

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學科

佳作

080810

多管咸試—膠管樂的製作與分析

學校名稱：高雄市鳳山區忠孝國民小學

作者：	指導老師：
小六 郭芸吟	郭清進
小六 孫苡珊	李坤成
小六 王 琪	
小六 曾慧怡	
小六 曾思誠	
小六 許祐寧	

關鍵詞：聲音的探討、電腦測音、自製樂器

多管咸試——膠管樂的製作與分析

摘要

將自然與生活科技的「聲音的探討」單元中所學的知識，應用在日常生活，使用回收物品與教具的再利用當器材的來源，利用鼓風爐教具當壓吹空氣源（氣壓源），連接不同長短的膠管笛以發出聲音，藉由電腦測音軟體錄製所吹出的聲音，進行頻譜分析量測其音頻，探討不同長短的塑膠管所發出的音高，進而求出想要的音高的管長，使其發出所需的和弦與樂音，以製作能當伴奏或彈奏的膠管樂器，達到自製樂器的樂趣。

關鍵字：聲音的探討、電腦測音、自製樂器

壹、研究動機

在五年級自然與生活科技中有一單元談到了「聲音的探討」，敲擊或吹奏不同體積的物體所發出的聲音高低也會有所不同，改變物體的體積就可得到不同音高的聲音，進而了解聲音有高低、大小和音色的變化。利用裝著不同水位的試管就能吹出不同的音高，令人感到非常的驚訝，不禁想更進一步的瞭解其中的奧妙。然而在此單元中，要將試管吹出聲音實是有點困難，因此，如何能輕易的能將試管吹出美妙的聲音，引發了研究者的研究動機。研究者試著將塑膠管製成與直笛（或陶笛）類似的吹嘴，如此加上吹嘴的塑膠管就可很容易就能吹出聲音。

本實驗所要製作的膠管樂，與吹奏樂器中的排笛較相似，都屬於閉管樂器，且一管（空氣柱）發出一音；其中最大的差別在於排笛只能吹奏單音旋律，而研究者想製作的膠管樂器卻能同時發出單音旋律與伴奏和弦。排笛與膠管樂在單音的吹奏方式相同，只是氣流的來源不同，排笛由嘴唇控制，吹奏者要有相當的技巧，而膠管樂由壓縮排橐(鼓風爐教具)所控制，人為的壓控操作所產生氣流壓力差異較大，如何能使膠管樂發出預期的樂音，引發了研究者的研究動機。

貳、研究目的

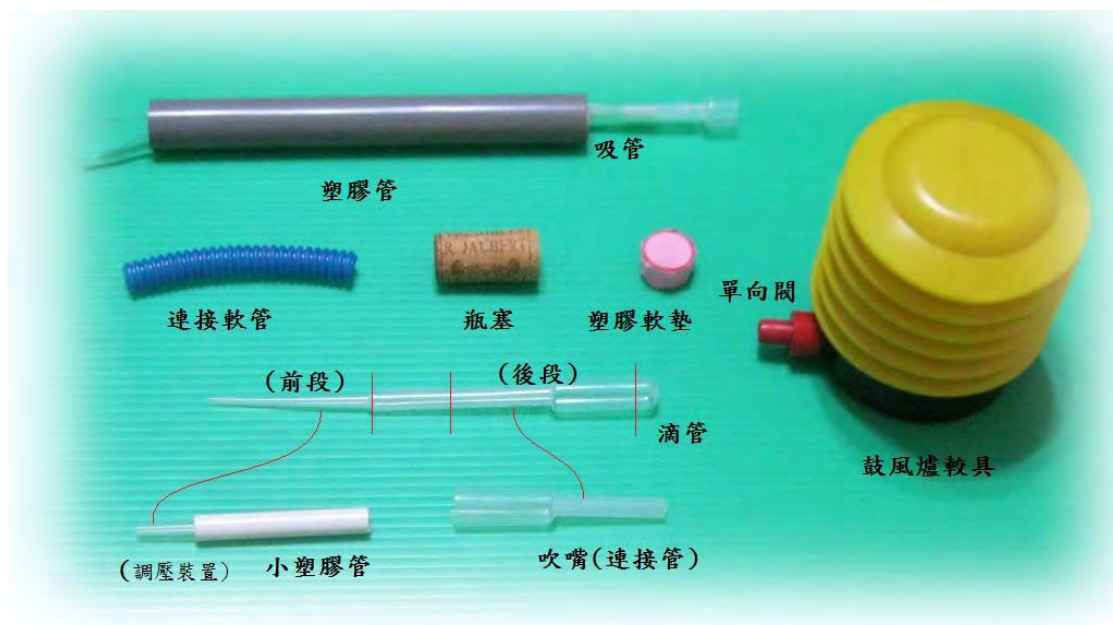
笛類在重吹或輕吹時頻率會有些微差異或出現倍頻現象，透過技巧性的吹奏，可利用它來增加音域；而膠管樂的氣壓源由壓縮排橐所控制，人為的壓控操作所產生氣流壓力差異較大。為了能使膠管樂發出預期的樂音，首先必須了解塑膠管所吹出的音頻與重吹或輕吹所發出音頻的關係；其次振動體（空氣柱）大小為影響物體發出音頻高低的主要因素，為了製造能發出各種伴奏和弦與音階的膠管樂器，必須了解塑膠管所吹出的音頻與其管長及粗細的關係。利用電腦的錄音與頻譜分析，分析改變不同的變數項目對膠管所發出的音頻影響，期能研製出發出音域較廣的膠管樂器。

