

和弦琴片之加工實務與聲音特性探討

王栢村¹、徐詠翔¹、鄭曉蔚¹、陳建宏¹、黃家賢¹、吳盈輝²

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系

² 國立內埔高級農工職業學校 機械科

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

以往在設計打擊樂器過程中，在設計分析模型與加工實務上皆會產生些許的加工誤差，而這些誤差往往會影響打擊樂器的聲音品質，故本文針對和弦琴片探討加工實務對聲音特性的影響。首先應用有限元素分析軟體針對已完成最佳化分析之和弦琴片進行模態分析，得到和弦琴片之理論自然頻率與模態振型，獲得其和弦琴片之幾何外型，並進行雷射加工取得實體，且接著對初次加工之和弦琴片進行聲音量測，了解其雷射加工對和弦音頻率造成的影響，並建立聲音頻率之補正策略；透過最佳化分析對和弦琴片進行聲音頻率之補正，獲得頻率補正後和弦琴片之有限元素模型，進行第二次雷射加工，取得補正後之和弦琴片實體，並進行聲音量測確認其和弦音頻率之正確性，結果顯示其和弦琴片之加工實體造成的頻率誤差有明顯改善；此外，本文也針對以補正之和弦琴片進行實驗模態分析，並驗證實體結構是否等效於分析模型；針對敲擊和弦琴片不同位置與使用不同敲擊鉗進行聲音量測，獲得其聲音頻譜與發聲頻率，經比較選出合適的敲擊位置與敲擊鉗。本文成功修整和弦琴片之加工誤差，以及探討其聲音特性，此結構修整方法可應用於類似的打擊樂器。

關鍵詞：和弦琴片、加工誤差、聲音特性。

1. 前言

以往在設計打擊樂器過程中，在設計分析模型與加工實務上皆會產生些許的加工誤差，而這些誤差往往會影響打擊樂器的聲音特性，本文針對和弦琴片探討加工實務對聲音特性的影響，其和弦琴片已取得中華民國發明專利[1]、[2]與新型專利[3]。

Wang and Jian[4]針對鐵琴片設計出具有 C 和弦音之特性，運用有限元素分析與實驗模態分析，獲得自然頻率與模態振型等模態參數，再進行模型驗證之比對，使有限元素模型等效於實際結構。王與謝[5]應用 ANSYS 有限元素分析軟體之最佳化設計方法搭配貝茲曲線法，設計出兩種具 C 和弦鐵琴片，進行有限元素分析與實驗模態分析，兩者進行比對驗證，成功驗證出分析模型與實際結構之等效性。

在樂器上分析方面的研究有 Petrolito and Legge[6]透過最佳化方法對木琴片做結構之設計變更，改變底部切除面積來調整自然頻率，由此設計出設定的目標頻率值之木琴片結構。Bretos *et al.* [7]以有限元素分析對木琴結構之木條進行模態分析，由木條振動之模態情形探討木條均勻或凹刻截面對其模態參數之影響，結果得知

木條為非均勻材料特性，其中以楊氏係數對側向振動模態的影響最大。McLachlan[8]利用有限元素分析方法求得鐘的自然頻率與模態振型，透過實驗模態分析得知在不同固定邊界所產生之效應，經比對驗證後兩者之模態振型吻合。Ansari[9]對鐘進行實驗模態分析與有限元素分析，且利用實驗模態分析所量測出的自然頻率比例為基準，比對有限元素分析所得知的自然頻率比例，求出有限元素分析之基音頻率。針對聲音特性的研究，Jing[10]模擬中國鐘之聲音與振動特性，針對單音及雙音之中國鐘進行模擬，也對中國鐘之形狀進行探討，得知中國鐘所發出的聲音持續度較長，主因是在外型的形狀設計，藉此得知結構較扁型的中國鐘其聲音衰減較迅速。

本文旨在探討已完成最佳化設計之和弦琴片進行加工實務對聲音特性的影響，且建立一套琴片之自然頻率的補正方法，並對和弦琴片進行聲音量測，驗證其和弦音頻率的正確性。

2. 和弦琴片之設計分析與加工實務流程

本文針對已完成最佳化分析之和弦琴片進行模態分析，表 1 為和弦音程表，本研究採用 Do、Mi、So 三音組成之和弦琴片，且針對大三、小三、增三、減三等 4 種和弦琴片進行分析，求得其 4 種已完成設計之和弦琴片的自然頻率，並將設計完成之和弦琴片分析模型委任廠商進行雷射加工並取得實體，並進行聲音量測取得實體之聲音頻率，透過分析結果與實際測得結果進行比對，探討其聲音頻率之差異性。

表 1 和弦音程表

Chord name	Component intervals		Example	Chord symbol
Major triad	major third	perfect fifth	C-E-G	C, CM, Cma, Cmaj, CΔ
Minor triad	minor third	perfect fifth	C-E ^b -G	Cm, Cmi, Cmin
Augmented triad	major third	augmented fifth	C-E-G [#]	C+, C+, Caug
Diminished triad	minor third	diminished fifth	C-E ^b -G ^b	Cm(^b 5), C ^o , Cdim

2.1 和弦琴片之設計分析

本節透過 ANSYS 有限元素分析軟體之最佳化分析方法對和弦琴片進行分析，並取得和弦琴片之有限元素模型，實際獲得和弦琴片長度約為 122mm，厚度為 2.8mm，材料參數之設定為楊氏係數為 186.27(GPa)，密度為 7886.51(kg/m³)，蒲松比為 0.34 進行設定，並假設和弦音板材料為等向性且為均質性，並符合虎克定律之假設，圖 1 為小三和弦音板之有限元素模型圖，元素採用線性立方體元素(SOLID 45)進行建構，元素分割則採用 1mm 為一單位進行分割，共有 42366 個元素與 57976 個節點，在設定位移限制與負荷條件方面，因模

