

# 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

王栢村<sup>1</sup>林怡馨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>屏東科技大學機械工程系 教授

<sup>2</sup>屏東科技大學機械工程系 研究生

E-mail:wangbt@mail.npust.edu.tw

## 摘要

本文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，對鐵琴片之振動做一系列的探討，首先，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，包括自然頻率、模態振型及阻尼比，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，由結果顯示，理論有限元素分析與實驗模態分析所求得之模態參數均相當吻合，故成功地完成模型之驗證。且由實驗結果顯示，麥克風所量得的聲音響應與加速度計所量得之振動模態是相對應的，因此以麥克風當感測器進行模態分析這個方法是可行的。本文運用加速度計感測器與麥克風對鐵琴片進行實驗模態分析，未來可利用此方法進行鐵琴片的形狀設計與聲音預測，文中所提及的實驗方法將有助於往後對樂器進行振動分析之研究。

**關鍵詞：**鐵琴片、加速度計、麥克風、實驗模態分析。

## 1. 前言

中國樂器有著音色優美柔和、聲音清脆圓潤、音韻特殊、演練較易、價格低廉攜帶便利等優點，但相對的中國樂器也是有缺點的如音域較小、音階短缺且欠準確、音量不足難適應大軍樂、規格與演奏方式未統一、仍停留在手工製造階段等缺點需要改進。

在演奏時，每個樂器之結構振動方式皆不相同，所以在音色、音質、音韻上就有很大的差異。過去對於樂器振動的分析，大多以加速度計感測器進行樂器振動量測分析，現今科技發達，不再侷限於加速度計當感測元件，而可使用角加速度計、壓電薄膜、麥克風等感測元件進行振動分析。

Bretos et al. [1]以有限元素分析木琴之木條的振動模態，探討木條均勻或凹刻截面對其自然頻率及模態振型之影響，得知木條之非均勻材料特性，其楊氏係數對側向振動模態影響最鉅。Doutaut et al. [2]以自由樑理論分析木琴受敲擊的時間域及頻率響應預測，其理論分析結果與實驗量測結果有良好的吻合性。王等人[3]藉由有限元素分析(FEA)軟體與實驗模態分析(EMA)來探討銅鑼之振動與聲音特性，實驗量測結果與理論預測結果有良好的吻合性，因此藉由有限元素分析軟體進行分析的方法是可行的。王和蘇[4]同樣以 EMA/FEA 探討振動與聲音間的關連性，王等人[5]則對吉他共鳴箱的振動特性做比較。

Wang[6]利用三種不同的驅動器與感測器組合成九種不同的量測方式，藉由這九種量測方式，可得知當實驗中若採用移動感測器之方法時，實驗所得到的模態振型是感測器之模態振型，若採用移動驅動器之方法時，實驗所得到的模態振型是驅動器的模態振型。王等人[7]分別用加速度計與旋轉角加速度計進行實驗模態分析，由實驗結果顯示，加速度計與旋轉角加速度計所量測得知的自然頻率、阻尼比、模態振型、MAC 及頻率響應函數均相當吻合，因此證實旋轉角加速度計可當作實驗模態分析之感測器。

本文採用加速度計與麥克風當感測器對鐵琴片進行結構振動分析，主要分析目標如下：

1. 鐵琴片之模型驗證：以有限元素分析架構有限元素模型，得到理論之模態參數及頻率響應函數。再以加速度計感測器進行實驗模態分析，求得實驗之模態參數及頻率響應函數。以實驗模態分析的結果為基準，對有限元素分析進行比對驗證，包括自然頻率、振型、頻率響應函數，進而確認模型的正確性，未來可做為其他鐵琴片之頻率預測分析。
2. 麥克風為感測器之可行性：由衝擊錘的敲擊，佐以麥克風當感測器，將所量得的訊號輸入頻譜分析儀做分析，將加速度計所量得的模態振型與麥克風量測得之模態振型進行比對，進而評估麥克風當感測器的可行性。

## 2. 有限元素分析(FEA)

圖 1 為常見的鐵琴，本文擬分析鐵琴上的 C 音階鐵琴片，鐵琴片長、寬、厚分別為 122mm、30mm、3mm，表 1 為鐵琴片材料性質。



圖 1、鐵琴實體圖

表 1、材料性質對照表

| 楊氏係數(N/m <sup>2</sup> ) | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 浦松比  | 彈簧常數(N/m) |
|-------------------------|------------------------|------|-----------|
| 0.1847×10 <sup>12</sup> | 7468                   | 0.27 | 5125      |

