

国家级大学生创新创业项目报告

项目名称：智能钢琴调音设备探究与设计

项目编号：#201910280001

上海大学理学院

指导教师：李凯

小组成员：翟晗锋，刁山洲，翁圣劼

成员基本信息

翟晗锋	力学与工程科学学院	17121632
刁山洲	计算机工程与科学学院	17121630
翁圣劼	力学与工程科学学院	17121826

项目负责人基本信息

翟晗锋

理论与应用力学系, 力学与工程科学学院, 上海大学.

邮箱：frankzhai0@gmail.com

联系电话：+86 180 2102 7596

目录

摘要

0 引言

1 背景概括

1.1 吉他及基本结构

1.1.1 吉他

1.1.2 弦结构

1.1.3 共鸣箱

1.2 弦振动理论

1.2.1 基本模型及假定

1.2.2 数学推导

2 仿真模拟

2.1 结构建模

2.2 网格&载荷施加

2.3 结果讨论

2.3.1 变形分析

2.3.2 模态分析

2.4 有限元讨论

3 弦振动试验

3.1 实验设计

3.1.1 实验目的及设备

3.1.2 实验方法

3.1.3 琴弦参数

3.2 实验装置设计

3.3 拉伸试验

3.4 弦振动曲线拟合

3.4.1 A弦曲线拟合

3.4.2 E弦曲线拟合

3.5 弦振动实验讨论

4 弦振动调节程序设计

4.1 GUI 界面设计

4.2 数据读取及曲线拟合

4.3 结果输出

5 结论

6 总结

7 声明

8 鸣谢

附录

参考文献

弦乐器智能调音设备设计：吉他振动探究

翟晗锋 刁山洲 翁圣劼

(上海大学力学与工程科学学院，上海大学计算机工程与科学学院，上海大学理学院，上海 200444)

摘 要

吉他是一种由弹拨为操作方式的六弦琴类弦乐乐器。在吉他多样旋律和音乐背后有复杂的科学机制。本文从弦振动理论基本模型及假定和数学推导出发，利用有限元模拟的方法对吉他进行建模和琴弦荷载施加，分析讨论吉他的结构特征和模态分析。通过有限元可以分析出共鸣箱对吉他声音起到的扩大作用和微弱频率改变。为排除共鸣箱影响，我们设计试验研究弦振动的声音特性；对琴弦(*highE*、*lowE* 弦)进行拉伸试验和振动频率测量，对测量结果进行记录并利用现有理论模型进行数据拟合。我们还基于 **MATLAB** 开发出了一款基于弦振动声音测量样本和振动理论模型的声音测量矫正用户界面程序开发，并能实现声音样本误差显示。最后，我们从理论层面讨论了弦乐器自动化声音调制的机理并给出了基本模型。对于弦乐器的发生机制进行多维度的学习和探究。同时，由弦乐器弦腔振动机理研究引发思想灵感可以为振动控制等工程问题提供方案和灵感；由弦乐器总体结构可以拓展到设计研究具有相应振动性质的结构和材料，并为工程学提供更多贡献。

关键词：弦乐器；有限元分析；振动控制；模态分析；曲线拟合；GUI 用户界面设计；**MATLAB**；频谱分析

0 引言

音乐是当今社会人们休闲娱乐等无法离开的一门艺术。但同时，音乐也是一项高深且复杂的技术，是一项困扰了人们上千年却又令人着迷的技术科学。音乐的本质就是物体的振动，通过具有不同结构不同材质物体以不同形式发出的不同频率振动，构成了我们今日人类陶醉又沉迷的音乐。

现代社会中，演奏音乐的乐器复杂多样，其内部含有的复杂技术难题更是发展出了不同的科学分支。但总的来说，现有乐器基本可以分为两类：管乐和弦乐。管乐是靠气体在金属或其他材质腔内部发生共振，依由其结构构造，发出不同音色的声音；其声音浑厚，多用于合奏。其主要代表有大号、圆号、小号等。而弦乐主要依靠弦振动传递到腔内发生共振产生声音，多用于独奏。相比管乐，弦乐的构造和发声机理更复杂，更多样，也是我们本次研究的重点。典型的弦乐器有小提琴，大提琴，吉他等。需要特别指出的是，钢琴也属于弦乐的一种，其发声机理与吉他类似。钢琴和吉他发声过程本质虽然相似，但是钢琴的内部结构和激励施加以及振幅放大效应远比吉他复杂的多：吉他由人手拨动施加初始激励，而钢琴则需要复杂的击弦装置控制的激励施加；吉他由一个曲线型的腔体产生共鸣作用(提琴类同样适用)，而钢琴则是一个相对体积较大，控制较为复杂的琴身来起到共鸣效应，其中涉及到木板选材、排列等问题，涉及变量较多，难以控制。本次科研项目中，因为项目经费和多方面条件的限制，我们主要研究探讨吉他及其发声机理。

由吉他振动可以引发出多方面多维度的问题讨论。首先，我们听到的吉他声音主要是由人手拨动的初始激励诱发的弦振动。但是，经过仅仅是一根弦的振动无法发出我们听到的美妙的吉他声；吉他流线型的设计和木质的腔体对振动的扩大作用使得弦振动的大小被放大。同时，腔体木板自身产生的振动对整体的声音频率也会产生微弱影响。我们将以数学推导、仿真模拟、试验验证、程序设计等多方面多维度来研究学习吉他的美妙的旋律背后复杂的数学物理力学机制。

1 背景概括

1.1 吉他及基本结构

1.1.1 吉他

吉他是一种弹拨乐器，通常有六弦(*highE*、*B*、*G*、*D*、*A*、*lowE* 弦)。吉他的声音产生是由于人手拨动的初始激励诱发的弦振动产生。振动弦的声音可以通过吉他的共鸣箱以声学方式发出，也可以通过电放大器和扬声器发出。作为一种弦乐器，其传统上是用木头制成，并用高分子，尼龙或丝钢等材质的弦连接，其结构和音色与其他弦乐器不同。

现代民谣吉他主要有三种类型：古典吉他(西班牙吉他/尼龙弦吉他)，钢弦民谣吉他和爵士吉他。本次研究主要用到钢弦民谣吉他。吉他的声音是通过弦的振动激励的，弦的振动是通过用手施加的力来产生的。弦中的振动形式可用波函数拟合。腔体共振导致振动弦产生恒定频率的声音。对于吉他弦的振动过程可以模拟为方程频率 $\nu = \sqrt{\frac{P}{\rho}}$ 。其中 P 是振动周期， ρ 是弦的纵向密度。



图 1 试验中用到的吉他以及弦扭调节装置

Fig. 1 The guitar used for experiment and the tuning head of guitar

由于吉他弦长时间使用或暴露在复杂物理场下，吉他弦会出现松动、生锈、老化等现象导致其发出声响异常。一般情况下，我们需要用的吉他的调音

旋钮通过调整吉他弦张力的方式来调整吉他的音准。因此，找出音调头与琴弦张力之间的对应关系是很必要的。调音旋钮的图片如图1所示。在本实验中，我们将连接到调音头的螺栓称为调音按钮。

1.1.2 弦结构

吉他共有六根弦，我们常用 *highE*、B、G、D、A、*lowE* 六个英文字母来表示；亦或直接用 1st、2nd、3rd ...6th 直接表示六根弦。其对应命名如图 2 所示。

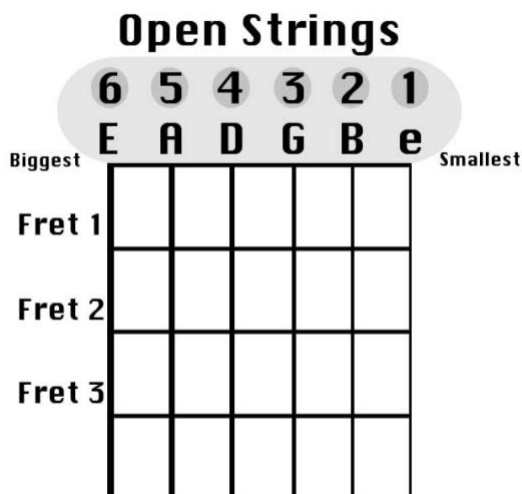


图 2 吉他中的六根弦及其对应命名

Fig. 2 The six strings in the guitar and their corresponding names

传统上，由肠子制成的古典吉他弦现在已改为用尼龙或高级合成材料制成，以提高演奏性能。电吉他弦有镀镍钢，纯镍或不锈钢制成。在本次试验中，我们用到的民谣吉他弦是由丝钢制成。同时，在第 3 章中提到的拉伸试验中，为增强试验效果，我们选用 *highE*、*lowE* 两种弦进行试验。

1.1.3 共鸣箱

当吉他弦弹拨初始激励后，它振动并产生谐波以及泛音丰富的频谱。此时吉他的共鸣箱会产生共振效应放大弦振动声音。吉他共鸣箱未按比例放大弦的所有频率。相反，某些频率比其他频率放大得更多。这种特质被称为吉他共鸣箱的共鸣效应。其作用机理和特征如图 3 示。

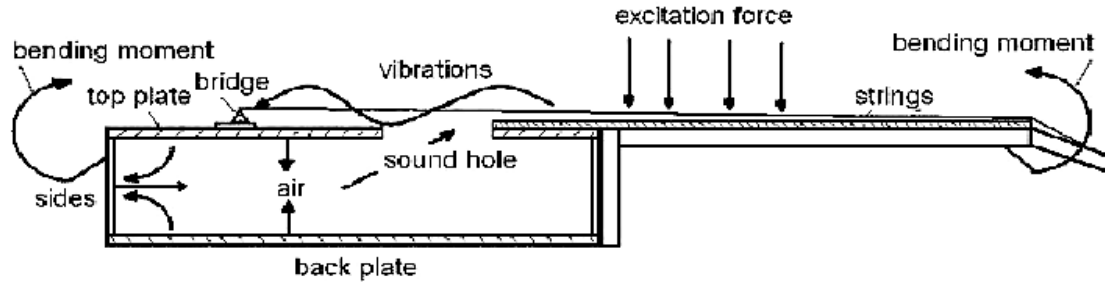


图 3 吉他整体结构及其共鸣箱作用机理示意图

Fig. 3 Schematic view of the guitar 's structure and the mechanism of its resonance body

1.2 弦振动理论

1.2.1 基本模型及假定

关于吉他中弦振动的情况，我们可以建立如下的机械模型。为了模拟吉他中发生的情况，该模型由一根拉伸的弦组成，该弦固定在两端。对吉他弦以初始激励，模仿人手的弹拨。

根据图 3，假设弦的长度为 $2a$ 。截面积为 A 。弹性模量为 E ，触击点恰好位于琴弦的中间。弦张力为 T ，为横向位移的函数。由于弦相对质量较小，我们忽略了弦的质量。

由胡克定律，当横向位移为 h 时，张力 T 符合：

$$T = \frac{EA(b-a)}{a}$$

其中 $b^2 = a^2 + h^2$ (3), $\sin \alpha = \frac{h}{b}$ (4);

当初始力为 F 时，根据平衡方程可得

$$F = 2T \sin \alpha \quad (5)$$

化简可得

$$F = 2EA \frac{\sqrt{a^2+h^2}-a}{a} \frac{h}{\sqrt{a^2+h^2}} \quad (6)$$

我们假设动能为 W ，由定义： $\int_0^H F dh = W$ (7). 这样我们可以得到张力与横向位移 h 关系：

$$T = \frac{EA(\sqrt{a^2+h^2}-a)}{a} \quad (8)$$

如图所示，我们可以看到弦张力图是对称的。此外，随着张力的增加，张力的导数也在增加。并且当张力减小时它下降。这种现象表明张力对应于其增长率。

由图二，不难观察到在初始刺激后频率呈指数下降。随后，弦线具有跟随的后几阶模态振动。最终，振动由于能量消耗而结束。

因此，在仔细研究了图 3 之后，我们需要解释为什么在第一个振动之后会出现这些跟随振动。在弦的振动中，横向振动是起到主导作用的。考虑到纵向振动的幅度较小，我在建立机械模型时只关注横向振动。初始刺激后，琴弦具有许多模态。我们可以通过分析振动过程来得出该过程的控制方程：

为了分析弦的自由振动，因此引入一维情况下的运动方程：

$$x(t) = C_1 \cos(\omega_0 t) + C_2 \sin(\omega_0 t)$$

在初始状态，存在初边值条件：

$$x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0$$

因此，可以推的振动方程：

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \\ &= A \sin(\omega_0 t + \varphi) \end{aligned}$$

其中 $A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_0}\right)^2}$, $\varphi = \tan^{-1} \frac{\dot{x}_0 \omega_0}{x_0}$; φ 是振动模态；前四阶模态振动形式如下图所示。

