



鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證

王栢村¹、簡孝名²

¹ 屏東科技大學機械工程系教授

² 屏東科技大學機械工程系研究生

E-mail: M9732014@mail.npust.edu.tw (簡孝名)

摘要

本文將針對鐵琴樂器所包含之12片不同音階鐵琴片，對敲擊後之敲擊音進行聲音特性之探討，並對鐵琴片進行有無加速度計於自由與實際邊界下之模型驗證，藉此建構出參數化之鐵琴片有限元素模型，以進行不同音階尺寸之鐵琴片分析。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，量測不同邊界下鐵琴片之模態參數，將分析與實驗所得到的模態參數進行比較修正後，可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。最後，運用所得到的鐵琴片有限元素模型進行不同音階之模擬預測。從結果得知，經驗證後之鐵琴片有限元素模型可實際用來模擬預測不同音階鐵琴片之模態特性。未來可利用此鐵琴片之有限元素模型快速的進行鐵琴片之理論分析，以獲得理論的模態參數，這將有助於往後對於鐵琴片設計製作。

關鍵字：鐵琴片、實際邊界、模型驗證、有限元素模型、實驗模態分析。

1. 前言

鐵琴片是西方的一種打擊樂器，在打擊樂器當中，鐵琴的聲音清脆、鮮明，既可以當旋律的主奏，亦可當旋律的伴奏，在配器的使用上變化性是相當高的。鐵琴是由許多不同尺寸音階的音板所組合而成的，主要是運用敲擊槌敲擊各個不同尺寸音階的鐵琴片音板來發出聲音，本文將探討鐵琴片結構之聲音特性，並對鐵琴片結構之自然頻率與模態振型差異及邊界的影響進行探討。

對於樂器的模態量測與特性以及聲音與振動間之關連性方面，王與林[1]運用不同的感測器對鐵琴片進行實驗模態分析之比較與驗證，從驗證結果得知麥克風與加速度計所量測之模態參數十分吻合，因此確認麥克風可運用在感測器之可行性。王與林[2]探討了不同材質之敲擊槌與不同的敲擊位置對鐵琴片模態特性之影響，從結果中看到結構之自然頻率振幅被激發出的程度會隨著敲擊槌的材質而有所變化，且發現當敲擊點偏移中心點時，便會激發出較多的模態，偏移的距離越大，被激發出的模態數也會越多。王等人[3]運用貝茲曲線法找出形狀最佳化之和弦鐵琴片設計，此設計方法可應用於不同和弦鐵琴片的設計開發或其他不同類型的打擊樂器使用。王等人[4]對一中國傳統樂

器銅鑼進行完整的模型驗證流程，藉此探討銅鑼振動與聲音特性之關連性。王與陳[5]對鑼形銅鑼做一完整的模型驗證，並運用麥克風做為感測器，藉此了解鑼形銅鑼振動與聲音之間的關連性。王與廖[6]對C音階木琴條進行實驗模態分析與理論有限元素分析之比較驗證，經驗證後得到最佳化之C音階木琴條之木琴條材料參數。Bork[7]藉由調整木琴片之外形以改變結構本身之自然頻率來管理敲擊之聲音變化，同時對共鳴器之探討有以下幾點發現，單一共鳴器之效果是主要造成調音效果的主因，而當同時加裝二支共鳴器時，其效果為造成延遲時間的延長。Chaigne and Doutaut[8]主要在探討運用木棒敲擊木琴片於時間域下之振動情形，並應用Euler-Bernoulli方程式作為理論基礎及使用Hertz's法則來敘述連接之線性彈性體。Doutaut *et al.* [9]使用木棒敲擊馬林巴琴及電顫琴，並結合中心差分法對得到的數據結果做探討，探討時間域下模型之聲音壓力輻射。Jing[10]主要在模擬古代國鐘之聲音及振動特性，針對單音及雙音之古代中國鐘進行模擬，同時也對古代中國鐘之形狀進行探討，以了解古代中國鐘之設計方法。