本研究預計達成下列三個目的：

- 一、了解重吹或輕吹對塑膠管所發出音頻的影響。
- 二、探討不同長短的塑膠管與音頻的關係。
- 三、探討不同粗細的塑膠管與音頻的關係。

參、研究設備及器材

- 一、設備：電腦、麥克風、鋸子、鑽孔機、鑽頭組、雕刻刀、銼刀、調音器。
- 二、器材：使用回收物品與教具的再利用當材料，其品項內容如圖 1 所示：



三、量測工具：60cm 長尺、錄音與頻譜分析軟體（圖 2）。

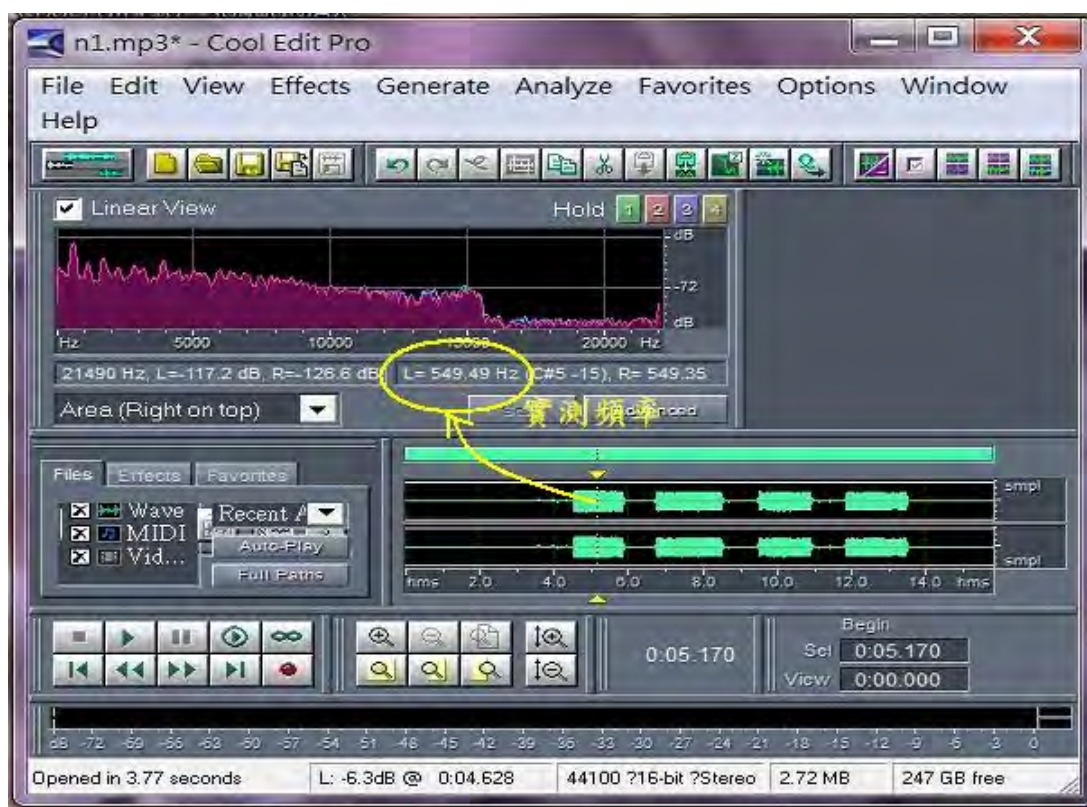


圖 2 錄音與頻譜分析軟體——Cool Edit

肆、研究過程或方法

一、膠管笛的構造與發聲原理

(一) 膠管笛的主要構造如圖 3 所示：



圖 3 膠管笛的主要構造

1. 吹嘴：壓縮空氣從吹嘴送氣時，首先集中氣流，從吹嘴進入氣腔（空氣柱）。
2. 氣道：由吹嘴進入的氣流，順著氣道流往氣窗。

3. 笛唇：氣流到達氣窗後，在笛唇處做分流動作，一部分氣流往膠管笛內部氣腔，另一部分氣流往外部與笛唇摩擦振動而發出聲音。
4. 共鳴氣腔：流往膠管笛內部的氣體在此產生共鳴，而由氣腔體積的大小來決定膠管笛基音的頻率。膠管笛內部氣腔愈大，聲音會愈低，所以體積愈大的膠管笛，聲音愈低沉；體積愈小的膠管笛，聲音越高昂。

(二) 膠管笛的發聲原理

自製膠管笛的發音體屬於氣簧，由吹出的氣流本身作為發音體，類似陶笛與排笛之閉管樂器。笛類的發音是依靠「邊稜音」的原理，當吹奏者用一股氣流送向氣道時，與氣道對面的尖銳邊緣（笛唇）相碰，氣流就開始分裂，約三分之一氣流散發於孔外，另三分之二的氣流則進入管內，發生漩渦而成聲。

二、膠管樂器的構造設計

自製的膠管樂器分為音階與伴奏二部分，音階部分由右手壓吹單音旋律，伴奏部分由左手壓吹和弦。

(一) 膠管樂器的音階構造設計

利用鼓風爐的教具當壓吹空氣源（氣壓源），每個氣壓源連接一個膠管笛以發出所要的音階頻率，其構造設計與成品實物，分別如圖 4 與圖 5 所示。

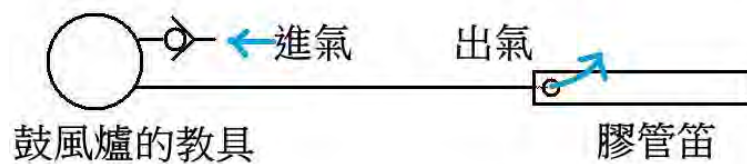


圖 4 膠管笛之壓吹設計圖

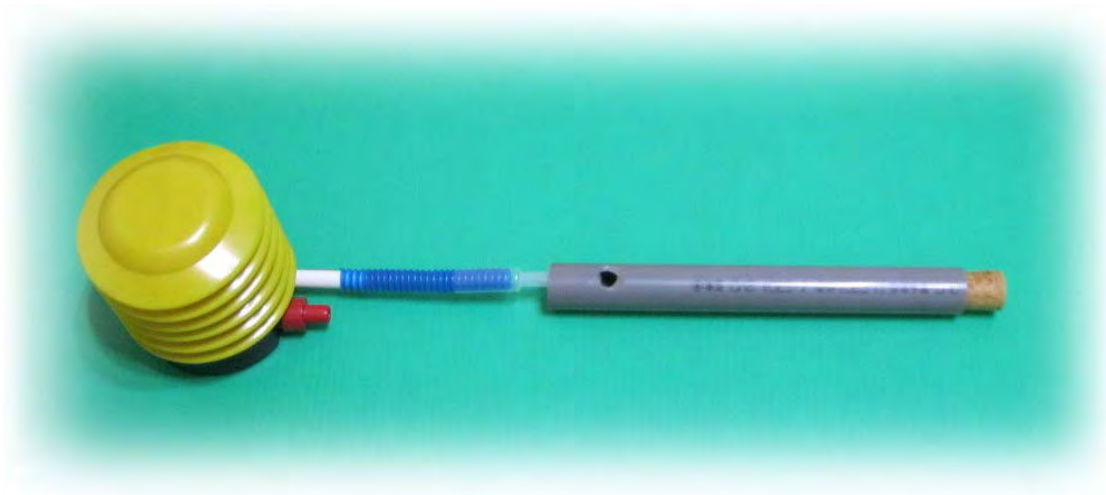


圖 5 膠管笛之壓吹組合成品

將所設計的長短不同膠管笛壓吹組，組成高低不同的音階，以利於演奏樂曲。

(二) 膠管樂器的伴奏構造設計

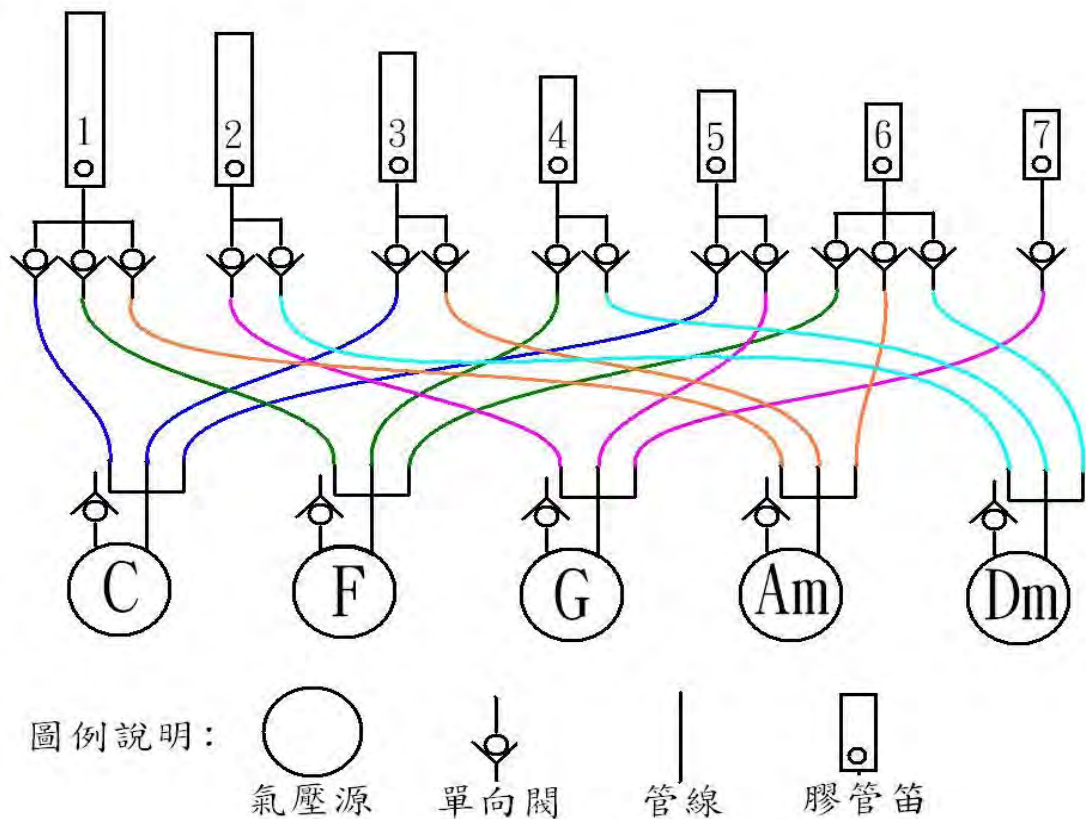


圖 6 膠管樂器的伴奏構造設計圖

常用的和弦有 C (1-3-5)、F (1-4-6)、G (2-5-7)、Am (1-3-6)、Dm (2-4-6)，利用鼓風爐的教具當氣壓源，每個氣壓源連接三個不同長短的膠管笛以發出所設計的和弦音，其構造如圖 6 所示。

