

自製精良且簡易的特斯拉線圈
以衰減係數分析驗證其精密程度

摘要

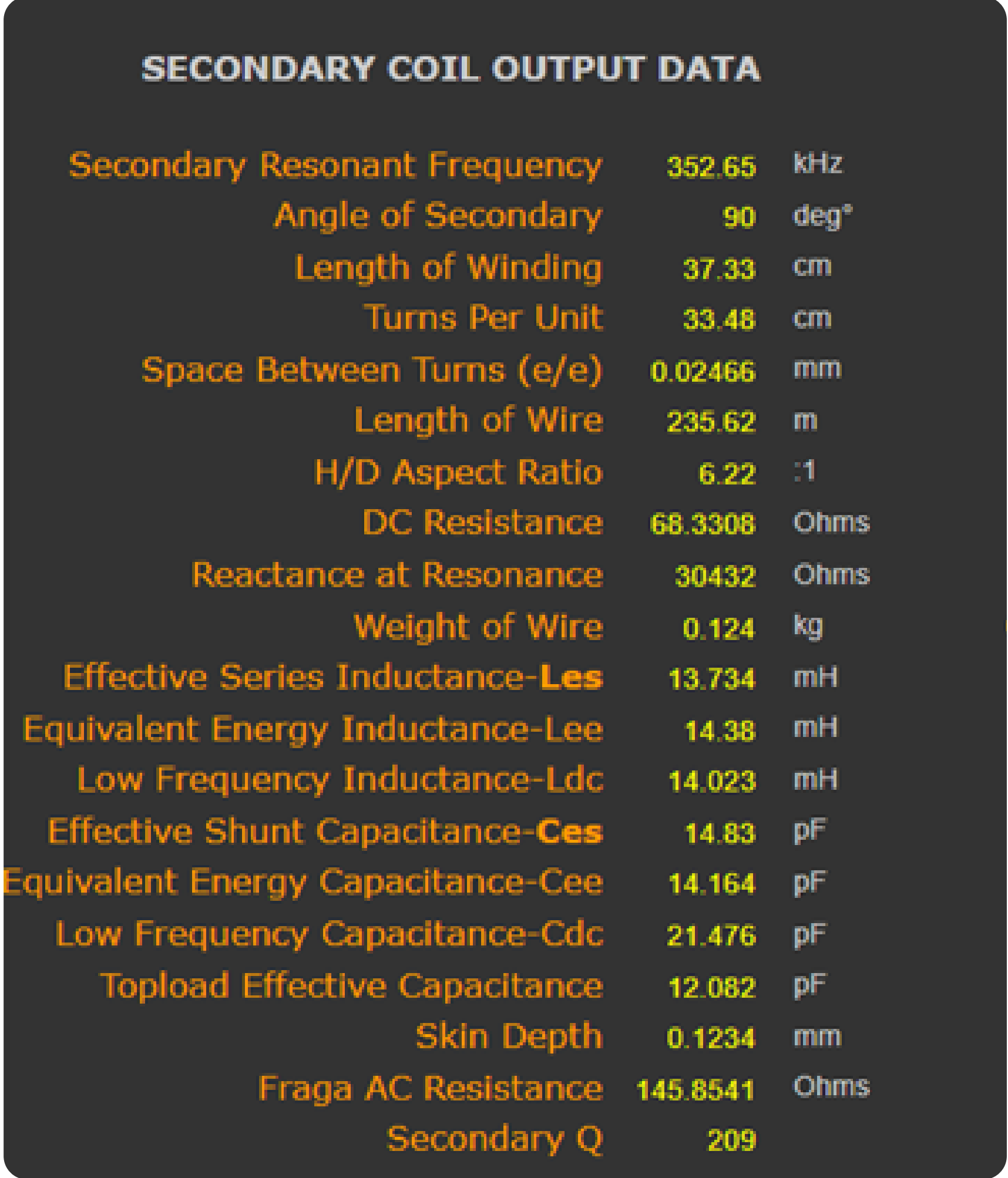
本研究的目的是為透過示波器量測特斯拉線圈所發出的電訊號，並以衰減係數來分析其精密度。研究者在開始接觸特斯拉線圈時，發現前人的研究設備不夠完善。因此在製作過程中特別使用線上模擬程式來進行理論值的模擬，注重於線圈架構和材料選擇上，並以此裝置發射電磁輻射，使用示波器加以確認其發出的頻率是否與理論值相吻合。最後，使用示波器量測不同距離處、電壓大小的阻尼正弦波脈衝波形，再依據其電壓值及距離畫出散佈圖，得到結果與輻射指數衰減係數的物理現象相吻合，也驗證了研究者設計的裝置與方法具有更好的精密性。

研究目的

- （一）了解特斯拉線圈相關數值與其運作時之影響
- （二）設計更好的設備與方法製作特斯拉線圈
- （三）實作特斯拉線圈電路與並設計驗證實驗設備精準性之實驗
- （四）探討接收線圈與特斯拉線圈距離對能量強度的影響
- （五）提出改善此研究的方法

研究過程與方法

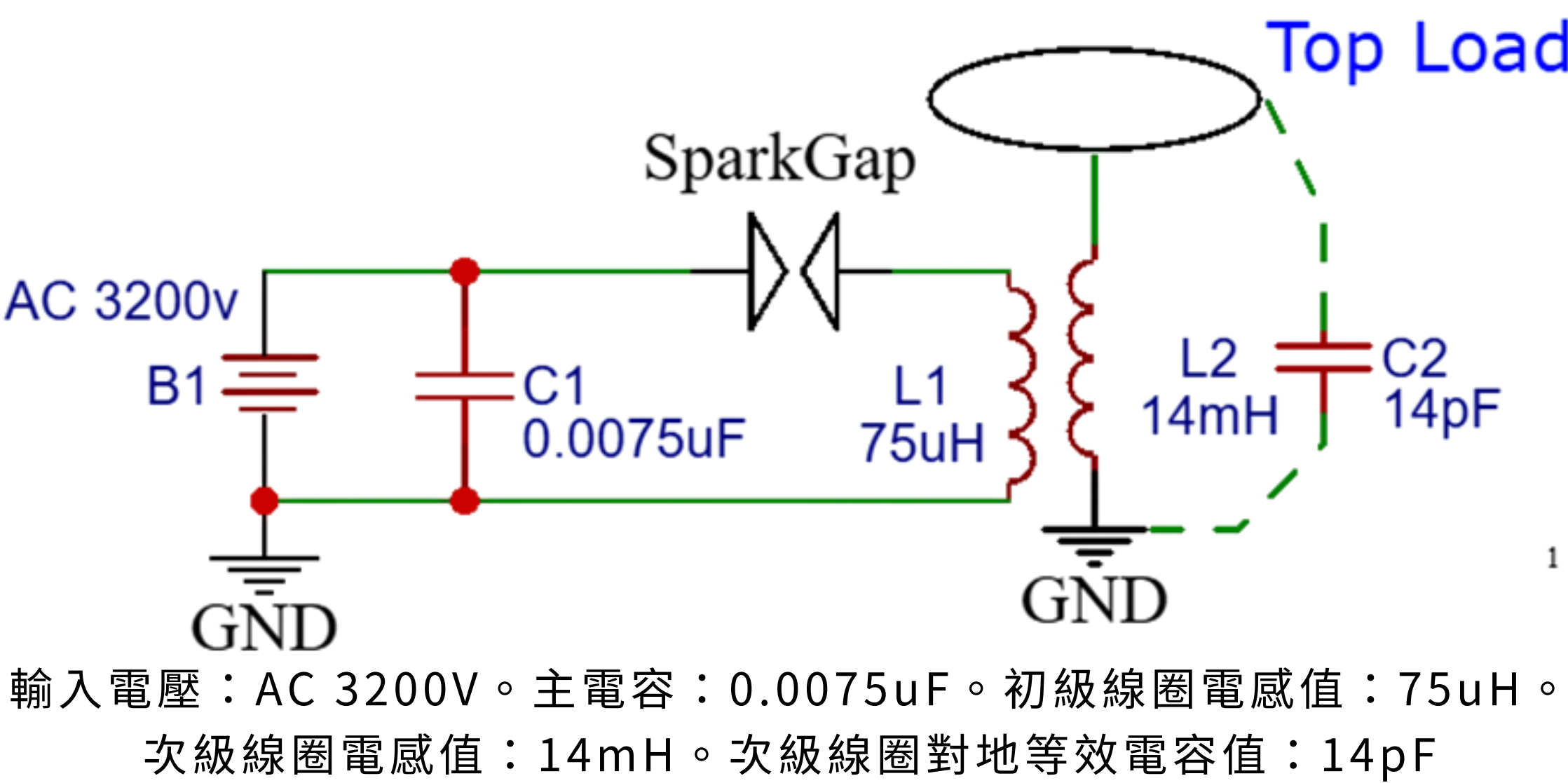
圖一、Java TC 模擬結果圖



設計、製作特斯拉線圈相關部件

- 1.應用線上工具 JavaTC 模擬分析特斯拉線圈各部件參數並繪製電路圖，如圖一&二。
- 2.籌備自製特斯拉線圈基本零件。
- 3.繞製初級線圈和次級線圈。
- 4.依照電路圖架設特斯拉線圈。

圖二、實驗裝置電路圖



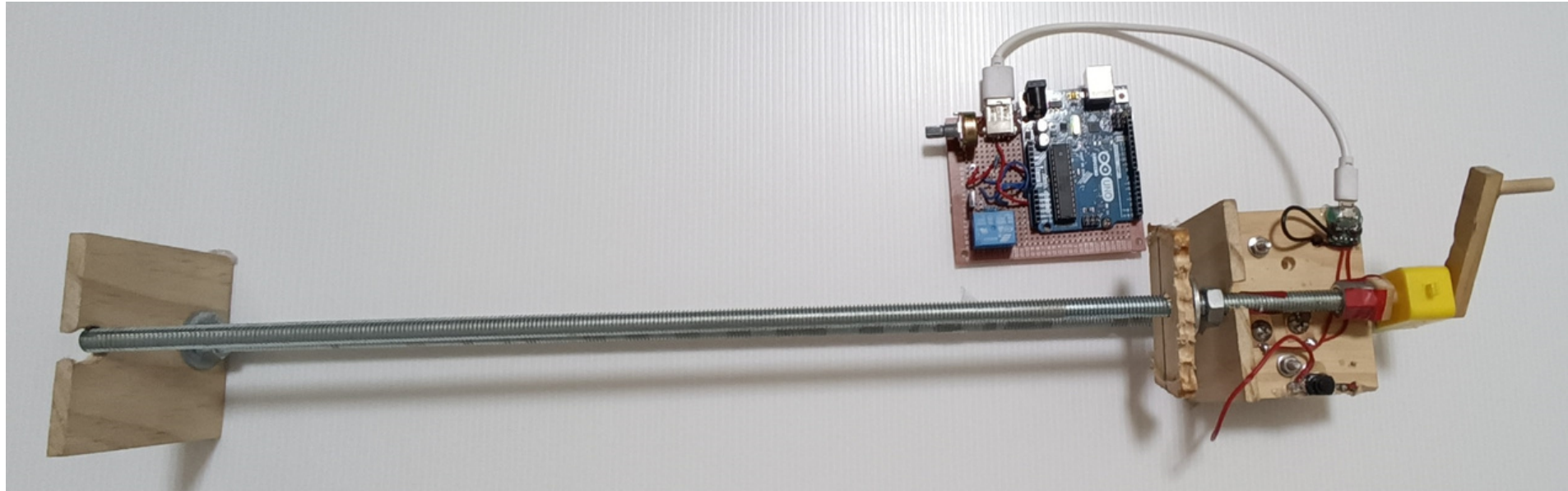
表一、本實驗與前人的實驗之差異性比較

比較項目	前人研究	本實驗
初級線圈設計	初級線圈沒有進行固定，在操作時容易產生鬆動而產生誤差。 (來源：林予瀾等人 (2021))	使用8片9*15cm的電路板垂直平均擺放，將漆包線穿過電路板上的孔洞，加強固定減少電感值的變動
次級線圈設計	在繞製次級線圈時，僅用膠帶固定出線兩端，且線圈表面沒有覆蓋其他保護措施。 (來源：高浩鈞 (2018))	使用自製繞線工具，可知道次級線圈的總圈數，並在纏繞完成後使用環氧樹脂將其表面進行覆蓋，可以提高耐電壓能力。
測試方法1	使用驗電筆進行電場範圍的量測，但未能直接測量輸出電壓與波形。 (來源：林予瀾等人 (2021))	1.使用示波器量測不同距離與不同電感值下的實際頻率，並計算其與理論值的誤差，以驗證系統的準確性。
測試方法2	透過整流電路對手機進行充電，可能受不同手機的充電協議影響，導致無法準確評估充電效率。 (來源：高浩鈞 (2018))	2.使用示波器量測不同距離與不同電感值下的電壓變化，並驗證測試結果與輻射線性衰減模型是否符合，確保能準確評估能量傳輸特性。

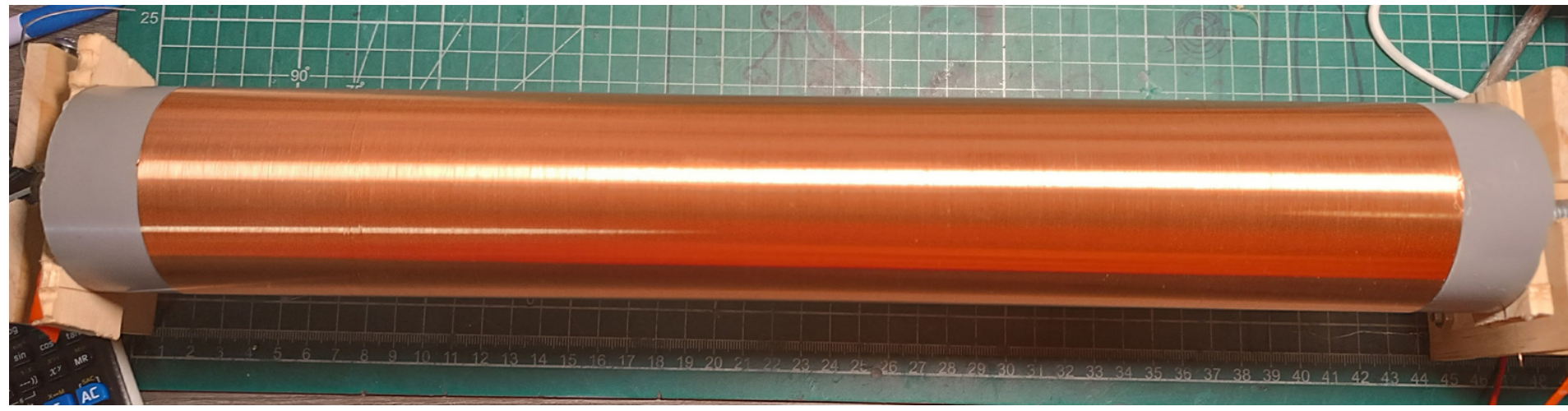
纏繞次級線圈

如（圖二）為 ARDUINO 自動繞線機，可確保線圈繞製均勻，繞製完成後，使用環氧樹脂將其表面進行保護絕緣處理，成品如（圖三）。

圖二、次級線圈繞線器



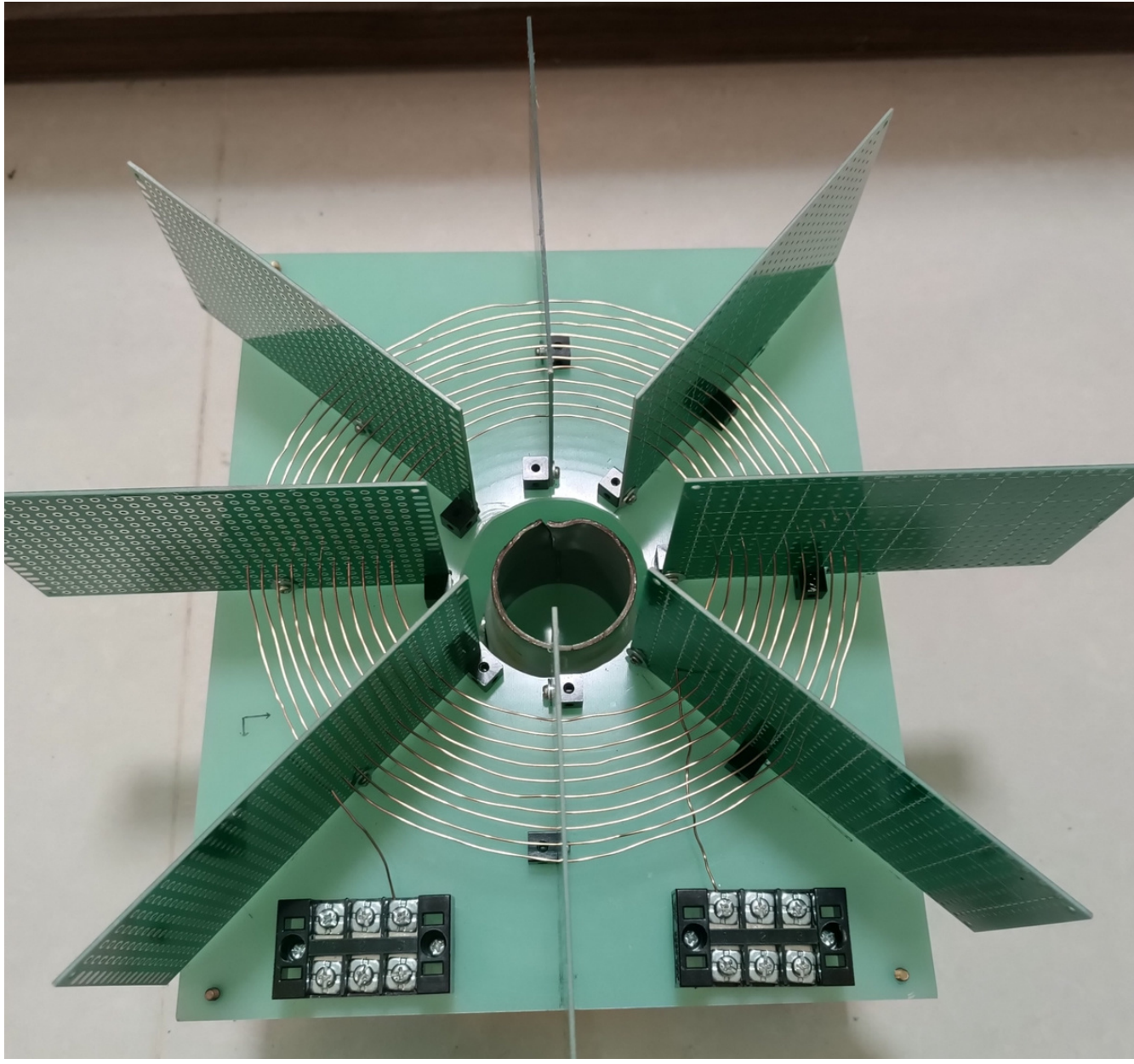
圖三、次級線圈成品



繞製初級線圈

將八片9*15cm電路板以八等分固定在玻纖板上，固定好後進行繞線，製作初級線圈，成品如圖四。

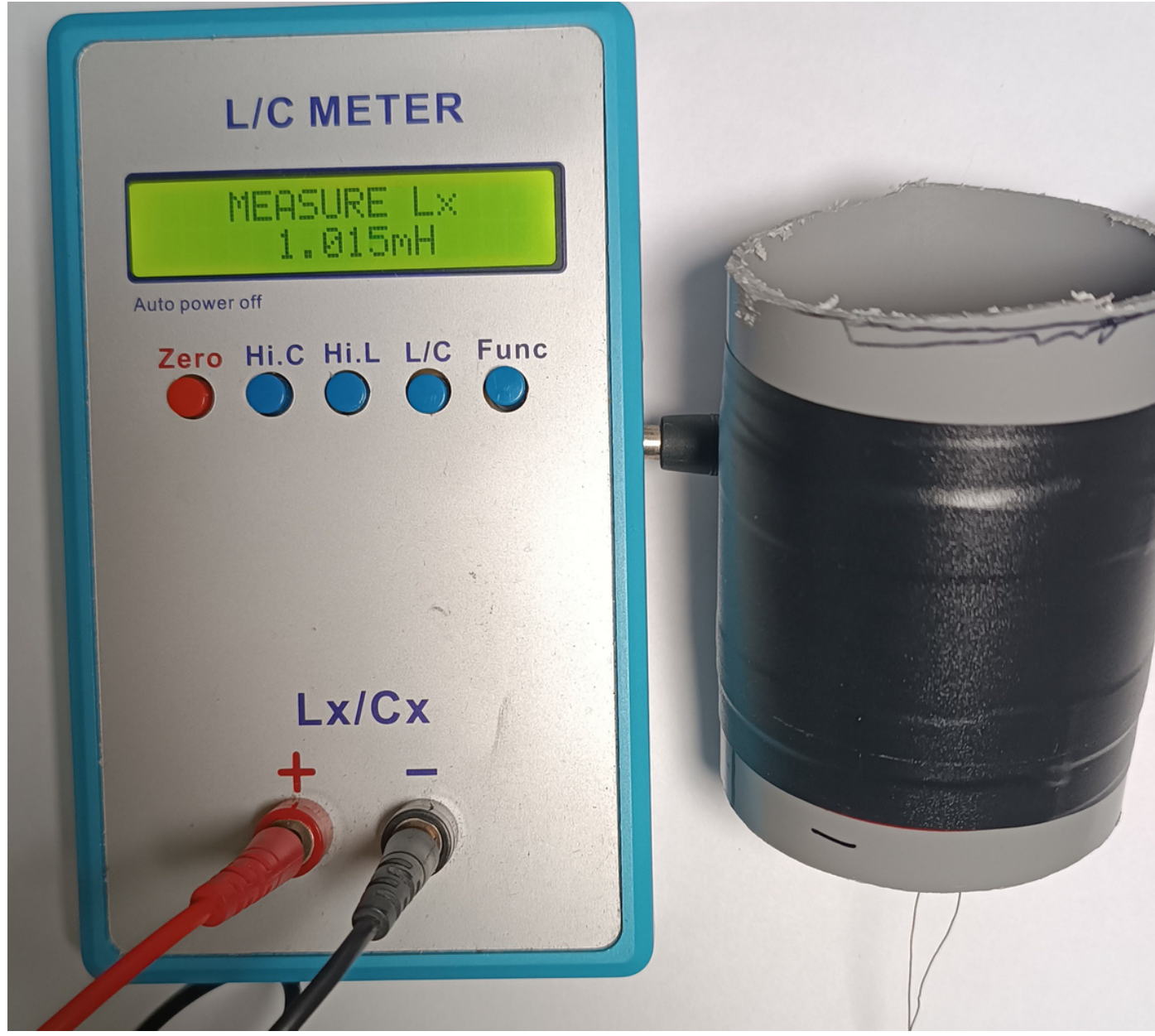
圖四、初級線圈成品



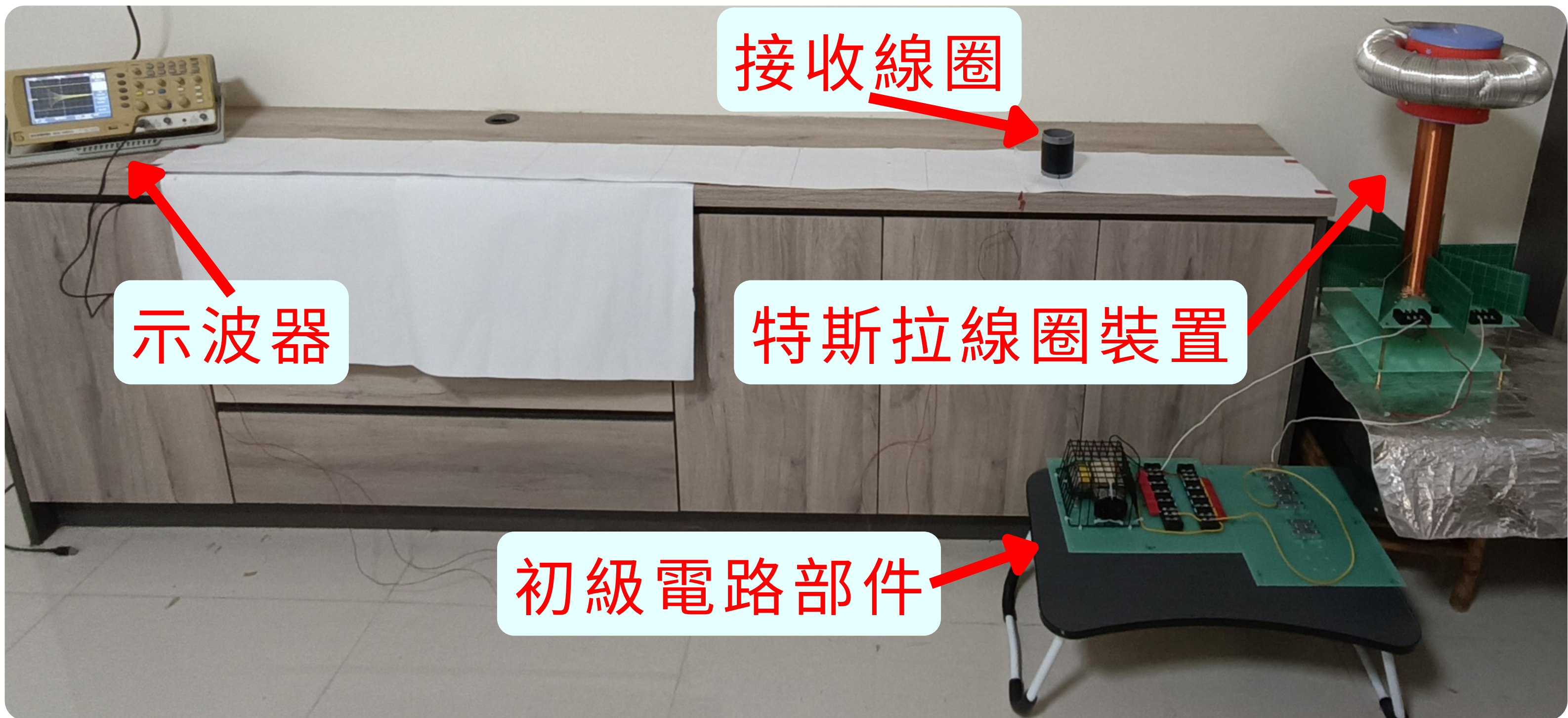
測量接收線圈

製作方式雷同於次級線圈，先使用螺線管電感公式進行計算，再用LC Meter進行測量。

圖五、測量實際接收線圈電感值



圖六、接收線圈連接與示波器設置



儀器擺設

與示波器、探棒擺放位置注意事項

- 1.將示波器與探棒擺放在整個系統的最後端後，以避免電磁干擾。
- 2.使用紙張標記固定測量點的距離，方便記錄感應電壓變化。

實驗一、能量無線傳輸強度與兩線圈距離趨勢之測量（直線衰減係數）

高壓電阻與接收線圈並聯後，將探棒並聯於高壓電阻

放置接收線圈
(從 50 cm 開始)

開啟特斯拉線圈電源
設定示波器調整電壓刻度至滿版

以一般模式觀察波形
(TIME/DIV = 100μs)

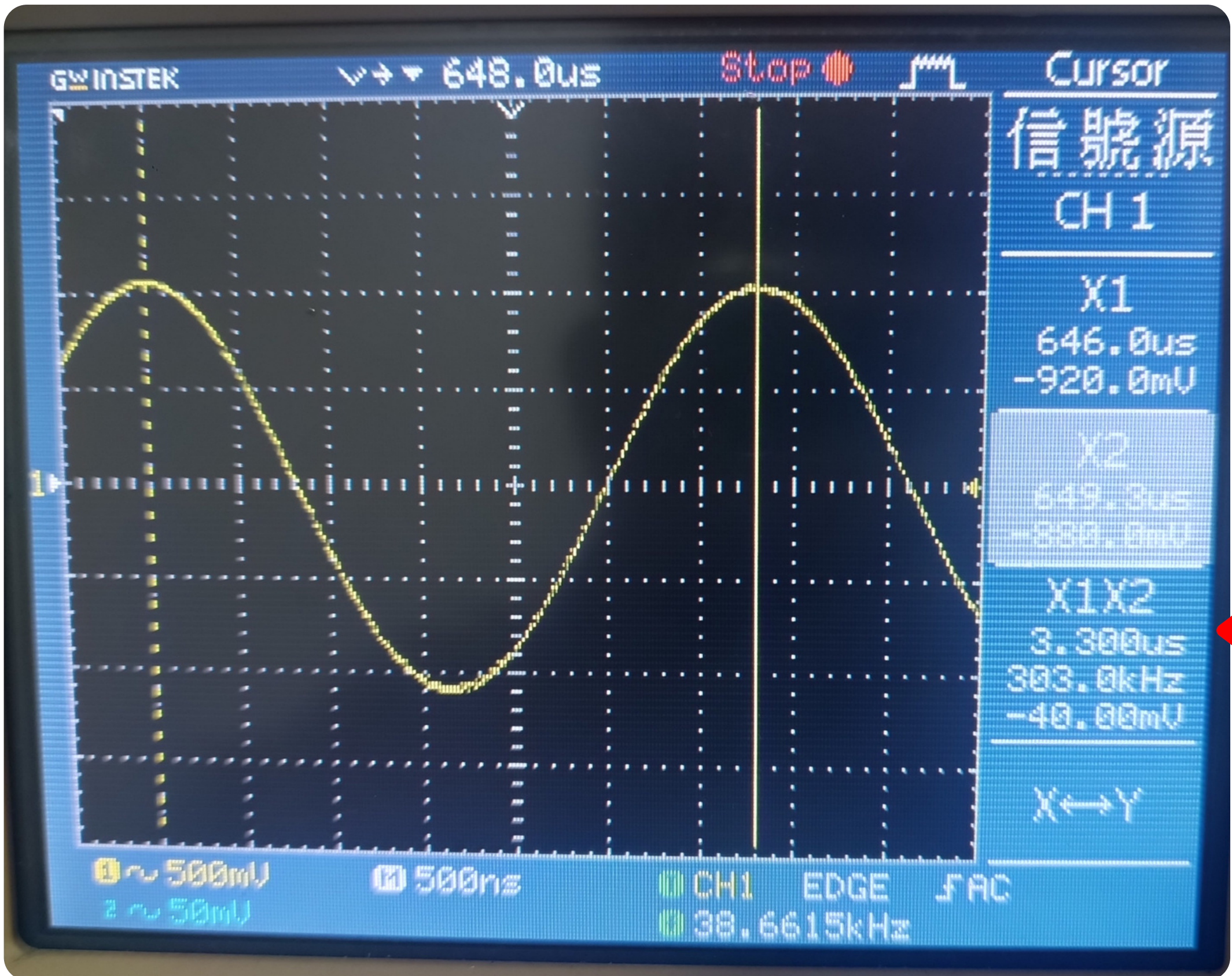
切換至峰值檢測模式，再放大圖形

利用示波器游標測量功能，讀取電壓峰值並記錄

兩線圈間距增加 25 cm，重複前述步驟直至 200 cm

數據紀錄與分析
輸入 Excel，繪製圖表並進行回歸分析，計算衰減係數

圖七、正弦波波形



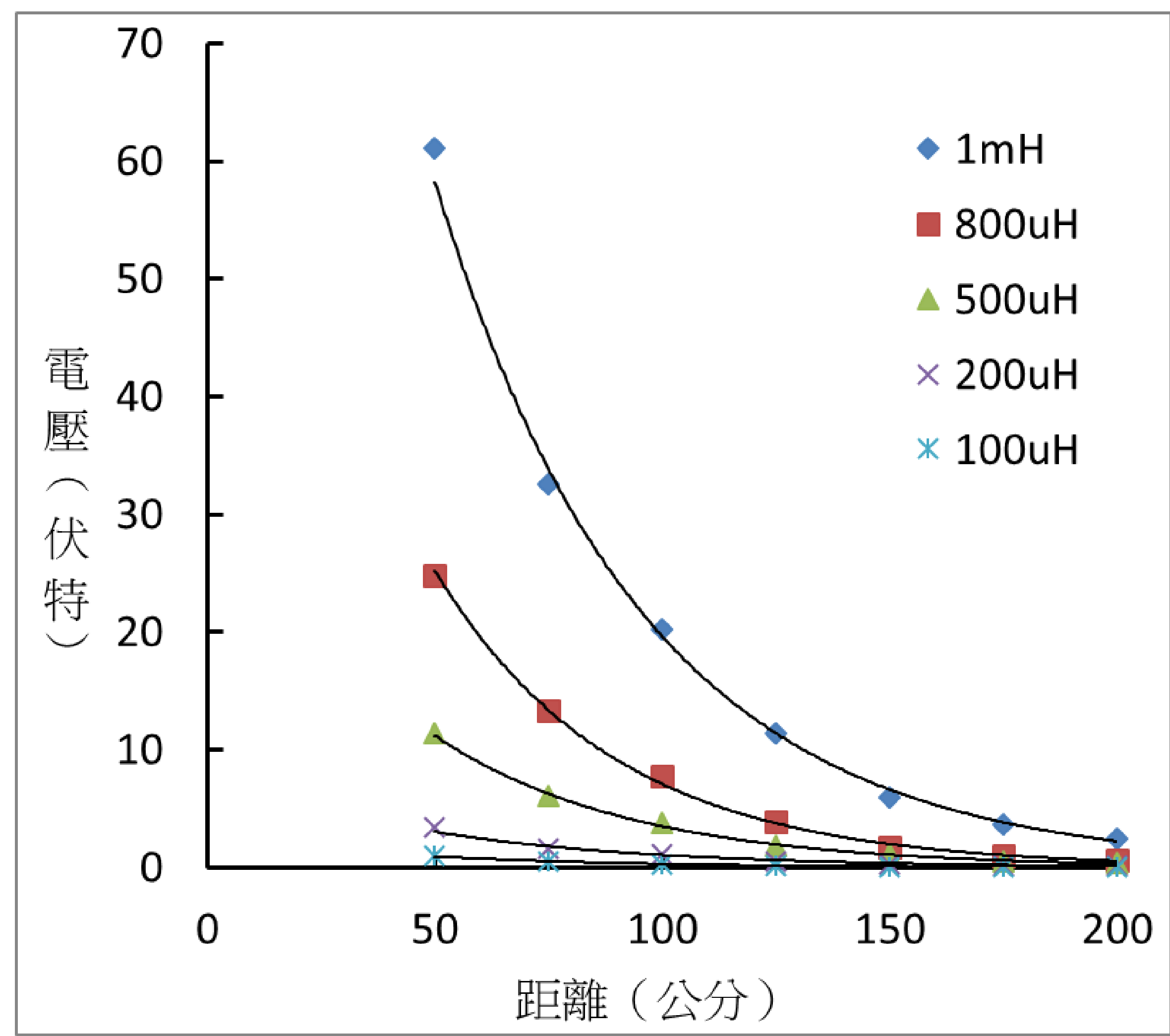
實驗二、驗證裝置震盪頻率與JAVATC的模擬是否相符

- 1.完成設備的組裝與架設，並在實驗中不再更動特斯拉線圈與環境
- 2.開啟特斯拉線圈並將示波器探棒接至接收線圈兩端，以一般模式觀察波形。
- 3.調整時基與電壓單位，直至可觀察到如圖七所示的正弦波波形。
- 4.透過示波器上方的量測功能，調整X軸檢測桿，量測波峰到波峰的時間間隔，即可推算出此波形的頻率。
- 5.我們將此頻率值與模擬工具 JAVATC 計算結果比對，驗證線圈震盪頻率的準確度。

實際頻率

研究結果

圖八、不同接收線圈感應之訊號電壓與兩線圈距離之趨勢關係



表二、不同接收線圈之能量傳輸趨勢方程式與直線衰減係數

電感值	趨勢方程式	直線衰減係數
1mH	$y = 172e^{-0.022x}$	0.022
800uH	$y = 89.6e^{-0.025x}$	0.025
500 uH	$y = 35.8e^{-0.023x}$	0.023
200 uH	$y = 35.8e^{-0.023x}$	0.023
100 uH	$y = 2.78e^{-0.022x}$	0.022

表三、不同接收線圈在不同線圈間距所得到的訊號頻率

	距離（cm）	50	75	100
訊號頻率（kHz）	1mH	302.28	301.94	300.88
	800uH	301.22	301.20	300.12
	500uH	301.96	302.70	299.78
	200uH	300.50	301.22	301.22
	100uH	301.94	302.68	298.32
	平均值	301.20 ± 0.30		

討論

一、 能量傳遞機制與電磁輻射驗證

在本實驗中，研究者原假設能量傳遞主要依靠磁場耦合，但實驗顯示接收訊號為「阻尼正弦波電磁脈衝」，表明傳遞機制以電磁輻射為主。透過頻率與衰減分析，結果顯示接收能量隨距離指數衰減，且頻率維持在共振範圍內，符合輻射衰減模型（Oshina & Spigulis, 2021），證明本研究設計的特斯拉線圈具備良好精密度並符合電磁輻射特性。

電磁輻射衰減模型之數學形式為： $I_z = I_0 e^{-\mu z}$

其中， I_z 為接收端的能量強度， I_0 為初始能量大小， μ 為線性衰減係數， z 為發射線圈與接收線圈的距離。其表示接收端與初始發射端之間的電磁輻射傳輸效能與距離呈現指數性關係，距離越遠，其傳輸效能越差，即得到的電訊號越小。

本研究中1mH的接收電感為例： $y = 172.54e^{-0.022x}$

本研究透過數據擬合，驗證接收訊號y與距離x之間符合指數衰減關係。其中，係數 172.54 代表兩線圈距離為零時的最大訊號，即能量接收上限；指數中的 0.022 為電磁輻射在大氣中傳播的線性衰減係數，與大氣對電磁波的吸收與散射相關。

二、 理論與實驗的諧振頻率比較

在本實驗中，特斯拉線圈的諧振頻率是影響感應電壓與電場強度的重要參數。我們透過JAVATCA模擬結果得知理論諧振頻率（圖一），並與實際測量頻率結果（表一）進行誤差分析，以評估本實驗精確性與可能影響實驗之因素。

JAVATC 模擬計算諧振頻率： 352.65kHz

本實驗測量諧振頻率： $301.20 \pm 0.30\text{ kHz}$

以下為研究者推測的可能因素：

- 寄生電容與雜散電感影響：理論計算時假設特斯拉線圈的等效電路完全由設計的電感與電容組成，然而實際電路中存在寄生電容與額外電感，這些因素皆會降低共振頻率。
- 測試環境影響：周圍牆壁與特斯拉線圈的距離都可能改變電場分布，進而影響諧振條件，使測量頻率與理論值不同。

結論

一、 特斯拉線圈主要的能量傳輸方式與限制

本研究發現，特斯拉線圈的能量傳遞主要以「電磁輻射」為主，測得訊號呈現「阻尼正弦波電磁脈衝」特徵。實驗結果顯示，無線能量傳輸受空氣吸收與散射影響顯著，接收能量隨距離增加呈指數性衰減。

二、 設備精良與數據一致性

本實驗結果符合輻射線性衰減模型且與文獻相符，五種不同電感值的接收線圈之實驗結果均符合此模型，衰減係數皆介於0.022至0.025之間，顯示**本實驗設備精密、運作穩定且易測量。**

三、 相較前人研究的改進

本研究透過示波器直接測量出能量的波形、頻率與電壓，並透過電路板固定初級線圈及自製繞線工具製作次級線圈，提高設備精度與穩定性。相較於前人在研究中以驗電筆或整流電路充電的測量方式，以及不穩定的線圈結構，**本研究方法可準確量化實驗數據並分析訊號特徵，大幅減少誤差因素。**使本實驗的研究結果更具有參考價值。

四、 研究限制與建議

本研究測得諧振頻率與理論值誤差為 14.59%，仍存在無法克服之寄生電容、雜散電感與環境的影響。建議測試環境避免金屬物件置於線圈附近造成干擾，並保持設備遠離牆面，以減少雜訊與頻率偏移影響測量結果。

參考文獻

- 尤恩博（2020）。無線充電之研究。〔碩士論文。國立雲林科技大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/8f43pm>。
- 李以文（2003）。電磁脈衝防護與抑制元件之探討。〔碩士論文。逢甲大學〕臺灣博碩士論文知識加值系統。 <https://hdl.handle.net/11296/4443mn>。
- 林予靜、蘇健勛、陳苡禎（2021）。An Easy Method to Discuss Properties of Simplified Solid-state Tesla Coil。2021年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。
- 高浩鈞（2018）。無線傳電「遠」又「多」－利用特斯拉線圈自製無線傳電系統。全國第 58 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- Oshina, I., & Spigulis, J. (2021). Beer-Lambert law for optical tissue diagnostics: current state of the art and the main limitations. Journal of biomedical optics, 26(10), 100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.26.10.100901>