本文的主要目的是探討鐵琴片結構之聲音特性，並建構鐵琴片於自由及實際邊界下之有、無加速度計之參數化有限元素模型，接著進行鐵琴片於自由及實際邊界下之有、無加速度計之完整的模型驗證。

2. 模型驗證流程說明

圖1為模型驗證之流程圖，模型驗證流程分為理論的有限元素分析與實驗的實驗模態分析兩個部份，理論的部份運用有限元素分析軟體進行模態分析以獲得結構物本身的理論模態參數，包含自然頻率與模態振型，若要比對頻率響應函數時，便要再進行簡諧分析以獲得理論之頻率響應函數；實驗的部份運用實驗模態分析方法對結構物進行頻率響應函數的量測，再經由模態參數擷取軟體獲得結構本身實際的模態參數，包含自然頻率、阻尼比與模態振型。最後將兩者所得到的模態參數進行比較驗證，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，則可得到等效於實際結構的理論有限元素分析模型，獲得等效分析模型後，未來若要進行結構的響應預測分析時，便可利用此等效分析模型進行後續的預測與分析。

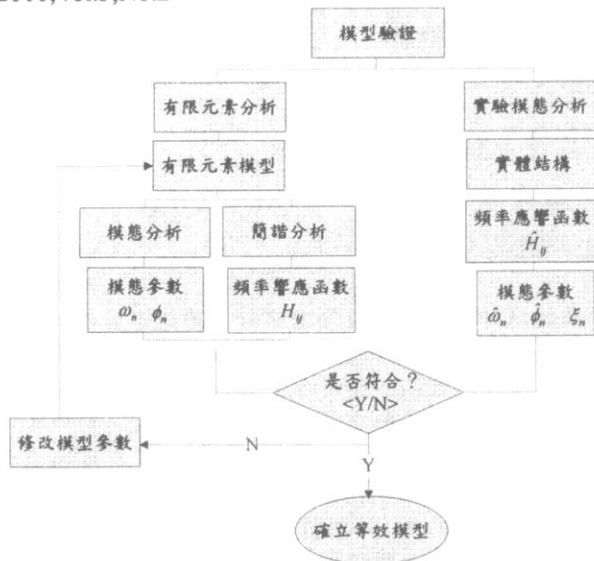


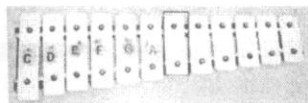
圖1、模型驗證之流程圖

3. 有限元素分析

圖2為鐵琴實體結構圖，表1為鐵琴片與加速度計之材料參數表。應用ANSYS軟體對鐵琴片進行有限元素分析，(1)首先採用線性立方體元素(Solid45)來建構鐵琴片與加速度計，並以彈簧元素(Combin14)來模擬棉墊。(2)元素分割方面如圖3、圖4與圖5所示，以元素尺寸1.25mm對棉墊接觸部份進行Mapped mesh分割；以元素尺寸1.375mm對鐵琴片第1、3部份進行Sweep mesh分割；以元素尺寸1.25mm對鐵琴片第2部份進行Sweep mesh分割；長度方向以元素尺寸1.375mm、寬度方向1.25mm、厚度方向1.25 mm對加速度計進行Mapped mesh分割。(3)位移限制方面分別有兩種邊界條件限制，模擬自由邊界下則無需設定任何位移限制條件；模擬棉墊之實際邊界下，則將彈簧元素(Combin14)底部節點設定全固鎖(UX=UY=UZ=0)，並設定彈簧元素(Combin14)能做動的方向僅有Z方向的位移。(4)負荷條件方面，模態分析不需設定任何負荷條件。

表1、材料參數表

	楊氏係數 (GPa)	密度 (kg/m ³)	蒲菘比	彈性係數 (N/m)
鐵琴片	197.37	7468	0.28	1
加速度計	1.55	4968	0.33	x



