

教練科學

COACHING SCIENCE



中華民國運動教練協會

教練科學 目錄

九十二年出版

邱玉惠、王三財	
擊劍選手體格差異研究分析	1
王朝仁、陳興一	
探研橄欖球比賽司克蘭(Scrum)規則修訂意旨	19
丁麗芬、王柏村、林寶城、陳柏宏、張家華	
網球拍之模態特性驗證	29
溫華昇、張志凌	
以擊劍運動訓練教育淺談擊劍教練哲學觀	41
郭旗顯	
射箭使用器材的調配影響箭飛行穩定因素之探討	49
劉德智、余鑑紘	
以等速訓練機模擬輕艇動作對評估輕艇選手專項肌耐力的應用	67
劉德智、余鑑紘	
模擬輕艇 500 公尺比賽之相關研究	76
馬君萍	
女子壘球選手知覺教練領導行為、知覺動機氣候、團隊凝聚力與內在動機之相關研究 ..	88
彭賢德、彭賢順、彭賢勝	
旋轉式鉛球投擲技術之探討	102
陳聰獻、蔡佳惠、張世聰	
跳水運動之起源與發展趨勢之探討	113
王秉泰、張簡坤明	
南韓女子手球隊賽前準備運動之分析	123
鄧正忠	
知覺訓練對羽球後場扣殺球預期表現之研究	136
楊紀瑜、許志祥、吳喜松	
大專籃球選手適應能力量表之信度與效度分析	145
楊紀瑜、許志祥、吳喜松	
規劃與控制對學校運動代表隊之重要性以明新科技大學男生籃球隊為例	155
周俊三、吳喜松、林佳蓉	
大陸職業籃球甲 A 聯賽經營現況及面臨問題分析	168

網球拍之模態特性驗證

丁麗芬 輔英科技大學

王柏村 屏東科技大學

林寶城 台北市立體育學院

陳柏宏 屏東科技大學

張家華 屏東科技大學

摘要

本研究目的在探討網球拍之振動特性。研究中應用理論及實驗兩種方式，分別對一網球拍進行實驗模態分析與有限元素分析，在 ANSYS 應用軟體上以有限元素架構模型，在實驗模態分析則藉由衝擊錘當作激振器、加速度計當作感應器，分別求得結構系統之振動頻率響應函數與模態參數等資料，其中模態參數包括自然頻率、阻尼比及模態振型。透過實驗值與理論值之自然頻率數值做最佳化的參數比對，獲得相當一致之結果，驗證所架構的有限元素模型有其足夠之代表性，亦可提供所推展出來的理論分析及模擬等技巧用於他種網球拍上，作為模態振動分析、設計變更及定義品質指標之參考。

關鍵字：振動、實驗模態分析、有限元素分析、模態參數

The Assay on Modal Characteristic of Tennis Racket

Li-Fen Ting	Fooyin University
Bor-Tsuen Wang	National Pingtung University of Science and Technology
Peo-Cheng Lin	Taipei Physical Education College
Chia-Hua Chang	National Pingtung University of Science and Technology
Po-Hung Chen	National Pingtung University of Science and Technology

Abstract

The purpose of this study was to investigate the vibration property of tennis racket. Applied with theory and experiment, the tennis racket was operated in Experimental modal analysis (EMA) and Finite element analysis (FEA). The ANSYS Software was applied in FEA. In EMA, the hammer was regarded as an actuator, accelerometers as a sensor. The vibration frequency response functions of structural system & model parameters were calculated separately. The model parameters include natural frequency, damping ratio and mode shape. Through the comparison with the best natural frequency parameters between experiential value and theoretical value, it was coincident that FEM was feasibility to offer theory analysis and model to the other kinds of tennis racket as the reference on EMA, transform design, and identify quality index.

Key words : Vibrations, Experimental model analysis (EMA), Finite element method (FEM), Model parameters.

