

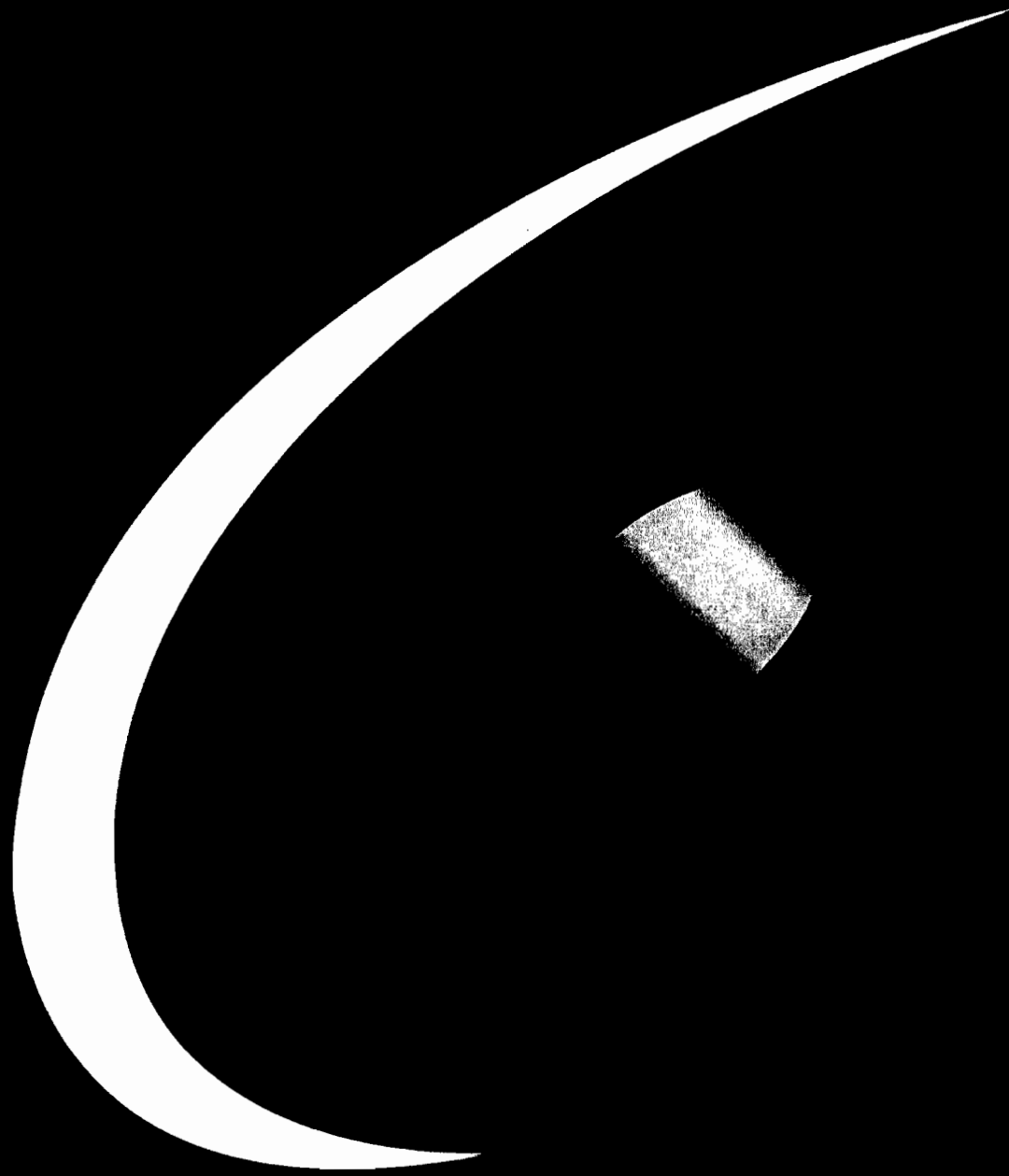
# 音響學會

會刊

第十一卷 第一期  
民國三十七年十一月

中華民國音響學會

THE ACOUSTICAL SOCIETY OF THE REPUBLIC OF CHINA



## 不同高爾夫球桿擊球之音頻特性分析

王栢村<sup>1</sup>、李建興<sup>2</sup>、許燕吉<sup>3</sup>、高毓廷<sup>4</sup>、謝佳雄<sup>4</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