(a)C7 鐵琴片



(b)側視圖

圖2、鐵琴實體結構圖

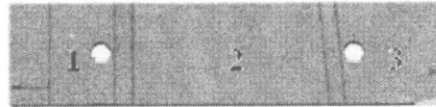
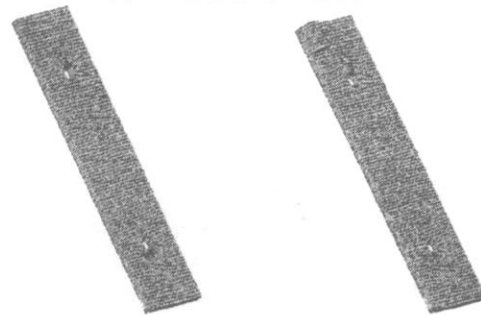
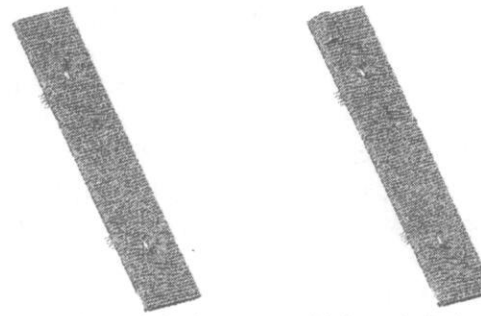


圖3、元素分割示意圖



(a)無加速度計

圖4、C6音階之有限元素模型圖(自由邊界)



(a)無加速度計

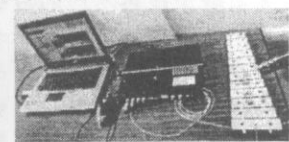
圖5、C6音階之有限元素模型圖(實際邊界)

4. 實驗模態分析

圖6為實驗架構圖，圖6(a)為模擬自由邊界、圖6(b)為模擬實際邊界，激振器如圖7所示，使用橡膠與鋼質兩種不同材質的衝擊槌進行實驗敲擊，敲擊的規劃點如圖8所示共有16個敲擊規劃點，以麥克風做為感測器進行實驗模態分析量測。表2為實驗敲擊規劃表，由表3可知C6音階進行了自由/實際邊界下、有/無加速度計之完整的實驗敲擊量測，具有完整的C6音階鐵琴片之實驗敲擊數據；C7音階在無加速度計的量測上，進行了自由/實際邊界下完整的實驗敲擊量測，而在有加速度計的量測上，僅獲得C7音階鐵琴片之自然頻率數據。因參數化鐵琴片有限元素模型需對不同音階鐵琴片進行模態參數之預測與驗證，所以對C6~G7各音階鐵琴片進行了僅獲得音階鐵琴片之自然頻率數據實驗量測，以獲得驗證的實驗數據資料。



(a)自由邊界



(b)實際邊界

圖6、實驗架構圖



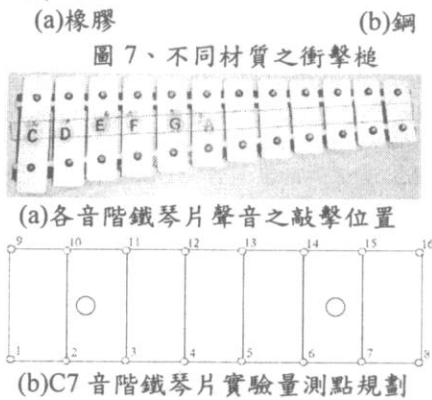


圖8、鐵琴片敲擊位置示意圖

表2、實驗敲擊規劃表

鐵琴片	邊界	自由邊界	實際邊界
C6	無加速度計/麥克風	○	○
	有加速度計/麥克風	○	○
C7	無加速度計/麥克風	○	○
	有加速度計/麥克風	△	△
C6-G7	無加速度計/麥克風	x	△

