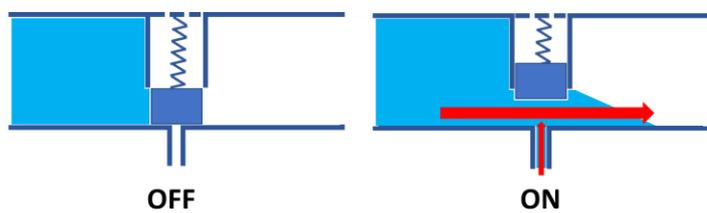
電源會對電容器充電，當累積足夠的高電壓後，電容會在極短時間將電能釋出，在間隙處擊穿空氣產生電弧(使空氣變成導體)，原本的斷路被空氣電漿連接成迴路(ON)，接著主線圈就會產生遞增的電流，不過當放電後的電容電壓不足以繼續擊穿空氣時，原本的迴路就會被切斷(OFF)，主線圈的電流就會遞減，由於火花間隙重新回到斷路狀態，電源的電到不了線圈，電容器又會再一次被充電直到下一次釋放，形成一反覆週期，過程中主線圈會產生隨時間變化的電流。



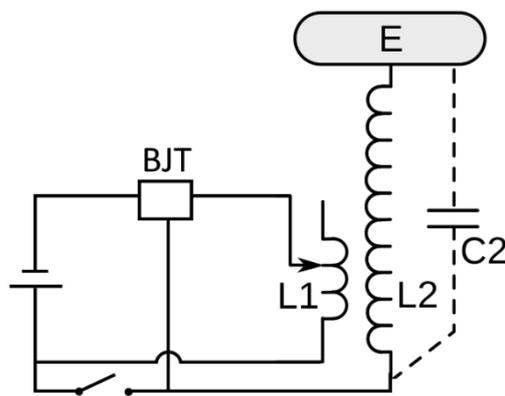
圖是尼古拉·特斯拉本人發明進行簡化後的模型 (C2 表空氣受到高電壓誘導發生感應起電而充電)

在本研究使用的簡易型特斯拉線圈，是以電晶體取代火花間隙與電容器的功用，電晶體也可以扮演高頻率切斷迴路的裝置，於主線圈中產生隨時間變化的電流，利用電磁感應與變壓器原理，在副線圈上產生 1000 伏特以上的交流電，並能激發日光燈管發光。

電源與主線圈直接串聯，並在迴路中加入三極體開關，三極體一開始不允許電流通過(OFF)，因此主線圈無電流，若在三極體的基極給予微量電流時，則三極體就會讓電源給予的部分電流通過(ON)，過程我們可以將它想成是一個電流閘門，如下：



當電流通過主線圈時，會產生隨時間變化的電流，因此副線圈也會產生感應電流，設計使副線圈的電流回饋至基極，就可以控制電流閘門的打開及關閉，因此模擬出類似火花間隙的擊穿與復原效果，產生隨時間變化而遞增或遞減的電流週期，進而在螺線管中產生磁通量變化。



圖是參考網路提供之固態特斯拉線圈進行簡化後的模型(此簡化模型只適用於 NPN 型的 BJT)

本研究以簡化後的模型作為探討特斯拉線圈性質之系統，希望能在中學實驗室就能輕易操作，尋找能偵測並定量線圈周圍交流電場強度的方法，克服可能出現的誤差並建立標準檢驗程序後，改變不同市售常見的三極體、改變直流電壓、改變螺線管形狀參數等，對特斯拉線圈性質統計及電磁理論作探討。

柒、研究方法-方法學

一、實驗一、纏繞不同高度、不同管徑的特斯拉線圈

(一) 步驟

步驟 1-1 本研究選用線徑為 1.5 mm 之漆包線(不是銅線)

步驟 1-2 裁切 PVC 管，管徑 7 cm 高度分別為 7.5、15、30 公分
管高 15 cm 管徑分別為 3.8、7、11.5 公分

步驟 1-3 纏繞過程要注意漆包線要貼密且不可交叉

步驟 1-4 纏繞成不同高度的特斯拉管

(二) 圖例說明



步驟 1-1.
1.5 mm 之漆
包線



步驟 1-2
鋸開柔軟的
PVC 管



步驟 1-3
貼密且不可交叉



步驟 1-4
不同管徑的特斯拉管



步驟 1-4
不同高度的特斯拉管

二、實驗二、使用燈管測量組裝出之特斯拉線圈之可行性

(一) 步驟

步驟 2-1 使用四種揀出之電晶體作為開關

步驟 2-2 以直徑 7cm 管長 15cm 的 PVC 螺線管進行測量

步驟 2-3 調整電壓

步驟 2-4 以日光燈管測量電波範圍

(二) 圖例說明



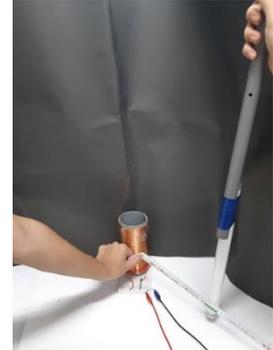
步驟 2-1
使用四種揀出之電
晶體作為開關



步驟 2-2
直徑 7cm 管長 15cm 的
PVC 螺線管



步驟 2-3
調整電壓



步驟 2-4
以日光燈管測量電波範圍

三、實驗三、建立驗電筆的標準檢驗流程

(一) 步驟

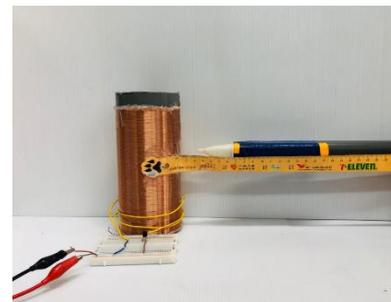
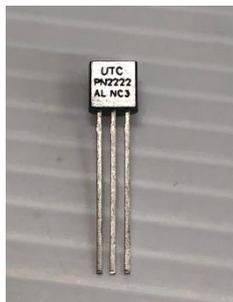
步驟 3-1 使用 2222 型電晶體作為開關

步驟 3-2 選用直徑 7 公分管長 15 公分之 PVC 之螺線管進行測量

步驟 3-3 將皮尺固定於管長一半的部分

步驟 3-4 將驗電筆固定於另一支 PVC 管上測量特斯拉線圈之電波場範圍

(二) 圖例說明



步驟 3-1

使用 2222 型電
晶體作為開關

步驟 3-2

直徑 7 公分管長 15 公
分之螺線管

步驟 3-3

將皮尺固定於管長
一半的部分

步驟 3-4

將驗電筆固定於另一支
PVC 管上測量特斯拉線圈之
電波場範圍

四、實驗四、統計不同電晶體在本研究特斯拉模型下的工作電壓及 8V 時的電波強度(cm)

(一) 步驟

步驟 4-1 分別使用不同電晶體作為開關

步驟 4-2 選用直徑 7 公分管長 15 公分之 PVC 之螺線管進行測量

步驟 4-3 將皮尺固定於管長一半的部分

步驟 4-4 將驗電筆固定於另一支 PVC 管上測量特斯拉線圈之電波場範圍

步驟 4-5 比較各電晶體之優劣

步驟 4-6 選出適合本實驗電路之電晶體

五、實驗五、探討 4 種電晶體組裝之特斯拉線圈其在不同工作電壓對電波強度的影響

(一) 步驟

步驟 5-1 使用四種揀出之電晶體 2222、3904、9011、9014 作為開關

步驟 5-2 以不同管徑及長短的螺線管進行實驗

步驟 5-3 調整電源供應器電壓

步驟 5-4 將驗電筆固定於另一支 PVC 管上測量特斯拉線圈之電波場範圍

六、實驗六、探討 4 種電晶體組裝之不同形狀特斯拉線圈在 8V 下在垂直高度上的分布

(一) 步驟

步驟 6-1 使用 4 種揀出電晶體作為開關

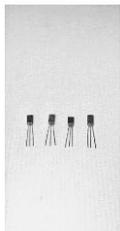
步驟 6-2 固定使用 8 伏特

步驟 6-3 以不同管徑及長短的螺線管進行實驗

步驟 6-3 將驗電筆固定於另一支 PVC 管上測量特斯拉線圈之電波場範圍

步驟 6-4 以皮尺測量特斯拉線圈之電波場範圍

(二) 圖例說明



步驟 6-1

步驟 6-2

步驟 6-3

步驟 6-4

步驟 6-5

使用 4 種揀
出電晶體

固定使用 8 伏
特

以不同幾何的螺線管
進行實驗

測量特斯拉線圈之
電波場範圍

以皮尺測量特斯拉線
圈之電波場範圍

七、實驗七、探討 4 種電晶體組裝之特斯拉線圈在不同管徑、管徑對電波強度的影響

(一) 步驟

步驟 7-1 準備管徑為 3.8、7、11.5 公分管長 7.5、15 及 30 公分的長螺線管

步驟 7-2 將挑出的四種電晶體分別試用於三種螺線管

步驟 7-3 以螺線管的一半高度作為測量基準，測量其電波範圍

步驟 7-4 比較不同管徑及管長對電波範圍的影響並找出其關聯性

八、實驗八、探討 4 種電晶體組裝之特斯拉線圈在不同主副圈數對電波強度的影響

(一) 步驟

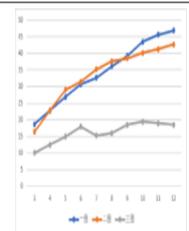
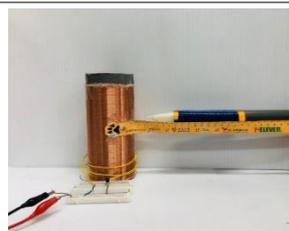
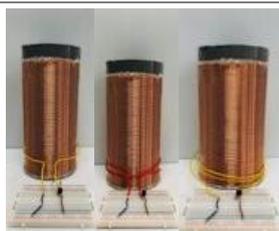
步驟 8-1 將主線圈調整為 1、2、3 圈

步驟 8-2 固定電晶體型號

步驟 8-3 於相對高度位子(半高)同一水平面之位子測量

步驟 8-4 得出主、副線圈互感影響結果

(二) 圖例說明



步驟 8-1

步驟 8-2

步驟 8-3

步驟 8-4

將主線圈調整為 1、2、3
圈

固定電晶體型號

於相對高度位子(半高)
同一水平面之位子測量

得出主、副線圈互感
影響結果

九、實驗九、電晶體測試，使用三用電表檢驗為 NPN 或是 PNP 型

(一) 步驟

步驟 9-1 將三用電表調至檢測電晶體之檔位

步驟 9-2 選擇 NPN 或是 PNP 型之檔位

步驟 9-3 將電晶體插上三用電表

步驟 9-4 得出檢測結果

(二) 圖例說明



步驟 9-1

將三用電表調至檢測電
晶體之檔位

步驟 9-2

選擇 NPN 或是 PNP 型
之檔位

步驟 9-3

將電晶體插上三
用電表

步驟 9-4

得出檢測結果

十、實驗十、電腦 GGB 軟體作圖

(一) 步驟

步驟 10-1 以驗電筆得出電場距離之數據

步驟 10-2 開啟 GGB 軟體之 3D 繪圖區

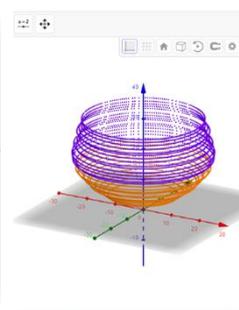
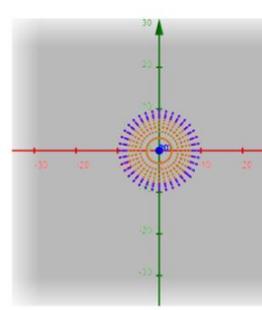
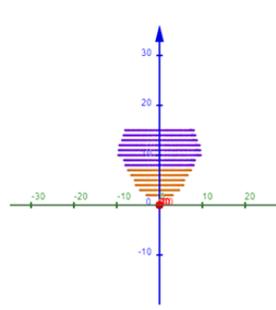
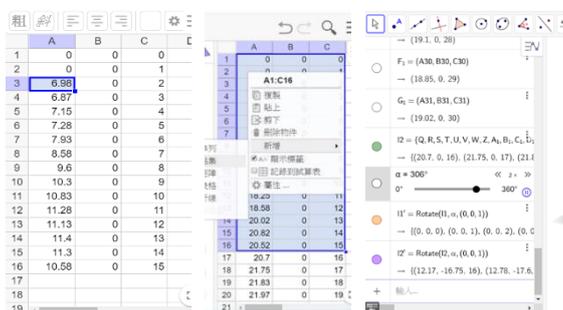
步驟 10-3 輸入程式

步驟 10-4 將數據輸 GGB 軟體

步驟 10-5 得出電波場之立體圖

步驟 10-6 將電波場圖調整不同的視角以利進一步的比較

(二) 圖例說明



步驟 10-1
建立試算表

步驟 10-2
設立點
集與列串

步驟 10-3
建立旋轉函
數=rotate(點
集, α , (0,0,1))

步驟 10-4
測視

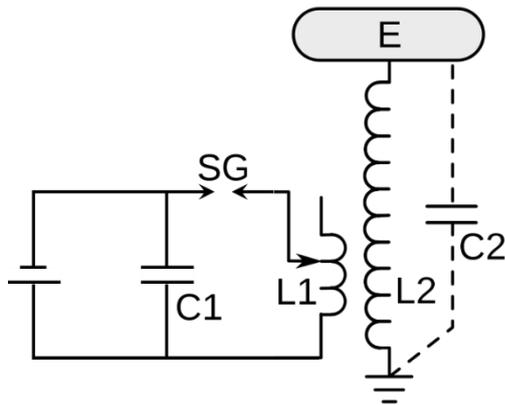
步驟 10-4
俯視

步驟 10-4
立體視角

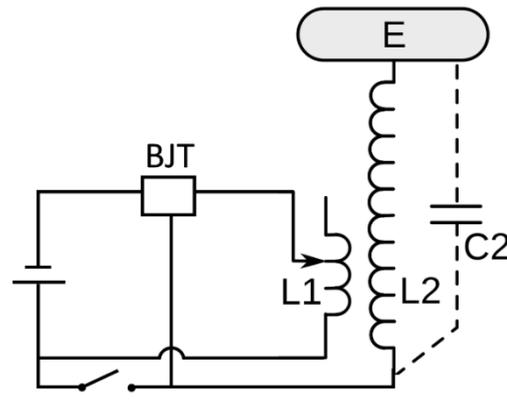
捌、研究過程與初步結果

討論一、簡化特斯拉線圈模型之可行性探討

網路上有各式各樣的特斯拉線圈電路圖，老師說，除了有不同種類，或是經過各種改良後的，根據愛好者的偏好去設計滿足他們所想要特斯拉裝置來凸顯某些特性，因此加入了許多額外的電路元件，可能效能變好了，卻也讓整個特斯拉線圈的電路變的相當複雜，在參考了一些資料後，決定以使用「電晶體作為開關」的固態特斯拉為研究對象，並以特斯拉本人所設計的最原始的火花間隙型特斯拉為創作藍圖，逐一將網路提供的電路圖中不必要的元件拿掉，變成只有最簡單功能的電路。



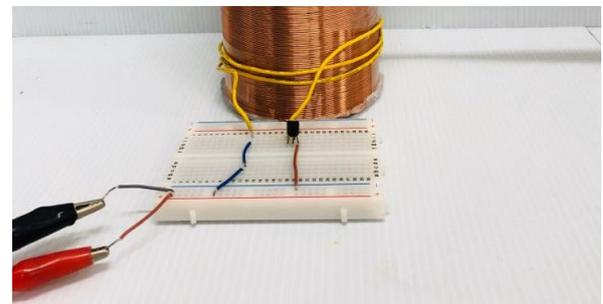
【圖】尼古拉特斯拉設計：最原始 Tesla coil



【圖】經本研究簡化之固態特斯拉線圈

這個電路沒有使用任何電阻，缺點是很容易燒掉，在不影響功能的情況下，我們在 B 極設計一個開關，開關只有在一開始瞬間供電直到確定特斯拉線圈啟動後，就會馬上把開關關掉，也就是特斯拉線圈在工作的時候，B 極的電流閘門啟動完全由：特斯拉副線圈所感應出的應電流回饋來提供，這麼做的優點是，主線圈的脈衝電頻率會直接與副線圈的交流電頻率接近，根據變壓器的原理，這樣的能量轉換效率會最高。

研究過程中，我們也曾經做過能產生電弧的特斯拉線圈，不過，由於固態特斯拉線圈使用的是電晶體做為開關，而其固有的功率上限，無法呈現像火花間隙型的特斯拉線圈那樣具有較長的電弧，而且還必須在電晶體背後加上散熱片，若討論太多的元件加入，反而會增加了實驗的複雜性，因此，實驗也不替電晶體加上散熱片，燒掉就燒掉，燒掉以前可以測得其耐電壓，因此接下來的實驗，就是要先挑選本研究可以使用的電晶體。



【圖】經本研究簡化之固態特斯拉線圈接法

在市面上的電晶體，PNP 型與 NPN 型在 TOP50 中，大部分都是成對販售的(譬如編號相近的 3906 與 3904 是同一個公司生產，前者是 PNP 型而後者是 NPN 型)，一開始我們挑選了眾多組合，但是發現所有的 PNP 型都無法，只有 NPN 型可以使「本研究自製特斯拉線圈」正常運作。

我們與老師討論後發現，照理來說，應該只有接法的問題而兩者應該都可以，後來發現，PNP 型之所以無法使特斯拉線圈成功運作的原因是，我們所重新設計的特斯拉線圈模型中，加入了一個開關，且 B 極的電流由副線圈提供，而副線圈本身是一個受感應的空導線，種種原因導致這個結果，最後，我們將可使用的電晶體母群體縮減成只有 NPN 型。

討論二、建立標準測量流程

本研究建立之測量方式，是以市售驗電筆(規格為：90V-1000V AC)接受微弱特斯拉電波後仍能發光的偵測距離極限作為特斯拉電波所能到達的最遠距離(當然，再更遠並不是沒有電波，只是太弱了沒有偵測到)，由於驗電筆只有發光或不發光(沒有辦法顯示數字大小)，因此驗電筆只要在特斯拉管周圍水平距離越遠的位置接受電波後仍發光，就表示位在中央管柱的電波強度越強。