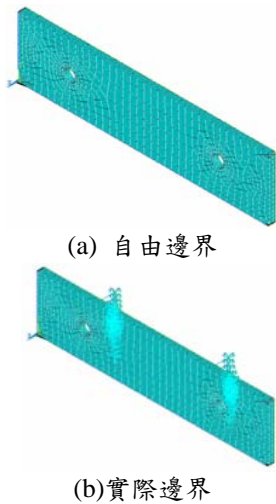


圖 2、鐵琴片有限元素模型示意圖

本文採用 ANSYS 分析軟體進行有限元素分析，圖 2(a)為鐵琴片自由邊界之有限元素模型示意圖，假設鐵琴片材料為等向性且為均質性，並符合虎克定律之假設，所以，採用線性立體元素(solid45)來架構鐵琴片。元素分割方面，長度方向分割 36 等分，寬度方向分 15 等分，厚度方向分 1 層。位移限制負荷條件方面，模擬自由邊界的鐵琴片在模態分析中不用設定負荷，簡諧分析中在衝擊鎚施力位置設一單位的外力，以求得對應之頻率響應函數。

首先進行模態分析(Modal Analysis)求出模態參數及振型。令楊氏係數  $E$ 、浦松比  $\nu$  為設計變數，經由最佳化分析使理論分析和實驗分析得到的自然頻率誤差最小。而後，再進行簡諧分析(Harmonic Analysis)，以求出頻率響應函數。

圖 2(b)為鐵琴片實際邊界之有限元素模型示意圖，其架構元素、元素分割及位移限制負荷條件的設定與自由邊界相同，鐵琴片與基座的接觸狀態採用三維彈簧阻尼元素(COMBIN14)來架構。

首先進行模態分析(Modal Analysis)求出模態參數及振型。楊氏係數  $E$ 、及浦松比  $\nu$  已由自由邊界模型驗證求得，令彈簧常數  $k$  為設計變數，利用最佳化分析使理論和實驗所得到的自然頻率誤差最小，最佳化之彈簧常數為 5125 (N/m)。而後，再進行簡諧分析(Harmonic Analysis)，以求出頻率響應函數。

### 3. 實驗方法步驟

為對自由邊界之鐵琴片進行實驗模態分析，實驗架構圖如圖 3 所示，首先，將鐵琴片懸掛於一支架上以模擬自由邊界，並在鐵琴片上畫分為 65 個敲擊點，加速度計固定在第 65 個點上，麥克風以距離鐵琴 5cm 作基準進行量測，如圖 4 所示，以衝擊鎚敲擊鐵琴片上每一個測試點，由加速度計感測器量取鐵琴片之響應訊號。

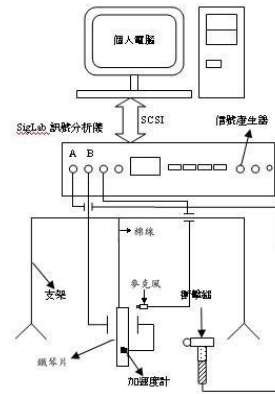


圖 3、實驗模態分析設備架設圖

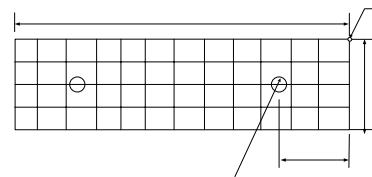


圖 4、鐵琴片敲擊點規劃圖

經過放大器將訊號傳入頻譜分析儀，頻寬為 0~10000Hz，解析度 8192 條，頻譜分析儀對輸入模組之訊號作快速傅立葉轉換，求得鐵琴片之頻率響應函數和關聯性函數，之後再將頻率響應函數以 ME'Scope VES 軟體作曲線嵌合(Curve Fitting)。藉此獲得模態參數，包括自然頻率、阻尼比和模態振型。

對於實際邊界之鐵琴片實驗的儀器架設方式與鐵琴片自由邊界實驗是一樣的，只是受測物(鐵琴片)以實際情形靜置於海棉墊基座上。

### 4. 結果與討論

首先進行模型驗證，圖 5 為驗證流程圖，模型驗證的主要在確認有限元素模型是否能代表實際模型，若理論與實驗得到之模態參數比對結果不佳，則需對有限元素模型進行修改，直到有限元素模型可以代表實際模型為止。而後，將加速度計與麥克風所量得的结果進行比對，探討麥克風當感測器進行實驗模態分析(EMA)的可行性。

