

大專體育學刊

自然科學篇

第五卷 第三期



中華民國大專體育總會編印

中華民國九十二年十二月三十一日

大專體育學刊自然科學篇

第五卷第二期目錄

九十二年十二月三十一日出刊

林正常 主編的話.....	i
邱靖華 羽球單打比賽之攻防模擬系統	1
丁麗芬 王柏村 林寶城 張家華 陳柏宏 有無網線球拍之動態特性分析	13
龔榮堂 不同重量球棒之揮棒速度研究	27
吳嘉祥 劉 宇 黃韻靜 陳嘉遠 超級馬拉松跑步動作機械能利用率之生物力學研究.....	35
謝堯夫 李宏滿 相子元 軍用鞋之運動生物力學分析	45
劉宏祐 網球運動員的發球、接發球視力分析：以中學以上球員為例.....	57
侯淑玲 陳金海 桌球運動員視覺反應能力與接發球表現的相關研究.....	67
林房儂 林志鴻 聽障生參與游泳運動之水性適應能力與游泳技能研究.....	77
郭世傑 楊子孟 洪榮聰 大專院校學生生活方式與體能狀況調查研究.....	87
鄭振洋 郭文彥 2002 年世界杯足球賽不同洲別、專長位置運動員間年齡、體格之分析研究	95
鍾祥賜 陳文基 陳五洲 不同負重方式對國小學童足底壓力的影響.....	103
郭芳娟 林正常 膝關節等速運動中肌力與肌電頻譜的相關性.....	113
劉 強 龔榮堂 相子元 球棒重量對肌肉活性之影響：適當球棒重量之探討.....	121
林信甫 莊泰源 林正常 以 $\dot{V}O_2\max$ 間接測量法評估個體有氧適能之研究.....	131
王秉泰 陳美枝 王世椿 郭家驊 增強式訓練法對手球選手胰島素敏感度之影響.....	143
李孟印 謝錦城 許壬榮 王朝鐘 王宏臺 呂學冠 兒茶原酸補給對於衰竭運動引起老鼠的氧化壓力及肌肉傷害之影響.....	155
李志恒 施春兆 運動員禁藥甲基安非他命及麻黃素併用的細胞毒性增強作用探討	165
稿 約	175
參考文獻範例.....	178

有無網線球拍之動態特性分析

丁麗芬¹ 王柏村² 林寶城³ 張家華² 陳柏宏²

¹輔英科技大學 ²國立屏東科技大學 ³台北市立體育學院

本文旨在比較無網線拍框及穿上網線後球拍之動態特性改變。研究中應用有限元素分析及實驗模態分析兩種方式，分別求得球拍之模態參數與頻率響應函數用以進行驗證，在取得實驗值及理論值之吻合結果後，進而綜合兩種方式所得之模態參數（自然頻率、阻尼比、振型）等表現，比較無網線拍框及有網線球拍間之物理特性差異，獲得如下結論：一、在模型驗證方面，對所架構之有限元素分析模型與球拍實體實驗所得之數據與模態振形加以比對，均呈現相當程度之吻合，其誤差值皆於可接受之範圍中，顯示結合有限元素分析與實驗模態分析進行網球拍實驗操作，有其適當性與正確性。二、比較空拍框與有網線球拍之動態特性，顯示有網線球拍各模態的自然頻率呈現降低之趨勢，阻尼比亦優於無網線之拍框，而模態振形兩者頗為近似，並未因穿上網線而造成差異。本研究驗證了有限元素模型的適用性及有無網線球拍振動特性之差異，將可提供理論與技巧結果應用於各種受力狀況與不同邊界條件之球拍設計，減少研發測試過程中所耗費之人力、物力與時間，而所建立之球拍網線模擬方式，亦有助於爾後探討不同網線張力及穿線模式等方面研究，可作為評估球拍品質指標模擬分析之依據。

關鍵詞：有限元素分析，實驗模態分析，網線張力

壹、緒論

隨著嶄新科技之推展，技術不斷的蛻變與創新，網球拍之研發更是結合了材料、力學等諸多領域不斷的出陳佈新，強調賽場優勢及球員需求等多樣化的新品也隨之問世，球拍之設計規格及製造更趨複雜，也導致國內外學者不斷的投入研究探討。1978年 Baker 和 Wilson 提出影響網球拍擊球功能最重要因素為網線材質、網線張力及球框之材質；Bordy (1987)亦提到「網球永遠打不到高科技的球拍，它只打在網線上」，由此可知在探測球拍功能及擊球效應時，網線亦成了最具關鍵之條件。對擊球之過程而言，網線的功用在於網球衝撞拍面時，將球之動能以彈性能儲存，再將本身動能及彈性能以振動方式傳送給網球(相子元, 1997b)。Brody(1995)指出網線的振動主要受球速及碰撞位置之影響，倘若僅有部分之能量用於球的反彈上，則其餘之動能均將傳送至拍框，造成拍框及握把的振動，也成了握拍手臂絕大之負荷，反之亦然。因此，網球拍能否達成強力回擊之效應，或一味驅使手臂全然吸收傳遞至握把的振動能量，網線所導致之結果實不容忽視。