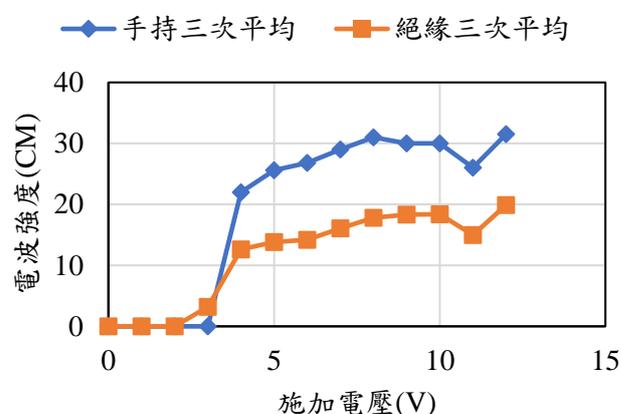
本研究定義：特斯拉電波強度=驗電筆偵測極限內，電波所能到達的最遠距離(cm)

既然已設定了測量方式，那麼就應該要有具有信度，也就是相同條件下，實驗數據要具有再現性。經過一段時間的反覆測試，實驗發現時常會有較大誤差出現，其中存在兩個問題：

1. 驗電筆移動時，直接手持會對測量造成影響。
2. 向內移動或是向外移動也會對測量造成影響

針對問題 1，實驗發現，「手持」所得數據一定較「絕緣」所得數據「大」，由於電波強度是由特斯拉管發出，理論上應為定值，因此無論使用何種方式，應該測量結果應相同。

數據顯示：驗電筆以手持可能會使得數據產生正偏差，手持的驗電筆可以在距離特斯拉管較遠的位置發光，我們認為：人的身體是導體，手持驗電筆等同於接地，可能是造成此現象原因，並且不同的實驗人員進行手持，也有數據上的差異，這是因為每個人的電阻不同，**故之後的實驗將會改成以 PVC 管支撐驗電筆**，而不再使用手持。

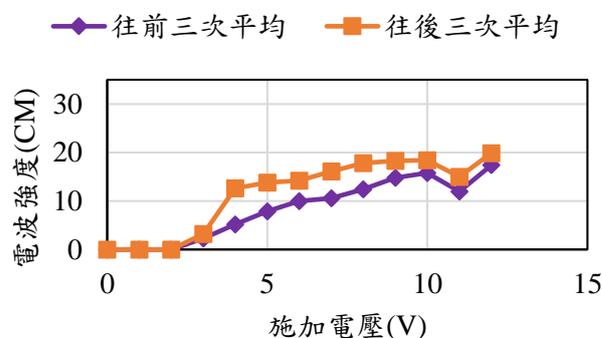


本實驗部分以 2222 型電晶體為開關的特斯拉線圈進行實驗。附錄也有其他電晶體的數據

針對問題 2，由於測量特斯拉電波強度，是以「等速移動」驗電筆來測得數據，實驗發現：

- (1) 靠近模式中是在特定高度下，從無窮遠處將驗電筆逐漸移近特斯拉管，直到驗電筆開始閃爍瞬間，紀錄與特斯拉管的直線距離；
- (2) 遠離模式中是在特定高度下，從貼近已經啟動的特斯拉管將已經閃爍的驗電筆逐漸移遠特斯拉，直到驗電筆閃爍消失瞬間，停止移動，並紀錄與特斯拉管的直線距離。

實驗發現，靠近或是移遠所讀取的實驗數值普遍具有一段差距，推論：靠近模式中，所得數據可能為負偏差；遠離模式中，所得數據可能為正偏差，**於是我們決定以三次靠近平均、三次遠離平均所得求平均，作為該次變因實驗的測量值。**



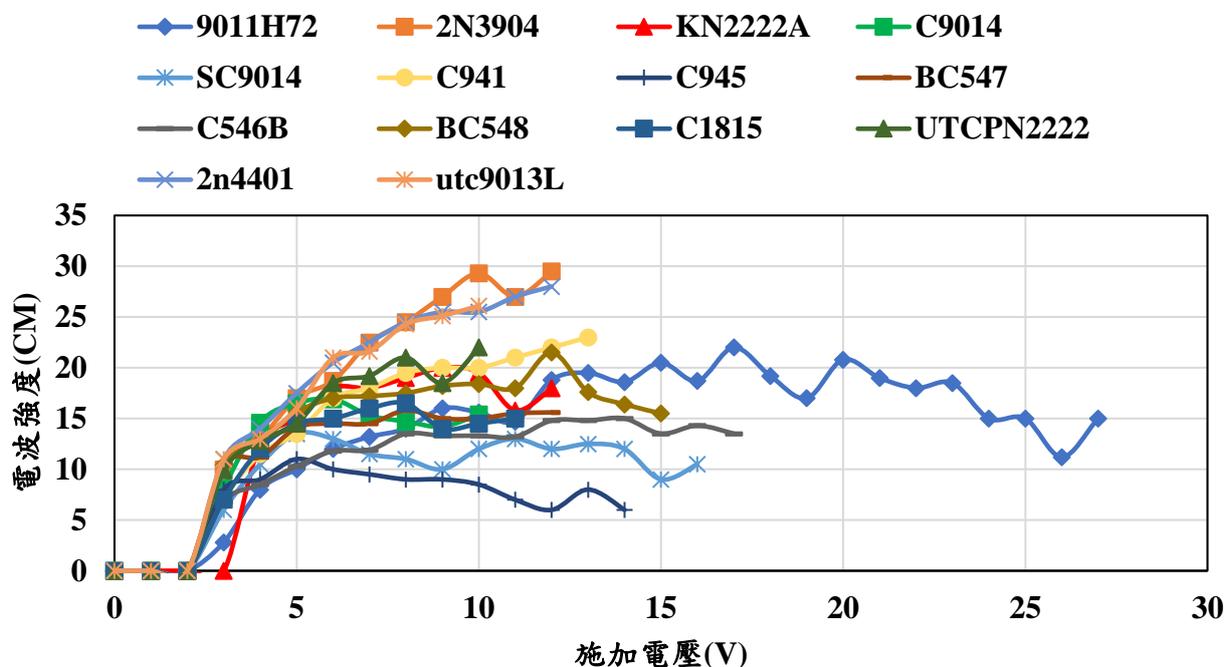
本實驗部分以 2222 型電晶體為開關的特斯拉線圈進行實驗。附錄也有其他電晶體的數據

討論三、從母群體中挑選出有利於後續實驗的電晶體來作為本研究之子群體

將「**電路模型**」與「**標準測量流程**」都建置完成後，接著就要選擇適合本研究的電晶體作為開關。為了使測量具有「**信度(再現性)**」及「**鑑別度**」，所選用的電晶體必須要有兩個特性：

1. 耐壓程度佳，穩定度也佳→不能測量參數到一半就燒掉或是耗損之類的影響實驗進行
2. 啟動特斯拉時，有較大的電波強度→故受到變因影響時，電波所能傳的最遠距離有明顯變化

如圖是所選用母群體 14 種 NPN 型電晶體做為特斯拉線圈的開關，電壓工作範圍及對應電波強度。



【圖】 不同電晶體運用於本研究特斯拉模型的電壓工作範圍與電波場強度

【表】 不同電晶體運用於本研究特斯拉模型的耐壓程度

型號	啟動特斯拉最低電壓(V)	最大耐壓(V)	電波強度(cm)
9011 型	3	27	14.0
3904 型	3	12	24.5
2222 型	3	12	16.0
9014 型	3	16	11.0
9014 型	3	10	14.7
941 型	3	13	19.5
945 型	3	12	9.0
547 型	3	12	15.8
546 型	3	17	13.5
548 型	3	15	17.5
815 型	3	11	16.5
C2222 型	3	10	21.0
4401 型	3	16	24.5
9013 型	3	10	24.3

透過本實驗部分，可以列出一張清單，直接知道常見電晶體用於特斯拉的效果為何，即使對電晶體不熟悉，但仍可以用實作的方式，直接統計結果。//驗電筆多遠可發光及日光燈管多遠可發光

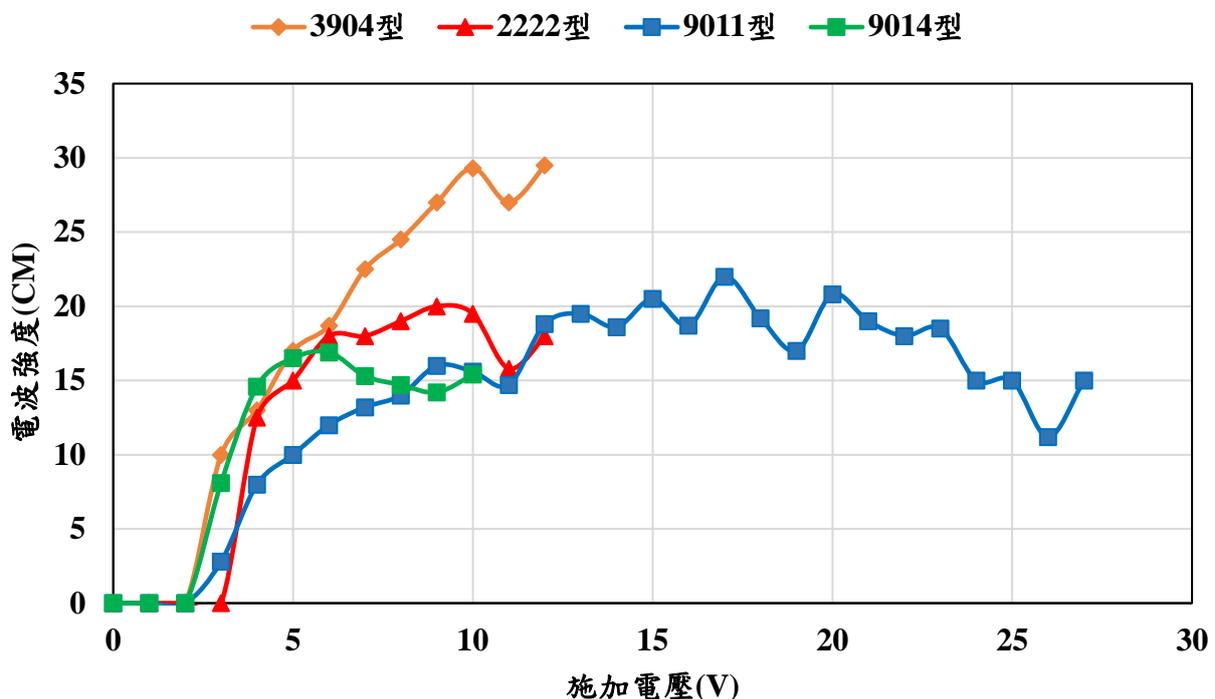
討論四、探討施加電壓對特斯拉電波強度的影響

在本實驗部分中：

1. 選用 7 cm 粗、15 cm 高的特斯拉主管
2. 設定主線圈 3 圈，副線圈密度 15 匝/cm
3. 以 15 cm 特斯拉管半高位置為測量點
4. 並使用經絕緣處理後的驗電筆作為偵測器，對電晶體進行特斯拉電波測試。

針對子群體 4 種，探討「特斯拉電波強度」如何受到「施加電壓」的影響。

- (1)實驗發現：「特斯拉電波強度」與「施加電壓」不是正比關係
- (2)在某一電壓範圍時電波強度會遞增趨於飽和，電壓過高則電波強度有下降的趨勢。
- (3)所選 4 種電晶體即將燒掉時的電壓大都有電波強度突然增加現象(迴光返照)



【圖】 4 種電晶體運用於本研究特斯拉模型的耐壓程度與電波場強度

所得結果如圖，發現「驅動電壓」大部分都要 3V 以上，才能啟動特斯拉驗圈，而耐壓程度(無散熱下)大部分為 12V 左右，少數如 3904 可超過 25V，大致上均隨外電壓升高，能使電波強度達到飽和，耐壓高(可施加更高電壓)的電晶體特斯拉組合並不一定可以得到更高的電波強度，例如電波強度最強者 9011 型，其耐壓程度不如 3904 型，而對照組 2222 型無論耐壓或是電波強度都不如前兩者。9014 型的電波強度發生在相對較低 5V 就達到電波強度飽和，並且也具有相對較大的電波強度，在我們認為：9014 型在於製作特斯拉線圈上，也是一個不錯的選擇。

因此在之後的實驗中：

3904 型是高電波強度的代表，**9011 型**是高耐壓的代表，**9014 型**是低電壓驅動的代表，**2222 型**則為本研究對照組。

施加電壓則選擇可接受的 8V 作為後續實驗的固定參數

討論五、探討特斯拉電波強度在垂直高度上的分布

在進行許多實驗測試時，發現自製特斯拉周圍的電波場，在水平面上大致與影片中相符：就是在同心圓的圓周(距離特斯拉管中心一樣遠的位置)上強度差不多，即在差不多遠的位置使驗電筆能發光的極限距離差不多。

但是，實驗發現：在不同垂直高度上，電波強度卻呈現很大的差異，於是認為：

自製特斯拉線圈的電波強度在垂直高度上，是不均勻的，意味著若我們「躺在」特斯拉線圈旁邊，無線傳電的效果可能變差？於是接下來便設計以下實驗：固定施加電壓，探討特斯拉電波強度在垂直高度上的分布。

實驗發現：特斯拉管周圍的電波雖然看不見，但呈現非均勻分布，為了呈現此現象，本實驗部分將特斯拉線圈據不同高度分成幾個區域討論

- | | |
|--------|--------------------------|
| 外天線區： | 表示在特斯拉副線圈螺線管之上，可自行調整天線長度 |
| 特斯拉主區： | 是主、副線圈重疊區以外，副線圈對外裸露出來的部分 |
| 主副重疊區： | 主線圈纏在副線圈之外，並且被主線圈包住的高度範圍 |

如圖以顏色來進行分區，紅色為主副重疊區；橘色為特斯拉主區，紫色為外天線區。實驗先討論 2222 型的情況

實驗發現：

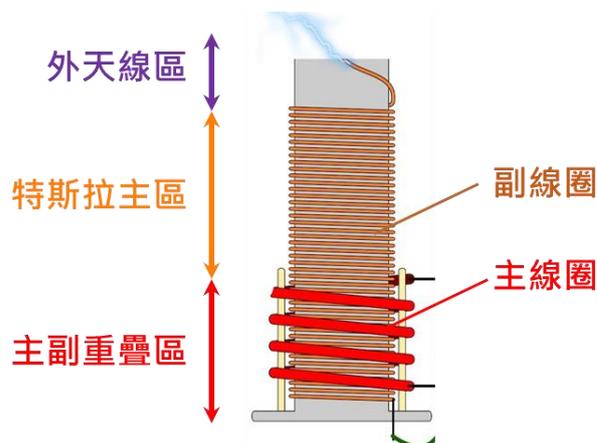
- (1) 紅色高度區幾乎沒有特斯拉的電波場或是強度極弱
- (2) 橘色高度區的電波場強度隨高度迅速遞增，並於接近頂端時趨緩
- (3) 紫色高度區已脫離螺線管，但仍具有電波場的性質，雖然天線的延伸會使得電波場強度下降，但也不是隨高度迅速下降或是直接歸零

充電像WIFI！迪士尼展示無線充電房間

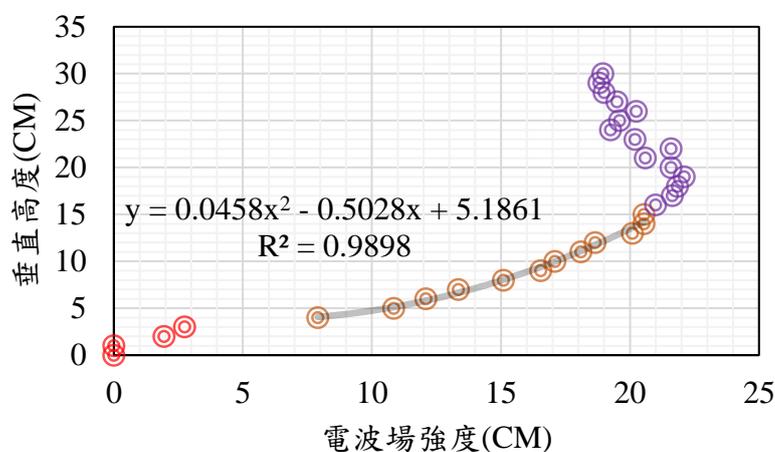
更新時間：2017-02-27 20:50:05



來源：參考文獻 4

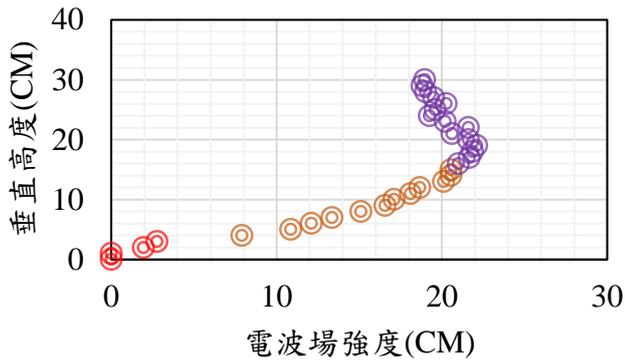


【圖】本研究自行設定並劃分特斯拉線圈分區

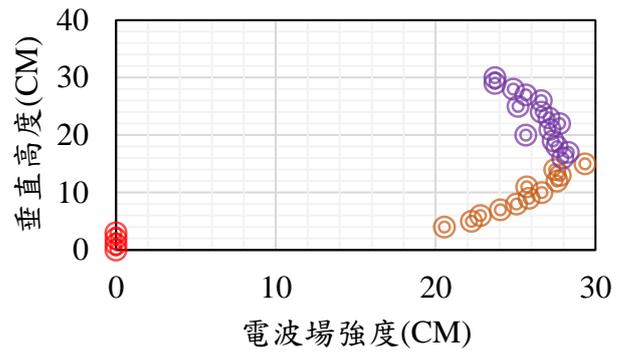


【圖】2222 型電晶體組裝之特斯拉線圈其特斯拉電波強度在垂直高度上的分布

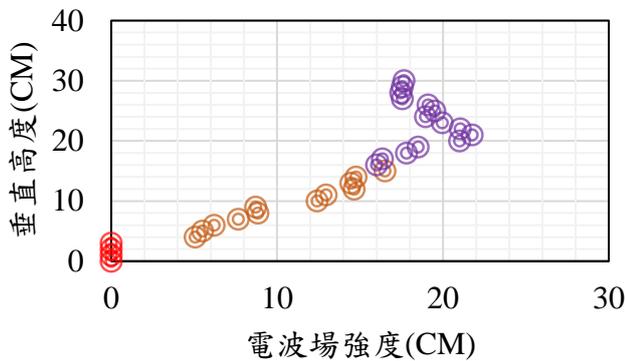
實驗也同時做了子群體中其他三種電波場強度在垂直高度的分布，實驗發現，它們都具有一樣的特性：(1)主副重疊區的電波場強度最弱；(2)主區強度隨垂直高度遞增而趨於飽和；(3)天線區遞減