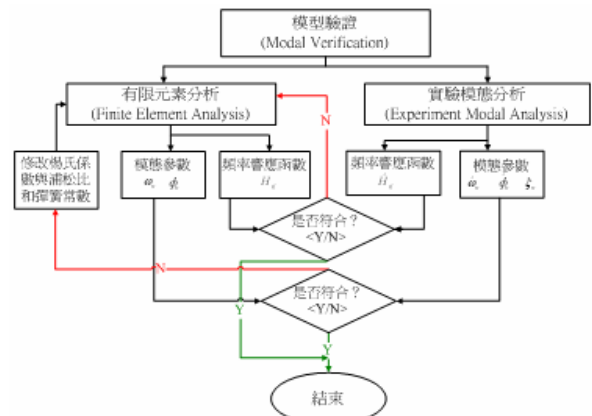
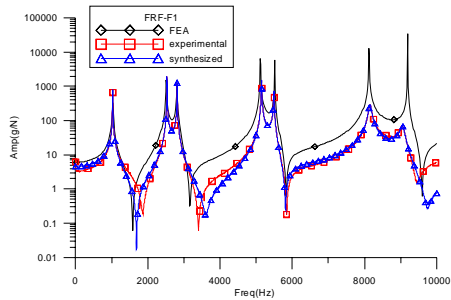
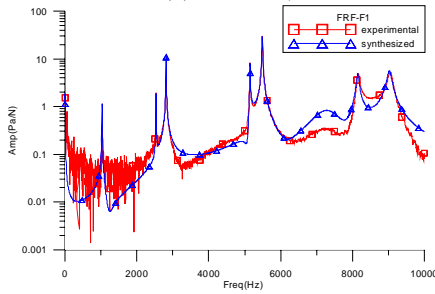


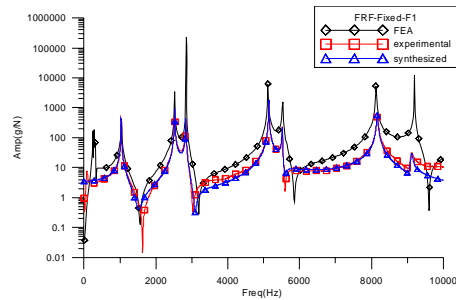
圖 5、模型驗證流程圖



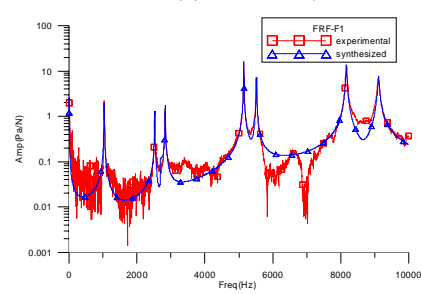
(a) 加速度計



(b) 麥克風



(a) 加速度計



(b) 麥克風

圖 6、自由邊界不同點(H<sub>65,1</sub>)頻率響應函數圖 圖 7、實際邊界不同點(H<sub>65,1</sub>)頻率響應函數圖

表 2、自然頻率(Hz)對照表

(a) 自由邊界

| 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)    | 1024.9   | 1029.2        | -0.004  | 0.9734 | 0.1885  | 1029.3       | -0.004  | 0.8574 | 0.1795  |
| 2    | (2,2)    | 2499.9   | 2530.3        | 0.012   | 0.9538 | 0.0666  | 2530.0       | -0.011  | 0.9024 | 0.0675  |
| 3    | (4,1)    | 2807.7   | 2812.5        | -0.072  | 0.9293 | 0.0935  | 2812.5       | -0.001  | 0.903  | 0.0938  |
| 4    | (3,2)    | 5110.9   | 5149.1        | -0.007  | 0.9238 | 0.0926  | 5149.0       | -0.007  | 0.7796 | 0.0978  |
| 5    | (5,1)    | 5504.5   | 5492.9        | 0.002   | 0.8165 | 0.1149  | 5492.5       | 0.002   | 0.7702 | 0.1239  |
| 6    | (4,2)    | 8103.0   | 8153.0        | -0.006  | 0.9339 | 0.4369  | 8159.6       | -0.006  | 0.8578 | 0.3969  |
| 7    | Y 方向彎曲模態 | 8620.9   | X             | X       | X      | X       | X            | X       | X      | X       |
| 8    | (6,1)    | 9177.1   | 9057.5        | 0.013   | 0.7522 | 0.6599  | 9030.5       | 0.016   | 0.6682 | 0.6669  |

