

高尔夫球头声音与振动模态关联性探讨

王栢村¹⁾ 陈又毓¹⁾ 许燕吉²⁾ 高毓廷²⁾ 黄裕仁²⁾ 谢佳雄²⁾

1) 屏东科技大学机械工程系, 屏东 2) 大田精密工业股份有限公司研发中心, 屏东

摘要 对典型高尔夫球木杆之球头分别进行有限元素分析与实验模态分析,以验证求得理论分析模型,进而探讨球头声音与振动模态关联性.首先执行最佳化分析法以求得球头顶盖碳纤维素材之等效材料参数,使得理论模态分析所得之自然频率和模态振型与实验模态分析结果相吻合.同时量测球头冲击音,由声音频谱图可观察各峰值频率与球头特定之振动模态有极大关联性.

关键词 有限元素分析;实验模态分析;振动模态;声音频谱

Correlation study of golf club head impact sound and vibration modes

WANG Bortsuen¹⁾, CHEN Youyu¹⁾, XU Yanji²⁾, GAO Yuting²⁾, HUANG Yuren²⁾, XIE Jiaxiong²⁾

1) Department of Mechanical Engineering, Pingtung University of Science and Technology, China Taipei

2) O-TA Precision Industry Co. Ltd., China Taipei

ABSTRACT This work performed both finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA), respectively, to verify the analytical model of a typical wooden golf club head and so forth to study the correlation of its impact sound and vibration characteristics. First, optimum analysis was carried out to determine the equivalent material properties of club head that is implemented in analytical model to do theoretical modal analysis. Modal parameters, including natural frequencies and mode shapes, were obtained and compared with those from EMA. The impact sound of club head was also measured. Results show that the peak resonances of sound spectrum are strongly correlated to some specific vibration modes.

KEY WORDS finite element analysis; experimental modal analysis; vibration mode; sound spectrum

高尔夫球向来都是一项热门的运动,热爱此项运动的人也逐年增加,对于球具的品质要求也是越来越注重,为了因应市场的需求,高尔夫球具的性能也发展的越来越人性化,在种种的需求下,开发一种新式球具所要消耗的是大量的设计时间及耗材成本.结合有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)与实验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)进行模型验证,得到等效有限元素模型,以应用于提高生产效能与缩短研发时间^[1-5].而在击球声音方面的研究^[6-10]是量测高尔夫球声音频谱,并探讨击球声音特性与球头品质之差异.

为了解球头之振动特性,对球头进行实验模态分析,以求得球头之模态参数,进而探讨球头声音与振动模态之关联性.

1 球头模型验证

1.1 实验模态分析

对高尔夫球头进行实验模态分析,将球头分为三个部分,打击面、顶面及底面,各为121个量测点,故整体球头有363个量测点,如图1,并以冲击锤为激振器进行实验模态分析.图2为高尔夫球头实验结构图,利用冲击锤激振球头结构,加速度计为感测器,当感测器接收到信号,通过频谱分析仪快速傅立叶转换可得到频率响应函数,利用曲线嵌合软件可取得高尔夫球头之模态参数,即自然频率、模态振型.

1.2 有限元素分析

本文以ANSYS套装软件对高尔夫球头进行有

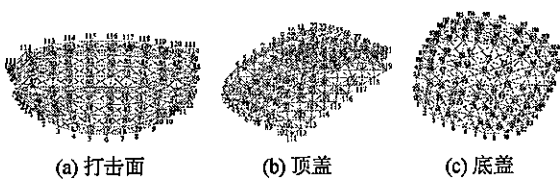


图1 球头量测点规划示意图

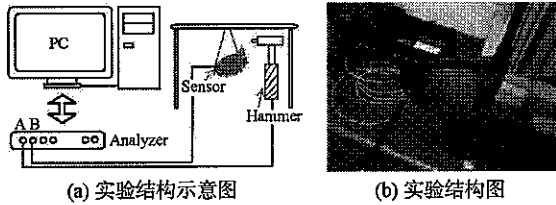


图2 高尔夫球头实验结构图

限元素分析. 图3为高尔夫球头之有限元素模型, 利用纤维素材试片及线性壳元素(Shell63)建构高尔夫球头, 而球头内的三根肋则是以梁元素(Beam4)建构之有限元素模型, 除顶盖碳纤维材料假设为正向性材料模型, 其余钛材质均假设为等向性材料模型. 分割方式采用 Mapped Mesh 方式分割, 共分为 7461 个节点与 6689 个元素, 均无任何外力负荷, 高尔夫球头顶盖碳纤维素材与高尔夫球头边界条件均采用自由边界. 对高尔夫球头进行模态分析, 主要目的在于求得其模态参数, 其中包括自然频率与模态振型.