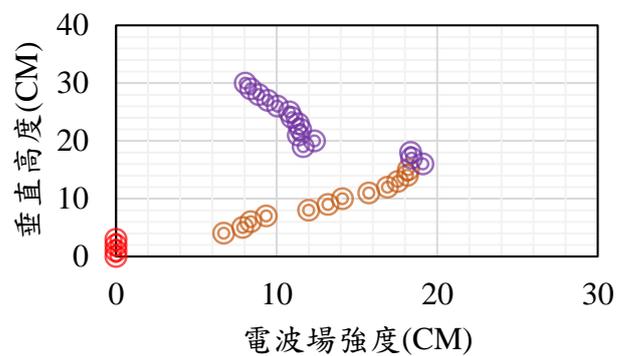
2222 型



3904 型



9014 型

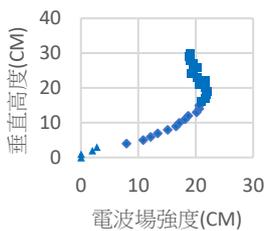


9011 型

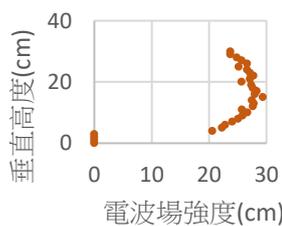
【圖】4 種電晶體組裝之特斯拉線圈其特斯拉電波強度在垂直高度上的分布

※進階探討

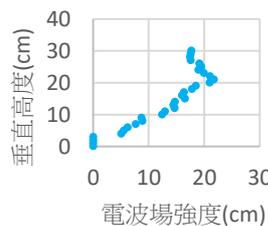
雖然在不同高度有較大的差距，但是實驗過程中也發現從俯視角度，相同半徑的環形範圍電波強度均相當(也就是具有 Z 軸對稱)，於是我們在四個方向都進行測量，即 xz 平面、yz 平面、-xz 平面、-yz 平面，發現差異不大。



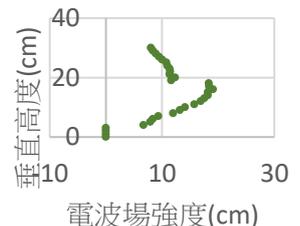
2222



3904

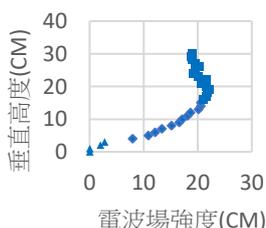


9014

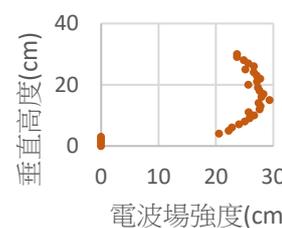


9011

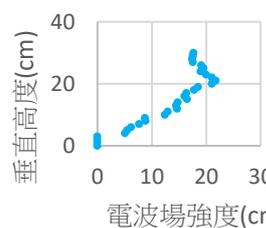
x_z 平面



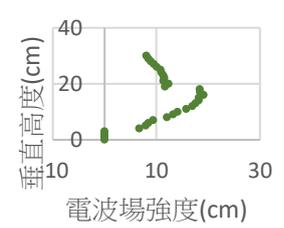
2222



3904

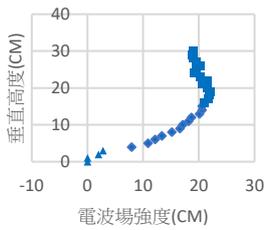


9014

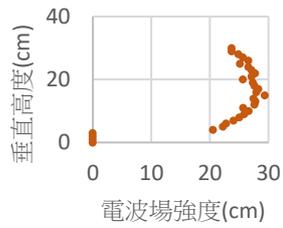


9011

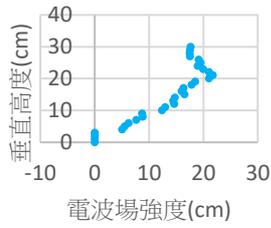
-x_z 平面



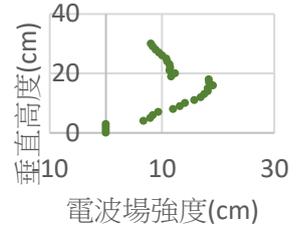
2222



3904

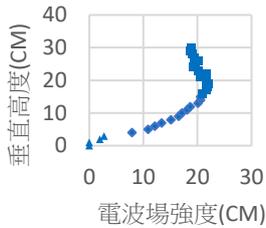


9014

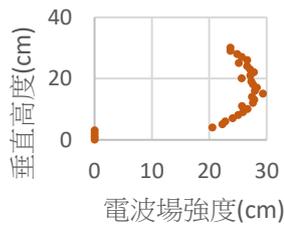


9011

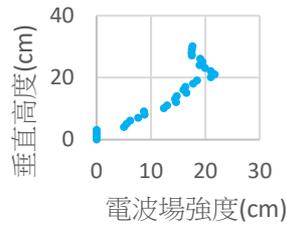
y_z 平面



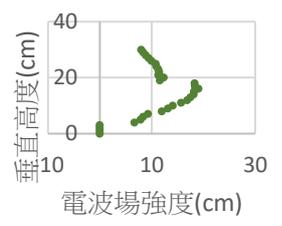
2222



3904



9014

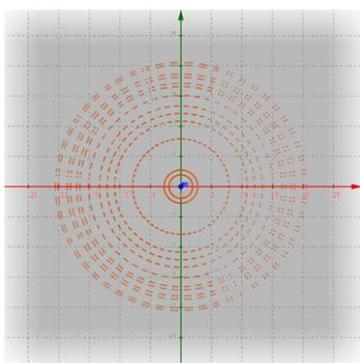


9011

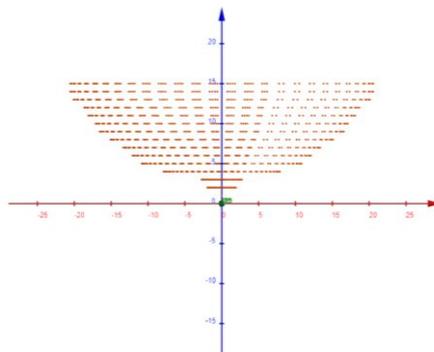
-y_z 平面

【圖】4種電晶體組裝之特斯拉線圈其特斯拉電波強度在「其他方向」的垂直分布

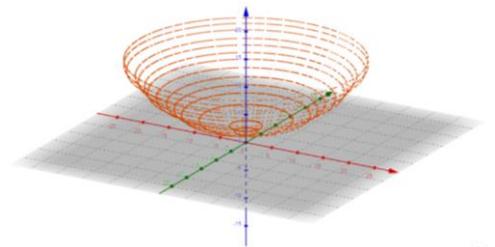
據此，我們可以模擬繪製出特斯拉電波強度的垂直高度分布圖形(假設其可以繞 z 軸作一旋轉體)。



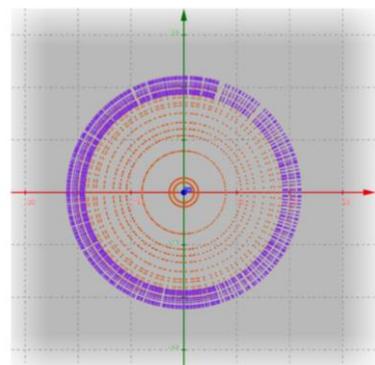
特斯拉主區俯視圖



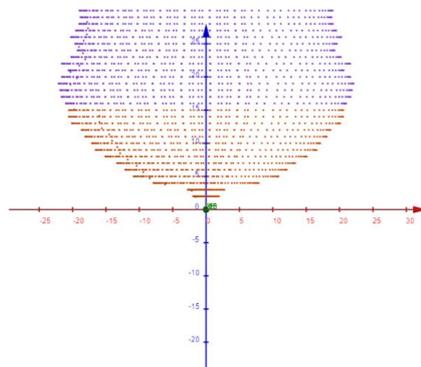
特斯拉主區側視圖



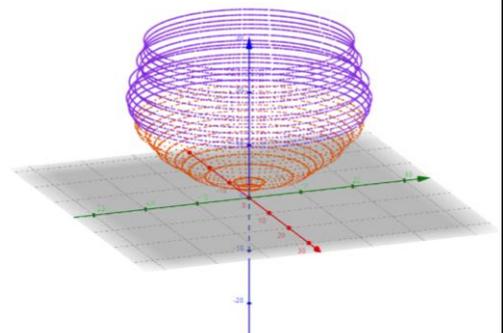
特斯拉主區立體圖



整體俯視圖(含天線部分)



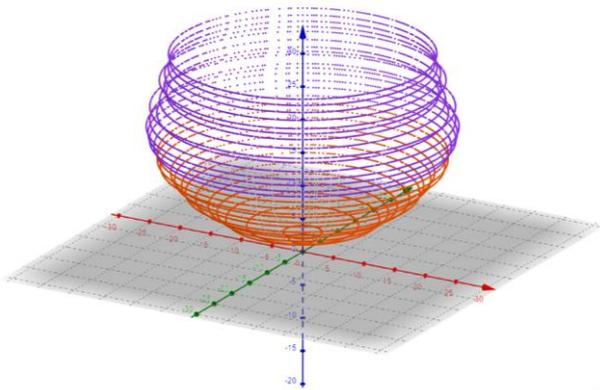
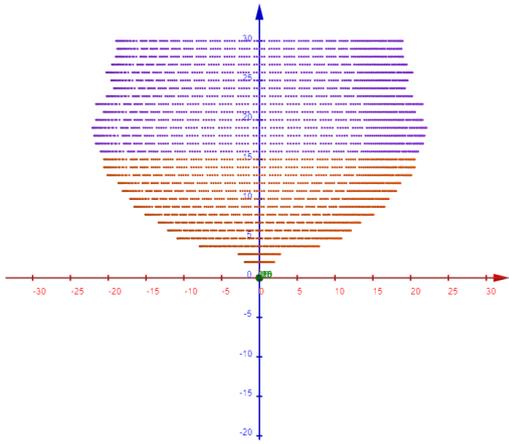
整體側視圖(含天線部分)



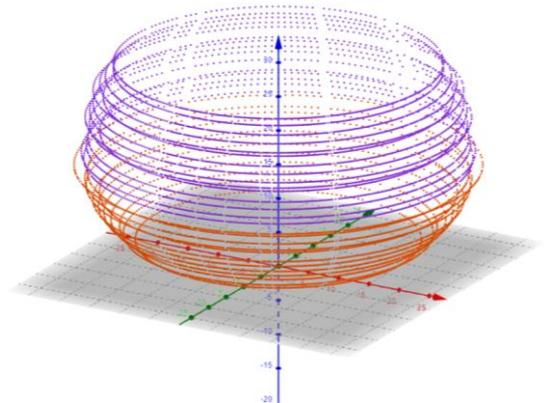
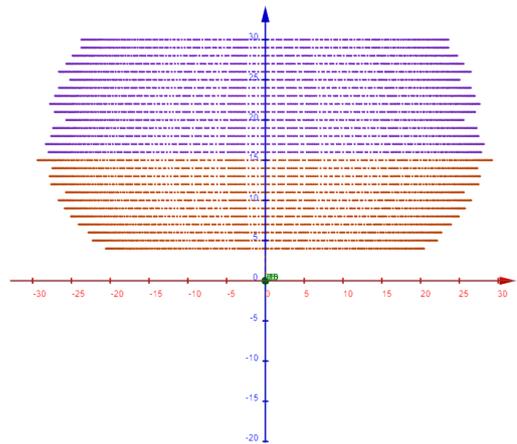
整體立體圖(含天線部分)

【圖】2222 型電晶體組裝之特斯拉線圈其特斯拉電波強度在「空間」上的分布

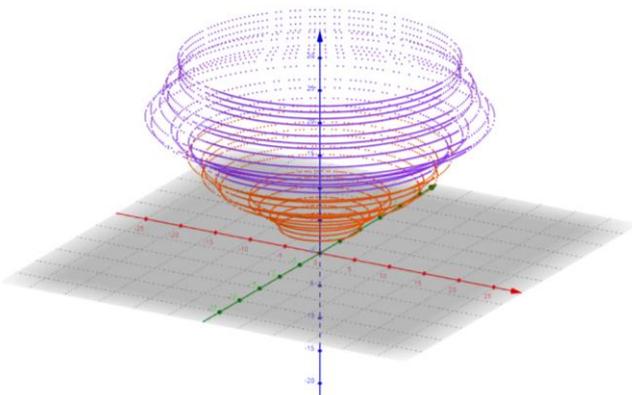
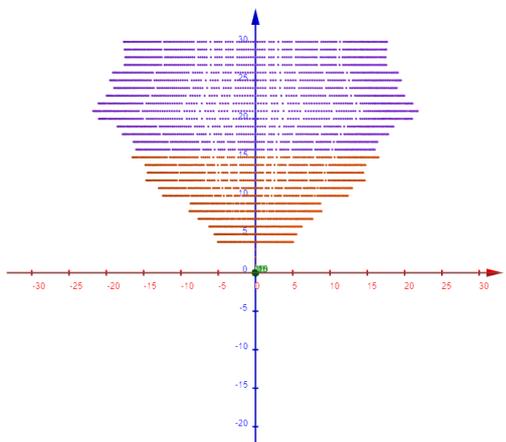
實驗也探討了其他電晶體製成特斯拉線圈，其電波場強度在空間中的分布



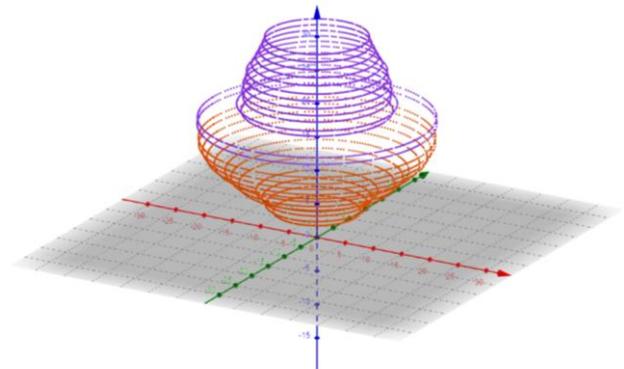
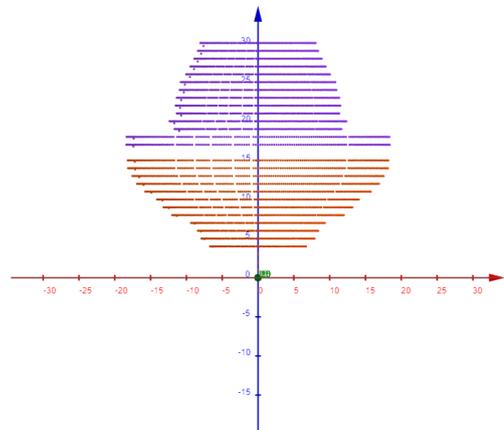
2222 型



3904 型

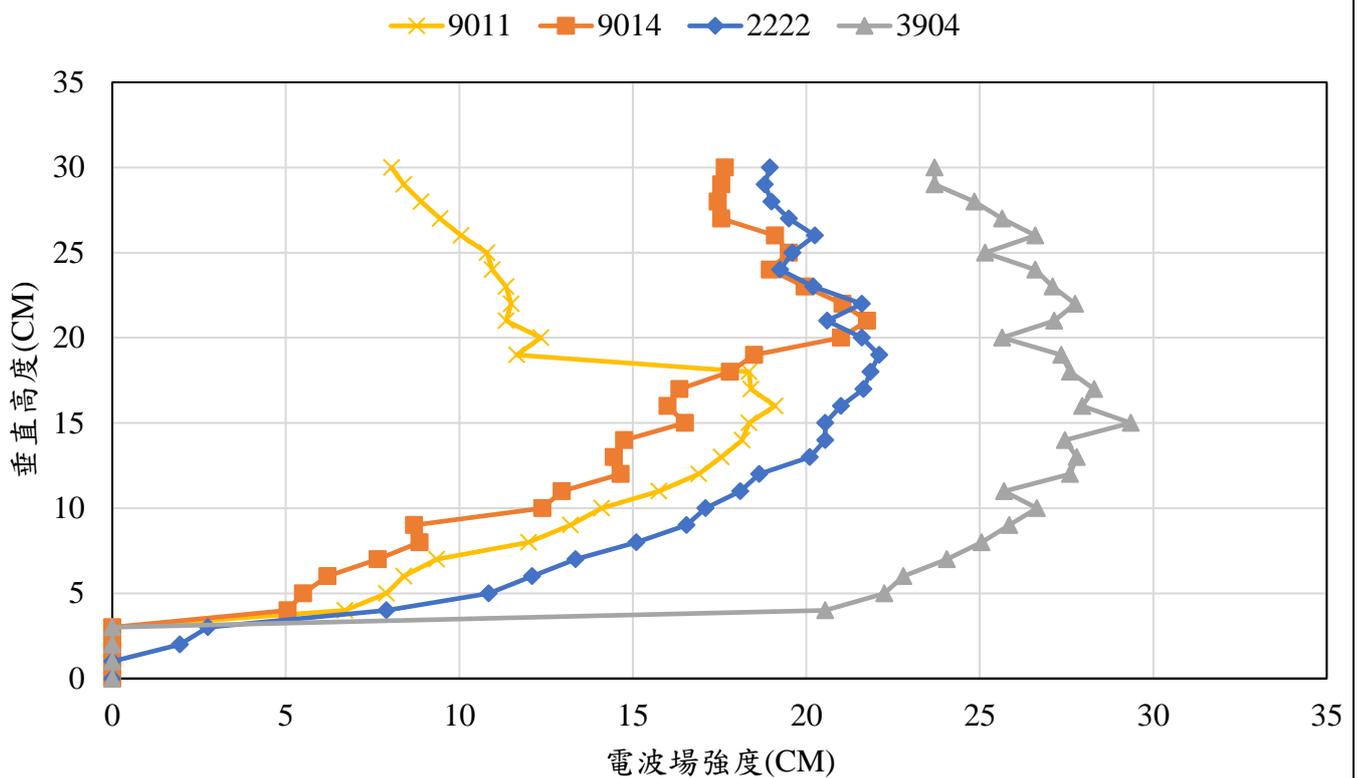


9014 型



9011 型

【圖】4 種電晶體組裝之特斯拉線圈(施加 8V)其特斯拉電波強度在「空間」上的分布

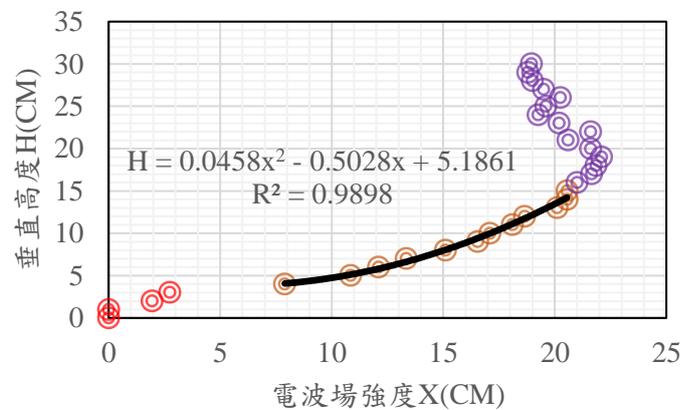


【圖】4種電晶體組裝之特斯拉線圈(施加8V)其特斯拉電波強度在「垂直高度」上的分布比較

因此本實驗部分可以給一小結論

- (1) 證明向外突出、並脫離特斯拉螺線管的天線具有延伸電波場的性質。
- (2) 外天線的電波場強度會逐漸遞減
- (3) 證明螺線管周圍是一非均勻電波場，並找到其電波場隨高度遞增符二次函數之關係

$$H = 0.0458x^2 - 0.5028x + 5.1861$$
 相關係數達 $R^2 = 0.9898$
- (4) 證明主線圈若鬆散纏繞在副線圈外，重疊部分將可能阻擋特斯拉電波的發射。