<sup>3</sup>大田精密工業股份有限公司研發中心經理

<sup>4</sup>大田精密工業股份有限公司研發中心工程師

### 摘要

本文針對不同高爾夫球桿進行擊球聲音測試，主要探討其音頻特性。以麥克風為感測器量測得擊球聲音線性頻譜資訊，由樂音角度探討其差異性，也將線性頻譜資訊轉換成三分之一八音頻帶，並藉由室內噪音評估標準探討不同球桿擊球聲音差異，以期建立高爾夫球桿擊球聲音有一量化指標。本文除了對高爾夫擊球聲音品質差異性有初步瞭解，亦探討不同球桿擊球之聲音差異，希能發展為高爾夫球桿之品質指標之一，作為球桿設計製造參考。

關鍵字：擊球測試、聲音品質、線性頻譜、1/3 八音頻帶、品質指標

### Characterization of Sound Spectrum of Different Golf Clubs in Swing

B. T. Wang<sup>1</sup>, J. X. Li<sup>2</sup>, Y. J. Xu<sup>3</sup>, Y. T. Gao<sup>4</sup>, J. X. Xie<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor, <sup>2</sup> Graduate student

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

<sup>3</sup>Manager, <sup>4</sup>Engineer

O-TA Precision Industry Co., Ltd

### Abstract

This work performs swing tests for different golf clubs to characterize the sound properties. First, the sound quality is defined, and made a description of its difference and expression. Swing tests for different golf clubs are then carried out to determine the linear spectrum data by the microphone. The impact sound characteristics are discussed from the point of view in musical tones. Furthermore, the linear spectrum data is transferred to 1/3 octave band and the different sound quality is characterized

by room noise rating index. This work establishes the general idea for sound quality of swing test for different golf clubs, and characterizes the difference of swing test for different golf clubs. The selection of proper quality index for golf clubs is desired and will be beneficial to the golf club design.

*Keyword: swing test, sound quality, linear spectrum, 1/3 octave band, quality index*

## 壹、前言

目前高爾夫球桿市場中，行銷手法不外乎低重心，高恢復係數等，隨高爾夫球桿市場的擴大，客戶對球桿使用之舒適度亦逐漸要求，其中對擊球聲音悅耳度備受重視，而擊球聲音易受球頭材料、結構等種種因素所影響，此外，外在環境更對個人聽覺造成不等之差異，未來在高爾夫球桿之研發過程中，如何確認成品之擊球聲音有較佳之悅耳度為未來之重要課題，在此之前，則必須先對擊球聲音量化，以探討擊球聲音之特性，更瞭解何謂悅耳度佳之聲音頻譜。

過去在有關高爾夫球桿擊球聲音特性探討部分，Hocknell *et al.* [1]主要利用雷射振動儀針對空心球頭求得其模態特性，並利用球頭中心擊球與偏心擊球所產生之加速度與頻譜進行比較與探討，期望藉此得到球頭模態與聲音頻譜之關聯性。翁和康[2]針對不同品牌之高爾夫球頭之擊球聲音，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。康等人[3]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。Roberts *et al.* [4]結合主觀資料量測(Measurement of subjective data)與客觀資料量測(Measurement of objective data)針對高爾夫擊球聲音與擊球感覺進行關聯性探討，比較主觀分析與客觀量測所得數據加以評估，得到量化之高爾夫擊球聲音特性。王和黃[5]針對不同高爾夫球桿進行傳統實驗模態分析，以麥克風為感測器，對球頭敲擊聲音進行聲音頻譜量測，並對聲音品質加以定義，並得到高爾夫球頭擊球聲音品質之評估模式。王等人[6]首先結合有限元素分析與實驗模態分析求得高爾夫球頭之等效數學模型，並利用衝擊錘對球頭打擊面不同點數進行球頭敲擊聲音頻譜量測，並探討球頭振動模態與敲擊聲音之關聯性。