壹、前言

始自 1979 年 H. Brody 發表了 *Physics of Tennis Racket* 一文，說明了網球拍與網球之間的力學行為後，國內外學者莫不相續投入球拍本體之相關研究。歸納諸多報告中，其目的均為取得一個強勁有力和感覺舒適，卻又安全無慮之最佳化設計。然無可諱言的，球拍振動設計所涉及之變數至為複雜，Baker 和 Wilson(1987)認為網線材質之種類、網線的張力及拍框勁度將影響球拍擊球效應，故學者在投入研究之際，除了對拍框材質、勁度，網線的延展性、截面積等因素均個別探討外，對於各因素間之交互作用所造成的影響亦須加以探究，方能有效掌握球拍品質之良窳。而所有實驗亦須在球拍成品後方得以進行測試，且研發前後所耗費之時間、物力均是難以估算。

隨著科技之進步，振動特性之量測與分析等技術更趨成熟，被使用於航太、機械、模具研究之模態分析技巧與有限元素分析軟體亦陸續為學者設計用來量測及預估運動器材之動態特性(王柏村, 2000; 相子元, 1997; 黃文譽, 1999)，亦有學者直接設計多項模態實驗驗證網球拍之振動特性，進而對球拍材質、網線張力及阻尼之效能加以探查(林寶城, 1998; 丁麗芬等, 2002; 陳帝佑, 1998); Baker(1987)、Lee 和 Yum(1987)、周至柔(1994)亦嘗試應用有限元素探討網球拍力學特性之影響，Oh 和 Yum(1986)則以多維光譜分析拍框承受碰撞時握把所承受力量分布的情形。這些文獻驗證了有限元素分析有預估運動器材之適用性，能作為獲得精準與安全的最佳化設計之依據。然卻較少有文獻透過實驗與模擬，深入探查及分析運動結構物體振動時之變異。

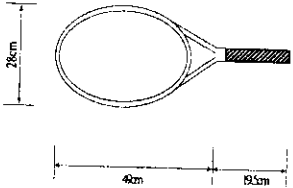
本研究以有限元素法之數值模擬及實驗模態分析兩種方式來探討網球拍之振動特性，除比對兩者之頻率響應函數及模態參數來驗證所架構的有限元素模型之正確性及適用性外，亦期望所建立之模型足以代表實體結構，並能將此電腦輔助設計及分析概念推導於其他種類之球拍，並作為網球拍模態振動分析、設計變更及定義品質指標之參考，使球具設計能更深具安全性與實用性。

貳、研究問題與分析目的

一、研究問題

本研究採 PRINCE 之大型拍面之網球拍作為實驗用拍來進行有限元素分析及實驗模態分析。對球拍實體進行結構動態分析，依球拍外型、材質，將球拍分為拍框架部分及握把部分，其拍框為碳纖維材質，拍柄部分係木頭材質，採用 free-free 邊界情況，以兩條橡皮筋所組合之彈性繩將球拍懸掛，以進行實驗模態分析來探討網球拍結構之動態特性。其各段之材料性質、實際結構的楊氏係數、密度等如表 2-1 所列。

表 2-1、實驗拍材料特性

		
球拍性質	球拍部分	握把部分
材料	碳纖維	木頭
楊氏係數(pa)	51.118×109	10.612×109
密度(Kg/m ³)	1133.1	609.39

二、分析目的

為驗證網球拍結構之動態特性，本章對網球拍進行網球拍之有限元素分析及實驗模態分析，架構有限元模型進行分析，以其模態分析求取模態參數，包括自然頻率及模態振型，及進行簡諧分析以求取頻率響應函數。再進行實驗模態分析求取網球拍之模態參數及頻率響應函數，並比較驗證以確認有限元素模型之正確性。更進一步確認有限元素模型對其他球拍之適用性。其實驗結構流程如圖 2-1 所示。

