

# 2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160031  
參展科別 物理與天文學  
作品名稱 各種導電物質於不同變因下之共振頻率的  
探討與運用  
得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師 戴仁欽

作者姓名 陳祈佑、林暉城

關鍵詞 共振、RLC 電路、導電

## 作者簡介



我們是林暉城和陳祈佑，目前就讀師大附中三年級。在數資班與物理專研的因緣際會下，我們成為隊友。研究的過程相處融洽，並且對物理有更深入的研究。此外，我們在各項競賽曾獲取佳績，舉凡清華盃化學競賽以及物理奧林匹亞初選等比賽，均有獲獎紀錄，在科學方面有著比同儕更深入的了解。

## 摘要

我們製作了一個金屬探測器。有別於一般固定頻率的操作方式，我們改變輸入探測器的電壓頻率，量測探測器的共振頻率。當我們改變金屬與探測器的距離，發現共振頻率會隨之改變。於是我們更進一步，藉由觀察輸入電壓與感應電壓之正反對稱性，精確測得共振頻率，並且探討各種導電物質的變因與共振頻率及感應電壓的關係。

## Abstract

We invented a metal detector. Unlike the common manipulation which fixes input frequency, we adjusted the input frequency and then measured the resonance frequency output from the detector. In our experiment, we found that the resonance frequency varied with the adjustments of the distance between the metal and the detector. Driven by our curiosity, we took a step further. With the method that measured the phase shift between the input wave and the output one, we not only could measure the resonance frequency accurately but also could discuss the relationship between resonance, output voltage and different variables of electrically conductive materials. To conclude, through our metal detector, we can measure the factors around us in a more precise and easier way.

## 壹、 研究動機

國中時學過電流生磁場和磁場生電流的原理後，就一直對變動的磁場可以產生電流這件事感到好奇。因此我們上網查閱相關資料，發現金屬探測器就是利用相關的知識來偵測金屬。當金屬出現在探測器的附近時，就會影響變動的磁場，進而影響到感應線圈的電流，所以可以利用感應電流突然的改變來偵測金屬。一般金屬探測器的變動磁場是固定頻率的，然而上高中物理課時老師提到共振頻率，我們便開始好奇金屬物體距離感應線圈的遠近，除了會影響感應電流的大小，還會影響到探測器的共振頻率嗎？所以我們想要改變金屬相對於感應線圈的位置來觀察共振頻率的變化；更進一步，我們想要知道改變金屬的狀態（如溫度），金屬探測器的共振頻率會如何變化？電解液也可以導電，因此我們也想探討電解液的酸鹼度如何影響金屬探測器的共振頻率。

## 貳、 研究目的

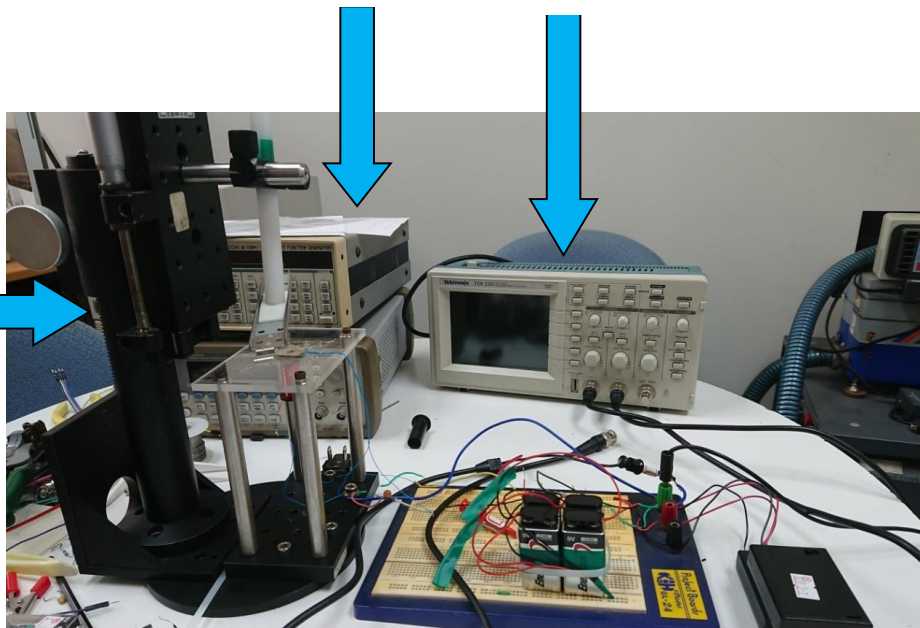
如果金屬探測器的共振頻率會隨金屬物體的距離而變化，並且我們可以很準確量出頻率的變化值，那麼金屬探測器不只可以偵測到金屬物體的存在，還可以準確量到金屬物體的距離，於是金屬探測器就變成一個測距儀。同樣的道理，只要溫度、離子濃度等變因使得金屬探測器的共振頻率產生足夠的變化，金屬探測器也可以變成溫度計及離子濃度計。我們想要知道，這些量計到底有多靈敏，精確度有多高？