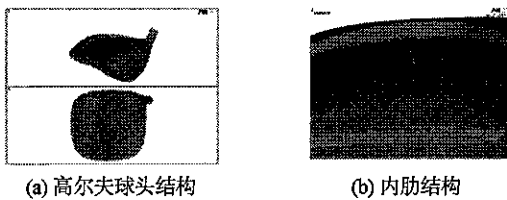
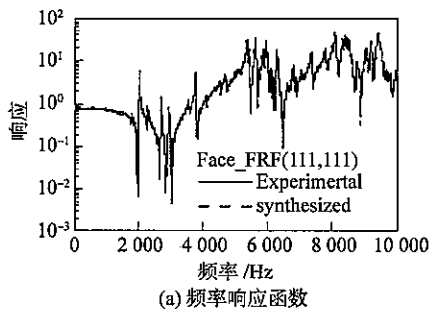


图3 高尔夫球头之有限元素模型

2 球头振动与声音关联性

利用麦克风进行量测, 可得到激振于球头结构之声音频谱. 主要以冲击锤为激振器, 麦克风为感



(a) 频率响应函数

测器, 麦克风投影点与高尔夫球头间距离为 0.2 m, 量得实际击球声音信号后, 通过频谱分析仪经快速傅立叶转换得到自身功率频谱密度函数, 此即为激振高尔夫球头结构声音之线性频谱.

得到高尔夫球头结构声音之线性频谱后, 将线性频谱峰值频率与高尔夫球头振动模态进行对应比较, 探讨激振高尔夫球头结构声音与振动模态之关联性.

3 结果与讨论

3.1 高尔夫球头之模型验证

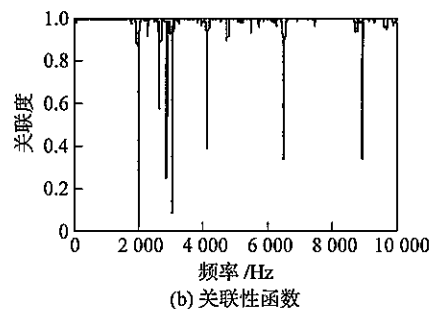
在高尔夫球头之模型验证中, 于最佳化分析过程之目标函数主要设置为以实验所得自然频率为基准, 并与理论所得自然频率两者误差范围在 $\pm 10\%$ 内, 因此实验分析所得之正确性与可靠度显得相当重要.

为探讨 EMA 实验之正确性与可靠度, 图4为高尔夫球头打击面频率响应函数(FRF)与关联性函数图, 其中图4(a)为 $H_{ij} = H_{111,111}$, j 代表冲击锤之施力点位置, i 为加速度计量测点位置, 综合讨论如下:

(1) 首先由图4(b)之关联性函数, 除了反共振点之值偏低外, 大都接趋近于 1, 表示实验品质之可靠性.

(2) 图4(a)为 FRF 曲线图, Experimental 为实验所得, 而 Synthesized 为经过曲线嵌合后所推算求得之合成 FRF 曲线. 可观察两条曲线几乎重叠, 表示曲线嵌合成功, 也就是所求得之自然频率、模态振型及阻尼比等模态参数之正确性.

在确认实验模态分析所得模态参数之正确性后, 接着配合有限元素分析进行最佳化分析, 以 EMA 所得模态参数为基准, 以完成高尔夫球头之模型验证, 进而得到与实际结构等效之数学模型. 表1为 EMA 与 FEA 之自然频率误差表, 以及模态振型比较之模态保证指针 (Modal Assurance Criterion,



(b) 关联性函数

图4 打击面响应

MAC)总表,其中,EMA 包含打击面(Face)、顶面(Crown)及底面(Sole)独立实验所得之模态编号及

其对应之自然频率,FEA 则为整体球头经有限元素理论模态分析所得之自然频率比较,综合讨论如下:

表1 EMA 与 FEA 自然频率误差与模态振型比较之模态保证指标(MAC)比较表

EMA						FEA		Err./%	MAC		
Face		Crown		Sole		Head			Face	Crown	Sole
Mode	Freq/Hz	Mode	Freq/Hz	Mode	Freq/Hz	Mode	Freq/Hz				
E1	1793.7	E3	1794.3	E1	1793.5	F1	1647.1	-8.20	0.879	0.892	0.696
E2	2037.3	E4	2036.2	E2	2037.7	F3	2067.5	1.54	0.789	0.458	0.106
E3	2292.7	E6	2292.2	E3	2292.6	F4	2222.3	-3.05	0.689	0.004	0.392
E4	2616.7	E8	2615.1	E4	2616.6	F5	2414.3	-7.68	0.463	0.146	0.592
E5	2711.8	E9	2710.9	E5	2711.9	F6	2688.9	-0.81	0.474	0.484	0.580
E6	2955.9	E10	2954.7	E6	2955.2	F7	3221.6	9.03	0.285	0.505	0.243
E9	3571.4	E13	3570.5	E9	3572.0	F10	3695.8	3.50	0.795	0.134	0.449
E12	3935.8	E17	3935.8	E12	3937.2	F11	4098.2	4.12	0.479	0.011	0.018
E13	4110.2	E18	4108.8	E13	4108.5	F13	4300.0	4.54	0.894	0.356	0.153
E15	4534.8	E20	4534.4	E16	4535.0	F15	4534.9	0.01	0.446	0.027	0.307
E16	4655.5	E21	4661.3	E17	4652.3	F16	4697.9	0.77	0.394	0.059	0.003
E17	4708.8	E23	47082.2	E18	4707.8	F18	4904.5	4.18	0.357	0.081	0.031
E19	5073.1	E26	5067.6	E21	5076.0	F19	4976.3	-1.80	0.457	0.032	0.006
E20	5181.4	E27	5175.7	E22	5180.2	F20	5252.0	1.47	0.207	0.009	0.146
E22	5413.7	E30	5412.8	E24	5416.2	F22	5612.5	3.72	0.343	0.017	0.161
E23	5627.7	E32	5623.5	E26	5633.8	F23	5667.2	0.79	0.654	0.196	0.001
E24	5754.8	E33	5756.8	E27	5751.0	F24	5719.8	-0.64	0.598	0.039	0.002
E27	5961.7	E36	5960.5	E32	5965.5	F25	5872.9	-1.47	0.470	0.108	0.000
E28	6114.2	E38	6113.3	E33	6116.0	F26	620.64	1.44	0.633	0.100	0.012
E29	6189.1	E39	6193.1	E34	6185.2	F27	6278.2	1.36	0.703	0.005	0.082
E30	6297.4	E40	6298.1	E35	6300.7	F28	6462.3	2.60	0.717	0.001	0.246
E31	6644.6	E42	6656.0	E39	6658.0	F30	6635.1	-0.31	0.375	0.016	0.106
E34	6881.4	E44	6886.4	E42	6881.5	F32	6973.8	1.38	0.603	0.016	0.000
E35	7064.8	E45	7066.4	E43	7074.6	F33	7100.9	0.49	0.204	0.028	0.015
E37	7373.6	E48	7374.5	E46	7379.3	F35	7374.7	-0.01	0.709	0.001	0.183
E38	7533.6	E49	7535.0	E48	7534.4	F36	7549.7	0.19	0.157	0.009	0.036
E41	7707.9	E52	7695.8	E50	7706.0	F37	7624.5	-0.93	0.310	0.003	0.000
E42	7806.7	E53	7807.8	E52	7810.2	F38	7722.7	-1.08	0.230	0.135	0.000
E44	7902.0	E54	7901.0	E54	7901.5	F40	7975.2	0.94	0.366	0.056	0.032
E47	8097.7	E56	8108.5	E57	8108.3	F41	8056.9	-0.51	0.414	0.126	0.189
E50	8330.9	E58	8333.9	E60	8336.9	F45	8422.4	1.03	0.819	0.017	0.018
E51	8406.9	E60	8410.8	E61	8412.2	F46	8502.6	1.09	0.629	0.055	0.015
E54	8616.3	E63	8625.7	E64	8610.1	F48	8682.6	0.63	0.585	0.014	0.004
E57	8848.7	E65	8856.7	E68	8849.3	F49	8752.1	-1.81	0.375	0.022	0.086
E58	8907.4	E66	8911.2	E69	8906.1	F50	8805.3	-1.22	0.407	0.036	0.038
E61	9222.1	E71	9227.6	E73	9225.7	F54	9061.0	-1.81	0.476	0.115	0.006
E68	9697.8	E78	9694.2	E78	9689.4	F59	9667.2	-0.29	0.406	0.027	0.014
E69	9785.5	E79	9772.8	E79	9784.8	F61	9789.7	0.17	0.213	0.059	0.019
E71	9898.0	E80	9899.5	E81	9897.3	F63	9224.5	0.25	0.436	0.060	0.003

(1) 由于三个部位为独立之实验,其模态数略有差异,表中所列为自然频率相互之对应,自然频率值虽有少许差异,由 MAC 值可判断为相同之模态.

(2) 以 Face 之 E1 模态为 1793.7 Hz 为例,而 Crown 及 Sole 之 E3 模态为 1794.3 Hz 及 E1 模态为 1793.5 Hz,与 FEA 之 F1 模态 1633.7 Hz 比较,自然频率误差约 - 8.92%,而 MAC 值除 Sole 为 0.674,其余 Face 及 Crown 均 0.86 以上,代表四者之模态有良好之对应.

(3) 就自然频率之部分比较,除了少数几个模态自然频率误差在 ± 8% 外,大多数均在 ± 3% 以内,代表理论与实验之自然频率之比对上有一定程度的精准度,再观察少数误差大之自然频率其模态振型,发现顶面碳纤维加钛 64 之复合材料与钛 64 材料之交接处,就整体球头而言有明显大之振动量,因此对碳纤维加钛 64 之复合材料进行材料参数最佳化,使自然频率误差缩小.

(4) 就模态振型而言,有限元素分析与实验量测之模态振型均有一致性,而 MAC 为模态振型验证品质指针,其值越接近 1,表示两模态之振型对应性越高,由于固定加速度计于一个量测点,量测得到的值之方向性为加速度计摆放点之 Z 方向,而高尔夫球头之顶面及底面,外型多呈现曲面,导致 MAC 值偏低,而打击面整体趋近于平面,故以打击面作为 MAC 之参考面,从表中得知理论分析与实验量测之部分模态振型 MAC 值高于 0.7,显示理论与实验之振型对应性高.

3.2 球头声音与振动模态之关联性

现今消费者对于击球声音悦耳性非常重视,也是选购球具的重要因素之一,而击球声音与球头结构振动之间的关联性,则是需要去探讨的.图 5 是球头振动与声音频谱图,其中声音频谱是撷取打击面、顶面及底面之中心点位置.本文针对高尔夫球头激振声音与振动模态之讨论如下:

(1) 图 5(a)为高尔夫球头打击面之振动与声音频谱图,从中可以观察出声音高之频率与球头结构振动模态之频率有相对对应性,如 79.95 dB 为声音最高的频率于 4109.4 Hz,与振动模态频率于 4110.2 Hz(1,1)模态相对应,就打击面而言(1,1)模态会主导击球声音之可能性相当大.

(2) 图 5(b)为高尔夫球头顶面之振动与声音频谱图,从中可以观察出声音高之频率与球头结构振动模态之频率亦有相对对应性,如 78.5 dB 为声音最高的频率于 1796.9 Hz,与振动模态频率于 1794.3 Hz(1,1)模态相对应,就顶面而言(1,1)模态会主导

击球声音之可能性相当大.

(3) 如图 5(c)为高尔夫球头底面之振动与声音频谱图,从中可以观察出声音高之频率与球头结构振动模态之频率有相对对应性,如 79.95 dB 为声音最高的频率于 2037.5 Hz,与振动模态频率于 2037.7 Hz(3,1)模态相对应,就打击面而言(3,1)模态会主导击球声音之可能性相当大.

