▲ 2017.6.24 雲林縣虎尾國中教師「烏克麗麗」自造工作坊

烏克麗麗的科學原理與製作

文／林國憲

本文旨在引領讀者認識烏克麗麗的結構與科學原理的關係，並導引讀者經由自己動手，做出一把自己專屬的烏克麗麗。首先簡述烏克麗麗的發明歷程及其發展類別。其次介紹烏克麗麗琴體結構，及其發聲原理、音色與發音頻率變化等科學原理。後段說明製作過程，教導讀者如何準備簡單的材料與工具，在預算 250 元下，製造出一把 23 吋的原音烏克麗麗。

近年來校園裡掀起了一陣學習烏克麗麗的旋風，在偶像劇的推波助瀾下，迅速風靡於各國中小學，甚至大學校園也成立了不少學習社團。究其原因，其樂器本身不僅小巧玲瓏攜帶方便，價格便宜也容易學習，加以其熱情活潑輕快的樂音，很快的就擄獲了各個年齡階層學習者的心。烏克麗麗的發明源自葡萄牙的 machete 琴，1878 年由 Joao de Freitas 在第一次移民時帶入了夏威夷。在葡萄牙製琴師、夏威夷皇室國王與皇后推動和參與演奏下，漸成為流行於當地的民族樂器。烏克麗麗的

名稱 ukulele 由來有兩種說法，一為夏威夷皇室官員 Edward William Purvis 用以形容該樂器彈奏時如跳蚤跳躍之手法的戲稱。另一說法為當時夏威夷皇后 Lili‘uokalani 將其稱為來到此地（lele）的禮物（uku）之意。

烏克麗麗的科學原理

一、結構

烏克麗麗的科學原理與其結構有主要的關係，大體而言是一把縮小版簡化的吉他，在結構與彈奏法上也有些雷同，不過烏克麗麗較為簡單且容易上手。就其尺寸規格來看，最常見的有四類，高音（soprano）、中音（concert）、次中音（tenor）與低音（baritone），其主要的內涵如表 1 所示。

一把烏克麗麗的結構大致可分為琴頭、琴頸與音箱三個部分。琴頭上左右兩邊各鑽兩個洞，並在其上安裝弦鈕，做為調整聲音高低之用。琴頸上另黏接指板，指板的上方與琴頭交接處設有上弦枕，為弦長之起點。指板依不同的琴長按音律裝設相對數量之音格線（琴衍），作為彈奏不同音律之用。

表 1　烏克麗麗類型一覽表

類型	琴長	弦長	調音	音調範圍	頻率範圍
soprano	21”（53cm)	13" (33cm)	G4-C4-E4-A4	C4–A5	300-700Hz
concert	23”（58cm)	15" (38cm)	G4-C4-E4-A4	C4–C6	300-700Hz
tenor	26”（66cm)	17" (43cm)	G3-C4-E4-A4	G3–D6	200-700Hz
baritone	29”（74cm)	19" (48cm)	D3-G3-B3-E4	D3–A♯5	150-700Hz

二、發聲原理

不同尺寸的琴有不同大小的音箱，音箱主要為共鳴聲音之用，音箱越大發出之聲音即響度越大。音箱上大致有一個下弦枕與琴橋，上下弦枕間的距離即為弦長，不同類型的琴其弦長不同，發出之聲音高低亦有不同。琴橋之作用為將弦之振動傳導至音箱，再由音箱擴大聲音後，經由音箱上的音孔發出聲音。

音孔一般設於音箱的上方，音孔的大小與音箱大小有固定的比例。音孔的造型傳統上採圓形，其形狀及大小影響音箱的空氣容量，從而影響音色與音高。音孔越大，音色越低沉；音孔越小，音色越明亮。音箱的內部面、背板上裝設音樑，音樑的作用主要有兩個：第一為防止琴體在琴弦張力的作用下塌陷；第二為決定面板的振動模式塑造出琴的聲音即音色。

