

## 塑膠管打擊樂器之設計與製作

王栢村<sup>1</sup> 蔡有倫<sup>2</sup> 張嘉軒<sup>3</sup> 張宏名<sup>3</sup> 黃凱昱<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學 機械工程系教授

<sup>2</sup> 國立屏東科技大學 機械工程系研究生

<sup>3</sup> 國立屏東科技大學 機械工程系大學部學生

[wangbt@mail.npust.edu.tw](mailto:wangbt@mail.npust.edu.tw)

### 摘要

打擊樂器被廣泛地應用於音樂表演中。有調的打擊樂器可以產生特定的音階，可用來演奏一首歌曲。本文目的是在設計一套不同長度的塑膠管，以滿足各音階的標準頻率所產生出來的敲擊聲，對塑膠管進行設計並組裝成一組可以演奏的打擊樂器，並建立開發塑膠管打擊樂器 (PPPI) 的設計過程。首先，經由實驗模態分析 (EMA) 和有限元分析 (FEA) 來得到塑膠管的材料機械性質，也對塑膠管敲擊的聲音進行校準，以理解聲音和振動特性。設計的目標是，獲得 PPPI 兩個完整的八度音階的樂音從 F4 到 E6。對不同的標準管進行分析，來決定合適的塑膠管直徑和厚度，根據各個音階的標準頻率，進行最終的分析和製造出不同長度的塑膠管，並對每根塑膠管的敲擊聲所激發出來的基本頻率進行校準，以滿足標準頻率。琴架的結構和塑膠管的組裝方法是根據整套 PPPI 的結構而設計的，本文所提出的設計方法和製造過程，可用於參考製作新型 PPPI。

**關鍵詞：**塑膠管、打擊樂器、實驗模態分析、有限元素分析。

### 1. 前言

樂器的演奏方式種類繁多，可分打擊樂器、管樂器、弦樂器等等，其中，打擊樂器係利用結構振動進而發出聲音，而影響樂器結構振動特性，包括結構之形狀、尺寸、材質等。

就打擊樂器而言，王與林[1]探討不同敲擊位置對鐵琴片模態特性之影響，從聲音頻譜結果發現，在敲擊位置離中心點愈遠時，被激發出的模態也愈多。王與謝[2]對兩種具有 C 和弦音組成之鐵琴片形狀，做成實體鐵琴片，並利用麥克風作為感測器，進行 C 和弦鐵琴片敲擊之聲音量測分析，經實驗量測得鐵琴片之聲音頻譜及峰值頻率，進而探討不同敲擊位置之發聲效果及正確性，並利用不同材質敲擊工具，探討和弦鐵琴片之聲音頻率與振幅比較，選擇出合適的敲擊工具。王與簡[3]建立參數化鐵琴片有限元素模型，並利用模型驗證流程的比對，確認鐵琴片有限元素模型的準確性，同時進行實驗量測分析，了解鐵琴片之聲音特性。王與林[4]使用衝擊錘當驅動器，分別以加速度計與麥克風當感測元件，分別架構自由邊界與實際邊界之鐵琴片有限元素模型，進行理論模態分析，以求得鐵琴片之自然頻率及其對應之模態振型；然後再對鐵琴片進行實驗模態分析，

求得實體之模態參數，以實驗求得之模態參數為基準，作為有限元素模型修正之依據。

王與廖[5]對 C 音階之木琴條進行有限元素分析和實驗模態分析，經由比較驗證後得到此木琴條的材料參數。王等人[6]用麥克風做為感測器，對古鈸進行敲擊之聲音量測分析，透過頻譜分析儀，求得古鈸之聲音頻譜及峰值頻率，同時運用有限元素分析，將古鈸以立體元素建構其有限元素模型，並設定固定邊界，以進行理論模態分析，求得該古鈸之模態參數，並將實驗所求得之自然頻率為基準，修正有限元素模型。

王與陳[7]利用有限元素分析法，對銅鑼進行理論簡諧分析，藉此獲得銅鑼聲音頻率響應函數，得到之自然頻率與實驗結果相當吻合。王與蘇[8]探討吉他弦之振動模態特性，並進行理論分析模型之驗證，首先建構吉他弦之有限元素模型，據以進行模態分析求得吉他弦之自然頻率與模態振型，同時也進行實驗模態測試以求得實際吉他弦之實驗模態參數，並進行模型驗證。莊等人[9]透過對聲音品質的瞭解，將二胡的聲音進行主觀的評估與客觀的量測分析，並參考製琴師的經驗，制訂出一套評估二胡的樂音指標。

