

不同銅鈴之振動模態與發聲機制探討

王栢村¹、劉得江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

科技部計畫編號：MOST 105-2622-E-020-001-CC3

摘要

在古代因為受限於禮制規範及銅鐘製作成本太高，而發展出外型與銅鐘相似的銅鈴，而這些銅鈴常被掛在出入口及屋簷下，有著祈福與避邪的用途。本文主要探討兩種不同外形及不同表面結構銅鈴的振動模態與發聲機制。透過有限元素分析軟體 ANSYS 建構銅鈴之模型，進行理論分析求得理論模態參數，包含自然頻率及模態振型，再參考理論模態振型進行銅鈴的佈點規劃進行實驗模態分析，採用鈎魚線懸掛銅鈴以模擬自由邊界，利用衝擊錘敲擊銅鈴，而以加速規量測響應，藉由振動噪音量測軟體取得銅鈴的頻率響應函數，再透過曲線嵌合軟體 ME'scopeVES 進行曲線嵌合求得實驗模態參數，包含自然頻率、模態振型及模態阻尼比。銅鈴之聲音量測分析，利用鐵製敲擊錘敲擊銅鈴，以麥克風量測聲音壓力訊號，經由振動噪音量測軟體進行分析可求得銅鈴之聲音頻譜及時頻圖。透過理論模態參數及實驗模態參數比對，能確認銅鈴的實際振動模態特性，並由振動模態與聲音量測結果進行比對，能了解銅鈴之發聲機制。銅鈴的聲音特性以基音及泛音音色、聲音壓力位準及衰減率作為客觀指標，透過尖銳度、亮度及持續度評估主觀感受，進而探討主觀及客觀之間的關聯性。結果顯示，兩種銅鈴在振動模態的分析與實驗結果對應良好，也由主觀的解析探討兩種銅鈴之差異。本文利用有限元素分析及實驗量測分析探討兩種不同表面結構及不同外形銅鈴的振動模態與發聲機制，此分析與實驗技術可應用於設計製造鐘形敲擊樂器。

關鍵字：銅鈴、有限元素分析、實驗模態分析、發聲機制

1. 前言

銅鈴為打擊樂器的一種，表面往往會鑄上代表著吉祥、祈福、警世、避邪、驅魔等意義的圖案、花紋，銅鈴常被掛在屋簷下及房屋的出入口，藉由風吹發出清脆且響亮的鈴聲，有著祈福與避邪的用途，銅鈴的外型因為運用的場合不同而有很多種，聲音特性也不同，因此，藉由分析銅鈴的振動模態及發聲機制，能設計出最適合的外型及聲音。

本文是利用有限元素分析及實驗模態分析對不同銅鈴進行振動模態探討。Ansari[1]對鐘進行有限元素分析及實驗模態分析，探討鐘身厚度對自然頻率及振動模態的影響，結果顯示，鐘的厚度增加會對高模態數所對應的自然頻率產生影響。Cheng and Lan[2]探討雙音中國和平鐘之振動模態與聲音特性，他們利用加速規對鐘的不同點進行量測，並利用短時頻譜分

析求得各個自然頻率對應的振動模態。王等人[3]探討縮小模型鐘的振動與發聲機制，比對有限元素分析與實驗模態分析，成功建立了等效於實際結構的有限元素模型。

在聲音特性的部分，Hibbert et al.[4]分析並探討教堂鐘的聲音特性，發現敲擊教堂鐘所激發的發聲頻率會因為鐘緣高低而受到影響。王與余[5]對古鈸進行聲音量測分析，發現敲擊古鈸時激發出的自然頻率會因敲擊位置不同而有所變化。Kim[6]對聖德大王神鐘進行實驗模態分析及聲音量測分析，探討其振動及聲音特性，發現鐘的發聲頻率都是由兩個非常接近的頻率所組成，這種現象稱為重擊效應。王等人[7]探討平滑表面銅鐘的振動模態與發聲機制，並以不同軟硬的敲擊錘進行聲音量測分析，結果顯示，軟的敲擊錘最能激發出主要發聲頻率且衰減率較低。王等人[8]探討打擊樂器聲音品質主客觀的關聯性，發現尖銳度、亮度與持續度等主觀評價，與客觀指標的頻譜質心、頻譜不規則度與衰減率有明顯對應之關聯性，並建立了主客觀的評價模式。

