

# 二胡琴弦拉伸試驗機製作與琴弦之探討

李志良

德霖技術學院機械工程系

楊瑾惠

臺灣國家國樂團中胡聲部副首席

## 摘要

以往對於音樂的看法通常都被劃歸於人文學科，現今歐洲音樂教育在系統音樂學底下有著跨越理工專業領域的研究方向。而以機械領域的角度來看，樂器就是一種製造聲音的機器，目前我國傳統國樂當中，二胡是最受歡迎的樂器之一。近年來許多學者針對胡琴這個樂器在性能上與演奏技巧上的發展能再提升，提出許多自我要求與改良的方向。隨著中國音樂的發展所涉及物理學、音樂美學等學科愈多，但在各種樂器改良背後，針對中國樂器在物理聲學與材料工程理論等理論基礎的研究並不多見。本研究曾利用百萬專業級的拉伸試驗機來進行琴弦的研究，為求日後研究方便性本研究依其拉伸試驗機基本設計原理，製作一台符合所需條件的拉伸試驗機並進行測試與試驗，以提供國樂樂器在基礎理論的研究。

**關鍵字：**二胡、琴弦、拉伸試驗機

## 壹、前言

一般對音樂學的看法通常被劃歸於人文學科，其跨領域的研究也側重其與歷史學、哲學、人類學、語言學、文學、社會學以及藝術史等學科的交流。然而，在十九世紀下半葉，當音樂學家極欲把音樂學確立為一門獨立學科之際，他們倒是引用了許多音樂物理學與音樂生理學等學科的新發現，例如科學家 Hermann von Helmholtz (1821-1894) 對於人耳與不和諧音的研究，即為音樂生理學的範疇。為了要鞏固音樂學的科學基礎，這樣的自然科學傳統，在今日歐洲的音樂學教育中仍然歷歷可見，因此在系統音樂學底下便有一些跨越理工專業領域的研究方向。

其實就機械領域的角度來看，樂器的本身就是一種製造聲音的機械，這種機械則由兩個部份來構成，其一是“激發系統”，另外則是“共振系統”。激發的方式分別有撥彈、敲擊、拉擦及氣吹等；而共振的部份則包括了弦、棒、薄膜(琴皮)、平板、管、號筒及電子發音器等。其中使緊繃的弦令其振動，則是產生音樂最古老的方法之一，目前在我國傳統國樂的擦弦樂器當中，胡琴可以說是最受歡迎的樂器之一。近年來各作曲家、表演者與相關學者針對胡琴這個樂器在性能與演奏技巧上的發展與再提升，提出許多自我要求與改良的方向，同時也不斷摸索著解決之道。在漫長的歷史過程中，中國樂器並非是一成不變的，它或多或少都有經歷過改良與變革，尤其是當近代東西方文明激烈的碰撞下，傳統文化在面對內在與外來的壓力，其所引發出多元與多向的遞嬗，相較於兩三千年來的進程尤其顯得劇烈。連帶的促使我國音樂在演奏形態及創作手法的發揮空間上不斷的擴大，甚至更進一步的影響美學思想。在近百年來持續不斷的樂器改良下，原屬於鄉野民間的胡琴無論是在製造工藝或是各部位的材質上，均隨其音樂有著長足發展，精緻度也有顯著的進步。此外對於胡琴本身在發音的聲學要求上也跟著相對的提高，然而音樂聲學的研究已不是單純對樂器發聲做研究，因為社會的進步與科學的發達，已使現在的研究不僅僅只有對聲波做研究而已，它已經涉及到物理學、音樂美學、造型藝術、電腦科學、製造工藝、心理學以及生物科技等學科。但是在各種的樂器改良背後，針對中國樂器在物理聲

學與數學的分析，以及材料工程學等理論基礎的研究並不多見。

為促進科學與人文的對話，本研究將嘗試製作琴弦拉伸試驗機，並針對二胡琴弦探討一些理論，再以機械的專業技術和數學、物理的角度探討二胡空弦弦長承受之張力與振動頻率的關係，進而了解琴弦機械與物理的特性，由於機械領域專業的拉伸試驗機一台價值百萬，故製作二胡琴弦試驗機加以輔助琴弦拉伸的實驗。