本文是運用有限元素分析軟體與頻譜分析儀以及聲音量測程式，進行理論與實驗量測分析，求得塑膠管的模態參數，包括自然頻率及所對應之模態振型，主要目的：在將理論分析與實驗分析結果做驗證，若結果吻合，則成功建立等效模型。再變更模型參數並與標準音階頻率做比對，可找出塑膠管外型長度與音階頻率關聯性，以應用於塑膠管打擊樂器之設計與製作。

### 2. 設計分析與實作流程

本文研究目的在設計一部塑膠管打擊樂器，首先對塑膠管進行理論與實驗分析結果做驗證，若結果吻合，則成功建立等效模型。接著對模型參數作變更並與標準音階頻率做比對，找出塑膠管外型長度與音階頻率關聯性。

#### 2.1 模型驗證

圖 1 為塑膠管模型驗證流程圖，分為兩大部分，分別為理論的有限元素分析與實驗的實驗模態分析。其中，理論的部份為運用 ANSYS 有限元素分析軟體對塑膠管進行有限元素分析，得到其理論之模態參數，包含自然頻率和模態振型。而實驗的部分為利用實驗模態分析的方法對塑膠管進行量測，以求得其頻率響應函數，再利用 ME'scopeVES 軟體進行曲線嵌合，以求得塑膠



管實際結構的模態參數，如自然頻率、模態振型與阻尼比。

最後將理論分析與實驗分析所得到的模態參數進行比對驗證，若是模態參數比對不吻合，則回到有限元素分析部份進行模型參數的修改，若是模態參數比對十分吻合，則完成等效於實際結構之有限元素模型的模型驗證。

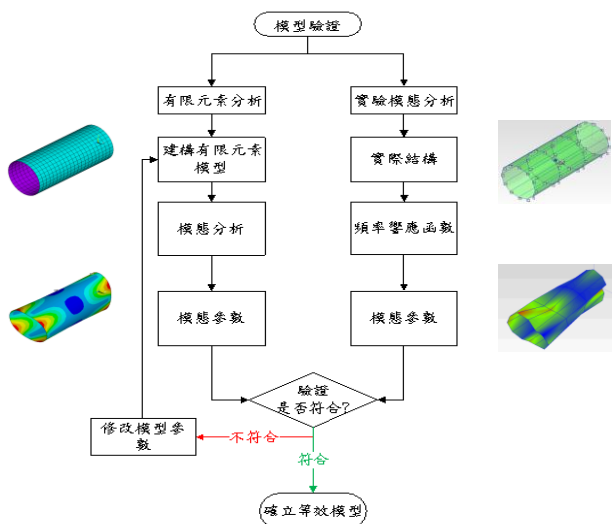


圖 1 模型驗證流程圖

## 2.2 有限元素分析(FEA)

圖 2 為塑膠管實際結構之剖面尺寸示意圖，經由實際量測得知其尺寸，表 1 為塑膠管外型尺寸表，外徑(D)=48mm、厚度(t)=2.98mm、長度(L)=105mm，本文採用 ANSYS 有限元素軟體進行分析。首先，先建構塑膠管有限元素模型，由於塑膠管結構之厚度遠小於其直徑，因此可採用薄殼元素(Shell63)。

圖 3 為塑膠管有限元素模型，表 1 為塑膠管之材料性質參數表，在材料參數設定浦松比( $\nu$ )=0.34、楊氏係數(MPa)=3770、密度( $\text{kg/m}^3$ )=1493.11，元素分割方面圓周方向分成 31 等份，軸向分成 62 等份，共 1953 個節點、1922 個元素。位移限制模擬在自由邊界狀態下進行分析，則無需設定任何位移限制條件。負荷條件方面模態分析不需設定任何負荷。分析目標為建構等效於實際結構之有限元素模型，在進行模態分析，求得結構自然頻率及模態振型。

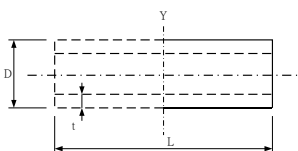


圖 2 剖面尺寸示意圖

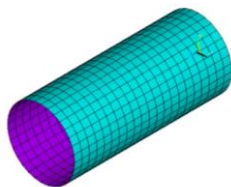


圖 3 有限元素模型

表 1 塑膠管外型尺寸與材料性質

| 外徑 (D) | 厚度(t)  | 長度 (L) | 楊氏係數 (MPa) | 密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) | 浦松比  |
|--------|--------|--------|------------|------------------------|------|
| 48mm   | 2.98mm | 105mm  | 3770       | 1493.11                | 0.34 |