本文探討兩種不同外形及不同表面結構銅鈴之振動模態與發聲機制，利用有限元素分析與實驗模態分析探討銅鈴之實際振動模態，並結合聲音量測分析探討其發聲機制，未來可應用於設計製造鐘形敲擊樂器。

2. 有限元素分析

本節針對兩種不同表面結構及不同外形之銅鈴進行有限元素分析，圖 1 為不同銅鈴之實際結構示意圖，由外表即可看出兩者之差異，圖 1(a)為鑲面銅鈴，由圖可得知此銅鈴表面有鑲嵌圖案，鈴身較寬大，其全高 46mm、底部直徑 45mm、密度 $\rho=8228\text{kg/m}^3$ 、楊氏係數 $E=115.383\text{GPa}$ 、蒲松比 $\nu=0.36$ ；圖 1(b)為光滑銅鈴，由圖可得知此銅鈴表面較光滑，鈴身較纖細，其全高 48mm、底部直徑 41mm 密度 $\rho=8517\text{kg/m}^3$ 、楊氏係數 $E=121.369\text{GPa}$ 、蒲松比 $\nu=0.36$ 。有限元素分析利用有限元素分析軟體 ANSYS 建構模型，圖 2 為不同銅鈴之有限元素模型示意圖，兩種銅鈴皆採用 solid 187 線性立方體元素進行建構，圖 2(a)為鑲面銅鈴，元素剖後共有 73130 個元素及 129655 個節點，圖 2(b)為光滑銅鈴，元素剖後共有 67139 個元素及 115794 個節點。

進行實驗模態分析時，銅鈴透過鈎魚線懸掛以模擬自由邊界，為了配合實驗模態分析，在理論模態分析時位移限制不做設定以模擬自由邊界，簡諧分析時須在輸入點設定外力以模擬實際敲擊情況。經理論模態分析及簡諧分析後分別求得理論模態參數與理論

頻率響應函數，理論模態參數包含了理論自然頻率與理論模態振型。

3. 實驗量測分析

本節將對兩種不同表面結構及不同外形之銅鈴進行實驗量測分析，實驗量測分析可分為實驗模態分析與聲音量測分析。

3.1 實驗模態分析

實驗模態分析前須先利用有限元素分析所得到的理論模態振型進行佈點規劃，圖 3 為不同銅鈴之佈點規劃示意圖，圖 3(a)為鑲面銅鈴、圖 3(b)為光滑銅鈴，銅鈴每單位高度佈 1 圈，每圈有 6 點，共有 3 圈，總共 18 個量測點，由於頂部吊環不會出現振型，故無繪製吊環，圖 4 為實驗量測架設圖，銅鈴由釣魚線懸掛模擬自由邊界，以衝擊錘作為驅動器敲擊銅鈴，加速規作為感測器黏貼在第一點將訊號傳入訊號擷取卡，再輸入至振動噪音量測軟體進行分析，量測軟體設定如下，頻寬設定為 20000Hz，頻率解析度為 1.5625Hz，求得實驗頻率響應函數，最後由曲線嵌合軟體 ME'scopeVES 進行曲線嵌合，取得實驗模態參數，實驗模態分析包含實驗自然頻率、實驗模態振型與阻尼比。

3.2 聲音量測分析

聲音量測分析是為了求得不同銅鈴之聲音特性，圖 4 為實驗量測架設圖，利用釣魚線懸掛銅鈴模擬自由邊界，以鐵製敲擊錘敲擊銅鈴，透過麥克風做為感測器接收訊號，傳入訊號擷取卡取得時間響應訊號，再輸入至振動噪音量測軟體內進行運算，量測軟體設定如下，頻寬設定為 20000Hz，頻率解析度為 1.5625Hz，量測時間為 8 秒，透過快速傅立葉轉換及短時傅立葉轉換後能求得聲音頻譜及時間頻譜，並由時間響應訊號求得聲音衰減率。

4. 結果與討論

本文探討兩種不同表面結構及不同外形銅鈴之振動模態與發聲機制，了解不同銅鈴之振動特性及聲音特性。

4.1 銅鈴之模型驗證

本小節針對兩種銅鈴進行模型驗證，圖 5 為模型驗證流程圖，透過比對理論模態參數及實驗模態參數，能確認有限元素模型之正確性。

4.1.1 模態參數

表 1 為鑲面銅鈴之模態參數總表，表 2 為光滑銅鈴之模態參數總表，由於有限元素分析所求得的模態中，前六個屬於剛體模態，故不做探討，圖 6 為不同銅鈴之模態振型對照圖，圖 6(a)為鑲面銅鈴，圖 6(b)為光滑銅鈴，物理意義以 (θ, z) 作為表示， θ 為圓周節線數， z 為軸向節線數，不同銅鈴之模態參數綜合結果與討論如下：