(b) 實際邊界

| 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)    | 1029.7   | 1034.3        | -0.004  | 0.9596 | 0.2645  | 1033.7       | -0.003  | 0.7358 | 0.2725  |
| 2    | (2,2)    | 2517.3   | 2523.0        | -0.002  | 0.8759 | 0.1298  | 2523.1       | -0.002  | 0.4731 | 0.1288  |
| 3    | (4,1)    | 2840.0   | 2832.1        | 0.002   | 0.9047 | 0.1348  | 2832.3       | 0.002   | 0.7276 | 0.1388  |
| 4    | (3,2)    | 5123.4   | 5144.1        | -0.004  | 0.7147 | 0.0629  | 5144.1       | -0.004  | 0.2292 | 0.0624  |
| 5    | (5,1)    | 5533.0   | 5515.2        | 0.003   | 0.8569 | 0.0979  | 5517.3       | 0.002   | 0.082  | 0.0886  |
| 6    | (4,2)    | 8127.0   | 8162.4        | -0.004  | 0.8266 | 0.1559  | 8165.6       | -0.004  | 0.1431 | 0.1539  |
| 7    | Y 方向彎曲模態 | 8642.0   | X             | X       | X      | X       | X            | X       | X      | X       |
| 8    | (6,1)    | 9201.3   | 9116.1        | 0.009   | 0.1459 | 0.2359  | 9113.2       | 0.009   | 0.118  | 0.1929  |

#### 4.1 自由邊界鐵琴片之模型驗證

將實驗所得的結果與有限元素分析之結果進行比對，其中包括頻率響應函數、自然頻率及模態振型，藉由模型驗證進而確定有限元素模型之正確性。

##### 1. 頻率響應函數

圖 6 為不同點(H<sub>65,1</sub>)頻率響應函數圖，圖 6(a)為使

用加速度計當感測器所量得之不同點頻率響應函數圖，圖 6(b)為使用麥克風當感測器量得之不同點頻率響應函數圖；在圖 6(a)中，分別有理論分析(FEA)、實驗(experimental)模態分析及曲線嵌合(synthesized)而成的頻率響應函數曲線，實驗與理論分析結果的共振尖峰值在頻寬 6000Hz 前有相當的吻合性；在圖 6(b)中，實驗與曲線嵌合的結果相當吻合，證明曲線嵌合成功。將圖

6(a)與圖 6(b)相對照，可發現在兩張圖在實驗分析之共振頻率有相對應情形，唯有高頻的部分有些微的誤差。

## 2. 模態參數

表 2(a)為經由最佳化分析後的理論分析與實驗模態分析所得之自然頻率比對表，表 3(a)為理論分析與實驗模態分析所得之模態振型對照表，綜合討論如下：

- (1) 在表 2(a)的自然頻率比對表中，加速度計與麥克風所量得之自然頻率誤差百分比皆在 $\pm 1\%$ 以下，且有正負誤差，因此自然頻率比對成功；而理論有限元素分析 (FEA) 的第 7 個自然頻率並無對應到任何實驗模態分析 (EMA) 頻率值，乃因該模態為  $y$  方向彎曲模態，不論是振動或聲音，在  $z$  方向敲擊，均無法激發該模態，故無法量測得到。
- (2) 一般而言，若實驗與理論的模態振型有良好的關連性，則 MAC(模態參數品質保證指標)數值會大於 0.9 以上，若 MAC 數值低於 0.05，則代表實驗與理論間之振型呈正交性。由表 2(a)中 MAC 比對結果顯示，以加速度計為感測器之 MAC 值明顯高於麥克風，因為加速度計感測器之振動訊號較明顯，而聲音較易受環境音場效應之影響。由表 3(a)中可明顯看出實驗之模態振型和理論之模態振型是相當吻合的。
- (3) 以加速度計或麥克風為感測器實驗求得之阻尼比都在 0.1~0.3%左右，相當一致，在分析時，阻尼比並無法獲得，在簡諧分析係以實驗求得之平均阻尼比代入，求得如圖 6 中之頻率響應函數。

在鐵琴片不同點頻率響應函數圖中，加速度計當感測器在頻寬 6000Hz 前實驗與理論的頻率峰值皆有相當的吻合性，麥克風當感測器在頻寬 6000Hz 前與加速度計所量得的鐵琴片之自然頻率值也相當的吻合；且在鐵琴片的模態參數中，自然頻率誤差百分比皆在 $\pm 1\%$ 以下；MAC 數值都在 0.66 以上，表示有限元素模型與實際模型之模態振型是吻合的，因此可推論模型驗證是成功的。

## 4.2 實際邊界鐵琴片之模型驗證

由自由邊界的模型驗證中可獲得鐵琴片之楊氏係數  $E$ 、及浦松比  $\nu$ ；以彈簧常數  $k$  為設計變數，進行最佳化分析，將有限元素分析之結果與實驗所得的結果進行比對，其中包括頻率響應函數、自然頻率及模態振型，藉由模型驗證進而確定實際邊界鐵琴片之有限元素模型正確性。