國內外有多位專家學者曾投入網線之相關研究，嘗試為網線影響球拍品質良窳建立一個明確的指標。然網線所涉及之因素至為複雜，學者除了對網線材質、張力、截面積及穿線模式等關鍵分別深入研究外，對網線各個因素之交互作用所引起之異動亦需加以掌握及探討，方能有效評估網線之效應。林寶城(1997)曾以實驗模態探討有無網線之模態及應用趨穩時間比較阻震

器功能，相子元(1997a)以有限元素分析比較無網線球拍及 60 磅網線張力球拍之振動物理特性；Widing 和 Moeinzadeh (1990)以立體元素(solid element)模擬拍框，以非線性繩索元素(cable element)模擬網線並考慮網線幾何非線性現象(geometry nonlinearity)。從許多文獻回顧中，學者各有各之觀察角度，亦藉由不同實驗設計探討球拍品質，然卻少見文獻結合電腦模擬與實體實驗，同步探討及驗證網線對球拍品質之影響。

綜合以上，本研究嘗試透過有限元素分析與實驗模態兩種方式，分別對球拍進行實驗，並加以比較無網線拍框在穿以網線之情況下所呈現的動態特性之異動。過程中先驗證了有限元素模型的適用性與正確性後，再深入探討兩種球拍間模態參數的差異結果，以此為球拍網線之功能作一定義。本文期待以模型驗證所得，及球拍穿以網線後振動特性之改變，提供應用於各種受力狀況與不同邊界條件之球拍設計上，以此減少球拍成品測試中，其繁複過程中所耗費之人力、物力及時間，並將以所建立之網線及球拍模擬方式，提供爾後探討不同網線模式及球拍結構之研究，作為預估及模擬分析球拍品質之依據。

貳、方法與步驟

一、實驗日期與地點

民國 91 年 12 月至 92 年 2 月於屏東科技大學機械工程研究所振動噪音實驗室執行。

二、實驗對象

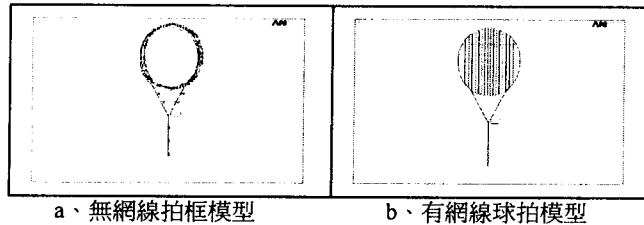
本研究取 Wilson Hyper Carbon Prostaff 5.0 大型拍面之拍框（材質為 80 碳素/20 超碳纖維球拍，拍面積為 110 平方英吋、握把為 4 ¼ 英吋、拍厚 21mm、平衡 12pts、屬輕拍頭），與穿以 16 號（截面積 1.30mm）之人造合成腸線（synthetic gut）、網線張力設定為 45 磅，以此因素組成之球拍作為實驗代表，並於實驗前完成基本資料之量測。

三、實驗方法

(一)有限元素分析

本章應用 ANSYS 5.0 軟體進行球拍實際結構分析。其建構有限元素模型之原則分述如下：

- 1.元素類型：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(beam4)，架構有限元素模型如圖一-a.b 所示。
- 2.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，每兩個節點(node)連為一個元素，本實驗握把處分割為 3 個元素，框架的部份分為 78 個元素，網線的部份則分為 652 個元素。
- 3.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。
- 4.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 ($f=1$)。



a、無網線拍框模型 b、有網線球拍模型

圖一 有限元素模型

(二)實驗模態分析

1. 實驗儀器設備架構

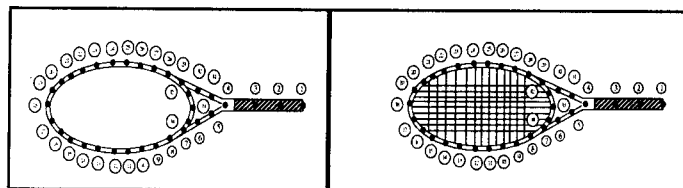
實驗儀器型號請參閱表一，架構情形如圖 2-3 所示。實驗過程中首先將衝擊錘用導線接於訊號分析儀之 A 輸入模組，加速度計用導線經過電荷放大器接於訊號分析儀之 B 輸入組模，再透過 SCSI 介面將訊號分析儀與個人電腦相連接。其實驗的動作原理為，利用衝擊錘作為驅動器(actuator)，對網球拍框加以激振，利用加速度計作感應器(sensor)，量取結構之響應訊號，經過電壓放大器將訊號傳入雙頻道訊號分析儀，由訊號分析儀對輸入之訊號作快速傅立葉轉換，求得球拍的頻率響應函數和關聯性函數，最後再將所得到的頻率響應函數傳入 ME scope 軟體作曲線嵌合(curve fitting)工作。實驗過程中，首先須完成 BK3550 訊號分析儀設定，頻寬設為 2000Hz，解析條數為 3201 條。本實驗驅動器因使用衝擊錘，所以加 transient 加權函數，在感應器之加速度響應加 exponential 加權函數。

表一 實驗模態使用之儀器型號一覽表

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 (dynamics spectrum analyzer)	SigLab Model 20-42 多頻譜分析儀
實驗模態分析軟體	ME scope 3.0 版

