

# 不鏽鋼管打擊樂器之設計與製作

## Design and Manufacture of Percussion Instrument of Stainless Steel Pipe

王栢村<sup>1</sup> 施旻穎<sup>2</sup> 徐羚育<sup>2</sup> 劉軒廷<sup>2</sup> 蕭信宏<sup>2</sup> 張家豪<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專題生

<sup>3</sup> 國立屏東科技大學機械工程系研究生

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

### 摘 要

本文目的為設計一組兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器，以線性薄殼元素(Shell63)建構有限元素模型，進行理論模態分析，求得理論的模態參數，包括自然頻率、模態振型，同時並進行實驗模態分析求得實驗之模態參數，並以實驗模態分析之結果為基準，確認有限元素模型可行性與不鏽鋼管材料參數之驗證，在聲音量測實驗中，量測不鏽鋼管打擊樂器激發出來的聲音，求得其聲音頻譜、頻率峰值，透過聲音量測與理論分析校正其聲音頻譜，包含基音與泛音頻率之校正，其中不鏽鋼管之聲音輻射與振動模態有著極大之關聯性。此不鏽鋼管之有限元素模型可透過長度之變異，進行基音頻率之校正，使其與各音階之目標頻率相互對應，進而設計出一組兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器，本文闡述一組兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器之設計與製作流程。

關鍵字：不鏽鋼管、打擊樂器、實驗模態分析、有限元素分析

### Abstract

This work aims to design a set of stainless steel pipes containing two octave musical notes for percussion instrument. The finite element (FE) model of the pipe is constructed by linear shell elements and performed modal analysis to obtain theoretical modal parameters, including natural frequencies and mode shapes. Experimental modal analysis (EMA) is also carried out on the pipe to get structural modal parameters. Base on the experimental data, the FE model can be validated to determine mechanical properties of the stainless steel pipe. The percussion sound of the pipe can also be measured and analyzed to calibrate the radiated sound spectrum, including the fundamental frequency and overtone frequencies. The radiated sound of the pipe can be interpreted related to the structural vibration modes. The FE model can then be used to design the exact length of pipe with the correct fundamental frequency corresponding to the frequency of a specific musical note. The two octave musical notes of the stainless steel pipes can be designed and manufactured accordingly. The percussion sound quality for the set of pipes is also evaluated as the percussion instrument. This work shows the design and fabrication processes for making a set of percussion instrument by stainless steel pipes.

Keywords : Stainless Steel pipe, percussion instrument, experimental modal analysis, finite element analysis

## 一、前言

在眾多打擊樂器中，屬於管狀類較為知名的莫過於「管鐘」。管鐘是由一組定音的銅管，大約是4公分(1吋半)的寬度按長短排列，用獸皮(牛皮)或塑膠做的擊槌敲擊，如繩子懸掛於一個架子上。每支金屬管上端皆有一個帽蓋，底端為開放的，或由內置的金屬盤來關閉。因圓形金屬管之材質多為黃銅或者摻雜其他金屬，材料取得不易及價格昂貴，而在構想一組管型打擊樂器中，本文採用日常生活中易於取得之材料——不鏽鋼管，作為設計一組具有兩個八度音之新型打擊樂器。

不鏽鋼管打擊樂器之設計與製作，是藉由理論之模態參數與實驗的模態參數分析進行比較驗證，同時運用理論與實驗分析結果對樂器進行聲發聲機制之探討。

關於鐘之研究，亦有相關文獻進行探討。郭與大[1]針對台灣現存的梵鐘，測量其聲能衰減時間與頻率，並與中國鐘和日本鐘的音響特性做比較，結果顯示台灣銅鐘及中國銅鐘的基音頻率測試與日本鐘不同，原因為鐘身形狀以及鐘身的厚度不同而影響其聲音的衰減率。Blankenhorn *et al.* [2]對鐘進行模型驗證，作為預估數值模型的性質，以數值研究方法為制定適當的數學模型和最後數值求解。而實驗模態分析方面以單軸向加速規為感測器，透過移動感測器固定驅動器進行量測。在音樂鐘的部分，Pan[3]探討古代中國音樂鐘因其杏仁狀之橫截面，導致產生兩種不同的敲擊音調。透過64音樂鐘的共振頻率分析，發現一般敲擊與側邊敲擊在個別鐘與相鄰鐘之間有頻率比值的關係，且中國音樂鐘的聲學特性著重於雙音與短衰減特性。Yoo *et al.*[4]等人對古代石頭編鐘做有限元素分析，討論其模態振型和振動頻率與其石頭形狀之關聯。透過有限元素分析，觀察到模態振型及頻率與韓國石編鐘進行全息干涉與模態測試的結果非常吻合。根據石頭的基本曲率和頂角的模態振型，發現古代中國與韓國石編鐘可能由此依據選定可得到的最佳聲音。