三、影響膠管笛頻率的因素探討

影響膠管笛頻率的要因分析，如圖7所示：

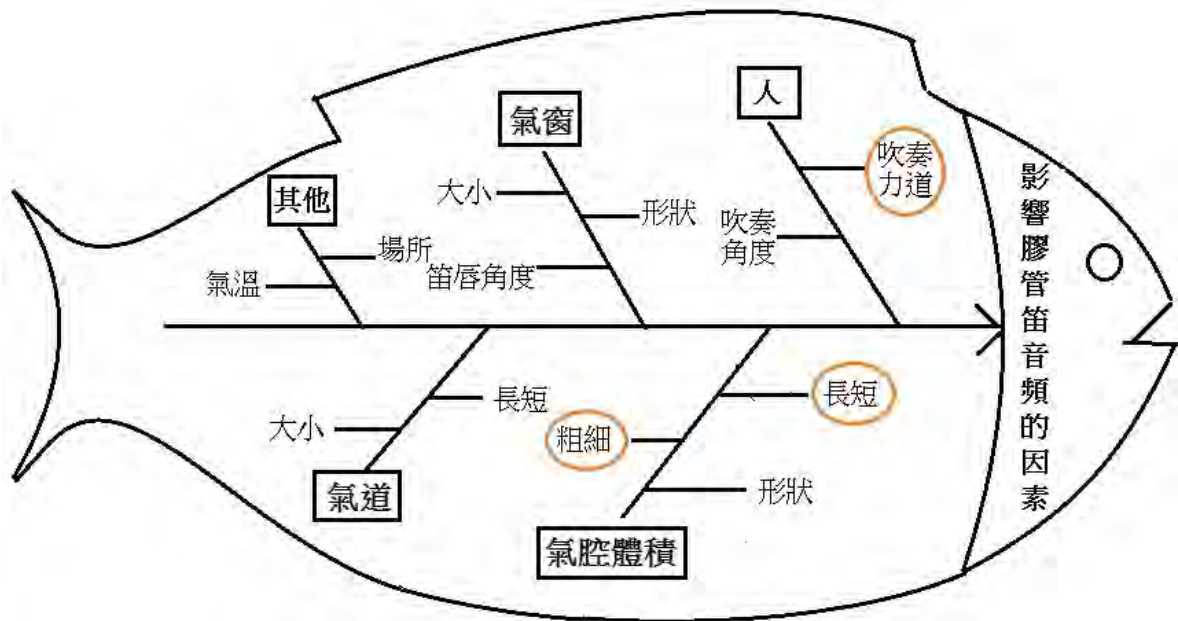


圖7 影響膠管笛頻率的要因分析圖

由要因分析圖得知，影響膠管笛頻率的因素眾多，而本實驗主要著重在塑膠管粗細選擇與其長短的調整，而氣壓源壓吹力道大小也會因人而異，因此選定壓吹力道、塑膠管長短、塑膠管粗細三個變因來做分析探討，其餘的要因則保持不變。

四、膠管樂製作流程

自製的膠管樂器分為音階與伴奏二部分，利用鼓風爐的教具當氣壓源，在單音旋律吹奏部分，每個氣壓源連接一個膠管笛，分別量測校正音準；而伴奏和弦部分每個氣壓源則連接三個不同長短的膠管笛以發出所設計的和弦音（如圖6所示）。5組常用和弦與7個膠管笛搭配，除膠管笛要量測校正音準外，和弦膠管笛組更要調整到每管音量能均勻吹出。膠管樂製作流程如圖8所示：