備註：○為具有完整鐵琴片之實驗敲擊數據
△為僅獲得鐵琴片之自然頻率數據

5. 結果與討論

首先，運用模型驗證方法對C6與C7音階進行實驗量測與理論分析求解，將兩者所得到的數據資料進行比較驗證，當比對的結果十分吻合時，所建構出的有限元素分析模型將可等效於實際的結構物。接著對量測獲得的鐵琴片敲擊音進行聲音特性之探討，最後將運用參數化之鐵琴片有限元素模型，對不同音階尺寸的鐵琴片進行分析與實驗量測自然頻率的比較。

5-1. C6與C7音階鐵琴片之模型驗證

表3為C6音階鐵琴片自然頻率對照表、表4為C7音階鐵琴片自然頻率對照表。表3與表4皆分為四個部份做探討，包含自由/實際邊界下、有/無加速度計四種。由表中C6與C7音階鐵琴片自然頻率的比對可看到自然頻率的誤差值皆在±3%以內，顯示自然頻率的比對是成功的。而在模態保證指標(MAC)方面，因實驗所量測得到的實驗振型擺動不完全造成有部份的MAC值是偏低的，但從實驗與理論分析的動畫中可確認實驗獲得的模態振型與理論分析的模態振型是有相當的吻合度的，以整體來說，此次的模型驗證是成功的。

5-2. 鐵琴片聲音特性之探討

表5為不同感測器於鐵琴片之自然頻率比較表，從表5中可看到麥克風與加速度計所量測得到的自然頻率值十分吻合，證明運用麥克風作為感測器是可行的。

表6為不同敲擊槌於鐵琴片之自然頻率與dB比較表，從表6中可得知不同的敲擊槌所激發的自然頻

率值雖然十分吻合，但不同材質所激發出來的聲音峰值卻有明顯的差異，軟的材質易激發出低頻的頻率聲音峰值，硬的材質則易激發出高頻的頻率聲音峰值，如圖9所示。

圖9為不同敲擊槌於鐵琴片之聲音頻譜響應圖、圖10為不同感測器於鐵琴片之頻譜響應圖，圖9與圖10皆有附上各個頻率峰值的模態振型圖形。從表7各音階鐵琴片之自然頻率比較表(實際邊界下)中，可得知圖9中運用橡膠槌所激發之第一振動模態頻率值與標準音高是相同的，因此可推論鐵琴片的第一振動模態為鐵琴片之聲音主頻率。

圖9中，鐵琴樂器運用橡膠槌進行敲擊激振所激發的自然頻率峰值中，最高的峰值值分別為1050.0Hz與2106.3Hz，且這兩個峰值所對應的聲音分貝值也是所有激發的聲音中聲音分貝值最高的，因此，當運用敲擊棒敲擊鐵琴樂器時，人耳所聽見的聲音為1050.0Hz與2106.3Hz所發出之聲音頻率。

5-3. 參數化鐵琴片有限元素模型之預測與驗證

表7為各音階鐵琴片之自然頻率比較表(實際邊界下)，從表7裡可看到標準音高、實驗與理論分析的自然頻率值的比較，一般的樂器皆是運用調音器做為音準的確認，而調音器對樂器所發出之音頻也有容許的誤差量[11]，其音頻的誤差量為20cent，而1Hz為3cent，因此得知樂器發聲音頻的誤差量為±6.67Hz。由表中可得知此參數化鐵琴片有限元素模型模擬出的自然頻率值已十分接近實驗所量測的實驗數據，但以音樂的角度來評估此參數化鐵琴片有限元素模型是仍具有改善空間的。

6. 結論

本文建立了一個參數化鐵琴片有限元素模型，並藉由模型驗證流程的比對驗證，對此理論分析模型做進一步的確認，確認此參數化鐵琴片有限元素模型的可行性與準確性，同時對實驗量測的數據進行探討，以了解鐵琴片之聲音特性，藉由以上的比較探討可得知以下結論：