## 2.3 實驗模態分析(EMA)

本節主要目的為對塑膠管進行實驗模態分析，圖 4 為塑膠管點數規劃示意圖，圓周分成 12 個點，軸向分成 4 個點，共 48 個敲擊點，加速度計分別固定在第 9 跟第 18 點上。圖 5 為敲擊示意圖，以固定加速度規移動衝擊錘的方式，敲擊塑膠管上每一個測試點。圖 6 為塑膠管實驗架設圖，經由加速度計感測器量取塑膠管之響應訊號，再將得到訊號傳入頻譜分析儀，其儀器設定頻寬為 5000Hz，解析條數為 4096 條，解析頻率為 0.625 Hz，接著對頻譜分析儀輸入模組之訊號作快速傅立葉轉換，求得塑膠管之頻率響應函數和關聯性函數，再將頻率響應函數傳入電腦中，以 ME scopeVES 軟體做曲線嵌合，以獲得塑膠管之模態參數，包括：自然頻率、模態振型、及模態阻尼比。

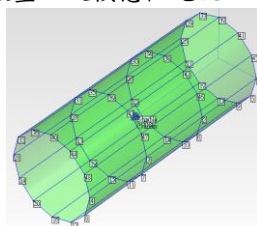


圖 4 塑膠管點數規劃



圖 5 敲擊示意圖



圖 6 塑膠管實驗架設圖

## 2.4 聲音量測分析

聲音量測實驗分析目標，在針對塑膠管打擊樂器進行敲擊量測聲音，進而對塑膠管所激發出的聲音進行聲音特性探討。圖 7 為敲擊錘實體圖(塑膠)，圖 8 為塑膠管聲音量測實驗儀器架設圖。首先將塑膠管垂吊於鐵架上，經由敲擊錘敲打於塑膠管中心點上，敲打之後所得到的聲音再由麥克風接收之後傳送至聲音量測程式對塑膠管進行分析，則可測得聲音之時間域及聲音頻譜圖結果。



圖 7 敲擊錘實體圖(塑膠)



圖 8 塑膠管聲音量測實驗儀器架設圖

## 2.5 實際設計與製作之流程

圖 9 為實際設計與製作之流程，先確定塑膠管之聲音特性，決定音階頻率範圍，再分析設計出一套兩個八度音階之琴管，再依塑膠管特性、攜帶方便性、加工可行性及符合人性化設計來繪製琴架設計圖，再依設計圖進行加工，並將加工完成之原件進行組裝，進而完成一組塑膠管打擊樂器。

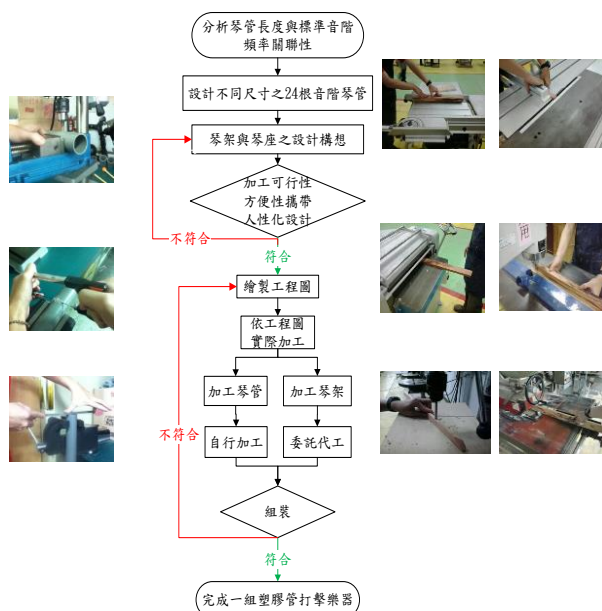


圖 9 實際設計與製作之流程

## 3. 結果與討論

本節針對塑膠管打擊樂器探討的有三大部份，第一部分，對一根塑膠管進行有限元素分析與實驗模態分析所得的結果進行模型驗證，確認模型等效性，並校正材料機械性質，也了解塑膠管之振動模態特性。第二部分為對 E6 音階塑膠管進行打擊聲音量測，利用 FEA 與聲音量測所得結果進行比對，驗證是否與標準音階頻率符合，並針對比對結果進行音準、音色及持續度探討。第三部分為對所製作之兩個八度音階塑膠管打擊樂器組，進行聲音品質特性探討，為了解此琴組之聲音品質。