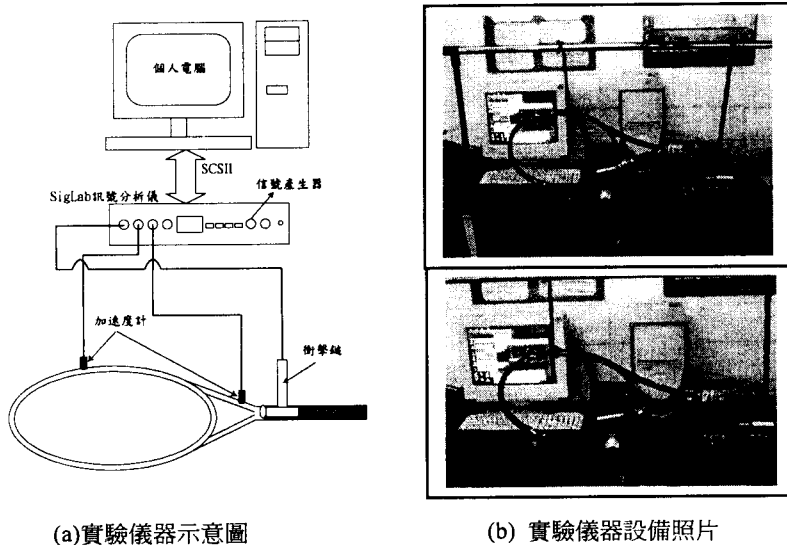
2. 實驗步驟

本章採用同一隻網球拍進行網線之研究，過程中先以穿上網線之球拍進行實驗後，再將網線剪下進行空框之操作，以達到實驗系統之一致性。實驗方式則以固定衝擊錘敲擊位置，移動加速度計的方式，將加速度計(PCB 352A)以蜂蠟黏貼於平板分割點各個分割點上作為感應器，其分割點請參閱圖二-a.b 所示。再以鋼質衝擊錘於 Z 方向施加點力於自由邊界網球拍第 8 點上，激振網球拍劃分的 34 個測定點，每一個點敲擊三次取其平均數，響應經由訊號放大器傳入訊號分析儀，即可得到 34 組頻率響應函數，再交由 ME scope 軟體作曲線嵌合，求取網球拍的模態參數自然頻率、阻尼比和振型等參數。過程中極力掌握訊號的正確性，剔除所有不良及錯誤的訊號，在完成 34 個座標點之測試後，儲存資料以供分析。實驗場地儀器之佈置如圖三所示。



a、無網線拍框 b、有網線球拍

圖二 球拍實驗模態量測點示意圖



圖三 實驗場地儀器設置圖示

參、結果與討論

本研究應用實驗模態及有限元素分析探討有網線及無網線球拍之動態特性，過程分為兩部分，第一部分為結合實驗用拍的實驗值與理論值，驗證所建構之有限分析模型的適用性及正確性；第二部分為比較無網線拍框及有網線球拍之模態參數（含自然頻率、阻尼比及模態振形）的差異性，瞭解網線對球拍動態特性之影響。茲將研究過程陳述如下：

一、有限元素分析模型之驗證

(一)最佳化模型之初步選取

為驗證網線對球拍結構動態特性之影響，本章對無網線拍框及穿以 45 磅張力之球拍進行實驗。採用 free-free 邊界情況，依球拍之外型結構及幾何材料，將球拍分為球拍框及握把兩段行有限元素分析及實驗模態分析等實驗。為取得誤差比最小的最佳化模型，採嘗試錯誤(try and error)之方式，分別對兩種結構體建立三種以上之有限元素實驗模型(請參閱表二)，並取有限元素及實驗模態兩種方式模態振形相同表現與自然頻率誤差率最小者，初步列為最佳化代表，其基本模型之建立請參閱表二所列。

表二 有限元素最佳化模型建構「自然頻率」比較表

a. 無網線網球拍							
自然頻率	實驗值	模型 A	E1=18.233e9 E2=23.628e9 D1=694.27 D2=1105.5	模型 B	E1=18.119e9 E2=24.162e9 D1=699.76 D2=1129.9	模型 C	E1=17.688 E2=24.02e9 D1=697.67 D2=1124.1
	(Hz)	(Hz)	誤差(%)	(Hz)	誤差(%)	(Hz)	誤差(%)
Mode1	174	173.68	-0.1861	174.01	0.6421	173.84	-0.0966
Mode2	495	496.68	0.3400	496.86	0.3762	496.66	0.3345
Mode3	511	511.72	0.1415	511.90	0.1769	511.26	0.5081
Mode4	988	993.41	0.5473	992.77	0.4832	990.17	0.2193

b.有網線球拍

自然頻率	實驗值	模型 A	E1=18.233e9 E2=23.628e9 D1=694.27 D2=1105.5 E3=25.6e9 D3=3.1772	模型 B	E1=18.119e9 E2=24.162e9 D1=699.76 D2=1129.9 E3=25.244e9 D3=2.4191	模型 C	E1=17.688 E2=24.02e9 D1=697.67 D2=1124.1 E3=26.603e9 D3=2.9859
	(Hz)	(Hz)	誤差(%)	(Hz)	誤差(%)	(Hz)	誤差(%)
Model1	169	173.85	2.8716	173.88	2.8860	173.86	2.8728
Mode2	477	497.05	4.2036	497.50	4.2969	496.91	4.1748
Mode3	499	511.40	2.4843	511.36	2.4765	511.38	2.4802
Mode4	960	991.82	3.3143	997.43	3.8986	991.49	3.2805