關於鐵琴片之發聲機制與聲音特性，得知鐵琴片振動模態與其相對應之自然頻率。王與林[5]利用不同材質之敲擊槌與敲擊鐵琴片之不同位置，探討其聲音特性為何，結構顯示結構自然頻率之振幅其激發出來的程度會隨著敲擊槌的材質不同而有所變化，且敲擊點偏移中心點時，可激發出較多的模態。王與簡[6]對鐵琴片進行實際邊界下之模型驗證，並建構出參數化之鐵琴片有限元素模型，以便能進行快速之設計分析。首先建構鐵琴片的有限元素模型，並進行鐵琴片於自由邊界與實際邊界下之實驗模態分析，並獲得等效於自由邊界與實際邊界下鐵琴片的有限元素模型。

而關於弦樂器的部分，除了分析聲音頻率外，也對音場等聲音特性作探討。Hutchins[7]探討小提琴之最佳的特徵模態和固有頻率的關係，透過分析並找出影響模態振型的因素。Alexander *et al.*[8]探討分析錘揚琴的儀器分析參數與音質之間的關係，也探討錘揚琴的聲音衰減率與人工激發裝置(AEM)之間的關聯。在吉他的發聲機制方面，是藉由觸動吉他弦線使得音箱之結構產生振動而產生聲音。王與黃[9]應用有限元素分析以及實驗模態分析兩種方法，對包含琴柄及共鳴箱之整體吉他結構進行分析，並將有限元素分析以及實驗模態分析兩種分析結果進行模型驗證，以確認有限元素模型之正確性，使瞭解整個吉他結構之振動特性。徐與吳[10]探討二胡的音質，並以客觀之角度來探討如何改善狼音對二胡音質的影響。鐘等人[11]利用聲音量測程式對二胡與小喇叭等

樂器做穿透力比較。

不同的打擊樂器運用有限元素分析及實驗模態分析探討關於聲音與振動特性。王等人[12]針對不同樂器用以頻譜分析儀進行實驗模態分析、發聲機制之探討，以音高、音色、持續度三大方向進行討論，進而了解不同打擊樂器的聲音特性。樂器方面，運用麥克風為感測器針對不同樂器進行實驗模態分析的比較與驗證，從驗證結果顯示麥克風與加速規所量之模態參數相當吻合。Fletcher [13]探討銅鈸之振動模態特性，由於銅鈸因形狀呈錐形且堅硬，因此其聲音特性隱含著更多的特質，實驗方法為用一個簡單的平板，激發銅鈸並以正弦用振盪器連接到它的中央凸台。王與吳[14]對銅鑼進行實驗模態分析獲得結構頻率響應函數，並利用曲線嵌合獲得該銅鑼之模態參數，包括自然頻率及所對應之模態振型，以提供有限元素分析的模態參數進行比對，確認有限元素模型的正確性，並進一步了解其模態特性與振動特性。Pan *et al.*等人[15]對管鐘進行探討，不同長度與厚度的圓管皆會有不同頻率所產生，以有限元素分析及實驗模態分析同時進行，將模態參數結果做比較驗證。

本文以不鏽鋼管為基材，對不鏽鋼管進行實驗模態分析(Experimental Modal Analysis,EMA)與有限元素分析(Finite Element Analysis,FEA)對其進行模型驗證，探討其FEA 模型之正確性，並設計製作出一組兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器。

## 二、設計分析方法與步驟

本文研究目的在設計一組不鏽鋼管打擊樂器，圖 1 為實際設計與製作之流程圖，首先對不鏽鋼管進行有限元素分析與實驗模態分析並獲得理論與實驗的模態參數，接著將兩者所得的分析結果進行比較驗證，取得不鏽鋼管之材料參數並了解其振動模態之特性，之後藉由聲音量測分析了解其發聲機制。透過不鏽鋼管特性曲線圖選定打擊樂器之音階範圍為 F3 至 F5，經由模態分析求得不同音階之理論長度，之後進行切割加工 25 支不鏽鋼管，再進行聲音量測分析獲得基音頻率並以標準音階頻率做為調音的依據，完成 25 支不鏽鋼管之調音校正並繪製琴架之設計圖，再進行琴架的加工，並將加工完成之不鏽鋼管件與琴架進行組裝及測試，即能完成一組兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器組。