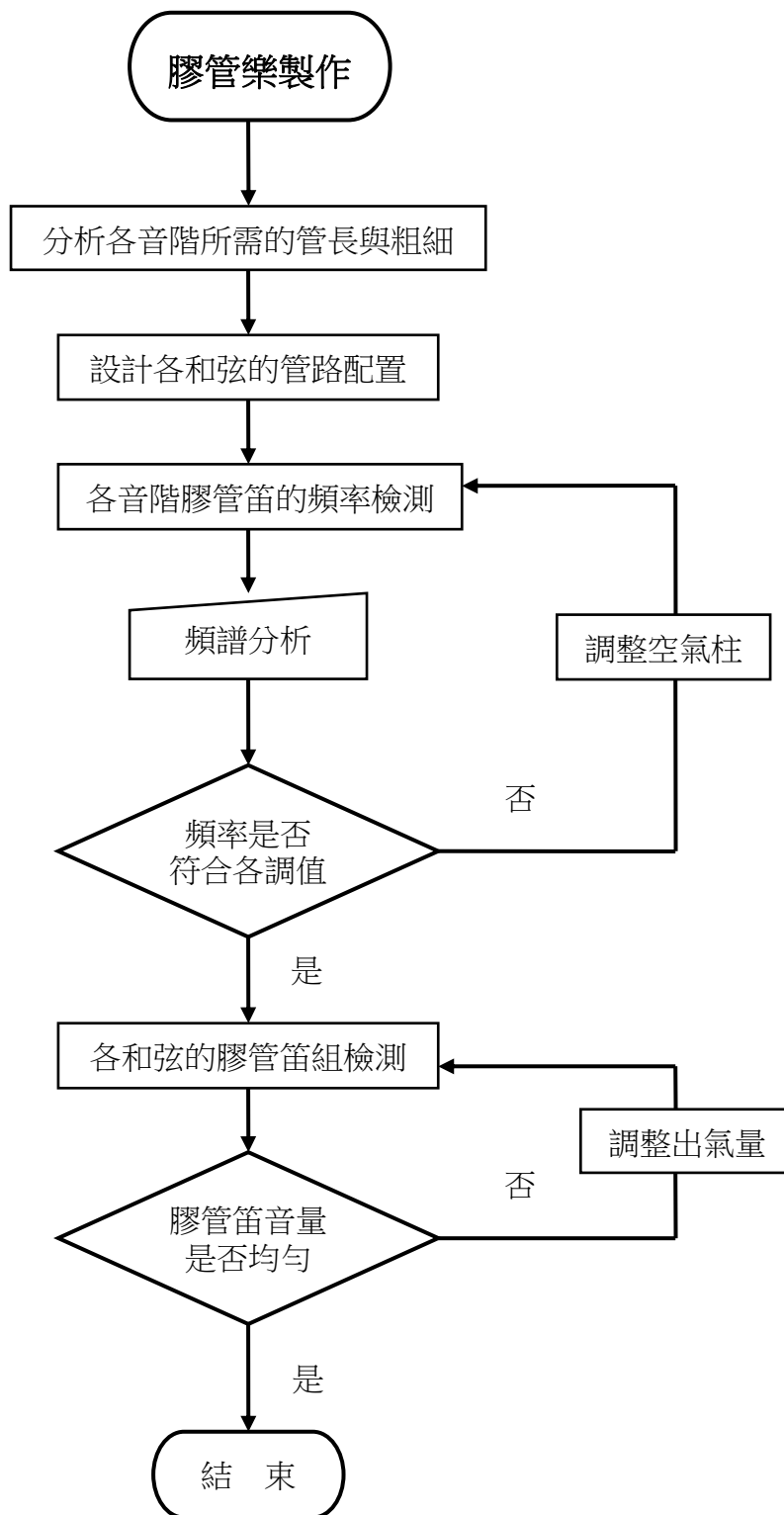


圖8 膠管樂製作流程圖

自製完成的膠管樂器伴奏成品實物，如圖9所示，其中各連接歧管由回收的滑輪組教具組的支架所製成，中間的管路氣流較大，因此要調整出氣量使各管的出氣量均勻。

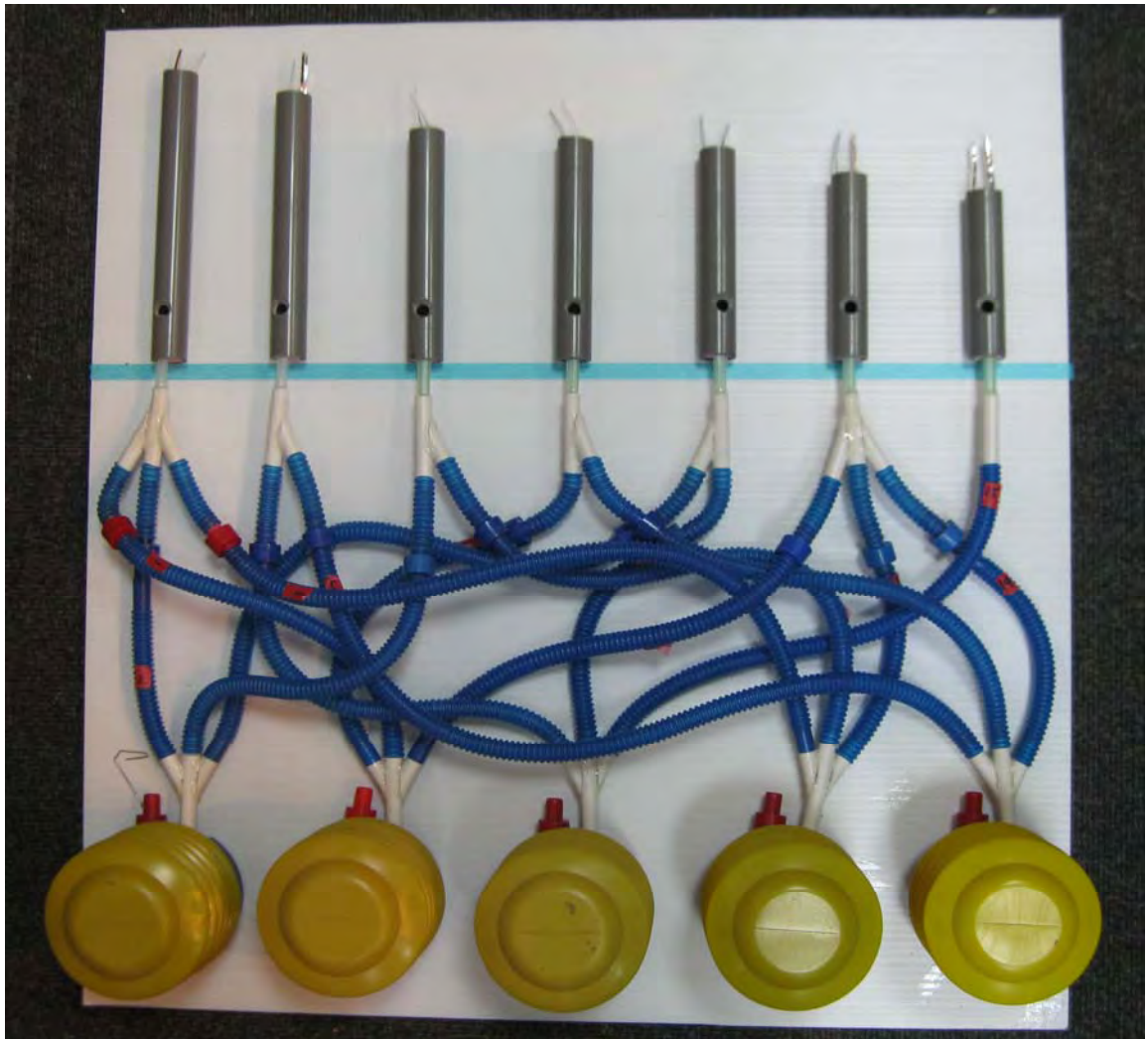


圖9 自製完成的膠管樂器伴奏成品

五、實驗設計

為瞭解膠管笛氣腔(空氣柱)與吹出音頻的關係，依據研究目的進行下列實驗：

實驗設計：

1. 要改變的項目：
 - (1) 吹氣力道：分輕吹與重吹二個水準值。
 - (2) 空氣柱：從 2~50cm，每間隔 2cm 為一單位，共 25 個水準值。
 - (3) 管別：依較常見的塑膠管取材，分 A (13mm 電氣導管)、B (16mm 自來水管)、C (20mm 自來水管)、D (28mm 電氣導管) 4 個水準值。

2. 要觀察的項目：音高（頻率）
3. 保持不變的項目：氣腔形狀、氣道大小、氣道長短、氣窗大小(圓形直徑 8mm)、氣溫高低、錄音場所。

伍、研究結果

一、實驗記錄與分析

依實驗設計進行實驗，分別針對重吹或輕吹、不同長短與不同粗細的塑膠管進行測音，各水準所測的數據平均值如表 1 所示：

表1 各水準所測的數據平均值

管別	空氣柱 力道	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
		A	輕吹	1877	1303	1033	847	712	626	550	452	1270	1167	1064
重吹	1895		1322	1036	848	718	629	551	516	1275	1178	1067	998	925
B	輕吹	1632	1152	929	775	651	580	529	485	1221	1119	1033	959	888
	重吹	1660	1172	932	779	664	585	530	485	1234	1138	1041	964	906
C	輕吹	1546	1161	927	806	700	591	548	506	1198	1133	1044	970	900
	重吹	1572	1164	950	817	703	600	558	517	1196	1132	1051	978	913
D	輕吹	1206	877	758	631	570	496	454	1238	1132	1020	938	878	816
	重吹	1259	884	763	636	571	495	457	1239	1137	1022	958	883	831

管別	空氣柱 力道	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	
		A	輕吹	860	804	760	716	677	654	623	975	931	893	860
重吹	1422		1346	1264	1189	1132	1068	1025	1365	1327	1259	1214	1171	
B	輕吹	832	788	744	703	666	631	612	581	551	887	845	806	
	重吹	1393	1307	1229	1172	1104	1053	1009	966	925	1236	1190	1139	
C	輕吹	845	801	755	715	679	653	595	581	552	535	517	500	
	重吹	851	1308	1234	1177	1109	1061	1009	968	913	879	848	827	
D	輕吹	774	722	688	658	626	591	574	545	527	501	487	464	
	重吹	860	804	760	716	677	654	623	975	931	893	860	835	

表2 音階與頻率對照表

音符	G4	G#4	A4	A#4	B4	C5	C#5	D5	D#5
頻率	392.0	415.3	440.0	466.2	493.9	523.3	554.4	587.3	622.3
音符	E5	F5	F#5	G5	G#5	A5	A#5	B5	C6
頻率	659.3	698.5	740.0	784.0	830.6	880.0	932.3	987.8	1046.5
音符	C#6	D6	D#6	E6	F6	F#6	G6	G#6	A6
頻率	1109	1175	1245	1329	1397	1480	1568	1661	1760