三、聲音科學

聲音科學的三要素分為響度、音調與音色。響度又稱為音量，與聲強及頻率有關，如前所述較大的音箱有較大的音量，彈撥弦的力度影響到弦的振幅，相對地影響到聲音的大小。音調所指為弦的振動頻率，頻率為單位時間內反覆振動之次數。振動頻率愈大，則聲音就愈高昂；若振動頻率愈小，則愈低沉。人耳能感受到的振動頻率範圍約為 20-20000 赫茲（Hz），但隨著年齡的增長，聽覺上限會降低。

烏克麗麗的發聲頻率大致介於 150-700Hz，是適合各年齡階層的樂器。它的發聲頻率和其上的弦之粗細和彈奏位置有關，琴上由右至左分別為第一至四弦，第一與第四弦粗細相同為 0.6mm，第二弦為 0.7mm，第三弦為 0.8mm。弦越粗其振動頻率越低，發出之聲音越低，弦越細則其振動頻率越高，發出之聲音越高。在彈奏上指板的把位越低，表示弦長越短，弦越短則其振動頻率越高，其發出之聲音越高。反之，高把位的弦較長，相對的頻率較低，聲音也就越低。

音色所指為聲音的特色，主要決定於不同的震動波型，不同的樂器其發出之聲音不同，即擁有不同的音色。烏克麗麗的音色受到幾個不同因素的影響，如弦的類型尼龍弦與金屬弦各有不同音色；音箱構成的材料不同，則發出不同的音色。一般吉他家族的樂器，音箱的製作由不同材質的木材構成，另外實木板與合成板的音色也有差異，以皮鼓作為音箱的斑鳩烏克麗麗（banjo ukulele），更具有完全不同於傳統琴身的音色。

動手製作一把烏克麗麗

製作一把烏克麗麗必須先瞭解它的結構，基本造型常見的有吉他型、鳳梨型（pine apple）、鰈魚型（fluke）與跳蚤型（flea），當然市售也有不少自由創作之造型。不過限於製作難度與專業器具需求，本文僅以 23 吋鰈魚型烏克麗麗（圖 1）作為製作之示範說明，分為琴頸與音箱兩大區域（圖 2）加以詳述，並表列所需材料零件（表 2）。