## 三、不鏽鋼管之模型驗證

圖 2 為不鏽鋼管模型驗證流程圖，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不鏽鋼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之方法對不鏽鋼管進行量測，以求得其頻率響應函數，再利用 ME'scopeVES 軟體進行曲線嵌合，以求得不鏽鋼管實際結構的模態參數，如自然頻率、模態振型與阻尼比。

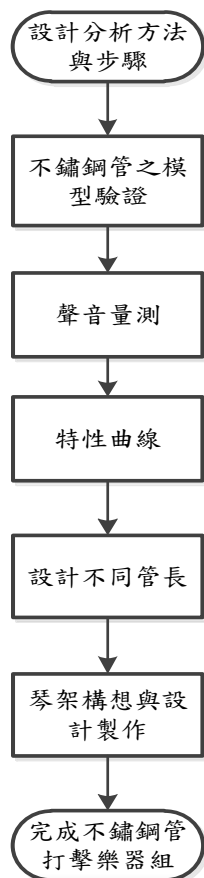


圖 1 實際設計與製作之流程圖

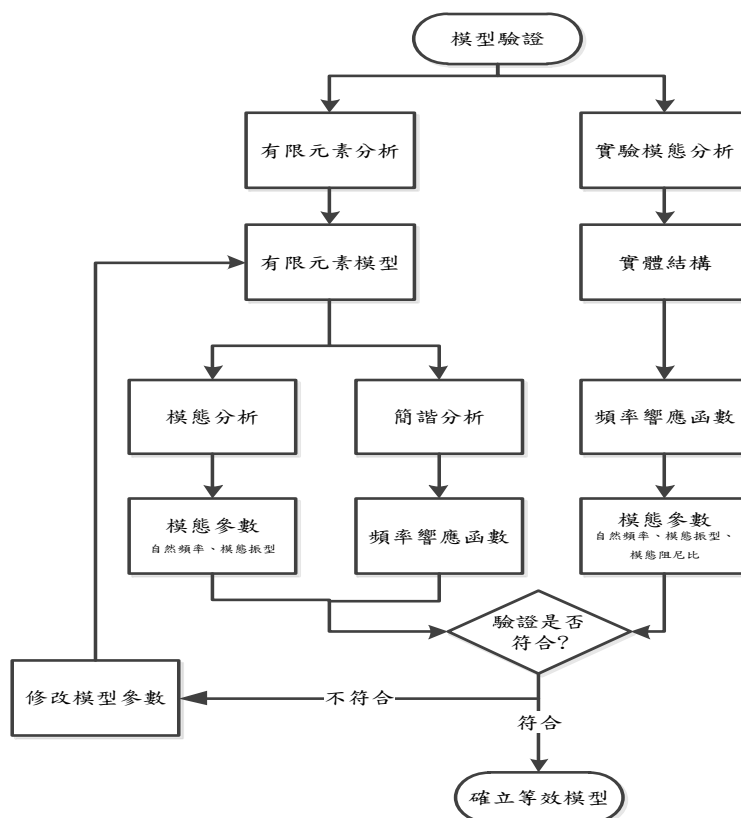


圖 2 模型驗證流程圖

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，若是模態參數比對吻合，則完成等效於實際結構之有限元素模型的模型驗證。

### 3.1 有限元素分析(FEA)

圖 3 為不鏽鋼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 為不鏽鋼管外型尺寸表，外徑=50.6mm、厚度=0.1mm、長度= 14.95mm，本文採用 ANSYS 有限元素軟體進行分析。首先，先建構不鏽鋼管有限元素模型，由於不鏽鋼管結構之厚度小於其直徑，因此可採用薄殼元素(Shell63)。

圖 4 為不鏽鋼管有限元素模型，表 1 為不鏽鋼管之材料性質參數表，在材料參數設定蒲松比( $\nu$ )=0.28、楊氏係數(GPa)=205、密度( $\text{kg/m}^3$ )=6871.84，元素分割方面圓周方向分成 12 等份，軸向分成 7 等份，共 1848 個節點、1760 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。

