

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國小組 生活與應用科學(二)科

082932

弦外之音 箏有趣

學校名稱：基隆市信義區深澳國民小學

作者： 小五 鄭安妤 小五 吳彥樺 小五 陳奕辰 小五 張偉華	指導老師： 王品涵
---	--------------

關鍵詞：自製樂器、波形、音箱

## 摘要

根據自然課本「聲音與樂器」單元，自製一台跨越三個八度的古箏，透過控制琴弦的張力，驗證「弦愈粗、愈長、張力愈小，其音調愈低；弦愈細、愈短、張力愈大，其音調愈高」及八度音之間振動頻率為1:2的規律；以 Audacity 分析波形及頻譜圖，比對雁柱、音色、調音方式間的關係。歸納10位音樂專家對音色佳的定義，以音準、響度及波形為音色指標，改良第一製尼龍弦箏，再製第二製樺接尼龍弦箏及第三製樺接鋼弦箏，比對三者經不同時間及彈奏次數的偏離音準幅度；以分貝計測無音箱、有開口音箱、無開口音箱的響度差異；觀察不同製作方式、音箱形式及弦的材質之波形，依響度能量削弱時間及聲音延長時間，比較其變化與市售古箏的差異，找出自製古箏的最佳條件。

## 壹、研究動機

從自然課本中，看到「聲音與樂器」單元的「製作簡易樂器」活動，發現樂器與自然科學原理竟然有所相關，也看到課本自製樂器的範例是以盒子挖洞，再套上橡皮筋，利用控制橡皮筋長短的方式，來發出不同音高的簡易樂器，但是橡皮筋能展現的音高不多，但無法利用這樣簡易的樂器演奏出自己喜歡的歌曲，音域不夠寬廣，音高有所限制，彈奏起來不能盡興；而範例的自製樂器既像吉他又像古箏，而吉他的弦較少，主要是靠琴衍（見頁5，圖1-7）按出不同音階，但是古箏大部分的音階只要靠單條弦彈奏就可以，對於彈奏方式比較簡單，想依照課本中「製作簡易樂器」的範例套用在古箏的製作上；一般而言，一台古箏要價好幾萬元，若能透過自製的方式，做出橫跨至少三個八度的自製古箏，讓我們不用花太多錢，卻又能滿足自己彈奏喜愛流行樂曲的需求。

## 貳、研究目的

- 一、利用簡單的木頭，模擬市售16弦古箏，自製一台橫跨三個八度音域的古箏，完成一個經濟實惠卻功能實用的樂器。
- 二、透過自製古箏調音的音高頻率，驗證八度音之間振動頻率為1:2的規律。
- 三、透過自製古箏，控制弦的粗細、長短、鬆緊，驗證課本中聲音高低變化的現象。

四、比較有雁柱與無雁柱對自製古箏聲音的影響。

五、市售古箏有開口共鳴箱，本研究以無開口音箱進行實驗，測試是否具有同樣的共鳴效果。

六、與市售的古箏相比，嘗試以不同的古箏自製方式，比對出最佳音色的條件。

七、

## 參、研究設備及器材

為了達成上述六項研究目的，準備了四大階段的研究設備集器材：

一、自製古箏需要準備：

(一) **箏身**：木材（依據設計圖跟木材行訂製木材、微調整音高用的小木頭、箏架）、6分銅釘、8分銅釘、6分及8分螺絲、8分及寸2自攻螺絲、T型板手、扁鑽、鐵鎚、拔釘器器具、砂紙、白膠。

(二) **弦(吉他弦)**：透明色尼龍弦第一弦(弦徑0.80mm)、第二弦(弦徑1.00mm)、第三弦(弦徑1.20mm)；鋼弦第一弦(弦徑0.40mm)、第二弦(弦徑0.45mm)、第三弦(弦徑0.70mm)。

二、調音與彈奏樂曲，需要：

(一) **辨識弦位置(吉他黑色尼龍弦)**：第一弦(弦徑0.80mm)1條、第二弦(弦徑1.00mm)1條、第三弦(弦徑1.20mm)2條。

(二) **調音及測量音高頻率**：古箏調音器及 DaTuner 應用程式。

(三) **彈箏工具**：古箏義甲。

三、探索影響響度及音色的因素，需要：

麥克風、Audacity 電腦軟體、分貝計、游標卡尺。

四、以不同製作方式探討影響音色的因素，需要：

木材、3.5公分十字頭螺絲及其螺帽、塑膠透明華司、2英吋 L 型托架、電磨機、十字螺絲起子、分貝計、CorelDRAW 電腦軟體設計向量圖檔、雷射切割技術、Audacity 電腦軟體。



圖1-1 研究設備及器材

## 肆、研究方法與結果

### 一、文獻探討

#### (一) 舊經驗的結合

##### 1. 聲音的構成

聲音是由空氣的細微振動所形成，各式各樣的聲音產生聲音的部位都會有振動的現象，物體振動會產生一種波，稱為「聲波」，而物體發出的聲音可以藉由空氣或其他物質向外傳送出去，傳到我們的耳朵，像這種可以傳遞聲波的物質，稱為「介質」。

##### 2. 樂音的構成

有些聲音聽起來好聽，稱為樂音，有些聲音聽起來難以入耳，稱為噪音；從聲壓與頻率（每秒產生的空氣疏密重複次數，數值愈大音調愈高）的角度觀察，所有的聲音都能以「波狀圖」（波形圖）表示（瀧田義博等，2016）。聲音的音色是由波形來決定，樂音具有單純而有規則的波形，而噪音的波形是複雜、不規則的。（李在允，2014）

在樂器中分為管樂器、打擊樂器及弦樂器，不論是哪一種樂器類別在各個高音與低音組合之下形成美妙的聲音，始終遵循這個原則：空氣柱長、金屬片長、較長的弦發出的聲音都比較低，而空氣柱短、金屬片短、較短的弦發出的聲音都比較高。以弦樂器來說，弦愈粗、愈長、張力愈大，所產生的音調愈低；弦愈細、愈短、張力愈小，所產生的音調愈高；也就是說，弦的「粗細」、「長短」及「張力大小」是影響音調高低的關鍵。

聲音的高低、大小、音色為聲音三要素。聲音的高低由振動的頻率決定，頻率越高，聲音越尖銳，以赫茲（Hz）音調高低的單位。而聲音的大小是指聲音的強弱，也就是響度、音量，聲音的大小是由聲波的振動幅度決定，振幅越大，聲波的能量越高，聲音也越大聲，以分貝（dB）表示響度大小的單位，當音量降低20dB則相當於能量衰減為0.01倍，如圖1-2。以弦樂器來說，撥弦的力道愈大或音箱（共鳴箱）愈大時，響度愈大，反之則愈小。音色則是每種樂器本身獨特的聲音，如吉他及古箏本身具有一定的音色，讓人一聽就能辨識出是哪種樂器發出的聲音。

dB	強度比	功率比
60	1,000,000	1,000
40	10,000	100
20	100	10
0	1.0	1
-20	0.01	0.1
-40	0.0001	0.01
-60	0.000001	0.001

圖1-2 分貝定義及其能量比

綜合以上，弦樂器中，粗細、長短及張力大小是影響聲音高低的關鍵。音箱及撥弦的力道是響度的關鍵，而本研究就以自製古箏來探究樂器中的科學原理。

## (二) 名詞解釋

### 1. 八度音程：

兩音之間的振動頻率是1:2的音程關係。高音的振動頻率是低音振動頻率的兩倍，如中央 C「C4」的頻率是261.63Hz 高一個八度音程的「C5」的頻率是523.25Hz，且兩音之間有緊密的音律連結，在人耳聽來一個音比另一個音高，但會認為都是 Do 的音，而音階和弦就是以八度音程的基礎來發展（BomBom Story、金德永，2016），如圖1-3。



圖1-3 八度音程

### 2. 振動頻率：

單位時間內通過定點的波數，週期運動的物體在經過位置移動後，又再度回到出發的狀態，完成一個週期，人們以赫茲作為計算振動頻率時所使用的單位，1Hz 就是每秒振動一個週期，赫茲愈高，音高愈高。（BomBom Story、金德永，2016）

### 3. 聲音的共振：

聲音的共振也就是共鳴，大多數的樂器都有共鳴箱的設計，可以使振動的空氣量增加，古箏或吉他也是，共鳴箱（音箱）能增強樂器發出的音量，其音量增大的原理是當弦振動時，距離弦非常近的共鳴箱會受迫而隨之振動，這種強迫性的振動使共鳴箱的振動頻率等於弦的振動頻率，整個箱體的振動就能提高發聲體與空氣分子碰撞的接觸面積，增強空氣分子振動而使音量變大。而綜合聲音振動頻率與共振產生音高與音量的差異，所形成的波形也隨之改變，如圖1-4：

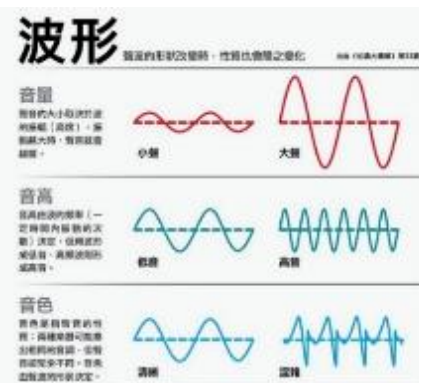


圖1-4 波形變化圖

### 4. 頻譜圖：

將聲音繪製成頻譜，所得的結果會是分別以振幅（dB）及相位為縱軸，頻率（Hz）為橫軸，可看出音色，頻譜圖可看出音色、基頻及泛音，也可分析樂器的起音、衰減、

延音及釋音，以下在雁柱對於聲音的影響中，以音波及頻譜圖輔助，探討聲音的變化。

### 5. 雁柱：

雁柱斜列在箏面上，每條弦橫跨其上，高音靠近箏頭，低音靠近箏尾，符合物理現象中的變化：短弦音高，長弦音低。整體看如一行大雁飄然欲飛，所以稱為「雁柱」，大多為較硬的材質製作，其材質可影響聲音的音質好壞。(林東河、黃好吟，1990)

雁柱很像課本上架在紙箱上的吸管，如圖1-5，我們從《進入科學世界的圖畫書—聲音》自製橡皮筋吉他中看到，在套了橡皮筋的容器上加了兩枝筆，使得聲音變得清脆(Neil Ardley, 1996)，如圖1-6，因此本研究中也使用了雁柱藉以增加聲音的清脆度，並加以探討加了雁柱後對聲音的影響。

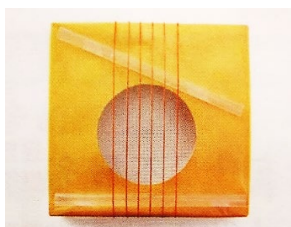


圖1-5 自然課本裡的自製樂器使用吸管增加聲音清脆度

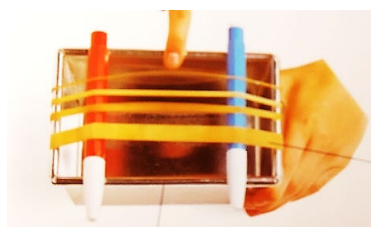


圖1-6 套了橡皮筋的容器上加了兩枝筆增加聲音清脆度

### (三) 樂器的探討

在本研究以弦樂器為自製方式，從課本範例以紙箱挖洞並套上橡皮筋的自製弦樂器，聯想到以吉他與古箏作為自製樂器的型態，但吉他只有6條弦，大部分音高靠琴格（衍）按音來變化，古典吉他各部位名稱如圖1-6，對於自製樂器來說難度較高，可能容易因製作得不精準而使得難以調音，因此以自製古箏為目標，讓每條都有它固定的音，並靠調音轉軸來調音。



圖1-7 古典吉他各部位名稱（山葉吉他手冊，2007）

古箏弦數經歷代變化，至清末民初初見16弦箏，古箏的弦數伴隨音域擴大，目前多半為16弦、18弦、21弦、23弦、25弦，其中最普遍為16弦與21弦箏，本研究選擇跨越完整三個八度音域且弦數最少的16弦箏作為自製弦數，市售古箏使用雁柱，用以調音及音階變化，相較



於沒有雁柱的古琴，古琴聲音沉悶而不響亮，古箏聲音宏亮而清脆，雁柱是其中一個關鍵，本研究透過弦的粗細、雁柱的使用在探討聲音的變化。

在古箏中不論是什麼調，音階從低到高的排列是 Sol→La→Do→Re→Mi→Sol 如此作為一個八度的循環，為了彈奏辨識方便會在每個八度的 Sol (以 D 調為例)換上綠色或紅色的弦，其正面及背面圖如圖1-8，在古箏雁柱左方按音會使得音高聲高的變化，因此古箏中弦序少了 Fa 和 Si, Fa 和 Si 的音分別是由 Mi 和 La 按音產生，如此也能在彈奏中出現音高的些微變化。



圖1-8 古箏正、背面，箏長168公分  
(箏圖為新愛琴樂器，說明為自行標示)

音高	d	e	g	a	b	d'	e'	g'	a'	b'	d''	e''	g''	a''	b''	d'''
簡譜	5	6	1	2	3	5	6	1	2	3	5	6	1	2	3	5
五線譜																

圖1-9 16弦箏的音高排列與音名的對照

16弦箏最常用的音階為 G 調，在古箏音階排列由低到高方式是： $\underset{\cdot}{5}\underset{\cdot}{6}\underset{\cdot}{1}\underset{\cdot}{2}\underset{\cdot}{3}\underset{\cdot}{5}\underset{\cdot}{6}\underset{\cdot}{1}\underset{\cdot}{2}\underset{\cdot}{3}\underset{\cdot}{5}\underset{\cdot}{6}\underset{\cdot}{1}\underset{\cdot}{2}\underset{\cdot}{3}\underset{\cdot}{5}$ 。

$\underset{\cdot}{5}\underset{\cdot}{6}\underset{\cdot}{1}\underset{\cdot}{2}\underset{\cdot}{3}\underset{\cdot}{5}\underset{\cdot}{6}$       12356       $\underset{\cdot}{1}\underset{\cdot}{2}\underset{\cdot}{3}\underset{\cdot}{5}$

譜的對照，如圖1-9 (林東河、黃好吟，1990)。本研究的自製古箏音高排列順序以16弦的音階調音，低音到高音的音名依序為：DEGAB，以此方式循環三個八度。

## 二、自製古箏

### (一) 製作箏身

流程	圖片	說明
1. 設計圖	<p>圖2-1 自製古箏設計圖</p>	設計長60公分，寬30公分，高約10公分的盒狀音箱古箏，每片木板厚度1.2公分(統一規格)，常見有16及21弦箏，21條弦製作較難，以16條弦製作便能達成三個八度音階的研究目的。
2. 裁木材	<p>圖2-2 前往木材行裁好六塊木板</p>	<p>(1) 原作法：請木材行工廠師傅看過圖3-1的設計圖，裁製以長方體音箱為設計的六塊面板。</p> <p>(2) 修改：師傅以經驗建議——</p> <p>a.將音箱上緣設計圓弧狀，美觀且便於穿弦。</p> <p>b.再調整為箏頭高、箏尾低的斜度。</p>

流程	圖片	說明
3. 打穿弦洞	 圖2-3 箏尾以銅釘打穿弦洞	在箏頭及箏尾的穿弦面板打洞以利組裝後穿弦。 (1) 原作法：以吉他或烏克麗麗的穿弦洞方式——上方加一塊木板，從箏尾及木板中間穿弦。 (2) 修改：木頭堅固程度足以承受打洞穿弦的方式，於是改以打洞穿弦方法製作。
4. 磨邊	 圖2-4 以砂紙磨平木銳利邊緣	裁製的面板因為要穿上弦，讓弦橫跨在上面，因此需要先用砂紙磨平銳利的裁剪邊緣，成為圓滑的表面及邊緣。
5. 組合	 圖2-5 五塊面板組合樣貌	先將扣除彈箏面的五塊面板組合成一個盒狀，以白膠黏合，以白膠富水分及黏膠，能深入木材質地中，因此十分牢固。
6. 固定面板	 圖2-6 以銅釘輔助面板固定	(1) 發現問題一：每塊木板未必平整，無法貼合。 (2) 解決方法：黏合時需要適當銅釘固定，視固定部位使用6分銅釘或8分銅釘。
7. 交叉穿弦	 圖2-7 箏尾穿弦方式	(1) 原作法：完成古箏後開始穿弦，以尼龍線作弦。 (2) 修改：若以同為尼龍線的古典吉他弦，其延展性高，具有較佳的彈性，因此選用吉他弦來作為自製古箏弦。

(1) 發現問題二：調音轉軸以6分螺絲，但螺絲旋轉空間有限。
(2) 解決方法：調整成8分螺絲，設想為將弦纏繞在上頭，讓弦隨著螺絲旋轉而調音。
(3) 發現問題三：以螺絲作為調音轉軸時，如圖2-8，弦纏繞在上面容易鬆脫，若是將弦先卡在轉軸洞裡固定再纏繞在螺絲上，會容易絞斷弦，調好音也無法維持太久。
(4) 解決方式：以自攻螺絲作為調音轉軸。以古箏調音轉軸為參考，因為古箏轉軸為特殊零件，在樂器行或網路商店都無從購買，若是以吉他等樂器轉軸為方向也無法找到適用零



件；找到最接近的零件為有孔柴油螺絲，如圖2-9，但大小不適用；最後選擇自攻螺絲，如圖2-9，自攻螺絲上有透明華司，可做為卡弦用途，搭配 T 行板手再加以旋轉。



圖2-8 以螺絲作為調音轉軸



圖2-9左至右，為有孔柴油螺絲、8分、寸2自攻螺絲



圖2-10 古箏調音轉軸

<p>8. 調音</p>	 <p>圖2-11 以自攻螺絲作為調音轉軸調好的16條弦</p>	<p>(1) 原作法：以8分自攻螺絲，如圖2-9，但因為8分自攻螺絲較短，轉動的圈數較少，調音不易。</p> <p>(2) 修改：以較長的寸2自攻螺絲，如圖2-11，寸2螺絲，可以有足夠的圈數調緊琴弦，十分理想。</p>
<p>9. 自製雁柱</p>	 <p>圖2-12 左為市售古箏雁柱，右為自製改良式金字塔型雁柱</p>	<p>(1) 原作法：仿市售古箏雁柱細高樣式製作。</p> <p>(2) 修改：自製古箏中，弦相對較鬆，彈奏過程容易受力傾倒，因此將雁柱設計成金字塔型，如圖2-12，底盤為柱狀不易傾倒，在上端以扁鑽做記號固定，使弦能在凹槽中固定住。</p>
<p>10. 加雁柱</p>	 <p>圖2-13 自製古箏用10個自製雁柱</p>	<p>(1) 發現問題四：自製雁柱太寬，微調空間不足。</p> <p>(2) 解決方法：只裝10個自製雁柱。搭配驗證課本中聲音變化的物理性，最後6個低音的弦不加雁柱，以討論在相同條件下聲音變化。</p>
<p>11. Sol 做記號</p>	 <p>圖2-14 自製古箏將每個 Sol 的弦換為黑色弦以便彈奏時辨識</p>	<p>由於16條弦的箏弦數比較多，我們在彈奏的過程中容易彈錯，因此我們也模仿佛古箏的方式，在每五條弦(Sol)就使用一條有綠色或紅色的弦做記號，如第6頁圖1-7，同樣在每個 Sol 置換成黑色古典吉他弦，以利彈奏時辨識，如圖2-14。</p>

(二) 八度音程聲音頻率的變化

1.測量聲音的頻率：

5̣6̣1̣2̣3̣5̣6̣1̣2̣3̣5̣6̣1̣2̣3̣5̣

DEGABDEGABDEGABD，共16條弦，配合古箏 5̣、5̣、5̣、5̣ 皆以不同顏色區分，本文以下出現這四個 Sol 皆以紅色字體標記。

所有以紅色表示的音名是古箏16弦箏中一般所使用的音調（即G調），我們以 Da Tuner 調音器應用程式來表示每個 Sol（G 調音名為 D）音的頻率（赫茲 Hz），如表2-1，每條弦的聲音頻率測量如表2-2：

表2-1 四個八度音的 Sol 聲音頻率（一）

簡譜音	5̣	5̣	5	5̣
頻率 (Hz)	73.2	146.6	293.6	588.1

表2-2 驗證八度音程兩音之間的振動頻率是1:2（一）

簡譜	5̣	6̣	1̣	2̣	3̣	5̣	6̣	□	◻	◀	▲	▼	i	2̇	3̇	5̣
頻率 (Hz)	73.2	82.8	98.0	112.4	124.8	146.4	165.8	195.3	224.5	250.3	294.2	329.2	393.9	444.2	494.7	586.5

2.發現問題五：調音過後，最低音的一條弦過於鬆弛，簡直無法彈奏，聲音不夠響亮。

3.解決方法：最低音這條弦有足夠空間可以在上調一個八度音，也就是目前73.2Hz 的兩倍，於是以其兩倍「146.4Hz」上調八度再測量聲音的頻率，配合最低音的弦，將每條弦都調緊，Sol 頻率變化依序是：146.5→293.6→590.2→1176.7，如表2-3，每條弦的頻率如表2-4。

表2-3 四個八度音的 Sol 聲音頻率（二）

簡譜音	5̣	5̣	5	5̣
頻率 (Hz)	146.5	293.6	590.2	1176.7

表2-4 驗證八度音程兩音之間的振動頻率是1:2（二）

簡譜	5̣	6̣	1̣	2̣	3̣	5̣	6̣	□	◻	◀	▲	▼	i	2̇	3̇	5̣
頻率 (Hz)	146.5	162.3	195.5	220.8	247.4	293.6	330.7	394.6	441.2	497.4	590.2	665	788.4	884.3	990.6	1176.7

**【研究結果1】**

在前面名詞解釋中，知道八度音程是兩音之間的振動頻率是1:2的音程關係，相同音名的八度音，其頻率從低音到高音會是呈倍數變化，愈高音，聲音頻率愈高（赫茲數字愈大），從

以上觀察，在 Sol 頻率變化依序是：73.2→149.2→294.2→586.5，如表2-1，調音數值無法完全準確，但前者聲音頻率約是後者的兩倍，不論是哪一種調音方式，都驗證了八度音的規則，兩音之間的振動頻率是1:2。

### (三) 弦與音高的變化

16弦使用三種不同粗細的古典吉他弦作為高音到低音的分布使用，以突顯高音中音與低音的音色，最高音的5條弦使用的最細的一條弦（圖示編號1，材質為尼龍弦，弦徑0.80mm），

中音的5條弦使用的次細的弦（圖示編號2，材質為尼龍弦，弦徑1.00mm），最低音6條弦所使用的是最粗的弦（圖示編號3，材質為尼龍弦，弦徑1.20mm），在調好音後，也同樣發現其規則：弦愈

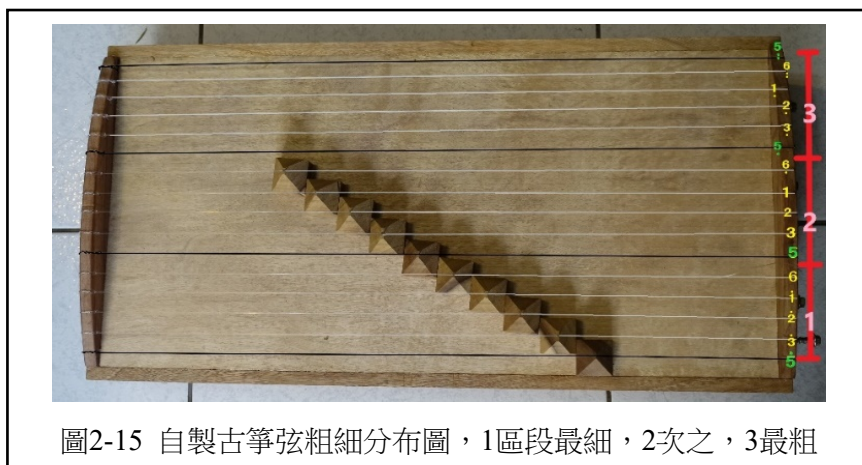


圖2-15 自製古箏弦粗細分布圖，1區段最細，2次之，3最粗

粗、愈長、張力愈小，其音調愈低；弦愈細、愈短、張力愈大，其音調愈高。

為了便於討論弦的粗細、張力、長短對音高的變化，最低音6條弦不使用雁柱，弦的長短及粗細顯而易見，而張力卻無法以做一致性的調整，因此，藉由控制琴弦的張力，來探討弦的粗細、長短及音高，三者之間的關係。

### 【研究結果2】

1. 弦的長短、粗細相同，音高不同：

5 5

3

1.20mm) 且弦的長短相

同（皆無使用雁柱），我們發現，同樣可以調出不同的音高，以表現出5 6 1 2 3 5的音階。

2. 弦的粗細相同，長度不同，可以讓其音高相同，或使長弦比短弦發出較高的音調：

即便使用雁柱，讓弦產生長短的變化，仍然可以控制琴弦的張力，調出相同的音高，甚至可以讓長的弦比短的弦發出較高的音調。

3. 弦的粗細不同，長度相同，可讓其音高相同，或使粗弦比細弦發出較高的音調：

使用三種不同粗細的弦，不論是否使用雁柱，只要控制好弦的張力，是可以讓粗弦比細弦發出較高的音調，但是要注意不可將粗的弦硬是調到高出正常音太多的音，若將弦調得過緊，將會有斷弦的風險。

#### 4. 小結：

以一般樂器的設計來看，細弦通常比粗弦音高，而短弦比長弦音高，但是控制琴弦的張力，可以同時讓粗弦比細弦、長弦比短弦音調還高。也就是說，控制琴弦的張力可以「打破」細弦比粗弦、短弦比長弦發出較高音調的規則，但是始終遵守這個規則：「弦愈粗、愈長、張力愈小，其音調愈低；弦愈細、愈短、張力愈大，其音調愈高」。

這也是為什麼我們選擇自製「古箏」，是因為古箏在彈奏過程頻繁使用左手在雁柱左方「按音」來增加弦的「張力」，達到在演奏過程聲音的變化，如 Fa 是由 Mi 按音使音高上揚而產生，而 Si 是由 La 按音使音高上揚而產生，也能以更多變化的方式將 Mi 按到 Sol 或將 La 按到高音 Do，產生更多音程的變化；甚至在演奏技巧上反過來使用「放音」（即先按住再放開，使弦先緊後鬆）形成降音變化，都是控制琴弦的張力所產生的。

#### （四）彈奏的過程

自製古箏具有三個八度音程，我們可以不受音高限制，彈奏出任何一首曲子，樣具有三個八度音程的自製樂器，確實可以如實表現出我們熟悉的歌曲。

### 三、有雁柱與無雁柱對自製古箏的影響

聲音的三大要素是高低、大小和音色，這三要素都能使波形產生改變，音的高低是由振動的頻率來決定，聲音的大小由聲波的振動幅度（振幅）來決定，而音高和大小不會影響波形的規律，但音色不同音波的形態則會全然改變，各種樂器具有不同的波形。以下我們使用 Audacity 電腦軟體，來從波形來分析有無雁柱的聲音變化，兩者並排，上為無雁柱，下為有

♯6 1 2 3 ♯6

1 2 3 5 6


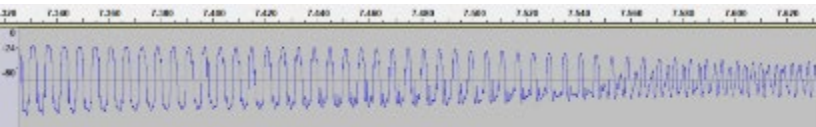
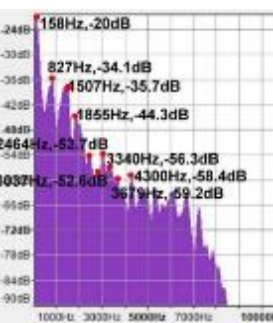

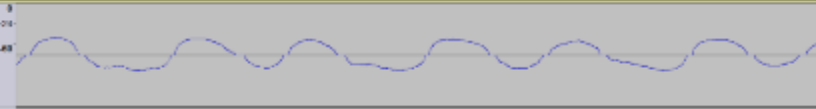
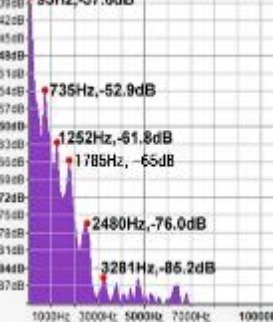


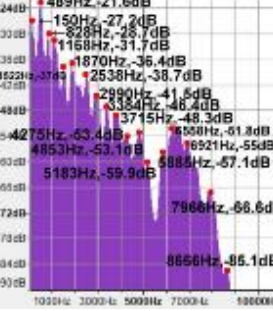
i 2 3 5

**（一）發現問題六：**以原有雁柱最低音146.5Hz 為基準調音，但是調到 Re(以441.2Hz 為基準)，由於缺少雁柱輔助，無法將長度這麼長的弦調到同樣的音，弦最終承受不了而斷掉，我們

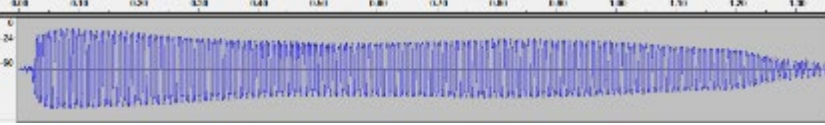
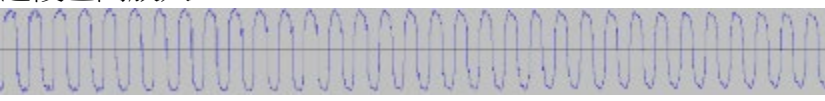

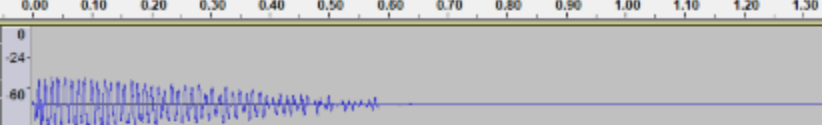

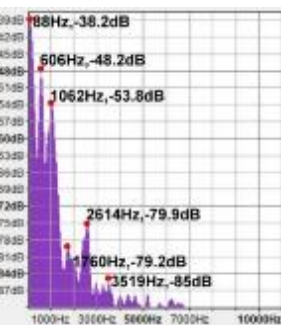
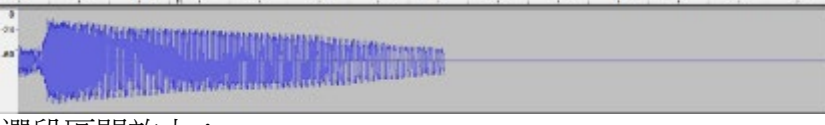


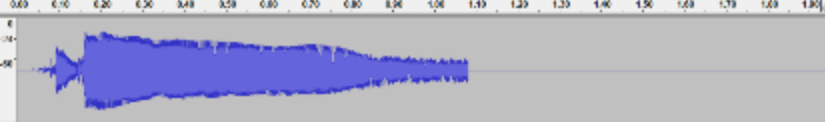
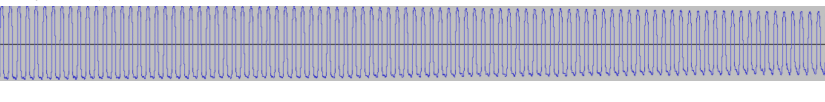
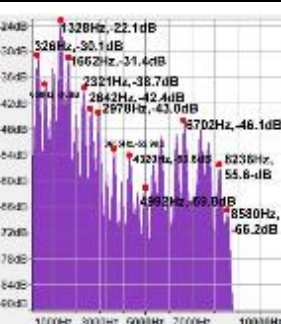
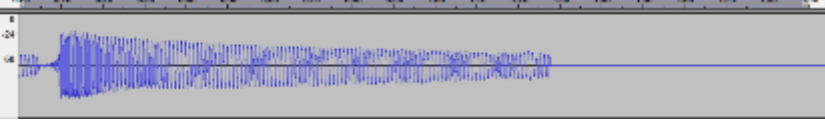
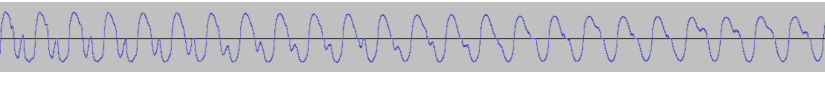
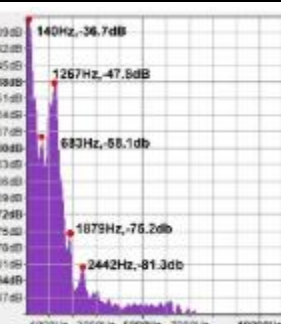


3-1的 $\text{6}^{\flat}$ 、 $\text{1}$ 、 $\text{1}$ 的第一個波形圖。

(二)解決方法：在無雁柱之下，由於高音細弦無法配合低音粗弦的調音方式，因此，調弦順序應改為由高音細弦調至低音粗弦，但是高音細弦在沒有雁柱的輔助下，最高音在還沒到達1176.7Hz 的音高標準時就斷弦，無法依照有雁柱的赫茲標準（有雁柱的最高音為1176.7Hz）調音，經實驗只能依「原音低兩個八度（293.6Hz）」為調音基準，每個八度的 Sol 音頻率依序為：293.6Hz→146.5→73.4→36.7，而前面提到最低音調至73.2Hz，弦已經過於鬆弛（張力小），為了看到全部音的波形變化，我們仍然將音調往下調，當音高頻率低於73.2Hz 時更為鬆弛（張力更小），表現出來的音已不像弦樂器，反而更像打擊樂器的聲音。

簡譜音	波形圖 橫軸為時間(秒)，縱軸為振幅(分貝)，同一個音的波形取同時間比較	頻譜圖
$\text{6}^{\flat}$ 兩度低音 La  無雁柱	以最低音146.5Hz 為基準往高音調音：(張力大) $\text{6}^{\flat}=162.3\text{Hz}5$  選段區間放大： 	
	以最高音293.6Hz 為基準往低音調音：(張力小) $\text{6}^{\flat}=40.6\text{Hz}$  選段區間放大： 	
有雁柱	$\text{6}^{\flat}=162.3\text{Hz}$  選段區間放大： 	



簡譜音	<p style="text-align: center;">波形圖</p> <p style="text-align: center;">橫軸為時間(秒)，縱軸為振幅(分貝)，同一個音的波形取同時間比較</p>	<p style="text-align: center;">頻譜圖</p>
<p style="text-align: center;">1 低音 Do</p> <p style="text-align: center;">無 雁 柱</p>	<p>以最低音146.5Hz 為基準往高音調音：(張力大) <math>\downarrow</math>=195.5Hz</p>  <p>選段區間放大：</p> 	
	<p>以最高音293.6Hz 為基準往低音調音：(張力小) <math>\downarrow</math>=48.8Hz</p>  <p>選段區間放大：</p> 	
<p style="text-align: center;">有 雁 柱</p>	<p><math>\downarrow</math>=195.5Hz</p>  <p>選段區間放大：</p> 	
<p style="text-align: center;">1 Do</p> <p style="text-align: center;">無 雁 柱</p>	<p>以最低音146.5Hz 為基準往高音調音：(張力大) <math>\downarrow</math>(Do)=394.6Hz</p>  <p>選段區間放大：</p> 	
	<p>以最高音293.6Hz 為基準往低音調音：(張力小) <math>\downarrow</math>(Do)=97.8Hz</p>  <p>選段區間放大：</p> 	

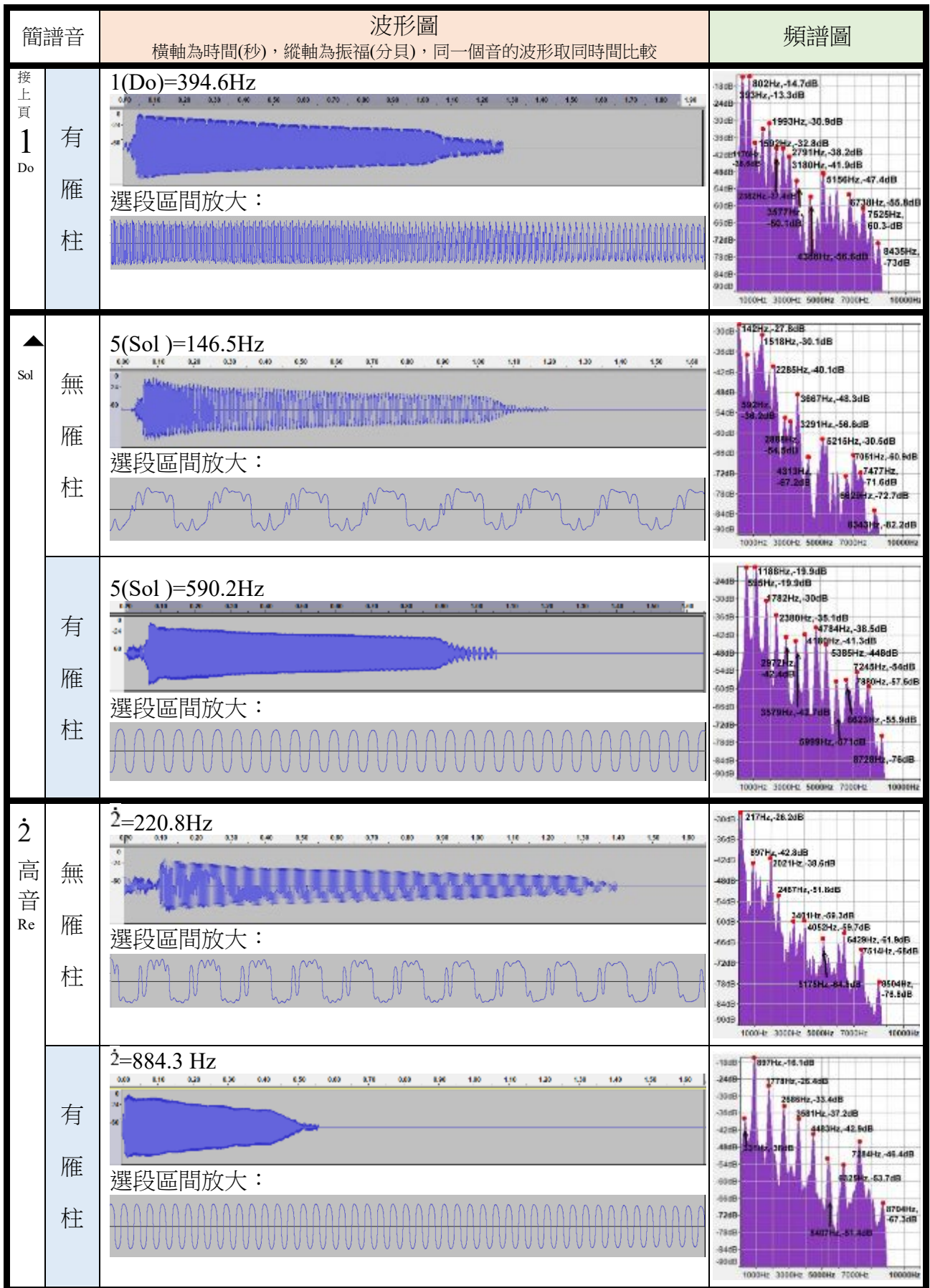


圖3-1 有無雁柱的波形及頻譜圖舉例

### 【研究結果3】

我們從音波形狀來看聲音維持一定規律形狀的情形，以及從頻譜圖分析來看聲音的維持或衰弱情形。自製古箏共有16條弦，每條弦60公分長，從低、中、高音段來看無雁柱的情形，而我們知道除了噪音以外，每種聲音的波形都會維持一定的規律形狀，而聲波形狀改變時，聲音也會隨之變化。

#### （三）雁柱對調音方式的影響

以下將有無雁柱調音方式的製成表3-1，透過雁柱的輔助能使每一條弦維持一定的彈性。

表3-1 有雁柱及無雁柱的調音方式

	調音方式
無雁柱	只能由高音細弦（原音低兩個八度(293.6Hz)的標準）往低音粗弦調音。
有雁柱	可依正常方式調音，不須降兩個八度，且能透過雁柱調整弦的長短，減少調音時張力過大，造成斷弦的情況。

#### （四）雁柱對音色的影響

##### 1. 雁柱對低音段（ $\text{♭}^1\text{♮}^2\text{♮}^3\text{♮}^5\text{♮}^6$ ）的影響

無雁柱在低音段的波形分成兩種情形，第一類是以低音146.5Hz 為基準往高音調音（低音段張力大），第二類是以高音293.6Hz（低音段張力小）為基準往低音調音。以最低音146.5Hz 為基準往高音調音，弦的長度雖然因為缺少雁柱而變長，但音調要達到與有雁柱的標準，使得弦的張力變大，因此聲音聽起來響亮，音波整體形狀完整，且聲音延長性甚至維持得比無雁柱時長，放大波形也看到波形規律，如上圖3-1  $\text{♮}^6$  ！

以高音293.6Hz 為基準往低音調音，最高細弦最高只能從293.6Hz 為基準往低音調音，若再提高音調則會斷弦，而在此情形下，音階到了低音段時，弦已經十分鬆弛（張力小），聲音短、弱，且無法達到一定響度，只出現微弱的聲響，由頻譜圖也明顯看出聲音衰弱十分迅速，聲音沒有延長性，張力小而抑制高音的頻率；放大波形來看，聲音衰弱快使得幾乎快看不到波形有規律的形狀，在調音的過程甚至難以抓準音高，音高在撥動弦之後浮動，容易走音，音階不穩定。

##### 2. 雁柱對中音段（12356）的影響

無雁柱以低音146.5Hz 為基準往高音調音，中音段不論是否有雁柱對聲音的影響不大，聲音的波形長短、形狀相似，頻譜圖也類似，如上圖3-1：1、5；第二次無雁柱調音以293.6Hz 為基準往低音調音，1這個音仍舊面臨與低音段同樣情形：弦過於鬆弛而失去聲音響度、延長性。

### 3. 雁柱對高音段 ( $i\dot{2}\dot{3}\dot{5}$ ) 的影響

在高音段若以低音146.5Hz 為基準往高音調音，調至 Re(以441.2Hz 為基準)這個音時即斷弦，因此只能以293.6Hz 為基準往低音調音，在音高不同的情形下，雖然是同樣的音名，但是由於有雁柱的音高較高，因此波形出現比較密集的現象。且發現無雁柱的弦長且具有一定的張力，所以聲音容易產生共鳴、響度大、延長性，而有雁柱因為音調更高，振動長度變得非常短，使得聲音尖銳、波形較為短小，如圖3-1 2

#### (五) 小結：

雁柱對聲音的響度、延長性並沒有直接影響，但是對樂器本身具有關鍵性的角色。在無雁柱的情況下仍然可以產生高音質的聲音，在放大波形，看到使用雁柱後，波形雖然規律但是形狀改變，表示音色產生些微變化，但整體來說，只要弦的緊度足夠，都能產生樂音；而雁柱對「古箏」這種中大型樂器來說時卻十分重要，透過雁柱輔助，增加弦的彈性，不易斷弦，透過波形看到低、中、高音的聲音變化，在跨越三個八度的聲音表現中，確實讓粗弦與細弦發揮作用，讓細弦顯出它的高音而不易斷弦，也讓粗弦顯出它渾厚的低音而不鬆弛。

我們原以為雁柱是為了增加聲音的清脆度，而這樣的假設只對一半，真正讓聲音產生清脆度的是箏頭與箏尾高起來的木頭片，在轉緊弦時就能發出清亮的聲音，但是少了雁柱仍然無法展現音域寬廣、更具變化的聲音，一旦少了雁柱就如古琴，聲音聽來較為沉悶、鬆散，無法展現「大弦嘈嘈如急雨，小弦切切如私語」高低音的張力，自製古箏之所以能跨越三個八度音，展現多層次的音色，正是因為「雁柱」的輔助而達成的效果。



#### 四、探討影響音色的因素

我們實地訪問10位音樂專家，包含5位古箏專家及5位弦樂器專家（1位琵琶、2位小提琴、2位吉他樂器專家），從這10位音樂專家對音色佳的敘述可分為其條件及特色，如表4-1。

表4-1 訪問10位音樂專家對音色佳的定義

身分	音色佳的條件	音色佳的聲音特色
1 古箏老師(男)	(1) 製作：弦材質佳，木材質地堅硬，密度高。材質差的弦會有雜音，材質差的箏換質地好的雁柱可提升音色，如紫檀木。 (2) 聲音穩定，不易走音，不是愈貴的箏愈好。	聲音集中、音色明亮，如紫檀木的箏，新箏明亮，愈彈愈沉穩，高音仍明亮，愈彈愈具特色，通常以「唐正飛」所製的箏音色佳，大部分比賽優勝者多半使用其所製的箏，音穩定性高。
2 古箏老師(男)	(1) 聲音：低中高音平均，餘音長、共振長。 (2) 不易走音。	每個人對音色的喜好不同，大致上低音渾厚、中音飽滿、高音明亮。
3 古箏老師(女)	(1) 製作：木材及雁柱密度高、質佳，紫檀木比紅木好，並製工精細(如敦煌牌)。 (2) 親自彈奏大型樂曲測試，才能顯出琴弦的張力與整體感，不以價格作為品質定位。 (3) 音準穩定，不易走音。	聲音不乾扁、不分散，共鳴讓人感覺像立體音響，聲音集中又有層次感，低中高音相互襯托，發揮古箏音域廣的特色。
4 古箏老師(女)	(1) 振槓持續時間合適，過短沒韻味，過長吵雜，過短沒韻味效果。 (2) 由低音到高音聲音有層次感。	快速彈奏聲音聚集醇厚，接音的聲音有韻味；用力彈時，聲音不會有炸開的感覺。
5 古箏老師(女)	(1) 製作：雁柱密度高，如果放到水裡會沉到底，會使音質更響亮、集中，弦槽工整才不會有雜音。 (2) 箏身：小於128公分則會影響音色。	沒有一種箏能符合各種完美需求，各有千秋，一般音色好表示聲音緊緻、明亮、純淨。
6 精熟琵琶演奏者(女)	(1) 音準正確，無雜音、不吵雜。 (2) 餘音延長適中，太短不悠揚，太長不乾脆。 (3) 共鳴洪亮但有顆粒感，每音清晰分明。	(1) 高音清脆明亮(不吵)。註：音色主觀，無十全十美。 (2) 中音堅實不燥(不乾不扁)。 (3) 低音洪亮、渾厚(不悶，聲音直接，不像隔了一層距離)。
7 小提琴演奏家(男)	(1) 材質：木材好、製工佳；尾脈弦變化性大，大部分演奏家都使用。 (2) 松香使用適當，過多粉飛揚，過少聲音乾扁少了磨擦。	聲音既有穿透性又柔和。
8 小提琴老師(女)	(1) 材質：木頭來源、製作的技術精細、琴弦的選擇。 (2) 音準穩定。	聲音渾厚，高低音平衡，可低沉又可高亢，清脆又響亮，親自試拉，能發出人聲般的溫暖。
9 吉他老師(男)	(1) 材質：實木製成的聲音較好；弦的廠牌弦粗細規格不一，精緻度會影響聲音。 (2) 音高穩定度強。	聲音渾厚、集中，不鬆散。
10 精熟吉他演奏者(男)	(1) 木質好、製工精細，琴身平直，琴頭好握。 (2) 音箱共鳴長。	共鳴響亮，不會悶悶的；聲音乾淨、清脆，沒有雜音；保持穩定的音高。

以上製造樂音方式：古箏、琵琶、吉他以手指彈撥，小提琴以拉弓方式。而歸納10位音樂專家對音色佳的定義，可分為製工、音質、聲音特色及共鳴，如表4-2：

表4-2 音色佳的條件

	音色佳的條件
製工	不論是箏身或雁柱，木材材質佳、製作精細。
音準	音準穩定。
共鳴	足夠的共鳴形成足夠的響度。
聲音特色	聲音集中無雜音，低中高音域分明，低音渾厚，中音飽滿，高音明亮。

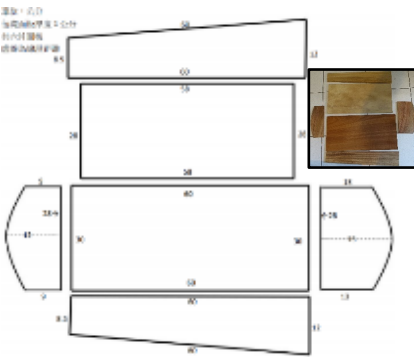
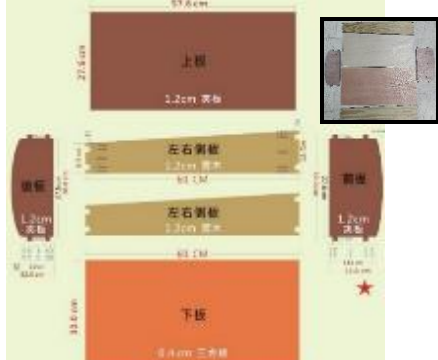
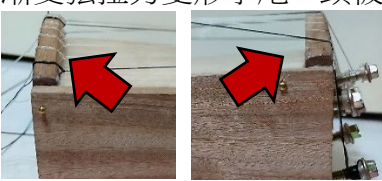

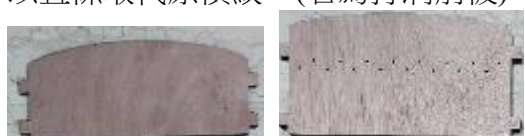

從表4-2來看，影響音色的因素有製工、音質、聲音特色及共鳴，而音準可能會因製工精準而更為準確。因此，以下以音準、響度及波形作為音色佳的指標，進行三項實驗分析。


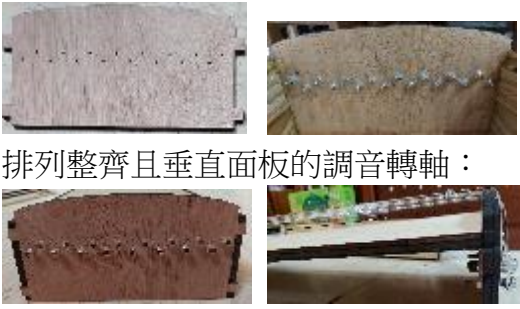

##### (一) 音高頻率準確度的實驗探討



1. **發現問題七**：從第一製的自製古箏發現，音準經常走音，彈奏前都須再調音。
2. **假設**：改變弦的材質或製作方式，讓製弦及箏身更穩固，可以降低走音的情況。
3. **解決方法**：如表4-3
  - (1)木板切割：以雷射切割方式讓每個木材角度更為密合，不使木板晃動而影響音高。  
卡榫接合：木板間設計卡榫接合，並以白膠加強固定木板之間，使木板減少晃動，並減少釘子（樂器不宜釘製）製作，使聲音振動時只有木板本身的共鳴。
  - (2)原自製古箏木材紋路是橫條，於是箏頭與箏尾木板受到弦的拉力而逐漸變形而往內凹，再製古箏箏頭與箏尾木板改以直條紋路製作。但是原木板是杉木製成，若以杉木則無法以直條紋製作，於是改變為夾板材質製作。
  - (3)調音轉軸以螺絲及螺帽取代。調整弦的轉軸因洞孔在調音過程逐漸變大而鬆動，若將洞孔是先以機器穿孔，再以螺絲及螺帽固定，便能穩固弦在高張力下的拉力。
  - (4)使用鋼弦：請教樂器行老闆後了解，原本所使用的尼龍弦會因逐次調緊弦的過程，逐漸將弦拉緊、延長，因此製作一組鋼弦自製古箏，減低弦延長而走音的可能。

表4-3 改良自製古箏項目說明

改良項目	說明（原第一製尼龍弦箏，第二、三製尼龍及鋼弦箏為改良版）		
	第一製尼龍弦箏（原製）	第二製尼龍弦箏	第三製鋼弦箏
1 精準以榫接向量圖檔設計每片1.2公分（統一規格）的木片圖形			
2 改變木材的本身紋路方向。裁切直條木板增加材料成本，卻能加強直向承受力。	<p>漸受弦拉力變形箏尾、頭板：</p>  <p>原為橫條紋(左箏尾右箏頭)：</p> 	<p>以直條取代原橫紋：(右為打洞前板)</p>  <p>製成的後、前面板：</p> 	

改良項目	說明（原第一製尼龍弦箏，第二、三製尼龍及鋼弦箏為改良版）		
	第一製尼龍弦箏（原製）	第二製尼龍弦箏	第三製鋼弦箏
3 調音轉軸孔雷射打洞，並以螺絲及螺帽固定弦	<p>原以自攻螺絲作為調音轉軸，排列不整齊且轉軸易受弦拉力而向傾斜，洞孔漸鬆動：</p> 	<p>以雷射切割打洞穩定洞孔垂直度，螺絲為轉軸(左圖)，於面板背後黏螺帽輔助螺絲調音轉軸的緊度及力量(右圖)：</p> <p>排列整齊且垂直面板的調音轉軸：</p>  <p>左圖第二製尼龍弦，右圖第三製鋼弦：</p> 	
使用鋼弦。僅第三製使用鋼弦作為改良箏的比對（最高音1~5條弦用吉他第一弦，次高音6~10用第二弦，最低音11~16用的三弦）	<p>第一製與第二製皆使用尼龍弦箏</p>  <p>30.5公分 13公分</p> <p>第一弦(弦徑0.80mm) 第二弦(弦徑1.00mm) 第三弦(弦徑1.20mm)</p>	<p>第三製鋼弦為參照：</p>  <p>第一弦(弦徑0.40mm) 第二弦(弦徑0.45mm) 第三弦(弦徑0.70mm)</p>	

#### 4. 音準實驗過程：

若要提升音色其中一個條件是「音準」。為了讓測量的條件更一致，自製古箏的雁柱改以三角柱木條，擺放位置距離第一弦（振動長度）13公分，距離第16弦（振動長度）為30.5公分（長度是取自各台箏的最佳音色平衡點而定）。古箏在相對濕度30~70%及溫度16°C~28°C溫度最不容易走音，且能維持箏身的結構，最理想的環境是相對濕度55%、溫度20度。琴弦走音幅度大的因素：(1)調音後時間長；(2)彈奏量多及力道大；(3)新弦；(4)溫度或濕度變化多。



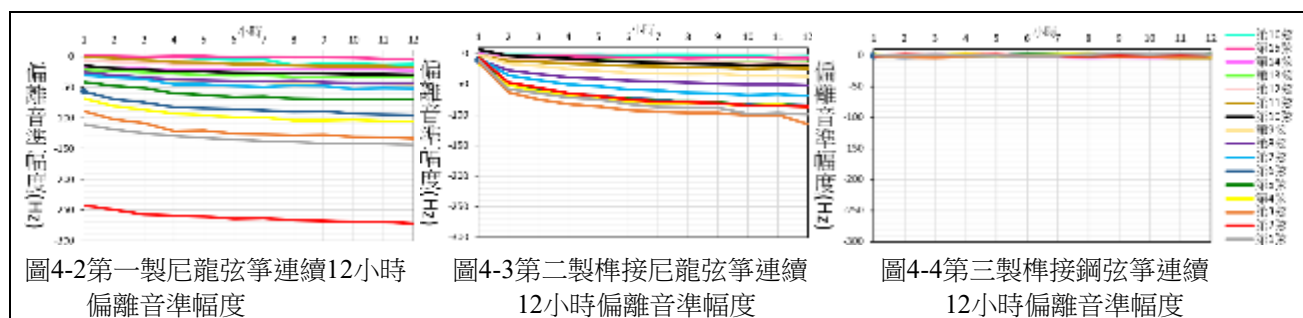
圖4-1 各台古箏音準測量實際場域

因此，將三台自製古箏置於濕度55%及25°C（考慮到實驗時室外溫度約28°C，避免箏在實驗後環境溫差過大，將溫度定為25°C）同一場域，如圖4-1，同批換上新弦，測量自製古箏在經過不同時間及彈奏量（力道控制一定）測量每台箏的每條弦音準偏離幅度。將走音因素排除弦的新舊及溫、濕度變化，控制時間及彈奏次數，來看偏離音準幅度。

以原（第一次製作）尼龍弦自製古箏、第二次製作榫接的尼龍弦自製古箏、第三次製作榫接的鋼弦自製古箏、市售163公分古箏及55公分小古箏（長度與自製古箏相似）測量音高頻率來看音準偏離幅度。

### (1) 【音準實驗(一)】

將每小時與標準音高相差頻率(Hz)記錄下來（標準音見第10頁，圖2-5），共12小時，第1弦為最高音 $\dot{5}$ ，第16弦為最低音 $\dot{5}$ 。



弦序	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
第一製尼龍弦箏	-12.3	-4.1	-22.9	-33.6	-17	-17.4	-29.7	-45.3	-44.9	-52.4	-95.6	-70.8	-106.1	-134	-272	-143.8
第二製尼龍弦箏	-5.2	-7	-15.8	-14.8	-15.5	-24.3	-19.2	-37.2	-51.6	-69	-84.7	-85.4	-87.2	-115.1	-86.9	-99.3
第三製鋼弦箏	-2.4	-2.8	-3.6	-2.8	-2.5	-3.7	-0.5	0.6	-1.6	-0.4	1.1	2.9	-0.9	-0.3	0.8	2.1
市售163公分箏	0.2	-0.1	-1	-2.3	-1.2	-1.5	-0.6	-1.6	-0.5	-1	-5.3	4.2	-7.7	-7.4	-4.6	4.7
市售55公分箏	4.2	4.9	-6	-7.5	-5.4	-5.4	-3.9	4.1	-14.9	-13.6	-13.6	-14.5	-15	-14.3	-14.8	-11.5

圖4-5 12小時後自製古箏與市售古箏偏離音準幅度色階差異圖（單位：赫茲 Hz）

### 【研究結果4】

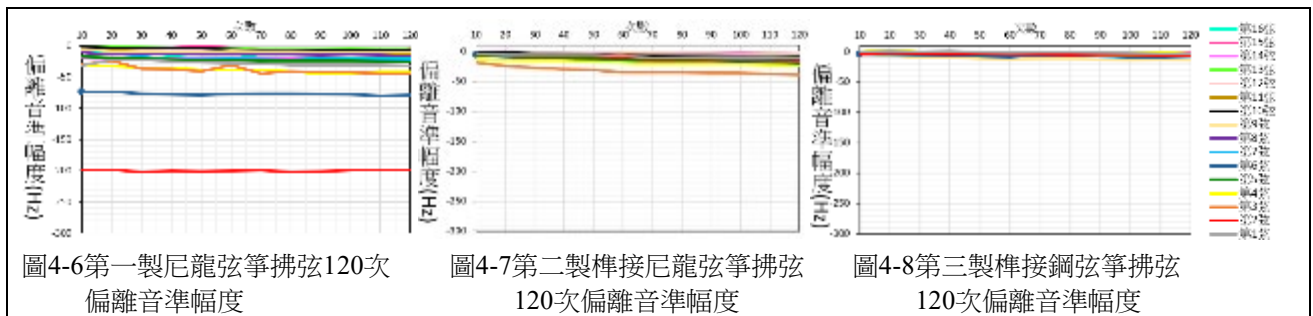
- a. 自製古箏以榫接、直條紋木材、雷射切割打調音轉軸孔，並以螺絲及螺帽作為調音轉軸（如圖4-3、4-4的第二、三製古箏），確實可以增加音準穩定度。第一製尼龍弦箏音準偏離過多，已無法辨識相對音高，有些調音轉軸音為洞孔鬆弛已無法固定，如第二弦 $\dot{3}$ ，從第一小時就偏離近-250Hz，比第三弦 $\dot{2}$ 還要低音，無法調音。
- b. 鋼弦增加音準穩定度。第二製與第三製榫接自製古箏是同樣的製作方式，但第三製與第二製的差異在於使用鋼弦，減少尼龍弦的延展，鋼弦具較佳的摩擦力而更貼合調音

轉軸，經過12小時音準幾乎毫無偏離（16條弦偏離音準幅度皆約維持為0）。

- c. 自製榫接鋼弦音準穩定度優於市售55公分箏。從12小時後自製古箏與市售古箏偏離音準幅度色階差異圖中，如圖4-5，綠色格（包含深綠、淺綠與淡綠）是一般人耳辨識不出差異的音準範圍，不影響一首歌的旋律；深綠、淺綠的數值皆為正常的誤差值範圍，而淡綠是一般人耳無法察覺，但演奏家、絕對音感者及儀器可能察覺的音準偏離幅度。經過12小時後，第三製榫接鋼弦箏音高數值穩定度比市售163公分箏好，但這部分有可能是測量誤差範圍。古箏長度小於128公分則會影響音色，愈小的箏愈容易走音，而第三製榫接鋼弦箏音高準確度更勝市售的55公分箏，靜置多天音高仍準確。

## (2) 【音準實驗(二)】

10次（每拂10次約15秒鐘），每拂10次同等於彈弦10次，共測12次，記錄音高頻率測量走音幅度，來看音準穩定度。



弦序	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
第一製尼龍弦箏	-20.9	4.8	-24	-6	-8.6	-12.3	-7.7	-10.1	-16.9	-22.2	-79	-26.1	41.7	44.9	-198.2	-31.8
第二製尼龍弦箏	4.2	4.3	-3.4	-5.8	-3.5	-9.6	-9.7	-17.1	-17.4	-17.2	-22.8	-21.2	-24.2	-39.5	-14.7	-11.4
第三製鋼弦箏	-3.3	-2	-5	-3.7	-3	-3.1	-3.7	-14	4.1	-7.8	-8	-7.4	-3.2	-6.3	-5.2	-2.8
市售163公分箏	0.3	0.1	0.1	0	0.3	0.6	0.3	-0.2	0.8	-0.2	-0.8	0	-0.4	-2.3	0.2	1.4
市售55公分箏	-0.5	-1.4	-0.5	-1.2	-1.1	-2.4	-3	-2.1	-2.9	-3.5	-5.4	-5.5	-8.1	-11.1	-10.5	1.4

圖4-9 拂弦120次偏離音準幅度色階差異圖（單位：赫茲 Hz）

### 5]

- a. 自製古箏以榫接、直條紋木材、雷射切割打調音轉軸孔，並以螺絲及螺帽作為調音轉軸（如圖4-7、4-8的第二、三製古箏），能穩定音準。第一製尼龍弦箏音準偏離過多，第二弦<sup>3</sup>同樣從第一測量就偏離近-200Hz，比第三弦<sup>2</sup>還要低音，無法調音。第二製尼龍弦箏拂弦120次後仍維持一定音準。（綠格為一般人辨識不出差異的音準範圍）榫接鋼弦音準穩定度在自製古箏中最佳。經過拂弦120次後音準幾乎毫無偏離，僅第



9弦音準幅度稍多（-14Hz），但仍不影響彈奏一首歌的辨識音。

d. 比較：

(a) 時間愈久，第二製樺接尼龍弦箏相較於拂弦120次，偏離音準幅度愈多，12小時後10條弦已稍走音（音準偏離幅度超過-20Hz），拂弦120次僅4條弦走音。

(b) 彈奏次數愈多次，第三製樺接鋼弦箏相較於經過12小時，偏離音準幅度愈多，但音準都維持在能辨識音準的範圍內。

(c) 長度與自製古箏相當的市售55公分箏時間愈久，相較於拂弦120次，偏離音準幅度愈多。

e. 小結：樺接鋼弦自製古箏靜置的音準比市售的55公分小古箏還穩定，彈奏後經過力道拉扯，雖較易有些微音準的變化，但仍不影響演奏一首曲子的音準，品質遠優於第一製及第二製箏，對自製古箏改良十分具有成效。

## （二）無音箱、有開口音箱、無開口音箱及市售163公分古箏響度的實驗探討

若要提升音色其中一個條件是「響度」。課本中的自製樂器仿造吉他使用盒子挖洞並套上橡皮筋，以製造一個音箱讓聲音產生共鳴，市售古箏在其背面一樣有挖洞作為共鳴。實驗以戴上古箏義甲，撥弦十次取平均分貝值，以分貝計測量分貝（dB）大小來看自製古箏的響度。

測量樺接自製古箏：無音箱（上板、前板及後板，如圖4-10）、有開口音箱（拆下底板，如圖4-11）、無開口音箱（6片木板完全密合，如圖4-12）的分貝值。無音箱尼龍弦箏僅有前後版，難以支撐弦的拉力，因此做了兩個箏架橫跨前後板，並以L型支架增加箏架木材強度，測量時抬高避免與接觸面產生共鳴，而有開口音箱測量時將分貝計放在音箱開口處測量。



圖4-10 無音箱樺接尼龍弦箏



圖4-11 有開口音箱樺接尼龍弦箏



圖4-12 無開口音箱樺接尼龍、鋼弦箏

## 【研究結果6】



分貝（dB）是用以表現響度的單位，我們用測量分貝值來實驗及觀察，測試每條弦在無音箱及有音箱的情況下的響度變化，同為榫接尼龍弦自製古箏，在無音箱、有開口音箱和無開口音箱的響度變化中，發現音箱在有開口的情況下分貝值變大、響度增加，而無開口音箱和無音箱的響度大致上差不多，但卻無法增加響度，如圖4-13。

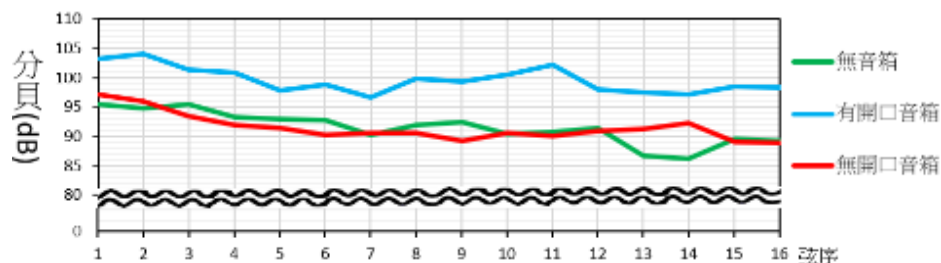


圖4-13 無音箱、有開口音箱、無開口音箱響度差異圖（單位：分貝 dB）

得知有開口音箱響度最大後，若單以響度條件來看，最佳的音色箏體為有開口的榫接自製古箏，而從音準實驗中知道榫接自製古箏中，鋼弦的音準優於尼龍弦，與市售163公分古箏無異，音高穩定度優於市售55公分攜帶型古箏。進而測試自製鋼弦箏及市售163公分古箏的響度，與自製尼龍弦箏響度做比較，如圖4-14。

市售163公分古箏音箱大、材質佳、聲音共鳴效果好，因此響度大於自製古箏，而自製鋼弦及尼龍弦箏的響度差不多。也就是說，自製鋼弦及尼龍弦箏在響度相當的情形下，鋼弦的音準遠比尼龍弦穩定，最佳的音色箏身為「有開口的榫接鋼弦自製古箏」。

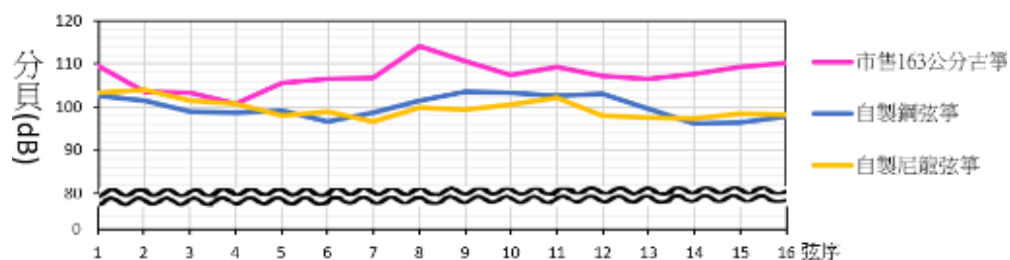


圖4-14 無音箱、有開口音箱、無開口音箱響度差異圖（單位：分貝 dB）

### （三）製作方式、音箱形式、弦的材質對波形的實驗探討

以音準、響度及波形可作為音色佳的指標，在音準及響度實驗探討中，知道鋼弦、有開口的自製古箏的音色條件最佳，進而分別探討第一製尼龍弦箏及第二製榫接尼龍弦箏波形差異，無音箱及無開口音箱波形差異，榫接尼龍弦及鋼弦有開口音箱波形差異。

#### 1. 第一製尼龍弦箏及第二製榫接尼龍弦箏波形差異

第一製尼龍弦箏及第二製榫接尼龍弦的製作差異在於製作方式：榫接、木材紋路（紋路改變則木質須更換，但盡量與原木材相似）及調音轉軸穩定度的不同，觀察波形發現：

**【研究結果7】**

- (1) 響度能量削弱時間：以「音量降低20dB 則相當於能量衰減為0.01倍」的特性來看，計算出第一製尼龍弦箏及第二製榫接尼龍弦箏聲波能量削弱0.01所需的時間（四捨五入計算至小數點第2位）。兩者削弱所需秒數以小數點百分位的差異，對聲音來說差異不明顯。
- (2) 聲音延長時間：大致上兩者音色各有些微差異，分不出優劣。如圖4-15，以!、□、i為例。

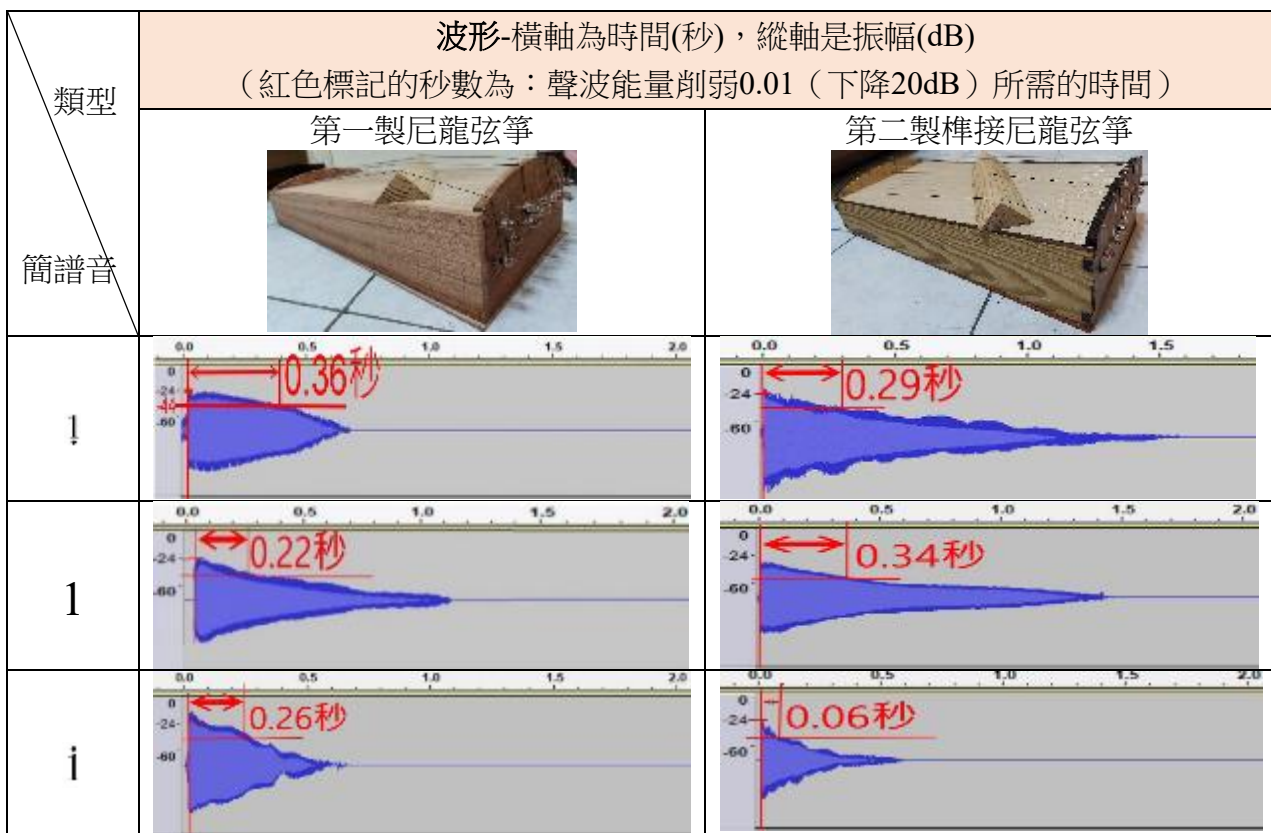


圖4-15 第一製尼龍弦箏及第二製榫接尼龍弦箏的聲波衰減（以!、□、i為例）

2.無音箱及無開口音箱波形差異

測試分貝值的過程聽到無開口音箱使得聲音的延長性變佳，但實際響度卻沒有增加，以同樣製作方式的榫接尼龍弦箏來看，將僅上板、前板及後板的無音箱，與六片製箏面板完全密合兩類型的自製古箏，比較兩者的波形發現：

**【研究結果8】**

- (1) 響度能量削弱時間：無開口音箱分貝能量削弱時間慢，明顯看出聲音響度維持較久。
- (2) 聲音延長時間：無開口音箱的聲音更為豐厚，聲音停留更長，如圖4-16的 $3$ 、 $6$ 、 $5$ ，且愈低音愈是明顯，聲音在彈奏之後不斷與木箱迴盪，如 $3$ ，我們還發現當無開口音箱響度比無音箱略小時，如圖4-16的 $3$ 和 $5$ ，它的聲音延長度仍然稍微長，無論低（ $5$   $6$   $1$   $2$   $3$   $5$   $6$ ）、中（ $12356$ ）、高（ $1235$ ）音段，無開口音箱的渾厚度較好、音色較佳。
- (3) 小結：若要使音箱增加響度的作用，必須要像課本自製樂器一樣，將音箱挖洞。一般我們看到演奏家在演奏時，會將麥克風置放於音箱的音孔。而琵琶這樣的樂器（無開口音箱）就像我們的自製古箏，它的音箱用以增添音色的作用可能大於增加響度的作用，只要有音箱對於樂器本身都有加分的效果，聲音會透過木頭振動，在音箱內產生共鳴，進而提升音色。