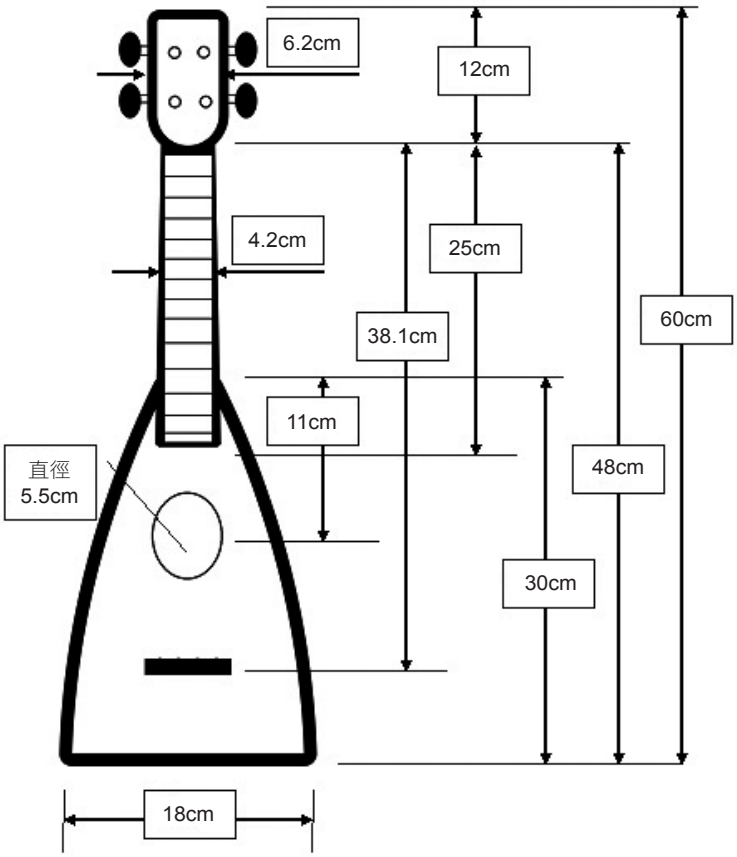

圖 1. 23 吋鰈魚型烏克麗麗的尺寸圖

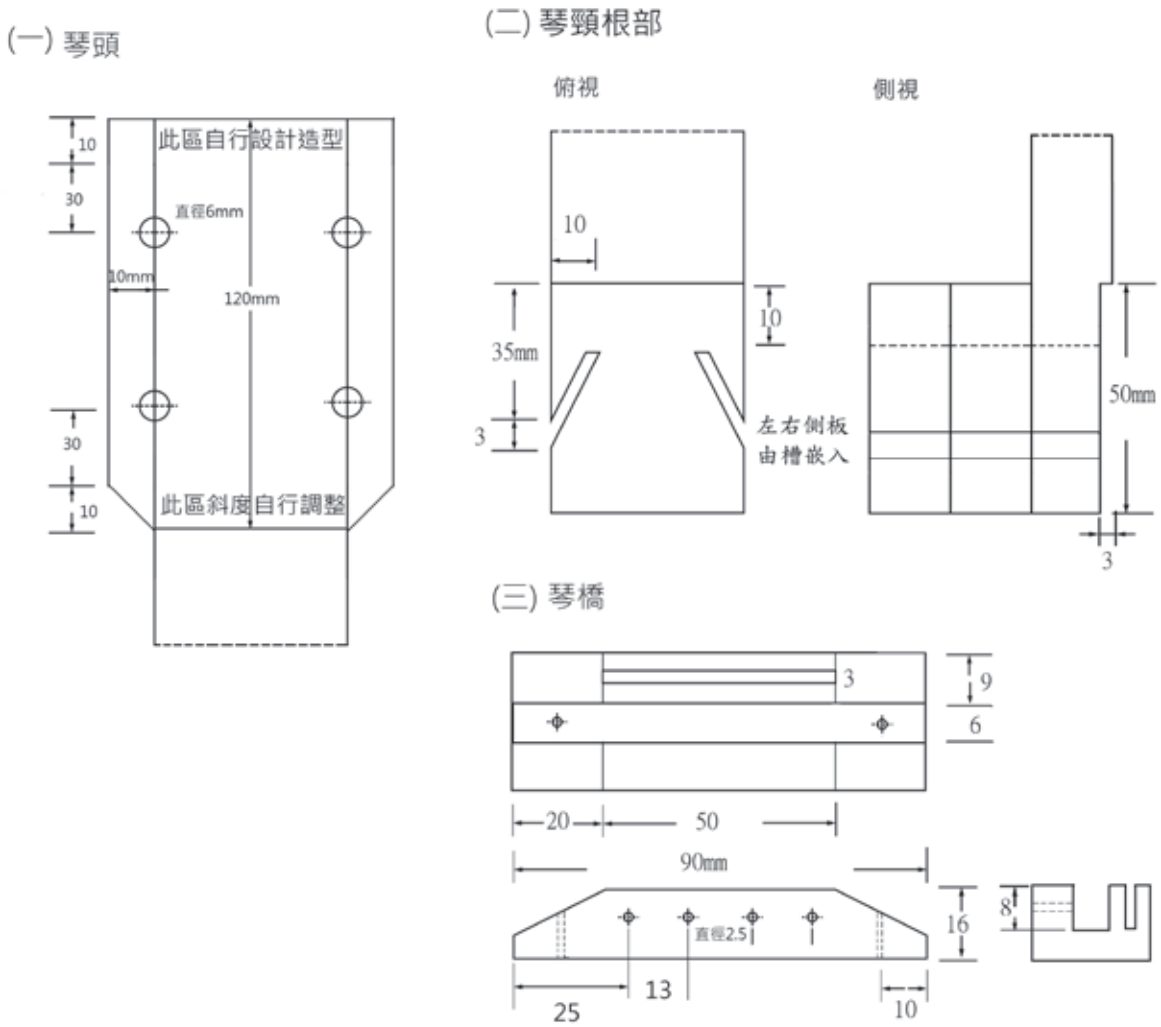

圖 2. 琴頭、琴頸根部與琴橋的細部尺寸圖

表 2　烏克麗麗（23 吋鰈魚型）製作材料零件表（每人）

編號	名稱	尺寸（cm）	數量	材質用途
1	琴頸	35×4.2×1.6	1	實木
2	共鳴箱底板	4.2×18×1.6	1	實木
3	共鳴箱左右板	4.2×30×0.3	2	合板，紋路順著長邊上
4	共鳴箱上下板	30×20×0.3	2	合板，紋路要直立紋
5	琴頭擴張板	12×1×1.6	2	實木
6	琴頸增厚板	4.2×5×1.6	2	實木
7	指板	25×4.2×0.6	1	實木

（續下頁）

表 2　烏克麗麗（23 吋鰈魚型）製作材料零件表（每人）

編號	名稱	尺寸（cm）	數量	材質用途
8	琴橋	9×2.4×1.6	1	實木
9	琴橋內襯板	9×1.8×1.6	1	實木，因鋸路 1.8 可變小
10	上弦枕	4.2×0.6×1.2	1	實木
11	下弦枕	5×0.9×0.3	1	壓克力板
12	鉛線鐵絲	# 16，70cm	1	琴衍（或音格線）
13	圓頭螺絲	1/4”×1.5” 英吋	4	弦鈕（上有 + - 開口）
14	螺帽	1/4” 英吋	4	弦鈕
15	蝶型螺帽	1/4” 英吋	4	弦鈕
16	華司	1/4” 英吋	4	弦鈕
17	彈簧華司	1/4” 英吋	4	弦鈕