### 3.1 塑膠管模型驗證

圖 10 為塑膠管之頻率響應函數  $H_{ij}(f)$ ，以衝擊錘為輸入端圖，加速度計為輸出端。圖 10(a) 為塑膠管同點頻率響應函數 ( $i=01, j=01$ )，圖 10(b) 為不同點頻率響應函數 ( $i=09, j=01$ )，圖中黑色實線為實驗所得到的頻率響應函數，紅色虛線是合成頻率響應函數，藍色虛線為理論的頻率響應函數。從此圖中可看出實驗與合成對應幾乎吻合，代表曲線嵌合是良好的。在理論曲線分析部分的頻率未達到準確的結果，頻率峰值上會有偏移的現象，但頻率曲線的趨勢大致上是相同的。

圖 11 為塑膠管之關聯性函數  $\gamma^2_{ij}(f)$ ，由圖中可以看出除了反共振點外，其餘值接近於 1，代表此塑膠管實驗品質是可靠的。

表 2 為塑膠管之理論與實驗模態參數對照表，將理

論及實驗分析所得的模態振型進行比較驗證，並評估塑膠管結構之振動特性。從表 2 可以知道塑膠管模態振型為兩兩一組的對稱模態，其物理意義分別為  $(\theta, z) = (2,1), (2,2), (2,3), (3,2), (3,3)$  對稱模態。

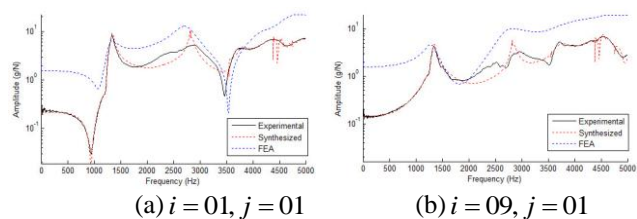


圖 10 塑膠管之頻率響應函數  $H_{ij}(f)$

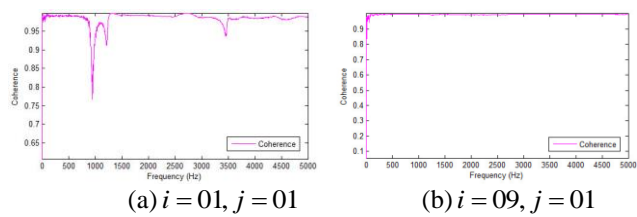


圖 11 塑膠管之關聯性函數  $\gamma^2_{ij}(f)$

表 2 塑膠管之理論與實驗模態參數對照表

| 模態   | FEA    |      | 模態   | EMA    |      | 誤差 (%) | 物理意義 $(\theta, z)$ | 阻尼比 (%) |
|------|--------|------|------|--------|------|--------|--------------------|---------|
|      | 自然頻率   | 模態振型 |      | 自然頻率   | 模態振型 |        |                    |         |
| F-01 | 1222.2 |      | E-01 | 1238.6 |      | 1.32   | 對稱模態 (2,1)         | 2.95    |
| F-02 | 1222.3 |      | --   | --     | --   | --     |                    | --      |
| F-03 | 1309.0 |      | E-02 | 1340.8 |      | 2.37   | 對稱模態 (2,2)         | 2.66    |
| F-04 | 1309.2 |      | --   | --     | --   | --     |                    | --      |
| F-05 | 2739.2 |      | E-03 | 2708.5 |      | -1.13  | 對稱模態 (2,3)         | 0.05    |
| F-06 | 2739.3 |      | E-04 | 2778.1 |      | 1.39   |                    | 1.48    |
| F-07 | 3454.1 |      | E-05 | 3517.2 |      | 1.79   | 對稱模態 (3,2)         | 0.14    |
| F-08 | 3454.2 |      | E-06 | 3553.7 |      | 2.79   |                    | 0.12    |
| F-09 | 4194.2 |      | E-07 | 4297.5 |      | 2.40   | 對稱模態 (3,3)         | 0.31    |
| F-10 | 4194.4 |      | E-08 | 4352.3 |      | 3.62   |                    | 1.37    |