由表 1 得知，膠管笛所能發出的音頻範圍約 500~1800 Hz (次/秒)，參照表 2 之音階與頻率對照，了解其音域範圍為 B4~A6 (14 度音)。

二、統計圖分析

依實驗設計所測得到的實驗記錄，做更詳細的統計分析，得到的結果如下：

(一)重吹或輕吹對塑膠管所發出音頻的影響

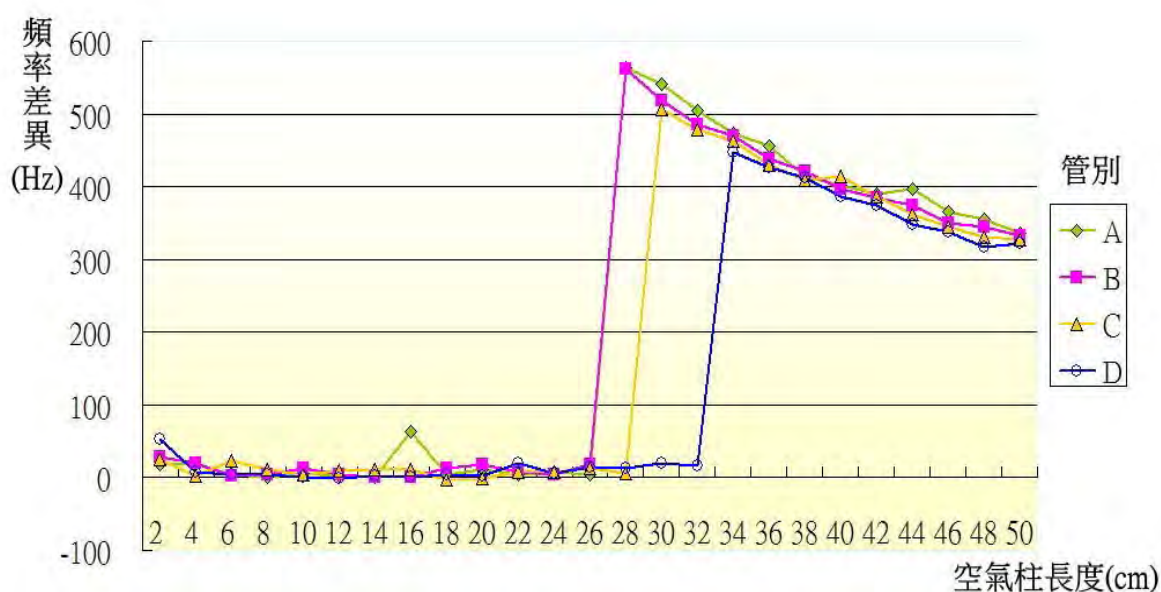


圖 10 重吹或輕吹對塑膠管所發出音頻差異統計分析圖

由圖 10 得知 2~26cm 內重吹比輕吹平均差異約高 10Hz，換成音程則在 0.3 個半音內，重吹或輕吹對塑膠管所發出音頻的影響不大，而空氣柱長度超過 26cm 時則易產生氣音（頻率陡增）。

（二）不同長短的塑膠管與音頻的關係

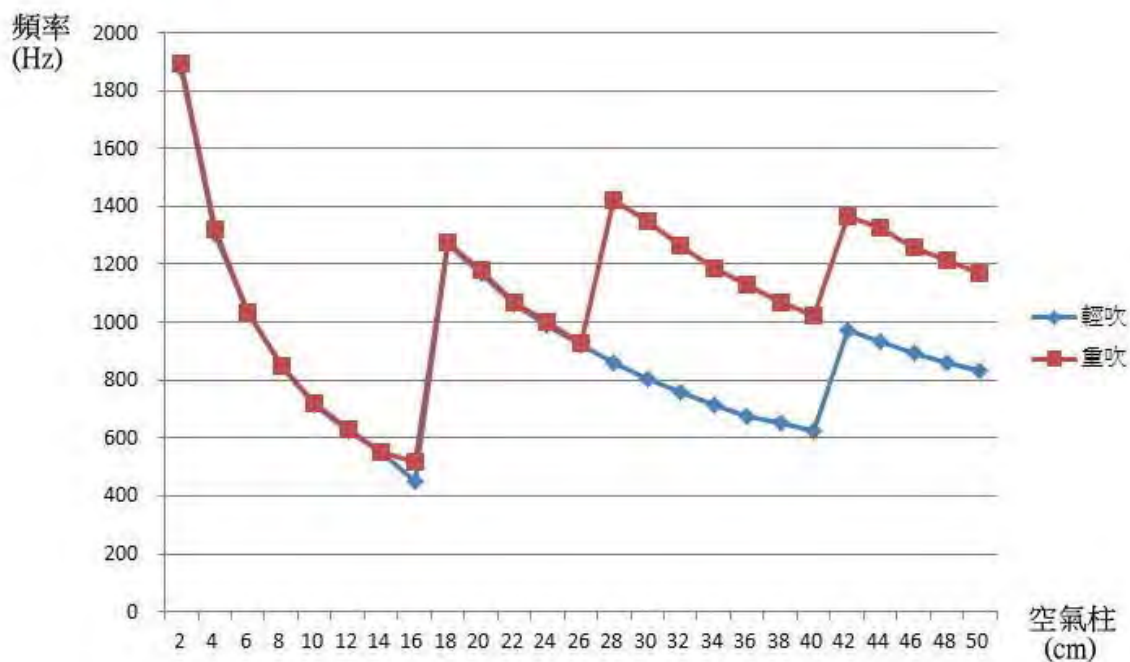


圖 11 不同長短的塑膠管與音頻之關係分析圖 (A 管)

由圖 11 之 A 管(13mm 電氣導管)在不同長短的塑膠管與音頻之關係分析圖得知，空氣柱長短與音頻之關係並非單純的線性關係，空氣柱愈長頻率不見得愈低，然亦是有軌跡可循。在輕吹的條件下，當空氣柱長度在 16cm 以下，氣腔體積愈大則頻率會愈小，兩者呈反比關係。而空氣柱長度在 16cm 以上時，頻率會突然倍增，實測值與理論並不相符，但繼續增加空氣柱長度至 40cm 內，此範圍的氣腔體積與頻率亦呈現反比關係。再持續增加空氣柱長度至 42cm 以上時，頻率又會突然倍增，繼而又呈現反比關係。在重吹的條件下，空氣柱長短與音頻之關係也是成鋸齒狀分布。