本文針對市售擊球聲音悅耳度相對良好之不同高爾夫球桿型號

Type-A~Type-E 進行擊球聲音測試，主要探討其擊球音頻特性。利用麥克風為感測器量測得擊球聲音線性頻譜資訊，試以樂音角度探討其頻譜特性，也將線性頻譜資訊轉換成三分之一八音頻帶，並藉由室內噪音評估標準探討不同球桿擊球聲音差異，以期建立高爾夫球桿擊球聲音有一量化指標，並提供高爾夫球頭結構設計之參考。

## 貳、不同高爾夫球桿揮桿擊球音頻測試與分析

本文利用麥克風進行量測，可得到不同球桿於實際揮桿擊球之聲音頻譜，圖 1 為揮桿擊球聲音量測設備示意圖，主要以麥克風 130D20 為感測器，分別離地面高度為 1m 與 1.5m，麥克風投影點與高爾夫球間距離為 0.6m，麥克風 a 施以 box window；b 則施加 exponential window，量得實際擊球聲音信號後，透過頻譜分析儀 SibLab 經快速傅立葉轉換得到自身功率頻譜密度函數(autospectrum)，此即為高爾夫球桿擊球聲音之線性頻譜。

得到實際高爾夫球桿擊球聲音線性頻譜資訊後，利用套裝軟體 MATLAB 進行運算，可分別得到 1/3 八音頻帶頻譜(1/3 octave band spectrum)與 1/1 八音頻帶頻譜(1/1 octave band spectrum)，並套入室內噪音評估指標(room noise rating index)，最後經由擊球聲音之線性頻譜、1/3 八音頻帶與套入室內噪音評估指標等客觀量測數據且配合擊球者與其他現場球員之主觀評價，探討不同品牌球具擊球之聲音頻譜特性，也對主觀上不同聲音品質評價程度與客觀聲音頻譜量測數據做關聯性討論。

## 參、結果與討論

由以上實驗測試中，於麥克風加權函數選用中，box window 主要使用於脈衝訊號，使原始輸入訊號更接近於理想脈衝波；exponential window 使用於衰減之訊號，目的在於使原始輸入訊號在量測區間能強制衰減至零，以避免訊號出現洩漏(leakage)，擊球聲音於時域為衰減訊號，理應均施以 exponential window，由於儀器使用上的限制故兩者施以不同加權函數，所造成差異會使頻率之解析有所誤差，為獲得客觀可靠的量測數據，文中僅以施加 exponential window 之麥克風所得結果為討論基礎，同時其架設高度亦接近一般使用者於擊球姿勢之耳朵高度，以模擬球員實際聽到擊球聲音之狀態。以下針對線性頻譜與 1/3 八音頻帶比