### 3.2 實驗模態分析(EMA)

本節主要是對不鏽鋼管進行實驗模態分析，圖 5 為不鏽鋼管點數規劃示意圖，圓周分成 12 個點，軸向分成 7 個點，共 84 個敲擊點，加速規分別固定在第 1 點上。敲擊

不鏽鋼管上每一個測試點。圖 5 為不鏽鋼管實驗架設圖，以小型敲擊錘為輸入，加速規輸出，以固定加速度規移動衝擊錘的方式，將加速規量取到的響應訊號傳入至頻譜分析儀，其儀器設定頻寬為 5000Hz，解析頻率為 1.563 Hz，接著將輸入至頻譜分析儀之訊號作快速傅立葉轉換，求得不鏽鋼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 MEscopeVES 軟體做曲線嵌合，以獲得不鏽鋼管之模態參數，包括：自然頻率、模態振型、及模態阻尼比。

### 3.3 模型驗證之結果

圖 7 為不鏽鋼管之頻率響應函數。圖 7(a)為同點頻率響應函數( $i=01, j=01$ )，圖 7(b)為不同點頻率響應函數( $i=42, j=01$ )，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。從圖中可看出實驗與合成對應幾乎吻合，表示曲線嵌合是良好的。而理論與合成在對應方面上，呈現部分頻率峰值有偏移的現象，猜測是由於受測的不鏽鋼管實際結構並非真圓，但頻率曲線的趨勢大致上是相同的。而楊氏係數由 205GPa 校正為 126.13GPa。

表 2 與表 3 為不鏽鋼管之理論與實驗模態參數對照表，從表中可得知不鏽鋼管之 FEA 的自然頻率與聲音量測的自然頻率做比對，由於 EMA 有黏貼加速規導致些微質量效應，所以 EMA 測得的自然頻率略低於聲音量測的自然頻率，結果發現部份聲音量測的自然頻率沒對應到 EMA 的自然頻率，且表中有兩個誤差值較大分別為約 5%、14%，其它誤差值皆在 1.14% 以內。模態振型為兩兩一組的對稱模態且其 FEA 與 EMA 的模態振型皆有對應，其物理意義分別為  $(\theta, z) = (2,1)$ 、 $(2,2)$ 、 $(2,3)$ 、 $(3,1)$ 、 $(3,2)$ 、 $(3,3)$ 、 $(4,1)$ 、 $(4,2)$  對稱模態。

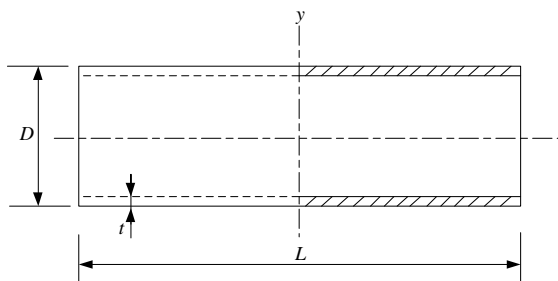


圖 3 剖面尺寸示意圖

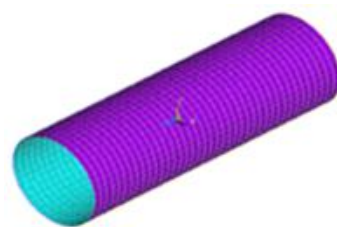


圖 4 有限元素模型

表 1 不鏽鋼管外型尺寸與材料性質

外徑(D) mm	厚度(t) mm	長度 (L) mm	楊氏係數(GPa)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	蒲松比
506	1	149.5	205	6871.84	0.28

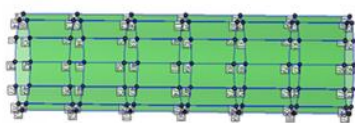
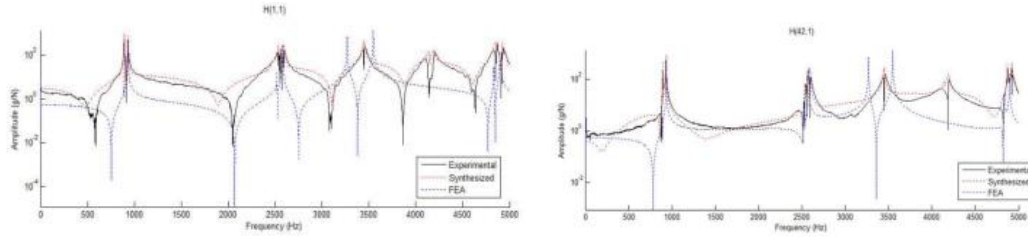