⇒ 代碼：1=拍框、2=握把、3=網線、E=楊氏係數(pa)、D=密度(Kg/m³)

觀察表二，無網線球拍以模型 C 與實驗模態分析所得的自然頻率比較誤差值最小，在 0.5% 之下；有網線之球拍亦以模型 C 所得的自然頻率比較誤差值最小，在 4.2% 之下。兩者均顯示模型 C 有限元素模型與實驗所得自然頻率最為吻合。兩者所得到之前四個自然頻率皆在可接受之頻率範圍之內。綜合結果，初步選定模型 C 為最佳化代表，列其材料性質及結構幾何等參數，包括楊氏係數與密度等資料陳述如表三，並以所設定之參數結果與實驗模態分析所得資料加以結合驗證。

表三 最佳化理論模型幾何材料與性質列表

球拍性質	球拍部分	握把部分	網線部分
材料	碳纖維	木頭	尼龍線
楊氏係數(pa)	24.02×10 ⁹	17.688×10 ⁹	26.603×10 ⁹
密度(Kg/m ³)	1124.1	697.67	2.9859

(二)有限元素模型與實驗模態之結合驗證

判斷模態分析的實驗與理論之吻合程度，可藉由定性與定量兩方面來作比對。定性比對是根據實驗模態數據與分析結果，分別繪製模態振形與頻率響應函數(frequency response functions)圖形及關聯性函數圖形，檢視兩者間的相似性與差異性；而定量比對則是對實驗與分析所得的模態振形，作交叉的正交性計算(cross orthogonality calculation)，藉以觀察吻合程度(丁麗芬等，2003)。本研究為確認兩種模態分析之吻合性，取理論值與實驗值實施簡諧分析(harmonic ayalysis)，透過定性及定量等因素一一比對驗證。茲就各細項逐一陳述：

1. 模態振形之驗證

二種球拍分別擷取前四個模態振形，有限元素分析請參閱圖四、圖五，實驗模態振形圖請參閱圖六、圖七。對兩者模態振形特性分別陳述如下：

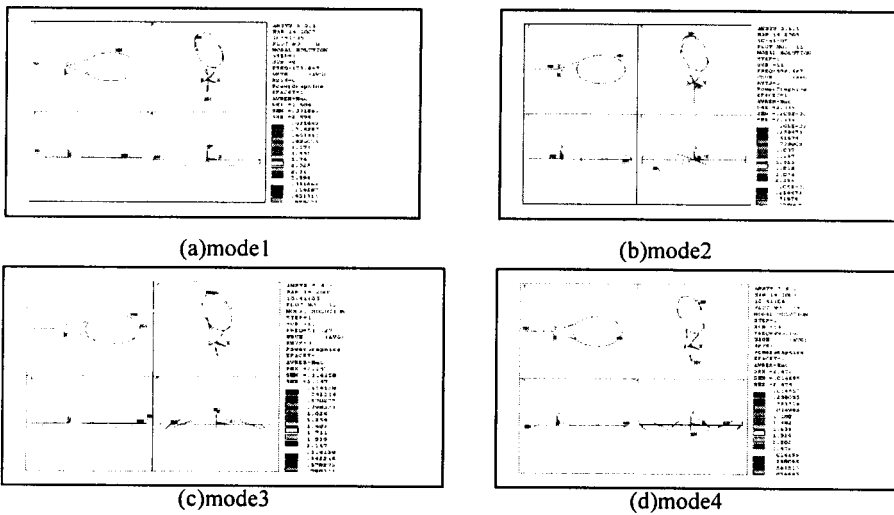
(1)無網線網球拍所展現之振型模式

第一模態中(如圖四-a、六-a 所示)呈現低頻之單次彎曲模態(bending mode)，計有二個節點(node)，落於靠近球拍頂端左右兩側與拍面與拍柄之銜接處位置；第二模態(如圖四-b、六-b 所示)呈現中頻之單次扭曲模態(tosion mode)，計有三個節點，一落於靠近球拍頂端附近左右兩側、拍面與拍柄之銜接處位置及握把處；第三模態(如圖四-c、六-c 所示)呈現高頻之三次彎曲模態，計有四個節點，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(圖四-d、六-d 所示)係呈現高頻之狀態，其振幅微小，振動對手臂幾乎已無影響。