空氣柱長度在 16cm 以下，不論重吹或輕吹，氣腔體積愈大則頻率會愈小，兩者均呈穩定的反比關係。

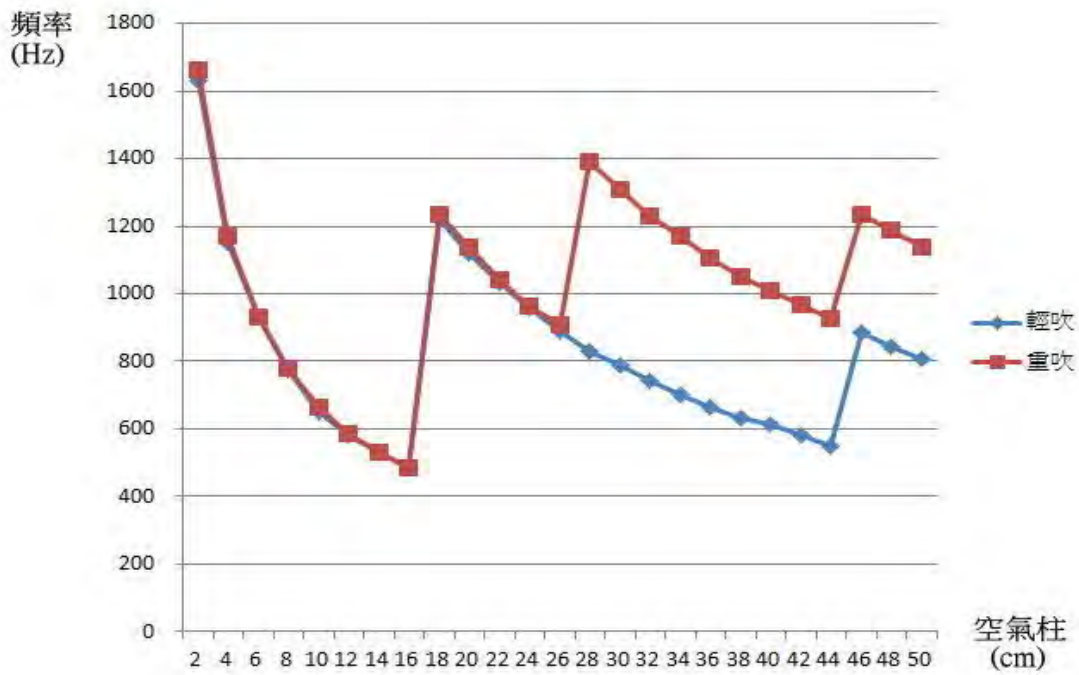


圖 12 不同長短的塑膠管與音頻之關係分析圖 (B 管)

由圖 12 之 B 管(16mm 自來水管)分析圖得知，空氣柱長短與音頻之關係與 A 管(13mm 電氣導管)雷同。

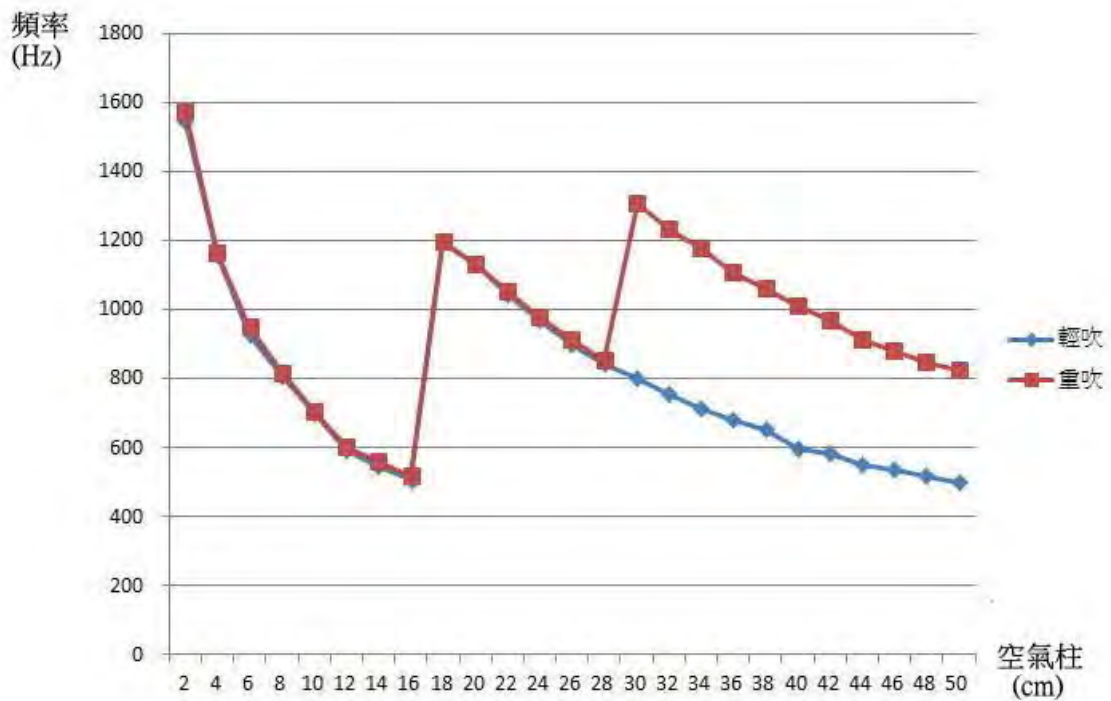


圖 13 不同長短的塑膠管與音頻之關係分析圖 (C 管)

由圖 13 之 C 管(20mm 自來水管)分析圖得知，空氣柱長度在 16cm 以下，不論重吹或輕吹，氣腔體積愈大則頻率會愈小，兩者均呈穩定的反比關係，與 A 管、B 管皆相似。而空氣柱長度在 16cm 以上時，頻率會突然倍增，陡增後氣腔體積與頻率又再度呈現反比關係。不論重吹或輕吹，C 管出現陡峰數均比 A 管與 B 管少一次，而出現雙音的長度延至 30cm 以上。

C 管空氣柱長度在 18~50cm 時，氣腔體積與頻率呈現穩定的反比關係，只是在吹奏低音時要輕吹，否則容易吹出氣音，此點與吹奏其他樂器相同。

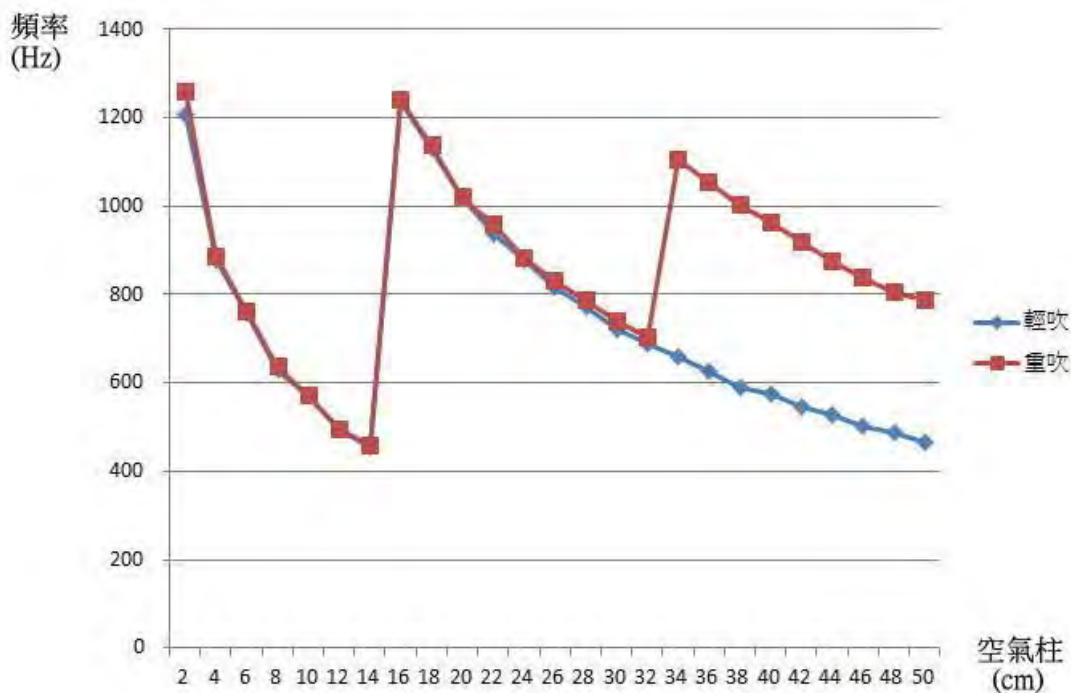


圖 14 不同長短的塑膠管與音頻之關係分析圖 (D 管)