## 貳、製作內容

本研究之二胡琴弦拉伸試驗機的製作內容，主要分為四大部份，分別為 一、夾具。二、升降系統。三、底座。四、測量儀錶。分述如下：

一、夾具：主要分為 (a) 上夾具。(b) 下夾具。

(a) 上夾具：由兩塊夾板和一個主要構件，本組拉伸試材為二胡琴弦，考慮當挾持時，會損壞試材而影響實驗數值，故在挾持兩端裝置較軟的鋁合金夾板，由於為配合機械式拉壓試驗儀錶的應用，故固定上夾具並與機械式拉壓試驗儀錶相配合應用，並將兩者裝置於面板上。

(b) 下夾具：由兩塊夾板一個墊塊，和主要構件構成下夾具與升降平板相銜接，故會隨著升降平板而移動，故而在其間加入墊塊，增加穩定性，夾具的夾持兩端皆是利用材質較軟的鋁合金。

二、升降系統：主要分為 (a) 升降平板。(b) 導螺桿。(c) 兩支導柱。(d) 兩支螺母。

(a) 升降平板：利用導螺桿的傳動及左右兩支導柱支撐，帶動平板的移動，而平板與下夾具相接，隨著平板升降，進行琴弦的拉伸動作，故平板連接著升降系統內部所有主要機構。

(b) 導螺桿：主要帶動升降平板升降與試驗機進行拉伸進給時，精度的控制，由於拉伸試材為琴弦，實驗得知當拉伸至 9mm 時發生降伏破壞，故選用 M25 ×2.0，L=1100 mm的導螺桿，導螺桿為主要機件，考慮其耐用性與防鏽性採用不銹鋼材質。

(c) 導柱：拉伸試驗機的拉伸動作主要由導螺桿帶動升降平板，但是單只是靠導螺桿帶動平板的升降會發生平板晃動、旋轉不穩定，故在平板兩端加入兩隻導柱，增加平板的升降穩定度（其尺寸 16×L1000，材質為不銹鋼）。

(d) 螺母：主要穩定升降平板，而能在導螺桿上平穩的移動，不易晃動，選用配合導螺桿尺寸 M25×2.0，PCD44，4 -  $\phi$ 4.5。

三、底座：(a) 底板。(b) 伸縮腳架。

(a) 底板：主要為固定主要機件（導螺桿、導柱等）和放置於地面時的平穩性，為求導螺桿轉動的穩定度，故在底板內裝置軸承，配合導螺桿。

(b) 伸縮腳架：主要目的是增加穩定性，由於整個機構重心在於後半部，而考慮若增大底座會浪費不必要的材料與擺放時佔空間，故在底座添加伸縮腳架以增加穩定性，考量其伸縮性以方便存放，減少所佔的空間。

四、測量儀錶：細分為 (a) 機械式推拉試驗機儀錶。(b) 刻度盤。(c) 搖桿。

(a) 機械式推拉試驗機儀錶：市面上有許多的荷重器(Load Cell)與測量應力的儀錶，但製作本試驗機所需應力與精度約：應力 50kgf~100kgf 精度 0.01~0.05 mm，機械推拉試驗機儀錶規格為：應力 50kgf 精度 0.05mm。雖然精度不高，但符合所需條件，價格也較合理，