1. 有限元素模型之模型驗證：C6與C7音階自由/實際邊界下、有/無加速度計的自然頻率誤差皆在±3%以內，且在模態保證指標(MAC)的比對裡，實驗獲得的模態振型與理論分析的模態振型是有相當的吻合度的，以整體來說，此次的模型驗證是成功的。
2. 自由/實際邊界之邊界影響：從實驗所量測得到的鐵琴片自然頻率中可以看到實際邊界下的自然頻率值的會略高於自由邊界下的鐵琴片，代表鐵琴片於實際的邊界條件下是會受到些微邊界效應的影響。
3. 有/無加速度計之影響：C6音階鐵琴片重量為82g，加速度計重量為1.5g，鐵琴片的重量約為加速度計55倍，從表4與表5的資料中可以看



- 到僅 1/55 的質量效應在自由邊界下造成自然頻率誤差達 20.8Hz, 而在實際邊界下有減低質量效應的效果, 自然頻率誤差量降至 15.7Hz, 由此得知質量效應對小型結構物其影響是較大的。
4. 不同感測器對於鐵琴片聲音與振動特性之影響: 從表 5 可得知運用麥克風作為感測器是可行的, 因為麥克風所量測得到的自然頻率值與加速度計量測得到的十分吻合。
 5. 不同敲擊槌作用於鐵琴片之聲音頻譜響應差異: 從表 6 中可發現雖然不同的敲擊槌所激發的自然頻率值十分吻合, 但不同材質所激發出來的聲音響度卻有明顯的差異, 軟的材質易激發出低頻的頻率聲音峰值, 硬的材質則相反, 因此, 在敲擊樂器時所使用的敲擊材質是需要列入考量的。
 6. 鐵琴片聲音特性: 運用橡膠槌所激發之第一振動模態頻率值與標準音高相同, 可推論鐵琴片的第一振動模態即為鐵琴片之聲音主頻率, 且第一振動模態頻率值所對應的聲音分貝值也是所激發的聲音中聲音分貝值最高的, 因此, 當運用敲擊棒敲擊鐵琴樂器時, 人耳所聽見的聲音為第一個振動模態對應之鐵琴片聲音頻率。
 7. 參數化鐵琴片有限元素模型的可行性與準確性: 從表 7 的比較可得知此參數化鐵琴片有限元素模型模擬出的自然頻率值已十分接近實驗所量測的實驗數據, 但以音樂的角度來評估此參數化鐵琴片有限元素模型是仍具有改善空間的。
- 本文所建構的參數化鐵琴片有限元素模型, 期盼未來在對鐵琴片進行研究與開發時, 能有效的幫助到往後對於鐵琴片設計製作以及振動與聲學特性之相關研究。

7. 參考文獻

1. 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。
2. 王栢村, 林怡馨, 2007, 「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」, 2007 中華民國音響學會年會暨第二屆論文發表會, 台北, 論文編號: C5。
3. 王栢村, 謝明憲, 趙天麒, 2008, 「基於聲音特性之鐵琴片形狀設計」, 中華民國音響學會第二十一屆學術研討會, 台中, 論文編號: A1-3。
4. 王栢村, 李雨軒, 張志偉, 2002, 「銅鑼振動與聲音特性之探討」, 中華民國振動與噪音工程學會第十屆學術研討會論文集, 台北, 第 245-252 頁。
5. 王栢村, 陳新正, 「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論文集, 論文編號: A1-4。