較探討、不同高爾夫球桿擊球音頻比例分析與室內噪音評估指標探討等三部分討論之。

### 一、線性頻譜與 1/3 八音頻帶比較探討

綜合不同高爾夫球桿擊球聲音之線性頻譜與 1/3 八音頻帶之比較探討，表 1 為不同高爾夫球桿擊球線性頻譜與 1/3 八音頻帶頻譜對照表，討論如下：

1. 表中球桿型號為 Type-A~Type-E，其排列主要依據現場揮桿專業教練與資深工程師之主觀感受，經票選後對球桿擊球聲音之整體評價由高至低依序排列。
2. 表中各球桿之各種聲音頻譜曲線值係經由各單一球桿進行數次穩定之揮桿擊球測試，將所得頻譜資訊並加以平均而得之，故可假設揮桿擊球測試為穩定狀態，基於該假設下，可對不同球桿之擊球聲音進行各項分析探討。
3. 於擊球聲音線性頻譜中，橫座標為頻率域，呈線性關係遞增，可忠實記錄擊球聲音於各頻率下之分佈，表中各球桿擊球聲音之線性頻譜可觀察有明顯的峰值，由王等人[6]可得知該每一峰值均與球頭結構振動模態有相當高之關聯性，此數據於後續頻譜比例分析中提供了擊球聲音與樂音關聯性之重要訊息，也對未來基於良好擊球聲音品質之球頭設計上提供了一個思考方向。
4. 人耳之聽覺並非此線性關係，舉例而言，200Hz 與 210Hz 間之聲音無法由人耳辨別，故 1/3 八音頻帶中 A 加權模擬了人耳對不同頻率之感受度，可作為人耳對各球桿擊球聲音於不同頻率範圍感受程度之依據。
5. 由表中 1/3 八音頻帶頻譜比較中，可觀察五支高爾夫球桿於 3150Hz、4000Hz 與 5000Hz 等三個頻帶均有較高之音量分佈，且可發現所有球桿擊球聲音之 1/3 八音頻帶頻譜分佈均具有相同區域之趨勢。
6. 在低頻部份，此五支不同型號球桿亦有以下相同之特性：
  - (1) 線性頻譜中，此五種不同型號於頻率 2500Hz 以下之分貝值皆為 65dB 以下。
  - (2) 比較各球桿於頻率 2500Hz 以上之分貝值，皆與低頻音量值相差 10dB 以上，對人耳感受度而言，幾乎是感受不到 2500Hz 以下低頻的聲音。

7. 由 1/3 八音頻帶頻譜亦可獲得各球桿擊球聲音之響度值，觀察表中各球桿擊球聲音品質與響度值發現擊球聲音悅耳度評價愈高者，響度值愈大，但僅單由響度值來作為聲音品質之指標較不具代表性，此外，於球頭型號 Type-B、Type-C 中，A 加權響度數值高於未經加權之數值，係由於 2000Hz~6000Hz 之加權值較多影響所致。

## 二、不同高爾夫球桿擊球音頻比例分析

由表 1 線性頻譜及 1/3 八音頻譜之特性比較，儘管可以得知頻譜波峰係源自球頭振動模態[6]，然而尚難推斷不同球桿在主觀評斷時所造成之差異，為此進一步再以波峰頻率之音頻比例分析探討之。表 2 為樂音頻率比例對照表，表中可得到以音階 C(Do)、D(Re)、E(Me)等兩兩頻率間分別由 0 至 8 個全音及其各對應之頻率比例數值，例如 D 與 C 音階之全音數為 1，而其頻率比例為 1.12，在後續分析中可對照此表來分析不同高爾夫球桿擊球線性頻譜之各音頻比例。

表 3 為不同高爾夫球桿擊球音頻比例對照表，其音頻比例與樂音數計算方法說明如下：

1. 線性頻譜之音頻比例計算方法以 Type-A 為例，由表 1 中觀察球具 Type-A 之線性頻譜可發現共有 6 個峰值，其對應頻率即為表 3 中 Type-A 之 6 個對應頻率值，將此 6 個頻率值視為不同音階組合，各頻率值所代表即可視為音階之頻率。
2. 欄位 2/1 中，比例 1.17 表示第二個峰值頻率 4381.25Hz 與第一個峰值頻率 3737.5Hz 之比值；同一欄中下一列比例 1.18 表示第三個峰值頻率 5187.5Hz 與第二個峰值頻率 4381.25Hz 之比值，其餘以此類推。
3. 欄位 2/1 中，第一個樂音數則與表 2 中全音數 1.5 頻率比例 1.19 有 1.4% 之差異，因此界定球具 Type-A 於擊球聲音線性頻譜中，前兩個峰值之頻率間隔有 1 個全音 1 個半音，故由表 2 可對應得知其全音數為 1.5，其餘樂音數求取方法以此類推。
4. 欄位 3/1 中，比例 1.39 表示第三個峰值頻率 5187.5Hz 與第一個峰值頻率 3737.5Hz 之比值；同一欄中下一列比例 1.32 表示第四個峰值頻率 5762.5Hz 與第二個峰值頻率 4381.25Hz 之比值，該欄位之其他比例值與其他欄位如 4/1、5/1、6/1 等，其比例值均以此類推。
5. 表中各欄位樂音數之求取方法均由上述所推算之比例值經與表 2 全音數

與頻率比例值做相對應或接近之數值做比較，即可判別該球桿於擊球聲音線性頻譜中，各峰值頻率之樂音全音數，所有球具比例值與樂音數計算方法均以此類推。

針對表 3 各個不同球桿所呈現線性頻譜之音頻比例關係，綜合討論如下：

1. 就峰值頻率比例關係而言，球頭編號 Type-A 之各音頻比例依次由 1 個全音、1.5 個全音、…、5.5 個全音呈穩定關係，相較表 2 樂音全音數所對應之數值誤差也較為低，整體誤差趨勢均不超過，絕對誤差值平均為 1.54%。
2. 就音階比例而言，C 合弦 Do、Me、So 為公認悅耳度最佳之樂音組合，其簡譜代號為 C、E、G，樂音數分別為 0、2、3.5，其中可觀察音階 C、E 差了 2 個全音；E、G 差了 1.5 個全音。
3. 觀察球頭編號 Type-A 之第一列音頻比例樂音數，發現樂音數 1.5 與 3.5、3.5 與 5.5，以及 3 與 5 相差數值均為 2；樂音數 1.5 與 3、3.5 與 5 相差數值均為 1.5，由 Type-A 擊球聲音之線性頻譜中發現音階比例有許多樂音數 2 與 1.5 之組合，恰與 C 和弦之音頻比例相吻合，故推斷此為球頭編號 Type-A 聲音悅耳度票選最佳之原因。
4. 球桿編號 Type-B、Type-C、Type-D、Type-E 雖或多或少有樂音數差異 2 與 1.5 之組合，但有較多音頻比例與 0.5 個全音相符合，由樂音和弦之音階組合來看，一般認知上單純的半音組合，難產生較悅耳之和弦音，因此推論此為 Type-A 比其他球桿在主觀評斷有較佳悅耳度之原因。

綜合以上音頻比例分析與各球桿悅耳度之主觀評斷比較，本文提出一個假說 (hypothesis)，高爾夫球頭之振動模態頻率所引發之擊球聲音頻率的音頻比例，如果能對應如 C 和弦之樂音比例，該球桿將有較佳之悅耳度。此假說提供爾後高爾夫球頭結構設計之參考依據。

### 三、室內噪音評估指標探討

對擊球聲音品質好壞之數據量化部分，本文亦嘗試利用所量測到之數值經由不同聲音品質評估方法來了解高爾夫球具擊球聲音悅耳度主觀評價與客觀量測之關連性。由不同高爾夫球桿實際擊球所量測之聲音線性頻譜轉換成 1/1 八音頻帶，並套入室內噪音評估指標模式[7,8]，表 4 為擊球聲音套入室內噪音品質指標