故採用機械推拉試驗機儀表。

(b) 刻度盤：主要為轉動導螺桿來移動下夾具進行拉伸，控制拉伸的精度（每一刻度為 0.02 mm）並與上板內部軸承（與導螺桿配合）配合。

(c) 搖桿：主要為帶動整個拉伸的進行作業，與導螺桿、刻度盤相配合。

### 叁、組裝程序

1. 各細部零件的組裝：

[1] 底座：(a) 底座與內部軸承。(b) 底板與伸縮腳架。

[2] 升降系統：(a) 導螺桿。(b) 螺母。

[3] 測量系統：(a) 面板與上夾具機械式推拉試驗儀表。  
(b) 刻度盤與上板內部軸承。

[4] 夾具：下夾具與配合平板的墊片。

2. 底座上安裝導螺桿配合內部軸承。

3. 導螺桿裝置於平台上並配合螺母。

4. 平台兩端加入兩支導柱配合底座軸承。

5. 上板內的軸承配合於導螺桿和兩支導柱與刻度盤。

6. 安裝面板。

7. 下夾具固定於平台上。

8. 銜接面板與背板。

9. 完成琴弦拉伸試驗機。

右圖圖 1 為拉伸試驗機示意圖，圖中各部位名稱分別為

- (1) 底座。
- (2) 下夾具。
- (3) 面板。
- (4) 上夾具。
- (5) 機械式推拉試驗儀表。
- (6) 刻度盤。

右圖圖 2 為琴弦拉伸試驗機完成照片。

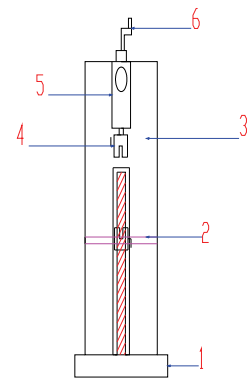


圖 1、拉伸試驗機示意圖



圖 2、琴弦拉伸試驗機完成照片

## 肆、研究方法與步驟

由於波動方程式中有兩個重要參數會影響波動的進行，其一是琴弦單位長度的質量( $\rho$ )，這個參數的取得比較容易，在本研究中將以電子天秤量測琴弦的重量，並將量取多組琴弦作為樣本以求其平均數，然後除以琴弦長度後便可求得( $\rho$ )。另外一個參數則為琴弦的張力，在此本研究將對琴弦使用拉伸試驗機施以拉伸實驗，以取得琴弦經調音定弦後所承受的張力。下圖圖 3 為琴弦應力應變示意圖，由圖中可以看出琴弦承受應力的情形，其中曲線一開始一直是遵循虎克定律做等比例的變形來承受應力，直到降伏強度之後便不再是等比例進行而是成為塑性變形，此時若繼續增加應力且超過抗拉強度便會產生破壞或斷裂的情形。

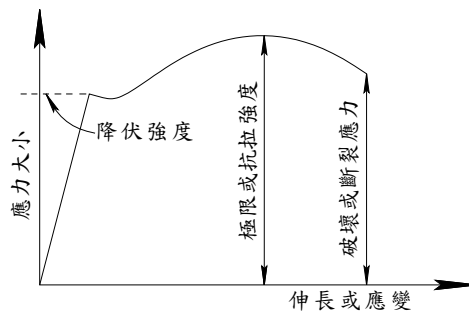


圖 3、琴弦應力應變示意圖

琴弦都有其應力應變圖來表現出它的機械或物理的特性，一條新的琴弦經調音定弦後，其承受的應力應該保持在虎克定律的降伏強度內，而由頻率公式  $f = 1/(2L)*(T/\rho)^{1/2}$  可知，若知道空弦弦長(L)，單位長度的質量( $\rho$ )以及其所承受的張力(T)，便可計算出該琴弦的振動頻率(f)。

## 伍、結果與討論

首先是量測及計算琴弦單位長度的質量( $\rho$ )，本研究所使用的琴弦為牡丹弦之內弦，共取樣量測六條琴弦以統計之。經由量測琴弦的重量以及長度之後，加以相除便為琴弦單位長度的質量( $\rho$ )，隨後再求其平均值以做為其他計算分析之依據，表一為其統計計算結果，最後得牡丹弦內弦之平均單位長度質量為 0.00099417 kg/m。

表一、琴弦單位長度質量統計表

	重量 (公克)	長度 (公分)	$\rho$ (kg/m)
1	0.83	85.2	0.00097418
2	0.83	85.0	0.00097647
3	0.86	85.4	0.00100703
4	0.86	85.0	0.00101176
5	0.86	85.2	0.00100939
6	0.85	85.2	0.00098590
平均	0.8467	85.167	0.00099417

接著是進行琴弦的拉伸實驗，在拉伸的當中並進行琴弦定音的工作，以求得定弦後此時琴弦所承受的張力。在本實驗中分別以 36 公分，37.5 公分與 39 公分的琴弦長度進行拉伸，經定弦後可得到各自所承受的張力，再以頻率公式計算列於表二。

表二、二胡內弦振動頻率計算結果

	空弦長度 (公分)	定弦張力 (kgf)	頻率 (Hz)
1	36	4.45	291.04
2	37.5	4.87	292.29
3	39	5.31	293.47