圖 5 不鏽鋼管點數規劃



圖 6 不鏽鋼管實驗架設圖



(a)同點 ( $i=01, j=01$ )

(b)不同點 ( $i=42, j=01$ )

圖 7 不鏽鋼管之頻率響應函數  $H_{ij}(f)$

表 2 不鏽鋼管理論與實驗模態參數對照表

模態數	FEA	模態數	EMA	聲音量測 自然頻率	誤差百分比 (%)	物理意義 ( $\theta, Z$ )	阻尼比 (%)
	自然頻率		自然頻率				
F-01	894.7	E-01	892.4	895	-0.03	對稱模態 (2,1)	0.048
F-02	894.7	E-02	898.3	905	-1.14		0.173
F-03	937.4	E-03	932.1	938	-0.06	對稱模態 (2,2)	0.057
F-04	937.4	E-04	932.8	939	-0.17		0.053
F-05	2529.2	E-05	2468.7	--	--	對稱模態 (3,1)	0.251
F-06	2529.2	E-06	2534.6	2535	-0.23		0.178
F-07	2587.8	E-07	2589.8	2592	-0.16	對稱模態 (3,2)	0.186
F-08	2587.8	E-08	2596.2	2609	-0.81		0.133
F-09	3278.3	E-09	3444.1	--	--	對稱模態 (3,3)	0.173
F-10	3278.3	E-10	3456.3	3463	-5.33		0.150
F-11	3556.9	E-11	4137.0	4147	-14.23	對稱模態 (2,3)	0.177
F-12	3556.9	E-12	4190.9	--	--		0.256
F-13	4847.0	E-13	4830.4	4853	-0.12	對稱模態 (4,1)	0.348
F-14	4847.0	E-14	4871.5	4886	-0.80		0.038
F-15	4912.1	E-15	4919.5	4913	-0.02	對稱模態 (4,2)	0.058
F-16	4912.1	E-16	4923.2	4945	-0.67		0.049

表 3 不鏽鋼管理論與實驗之模態對應表

物理意義	$(\theta, z) = (2,1)$	$(\theta, z) = (2,2)$	$(\theta, z) = (2,3)$	$(\theta, z) = (3,1)$
FEA				
EMA				
物理意義	$(\theta, z) = (3,2)$	$(\theta, z) = (3,3)$	$(\theta, z) = (4,1)$	$(\theta, z) = (4,2)$
FEA				
EMA				

#### 四、不鏽鋼管之聲音特性

本章透過聲音量測實驗分析對不鏽鋼管進行敲擊量測，並對不鏽鋼管所激發出的聲音進行聲音特性探討。

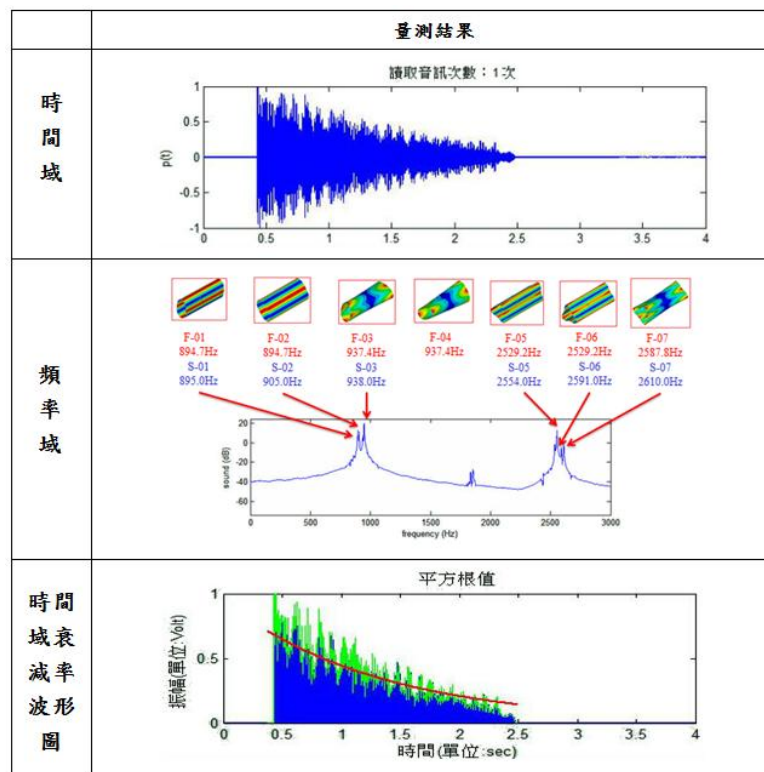
##### 4.1 聲音量測分析

圖 8 為不鏽鋼管聲音量測實驗儀器架設圖、表 4 為量測不鏽鋼管聲音之時間域與頻率域圖。將不鏽鋼管垂吊於鐵架上，經由敲擊錘敲打不鏽鋼管中心點上，激發的聲音經麥克風接收之後傳送至聲音量測程式並進行分析，則可測得不鏽鋼管之聲音時間域、聲音頻譜域、衰減率。



圖 8 不鏽鋼管聲音量測實驗儀器架設圖

表 4 不鏽鋼管聲音量測之時間域與頻率域圖



#### 五、不鏽鋼管打擊樂器之設計製作與聲音品質探討

##### 5.1 不鏽鋼管之發聲模態特性曲線

圖 9 為不鏽鋼管發聲模態之特性曲線圖，圖中可以發現，基音的模態振型會隨著管長的增減而產生變化，管長在 0.5m 前為 Axial 模態；而 0.5m 後為 Bending 模態。透過

不鏽鋼管之特性曲線圖，決定採用(3,1)的發聲模態曲線，音階範圍選定於 F3 至 F5 作為不鏽鋼管音階排列之依據。

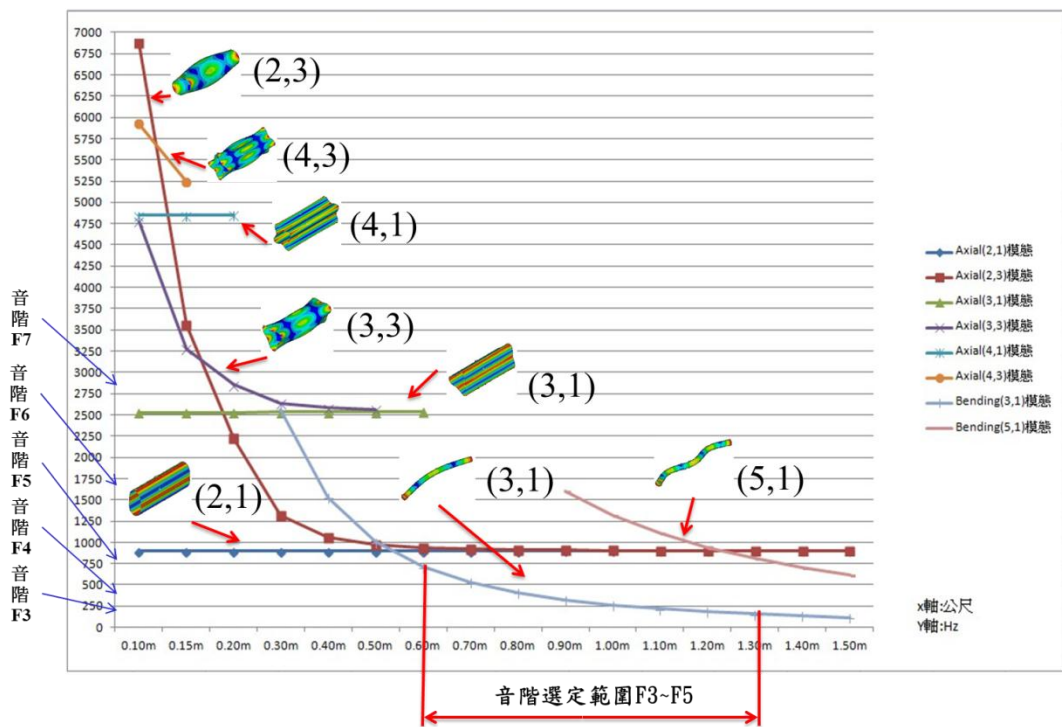


圖 9 不鏽鋼管發聲模態之特性曲線圖

## 5.2 設計製作與聲音品質探討

圖 10 為不鏽鋼管打擊樂器初步示意圖、圖 11 為不鏽鋼管打擊樂器實體圖，依鋼琴琴鍵音階的排列方式由左至右排出 F3 到 F5 共兩個八度音的音階。表 5 為不鏽鋼管製作兩個八度音之所有管材之參數總表。分析不鏽鋼管的長度以 FEA 根據標準頻率所求得之不鏽鋼管長度，而實際調音後之不鏽鋼管，量測之自然頻率與標準音階誤差須依據樂理需求，誤差需在±0.34%以內，才符合音準需求，而在整組不鏽鋼管打擊樂器中，兩個八度音階之自然頻率的誤差百分比皆約在±0.34%內，誤差百分比皆在合理範圍內。

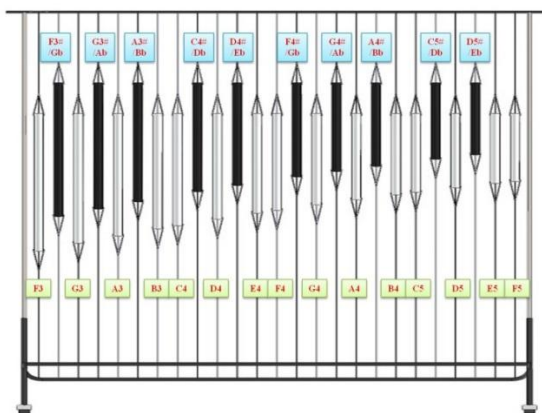


圖 10 不鏽鋼管打擊樂器初步示意圖



圖 11 不鏽鋼管打擊樂器實體圖



表 5 不鏽鋼管製作兩個八度音之所有管材之參數總表

音階	標準音階 頻率(Hz)	分析長度 (cm)	實際長度 (cm)	量測之聲音 頻率(Hz)	誤差百分 比%	容許誤 差%	衰減率
<b>F3</b>	174.6	134.8	134.8	175.0	-0.34	±0.34	1.58
<b>F3<sup>#</sup>/G<sup>b</sup></b>	185.0	130.8	130.8	185.0	0	±0.34	0.93
<b>G3</b>	196.0	127.0	127.0	196.0	0	±0.34	1.11
<b>G3<sup>#</sup>/A<sup>b</sup></b>	207.7	123.5	123.5	208.0	0.14	±0.34	2.17
<b>A3</b>	220.0	119.9	120.1	220.0	0	±0.34	0.99
<b>A3<sup>#</sup>/B<sup>b</sup></b>	233.1	116.4	116.5	233.0	-0.04	±0.34	2.05
<b>B3</b>	246.9	113.6	113.5	247.0	0.04	±0.34	1.06
<b>C4</b>	261.6	110.3	110.3	261.0	-0.23	±0.34	1.12
<b>C4<sup>#</sup>/D<sup>b</sup></b>	277.2	107.3	107.1	277.0	-0.07	±0.34	0.63
<b>D4</b>	293.7	104.2	104.0	293.0	-0.24	±0.34	1.16
<b>D4<sup>#</sup>/E<sup>b</sup></b>	311.1	101.2	100.9	311.0	-0.03	±0.34	0.99
<b>E4</b>	329.6	98.3	98.1	329.0	-0.18	±0.34	0.24
<b>F4</b>	349.2	95.4	95.4	348.0	-0.34	±0.34	2.31
<b>F4<sup>#</sup>/G<sup>b</sup></b>	370.0	92.8	92.6	369.0	-0.27	±0.34	0.37
<b>G4</b>	392.0	90.0	89.9	391.0	-0.26	±0.34	0.72
<b>G4<sup>#</sup>/A<sup>b</sup></b>	415.3	87.4	87.4	414.0	-0.31	±0.34	0.03
<b>A4</b>	440.0	84.8	84.6	439.0	-0.23	±0.34	0.92
<b>A4<sup>#</sup>/B<sup>b</sup></b>	466.2	82.3	82.2	465.0	-0.26	±0.34	0.23
<b>B4</b>	493.9	80.0	79.7	493.0	-0.18	±0.34	0.64
<b>C5</b>	523.3	77.6	77.5	522.0	-0.25	±0.34	0.25
<b>C5<sup>#</sup>/D<sup>b</sup></b>	554.4	74.9	74.9	555.0	-0.25	±0.34	1.40
<b>D5</b>	587.3	72.7	72.8	586.0	-0.22	±0.34	1.16
<b>D5<sup>#</sup>/E<sup>b</sup></b>	622.3	71.0	70.8	622.0	-0.05	±0.34	0.48
<b>E5</b>	659.3	68.9	68.8	658.0	-0.20	±0.34	1.01
<b>F5</b>	698.5	66.5	66.5	698.0	-0.07	±0.34	0.67

## 六、結論

本文目的為設計一組具兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器並建立一套整體研究方法與步驟，首先取一支不鏽鋼管做 FEA 與 EMA 分析，經模型驗證後得到其材料參數與模態振型，透過聲音量測程式獲得的量測頻率與 EMA 的量測頻率做比較，找出對應的模態振型並探討不鏽鋼管的發聲機制，經由特性曲線圖選定音階範圍為 F3 至 F5，對不鏽鋼管進行切割加工，之後對各管子進行聲音量測分析，將其獲得之基音與音階頻率表做

比對，將誤差率大的部分經由調音加工，使誤差百分比控制在 0.34% 合理範圍內。之後考量打擊樂器敲擊之位置與管與管之間的排列間隙，設計出一組懸吊立式的管架，將管與管架裝配完成進行演奏測試與調整，即完成一組不鏽鋼管打擊樂器。而本文之研究方法與流程，也可做為日後樂器分析或製作之參考。

## 七、參考文獻

1. 郭裕文, 大熊恒靖, 2008, 「台灣鐘的音響特性」, 中華民國音響學會第二十一屆學術研討會, 台中縣, 第 19-31 頁。
2. Blankenhorn, G., Muller, L., Siebert, A., and Schweizerhof, K., 2006, "On the Numerical Analysis of a Carillon Bell Using LS-DYNA with a Specific View on Model Validation," *5th German LS-DYNA Forum*, Germany, pp. 01-09.
3. Pan, J., 2009, "Acoustical Properties of Ancient Chinese Musical Bells," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 84, No. S1, pp. S135-S135.
4. Yoo, J., and Thomas, D., R., 2006, "Geometrical Effects on the Tuning of Chinese and Korean Stone Chimes," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 6, pp. 78-83.
5. 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屆論文發表會, 台北, 論文編號: C5。
6. 王栢村, 簡孝名, 2009, 「實際邊界下之鐵琴片模型驗證」, 中華民國音響學會第二十二屆學術研討會, 新北市, 第 A35-A45 頁。
7. Hutchins, C. M., 1981, "The Acoustics of Violin Plates," *Scientific American*, Vol. 245, No.4, pp. 170-180.
8. Alexander, M., and Herbert, H., 2010, "A Method for a Acoustical Comparison of the Hammered Dulcimer," *Proceedings of the Second Vienna Talk*, Austria, pp. 100-101.
9. 王栢村, 黃國棟, 2004, 「吉他之振動特性與模態分析」, 中華民國音響學會第十七屆學術研討會, 高雄縣, 第 197-205 頁。
10. 徐茂濱, 吳佳宗, 2010, 「以客觀法評量狼音之改良對二胡音質的影響」, 中華民國音響學會第二十三屆學術研討會, 台中市, 第 153-158 頁。
11. 鍾欣樺, 徐茂濱, 林昱廷, 李十三, 2009, 「二胡穿透力客觀指標的探討」, 中華民國音響學會第二十二屆學術研討會, 新北市, 論文編號 A008。
12. 王栢村, 吳祥瑞, 徐秀娟, 高正賢, 2011, 「不同打擊樂器聲音特性探討」, 中華民國音響學會第二十四屆學術研討會, 新北市, 第 320-326 頁。
13. Fletcher, N., H., 2000, "Nonlinearity, Complexity, and the Sounds of Musical Instruments," *Canberra 0200*, Australia, pp. 2717-2720.
14. 王栢村, 吳銘峰, 2012, 「銅鑼模型更新及其聲音與振動特性探討」, 中華民國音響學會第二十四屆學術研討會, 新北市, 第 327-333 頁。
15. Pan, J., and Bergmann S., 2010, "An Experimental Study of Acoustical Properties of Tubular Tower Bells," *20th International Congress on Acoustics*, Australia, pp. 1839-1844.