## 參、 研究設備及器材

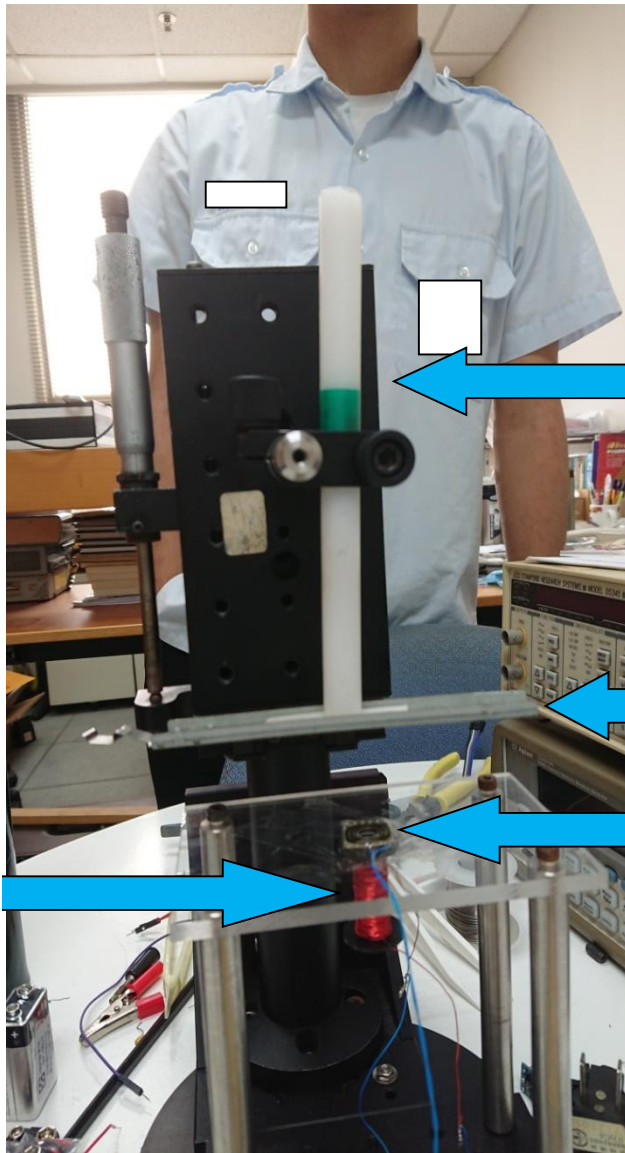
訊號產生器

示波器

金屬探測器



圖(一)、由訊號產生器產生交流電通至金屬探測器，另經由示波器觀測金屬探測器的感應電壓及相位差。



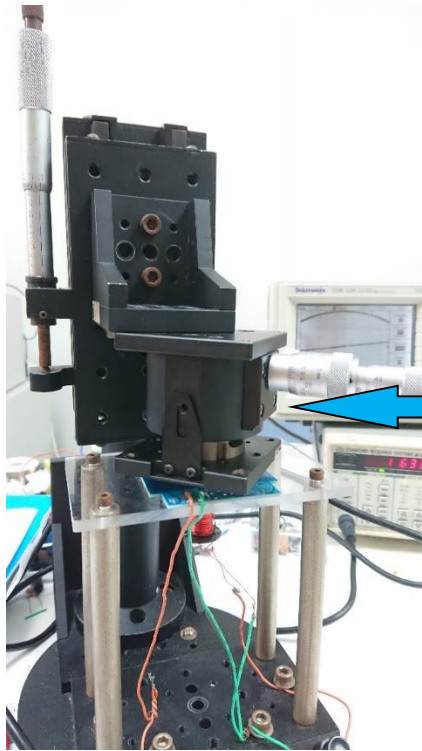
樣品座

待測金屬片

感應線圈

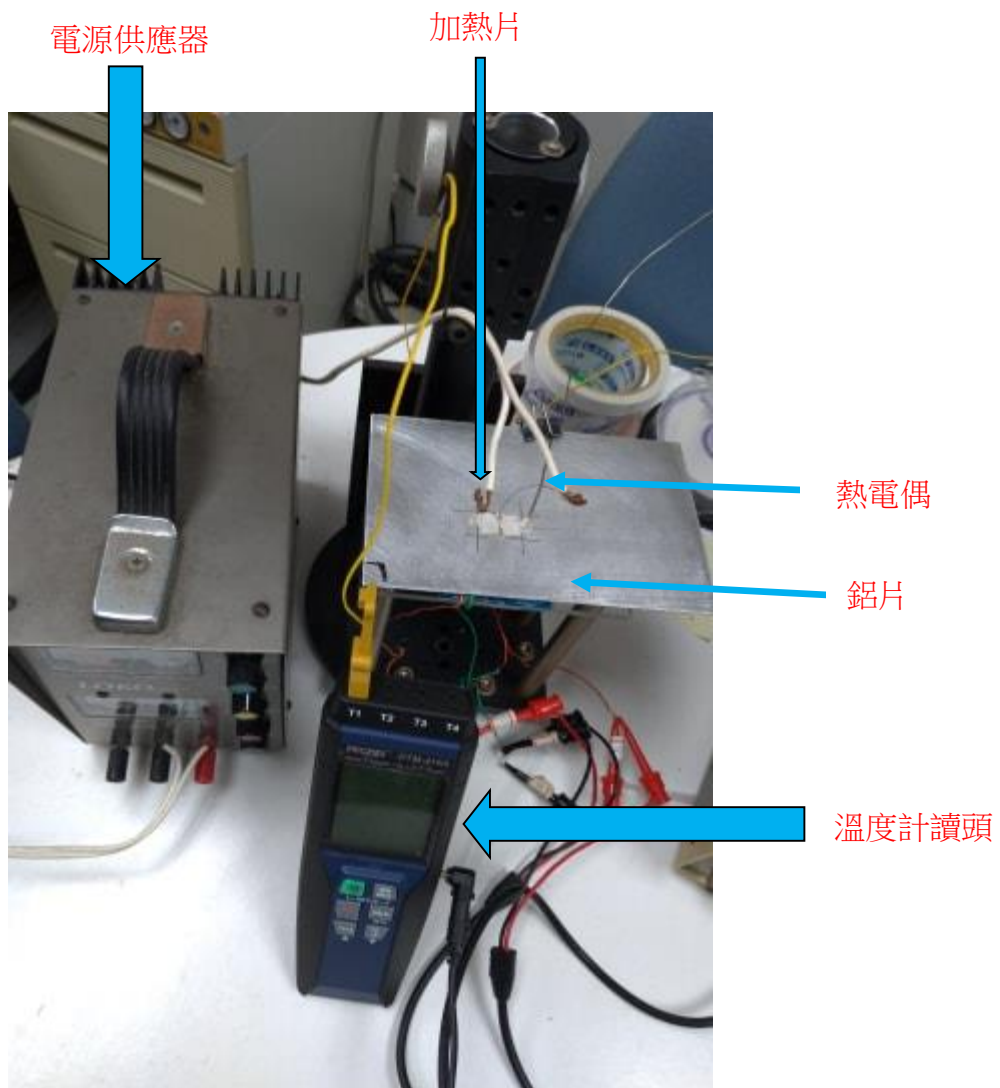
電磁鐵線圈

圖(二)、訊號產生器將交流電通入電磁鐵線圈後，感應線圈便會產生一感應電流。待測物放置於樣品座上，樣品可以藉由螺旋測微導桿改變樣品和感應線圈的距離。



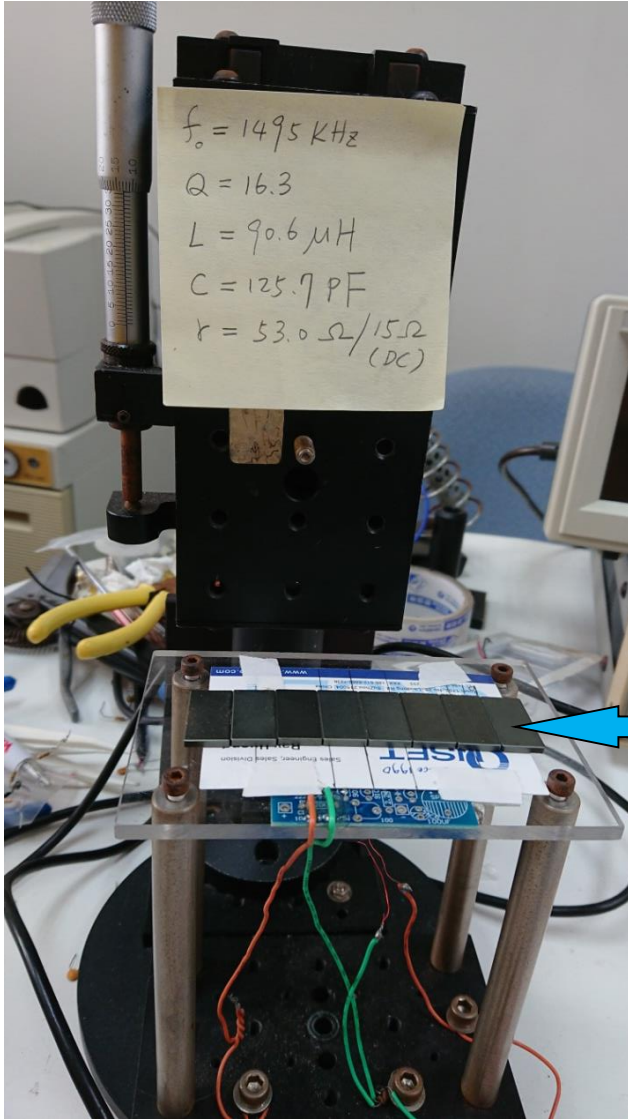
精密移動平台

圖(三)、於原金屬探測器上加裝精密移動平台，可精細調整樣品和感應線圈的距離至每格為  $0.5 \mu\text{m}$ 。



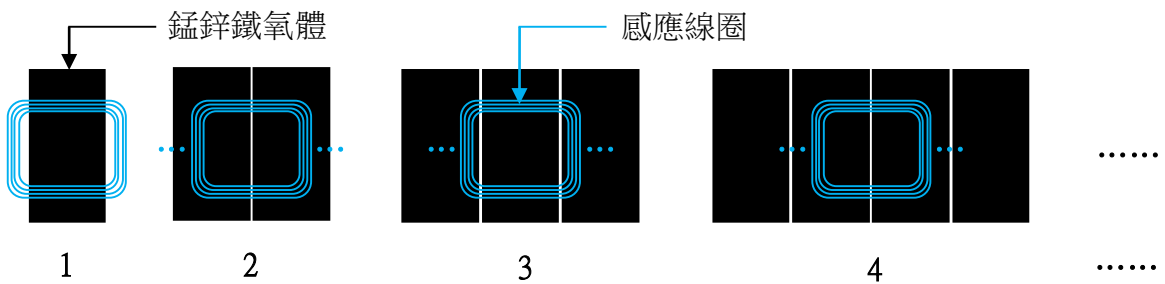
圖(四)、以銀膠將加熱片及熱電偶固定黏於金屬板，連接電源供應器以加熱金屬板，並連接溫度計觀測溫度。