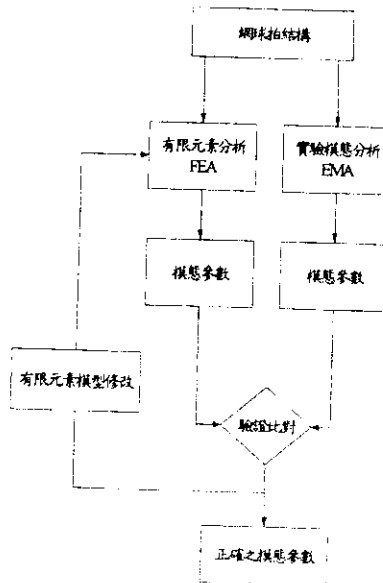


圖 2-1、模型驗證流程圖示

參、研究方法與步驟

一、有限元素模型構念

本章應用 ANSYS 軟體模擬分析網球拍結構，包括模態分析及簡諧分析，以求得所需的模態參數和頻率響應函數。其建立理念有限元素模型之原則分述如下

- (一) 元素類型：以網球拍的元素模型架構可視為樑元素(Beam4)結構，故選用三維懸樑架構元素，架構有限元素模型如圖 3-1 所示。
- (二) 元素分割：由簡化之網球拍結構，在有限元素分析時為了與實際結構所敲擊的點數位置一樣，以直接架構法定義，可以做適當簡單的距離大小。
- (三) 位移限制：對於自由邊界狀態之網球拍結構系統，則無須設定任何位移之限制，皆為自由端(free-free)之自由邊界狀態方式。
- (四) 負荷條件：進行模態分析時，不必設定任何之外力負荷條件。進行簡諧分析時，所設定的外力為受單一簡諧外力 ($f=1$)。

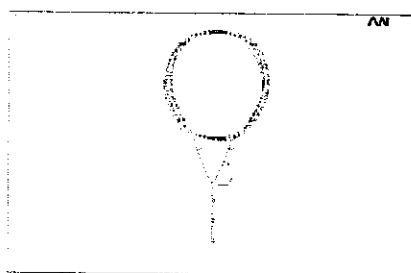


圖 3-1、有限元素模型

二、實驗模態分析

實驗模態分析研究實施過程陳述如下：

- (一) 選定研究樣本及建立幾何結構(Structural Geometry)座標點(Node)資料，取用 PRINCE 之網球拍作為實驗代表，並在球拍選定預備激振之節點三十四處(請參閱圖 3-2)。標示點之編號、座標值、相對關係等資料輸入套裝軟體之幾何座標系統中，在呈現接續(Display Sequence)後，儲存定義過的幾何結構副程式檔案。

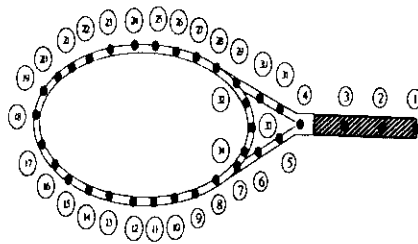


圖 3-2、網球拍量測點示意圖

(二) 安裝及檢視測量儀器

研究實驗所使用之儀器型號如下表 3-2 所列。

表 3-2、實驗模態應用儀器型號一覽表

儀器名稱	型號
PCB 加速規(Accelerometers)	型號 352A(三顆)
衝擊錘(Dytran Hammer kit)	PCB 056C03
頻譜分析儀 SigLab Model 20-42 多頻譜分析儀	(Dynamics Spectrum Analyzer)
實驗模態分析軟體	MEScope 3.0 版

(三) 實驗步驟

實驗架構情形如圖 3-3 所示，首先將衝擊錘用導線接於訊號分析儀之 A 輸入模組，其次再將加速度計用導線接於訊號分析儀之 B、C、D 輸入組模，再透過 SCSI 介面將訊號分析儀與個人電腦相連接。其實驗的動作先將加速度計(PCB 325A)以蜂蠟黏貼於平板分割點各個分割點上作為感應器，以鋼質衝擊錘於 Z 方向施加點力於自由邊界網球拍第 4 點上，激振網球拍劃分的 34 個測定點（如圖 3-2 所示），即可得到 34 組結構之響應訊號，經過電壓放大器將訊號傳入雙頻道訊號分析儀，由訊號分析儀對輸入之訊號作快速傅立葉轉換，求得球拍的頻率響應函數和關聯性函數，最後再將所得到的頻率響應函數傳入 MEScope 軟體作曲線嵌合 (Curve Fitting) 工作，則可得到模態振型等模態參數，在完成所有座標點測試後，加以儲存並分析。實驗過程中，設定訊號分析儀之頻寬為 2000Hz，解析條數為 3201 條，因驅動器使用衝擊錘，所以加 Transient 加權函數，在感應器之加速度響應加 Exponential 加權函數。