由圖 14 之 D 管(28mm 電氣導管)分析圖得知，空氣柱長短與音頻之關係與 C 管(20mm 自來水管)較相似，唯空氣柱長度在 16cm 時就出現頻率陡增現象，且音域廣度明顯下降，僅能吹出 B4 ~ D6 共 10 度音。

(三) 不同粗細的塑膠管與音頻的關係

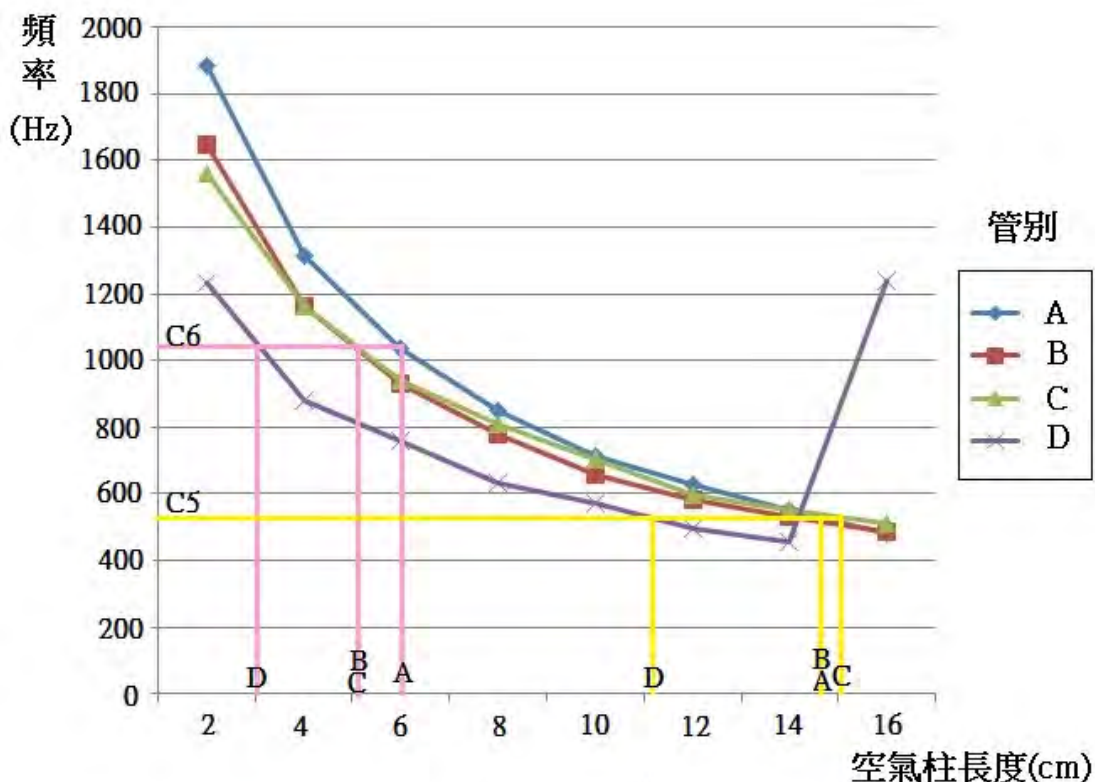


圖 15 不同粗細的塑膠管與音頻之關係分析圖

由不同長短的塑膠管與音頻的關係探討得知，空氣柱長度在16cm內，氣腔體積愈大則頻率會愈小，呈穩定的反比關係（D管除外）。分別取A、B、C、D各管長度在16cm內之數據做比較，得到圖15之不同粗細的塑膠管與音頻之關係分析圖。由圖15求得發出同一音頻各管所需的長度，除D管明顯較短外，其餘A、B、C管的長度差異約在1cm內。

從分析圖可以看出較細的管子所發出的音域較廣，與表2之音階與頻率對照表得到各管的音域範圍如下：

A管：B4 ~ A6，可吹出14度音。

B管：B4 ~ G6，可吹出13度音。

C管：C5 ~ G6，可吹出12度音。

D管：B4 ~ D6，可吹出10度音。

陸、討論

一、膠管笛的笛管選擇

一般的歌曲音域廣度約在 12 度音內，由研究結果得知製作膠管笛的塑膠管 A、B、C 均符合吹奏單音旋律音域廣度的要求，然研究者所設計的膠管樂器，除單音旋律的演奏外亦包含歌曲的伴奏。依設計圖所製作的伴奏樂器如圖 9 所示，在連接氣壓源的出氣分歧管中，中間的管路要加裝調壓裝置，以減少其出氣流量，使出氣量平均，方能使連接的三支膠管笛都發出聲音。因伴奏用的膠管笛只要能發出 7 度音即可（C5 ~ B5），A 管雖可發出較寬廣的音域，但其為電氣導管管壁較薄，笛唇與空氣的摩擦面積較小，可能無法同時使連接的三支膠管笛都發出聲音來；又考慮同時吹奏三管用以伴奏的氣壓源分流後壓力較弱，而吹奏旋律的單管笛氣壓又過強。因此，研究者採用 B 管(16mm 自來水管)來當伴奏笛、而以 C 管(20mm 自來水管)來做演奏笛的笛管。

二、各音階的膠管笛空氣柱長度推估

製作膠管樂的笛管選擇 B 管（伴奏）與 C 管（主音），針對 B、C 管長度在 16cm 內之數據做 SPSS 統計分析，得到空氣柱長短與音頻的最適曲線圖，如圖 16 所示：

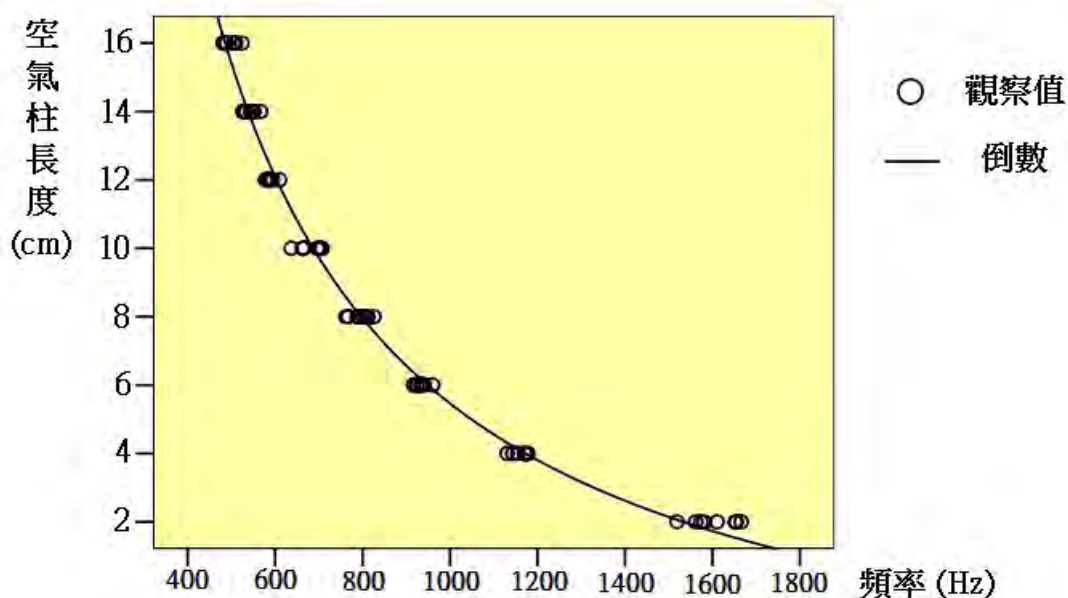


圖16 空氣柱長短與音頻的最適曲線圖

由圖16之最適曲線圖可以得知空氣柱長短與音頻呈反比關係，其回歸方程式如下：

$$Y = 9948 \div X - 4.5$$

公式中的X為頻率，而Y為所對應的空氣柱長短，將表2 之音階頻率代入公式，得到音階與空氣柱長度推估對照，其關係如表3所示：

表3 音階與空氣柱長度推估對照表

音符	B4	C5	D5	E5	F5	G5	A5	B5	C6	D6	E6	F6	G6
頻率	494	523	587	659	699	784	880	987	1047	1175	1329	1397	1568
空氣柱	15.6	14.5	12.4	10.6	9.7	8.2	6.8	5.6	5.0	4.0	3.0	2.6	1.8