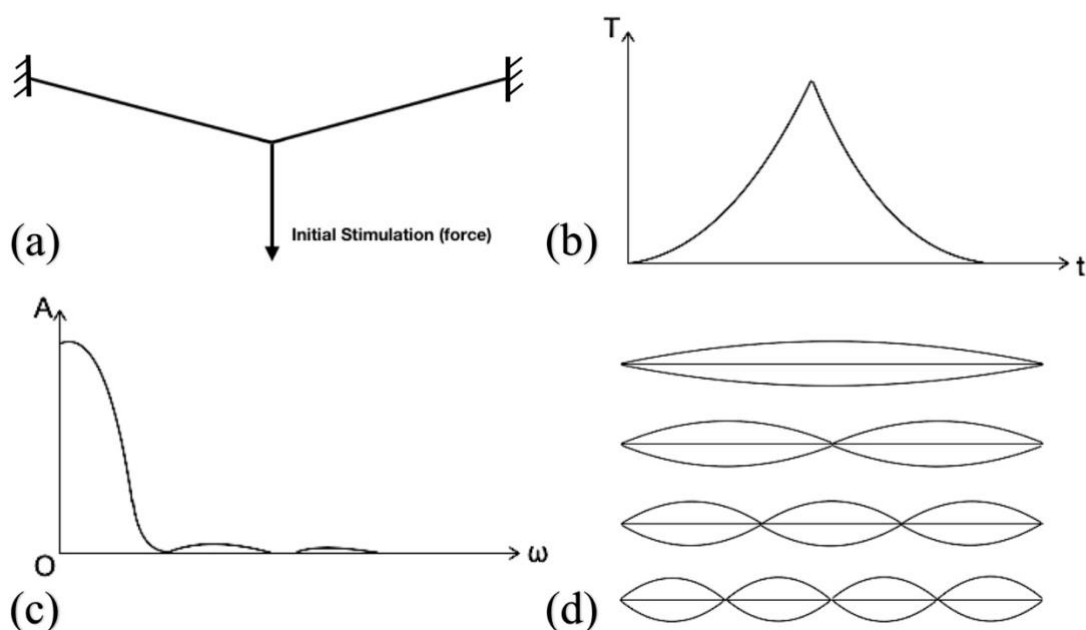


图 4 吉他弦数学模型. (a) 吉他弦在初始激励后收到拉伸示意图. (b) 吉他弦中张力随时间变化曲线图. (c) 吉他弦张力脉冲的频谱分布. (d) 吉他的前四阶振动模式.

Fig. 4 Mathematical model of guitar strings. (a) Schematic diagram of the guitar string after stimulated by initial excitation. (b) The curve of string tension variation with time in initial stimulation. (c) Spectrum distribution of the tension pulse of the guitar string. (d) The first four vibration modes of the guitar.

1.2.2 弦自由振动

首先讨论弦的振动问题。设理想柔软的细弦张紧于两个固定点之间，张力为 T ，跨长为 L ，弦单位长度的质量为 ρ ，两支点连线方向取为 x 轴，与 y 轴垂直的方向取为 y 轴，如图 4，设弦的振动发生在 xoy 平面内，弦的运动可表示为 $y = y(x, t)$ 。

并假设弦的振动幅度是微小的，即 y 与 $\frac{\partial y}{\partial x}$ 均为小量；在这些假设下，弦的张力 T 可近似地看作常量。再设重力与阻尼的影响均可略去不计。在自由振动中，弦的微元 dx 的受力如图 5(b)，列出这一微元的运动微分方程得：

$$\rho dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \sin\left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx\right) - T \sin\theta \quad (1)$$

考虑在微振动假设下，有

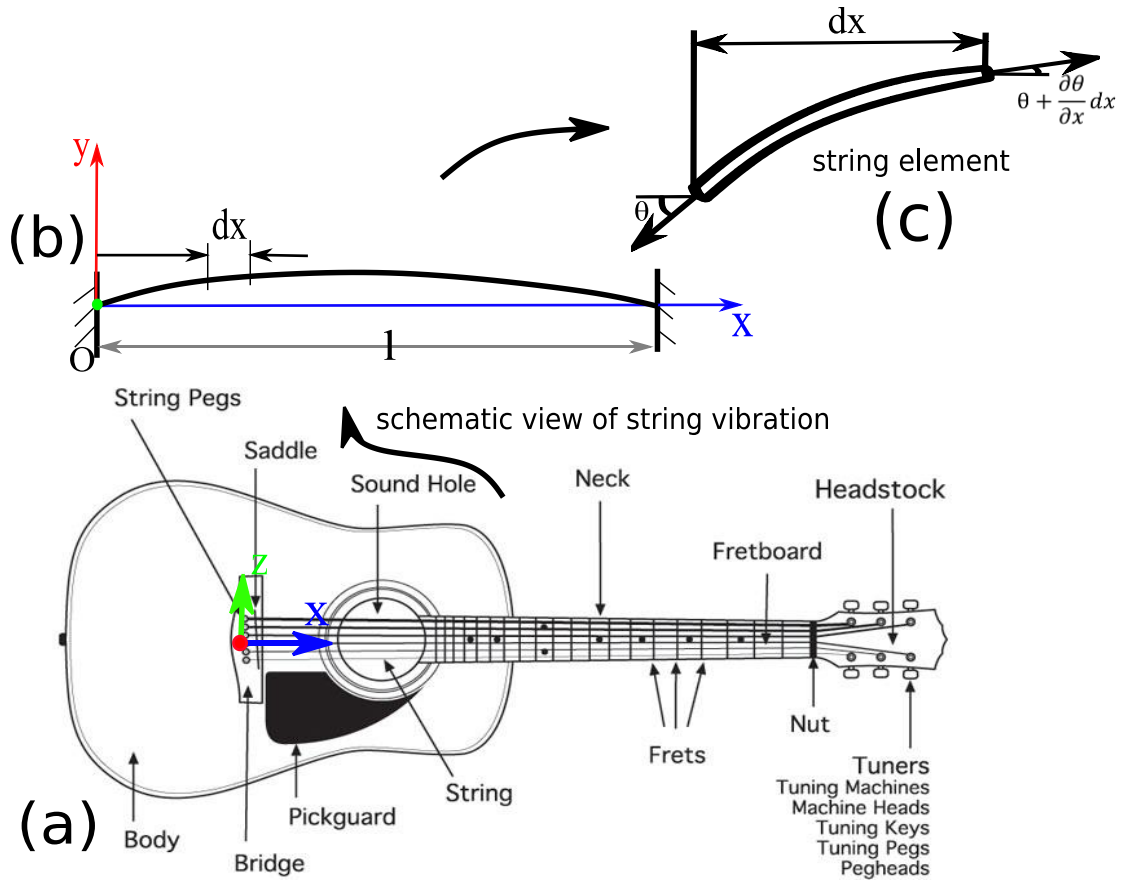


图 5 弦振动过程中取微元分析的简化示意图 ($\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta = \frac{\partial y}{\partial x}$)

Fig. 5 Simplified schematic diagram of micro-element analysis during string vibration. ($\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta = \frac{\partial y}{\partial x}$)

故有:

$$\rho dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) - T \theta = T \frac{\partial \theta}{\partial x} dx = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad (2)$$

整理得:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中 $c = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$

弦的运动还必须满足边界条件:

$$y(0, t) = y(1, t) = 0$$

描述弦振动的函数 $y(x, t)$ 可以分解为空间函数与时间函数的乘积，即

$$y(x, t) = X(x)Y(t) \quad (4)$$

其中 $X(t)$ 是振型函数，它表示整个弦的振动形态，而 $X(t)$ 表征点的振动规律。

将 (4) 代入 (3) 式，可得

$$c^2 \frac{1}{x} \frac{d^2 x}{dx^2} = \frac{1}{y} \frac{d^2 Y}{dt^2} \quad (5)$$

上式左端只与 x 有关，式子的右端与 t 有关，所以要是对于任意 x 和 t 都能够上式成立的话，不许满足两端都等于同一个常数，我们假设这个常数是 a ，可以的到下面两个常微分方程：

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} - aY = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} - \frac{a}{c^2} X = 0 \quad (7)$$

由于 $\frac{d^2 Y}{dt^2}$ 是大于零的，所以只有当 a 为负数时，才可以从上述式子中来确定一个振动运动，我们假设 $a = -\omega^2$ ，上述第一式可改成：

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + \omega^2 Y = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d^2 x}{dx^2} + \beta^2 X = 0, \quad \beta = \frac{\omega}{c} \quad (9)$$

出方程 (8)，可解得：

$$Y(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (10)$$

其中 A 、 B 均为积分常数。同时由方程 (9) 可解得：

$$X(x) = C \sin \beta x + D \cos \beta x \quad (11)$$

由 (11) 中的 C 、 D 也均为积分常数，另外，由边界条件 $y(0, t) = y(l, t) = 0$ 得：

$$X(0) = 0, X(l) = 0 \quad (12)$$

由 $X(0) = 0$ 可得到 $D=0$ ，由 $X(l) = 0$ 可得到 $\sin \beta l = 0$ ，这就是弦的振动特征方程，出此可确定一系列特征值 β_i ：

$$\beta_i l = i\pi, \quad i = 1, 2 \dots \dots$$

由此可确定一系列特征函数，也称之为振型函数：

$$X_i(x) = \sin \frac{i\pi x}{l}, \quad i = 1, 2, \dots$$

和各个特征值相对应，可确定系统的各阶固有频率：

$$\omega_i = c\beta_i = \frac{i\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad i = 1, 2, \dots$$

但是此处需要一阶的固有频率，在 $i = 1$ 的情况下，我们得到一阶固有频率为

$$\omega_1 = c\beta_1 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

而真实的振动频率 f 有

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

由此可以推得，弦上张力与频率之间的关系为：

$$F = (f \cdot 2L)^2 \cdot \rho$$

2 仿真模拟

2.1 结构建模

要对吉他的弦振动进行研究分析，我们首先对与吉他整体结构进行建模并进行仿真分析；我们首先选取古典吉他并根据其外形基于ANSYS workbench中的Geometry模块，通过建立整体结构框架再生成面的方式建立吉他结构如图 6 所示：其中，绿色部分为吉他共鸣箱，选用木材(Wood)；浅红色的手柄同样选用木质材料(Wood)；吉他弦，固定旋钮以及边缘的灰色手柄头端为金属材料，采用铝合金(Aluminum Alloy)。共鸣箱中为中空，与真实吉他相同。

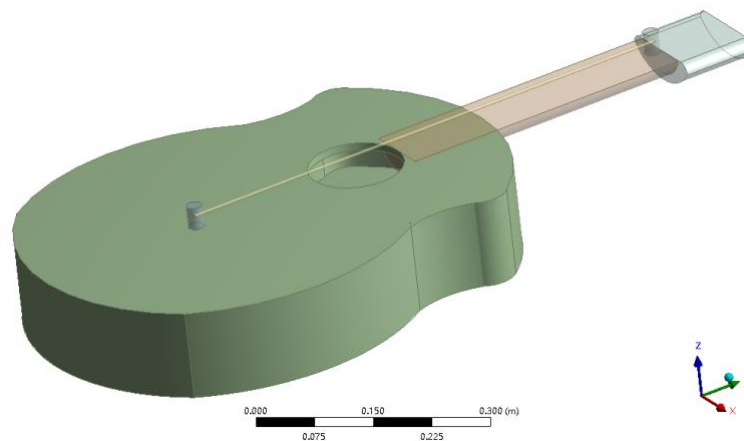


图 6 吉他建模

Fig. 6 Modeling of the guitar.