18	琴弦	23” 英吋	1 組	烏克麗麗用（1 組 4 條）
19	木螺釘	5/8” 英吋	9	固定琴橋、指板
20	鐵釘	3.8cm，1.5cm	各 2	
21	雙面泡棉膠帶	0.9cm，120cm	1	音箱內襯
22	音箱樑	0.6×0.9×30	2	實木
	其他			白膠、，快乾膠、# 80、# 200、# 400 砂紙、棕色染色劑、透明漆、1” 漆刷、光碟片、膠帶

一、琴頸區域

此區域可細分為琴頭、琴頸、琴根與指板四部分，製作方法如下：

（一）琴頭製作

首先裁切 4.2*1.6cm 的木條 35cm，寬面朝上左邊 12cm 畫線作為琴頭，右邊 5cm 畫線為琴根與音箱結合之用。在琴根寬面以線鋸鋸出一個 4.2*5*0.3cm 的切面，以便安放音箱的面板。鋸出兩條 12*1*1.6cm 的木條，分別用白膠貼於琴頭的左右邊，並以橡皮筋捆緊，作為擴大琴頭面積。另裁切兩塊 4.2*5*1.6cm 木塊，將其重疊黏接於琴根背面，並以橡皮筋捆緊，作為增厚琴根之用（圖 3）。

待白膠乾後，在琴頭寬面畫三等分線各佔 4cm，此兩線與左右黏接的木條，形成的四個交叉點，以電鑽在此鑽出四個 6mm 的圓孔（圖 4），作為安裝弦鈕之用。另在琴頭上方 1cm 處畫橫線，此區域製作

者可自行設計不同的琴頭造型切割。在琴頭下方 1cm 處畫橫線，此部分畫 45 度線朝上，切除多餘木材，作為琴頭與琴頸交界之緩衝，並可以砂紙磨成弧形（圖 5）。琴頸背面兩緣以銼刀銼圓，並以砂紙磨平滑，以利彈奏時虎口握持。