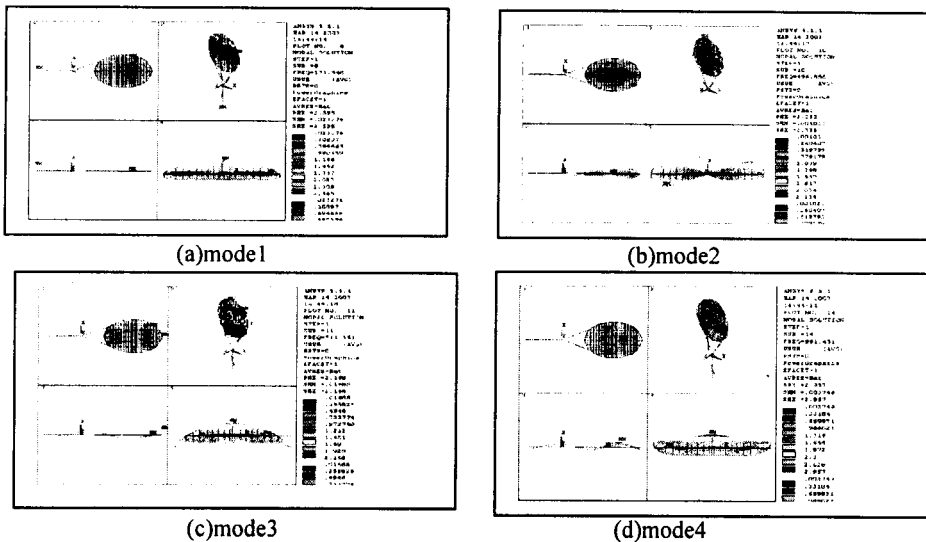
(2)有網線網球拍所展現的振型模式

在第一模態中（如圖五-a、七-a 所示）呈現低頻之單次彎曲模態，計有二個節點，落於靠近球拍頂端附近左右兩側與拍面與拍柄之銜接處位置；第二模態（如圖五-b、七所示）呈現中頻之扭曲模態，計有三個節點，一落於靠近球拍頂端、拍框中段左右兩側、拍面與拍柄之銜接處下方 3 公分位置；第三模態（如圖五-b、七所示）呈現高頻之二次彎曲模態，計有三個節點，分別落於靠近球拍頂端附近左右兩側、靠近框面與拍頸銜接處兩側與拍柄起點及拍面與拍柄之銜接處約下 5 公分位置；第四模態見圖五-d 之有限元素分析呈現三次彎曲模態，計有四個節點，而圖七-d 實驗模態則呈現四次彎曲模態，計有五個節點，評估其自然頻率均為高頻，其振幅已微弱到難以感應到，可忽略其產生之影響。