本實驗於調音時二胡內弦的定音為 D，若其振動的頻率以十二平均律計算的話，A 的頻率以 440Hz 設定則 D 的頻率為 293 Hz，而由表二計算所得到的頻率均非常接近此值，這是很有趣的現象，雖然這個結果不能證明二胡較佳的空弦弦長為 39 公分，但是足可證明琴弦所量測得到的單位長度質量與所承受張力的可信度。另外要補充說明的事，即是在實驗中於不同弦長定弦調音時，在弦長 36 公分的推拉弓之際，雖是調到音但是調音器的指示燈顯得很不穩定，而弦長 37.5 公分的情況則稍稍穩定，但是在 39 公分的調音於推拉弓時調音器的指示燈是穩定不動的。此現象真的是很值得玩味與探討，因為此時並無二胡的琴筒做為發音器，甚至可以說根本就沒有二胡其他任何一個部位可以影響琴弦的振動或發音，本實驗很單純的僅是在探討二胡琴弦，而任何一條琴弦的本身均具有其特性的長度，它的粗細、重量、質料以及所承受張力的應力應變關係等因素，都會影響其振動的形式與其穩定度。所以說 39 公分是不是二胡最佳空弦弦長，從以往的相關研究[參考文獻 2]與本次實驗的跡象顯示，均較優於其他空弦的長度。

由測試結果顯示，牡丹內弦的降伏點約為 13.5 公斤力(kgf)，而伸長量為 0.55 公分左右。當琴弦一直拉伸到拉斷，此時的伸長量約在 0.9 公分左右，而抗拉強度為 15 公斤力。由表二的各個定弦張力可得知均遠小於降伏強度(虎克定律範圍內)，所以只要正常使用琴弦應該不會有斷弦的情形。但是依經驗法則建議琴弦使用三個月左右需要換弦，此乃琴弦有其疲勞強度的影響，即繃緊的弦用久了會有鬆弛的現象，不過鬆弛的多嚴重該如何判定一直沒有標準，在此仍可由應力應變圖做判斷，這將是後續待研究的內容。將使用過三個月的琴弦做拉伸實驗以比較新弦與舊弦應力應變圖的差異，以提供換弦的科學依據。還有本次實驗僅針對二胡內弦探討，至於二胡外弦甚至是高胡與中胡的琴弦，均可從事拉伸實驗與定弦頻率計算的探討。其實像是”二泉琴”以及”長城弦”的特殊情形，均有其特別的物理意義，而國樂樂器基礎理論的研究，就是需要一點一滴的累積起來。

## 參考文獻

- [1] 林昱廷，1998：“中國傳統樂器聲學特性之分析研究”，國科會研究報告。
- [2] 林昱廷，1995：“南胡空弦弦長的科學分析研究”，台北：學藝。
- [3] 鄭德淵，1984：“中國樂器學—中國樂器的藝術性與科學理論”，生韻出版社。
- [4] 孫清吉，1982：“樂學原理”，全音樂譜出版社。
- [5] 吳佳曉/譚勇，2001：“胡琴新巧奪天工，都江香江樂韻長—川籍音樂家熊正林二胡樂改之路”，實驗國樂團雙月刊，第十四期，10~16 頁。
- [6] Erwin Kreyszig，1983：“高等工程數學”，曉園出版社。
- [7] Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing，1998[1991]：“The Physics of Musical Instruments (樂器物理學)”，Springer-Verlag, New York, 2nd edition, ISBN 0387983740.

# The Study of Erhu Strings and the Manufacture of Tensile Testing Machine for Strings

**Chi-Liang Lee**

Department of Mechanical Engineering, De-Lin Institute of Technology

**Chin-Hui Yang**

National Chinese Orchestra Taiwan

## Abstract

The study of music has often been attributed to the Humanities in the past times. The European music education in the field of musicology has across the engineering field at the system research in present. In simple terms, musical instrument is made out voice machine in mechanical field. Erhu is one of the most popular musical instruments in traditional Chinese music. In recent years, many scholars on Chinese musical instruments upgrade the performance and technique development in Erhu. The researches provide lots of self-discipline and improvement direction. However, the Chinese musical instrument acoustics, physics and materials engineering theory and other theories on the basis were rare behind the improvement in a variety of Chinese musical instruments. This study has used expensive of tensile testing machine to study Erhu string. In order to study the conveniences in the future, this study depends on its stretch testing machine basic design principle to manufactures a tensile testing machine for carries on the test and the experiment in Erhu strings research.

**Keywords** : Erhu, strings, tensile testing machine