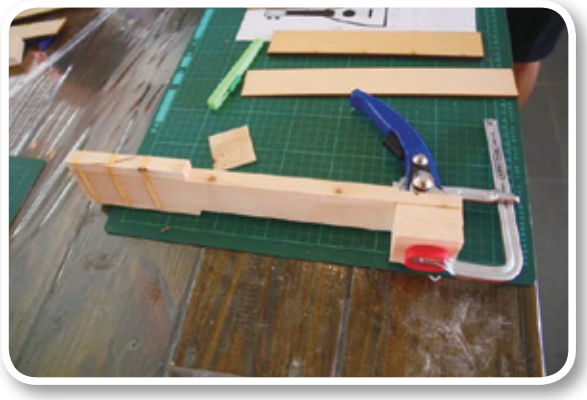

圖 3. 琴頭、琴頸與琴根結合

圖 4. 琴頭鑽孔

圖 5. 琴頭樣式

（二）琴根製作

琴根與音箱的接合以開槽方式嵌接，在琴根上方 1cm 處畫橫線，並在線上左右兩端 1cm 處做記號，由此兩記號各自向下 2.5 cm 處畫出兩條斜線，以線鋸將此兩斜線鋸出 0.3cm 寬的槽，並以 0.3cm 厚度側板，嘗試是否可嵌入此槽。

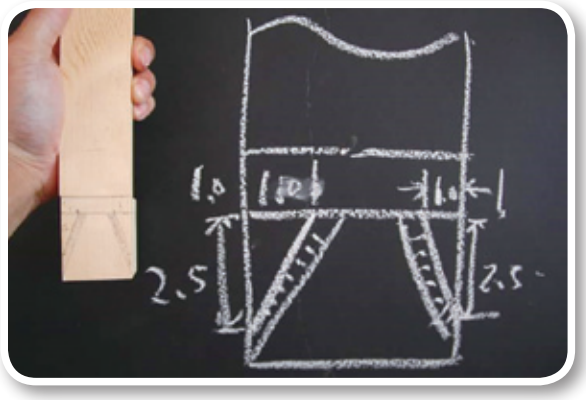

圖 6. 琴根開槽圖示

（三）指板製作

指板部分先將 4.2*0.6cm 木條切出 25cm 長，在指板底下 1cm 處畫一橫線，此區域製作者可自行設計造型裁切。待裁切完畢後先砂磨平順，然後以棕色木材染劑染色。待乾燥後以鉛筆在指板上畫出音格線，並以線鋸輕輕鋸出鋸路（圖 7），

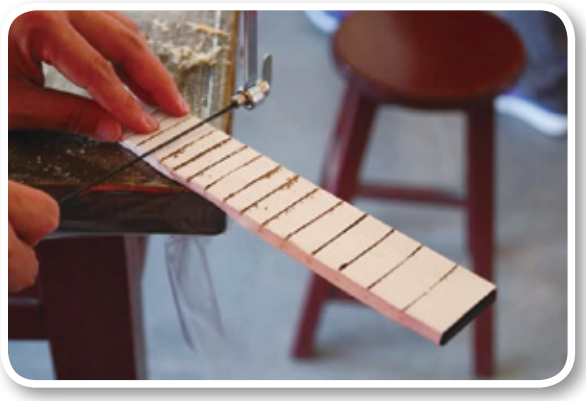

圖 7. 指板開槽

露出原木材顏色即可。音格線的位置（表 3）可上網尋找 Fret Calculator，只要輸入琴格數 16 ，弦長 38.1cm，並選擇 ukulele 樂器，按送出後電腦會自動計算音格線的相對位置。然後選擇 16 號鐵絲，使用鋼絲鉗剪成 16 段 4.2cm 長鐵絲作為琴衍，每段用鐵鎚輕敲修直，然後以快乾膠黏接於音格的細微鋸槽上（圖 8）。指板的第 5、7、10、12 音格，一般會作記號以方便彈奏，可在各音格中間以 2.5mm 鑽頭鑽貫穿孔，並以 6mm 鑽頭鑽 3mm 深沉孔，待黏接於琴頸後，再以木螺絲鎖緊。