【圖】2222型電晶體組裝之特斯拉線圈其特斯拉電波強度在「垂直高度」上的分布

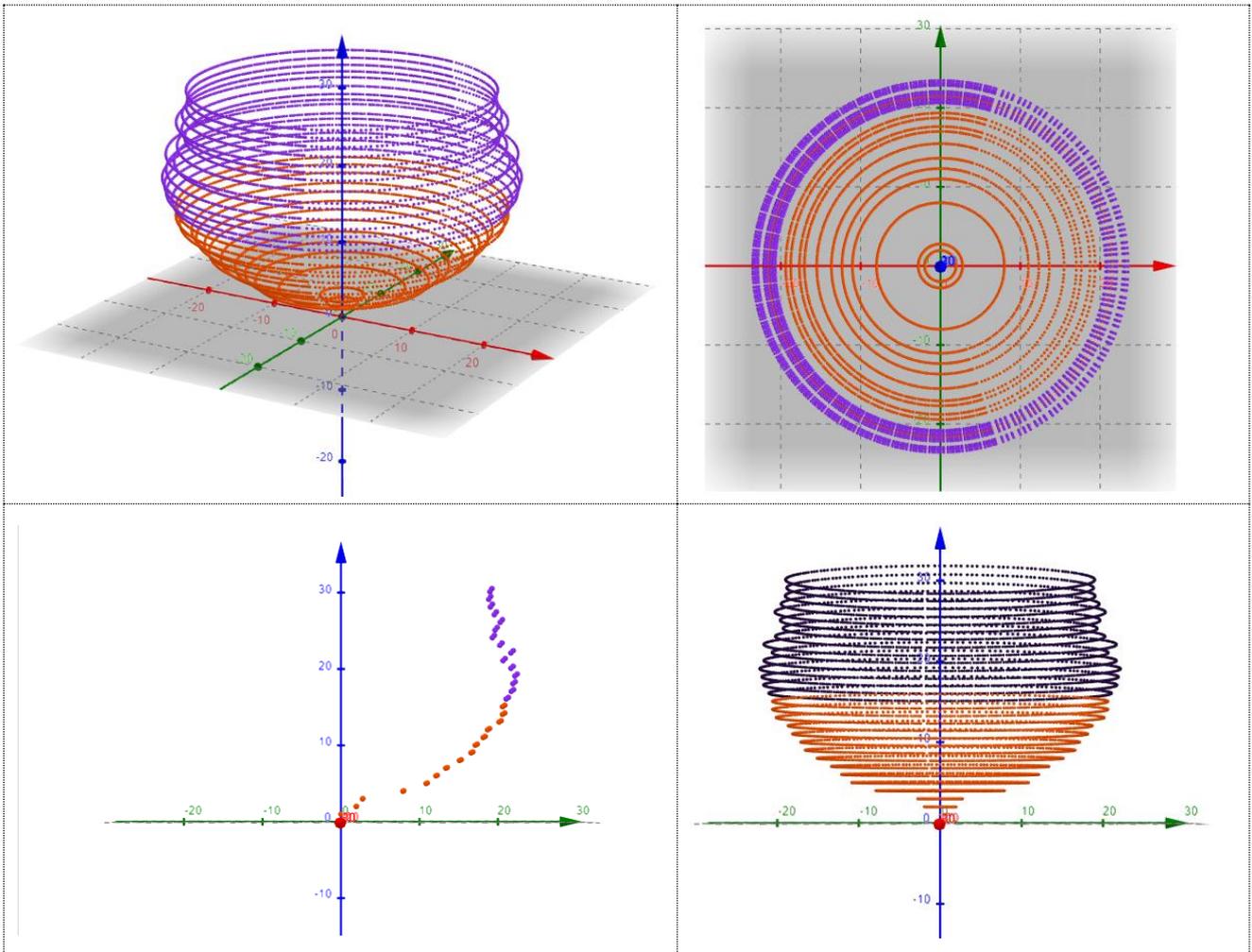
外天線區： 脫離螺線管主區，天線的電波強度會遞減，但幅度不大

特斯拉主區： 電波場強度隨高度快速遞增，接近螺線管頂端趨飽和

主副重疊區： 幾乎沒有電波場，推測是由於內外線圈磁力線干擾抵銷

討論六、探討特斯拉線圈的天線意義

實驗發現天線具有延伸螺線管發射源特性，我們繪製出了電波強度在高度方向的分佈形狀，這項發現相當有意思，由於遠距傳輸受限於距離，因此若天線具有「等效延伸電波發射源」的特性，是否能克服特斯拉管笨重的缺點。圖以 2222 型電晶體為例



【圖】2222 型電晶體組裝之特斯拉線圈其外天線電波場在「空間」上的分布

實驗嘗試統計 4 種電晶體天線強度隨高度遞減之關係，計算方式：

$$\text{保留率} = \frac{\text{天線延伸高度的電波強度}(cm)}{\text{高度 } 15 \text{ cm 處的電波強度}(cm)} \times 100\%$$

實驗發現：保留率都超過 0.9，而超過 1 的物理意義是，天線附近的電波場比管頂 15 cm 強。

值得一提的是，9011 的天線電波場非常不穩定，是所有子群體中保留率最低的。

【表】不同電晶體之電波場強度保留率

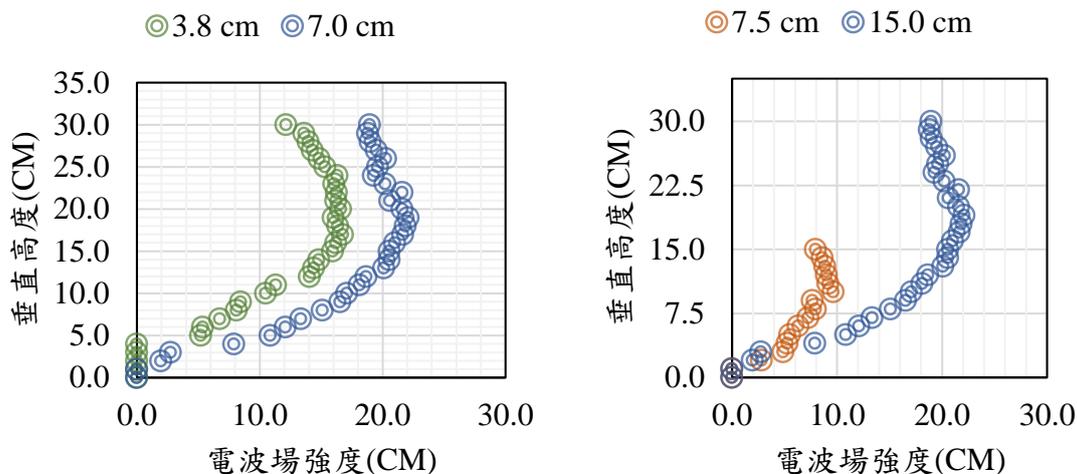
天線高度	2222	3904	9014	9011
15 cm	1.00	1.00	1.00	1.00
18 cm	1.06	0.94	1.08	1.01
21 cm	1.01	0.93	1.32	0.62
24 cm	0.94	0.91	1.15	0.60
27 cm	0.93	0.87	1.06	0.51
30 cm	0.92	0.81	1.07	0.44

於是在接下來的實驗中，我們試圖尋找，是「什麼樣的形狀特徵」可以使天線在向外延伸一段距離後仍能作為良好的電波發射源。

討論七、探討特斯拉管形狀對電波強度提升效率、天線保留率之影響

固定 8V 電壓進行以絕緣後的驗電筆測量 6 次平均。

以 2222 型為例，實驗發現，當特斯拉的副線圈管徑增加，電波場強度也會有增加的趨勢，如圖

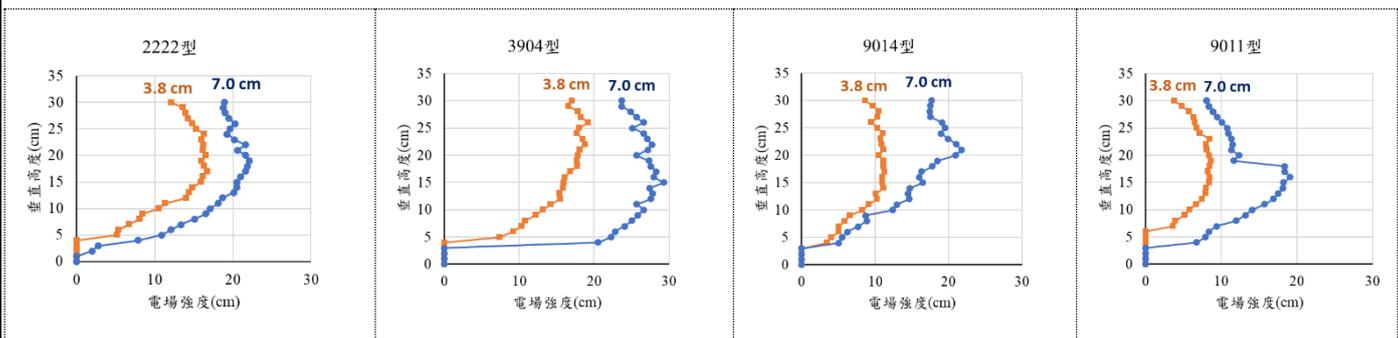


【圖】2222 型組裝之特斯拉電波場強度受到「管徑」或「管高」的影響

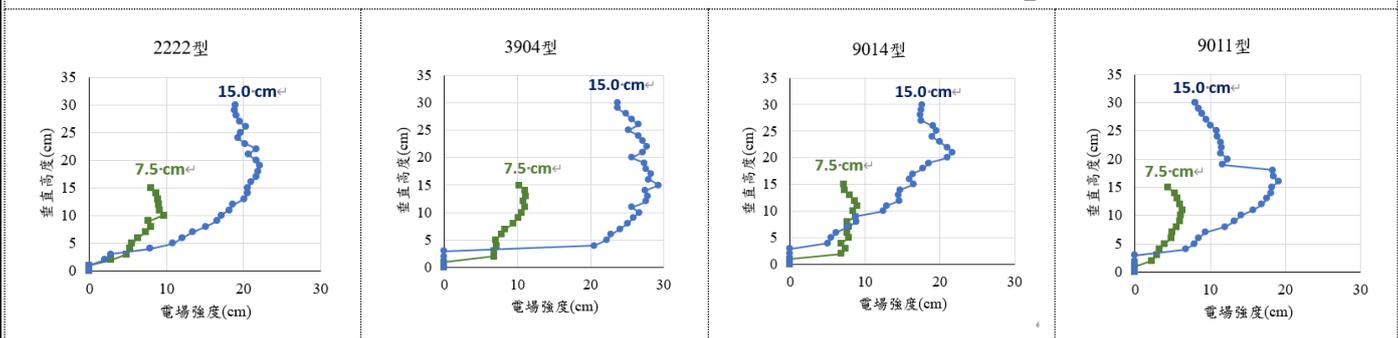
如表(附錄 I)是特斯拉線圈在不同垂直高度(含延伸天線)的電波場強度，以及當管徑、管長倍增時，電波場強度的提升倍率。此外實驗也統計外天線區的電波場保留率與管徑的相關性。

由整理的表格(附錄 I)可知，管徑會影響電波場大小，由提升倍率=相同高度下 7.0 cm 電波場強度/相同高度下 3.8 cm 電波場強度，隨高度增加而提升倍率下降，由以上歸納得知：對 2222 型的數據整體而言，管徑幾乎不影響保留率，「管徑較大」、「管長較長」的特斯拉能產生「高度上更均勻」的電波場強度。但是，若考慮成本問題，當管徑加倍，所需漆包線也會加倍(圓周長與直徑成正比)，然而本實驗中不同管徑的頂端之提升倍率只有 1.29 倍之差；本實驗中不同管長的任意高度位置之提升倍率都超過 2.8 倍，所以管徑較大的特斯拉，經濟效益較低。

實驗也討論了其他電晶體，也有相同的趨勢。如下：



【圖】4 種電晶體組裝之特斯拉電波場強度受到「管徑」的影響



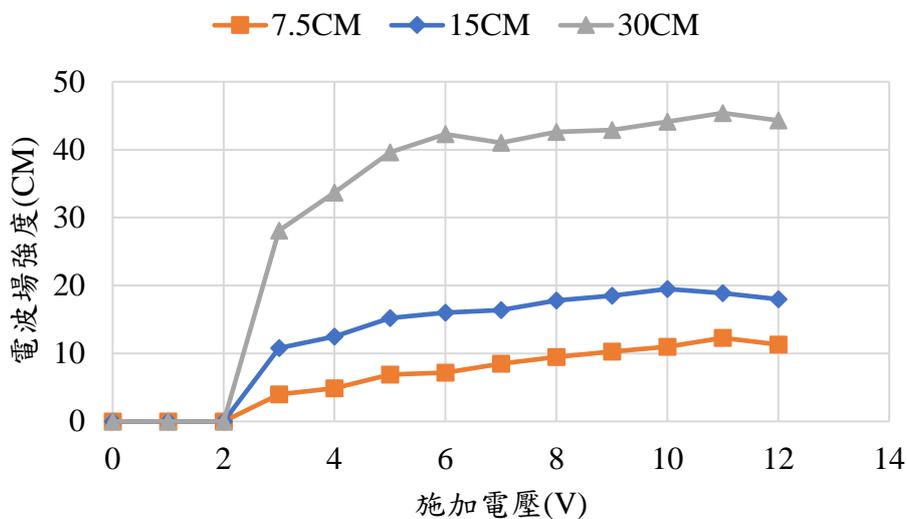
【圖】4 種電晶體組裝之特斯拉電波場強度受到「管長」的影響

討論八、綜合探討特斯拉管形狀對電波強度提升效率、天線保留率之影響

根據討論七與討論八結果推論：

- (1) 特斯拉管的形狀不影響天線的電波場強度保留率
- (2) 由於將管徑倍增、以及將管長倍增，所需的線材量是相同的，實驗得知，將材料運用在增加管長的經濟效益較高。

實驗也嘗試將此結果與電磁理論作整合，首先，管長影響的決定性因素在於「主副圈數比」，實驗更進一步作了第三種管長 30 cm 來觀察結果。實驗確實證明：主線圈匝數固定下，當管柱長(副線圈匝數)加倍，電波場強度也跟著加倍。



【圖】特斯拉電波場強度受到「管長」的影響

因此根據匝數比，實驗推出的數學模型為：匝數比與電波場強度能傳的距離成正比。

除此之外，實驗也發現管徑對電波場強度能傳的距離有關，但是隨著越接近管頂，影響力越小，目前還無法找出數學模型。

根據互感原理理論，同軸螺線管的磁力線的傳輸應該與面積無關，因此目前我們無法找到相關性。

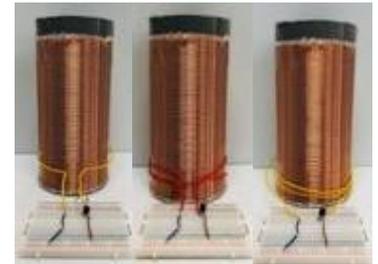
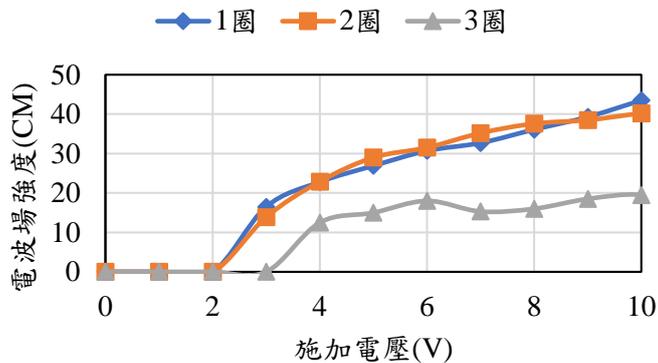
在外天線區的保留率中，在本研究中發現很神奇的是，特斯拉向外延伸的天線具有延伸電波源的性質。並且