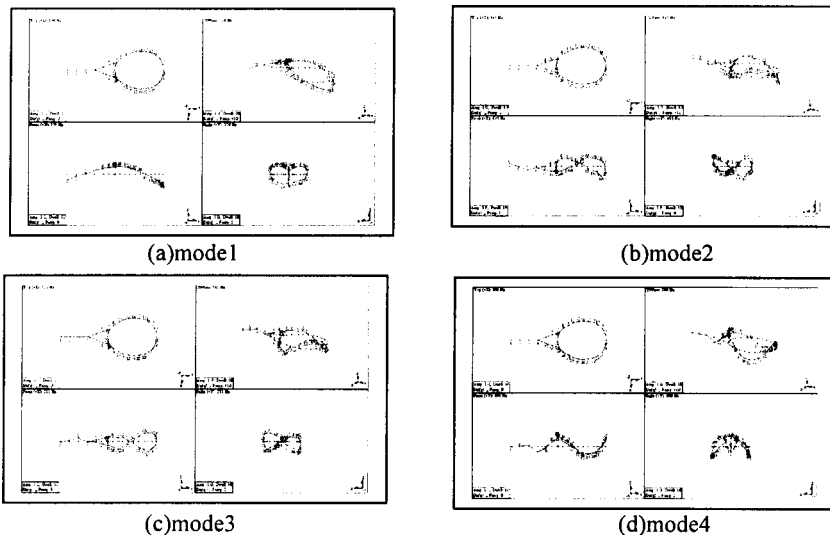
本研究透過模態振形圖示之觀察，可看出實驗與理論兩者振型相當吻合。



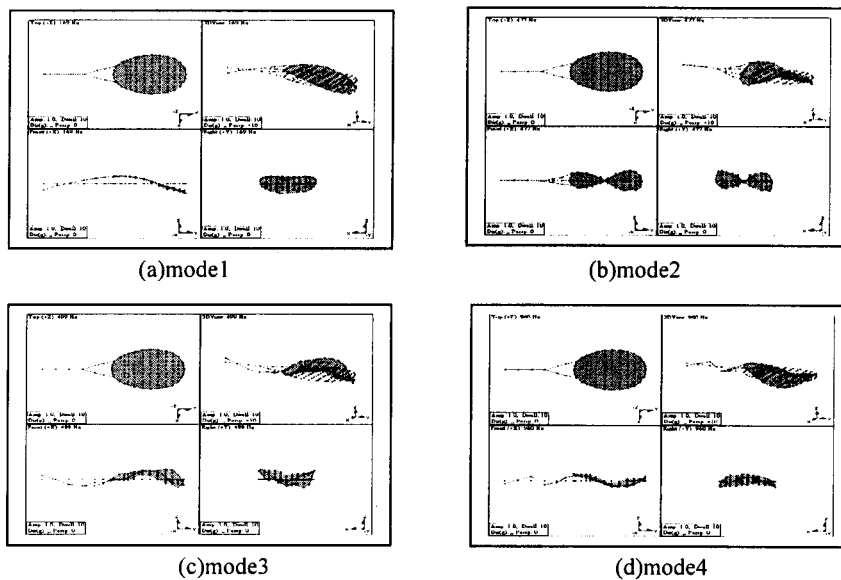
圖四 無網線球拍之有限元素模型圖示



圖五 有網線球拍有限元素模型圖示



圖六 無網線球拍之實驗模態振形圖示

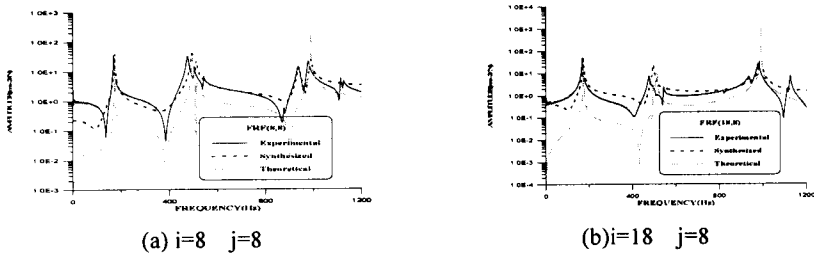


圖七 有網線球拍之實驗模態振形圖

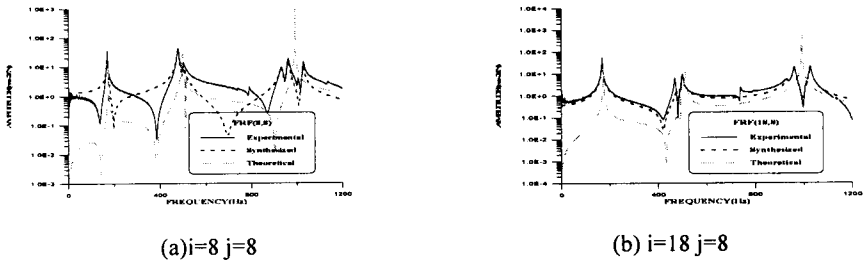
2. 頻率響應函數之驗證

無網線球拍之頻率響應函數如圖八所示，有網線球拍則參閱圖九，圖中 $i=8$ 及 18 、 $j=8$ ，即表示輸入點為第 8 點，輸出點為第 8 點及 18 點，頻率響應函數圖形上的三條曲線分別為實驗的頻率響應函數曲線(EMA)、synthesized 曲線及有限元素的頻率響應函數曲線(FEA)，其中 synthesized 曲線為曲線嵌合得到之模擬曲線，藉由 EMA 及 synthesized 曲線之比對，可以檢視實驗操作之優劣，而從 synthesized 曲線及 FEA 之吻合度情況，可驗證架設模型之正確與否。

本研究觀察圖八及圖九之頻率響應函數圖形，看出在前四個自然頻率範圍與實驗曲線相當吻合，呈現之峰值亦有其共同性，顯示曲線吻合的正確性。



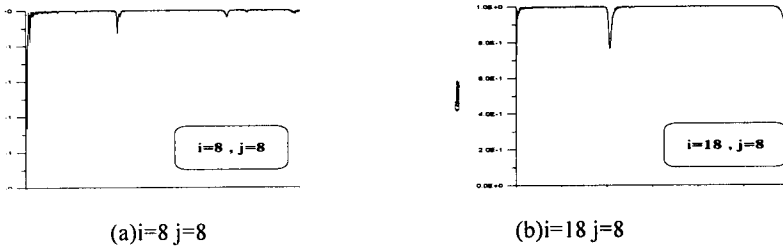
圖八 無網線球拍實驗與理論之頻率響應函數比較圖



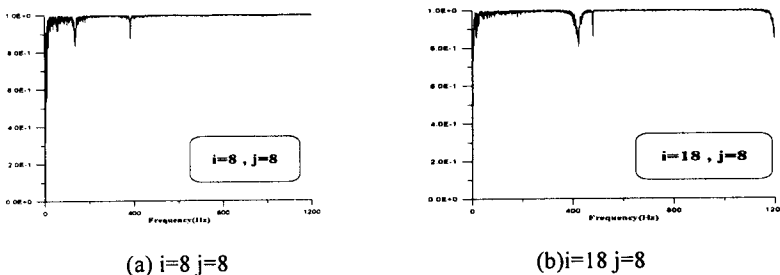
圖九 有網線球拍實驗與理論之頻率響應函數比較圖

3. 關聯性函數

關聯性函數越接近 1，即代表結構的頻率響應函數可信度高。觀察無網線球拍關聯性函數圖示十、有網線球拍關聯性函數圖示十一，其分別對應於圖八、圖九之無網線及有網線之頻率響應函數，由圖中顯示之圖形，整體而言，兩種球拍之四個模態大致接近 1，除反共振點因為響應小所導致附近之關聯性函數值較差外，其他皆可，代表本實驗之結果可信度佳。



圖十 無網線球拍實驗與理論之關聯性函數圖示



圖十一 有網線球拍實驗與理論之關聯性函數圖示

4. 實驗振型與理論振型之模態判定分析矩陣(mode assurance criterion matrix, 簡稱 MAC)

本研究透過模態判定分析矩陣點積值來瞭解兩個模態間之相似關係。模態判定點積值是從 0-1 之間，如果兩個模態的向量完全相同時，則點積是 1；如果兩個單位的向量是正交(orthogonal)或相互成垂直時，則它們的點積是為 0；不完全相似時則點積是介於 0-1 之間。為驗證實驗與理論模態振形之吻合度，在模態振形比對方面，自表四-a.b 模態判定分析矩陣中可見，對角線元素向量值上，在無網線球拍第 3 模態與有網線球拍第 4 模態皆因實驗操作因素或受阻尼效應之影響，呈現較低之數值外，其餘均介於 0.6-0.9 間，以大都接近 1 之數值可以判斷出實驗與理論之模態振形相當近似，而在非對角線元素均偏於 0，意味其正交特性。從 MAC 表中數據及對照振型圖示，可看出實驗與理論之模態振形有其吻合性。