圖 8. 琴衍黏貼

表 3　指板上音格線的相對位置表（弦長 381mm）

琴衍位置	與上弦枕距離	琴衍位置	與上弦枕距離	琴衍位置	與上弦枕距離
1	21.384mm	7	126.713mm	13	201.192mm
2	41.568mm	8	140.985mm	14	211.284mm
3	60.618mm	9	154.456mm	15	220.809mm
4	78.600mm	10	167.171mm	16	229.800mm
5	95.573mm	11	179.172mm	17	238.286mm
6	111.592mm	12	190.500mm	18	246.296mm

二、音箱區域

（一）側板與底板固定

先鋸切一段 4.2*1.6cm 的木條 18cm 作為音箱的底板，準備兩片 4.2*30*0.3cm 薄板，木紋要由上而下以免彎折時斷裂。將兩片側板各自以白膠黏接於底板兩側，側板上先以 2.5mm 鑽頭鑽出導孔，然後再各自鎖上兩根木螺絲以免爆裂（圖 9）。注意側板與底板務必保持垂直，側板在嵌入琴根的鋸槽前，先以濕布擦拭，以免側板

圖 9. 側板、底板固定與塑型

因太乾燥而彎曲時折斷（圖 10）。側板與琴根的上緣要保持平面，琴根背面會多出側板一點，可用砂紙磨平。整體調整琴頸與音箱的形狀，如有歪斜要立即調整。

圖 10. 琴頸與音箱側板結合

（二）音箱面、背板製作

接著將音箱面、背板重疊，好看的面朝外，置於音箱底下以鉛筆畫出音箱的外型曲線，以線鋸機沿線外將面背板同時鋸好。面板的上緣中心往下 11cm 處畫一中心點，以此點使用直徑 5.5cm 開孔器鑽出一音孔（圖 11）。

圖 11. 音箱面板開音孔

（三）音箱組合

在側板內側的上下兩緣以雙面泡棉膠黏貼，可加厚側板並提升密封性。先將側板底緣上白膠，再將音箱背板貼上（圖 12），可用橡皮筋捆緊再以重物壓住。裁切二段 0.9*0.6cm 木條作為音樑，長度大致適合將音箱三等分即可，並使用白膠貼於背板上。音箱面板黏接前必須先將琴橋和音樑裝上（圖 13 ～ 14），面板音樑可

圖 12. 音箱背板與音樑黏合

圖 13. 音箱面板內部音樑與支撐黏合

圖 14. 音箱面板黏合

放在音孔上下兩側及琴橋位置之下以增加支撐力。琴橋以 9*2.4*1.6cm 木條鋸切（圖 15），然後染成棕色待其乾燥後以白膠及螺釘固定於面板（圖 16），琴橋上之下弦枕上緣與上弦枕下緣間必須保持 38.1cm。最後再將之前所做的指板和上弦枕黏鎖在琴頸上即完成琴體（圖 17）。

全部琴體完成後（圖 18）以 200 號砂紙順木紋方向磨平順，然後以乾刷清理木灰，接著上第一次底漆，底漆不要刷太厚，並乾燥 30 分鐘以上。待乾燥後以 400 號砂紙輕輕研磨，並以乾刷清除漆灰。第二次刷面漆注意順木紋方向，並注意不要塗太厚以防漆流動，待乾燥 1 小時後，檢視漆的狀況良好後即可安裝零件。沒有漆料時可以改用護木油或蜂蠟塗抹保護木材。

安裝弦鈕注意左右差異以螺絲鎖緊即可，如以五金螺絲替代弦鈕（圖 19），先將彈簧墊片穿過螺絲再穿過螺帽，通過琴頭圓孔後伸出 1cm，在螺絲上套上墊片並以蝶形螺帽鎖緊。弦的安裝注意弦的順序，右至左分別為第 1 至 4 弦，先將其穿過琴橋上的小孔，在其上繞兩圈打結，然後經過上弦枕，在弦鈕上順時針轉兩圈轉緊。如以替代螺絲則在螺帽下順時針轉兩圈，然後再轉到彈簧墊片間，並將螺帽轉緊以固定弦，調音則必須以起子轉動螺絲上的缺口，順時針調緊逆時針放鬆（圖 20）。