擬自由邊界，故位移限制不需設定，在模態分析時亦不需要設定負荷條件。

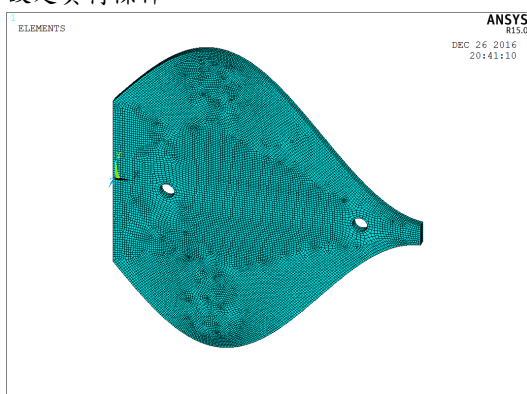


圖 1 小三和弦音板之有限元素模型圖

2.2 和弦琴片之加工實務流程

本節針對已完成最佳化設計之和弦琴片進行雷射加工，取得 4 片和弦琴片實體(分別有大三、小三、增三、減三等)，故說明其雷射加工實務流程，圖 2 為和弦琴片之雷射加工流程圖，於加工實體前首先透過 ANSYS 軟體進行圖檔輸出，轉成 .IGES(Initial Graphics Exchange Specification)圖檔，再透過 3D 繪圖軟體轉換 2D 圖面，故未在 ANSYS 軟體內進行尺寸的英制轉公制，並於繪圖軟體中進行轉換，在加工過程透過委託雷射加工廠進行加工，其過程透過電腦輔助工程製造軟體將 2D 圖檔轉換成 NC 碼(Numerical Control Code)輸入至雷射加工機進行加工，取得 4 片和弦琴片實體。

2.3 和弦琴片聲音頻率之正確性評估

針對已取得的和弦琴片實體進行聲音量測分析，圖 3 為和弦琴片實體示意圖，(a)大三和弦，(b)小三和弦，(c)增三和弦，(d)減三和弦，並了解和弦琴片實體之聲音頻率與設計分析頻率之差異，探討其加工實務與聲音頻率之正確性評估，圖 4 為和弦琴片聲音量測架設示意圖，實驗儀器使用振動噪音量測軟體(Sound and Vibration Measurement System, SVM)與訊號擷取卡(NI-9234)進行聲音量測，透過釣魚線將和弦音板懸吊，以琴槌為驅動器，麥克風為感測器，透過聲音量測軟體的快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，得到量測點的聲音頻譜圖，表 2 為和弦琴片初次加工之聲音頻率總表，由表中得知設計目標頻率與實際測得之聲音頻率，頻率誤差趨近 10%，了解分析模型與實際結構存在差異性，推測可能是幾何尺寸與材料參數的差異性，後續了解其差異性並建構其加工實務之補正方法。

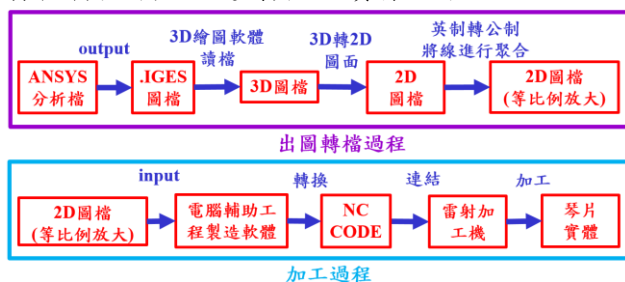
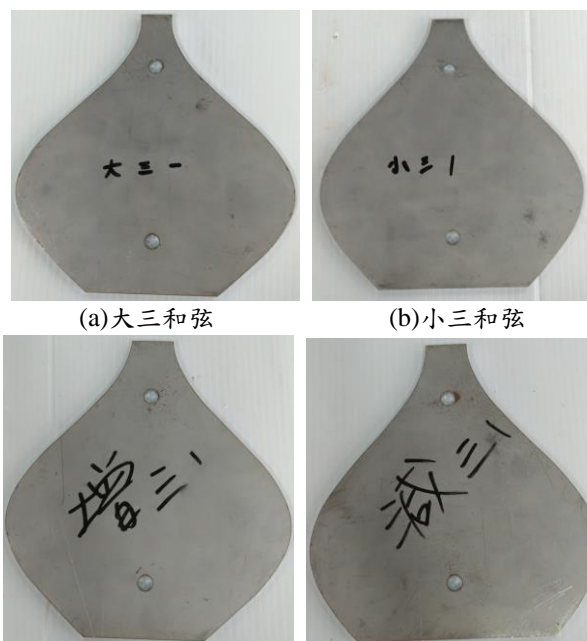


圖 2 和弦琴片之雷射加工流程圖



(a)大三和弦 (b)小三和弦
(c)增三和弦 (d)減三和弦
圖 3 和弦琴片實體示意圖

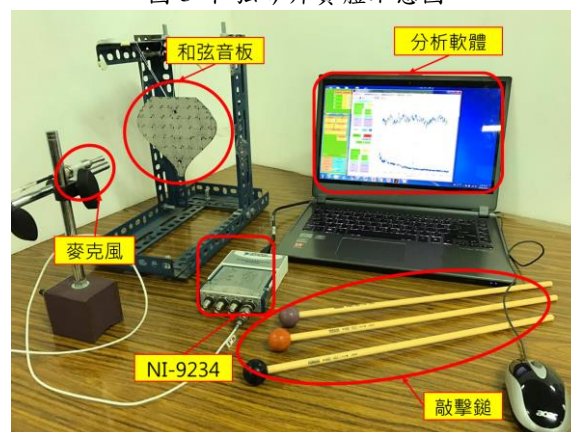


圖 4 和弦琴片聲音量測架設示意圖

表 2 和弦琴片初次加工之聲音頻率總表

和弦名稱	和弦音階	目標頻率 (Hz)	分析頻率 (Hz)	量測頻率 (Hz)	量測與分析之頻率誤差百分比 (%)	量測與目標之頻率誤差百分比 (%)
大三和弦 C6	C6	1046.5	1044.6	1154	10.47	10.27
	E6	1318.5	1319.5	1444	9.44	9.52
	G6	1567.9	1565	1713	9.46	9.25
小三和弦 C6	C6	1046.5	1046.8	1154	10.24	10.27
	E6 ^b	1244.5	1244.9	1358	9.09	9.12
	G6	1567.9	1568.4	1715	9.35	9.38
增三和弦 C6	C6	1046.5	1046.6	1149	9.78	9.79
	E6	1318.5	1317.8	1433	8.74	8.68
	G6 [#]	1661.2	1659.5	1808	8.95	8.84
減三和弦 C6	C6	1046.5	1047.4	1153	10.08	10.18
	E6 ^b	1244.5	1244	1353	8.76	8.72
	G6 ^b	1479.9	1478.7	1617	9.35	9.26