### 1. 頻率響應函數

圖 7(a)為使用加速度計當感測器所量得不同點 ( $H_{65,1}$ ) 頻率響應函數圖，圖 7(b)為使用麥克風當感測器量得之不同點 ( $H_{65,1}$ ) 頻率響應函數圖。在圖 7(a)中，由於本次實驗對象為實際邊界之鐵琴片，因此，鐵琴片在頻率 324.81hz 多了一個剛性模態，除此之外，實驗與理論分析結果的共振尖峰值在頻寬 5500Hz 前有相當的吻合性；圖 7(b)中，實驗結果與曲線嵌合的結果相當吻合，證明曲線嵌合成功。將圖 7(a)與圖 7(b)相對照，可發現不論以加速度計或麥克風為感測器在實驗分析之鐵琴片自然頻率有相對應情形。

由圖 7 中可發現在頻率 5500Hz 後之共振尖峰有所誤差，其原因可能有三，一是有限元素模型中鐵琴片與基座間的接觸點是採一直線的點，而實際上鐵琴片與海棉墊基座接觸的點並非如此，因而產生誤差；第二個原因可能是有限元素模型沒有把加速度計的質量效應列入考慮，因而產生誤差，第三個產生誤差的原因可能是加速度計感測器與鐵琴片的接觸面積橫跨 2 個量測點，所以在同點頻率響應函數圖中，實驗與理論分析曲線才會有些許落差。因此，若將以上產生誤差的因素都克服的話，高頻的共振尖峰應可完全吻合。

## 2. 模態參數

表 2(b)為經由最佳化過程的理論分析與實驗模態分析所得之自然頻率比對表，表 3(b)為理論分析與實驗模態分析所得之模態振型對照表，綜合討論如下：

- (1) 在表 2(b)的自然頻率比對表中，所有自然頻率誤差百分比皆在 $\pm 1\%$ 以下，因此可推論自然頻率比對成功。而理論有限元素分析 (FEA) 的第 7 個自然頻率並無對應到任何實驗模態分析 (EMA) 頻率值。
- (2) 由表 2(b)中 MAC(模態參數品質保證指標)比對結果顯示，使用加速度計當感測器所得之前 6 個模態的 MAC 數值都在 0.71 以上，表示前 6 個模態振型有良好的對應性；且以加速度計為感測器之 MAC 值明顯高於麥克風，雖然以麥克風當感測器所量得的 MAC 數值不高，但由表 3(b)振型圖仍可確認模態振型對應之正確性。表 3(b)中，以加速度計當感測器的第 8 個模態之理論模態振型是屬於 (6,1) 模態，而實驗模態振型與理論之模態振型有些微的出入，也造成了表 2(b)中第 8 個模態之 MAC 數值為 0.14 的原因。
- (3) 以加速度計或麥克風為感測器實驗求得之阻尼比都在 0.1~0.3%左右，相當一致。

在鐵琴片的頻率響應函數圖中，加速度計當感測器在頻寬 5500Hz 前實驗與理論的頻率峰值皆有相當的吻合性，麥克風當感測器在頻寬 5500Hz 前與加速度計所量得的鐵琴片之自然頻率值也相當的吻合；在鐵琴片的模態參數中，自然頻率誤差百分比皆在 1% 以下；以加速度計當感測器之前 6 個模態的 MAC 數值都在 0.71 以上，表示前 6 個模態振型是相當吻合的，因此可推論模型驗證是成功的。因此，未來可依相同方法建構不同尺寸之鐵琴片，以預測其振動自然頻率以及鐵琴片之設計。

表 3、鐵琴片模態振型對照表  
(a)自由邊界

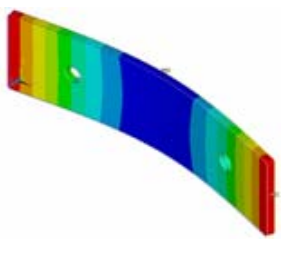
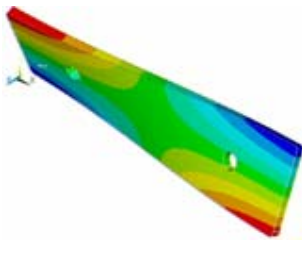
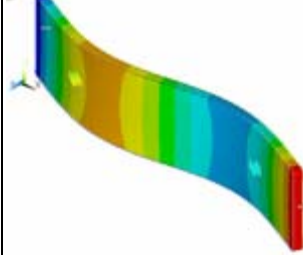
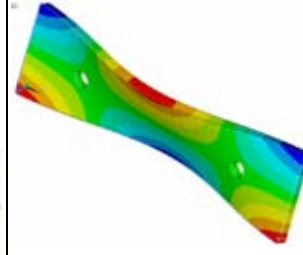
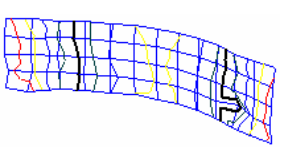
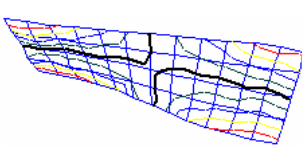
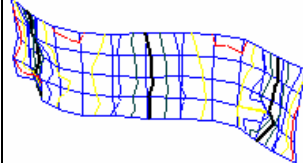
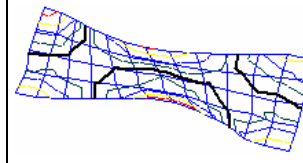
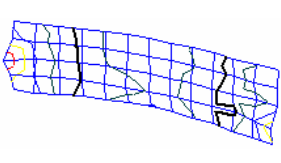
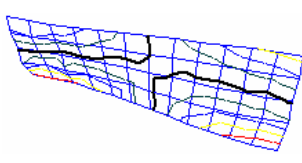
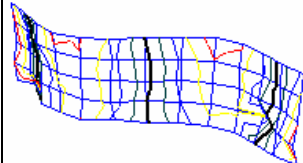
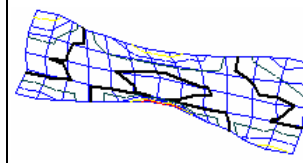
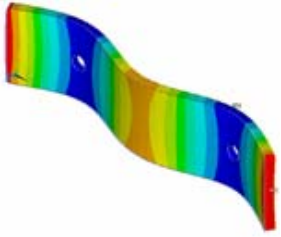
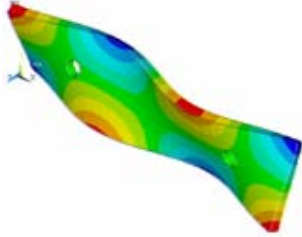
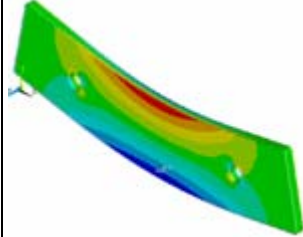
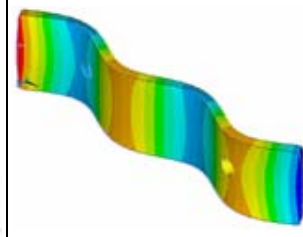
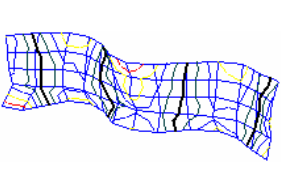
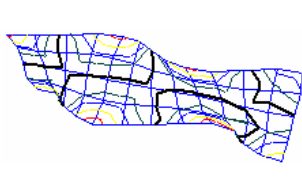
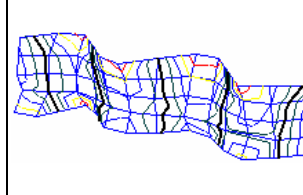
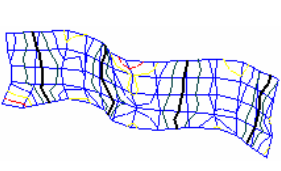
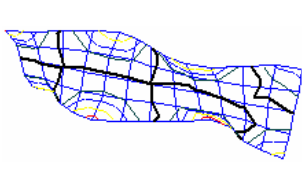
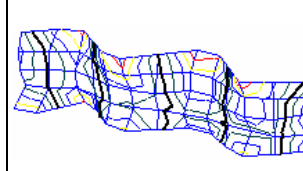
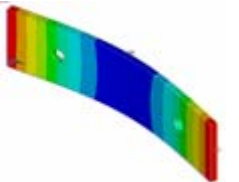
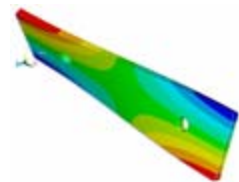
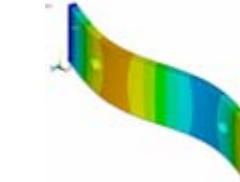
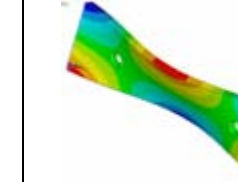
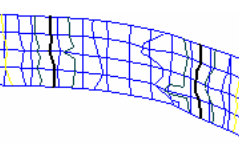
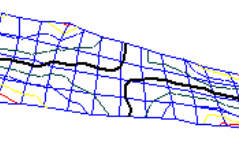
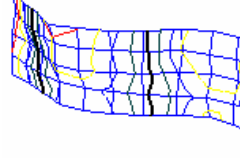
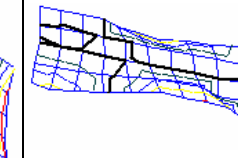
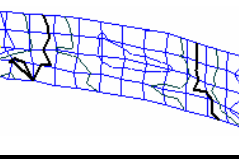
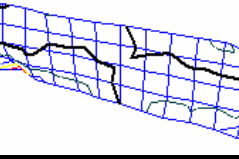
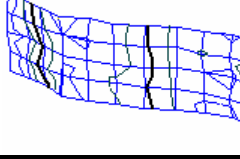
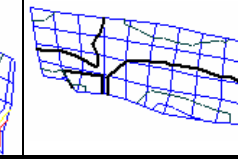
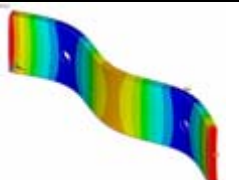
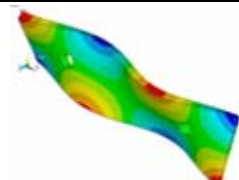
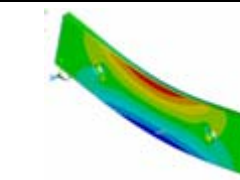
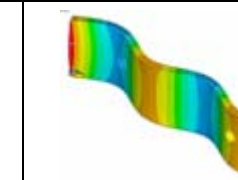
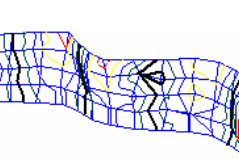
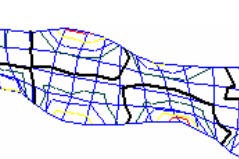
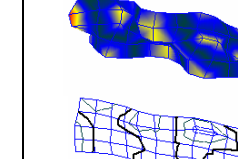
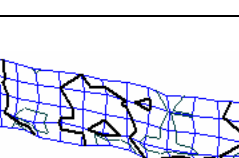
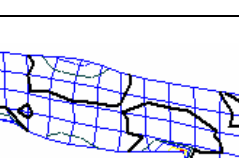
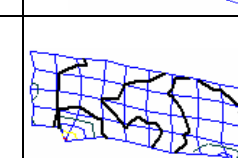
| Mode             | 1   | 2   | 3   | 4   |
|------------------|---|---|---|---|
| FEA 振型           |    |    |   |    |
| EMA 振型(加速度計當感測器) |    |    |   |    |
| EMA 振型(麥克風當感測器)  |    |    |   |    |
| Mode             | 5   | 6   | 7   | 8   |
| FEA 振型           |   |   |  |   |
| EMA 振型(加速度計當感測器) |  |  | X   |  |
| EMA 振型(麥克風當感測器)  |  |  | X   |  |

表 3、鐵琴片模態振型對照表(續)  
(b)實際邊界

| Mode             | 1   | 2   | 3   | 4   |
|------------------|---|---|---|---|
| FEA 振型           |    |    |   |    |
| EMA 振型(加速度計當感測器) |    |    |   |    |
| EMA 振型(麥克風當感測器)  |    |    |   |    |
| Mode             | 5   | 6   | 7   | 8   |
| FEA 振型           |   |   |  |   |
| EMA 振型(加速度計當感測器) |  |  | X   |  |
| EMA 振型(麥克風當感測器)  |  |  | X   |  |

### 4.3 加速度計與麥克風之比較

本實驗分別以加速度計及麥克風當感測器，結果比較如下：

- (1) 在圖 6 與圖 7 之不同點頻率響應函數圖中，可發現無論是用加速度計當感測器，或是用麥克風當感測器，實驗與理論的頻率峰值皆有相當的吻合性。
- (2) 在表 2 與表 3 中，分別使用加速度計與麥克風所量得之鐵琴片自然頻率值均相當吻合，唯有在高頻的模態時，有些微的差異；況且，理論有限元素分析 (FEA) 第 7 個自然頻率均無對應到任何實驗模態分析 (EMA) 頻率值。
- (3) 以加速度計為感測器之 MAC(模態參數品質保證指標)值明顯高於麥克風之 MAC 值，因為加速度