管的高瘦不影響天線電波場的保留率，天線在延伸一倍管長後仍可維持高電波強度。

討論九、探討主線圈圈數對電波強度、保留率之影響

使用 7 cm 粗、15 cm 高(副線圈密度為 15 匝/公分)的特斯拉管，改變不同主線圈圈數並測量半高位置的電波場強度，實驗發現：

降低主線圈數，有機會可以提升電波場強度，主要原因推測為：主副線圈比的提升。但是，實驗也發現降到 1 圈的情況下，並無法再有效提升。



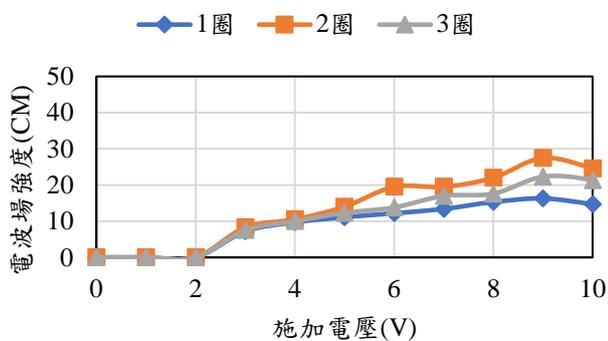
1 圈 / 2 圈 / 3 圈

【圖】2222 型組裝之特斯拉電波場強度受到「主線圈圈數」的影響

【圖】不同主線圈匝數

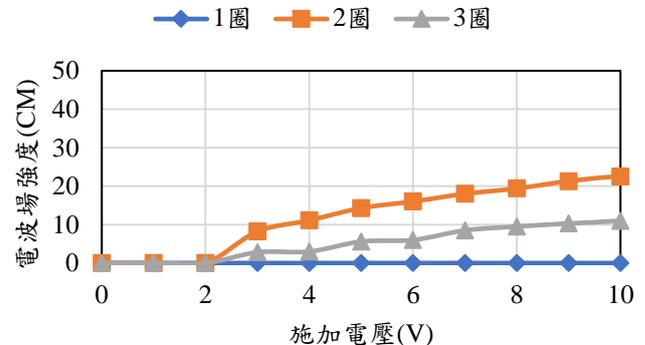
為了更進一步確認主線圈的影響，實驗針對不同形狀的特斯拉管進行測試研究。

縮短一半管徑



直徑 3.8 cm 管長 15.0 cm

縮短一半管長



直徑 7.0 cm 管長 7.5 cm

【圖】2222 型組裝之不同形狀特斯拉與「主線圈圈數」的關係

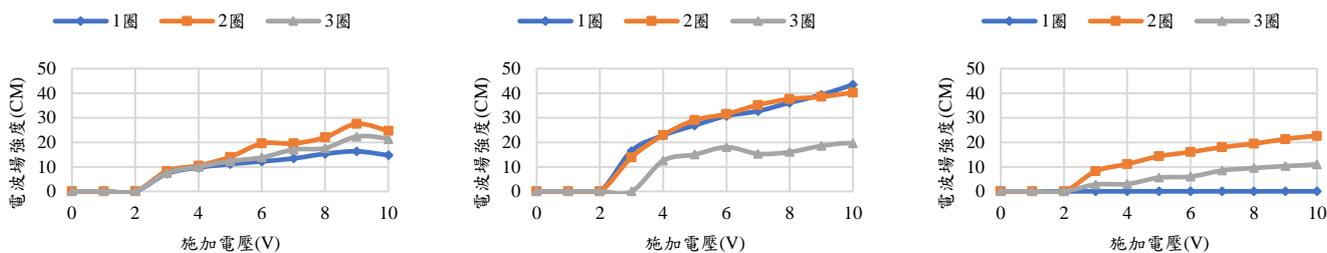
實驗發現：無論是管徑太短或是管長太短都會使得「主線圈只 1 圈」的效果變差。

除此之外，從實驗數據可以得到其他更多資訊。

1. 當管長減半或太短時，主線圈只有 1 圈的特斯拉甚至無法工作(電波場為零或驗電筆測不到)。
2. 當管徑減半時，1 圈仍可工作，但效果大減。
3. 無論特斯拉管何種形狀，大致上都呈現 2 圈優於 3 圈的結果。

為了更進一步確認主線圈的影響，實驗針對子群體的「不同電晶體」的特斯拉管也進行採樣測試。

以下是不同電晶體的結果做統計，希望藉由歸納法，證明此部分的研究結果。

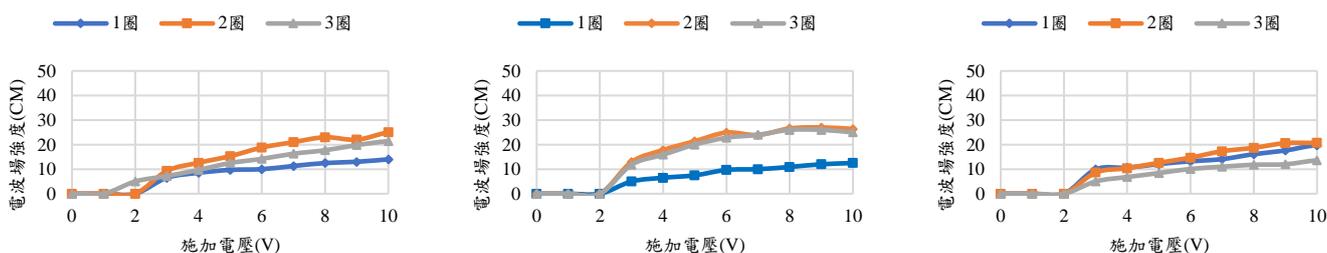


直徑 3.8 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 7.5 cm

【圖】2222 型不同形狀、圈數對特斯拉電波場強度影響

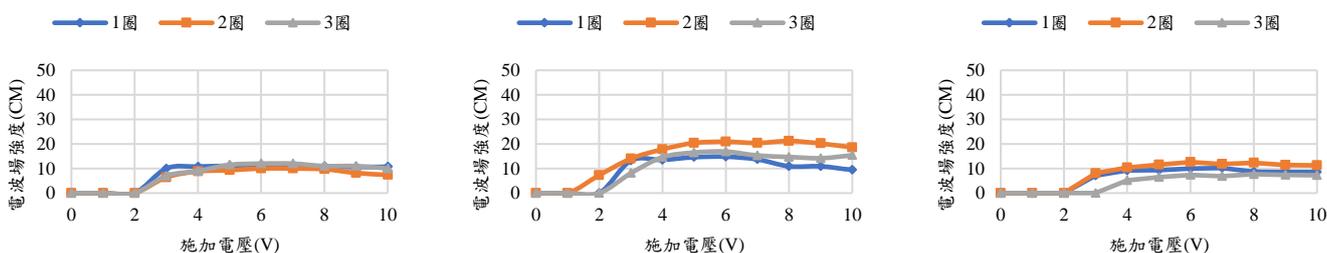


直徑 3.8 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 7.5 cm

【圖】3904 型不同形狀、圈數對特斯拉電波場強度影響

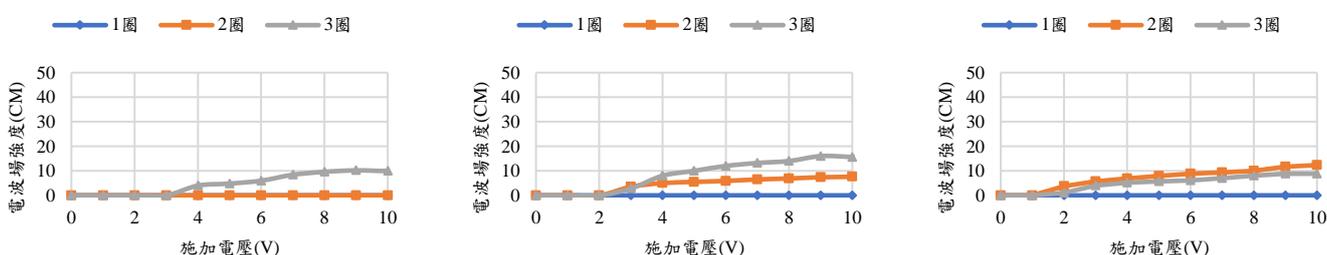


直徑 3.8 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 7.5 cm

【圖】9014 型不同特斯拉形狀、圈數對特斯拉電波場強度影響



直徑 3.8 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 15 cm

直徑 7 cm 管長 7.5 cm

【圖】9011 型不同特斯拉形狀、圈數對特斯拉電波場強度影響

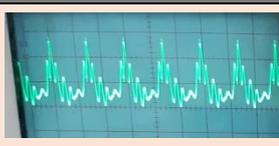
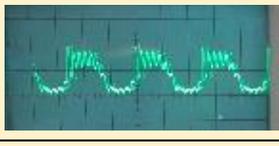
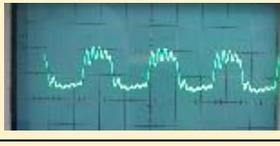
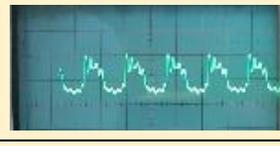
實驗發現：大部分的結果都顯示，1 圈的效果並不佳，特別是 9011 型，別說 1 圈，連 2 圈都可能無法使特斯拉線圈正常運作(無論施加多少電壓，電波場強度均為零)。

綜合以上，要使特斯拉線圈在大部分電晶體、大部分形狀(高瘦)都要可以正常運作，主線圈的「適當」圈數，應為 2~3 圈，其中，若不考慮使用 9011 型，則 2 圈將能更節省材料，且有不錯的效能

討論十、以示波器測量不同幾何形狀之特斯拉的電場頻率

【表】使用 2222 型電晶體再 8V 下測量不同幾何形狀特斯拉管得到的輸入波型

管徑	管高	主線圈 3 圈	主線圈 2 圈	主線圈 1 圈
寬 7.0 cm	高 7.5 cm			
	頻率(Hz)	1.78×10^6	2.5×10^6	2.273×10^6
	高 15 cm			
	頻率(Hz)	1.667×10^6	1.923×10^6	1.923×10^6
	高 30 cm			
	頻率(Hz)	2.381×10^6	2.273×10^6	2.273×10^6

管徑	管高	主線圈 3 圈	主線圈 2 圈	主線圈 1 圈
寬 3.8 cm	高 15 cm		無法測得	無法測得
頻率(Hz)		4.16×10^6		
寬 7.0 cm				
頻率(Hz)		1.667×10^6	1.923×10^6	1.923×10^6
寬 11.5 cm				
頻率(Hz)		2×10^6	2.5×10^6	1.1×10^6

實驗可以發現：

1. 輸入的波確實是「脈衝電」接近方形波，跟實驗一開始的假設一樣
2. 若主線圈數太少、管徑太小，波形變成三角形，甚至可能導致示波器讀不到訊號
3. 不同幾何形狀的特斯拉管會影響輸入波的波形。當管高太小或是管徑太細，則波形變成三角形
4. 而不同幾何形狀的特斯拉管，會影響輸入頻率。

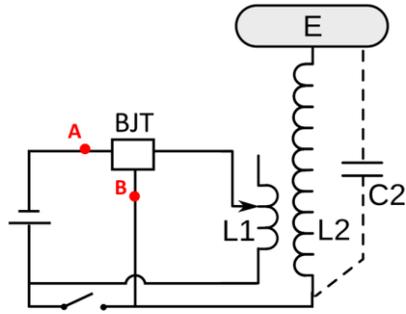
有請教過電腦公司老闆，他說方波出現一些上下震盪主要原因是特斯拉的感應電流作為啟動電晶體開關輸入時，會有週期性擾動，那麼主線圈的迴路會出現不穩的情況，。

備註：

1、輸入波的測量

將示波器的輸入端，接到本研究電路圖的 A、B 接點。

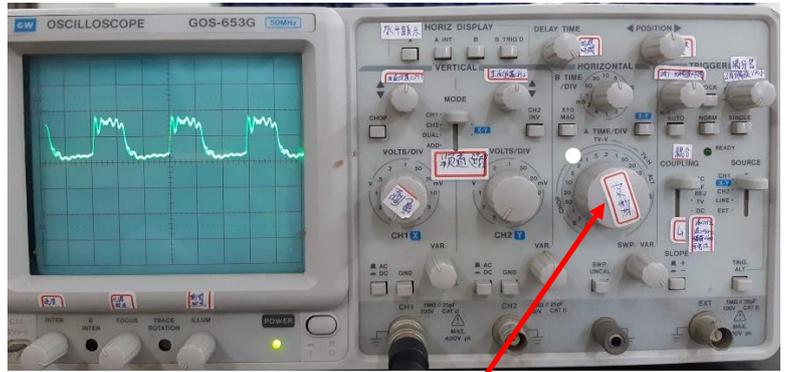
由於輸入的頻率是由特斯拉管的輸出決定，因此從示波器上看到的脈衝頻率，理論上也是特斯拉的頻率。



2、頻率的測量

從波形可知。以前國二就學到的，波的頻率是 1 秒可以產生幾個波，如螢幕顯示：一個波大約是 3 格，而示波器的轉扭可以調整一格的時間，譬如現在轉扭是 $0.2 \mu s$ ，就是 0.2×10^{-6} 秒。因此：

$$\text{頻率 } f = \frac{1}{3 \times 0.2 \times 10^{-6} \text{ sec}} = 1.67 \times 10^6 \text{ sec}$$



水平一格的秒數

討論十一、初步應用(成功用於無線傳電)

如圖是以本研究特斯拉對照組參數：

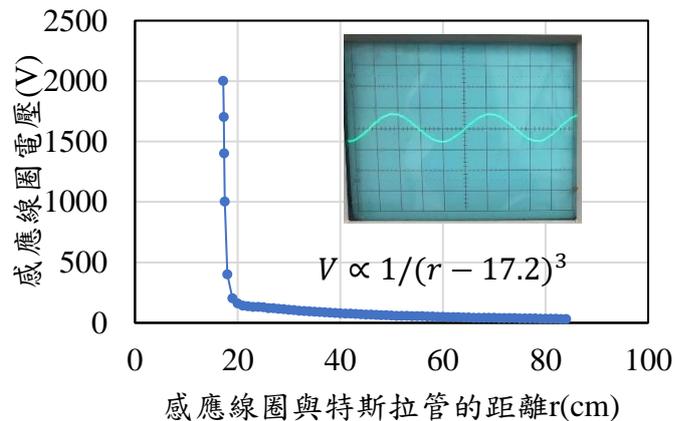
電晶體型號	2222 型
漆包線線徑	1 mm
輸入直流電壓	8V
主線圈匝數	3 圈
特斯拉管徑	7 cm 粗
特斯拉管高	30 cm 高

進行無線傳電的結果。感應線圈的交流電經整流器後得到直流電壓。

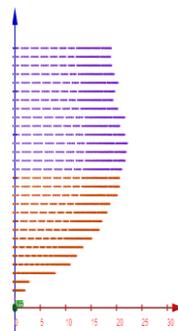
可以使無線距離超過 30 cm 的 LED 燈泡發光。



【圖】應用於無線傳電



【圖】感應電壓(整流後)隨感應線圈距離變化

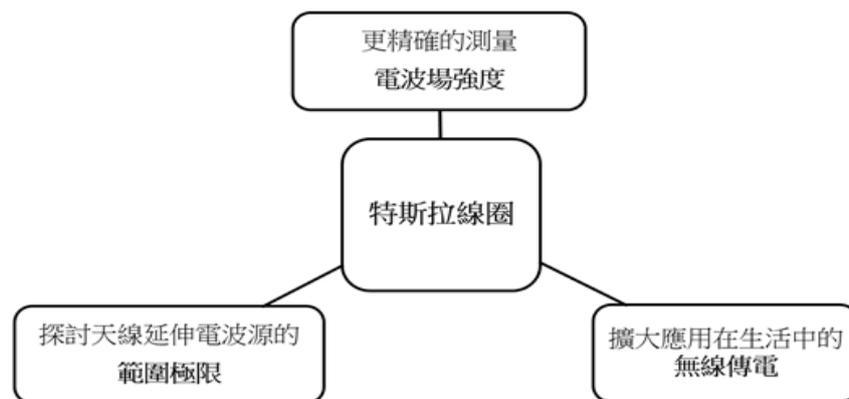


【圖】本研究以絕緣驗電筆畫出的電波場圖

玖、目前結論

1. 本實驗製作的固態特斯拉線圈產生的效能雖比原先的設計差，但優點是容易取得、較具安全性且需組裝之電路較為簡易。
2. 本研究發現使用的電晶體需為 NPN，若為 PNP 則無法使用於本實驗設計的簡易電路。
3. 驗電筆的敏感度較燈管好，因此在往後的實驗選擇使用驗電筆來進行測量。
4. 從 TOP50 電晶體中選出 4 種最好的電晶體分別是 2222、9014、3904、9011 進行之後的實驗。
5. 施加不同電壓於裝有電晶體的特斯拉線圈時，剛開始都會穩定上升，但在瀕臨崩潰電壓時都會有下降的現象發生，但若再繼續調高至崩潰電壓則會損毀。
6. 特斯拉線圈的天線具有延長電波發射源的功能，使之能有較遠的傳電距離。
7. 根據繪製的電場圖發現 9011、3904 在部分高度會偵測不到電波，其餘的電晶體則無此情況發生。
8. 管徑增為 2 倍雖然會使電波強度變大，但增加的幅度較小。
9. 管長大小會對電波強度產生「明顯」的影響，若管長增為 2 倍，則電波強度約增為 2 倍。
10. 主線圈適當的匝數為 2-3 圈，能有較好的效能，在 1 圈時無法適用於部分(9011)電晶體。
11. 特斯拉管的幾何形狀會影響到頻率，當管徑太小且主線圈數太少則無法測得數據。
12. 實驗成功將最佳參數應用於無線傳電，並以數據得到感應電壓隨感應線圈距離快速遞減。

拾、未來展望



1. 一開始本實驗使用燈管的發光與熄滅來判斷是否有成功通路和電波場範圍，但由於測量範圍過於狹窄，所以後來改用較為靈敏的市售驗電筆來量測。未來**可望測量物體於空間上一個點的「靜態或動態(交流)磁感應強度的高斯計」將電波場強度精準量化。**
2. 前面實驗得知將管長延伸兩倍時，電波場強度大略以根號二倍增加，並且天線也能延伸電波發射源。未來我們**可望將管長無限延伸放大**研究效果是否會有一個極限值，並且若是將天線曲折 90° 能不能講電波發射源橫向延伸



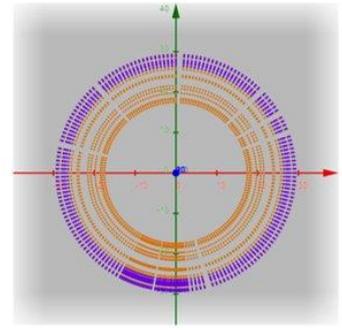
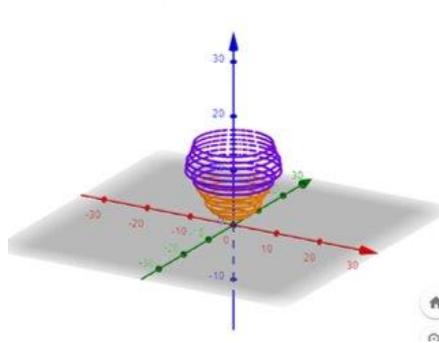
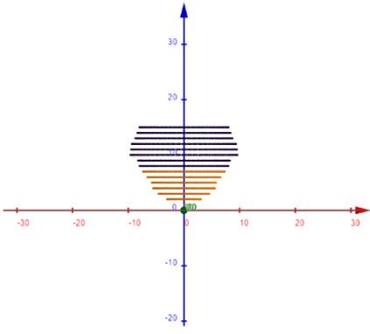
3. 提升感應線圈的電流，使其能成功在空間中進行無線傳電。並且計算出特斯拉線圈的頻率，打造一個電磁場均勻分布的空間，創造一個方便的電器充電方法。