(四) 實驗場地設置

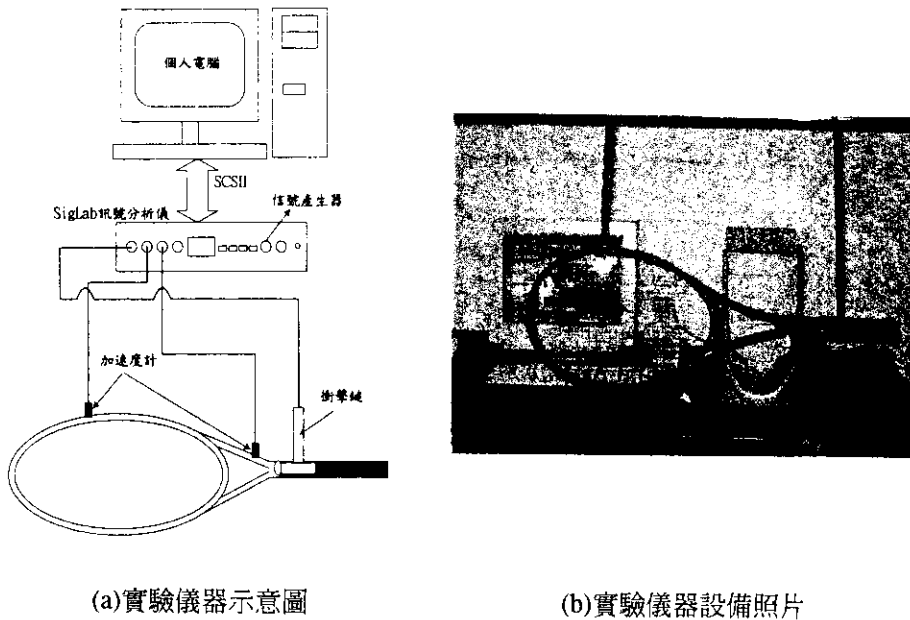


圖 3-3、實驗場地儀器設置圖示

肆、結果與討論

完成實驗模態及有限元素之模型架構程序後，將兩者所得之頻率響應函數、關聯性函數及模態參數(含自然頻率、阻尼比及模態振型)加以分析，驗證有限元素分析之適用性及正確性。

一、實驗模態分析結果之驗證

(一) 頻率響應函數之驗證

觀察頻率響應函數圖 4-1，圖中 $i=18$ 、 $j=4$ ，即輸入點為第 4 點，輸出點為第 18 點，而三條曲線分別為實驗的頻率響應函數曲線、Synthesized 頻率響應函數曲線及有限元素頻率響應函數曲線，可看出在前三個自然頻率範圍與實驗曲線相當吻合，其峰值均落於相同之頻率上，顯示曲線吻合的正確性。而實驗頻率響應函數曲線與有限元素的頻率響應函數曲線做比較，亦可看出相同結果。

(二) 關聯性函數

觀察圖 4-2，圖為對應於圖 4-1 之關聯性函數圖，圖中關聯性函數越接近 1，代表結

構的頻率響應函數可信度高，由圖 4-2，除高頻處可能因實驗操作之因素，而導致反共振點附近之關聯性偏低外，整體而言，共振點附近之關聯性函都近於 1，顯示實驗之頻率範圍具有相當的可靠性。