2.2 网格&载荷施加

完成对吉他整体进行建模后，我们需要生成网格以对吉他进行进一步分析讨论。我们使用Mesh模块中对结构的自动生成网格，如图 7所示。从图中可以看出，自动生成网格对于吉他共鸣箱的部分主要生成三角形网格，而对于相对较为规则的吉他手柄部分，则主要是四边形网格。

2.3 结果讨论

2.3.1 变形分析

获得网格结构后，我们首先对吉他结构进行静态分析。我们先对吉他弦时加一个横向载荷，然后观察在静态情况下的吉他整体变形情况。如图 8所示，

我们可以看到，在刚刚施加载荷的瞬间，旋钮两点附近的吉他结构产生了很大的变形。同时，根据图 8(a) 中可以看出，吉他共鸣箱在旋钮的两侧产生两个区域，体现了相对较大的变形。从图 8(b) 中可以看出，在载荷施加初始阶段，吉他共鸣箱背部也产生了两个区域出现较大变形。这两个较大变形区可能导致了吉他独特的音质和音色。

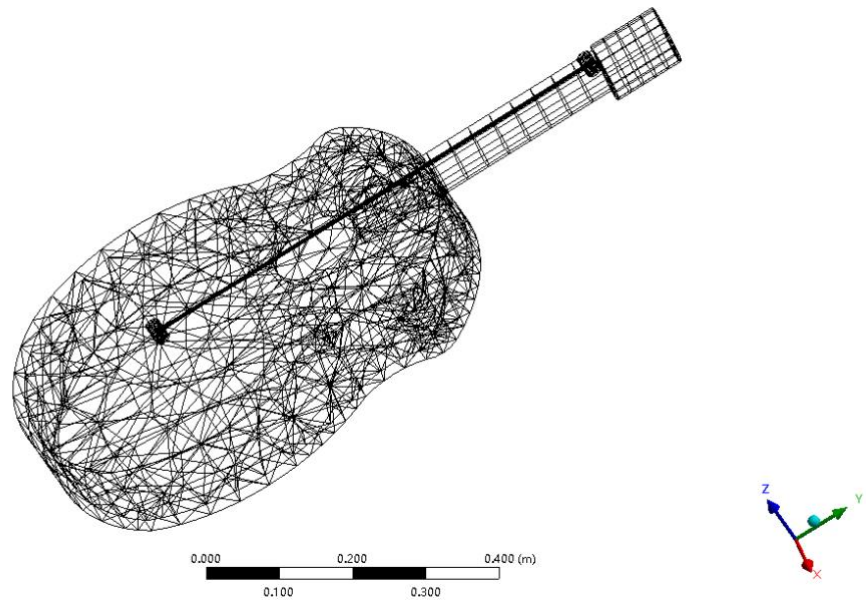


图 7 吉他网格生成

Fig. 7 The meshing of the guitar

2.3.2 模态分析

完成静态分析，我们主要讨论吉他弦振动对于整体结构振动模态的影响。设置同样的边界条件，我们可以得到吉他的振动模态分布，如图 9所示。其中，我们可以观察得共鸣箱中心部分产生较大振动。该现象阐述了吉他共鸣箱的作用机制：即是吉他共鸣箱中心部分对弦振动产生放大效应。而吉他共鸣的模态及频率如**Error! Reference source not found.**和图 10所示。根据吉他共鸣箱的模态我们可以看出共鸣箱整体的振动频率小于1，其较小的数值体现出共鸣箱对于吉他弦振动的音高（频率）影响不大。

2.4 讨论

有限元分析是当下计算固体力学中最常用的方法，其对于静态问题分析较为准确且易于收敛。对于动力学问题也具有不错的准确度。在对于吉他振动问

题的分析中，对于整体建模的考虑是主要因素之一；同时，金属和木材的接触部分也是影响振动主要性质的因素。根据图 11所示吉他应变能的分布我们可以看出吉他金属旋钮和木材接触处出现了应变能集中，这也和我们开始的静态变形分析相同。最终，我们可以得出，吉他的共鸣箱对与整体吉他弦振动频率改变不大，并且在金属和木材接触处出现变形和能量集中。

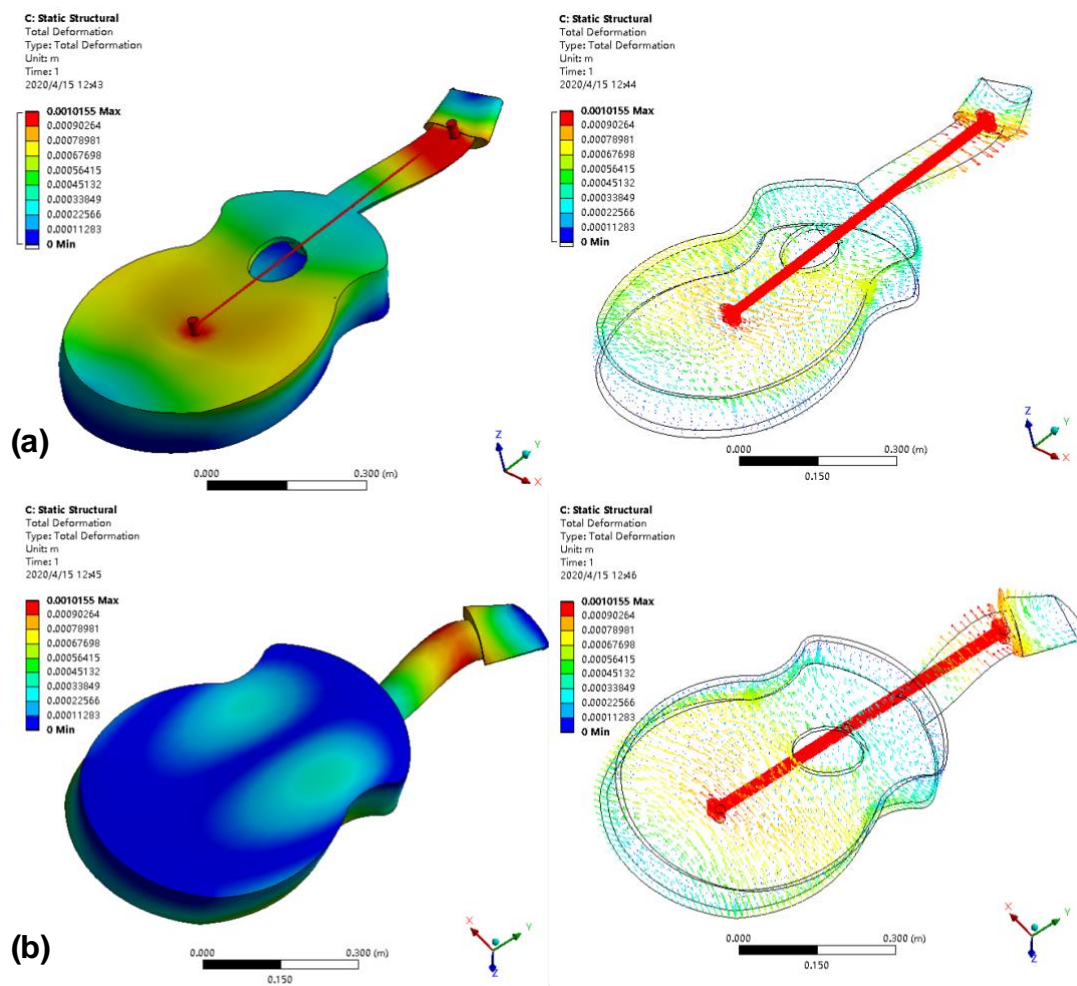


图 8 吉他静态变形分析

Fig. 8 FEM analysis of guitar's static deformation

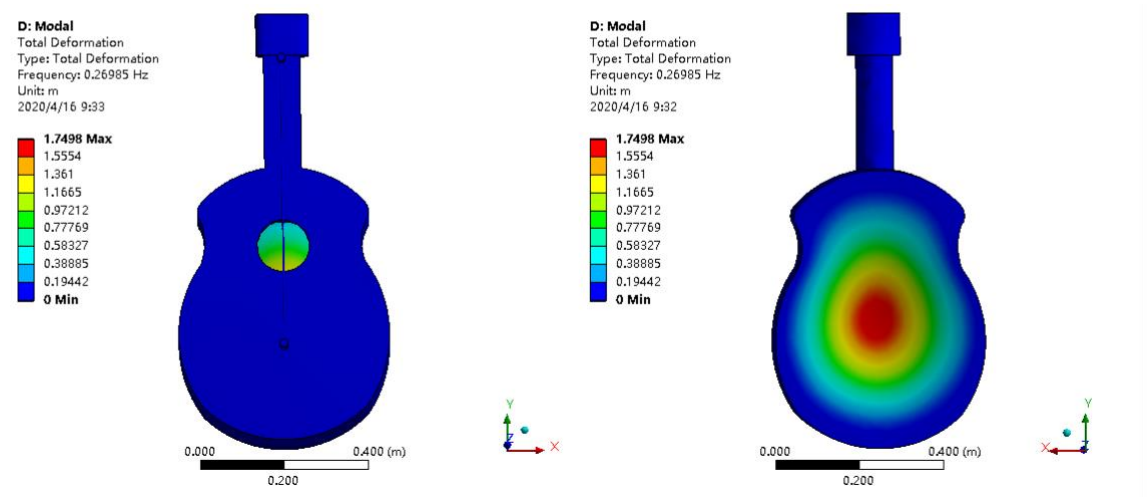


图 9 吉他模态分析

Fig. 9 Analysis of guitar's modal

吉他共振箱振动模态频率

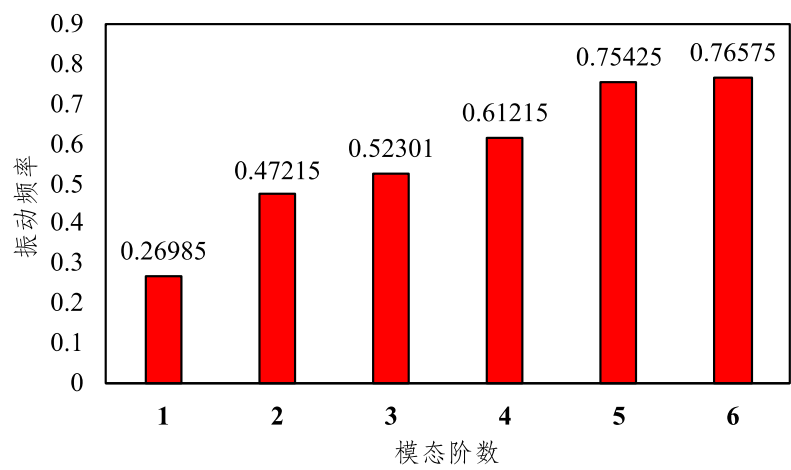


图 10 吉他模态阶数与对应的固有频率直方图

Fig. 10 Histogram of the numbers of guitar's modal and their corresponding natural frequency

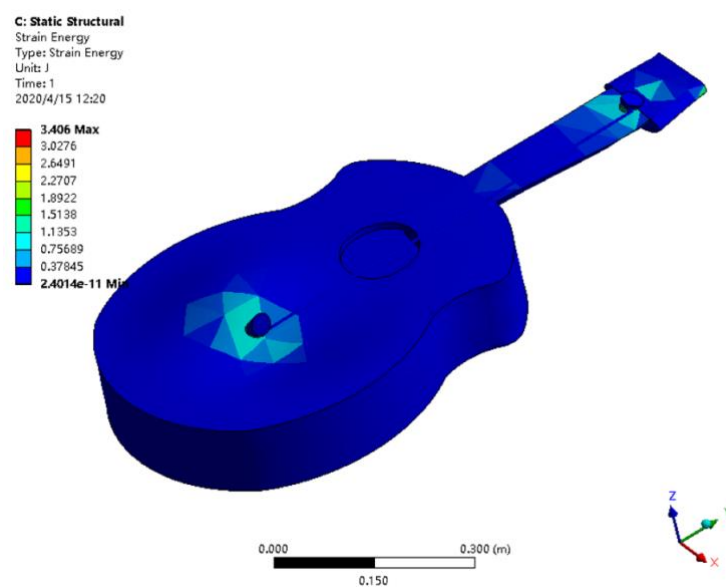


图 11 吉他应变能分布

Fig. 11 The strain energy distribution of guitar

3 弦振动试验

3.1 实验设计

3.1.1 实验目的及设备

本实验的目的是要通过实验测量数据拟合出吉他的张力与频率关系曲线；同时，在此基础上，可以将试验拟合曲线与理论值曲线进行比对和分析。同时，将曲线比对后，还可以分析出拟合精度；对于实验过程进行仔细分析和理解，还同时能够找出误差的主要来源，以及数学模型中公式设置的不合理之处。

在本实验中，为了拟合出频率和张力的曲线，我们需要确定频率和张力的数值。因此，我们需要测量频率和张力。改变张力需要使用拉伸机拉伸琴弦，张力可以由拉伸机的显示器上读得。而弦的频率需要通过拨弦获得。为了测量弦频率，需要使用夹具固定琴弦。

3.1.2 实验方法

由前文中所分析我们可知本次试验需将琴弦固定在夹具上后放到拉伸机上定量等距加载后进行拨弦测量频率。在该过程，为定量分析减少误差，同时为方便之后曲线拟合输入参数，我们固定弦的长度为 30cm；同时确定拨弦点为弦中点，并在弦中点处用马克笔进行标记。弦拉伸过程下图 12 所示。

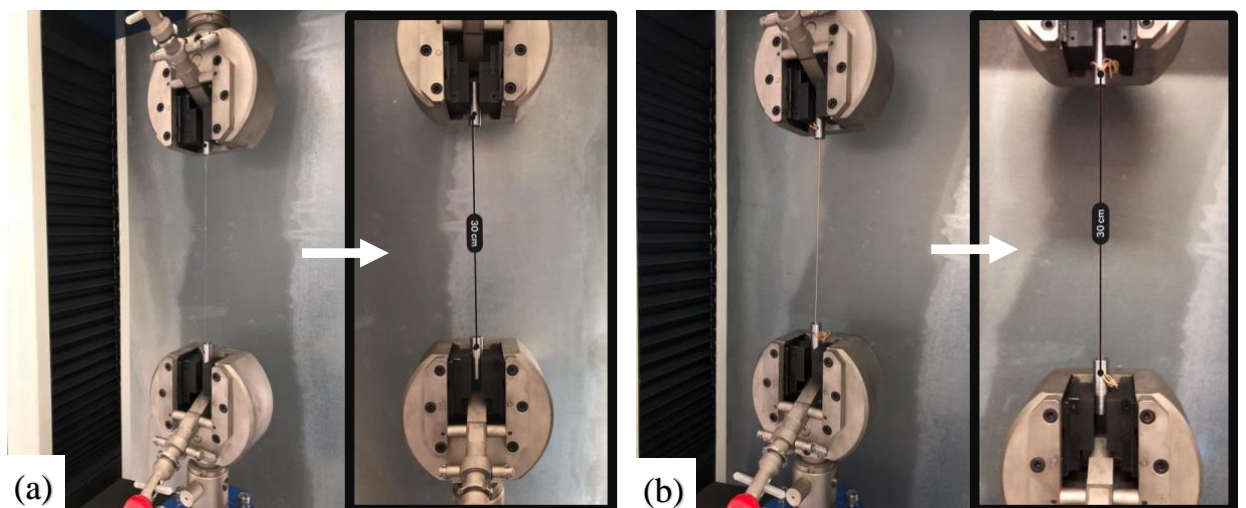


图 12 弦的轴向拉伸实验

Fig. 12 The axial tensile test of strings

3.1.3 琴弦参数

同时，本实验的目的是通过实验数据拟合曲线后并和理论曲线进行比对；为了绘制理论曲线，由弦振动公式 $F = (f \cdot 2L)^2 \cdot \rho$ 可知，我们需要的物理参数是弦长度 L 和线密度 ρ 。由上文简述可知，弦长度 L 为已知 (0.3m)，弦的线密度需要通过 $\rho = \frac{\Delta m}{L}$ 测得，测量计算过程如下图 13 所示。

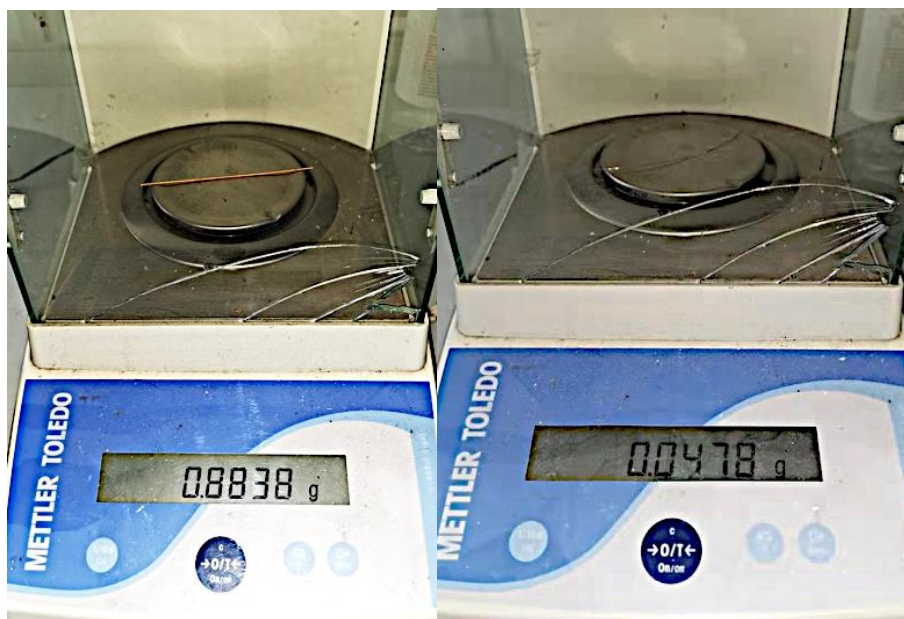


图 13 测量F弦和A弦的质量

Fig. 13 Measurement of the weights of string A and string F

如图 14，对长为 10cm 的弦段进行质量测量，为减小误差，测量六次弦的质量并将相关数据记录，对六次测量结果求平均值，再用质量平均值除以弦的长度即可得两种弦的线密度。

F 弦	0.8899	0.8775	0.8689	0.8916	0.8841	0.8838	0.88263
A 弦	0.0477	0.0482	0.0478	0.048	0.0484	0.0486	0.04812

表 1 F弦和A弦的质量

Tab. 1 The weights of string A and string F

由以上数据，可以求得 A 弦的线密度：

$$\rho_A = \frac{\Delta m}{L} = \frac{0.04812 \times 10^{(-3)}}{0.1} = 4.812 \times 10^{-4} (kg/m)$$

由以上数据，可以求得 F 弦的线密度：

$$\rho_F = \frac{\Delta m}{L} = \frac{0.88263 \times 10^{(-3)}}{0.1} = 8.826 \times 10^{-3} (kg/m)$$

由此，即获得了弦长度 L 和线密度 ρ 两项参数，理论曲线可以完成绘制。

3.2 实验装置设计

由本次实验所用拉伸试验机的夹具特点，夹具设计上在夹头处采用和普通低碳钢/铸铁相同的设计，如图 5 (a)，试样夹头处直径 15mm，所以同样的设计下采用 15mm 的夹头。然后仿照实际吉他的弦与上调弦处的连接设计，采用长圆柱中间打入小孔的设计，将弦从中间孔中穿过来固定琴弦。初步设计如图 15 (b)，具体数据在图 15 (c) 中已经标出。

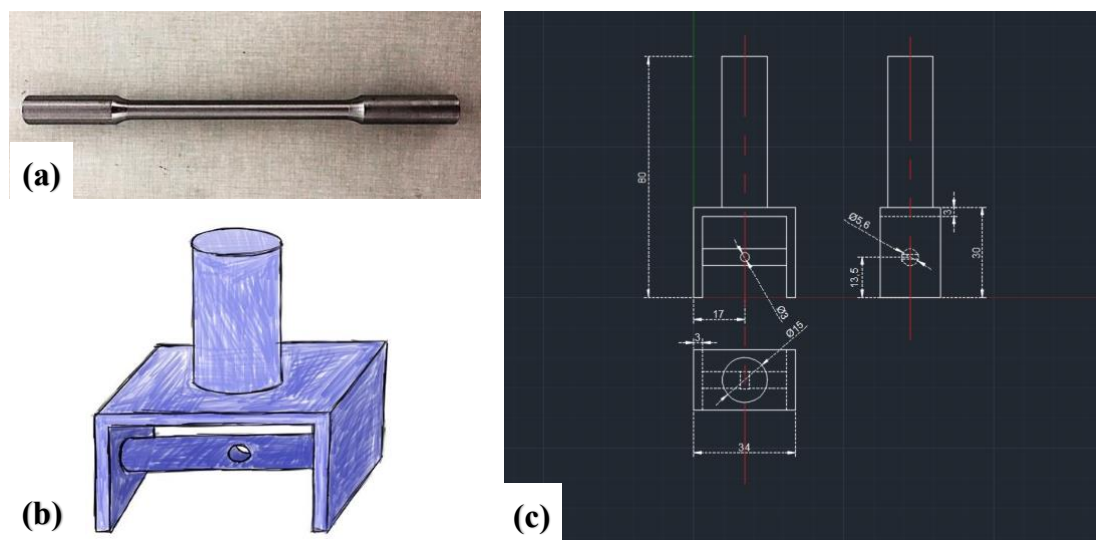


图 14 轴向拉伸实验的夹具设计

Fig. 14 The fixture's design of the axial tensile test

当我们拿到工程中心加工的时候，第一个最大的问题是夹具实际尺寸比初步设想的要大的多，这使得本身间距较短的拉伸机上下距离更加短了，同时还有一个很大的问题就是几何设计对于实际加工流程过于复杂，如果直接加工会花费很多实验经费，不利于本次实验的经济性。所以最后考虑问题上要重新考虑在尺寸和几何上更简单的模型。

因为初步设计夹具没有经验，本着简单性和经济性的原则对夹具有以下很多多次的简化设计。

首先因为加工上的困难，原先设计中间的杆状结构加工复杂，然后将重新设计时将杆提出，单独作为一个样件来加工，这样一来，加工难度一下子就降

低了，单独的杆件与主结构用螺丝钉连接，如图 14，具体数据在图中已经标出。

然后再考虑到几何的简单性原则上，将整个夹头尺寸一体化，整个夹头成为一整根圆柱，以此再次简化加工工序。同时减少了夹头长度，可以上更长的弦，如图 15，具体数据在图中已经标出。

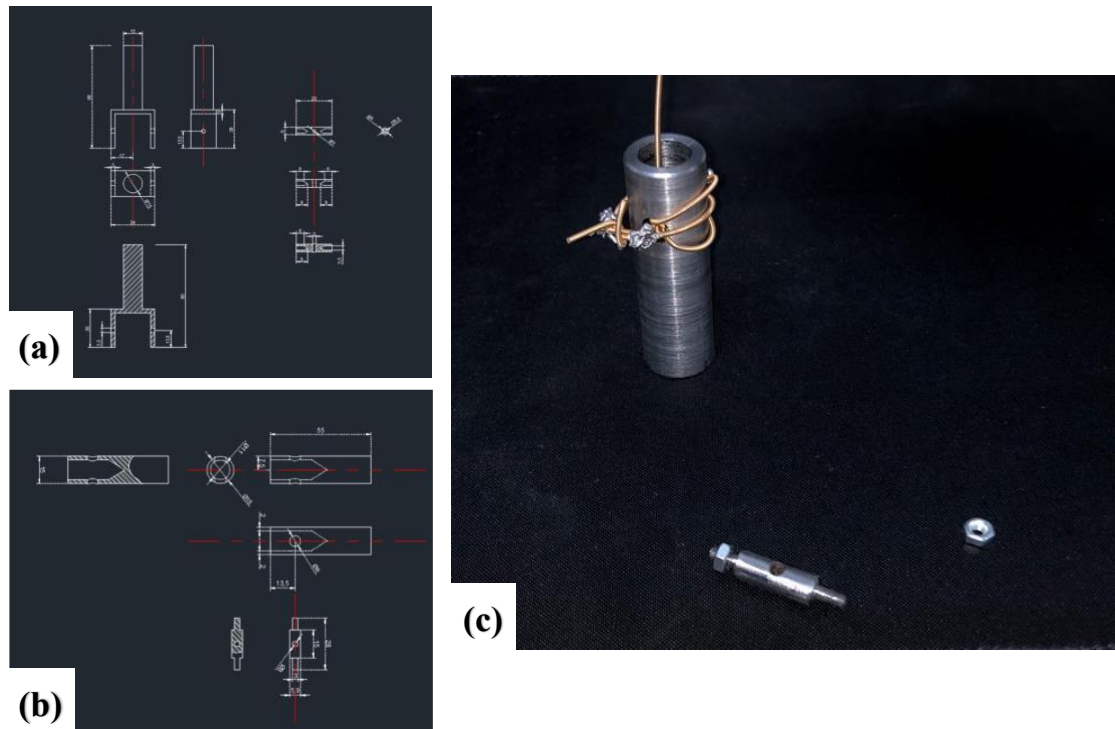


图 15 夹头的简化版设计

Fig. 15 The simplified design of the fixture

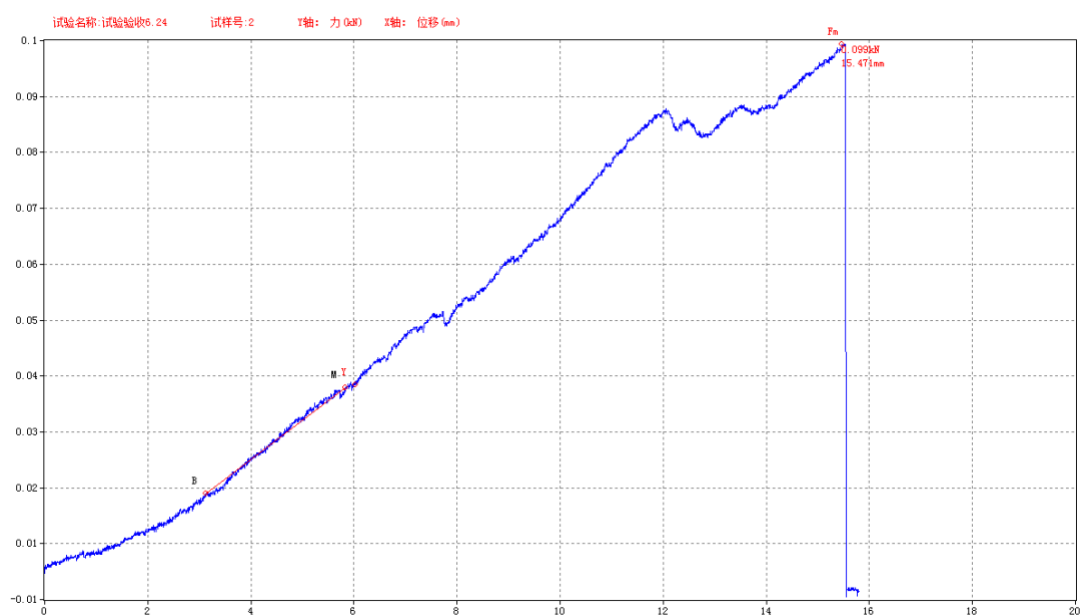
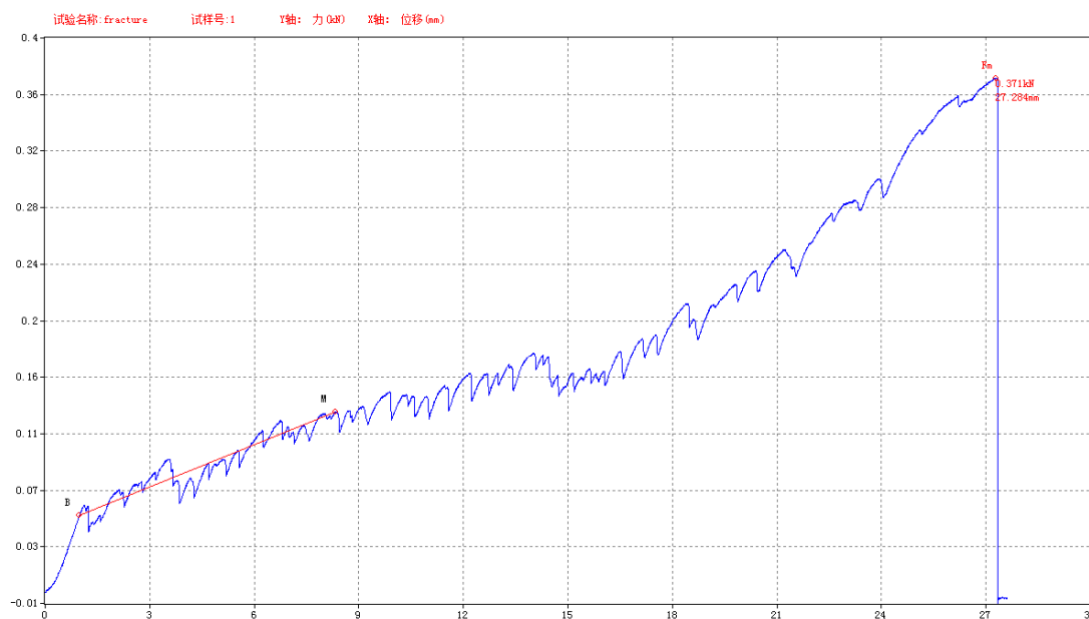


图 16 A弦的F-D曲线**Fig. 16** The force-displacement curve of string A

3.3 拉伸试验

在进行频率测量之前，为了了解测量对象 A 弦和 E 弦两种弦的力学性能以及更好地展开实验，我们分别取两根弦并对其进行拉伸试验，了解这两种弦再多拉拉里的情况下发生断裂；同时也可以判断这两种弦在哪部分拉力区间内测量数据拟合效果较好、误差较小。两根弦的拉伸断裂曲线如图 16 所示。

如图 16 所示，对于 A 弦的拉伸断裂曲线进行分析，我们可以看出，当力的区间处在 20N 到 60N 时，此时拉伸曲线的线形趋势较为明显，故在该区间内的拉力拉伸后的弦振动频率测量结果相对较为准确。

**图 17** E弦的F-D曲线**Fig. 17** The force-displacement curve of string E

同理，对 E 弦进行相同的分析，也可以分析出当拉力处在 70N 到 260N 时拉力曲线的线形拟合较好，故该区间的频率测量效果较好。

完成弦拉伸断裂测量后，对琴弦进行控制位移法进行加载，对应不同的位移记录下拉伸机先后的拉力数值并使用录音设备对于声音进行记录。后将声音

文件导入电脑利用分析软件 (Origin) 得到不同的频率, 在波形图找出主频率;
其中, A 弦的 7 组数据和 E 弦对应的 8 组数据的频率如下表 2 至表 5 所示。

1

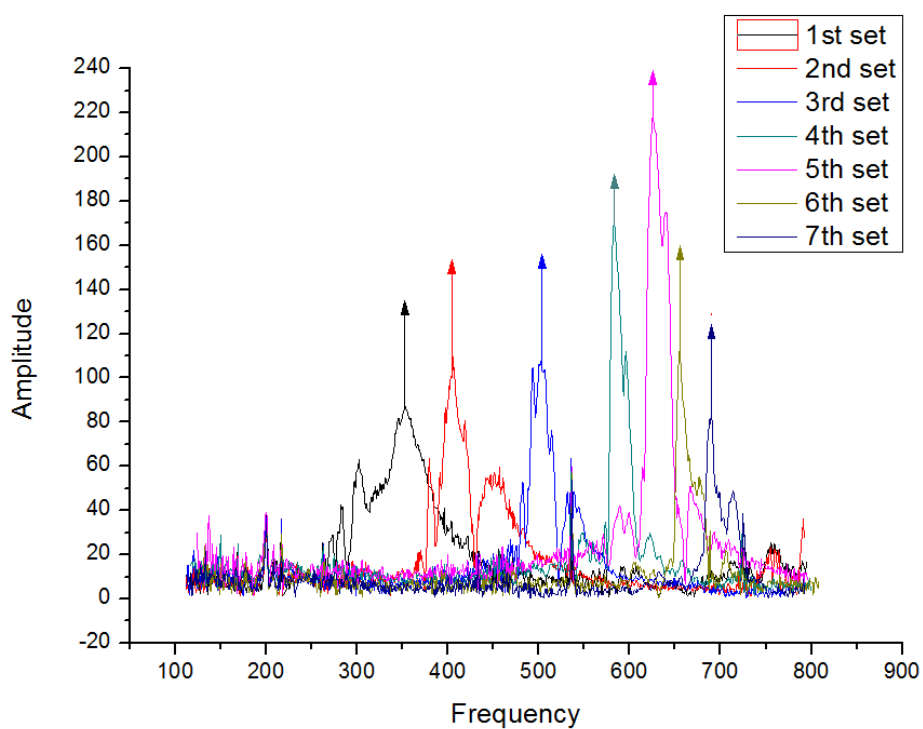


图 18 不同拉力下A弦的A-F曲线

Fig. 18 The amplitude-frequency curve of string A with different tension

1

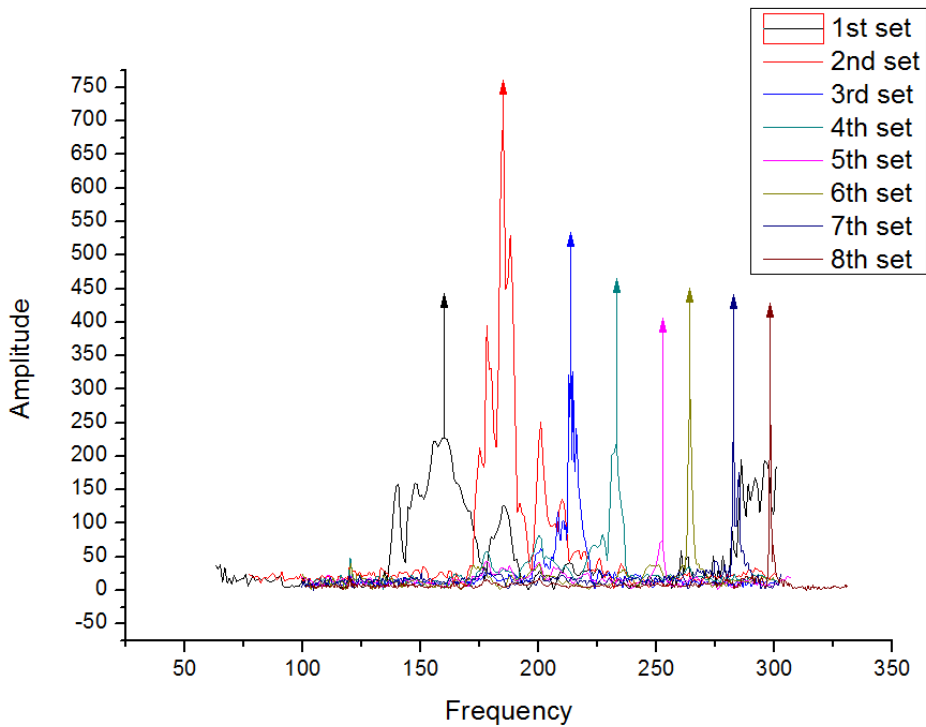


图 19 不同拉力下E弦的A-F曲线

Fig. 19 The amplitude-frequency curve of string E with different tension

如表 2 示，我们可以看到随着逐级加载，频率逐渐增大的趋势；同时，A 弦的一阶振型的频率处在 350Hz 到 800Hz 的范围区间内。

同理，观察表 3，相同趋势同样吻合；同时，E 弦的一阶振型的频率处在 100Hz 到 350Hz 的范围区间内。

Frequency(y) - Hz	delta-freq	Force(x) - N	delta-force	displacement
350.91	-53.67	52.133	34.123	5
404.58	-99.06	86.256	33.886	7
503.64	-78.99	120.142	28.673	9
582.63	-43.64	148.815	21.09	11
626.27	-28.34	169.905	18.958	13
654.61	-35.36	188.863	15.166	15
689.97		204.029		17

表 2 A弦的第一次拉伸实验参数表

Tab. 2 String A’s parameter table of the first tensile test

Frequency(y) - Hz	delta-freq	Force(x) - kN	delta-force	displacement
159.56	-25.08	0.081	0.065	3
184.64	-28.59	0.146	0.038	4

213.23	-20.06	0.184	0.018	5
233.29	-18.56	0.202	0.038	6
251.85	-11.79	0.24	0.031	7
263.64	-18.3	0.271	0.04	8
281.94	-15.3	0.311	0.038	9
297.24		0.349		10

表 3 E弦的第一次拉伸实验参数表**Tab. 3** String F's parameter table of the first tensile test

位移-mm	5	7	9	11	13	14	15
起始力-N	28.673	36.967	50.474	65.640	80.806	88.389	93.839
终止力-N	2.844	16.588	36.967	59.716	69.431	78.673	89.100
频率-Hz	350.91	404.58	503.64	582.63	626.27	654.61	689.97

表 4 A弦的第二次拉伸实验参数表**Tab. 4** String A's parameter table of the second tensile test

上文中所述 A 弦拉伸实验中 7 组数据不同的位移、张力和频率数据记录在表 5 中。

位移-mm	3	4	5	6	7	8	9	10
起始力-kN	0.081	0.108	0.137	0.155	0.177	0.197	0.223	0.252
终止力-kN	0.043	0.080	0.118	0.139	0.166	0.183	0.214	0.241
频率-Hz	159.56	184.64	213.23	233.29	251.85	263.64	281.94	297.24

表 5 E弦的第二次拉伸实验参数表**Tab. 5** String F's parameter table of the second tensile test

同样的，E 弦拉伸实验中 8 组数据不同的位移、张力和频率数据记录在表 6 中。

3.4 弦振动曲线拟合

3.4.1 A弦曲线拟合

我们已获得弦频率及张力数据，同时通过本文 1.2.2 中张力与频率之间的关系计算得到的相关参数，可以将理论曲线描绘出来；因此，通过数值计算软件 (Matlab)，将理论曲线和数据点连成直线绘制在坐标轴上，观察实验与理论曲线的吻合程度，结果如图 20 所示。

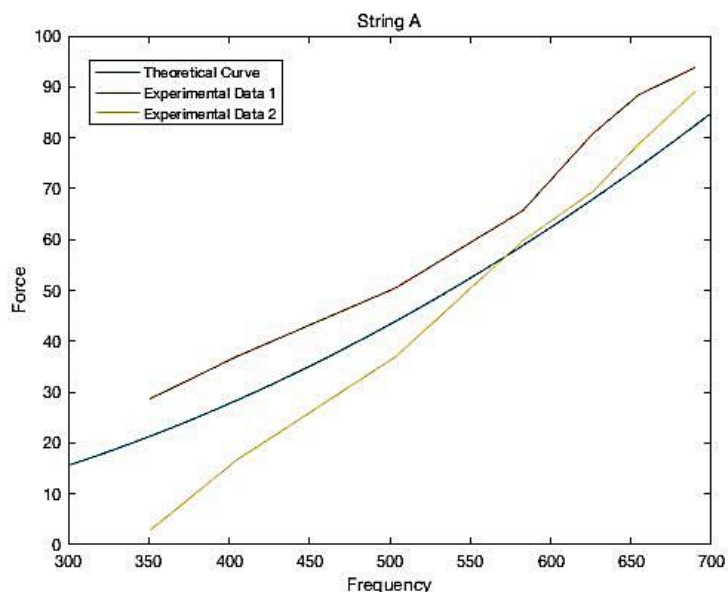
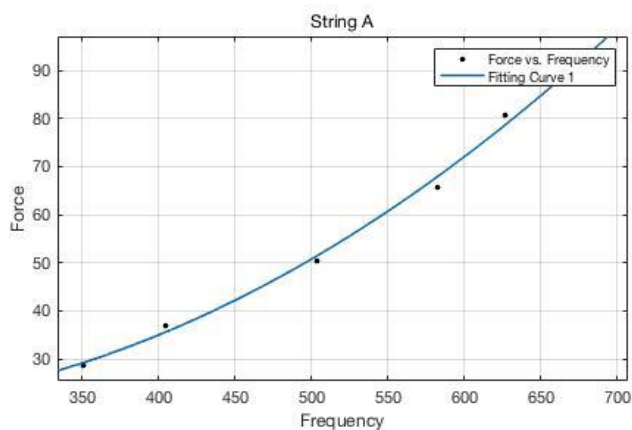


图 20 A 弦实验曲线与理论曲线对照

Fig. 20 Comparison of the experimental curve and the theoretical curve on string A

通过观察该曲线，我们可以看出实验获得数据基本吻合理论曲线，在其上下波动；这也证实了实验数据是基本可靠的。因此，我们也分别对两次实验数据进行曲线拟合；拟合步骤如下图 21 所示。



Linear model Poly2:

$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0002755 \quad (2.819e-05, 0.0005229)$$

$$p2 = -0.09005 \quad (-0.3478, 0.1677)$$

$$p3 = 26.91 \quad (-37.19, 91)$$

图 21 A 弦第一组实验数据拟合曲线

Fig. 21 The fitting curve of string A's first experimental data

$$Force = 0.0002755 \cdot Frequency^2 - 0.09005 \cdot Frequency + 26.91$$

通过将数据输入系统，再利用软件自带的拟合软件系统；由前文中推导可知，张力与频率的关系为 $F = (f \cdot 2L)^2 \cdot \rho$ ，二者为 2 次函数关系，因此我们选择拟合次数为 2，即可得到如图 22 所示的拟合曲线和函数表达式。

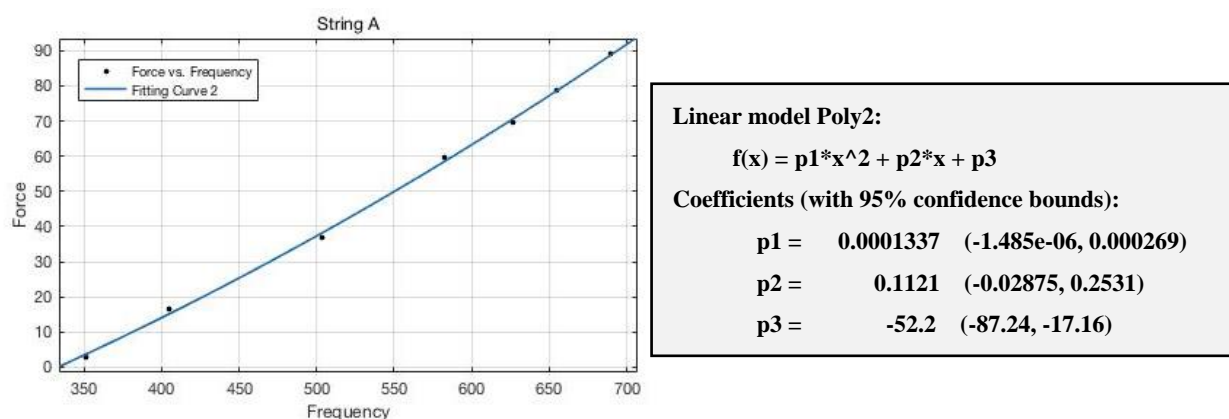


图 22 A 弦第二组实验数据拟合曲线

Fig. 22 The fitting curve of string A's second experimental data

$$Force = 0.0001337 \cdot Frequency^2 + 0.1121 \cdot Frequency - 52.2$$

同样的，对于第二组数据，采用相同的方法，也可以拟合得到相应曲线及函数表达式。

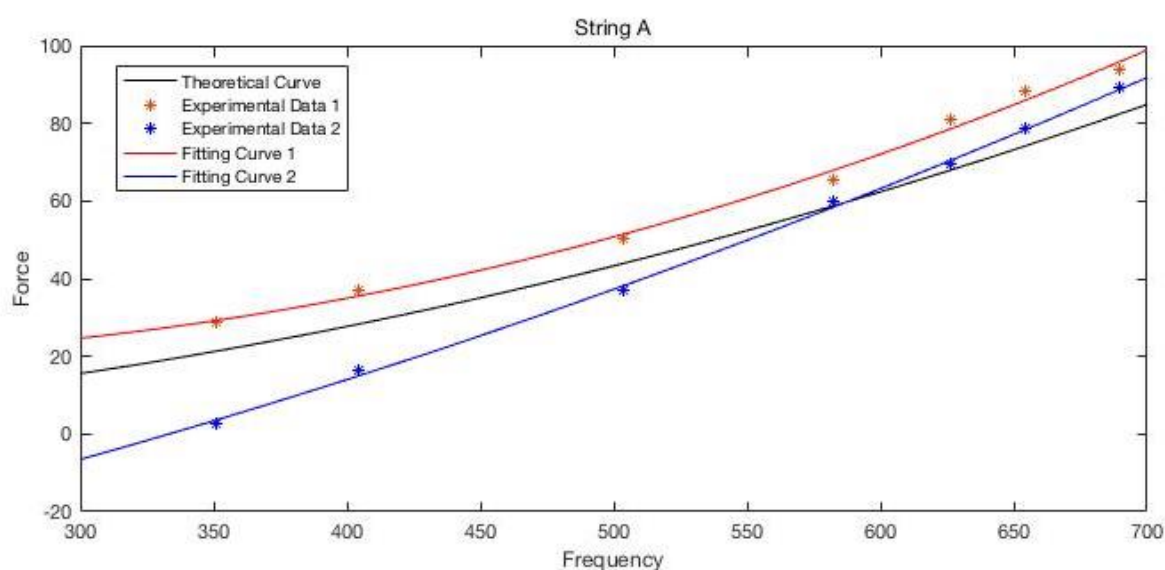


图 23 A 弦实验数据拟合曲线与理论曲线对照图

Fig. 23 Comparison of the fitting curve and the theoretical curve on string A's experimental data

最终，我们通过获得的两组拟合曲线函数可以画出比对图像；在坐标轴上分别绘制理论曲线、两组拟合曲线以及相关实验测量数据数据，这样可以很清晰的看出实验数据与理论数据的对比；最终得到结果如上图 23 所示。

3.4.2 E弦曲线拟合

对于 E 弦，我们采用相同的思路进行数据采集，曲线拟合及精度分析。先将我们采集到的频率及张力数据输入 Matlab 中，同时再将理论曲线输入，如图 24 所示。由观察可得试验取得数据基本符合理论曲线，在其上下波动。

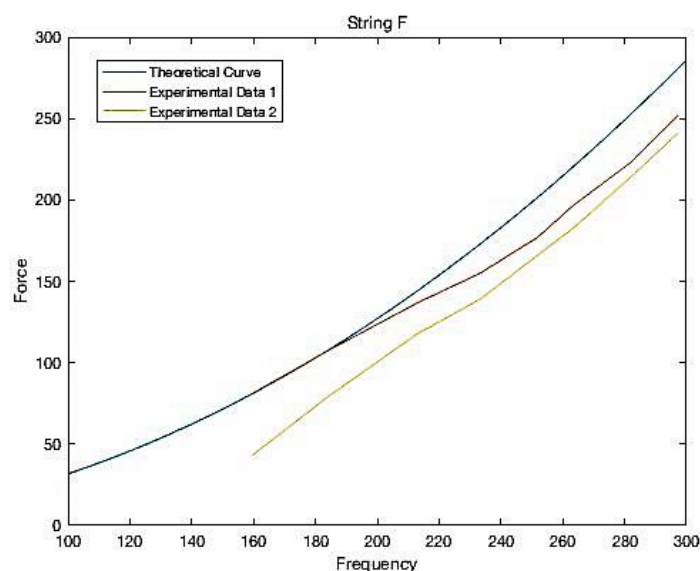
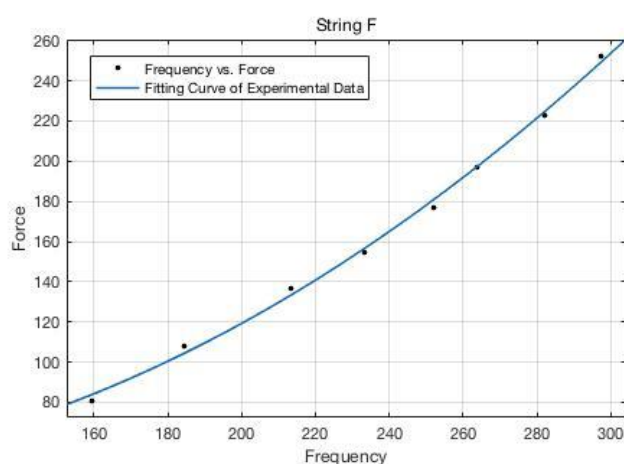


图 24 E 弦实验数据与理论曲线对照

Fig. 24 Comparison of the experimental curve and the theoretical curve on string E

在确认实验数据有效后，我们分别对两组频率张力数据进行曲线拟合，拟合结果如下。



Linear model Poly2:

$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.003352 \quad (0.001574, 0.00513)$$

$$p2 = -0.3306 \quad (-1.146, 0.4852)$$

$$p3 = 51.32 \quad (-39.54, 142.2)$$

图 25 E 弦第一组实验数据拟合曲线

Fig. 25 The fitting curve of string E's first experimental data

第一组数据的拟合结果如图 25 所示,并得到相应曲线的函数表达式。

$$Force = 0.003352 \cdot Frequency^2 - 0.3306 \cdot Frequency + 51.32$$

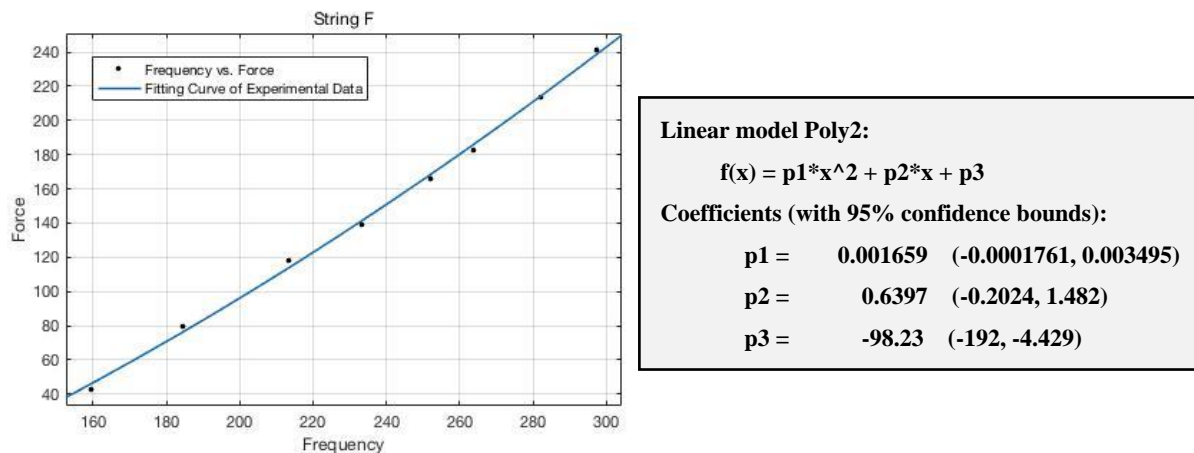


图 26 E 弦第二组实验数据拟合曲线

Fig. 26 The fitting curve of string E's second experimental data

第二组数据的拟合结果如图 26 所示,并得到相应曲线的函数表达式。

$$Force = 0.001659 \cdot Frequency^2 + 0.6397 \cdot Frequency - 98.23$$

最终,我们通过获得的两组拟合曲线函数可以画出比对图像;在坐标轴上分别绘制理论曲线、两组拟合曲线以及相关实验测量数据数据,这样可以很清晰的看出实验数据与理论数据的对比,最终结果如上图 27 所示。

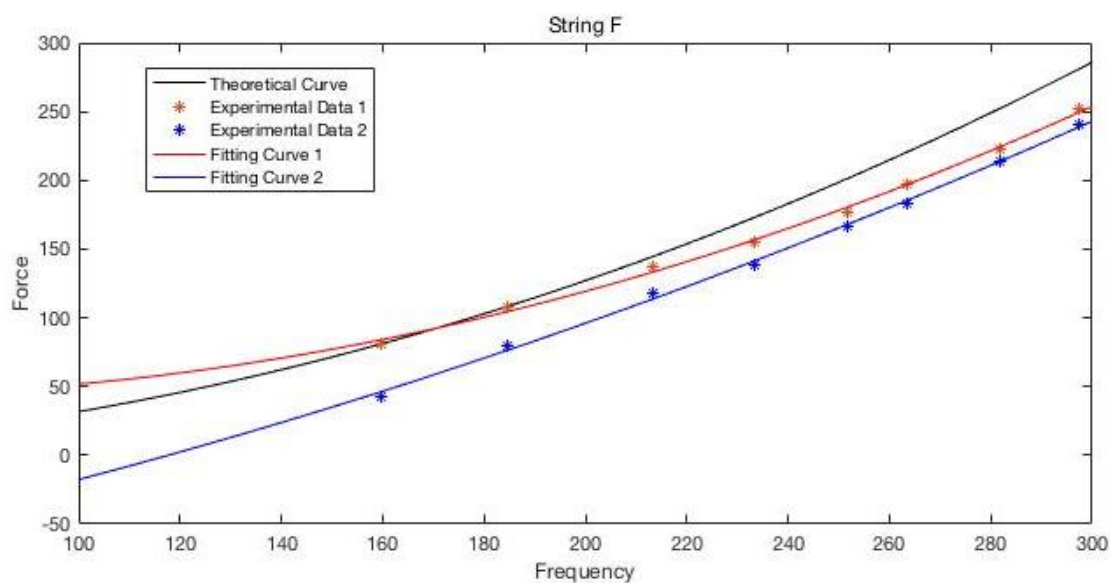


图 27 E弦实验数据拟合曲线与理论曲线对照图

Fig. 27 Comparison of the fitting curve and the theoretical curve on string E's experimental data

3.5 弦振动实验讨论

综上所述，我们即已获得了吉他弦振动的张力频率关系曲线及函数表达式。完成上述实验步骤后，我们对该实验有诸多反思：首先，我们对于夹具的设计有很多的不合理之处，导致了在缠弦拉伸时铜丝与夹具交接处的摩擦使得拉伸的张力测量不准；其次，在弹弦时拨弦的力道可能导致测量得到的音质有所差别，同时，拉伸机器的运转也会影响测量声音的结果；最后，琴弦的固定方法也并不是完全按照吉他的固定方法固定，可能导致拉伸过程中张力测量不准确。

同时，在完成实验设计的初始目标后，我们还可以进行进一步分析及对未来的展望：首先，对于理论曲线绘制中产生的误差，我们可以通过理论公式 $f = \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\rho}}$ 分析得，误差主要来源于：(1) 弦线密度测量不准确；(2) 弦长度数值测量不准确；而对于实验数据中产生的误差，主要来源于(1) 拉伸机拉力数值显示不准确；(3) 进行录音时环境杂音及录音设备导致音频率测量不准；(4) 实际实验时拉伸导致弦长度的改变。其次，通过设计该实验我们可以对未来展望，发现利用该琴弦实验我们可以拟合其他弦乐器振动曲线；同时还可以分析其高阶模态对于整个振动的影响；同时还可以继续就吉他展开，分析共鸣箱的作用以及其振动模态形式。

4 弦振动调节程序设计

• 导入音频，分析频率

这里我们做个一个设计，可以打开 windows 的文件夹管理系统，在里面我们可以选择我们系统中想要导入的音频文件（仅支持.wav 和.m4a 格式）。这里我使用了 matlab 的一个读取文件函数 `uigetfile()`保存。对于音频文件，调用 `audioread()`函数进行读取，利用 FFT(快速傅里叶变换)，将离散有限的时域信号转化成具有周期的频域信号，再将音频的波谱图画在 GUI 中。

• 计算 ΔF (变化的力)和 ΔL (位移量)

通过力学实验，我们获得了吉他弦的 ρ (线密度), L (弦长), f (弦的频率) 。查阅网上的资料，通过公式 $F=(f*2L)^2*\rho$ ，我们可以获得六根琴弦在标准频率下所需的标准力 F ，标准频率如下表 7 所示。结合音频分析得到琴弦的实际频率，并获得吉他弦的实际轴力 $outForce$ 。由于调音过程中琴弦拉伸量小，可以将琴弦横截面积 A 看作定值。根据公式 $\Delta F = F - outForce$ ， $\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{A} = E\Delta\varepsilon$ ， $A = \frac{\pi d^2}{4}$ ， $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta L_2}{L} - \frac{\Delta L_1}{L} = \frac{\Delta L}{L}$ ，计算出 ΔL 。通过测量，我们获得了吉他调音柱的直径 d 为 0.018m,通过这些数据我们可以计算出吉他调音旋转的方向和圈数。

琴弦编号	标准频率(Hz)
highE	329.6276
B	246.9417
G	195.9977
D	146.8324
A	110.0
lowE	82.4069

表 6 六根琴弦的编号与其对应的标准频率

Tab.7 Numbers of the six strings and their corresponding standard frequency

• 力的分析模块

这部分，主要是使用 matlab 的 plot()函数，将每个吉他琴弦的 f 与 F 的标准函数画在 GUI 中，同时将通过测量获得的 f 和 F 以散点的形势画在同一张图中，并用图像的形式直观地表现出两者的差值。

4.1 GUI 界面设计

GUI 界面设计由组内成员刁山洲完成。GUI 界面具有漂亮且统一的界面，适合于项目展示。本文的 GUI 界面拥有六个可操纵控件，功能分别为选择需要测量的琴弦种类，绘制所选吉他弦对应的 f - F (频率-拉力) 曲线，声音输入与频率识别，计算需要增减的力的大小，清除变量以及退出程序。

GUI 界面设计如下图 28 所示。

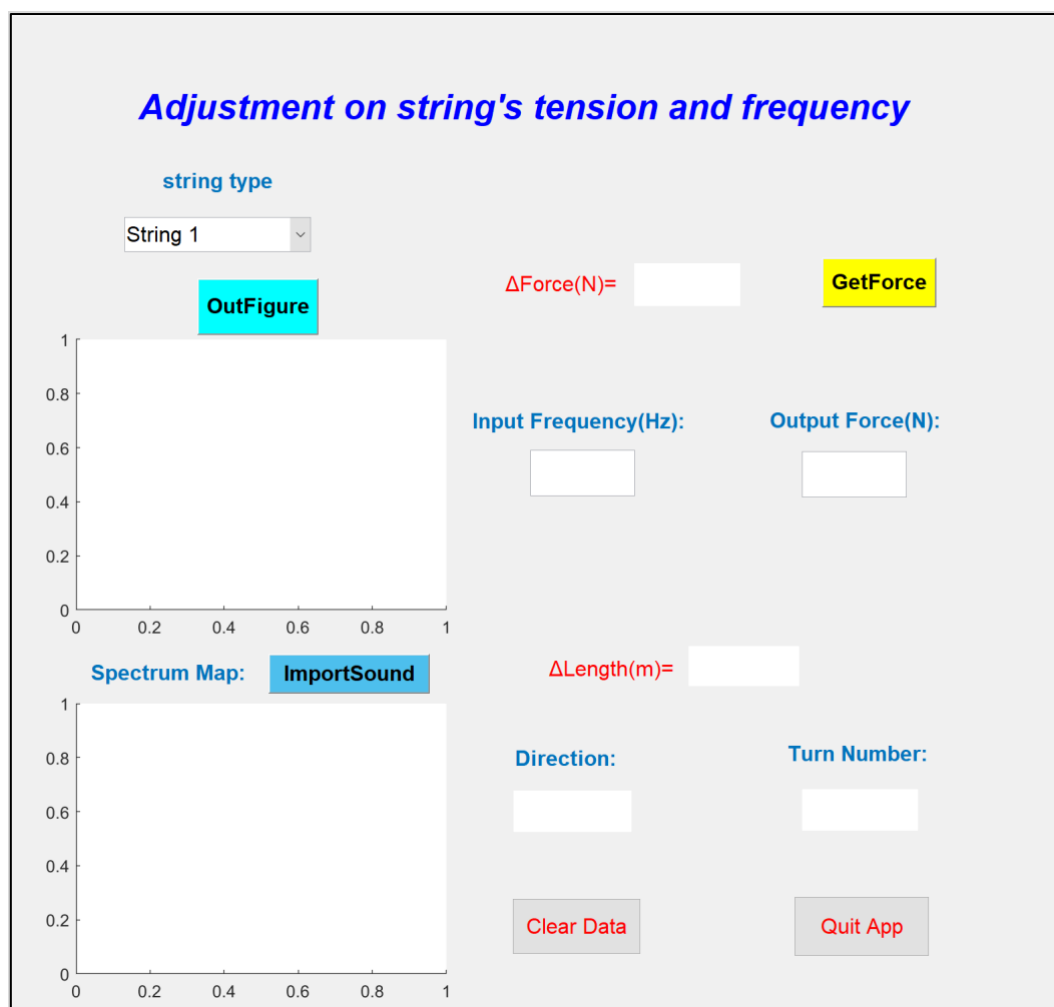


图 28 GUI 界面设计

Fig.28 Design for GUI interface

4.2 数据读取及曲线拟合

从列表控件选择任意一条弦，数字越大，标准频率越大，如下图 29 所示。

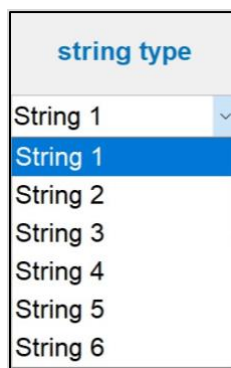


图 29 用于选择琴弦种类的列表控件

Fig.29 The list control for selecting string type

从曲线控件可以绘制拉升实验拟合出的曲线，如下图 30 所示。

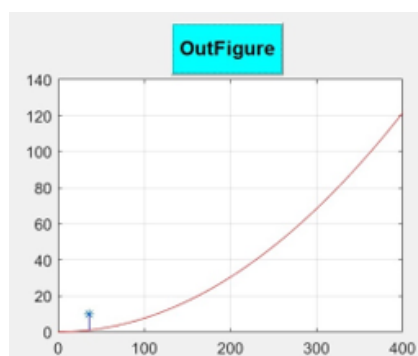


图 30 关于 f-F (频率-拉力) 的拟合曲线控件

Fig.30 The control for fitting frequency-tensile curve

声音文件通过程序调入，通过 matlab 内置函数进行快速傅里叶变换，将离散有限的时域信号转化成具有周期的频域信号，选取纵轴最高点对应的横坐标，即此段音频的主频进行下一步的计算。频谱分析如下图 31 所示。

