

不同結構厚度高爾夫球頭之振動模態與聲音關聯性探討

王栢村¹、丁國基²、張年華²、王文志³、謝嘉展³、黃裕仁⁴、陳詠升⁴

¹國立屏東科技大學 機械工程系 教授

²國立屏東科技大學 機械工程系 研究生

³國立屏東科技大學 機械工程系 大學部 學生

⁴大田精密工業股份有限公司研發中心

Email: wanbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文對3個不同厚度之高爾夫球頭進行實驗模態分析(experimental modal analysis, EMA),以求得其模態振動特性,包括自然頻率、模態振型及阻尼比。藉此觀察這三個球頭結構變更,對球頭振動模態特性的影響,同時也以高爾夫球作為衝擊頭,撞擊球頭打擊面,並量測球頭之衝擊音,由各球頭之聲音頻譜圖,可觀察球頭結構變更時,各聲音峰值頻率與對應音量大小之差異,進而探討不同結構厚度之球頭衝擊聲音與振動模態的關聯性。結果顯示,不同結構厚度將影響結構自然頻率及對應之模態振型,進而改變球頭之衝擊聲音頻譜特性,包括峰值頻率對應之結構振動模態與音量大小,藉由本文之分析探討可更深入了解高爾夫球頭結構厚度對其衝擊聲音的影響,有助於未來基於球頭聲音品質特性之球頭設計參考。

關鍵詞: 實驗模態分析、模態振型、聲音頻譜、峰值頻率。

1. 前言

高爾夫球這項運動近年來是越來越多人開始接觸,在球頭的材質及設計的品質也逐漸的開始受到重視。然而結構的變化對高爾夫球的打擊及聲音之影響並不容忽視,因此在各種需求中,想開發新式球具的情形下,對高爾夫球頭的結構,找出其聲音與振動之關連性,應用在球頭之設計中,便能達到降低設計時所需花費的時間及成本。

高爾夫球具模態測定與分析評估方面,王和黃[1]此文是對一高爾夫球鐵桿進行有限元素分析與實驗模態分析,分別求取其球桿頻率響應函數及模態參數。利用有限元素法架構三種不同有限元素模型,主要是為了看出以不同方式架構有限元素模型所帶來的差異,分別求取這三種模型之模態參數,並與實驗模態分析求取之模態參數做比較,同時亦進行簡諧分析求取頻率響應函數並與實驗模態分析之值做比較,最後進行有限元素模型之修正,並探討不同模型之適應性。王和吳[2]此文主要對高爾夫球桿及單獨球頭分別進行有限元素分析,將所得之模態參數,進行比較及關聯性之探討以了解其振動特性,且在握把

處設定三種不同邊界條件,自由、固定、彈簧等邊界進行分析,預期找出不同邊界對模態參數之影響和各邊界間之關聯性。王和黃[3]主要是對相同高爾夫球桿與握把,但不同球頭之完整高爾夫球桿進行有限元素分析及實驗模態分析,分別求取其模態參數,並由其模態參數判斷球桿的品質及有限元素模型之可行性確認。丁等人[4]應用有限元素分析與實驗模態分析兩種方法,分別對網球拍進行分析,探討網球拍實驗值與理論值之模態參數與結構系統的頻率響應函數,進行比對以驗證其架構之有限元素模型的合適性,並可提供其理論分析及模擬等技巧在別種網球拍上,作為模態振動分析、設計變更之參考。王等人[5]以振動分析方法結合有限元素分析及實驗模態分析,對不同結構之高爾夫球的機械性質進行探討。主要是為了建立高爾夫球產品之分析及實驗技術,並建立參數化設計之理念。

高爾夫擊球聲音品質分析中,翁和康[6]主要針對8種不同品牌之高爾夫1號木桿球頭之擊球聲音,配合人耳聽覺與擊球聲音頻譜分析而找到辨別擊球聲音好聽與否之鑑別方法,以此來規劃出一套設計木桿頭的流程。康等人[7]針對不同品牌之高爾夫球桿進行擊球聲音頻譜分析,同時對球頭與高爾夫球以有限元素軟體進行碰撞分析,利用整體碰撞模型所產生之加速度進行快速傅立葉轉換所得之頻譜圖,藉以探討球頭結構與擊球聲音頻譜之關聯性,以建立高爾夫擊球聲音評估之方法。王等人[8]此篇文獻主要對不同之高爾夫球桿進行擊球聲音測試,量測其不同球桿擊球時之聲音頻譜,並利用套裝軟體進行運算取得1/3八音頻帶頻譜及1/1八音頻帶頻譜,最後套入室內噪音評估指標進行綜合比較,以瞭解不同高爾夫球桿擊球音頻之特性。王和黃[9]此文主要是利用不同高爾夫球桿,量測敲擊所產生之聲音頻譜,藉由各種對聲音的評估指標,來比較不同球桿間聲音頻譜之特性及聲音品質之差異,實驗結果顯示不同評估指標對聲音品質皆呈一致性,表示此種量測方法及評估可用在高爾夫球桿的擊球聲音量測與聲音品質分析。王等人[10]對高爾夫球木桿球頭,進行有限元素分析及實驗模態分析,以求得球頭之振動模態特性,並量測球頭表面之加速度及聲音信號,以對球頭的振動模態及聲音輻射之關聯性作探討。

本文主要目的是對不同厚度結構之高爾夫球頭進行 EMA，由 EMA 量測結果探討厚度對球頭振動模態之影響，進而探討球頭結構振動模態與聲音之關連性。

2. 球頭結構特徵

圖 1 為球頭實體圖，球頭本體材質皆為 Ti64，此球頭共分為 73 個不同厚度區塊，圖 2 為球頭厚度位置分佈示意圖，其中 A1~A4 區塊為打擊面(face)，A5~A53 及 A73 區塊為頂蓋(crown)，A54~A72 區塊為底蓋(sole)，將三個不同結構之球頭分為 Type-1、Type-2 及 Type-3，並以 Type-3 為厚度變更的基準，分別於 C1、C2 及 C3 區塊做厚度變更，如表 1 所示，使 Type-1 在 C1 區塊厚度變薄，C2 及 C3 區塊加厚，Type-2 則在 C1 及 C2 區塊加厚，C3 區塊變薄，並將三個球頭彙集成表 2 球頭厚度表。



圖 1 為球頭實體圖

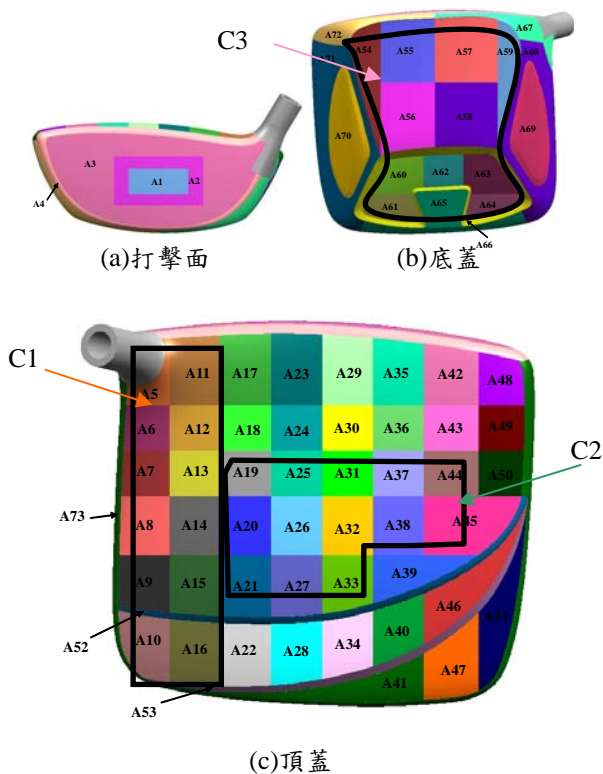


圖 2 球頭厚度位置分佈示意圖

表 1 球頭結構變更表

區塊 \ 種類	Type-1	Type-2	Type-3
C1	-	+	變更基準
C2	+	+	變更基準
C3	+	-	變更基準

表 2 球頭厚度表

分佈位置	Type-1(193.3g)	Type-2(194.7g)	Type-3(191.3g)
	厚度(mm)	厚度(mm)	厚度(mm)
A1	3.3	3.3	3.3
A2	3.14	3.14	3.14
A3	2.8	2.8	2.8
A4	1.5	1.5	1.5
A5	1.3	1.3	0.7
A6	0.32	0.58	0.56
A7	0.34	0.6	0.6
A8	0.52	0.72	0.57
A9	0.52	0.72	0.62
A10	0.68	1	0.79
A11	0.74	0.82	0.78
A12	0.37	0.58	0.52
A13	0.38	0.72	0.48
A14	0.36	0.78	0.51
A15	0.31	0.84	0.61
A16	0.69	1	0.81
A17	0.79	0.64	0.53
A18	0.53	0.57	0.47
A19	0.56	0.67	0.41
A20	0.56	0.62	0.45
A21	0.49	0.67	0.52
A22	0.83	0.84	0.76
A23	0.58	0.6	0.61
A24	0.57	0.54	0.48
A25	0.6	0.65	0.32
A26	0.65	0.74	0.44
A27	0.64	0.81	0.46
A28	0.84	1.05	0.86
A29	0.58	0.58	0.53
A30	0.58	0.6	0.45
A31	0.68	0.52	0.32
A32	0.64	0.78	0.53
A33	0.75	0.65	0.59
A34	0.89	1.05	0.9
A35	0.72	0.57	0.75
A36	0.85	0.65	0.53
A37	0.7	0.62	0.49
A38	0.78	0.73	0.58
A39	0.81	0.63	0.7
A40	0.95	1.05	0.94
A41	0.84	1.05	0.87
A42	0.75	0.82	0.85
A43	0.62	0.71	0.62
A44	0.65	0.63	0.56
A45	0.73	0.7	0.64
A46	0.94	1.05	0.93
A47	0.88	1.05	0.9
A48	0.78	0.93	0.93
A49	0.7	0.8	0.72
A50	0.67	0.8	0.7
A51	0.85	1.05	0.88
A52	1	0.85	0.85
A53	1	0.9	0.9
A54	0.86	0.8	0.8
A55	0.9	0.9	0.9
A56	0.8	0.8	0.8
A57	0.9	0.9	0.9
A58	0.8	0.8	0.8
A59	0.85	0.8	0.82
A60	0.98	0.88	0.98
A61	0.85	0.78	0.79
A62	0.87	0.8	0.85
A63	0.92	0.72	0.74
A64	0.84	0.72	0.88
A65	0.9	0.8	0.82
A66	1.1	1.1	1.1
A67	1.29	1.36	1.29
A68	1.07	1.3	1.18
A69	0.8	0.72	0.86
A70	0.85	0.85	0.86
A71	0.83	0.8	0.85
A72	0.84	1.36	0.86
A73	0.8	0.7	0.7

3. 量測步驟與方法

圖3為敲擊點規劃圖，分別於球頭打擊面、頂蓋及底蓋三個部份，各規劃了121點作為量測點，因此共363個量測點，圖4(a)與圖4(b)分別為球頭振動量測實驗及衝擊音量測圖，以棉懸吊起模擬自由邊界，加速度計與麥克風作為感測器，再分別以鋼頭衝擊錘進行球頭激振及高爾夫球衝擊錘量測衝擊音，並由圖4(c)所示，訊號經由導線傳輸到頻譜分析儀，進行快速傅立葉轉換，可得到球頭之頻率響應函數與聲音線性頻譜即自身功率頻譜密度函數(autospectrum)，再進一步藉由ME'Scope軟體做曲線嵌合，可得到球頭之模態參數，即模態振型、自然頻率與阻尼比。

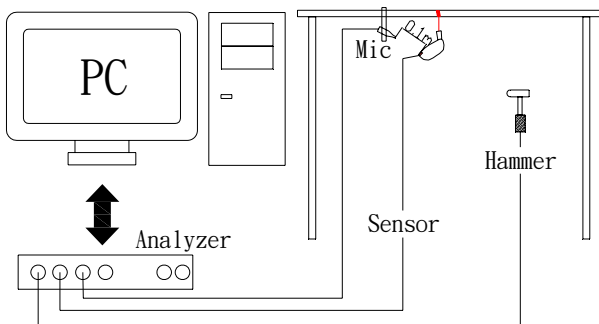


(a)打擊面 (b)頂蓋 (c)底蓋

圖 3 敲擊點規劃圖



(a)球頭振動量測圖 (b)球頭衝擊音量測圖



(c) 球頭振動與聲音量測架設示意圖

圖 4 球頭振動與聲音量測圖

4. 結果與討論

依上述之實驗，分別對三個球頭進行振動特性與聲音頻譜量測，而球頭聲音與振動關聯性，可對頻率響應函數、模態參數及聲音與振動關聯性三部份進行討論。

4.1 模態參數比對

(1) 由表 3 頻率對照表，可發現 Type-2 球頭厚度整體增加，因而造成振動頻率下降，此結果顯示厚度的增減，對振動頻率影響的關係。

- (2) 在模態振型比對中，可由模態振型保證指標表(MAC)做判斷，其值越接近 1 代表有較佳的振型對應，從表 2 中可發現由於打擊面在結構厚度上並無改變，因此 MAC 對應特性較佳，大都在 0.7~0.9 之間，而頂蓋 MAC 值因 Type-2 球頭將頂蓋結構整體加厚，與 Type-3 形狀趨勢相差較小所以 MAC 值對應特性也相當高，反之 Type-1 球頭將結構 C1 區塊厚度變薄及 C2 區塊厚度增加，與 Type-3 球頭頂蓋差異較大，因此 MAC 對應特性相對較低，相較 Type-1 與 Type-2 球頭，因頂蓋厚度改變趨勢完全不同，所以 MAC 值較差。
- (3) 因為此三個球頭底蓋厚度變化差異量較小，且為區塊整體變更，使底蓋 MAC 值對應特性在 2000Hz 前之低頻處都有良好對應。

表 3 球頭自然頻率及模態振型保證指標(MAC)表

Freq.(Hz)		MAC									
Type1	Type2	Type3	Face			Crown			Sole		
			T1-T3	T2-T3	T2-T1	T1-T3	T2-T3	T2-T1	T1-T3	T2-T3	T2-T1
1741.3	1730.7	1763.3	0.9754	0.8936	0.9247	0.5995	0.9335	0.6544	0.9731	0.9625	0.9634
1998.1	2000.9	2016.8	0.9619	0.9243	0.8764	0.5653	0.9324	0.5696	0.9606	0.7893	0.7234
3270		3241.6	0.1748			0.1469			0.6067		
3373.8	3383.2	3377.9	0.1389	0.6166	0.6457	0.0138	0.2763	0.1164	0.3141	0.7454	0.5033
3619.5	3651.5				0.7385			0.0209			0.0433
3970.0		3976.2	0.9577			0.0309			0.2374		
4141.2	4135.8				0.9465			0.1472			0.6593
4306.0	4238.1	4298	0.9263	0.9633	0.9601	0.0447	0.0625	0.0276	0.1213	0.4777	0.1601
4380.3	4384.0	4377.9	0.7255	0.8342	0.3749	0.0034	0.0012	0.1275	0.3194	0.0008	0.1541
4572.7		4542.3	0.9181			0.0081			0.0337		
4737.7	4720.2	4722.3	0.1078	0.3291	0.8404	0.0308	0.0506	0.0013	0.022	0.4265	0.0113
5428.1	5436.2	5439.3		0.1055	0.0124		0.0238	0.0137		0.1761	0.0318

4.2 聲音與振動模態之關聯性

圖 5 為球頭振動與聲音頻譜圖，其中實線為 sonud spectrum，虛線為球頭頻率響應曲線，由圖 5 與表 4 中可得知相對應之振動模態與聲音峰值，討論如下：

- (1) 表 4 為球頭聲音與振動模態對照表，表中分別有三個球頭擊球聲響較大之峰值頻率，其中 Type-1 與 Type-3 有 7 個，而 Type-2 只有 5 個，而比較球頭聲響最大處，可發現 Type-1 與 Type-3 球頭皆在振動頻率 1750Hz 左右為最大處，而 Type-2 卻在 2000Hz 左右，顯示球頭厚度增加，會改變聲音響度的大小及影響最大聲響的振動頻率。
- (2) 一般高音(1,1)模態對聲音輻射效益較大，由表 4 可看出三個球頭，除了前兩個聲音對應模態為 E02 與 E04 的頂蓋與底蓋(1,1)模態，其餘皆為打擊面(1,1)模態，由此可判斷其主要影響聲音的地方，而從頂蓋(1,1)模態可看出 Type-1 球頭，因將結構 C1 區塊厚度變薄及 C2 區塊厚度增加，使頂蓋(1,1)模態相較 Type-2 與 Type-3 有向左偏移的趨勢。

表 4 球頭聲音與振動模態對照表

	聲音頻率	dB	Mode	振動頻率	Face	Crown	Sole
Type-1	1740.6	74.82	E02	1741.3			
	2000	67.77	E04	1998.1			
	3371.8	69.51	E16	3373.8			
	3968.7	64.57	E20	3970			
	4140.6	71.05	E22	4141.2			
	4300	69.15	E23	4306			
	4568.7	69.39	E26	4572.7			
Type-2	1731.25	53.3	E02	1730.7			
	2000.00	62.14	E04	2000.9			
	3646.88	53.05	E17	3651.5			
	4234.38	56.14	E23	4238.1			
	4718.75	53.6	E29	4720.2			
Type-3	1762.50	73.64	E02	1763.3			
	2018.75	63.31	E04	2016.8			
	3240.63	66.85	E16	3241.6			
	3975.00	64.00	E23	3976.2			
	4293.75	70.94	E25	4298.0			
	4381.25	73.95	E26	4377.9			
	5437.50	64.63	E40	5439.3			

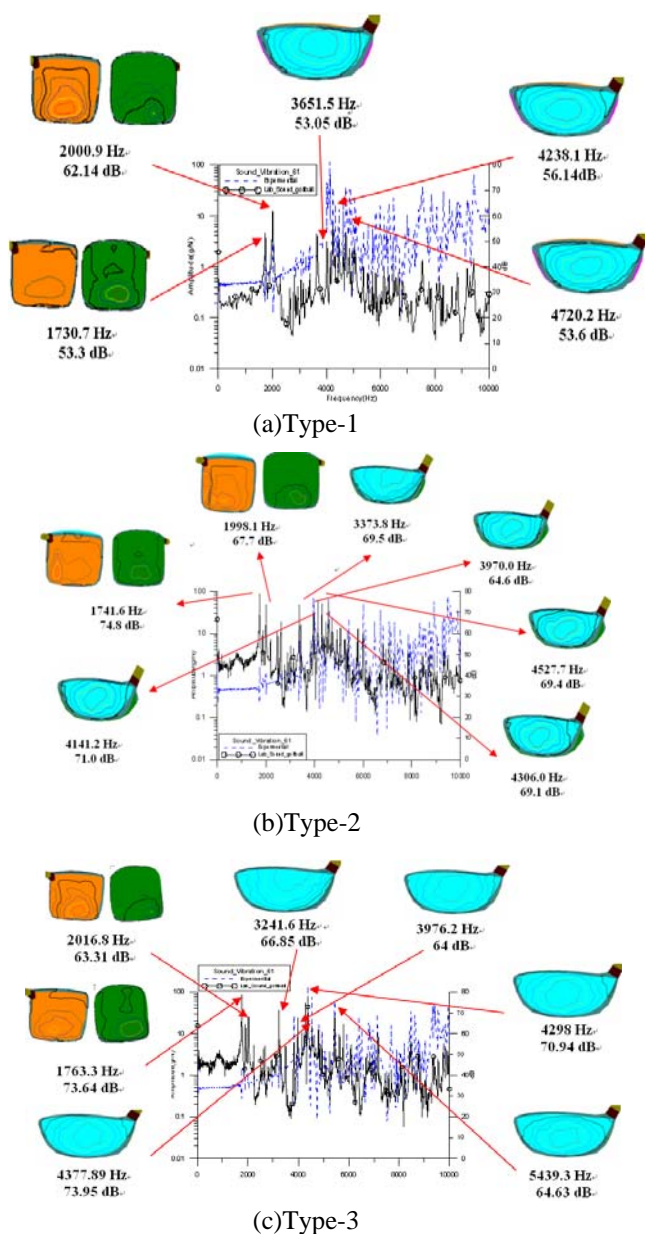


圖 5 球頭振動與聲音頻譜圖

5. 結論

本文對三個不同結構厚度之高爾夫球頭進行實驗模態分析，並同時以高爾夫球衝擊頭量測聲音線性頻譜，由分析之結果可得以下結論：

- (1) 利用實驗模態分析量測不同結構高爾夫球頭之振動特性，可得知不同厚度區塊對球頭振動模態之影響。
- (2) 藉由不同結構厚度之高爾夫球頭進行實驗模態分析，結果得知擊球聲音頻譜雖有不同，但仍由球頭打擊面、頂蓋主導擊球聲音。
- (3) 本文所建立之不同結構高爾夫球頭相關資料，可對未來進行球頭結構變更設計，提供一參考資料。

6. 參考文獻

- [1] 王栢村、黃瑞光，「高爾夫球桿振動模態參數之測定」，中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議論文集(二)，新竹，第 457-464 頁，1999。
- [2] 王栢村、吳國禎，「高爾夫球木桿之模態分析」，中華民國振動與噪音工程學會第十二屆學術研討會，台北，論文編號：A3-2，2004。
- [3] 王栢村、黃瑞光，「不同球頭之高爾夫球桿振動特性及品質之探討」，中華民國振動與噪音工程學會第八屆學術研討會，屏東，第 209-216 頁，2000。
- [4] 丁麗芬、王栢村、林寶城、陳柏宏、張家華，「網球拍之模態特性驗證」，教練科學，第 2 期，第 29-40 頁，2003。
- [5] 王栢村、李建興、趙志燁，「高爾夫球模型驗證及振動特性探討」，Taiwan ANSYS User Conference，台北，編號 5-8，第 243-250 頁，2006。
- [6] 翁焜煌、康淵，「高爾夫 1 號木桿頭打擊聲響品質之頻譜分析研究」，大專高爾夫學刊，第 2 期，第 26-39 頁，2003。
- [7] 康淵、溫柏青、鍾文仁、張永鵬、王俊傑，「高爾夫球木桿力學與音響」，中華民國第二十屆機械工程研討會論文集，台北，第 1009-1016 頁，2003。
- [8] 王栢村、李建興、許燕吉、高毓廷、謝佳雄，「不同高爾夫球桿擊球之音頻特性分析」，中華民國音響學會第十六屆學術研討會論文集，台南，論文編號：A8，2006。
- [9] 王栢村、黃瑞光，「不同球頭之高爾夫球桿聲音品質分析」，中華民國音響學刊，第 8 卷，第 2 期，第 53-62 頁，2002。
- [10] 王栢村、林昆正、徐川洋，「高爾夫球振動與聲音關聯性之探討」，中華民國音響學會第十六屆學術研討會論文集，台北，第 212-219 頁，2003。

Correlation Study between Vibration Modal Characteristics and Impact Sound of Different Golf Club Heads with Various Thickness

Bor-Tsuen Wang¹, Guo-Ji Ding², Nian Hua Zhang², Zhi Wen Wang³, Jia Zhan Xie³, Yu Ren Huang⁴, Yong Sheng Chen⁴

¹ Professor, ² Graduate student, ³ University student

¹²³ Department of Mechanical Engineering National Pingtung University of Science and Technology
Engineer

⁴ O-TA Precision Industry Co., Ltd
Email: wanbt@mail.npust.edu.tw

Abstract

This work aims to perform experimental modal analysis (EMA) on three golf club heads with different structural thickness to obtain their modal parameters, including natural frequencies, mode shapes and damping ratios and so forth to discuss the effects on their modal characteristics. A golf ball is also applied as the impact hammer to strike on the hitting face of the club head and measure the impact sound of the club heads. The radiated sound spectra help to observe the peak resonance frequencies and their sound pressure level. Therefore, the effect of structural thickness on modal properties and sound radiation can be discussed. Results show that different thickness of club heads affect their natural frequencies as well as their corresponding mode shapes and so forth change their sound spectra, including peak frequencies and sound pressure levels. This work shows the effect of structural thickness on the impact sound of club heads and will be beneficial to the club head design in considering its sound quality.

Keywords: experimental modal analysis, modal shape, sound spectrum, peak frequency