關係表，討論如下：

1. 表中噪音率定曲線(noise rating curve, NR curve)主要用以評估室內噪音、吵鬧程度，而由各球桿擊球聲音 NR 值發現，該指標隨球具擊球聲音品質評價的好壞而遞減，對此現象是否足以代表擊球聲音悅耳度仍待爾後確認，不過 NR 值與球具擊球聲音主觀評斷之一致性趨勢值得注意。
2. 由平衡噪音準則曲線(balanced noise criterion curves, NCB curves)以 Type-A 擊球聲音之 NCB 指標為例，標示為 NCB66H\_B，表示其高頻聲壓位準超過 NCB-66 曲線，故加註 H 表示 Hiss，且低頻聲壓值坐落於 B 區域，有引發振動之虞，故標註為 B，同時可觀察各球桿擊球聲音 NCB 指標變化無穩定趨勢外，擊球聲音主觀評價最好與最差之球桿均有引發振動之虞，其餘則無此現象，而該五支球桿皆為 No Rumble 且 Hiss，表示在頻率值 1000Hz 以下之音壓位準值皆未超出 NCB-66 曲線，且於頻率值 1000Hz 以上之音壓位準值皆高於 NCB-66 曲線。
3. 室內準則曲線(room criterion curves, RC curves)主要係由頻率 500Hz、1000Hz 與 2000Hz 下之音壓位準總和平均經四捨五入後所得，再進一步計算出低頻(LF)、中頻(MF)、高頻(HF)，以及 QAI (quality assessment index) 值，以 Type-A 為例，QAI 值為 42，表示 LF、MF、HF 三者最大值與最小值差異甚大，非理想音場環境，且於 HF 有最大值，同時高頻有 Hiss 現象，低頻部份則坐落於 B 區域，有引發振動之虞。表中擊球聲音 RC curves 值與主觀評價之優劣並未有穩定趨勢。
4. 在 A、B、C 加權全音域音壓位準中，各分別以 40 phone、70 phone 與 100phone 之等響度曲線作為標準作加權計算，其中 A 加權在於模擬人耳對不同頻率之敏感度，C 加權則用於吵雜之環境，表中觀察 A、B、C 加權之音壓值均隨擊球聲音主觀評價之排名先後而有所遞減。此現象可推論，整體音量大有助於擊球聲音之正面主觀評斷。
5. 噪音準則曲線(noise criterion curves, NC curves)之目的則與 RC curves 相同，皆為用以評估室內噪音吵鬧程度，差異在於 NC curves 套入 1/1 八音頻帶音壓位準值，RC curves 則使用 1/3 八音頻帶套入求得，而觀察表中各型號球具之 NC curves 數值並未出現穩定之趨勢。

將擊球聲音量化數據套入室內噪音評估指標中，綜合以上討論分析，並無明



顯觀察出各擊球聲音悅耳度之差異性，唯一具穩定趨勢之指標為 NR curve 與 A、B、C 加權全音域音壓位準，擊球聲音悅耳度愈高者，任一種指標之數值愈大，但仍無足夠訊息能區分出擊球聲音悅耳度好與不好之差異，而且不易作為球頭結構設計之參考。其餘在由平衡噪音準則曲線(balanced noise criterion curves, NCB curves)、室內準則曲線(room criterion curves, RC curves)與噪音準則曲線(noise criterion curves, NC curves)中，對該五支球桿之擊球聲音品質則無法觀察出相同趨勢之關聯性，亦無法用以判別擊球聲音品質指標。

## 肆、結論

本文對不同球桿進行實際揮桿擊球聲音量測，所得數據由各球桿經數次揮擊所得頻譜加以平均，故在基於擊球穩定之狀況下求得擊球聲音線性頻譜，經運算求得 1/3 八音頻帶與 1/1 八音頻帶，經線性頻譜比例分析、線性頻譜及 1/3 八音頻帶頻譜相互比較與室內噪音品質指標評估後，瞭解實際擊球聲音悅耳度差異之特性，並量化了人耳對聲音之感覺，有以下結論：