6. 王栢村, 廖偉廷, 「木琴條之實驗模態分析與模型驗證」, 中華民國振動與噪音工程學會第十七屆學術研討會論文集, 台北, 論文編號: B-06。
7. I. Bork, "Practical tuning of xylophone bars and resonators," *Applied Acoustics* 46, 103-127 (1995).
8. A. Chaigne and V. Doutaut, "Numerical simulations of xylophones. I. time-domain modelling of the vibrating bars," *Journal of the Acoustical Society of America* 101(1), 539-557 (1997).
9. V. Doutaut, D. Matignon and A. Chaigne, "Numerical simulations of xylophones. II. time-domain modelling of the resonator and of the radiated sound pressure," *Journal of the Acoustical Society of America* 104(3), 1633-1647 (1998).
10. M. Jing, "A theoretical study of the vibration and acoustics of ancient Chinese bells," *Journal of the Acoustical Society of America* 114(3), 1622-1628 (2003).
11. <http://tw.myblog.yahoo.com/jw!49dfDCOaHU5jqWvLKXE-/article?mid=500>

Sound Characteristic Analysis and Verification of Metallophone Instrument

Bor-Tsuen Wang¹ and Xiao-Ming Jian²

- ¹ Professor, Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology
- ² Graduate Student, Department of Materials Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

Abstract

This work aims to discuss the percussion sound of the metallophone instrument that contains a dozen of metallophone bars producing different notes. The modal parameters of a metallophone bar is experimentally obtained for with and without the accelerometer mass effect in both free and practical boundaries. The finite element analysis (FEA) is also adopted to construct the parametric FE model for analyzing all of the metallophone bars with different sizes. First, the FE models for both free and real boundaries are constructed and performed modal analysis. The corresponding experimental modal analysis (EMA) on both boundaries are, respectively, performed. The modal parameters obtained from FEA and EMA can then be compared to update and validate the FE models in both boundaries. Finally, the verified FE model is adopted to predict the modal properties of the metallophone bars for different notes. Results show that the modal sound response is well calibrated with the experiments. The developed parametric FE model for the metallophone in real boundary can be useful for the design and manufacturing of the metallophone bars.



Keywords : metallophone · real boundary · finite element analysis (FEA) · experimental modal analysis (EMA).

表 3、C6 音階鐵琴片自然頻率對照表

(a)自由邊界(無加速度計)

Mode	模態振型	FEA (Hz)	麥克風 EMA(Hz)	Err (%)	MAC 值	阻尼比(%)
1	(3,1)	1050.0	1050.0	0.000	0.976	0.238
2	(2,2)	2545.5	2571.9	-1.026	0.355	0.070
3	(4,1)	2868.1	2850.0	0.635	0.946	0.116
4	(3,2)	5200.0	5240.6	-0.775	0.470	0.043
5	(5,1)	5610.6	5562.5	0.865	0.900	0.072
6	(4,2)	8240.5	8290.6	-0.605	0.501	0.039
7	Y 方向彎曲模態	8852.5	X	X	X	X
8	(6,1)	9314.2	9221.9	1.001	0.891	0.072

(b)實際邊界(無加速度計)

Mode	模態振型	FEA (Hz)	麥克風 EMA(Hz)	Err (%)	MAC 值	阻尼比(%)
1	(3,1)	1050.0	1050.0	0.000	0.760	0.257
2	(2,2)	2545.5	2578.1	-1.265	0.355	0.154
3	(4,1)	2868.1	2856.3	0.415	0.757	0.164
4	(3,2)	5200.0	5237.5	-0.716	0.012	0.057
5	(5,1)	5610.5	5562.5	0.863	0.659	0.113
6	(4,2)	8240.5	8290.6	-0.605	0.069	0.085
7	Y 方向彎曲模態	8852.5	X	X	X	X
8	(6,1)	9314.1	9225.0	0.966	0.191	0.106

(c)自由邊界(有加速度計)[1]