1. 鑲面銅鈴與光滑銅鈴之模態振型順序大致相同，唯有在(2,2)與(4,1)時相反。

2. 在實驗模態振型中鑲面銅鈴(3,1)模態只有激發一個，與分析之模態振型有差異，推測為鑲面銅鈴之實體結構非真圓所導致。
3. 鑲面銅鈴之實驗與分析自然頻率誤差皆在 5% 以內；光滑銅鈴之實驗與分析自然頻率誤差在 F_13/E_07 與 F_17/E_11 時誤差分別達到 10.02% 及 16.61%，推測為有限元素模型與實際結構有差異所導致。

兩種銅鈴在實驗與分析之模態參數的比對中，雖然沒有完全吻合，但整體對應都算良好。

4.1.2 頻響應函數

圖 7 為不同銅鈴之頻率響應函數圖，圖 7(a)為鑲面銅鈴，圖 7(b)為光滑銅鈴，同點為 $H_{i,j}$ ， $(i,j)=(1,1)$ ，不同點為 $H_{i,j}$ ， $(i,j)=(1,13)$ ， i 為輸出點， j 為輸入點，圖中黑色實線為實驗頻率響應函數，紅色虛線為曲線嵌合後的實驗頻率響應函數，藍色虛線為分析頻率響應函數，由圖可得知實驗頻率響應函數與嵌合後的實驗頻率響應函數有明顯對應，代表曲線嵌合良好，兩種銅鈴在同點時三條曲線於峰值都有明顯對應，但在不同點時對應較不明顯，推測為有限元素模型與實體結構有差異所導致。

4.2 銅鈴之振動模態與發聲機制探討

本文利用振動噪音量測軟體求得不同銅鈴之聲音特性並結合振動模態，探討其發聲機制，圖 8 為不同銅鈴之時頻圖，圖 8(a)為鑲面銅鈴、圖 8(b)為光滑銅鈴，由圖可得知，鑲面銅鈴與光滑銅鈴分別在發聲頻率 2615Hz 與 4236Hz 時分貝值最高且持續時間也最久，由圖 8 得知兩種銅鈴的時間響應訊號圖形皆有忽大忽小持續下降之現象，發聲頻率也有出現兩個極為靠近的頻率，模態振型則出現對稱模態，此現象為重擊效應，在聽覺上會有週期性強弱的感覺。

圖 9 為不同銅鈴之聲音頻譜與實驗模態振型對應圖，圖 9(a)為鑲面銅鈴、圖 9(b)為光滑銅鈴，表 3 為鑲面銅鈴之聲音特性與實驗模態參數對照表，表 4 為光滑銅鈴之聲音特性與實驗模態參數對照表，經觀察後綜合結果與討論如下：

1. 兩種銅鈴之聲音頻譜在高頻時並無出現對應的發聲頻率，推測原因為聲音量測敲擊時，敲擊到節線所導致。
2. 兩種銅鈴之發聲頻率與實驗自然頻率誤差最大達到 7.01% 與 4.96%，推測原因為實驗模態分析時所黏貼的加速規產生了質量效應的影響。
3. 鑲面銅鈴的第四個發聲頻率無對應之模態振型，推測為鑲面銅鈴鈴身不均厚所導致。

4.3 不同銅鈴主觀感受與客觀指標之關聯性探討

本小節探討不同銅鈴主觀感受與客觀指標之關聯性，透過[8]王等人建立的主客觀的評價模式，訂定主觀感受分為尖銳度、亮度及持續度，以基音頻率、頻譜質心與衰減率作為客觀指標，主觀感受以 5 等地進行區分，以尖銳度為例 5=非常尖銳、4=尖銳、3=普通、2=低沉、1=非常低沉，並隨機進行問卷調查，最後進行加權平均取得主觀感受數值，圖 10 為不同

銅鈴之主觀感受雷達示意圖，圖 11 為不同銅鈴之客觀指標長條圖，配合表 3 與表 4 綜合結果與討論如下：

1. 多數人主觀覺得光滑銅鈴的聲音比鑲面銅鈴更尖銳；客觀數據顯示光滑銅鈴的基音頻率為 4228Hz，高於鑲面銅鈴的基音頻率 2615Hz，代表基音頻率的高低會影響尖銳度的主觀感受。
2. 主觀感受方面鑲面銅鈴讓人感覺比光滑銅鈴更響亮；客觀數據顯示鑲面銅鈴的頻譜質心比光滑銅鈴更高。
3. 主觀感受結果顯示，鑲面銅鈴的持續時間聽起來比鑲面銅鈴更久；客觀數據顯示鑲面銅鈴的衰減率為 0.81，光滑銅鈴的衰減率為 1.80。

綜合上述，鑲面銅鈴的聲音比光滑銅鈴整體感覺更舒適，推測原因為鑲面銅鈴聲音不會太尖銳，聽起來也很響亮，持續時間又長。

5. 結論

本文主要探討兩種不同外形及不同表面結構銅鈴的振動模態與發聲機制，透過有限元素分析與實驗模態分析取得分析與實驗的模態參數，以探討不同銅鈴之振動模態，在藉由聲音量測所得的聲音特性與實驗模態參數進行發聲機制探討，綜合以上探討可得到以下結論：

1. 鑲面銅鈴的實驗與分析自然頻率誤差皆在 5% 以內，頻率響應函數也都對應良好，代表有限元素模型等校於實際結構；光滑銅鈴因為實驗與分析自然頻率誤差超過 10%，推測原因為有限元素模型與實際結構的幾何有誤差。
2. 兩種銅鈴之發聲頻率與實驗自然頻率產生誤差，推測原因為實驗模態分析時黏貼的加速規產生質量效應。
3. 頻率響應函數的對應中兩種銅鈴皆對應良好，代表響應預測成功。
4. 主觀感受中尖銳度越高其基音頻率越高；亮度越大時聲頻譜質心就越高；持續度越久則衰減率越小。

6. 誌謝

本文感謝三希典藏有限公司以及科技部補助產學合作計畫的經費贊助，科技部計畫編號：MOST 105-2622-E-020-001-CC3。

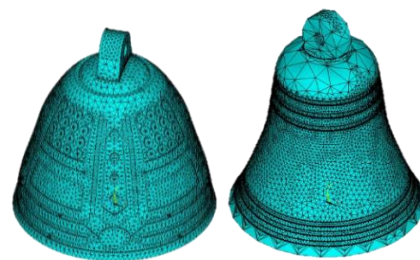
7. 參考文獻

1. J. Ansari, Finite Element Vibration Analysis and Modal Testing of Bells, Proceedings of the 2006 IJME-INTERTECH Conference, Union, NJ, USA, 2006
2. J. Cheng and C. Lan, Experimental Studies on Sound and Vibration of a Two-Tone Chinese Peace Bell, Journal of Sound and Vibration, Vol. 261, pp. 351-358, 2003

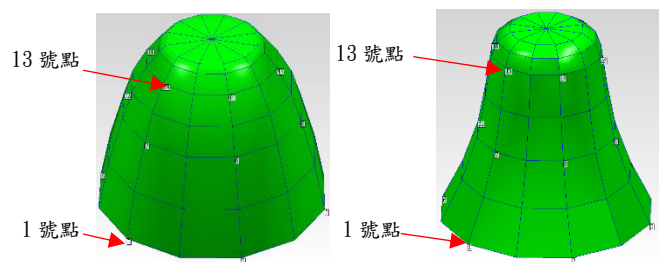
3. 王栢村、張博鈞、楊昶昱、黃家賢、吳盈輝，縮小模型鐘之振動模態與發聲機制探討，精密機械與製造科技研討會論文集，屏東、台灣，2016
4. W. A. Hibbert, D. B. Sharp, S. Taherzadeh and R. Perrin, Partial Frequencies and Chladni's Law in Church Bells, Open Journal of Acoustics, Vol. 4, pp. 70-77, 2014
5. 王栢村、余冠德，古鈸之模型驗證與聲音特性探討，中國機械工程學會第三十一屆全國學術研討會論文集，台中、台灣，2014
6. Y. H. Kim, Sound of King Song-Dok Bell, Journal of the Acoustical Society of Japan, Vol. 19, pp. 305-313, 1998
7. 王栢村、蔡俊郎、葉明遠、李致緯、張博鈞、吳盈輝，平滑表面銅鐘之振動模態與發聲機制探討，第二十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，高雄、台灣，第 270~277 頁，2016
8. 王栢村、黃家賢、吳盈輝、李之光、徐秀娟，打擊樂器主客觀聲音品質評價之關聯性探討，台灣聲學學會第二十九屆學術研討會論文集，雲林、台灣，2016



(a)鑲面銅鈴 (b)光滑銅鈴
圖 1 不同銅鈴之實體結構示意圖



(a)鑲面銅鈴 (b)光滑銅鈴
圖 2 不同銅鈴之有限元素模型示意圖



(a)鑲面銅鈴 (b)光滑銅鈴
圖 3 不同銅鈴之佈點規劃示意圖

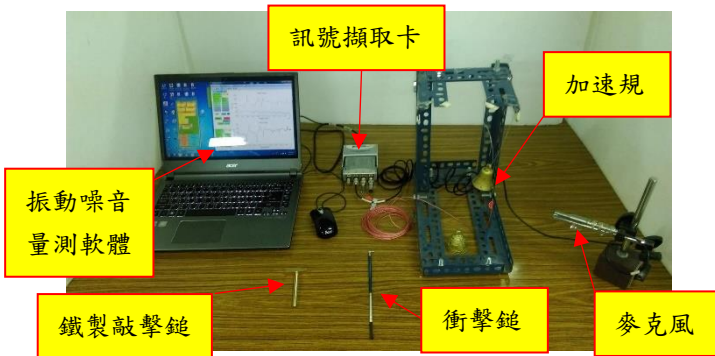
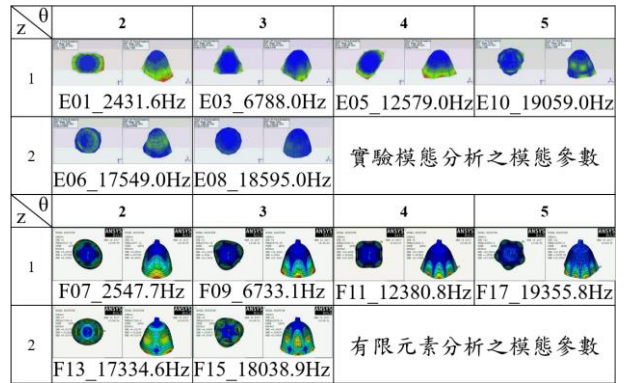


圖 4 實驗量測架設圖



(a) 鑲面銅鈴

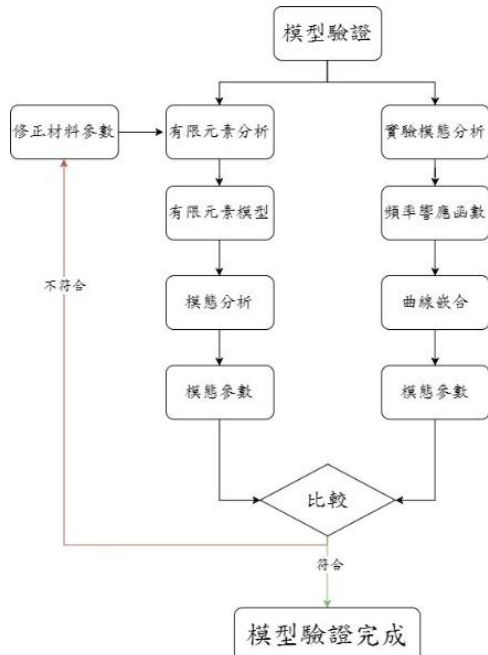
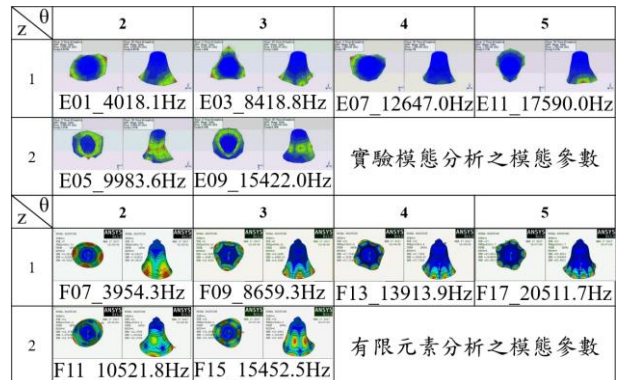
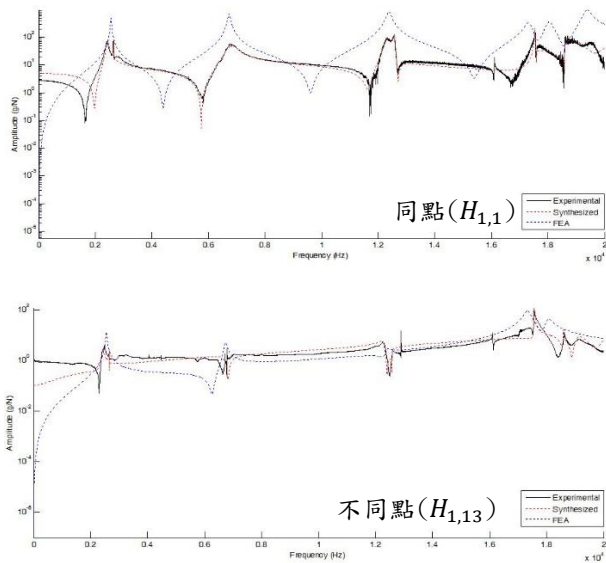


圖 5 模型驗證流程圖

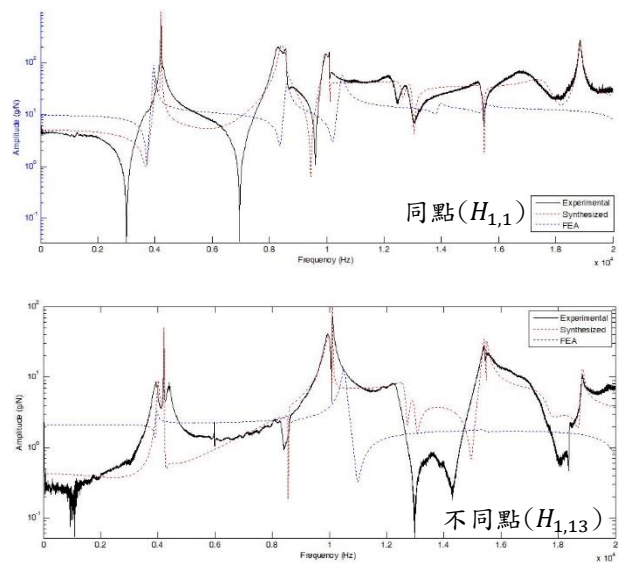


(b) 光滑銅鈴

圖 6 不同銅鈴之模態振型對照圖



(a) 鑲面銅鈴



(b) 光滑銅鈴

圖 7 不同銅鈴之頻率響應函數圖

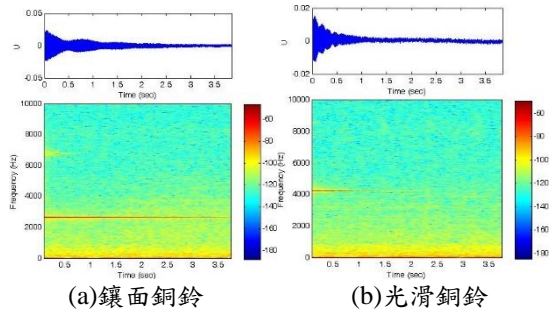


圖 8 不同銅鈴之時頻圖

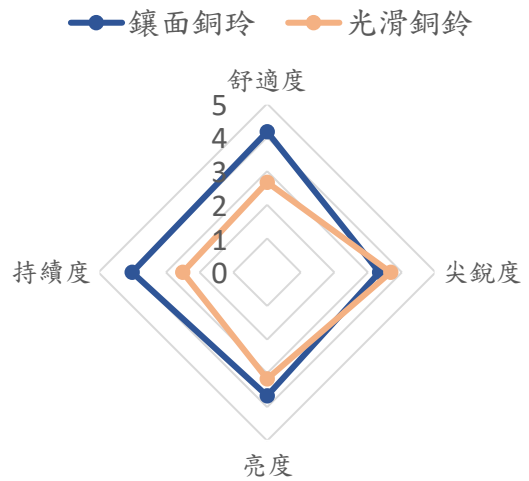


圖 10 不同銅鈴之主觀感受雷達示意圖

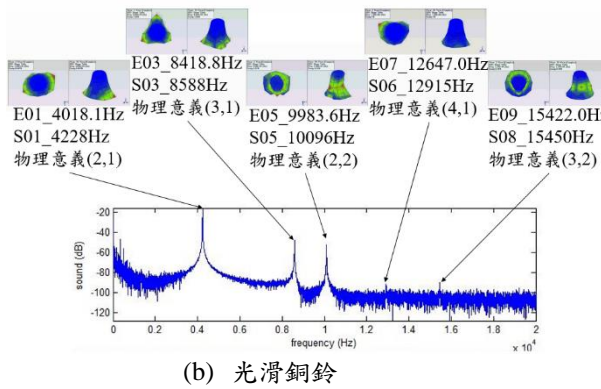
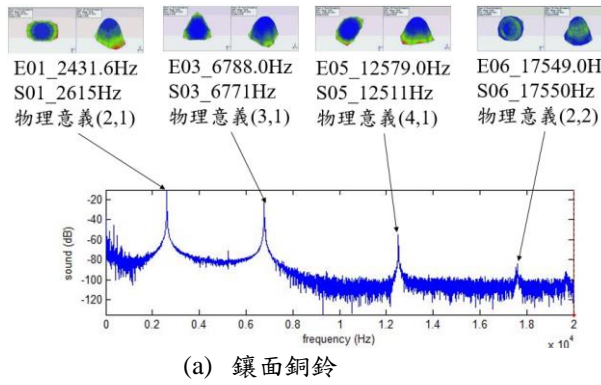
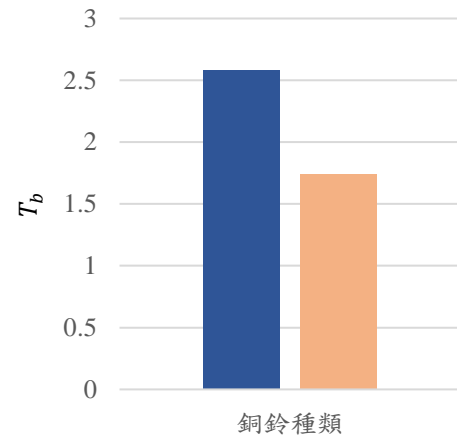
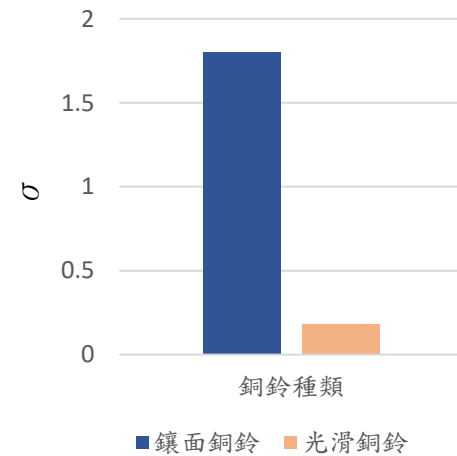


圖 9 不同銅鈴之聲音頻譜與實驗模態振型對應圖



(a) 頻譜質心



(b) 衰減率

圖 11 不同銅鈴之客觀指標長條圖

表 1 鑲面銅鈴之模態參數總表

模態數	FEA 自然頻率 (Hz)	模態數	EMA 自然頻率 (Hz)	阻尼比 %	誤差 %	物理意義 (θ, z)
F_07	2547.7	E_01	2431.6	1.48	4.77	(2,1)
F_08	2558.6	E_02	2644.6	0.0613	-3.25	(2,1)
F_09	6733.1	E_03	6788.0	2.45	-0.81	(3,1)
F_10	6733.4	-	-	-	-	(3,1)
F_11	12380.8	E_04	12283.0	0.773	0.80	(4,1)
F_12	12389.8	E_05	12579.0	0.242	-1.50	(4,1)
F_13	17334.6	E_06	17549.0	0.0789	-1.22	(2,2)
F_14	17351.5	E_07	17563.0	0.0753	-1.20	(2,2)
F_15	18038.9	E_08	18595.0	0.0662	-2.99	(3,2)
F_16	18050.2	E_09	18675.0	0.722	-3.35	(3,2)
F_17	19355.8	E_10	19060.0	1.08	1.55	(5,1)

表 2 為光滑銅鈴之模態參數總表

模態數	FEA 自然頻率 (Hz)	模態數	EMA 自然頻率 (Hz)	阻尼比 %	誤差 %	物理意義 (θ, z)
F_07	3954.3	E_01	4018.1	0.843	-1.59	(2,1)
F_08	3955.3	E_02	4218.2	0.0391	-6.23	(2,1)
F_09	8659.3	E_03	8418.8	1.06	2.86	(3,1)
F_10	8602.3	E_04	8576.3	0.376	0.30	(3,1)
F_11	10521.8	E_05	9983.6	1.01	5.39	(2,2)
F_12	10522.9	E_06	10108.0	0.0544	4.10	(2,2)
F_13	13913.9	E_07	12647.0	1	10.02	(4,1)
F_14	13917.3	E_08	12953.0	0.893	7.45	(4,1)
F_15	15452.5	E_09	15422.0	0.38	0.20	(3,2)
F_16	15453.8	E_10	15494.0	0.136	-0.26	(3,2)
F_17	20511.7	E_11	17590.0	2.25	16.61	(5,1)

表 3 鑲面銅鈴之聲音特性與實驗模態參數對照表

峰值數	發聲頻率(Hz)	頻率比	聲音壓力位準(dB)	模態數	自然頻率(Hz)	誤差(%)	物理意義(θ, z)
S_01	2615	1.000	89.5	E_01	2431.6	-7.01	(2,1)
S_02	2647	1.012	67.6	E_02	2644.6	-0.09	(2,1)
S_03	6771	2.589	78.31	E_03	6788.0	0.25	(3,1)
S_04	6819	2.608	61.75	-	-	-	(3,1)
S_05	12511	4.784	44.64	E_04	12283.0	-1.82	(4,1)
S_06	12619	4.826	15.31	E_05	12579.0	-0.32	(4,1)
S_07	17550	6.711	12.01	E_06	17549.0	-0.01	(2,2)
S_08	17613	6.735	15.64	E_07	17563.0	-0.28	(2,2)
聲音衰減率 0.81							

表 4 光滑銅鈴之聲音特性與實驗模態參數對照表

峰值數	發聲頻率(Hz)	頻率比	聲音壓力位準(dB)	模態數	自然頻率(Hz)	誤差(%)	物理意義(θ, z)
S_01	4228	1.000	67.72	E_01	4018.1	-4.96	(2,1)
S_02	4236	1.002	84.35	E_02	4218.2	-0.42	(2,1)
S_03	8588	2.031	52.32	E_03	8418.8	-1.97	(3,1)
-	-	-	-	E_04	8576.3	-	(3,1)
S_04	10096	2.388	47.82	E_05	9983.6	-1.11	(2,2)
S_05	10109	2.391	35.22	E_06	10108.0	-0.01	(2,2)
S_06	12915	3.055	6.77	E_07	12647.0	-2.08	(4,1)
S_07	12923	3.057	6.7	E_08	12953.0	0.23	(4,1)
S_08	15450	3.654	9.11	E_09	15422.0	-0.18	(3,2)
S_09	15461	3.657	4.27	E_10	15494.0	0.21	(3,2)
聲音衰減率 1.80							

Discussions on Vibration Modes and Sound Generation Mechanism of Different Tiny Copper Bells

Bor-Tsuen Wang¹, De-Jiang Liu¹, Chia-hsien Huang¹, Ying-Hui Wu²

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

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

MOST Project No.: MOST 105-2622-E-020-001-CC3

Abstract

The tiny copper bells are made to mimic the large scale of bells that are too much cost and frequently hanged at the door for prayer and avoiding evil. This work aims to investigate the vibration characteristics of two tiny copper bells that made with different shapes and surface carvings as well as their sound generation mechanism. Finite element analysis (FEA) software, ANSYS, is adopted to construct the FE model of bells and perform theoretical modal analysis (TMA) so as to obtain theoretical modal parameters, i.e. natural frequencies and corresponding mode shapes. From obtained bell's mode shapes, the grid on the bell for experimental modal analysis (EMA) can be planned accordingly. The impact hammer is used as actuator and

the accelerometer as sensor, respectively, to determine structural frequency response functions (FRFs) that are used to perform curve-fitting by ME'scopeVES to obtain experimental modal parameters, including natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios. The percussion sound measurement on the tiny bell hit by steel stick is also carried out, and the sound pressure response is recorded and processed by Sound and Vibration Measurement (SVM) software to get sound auto spectrum as well as time-frequency plot. From the comparison between theoretical and experimental modal parameters, the tiny bell's vibration modes can be properly identified. In addition, the percussion sound spectrum can be correlated to those structural vibration modes. The percussion sound is also analyzed to get its fundamental frequency and overtone frequencies for tonality, sound pressure level and decay rate that are used as objective indices. The subjective evaluation is characterized by sharpness, brightness and continuity. Finally, both subjective and objective evaluations are correlated. Results show both numerical and experimental modal parameters agree well to each other. The sound perception difference between the two tiny copper bells can be interpreted by subjective and objective evaluation. This work presents the application of FEA and EMA to investigation on two tiny copper bells. The numerical and experimental techniques can be adapted to bell type's percussion instrument design and manufacture.

Keywords : Tiny Bell, Finite Element Analysis (FEA), Experimental Modal Analysis (EMA), Sound Generation