### 3.2 E6 音階塑膠管之聲音量測

表 3 為 E6 音階打擊聲音量測之時間域與頻率域圖。E6 之聲音頻譜圖，可由理論與聲音量測確定塑膠管結構之聲音特性及振動性，得知 E6 長度之塑膠管，可激發出 F7 及 F13 模態。

表 3 E6 音階打擊聲音量測之時間域與頻率域圖

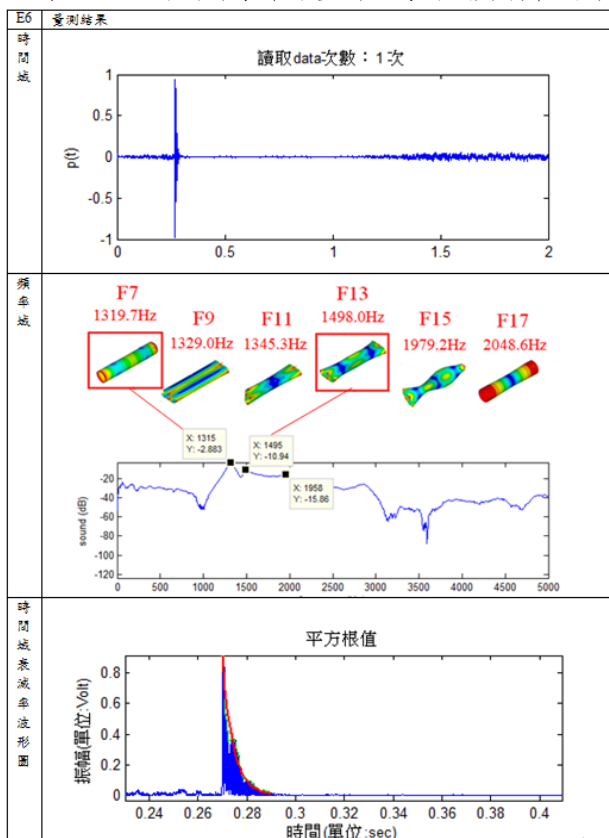


表 4 以塑膠管製作兩個八度音階所有塑膠管之參數總表

| 音階                              | 標準音階頻率 (Hz) | 分析長度 (cm) | 實際長度 (cm) | EMA 量測之自然頻率 (Hz) | 誤差百分比 (%)    | 衰減率    |
|---------------------------------|-------------|-----------|-----------|------------------|--------------|--------|
| F4                              | 349.2       | 49.4      | 49.5      | 350.0            | 0.22         | 171.74 |
| F4 <sup>#</sup> /G <sup>b</sup> | 369.9       | 47.9      | 47.9      | 372.0            | <b>0.54</b>  | 291.48 |
| G4                              | 392.0       | 46.4      | 46.6      | 392.0            | 0.00         | 177.56 |
| G4 <sup>#</sup> /A <sup>b</sup> | 415.3       | 45.1      | 45.3      | 415.0            | -0.07        | 175.48 |
| A4                              | 440.0       | 43.7      | 43.8      | 439.0            | -0.22        | 159.13 |
| A4 <sup>#</sup> /B <sup>b</sup> | 466.1       | 42.4      | 42.6      | 466.0            | -0.03        | 164.04 |
| B4                              | 493.8       | 41.1      | 41.2      | 493.0            | -0.17        | 185.99 |
| C5                              | 523.2       | 39.9      | 40.2      | 522.0            | -0.23        | 125.41 |
| C5 <sup>#</sup> /D <sup>b</sup> | 554.3       | 38.6      | 38.7      | 552.5            | -0.32        | 69.97  |
| D5                              | 587.3       | 37.4      | 37.6      | 585.0            | <b>-0.39</b> | 156.57 |
| D5 <sup>#</sup> /E <sup>b</sup> | 622.2       | 36.2      | 36.7      | 619.0            | <b>-0.52</b> | 144.92 |
| E5                              | 659.2       | 35.1      | 35.3      | 657.5            | -0.25        | 108.04 |
| F5                              | 698.4       | 34.0      | 34.3      | 697.5            | -0.12        | 186.17 |
| F5 <sup>#</sup> /G <sup>b</sup> | 739.9       | 33.0      | 33.4      | 737.0            | <b>-0.40</b> | 314.92 |
| G5                              | 783.9       | 32.0      | 32.2      | 780.0            | <b>-0.50</b> | 151.77 |
| G5 <sup>#</sup> /A <sup>b</sup> | 830.6       | 31.0      | 31.1      | 825.0            | <b>-0.67</b> | 108.55 |
| A5                              | 880.0       | 30.0      | 30.2      | 882.5            | 0.28         | 219.18 |
| A5 <sup>#</sup> /B <sup>b</sup> | 932.3       | 29.0      | 29.2      | 935.0            | 0.28         | 131.45 |
| B5                              | 987.7       | 28.1      | 28.4      | 987.0            | -0.07        | 141.92 |
| C6                              | 1046.5      | 27.2      | 27.9      | 1043.0           | -0.33        | 166.57 |
| C6 <sup>#</sup> /D <sup>b</sup> | 1108.7      | 26.3      | 26.6      | 1112.0           | -0.29        | 159.58 |
| D6                              | 1174.6      | 25.5      | 25.7      | 1170.0           | <b>-0.39</b> | 148.61 |
| D6 <sup>#</sup> /E <sup>b</sup> | 1244.5      | 24.6      | 24.9      | 1241.0           | -0.28        | 133.55 |
| E6                              | 1318.5      | 23.8      | 24.0      | 1315.0           | -0.26        | 207.43 |