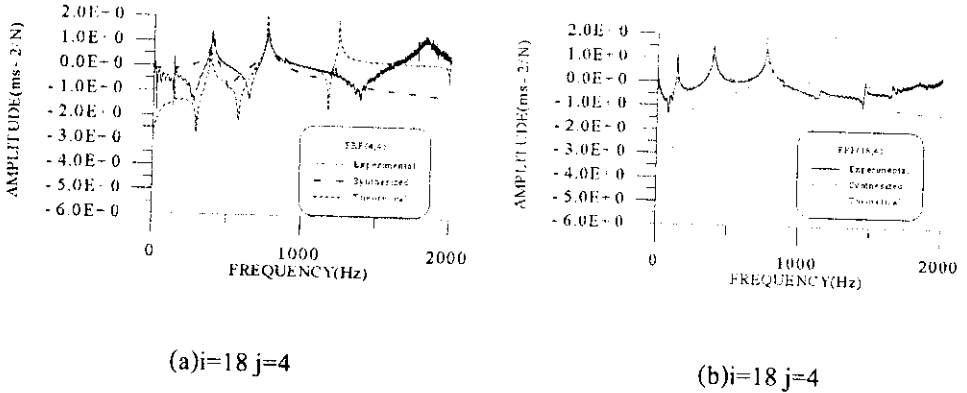


圖 4-1、頻率響應函數圖示

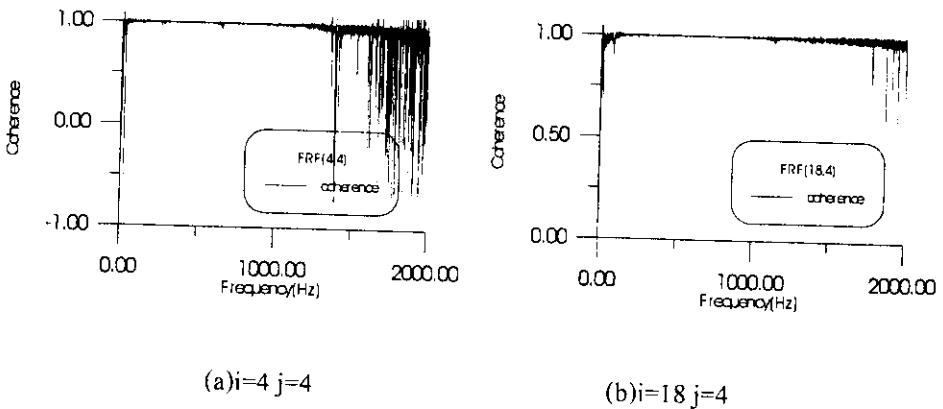


圖 4-2、關聯性函數圖示

二、模態參數驗證

(一)自然頻率之驗證：

本實驗主要探討前四個模態，經由模型驗證並執行最佳化分析，可得實驗與理論自然頻率結果(如表 4-1)，依結果實驗所得自然頻率值與有限元素模型所得理論值其誤差分布於-0.52060 至 2.6143%之間，皆低於 $\pm 3\%$ 的容許範圍之內，顯示有限元素與實驗模態所得之自然頻率吻合度獲得驗證。

表 4-1、實驗與理論之自然頻率比較表

自然頻率	實驗值	理論值	誤差百分比(%)
f_1	139	140.07	0.50040%
f_2	394	381.73	-2.3718%
f_3	765	761.02	-0.52060%
f_4	1210	1241.6	2.6143E%

(二) 阻尼比之驗證

理論分析並無法求得阻尼比，而實驗中可進行參數估測之方法求得阻尼比，結果如表 4-2。一般而言，阻尼比會隨模態數之增加而減少，本實驗未隨之遞減，然觀察所有數值均在 0.4~1.1% 之間，此數值比一般鋼材 0.1 左右為高，應該是球拍阻尼效應所致。

表 4-2、實驗模態阻尼比一覽表

阻尼比	加速度計/衝擊錘
	阻尼比(%)
ξ_1	0.606%
ξ_2	1.015%
ξ_3	0.664%
ξ_4	0.433%

(三) 模態振型之驗證

由所呈現之模態峰值譜，判定各個頻率反應訊息峰帶(Band)之振型，本章理論模態之振型圖(參閱圖 4-3-a.b.c.d)及實驗模態之振型圖(參閱圖 4-4-a.b.c.d)。在第一模態中均呈現低頻之單次彎曲模態(Bending Mode)，計有二個節點(Node)，落於靠近球拍頂端約三公分處的左右兩側與拍面與拍柄之銜接處位置；第二模態呈現中頻之二次彎曲模態，計有三個節點，一落於靠近球拍頂端約三公分處的左右兩側、拍面與拍柄之銜接處位置及握把處；第三模態呈現高頻之三次彎曲模態，計有四個節點(Node)，分別落於面頂端的兩側、靠近框面與拍頸銜接處兩側與拍柄起點及握把位置；第四模態係呈現高頻之狀態，自然頻率為 1210 赫茲(Hz)以上，因頻率更高振幅更微小，手臂幾乎無法感覺到，故可忽略其所產生之影響。相較兩者所呈現之四個模態振型圖示均為近似。

為驗證實驗與理論模態振型之吻合度，在模態振型比對方面，請觀察表 4-3 的模態判定分析矩陣表(簡稱 MAC)，自表中的對角線元素向量值上，除第 4 模態因實驗操作品質稍差外，其餘數據均非常接近 1，顯示出實驗與理論之模態振型相當吻合，而非對角線元素均趨於零，表示各模態振型之正交(Orthogonal)特性。

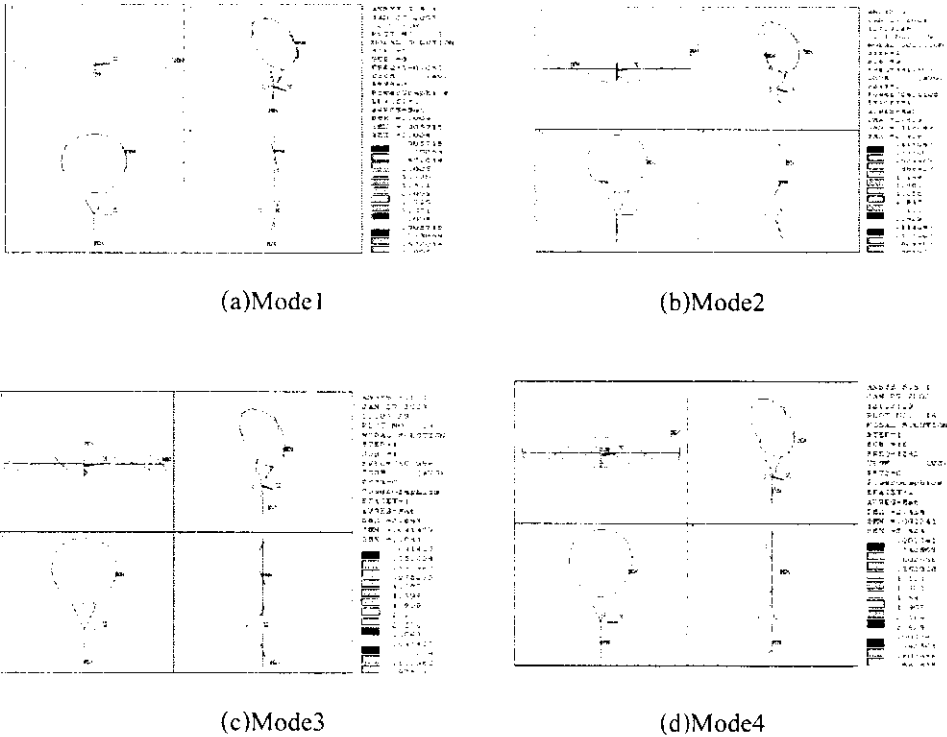
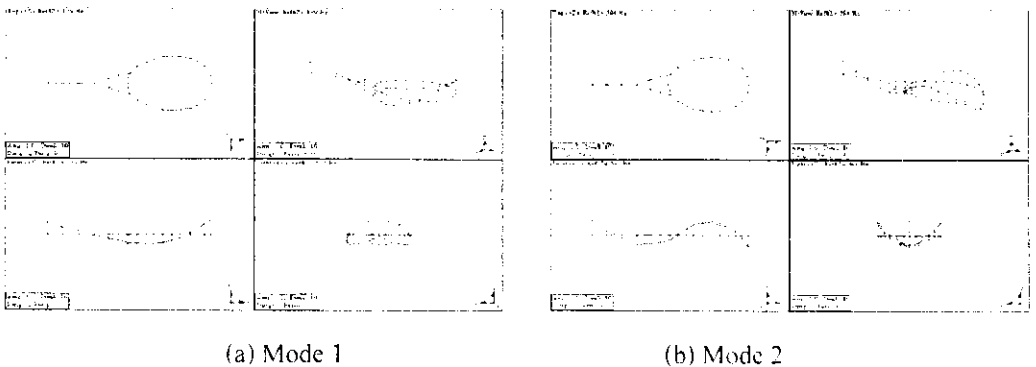