拾壹、參考文獻

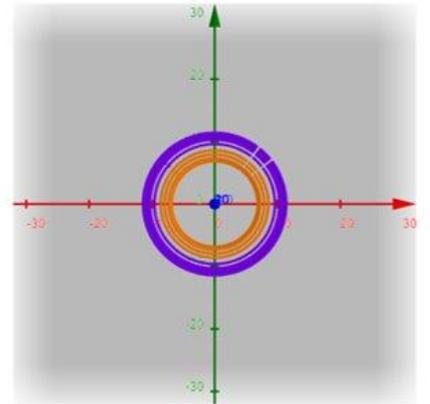
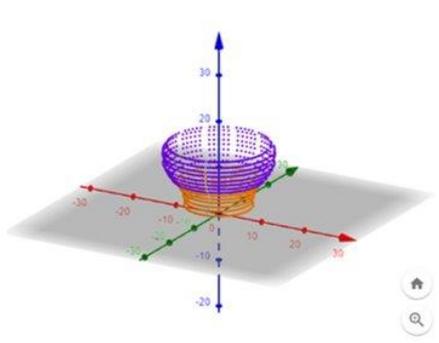
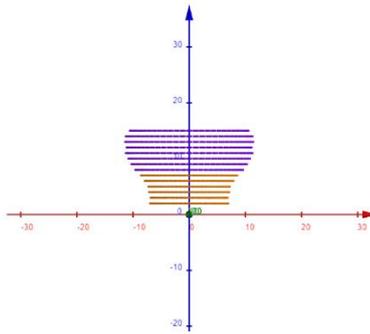
1. 無線傳電「遠」又「多」—利用特斯拉線圈自製無線傳電系統，第 58 屆中小學科展
 2. 佚名，被世界遺忘的天才-特斯拉回憶錄，北京法律出版社
 3. 無線充電技術，科學發展期刊，540 期
 4. 充電像 Wi-Fi 一樣自由，迪士尼展現無線供電房間 科技新報 20170202
<http://technews.tw/2017/02/22/quasistatic-cavity-resonance-for-ubiquitous-wireless-power-transfer/>
 5. 無線充電系統發展技術介紹 車輛研測資訊 108 期 2015-10
https://www.artc.org.tw/upfiles/ADUUpload/knowledge/tw_knowledge_501525427.pdf
 6. 20170614 Wireless charging of moving electric vehicles overcomes major hurdle Stanford University
<https://news.stanford.edu/press-releases/2017/06/14/big-advance-wireless-charging-moving-electric-cars/>
 7. Wireless Electricity? How the Tesla Coil Works. Kelly Dickerson，2014， Live Science
 8. Easy Tesla Coil，Paul，2018，DrewPaulDesign
 9. 看懂這些，你也可以做「特斯拉線圈」！，托尼斯塔克，2016，每日頭條科技
 10. Tesla 一生中最偉大的發明: Tesla Coil 無線傳電，佚名，2004，錫安日報
 11. 最簡單的無線傳電原理，甚麼是變壓器? 交流電比直流電有啥好處，扒扒攻城獅，2018 每日頭條
 12. 無限能量傳輸，佚名，2011，小小科學實驗室
 13. How to Make a Mini Tesla Coil 9v，Aswinth Raj，2017，Circuit Digest
 14. Bipolar Transistor Tutorial，佚名，2020，ElectronicsTutorial
 15. <https://alltransistors.com/>
-

附錄 I 討論五數據

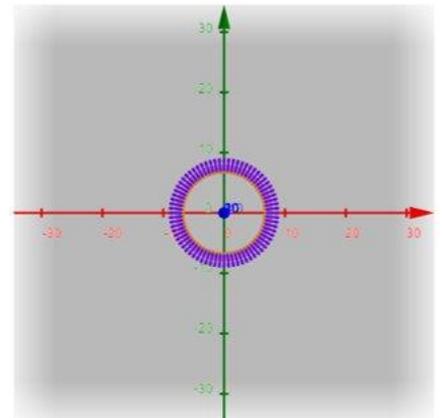
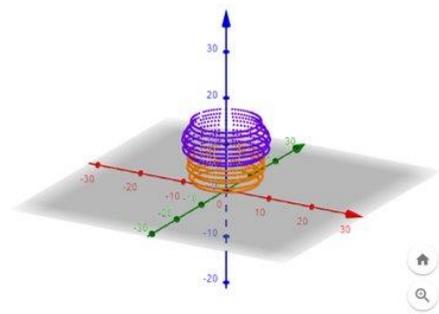
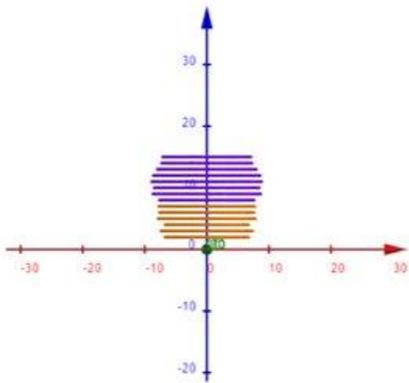
7/7.5/3 2222



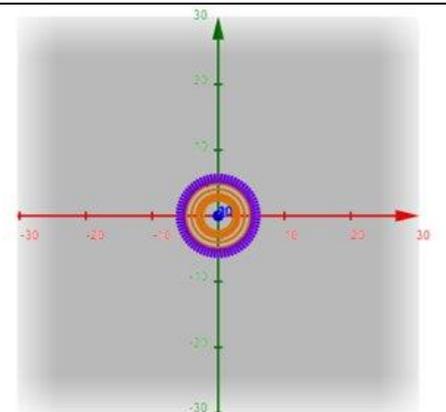
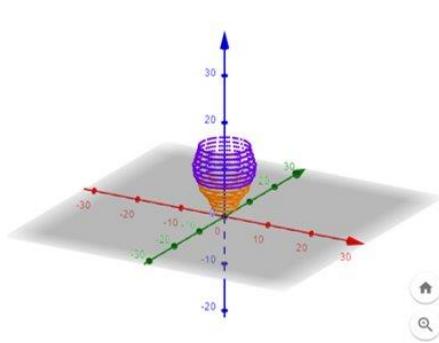
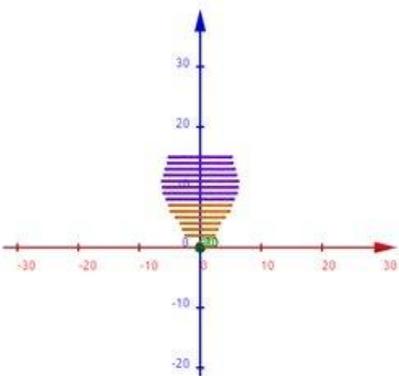
7/7.5/3 3904



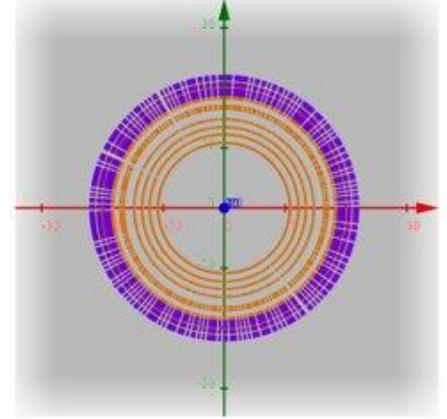
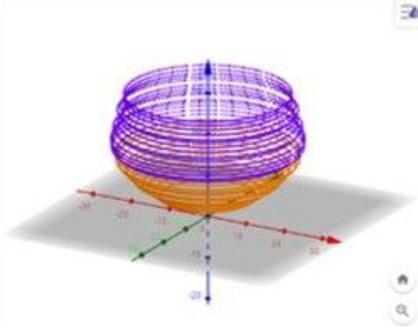
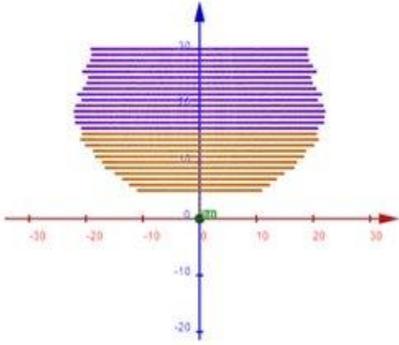
7/7.5/3 9014



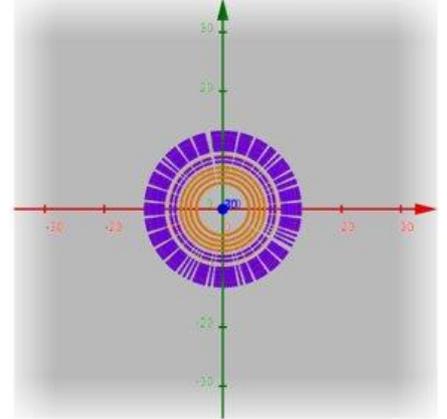
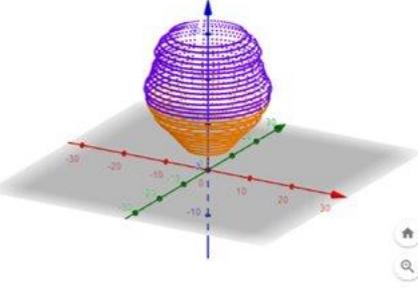
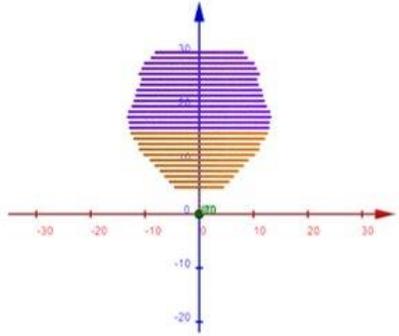
7/7.5/3 9011



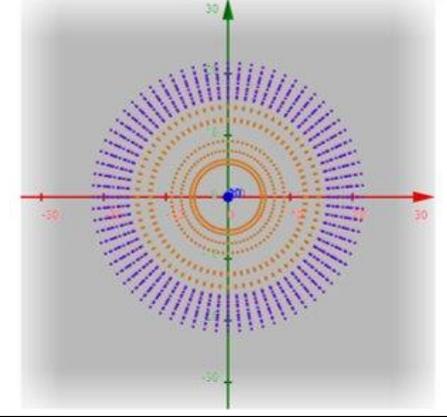
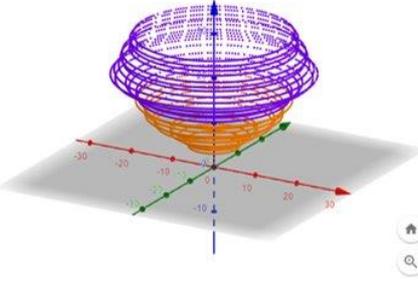
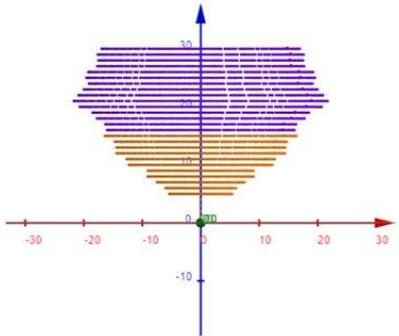
7/15/3 2222



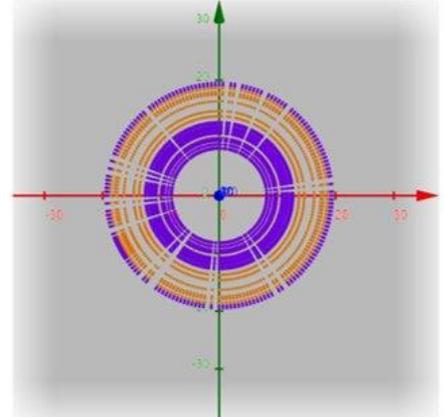
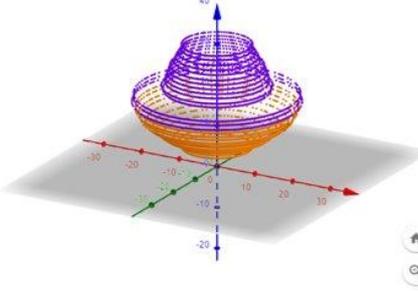
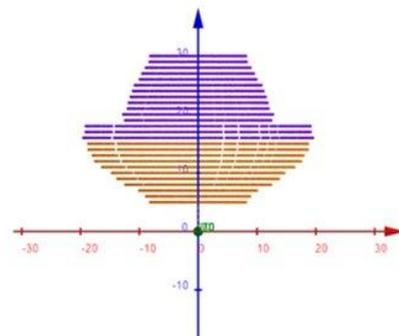
7/15/3 3904



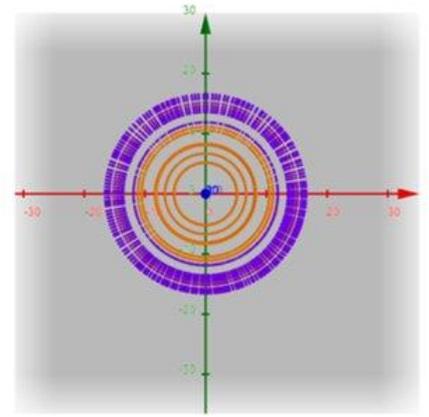
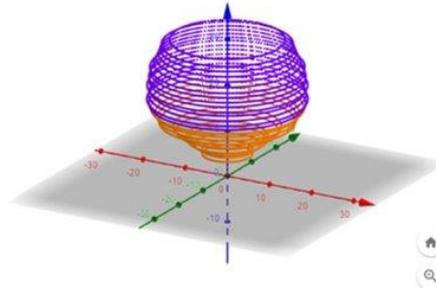
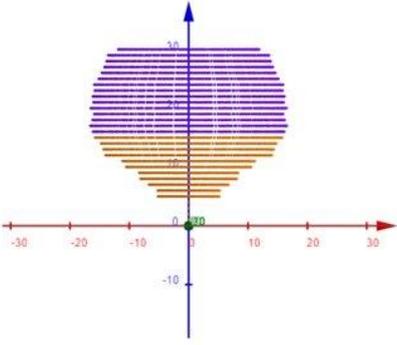
7/15/3 9014



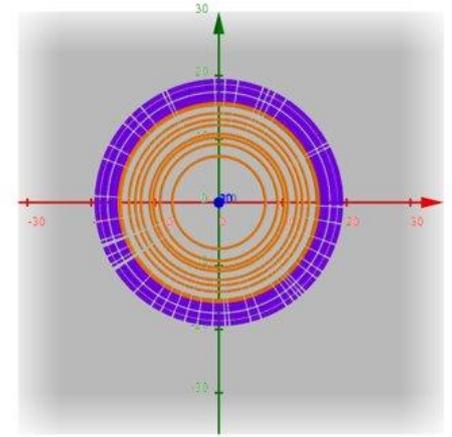
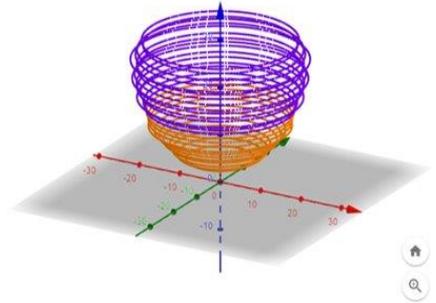
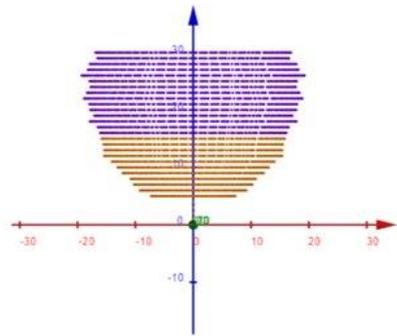
7/15/3 9011



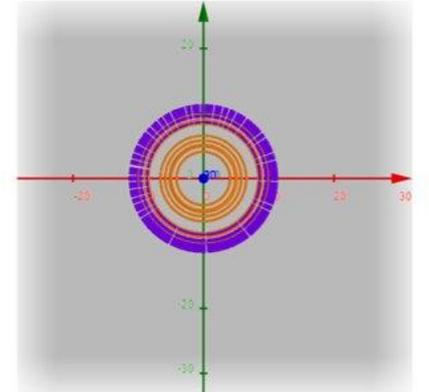
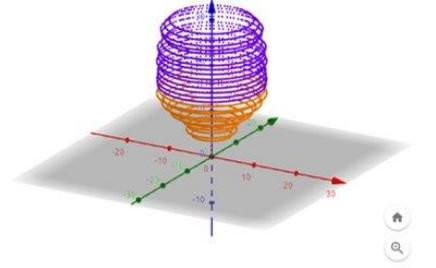
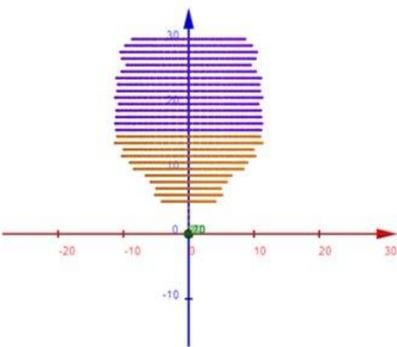
3.8/15/3 2222



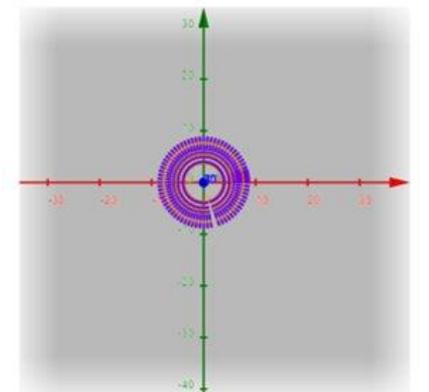
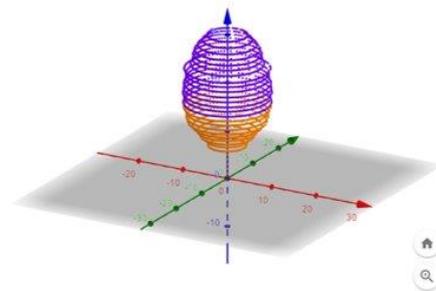
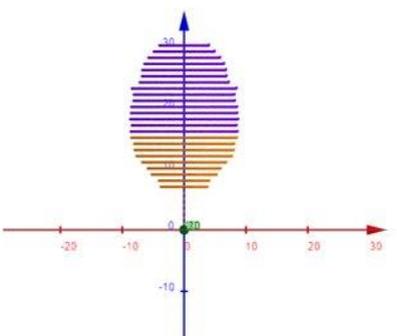
3.8/15/3 3904