### 3.3 塑膠管打擊樂器組之聲音品質探討

圖 12 為塑膠管打擊樂器實體圖，依鋼琴琴鍵音階的排列方式由左至右排出 F4 到 E6 兩個八度音的音階。表 4 為以塑膠管製作兩個八度音階所有塑膠管之參數總表，包括：音階名稱由 F4 到 E6，以及各音階對應的標準頻率，分析長度以 FEA 根據標準頻率所求得之塑膠管長度，而實際長度為調音後之實際長度，量測之自然頻率為塑膠管之基音，其與標準音階，誤差都在 1% 以下，依據樂理需求，誤差需在 ±0.3467% 以內，才符合音準需求，表 4 中有網底為超出標準之音階，顯示尚有改進之空間。

圖 13 為塑膠管長度與自然頻率之曲線圖，由圖中可以得知塑膠管的實驗與理論分析之自然頻率結果幾乎吻合，則表示實驗量測分析與理論是對應良好，並呈現非線性之趨勢。



圖 12 塑膠管打擊樂器實體圖

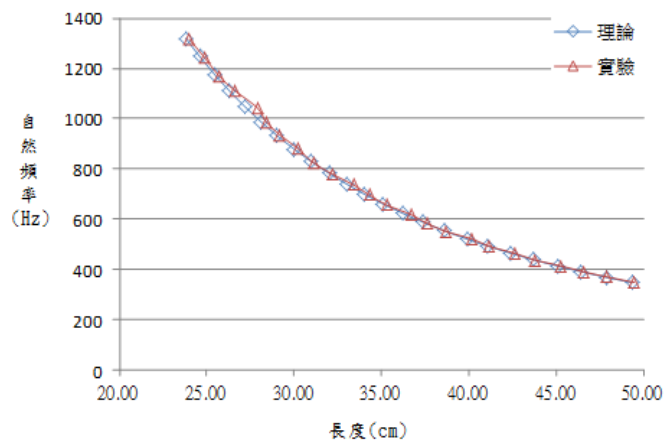


圖 13 塑膠管長度與自然頻率之曲線圖

經由塑膠管製作兩個八度音階所有塑膠管之參數總表，進而探討塑膠管聲音品質，探討內容包含：音準、音色、持續度。

- 音準：理想的聲音頻率容許誤差百分比在 ±0.3467% 以內，由塑膠管各音階自然頻率與標準音階頻率對照表得知，大部分塑膠管自然頻率皆在範圍內。
- 音色：由於塑膠管琴片無倍頻效果，其音色和木魚很相近。
- 持續度：為聲音持續的時間，衰減率的大小會影響持續度的時間，衰減率愈小持續度愈長，愈大持續度愈短。表 3 所示 E6 音階塑膠管衰減率為 207.43。