圖 4-3、有限元素分析之模態振型圖示



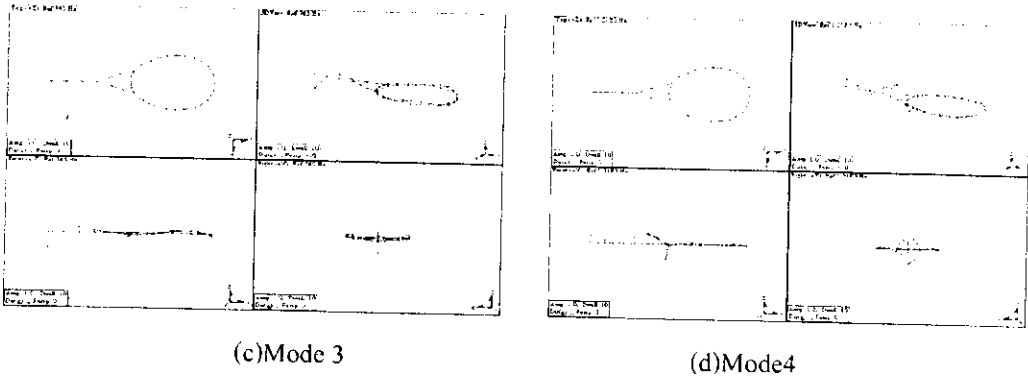


圖 4-4、實驗之模態振型圖示

表 4-3、實驗振型與理論振型之判定矩陣表

Mode	1	2	3	4
1	0.91936	0.096304	0.004587	0.000114
2	0.000297	0.95608	0.052552	0.003504
3	0.053717	0.10779	0.70185	0.016994
4	0.033941	0.01708	0.06928	0.020876

伍、結論與建議

本研究建構網球拍結構模型，並綜合有限元素模態分析與實驗模態分析所得結構參數加以比對，由自然頻率、阻尼比、振型及模態保證指標分析值，得結論陳述如下：

- (一) 所架構之理念有限元素模型，其驗證結果之自然頻率誤差皆在可接受之範圍內，所以代表其模型之可行性。
- (二) 頻率響應函數之驗證，實驗值以及實驗合成(Synthesized FRF)之吻合性代表曲線嵌合之準確性。由實驗值和理論值做比較，可確認理論所架構之有限元素模型模擬適當。
- (三) 就模態參數之驗證，自然頻率誤差均在 3 % 以下的優良數值，其模態振型也有很好的一致性，阻尼比無明顯增加之趨勢。

本文驗證結果，顯示有限元素分析模型所得結果與網球拍實體實驗所得之數據有相當程度之一致性，因此肯定所架構之理論有限元素模型可視為此種球拍之實際模型，除探討此球拍之

振動特性外，並可以此做為基本模型，在調整條件設定後進而探究所關心的各種因素之變異所導致對球拍之影響。本章所推展出來的理論分析、模擬技巧及架構原理有助於研究爾後之發展，並可拓延於他種運動器材之設計，作為結構之模擬分析、模態振動控制、設計變更及定義品質指標之參考。

參考文獻

中文部份

- 丁麗芬等(民 91)：鈦金網球拍振動模態分析。北體學報，第十期，9-21 頁。
- 王柏村(民 85)：振動學。台北：全華科技圖書公司。
- 林寶城(民 87)：網球拍面振動特性分析。臺灣師大體育研究第五期，67-86 頁。
- 周志柔(民 82)：網球拍之力學特性分析。國立成功大學碩士論文。
- 相子元(民 86)：振動分析—ANSYS 在網球拍振動分析的應用。輔訊最新技術資訊，66-72 頁。

英文部份

- B.C.Elliott; B.A.Blanksby; R.Ellis (1980). " Vibration and Rebound Velocity Characteristics of Conventional and Oversize Tennis Racket. " The Research Quarterly For Exercise and Sport,51(4) : 608-651.
- Howard Brody.(1987) " Models of Tennis Racket Impact " International ournal of Sport Biomechanics, 3(3) : 293-296.
- Jae-Eung Oh, Ho Park, Yu-Yub Lee & Sung-Ha Yum (1987). "The Estimation of Model Paraments Due to the Change of the Sweet Spot by the Structural Modification of a Tennis Racket ".JSME 1987,30 (265),1121-1128.