

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

082913

雙音筆筒樂器的研究

學校名稱：高雄市鳳山區忠孝國民小學

作者：	指導老師：
小六 竇博翰	蕭雅琳
小六 林彥丞	陳語婕
小六 王翊庭	
小六 陳玉婕	
小六 林宗靖	
小六 陳品霏	

關鍵詞：編鐘、聲音的探討、自製樂器

摘 要

有天我們在雜誌上看到曾侯乙編鐘出土的消息，報導中說這個鐘除震驚了中國，更受世界矚目，這讓引起了我們對這個鐘好奇，除了讚嘆古人的智慧與技術外，要如何將繁雜的青銅編鐘鑄造技術，簡化應用在日常生活中，做成實用又能演奏的樂器，讓編鐘不再遙不可及，就成了我們要進行這個研究的主要目的。本研究中，除請老師帶領我們如何依據周禮考工記中所述編鐘的各部位比例來製作筆筒筒身，利用等比級數法來理解合調性音高的音頻，並透過對編鐘樂器的理解，期待在實驗的過程中找製作出陶製雙音筆筒編鐘樂器的模式。

壹、研究動機

陶藝課是我們學校傳承多年的特色課程，從低年級就開始接觸陶土的捏塑……，一直到六年級的畢業陶板製作，校園裡貼滿了歷屆畢業生的作品。今年本校榮獲了教育部藝術教育貢獻績優學校獎，讓我們更想有所作為，因此突發奇想，將陶板做成雙音筆筒樂器，平時充當筆筒使用，要演奏時可將一組雙音筆筒樂器當成編鐘，以敲出美妙的樂音，讓學校處處充滿著歡樂氣氛，創造出快樂的學習環境。

貳、研究目的

以本校歷年來所實施的陶藝課程(畢業陶板製作)為基礎，結合編鐘製作技術，為能簡化做成實用又可演奏的樂器，我們只取編鐘的鈺面與舞面組合成筆筒形狀的獨特樂器。本實驗預計達到下列目的：

- 一、了解鈺面大小與頻率的關係。
- 二、探討鈺面厚度對頻率的影響。
- 三、了解鈺面飾物對頻率的影響。
- 四、探討隧音與鼓音的音程差異。

透過上述的研究與討論，期望能製作出一組能演奏的雙音筆筒編鐘樂器。

參、研究設備及器材

(一)設備：電腦、麥克風、手機、壓泥板機（圖 1）。

(二)軟體：頻譜分析軟體--Sound Analyzer（圖 2）、統計軟體 SPSS。

(三)器材與工具：游標尺、陶土、板厚壓條、擀麵棍、製陶工具組。



圖 1 壓泥板機



圖 2 頻譜分析軟體—Sound Analyzer

肆、研究過程或方法

一、相關文獻的蒐集與探討

(一)編鐘的結構以及發音

單一懸掛，用來演奏的鐘稱為特鐘，若選集若干音高不同之鐘，以音階次序排列，懸在一起來奏樂則稱為編鐘。周時已見風行，古之編鐘有大小差異及大小相同而以鐘壁之厚薄別其音高者兩種。至於編鐘之數，歷朝所訂互有差異，最多者有二十四口，少者僅有八口（梁在平，1971）。

編鐘的兩個基音，產生在鐘面的兩個不同部位。一個出自下半部的中央稱為「隧」的地方，另一個發自「隧」左、右兩側稱為「鼓」的地方，此位置正好是從「隧」到「鈇」之距離的 $3/5$ 處，其位置如圖 3 所示。「隧」字意為鏡子，可能是因鐘口的拱弧相似於聚日取火的凹面鏡。「鼓」字有樂器之「鼓」，或「演奏」的意義。敲鐘的隧部，其音稱為隧音；敲鐘的鼓部，其音稱為鼓音（張志誠，1988）。

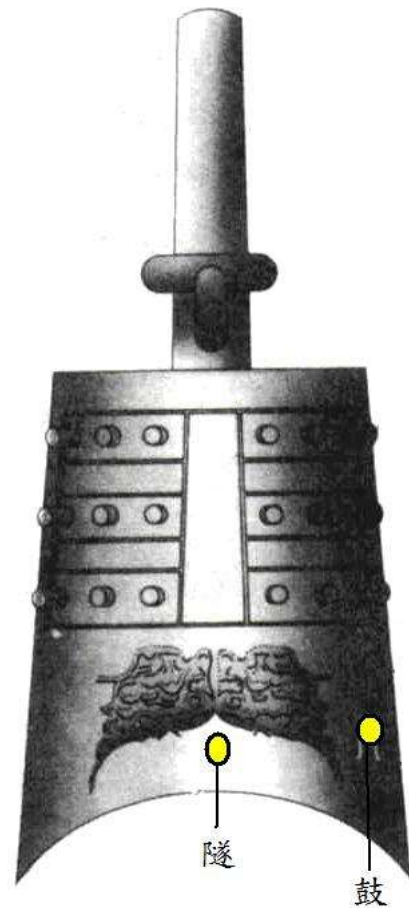


圖 3 鐘的雙音敲擊部位

(二)鐘的基本設計

周禮考工記：「鳧氏為鐘，兩樂謂之鈇，鈇間謂之於，於上謂之鼓，鼓上謂之鈺，鈺上謂之舞，舞上謂之甬，甬上謂之衡，鐘縣謂之旋，旋蟲謂之幹，鐘帶謂之篆，篆間謂之枚，枚謂之景，於上之攆謂之隧。十分其鈇，去二以為鈺。以其鈺為之鈇間，去二分以為之鼓間。以其鼓間為之舞修，去二分以為舞廣。以其鈺之長為之甬長，以其甬長為之圍。參分其圍，去一以為衡圍。參分其甬長，二在上，一在下，以設其旋。薄厚之所震動，清濁之所由出，侈弇之所由興。有說，鐘已厚則石，已薄則播，侈則柞，弇則鬱，長甬則震。是故大鐘十分其鼓間，以其一為之厚；小鐘十分其鈺間，以其一為之厚。鐘大而短，則其聲疾而短聞；鐘小而長，則其聲舒而遠聞。為隧，六分其厚，以其一為之深，而圍之。」依周禮考工記所述，鐘的各部位比例，如圖 4：

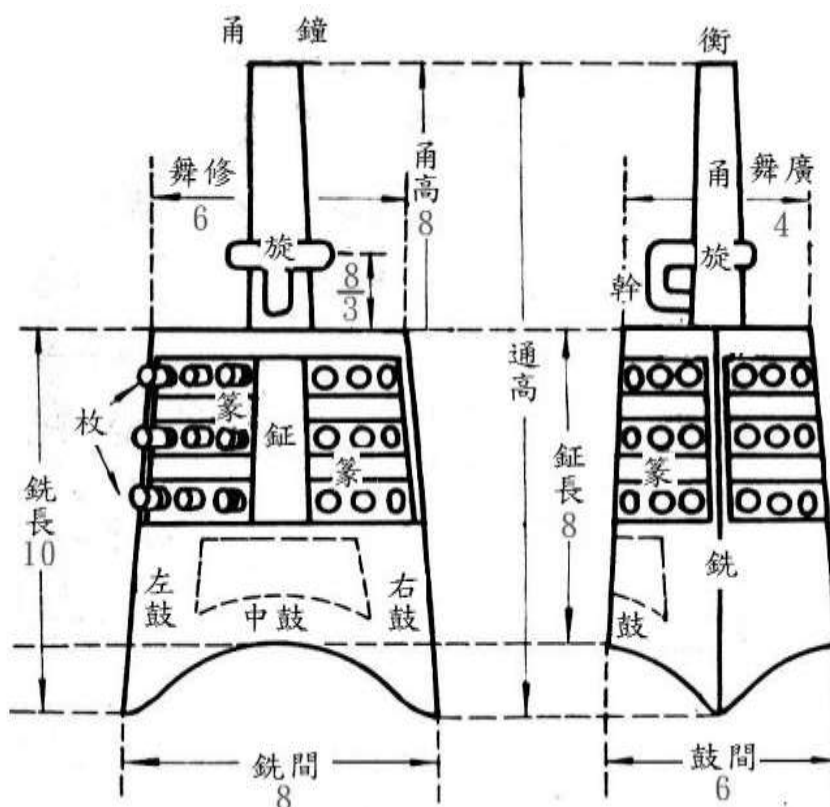


圖 4 鐘各部位名稱與比例圖

資料修自：劉東升、胡傳藩、胡彥久（1987，頁 59）

(三) 鐘的調音方法

在周禮考工所記載之「甬氏為鐘，……為遂，六分其厚，以其一為之深，而圓之。」說明瞭鐘體設計完成後，要在內部環繞一圈 $1/6$ 厚的加強圈，其用意乃在提高音頻，以備日後調音之用。將加強圈或鐘體磨薄，可降低其音頻。

鐘由於其內距不對稱，故能發出兩個音，枚則有助於音色之修飾。有些鐘上還刻有銘文，精確地指出兩音的敲擊位置。……1977 年，黃翔鵬、呂驥、王湘、顧國寶等在測定一套陝西出土的編鐘時，發現敲擊每一口鐘的側面所得的音都比敲擊正面的音為高，兩音之間的音程總是維持在小三度或大三度，相當於鋼琴上四或五個鍵距。

由圖 5 鐘的雷射影片中，可以看出「隧」（左）和「鼓」（右）的基頻模式。寬闊的白色區域代表節線，黑線部分是振動較強的地方，節線的聚合非常明顯。由雷射影片得知，「隧」與「鼓」是互不干擾的雙音設計。

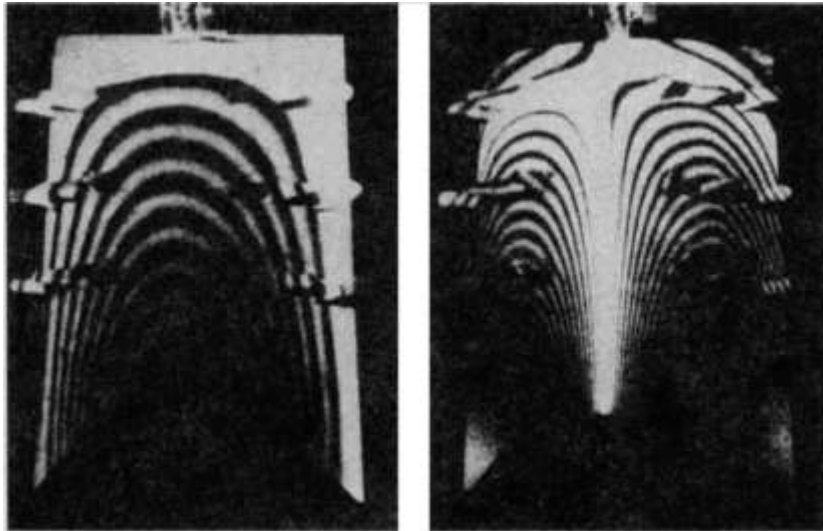


圖 5 鐘的雷射影片
資料來源：（張志誠，1988）

(四)影響陶鐘音高的因素

菅原明朗（1992）在「樂器圖解」一書中提到，音律是由下列三個條件來決定的：1.音板越長，音越低；2.音板的中央部份越薄，音越低；3.音板的兩端越薄，音越高。其音板與音頻的關係如圖 6 所示：