#### 4. 結論

本文目的以設計並製作出一部塑膠管打擊樂器為目標，得到以下結論：

1. 由圖 10、11 中可看出實驗與合成對應幾乎吻合，代表曲線嵌合是良好的；在塑膠管之關聯性函數圖中可以知道除了反共振點外，其餘值接近於 1，代表此塑膠管實驗品質是可靠的。
2. 由表 2 可得知塑膠管模態振型中，在實驗數據中 E-02、E-04 之模態振型未出現，推測為塑膠管實體之對稱模態的自然頻率較為相近。
3. 表 3 為 E6 音階打擊聲音量測之時間域與頻率域圖得知，塑膠管的衰減率較大，代表聲音的持續度愈短，推測為塑膠管材料本身性質的關係，因此造成聲音衰減率較大。
4. 塑膠管長度與自然頻率曲線表中，看的出來理論值與實驗值有對應，代表此實驗良好，且圖中為曲線的趨勢，呈現非線性。
5. 在整組塑膠管打擊樂器中，兩組八度音階之自然頻率的誤差百分比皆約在  $\pm 0.3476\%$  內，在誤差率大的部分可經由後續加工微調來進行調音，使誤差百分比在合理範圍內。

#### 5. 參考文獻

- [1] 王栢村，林怡馨，2007，「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」，中華民國音響學會年會暨第二十二屆論文發表會，台北，論文編號 C-5。
- [2] 王栢村，謝明憲，2009，「和弦鐵琴片之聲音特性與設計分析」，中華民國音響學會九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會，台北，論文編號：A006 第 A-26--A-34 頁。
- [3] 王栢村，簡孝名，2010，「鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證」，台灣省機械技師公會，機械技師學刊:3 卷 2 期，第 1-7 頁。
- [4] 王栢村，林怡馨，2007，「以加速度計與麥克風為感測器之鐵琴片實驗模態分析比較」，中華民國力學學會第三十一屆全國力學會議，高雄，論文編號：H31。
- [5] 王栢村，廖偉廷，2009，「木琴條聲音與振動關聯性及形狀變更設計之探討」，屏東科技大學暨北京科技大學第四屆學術交流研討會，屏東，論文編號:C14。
- [6] 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，2011，「古鈸打擊聲音特性之探討」，中華民國振動與噪音工程學會第 19 屆學術研討會，彰化，論文編號：B-09。
- [7] 王栢村，陳新正，2008，「鑼臍形式銅鑼之聲音及振動特性的探討」，中華民國音響學會第二十一屆學術研討會，台北，論文編號：A1-4。
- [8] 王栢村，蘇集銘，2006，「吉他弦之振動與聲音特性探討」，中華民國音響學會第十九屆學術研討會論文集，台南，論文編號：A7。
- [9] 莊肯堯，翁榮源，徐茂濱，李十三，2006，「二胡樂音指標之建立與蟒皮對於音色之影響」，第十四

屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，宜蘭，  
論文編號：C16。

## Design and Manufacture of Plastic Pipe Percussion Instrument

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, You-Luen Tsai<sup>2</sup>, Chian-Suan Chang<sup>3</sup>,  
Hung-Ming Chang<sup>3</sup>, Kai-Yu Huang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor <sup>2</sup>Graduate Student

<sup>3</sup>Undergraduate students

Department of Mechanical Engineering National  
Pingtung University of Science and Technology

### ABSTRACT

Percussion Instruments are widely adopted for musical performance. The tuned percussion instruments can produce specific musical notes to play a song. This work aims to design a set of plastic pipes with different lengths to generate percussion sound meeting the musical note's frequency. The plastic pipes are designed and assembled as a set of percussion instrument ready to play. The design procedure is planned to develop the plastic pipe percussion instrument (PPPI). First, mechanical properties of the plastic pipe are determined by experimental modal analysis (EMA) and finite element analysis (FEA). The pipe percussion sound is also calibrated to understand the sound and vibration characteristics. The design objective is to obtain the PPPI with two complete octave musical notes from F4 to E6. Different standard pipes are then analyzed to decide the suitable pipe diameter and thickness. According to the musical note's standard frequencies, different length of pipe is finally analyzed and manufactured. The fundamental frequency of the percussion sound of each pipe is calibrated to meet the standard frequency. The frame structure and the assembly method of pipes are designed accordingly to construct the whole set of PPPI. This work presents the design method and manufacturing considerations for the new type of PPPI.

**Keywords:** plastic pipe, percussion instrument, experimental modal analysis, finite element analysis



第二十一屆中華民國振動與噪音工程學術研討會 國立臺北科技大學 中華民國一〇二年六月二十九日  
The 21<sup>th</sup> National Conference on Sound and Vibration, Taipei, June 29, 2013