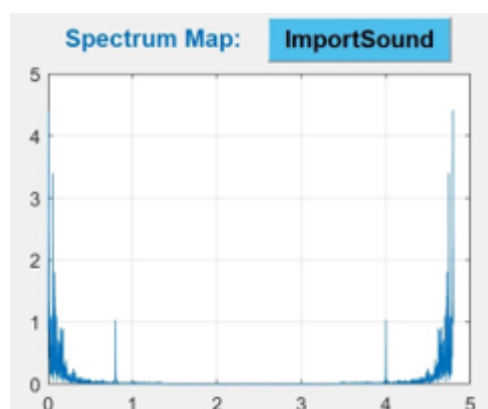


图 31 音频输入与频谱分析控件

Fig.31 The control for audio input and spectrum analysis

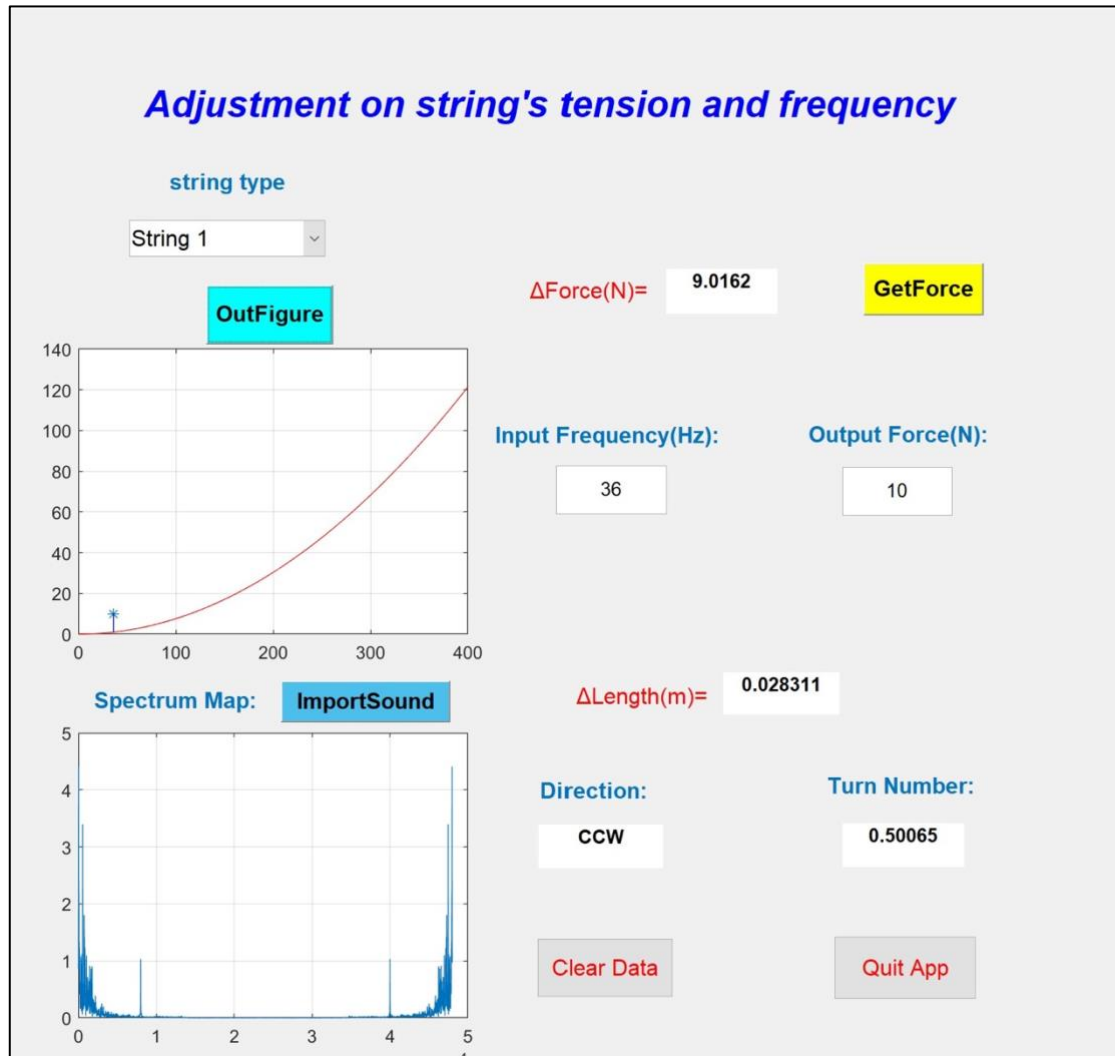
通过程序计算标准拉力与实际拉力，两者相减得到需要改变的琴弦拉力，不妨设其大于 0，则需要拉紧琴弦，即顺时针转动调音旋钮（本文默认顺时针转动为拉紧操作），如下图 32 所示。



图 32 需要改变的琴弦拉力

Fig.32 The string tension to be changed

以 E 弦为例，输入一段实际弹奏 E 弦的录音，输出结果为需要顺时针旋转半圈，如下图 33 所示。

**图 33** 测试结果**Fig.33** The testing result

4.3 GUI 运行代码

```
function varargout = ForceGUI(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @ForceGUI_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @ForceGUI_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
```

```

        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end


---


function ForceGUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);


---


function varargout = ForceGUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
global length %弦长
global density %线密度
global outForce
global dF
x=0:0.05:400; %刻度为 0.05 单位。显示区间为[0,400]。
axes(handles.axes1);
y1=(x^2*length).^2 * density;
plot(handles.axes1,x,y1,'r','LineWidth',0.5); %绿色的曲线。线宽 0.5。
hold on
h=str2double(get(handles.edit3,'String'));
F=str2double(get(handles.edit2,'String'));
scatter(handles.axes1,h,F,'*');
hold on
if dF>=0
    plot(handles.axes1,[h h],[outForce F],'b');
else
    plot(handles.axes1,[h h],[F outForce],'b');
end
grid on


---


function pushbutton1_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global dF
global outForce

```

```

global length
global density
global E %弹性模量
global dL
E=200;
a1=str2double(get(handles.edit3,'String'));
a2=str2double(get(handles.edit2,'String'));
outForce = (a1*2* length)^2*density;
dF=abs(a2-outForce);
set(handles.text6,'String',num2str(dF));
dL=dF/E*length;
turns=dL/(pi*0.018); % 吉他调弦琴柱的直径
set(handles.text9,'String',num2str(dL));
if dF>=0
    set(handles.text12,'String','CCW');% 逆时针
else
    set(handles.text12,'String','CW');% 顺时针
end
set(handles.text13,'String',num2str(turns));


---


function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


---


function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


---


function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global length
global density
length=0.628;
fe=get(handles.popupmenu1,'Value');
switch fe
    case 1

```

```

        density=0.0004812;
    case 2
        density=0.0006714;
    case 3
        density=0.001126;
    case 4
        density=0.004523;
    case 5
        density=0.006512;
    case 6
        density=0.008826;
end

```

```

function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
[ReadVideoFileName,ReadVideoPathName,ReadVideoFilterIndex] =
uigetfile({'*.m4a;*.wav'},'Video',...
    'MultiSelect','off',...      %是否能够多选,'off'不支持多选, 'on'支持多选
    'D:\'); %设置默认路径
if isequal(ReadVideoFileName,0) || isequal(ReadVideoPathName,0) ||
isequal(ReadVideoFilterIndex,0)
    msgbox('导入音频失败, 点击 确定 关闭对话框, 再重新导入');
else
    VideoFullPath = fullfile(ReadVideoPathName,ReadVideoFileName);
end
axes(handles.axes2);
[data, Fs] = audioread(VideoFullPath);
fs=Fs;
N=4000; %n=1:N-1;
n=0.01*fs:0.01*fs+N-1;      %从第 2s 结束开始取样
%f=n*fs/N;
f=(n-0.01*fs)*fs/N;%数字频率转换成模拟频率应该是 n/N * fs, 但由于 n 从第三个周期
开始
temp=data(:,1);      %取单个声道样本
x=temp(n);

```

```
y=fft(x,N);
mag=abs(y);           %求得 Fourier 变换后的振幅
plot(handles.axes2,f,mag);
[~,pos] = max(mag);%找到幅值最高点，记录所在横坐标
freq = f(pos);        %幅值最高对应基频分量
set(handles.edit3,'String',freq);
grid on;
```

```
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.edit3, 'String','')
set(handles.edit2, 'String','')
set(handles.edit1, 'String','')
try
    delete(allchild(handles.img1));
    delete(allchild(handles.img2));
end
```

```
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
close
```

5 结论

基于上文工作，我们得到了弦上张力与频率之间的关系为：

$$F = (f \cdot 2L)^2 \cdot \rho$$

并且在弦的拉伸实验中验证了上述公式的可靠性，可以作为 GUI 的内置函数。

通过有限元软件计算，我们得到了吉他系统稳定时的瞬时变形云图，发现当吉他弦振动时，靠近琴弦两侧共鸣箱板随之振动，变形云图呈现出规则分布的图形，由此验证了吉他是通过琴弦和共鸣箱的共鸣作用来发声的设想。

通过频谱分析与理论计算，我们得到了标准频率和采样频率之差与调节圈数和方向之间的关系，实现了吉他智能调音理论设计阶段的成功。组员利用 Matlab 的 GUI 界面编译了调音程序，达成了项目设立之处的目标。

6 总结

在本次对吉他智能调音设计的研究中，我们得到了标准频率和采样频率之差与调节圈数和方向之间的关系，实现了吉他智能调音理论设计阶段的成功。组员利用 Matlab 的 GUI 界面编译了调音程序，达成了项目设立之处的目标。

通过创新项目，组员探究了弦乐器的发声原理，锻炼了力学建模和求解简单力学问题的能力，进而通过自主设计力学实验验证解的可靠性。在程序设计方面，计算机学院刁山洲同学通过自学 Matlab 程序语言，设计出功能全面的智能调音程序，为后续进一步设计智能电子调音器打下基础。

项目成立初期是最困难的时期，由于知识储备和科研经验贫乏，项目在整体逻辑框架设计阶段屡遭瓶颈。另外，由于课程时间冲突问题，组内三人很少有机会聚在一起讨论问题。

未来我们希望推出一套完整的智能调音设备，包含频率采样，智能调节，音准测试和机械反馈功能，实现自动化调音，普惠大众。

7 声明

本项目为国家大学生创新创业项目，项目编号为#201910280001，隶属于上海大学理学院，本项目参与人之间对资金及其他相关事务没有利益冲突。

8 鸣谢

作者们首先感谢李凯教授的辛勤指导；同时感谢力学系丁虎、楚海建、宋亦诚、马永其等教授的辛勤指导；谢文韬和文海舟等同学的帮助，以及上海大学和全国大创项目提供平台以及资金支持。

参考文献

- [1] 张健. 振弦式频率读数仪频率测量值的不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 42-11, 2015:84-86.
- [2] 韩铮 1,陈岚 1,郭滨 1,熊小敏 1*. 吉他振动模式测量仪的研制与应用[J].
- [3] 陈超. 基于 LabView 接口的数据采集系统设计及吉他音色的研究[D]. 安徽: 安徽理工大学. 2011:81
- [4] 孙启梦. 基于动态模糊神经网络的钢琴曲风音质评价方法研究[D]. 广州: 华南理工大学. 2018:75
- [5] 张科红,杜金潮,钱张耀,陈守川. ZCXS—A 型弦音实验装置的设计与研制[J]. 实验技术与管理, 24-1, 2007:61-63
- [6] 刘晓楠. 钢琴机械结构的性能分析对音质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学. 2011:78
- [7] WANG Jian-xin, Analysis of piano structure and its sound mechanism, Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2095-2295(2017)02-0131-06
- [8] Chen Chao, The research of the guitar tone and the data acquisition system design based on LabView interface, A dissertation in Mechanical and Electronic Engineering, TB52
- [9] Wang Kaifu, Mechanics of Materials, Press of University of Science and Technology of China, ISBN 978-7-312-02856-4
- [10] Liu Yanzhu, Chen Liqun, Chen Wenliang, Mechanics of Vibration, Higher Education Press, ISBN 978-7-04-031000-9
- [11] Liu Xiaonan, Performance Analysis of the Piano Mechanism and Research of the Effect to Timbre, A Dissertation Submitted for the Degree of Master, TP391
- [12] Han Zheng, Chen Lan, Guo Bin, Xiong Xiaomin, The Study and Application of the Guitar Vibration Measuring Device, 510275

Design of Intelligent Tuning Equipment for Stringed Instruments: Estimation of the Guitar Vibration

Hanfeng Zhai¹, Shanzhou Diao², Shengjie Weng³

*¹School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai,
China*

²School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai, China

³College of Science, Shanghai University, Shanghai, China

Abstract

The guitar is a string instrument which voice is initiated by plucking the string. Complex scientific mechanisms are belied under the guitar's melodious and musical rhythms. This article derives from the basic model of string vibration theory, which implemented basic assumptions and mathematical reasoning, uses finite element simulation to model the guitar body and initiated a stimulation on string, analyzes and discusses the structural characteristics and modal analysis of the guitar. Through the finite element analysis, the amplification effect and the subtle frequency alternation caused by the resonance body on the guitar sound is estimated and discussed. To eliminate such effects, we design experiments to study the sound characteristics of string vibration; perform tensile tests and vibration frequency measurements on the strings (*highE*, *lowE* strings), record the measurement results and use the existing theoretical models for data fitting. We have also developed a sound measurement and correction user interface program based on MATLAB. With the vibration sound measurement samples and vibration theory models based on MATLAB, we show the sound samples error with the theoretical model. Simultaneously, the inspiration from the research on

the vibration mechanism of the stringed cavity of the stringed instrument can provide solutions and inspiration for engineering problems such as vibration control; the overall structure of the stringed instrument can be extended to the design and research of structures and materials with corresponding vibration properties, and provide decent insights for manufacturing.

Keywords: Chordophone; finite element analysis; vibration control; modal analysis; curve fitting; GUI user interface design; MATLAB; spectrum analysis

Hanfeng Zhai

School of Mechanics and Engineering Science,

Shanghai University

Shanghai 200444, China

frankzhai0@gmail.com