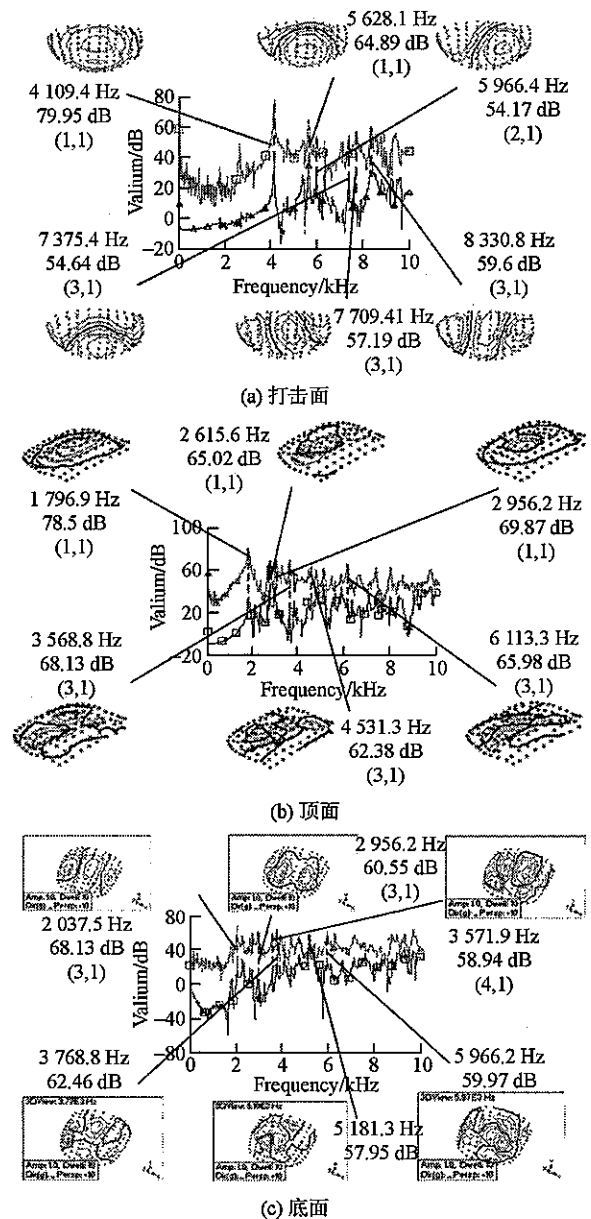


图 5 球头振动与声音频谱图

4 结论

本文对典型之高尔夫球木杆之球头进行了有限元素分析与实验模态分析,以验证求得理论分析模型,进而探讨球声音与振动模态关联性.结果显示有限元素分析与实验模态分析,有相当程度上的吻

合, 可将此高尔夫球头之有限元素模型视为与实际结构相符之等效数学模型, 对于后续击球声音与振动之关联性探讨, 有相当高之可靠度. 在高尔夫球头之声音与振动关联性探讨中, 分为三个部位, 即打击面、顶面及底面, 三个面之振动模态皆有与声音较大之频率相对应. 此后研究中会将球头与球杆结合为球具, 进而探讨实际挥杆击球之声音与振动之关联性.

参 考 文 献

- [1] Wang B T, Wu G Z. Modal properties of golf club wood driver in different boundary conditions // *The 13th National conference on the Society Sound and Vibration*, 2005
- [2] Gibson R F, Wen Y F. Evaluation of boundary condition for a composite plate vibration test // *Proceeding of the Spring Conference on Experimental Mechanics*, 1993: 19
- [3] Merkel R C, Tom B. Dynamic characterization and comparison of golf clubs // *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, 1999: 513
- [4] Friswell M I, Smart M G, Mottershead J E. Updating finite element models of golf clubs // *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, 1997: 155
- [5] Cheong S K, Kang K W, Jeong S K. Evaluation of the mechanical performance of golf shafts. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 464: 473
- [6] Wang B T, Lin K Z, Xu C Y. Discussions on correlation between vibration and sound radiation of golf club head // *2003 Annual Meeting and 16th Symposium of Acoustical Society of the Republic of China*, 2003: 212
(王栢村, 林昆正, 徐川洋. 高尔夫球头振动与声音关联性之探讨 // 中华民国音响学会第十六届学术研讨会论文集, 2003: 212)
- [7] Mitchell H A, Jones P S R, Rothberg S J. Hollow golf club head modal characteristics: determination and impact applications. *Experimental Mechanics*, 1998, 140: 146
- [8] Roberts J R, Jones R, Mansfield N J, et al. Evaluation of impact sound on the 'feel' of a golf shot. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 651: 666
- [9] Wang B T, Huang J K. The analysis of sound quality of golf clubs for different of club heads // *2000 Annual Meeting and 13th Symposium of Acoustical Society of the Republic of China*, 2000: 47
(王栢村, 黄瑞光. 不同球头之高尔夫球杆声音品质分析 // 中华民国音响学会第十三届学术研讨会论文集, 2000: 47)
- [10] Wicks A L, Knight C E, Neighbors J. The comparison of forged heads to cast heads for golf // *The 12th Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, 1993: 1797