表四 實驗振型與理論振型之判定矩陣表

a、無網線球拍

Mode	1	2	3	4
1	0.84604	0.18425	0.55696	0.15564
2	0.12710	0.62761	0.20372	0.15981
3	0.13033	0.13818	0.16423	0.30051
4	0.36318	0.10368	0.19812	0.66541

b、有網線網球拍

Mode	1	2	3	4
1	0.88053	0.00048	0.06949	0.009644
2	0.00164	0.88877	0.00127	0.000865
3	0.00611	0.12277	0.63711	0.056331
4	0.10292	0.00367	0.14625	0.49913

二、有無網線球拍之比較分析

(一)自然頻率

自表二比較有無網線球拍之自然頻率中可看出，實驗模態所得第一模態的自然頻率為 174Hz（無網線）及 169Hz（有網線），有限元素所得第一模態自然頻率為 173.84Hz（無網線）及 173.85Hz（有網線），完全符合學者 Brody(1995)、相子元（1997b）提出第一自然頻率應介於 100-200Hz 間之結論。再加以比較其他模態，亦有其共同之發展趨勢。比較有無網線球拍實驗模態之自然頻率，自表五可清楚看出，無網線拍框在穿以網線後，各模態自然頻率顯示降低趨勢，其百分比介於 2.35-3.64%之間，而有限元素之自然頻率改變百分比則介於 0.01-0.13 間，較無顯著之改變。

深入探討拍框再加上網線後所呈現之改變，顯示各模態間之自然頻率隨之降低，足驗證了網線能改變球拍之振動特性，就理論上可以瞭解，拍框穿上網線後，其設定的張力造成網線內拉拍框之現象，也因著拍框向內擠壓異位趨勢，正如同懸臂樑向外拉長之原理一般，其前後彎曲(bending)的頻率將隨之降低，此現象正佐證了穿以網線後的球拍將降低了自然頻率。

至於有限元素分析並未呈現相同之結果，探究原因，或許本實驗於分析目標的條件設定上，並未對受到網線張力內拉效應之框型重新估算，在相同之結構幾何及楊氏係數條件設定下，造成空框與穿上網線後兩支球拍的理論值相去不遠，故與實驗模態呈現有不同之結論，以研究逆向推導之方式，或許亦驗證了加上網線後拍框實體將受影響了結果，至於修正之因素或參數多寡，建議可應用繪圖軟體(Pro-E)繪出實際尺寸，再轉入有限元素軟體分析，並以立體元素取代樑元素，在條件設定更符合實際結構之下，能獲得更精確結果，將有助於研究分析信度，此乃後續研究可加以深入與修正之處。

表五 有無網線之球拍自然頻率比較表

自然頻率	無網線拍框		有網線球拍		穿線後自然頻率 改變百分比	
	實驗值	理論值	實驗值	理論值	實驗值	理論值
Mode1	174	173.84	169	173.86	-2.87	0.01
Mode2	495	496.66	477	496.91	-3.64	0.05
Mode3	511	511.26	499	511.38	-2.35	0.02
Mode4	988	990.17	960	991.49	-2.83	0.13

(二) 阻尼比方面

阻尼比數值高低是球拍吸振能力優劣的指標，所以網球拍之阻尼值越高，表示球拍吸振能力越好，亦代表球碰撞球拍時，所傳遞於手臂之振動能量會相對減少。因有限元素分析並無法求得阻尼比，故本研究僅就實驗模態分析加以比較，觀察表六所得，無網線球拍阻尼比約在 0.28-0.43%之間，有網線球拍約在 0.25-0.52%之間，此數值均比一般鋼材 0.1 左右為高，即是球拍阻尼效應所致。而無網線之拍框在穿上網線後，第一模態的阻尼效果並未突顯出，反而不如無網線之球拍(0.2589<0.2847)，然加上網線球拍的第二模態、第三模態顯然優於無網線球拍，尤其是第二模態阻尼比增加率高達 20.56%，第三模態阻尼比增加率亦為 11.08%，然第四模態的高頻時，則又呈現出有網線球拍在的阻尼效應不如無網線的空拍框(0.3602<0.4006)。

本研究結果，拍框再加上網線後，阻尼比方面並未呈現一致性之影響，於低頻的第一模態及高頻的第四模態中反顯現出不如無網線拍框之趨勢，此與學者林寶城(1997b)、陳帝佑(1998)之研究結果有所落差，許是網球拍研究通常以脈衝(impulse)方式輸入激振，因此每一個模態對整體振動具有相當程度的參與，或於握把與拍框因不同材料接合所形成之影響，導致阻尼比難以呈現線性之關係，然整體而言，穿上網線後，阻尼比提升百分比達 12.5%，顯現網線有提升球拍阻尼比之功效。

表六 有無網線之球拍阻尼比比較表

阻尼比(%)	無網線拍框	有網線球拍	穿線後阻尼比 改變百分比
ξ_1	0.2847	0.2589	-9.06%
ξ_2	0.4354	0.5249	20.56%
ξ_3	0.4043	0.4491	11.08%
ξ_4	0.4006	0.3602	-10.08%
合計	1.525	1.5931	12.5%