3. 和弦琴片加工實務之補正方法

本文針對和弦琴片進行設計分析，並進行雷射加工取得實際結構，透過對和弦琴片實體進行聲音量測分析，了解加工實務與設計分析之差異性，故本節針對其加工實務對和弦琴片聲音特性之影響進行補正，且建立一套自然頻率之補正方法。

3.1 加工實務之補正流程

本小節針對和弦琴片進行加工實務之補正流程進行說明，圖 5 為和弦琴片之加工實務補正流程圖，首先主要對已完成設計之和弦琴片初始形狀進行分析，並帶入實際需求之幾何尺寸與材料參數，進行最佳化分析對和弦琴片之外型尺寸進行微調，求得理論模態參數，如自然頻率、模態振型，並比對其自然頻率是否達到目標之頻率範圍內，如果有達到目標就進行雷射加工並取得實際成品，若未達到目標則回到和弦琴片之初始模型進行最佳化分析。

進行雷射加工完成後，取得和弦琴片之實體，接著針對和弦琴片進行實驗模態分析，獲得實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型、模態阻尼比，並確認其聲音特性是否與設計分析之目標一致，如果與目標一致則補正成功，若為否則回到最初和弦琴片之設計分析重新進行最佳化分析，過程中會針對幾何尺寸進行重新確認，並對材料參數重新進行校正，並將最後以材料參數校正之自然頻率結果與實際測得之自然頻率進行比對，其頻率誤差作為雷射加工機台之加工誤差的參考依據。

3.2 和弦琴片加工實務之補正成果

本小節主要探討和弦琴片進行二次雷射加工之補正成果，由表 2 得知初次加工之結果有趨近 10% 的頻率誤差，透過加工實務補正流程進行頻率補正，首先針對幾何參數進行修正發現不銹鋼板材實際厚度與初始分析設定之厚度有些許落差，並進行修正，修正厚度為 2.97mm。

在針對材料參數進行修正，利用小三和弦琴片實體進行實驗模態分析，取得實驗之模態參數，並利用分析與實驗之相同物理意義的模態頻率做為楊氏係數之修正依據，其修正之陽氏係數為 206.685(GPa)，表 3 為小三和弦 FEA 與 EMA 之自然頻率比對總表，由表中得知修正後之自然頻率誤差為 3.68%~-2.70%。

將修正後的幾何厚度與材料參數帶入其分析模型，對和弦琴片之有限元素模型進行模態分析，取得初步補正後之自然頻率，表 4 為和弦琴片之修正 FEA 模型與 EMA 之自然頻率比對總表，由表可知自然頻率之誤差大三和弦為 3.42%~-2.86%，小三和弦為 3.68%~-2.71%，增三和弦為 4.40%~-1.89%，減三和弦為 3.35%~-2.00%，透過以上頻率誤差擬定補正策略，表 5 為和弦音板初始加工之自然頻率誤差補正表，透過頻率誤差百分比修改目標頻率取得預期後之分析頻率，並進行最佳化分析，求得實際補正後之分析頻率，最後進行第二次雷射加工求得自然頻率補正後之和弦琴片，表 6 為第二次雷射加工之和弦琴片頻率比對總表，由表中得知各個和弦琴片之頻率誤差有明顯的下降，表示以上加工實務之補正方法具有可行性。

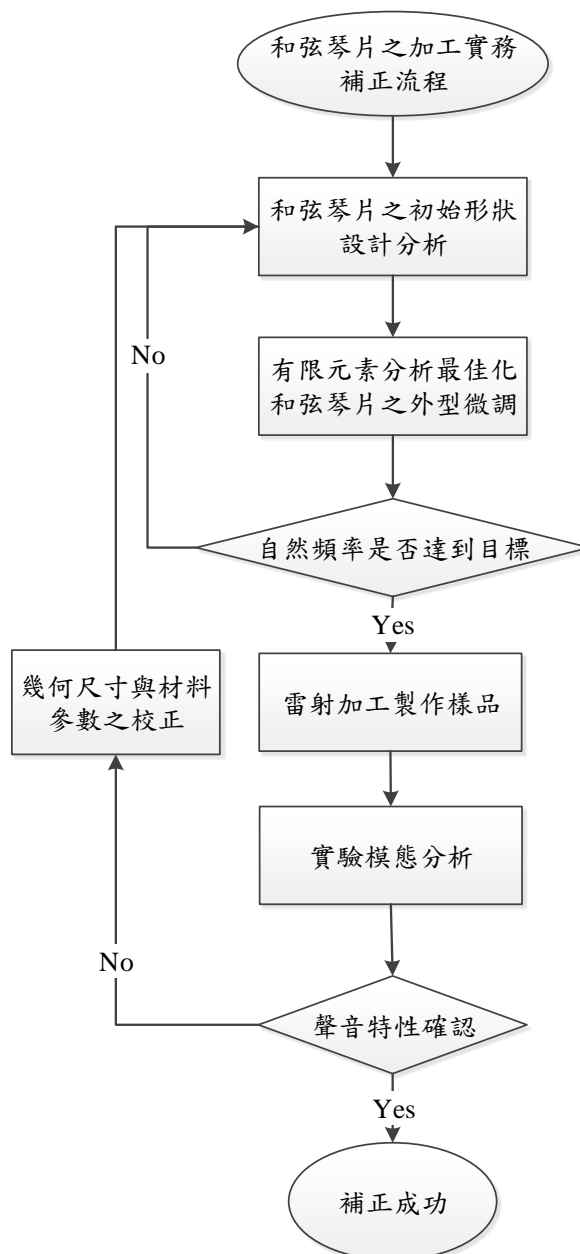


圖 5 和弦琴片之加工實務補正流程圖

表 3 小三和弦 FEA 與 EMA 之自然頻率比對總表

模態數	EMA		修正前 FEA		修正前自然頻率誤差 (%)	修正後 FEA		修正後自然頻率誤差 (%)
	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	模態數		自然頻率 (Hz)		
E-01	1157.0	F-07	1069.9	-7.52809	F-07	1125.7	-2.70527	
E-02	1360.0	F-08	1277.3	-6.08088	F-08	1343.9	-1.18382	
E-03	1716.1	F-09	1691.1	-1.45679	F-09	1779.3	3.682769	
E-04	2913.3	F-10	2739.1	-5.97947	F-10	2882.1	-1.07095	
E-05	3140.3	F-11	3021.9	-3.77034	F-11	3179.4	1.245104	
E-06	3642.5	F-12	3503.1	-3.82704	F-12	3685.7	1.185999	
E-07	4503.5	F-13	4382.8	-2.68014	F-13	4611.2	2.391473	
E-08	5365.9	F-14	5163.3	-3.77569	F-14	5432.7	1.244898	
E-09	5687.7	F-15	5451.2	-4.1581	F-15	5735.4	0.838652	

表 4 和弦琴片之修正 FEA 模型與 EMA 之自然頻率比對總表

和弦名稱	和弦音階	量測頻率 (Hz)	初步修正幾何與材料參數之分析頻率 (Hz)	自然頻率之誤差 (%)
大三和弦 C6	C6	1156.4	1123.3	-2.86
	E6	1445	1426.8	-1.26
	G6	1716.0	1774.7	3.42
小三和弦 C6	C6	1157	1125.7	-2.71
	E6 ^b	1360	1343.9	-1.18
	G6	1716.1	1781.2	3.68
增三和弦 C6	C6	1149	1127.3	-1.89
	E6	1433	1426.5	-0.45
	G6 [#]	1808	1887.5	4.40
減三和弦 C6	C6	1153	1129.9	-2.00
	E6 ^b	1353	1342.5	-0.78
	G6 ^b	1617	1671.1	3.35

表 5 和弦音板初始加工之自然頻率誤差補正表

和弦名稱	和弦音階	初始加工頻率 (Hz)	初始加工與目標頻率之誤差值 (%)	預期補正後之分析頻率 (Hz)	實際補正後之分析頻率 (Hz)
大三和弦 C6	C6	1156	-2.86	1016.570	1015.8
	E6	1445	-1.25	1302.029	1302.5
	G6	1716	3.42	1621.605	1621.2
小三和弦 C6	C6	1157	-2.60	1019.291	1019.9
	E6 ^b	1360	-1.00	1231.069	1231.0
	G6	1716	3.79	1627.406	1626.5
增三和弦 C6	C6	1149	-1.88	1026.826	1027.6
	E6	1433	-0.45	1312.577	1313.3
	G6 [#]	1808	4.39	1734.148	1734.1
減三和弦 C6	C6	1153	-2.00%	1025.570	1025.4
	E6 ^b	1353	-0.77%	1234.927	1235.4
	G6 ^b	1617	3.34%	1529.411	1530.7

表 6 第二次雷射加工之和弦琴片頻率比對總表

和弦名稱	和弦音階	量測頻率 (Hz)	目標頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)
大三和弦 C6	C6	1038	1046.5	-0.81
	E6	1312	1318.5	-0.49
	G6	1562	1567.9	-0.38
小三和弦 C6	C6	1043	1046.5	-0.33
	E6 ^b	1242	1244.5	-0.20
	G6	1566	1567.9	-0.12
增三和弦 C6	C6	1052	1046.5	0.53
	E6	1323	1318.5	0.34
	G6 [#]	1659	1661.2	-0.13
減三和弦 C6	C6	1047	1046.5	0.05
	E6 ^b	1245	1244.5	0.04
	G6 ^b	1480	1479.9	0.01

4. 和弦琴片之模型驗證與聲音特性探討

本小節針對小三和弦琴片進行模型驗證，並確認分析模型與加工之實際結構的等效性，且透過對小三和弦琴片進行聲音量測，探討不同槌及敲擊不同位置對聲音特性的影響。

4.1 和弦琴片之模型驗證

圖 6 為模型驗證之流程圖，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，首先理論

的部份為運用 ANSYS 有限元素分析軟體對和弦音板進行有限元素分析，求得理論之模態參數，包含自然頻率和模態振型；接著實驗的部分進行實驗模態分析，求得頻率響應函數，再利用曲線嵌合軟體 ME'scopeVES 進行曲線嵌合，以得到和弦音板實際結構的自然頻率、模態振型與模態阻尼比；最後將分析與實驗之模態參數進行比對，使得實體結構等效於分析模型，即完成模型驗證。

針對和弦琴片進行有限元素分析與實驗模態分析，並對理論與實驗模態參數進行比對，圖 7 為和弦琴片之佈點規劃示意圖，在和弦琴片上總共規劃 60 個量測點，將加速規固定在第 1 點位置量測訊號，每個敲擊點對應一筆頻率響應函數，因此可獲得 60 筆頻率響應函數與關聯性函數；實驗儀器使用振動噪音量測軟體 (SVM) 與訊號擷取卡 (NI-9234) 進行實驗模態分析，圖 8 為和弦琴片之實驗模態分析儀器架設圖，利用釣魚線將和弦音板懸吊，模擬自由邊界，以衝擊錘為驅動器，加速規為感測器，利用移動衝擊錘，固定加速規進行實驗量測。

針對和弦琴片之實驗結果顯示，圖 9 為小三和弦琴片模態振型物理意義對照圖，可看出在 F-12 與 F-14(a) 理論分析之模態振型未有對應之 (b) 實驗模態振型，推論的原因為加速規放置位置不理想。表 7 為加速規之和弦琴片 EMA 與 FEA 之自然頻率總表，由表中可觀察出其 MAC 值皆在 0.6 以上，其中第 1 模態的 MAC 值最高為 0.932，表示理論與實驗的模態振型擁有良好的吻合性，且可看出自然頻率誤差在第 3 模態時最高，造成此現象的原因為使用加速規作為感測器，其放置位置不理想與質量效應產生之影響。

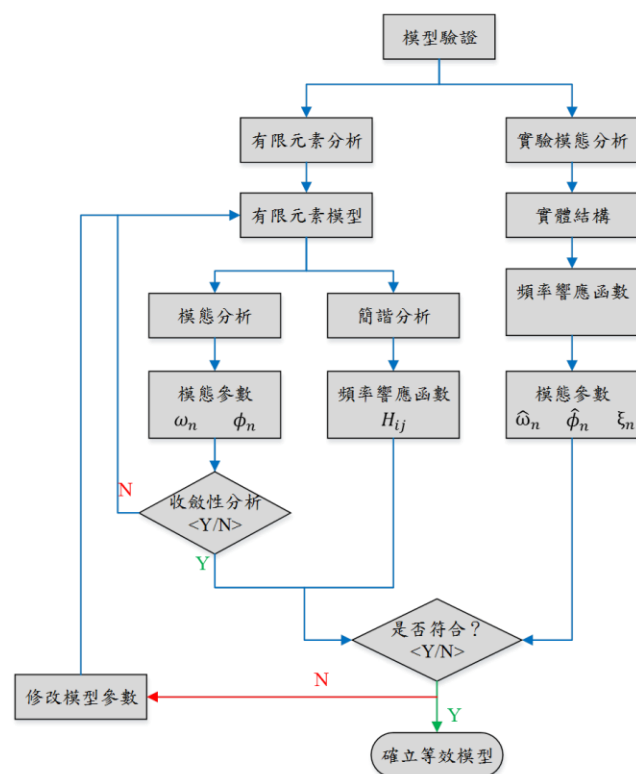


圖 6 模型驗證之流程圖

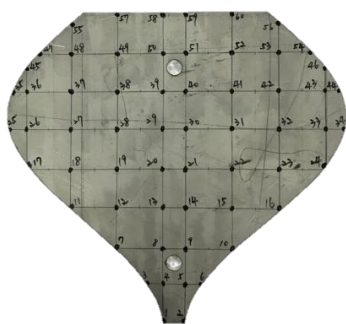


圖 7 和弦琴片之佈點規劃示意圖

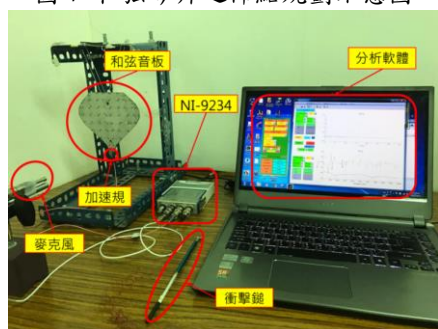
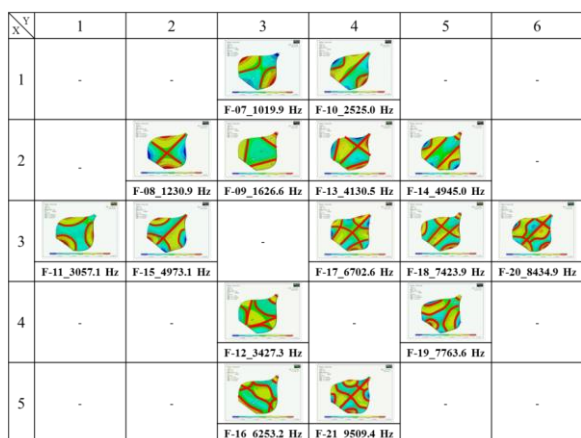
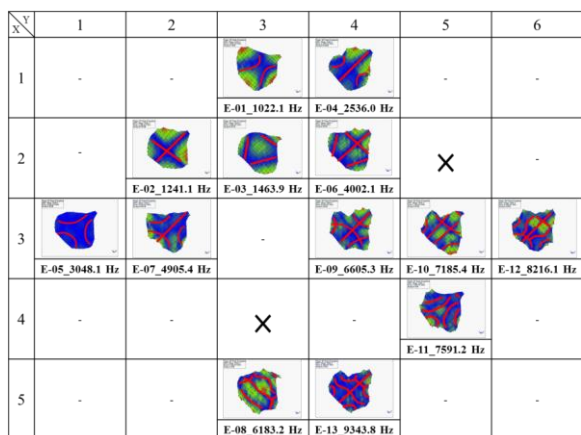


圖 8 和弦琴片之實驗模態分析儀器架設圖



(a) 理論分析之模態振型



(b) 實驗分析之模態振型

圖 9 為小三和弦琴片模態振型物理意義對照圖

表 7 加速規之和弦琴片 EMA 與 FEA 之自然頻率總表

模態數	EMA		FEA		自然頻率誤差 (%)	MAC Z 方向	模態阻尼比 (%)	物理意義 (X, Y)
	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	模態數				
E-01	1022.1	F-07	1019.9		0.216	0.932	0.136	(1, 3)
E-02	1241.1	F-08	1230.9		0.829	0.894	0.045	(2, 2)
E-03	1463.9	F-09	1626.6		-10.002	0.927	0.991	(2, 3)
E-04	2536.0	F-10	2525.0		0.436	0.685	0.019	(1, 4)
E-05	3048.1	F-11	3057.1		-0.294	0.852	0.403	(3, 1)
--	--	F-12	3427.3		--	--	--	(4, 3)
E-06	4002.1	F-13	4130.5		-3.109	0.898	0.092	(2, 4)
--	--	F-14	4945.0		--	--	--	(2, 5)
E-07	4905.4	F-15	4973.1		-1.361	0.628	0.049	(3, 2)
E-08	6183.2	F-16	6253.2		-1.119	0.784	1.22	(5, 3)
E-09	6605.3	F-17	6702.6		-1.452	0.790	0.490	(3, 4)
E-10	7185.4	F-18	7423.9		-3.213	0.727	0.940	(3, 5)
E-11	7591.2	F-19	7763.6		-2.221	0.799	0.350	(4, 5)
E-12	8216.1	F-20	8434.9		-2.594	0.797	0.259	(3, 6)
E-13	9343.8	F-21	9509.4		-1.741	0.796	0.327	(5, 4)

4.2 和弦琴片之聲音特性探討

首先針對和弦琴片進行不同位置與不同鐘之探討，選出合適的位置與敲擊鐘，接著依照其結果分別對其他種類之和弦琴片進行聲音量測，最後並觀察四種和弦型態之和弦琴片之聲音特性。

本文探討敲擊和弦琴片不同位置時所產生的聲音特性，圖 10 為敲擊位置示意圖，由於和弦琴片為對稱圖形，故以 A、B、C、D、E 點作為敲擊點，圖 11 為和弦琴片不同敲擊位置之聲音頻譜圖，從圖中可以看出在敲擊 A 點位置時，前三個頻率的模態峰值比較明顯，反之敲擊其他點時則有模態峰值較不明顯，表 10 為和弦琴片聲音量測之不同位置自然頻率與聲音壓力總表，由表可看出敲擊 A 點位置時前三個峰值分貝 (dB) 較其他位置來的平均，藉此可推斷 A 點為最佳敲擊位置。

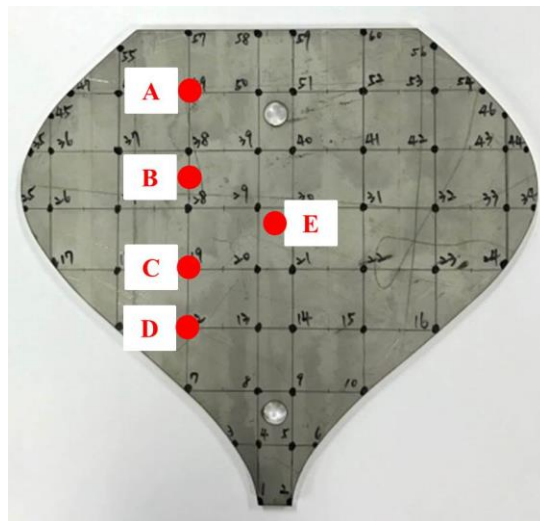


圖 10 敲擊位置示意圖

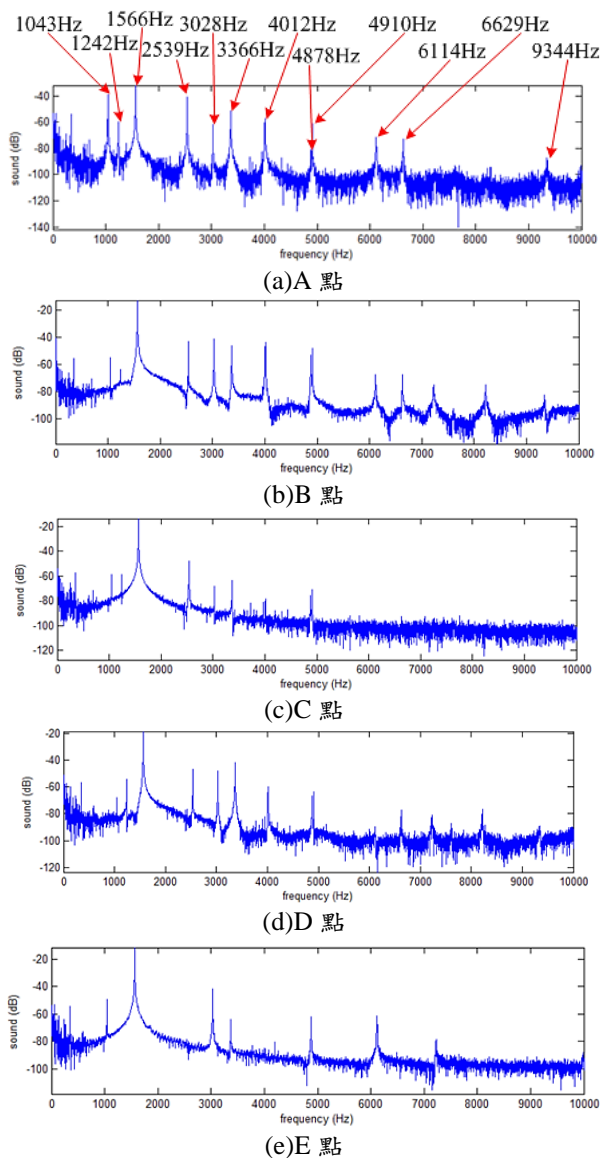


圖 11 和弦琴片不同敲擊位置之聲音頻譜圖
表 10 為和弦琴片聲音量測之不同位置自然頻率與聲音壓力總表

峰 值 數	A 點		B 點		C 點		D 點		E 點	
	峰 值 頻 率 (Hz)	峰 值 分 貝 (dB)	峰 值 頻 率 (Hz)	峰 值 分 貝 (dB)	峰 值 頻 率 (Hz)	峰 值 分 貝 (dB)	峰 值 頻 率 (Hz)	峰 值 分 貝 (dB)	峰 值 頻 率 (Hz)	峰 值 分 貝 (dB)
S-01	1043	61.09	1043	45.30	1043	40.85	1043	32.06	1043	50.56
S-02	1242	39.93	1242	36.63	1242	40.99	1242	45.74	-	-
S-03	1566	68.03	1566	87.12	1566	86.24	1566	81.28	1566	88.53
S-04	2539	59.18	2539	56.98	2538	52.27	2539	53.03	-	-
S-05	3028	38.49	3028	58.92	3028	31.81	3028	52.14	3028	58.52
S-06	3366	48.83	3367	53.78	3366	36.62	3366	57.92	3367	35.76
S-07	4012	42.75	4011	56.51	4012	21.6	4012	39.98	-	-
S-08	4878	19.12	4878	47.13	4877	24.38	4877	33.41	4877	37.85
S-09	4910	39.09	4910	51.83	4909	28.69	4910	36.15	-	-
S-10	6114	28.26	6114	32.74	-	-	-	-	6116	38.44
S-11	6629	26.92	6629	32.45	-	-	6629	22.84	-	-
S-12	-	-	7225	24.92	-	-	7227	19.30	7228	21.72
S-13	-	-	7602	14.56	-	-	7603	15.94	-	-
S-14	-	-	8219	25.27	-	-	8218	23.68	-	-
S-15	9344	12.73	9343	17.63	-	-	-	-	-	-

圖 12 為不同軟硬敲擊鎚之示意圖，ME-101 硬度最大、ME105 硬度最小、而 ME-103 介於兩者之間，圖 13 為不同敲擊鎚敲擊和弦琴片 A 點之聲音頻譜圖，從聲音頻譜圖可發現首先以 ME-101 敲擊時，7000(Hz)前之自然頻率較明顯且較容易觸發高頻之頻率，再以 ME-103 敲擊時，為 4000(Hz)前之自然頻率較明顯，最後以 ME-105 敲擊時，則是 3000(Hz)前之自然頻率較明顯且較容易激發低頻之頻率，接著由表 11 為和弦琴片聲音量測之不同敲擊鎚自然頻率與聲音壓力總表，可發現以 ME-103 敲擊鎚敲擊時，其前三峰值分貝(dB)較其他兩者高，最後再由圖 14 為不同敲擊鎚敲擊和弦琴片 A 點之聲音時頻圖，可觀察出 ME-103 之時間域響應時間較長，且透過其時間頻譜圖發現主要頻率之響應較其他兩者來得好，由上述總結可得知，以 ME-103 敲擊鎚敲擊 A 點時較能激發和弦主要頻率且其響應良好，故 ME-103 為合適的敲擊鎚。



圖 12 不同軟硬敲擊鎚之示意圖

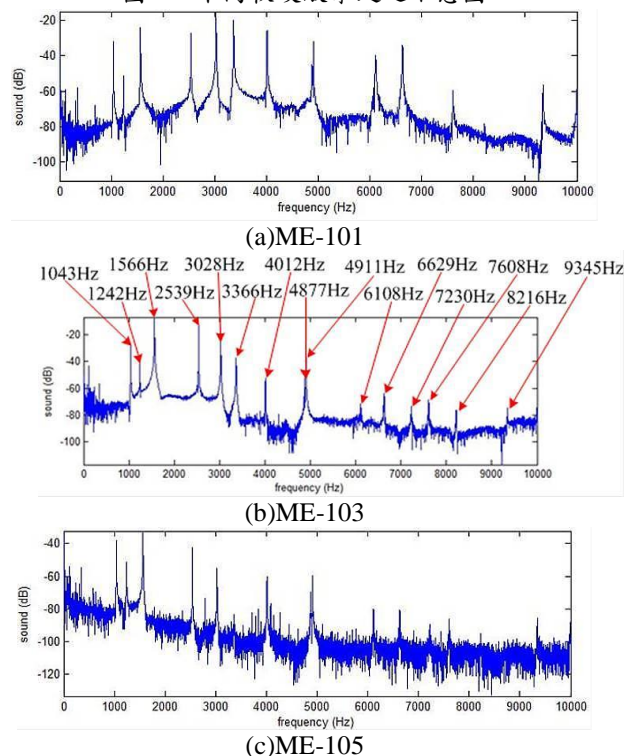


圖 13 不同敲擊鎚敲擊和弦琴片 A 點之聲音頻譜圖

表 11 和弦琴片聲音量測之不同敲擊鉗自然頻率與聲音壓力總表

峰值數	ME-101			ME-103			ME-105		
	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	頻率比	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	頻率比	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	頻率比
S-01	1043	67.94	1	1043	70.42	1	1043	60.47	1
S-02	1242	48.72	1.19	1242	58.46	1.19	1242	48.85	1.19
S-03	1566	75.81	1.50	1566	92.75	1.50	1566	67.75	1.50
S-04	2539	72.85	2.43	2539	86.74	2.43	2539	57.66	2.43
S-05	3028	84.85	2.90	3028	74.33	2.90	3028	74.33	2.90
S-06	3367	79.68	3.23	3366	62.81	3.23	-	-	-
S-07	4011	74.27	3.85	4012	47.45	3.85	4012	39.87	3.85
S-08	4877	55.03	4.68	4877	47.51	4.68	4877	30.20	4.68
S-09	4911	67.85	4.71	4911	62.63	4.71	4911	40.08	4.71
S-10	6112	60.33	5.86	6108	28.11	5.86	6114	19.91	5.86
S-11	6630	65.74	6.36	6629	35.90	6.36	6629	19.05	6.36
S-12	-	-	-	7230	26.75	6.93	7225	10.36	6.93
S-13	7604	40.38	7.29	7608	31.26	7.29	7603	13.89	7.29
S-14	8215	21.50	7.88	8216	23.48	7.88	8224	5.08	7.88
S-15	9344	43.62	8.96	9345	25.16	8.96	9344	14.40	8.96