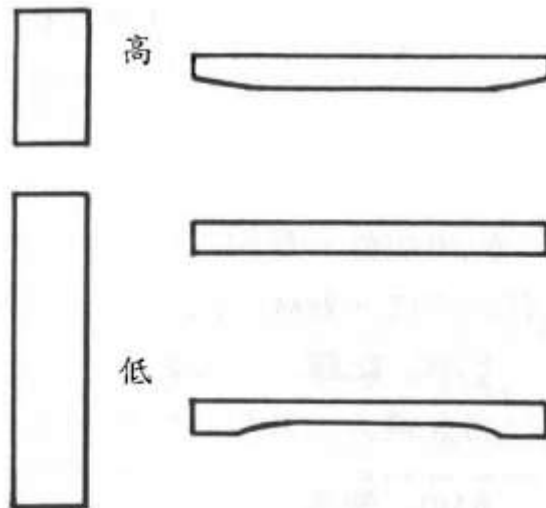


圖 6 音板與音頻的關係

我們查到鄭慧慈（2008）在其研究中談到的基音頻率公式是：

$$\text{頻率（赫茲）} \times \text{高度（公分）}^2 \div \text{厚度（公分）} = \text{常數} \quad \dots\dots\dots\text{公式 1}$$

也就是頻率（赫茲）與高度（公分）²成反比，而與厚度（公分）成正比。

另外有一篇是劉克明（1999）在「中國古代機械設計思想的科學成就」裡面也提到同一組編鐘相鄰的兩音頻存在下列關係：

$$f_n \times L_n^a = f_{n+1} \times L_{n+1}^a \quad \dots\dots\dots\text{公式 2}$$

式中，f 為鐘的第一基頻數，L 為銑長，一般 a=1.6~2.2，n 為鐘的序號。其中為何 a≠2，因為古代的編鐘，其鐘體並非相同厚度且經修整所致。

(五)鐘體形狀的發展



圖 7 鐘的譜系

資料來源：（張志誠，1988）

由圖 7 鐘的譜系顯示出其演進的軌跡。年代最早的「鈴」可回溯至三千六百多年前，內部有舌，只能發一個音。手執的「鈺」用於軍陣，開口朝上，是雙音鐘的前身。「鈕鐘」也有雙音，但不如「甬鐘」清晰，掛在出土編鐘的最上層。同時代的「鎛」是一單音的慶典禮鐘、以上各鐘並未照比例描繪。圖 7 右為本研究所欲製作的雙音筆筒編鐘樂器。

(六)聲音的探討

十二平均律是一種音樂律制，將一個八度音平均分成十二等分，乃今日最主要之調音法。中國明代音樂家朱載堉於萬曆十二年（1584）出版《律呂精義》一書，首次提出“新法密律”，經過精密的計算和科學實驗，用等比級數平均劃分音律，推算出將八度音等分為十二等分的演算法。即近代樂器上廣用的“十二平均律”。歐洲直到 1636 年，才由法國人默森提出了同樣的理論（王敏，2008）。

本研究所採用的音高值，是以國際標準音的頻率（赫茲：Hz）來表示，各音階相對的頻率，如表 1 所示：

表 1 音階與頻率對照表

音符	頻率	音符	頻率	音符	頻率	音符	頻率
C4	261.63	C5	523.25	C6	1046.50	C7	2093.00
D4	293.66	D5	587.33	D6	1174.66	D7	2349.32
E4	329.63	E5	659.26	E6	1318.51	E7	2637.02
F4	349.23	F5	698.46	F6	1396.91	F7	2793.83
G4	392.00	G5	783.99	G6	1567.98	G7	3135.96
A4	440.00	A5	880.00	A6	1760.00	A7	3520.00
B4	493.88	B5	987.77	B6	1975.53	B7	3951.07

二、筆筒樂器的設計與製作

鄭慧慈（2008）談到從實際製作陶鐘中，發現如依圖 8 陶鐘鐘體的基本設計模數比例圖，來設計製作陶鐘，恰能符合周禮考工記對鐘所述的各部位比例。

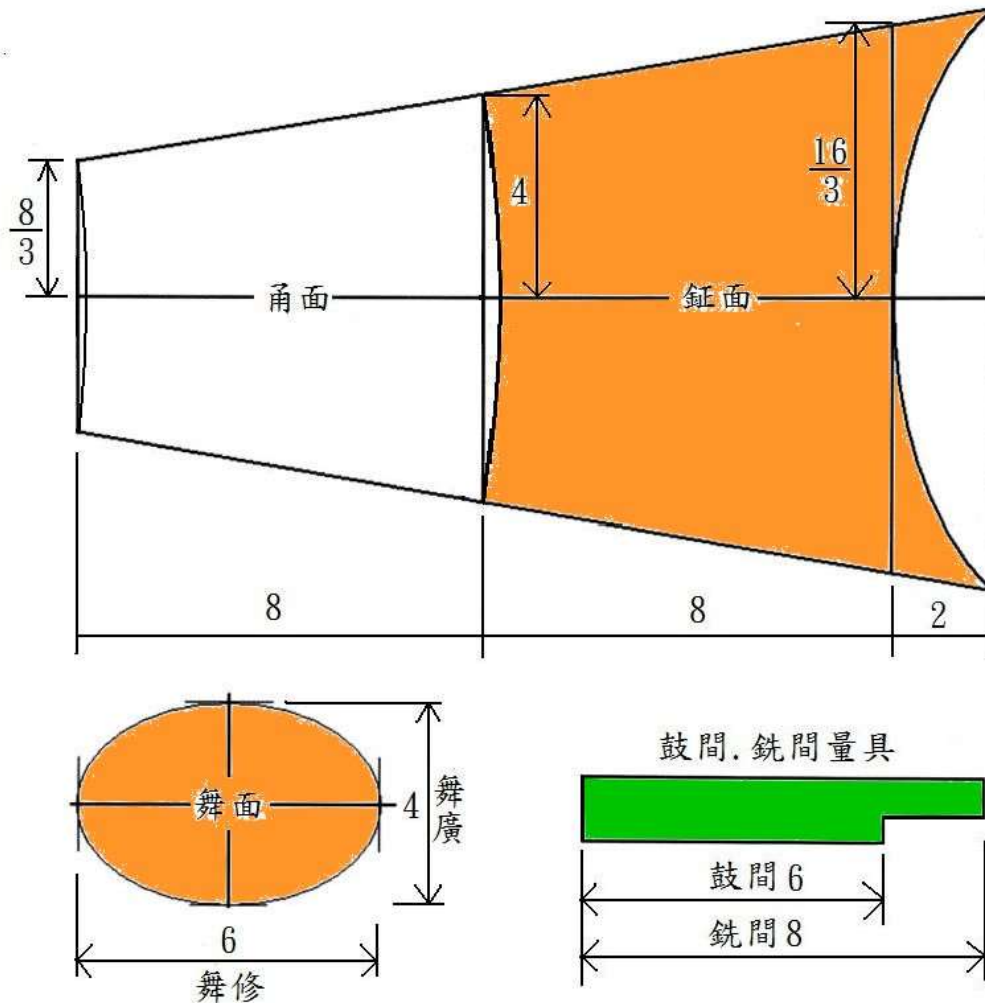


圖 8 陶鐘鐘體的基本設計模數比例圖

依陶鐘鐘體的基本設計模數比例圖所製作出的陶鐘如圖 9 所示：



圖 9 依基本設計模數比例圖所製成的陶鐘

簡化陶鐘鐘體的基本設計模數比例圖，僅取用一個舞面與二個鈺面的陶板，就可製成雙音筆筒樂器，其組合方法、程序與量測工具，如圖 10 所示。

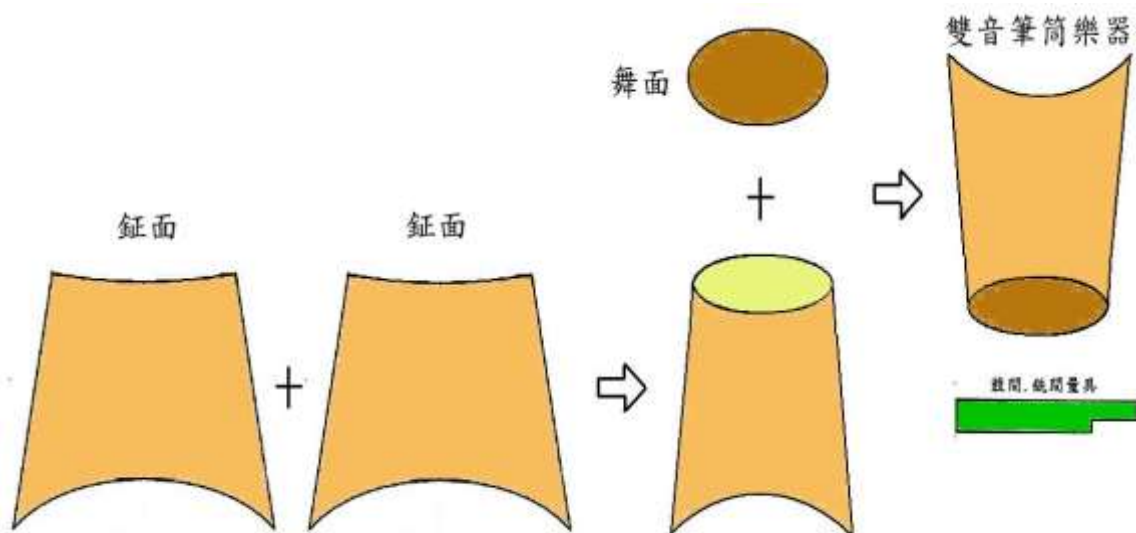


圖 10 雙音筆筒樂器之陶板組合示意圖

組合後的筆筒樂器基本形狀，如圖 11 所示。



圖 11 由舞面與二個鈺面的陶板製成雙音筆筒樂器

三、研究歷程：

由文獻探討中得知，如欲產生高八度音，其振動頻率要倍增成 2 的等比級數關係。在一個完全八度音階內包含 13 個半音，因此，每升高半音頻率要增加 $\sqrt[12]{2} = 1.0595$ 倍。

由公式 1 得知，頻率與高度（面積縮放比）平方成反比，而與厚度成正比。依等比級數法求得增加半音所需的厚度比值 1.0595 與面積縮放比值 $\frac{1}{\sqrt{1.0595}} = 0.9715$ ，將其與音階的關係整理如表 2 所示：

表 2 等比級數法與音頻關係表

音階	厚度比值	面積縮放比	音頻
C	1.00	1.00	261.63
D	1.12	0.94	293.66
E	1.26	0.89	329.63
F	1.34	0.87	349.23
G	1.50	0.82	392
A	1.68	0.77	440
B	1.89	0.73	493.88
\dot{C}	2.00	0.71	523.25
\dot{D}	2.25	0.67	587.33
\dot{E}	2.52	0.63	659.26
\dot{F}	2.67	0.61	698.46

(一)研究問題一：了解鈺面大小與頻率的關係

依圖 8 的鐘體基本設計比例，裁切二個鈺面與一個舞面的陶板，分別將鈺面陶板置於鈺面成形模具(圖 12)上塑形，將成形後的二個鈺面陶板與舞面陶板組合，就可製成基本形的雙音筆筒樂器。壓印板厚 5mm 的陶板，利用影印機依表 3 的面積縮放比列印鐘體基本設計圖，以製作不同縮放比值大小的一組筆筒樂器，陶體自然乾燥後以 1200°C 進行「固燒」。



圖 12 鈺面成形模具

表 3 音階與面積縮放比的關係對照表

音階	C	E	G	b_B	\dot{C}
面積縮放比	1.00	0.89	0.82	0.75	0.71

1.要改變的變音：鈺面大小

以銑長 12cm 為基準，縮放比值分五個水準 1.00、0.89、0.82、0.75、0.71

2.要觀察的變因：音高

3.保持不變的變音：鈺面形狀、厚度、陶土的成份、溼度、燒結溫度 1200°C。

(二)研究問題二：探討鈺面厚度對頻率的影響

依圖 8 的鐘體基本設計比例，裁切成銑長 10cm 大小的陶板，將鈺面製成石膏模型(圖 13)，以確保不同厚度的陶板，能製作出具有大小相同的鈺面。分別調整壓泥板機(圖 1)的轉盤，擷壓陶土使陶板達到如表 4 比值的厚度，把陶板置入石膏模型內，去除多餘陶土後，將兩個半面鈺體粘土黏合，陶體自然乾燥後以 1200°C 進行「固燒」。



圖 13 鈺體石膏模型

表 4 音階與厚度比值的關係對照表

音階	\dot{G}	C	E	G	b_B	\dot{C}
厚度比值	0.75	1.00	1.26	1.50	1.75	2.00

1.要改變的變音：鈺面厚度

以鈺厚 1.25mm 為基準，分六個水準值 3.75、5.00、6.25、7.5、8.75、10mm

2.要觀察的變因：音高

3.保持不變的變音：鈺面形狀、大小、陶土的成份、溼度、燒結溫度 1200°C。

(三)研究問題三：了解鈺面飾物對頻率的影響

1. 要改變的變因為不同的鈺面飾物，可以分為：

- A. 壓印圖案(內部凹陷)
- B. 壓印圖案(內部補平)
- C. 內部補丁(2/5 鈺寬小圓)
- D. 內部補丁(1/2 鈺寬大圓)

2. 要觀察的變因：音高

3. 保持不變的變音：鈺面形狀、陶土的成份、溼度、燒結溫度 1200°C。

(四)研究問題四：探討隧音與鼓音基音的音程差異

分析研究問題一到三中，各個筆筒樂器的隧音與鼓音基音的音程差異，若不同鈺面條件下的隧音與鼓音基音音程差異，可以造成相對應的半音、全音差，我們就能實際應用於樂器製作上。

伍、研究結果分析與討論

(一)研究結果一：鈺面面積縮放比與隧音、鼓音頻率成反比

依表 3 音階與面積縮放比的關係對照表進行實驗，得到結果如表 5 所示：

表 5 面積縮放比與隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	A1	A2	A3	A4	A5
鈺面縮放縮放比	1	0.89	0.82	0.75	0.71
隧音頻率	1427	1841	2021	2294	2637
鼓音頻率	1569	2185	2300	2645	2900
頻率比	1.0995	1.1869	1.1381	1.1530	1.0997

註：頻率差距比值--半音 1.0595、全音 1.1225、三個半音 1.1893

將面積縮放比與隧音、鼓音頻率關係，以統計軟體 SPSS 進行分析，得到結果如圖 13~14 所示：

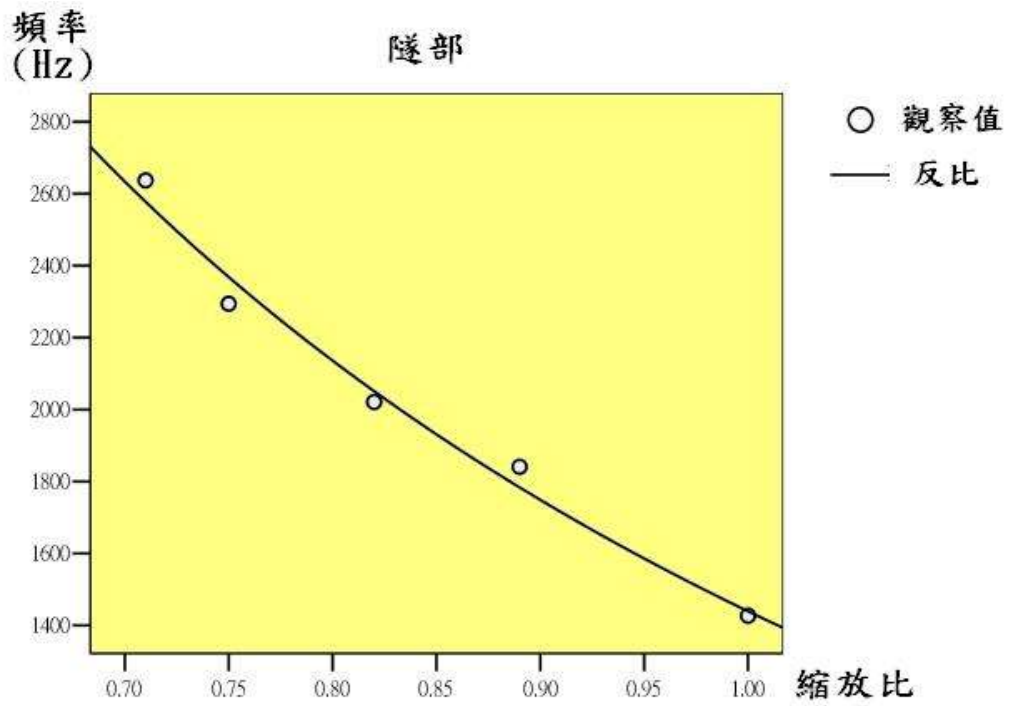


圖 14 面積縮放比與隧音頻率關係分析圖

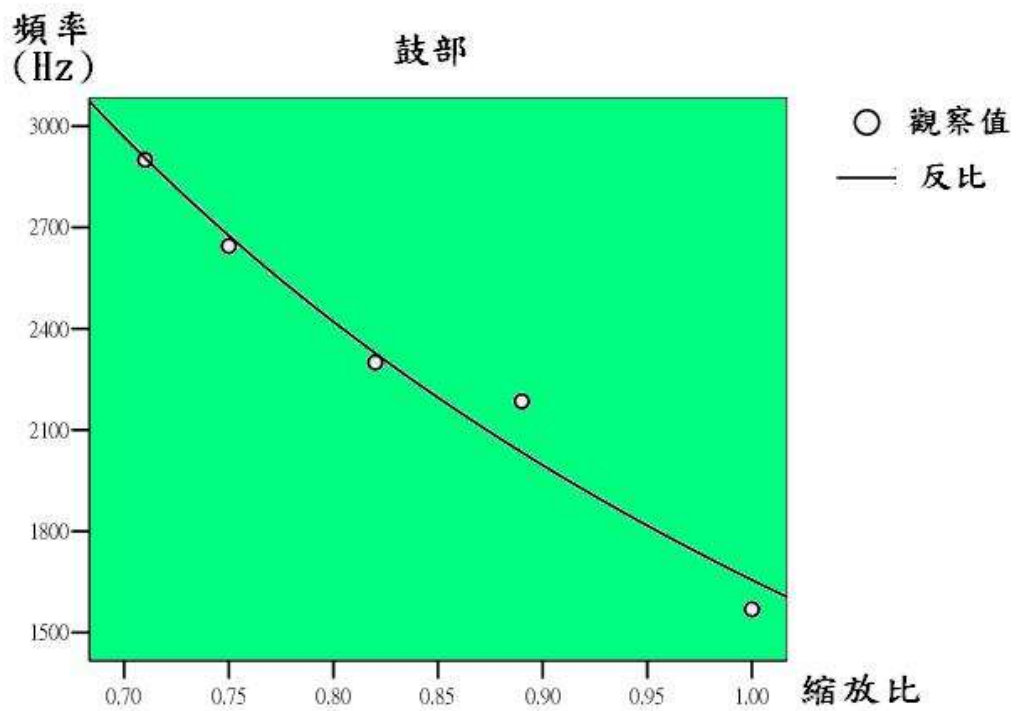


圖 15 面積縮放比與鼓音頻率關係分析圖

由圖 14~15 可以看出，面積縮放比與鼓音頻率成反比，而面積縮放比 0.71 與面積縮放比 1.00 亦非呈現倍頻關係，實驗結果均為 1.85 與理論值 2 亦有些差異。

透過與參考文獻一的作者訪談後，猜測可能是製造過程採用不同的鈺面黏合方法所造成，我們採用的是 A 黏合法，而原作者用的是 B 黏合法，A 黏合法所補的土較多，製作較大的鈺體時，對鈺體的體積大小影響不大，然製作較小的鈺體時，鈺體的體積大小明顯變大，由圖 16 鈺面黏合方法可以看出，在相同鈺面大小基準下，A 黏合法所製作的鈺體明顯大於 B 黏合法所製作的鈺體。

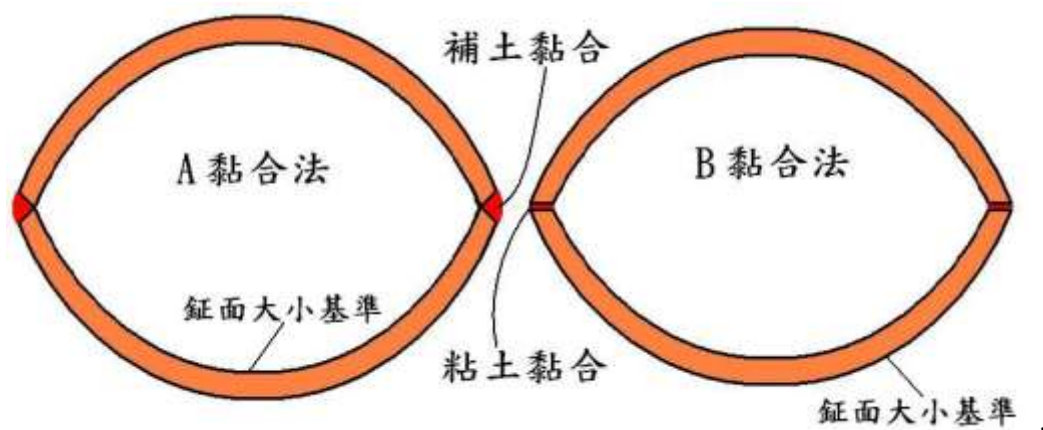


圖 16 鈺面黏合方法

(二)研究結果二：鈺面厚度與隧音、鼓音頻率成正比

依表 4 音階與厚度值的關係對照表進行實驗，得到結果如表 6 所示：

表 6 不同厚度對隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	B1	B2	B3	B4	B5	B6
厚度	3.75	5	6.25	7.5	8.75	10
隧音	1610	2124	2504	3165	3588	4225
鼓音	1789	2389	2810	3482	3990	4781
頻率比	1.1112	1.1248	1.1222	1.1002	1.1120	1.1316

將鈺面厚度與隧音、鼓音頻率關係，以統計軟體 SPSS 進行分析，得到結果如圖 17~18 所示：

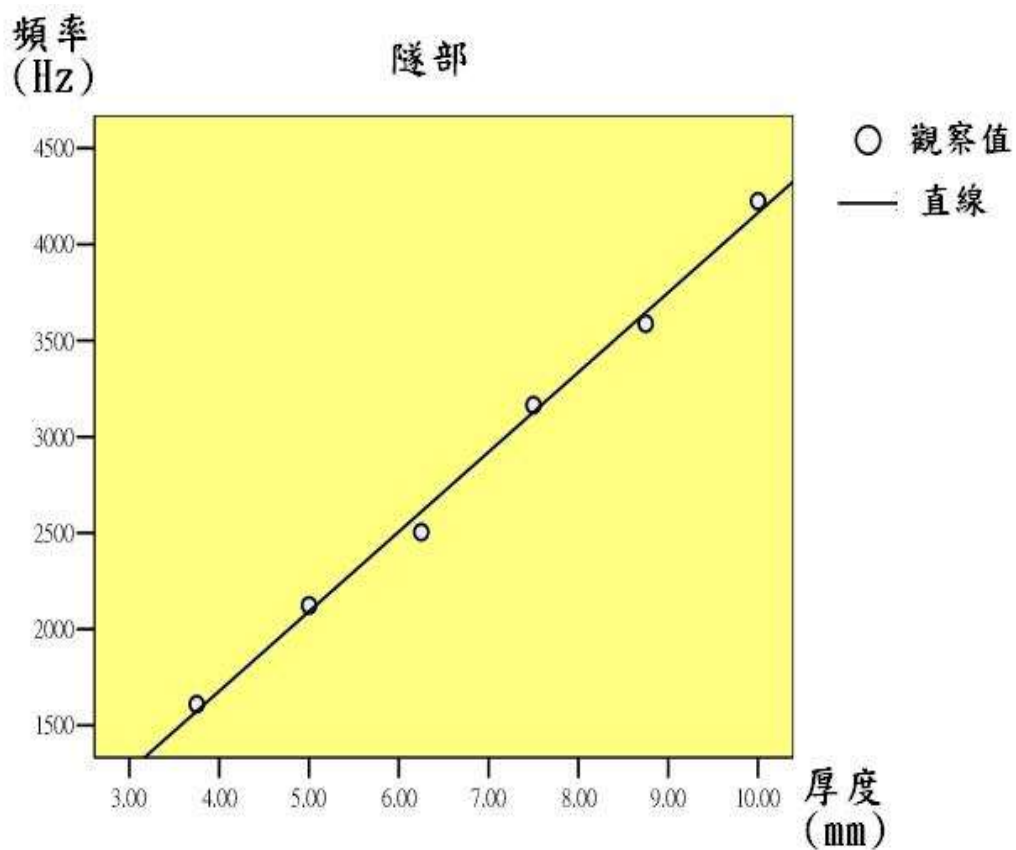


圖 17 鈺面不同厚度與隧音頻率關係分析圖

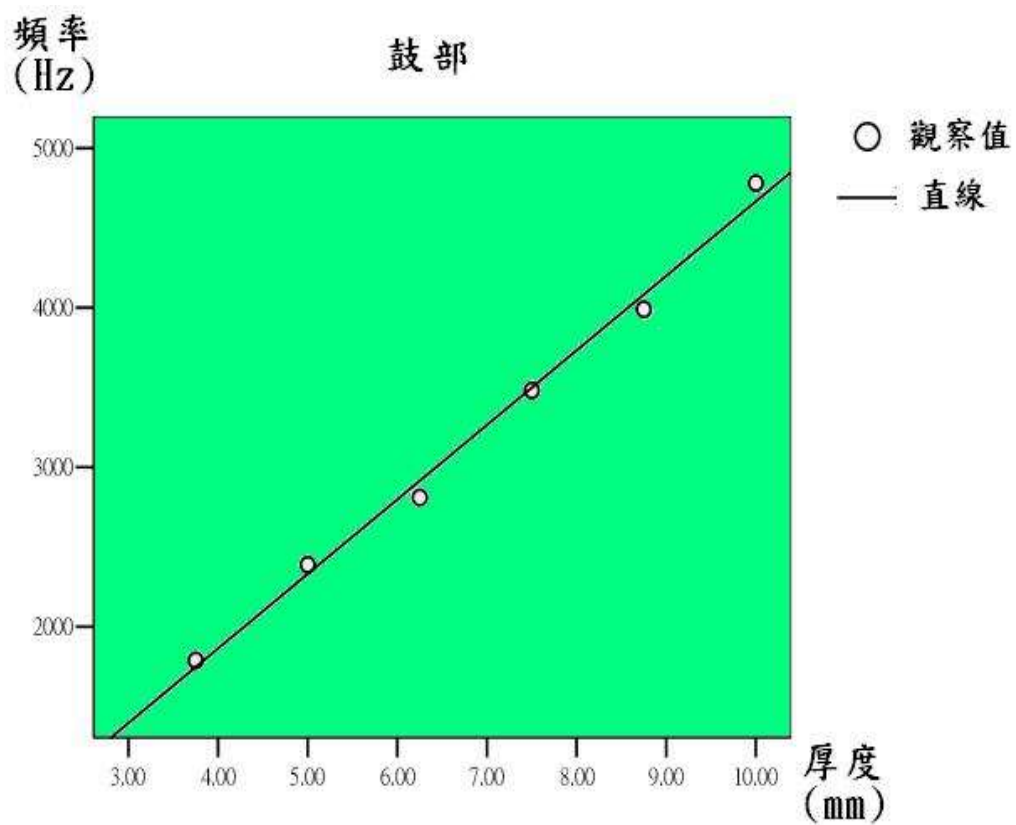


圖 18 鈺面不同厚度與鼓音頻率關係分析圖

由圖 17~18 可以看出，鈺面大小相同而不同厚度時，厚度與隧音、鼓音頻率都成正比，而厚度加倍時呈現倍頻現象，實驗結果與理論相符合。因此，可依不同厚度比來製作筆筒編鐘樂器。

(三)研究結果三：鈺面飾物(補丁)大小的增加，會使鐘體隧音與鼓音的音程差距有加大的趨勢

依實驗計畫製作鈺面飾物(圖 19)與鈺面內部補丁(圖 20)進行實驗，得到結果如表 7 所示：



圖 19 壓印貓頭鷹圖案



圖 20 於鈺面內部進行補丁增厚

表 7 不同鈺面飾物對隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	C1	C2	C3	C4
鈺面飾物	壓印圖案 (內部凹陷)	壓印圖案 (內部補平)	內部補丁 小圓(2/5 鈺寬)	內部補丁 大圓(1/2 鈺寬)
隧音	2068	2207	2664	1677
鼓音	2356	2600	3202	2287
頻率比	1.1393	1.1781	1.2020	1.3637
音程差距(半音值)	2	3	4	5

實驗編號 C1 與 C2 為鈺面大小與厚度均相同的鐘體，C1 於壓印後內部隨著圖案凹陷，而 C2 則將凹陷部位補平。C3 與 C4 則為鈺面大小不同而厚度相同的鐘體，分別在鈺面內部的單側鼓部進行補丁。

由表 7 可以看出，隨著補丁大小的增加，鐘體隧音與鼓音的音程差距有加大的趨勢，與文獻探討所發現敲擊每一口鐘的兩音之間的音程總是維持在小三度或大三度，相當於鋼琴上四或五個鍵距，可謂不謀而合。

(四)研究結果四：不同鈺面條件下的隧音與鼓音基音音程差異，都能造成相對應的半音、全音差，若能控制得宜則能實際應用於樂器製作上。

分析主題一到三各個筆筒樂器的隧音與鼓音基音的音程差異，得到結果如表 8~10 所示：

表 8 不同鈺面大小的隧音與鼓音基音的音程差異

實驗編號	A1	A2	A3	A4	A5
頻率比	1.10	1.19	1.14	1.15	1.10
音程差距	1~2	3	2	2~3	1~2

表 9 不同鈺面厚度的隧音與鼓音基音的音程差異

實驗編號	B1	B2	B3	B4	B5	B6
頻率比	1.11	1.12	1.12	1.10	1.11	1.13
音程差距	2	2	2	2	2	2

表 10 不同鈺面飾物的隧音與鼓音基音的音程差異

實驗編號	C1	C2	C3	C4
頻率比	1.14	1.18	1.20	1.36
音程差距	2	3	3~4	5

由表 8 可以得知，不同鈺面大小的隧音與鼓音基音的音程差異值約在 1~3 個半音之間。

由表 9 可以得知，不同鈺面厚度的隧音與鼓音基音的音程差異值約在 1 個全音。

由表 10 可以得知，不同鈺面飾物的隧音與鼓音基音的音程差異值約在 3~5 個半音之間，與文獻探討中所說的 4~5 個半音相符合。

因此如要運用到鼓音，則要如周禮考工所記載的，要在內部環繞一圈 1/6 厚的加強圈，先提高鐘體音頻，鐘體以 800℃ 進行素燒，素燒後可將加強圈或鐘體磨薄，以調降其音頻，調音完成後再以 1200℃ 進行「固

燒」。而使用不同鈺面厚度的隧音與鼓音可得到相臨的全音，可簡化製作上的困難度。

透過研究結果分析，我們將所製作的筆筒樂器篩選出實驗編號 B1、B2、B4、A3 與 A5，組合成一組可演奏的編鐘樂器(圖 21)。

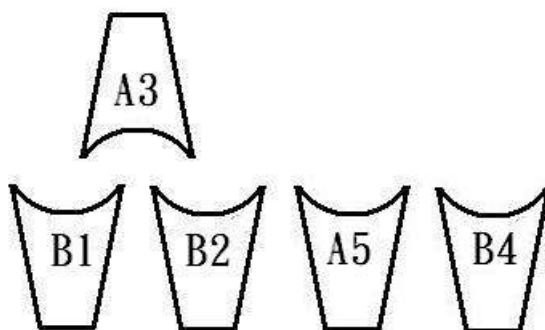


圖 21 自製可演奏的編鐘筆筒樂器組合

自製的編鐘筆筒樂器，演奏時採相對音高，分別以最低音當低音 Sol 或中音 Do，其演奏示意圖，如圖 22~23 所示：

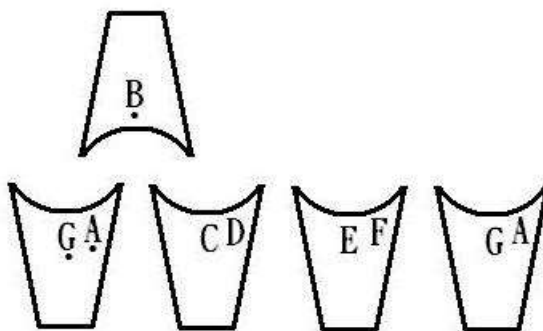


圖 22 自製雙音筆筒樂器演奏示意圖 (G̣-Ạ)

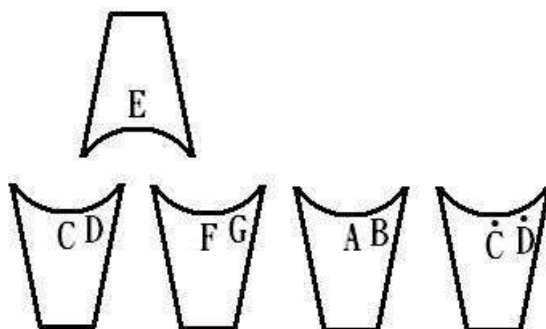


圖 23 自製雙音筆筒樂器演奏示意圖 (C̣-Ḍ)