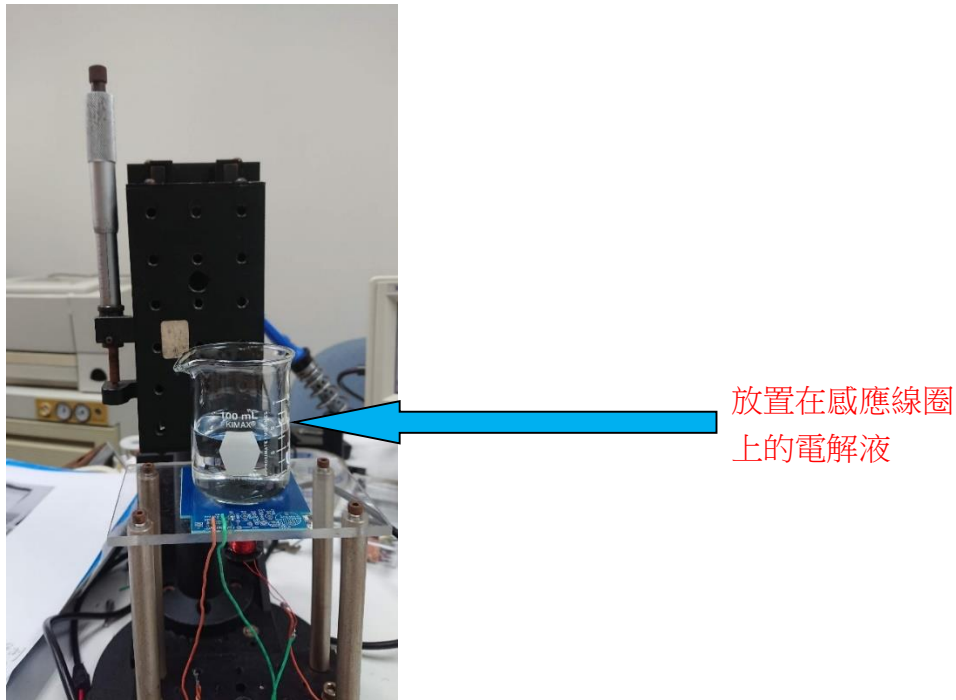


8 個橫向併排的  
錳鋅鐵氧體

圖(五)、圖為排列磁鐵(錳鋅鐵氧體)的實驗，以感應線圈的中線為中心，按照數目分別將磁鐵一左一右併排排列，如下示意圖。





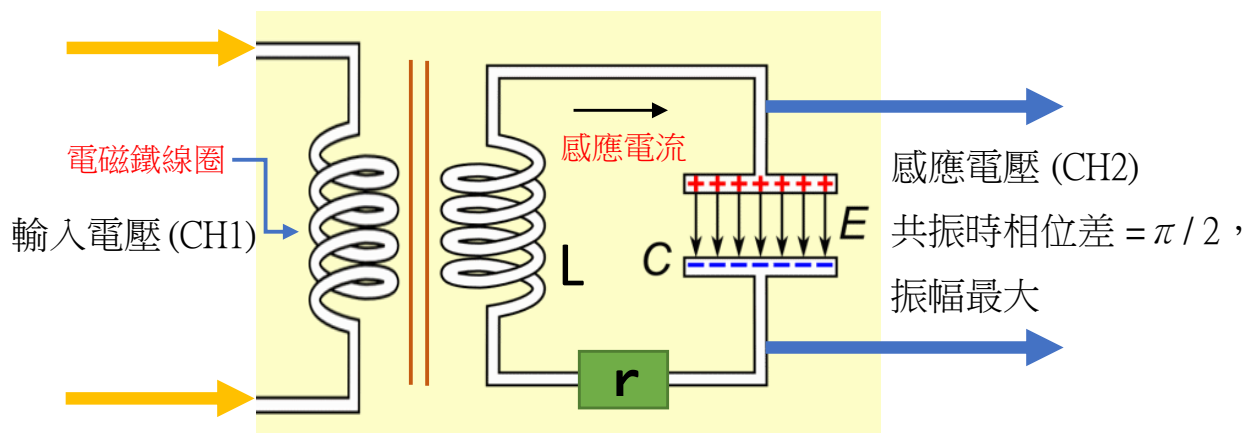


圖(六)、圖為電解液實驗，將特定濃度的溶液調配完成後放置如圖。

## 肆、 研究過程或方法

### 一、金屬探測器電路的分析

本實驗的金屬探測器由一電磁鐵和一感應線圈所組成，電磁鐵產生交流磁場，而感應線圈可視為一 RLC 電路。磁場的變動頻率 ( $\omega$ ) 會影響電感 (L) 及電容 (C) 的阻抗，當  $\omega L = 1/\omega C$  時，共振發生，電路中的阻抗有最小值  $r$ ，所以感應電流為最大，且感應電流和輸入電壓(電磁鐵電壓)的相位差是 0，當下的頻率即為共振頻率。本實驗是從電容外接示波器以讀取電壓，電容電壓(本實驗中我們稱之為感應電壓)和感應電流又產生  $\pi/2$  的相位差，共振時電容電壓也有最大的振幅。



圖(七)、本實驗的金屬探測器的電路示意圖

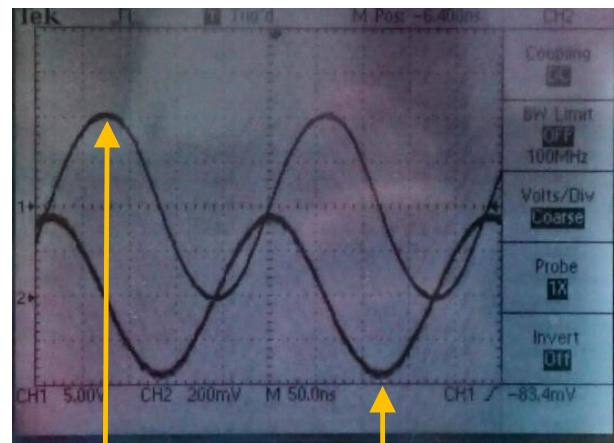
圖片來源：[https://zh.wikipedia.org/wiki/File:Tuned\\_circuit\\_animation\\_3.gif](https://zh.wikipedia.org/wiki/File:Tuned_circuit_animation_3.gif)

## 二、判斷共振的方法

(法一) 手動調整輸入電壓 (CH1) 頻率，仔細描點繪圖獲得感應電壓 (CH2) 的峰值，其所對應的頻率即為共振頻率。這種方法費工耗時，且感應電壓的最大值會因雜訊而不易判讀。

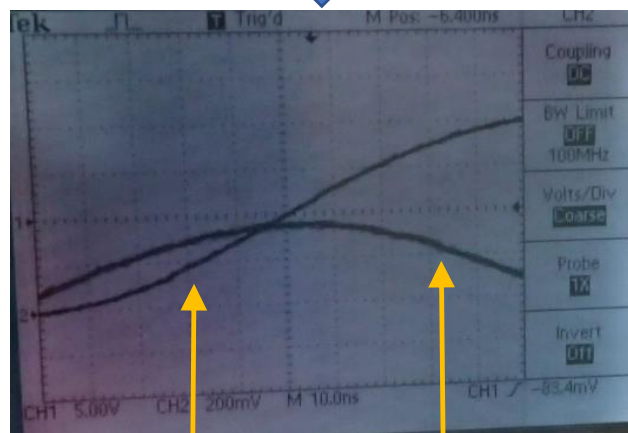
(法二) 發射一脈衝波，將感應波形經由傅立葉轉換後，即得到感應電壓對頻率的響應圖。其中峰值所對應的頻率即為共振頻率。雖較前者省時，但因示波器取樣點不足，使所得之共振頻率解析度較前者低。

(法三) 調整頻率並目測示波器，判斷輸入電壓與感應電壓的相位差為  $\pi/2$  時，即達共振。此方法雖較 (法二) 耗時，但因對稱性的辨認較容易，故共振頻率的判讀可達 1 Hz，所以我們採用此最準確的方法。如下圖所示



CH1: 輸入電壓      CH2: 感應電壓

時間放大



CH1: 反對稱      CH2: 對稱

圖(八)、共振時示波器所顯示的波形

### 三、研究問題

- (一) 製作一個金屬探測器，量測探測金屬的感應電壓與共振頻率，以了解電磁感應的原理及共振現象。
- (二) 瞭解實驗裝置的基本參數。
- (三) 改變金屬片和感應線圈的距離找出共振頻率對距離的關係。
- (四) 探討金屬探測器所能偵測到金屬距離變化量的最小值。
- (五) 探討金屬在不同溫度下，金屬探測器的共振頻率的變化。
- (六) 探討電解液在不同酸鹼度下，金屬探測器的共振頻率的變化。
- (七) 藉由共振頻率的變化，準確量測導電物質的距離、溫度、離子濃度等變因。

### 四、實驗步驟原理

#### (一) 實驗裝置的基本參數

當達到共振時， $\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。所以藉由並聯電容  $C'$  來測定金屬探測器的原始電容值  $C$  和電感值  $L$ 。再經由公式  $Q = \frac{\Delta f}{f_0}$  ( $\Delta f$  為半高寬、 $f_0$  為共振頻率、 $Q$  為品質因子) 可得  $Q$ 。又  $Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}$  可推算出金屬探測器的原始電阻  $r$ 。

#### (二) 金屬和感應線圈的距離對共振頻率的影響

由於金屬越靠近時，電感值  $L$  會減少越多，又共振時， $\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ，故導致共振頻率越來越高，最後獲得金屬距離和共振頻率的反比關係曲線。

#### (三) 觀察鋁在不同溫度下之共振頻率

藉由加熱板加熱，觀察不同溫度下金屬的共振頻率。

#### (四) 磁鐵排列方式對金屬探測器影響

將磁鐵橫向擺放和垂直往上疊，觀察其共振頻率和感應電壓的變化量。

#### (五) 電解液對金屬探測器影響

我們使用強酸(鹽酸)和強鹼(氫氧化鈉)來進行實驗。當我們置一導電物質於金屬探測器上時，會影響金屬探測器的電阻。以下為公式 ( $r'$  為共振電路增加的等效電阻、 $R$  為外加的併聯電阻)

$$r' = \frac{(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} R$$

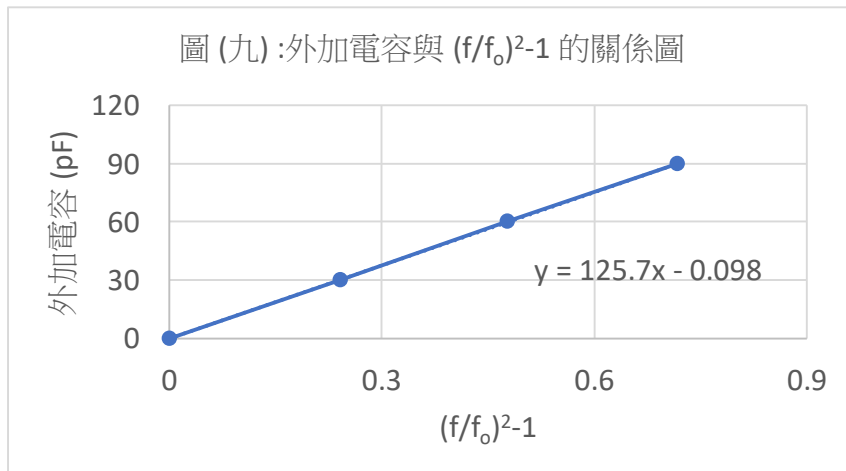
但強酸和強鹼中的電阻  $R \gg (\omega L)^2$ ，因此  $r' \sim \frac{(\omega L)^2}{R}$ 。最後可推得公式  $\frac{\Delta V}{V} = \frac{r'}{r}$ ， $\Delta V$  是放置電解液後感應電壓的變化，藉由觀察  $\Delta V$  可計算出  $r'$ ，進而求得  $R$ ，再探討  $R$  和電解液濃度的關係。

## 伍、研究結果

### 一、測定實驗裝置的基本參數

#### (一) 測定電容:

共振頻率 (kHz)	1495	1342	1230	1141
$(f/f_0)^2 - 1$	0	0.241	0.4773	0.71677
外加電容 (pF)	0	30	60	90



由上圖斜率可知，電路中電容  $C$  約為 126 pF，再藉由  $2\pi f_0$  ( $f_0 = 1495$  kHz) =  $\sqrt{1/LC}$ ，可算出電路之電感  $L$  為 91  $\mu$ H

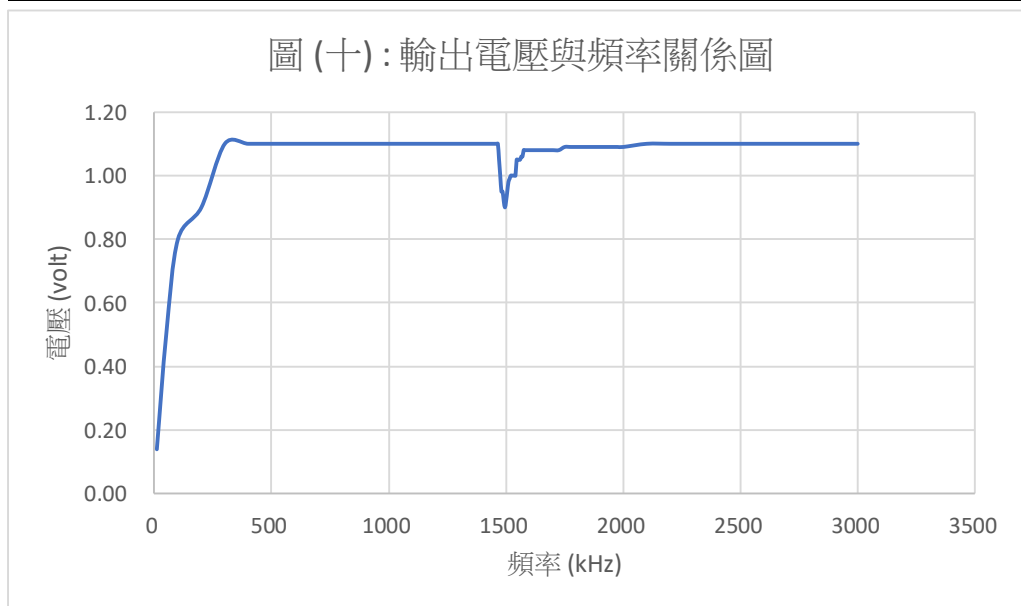
#### (二) 測定半高寬 (註:紅色字為共振頻率)

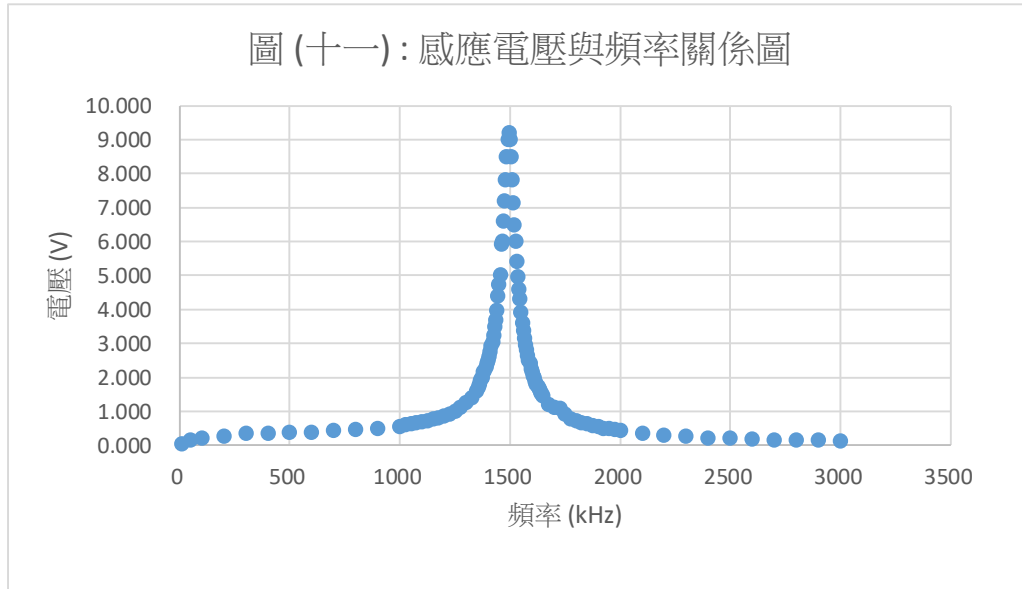
輸出頻率 (kHz)	10	50	100	200	300	400	500	600
輸出電壓 (volt)	0.14	0.50	0.80	0.90	1.10	1.10	1.10	1.10
感應電壓 (volt)	0.028	0.140	0.220	0.270	0.340	0.360	0.380	0.390
相角差 ( $\pi$ )								
輸出頻率 (kHz)	700	800	900	1000	1025	1050	1075	1100
輸出電壓 (volt)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10

感應電壓 (volt)	0.420	0.460	0.480	0.560	0.600	0.640	0.660	0.680
相角差 ( $\pi$ )				1.010				1.000
輸出頻率 (kHz)	1125	1150	1175	1200	1225	1250	1275	1300
輸出電壓 (volt)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
感應電壓 (volt)	0.720	0.760	0.800	0.850	0.900	1.000	1.100	1.250
相角差 ( $\pi$ )				0.985				0.984
輸出頻率 (kHz)	1325	1350	1355	1360	1365	1370	1375	1380
輸出電壓 (volt)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
感應電壓 (volt)	1.400	1.600	1.700	1.800	1.900	1.960	2.000	2.160
相角差 ( $\pi$ )								
輸出頻率 (kHz)	1385	1390	1395	1400	1405	1410	1415	1420
輸出電壓 (volt)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
感應電壓 (volt)	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600	2.760	2.920	3.040
相角差 ( $\pi$ )				0.977				
輸出頻率 (kHz)	1425	1430	1435	1440	1445	1450	1455	1460
輸出電壓 (volt)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
感應電壓 (volt)	3.240	3.500	3.680	3.960	4.400	4.720	5.000	5.920
相角差 ( $\pi$ )		0.959			0.888	0.893	0.881	0.835
輸出頻率 (kHz)	1465	1470	1475	1480	1485	1490	1495	1500
輸出電壓 (volt)	1.10	1.05	1.00	0.95	0.95	0.92	0.90	0.92
感應電壓 (volt)	6.000	6.600	7.200	7.800	8.500	9.000	9.200	9.000
相角差 ( $\pi$ )	0.812	0.706	0.776	0.674	0.635	0.601	0.529	0.412
輸出頻率 (kHz)	1505	1510	1515	1520	1525	1530	1535	1540
輸出電壓 (volt)	0.95	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
感應電壓 (volt)	8.500	7.800	7.120	6.480	6.000	5.400	4.960	4.600
相角差 ( $\pi$ )	0.356	0.308	0.296	0.212	0.200	0.164	0.188	0.123
輸出頻率 (kHz)	1545	1550	1555	1560	1565	1570	1575	1580
輸出電壓 (volt)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.08	1.08
感應電壓 (volt)	4.320	3.920	3.600	3.360	3.160	2.960	2.800	2.640
相角差 ( $\pi$ )	0.110	0.086	0.074	0.061				

輸出頻率 (kHz)	1585	1590	1595	1600	1605	1610	1615	1620
輸出電壓 (volt)	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
感應電壓 (volt)	2.500	2.400	2.240	2.160	2.040	2.000	1.880	1.800
相角差 ( $\pi$ )				0.067				
輸出頻率 (kHz)	1625	1630	1635	1640	1645	1650	1675	1700
輸出電壓 (volt)	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
感應電壓 (volt)	1.720	1.680	1.620	1.550	1.500	1.450	1.200	1.100
相角差 ( $\pi$ )								0.014
輸出頻率 (kHz)	1725	1750	1775	1800	1825	1850	1875	1900
輸出電壓 (volt)	1.08	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
感應電壓 (volt)	1.080	0.900	0.780	0.720	0.672	0.620	0.580	0.540
相角差 ( $\pi$ )				0.015				0.015
輸出頻率 (kHz)	1925	1950	1975	2000	2100	2200	2300	2400
輸出電壓 (volt)	1.09	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	1.10	1.10
感應電壓 (volt)	0.500	0.480	0.460	0.436	0.344	0.290	0.256	0.220
相角差 ( $\pi$ )				0.017				
輸出頻率 (kHz)	2500	2600	2700	2800	2900	3000		
輸出電壓 (volt)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10		
感應電壓 (volt)	0.200	0.180	0.164	0.150	0.140	0.136		
相角差 ( $\pi$ )								

圖(十): 輸出電壓與頻率關係圖





由上圖可知，半高寬  $\Delta f$  為 92 kHz，品質因子  $Q$  為 16.3，電路中電阻為  $53 \Omega$

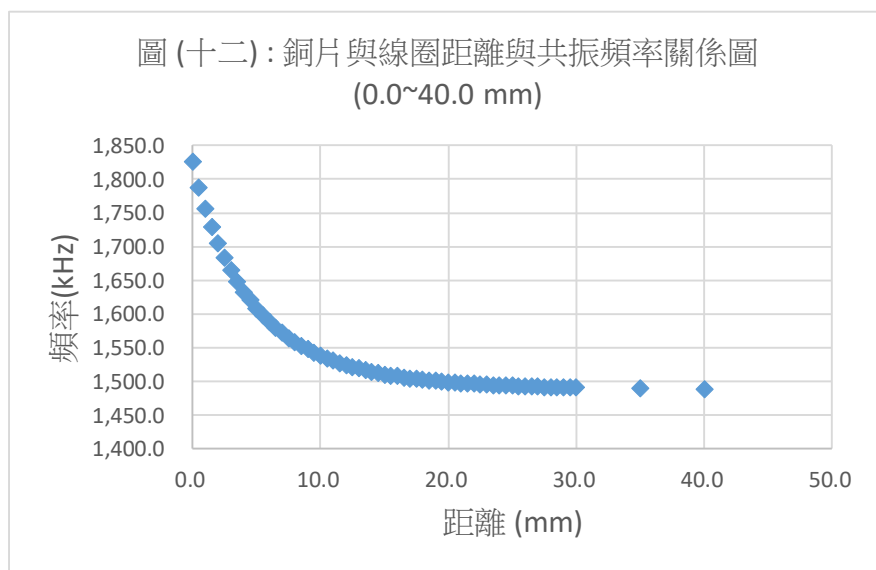
## 二、金屬和感應線圈的距離對共振頻率的影響

(一) 改變銅片和感應線圈的距離，找出共振頻率和距離的關係 ( $V_0 = 1$  volt，原共振頻率 = 1487.1 kHz)

銅片距離 (mm)	40.0	35.0	30.0	29.5	29.0	28.5	28.0	27.5	27.0
共振頻率 (kHz)	1488.6	1488.7	1490.3	1490.5	1490.8	1491.1	1491.2	1491.4	1491.7
銅片距離 (mm)	26.5	26.0	25.5	25.0	24.5	24.0	23.5	23.0	22.5
共振頻率 (kHz)	1492.0	1492.3	1492.6	1493.0	1493.4	1493.9	1494.3	1494.7	1495.3
銅片距離 (mm)	22.0	21.5	21.0	20.5	20.0	19.5	19.0	18.5	18.0
共振頻率 (kHz)	1495.9	1496.7	1497.1	1498.0	1498.6	1499.6	1500.6	1500.8	1502.2
銅片距離 (mm)	17.5	17.0	16.5	16.0	15.5	15.0	14.5	14.0	13.5
共振頻率 (kHz)	1503.1	1504.3	1505.6	1507.2	1508.3	1509.8	1511.5	1514.3	1516.3
銅片距離 (mm)	13.0	12.5	12.0	11.5	11.0	10.5	10.0	9.5	9.0
共振頻率 (kHz)	1518.6	1521.2	1524.0	1527.0	1530.3	1533.9	1537.7	1542.3	1547.1
銅片距離 (mm)	8.5	8.0	7.5	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5
共振頻率 (kHz)	1552.4	1557.7	1564.0	1571.4	1579.0	1587.9	1597.1	1607.6	1620.1

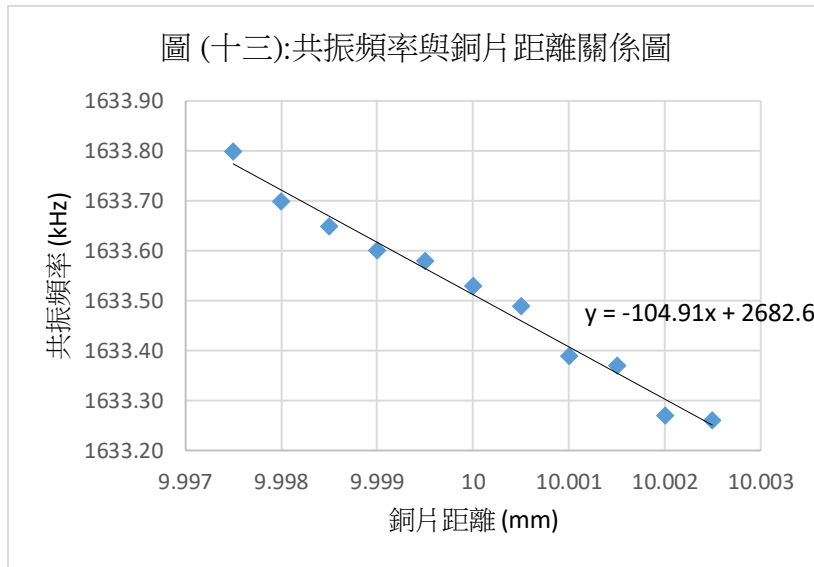


銅片距離 (mm)	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0
共振頻率 (kHz)	1632.5	1647.5	1664.2	1682.8	1703.8	1728.4	1756.4	1787.7	1825.0



(二) 加大輸出電壓 ( $V_o = 10$  volt)，用更小的步距 ( $0.5 \mu\text{m}$ ) 來改變銅片與線圈間的距離，探討本金屬探測器能測到的銅片距離的最小變化量

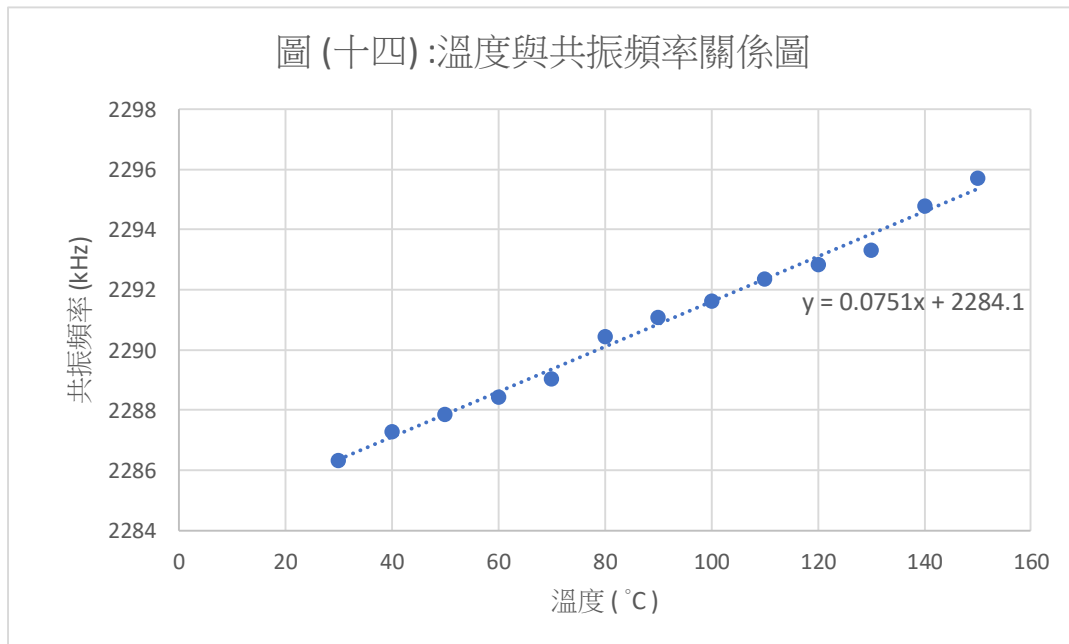
格數	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1
銅片距離 (mm)	9.9975	9.9980	9.9985	9.9990	9.9995	10.0000	10.0005
共振頻率 (kHz)	1633.80	1633.70	1633.65	1633.60	1633.58	1633.53	1633.49
格數	+2	+3	+4	+5			
銅片距離 (mm)	10.0010	10.0015	10.0020	10.0025			
共振頻率 (kHz)	1633.39	1633.37	1633.27	1633.26			



由實驗證實我們的金屬探測器有足夠的靈敏度測到小至 0.5  $\mu\text{m}$  的步距變化。

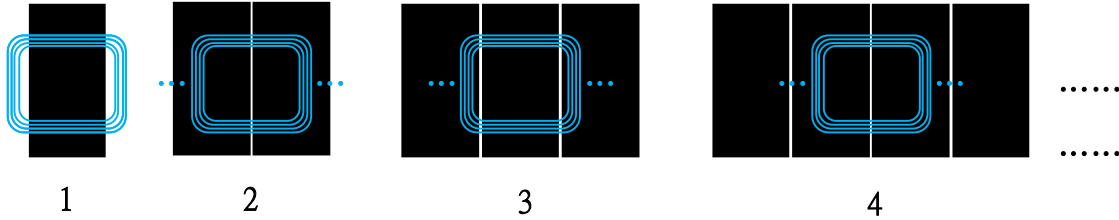
### 三、觀察鋁在不同溫度下之共振頻率

溫度 (°C)	30	40	50	60	70	80	90
共振頻率 (kHz)	2286.31	2287.27	2287.86	2288.43	2289.02	2290.43	2291.08
溫度 (°C)	100	110	120	130	140	150	
共振頻率 (kHz)	2291.63	2292.34	2292.83	2293.30	2294.77	2295.70	



四、由不同排列方式排列錳鋅鐵氧體觀測其對應之新共振頻率與感應電壓,  
 $f_0 = 1458.7 \text{ kHz}$  ( $V_0 = 6 \text{ volt}$ )

(一) 橫向排列：以感應線圈的中線為中心，按照數目分別將錳鋅鐵氧體一左一右併排。



堆疊磁鐵個數 (個)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
共振頻率 (kHz)	1458.7	1427.7	1405.2	1366.2	1291.6	1215.7	1183.2	1172.8	1155.6
感應電壓增加量 $\Delta V$ (volt)	0.00	4.00	6.0	8.5	12.0	16.0	18.0	18.5	19.5

圖 (十五) :共振頻率與排列個數關係圖

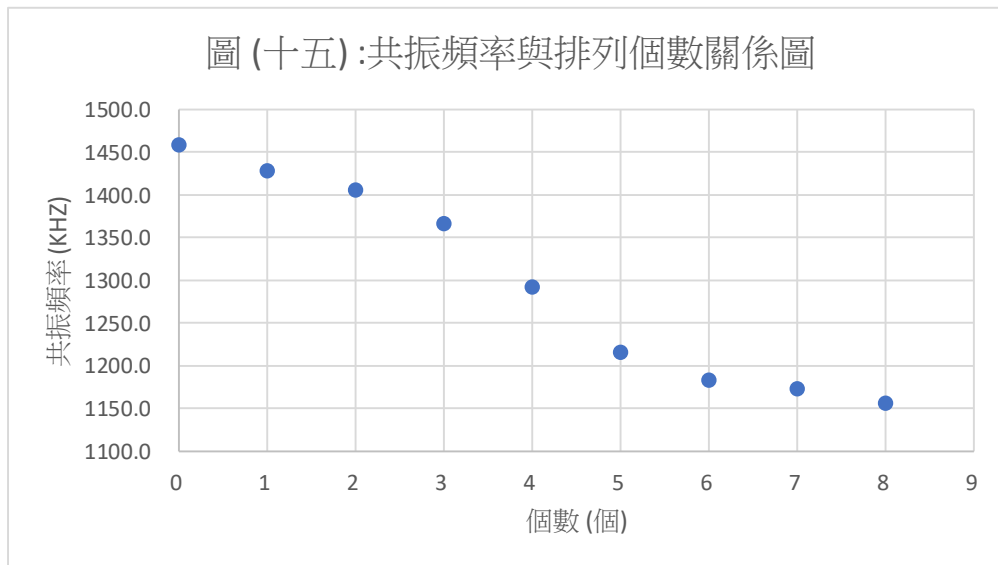
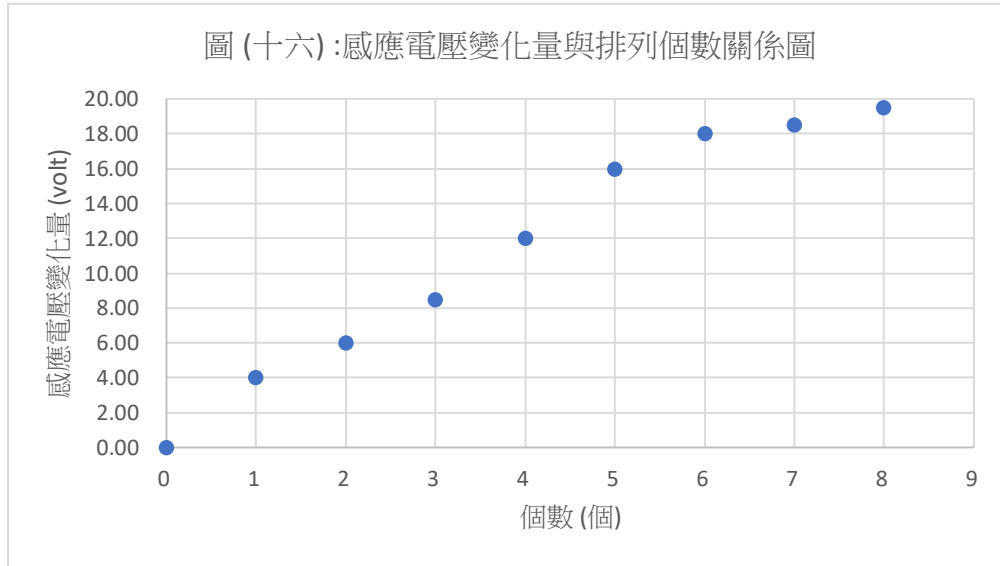
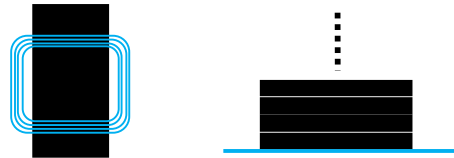


圖 (十六) :感應電壓變化量與排列個數關係圖

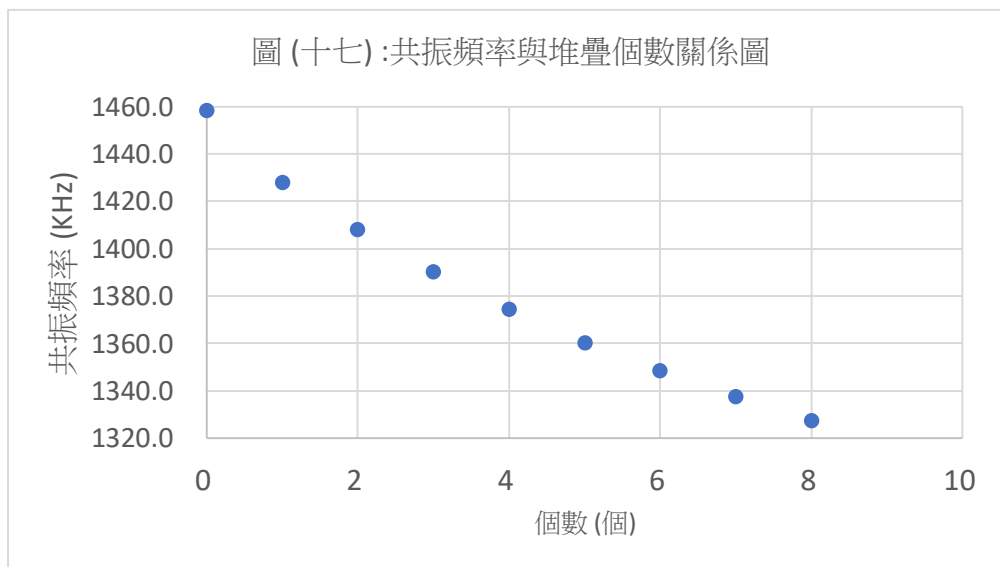


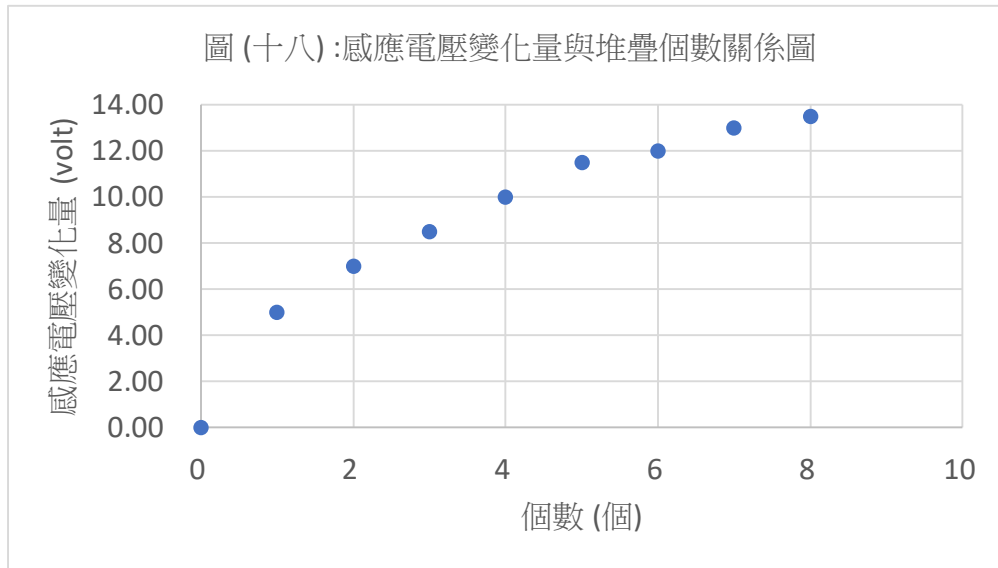
(二) 向上堆疊：以線圈中間為中心，向上排列



堆疊磁鐵個數 (個)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
共振頻率 (kHz)	1458.2	1427.9	1408.0	1390.2	1374.2	1360.3	1348.5	1337.5	1327.5
感應電壓增加量 $\Delta V$ (volt)	0.00	5.00	7.00	8.50	10.00	11.50	12.00	13.00	13.50

圖 (十七) :共振頻率與堆疊個數關係圖



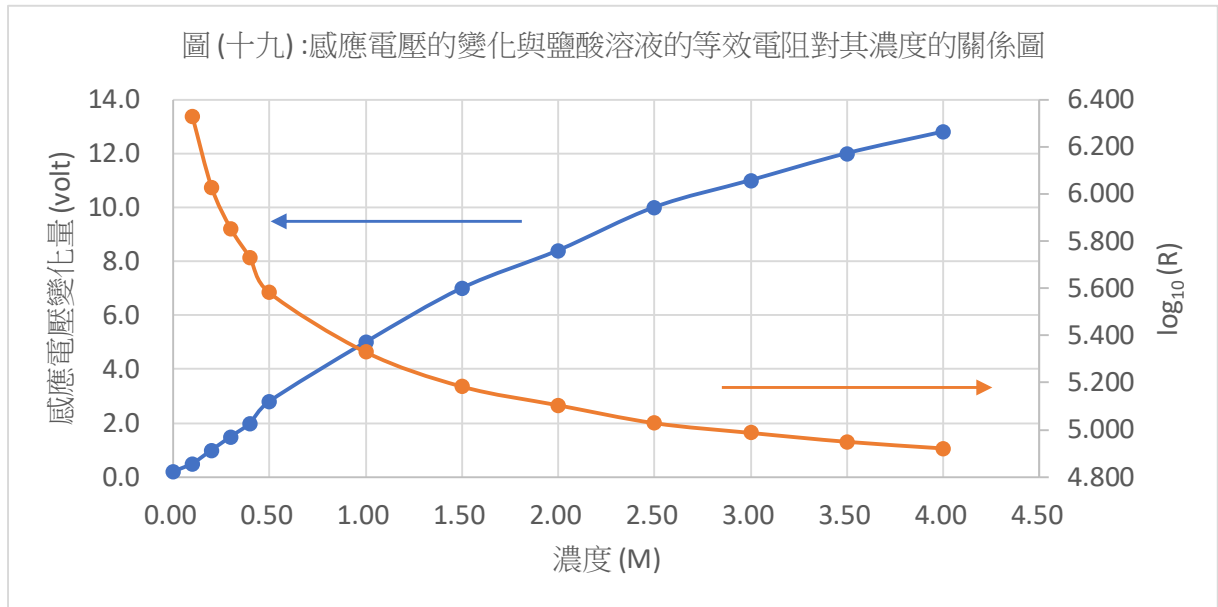


## 五、電解液濃度對感應電壓的影響

### (一) 鹽酸濃度對感應電壓的影響

鹽酸添加量 (mL)	0.00	0.49	0.97	1.46	1.94	2.43	4.85
鹽酸濃度 (M)	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00
共振頻率 (kHz)	1455.0	1454.5	1453.7	1454.5	1454.7	1453.5	1453.4
感應電壓變化量 $\Delta V$ ( volt )	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.8	5.0
電解液的等效電阻 $R$ ( $\Omega$ )	5356355	2142542	1071271	714181	535635	382597	214254
$\log_{10}(R)$	6.729	6.331	6.030	5.854	5.729	5.583	5.331
鹽酸添加量 (mL)	7.28	9.71	12.14	14.56	16.99	19.42	7.28
鹽酸濃度 (M)	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	1.50
共振頻率 (kHz)	1453.3	1453.4	1453.4	1453.3	1453.7	1454.2	1453.3
感應電壓變化量 $\Delta V$ ( volt )	7.0	8.4	10.0	11.0	12.0	12.8	7.0
電解液的等效電阻 $R$ ( $\Omega$ )	153039	127532	107127	97388	89273	83693	153039
$\log_{10}(R)$	5.185	5.106	5.030	4.989	4.951	4.923	5.185

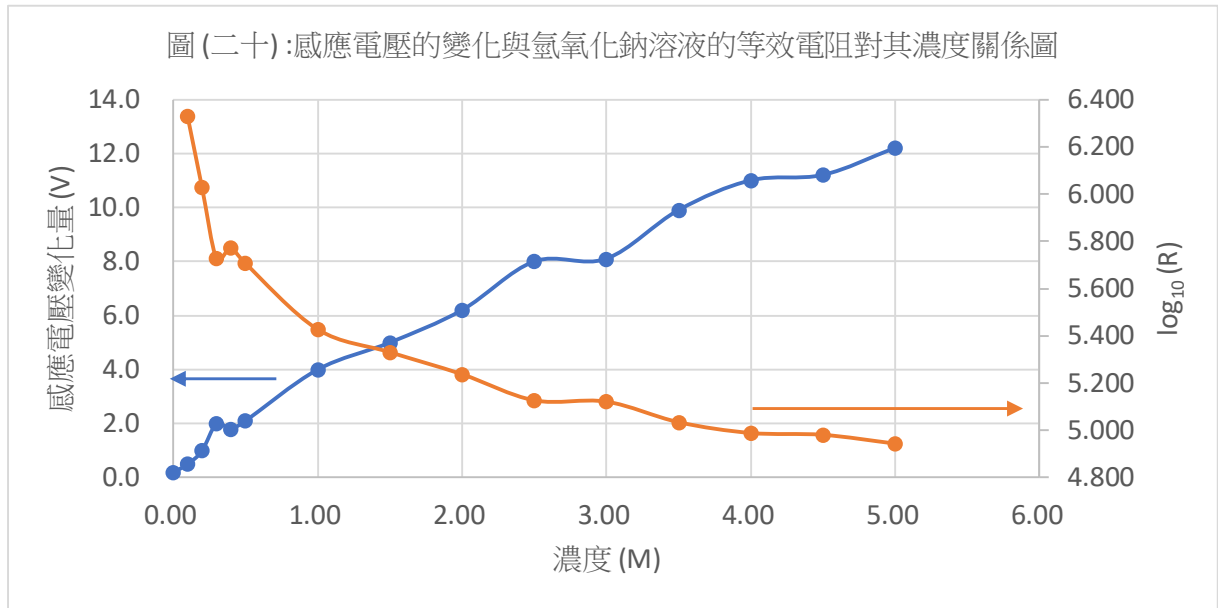
圖 (十九) :感應電壓的變化與鹽酸溶液的等效電阻對其濃度的關係圖



(二) 氫氧化鈉濃度對感應電壓的影響

氫氧化鈉添加量 (g)	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	2.00
氫氧化鈉濃度 (M)	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00
共振頻率 (kHz)	1455.0	1454.8	1455.1	1453.5	1452.3	1453.7	1453.8
感應電壓變化量 $\Delta V$ ( volt )	0.2	0.5	1.0	2.0	1.8	2.1	4.0
電解液的等效電阻 $R$ ( $\Omega$ )	5356355	2142542	1071271	535635	595151	510129	267818
$\log_{10}(R)$	6.729	6.331	6.030	5.729	5.775	5.708	5.428
氫氧化鈉添加量 (g)	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
氫氧化鈉濃度 (M)	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
共振頻率 (kHz)	1453.9	1453.7	1453.3	1449.1	1452.6	1453.4	1453.1
感應電壓變化量 $\Delta V$ ( volt )	5.0	6.2	8.0	8.1	9.9	11.0	11.2
電解液的等效電阻 $R$ ( $\Omega$ )	214254	172786	133909	132256	108209	97388	95649
$\log_{10}(R)$	5.331	5.238	5.127	5.121	5.034	4.989	4.981

圖(二十):感應電壓的變化與氫氧化鈉溶液的等效電阻對其濃度關係圖



## 陸、 討論

### 一、基本數據測量:

RLC 電路中，共振頻率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。因此，共振頻率會受電感值 L 和電容值 C 的影響。

### 二、金屬距離和共振頻率的關係:

當銅片越靠近，因為受到冷次定律的影響，使電感 L 變小，進而使共振頻率越高。

### 三、觀察鋁在不同溫度下之共振頻率

(一) 溫度增加，所觀察到之共振頻率上升。共振頻率和溫度大致成正比關係。經作圖得知，每改變  $1^\circ\text{C}$  所改變的共振頻率為  $75.1\text{ Hz}$ ，或換算成  $0.013^\circ\text{C}/\text{Hz}$ 。

(二) 由於溫度增加會使鋁的電阻增加，故推測上述現象是受到電阻增加的影響。

### 四、磁鐵堆疊:

(一) 錳鋅鐵氧體使得共振電路的電感 L 增加，故共振頻率因加入錳鋅鐵氧體而減少。

(二) 錳鋅鐵氧體會增加磁場，加強電磁鐵和感應線圈的耦合，故感應電壓因加入錳鋅鐵氧體而增加。

(三) 排列數目愈多，愈接近磁力線的邊界，故每多加一個錳鋅鐵氧體所影響的共振頻率及感應電壓變化量程度都較前幾項小。

### 五、電解液實驗:



- (一) 鹽酸溶液會使感應電壓變小，在低濃度時，感應電壓對濃度的變化率較大；反之則較小。
- (二) 由  $\log_{10}(R)$  圖可知，濃度愈大，鹽酸和氫氧化鈉的等效電阻  $R$  愈小。
- (三) 圖(二十)中的曲線較不規則，是由於固態的氫氧化鈉顆粒長久置於潮濕的空氣中導致潮解，因此實驗結果有不規則的變化。

## 柒、 結論

- 一、發生共振現象時感應電壓也較大，圖(十一)的峰值顯示當共振現象最明顯時，感應電壓也最大，此時輸出的電壓因阻抗減小而有一明顯的下降，如圖(十)。
- 二、銅片離線圈的距離與共振頻率約成反比關係，當銅片與線圈距離大於某一定值後共振頻率趨向於一定值。由於線圈與銅片間的距離會有電感效應，造成總電感值減小  $\Delta L$ ，使共振電路的電感值有改變。當距離增大，則距離造成的電感減小效應變小，總電感值  $= L_0 - \Delta L$ ，當  $L_0 \gg \Delta L$  時， $L_0 - \Delta L \approx L_0$ ，所以共振頻率趨於一個定值。
- 三、利用共振頻率的量測，我們的金屬探測器有足夠的靈敏度測到小至  $0.5 \mu\text{m}$  的金屬的位移。
- 四、錳鋅鐵氧體的實驗顯示，當堆疊的個數增加，共振頻率變小且感應電壓變大，這個結果和電磁鐵磁場的分佈吻合。
- 五、在電解液的實驗結果顯示，共振頻率對電解液濃度的改變並無明顯的變化；但是，電解液的濃度愈大，則等效電阻愈小，造成感應電壓的有大的變化(減少)量。所以我們可以利用感應電壓的變化，量出待測電解液的濃度。因為不需要接觸液體(非接觸式測量)，即可降低實驗的危險度。
- 六、實驗二、實驗三和實驗五可發現金屬或電解液因為其狀態不同(如距離遠近、溫度、濃度等)會大大地影響共振頻率或感應電壓，又因我們判讀共振頻率的精準度可達  $1 \text{ Hz}$ 。因此我們成功把金屬探測器變成一台能精確判斷金屬遠近、溫度和電解液濃度的非接觸式探測器。

## 捌、 參考資料及其他

- 一、「百科」1分鐘了解 RC、RL、RLC 電路原理。  
取自 <https://kknews.cc/zh-tw/news/9lp5x25.html>
- 二、Richard Fitzpatrick (July 14, 2007). Lenz's Law. Retrieved March 27, 2018, from <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/302l/lectures/node86.html>
- 三、Chris Woodford (gust 19, 2018). Metal detectors. Retrieved December 22, 2018, from <https://www.explainthatstuff.com/metaldetectors.html>

## 【評語】 160031

1. 主題的新穎性：藉由感應電壓波型，量測共振頻率，值的探究。
2. 實驗設計：探討樣品與感應偵測器距離對共振頻率影響，僅定性比較趨勢，應可思考如何做深入分析。
3. 數據、分析的創新性、內容完整性：雖能以共振討論，但較多呈現量測結果，可再思考如何有新穎論述或結論。