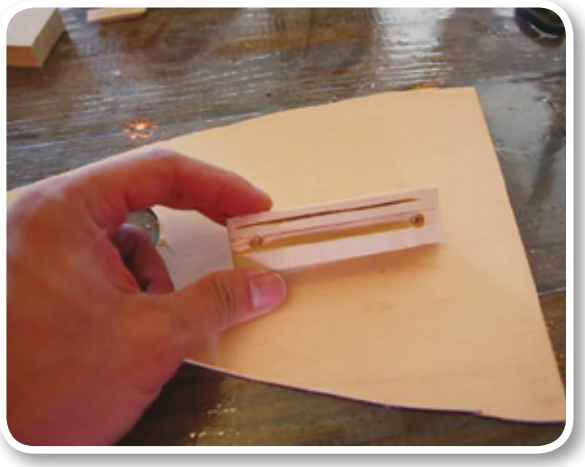

圖 15. 琴橋製作樣式

圖 16. 琴橋以白膠及螺絲固定

圖 17. 將指板先黏再鎖於琴頸上

圖 18. 完成後之琴體

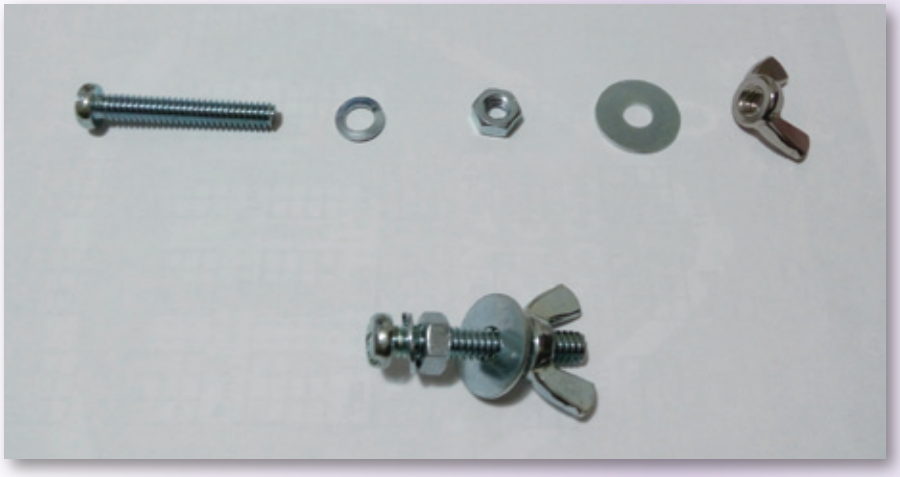

圖 19. 五金螺絲替代弦鈕與組合方式

圖 20. 上弦枕、替代弦鈕與上弦後樣式

烏克麗麗的調音左至右的空弦音為 G（So）、C（DO）、E（Mi）、A（La），可以調音器來調音，如無調音器可下載手機調音器 APP，常用安卓系統為 DA TUNER LITE 或 gstring。聲音太低時順時針轉緊調高，反之則逆時針放鬆調低。

結論

就科學的原理而論，音樂和數學、物理具有相關性。在西方樂理中，音樂的主要元素有音高、節奏和音色。彈奏樂器時藉由不同的音高重疊形成和聲，並依據節奏進行成為旋律。音色的形成則與製作樂器時的材料與技術有十分密切的關係。因此無論在彈奏或製作一把烏克麗麗上，都充滿了許多科學的原理在其中，動手製作一把琴是以科技的應用去應證科學的原理，讓嚴謹的科學以較有趣味的方式，呈現於大眾之面前。

後記

本文圖 3 至圖 18 由雲林自造教育示範中心（http://yunlinmaker.blogspot.tw/）主任林永欽老師提供。

延伸閱讀

影片 “How To Make a Homemade Ukulele”
網址：https://www.youtube.com/watch?v=lbwXX b0NFoo

林國憲
臺北市立內湖高級中學退休教師，目前兼任南港社大與各自造中心講師