計感測器之振動訊號較明顯，而聲音較易受環境音場效應之影響，因此由麥克風所量測的訊號較為微弱，由表 3(a)與表 3(b)模態振型圖可確認模態振型之正確性。

- (4) 表 3(a)與表 3(b)的阻尼比對照表中，以加速度計或麥克風為感測器實驗求得之阻尼比值相近，在自由邊界中，低頻時模態阻尼小，高頻時模態阻尼大；在實際邊界中，低頻時模態阻尼大，高頻時模態阻尼小。
- (5) Wang[6] 提及採用移動驅動器之方法，實驗所得到的模態振型是驅動器的模態振型，可推論本實驗所得之模態振型皆為位移模態振型，因此，加速度計與麥克風所量得之模態振型是可以做比較的。

由於頻率響應函數圖中，以加速度計和麥克風當感測器之實驗與理論的頻率峰值皆有相當的吻合性；且量得之鐵琴片自然頻率值均相當吻合，模態振型對應的相當良好；因此，可推論以麥克風當感測器進行實驗模態分析之想法是可行的。

## 5. 結論

本文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，對鐵琴片之振動做一系列的探討，也進一步探討以麥克風當感測器進行實驗模態分析的可行性。由以上分析可得到以下結論：

1. 模型驗證：在自由邊界與實際邊界中，理論分析與實驗所得的模態參數有相當程度的吻合性，且由理論與實驗模態振型之 MAC 比對結果中，得知實驗的模態振型與有限元素分析得到的模態振型吻合程度相當高，因此在振動分析方面，模型驗證是成功的。由於模型驗證成功，故可藉由有限元素模型對其它不同音階的鐵琴片做振動分析與鐵琴片基礎頻率之預測。
2. 加速度計感測器與麥克風之比較：加速度計與麥克風所量得之鐵琴片自然頻率均相當吻合，模態振型對應的相當良好，唯有在 MAC 值中，由於麥克風易受環境音場效應之影響，雖然麥克風之 MAC 值明顯低於加速度計之 MAC 值，但振動振型之物理意義皆相吻合，因此，以麥克風當感測器實驗模態分析之想法是可行的。

本文以加速度計和麥克風為感測器，對鐵琴片進行實驗模態分析，由實驗結果，證明以麥克風當感測元件的想法是可行的，因此，未來在進行其他樂器的實驗模態分析時，可以考慮使用麥克風當感測元件。

## 6. 參考文獻

- [1] Bretos J., Santamaria C., and Moral, J. A., 1999, "Finite Element Analysis and Experimental Measurement of Natural Eigenmodes and Random Responses of Wooden Bars Used in Musical Instruments," *Applied Acoustics*, Vol. 56 pp. 141-156.
- [2] Doutaut V., Matignon, D., and Chaigne, A., 1998, "Numerical Simulations of Xylophones. II. Time-Domain Modeling of the Resonator and of the Radiated Sound Pressure," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, No.3, pp. 1633-1647.
- [3] 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。
- [4] 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。
- [5] 王栢村，胡惠文，蘇敬翔，2003，「吉他共鳴箱之振動特性分析」，ANSYS 2003 台灣區用戶大會暨論文發表會，雲林，第 71-84 頁。

- [6] Wang, B. T., 1998, "Structural Modal Testing with Various Actuators and Sensors," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 12, pp. 627-639.
- [7] 王栢村，蔡明建，2004，「應用旋轉角加速度計於自由樑之實驗模態分析」，第十二屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，台北，論文編號：A1-2。

# Comparison of Experimental Modal Analysis on Metal Bar of Metalophone by Using Accelerometer and Microphone as Sensors

B-T Wang<sup>1</sup>, Y-S Lin<sup>2</sup>

Department of Mechanical Engineering of  
Science and Technology National Pingtung  
University

<sup>1</sup> Professor

<sup>2</sup> Graduate student

## ABSTRACT

This work applies both accelerometer and microphone, respectively, as sensors with the use of input hammer as the actuator to perform conventional experimental modal analysis(EMA) on a metal bar of metalophone. The metal bar in free and real boundaries are considered. The finite element models corresponding to both boundaries are constructed to perform theoretical modal analysis. Modal parameters extracted from EMA and obtained from finite element analysis(FEA) are compared and verified. Therefore, the FE model in free boundary can be validated and used to determine the material properties of the metal bar. The real boundary of metal bar rested on the foam support is also simulated by spring elements to predict vibration modes of the metal bar. Results show that natural modes of vibration for the metal bar in both boundaries can be well predicted and validated with EMA results. The use of microphone as sensor to carry out EMA experiments is feasible and shows reasonable agreement with the accelerometer. This paper not only addresses the feasibility in using acoustic response to extract the vibration modes but also studies the vibration characteristics of metal bar. The presented methodology can be beneficial to the design analysis of different sizes and shapes of metal bars. The experimental and analytical approaches can also be adopted to study other percussion instruments as well.

Keywords: metalophone, experimental modal analysis, accelerometer, microph.