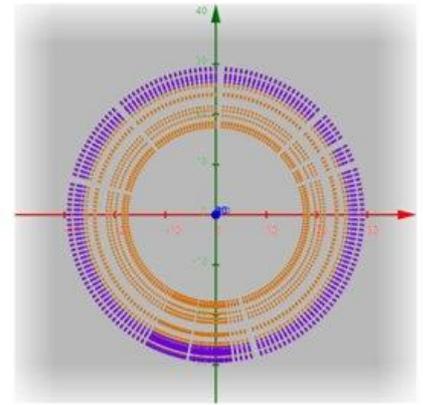
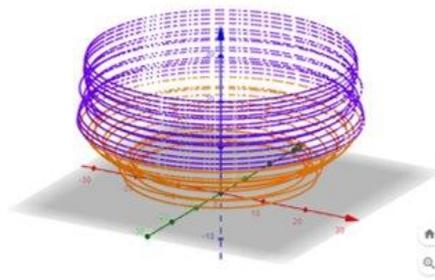
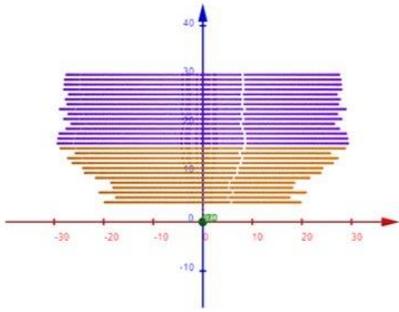
3.8/15/3 9014



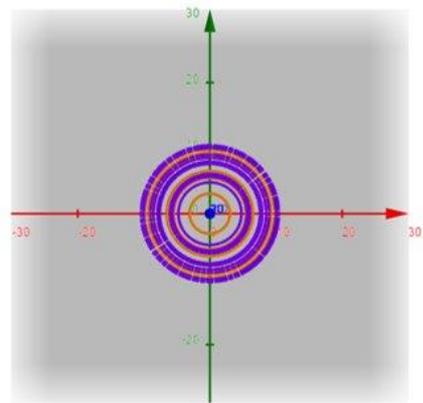
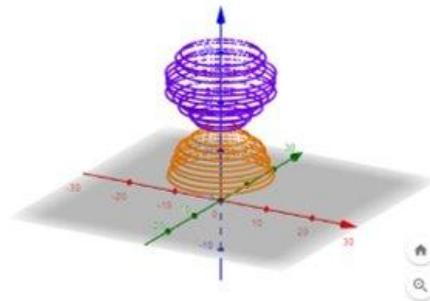
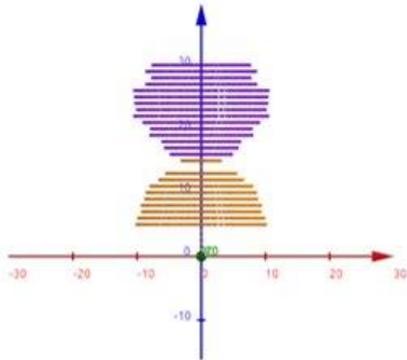
3.8/15/3 9011



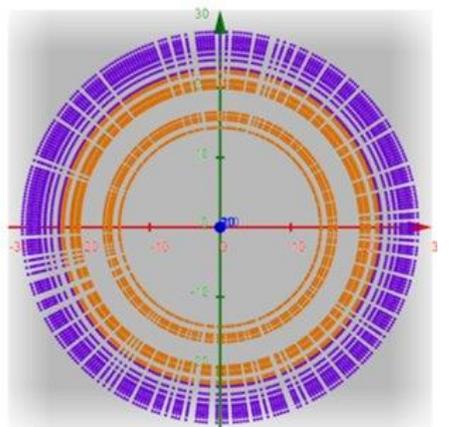
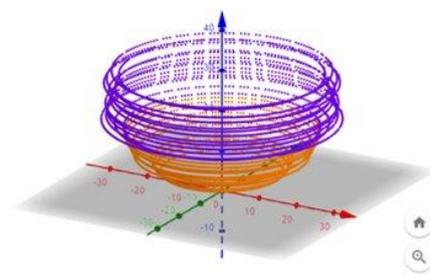
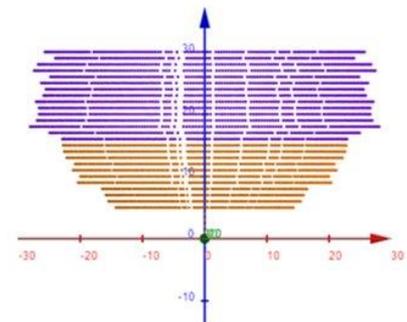
11.5/15/3 2222



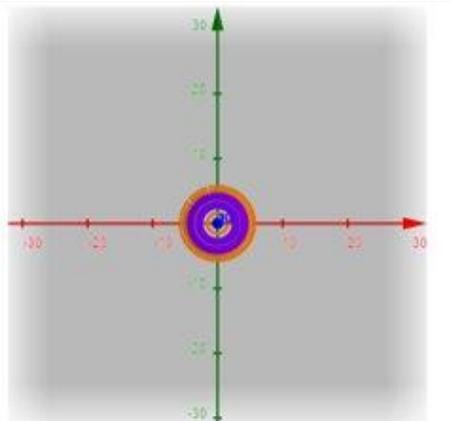
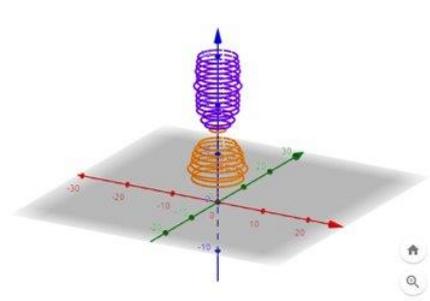
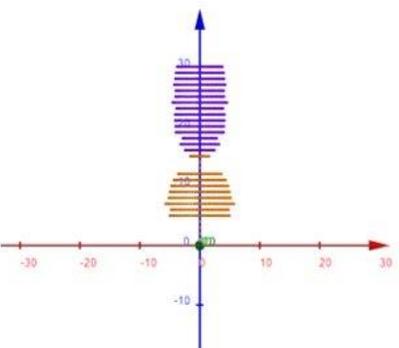
11.5/15/3 3904



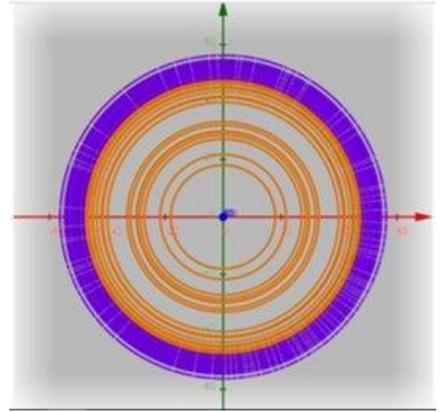
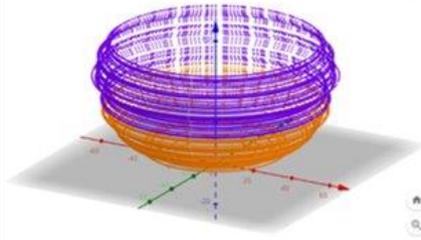
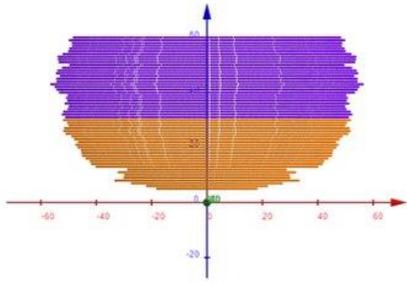
11.5/15/3 9014



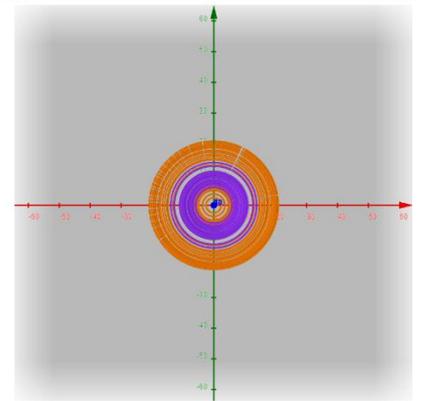
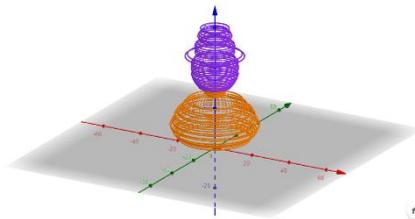
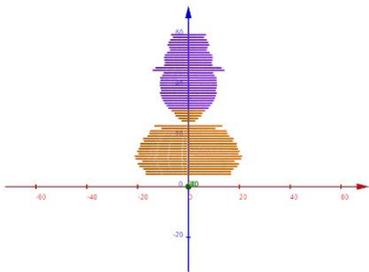
11.5/15/3 9011



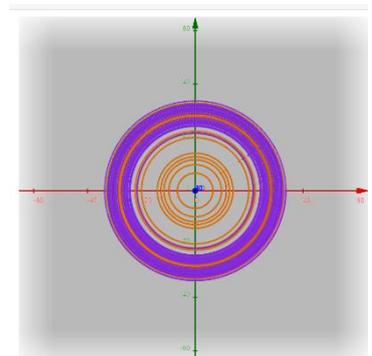
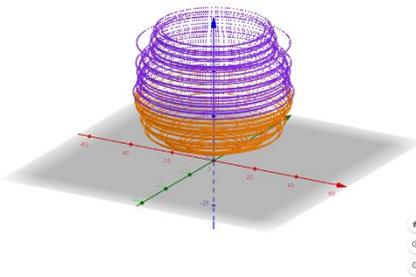
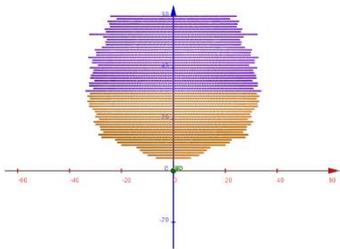
7/30/3 2222



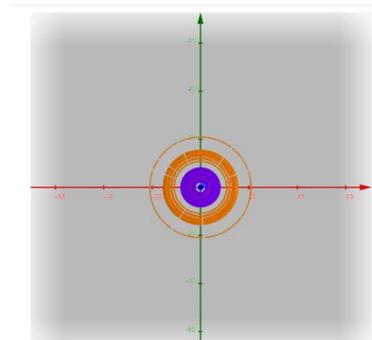
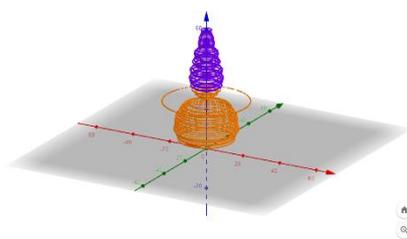
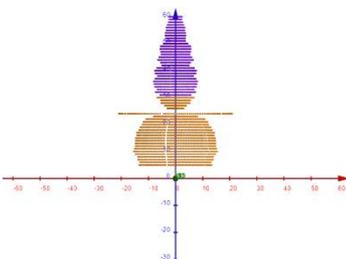
7/30/3 3904



7/30/3 9014



7/30/3 9011



附錄 II 討論七數據

【表】2222 型在不同管徑之電波場強度

垂直高度	管徑 3.8 cm	管徑 7.0 cm	提升倍率
1	0	0	-
3	0	2.75	-
5	5.20	10.85	2.09
7	6.75	13.35	1.98
9	8.45	16.55	1.96
11	11.30	18.10	1.60
13	14.40	20.10	1.40
15	15.95	20.55	1.29

【表】2222 型在不同管徑之天線電波場強度及天線的電波場強度保留率

	管徑 3.8 cm	管徑 7.0 cm	3.8 cm 保留率	7.0 cm 保留率
15	15.95	20.55	1.00	1.00
17	16.75	21.65	1.05	1.05
19	16.00	22.10	1.02	1.08
21	16.20	20.60	1.01	1.01
23	16.05	20.20	1.01	0.98
25	15.30	19.60	0.96	0.95
27	14.30	19.50	0.90	0.95
29	13.60	18.80	0.85	0.91

【表】2222 型在不同管徑之電波場強度

相對管高	管長 7.5 cm	管長 15.0 cm	提升倍率
1/8	0.0	0.0	-
2/8	0.0	2.0	-
3/8	2.8	7.9	2.82
4/8	4.2	12.1	2.87
5/8	5.3	15.1	2.88
6/8	5.9	17.1	2.89
7/8	6.3	18.7	2.96
1	7.3	20.6	2.83

【表】2222 型在不同管徑之天線電波場強度及天線的電波場強度保留率

相對管高	管長 7.5 cm	管長 15.0 cm	7.5 cm 保留率	15.0 cm 保留率
1	7.3	20.6	1	1
9/8	8.0	21.0	1.10	1.02
10/8	8.7	21.9	1.20	1.06
11/8	9.7	21.6	1.33	1.05
12/8	9.2	21.6	1.26	1.05

13/8	9.0	19.3	1.24	0.94
14/8	8.9	20.3	1.22	0.99
15/8	8.6	19.0	1.19	0.92
2	8.0	19.0	1.10	0.92

附錄 III 本研究數據

討論二數據

2222 型	手持				以水管絕緣			
	第一次	第二次	第三次	手持三次平均	第一次	第二次	第三次	絕緣三次平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	22	23.5	20	22	12.5	13.2	11.8	12.6
5	25.6	25.9	25.2	25.6	15	15	15	13.8
6	26.8	27.3	26.3	26.8	18	17.7	18.3	14.2
7	29	29.4	28.6	29	15.3	15.6	14.9	16.1
8	31	31.3	30.6	31	16	15.2	16.8	17.8
9	30	30.2	29.8	30	18.5	18.3	18.6	18.3
10	30	29.3	30.6	30	19.5	19.7	19.3	18.4
11	31	31	30.9	26	15.8	15.3	16.2	15
12	31.5	31.2	31.8	31.5	18	17.1	18.8	19.9

2222 型	往前				往後			
	第一次	第二次	第三次	往前三次平均	第一次	第二次	第三次	往後三次平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1.6	2.0	2.1	1.9	3.5	2.9	3.5	3.3
4	5.5	5	5.1	5.2	12.4	12.8	12.3	12.5
5	8.4	9.1	8.6	8.7	13.3	13.7	13.2	13.4
6	9.9	10.4	10	10.1	13.8	13.5	13.5	13.6
7	11	10.9	12	11.3	16.9	16.2	16.1	16.4
8	12.7	12.4	12.4	12.5	17	17.4	17.5	17.3
9	15.4	15.5	14.7	15.2	17.8	17.7	17.3	17.6
10	17.4	17.8	17.9	17.7	18.1	17.6	18	17.9
11	12.7	12.6	13.1	12.8	16.9	16.4	16.8	16.7
12	18	17.8	18.5	18.1	20	20.3	20.3	20.2

討論三數據

電壓	9011H72	2N3904	KN2222A	C9014	SC9014	C941	C945	BC547	C546B	BC548	C1815	UTCPN2222	2n4401	utc9013L
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2.8	10	0	8.1	6	7	8	10.5	6.8	10.4	7	9.9	11	11
4	8	13	12.5	14.6	10.5	11.5	9	11.2	8.5	12.7	12	12.8	14	13
5	10	17	15	16.5	13.5	13.5	11	14.1	10.3	15.6	14.5	14.5	17.5	16
6	12	18.7	18	16.9	13	17	10	14.5	11.8	17	15	18.5	20.5	21
7	13.2	22.5	18	15.3	11.5	18	9.5	14.5	11.9	17.2	16	19.2	22.5	21.6
8	14	24.5	19	14.7	11	19.5	9	15.8	13.5	17.5	16.5	21	24.5	24.3
9	16	27	20	14.2	10	20	9	15	13.3	18.2	14	18.5	25.5	25.1
10	15.6	29.3	19.5	15.4	12	20	8.5	15	13.3	18.4	14.5	22	25.5	26.1
11	14.7	27	15.8		13	21	7	15.5	13.2	18	15		27	
12	18.8	29.5	18		12	22	6	15.6	14.8	21.5			28	
13	19.5				12.5	23	8		14.8	17.6				
14	18.6				12		6		15	16.4				
15	20.5				9				13.5	15.5				
16	18.7				10.5				14.3					
17	22								13.5					
18	19.2													
19	17													
20	20.8													
21	19													
22	18													
23	18.5													
24	15													
25	15													
26	11.2													
27	15													

討論四數據

電壓	3904 型	2222 型	9011 型	9014 型
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	10	0	2.8	8.1
4	13	12.5	8	14.6
5	17	15	10	16.5
6	18.7	18	12	16.9
7	22.5	18	13.2	15.3
8	24.5	19	14	14.7
9	27	20	16	14.2
10	29.3	19.5	15.6	15.4
11	27	15.8	14.7	
12	29.5	18	18.8	
13			19.5	

14	18.6
15	20.5
16	18.7
17	22
18	19.2
19	17
20	20.8
21	19
22	18
23	18.5
24	15
25	15
26	11.2
27	15