Mode	模態振型	FEA (Hz)	加速度計 EMA(Hz)	Err (%)	MAC 值	阻尼比(%)	麥克風 EMA(Hz)	Err (%)	MAC 值	阻尼比(%)
1	(3,1)	1029.2	1029.2	0.000	0.950	0.1885	1029.3	-0.010	0.834	0.1795
2	(2,2)	2455.1	2530.3	-2.972	0.920	0.0666	2530.0	-2.960	0.837	0.0675
3	(4,1)	2831.8	2812.5	0.686	0.815	0.0935	2812.5	0.686	0.787	0.0938
4	(3,2)	5030.0	5149.1	-2.313	0.864	0.0926	5149.0	-2.311	0.839	0.0978
5	(5,1)	5544.1	5492.9	0.932	0.666	0.1149	5492.5	0.939	0.622	0.1239
6	(4,2)	7988.1	8153.0	-2.023	0.868	0.4369	8159.6	-2.102	0.818	0.3969
7	Y 方向彎曲模態	8541.4	X	X	X	X	X	X	X	X
8	(6,1)	9160.8	9057.5	1.140	0.601	0.6599	9030.5	1.443	0.530	0.6669

(d)實際邊界(有加速度計)[1]

Mode	模態振型	FEA (Hz)	加速度計 EMA(Hz)	Err (%)	MAC 值	阻尼比(%)	麥克風 EMA(Hz)	Err (%)	MAC 值	阻尼比(%)
1	(3,1)	1028.8	1034.3	-0.532	0.940	0.2645	1033.7	-0.474	0.708	0.2725
2	(2,2)	2454.2	2523.0	-2.727	0.843	0.1298	2523.1	-2.731	0.460	0.1288
3	(4,1)	2830.7	2832.1	-0.049	0.820	0.1348	2832.3	-0.056	0.660	0.1388
4	(3,2)	5028.1	5144.1	-2.255	0.227	0.0629	5144.1	-2.255	0.219	0.0624
5	(5,1)	5542.0	5515.2	0.486	0.039	0.0979	5517.3	0.448	0.073	0.0886
6	(4,2)	7985.1	8162.4	-2.172	0.022	0.1559	8165.6	-2.210	0.138	0.1539
7	Y 方向彎曲模態	8538.2	X	X	X	X	X	X	X	X
8	(6,1)	9157.3	9116.1	0.452	0.022	0.2359	9113.2	0.484	0.091	0.1929

表 4、C7 音階鐵琴片自然頻率對照表

(a)自由邊界(無加速度計)

Mode	模態振型	FEA(Hz)	麥克風 EMA(Hz)	Err(%)	MAC 值	阻尼比(%)
1	(3,1)	2110.1	2103.1	0.333	0.980	0.118
2	(2,2)	3625.9	3650.0	-0.660	0.935	0.078
3	(4,1)	5727.4	5703.1	0.426	0.931	0.060
4	(3,2)	7541.5	7596.9	-0.729	0.968	0.050

(b)實際邊界(無加速度計)

Mode	模態振型	FEA(Hz)	麥克風 EMA(Hz)	Err(%)	MAC 值	阻尼比(%)
1	(3,1)	2110.1	2106.3	0.180	0.915	0.140
2	(2,2)	3625.9	3653.1	-0.745	0.786	0.087
3	(4,1)	5727.4	5703.1	0.426	0.951	0.106
4	(3,2)	7541.5	7593.8	-0.689	0.530	0.039

(c)自由邊界(有加速度計)

Mode	模態振型	FEA(Hz)	麥克風 EMA(Hz)	Err(%)
1	(3,1)	2057.8	2062.5	-0.228



2	(2,2)	3462.5	3521.9	-1.687
3	(4,1)	5607.8	5596.9	0.195
4	(3,2)	7237.6	7318.8	-1.109

表 4、C7 音階鐵琴片自然頻率對照表(續)

(d)實際邊界(有加速度計)