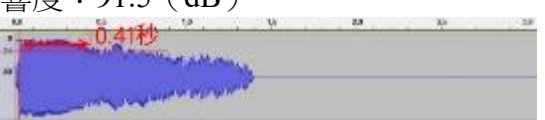
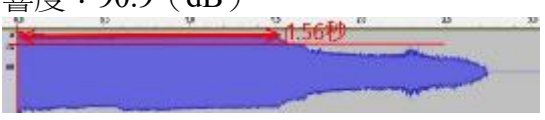
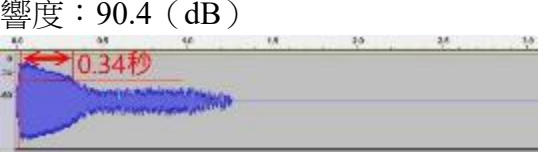
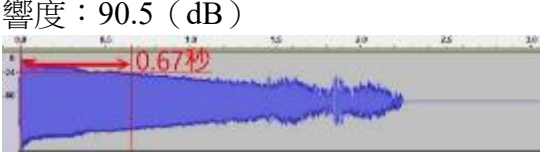
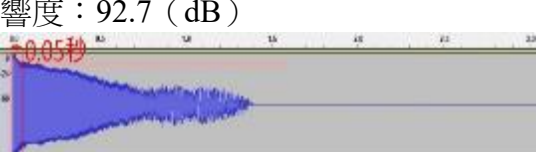
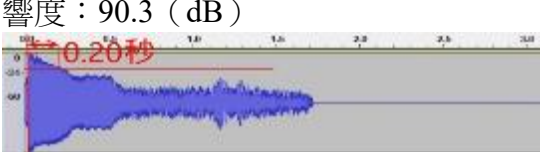
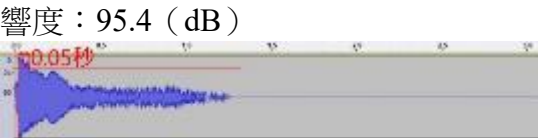

類型	波形-橫軸為時間(秒)，縱軸是振幅(dB) (紅色標記的秒數為：聲波能量削弱0.01 (下降20dB) 所需的時間)	
	無音箱樺接尼龍弦箏	無開口音箱樺接尼龍弦箏
簡譜音		
$5$	響度：91.5 (dB) 	響度：90.9 (dB) 
$6$	響度：90.4 (dB) 	響度：90.5 (dB) 
$5$	響度：92.7 (dB) 	響度：90.3 (dB) 
$5$	響度：95.4 (dB) 	響度：97.2 (dB) 

圖4-16 無音箱及無開口音箱響度相似，聲波衰減的狀況不同（以 $3$ 、 $6$ 、 $5$ 、 $5$ 為例）

### 3. 榫接尼龍弦及鋼弦有開口音箱波形差異

從無音箱和無開口音箱的實驗得知：有音箱能使得聲音產生共鳴，但未必能提高響度。只有「有開口的音箱」才能傳遞音箱所產生的共鳴。從有開口的音箱中，分別比較榫接尼龍弦箏、榫接鋼弦鋼弦箏的波形，再與市售的163公分古箏波形相對照，以低、中、高音段 $\dot{2}$ 、 $2$ 、 $\dot{2}$ 為例，如圖4-17。

#### 【研究結果9】

- (1) 響度能量削弱時間：低(如圖4-17的 $\dot{2}$ )、中音段(如圖4-17的 $2$ )、高音段(如圖4-17的 $\dot{2}$ )，榫接鋼弦箏能量削弱時間與榫接尼龍弦箏看似有秒數的差異，但小數點百分位的差異在實際上沒有明顯差異。而市售的163公分的大型古箏，聲音渾厚度夠飽滿，聲音集中充滿能量，但榫接鋼弦箏音質明顯優於榫接尼龍弦箏。
- (2) 聲音延長時間：榫接鋼弦箏的聲音延長時間看似較榫接尼龍弦箏久，但以(如圖4-17的 $\dot{2}$ )來說，榫接鋼弦箏的波形看似較尼龍弦渾厚，但響度從最高振幅下降20dB，聲波能量已下降0.01倍，若再下降20B，聲波已下降0.0001倍，對於人耳已無法辨識，(下面紅線)以下所出現的波形即為雜訊，並非該音的波形。

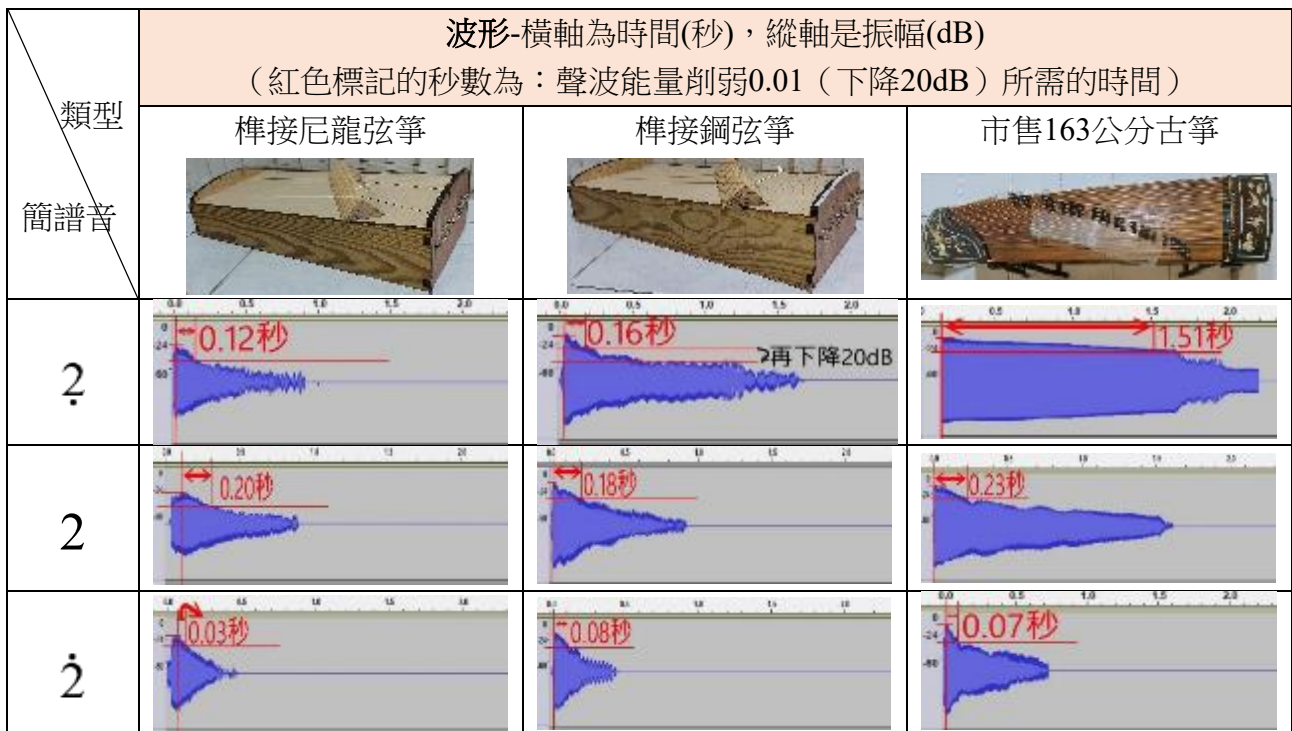


圖4-17 榫接尼龍弦箏、榫接鋼弦鋼弦箏波形差異舉例 (以 $\dot{2}$ 、 $2$ 、 $\dot{2}$ 為例)



#### (四) 小結

##### 【研究結果10】

從音高頻率準確度實驗中，發現鋼弦自製古箏的音準最穩定。綜合以上製作方式、音箱形式、弦的材質的波形比較：榫接方式對自製古箏沒有很明顯的音色變化，不足以作為結論；有音箱比無音箱聲音更具渾厚度，但若能增加音孔作為有開口音箱，便能兼具響度及渾厚度。

以音準、響度及波形為音色標準，將第一、二、三製改良的自製古箏逐一比較，如表4-4，第三製有開口音箱榫接鋼弦箏的音色最佳：音準最穩、響度最大，是自製古箏中音色最佳的代表。

表4-4 第一、第二、第三自製古箏音色佳之條件比較表

條件 \ 類型	第一製尼龍弦箏		第二製榫接尼龍弦箏		第三製榫接鋼弦箏	
音準（鋼弦最佳）					✓	
響度（有開口音箱最佳）	有開口 ✓	無開口	有開口 ✓	無開口	有開口 ✓	無開口
波形（三者差異不大）	無法比較		無法比較		無法比較	
音色最佳					✓（有開口音箱）	

#### 伍、討論

- 一、自製古箏要與坊間的樂器達到類似的音色、音高，必須要使木板、調音轉軸克服16條弦的高度拉力，嘗試木材的組合、穿弦的方式、調音方式、零件的取材與更換等，符合以生活中簡單的零件來達到「自製」古箏的效果。
- 二、使用三種不同弦徑的弦，不論是否使用雁柱，只要控制琴弦的張力，可同時讓粗弦比細弦、長弦比短弦音調還高，但若是將粗弦或長弦調至琴弦本身能負荷的張力範圍，則會有斷弦的風險。符合遵守「弦愈粗、愈長、張力愈小，其音調愈低；弦愈細、愈短、張力愈大，其音調愈高」的發音原則。
- 三、雁柱對聲音的響度、延長性並沒有直接影響，與原假設「雁柱能提升聲音的清脆度」不符。但雁柱卻是促成音域寬廣的關鍵，這部分與市售古箏的製作條件相符。
- 四、在無雁柱之下，由於高音細弦無法配合低音粗弦的調音方式，調弦順序則改為由高音細弦調至低音粗弦，但高音細弦只能依「原音低兩個八度（293.6Hz）」為調音基準；有雁柱



時，不須降兩個八度調音，且能透過雁柱調整弦的長短，減少調音時張力過大，造成斷弦的情況。從頻譜圖看到，同一條弦在音名相同、張力不同的情況下，弦的張力大，高音的頻率出現愈多，弦的張力小，高音的頻率出現愈少。

五、第二製樺接尼龍弦箏比第一製尼龍弦箏音準更穩定，符合「改變製作方式，降低走音情況」的假設；第三製樺接鋼弦箏經彈奏力拉扯，雖較易有些微音準的變化，但對音準來說微乎其微，音準遠優於第一製及第二製箏，符合「改變弦的材質，降低走音情況」的假設。

六、以波形看聲波衰減時間，第一製尼龍弦箏與第二製樺接尼龍弦箏無差異，而第二製樺接尼龍弦箏與第三製樺接鋼弦箏也無差異，這部分並不符合自製古箏的改良成效。

七、同為樺接尼龍弦自製古箏，有開口音箱才能使響度增加，符合一般樂器製作有音孔音箱的原理；而無開口音箱和無音箱的響度相似，聲波衰減時間卻較慢，愈低音愈是明顯，聲音在彈奏之後不斷與木箱迴盪，因此，無開口有音箱雖然具有音箱的條件，但無開口的限制卻使聲音被悶住而減弱，不符合製作音箱的意義；但無開口音箱波形比無音箱更具渾厚度，卻符合音箱能提升音色的作用，如琵琶。

## 陸、結論

一、自製古箏以樺接、直條紋木材、雷射切割打調音轉軸孔，並以螺絲及螺帽作為調音轉軸，可增加音準穩定度，以鋼弦取代尼龍弦更增加音準穩定度。「有開口音箱」、「鋼弦」為自製古箏的最佳條件，分別能提高響度及穩定音準，達到音色指標中「音準」及「響度」條件。

二、控制自製古箏琴弦的張力，可同時讓粗且長的弦比細且短的弦，發出較高的音調，但只能產生些微音高差異。因此，在一般樂器中的設計，以粗弦與較長的振動距離（長弦）表現低音、細弦與較短的振動距離（短弦）表現高音。

三、雁柱在自製古箏中是作為一種調節音高的工具，無法真正提升音色，卻能使粗弦和細弦各自發揮音色，對樂器本身也是一種自然保護。因此，雁柱是能讓弦不易斷掉，又能讓高音與低音充分展現其特色的關鍵。

四、弦的張力下降，會抑制高音的頻率。

五、音箱能提升音色，以有開口音箱為優，兼具共鳴與響度。

## 柒、建議與未來展望

一、樺接方式改成「指接樺」。指接樺似雙手手指交叉對接，可增加接合面積，使木板接合角度更為密合，如圖5-1。



二、未來若能學習更多頻譜圖的分析，將可觀察更多聲音的變化。

三、未來可選用質地較佳的樺木夾板以利製作及提高音色。若以經濟實惠為自製古箏的條件，須排除價格昂貴的實木木板（前、後板限定於直條紋路製作，木板價格將更高），樺木夾板為製作指接樺的最佳材質，且已廣泛應用於雷射切割技術上。樺木夾板質地均勻，較不因密度不同而影響音質。相較於一般夾板，樺木夾板本身膠量少，結構強度又高；而相較於實木，樺木夾板價格較為經濟，適合作為自製古箏木板。

四、雁柱的設計建議不用金字塔型，改為腳粗瘦高的鐵塔型，能增加微調音高的空間。

## 捌、參考文獻資料

一、林東河、黃好吟（1990）。箏曲彈奏集。臺北市：學藝。

二、小谷隆真（1993）。聲音遊戲：聲音及樂器的遊戲。臺北市：皮亞傑。

三、Neil Ardley（1996）。進入科學世界的圖畫書-聲音。臺北市：上誼。

四、辛玫芬（2006）。二十一弦箏的時代性與聲學性之探討。臺南市：國立臺南藝術大學民族音樂學研究所。

五、吳幸如、蘇孟莘（2013）。躍動音符創意小點子：自製樂器的製作與設計。臺北市：心理。

六、李在允（2014）。百變博士8：翻天覆地的聲音。臺北市：晨星。

七、BomBom Story、金德永（2016）。漫畫大英百科物理化學2光與聲音。臺北市：三采。

八、瀧田義博、藤子·F·不二雄等人（2016）。光與聲音魔法帽。臺北市：遠流。

九、HOW IT WORKS 知識大圖解國際中文版第33期6月號（2017）。臺灣：希伯崙。

十、王美芬等（2020）。國民小學自然與生活科技第六冊（五下）-第四單元聲音與樂器。新北市：康軒。

十一、中華民國第四十二屆中小學科學展覽會參展作品專輯 國小組物理科 「竹蟬是胡琴的老祖宗」國立台灣科學教育館。

十二、中華民國第四十五屆中小學科學展覽會參展作品專輯 國小組自然科 「菱角樂器」國立台灣科學教育館。

十三、中華民國第四十六屆中小學科學展覽會參展作品專輯 國小組自然科 「弦機妙算」國立台灣科學教育館。

十四、中華民國第四十六屆中小學科學展覽會參展作品專輯 國小組生活與應用科學 「自製排笛的研究」 國立台灣科學教育館。

十五、山葉吉他手冊（2007）（擷取日期：2021年3月14日）

<https://yamahamuSic.com.tw/instrument/guitar/guitar%20manuak.guitar-manual-202htm>