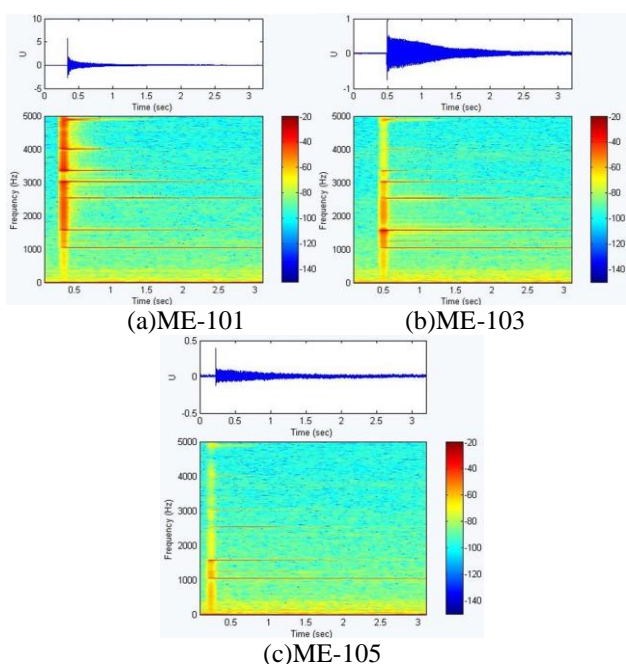


圖 14 不同敲擊鉗敲擊和弦琴片 A 點之聲音時頻圖

5. 結論

本文針對針對於和弦琴片探討加工實務對聲音特性的影響，建立一套和弦琴片之頻率補正方法，且針對補正之和弦琴片進行實驗模態分析，驗證實體結構是否等效於分析模型，透過敲擊和弦琴片不同位置與使用不同敲擊鉗進行聲音量測，獲得其聲音頻譜與發聲頻率，經比較選出合適的敲擊位置與敲擊鉗，最後本文成功修整和弦琴片之加工誤差，以及探討其聲音特性，並綜合本文結果討論，獲得以下幾點結論：

1. 成功設計且製作出於設計目標頻率約為 $\pm 1\%$ 以內之和弦琴片
2. 成功建立一套和弦琴片之補正方法，且能應用於其他種類之打擊樂器。
3. 藉由分析與實驗之模態參數比對，成功驗證實體結構等效於分析模型。
4. 敲擊 A 點其模態峰值較其他位置明顯，且前三個峰值分貝(dB)也較其他位置來的平均，藉此可推斷 A 點為最佳敲擊位置。
5. 使用 ME-103 敲擊鉗敲擊和弦音板，與其他鉗相較之下，較能激發主要之發聲模態，由此推斷 ME-103 為最佳敲擊鉗。

6. 參考文獻

- [1] 王栢村，趙天麒，謝明憲，2013，「具鐵琴和弦片之鐵琴製造方法及鐵琴和弦片之製造方法」，中華民國發明專利，發明第 I 409801 號。(專利權期間：2013 年 2 月 1 日至 2028 年 8 月 26 日)
- [2] 王栢村，謝明憲，趙天麒，2016，「鐵琴和弦片構造」，中華民國發明專利，發明第 I 515718 號。(專利權期間：2016 年 1 月 1 日至 2028 年 12 月 15 日)
- [3] 王栢村，謝明憲，趙天麒，2016，「具和弦片之鐵琴構造」，中華民國新型專利，新型第 M 516208 號。(專利權期間：2016 年 1 月 21 日至 2028 年 12 月 15 日)
- [4] B.T. Wang, and X.M. Jian, "Model Verification and Percussion Sound Characteristics of Metallophone with Chord Sound," *The 17th International Congress on Sound and Vibration*, Cairo, Egypt, submitted for presentation, 2010.
- [5] 王栢村，謝明憲，「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:A006，2009。
- [6] J. Petrolito, K.A. Legge, "Optimal Undercuts for the Tuning of Percussive Beams," *Journal of Acoustical Society of America* 102(4), pp 2432-2437, 1997.
- [7] J. Bretos, C. Santamaria, and J.A. Moral, "Finite Element Analysis and Experimental Measurements of Natural Eigenmodes and Random Responses of Wooden Bars Used in Musical Instruments," *Applied Acoustics*, Vol.56, pp 141-156, 1999.
- [8] N. McLachlan, "The application of new analyses and design methods to musical bells," *75th*

Acoustical Society of America Conference, New York, , pp. 1-8, 2004.

- [9] J. Ansari, "Finite Element Vibration Analysis and Modal Testing of Bells," *Proceedings of the 2006 IJME-INTERTECH Conference*, Union, NJ, USA, 2006.
- [10] M. Jing, "A theoretical study of the vibration and acoustics of ancient Chinese bells," *Journal of the Acoustical Society of America* 114(3), pp 1622-1628 2003.

Manufacturing Practice and Percussion Sound Characteristics for Chord Sound Plate

**Bor-Tsuen Wang¹, Yong-Shiang Hsu¹,
Shao-Wei Cheng¹, Chian-Hong Chen¹,
Chia-Hsien Huang¹, and Ying-Hui Wu²**

**¹Department of Mechanical Engineering,
National Pingtung University of Science and
Technology**

**²Machinery Division National Nei-Pu Senior
Agricultural-Industrial Vocational School**

ABSTRACT

Manufacturing error is of critical issue in making the percussion sound plate and affects the sound quality. This work aims to discuss the practical approach in manufacturing the chord sound plate (CSP) and its sound characteristics. From finite element analysis (FEA), the optimum shape of CSP is obtained such that natural frequencies and mode shapes of CSP meet the requirement of musical notes. Base on the designed CSP geometry, the CSP can be produced by laser cut. The made CSP is performed percussion test to measure the sound response and calibrate the difference of percussion sound frequencies from the chord sound frequencies. The correction strategy is suggested to modify the geometry shape so that the slight offset of natural frequencies can be fitted to the desired ones. The modified shape of CSP is manufactured and checked again for its percussion sound frequencies. Results show the frequency errors are in acceptable range for the made CSP by the offset adjustment. The CSP is then performed experimental modal analysis (EMA) to calibrate the FE model. The percussion sound test is also carried out for different striking locations and mallets to select the proper mallet and percussion location. The adjustment strategy is working well for the CSP and can be adopted for other similar sound plates.

Keywords: chord sound plate, manufacturing error, sound characteristics.