討論五數據

直徑 7cm 管長 15cm

2222	往前	往後	平均	3904	往前	往後	平均	9014	往前	往後	平均	9011	往前	往後	平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
2	1.4	2.5	1.95	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0
3	2.3	3.2	2.75	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0
4	5.2	10.6	7.9	4	21.3	19.8	20.55	4	4.5	5.6	5.05	4	5	8.4	6.7
5	7.9	13.8	10.85	5	24.8	19.7	22.25	5	4.6	6.4	5.5	5	6.8	9	7.9
6	10	14.2	12.1	6	24	21.6	22.8	6	4.8	7.6	6.2	6	7.1	9.7	8.4
7	10.6	16.1	13.35	7	26.7	21.4	24.05	7	6.5	8.8	7.65	7	8.6	10.1	9.35
8	12.4	17.8	15.1	8	28.4	21.7	25.05	8	8	9.7	8.85	8	11.3	12.7	12
9	14.8	18.3	16.55	9	27.8	23.9	25.85	9	7.7	9.7	8.7	9	11.6	14.8	13.2
10	15.8	18.4	17.1	10	29.6	23.7	26.65	10	10.7	14.1	12.4	10	12.5	15.7	14.1
11	16.4	19.8	18.1	11	27.5	23.9	25.7	11	11.7	14.2	12.95	11	14.4	17.1	15.75
12	17.4	19.9	18.65	12	29.5	25.7	27.6	12	13.9	15.4	14.65	12	14.6	19.2	16.9
13	19	21.2	20.1	13	30.1	25.5	27.8	13	13.6	15.3	14.45	13	15.7	19.4	17.55
14	18.8	22.3	20.55	14	30.5	24.4	27.45	14	14	15.5	14.75	14	17	19.3	18.15
15	18.9	22.2	20.55	15	32.2	26.5	29.35	15	15.8	17.2	16.5	15	17.4	19	18.2
16	19	23	21	16	30.1	25.8	27.95	16	15.7	16.3	16	16	17.8	20.4	19.1
17	20.3	23	21.65	17	30.7	25.9	28.3	17	15.7	17	16.35	17	17	19.8	18.4
18	20.9	22.8	21.85	18	29.8	25.4	27.6	18	15.7	19.9	17.8	18	17.5	19.2	18.35
19	20.8	23.4	22.1	19	30.3	24.4	27.35	19	16.8	20.2	18.5	19	10.9	12.4	11.65
20	20.5	22.7	21.6	20	27.6	23.7	25.65	20	20.7	21.3	21	20	11.9	12.8	12.35
21	19.3	21.9	20.6	21	29.4	24.9	27.15	21	20.2	23.3	21.75	21	10.1	12.6	11.35
22	21	22.2	21.6	22	30.9	24.6	27.75	22	20.3	21.8	21.05	22	10.5	12.5	11.5
23	19.1	21.3	20.2	23	29.1	25.1	27.1	23	18.9	21	19.95	23	10.2	12.5	11.35
24	18.3	20.2	19.25	24	29.2	24	26.6	24	17.8	20.1	18.95	24	9.8	12.1	10.95

25	18	21.2	19.6	25	26.9	23.4	25.15	25	18	21	19.5	25	10.1	11.5	10.8
26	19	21.5	20.25	26	28.6	24.6	26.6	26	17	21.2	19.1	26	8.8	11.3	10.05
27	19	20	19.5	27	28	23.3	25.65	27	16	19.1	17.55	27	8.4	10.5	9.45
28	18	20	19	28	26.5	23.2	24.85	28	15.5	19.4	17.45	28	8.1	9.7	8.9
29	17.9	19.7	18.8	29	26	21.4	23.7	29	15	20.1	17.55	29	7.8	9	8.4
30	18.9	19	18.95	30	25.6	21.8	23.7	30	16.8	18.5	17.65	30	6.5	9.6	8.05

討論六數據

2222	保留率		3904	保留率		9014	保留率		9011	保留率	
15	20.55	1	15	29.35	1	15	16.5	1	15	18.2	1
16	21	1.021898	16	27.95	0.9523	16	16	0.969697	16	19.1	1.049451
17	21.65	1.053528	17	28.3	0.964225	17	16.35	0.990909	17	18.4	1.010989
18	21.85	1.06326	18	27.6	0.940375	18	17.8	1.078788	18	18.35	1.008242
19	22.1	1.075426	19	27.35	0.931857	19	18.5	1.121212	19	11.65	0.64011
20	21.6	1.051095	20	25.65	0.873935	20	21	1.272727	20	12.35	0.678571
21	20.6	1.002433	21	27.15	0.925043	21	21.75	1.318182	21	11.35	0.623626
22	21.6	1.051095	22	27.75	0.945486	22	21.05	1.275758	22	11.5	0.631868
23	20.2	0.982968	23	27.1	0.923339	23	19.95	1.209091	23	11.35	0.623626
24	19.25	0.93674	24	26.6	0.906303	24	18.95	1.148485	24	10.95	0.601648
25	19.6	0.953771	25	25.15	0.856899	25	19.5	1.181818	25	10.8	0.593407
26	20.25	0.985401	26	26.6	0.906303	26	19.1	1.157576	26	10.05	0.552198
27	19.5	0.948905	27	25.65	0.873935	27	17.55	1.063636	27	9.45	0.519231
28	19	0.924574	28	24.85	0.846678	28	17.45	1.057576	28	8.9	0.489011
29	18.8	0.914842	29	23.7	0.807496	29	17.55	1.063636	29	8.4	0.461538
30	18.95	0.922141	30	23.7	0.807496	30	17.65	1.069697	30	8.05	0.442308

討論七、討論八數據

垂直高度	3.8 cm	7.0 cm	提升率	3 cm 保留率	7 cm 保留率
0.0000	0.0000	0.0000	-	0.0000	0.0000
1.0000	0.0000	0.0000	-	0.0000	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000	-	0.0000	0.0000
3.0000	0.0000	0.0000	-	0.0000	0.0000
4.0000	0.0000	0.0000	-	0.0000	0.0000
5.0000	5.2000	10.8500	2.0865	0.3260	0.5280
6.0000	5.3500	12.1000	2.2617	0.3354	0.5888
7.0000	6.7500	13.3500	1.9778	0.4232	0.6496
8.0000	8.1000	15.1000	1.8642	0.5078	0.7348
9.0000	8.4500	16.5500	1.9586	0.5298	0.8054
10.0000	10.5000	17.1000	1.6286	0.6583	0.8321
11.0000	11.3000	18.1000	1.6018	0.7085	0.8808
12.0000	14.0500	18.6500	1.3274	0.8809	0.9075
13.0000	14.4000	20.1000	1.3958	0.9028	0.9781
14.0000	14.8000	20.5500	1.3885	0.9279	1.0000
15.0000	15.9500	20.5500	1.2884	1.0000	1.0000

16.0000	16.2000	21.0000	1.2963	1.0157	1.0219
17.0000	16.7500	21.6500	1.2925	1.0502	1.0535
18.0000	16.3500	21.8500	1.3364	1.0251	1.0633
19.0000	16.0000	22.1000	1.3813	1.0031	1.0754
20.0000	16.6000	21.6000	1.3012	1.0408	1.0511
21.0000	16.2000	20.6000	1.2716	1.0157	1.0024
22.0000	16.2500	21.6000	1.3292	1.0188	1.0511
23.0000	16.0500	20.2000	1.2586	1.0063	0.9830
24.0000	16.3000	19.2500	1.1810	1.0219	0.9367
25.0000	15.3000	19.6000	1.2810	0.9592	0.9538
26.0000	14.8500	20.2500	1.3636	0.9310	0.9854
27.0000	14.3000	19.5000	1.3636	0.8966	0.9489
28.0000	13.9500	19.0000	1.3620	0.8746	0.9246
29.0000	13.6000	18.8000	1.3824	0.8527	0.9148
30.0000	12.1500	18.9500	1.5597	0.7618	0.9221

相對高度	7.5 cm	15.0 cm	提升率	3 cm 保留率	7 cm 保留率
0.0000	0.0000	0.0000	-	0.0000	0.0000
0.1250	0.0000	1.9500	-	0.0000	0.0949
0.2500	2.8000	7.9000	2.8214	0.3862	0.3844
0.3750	4.2000	12.1000	2.8810	0.5793	0.5888
0.5000	5.2500	15.1000	2.8762	0.7241	0.7348
0.6250	5.9000	17.1000	2.8983	0.8138	0.8321
0.8750	6.3000	18.6500	2.9603	0.8690	0.9075
1.0000	7.2500	20.5500	2.8345	1.0000	1.0000
1.1250	7.9500	21.0000	2.6415	1.0966	1.0219
1.2500	8.7000	21.8500	2.5115	1.2000	1.0633
1.3750	9.6500	21.6000	2.2383	1.3310	1.0511
1.5000	9.1500	21.6000	2.3607	1.2621	1.0511
1.6250	9.0000	19.2500	2.1389	1.2414	0.9367
1.7500	8.8500	20.2500	2.2881	1.2207	0.9854
1.8750	8.6000	19.0000	2.2093	1.1862	0.9246
2.0000	7.9500	18.9500	2.3836	1.0966	0.9221

直徑 7cm 管長 7.5cm

2222	往前	往後	平均	3904	往前	往後	平均	9014	往前	往後	平均	9011	往前	往後	平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
2	2.3	3.3	2.8	2	5.8	7.7	6.75	2	5.3	8.4	6.85	2	1.7	2.8	2.25
3	3.7	6	4.85	3	5.7	7.9	6.8	3	6.3	8.5	7.4	3	2.2	3.5	2.85
4	5	5.5	5.25	4	6.4	8	7.2	4	5.7	7.9	6.8	4	2.8	3.6	3.2
5	4.5	6.5	5.5	5	6.5	7.5	7	5	7.5	8.2	7.85	5	3.4	4.5	3.95
6	5.6	7	6.3	6	7.2	8.4	7.8	6	6.7	8.6	7.65	6	4.1	5.5	4.8
7	6.5	8	7.25	7	7.6	9	8.3	7	6.8	8.8	7.8	7	4	5.9	4.95

8	7.2	8.7	7.95	8	8.8	10	9.4	8	6.5	8.7	7.6	8	4.8	6.1	5.45
9	7.3	8	7.65	9	9.2	11	10.1	9	7.8	9.6	8.7	9	5	6.9	5.95
10	8.7	10.6	9.65	10	10	11.1	10.55	10	7.5	9.4	8.45	10	5.2	7	6.1
11	8.3	10	9.15	11	10.2	11.9	11.05	11	7.6	10.3	8.95	11	5.5	7	6.25
12	8.3	9.7	9	12	9.8	11.8	10.8	12	7.4	9.8	8.6	12	4.9	7	5.95
13	7.9	9.8	8.85	13	10.5	11.8	11.15	13	7.2	8.7	7.95	13	4.8	6.5	5.65
14	7.6	9.6	8.6	14	10.5	11.6	11.05	14	6.6	8	7.3	14	4.1	6.4	5.25
15	7.1	8.8	7.95	15	9.3	11.2	10.25	15	6	8.3	7.15	15	3.6	5.2	4.4

直徑 3.8Ccm 管長 15cm

2222	往前	往後	平均	3904	往前	往後	平均	9014	往前	往後	平均	9011	往前	往後	平均
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	
3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0
4	0	0	0	4	0	0	0	4	2.1	4.8	3.45	4	0	0	0
5	2.7	7.7	5.2	5	2.5	12.3	7.4	5	2.8	5.2	4	5	0	0	0
6	4	6.7	5.35	6	2.2	16.2	9.2	6	3.8	6.3	5.05	6	0	0	0
7	5	8.5	6.75	7	3.4	17.3	10.35	7	3.6	6.6	5.1	7	2.8	4.4	3.6
8	6.7	9.5	8.1	8	3.1	18.6	10.85	8	4.6	7.1	5.85	8	3.7	4.2	3.95
9	6.9	10	8.45	9	9.8	14.7	12.25	9	5.4	7.8	6.6	9	4.8	5.6	5.2
10	9	12	10.5	10	11.5	14.9	13.2	10	6.9	9.7	8.3	10	5.4	6.2	5.8
11	10.1	12.5	11.3	11	12.7	15.8	14.25	11	7.8	10.5	9.15	11	6.1	7.3	6.7
12	13.3	14.8	14.05	12	13.5	17.4	15.45	12	9	11.5	10.25	12	6.6	8.4	7.5
13	13.4	15.4	14.4	13	14	16.8	15.4	13	8.8	11.4	10.1	13	7	8.8	7.9
14	13.8	15.8	14.8	14	14.3	17.4	15.85	14	9.8	12.6	11.2	14	6.8	9.3	8.05
15	14.3	17.6	15.95	15	14.9	17	15.95	15	9.7	12.3	11	15	7.2	9.6	8.4
16	15.1	17.3	16.2	16	15	17.3	16.15	16	10	12	11	16	7.4	9.5	8.45
17	15.7	17.8	16.75	17	15.3	18.4	16.85	17	10.2	12.5	11.35	17	7.3	9.2	8.25
18	15.3	17.4	16.35	18	16.7	18.9	17.8	18	9.8	12.5	11.15	18	7.8	9.2	8.5
19	15.2	16.8	16	19	16.4	19	17.7	19	9.9	12.5	11.2	19	7.5	9.8	8.65
20	16.1	17.1	16.6	20	17	18.7	17.85	20	9.8	11.2	10.5	20	7.2	9.6	8.4
21	15.2	17.2	16.2	21	16	20.2	18.1	21	10	12.3	11.15	21	6.8	9.4	8.1
22	15.7	16.8	16.25	22	17.1	20.6	18.85	22	9.7	12.2	10.95	22	6.4	9.7	8.05
23	14.8	17.3	16.05	23	16.8	20.2	18.5	23	10	11.6	10.8	23	6.4	10.5	8.45
24	15.6	17	16.3	24	15.7	19.7	17.7	24	9.4	12.8	11.1	24	5.7	8.6	7.15
25	14.4	16.2	15.3	25	16.6	19.4	18	25	8.8	12	10.4	25	5.8	7.8	6.8
26	13.7	16	14.85	26	17.7	20.8	19.25	26	8	10.9	9.45	26	5.6	7.5	6.55
27	13.4	15.2	14.3	27	17.2	19.3	18.25	27	8.5	12.2	10.35	27	5.5	7.3	6.4
28	13.1	14.8	13.95	28	16.1	19.7	17.9	28	8.7	12.3	10.5	28	4.8	6.7	5.75
29	13.4	13.8	13.6	29	15.4	17.8	16.6	29	8.3	11.1	9.7	29	3.8	5.8	4.8
30	11.5	12.8	12.15	30	15.8	18.3	17.05	30	7.8	9.5	8.65	30	3	4.6	3.8

討論九數據

	7.5 CM	15 CM	30 CM
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	4	10.8	28.1
4	4.9	12.5	33.7
5	6.9	15.2	39.6
6	7.2	16	42.3
7	8.5	16.4	41
8	9.5	17.8	42.6
9	10.3	18.5	42.9
10	11	19.5	44.1
11	12.3	18.9	45.4
12	11.3	18	44.3

討論十數據

2222

直徑 7cm
管長 7.5cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	8.2	2.8
4	0	11.1	3
5	0	14.3	5.6
6	0	16	6
7	0	18	8.5
8	0	19.4	9.5
9	0	21.3	10.3
10	0	22.5	11

3904

直徑 7 cm
管長 7.5 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	0
3	3	9.9	8.6
4	4	10.6	10.4
5	5	12.1	12.6
6	6	13.2	14.7
7	7	14.1	17.3
8	8	16.1	18.7
9	9	17.6	20.6
10	10	19.7	20.8

9014

直徑 7 cm
管長 7.5 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	0
3	3	7.1	8
4	4	9.2	10.4
5	5	9.3	11.6
6	6	10	12.6
7	7	10.2	11.8
8	8	8.7	12.3
9	9	8.6	11.4
10	10	8.5	11.3

9011

直徑 7 cm
管長 7.5 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	3.7
3	3	0	5.7
4	4	0	6.9
5	5	0	7.9
6	6	0	8.8
7	7	0	9.3
8	8	0	10
9	9	0	11.7
10	10	0	12.3

直徑 3.8 cm
管長 15.0 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	7.2	8.3	7.5
4	9.7	10.5	10
5	11.1	14	12.3
6	12.2	19.5	13.8
7	13.4	19.5	17
8	15.3	22	17.6

直徑 3.8 cm
管長 15 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	5
3	3	6.5	9.3
4	4	8.5	12.6
5	5	9.7	15.3
6	6	10	18.8
7	7	11.3	21
8	8	12.5	23

直徑 3.8 cm
管長 15 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	0
3	3	10	6.4
4	4	10.8	8.8
5	5	11.1	9.3
6	6	11.5	10
7	7	11.2	10
8	8	10.9	9.7

直徑 3.8 cm
管長 15 cm

電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0
1	1	0	0
2	2	0	0
3	3	10	6.4
4	4	10.8	8.8
5	5	11.1	9.3
6	6	11.5	10
7	7	11.2	10
8	8	10.9	9.7

直徑 7 cm 管長 15 cm				直徑 7 cm 管長 15 cm				直徑 7 cm 管長 15 cm				直徑 7 cm 管長 15 cm			
電壓	1 圈	2 圈	3 圈	電壓	1 圈	2 圈	3 圈	電壓	1 圈	2 圈	3 圈	電壓	1 圈	2 圈	3 圈
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	7.3	0	2	0	7.3	0
3	16.5	13.9	0	3	5	12.9	11.8	3	13.2	14	8.1	3	13.2	14	8.1
4	22.8	22.9	12.5	4	6.5	17.8	15.9	4	13.5	17.8	14.6	4	13.5	17.8	14.6
5	26.9	29	15	5	7.5	21.4	20	5	14.6	20.4	16.5	5	14.6	20.4	16.5
6	30.7	31.5	18	6	9.7	24.9	22.8	6	14.8	20.9	16.9	6	14.8	20.9	16.9
7	32.7	35.2	15.3	7	10	23.9	24	7	13.7	20.4	15.3	7	13.7	20.4	15.3
8	36.1	37.6	16	8	10.9	26.6	26	8	10.9	21.2	14.7	8	10.9	21.2	14.7
9	39.3	38.5	18.5	9	12	27	26	9	10.9	20.2	14.2	9	10.9	20.2	14.2
10	43.5	40.2	19.5	10	12.5	26.4	25	10	9.5	18.6	15.4	10	9.5	18.6	15.4

討論十二數據

r	V	r	V	r	V
17.2	2000	42	73	70	38.8
17.3	1700	43	71	71	38.1
17.4	1400	44	69	72	37.6
17.5	1000	45	67	73	36.7
18	400	46	65	74	36.1
19	200	47	63	75	35.7
20	160	48	62	76	35.2
21	140	49	60	77	34.5
22	135	50	58	78	33.8
23	130	51	57	79	32.9
24	130	52	56	80	32.3
25	127	53	55	81	31.8
26	120	54	54	82	31.3
27	119	55	53	83	30.5
28	114	56	52	84	29.9
29	110	57	51		
30	106	58	50		
31	103	59	49		
32	99	60	48		
33	95	61	46		
34	92	62	45		
35	89	63	44		
36	87	64	43		
37	84	65	42		

38	81	66	41
39	79	67	40
40	77	68	39
41	75	69	39.5

【評語】 160020

作者自製簡化電路裝置，探討特斯拉線圈性質，並應用於無線傳電。作者在方法學與模型的建立雖有相當成熟的呈現，且實驗數據的歸納與分析能力也有一定的水準，然部分研究數據似有不符常理之處，宜再確認之。