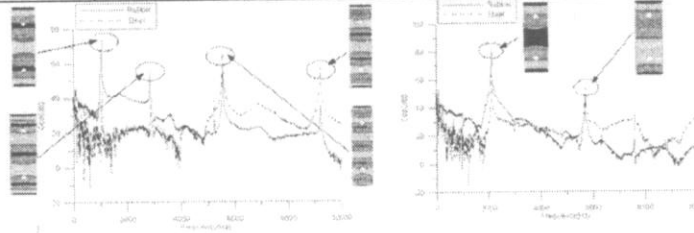
Mode	模態振型	FEA(Hz)	麥克風 EMA(Hz)	Err(%)
1	(3,1)	2057.8	2065.6	-0.378
2	(2,2)	3462.6	3512.5	-1.421
3	(4,1)	5607.8	5600.0	0.139
4	(3,2)	7237.6	7340.6	-1.403

表 5、不同感測器於鐵琴片之自然頻率比較表(實際邊界下具質量效應)

Mode	感測器	加速度計		麥克風		誤差
		自然頻率(Hz)	dB	自然頻率(Hz)	dB	自然頻率(Hz)
1		1034.4	50.7	1034.4	50.7	0.0
2		2525.0	45.1	2525.0	45.1	0.0
3		2834.4	47.8	2834.4	47.8	0.0
4		5143.8	62.3	5143.8	62.3	0.0
5		5518.8	56.1	5518.8	56.1	0.0
6		8168.8	53.5	8168.8	53.5	0.0
7		9118.8	47.3	9112.5	47.3	6.3

表 6、不同敲擊鉞於鐵琴片之自然頻率與 dB 比較表(敲擊 C6 鐵琴片中心點)

Mode	感測器	鋼鉞		橡膠棒		差異量	
		自然頻率(Hz)	dB	自然頻率(Hz)	dB	自然頻率(Hz)	dB
1		1050.0	43.8	1050.0	74.0	0.0	30.2
2		2859.4	37.7	2856.3	56.7	3.1	19.0
3		5240.6	38.5	5240.6	34.0	0.0	-4.5
4		5565.6	65.8	5559.4	54.3	6.2	-11.5
5		9225.0	57.0	9228.1	34.9	-3.1	-22.1



(a)C6 音階

(b)C7 音階

圖 9、不同敲擊鉞於鐵琴片之聲音頻譜響應圖(敲擊鐵琴片中心點)

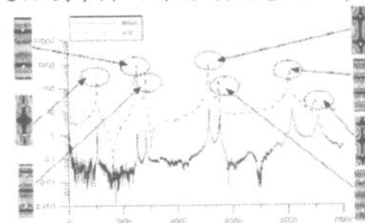


圖 10、不同感測器於鐵琴片之頻譜響應圖(C6 實際邊界下具質量效應)

表 7、各音階鐵琴片之自然頻率比較表(實際邊界下)

	標準音高(Hz)	EMA (Hz)	FEA (Hz)	EMA 與標準音高	FEA 與 EMA	EMA 與標準音高	FEA 與 EMA
				誤差(Hz)		誤差(%)	
C6	1046.5	1050.0	1050.0	3.5	0.0	0.334	0
D6	1174.7	1181.3	1191.9	6.6	10.6	0.558	0.902
E6	1318.5	1321.9	1319.5	3.4	-2.4	0.256	-0.180
F6	1396.9	1403.1	1418.2	6.2	15.1	0.446	1.074
G6	1568.0	1575.0	1598.8	7.0	23.8	0.446	1.511
A6	1760.0	1768.8	1803.5	8.8	34.7	0.497	1.965
B6	1975.5	1981.3	2010.5	5.8	29.2	0.291	1.476
C7	2093.0	2106.3	2100.1	13.3	-6.2	0.633	-0.292
D7	2349.3	2359.4	2381.5	10.1	22.1	0.429	0.938



E7	2637.0	2643.8	2630.7	6.8	-13.1	0.256	-0.494
F7	2793.8	2800.0	2794.8	6.2	-5.2	0.222	-0.186
G7	3136.0	3137.5	3102.9	1.5	-34.6	0.048	-1.103