以電腦分析實測頻率與各音階的理論值差異，得到結果如圖 24~25 所示：

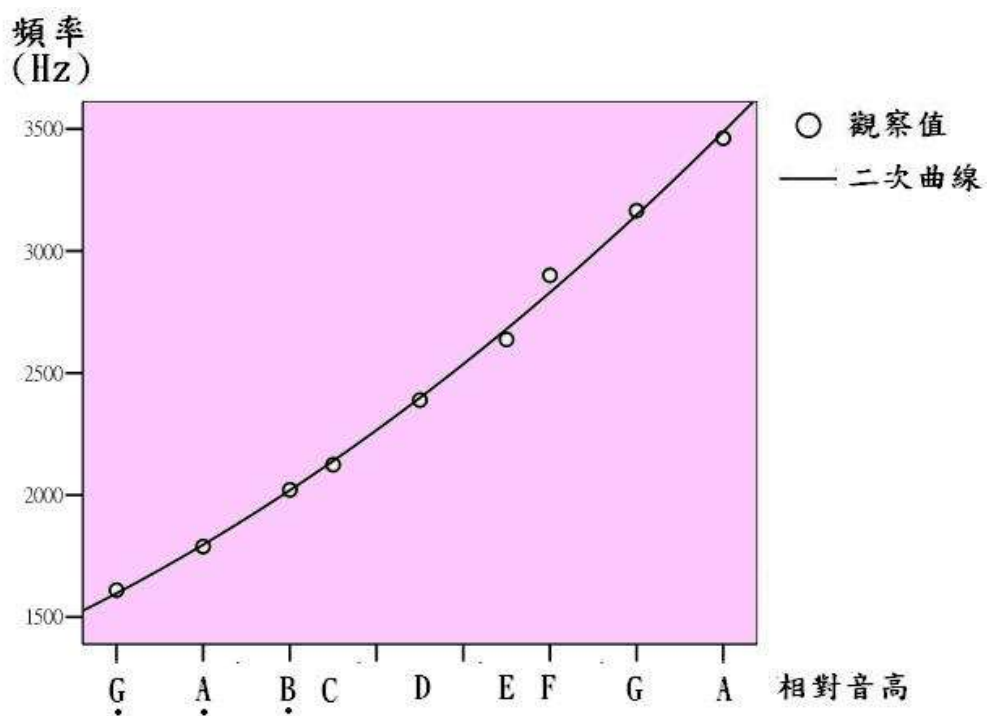


圖 24 各音階的實測頻率與理論值分析 (G-A)

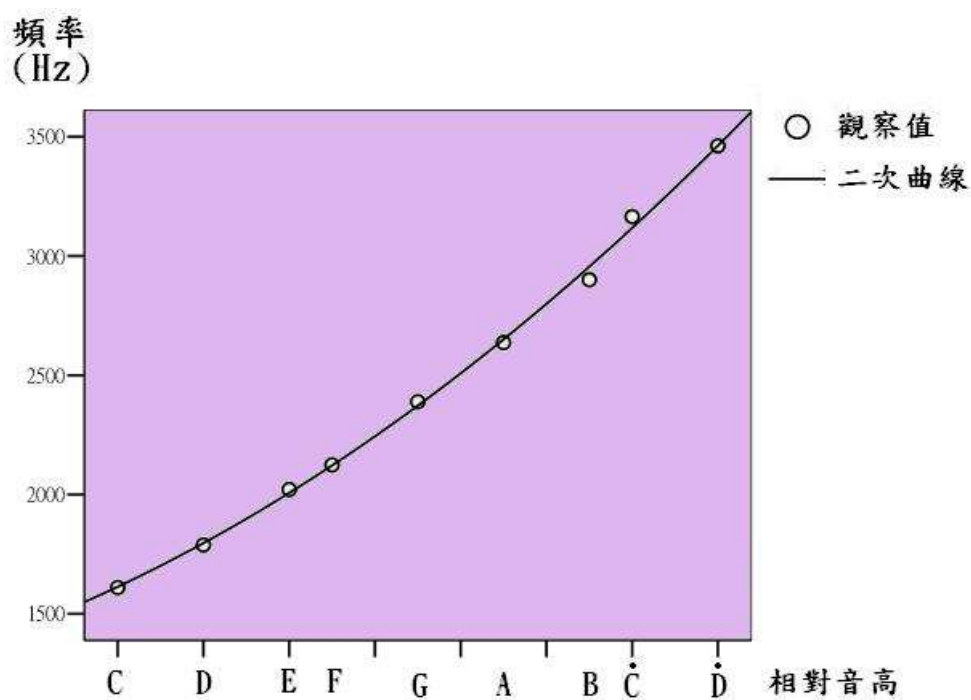


圖 25 各音階的實測頻率與理論值分析 (C-D)

由圖 24~25 各音階的實測頻率與理論值分析，可以看出自製雙音筆筒樂器演奏時，具有相當可期的音準。

(五)再現性分析：鈺面面積縮放比與隧音、鼓音頻率成反比，且呈現倍頻關係

再次依表 3 音階與面積縮放比的關係對照表進行實驗，本次實驗則改採 B 黏合法，得到結果如表 11 所示：

表 11 面積縮放比所對應的銑長與隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	D1	D2	D3	D4	D5
鈺面縮放縮放比	1	0.89	0.82	0.75	0.71
銑長	12.0	10.7	9.8	9.0	8.5
隧音頻率	1450	1823	2180	2500	2812
鼓音頻率	1592	2031	2317	2675	3046

銑長單位：cm

由表 11 面積縮放比所對應的銑長與隧音、鼓音的頻率測量值可以算出，面積縮放比 0.71 與面積縮放比 1.00 已呈現倍頻關係，實驗結果分別為 1.93、1.91 與理論值 2 幾乎相近。

將鈺面縮放縮放比轉換成銑長，其與隧音、鼓音頻率的關係，以統計軟體 SPSS 進行分析，得到結果如圖 26~27 所示：

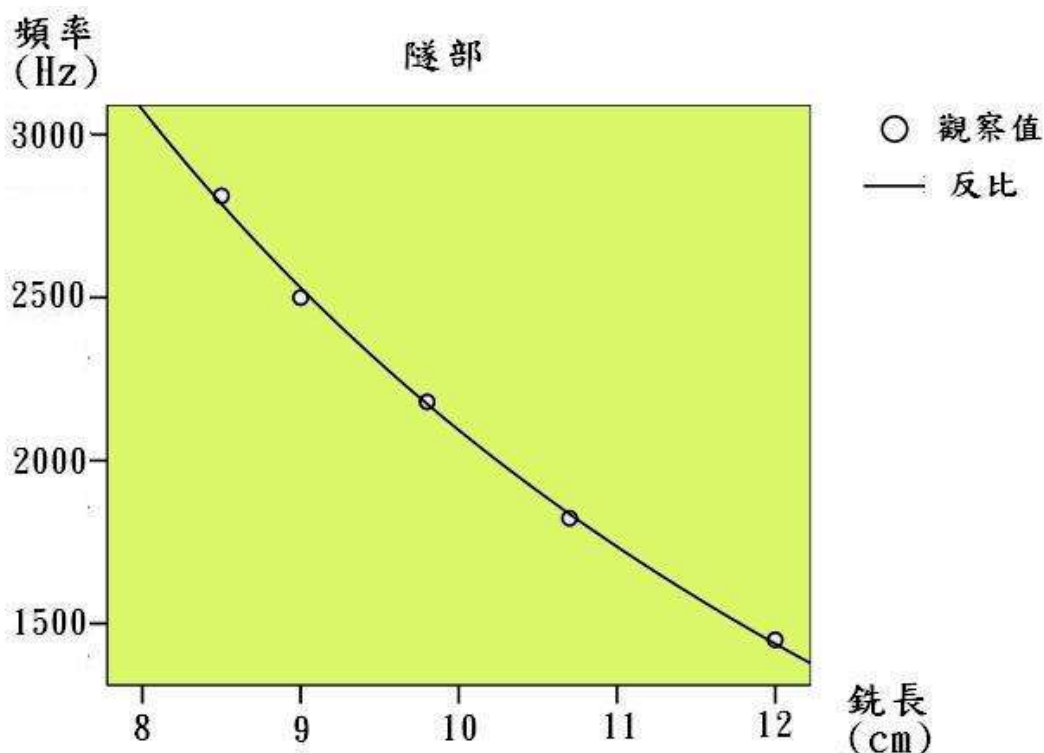


圖 26 銑長與隧音頻率關係分析圖

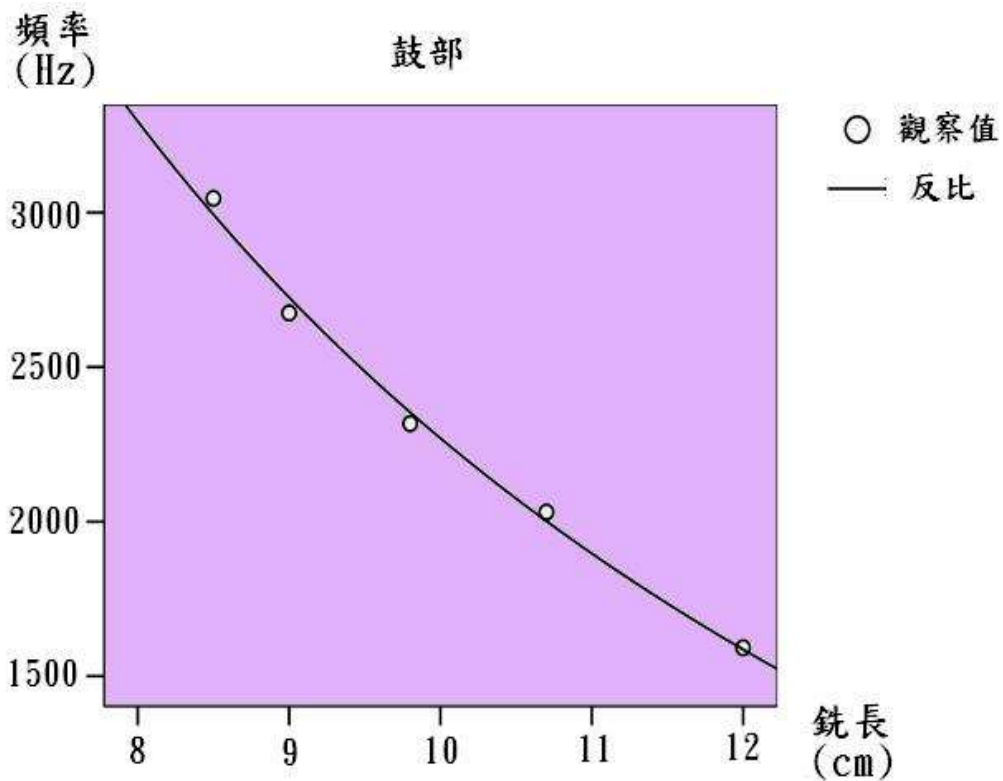


圖 27 銑長與鼓音頻率關係分析圖

由圖 26~27 銑長與隧音、鼓音的頻率關係分析圖可以看出，銑長與隧音、鼓音頻率皆成反比。

藉由統計軟體 SPSS 進行相關與迴歸分析，得到結果如表 12：

表 12 銑長對隧音、鼓音頻率的相關與迴歸分析

Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1
Inverse	.998	1841.317	1	3	.000	-1838.764	39320.733

Dependent Variable: 隧部 The independent variable is 銑長.

由表 12 的參數估計得知，頻率的迴歸方程式為：

$$\text{頻率}(F) = 39321 \div \text{銑長}(L) - 1839 \quad \dots\dots\dots\text{公式 3}$$

由表 1 音階與頻率對照表查得 C6 頻率為 1047Hz，而 G6 頻率為 1568Hz，將頻率資料代入公式 3，利用試算軟體 Microsoft Excel 以嘗試錯誤法，求得 C6 頻率所須銑長為 13.6cm，G6 頻率所須銑長約為 10cm。

陸、結論與建議

本研究依據周禮考工記中所述編鐘的各部位比例來製作筆筒筒身，並配合等比級數法來設計音階，製作出一組陶製雙音筆筒編鐘樂器。在研究過程中，發現本作品除能演奏樂音外，也能應用在日常生活當筆筒或花盆、花器……等使用，讓我們的生活充滿了藝術氣息(圖 28)。

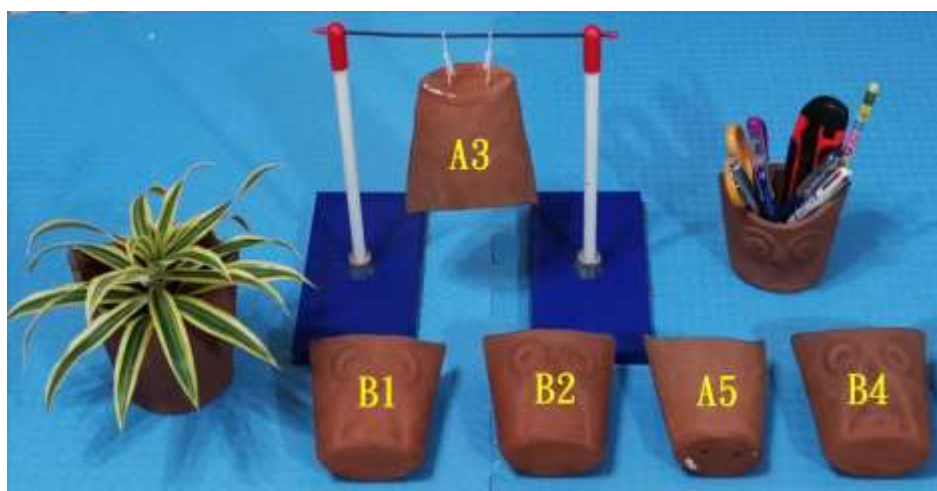


圖 28 兼具實用性的自製雙音筆筒樂器

一、 結論：

經由實驗設計來進行實驗，綜合研究結果分析與討論，得到下列結果：

- (一)面積縮放比與隧音、鼓音的頻率均成反比，實驗結果與理論相符合，亦即鈺面面積愈大的鐘體，不論敲擊隧部或鼓部都會發出較低的頻率。
- (二)鈺面大小相同而厚度不同時，鈺面厚度與隧音、鼓音的頻率均成正比，而厚度加倍時呈現倍頻現象，實驗結果與文獻探討所述無異。
- (三)鈺面飾物隨著補丁大小的增加，鐘體隧音與鼓音的音程差距有加大的趨勢，與文獻探討所發現敲擊每一口鐘的兩音之間的音程總是維持在小三度或大三度，可謂不謀而合。
- (四)不同鈺面大小的隧音與鼓音的音程差異值約在 1~3 個半音之間。而不同鈺面厚度的隧音與鼓音的音程差異值則維持在 1 個全音左右。增加了鈺面飾物的鐘體，其隧音與鼓音的音程差異值也會增大，約在 3~5 個半音之間。

(五)透過研究結果分析，我們將實驗編號 B1、B2、B4、A3 與 A5，組合成一組編鐘樂器，各音階的實測頻率與理論值無明顯差異，所以自製雙音筆筒樂器演奏時，具有相當可期的音準。

在我們國小五年級的「自然與生活科技」課程中，有一個「聲音的探討」單元，談及發音體的體積越大，則產生的音高越低。這個概念我們的實驗結果發現：「鐘體厚度固定，音高與鈺面面積大小成反比」相符；但在鐘體外形大小固定，則音高與鐘壁厚度成正比，我們的發現就和該單元的概念並不吻合，而此結果卻在古籍中早已有記載。

二、研究建議

(一) 為雙音筆筒編鐘樂器增添色彩

本研究主題雙音筆筒編鐘樂器，實驗時以 1200℃ 進行固燒。但在實際應用中可先利用基本鐘形為基礎進行 800℃ 素燒，施以彩繪(如圖 29~30)後，再以窯溫 1230℃ 進行釉燒，可製成茶杯、花瓶、花盆……等可愛又好玩的多用途編鐘筆筒樂器，讓生活更增添藝術氣息！

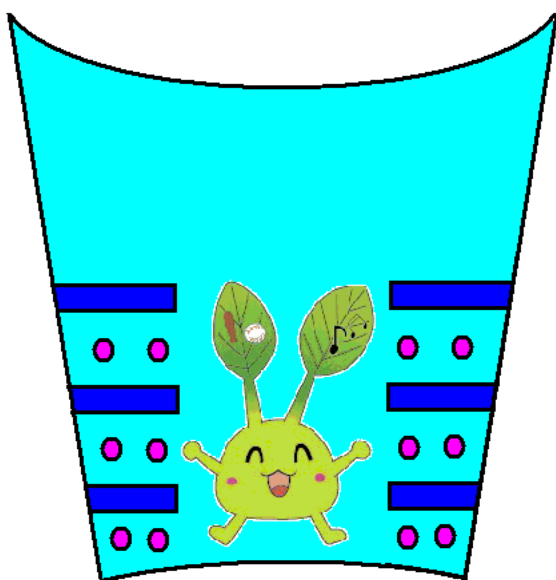


圖 29 鈺面以本校吉祥物為飾物

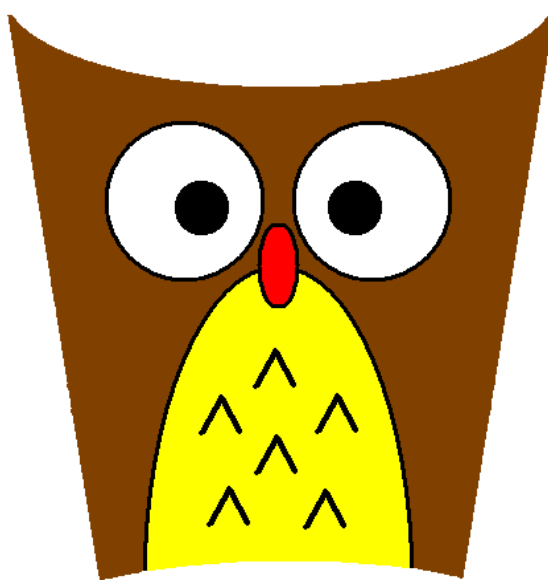


圖 30 貓頭鷹造型編鐘樂器設計

(二) 雙音筆筒編鐘樂器以編鐘方式呈現

在雙音筆筒編鐘樂器的底部鑽二個小孔，當花盆使用可用來排水，用來演奏時，則可依音階將鐘體吊掛排列成一組編鐘(圖 31)。

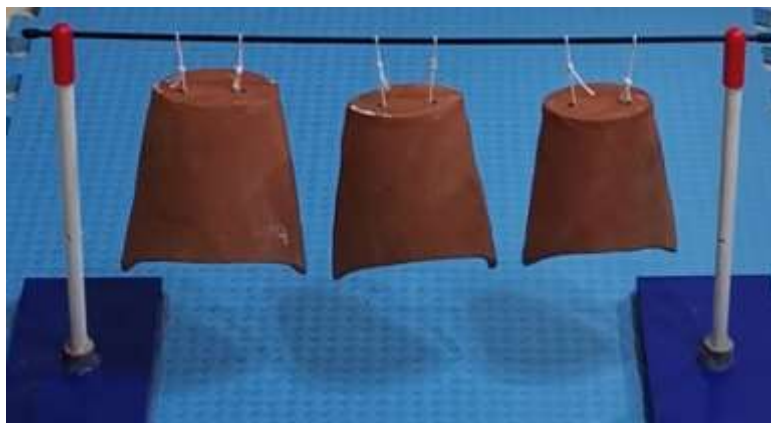


圖 31 鐘體依音階排列吊掛成一組編鐘

因陶板的厚度在製作上有所限制，約須控制在 5~10mm 之間，且在實驗中發現鐘體厚度不可超出鈺長的 1/10 倍，否則不易發出聲音。所以建議可以同時改變鈺長與厚度(表 10)，以設計一組筆筒編鐘樂器。分別以鈺長 13.6cm 與 10cm 製作二個鈺面模型(圖 29、30)，配合表 13 的厚度，便能製作發出 C6~C7 的 8 度標準音高筆筒樂器一組。

表 13 同時改變鈺長與厚度的音階關係對照表

音階	C6	D6	E6	F6	G6	A6	B6	C7
頻率	1047	1175	1319	1397	1568	1760	1976	2093
鈺長	13.6	13.6	13.6	13.6	10	10	10	10
厚度	5	5.6	6.3	6.7	5	5.6	6.3	6.7

【備註】鈺長單位：cm 厚度單位：mm

柒、參考資料

- 鄭慧慈（2008）。聲音的探討—以電腦測音分析陶磬與陶鐘為例。國立高雄師範大學工業科技教育學系教學碩士論文，未出版，高雄市。
- 王敏（2008）。音樂之父巴赫與音樂之祖朱載堉。作家雜誌，2 藝術空間。
- 梁在平（1971）。中國樂器大綱。國立台灣藝術專科學校藝術叢書第一輯。
- 張志誠（1988）。中國古鐘的聲學設計。科學月刊全文資料庫，0222。2008年6月30日，取自 <http://210.60.224.4/ct/content/1988/00060222/0009.htm>
- 菅原明朗（1992）。樂器圖解。臺北市：大陸書店。
- 劉東升、胡傳藩、胡彥久（1987）。中國樂器圖誌。北京市：輕工業出版社。
- 劉克明、楊叔子（1999）。中國古代機械設計思想的科學成就。中國機械工程，10（2）。

【評語】 082913

本研究目的是製作古籍中記載的一種樂器編鐘。文獻探討引用周禮考工記的原文以及古樂器的原理說明(如十二平均律)，原理與文獻說明均非常的細膩與詳細，是一個非常仔細的研究作品，值得鼓勵。然而建議應在過程的描述應再詳盡，雖有提及該校的陶藝課程，但仍應對於陶鐘的取得或製作過程加以描述，另外量測的結果分析也建議將學生的參與過程進行闡述。

作品簡報



研究動機



陶藝課是我們學校傳承多年的特色課程，從低年級就開始接觸陶土的捏塑……，一直到六年級的畢業陶板製作，校園裡貼滿了歷屆畢業生的作品。今年本校榮獲了教育部藝術教育貢獻績優學校獎，讓我們更想有所作為，因此突發奇想，將陶板做成雙音筆筒樂器，平時充當筆筒使用，要演奏時可將一組雙音筆筒樂器當成編鐘，以敲出美妙的樂音，讓學校處處充滿著歡樂氣氛，創造出快樂的學習環境。

研究目的

以本校歷年來所實施的陶藝課程(畢業陶板製作)為基礎，結合編鐘製作技術，為能簡化做成實用又可演奏的樂器，我們只取編鐘的鈺面與舞面組合成筆筒形狀的獨特樂器。本實驗預計達到下列目的：

- 1) 了解鈺面大小與頻率的關係。
- 2) 探討鈺面厚度對頻率的影響。
- 3) 了解鈺面飾物對頻率的影響。
- 4) 探討隧音與鼓音的音程差異。

透過上述的研究與討論，期望能製作出一組能演奏的雙音筆筒編鐘樂器。



文獻探討



圖 3 鐘的雙音敲擊部位

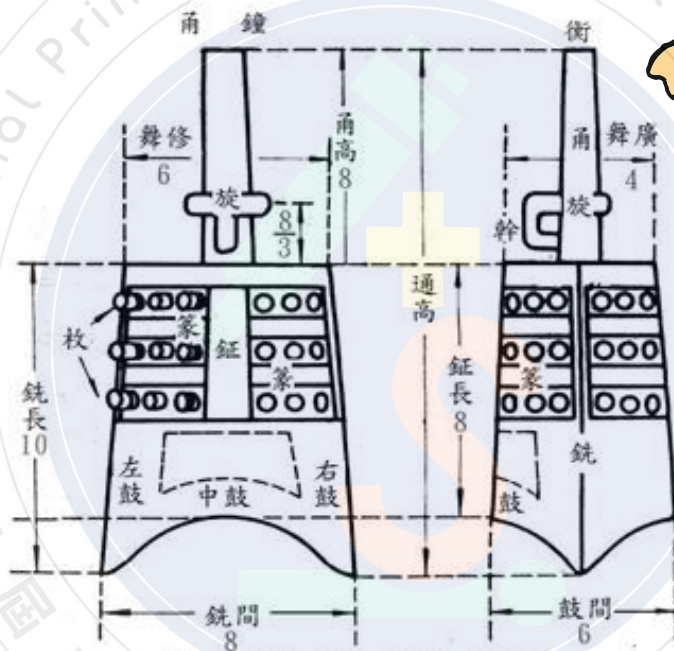


圖 4 鐘各部位名稱與比例圖

資料修自：劉東升、胡傳藩、胡彥久（1987，頁 59）

1. 鐘的音高不同，大小也會不同，如果依照音階順序排列一起演奏，稱為編鐘。

2. 鐘的兩個基音，為敲擊下半部中央的音稱為「隧」音；於隧到銑距離的 $\frac{3}{5}$ 的位置稱為鼓，位於隧的左右兩旁，稱為「鼓」音。

3. 由周禮考工記得知：古代的鐘越大，則鐘壁越厚，鐘壁的厚度約為鼓間的 $\frac{1}{10}$ ，且每個部位大小皆有一定的比例如左圖。

文獻探討

這是「隧」和「鼓」的基頻模式雷射圖。寬闊的白色區域代表節線，黑線部分是振動較強的地方，節線的聚合非常明顯。

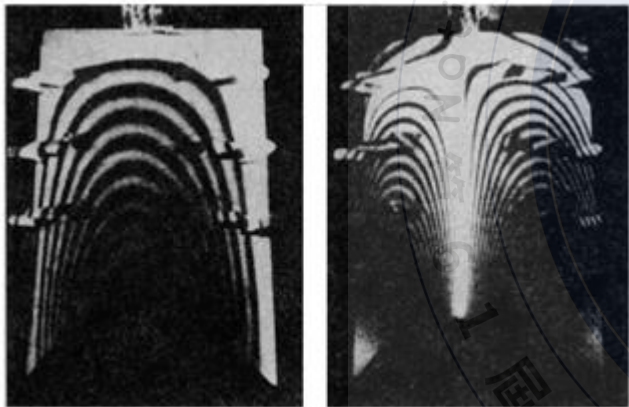


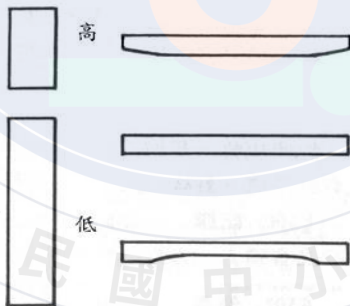
圖 5 鐘的雷射影片

資料來源：(張志誠，1988)

由上圖得知「隧」與「鼓」是互不干擾的雙音設計。

菅原明朗 (1992) 提到，音律是由下列三個條件來決定的：

1. 音板越長，音越低；
2. 音板的中央部份越薄，音越低
3. 音板的兩端越薄，音越高。其音板與音頻的關係如下圖所示：



鄭慧慈 (2008) 提出下圖的陶鐘鐘體的基本設計模數比例圖，來設計製作陶鐘，與周禮考工記所提『鐘』的比例相符，可作為實驗參照。

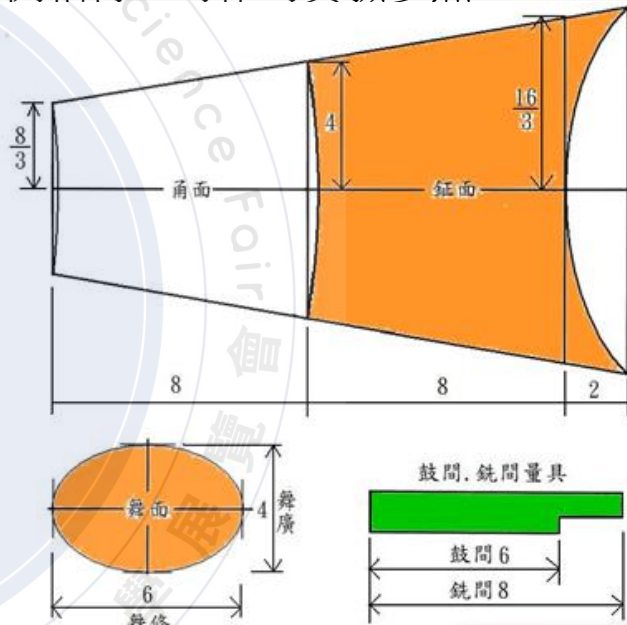


圖 6 音板與音頻的關係

從編鐘變成筆筒樂器

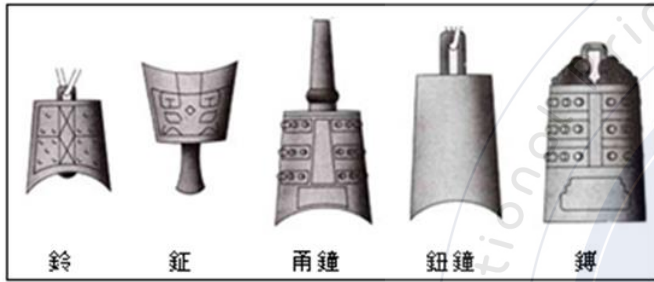


圖 7 鐘的譜系
資料來源：(張志誠, 1988)



裁切二個鈺面與一個舞面的陶板，分別將鈺面陶板置於模具(下圖)上塑形

將陶土桿平



靜置乾燥 4~7天



以泥漿水進行沾黏組合後進行素燒



簡化陶鐘鐘體的基本設計模數比例圖，僅取用一個舞面與二個鈺面的陶板，就可製成雙音筆筒樂器

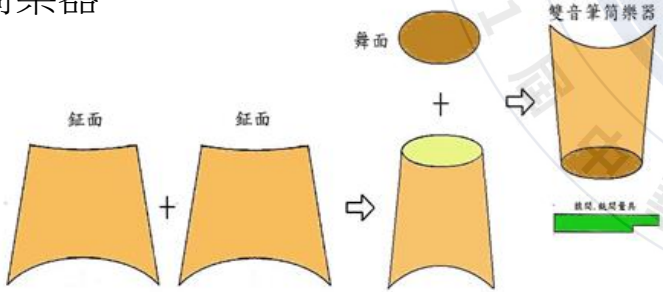


圖10 雙音筆筒樂器之陶板組合示意圖



研究問題一：了解鉦面大小與頻率的關係



結果：

表 5 面積縮放比與鑼音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	A1	A2	A3	A4	A5
鉦面縮放縮放比	1	0.89	0.82	0.75	0.71
鑼音頻率	1427	1841	2021	2294	2637
鼓音頻率	1569	2185	2300	2645	2900
頻率比	1.0995	1.1869	1.1381	1.1530	1.0997

註：頻率差距比值--半音 1.0595、全音 1.1225、三個半音 1.1893

步驟：

- (1) 壓泥板機壓厚 5mm 的陶板
 - (2) 利用影印機縮放比列印鐘體基本設計圖，
 - (3) 利用圖片製作不同大小的樂器
 - (4) 陶體自然乾燥後進行「固燒」。
- 以銑長 12cm 為基準，縮放比值分五個水準 1.00、0.89、0.82、0.75、0.71，觀察音高的變化。

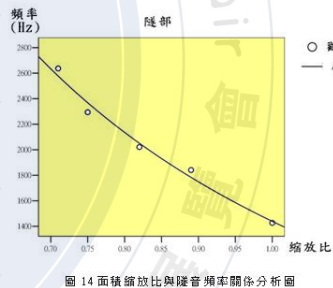
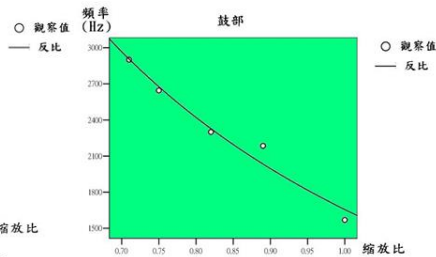


圖 14 面積縮放比與鑼音頻率關係分析圖



由圖 14~15 可以看出，面積縮放比與鼓音頻率大致上呈反比關係。但是，面積縮放比 0.71 與面積縮放比 1.00 與理論值有些差異。



從下表可以得知，每個音與其倍頻音的頻率都相差兩倍，在一個完全八度音階內包含 13 個半音，因此，每升高半音頻率要增加 $\sqrt[12]{2} = 1.0595$ 倍。

表 2 等比級數法與音頻關係表

音階	厚度比值	面積縮放比	音頻
C	1.00	1.00	261.63
D	1.12	0.94	293.66
E	1.26	0.89	329.63
F	1.34	0.87	349.23
G	1.50	0.82	392
A	1.68	0.77	440
B	1.89	0.73	493.88
C	2.00	0.71	523.25
D	2.25	0.67	587.33
E	2.52	0.63	659.26
F	2.67	0.61	698.46

基音頻率公式是：

$$\text{頻率 (赫茲)} \times \text{高度(公分)}^2 \div \text{厚度 (公分)} = \text{常數}$$

$$\text{依等比級數法求得增加半音所需的厚度比值 } 1.0595 \text{ 與面積縮放比值 } \frac{1}{\sqrt{1.0595}} = 0.9715$$



差異性研究

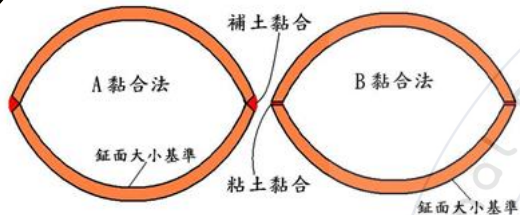


圖 16 鉦面黏合方法

與鄭慧慈老師訪談後，猜測誤差可能是製造過程採用不同的鉦面黏合方法所造成，我們採用的是A黏合法，而原作者用的是B黏合法。從上圖發現，A黏合法所補的土比例較多。所以製作較大的鉦體時，採用的黏合方式影響不大，然製作較小的鉦體時，A黏合法增加的黏土比例明顯高於B黏合法所製作的鉦體，也可能造成較大誤差。



研究問題二：探討鉦面厚度對頻率的影響

步驟：

- (1)調整壓泥板機的轉盤，擀壓陶土使陶板達到預定比值的厚度
 - (2)依基本設計比例圖，裁切大小相同的陶版。
 - (3)將陶板放置於模具上塑型
 - (4)將兩個半面鉦體粘土黏合
 - (5)陶體自然乾燥後進行「固燒」。
- 以鉦厚1.25mm為基準，分六個水準值3.75、5.00、6.25、7.5、8.75、10mm進行實驗並觀察音高變化。



結果：

表 6 不同厚度對隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	E1	E2	E3	E4	E5	E6
厚度	3.75	5	6.25	7.5	8.75	10
隧音	1610	2124	2504	3165	3588	4225
鼓音	1789	2389	2810	3482	3990	4781
頻率比	1.1112	1.1248	1.1222	1.1002	1.1120	1.1316

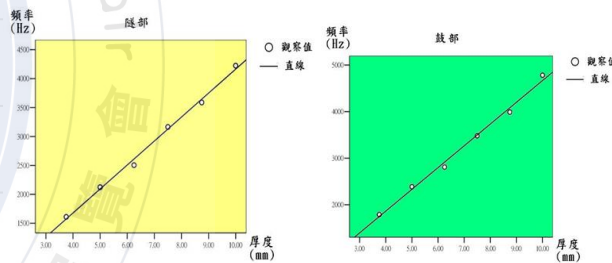


圖 17 鉦面不同厚度與隧音頻率關係分析圖

圖 18 鉦面不同厚度與鼓音頻率關係分析圖

由圖17~18可以看出，鉦面大小相同而不同厚度時，厚度與隧音、鼓音頻率都成正比，而厚度加倍時呈現倍頻現象，實驗結果與理論相符合。

研究問題三：了解鈺面飾物對頻率的影響

步驟：

使用銑長10公分，厚度0.75mm的陶板，置入石膏模型內，控制其形狀及厚度。並分別黏上4種不同的鈺面飾物：

- A. 壓印圖案(內部凹陷)
- B. 壓印圖案(內部補平)
- C. 內部補丁(2/5鈺寬小圓)
- D. 內部補丁(1/2鈺寬大圓)

進行音高變化觀察

結果：

依實驗計畫製作鈺面飾物(圖19)與鈺面內部補丁(圖20)進行實驗，得到結果如下

表 7 不同鈺面飾物對隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	C1	C2	C3	C4
鈺面飾物	壓印圖案 (內部凹陷)	壓印圖案 (內部補平)	內部補丁 小圓(2/5鈺寬)	內部補丁 大圓(1/2鈺寬)
隧音	2068	2207	2664	1677
鼓音	2356	2600	3202	2287
頻率比	1.1393	1.1781	1.2020	1.3637
音程差距(半音值)	2	3	4	5

實驗編號C1與C2為鈺面大小與厚度均相同的鐘體，C1於壓印後內部隨著圖案凹陷，而C2則將凹陷部位補平。

由表七，可以看出，C2鼓音及隧音均高於C1，且鼓音和隧音之間差距亦較大。

C3與C4則為鈺面大小不同而厚度相同的鐘體，分別在鈺面內部的單側鼓部進行補丁。由表7可以看出，隨著補丁大小的增加，鐘體隧音與鼓音的音程差距有加大的趨勢，與文獻探討所述敲擊每一口鐘的兩音之間的音程總是維持在小三度或大三度，可謂不謀而合。



圖 19 壓印貓頭鷹圖案

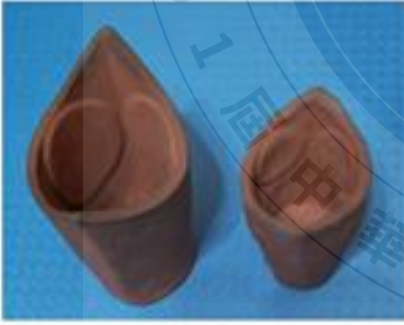


圖 20 於鈺面內部進行補丁增厚



研究問題四：探討隧音與鼓音基音的音程差異

分析研究問題一到三中，各個筆筒樂器的隧音與鼓音基音的音程差異，若不同鈺面條件下的隧音與鼓音基音音程差異，可以造成相對應的半音、全音差，我們就能實際應用於樂器製作上。

得到結果如下表：

表 8 不同鈺面大小的隧音與鼓音基音的音程差異

實驗編號	A1	A2	A3	A4	A5
頻率比	1.10	1.19	1.14	1.15	1.10
音程差距	1~2	3	2	2~3	1~2

表 9 不同鈺面厚度的隧音與鼓音基音的音程差異

實驗編號	B1	B2	B3	B4	B5	B6
頻率比	1.11	1.12	1.12	1.10	1.11	1.13
音程差距	2	2	2	2	2	2

表 10 不同鈺面飾物的隧音與鼓音基音的音程差異

實驗編號	C1	C2	C3	C4
頻率比	1.14	1.18	1.20	1.36
音程差距	2	3	3~4	5

我們將所製作的筆筒樂器篩選出實驗編號B1、B2、B4、A3與A5，組合成一組可演奏的編鐘樂器

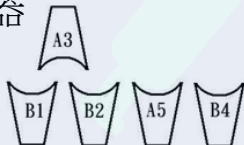


圖 21 自製可演奏的編鐘筆筒樂器組合

自製的編鐘筆筒樂器，演奏時採相對音高，分別以最低音當低音Sol或中音Do，並以電腦分析實測頻率與各音階的理論值差異

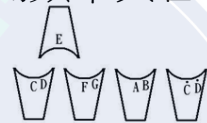


圖 23 自製雙音筆筒樂器演奏示意圖 (c-b)



圖 22 自製雙音筆筒樂器演奏示意圖 (g-a)

不同鈺面大小的隧音與鼓音基音的音程差異值約在1~3個半音之間。

不同鈺面厚度的隧音與鼓音基音的音程差異值約在1個全音。

不同鈺面飾物的隧音與鼓音基音的音程差異值約在3~5個半音之間

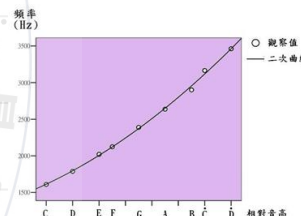
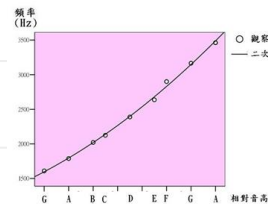


圖 25 各音階的實測頻率與理論值分析 (c-b)

A 各音階的實測頻率與理論值分析，可以看出自製樂器具有相當可期的音準。

B 使用不同鈺面厚度的隧音與鼓音可得到相臨的全音，可簡化製作上的困難度。



研究問題四：探討隧音與鼓音基音的音程差異



再現性分析

鈺面面積縮放比與隧音、鼓音頻率成反比，且呈現倍頻關係。

再次依表3音階與面積縮放比的關係對照表進行實驗，本次實驗則改採B黏合法，得到結果如下表：

表 11 面積縮放比所對應的銑長與隧音、鼓音的頻率測量值

實驗編號	D1	D2	D3	D4	D5
鈺面縮放縮放比	1	0.89	0.82	0.75	0.71
銑長	12.0	10.7	9.8	9.0	8.5
隧音頻率	1450	1823	2180	2500	2812
鼓音頻率	1592	2031	2317	2675	3046

銑長單位；cm

由表11面積縮放比所對應的銑長與隧音、鼓音的頻率測量值可以算出，面積縮放比0.71與面積縮放比1.00已呈現倍頻關係，實驗結果分別為1.93、1.91與理論值2幾乎相近。



將鈺面縮放縮放比轉換成銑長，其與隧音、鼓音頻率的關係，以統計軟體SPSS進行分析，得到結果如下圖：

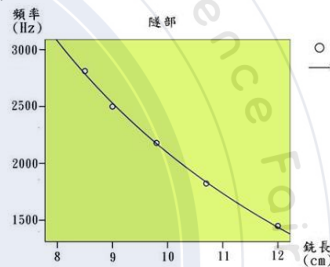


圖 26 銑長與隧音頻率關係分析圖

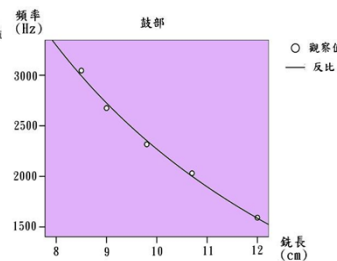


圖 27 銑長與鼓音頻率關係分析圖

由上面的關係分析圖可以看出，銑長與隧音、鼓音頻率皆成反比。

藉由統計軟體SPSS進行相關與迴歸分析，得到結果如右

表 12 銑長對隧音、鼓音頻率的相關與迴歸分析

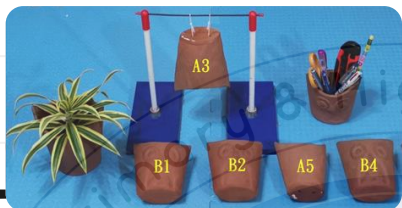
Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1
Inverse	.998	1841.317	1	3	.000	-1838.764	39320.733

Dependent Variable: 隧音

The independent variable is 銑長.

由表12的參數估計可以推知，頻率的迴歸方程式為：**頻率(F) = 39321 ÷ 銑長(cm) - 1839**
查找所需音高之頻率，代入後即可查得所需之銑長

結論與建議



(一)面積大小與隧音、鼓音的頻率成反比

(二)鈺面大小相同而厚度不同時，鈺面厚度與隧音、鼓音的頻率均成正比

(三)鐘體隧音與鼓音的音程差距會隨著鈺面飾物的增加而加大

(四)透過研究結果分析，我們將實驗編號B1、B2、B4、A3與A5，組合成一組編鐘樂器，各音階的實測頻率與理論值無明顯差異，所以自製雙音筆筒樂器演奏時，具有相當可期的音準。

結論



雖然陶板的厚度在製作上需控制在5~10mm之間，且在實驗中發現鐘體厚度不可超出鈺長的1/10倍，否則不易發出聲音。但在此範圍內仍能完成一個八度以上的筆筒樂器。

(一)與古代的編鐘不同，自製的雙音筆筒樂器的製作，在八度音內可以透過模具來固定「鈺面形狀」，只操作『厚度』來調整音高，不但容易操作且具有一定的穩定性；超過八度音的範圍再微調鈺長即可，期待未來能成為可以操作的課程。

(二)還可搭配彩繪釉燒的設計，讓自製的雙音筆筒樂器更加多采多姿，讓生活增添美感。

建議

參考資料



- 鄭慧慈 (2008)。聲音的探討—以電腦測音分析陶磬與陶鐘為例。國立高雄師範大學工業科技教育學系教學碩士論文，未出版，高雄市。
- 王敏 (2008)。音樂之父巴赫與音樂之祖朱載堉。作家雜誌，2 藝術空間。
- 梁在平 (1971)。中國樂器大綱。國立台灣藝術專科學校藝術叢書第一輯。
- 張志誠 (1988)。中國古鐘的聲學設計。科學月刊全文資料庫，0222。2008年6月30日
取自<http://210.60.224.4/ct/content/1988/00060222/0009.htm>
- 菅原明朗 (1992)。樂器圖解。感謝您的聆聽~請多多指教
臺北市：大陸書店。
- 劉東升、胡傳藩、胡彥久 (1987)。中國樂器圖誌。北京市：輕工業出版社。
- 劉克明、楊叔子 (1999)。中國古代機械設計思想的科學成就。中國機械工程，10 (2)



感謝您的聆聽~請多多指教!