十六、嘉義大學開放式課程（擷取日期：2021年3月17日）

<http://opencourse.ncyu.edu.tw/ncyu/mod/Resource/view.php?id=2275>

十七、教育部國民中學學習資源網（擷取日期：2021年3月17日）

[http://Siro.moe.edu.tw/teach/query.php?action=Read\\_content&p=821&d=1530270257](http://Siro.moe.edu.tw/teach/query.php?action=Read_content&p=821&d=1530270257)

十八、科學的家庭教師 [http://www.phyworld.idv.tw/NatuRe/Jun\\_2/B3\\_CH3/3-4\\_POINT.pdf](http://www.phyworld.idv.tw/NatuRe/Jun_2/B3_CH3/3-4_POINT.pdf)（擷取日期：2021年3月17日）

十九、台灣師大物理系 物理教學示範實驗教室（擷取日期：2021年3月17日）

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demoLab/html.php?html=modules/sound/section2>

二十、科技大觀園-音色的物理 <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sKZd.htm>（擷取日期：2021年3月17日）

二十一、維基百科-頻譜 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%91%E8%B0%B1>（擷取日期：2021年3月28日）

二十二、古箏的保養

<https://www.itsfun.com.tw/%E6%94%9C%E5%B8%B6%E5%9E%8B%E5%8F%A4%E7%A%E%8F/wiki-8295459-8362129>（擷取日期：2020年12月21日）

## 【評語】 082932

### 一、研究特色

1. 本作品以古箏為製作標的，研究自製古箏的可能性，從中發現問題、解決問題，具有探究的精神。
2. 研究的題材能與課程聲音單元結合，值得肯定。

### 二、建議事項

1. 研究目的建議多一點「發現或探索」，避免太多的驗證已知知識，例如弦的粗細、長短、鬆緊與聲音高低的關係。
2. 研究探討了各項變因的影響，但是沒有具體結論「如何完成一個經濟實惠卻功能實用的樂器」的研究目的。
3. p.11 指出本研究想要自製古箏的原因，是因為古箏在彈奏過程頻繁使用左手在雁柱左方「按音」來增加弦的「張力」以改變音調。此理由比較缺乏說服力，因為古箏可以因此演奏更多音階，不受限於 12356 的五音音階，且有更多演奏變化（如顫音）。
4. p.17 「音準、響度及波形」作為音色佳的指標，以探討「影響音色的原因」，實驗設計不是很恰當。因為 10 位專家的意見是指「音色好的條件」而非「判斷音色好壞的標準」，亦即，音準佳、響度優良未必就是音色好。
5. 自製樂器難以比專業製造的樂器更優良，建議研究目的與結果論述著重在「研發與改善具有基本功能與自娛的自製樂器」即可。



## 作品簡報

# 弦外之音 **箏** 有趣

The Interesting Acoustics of Self-made Zheng

科別：生活與應用科學科(二)(環保與民生)  
組別：國小組

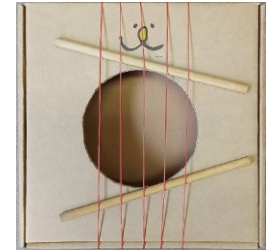


# 前言：研究問題

學生仿照自然課本方式自製樂器，但由於音域不寬，無法完整演奏一首流行歌。

改造

以此形式為基礎，自製一台橫跨三個八度的古箏，經濟實惠又不受音高限制。



驗證方向 課本內容所提：1.八度音之間的振動頻率；

2.琴弦粗細、長短、張力大小與音調的關係。

觀察變因 從雁柱有無、音箱形式來觀察波形、頻譜圖、響度等對聲音的影響。

滾動式改良 以市售古箏為標準，自製出音色最佳的古箏。



# 研究方法與結果：八度音程的音高頻率變化

一、自製古箏流程 自製長60公分、寬30公分、前高12公分、後高8.5公分的16弦古箏。

步驟	1	2	3	4	5	6	7	8
圖片								
說明	裁木板	打洞	磨平	組合	加釘	穿弦	調音軸	黑弦Sol

二、調音 16條弦(G調)簡譜音階： $\dot{5}$   $\dot{6}$   $\dot{1}$   $\dot{2}$   $\dot{3}$   $\dot{5}$   $\dot{6}$   $\dot{1}$   $\dot{2}$   $\dot{3}$   $5$   $6$   $\dot{1}$   $\dot{2}$   $\dot{3}$   $\dot{5}$   
(DEGABDEGABDEGABD)

以最高音586.5Hz為基準調音

解決方法：調高一個八度

產生問題：低音的弦過於鬆弛

以最高音1176.7Hz為基準調音

簡譜音	$\dot{5}$	$\dot{5}$	$5$	$\dot{5}$
頻率(Hz)	73.2	146.4	294.2	586.5

簡譜音	$\dot{5}$	$\dot{5}$	$5$	$\dot{5}$
頻率(Hz)	146.5	293.6	590.2	1176.7

發現 不論是哪種調音方式，每八度音之間，低音與高音的振動頻率比都是1:2。



# 研究方法與結果：弦與音高的變化

最低音的6條弦：弦徑1.20mm（編號3範圍）

中音的5條弦：弦徑1.00mm（編號2範圍）

最高音的5條弦：弦徑0.80mm（編號1範圍）



發現

理論上的物理現象是：「細弦比粗弦音調高；短弦比長弦音調高」。而本實驗透過**控制琴弦的張力**得到：

「張力愈小，其音調愈低；張力愈大，其音調愈高」的新結果。

# 研究方法與結果：有無雁柱的變化

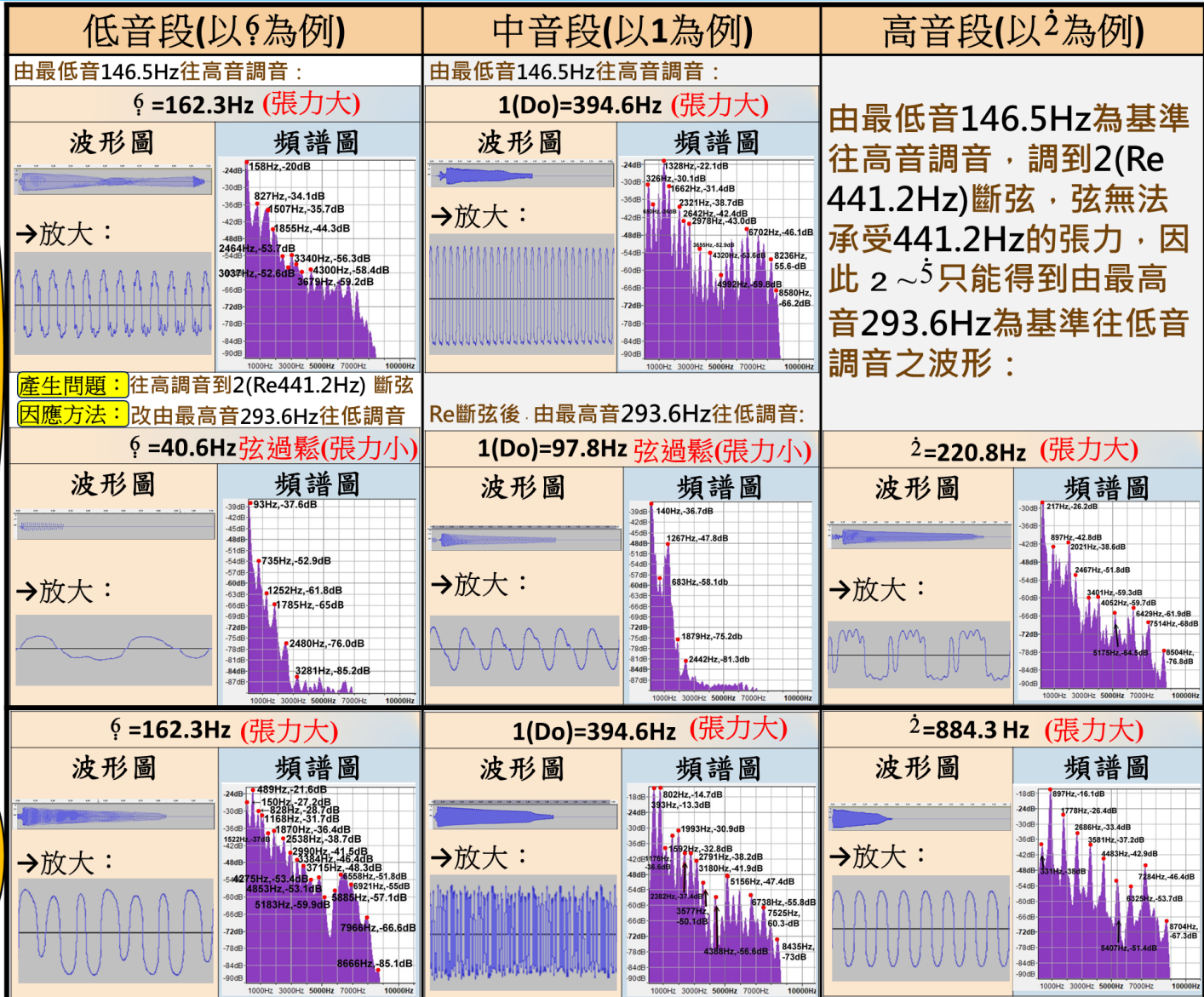
波形：橫軸-時間(Sec)，縱軸-振幅(dB)  
 頻譜：橫軸-頻率(Hz)，縱軸-振幅(dB)

無雁柱

(無法正常調音，須降低音調，由高往低調音)

有雁柱

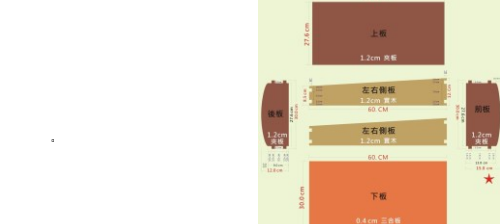
(最高音1176.7Hz 最低音146.5Hz)

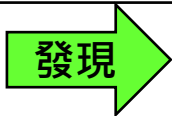


發現

無雁柱時：無法正常調音，弦無法維持固定張力，且張力變小，高音頻率變少；  
 有雁柱時：能正常調音，讓弦平均維持在張力大的狀態，並產生響亮音色。

# 研究方法與結果：探討音色因素之一-製作方式與材質

改良項目		說明		
		第一製尼龍弦箏(原製)	第二製榫接尼龍弦箏	第三製榫接鋼弦箏
1	設計榫接 雷射切割			
2	改變木材 紋路方向	<p><b>橫條紋</b> 受力變形</p> 	<p><b>直條紋</b> 後板：</p> 	<p><b>前板：</b></p> 
3	螺絲、螺帽 整齊固定			
4	使用鋼弦	<p>第一製與第二製：尼龍弦</p> 		<p>第三製：鋼弦</p> 



改變製作方式與材質使自製古箏結構更堅固，不易受琴弦張力而變形。而在相同木箱條件下，鋼弦比尼龍弦更不受張力而延展變形。



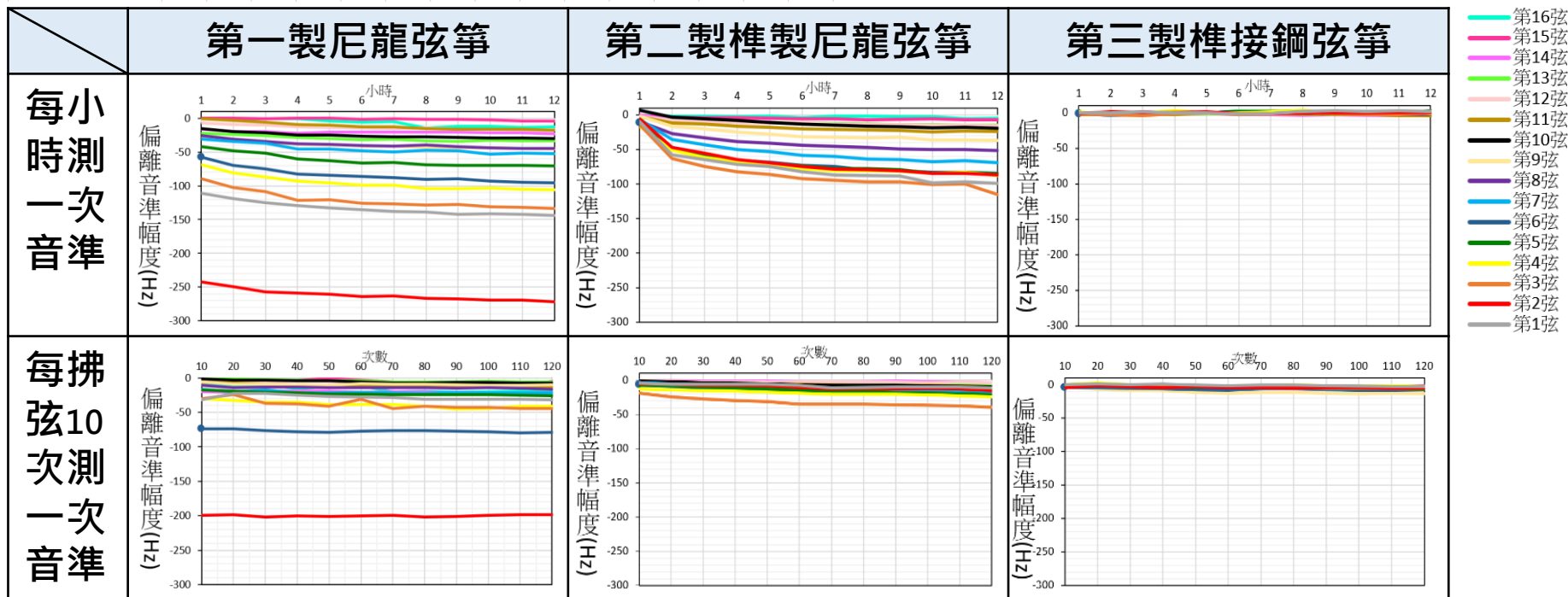
# 研究方法與結果：探討音色因素之二-音準實驗

以音準、響度及波形為音色佳的指標，在同一場域設定濕度55%及溫度25°C，換上同批新弦，測5台古箏音準：  
(單位：Hz)

弦序	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
第一製尼龍弦箏	-12.3	4.1	-22.9	-33.6	-17	-17.4	-29.7	45.3	-44.9	-52.4	-95.6	-70.8	-106.1	-134	-272	-143.8
第二製尼龍弦箏	-5.2	-7	-15.8	-14.8	-15.5	-24.3	-19.2	-37.2	-51.6	-69	-84.7	-85.4	-87.2	-115.1	-86.9	-99.3
第三製鋼弦箏	-2.4	-2.8	-3.6	-2.8	-2.5	-3.7	-0.5	0.6	-1.6	-0.4	1.1	2.9	-0.9	-0.3	0.8	2.1
市售163公分箏	0.2	-0.1	-1	-2.3	-1.2	-1.5	-0.6	-1.6	-0.5	-1	-5.3	4.2	-7.7	-7.4	4.6	4.7
市售55公分箏	4.2	4.9	-6	-7.5	-5.4	-5.4	-3.9	4.1	-14.9	-13.6	-13.6	-14.5	-15	-14.3	-14.8	-11.5



←12小時偏離音準幅度色階差異圖(單位：Hz)



**發現** → 榫接等改良製作方式讓音準更穩定，  
鋼弦又讓音準更加穩定，準確度稍優於市售55公分箏(纏弦:包纏鋼弦的古箏弦)。



# 研究方法與結果：探討音色因素之三-響度實驗

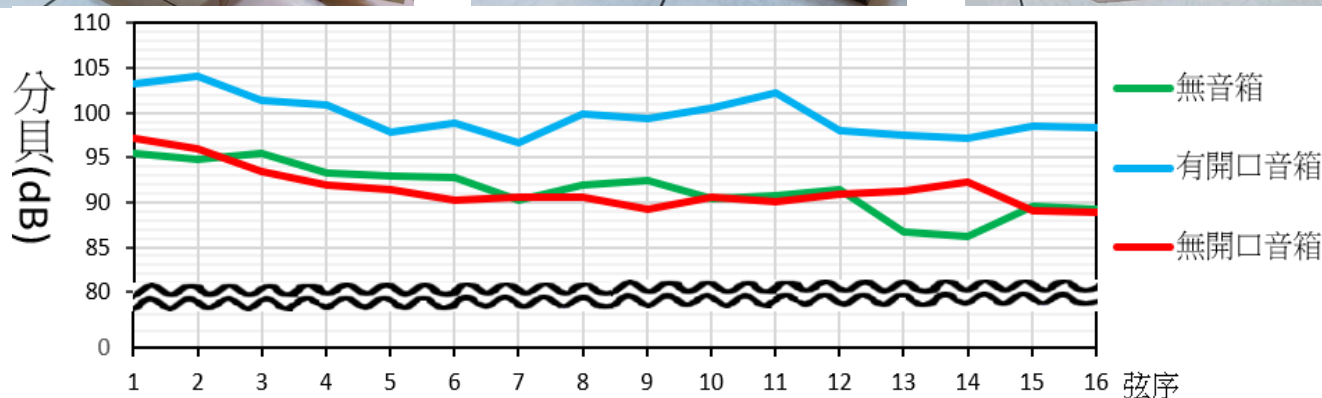
以同為「樺接尼龍弦箏」的**無音箱**



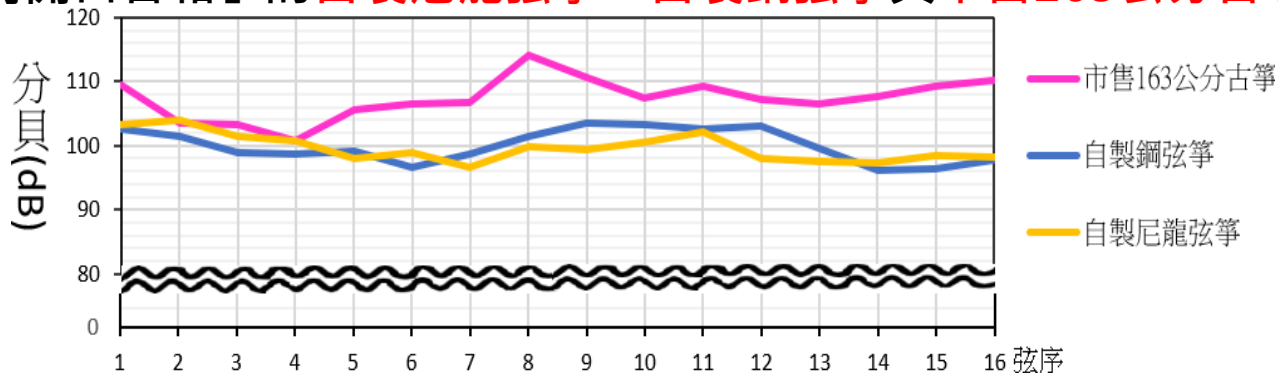
**有音箱(有開口)**



**有音箱(無開口)** 測量響度：



再將同為樺接「有開口音箱」的**自製尼龍弦箏**、**自製鋼弦箏**與**市售163公分古箏**比較響度：



發現

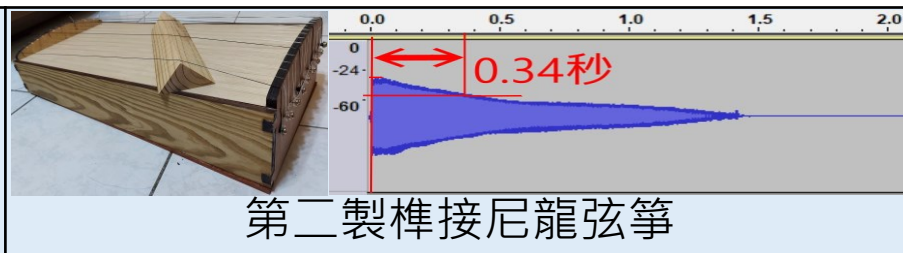
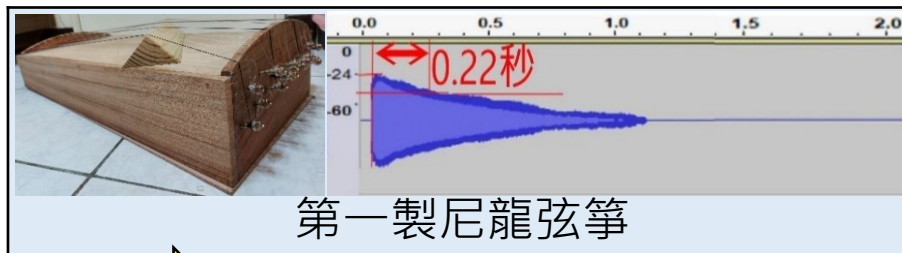
無開口音箱無法增加響度，有開口音箱的響度最大，最接近市售古箏的響度，而就本實驗而言，改變弦的材質看不出對響度的影響。

# 研究方法與結果：探討音色因素之四-波形差異

橫軸-時間(sec)

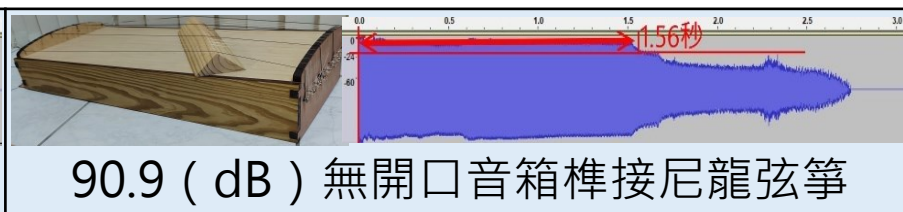
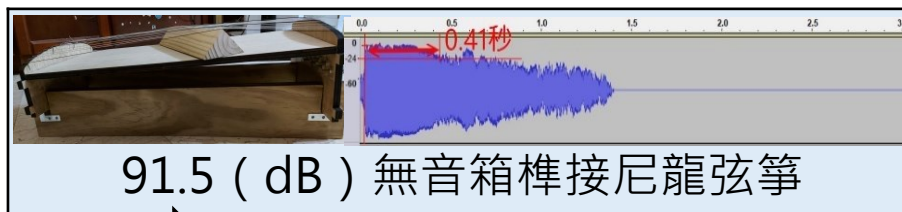
紅色標記的秒數是聲波能量削弱0.01 ( 下降20dB ) 所需的時間。觀察其波形：縱軸-振幅(dB)

## 一、榫接等製作方式對波形的影響(以1Do為例)



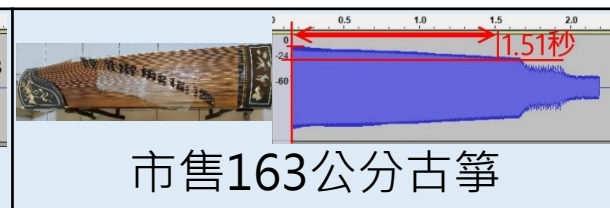
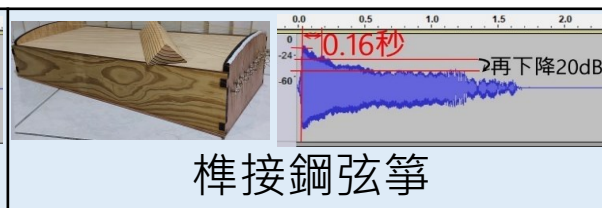
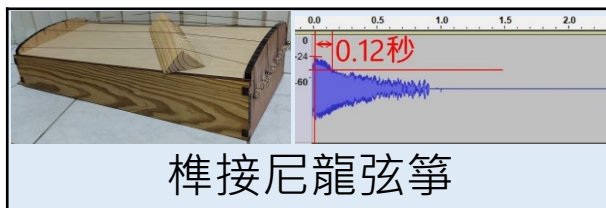
歸納 → 榫接等改良製作方式不能延長聲波削弱的時間。

## 二、音箱對波形的影響(以3為例)



歸納 → 無音箱與無開口音箱響度雖相似，無開口音箱的聲波削弱時間明顯較長。

## 三、弦的材質對波形的影響(以2為例)



歸納 → 改變弦的材質不能影響聲波削弱的時間。

發現 → 根據本頁實驗，「有音箱」才能明顯增加聲音的持續性。

# 研究假設與實驗發現對照

## 原先假設

## 實驗發現

一、 雁柱能提升聲音清脆度。



雁柱不能提升聲音清脆度，  
但卻是決定自製古箏音域寬廣的關鍵。

一、 改變製作方式與弦的材質，  
一、 能降低走音情況。



榫接等改良製作方式使音準更穩，  
而鋼弦箏的音準更優於尼龍弦箏。

三、 有無開口音箱皆能增加響度。



「有開口音箱」才能增加響度，  
「無開口音箱」不能增加響度。

四、 無開口音箱不能增加響度，  
可能也無法延長聲音的持續性。



無開口音箱雖然不能增加響度，  
但卻可以延長聲音的持續性。

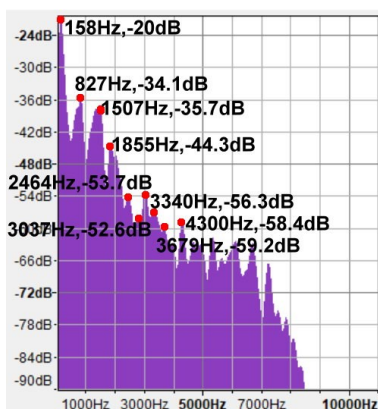
五、 榫接與鋼弦等製作方式皆能  
延長聲音的持續性。



榫接與鋼弦等製作方式對聲音的持續  
性沒有明顯影響，真正的影響在於  
「音箱的有無」。

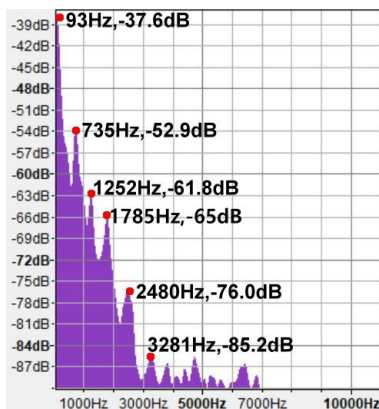
# 結論

- 一、「有開口音箱」、「鋼弦」能提升音色條件中的「響度」及「音準」；
- 二、控制自製古箏琴弦的張力，確實可讓「粗弦比細弦音調高」、「長弦比短弦音調高」，但影響有限（張力過大容易斷弦）；
- 三、雁柱在自製古箏中是調節音高的工具，雖無法真正提升音色，但卻能使每一條弦平均維持在張力大的狀態，讓粗弦和細弦各自發揮音色；
- 四、就同一條弦而言，當張力下降，會抑制高音的頻率；



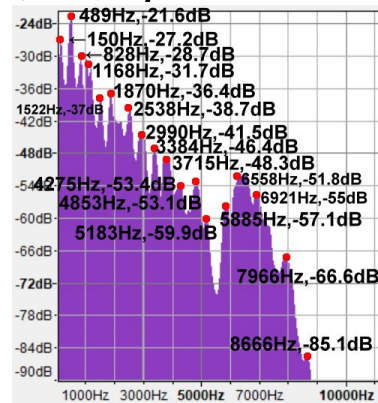
無雁柱

$f_0=162.3\text{Hz}$ (張力大)



無雁柱

$f_0=40.6\text{Hz}$ (張力小)



有雁柱

$f_0=162.3\text{Hz}$ (張力大)

- 五、音箱皆能提升音色，以「有開口音箱」為優，能發揮共鳴與響度的優勢。



# 建議與未來展望

- 一、榫接方式改成「指接榫」使木板接合更為密合。
- 二、學習更多頻譜圖的分析，將可觀察更多聲音的變化。
- 三、選用質地較佳的樺木夾板，以利製作及提升音色。
- 四、自製雁柱應由金字塔型改為(扁)鐵塔型，增加調音空間。
- 五、本研究只能比較自製與市售古箏的表現差異，未來可將市售古箏納入實驗內容，如將弦換成自製古箏的弦等，更能看出影響音色的因素。



▲指接榫



▲金字塔型雁柱



▲(扁)鐵塔型雁柱

## 參考文獻資料

- 一、林東河、黃好吟（1990）。箏曲彈奏集。臺北市：學藝。
- 二、Neil Ardley（1996）。進入科學世界的圖畫書-聲音。臺北市：上誼。
- 三、中華民國第四十六屆中小學科學展覽會參展作品專輯。國小組自然科「弦機妙算」。國立臺灣科學教育館。
- 四、音樂的科學（2017）。HOW IT WORKS知識大圖解國際中文版第33期6月號。臺灣：希伯崙。
- 五、古箏的保養（2020年12月21日）。華人百科。取自<https://www.itsfun.com.tw/%E6%94%9C%E5%B8%B6%E5%9E%8B%E5%8F%A4%E7%AE%8F/wiki-8295459-8362129>
- 六、音色的物理（2021年3月17日）。科技大觀園。取自<https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sKZd.htm>
- 七、嘉義大學開放式課程（2021年3月17日）。取自<http://opencourse.ncyu.edu.tw/ncyu/mod/Resource/view.php?id=2275>
- 八、頻譜（2021年3月28日）。維基百科。取自<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%91%E8%B0%B1>