1. 主要針對擊球聲音與人耳聽覺感受建立量化數據分析模式，同時亦建立揮桿擊球聲音量測流程，將有助於業界對高爾夫球桿於擊球聲音品質之評估與探討。
2. 針對市售擊球聲音品質相對優良之不同高爾夫球具進行實際揮桿擊球，藉以瞭解其聲音頻譜分佈之共同特性，人耳感受度最大均分佈於 3000Hz~6000Hz，而且此區間之峰值頻率與球頭振動模態頻率有直接關係[6]。
3. 針對市售球具擊球聲音之線性頻譜深入進行剖析，瞭解具良好聲音品質之高爾夫球具其線性頻譜特性，主要與樂音比例關係有相當高之關聯性，此特性可作為未來高爾夫球頭結構設計之重要參考依據。
4. 未來可依此頻譜特性作為基於良好擊球聲音品質高爾夫球具變更設計之設計目標，同時有助於對所謂“悅耳度佳”之聲音進行定義，並發展出一套對高爾夫擊球聲音悅耳度之判別模式，使作為日後高爾夫球桿研發設計之參考。

## 伍、致謝

感謝教育部產學園區計畫公-05-工-033 及大田精密工業股份有限公司經費支持以及球具提供，使得量測進行順利，特此致謝。

## 陸、參考文獻

1. Hocknell, A., Mitchell, S. R., Jones, P., and Rothberg, S. J., Hollow Golf Club Head Modal Characteristics: Determination and Impact Applications, *Experimental Mechanics*, Vol. 38, pp. 140-146(1998).
2. 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 3 期，第 26-39 頁(2003)。
3. 康淵，溫柏青，鍾文仁，張永鵬，王俊傑，「高爾夫球木桿頭力學與音響」，*中華民國第二十屆機械工程研討會論文集*，台北市，第 1009-1016 頁(2003)。
4. Roberts, J. R., Jones, R., Mansfield, N. J., and Rothberg, S. J., Evaluation of Impact Sound on the 'Feel' of a Golf Shot, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 287, pp. 651-666(2005).
5. 王栢村，黃瑞光，「不同球頭之高爾夫球桿聲音品質分析」，*中華民國音響學會第十三屆學術研討會論文集*，第 A47-A54 頁(2000)。
6. 王栢村，林昆正，徐川洋，「高爾夫球頭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*，第 212-219 頁(2003)。
7. Foreman, J. E. K., *Sound Analysis and Noise Control*, Van Nostarand Reinhold, New York (1990).
8. Beranek, L. L., and Ver, I. L., *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*, John Wiley and Sons, Inc. (1992).

表 1 不同高爾夫球桿擊球線性頻譜與 1/3 八音頻帶頻譜對照表

Type	Linear Spectrum	1/3 Octave Band Spectrum	
A	<p>3737.5 5187.5 6531.25 4381.25 5762.5</p>		81.403dB 80.759dBA
B	<p>3725 3937.5 4518.75 4125 5193.75 4868.75</p>		77.938dB 78.366dBA
C	<p>4300 5450 - 5737.5 6706.25 4893.75 6493.75 6218.75</p>		75.283dB 75.301dBA
D	<p>2562.5 5925 3350 6400 5575 4187.5</p>		74.605dB 74.549dBA
E	<p>3693.75 - 4368.75 6931.25 8012.5 5862.5 7650 6125</p>		73.154dB 71.903dBA

表 2 樂音頻率比例對照表

音階	C	C <sup>#</sup> D <sup>b</sup>	D	D <sup>#</sup> E <sup>b</sup>	E	F	F <sup>#</sup> G <sup>b</sup>	G	G <sup>#</sup> A <sup>b</sup>	A	A <sup>#</sup> B <sup>b</sup>	B	C	C <sup>#</sup> D <sup>b</sup>	D	D <sup>#</sup> E <sup>b</sup>	E
全音數	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
頻率比例	1	1.06	1.12	1.19	1.26	1.33	1.41	1.50	1.59	1.68	1.78	1.89	2.00	2.12	2.25	2.38	2.52