三、多管咸試——膠管笛的調整與測試

(一) 膠管笛音頻的調整與測試

參考表 3 之各音階膠管笛空氣柱長度推估裁鋸塑膠管，各管的裁鋸長度為空氣柱長度推估值加 4 cm（分別為吹嘴 2 cm、笛塞 1 cm 與調音校正 1 cm），依圖 3 膠管笛的主要構造製作膠管笛組，製作完成的膠管笛則以調音器檢測音調，並調整各管長度使其頻率符合各調值。

(二) 伴奏膠管笛組音量的調整

由於伴奏部分（圖6）為每個氣壓源同時連接三個不同長短的膠管笛，以發出所設計的和弦音，其出氣控制如圖17所示；而每支膠管笛也分別由1~3個氣壓源所控制，其進氣控制如圖18所示。因為在出氣分歧管中間的管路，其分流的氣壓較大，所以要加裝調壓裝置。而音頻差異較大及連接管管線長度不一的笛管，其管路也要適當的調整分流氣壓，使各和弦笛組每管音量能均勻吹出，方能發出悅耳的和弦聲音。

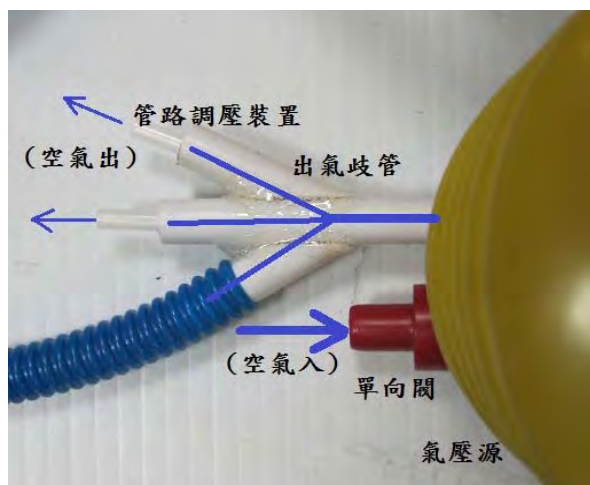


圖17 氣壓源出氣控制圖

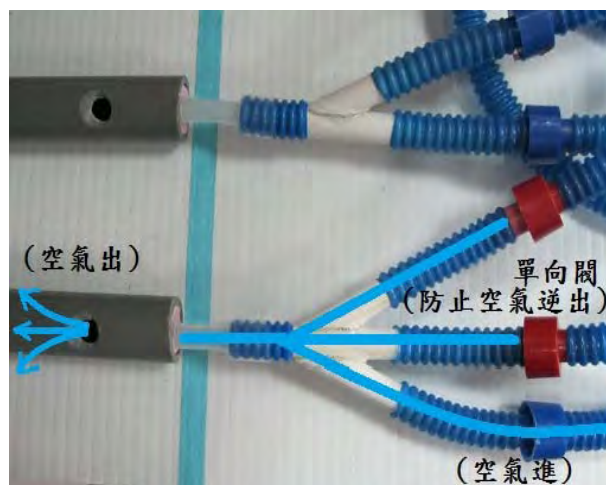


圖18 膠管笛進氣控制圖

四、其它發現

增加氣窗大小會使基音的頻率稍微提高，然音量也會相對增大，自製的膠管樂器在旋律吹奏部分，每個氣壓源連接一個膠管笛（圖5），其出氣量較充足，為了提高聲音響度，將圓形氣窗直徑由 8 mm 增為 10 mm，因而得到較佳的音色。

柒、結論與建議

一、結論

為了使膠管樂能發出預期的樂音，以及研製出能發出音域較廣的膠管樂器，經由要因分析與實驗設計，改變壓吹力道、空氣柱長短、塑膠管粗細三個變因來進行實驗，綜合研究結果分析與討論，得到下列結果：

1. 改變重吹或輕吹對塑膠管所發出音頻之間差異不大，音程影響在 0.3 個半音內，然空氣柱長度超過 26cm 時則易產生氣音（頻率陡增）。
2. 空氣柱長短與音頻之關係並非單純的線性關係，空氣柱愈長頻率不見得愈低，而是由高到低不斷的出現鋸齒狀分布。但空氣柱長度在 16cm 以下時，氣腔體積愈大則頻率會愈小，兩者呈反比關係，可依此推估各音調所需的

空氣柱長度。

3. 不同粗細的塑膠管，在同一長度時頻率會有差異，取其在有效的應用長度範圍內（發生頻率陡增前的空氣柱長），發現較細的管子所能發出的音域較廣。

根據實驗結果，推估各音調所需的空氣柱長度，用以設計製作膠管樂器的依據，考慮同時吹奏三管用以伴奏的氣壓源分流後壓力較弱，採用B管(16mm自來水管)來當伴奏笛，而吹奏旋律的單管笛氣壓較強，則以C管(20mm自來水管)來做演奏笛的笛管。

二、建議

自製的膠管樂器使用塑膠管做為笛身，要控制各管的氣窗形狀與大小，以圓形最為便利，由鑽孔機直接鑽洞後修飾即可，因此，本實驗採用圓形氣窗。然氣窗的形狀會影響笛類的音色，常見的氣窗形狀有方形、圓形、三角形、橢圓形、水滴形、盾牌形等。尖形氣窗其低音暗淡高音純淨，而圓形氣窗則是低音濃厚高音氣多。日後在研究防止氣音的產生方面，水滴形與三角形的氣窗形狀是較易製作的，值得嘗試與研究。

本實驗在分析各管別於重吹或輕吹時，在空氣柱長度超過 26cm 時易使塑膠管所發出音頻之間差異陡增，這不是研究者所樂見的現象，然或許可像直笛般開放半個背孔使其產生倍頻關係，則可減少膠管笛組的數量。

由圖 15 得知，塑膠管 D (28mm 電氣導管) 發出各音頻所需的空氣柱長度明顯較短，其空氣柱長約 11.2 cm 即可發出 C5 的筒音，利用它來製作塑膠管陶笛 (圖 19)，在塑膠管上挖出不同大小的音孔，經由開放不同的音孔組合面積大小，吹出悅耳的單音旋律，亦是值得探討與研究的。



圖 19 塑膠管陶笛

捌、參考資料

【一本書】

謝朝宗（1993）。MIDI 與電腦音樂。臺北市：第三波文化事業股份有限公司。

朱穌典（1982）。音樂概要。臺北市：臺灣中華書局。

施惠（2011）。國民小學自然與生活科技一第六冊。南一書局。

陳建廷（2012）。Ukulele 烏克麗麗。臺北市：麥書國際文化事業股份有限公司。

【期刊文章】

朱起東（1984）。管樂器發音的原理。中國學術期刊網路出版總庫：上海音樂學院學報，2。

【學位論文】

郭清進（2009）。陶笛製作與音頻分析之研究。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。

【評語】 080810

本作品應用回收物品與教具，連接不同長短的膠管笛以發出聲音，並藉由電腦測音軟體錄製所吹出的聲音，進行頻譜分析量測其音頻，探討不同長短的塑膠管所發出的音高，以達自製樂器的樂趣，小朋友發揮團隊研究之特色，作品令人愉悅。