(三) 模態振形方面

學者林寶城(1997)研究擊球反彈球速之報告中提出，球拍之設計應儘量作到穿線前後，模態完全沒有改變之設計。本研究透過有限元素及實驗模態之分析，綜合兩者之模態振形與模態保證指標驗證(MCA)之比較，不論是無網線拍框或穿上網線後之球拍，其所呈現的四個模態中，除了在實驗值的第三模態振形與有限元素分析之第四模態振形小有差異外，其他所呈現之物理特性均為吻合。足見網線並不是影響振動模式之因素，此結論亦如同學者相子元(1997a)分析網球拍之振動特性結論相符，再比較學者林寶城(1998a)及周志柔(1994)亦即網球拍之網線並未能造成球拍振動模態之改變，並非是改良球拍模態振形效應之考量因素。

表七 有無網線之球拍模態振形相較表

振 型 模態序	無網線拍框		有網線球拍		相較情形	
	實 驗	理 論	實 驗	理 論	實 驗	理 論
Mode1	單次彎曲	單次彎曲	單次彎曲	單次彎曲	吻合	吻合
Mode2	單次扭曲	單次扭曲	單次扭曲	單次扭曲	吻合	吻合
Mode3	單次扭曲	二次彎曲	二次彎曲	二次彎曲	近似	吻合
Mode4	三次彎曲	三次彎曲	三次彎曲	四次彎曲	吻合	近似

肆、結論與建議

一、結論

(一)有限元素模型驗證

- 1.理論與實驗之自然頻率誤差值皆在可接受之範圍內，顯示理念有限元素模型之正確性良好，並確認最佳化模型代表。
- 2.從頻率響應函數三條曲線之比對吻合度高，以實驗值曲線及實驗合成(synthesized FRF)曲線之吻合性，代表實驗操作之準確性。由實驗值和理論值曲線之比對上，亦可確認理論所架構之有限元素模型模擬適當。
- 3.在模態振形也有很好的一致性，實驗值與理論值保證指標分析值大都接近 1，可看出實驗與理論之模態振形有其吻合性。

(二)有無網線之模態參數的比較

- 1.加上網線後，球拍的自然頻率呈現降低之趨勢。
- 2.加上網線後，中頻時之阻尼比明顯增加，整體評估，穿上網線有提昇阻尼比之效應。
- 3.穿上網線後，並未造成模態振形之改變。

二、建議

- (一)本研究理論與技巧可擴展至各型球拍、非線性材料或非幾何形狀之物體，作為模擬各種受力狀況與邊界條件之依據，在成品未完成前即有預估功能，將可避免人力、物力及時間之浪費。此亦有助於爾後學術研究發展，作為球拍品質指標之評估與探討模式。
- (二)對有限元素之模型建構，建議應用繪圖軟體(Pro-E)繪出實際尺寸，再轉入有限元素軟體分析，並以立體元素取代樑元素，以更符合實際結構之條件設定下，更能精確研究分析之信度。

參考文獻

- 丁麗芬等 (2003)：網球拍之模態特性驗證。教練科學，2 期，29-40 頁。
- 王柏村 (1996)：振動學。台北：全華科技圖書公司。
- 王柏村 (2002)：實驗模態分析之實務與應用。金頓科技股份公司教育訓練教材。
- 林寶城 (1998a)：不同網線張力對網球拍振動模態之影響。第十三屆亞洲運動會運動科學研討會。
- 林寶城 (1998b)：網球拍面振動特性分析。臺灣師大體育研究，5 期，67-86 頁。
- 周志柔 (1994)：網球拍之力學特性分析。國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。
- 相子元 (1997a)：網球拍振動之有限元素分析。國立體育學院論叢，7 卷 2 期，29-38 頁。

- 相子元 (1997b)：振動分析—ANSYS 在網球拍振動分析上的應用。輔訊最新技術資訊，66-72 頁。
- 陳帝佑等 (1998)：網球拍拍柄材質之振動尼比研究。中華民國體育學報，25 期，137-160 頁。
- 陳廷國 (1991)：網球拍有限元素"化"靜態分析法及案例。體育與運動，72 期，60-66 頁。
- Brody, J. A. W., & Wilson, B. D. (1978). Effect of racket stiffness and string tension on ball velocity after impact. *Research Quarterly For Exercise and Sport*, 49(4), 255-259.
- Brody, H. (1995). How would a physicist design a tennis racket? *Physics Today, March*, 26-31.
- Elliott, B (1982). Influence of tennis racket flexibility and string tension on rebound velocity following a dynamic impact. *The Research Quarterly for Exercise and Sport*, 53(4), 277-281.
- Groppe, J., Shin, I., Thomas, J., & Welk, G. (1987) The effects of string type and tension of impact in midsize and oversized tennis racquets. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3(1), 40- 46.
- Knudson, D. (1993). Effect of string tension and impact location on ball rebound accuracy in static tennis impacts. *Journal of Applied Biomechanics (Champaign, Ill.)*, 9(2), 143-148 Refs: 24.
- Leigh, D. C., & Lu, W. Y. (1992). Dynamics of the interactions between ball, strings, and racket in tennis. *International Journal of Sport Biomechanics (Champaign, Ill.)*, 8(3), 181-206 Refs: