

分类号: 0469

单位代码: 10430

密 级: 无

学 号: 2017120105



山东建筑大学

Shandong Jianzhu University

硕士学位论文

(学 术 学 位)

论文题目: 不同弹拨位移下吉他琴弦振动特性及声学品质的研究

研究生姓名	矫盼盼
专业名称	凝聚态物理
学习形式	全日制
指导教师姓名	庄桥
学 院	理学院
入 学 日 期	2017 年 9 月
论文提交日期	2020 年 6 月

山东建筑大学硕士学位论文题目

不同弹拨位移下吉他琴弦振动特性 及声学品质的研究

国家自然科学基金资助项目（No.11374193）

计：学位论文 54 页

表 格 1 个

插 图 28 幅

评 阅 人： 盲 审

 盲 审

指导教师： 庄 桥

学院院长： 时术华

学位论文完成日期： 2020 年 4 月

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行的研究取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，论文中不含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得山东建筑大学或其他教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

学位论文作者签名： 解盼盼 日期 2020.6.18

学位论文使用授权声明

本学位论文作者完全了解山东建筑大学有关保留、使用学位论文的规定，即：山东建筑大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权山东建筑大学可以将论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他手段保留、汇编学位论文。

保留论文在此解密后遵守此声明。

学位论文作者签名： 解盼盼 日期 2020.6.18

导师签名： 王桥 日期 2020.6.18

摘要

乐器音色的好坏直接决定了乐器的表现力，弹拨力度作为弦乐器音色的影响因素，成为了演奏者们极为重视的问题。而弹拨力度又与弹拨位移有关，因此本论文以吉他的琴弦为研究对象，对琴弦进行不同位移的弹拨，从客观角度研究吉他琴弦振动及声学品质与弹拨位移的关系。

本论文的研究工作和成果如下：

通过总结吉他的研究现状，分析了吉他研究存在的问题及可研究方向，从振动和声学角度研究了吉他振动特性和声学特性。介绍了吉他的结构，对琴弦振动进行了动力学分析，通过数值计算的方法进行了仿真实验，分析了吉他的声学系统并进行了模型简化。

为了深入研究吉他的琴弦的振动机理，搭建了一个双高速相机非接触式光学测量系统，测量拨弦时吉他琴弦上的标定点的振动特性，并使用基于圆形霍夫变换的图像处理算法，提取标记点的中心位置坐标，合成振动位移、速度曲线，并将实验结果与仿真结果进行了对比，对实验得到的位移、速度图像进行了验证。

将不同弹拨位移下吉他琴弦振动的实验位移、速度特性与仿真结果进行了对比，发现周期符合良好，Y 方向为位移主方向，也符合良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显。

分析了不同弹拨位移下吉他各弦的位移、速度振动衰减情况，不同弹拨位移下吉他琴弦在获得振动条件后都没有出现稳定阶段，只有衰减阶段，且衰减得都比较缓慢，弹拨位移越大，振动持续时间越长。对于裸弦，振动持续时间很短，衰减程度较缠弦更为剧烈一点；对于缠弦，振动持续时间则比较长，衰减缓慢。

分析了不同弹拨位移下吉他各弦第一至第五谐音成分的变化情况。对于 e1 弦，第一至第三谐音成分较高，随着弹拨位移的增大，谐音成分变化不太明显；对于 b 弦，第一至第四谐音成分较高，第四谐音成分最高，随着弹拨位移的增大，各次谐音成分都逐渐增大；对于 g 弦，各次谐音成分都比较高，第二、第三谐音成分较其他谐音成分更高一些；对于 d 弦，第一至第三谐音成分较高；对于 A 弦，第一、第二谐音成分较高；对于 E 弦，第二谐音成分最高。

关键词： 吉他，弦振动，弹拨位移，声学品质，谐音占比

ABSTRACT

The quality of musical instrument timbre directly determines the performance of the instrument. As the influencing factor of the timbre of string instruments, the plucking force has become a problem that the performers attach great importance to. The plucking force is related to the plucking displacement, so this thesis takes the guitar string as the research object, and studies the relationship between the vibration and acoustic quality of the guitar string and the plucking displacement from an objective point of view.

The research work and achievements in the thesis are as follows:

This thesis summarizes the current situation of guitar research, explores the existing problems and research directions of guitar research, and studies the vibration and acoustic characteristics of guitar from the perspective of vibration and acoustics. In this thesis, the structure of guitar is introduced, the dynamic analysis of string vibration is carried out, the simulation experiment is carried out by numerical calculation method, the acoustic system of guitar is introduced and the model is simplified.

In order to study the vibration mechanism of guitar strings, a non-contact optical measurement system is built to measure the vibration characteristics of the string mark points when plucking strings. The circular Hough transform is used for image processing to extract the central position coordinates of the mark points and synthesize the vibration displacement and velocity curves. The experimental results are compared with the simulation results to verify the experimental results.

The experiment displacement and velocity characteristics of guitar string vibration under different displacement are compared with the simulation results. It is found that the period is in good agreement. Y direction is the main direction of displacement, also in good agreement,

while Z direction displacement is relatively small, and the vibration characteristics are not obvious.

This thesis analyzes the displacement and velocity vibration attenuation of guitar strings under different displacement, analyzes the acoustic signal in time domain and frequency domain, defines the harmonic ratio, which makes it more convenient and intuitive to compare the changes of harmonic. The guitar strings with different displacement have no stable stage after obtaining the vibration condition, only the attenuation stage, and the attenuation is relatively slow. The larger displacement, the longer vibration duration is. For bare strings, the vibration duration is very short, and the attenuation degree is a little more violent than that of the wound string. However, for twining strings, the vibration duration is longer and the attenuation is slow.

This thesis analyzes the change of the first to fifth harmonic components of each guitar string under different displacement. For e1 string, the first to third harmonic components are higher, and the change of harmonic components is not obvious with the increase of plucking displacement. For b string, the first to fourth harmonic components are higher, and the fourth harmonic component is the highest, and each harmonic component increases with the increase of plucking displacement. For g string, the second and third harmonic components are higher than other harmonic components. For d string, the first to third harmonic components are higher. For A string, the first and second harmonic components are higher. For E string, the second harmonic component is the highest.

Key words: guitar, string vibration, plucking displacement, acoustical quality, harmonic ratio

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪 论	
1.1 研究背景和现状	1
1.2 论文的主要内容	3
1.3 论文的目的和意义	3
第 2 章 理论基础	
2.1 弦振动理论	4
2.2 乐音的性质	8
2.3 吉他的构造	10
2.4 吉他的声学系统	10
2.5 吉他结构模型简化	11
2.6 吉他琴弦振动的动力学分析	12
2.7 小结	15
第 3 章 研究方法	
3.1 吉他弦振动仿真分析	16
3.2 双高速相机非接触式光学测量实验	18
3.3 基于圆形霍夫变换的图像处理	20
3.4 吉他声信号的采集与处理	21
3.5 小结	24
第 4 章 结果与讨论	
4.1 不同弹拨位移下吉他琴弦振动实验特性与仿真特性对比	25
4.2 不同弹拨位移下吉他各弦的振动衰减特性	31
4.3 不同弹拨位移下吉他各弦声信号分析	37
4.4 谐波占比	39

4.5 小结	39
第 5 章 结论与展望	
5.1 主要工作及研究成果	40
5.2 论文的主要创新点	41
5.3 工作展望	41
参考文献	42
后 记	45
攻读硕士学位期间论文发表及科研情况	46

第1章 绪论

1.1 研究背景和现状

1.1.1 研究背景

弦乐器是乐器家族一个重要的分支，不管是在古典音乐还是现代音乐中，弦乐器几乎承担了所有乐曲中抒情部分的演奏。弦乐器的发声原理是通过使张紧的琴弦产生振动从而发音，通过手指按住琴弦改变有效弦长来改变音高、拓宽音域。按照发音方式的不同，可以将弦乐器分为拉弦乐器、拨弦乐器和击弦乐器三种。拨弦乐器包括吉他、竖琴、琵琶和古筝；拉弦乐器比较常见的有提琴和二胡；击弦乐器有钢琴和扬琴等。其中，吉他作为一种常见的平民乐器，赢得了大多数音乐爱好者的喜爱，并成为了最广泛流传的乐器之一。

吉他是一种历史悠久的弦乐器，它的起源比小提琴和钢琴要早许多。里拉琴作为吉他最原始的形态，早在公元前 3000 年的古埃及就出现了；公元前 2500 多年，在西亚美索不达米亚地区一些古老的建筑上面出现了抱着古吉他正在弹奏的雕像；埃及金字塔的上方也有一些弓形的类似于吉他这种拨弦乐器的浮雕；在中国敦煌飞天壁画上也有弹奏六弦琴的画像^[1]。

吉他作为一种拨弦乐器，其音色优美、音域宽广，具有极为丰富的感染力和表现力，e1 弦、b 弦声音清澈明亮，g 弦、d 弦、A 弦、E 弦则浑厚雄壮。吉他既能够进行单独演奏，又能和其他乐器一起组合演奏。

根据吉他的结构和发声原理的不同，大致可以把吉他分成木吉他（民谣吉他，弗拉门戈吉他）、电吉他和古典吉他三种（见图 1.1）。



图 1.1 吉他的分类

随着人类精神需求的不断提高,对音乐的要求也在逐渐提高,因此对吉他进行科学的研究显得尤为重要。本文结合了机械振动、声学等多种学科,研究了吉他琴弦的振动特性和声学品质,为吉他的音色评估提供一个客观的标准而努力。

1.1.2 研究现状

吉他不仅是一件乐器,同时又是一件非常精密的声学设备,其发声原理也比较复杂,涉及了结构、声学、力学、振动等方面的问题,直到现在有很多问题还没有明确的解决方案。计算机水平和测量技术的飞速发展,为吉他研究者精确、深入地探索吉他的振动特性及声学品质提供了更加先进的实验工具及研究手段。为了使吉他能发出完美的声音,吉他研究者们采用了许多科学的方法对吉他进行了不同方面的研究。

Legge 和 Fletcher 在理论和实验上研究了吉他振动弦在不同频率模式下能量的非线性传递^[2]。非线性与由振动模式引起的弦张力的变化有关,但是如果要进行任何模式耦合,则至少一个琴码具有有限的机械导纳是至关重要的。在进行模拟时,可以通过一些方法将现实中激励琴弦时所产生的比较微小的影响因素进行放大,研究其幅度特性,通常在 0.1 s 的后达到最大幅度。

Richardson 提出了吉他振动和声辐射的三维时域数值模型^[3]。该模型涉及到受外力激励时弦的横向位移、共鸣板的振动以及声音辐射。通过虚拟域的方法分析了空气-面板的相互作用,并采用保守的方案进行了时间离散化。对模拟得到的声压波形进行频率分析,以便定量评估传递到耦合系统的各个组件的能量的多少,即从弦到面板,再从面板到音箱的传递过程。提出并讨论了面板厚度和腔体体积的变化对产生的声音的有什么影响,还可以在三种不同情况下对同一把吉他进行模拟实验,分别在真空中,在带有完美刚性面板的吉他的空气中,以及在带有弹性面板的吉他的空气中进行实验。实验中的空间压力场是随时间的变化的,尽量还原现实中弹拨时的真实状态,以此来研究其方向性复杂变化。

Woodhouse 描述了几种合成吉他弹拨响应的方法,从一些影响吉他弦振动特性的因素着手,给这些因素设置了不同的数据,进行频域、时域或模态叠加合成的研究^[4]。开发并实施了一系列方法,并比较了它们在不同条件下的测试结果。发现这些实验中最成功的两个方法是使用一阶方法的模态合成和频域合成。在这两者中,频域分析相对而言更为成功。得到一个重要的结论是,普通古典吉他的琴弦-琴体耦合模式仅在低频下表现

出“弯曲”行为，因此在进行低频模拟时，考虑琴弦的阻尼效果就显得极为重要。

Ricardo 进行了一些与吉他琴弦和面板的高频振动特性有关的测量，通过测量三种不同木材的面板的振动脉冲响应，比较了它们的衰减时间^[5]。所有这些测量结果表明，高频振动和辐射发生在 1-14kHz，但有些声音辐射谐波频率高达 20kHz。Ricardo 仅从主观角度来说明了高频区的重要性，没有提供任何实验证据，也没有证明各结构之间的耦合与早期衰减时间的测量数据之间的相关性。Ricardo 认为，除了要对低频模态下的声辐射情况进行研究外，对高频区的重要性的研究也应被特别关注。

目前国外对于吉他的研究多集中于仿真分析，通过设置不同的频率模式及不同材料的面板、琴码对吉他进行模态分析及声场分析，而缺少客观的实验分析，也没有琴弦的弹拨位移对吉他的声学品质的影响的研究，国内对吉他的研究则更少。

1.2 论文的主要内容

本文以吉他琴弦为研究对象，应用双高速相机非接触式光学测量系统，研究了吉他琴弦的振动位移、速度及声学品质与弹拨位移的关系，进行了时域、频域分析；对吉他进行了结构模型简化，并对吉他琴弦进行拨弦状态下的动力学分析，通过数值计算的方法研究了吉他琴弦在不同弹拨位移下的理论特性。对比了吉他各弦在不同弹拨位移下的振动衰减特性，用谐音占比来分析各谐音成分对声学品质的影响。

1.3 论文的目的和意义

吉他手在进行演奏时，吉他的音色会受到很多因素的影响，其中有很多值得我们进行深入探讨的问题，如吉他各个结构的振动特性，使用不同的材料会造成什么样的影响，琴码的偏移或形状、弦钮的调整以及拨弦点、弹拨位移等对吉他振动特性和声学品质的影响。吉他具有非常丰富的音乐表现力，不仅仅因为作曲家们创作了旋律优美的乐谱，还与演奏者弹拨位移的控制有关。经验丰富的吉他演奏者大多通过长期地摸索来弹出优美的音乐，并没有一种科学、客观的方式来判断弹拨位移与音色的关系。目前对于由不同弹拨位移引起的吉他弦振动特性的研究较少，因此本文尝试采用科学的方法研究弹拨位移与各个谐音成分的关系及对音色变化的影响，从而使演奏者能对弹拨位移与音色的关系有一个更加客观的判断标准，为分析吉他琴弦的振动特性和声学品质的提供了一种科学手段。本文在与乐器制造、乐器演奏紧密联系的基础上，融合机械、结构、振动和声学等多物理学科方法，为乐器评估、音乐声学的研究提供技术支持。

第 2 章 理论基础

2.1 弦振动理论

琴弦是弦乐器的原始振动体，通过将琴弦应用在乐器上使琴弦受到外力激励获得振动后使整个乐器获得振动，从而产生声音。琴弦对于弦乐器的声学特性具有主要的控制作用，弦乐器的声学特征主要来自于琴弦^[6]。因此，想要研究弦乐器的声学特性就要从研究弦振动开始。

2.1.1 弦振动建立三个基本条件

弦振动的产生需要三个基本前提，称为弦的“振动条件三要素”。它们既是弦振动建立的条件，同时也是弦振动建立的过程，想要研究弦振动，就要从研究这三个基本条件开始^[7]。

(1) 获得预置张力：如果没有预置张力，弦就会失去弹性，也就失去了复位能力，即使有外力的激励作用也无法产生振动。

(2) 获得初始位移：即使弦具有预置张力，却没有获得初始位移，那么弦就不具有产生复位趋势的能力，因此也不能产生振动。

(3) 获得复位条件：复位条件就是撤掉激励弦并造成弦的初始位移的外部作用力，如果不撤掉外部作用力，即使弦具有预置张力和初始位移，也无法产生振动。

2.1.2 理想弦的频率表达式

据相关资料记载，对弦振动最早进行比较系统的研究的是古希腊的数学家、哲学家毕达哥拉斯，在公元前 6 世纪，他进行了琴弦实验，得到了著名的琴弦定律。在 17 世纪，梅森取得了弦振动最成功的研究成果，他总结出了几个基本规律：(1) 弦的振动频率正比于弦的张力的平方根；(2) 弦振动时的频率反比于弦的有效弦长；(3) 弦振动的频率反比于弦的线密度的平方根 (4) 弦振动的频率反比于弦的直径。后来，他还引入了线密度这个物理量，也就是单位长度的弦的质量。于是就把一根接近理想模型的弦的频率用以下公式来表示^[8]：

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (2.1)$$

式中 f_n 为弦振动频率， n 为谐音序数($n=1, 2, 3, \dots$)， L 为有效弦长， T 为弦张

力, ρ 为线密度。

2.1.3 表征弦振动的物理量

位移: 位移是琴弦在外力的激励作用下获得振动条件后, 在某一时刻的位置与静止位置相比所产生偏移的距离矢量。

速度: 振动的速度是位移对于时间的变化率矢量。

加速度: 振动的加速度是速度对于时间的变化率矢量。

频率: 频率是单位时间内振动的重复次数。

周期: 周期是振动重复一次所用的时间。

相位: 相位是振动中的某个变化量在某个时刻所处的状态与一个参考坐标值的相对位置关系。

振幅: 振幅是振动的量所能取得的最大值。

对于速度、加速度和位移这三个物理量所可能具有的最大值分别称为速度幅、加速度幅和位移幅。

2.1.4 弦振动时可能具有的运动类型

琴弦在弦振动时同时存着在许多类型的振动, 但其中最为主要的是横振动、纵振动、倍频振动以及扭转振动, 只有横振动能直接通过眼睛观察看到, 而纵振动、倍频振动和扭转振动的位移比较微小, 很难直接看到, 需要通过一定的手段才能观察到。

(1) 横振动

横振动是指振动方向垂直于弦的方向的振动。弦的横振动的振动形态, 与橄榄形状相似。弦的两个端点被固定住, 我们称之为弦振动的“节”, 中间是弦振动振幅最大的位置, 称之为弦振动的“腹”。需要注意的是, 弦振动时除了弦的整体在发生振动外, 弦的二分之一、三分之一、四分之一等同时也在做分段振动。由整根弦的振动所产生的谐音叫做基音, 也叫第一谐音, 基音的频率被称为基频, 是弦振动各谐音频率中最小的, 它决定着琴弦所发出的声音的音高。分段振动产生的各次谐音的频率是基频的整数倍, 各次谐音成分的多少决定着声音的音色和声学品质。谐音的振幅基本跟谐音序数成反比, 按照 $1/n$ 的规律逐渐下降, 其中 n 为谐音序数。假设基音的振幅为 D , 则第二谐音的振幅为 D 的二分之一, 第三谐音的振幅为 D 的三分之一, 第四谐音的振幅为 D 的四分之一等等^[9]。

（2）纵振动

纵振动是指沿弦方向的伸缩运动。弦在做横振动的时候，弦的张力由于横振动振幅的变化也在产生着周期性的变化，因此张力的改变使弦产生了纵向振动。对于同一根弦来说，弦的纵振动的频率要比横振动的基音的频率高出很多。纵振动也伴随着一系列谐音，这些谐音成分对弦的音色和声学品质也会产生一定的影响。影响纵振动频率的因素除了弦的有效弦长、线密度之外，还跟弦的材料的弹性模量具有一定的关系^[9]。

（3）倍频振动

由于琴弦的固定点会有一定的位移，所以弦乐器在一定程度上存在着倍频振动。当琴弦在做横振动时，每当弦振动经过一个周期，与琴弦连接的结构(如吉他的琴码)就会因琴弦的振动而被带动振动两次，其振动基频是横振动基频的两倍，所以将这种振动称为倍频振动。倍频振动也有属于自己的谐音系列，各次谐音的振动频率由横振动频率决定，各谐音成分也会影响弦的音色^[9]。

（4）扭转振动

当我们弹奏弦乐器时，会使用手指或者拨片去弹拨琴弦，此时琴弦除了做横振动、纵振动以及倍频振动外，还会做扭转振动。扭转振动也会伴随产生一系列的谐音，其频率要比横振动基音的频率低，扭转振动各次谐音的成分对琴弦的音色有一定的影响。影响扭转振动频率的因素除了琴弦的有效弦长、线密度会外，弦的刚性系数也会产生一定影响^[9]。

当演奏者弹拨弦乐器时，以上四种振动方式往往是共同存在的。因为横振动会引起张力的变化，必然伴随着纵振动的产生；只要用来固定琴弦的结构（如吉他的琴码）在延着琴弦的方向上有弹性，那么就会产生倍频振动；如果激励方式是拨弦，又会产生扭转振动。但是每种振动方式所占的分量是由乐器的结构以及激励弦的方式共同决定，分量不同声音的特性也就不同。

在弦振动中，横振动发挥最主要的作用，而纵振动、倍频振动和扭转振动的作用则比较小。横振动的基频决定了琴弦所产生的声音的音高，弦的音色主要由横振动的谐音系列决定。正因为如此，在讨论弦振动时，往往只讨论横振动而不涉及其他三种振动方式。这几种运动类型通常同时发生在一种乐器中，具体情形根据乐器种类的不同而有所不同，而且和一些随机因素也有一定的关系。

2.1.5 弦的工作条件

刚度：刚度是指弦在弯力矩上的抵抗能力，而不是指材料的硬度^[10]。我们将弦用在乐器中往往就是利用弦的横振动，所以在弦所有的工作条件中，刚度是最为重要的，它影响到琴弦发音时的各种相关特性，如音高、衰变、音色和响应等，对于刚度的要求是越小越好。

抗张强度：抗张强度是指弦对于沿长度方向上的拉力的抵抗能力，对于抗张强度的要求是越高越好。

等径度：等径度是指在沿着弦方向上弦的直径值的均匀程度^[11]。它对于是否能正确计算弦的音高以及能否准确判断振动状态的是否良好具有重要影响。

椭圆度：椭圆度是指弦的横截面与标准圆形相比的偏离程度^[12]。弦具有标准的圆形横截面是弦振动发生时能让弦的运动轨迹处在应在平面内的重要影响因素，所以弦的横截面越圆越好。

延伸率：延伸率是指弦在受到外力激励作用时的塑性形变程度^[13]。延伸率会使音高由于蠕变而变得不稳定，所以对于延伸率的要求是越小越好。

耐候性：是指弦对于大气的含盐量、温度、湿度等的程度和变化情况的耐受能力，耐候性会影响到弦的音高的稳定性。

以上几个条件之间也存在着相互关联、制约以及矛盾关系，所以考虑弦的工作条件时不能只考虑某个条件的变化，还要考虑到它们之间的相关性。

2.1.6 表征波的物理量

由于各种振动在弦上能够传播，所以弦上产生了波。弦的物质内部之间的相互联系决定了振动可以在弦上传播，如果弦上的某一个质点发生了位移，那么它就一定会带动临近的质点按照相同的性质和规律开始运动。一旦开始发生传播，那么除了振源以外的所有质点将开始一个接一个地进入相同的振动状态，从近到远逐渐传播，这就是波^[14]。

波是振动的承载者，所以我们通常会用表示振动特性的物理量作为波的表达量，以此来描述波的一些特性。但是波的特性不仅仅反映在振动特性上，还反映在传播特性上^[15]。因此，我们会用一些特殊的表达量来描述波的传播特性，如波速、波长和波数等。

(1) 波速是指波传播振动的速度，而不是振动的速度。对于弦振动来说，由于波是在弦上进行传播的，所以弦上的波属于弹性波。因此，一些表征弦的弹性性质的物理量就决

定了弦上的波的传播速度，比如弹性模量、压缩系数、切变模量等等。影响波在弦上的传播速度的因素还包括弦上质点的惯性性质以及材料的密度，因为这些因素关系到弦在受到激励时对运动的响应速度，从而影响到波速；（2）波长是指波在一个振动周期内所传播的距离；（3）波数是在振动的传播路线上 2π 长度内所含有的波的个数^[16]。

2.1.7 驻波

理论和实践都已经证明，当两波在介质中相遇时，就会产生“干涉”。弦乐器的琴弦是两端被固定的有界弦，因此弦上的波不可避免地会在弦的固定点发生反射。当两个波相遇时都会对介质中的同一个质点施加一个振动力，从而使两个波的会合区域内的振动产生叠加，这些波叠加现象中存在一种比较特别的情况，当琴弦上的原始波和反射波相遇时就会产生干涉，从而在弦乐器的琴弦上形成驻波^[17]。

由于琴弦对于波来讲是一个场域有限的反射场，在琴弦上形成的驻波会受到一些条件的限制，从而使琴弦上驻波的分布特性相比其他波更为特殊^[18]。弦上的驻波具有以下几个特点：（1）弦上的驻波不是随意存在的，需要具备一定的条件，驻波的半波长的整数倍一定要等于弦长；（2）弦的两个固定端必定是波节；（3）驻波是琴弦上的原波和在琴码处失去半波后得到的反射波叠加之后形成的；（4）弦上驻波的频率必须等于整个弦振动频率的整数倍，这是驻波的一个非常重要的特性，它让弦振动从一种简单的简谐振动变为一种复合的谐振动系列^[19]。正是由于驻波的这一特点，才坚定了琴弦在乐器中的重要地位。只有由复合谐波振动所形成的声音才能有丰富的表现力和感染力，否则单纯的由简谐振动而形成的声音就会显得平淡无味。

2.2 乐音的性质

对于一条理想弦的横振动的谐音系列，第二谐音和第一谐音(基音)的频率比为 2:1；第三谐音和第二谐音的频率比为 3:2；第四谐音和第三谐音的频率比为 4:3；第五谐音和第四谐音的频率比为 5:4；第五谐音和第三谐音的频率比为 5:3；第五谐音和第二谐音的频率比为 5:2；第六谐音和第五谐音的频率比为 6:5，以此类推^[20]。

在音乐声学中，我们通常会把谐音系列称为泛音列，把高于基音频率的谐音称为泛音。谐音的序数比泛音的序数总是要大一个数，它们之间的对应关系如下：首先基音是相同的；第一泛音对应于第二谐音；第二泛音对应于第三谐音；第三泛音对应于第四谐音，以此类推。

乐音具有四种基本特性：音高、音量、音色和音长，也就是声音的高低、明暗、强弱和长短，主要是由人主观的心理因素决定的，而与之相对应的分别为频率、声压、频谱、波形和时间，则体现了客观物理特性^[21]。音高与振动的频率相关；音量与振动的振幅相关；音色与振动的谐音成分以及相对强度相关。

(1) 音高

音高，即声音的高低。高音相比低音听起来更加尖锐，而低音听起来则更加的深沉、厚重。振动频率快的振动，其音高就比较高，而振动频率慢的振动，其音高就比较低。

(2) 音量

音量，即声音的大小或强弱，也可以称为响度。如果一个弹性体振动时的振幅比较大，那么发出的声音就响；如果振幅比较小，那么发出的声音相对也就会弱一些^[22]。

在音乐声学中，通常用以下几种物理量来描述声音大小：声强、声压、响度、声强级、声压级、响度级等。其中，声强和声压都是客观的物理量，声强级和声压级则是通过对数换算的方法得到的分别与声强和声压相对应的物理量，而响度和响度级这两个物理量则是根据人的主观感受以及生理因素来进行判断的。

(3) 音色

音色，也可以理解为声音的颜色，类似于视觉上的色彩，音色是一种听觉上的色彩，可以根据音色的特性来分辨出声源。我们把一个乐音所涵盖的各次谐音在坐标轴上按顺序标记下来，就能够得到一个线状的声谱图。通过这个声谱图就能够对乐音的音色和振动时产生的各次谐音的成分以及与之相对应的幅度值之间的具体关系进行研究和分析。

(4) 音长

音长，就是声音持续的时长，指发音体振动延续的时间特征。

就乐音来讲，除了音长外，还存在一个跟时间相关的物理量，叫做声音的动态，也被称为过渡性质。无论任何乐器产生的乐音都会经历一个从产生到逐渐消失的过程，这种过程一般可以分为两种：有的乐音产生后就会立刻开始衰减，直到消失；而有的乐音则会存在一个稳定阶段，稳定阶段过去后才会开始衰减，直到消失。通常来说，在乐音整个动态过程中，如果存在稳定阶段，那么衰减阶段就会不太明显；如果只有衰减阶段，而没有稳定阶段，那么整个乐音的衰减就比较平缓。

声音的过渡性质也是一种可以用来判别出不同振动体的重要辨别方法。实验证明：

如果把某些乐器乐音的建立过程和消失过程都剪掉，只留下当中比较稳定的一段，结果令许多乐器方面的行家不仅分辨不出这是单簧管还是双簧管的声音，甚至连音叉和小号、双簧管和小提琴也分不出来了，可见过渡性质的重要性。

2.3 吉他的构造

吉他诞生至今，经过人们不断的研究摸索，其种类结构也在不断地变化。所有能被称为吉他的乐器都有一个共同点，也是吉他一词的关键定义，即吉他有六根琴弦，从细到粗分别为 e1 弦、b 弦、g 弦、d 弦、A 弦、E 弦，也称 1—6 弦^[23]，其中 e1 弦、b 弦为裸弦，g 弦、d 弦、A 弦、E 弦为缠弦。吉他是通过用手指或者拨片拨动琴弦而产生声音，琴弦获得能量产生振动，但由琴弦本身振动产生的声音很小，弦的能量一部分由琴码直接传递给面板，产生高频声音；另一部分通过空气传递给面板，面板又将能量传递给背板和音孔，产生低频声音。

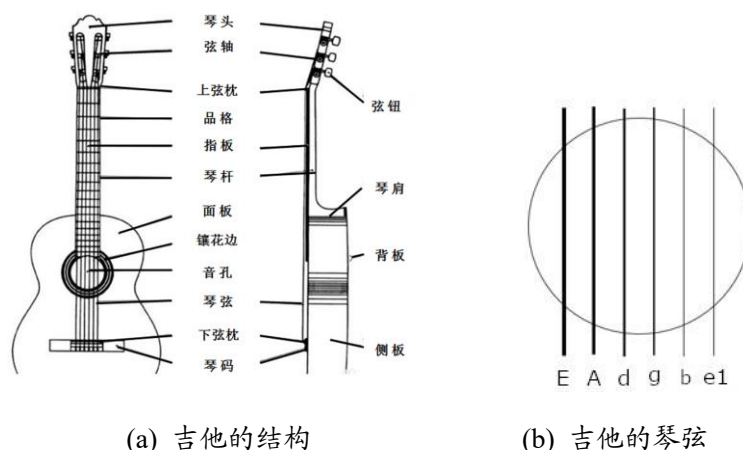


图 2.1 吉他的结构

2.4 吉他的声学系统

吉他作为一件乐器，它在弹奏过程中涉及到许多物理过程和相关学科知识，其中结构振动和声学是与之最直接相关也是最基础的。当演奏者弹拨吉他时，琴弦就会开始振动，一部分能量通过琴码传递给吉他面板，一部分能量通过音孔传递到琴箱，迫使琴箱内空气振动，最后传递给人耳。一般声波的频率范围为 10^{-4}Hz - 10^{14}Hz ，而人耳能听见的频率范围大约为 20Hz - 20kHz ，音乐的频率一般为 40Hz - 15kHz ^[24]。

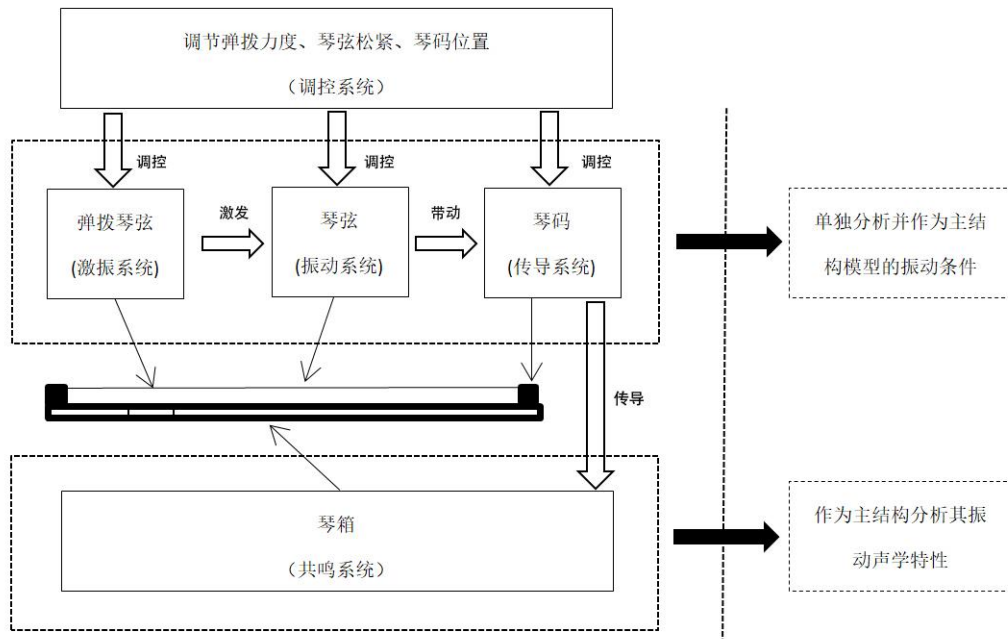


图 2.2 吉他的声学系统

在研究乐器时，研究者们结合相关的乐器声学理论，分析了乐器在整个发声过程中所涉及的振动与声学理论，最终提出了“乐器声学系统”这个概念，将吉他的声学系统分为了以下几个部分^[25]：

振动系统：乐器产生振动的主要结构，如吉他的琴弦。

调控系统：控制乐器的发声性能的装置，如吉他的弦钮。

激励系统：能够激发乐器产生振动，如吉他演奏者的手指。

共鸣系统：能快速传递振动系统振动能量的结构，如吉他的琴体。

传导系统：将振动系统产生的振动传递到共鸣系统的结构，如吉他的琴码。

2.5 吉他简化结构模型

为了更好地认识吉他的声学原理和系统地分析吉他的振动及声学特性，本文对吉他的结构进行了简化。吉他的琴弦两端被固定在吉他琴体上，同时顶在琴体两端的琴码上，而琴码又固定在吉他面板上。吉他演奏者通常使用手指或者拨片以拨弦的形式让琴弦在被激励后获得初始位移，从而使琴弦产生自由振动，然后再通过琴码以力的形式将振动传递给吉他面板^[26]。虽然在琴弦振动的过程中琴码会产生一定的位移，但是跟琴弦横振动的振动幅度比起来只能算是微小位移，可以忽略，这样就可以把琴码看作是固定不动，从而把吉他的弦振动简化为有界弦的振动^[27]。设吉他的有效弦长为 L ，把琴弦的左端固

定点也就是吉他的下琴码视为原点，上琴码端视为终点，建立直角坐标系，沿弦长方向为 X 轴，垂直于弦且平行于面板的方向为 Y 轴，垂直于面板的方向为 Z 轴，弹拨点在 $x = x_0$ 处，简化模型见图 2.3。

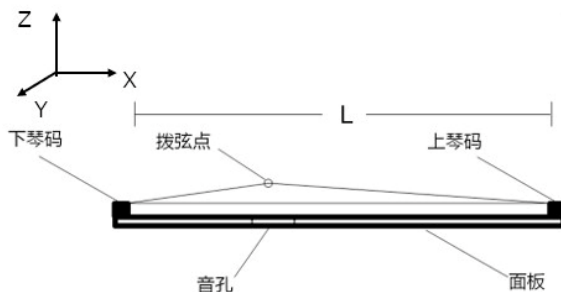


图 2.3 吉他弦振动简化模型

2.6 吉他琴弦振动的动力学分析

2.6.1 吉他弦振动的影响因素

影响弦振动的因素主要包括以下几个方面：

(1) 弦的有效长度

吉他手在进行演奏时，会通过用左手手指按住琴弦的方式来改变琴弦的有效弦长，以此来拓宽吉他的音域。

(2) 弦的张力

吉他琴弦两端是固定的，因此琴弦会受到轴向的张力 F 的拉伸。通过调节吉他弦轴来调整琴弦的张力，从而使吉他琴弦的声音调节到适当的频率。琴弦的张力通过琴码对琴体施加压力，所以张力大小对吉他的发音有着重要的影响^[28]。在演奏前，调节每根弦的张力从而使每根弦调节到相应的空弦基频，是使吉他发音标准的重要因素。

(3) 弦的扭转

在拨弦时，手指的摩擦将不可避免地导致弦的扭转以及横向偏转，这时弦的扭转波会对琴弦的运动产生影响^[29]。弦的扭转运动可能不是直接影响吉他声辐射的重要因素，但是当横向波转换成扭转波时，就会产生比较高的阻尼^[30]。

(4) 击弦点

在弦乐器的设计、制作和演奏的过程中，拨弦点的位置影响很大。在吉他演奏时演奏者通过在不同的位置进行拨弦，就会改变吉他发音的音色。英国物理学家 T. Young 在研究用各种不同的激励方式激励琴弦振动特性有什么区别时发现：对于一条被激发产

生振动的琴弦，如果击弦点位于某个谐音的波腹上，那么这个谐音就会被加强，但如果击弦点位于某个谐音的波节上，那么这个分音就会被抑制甚至是消除。根据这个发现他得出了以下结论：如果在琴弦的某个位置上激励琴弦并使琴弦振动，那么这个位置一定是琴弦振动的波腹而不是波节；如果在琴弦某个位置上激励琴弦后，琴弦的振动被抑制了，那么这个位置就是琴弦振动的波节而不是波腹^[31]。

当弹拨吉他琴弦的中间位置时，琴弦的中间位置一定是振动的波腹，而不是波节，此时琴弦的全弦振动(第一谐音)、三分之一弦长振动(第三谐音)、五分之一弦长振动(第五谐音)等奇次谐音都被加强了，而二分之一弦长振动(第二谐音)、四分之一弦长振动(第四谐音)、六分之一弦长振动(第六谐音)等偶次谐音则会被抑制甚至消除^[32]。

当我们激励琴弦的四分之一位置时，波腹的位置正好在二分之一弦长处，振动被加强；而四分之一弦长振动、八分之一弦长振动等，波节位置位于击弦点上，振动被抑制或消除。还有一种是在某个位置上止住振动的情况，在弹奏吉他时，演奏者用左手手指按住琴弦的三分之一位置，用右手弹拨琴弦，这时就会听到一个的比基音高十二度的谐音。这是由于当用左手手指按住在琴弦的三分之一位置时，只有第三谐音被保留下来了，因为第三谐音的波节正好处在按压琴弦的位置，而波节不在这个位置的第一、第二、第四等谐音则被消除了。如果按压琴弦的二分之一和四分之一位置，那么就可以分别演奏出高一个八度和高两个八度的谐音。

T. Young 的这个发现和结论，被称为“杨氏定律”^[33]。这个定律同样适用于除了琴弦之外的其他振动体。这个发现的意义在于：演奏者通过调整弦乐器琴弦的激励位置，可以在一定程度上改善弦乐器的发音，以此来得到自己所需要和追求的音色。

(5) 裸弦与缠弦

一般了解吉他的人都知道，吉他的琴弦是由两根裸弦和四根缠弦组成。一种弦乐器不论它有几根琴弦，有效弦长是多少，或是制作琴弦的材料是什么，一般都是使用裸弦作为高音弦，在裸弦上缠绕一层或者好几层线材的缠弦作为低音弦。

对于弦乐器来讲，为了能够得到更多不同频率的乐音，最常用的方法就是通过改变琴弦的有效弦长来调整乐音。但是在实际操作中设计制造一种弦乐器的时候，我们不可以单纯地只考虑乐音的频率，同时我们还需要考虑到音色是否优美、音量的大小以及实际演奏中演奏者弹奏是否方便这些问题。一件乐器不管是太大或者是太小，在实际演奏

中都是不太方便的。

因此，使用缠弦来制造弦乐器的低音弦是一个非常有效的方法。缠弦虽然增加了琴弦的质量，但仍然使琴弦保持着合适的柔顺度，琴弦的长度也适中，弦乐器不至于太大或者太小，通过使用缠弦有效地获取了低音。可以说采用缠弦是人类在弦乐器领域内的一项重大的发明，它的意义甚至不逊色于发明一件乐器。

(6) 其他因素

吉他的弦振动还受到其他许多因素的影响，除了以上两个因素外，弦的振动还受到弹拨位移、弹拨点、手指宽度等的影响，此外，弦的振动还受琴弦、琴码与琴体的耦合、手指的摩擦、演奏者的演奏姿势等各方面因素的影响。

2.6.2 吉他弦振动的动力学分析

在吉他演奏中最常见的弹奏手法是拨弦，是指当吉他琴弦张紧并进行空弦基频校准之后，用手指激励琴弦，然后手指不再接触琴弦，给予琴弦初始状态后使其自由振动。假设吉他琴弦使均匀且柔软的，在垂直琴弦的方向对琴弦进行激励，此时琴弦受到外力后开始产生不同类型的弦振动，这里我们只研究横振动。将坐标系定义为：吉他的下琴码为坐标原点，取沿着弦的方向为X轴，垂直弦线并且平行于面板的方向为Y轴，垂直于面板方向为Z轴。 $u(x,t)$ 表示琴弦上横坐标为 x 的点在 t 时刻其横振动所产生的位移，弦的运动的主要受外力和弦自身张力的作用，弦上每一个点的位移、张力等都必须遵循牛顿运动定律。此时弦上各点的位移在外力作用下满足经典物理的弦振动偏微分方程^[34]：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = F(x,t) \quad (2.2)$$

公式中 u 为横振动产生的位移， $F(x,t)$ 为作用在弦上单位质量的外力， $c^2 = T/\rho$ ， c 为弦振动的波速， T 为弦的张力， ρ 为弦的线密度。假设琴弦的有效弦长为 L ，弦的初始位移为 u_0 ，初始速度为 $\varphi(x)$ ，那么弦的横振动方程的解为^[35]：

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(A_n \cos \frac{n\pi c}{L} t + B_n \sin \frac{n\pi c}{L} t \right) \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \quad (2.3)$$

公式中：

$$A_n = \frac{2}{L} \int_0^L u_0 \sin \frac{n\pi x}{L} dx,$$
$$B_n = \frac{2}{n\pi c} \int_0^L \varphi(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx$$

2.7 小结

本章介绍了吉他的结构及弦振动理论,从音乐声学角度出发简述了吉他的声学系统,由于吉他的动力分析比较复杂,因此对吉他结构进行了模型简化。介绍了吉他振动系统的影响因素,结合弦振动基本理论对吉他弦振动进行了动力学分析。

第 3 章 研究方法

3.1 吉他弦振动仿真

为了更清晰直观地分析吉他的弦振动，对拨弦时吉他各弦在不同弹拨位移下的弦振动情况进行数值计算。拨弦时，假设在 $t=0$ 时刻，在距离下琴码 $x = x_0$ 处将弦从静止位置拉开 $u = u_0$ 的距离（拨弦初始位移）后释放，初始速度为零，即 $\varphi(x) = 0$ ，此时

$$B_n = \frac{2}{n\pi c} \int_0^L \varphi(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx = 0$$

弦的横振动的方程的解为^[36]：

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{2}{L} \int_0^L u_0 \sin \frac{n\pi x}{L} dx \cos \frac{n\pi c}{L} t \right) \right] \sin \left(\frac{n\pi}{L} x \right) \\ &= \frac{2u_0 L^2}{\pi^2 x_0 (L - x_0)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi x_0}{L} \sin \frac{n\pi x}{L} \cos \frac{n\pi c}{L} t \end{aligned} \quad (3.1)$$

其中 L 为吉他琴弦的有效弦长，为650mm； u_0 为琴弦的初始位移； x_0 为拨弦点到下琴码距离，本实验设置为140mm，避开了第一至第五谐波的波节，所以这五个谐波的谐音成分不会被抑制； t 为时间； $c^2 = T / \rho$ ， c 为弦振动的波速， T 为弦的张力， ρ 为弦的线密度，采用定长制 $\rho = m/l$ 计算密度， l 取50mm，弦的质量 m 实测可得(见表1)。

实验使用的是民谣吉他，琴弦采用达达里奥EJ16琴弦，参数如下：

表3.1 吉他各弦参数

	张力 (N)	基频 (Hz)	半径 (10^{-3}m)	质量 (10^{-3}kg)	线密度 (kg/m)	波速 (m/s)
E弦	113.2	82.4	1.35	5.0	0.0100	106.4
A弦	131.2	110.0	1.07	3.2	0.0064	143.2
d弦	135.8	146.8	0.81	1.8	0.0036	194.2
g弦	136.3	196.0	0.61	1.0	0.0020	261.1
b弦	105.7	246.9	0.41	0.4	0.0008	363.5
e1弦	106.0	329.6	0.30	0.3	0.0006	420.3

图 3.1 为数值计算得到的拨弦时吉他各弦在不同弹拨位移下 5 个周期内的弦振动仿

真位移和速度的时域曲线。e1 弦振动周期为 0.003s 左右，b 弦周期为 0.004s 左右，g 弦周期为 0.005s 左右，d 弦周期为 0.007s 左右，A 弦周期为 0.009s 左右，E 弦周期为 0.012s 左右，随着弦的粗度的增加、基频的减小，周期逐渐增加，e1 弦周期最短，E 弦周期最长。对比各弦振动位移发现，相同弹拨位移下各弦振动位移差别不大；对比各弦振动速度发现，相同弹拨位移下 e1 弦振动速度最大，E 弦振动速度最小。对于任意一根弦，随着弹拨位移的增大，各弦振动位移和速度的振幅都逐渐增大。

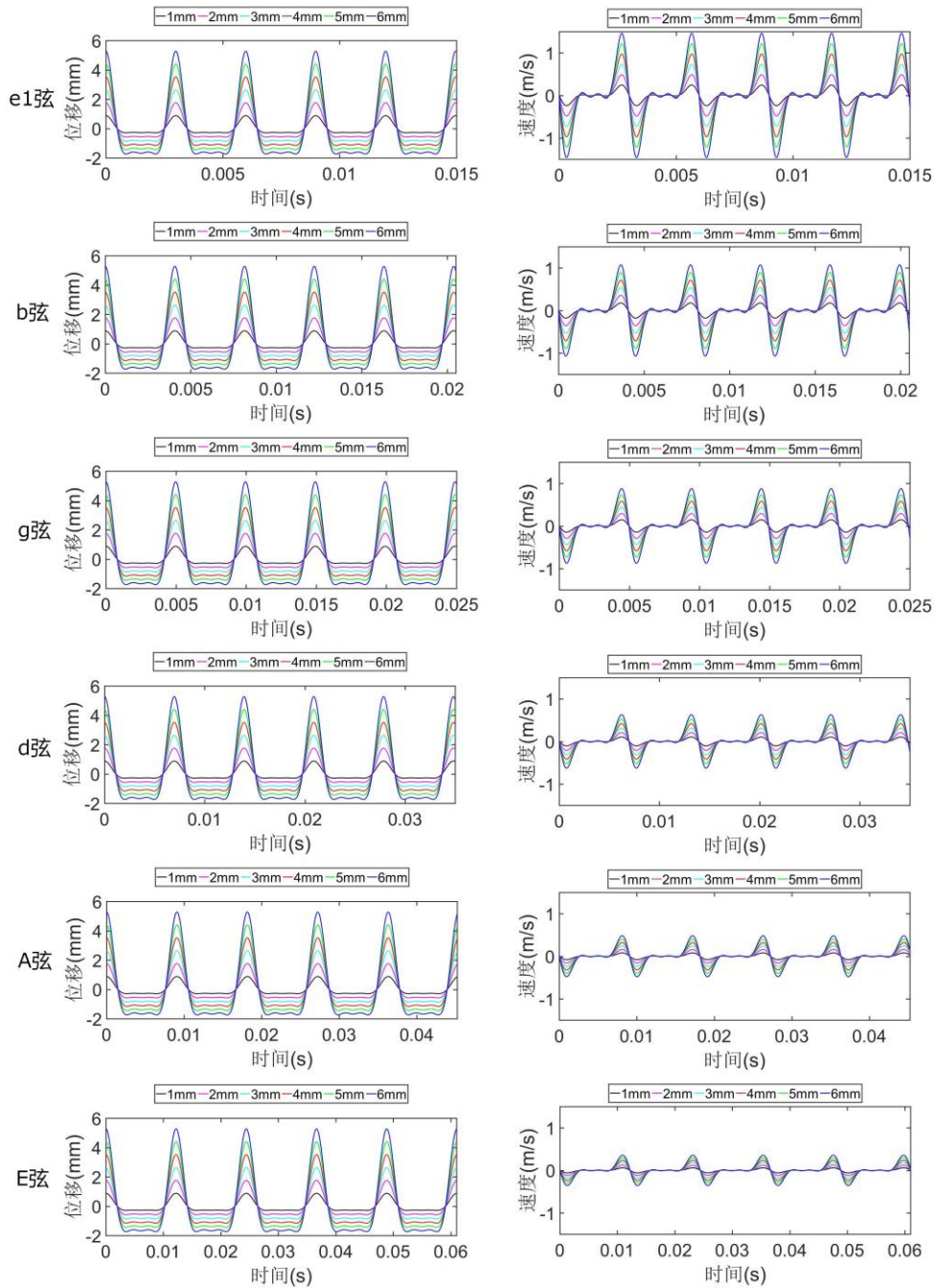


图 3.1 吉他琴弦不同弹拨位移下仿真位移和速度

3.2 双高速相机非接触式光学测量实验

3.2.1 实验原理

根据相关规定，将拍摄速度为 128 帧/秒及以上的拍摄归为高速摄影^[37]。高速摄影技术是一项用来研究高速运动物体的运动特性的技术，是光学领域的一个非常重要的分支^[38]。它的基本原理是：曝光时，记录介质和记录光场是处于相对静止状态或者是将两者的相对运动控制在允许的范围之内；不曝光时，记录介质和记录光场处于相对运动状态，从而使不同时间的图像被记录在介质的不同位置。这项技术可以研究领域涵盖面非常广，包括物理、生物、化学、材料、信息、空间等。高速摄影技术记录的是瞬间变化的时间和空间信息，其中时间信息是通过拍摄速率表示，而空间信息则是通过图像来表示^[39]。

为了建立吉他弦振动的精确模型，通过实验的方法来检测琴弦的实际运动状态对于吉他研究来说是非常重要的。本论文将应用高速摄影技术来研究吉他琴弦横振动的振动特性，搭建了一个基于双高速相机的非接触式光学测量系统，对整个测量系统进行了光路设计，对琴弦上的标定点进行拍摄，以此来检测拨弦时吉他琴弦上标定点的振动形态。采用基于圆形霍夫变换的图像处理算法对拍摄得到的序列图上的标定点进行目标识别和追踪，得到标记点的中心位置坐标，提取琴弦振动的特性参数，经数值处理后得到吉他琴弦的振动位移、速度，进而对吉他琴弦的振动特性进行研究。

3.2.2 实验装置与实验设计

由于弦的振幅很小，振动频率很高，用肉眼很难看清其振动状态。所以，为了测量拨弦过程中在不同弹拨位移下吉他的弦振动情况，在光学平台上搭建了一个琴弦振动的非接触式光速测量系统，包括无频闪光源、光路反射镜、吉他拨弦系统、高速相机及计算机图像采集系统。

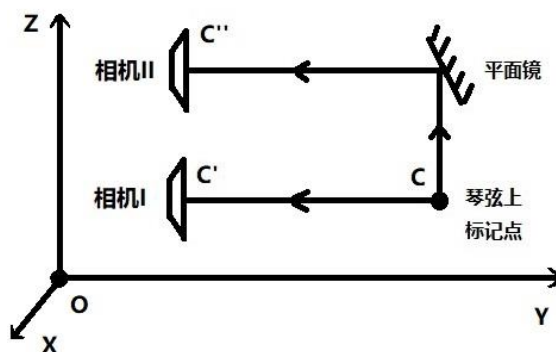


图 3.2 吉他琴弦振动高速摄影实验光路设计

为了能够追踪到琴弦上标定点的运动，本实验先在琴弦上做好标记点，根据图 3.2 的光路设计搭建光学测量系统，相机I可以直接拍摄到标定点 C 在 X-Z 平面内的振动情况，即相机I中的点 c' ；相机II则通过拍摄标定点 C 经平面镜反射后的图像来得到在 X-Y 平面的振动情况，即相机II中的 c'' 。然后使用圆形霍夫变换图像处理算法对每一帧点 C 的位置进行追踪，并得到点 C 中心位置坐标。



图3.3 吉他弦振动非接触光学测量实验平台

实验采用德国 pco.1200s 高速相机，相机的拍摄速度为 501-32023 帧/秒，画面像素高达 1280×1024 ，可通过自行定义拍摄区域及调整放大倍数进行局部显微放大拍摄，图片分辨率为 200×56 ，实验中高速相机的拍摄速度设置为 6000 帧/秒，吉他空弦基频最大的 e1 弦的频率为 329.6Hz，因此这个拍摄速度完全可以满足拍摄需求。



图 3.4 局部放大拍摄的实验图

3.2.3 实验过程与方法

为了减少各弦间的共振作用，将其余的弦拆卸，对待测弦单独进行实验。实验前对吉他进行空弦基频校准，拍摄前先将吉他和相机调水平，并调整平面镜片的位置，使相机I内呈现琴弦上标定点 C 的实像，相机II内呈现经过平面镜反射而成的标记点 C 的虚像，将相机I和相机II设置为同步拍摄。通过调整高速相机进行局部显微放大拍摄，图像比例可通过比例尺进行标定，采用无频闪光源，调整光源位置，通过调整曝光时间及帧率，使点 C 能够清楚地拍摄到。使用弹簧拉力计精确定量琴弦的初始位移，对琴弦进行不同弹拨位移的拨弦实验，弹拨位移分为六个级别，分别是 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、6mm。为了保证数据的准确性，进行了多次实验并取平均值，得到了各弦弹拨力度与弹

拨位移的关系曲线，如图 3.5 所示，弹拨力度与弹拨位移基本呈线性关系。同时通过 AWA6228+型声级计采集不同弹拨位移下吉他琴弦振动的声信号。

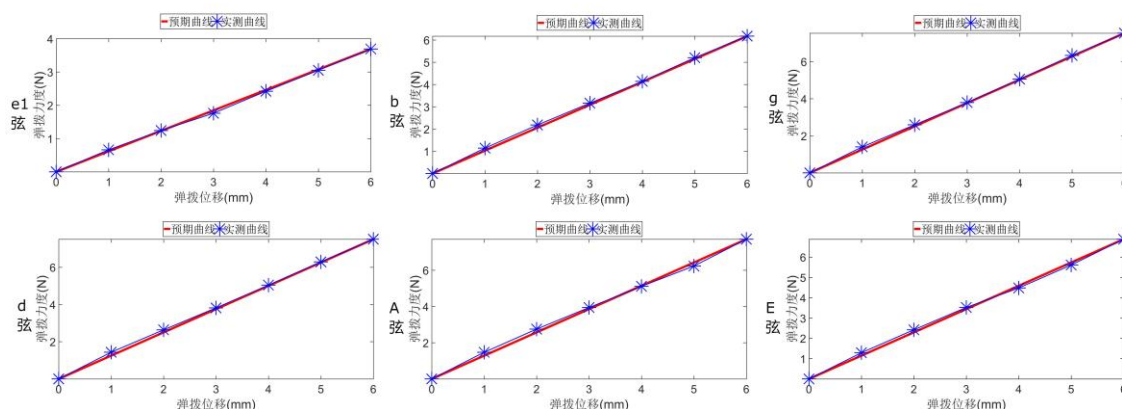


图 3.5 弹拨力度与弹拨位移的关系曲线

3.3 基于圆形霍夫变换的图像处理

3.3.1 图形采集

由于吉他琴弦的振动频率比较高，振动幅度却比较小，所以想要得到精确的图像数据就会比较难。虽然本实验中所使用的高速相机的最高帧率可以达到 30000 帧/秒，但是在进行实际高速拍摄时考虑到拍摄速度与分辨率、曝光时间的制约关系，为了得到较高的拍摄速度，图像分辨率则必须设置的很低。当相机的分辨率设置的过高时，拍摄速度就会相应地降低。因此，合理的设置相机的帧率、曝光时间和分辨率是图像采集的关键及难点，这对提高实验的精确度有着极为关键的作用。将实验中的拍摄数据保存为图片格式，选取需要的图片序列范围，然后应用图像和数据处理方法对图片中点 C 的中心点坐标进行提取。

3.3.2 图像识别

为了识别拍摄得到的序列图内的琴弦上的标记点，我们必须先判断图元的类别，目前有很多选择特征点的算法，都有各自的优点和缺点。就本实验而言，如果用神经网络检测高速拍摄得到的数万张序列图像，那么检测时间将会很长，收敛性也会存在一些问题。考虑到相邻两帧序列图像之间具有较强的相关性，本文通过分析相邻的两帧图像，采用圆形霍夫变换(CHT)图像处理算法提取标定点的几何中心坐标。

霍夫变换定义了图像从点到累加器空间(霍夫空间)的映射，对于圆形目标，圆的方程和映射根据下列公式进行运算^[40]

$$\begin{aligned}(x-x_0)^2+(y-y_0)^2 &= r^2 \\ x_0 &= x-r \cos \theta, y_0 = y-r \sin \theta\end{aligned}\tag{3.2}$$

其中 (x, y) 表示某个点的位置坐标, (x_0, y_0) 表示圆的原点, r 为圆半径, θ 为圆心角。在进行圆形霍夫变换之前, 先用下面这个公式计算预处理图像的梯度场^[41]

$$\nabla I_M(x, y) = \frac{\partial I_M(x, y)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial I_M(x, y)}{\partial y} \vec{j}\tag{3.3}$$

其中 $\nabla I_M(x, y)$ 是两个变量 x 、 y 的梯度函数, i 、 j 分别是 X 轴、Y 轴的单位矢量。然后将预处理后的图像转化为基于梯度的圆形霍夫变换, 直接输出图像中所有圆形目标几何中心的坐标和半径。由于本论文只用到了标定点的几何中心位置, 而并不需要标定点的半径。需要注意的是, 圆形霍夫变换不仅可以检测出标定点的几何中心位置, 而且可以达到亚像素级别分辨率, 由于标定点的几何中心位置是通过检测标定点的边缘来计算的, 因此在圆形霍夫变换中可以达到亚像素分辨率, 这对实验结果的精确度有很大的作用。由于校准点的几何中心位置在两个相邻的序列图中可能具有相同的像素, 在振动期间校准点在两个连续的瞬态时间中的边缘可能在相邻的像素发生交叉, 因此也会存在一定的误差。

3.4 吉他声信号的采集与处理

3.4.1 吉他声信号的采集

在进行声信号采集时, 要尽可能保持实验相对安静, 为了排除不必要的干扰, 实验时关闭了实验室内的所有可能产生噪音且与实验无关的设备, 以保证数据的准确性。本实验使用 AWA6228+型声级计(一级精度)进行声信号采集, 频率范围为 10Hz-20kHz, 完全可以满足实验需要。



图 3.6 AWA6228+型声级计示意图

实验时将声级计的录音时间设置为 10 秒，在距离吉他 0.3 米处放置三脚架，并将声级计固定在三脚架上，调整声级计探头方向，使其朝向吉他音孔方向。尽量保证在实验过程中不会有人为的噪声产生，按下声级计的“开始”按钮，用弹簧拉力计拨动吉他琴弦，按不同弹拨位移分别对 E、A、d、g、b、e1 六根弦进行拨弦，进行声信号采集。

3.4.2 吉他声信号的时域分析

把时间作为自变量来描述物理量的变化情况是信号最基本、最直观的表达形式。信号的时域分析是指在时域内对信号进行滤波、放大、统计特征计算、相关性分析等处理^[42]。采用时域分析这种方法可以有效的提高信噪比，并能够得到信号波形在不同时刻的相似性和关联性，获得反映物体运动状态的特征参数，为研究物质运动提供了一种有效的研究方法^[43]。

信号的时域分析图像直观的反映了声音随时间变化的规律，有些波形图在起始、结束阶段可能会存在一些噪音，这些噪音是在按下声级计的录音、结束按钮时声级计本身产生的，因此后期会对音频文件进行剪辑，将存在噪音的部分剪掉，避免噪音对实验结果产生影响。

波形图是声音信号最直观的表达方法，也是最为常见的一种信号表示方法。但从波形图中我们只能得到声音的幅度变化情况，而不能得到更深层次的信号特征，如各次谐波成分^[44]。对于本次实验来说，在不同弹拨位移下，各弦的波形图除了幅度及衰减情况

有些许不同外，并不能达到其他有用信息。虽然波形图对于信号在时域的处理上或许有一定的优势，但对更深层的信号特征的研究则略显单薄，因此这时就需要对声信号进行频域分析。

3.4.3 吉他声信号的频域分析

在对信号进行时域分析时，虽然有的时候一些信号的时域参数是相同的，但并不能说这些信号是完全相同的，因为信号不仅与时间的变化有关，还和频率、相位等因素有关，因此进一步在频域内对信号的频率结构进行分析是非常有必要的^[45]。

所谓频域分析，是指通过傅里叶级数或者傅里叶变换将信号或者系统变为频域，对信号和系统进行频域分析和处理^[46]。利用傅里叶变换将采集到的吉他乐音声学信号进行频域分析，得到吉他每根弦在不同弹拨位移下的频谱图。

假设抽样点 $N=2^M$ (M 为整数)，将 N 点复序列 $x(n)$ 对半分开， N 点离散傅里叶变换(DFT)可以写成前后两个部分：

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{N/2-1} x(n)W_N^{nk} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} x(n)W_N^{nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(n + \frac{N}{2})W_N^{(n+\frac{N}{2})k} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} [x(n) + W_N^{(N/2)k} x(n + \frac{N}{2})]W_N^{nk} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} W_N^{N/2} &= -1, \\ W_N^{(N/2)k} &= (-1)^k = \begin{cases} 1, & k \text{ 为偶数} \\ -1, & k \text{ 为奇数} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.5)$$

进一步分解为偶数组和奇数组，于是有

$$\begin{cases} X(2r) = \sum_{n=0}^{N/2-1} a(n)W_{N/2}^{nr} \\ X(2r+1) = \sum_{n=0}^{N/2-1} b_2(n)W_{N/2}^{nr} \end{cases}, \quad r = 0, 1, \dots, N/2-1 \quad (3.6)$$

这正是两个 $N/2$ 点的 DFT 运算，也就是将一个 N 点的 DFT 分解为两个 $N/2$ 点的 DFT。一个 $N=2^M$ 点的 DFT 在经过 M 次分解之后，最后剩下全部都是 2 点 DFT，2 点 DFT 实际上就只剩下加减运算了^[47]。

乐音的时间过程一般分为起振、稳定和衰减三个过程，简称为时程。由于不同乐器的激励方式和发音方式的不同，所以发音过程的三个阶段所占的比例也就不同。对于吉

他来说，其时程主要为衰减阶段，衰减阶段是指撤掉激励力以后琴弦的振幅开始逐渐减小直到振动完全停止的阶段。

由于频谱是由基频和各种谐音分量组成的，因此谐音分量的不同对于音色的变化起着极为重要作用。如果声音的频谱是以奇次谐音为主而缺乏偶次谐音，那么声音听起来就会比较模糊、暗淡和空虚；如果声音的频谱是以偶次谐音为主而缺乏奇次谐音，那么声音听起来就会比较明亮、清晰。

3.5 小结

本章对吉他六根弦的振动位移和速度进行了仿真分析，为了进一步了解吉他琴弦的振动特性，通过光学的方法搭建了双高速相机非接触式光学测量系统，采用基于圆形霍夫变换的图像处理算法，分析了琴弦上标记点的振动位移和速度与弹拨位移的关系。同时采集拨弦时不同弹拨位移下吉他各弦的声信号，并对声信号进行时域和频域分析。

第 4 章 结果与讨论

4.1 不同弹拨位移下吉他琴弦振动实验特性与仿真特性对比

实验时将标定点 C 设置于距离琴码 140 毫米处,手指拨弦的位置距离琴码 130 毫米。使用上述图像处理算法提取图像标定点的中心坐标,并合成为位移和速度曲线。本次实验只考虑 Y、Z 方向的振动特性,而 X 方向位移过于微小,测量存在一定困难,因此本实验未进行测量。

4.1.1 e1 弦在不同弹拨位移下实验特性与仿真特性对比

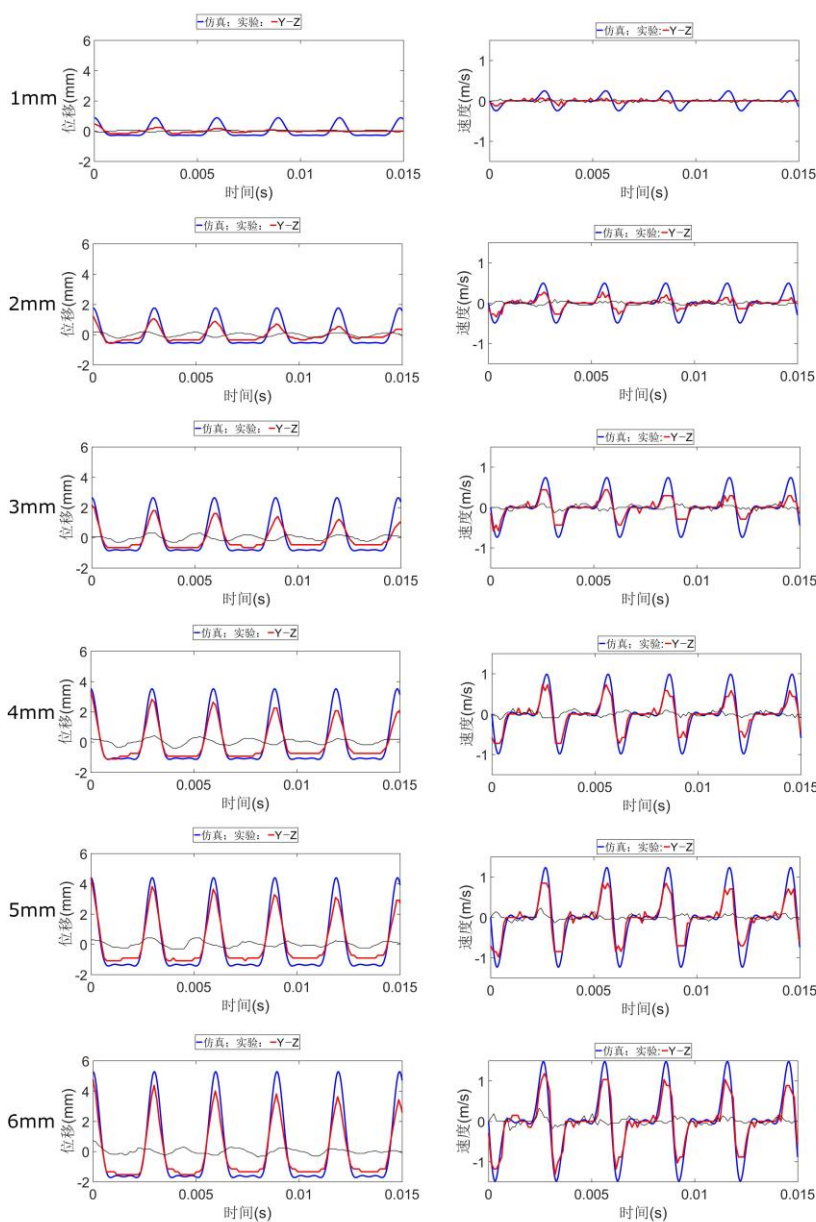


图 4.1 e1 弦在不同弹拨位移下仿真特性与理论特性对比

图 4.1 显示了 e1 弦在不同弹拨位移下五个周期内的实验得到的位移、速度波形与仿

真波形的对比情况，其中，速度波形是通过位移波形微分操作得到的。蓝色为仿真波形，红色为 Y 方向的波形，黑色为 Z 方向的波形。Y 方向为拨弦的主方向，实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显，但周期符合良好。e1 弦五个周期时长为 0.015 秒，平均振动周期为 0.003s，求得 e1 弦振动频率为 333.3Hz，与 e1 弦基频 329.6Hz 非常接近。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.1.2 b 弦在不同弹拨位移下实验特性与仿真特性对比

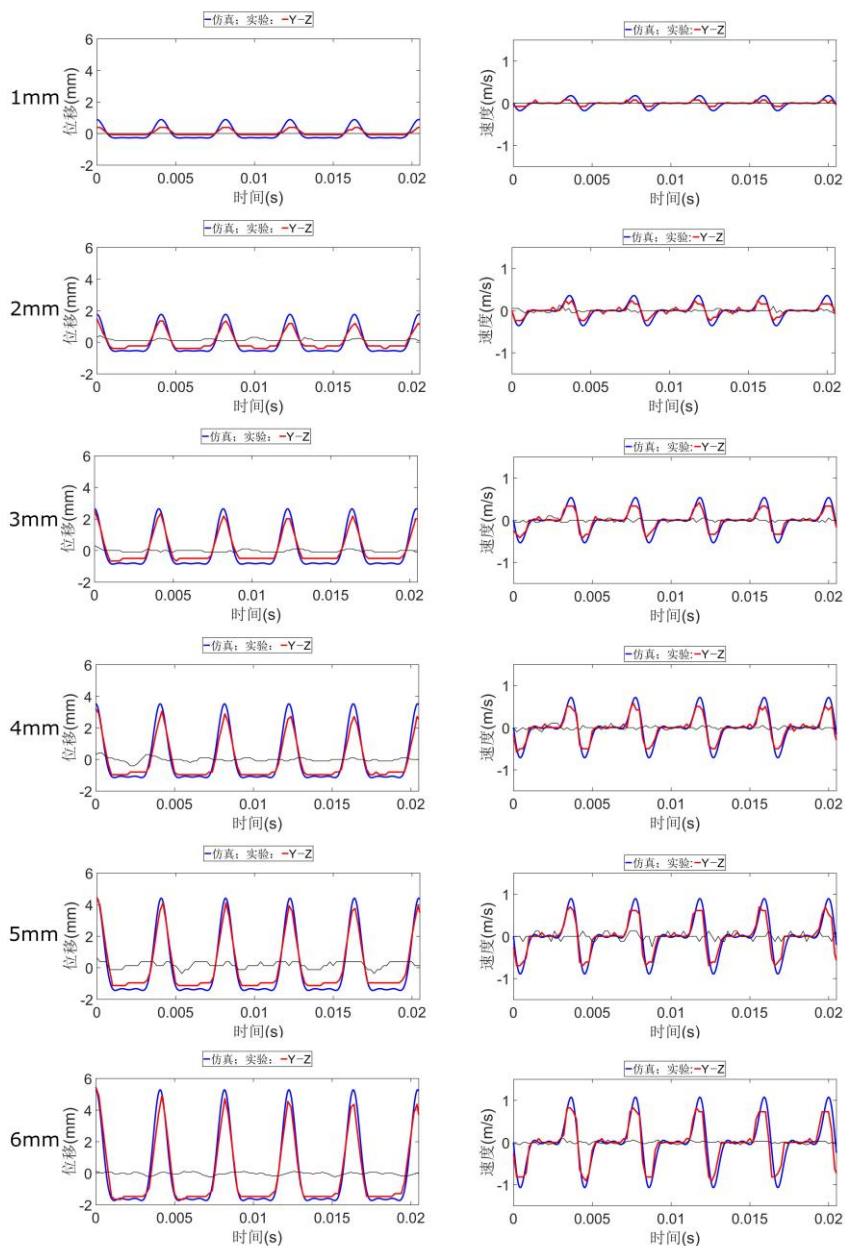


图 4.2 b 弦在不同弹拨位移下仿真特性与理论特性对比

图 4.2 显示了 b 弦在不同弹拨位移下五个周期内的实验得到的位移、速度波形与仿真波形的对比情况。Y 方向为拨弦的主方向，实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显，但周期符合良好。b 弦五个周期时长为 0.0205 秒，平均振动周期为 0.0041s，求得 b 弦振动频率为 243.9Hz，与 b 弦基频 246.9Hz 非常接近。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.1.3 g 弦在不同弹拨位移下实验特性与仿真特性对比

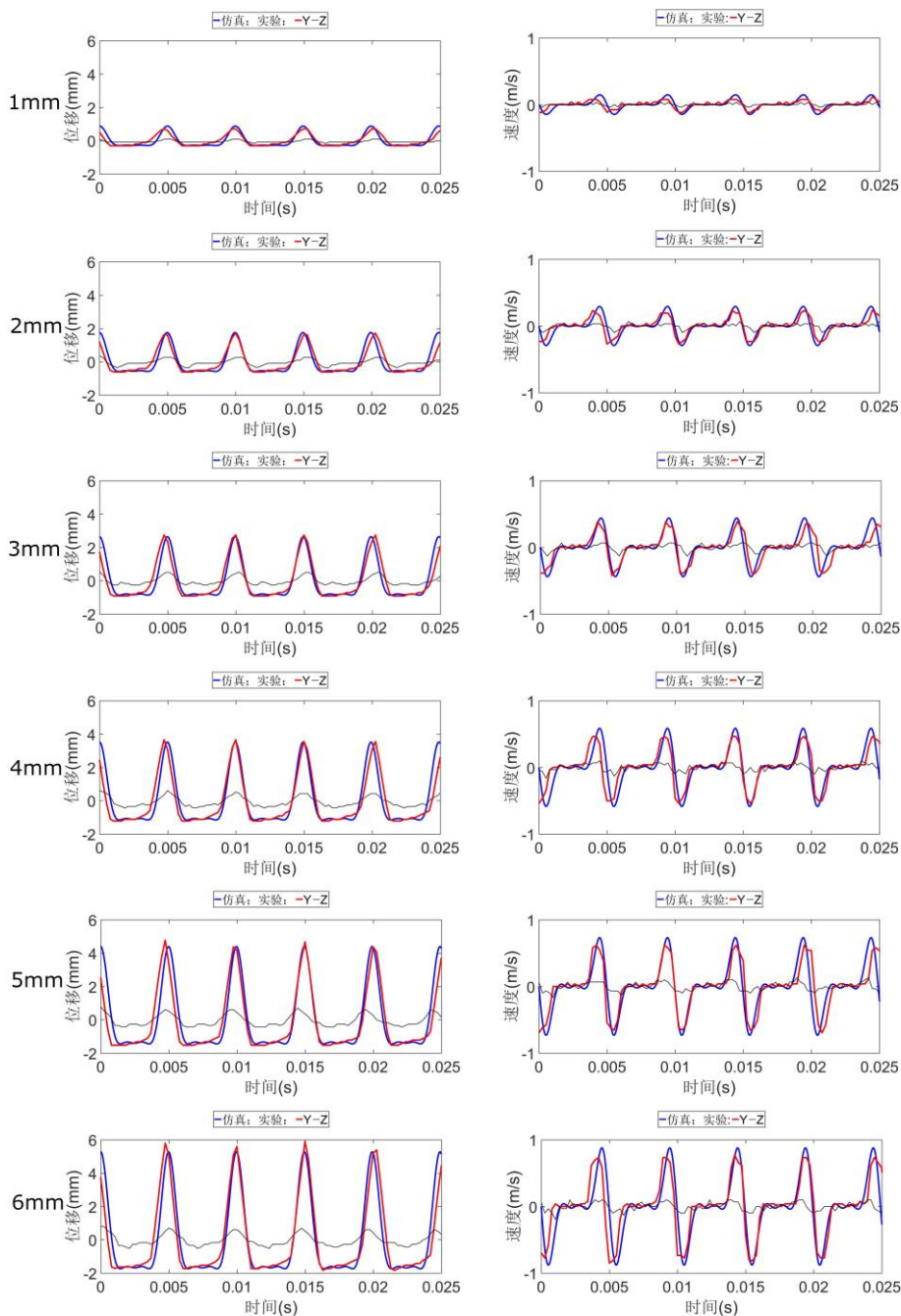


图 4.3 g 弦在不同弹拨位移下仿真特性与理论特性对比

图 4.3 显示了 g 弦在不同弹拨位移下五个周期内的实验得到的位移、速度波形与仿真波形的对比情况。Y 方向为拨弦的主方向，实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显，但周期符合良好。g 弦五个周期时长为 0.025 秒，平均振动周期为 0.005s，求得 g 弦振动频率为 200Hz，与 g 弦基频 196Hz 非常接近。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.1.4 d 弦在不同弹拨位移下实验特性与仿真特性对比

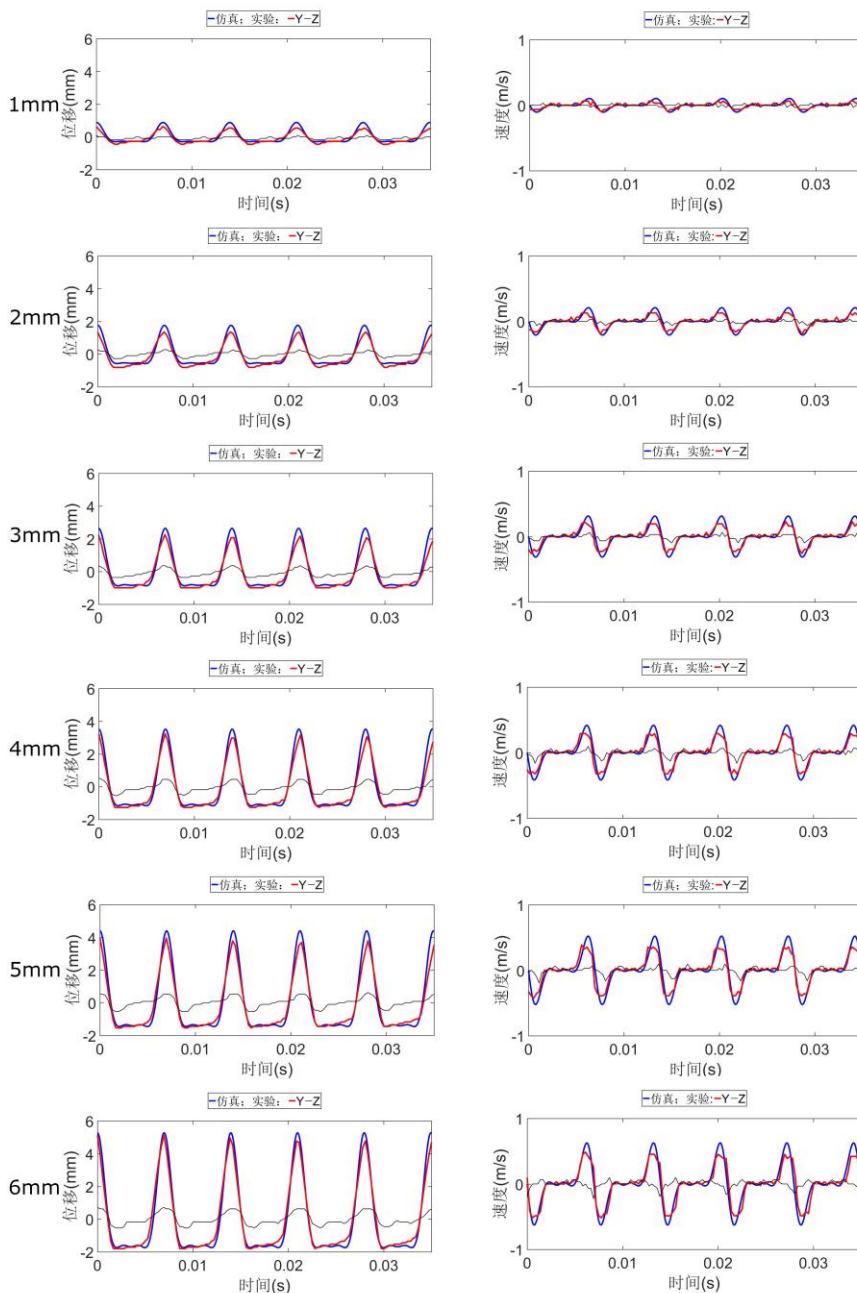


图 4.4 d 弦在不同弹拨位移下仿真特性与理论特性对比

图 4.4 显示了 d 弦在不同弹拨位移下五个周期内的实验得到的位移、速度波形与仿

真波形的对比情况。Y 方向为拨弦的主方向，实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显，但周期符合良好。d 弦五个周期时长为 0.035 秒，平均振动周期为 0.007s，求得 d 弦振动频率为 142.9Hz，与 d 弦基频 146.8Hz 非常接近。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.1.5 A 弦在不同弹拨位移下实验特性与仿真特性对比

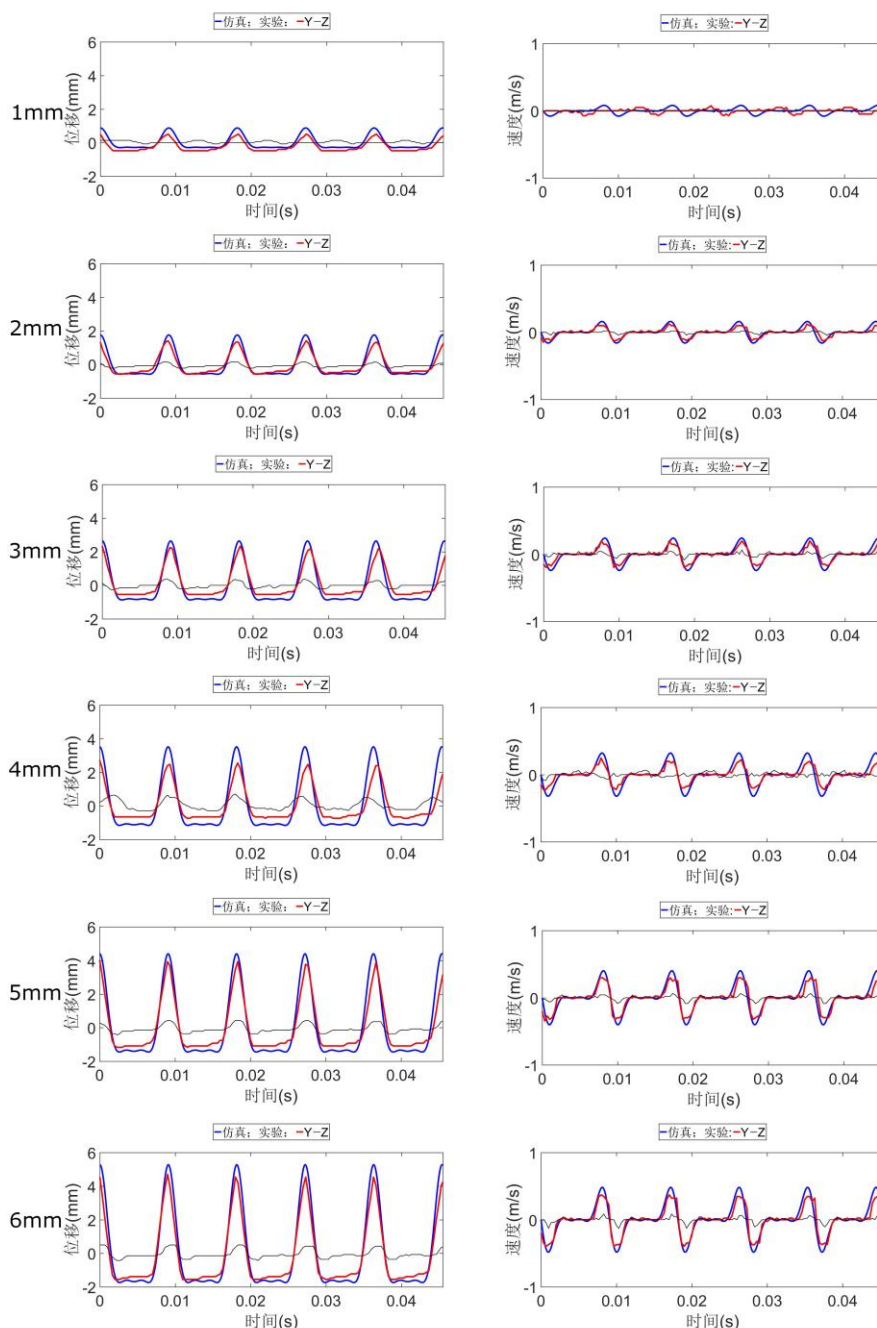


图 4.5 A 弦在不同弹拨位移下仿真特性与理论特性对比

图 4.5 显示了 A 弦在不同弹拨位移下五个周期内的实验得到的位移、速度波形与仿

真波形的对比情况。Y 方向为拨弦的主方向，实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显，但周期符合良好。A 弦五个周期时长为 0.0452 秒，平均振动周期为 0.00904s，求得 A 弦振动频率为 110.6Hz，与 A 弦基频 110Hz 非常接近。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.1.6 E 弦在不同弹拨位移下实验特性与仿真特性对比

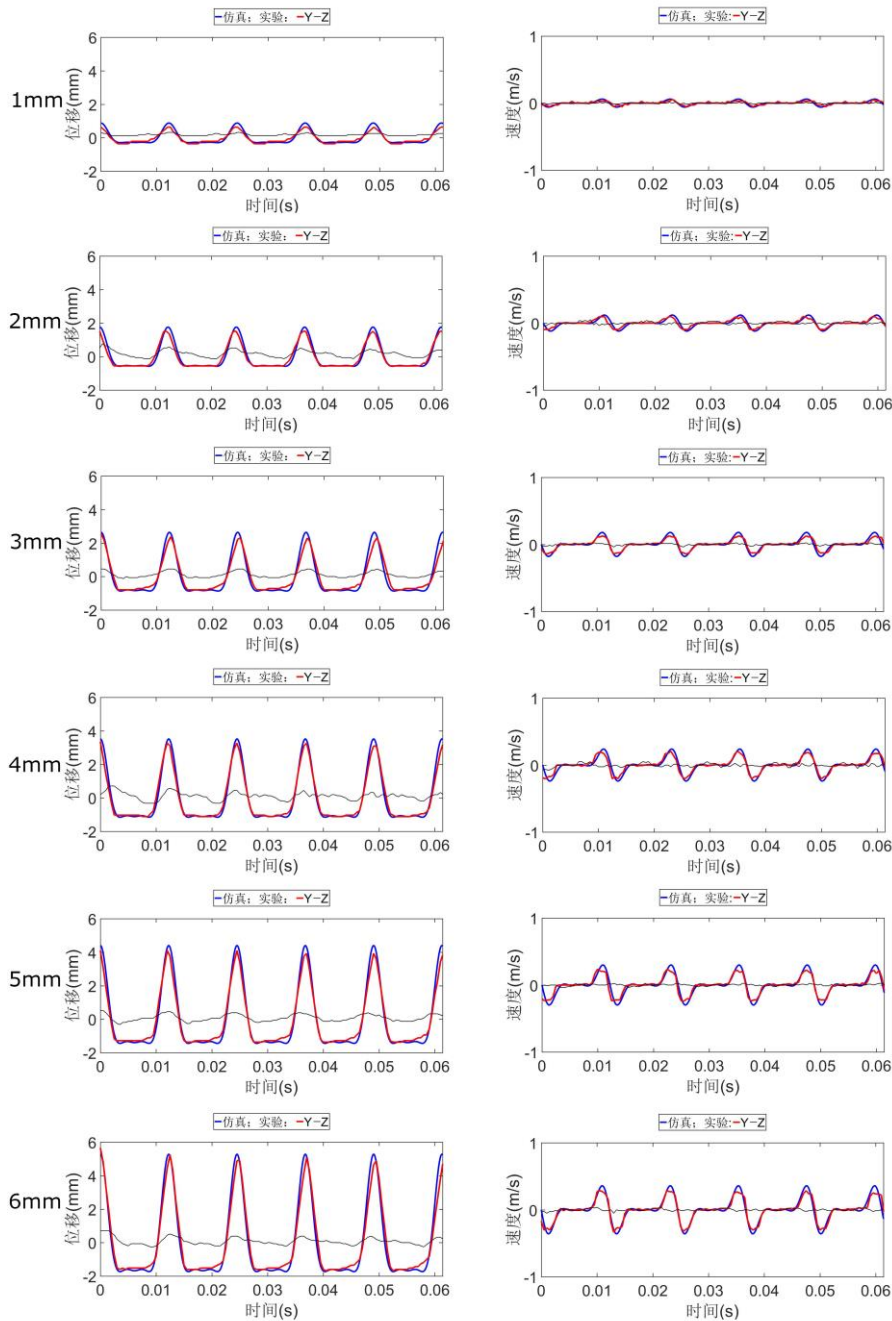


图 4.6 E 弦在不同弹拨位移下仿真特性与理论特性对比

图 4.6 显示了 d 弦在不同弹拨位移下五个周期内的实验得到的位移、速度波形与仿

真波形的对比情况。Y 方向为拨弦的主方向，实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显，但周期符合良好。E 弦五个周期时长为 0.061 秒，平均振动周期为 0.0122s，求得 E 弦振动频率为 82Hz，与 E 弦基频 82.4Hz 非常接近。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.2 不同弹拨位移下吉他各弦的振动衰减特性

4.2.1 e1 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

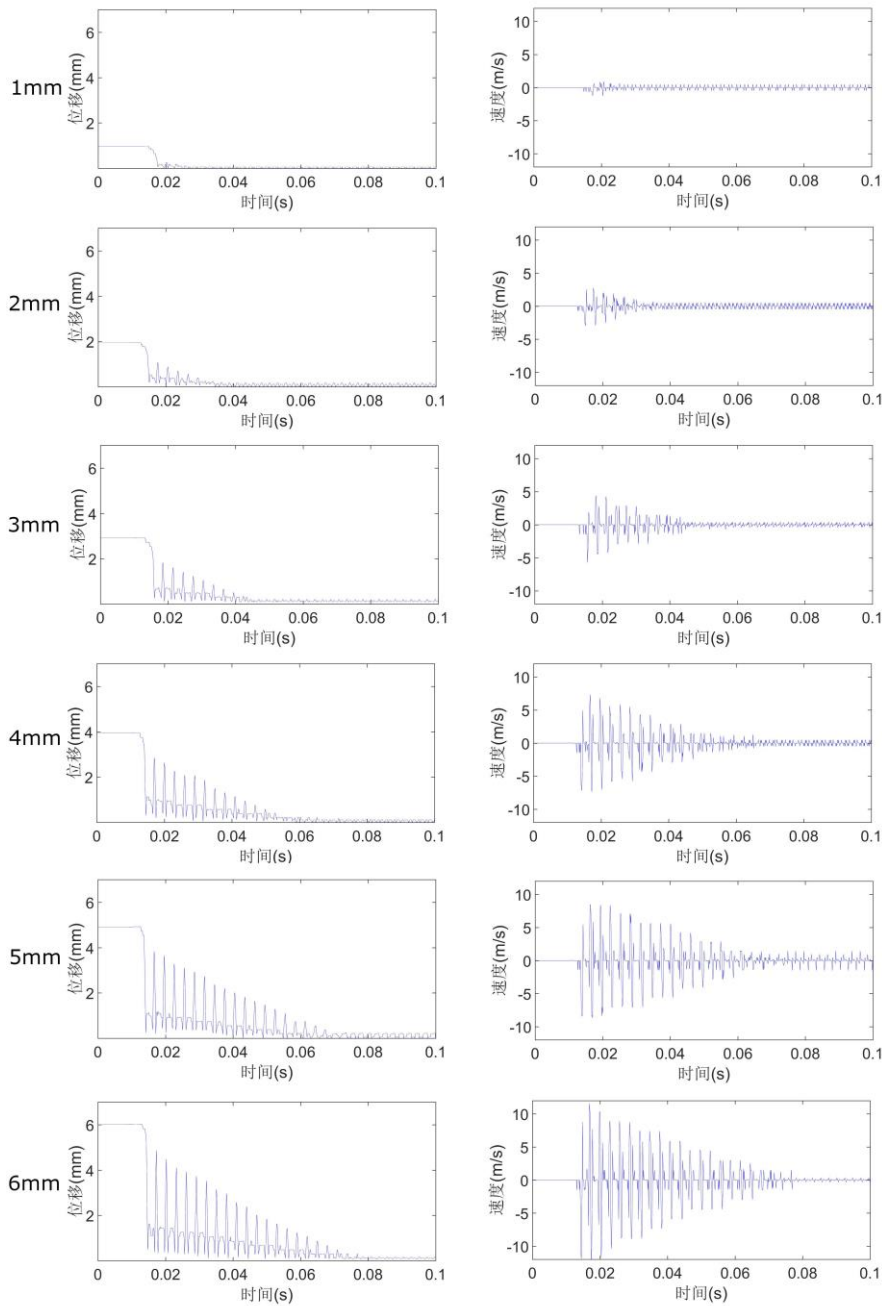


图 4.7 e1 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

图 4.7 显示了 e1 弦在不同弹拨位移下将 Y、Z 两个方向位移和速度合成后的波形的振动衰减情况。随着弹拨位移的增大，e1 弦的振动持续时间越来越长，弹拨位移为 1mm 时的持续时间只有 0.001s 左右，时间最短，弹拨位移为 6mm 时的持续时间为 0.06s 左右，时间最长。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.2.2 b 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

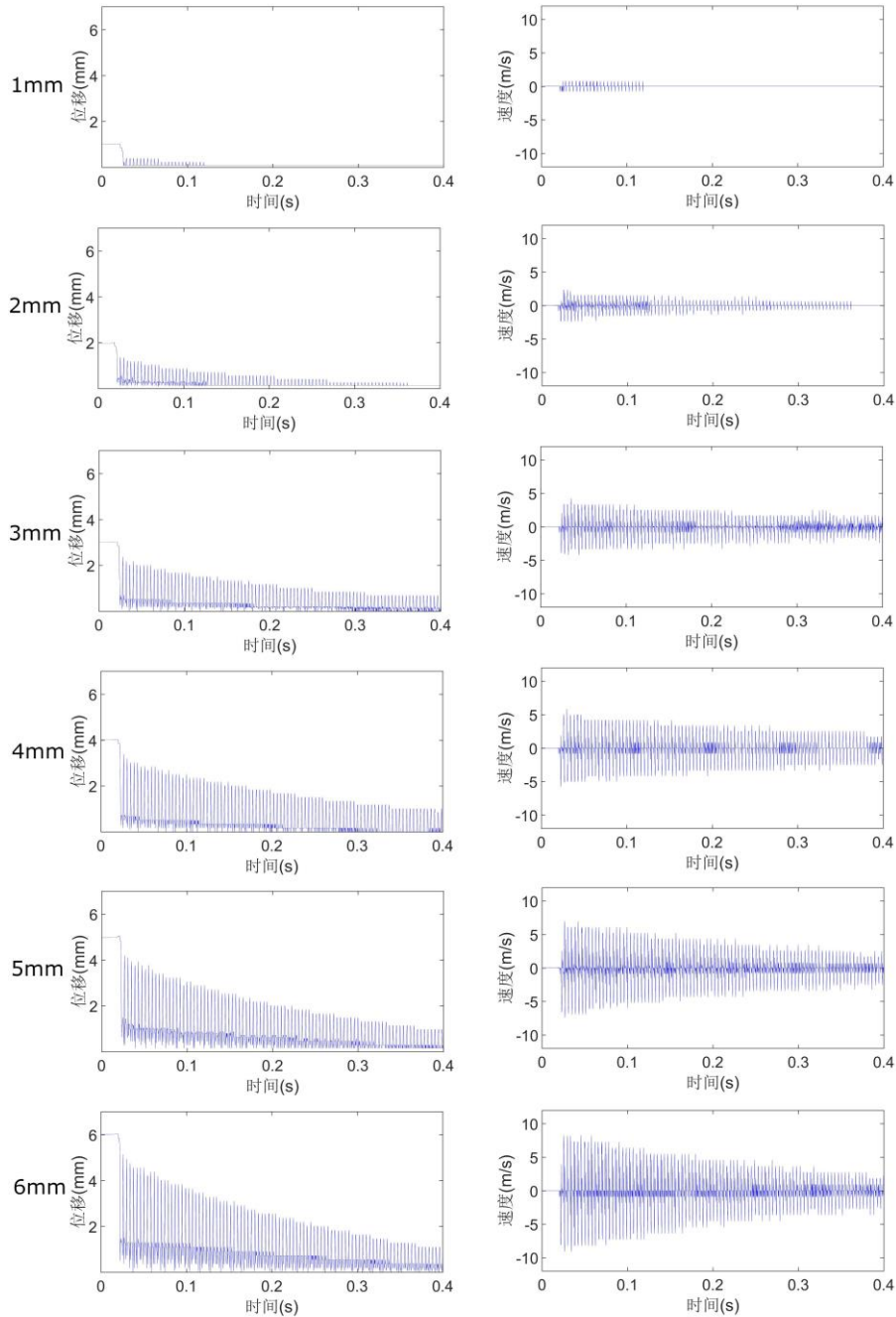


图 4.8 b 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

图 4.8 显示了 b 弦在不同弹拨位移下将 Y、Z 两个方向位移和速度合成后的波形的

振动衰减情况。随着弹拨位移的增大，b 弦的振动持续时间越来越长，弹拨位移为 1mm 时的持续时间为 0.01s 左右，时间最短，弹拨位移为 6mm 时的持续时间为 0.4s 左右，时间最长。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.2.3 g 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

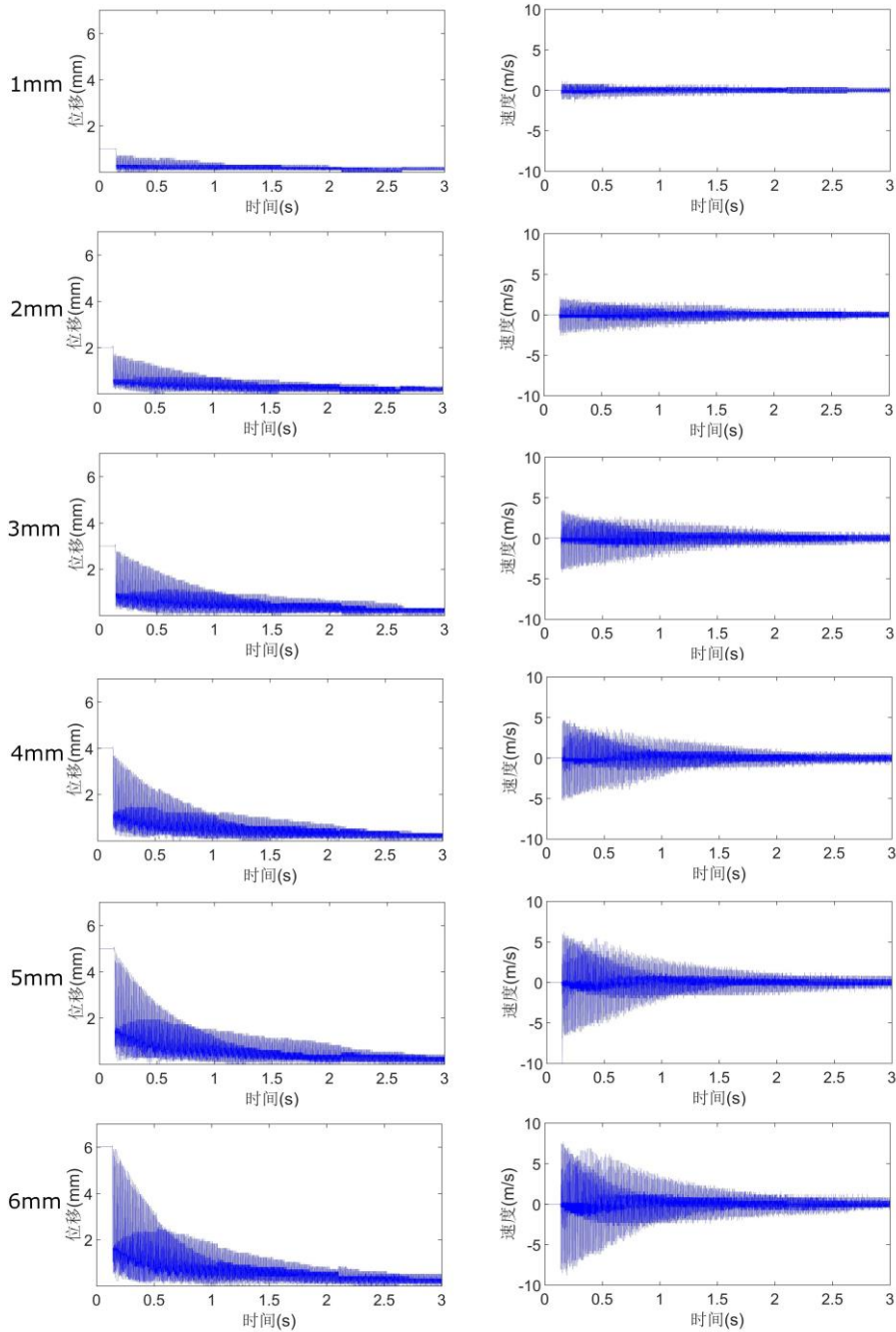


图 4.9 g 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

图 4.9 显示了 g 弦在不同弹拨位移下将 Y、Z 两个方向位移和速度合成后的波形的振动衰减情况。随着弹拨位移的增大，g 弦的振动持续时间越来越长，弹拨位移为 1mm

时的衰减情况较为平缓，随着弹拨位移的增大，逐渐出现骤降情况，且弹拨位移越大，骤降越剧烈。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.2.4 d 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

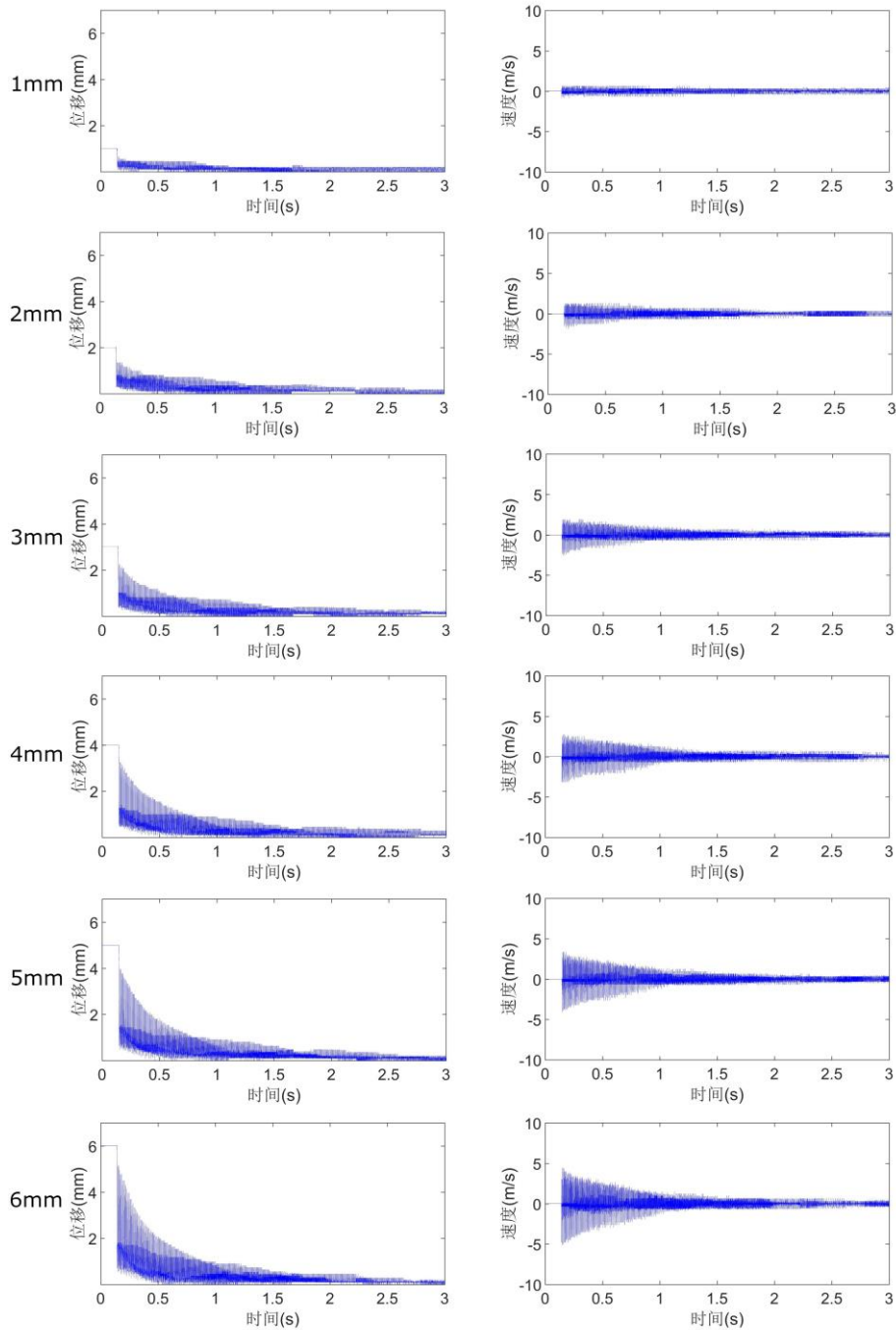


图 4.10 d 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

图 4.10 显示了 d 弦在不同弹拨位移下将 Y、Z 两个方向位移和速度合成后的波形的振动衰减情况。随着弹拨位移的增大，d 弦的振动持续时间越来越长，弹拨位移为 1mm

时的衰减情况较为平缓，随着弹拨位移的增大，逐渐出现骤降情况，且弹拨位移越大，骤降越剧烈。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.2.5 A 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

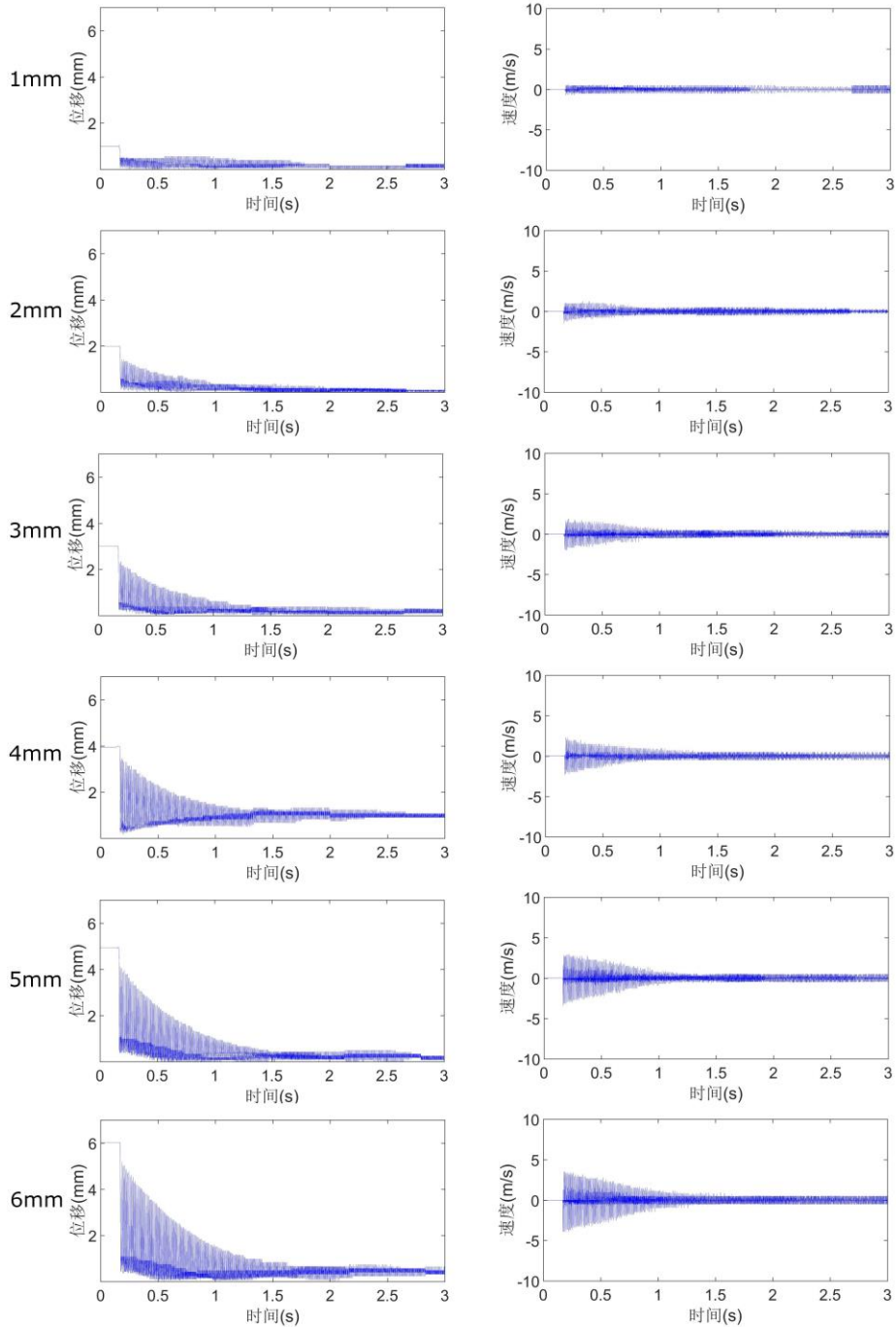


图 4.11 A 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

图 4.11 显示了 A 弦在不同弹拨位移下将 Y、Z 两个方向位移和速度合成后的波形的振动衰减情况。随着弹拨位移的增大，A 弦的振动持续时间越来越长，弹拨位移为 1mm

时的衰减情况较为平缓，随着弹拨位移的增大，逐渐出现骤降情况，且弹拨位移越大，骤降越剧烈。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

4.2.6 E 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

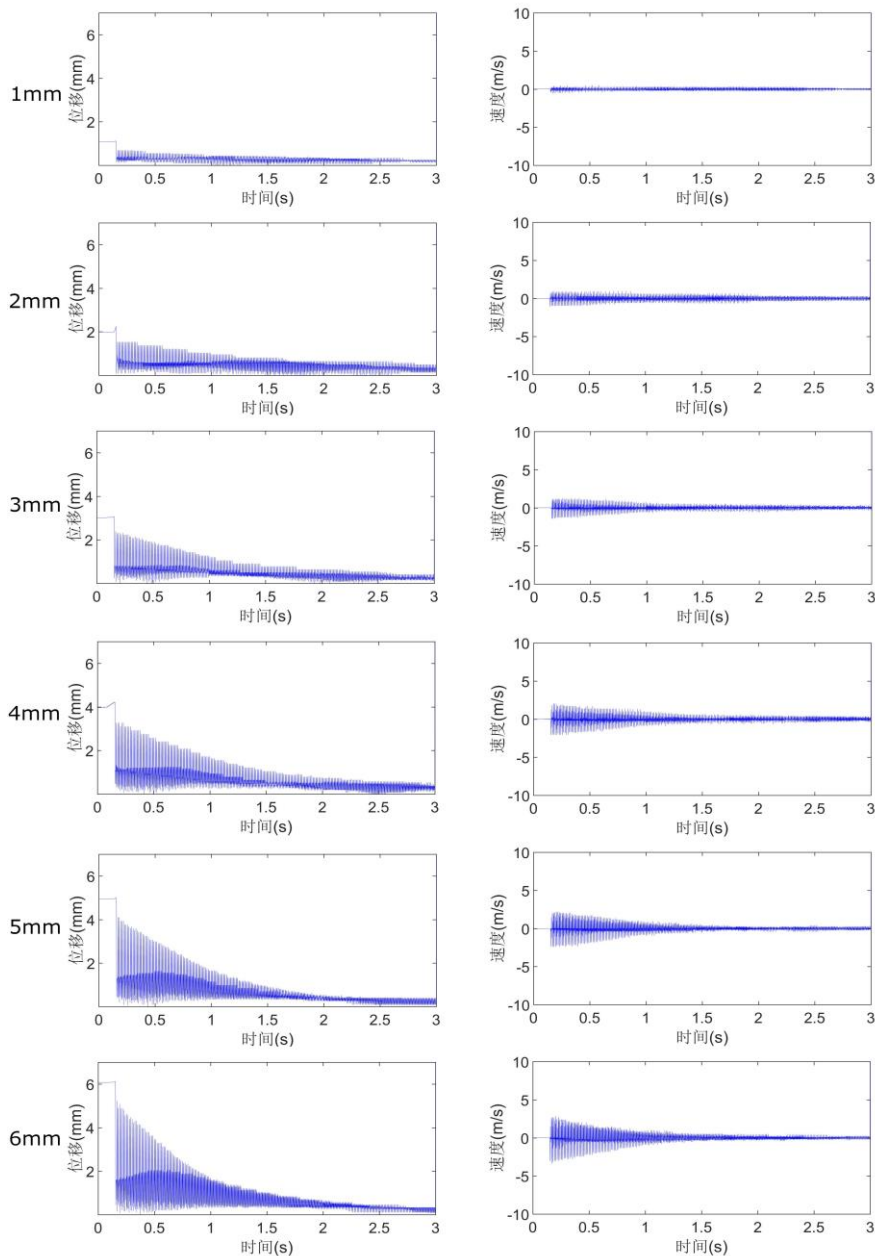


图 4.12 E 弦在不同弹拨位移下振动衰减特性

图 4.12 显示了 E 弦在不同弹拨位移下将 Y、Z 两个方向位移和速度合成后的波形的振动衰减情况。随着弹拨位移的增大，E 弦的振动持续时间越来越长，弹拨位移为 1mm 时的衰减情况较为平缓，随着弹拨位移的增大，逐渐出现骤降情况，且弹拨位移越大，骤降越剧烈。随着弹拨位移的增大，速度和位移波形的振幅也在不断增大。

根据实验数据总结发现，不同弹拨位移下的吉他琴弦在获得振动条件后都没有出现稳定阶段，只有衰减阶段，且衰减得都比较缓慢，弹拨位移越大，振动持续时间越长。对于裸弦来讲，振动持续时间很短，衰减程度较缠弦来讲更为剧烈一点。而对于缠弦，振动持续时间则比较长，衰减缓慢。

4.3 不同弹拨位移下吉他各弦声信号分析

4.3.1 波形图

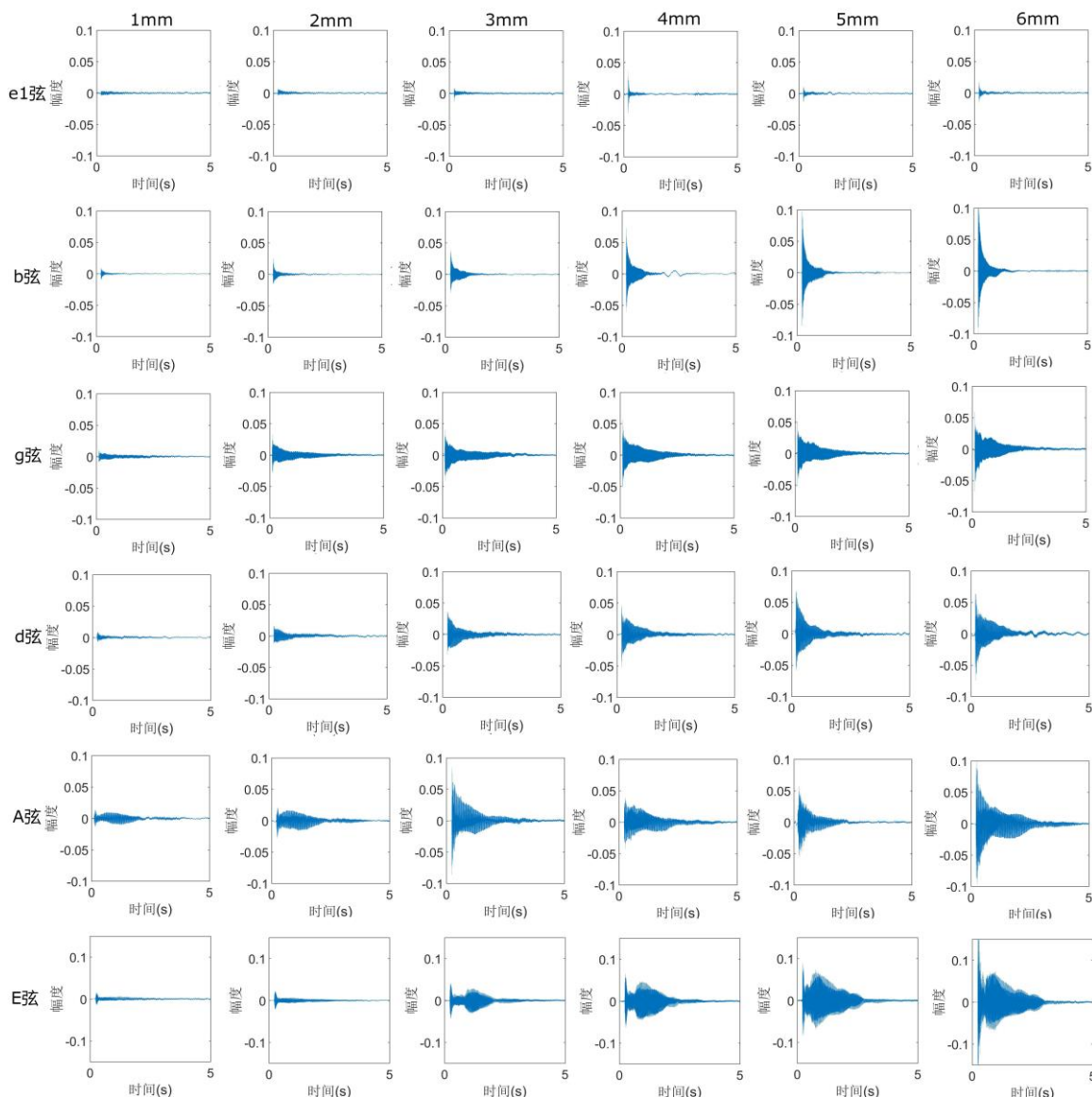


图 4.13 吉他琴弦在不同弹拨位移下的波形图

图 4.13 显示了吉他各弦在不同弹拨位移下声信号的波形图，随着弹拨位移的增大，各弦的波形振幅也逐渐增大。弹拨位移为 1mm、2mm 时，各弦振幅都较为平缓，A 弦振幅最大；弹拨位移为 3mm 时，e1 弦振幅最小，A 弦振幅最大；弹拨位移为 4mm、5mm、

6mm 时, e1 弦振幅最小, E 弦振幅最大。在弹拨位移较小时, A 弦振幅最大, 弹拨位移较大时, E 弦振幅最大。随着弹拨位移的增大, 各弦的振动衰减时间越来越长, e1-A 弦振幅都是逐渐衰减, 而 E 弦出现了先增后减的情况。

4.3.2 频谱图

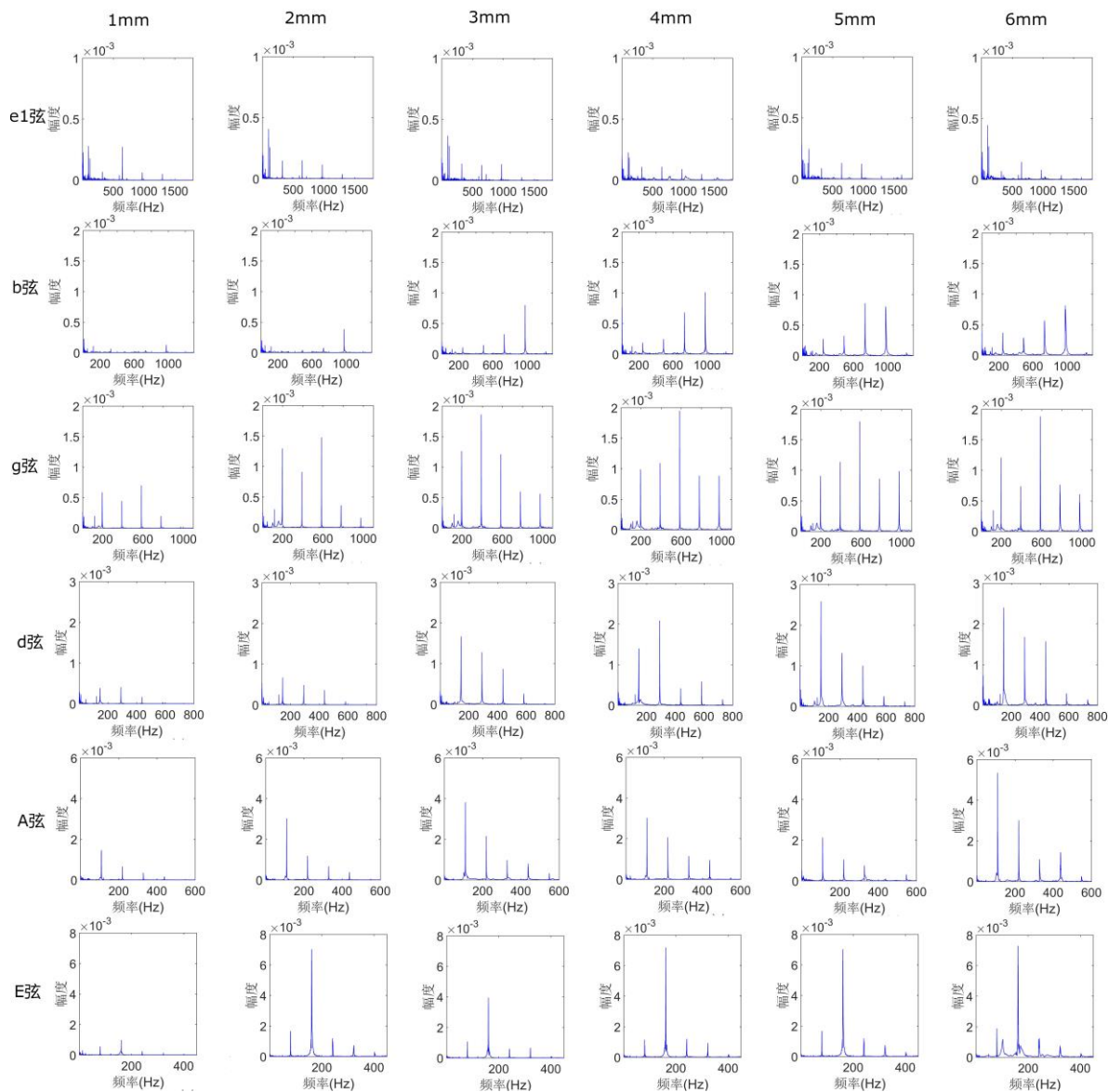


图 4.14 吉他琴弦在不同弹拨位移下的频谱图

图 4.14 为吉他各弦在不同弹拨位移下声信号的频谱图, 由于高次谐波人耳已不易听见, 因此本实验只讨论第一至第五谐波。对于 e1 弦, 第一、第二、第三谐波成分较高, 随着弹拨位移的增大, 谐波成分变化不太明显; 对于 b 弦, 第一、第二、第三、第四谐波成分较高, 第四谐波成分最高, 随着弹拨位移的增大, 各次谐波成分都逐渐增大; 对于 g 弦, 各次谐波成分都比较高, 第二、第三谐波成分较其他谐波成分更高一些; 对于

d 弦，第一、第二、第三谐音成分较高；对于 A 弦，第一、第二谐音成分较高；对于 E 弦，第二谐音成分最高。弹拨位移为 1mm 时，e1 弦和 g 弦谐波成分较为明显；弹拨位移为 2-6mm 时，g 弦谐波成分最明显。

4.4 谐音占比

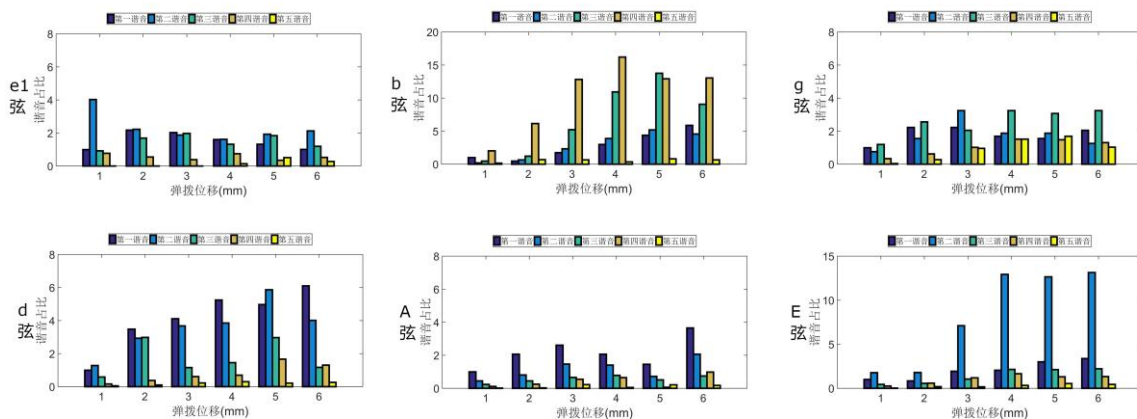


图 4.15 吉他琴弦在不同弹拨位移下的谐音占比

为了方便比较琴弦声学品质与弹拨位移的关系，用总谐音占比来定量表征琴弦在不同弹拨位移下该弦各谐音成分与初始位移为 1mm 时的基音成分的比值。对于 e1 弦，第一、第二、第三谐音的谐音占比较高，随着弹拨位移的增大，第五谐音的谐音占比逐渐增大；对于 b 弦，第三、第四谐音的谐音占比较高，随着弹拨位移的增大，第一、第二、第三谐音的谐音占比逐渐增加；对于 g 弦，各次谐音的谐音占比都比较明显，随着弹拨位移的增加，各次谐音的谐音占比逐渐增加；对于 d 弦，第一、第二、第三谐音的谐音占比较高，随着弹拨位移的增加，各次谐音的谐音占比逐渐增加；对于 A 弦，第一谐音的谐音占比较高，随着弹拨位移的增加，各次谐音的谐音占比逐渐增加；对于 E 弦，第二谐音的谐音占比较高，随着弹拨位移的增加，各次谐音的谐音占比逐渐增加。

4.5 小结

本章将不同弹拨位移下吉他琴弦振动的实验位移、速度特性与仿真结果进行了对比，发现周期符合良好，Y 方向为位移主方向，也符合良好，而 Z 方向位移较为微小，振动特性不太明显。分析了不同弹拨位移下吉他各弦的位移、速度振动衰减情况，发现不同弹拨位移下的吉他琴弦在获得振动条件后都没有出现稳定阶段，只有衰减阶段，且衰减得都比较缓慢，弹拨位移越大，振动持续时间越长。对于裸弦，振动持续时间很短，衰减程度较缠弦更剧烈一点；对于缠弦，振动持续时间则比较长，衰减缓慢。对声信号进行了时域、频域分析，定义了谐波占比，能更方便、直观的比较各谐音成分的变化情况。

第5章 结论与展望

针对目前在吉他声学品质方面缺乏系统的研究,本论文从振动和声学的角度研究了吉他琴弦在不同弹拨位移下的振动特性,通过理论建模、数值计算和实验验证的方法分析了弹拨位移对吉他声学品质的影响,并对声信号进行了时域、频域分析,探索从客观物理角度改善和评判吉他声学品质的方法。

5.1 主要研究成果

(1)经数值计算得到拨弦时吉他各弦在不同弹拨位移下5个周期内的弦振动仿真位移和速度的时域曲线,随着弦的粗度的增加、基频的减小,周期逐渐增,e1弦周期最短,E弦周期最长。对比各弦振动位移发现,相同弹拨位移下各弦振动位移差别不大;对比各弦振动速度发现,相同弹拨位移下e1弦振动速度最大,E弦振动速度最小。对于任意一根弦,随着弹拨位移的增大,各弦振动位移和速度的振幅都逐渐增大。

(2)将不同弹拨位移下吉他各弦实验得到的位移、速度波形与仿真波形进行对比,Y方向为拨弦的主方向,实验的振幅与周期与仿真结果符合情况良好,而Z方向位移较为微小,振动特性不太明显,但周期符合良好。随着弹拨位移的增大,速度和位移波形的振幅也在不断增大。

(3)将Y、Z两个方向位移和速度合成后得到琴弦的振动衰减情况,随着弹拨位移的增大,各弦的振动持续时间越来越长,且弹拨位移越大,随着弹拨位移的增大,速度和位移波形的振幅也在不断增大。不同弹拨位移下的吉他琴弦在获得振动条件后都没有出现稳定阶段,只有衰减阶段,且衰减得都比较缓慢,弹拨位移越大,振动持续时间越长。对于裸弦来讲,振动持续时间很短,衰减程度较缠弦来讲更为剧烈一点。而对于缠弦,振动持续时间则比较长,衰减缓慢。定义了谐波占比,能更方便、直观的比较各谐波成分的变化情况。

(4)分析不同弹拨力度下吉他各弦的频谱图发现,对于e1弦,第一、第二、第三谐波成分较高,随着弹拨位移的增大,谐波成分变化不太明显;对于b弦,第一、第二、第三、第四谐波成分较高,第四谐波成分最高,随着弹拨位移的增大,各次谐波成分都逐渐增大;对于g弦,各次谐波成分都比较高,第二、第三谐波成分较其他谐波成分更高一些;对于d弦,第一、第二、第三谐波成分较高;对于A弦,第一、第二谐波成分较高;对于E弦,第二谐波成分最高。弹拨位移为1mm时,e1弦和g弦谐波成

分较为明显；弹拨位移为 2-6mm 时，g 弦谐波成分最明显。

5.2 论文的主要创新点

建立了吉他结构的简化模型及动力学模型，并对吉他琴弦振动进行了仿真分析；从振动和声学角度对吉他弦振动进行了研究，搭建了非接触式光学测量系统，提出了一种可精确控制弹拨位移的方法；对吉他声信号进行了时域、频域分析，定义了谐波占比，为吉他声学品质的研究提供了评估和测量方法。

5.3 工作展望

基于高速摄影的非接触式光学实验系统可通过采用帧速更好的高速相机，来改善分辨率和帧速不可兼得的问题；进一步工作可对吉他琴弦设置不同的拨弦点，分析不同位置对琴弦进行弹拨对音质有什么影响；本文仅对吉他的琴弦进行了研究，下一步工作可对琴码、琴体等结构的振动特性或不同材料的琴弦、琴码、琴体的声学品质进行研究。

参考文献

- [1] 宋晓锐. 论吉他的演奏与技巧[J]. 大舞台, 2010, 000(011): 31
- [2] Legge K. A.. Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, 76(1): 5-12
- [3] Richardson B. E., Roberts G. W.. The adjustment of mode frequencies in guitars: a study by means of holographic interferometry and finite element analysis[J]. *SMAC 83 (Royal Swedish Academy of Music, Stockholm)* pp. 1985: 285-302
- [4] Woodhouse J.. On the synthesis of guitar plucks[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2004, 90(5): 928-944
- [5] Racardo R.. Vibration measurements in the classical guitar[J]. *Applied Acoustics*, 2002, 63(3): 311-322
- [6] 杨健. 走进琴弦的世界—谈近三千年来人类对琴弦的研究及引发的思考[J]. *自然杂志*, 2004(3): 177-183
- [7] 田泽林. 弦乐器的声学原理(一)[J]. *演艺科技*, 2006(3): 47-52
- [8] 龚镇雄. 音乐与物理[J]. *物理*, 1995, 24(9): 543-547
- [9] 张茂林, 刘金寿. 钢琴的音源[J]. *演艺科技*, 2012, 000(004): 50-56
- [10] Riera Robuste J.. Spatial hearing and sound perception in musical composition[J]. *Universidade De Aveiro*, 2014(5): 21-29
- [11] Neville N. H., Rossing T. D.. *The physics of musical instruments*[M]. Springer New York, 2010: 207-228
- [12] Thomas D., Rossing. *Springer Handbook of Acoustics*[M]. Springer New York, 2014: 575-592
- [13] 田泽林. 弦乐器的声学原理(二) [J]. *演艺科技*, 2006(4): 65-69
- [14] 陈小平. 声音与人耳听觉[M]. 中国广播电视出版, 2006: 158-176
- [15] 张春, 杨宁选. 固体均匀弦振动中数据处理与误差分析[J]. *物理通报*, 2018, 37(3): 74-78
- [16] 苗锟, 黄育红, 李康, 等. 弦振动形成驻波的规律和数据的 MATLAB 处理[J]. *大学物理实验*, 023(4): 75-76
- [17] 李生仁, 白琼燕, 杨军. 利用 Origin 分析弦振动形成驻波的规律[J]. *科教导刊(上旬刊)*, 2014(2): 191-193

- [18] Balazs Bank and Laszlo Sujbert. Modeling the longitudinal vibration of piano strings[J]. Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, 2003(3): 69-74
- [19] 刘宝利. 钢琴泛音剖析及其对八度音程的影响[J]. 乐器, 2011, 000(010): 26-29
- [20] Van M., Walstijn, Chatziioannou V.. Numerical Simulation of Tanpura String Vibrations[J]. International Symposium on Musical Acoustics, 2014(35): 152-158
- [21] Bremaud, Iris. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(1): 807-812
- [22] Chatziioannou V., Van Walstijn M.. Energy conserving schemes for the simulation of musical instrument contact dynamics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015(339): 262-279
- [23] Bradley K., Cheng M. H., Stonick V. L. Automated analysis and computationally efficient synthesis of acoustic guitar strings and body[C]. IEEE Assp Workshop on Applications of Signal Processing to Audio & Acoustics. IEEE, 1995(5): 11-17
- [24] Daisuke Naganuma, Hideyuki Nomura, Tomoo Kamakura. Theoretical analysis of two-dimensional vibration of single piano string using equivalent mechanical circuit models[J]. Acoustical Science and Technology, 2015(36): 286-295
- [25] 贾雄. 小提琴弦振动与琴体腔谐振研究[D]. 华南理工大学, 2013
- [26] Sandor Mehes, Maarten van Walstijn, Paul Stapleton. Towards a Virtual-Acoustic String Instrument[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016(15): 35-42
- [27] 刘颖. 小提琴振动机理及声学品质研究[J]. 神州(上旬刊), 2017, 000(028):45
- [28] 李子晋. 乐器声学品质评价方法研究[J]. 演艺科技, 2013(11): 16-19
- [29] Avanzini F., Marogna R.. A Modular Physically Based Approach to the Sound Synthesis of Membrane Percussion Instruments[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2010, 18(4): 891-902
- [30] 余征跃, 邓小伟, 姚卫平, 等. 从力学角度研究中国传统民族乐器[J]. 电声技术, 2017(Z4)
- [31] 张开明. 弦振动的研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2010(4): 96-99
- [32] 韩佩琦, 王文武, 刘天山. 弦振泛频分析及演奏中的泛音[J]. 河北科技大学学报, 2007, 28(3): 190-193

- [33] Skroče S., Kasać, Josip. Acoustic emission and vibrations signal analysis in drilling processes[J]. 2015(2): 58-66
- [34] 高淑英, 沈火明. 振动力学(第二版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016: 104-163
- [35] 李云芳. 扬琴弦振动的力学分析[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(3): 84-86
- [36] 邓小伟. 民族乐器古筝的结构振动声学特性分析[D]. 2015
- [37] 张承忠, 叶邦彦, 赵学智, 等. 用于提琴琴弦三维振动测量的高速摄影系统[J]. 光学精密工程, 2014, 022(009): 2329-2336
- [38] 张承忠, 叶邦彦, 梁立东. 小提琴弓弦系统的振动形态及振动机理研究[J]. 振动工程学报, 2015, 28(3): 359-365
- [39] 张承忠, 叶邦彦, 梁立东, 等. 基于高速摄影实验的小提琴琴弦三维振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2015(09): 191-195
- [40] Andy Adler, Fernando L., Podio, et al. Circular Hough Transform[M]. Encyclopedia of Biometrics. 2009
- [41] Ballard, D. H.. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes [J]. Pattern Recognition Society, 1981(13), 111-122
- [42] Behun L., Smetana M.. Coughing Record Analysis Using Matlab Signal Processing Toolbox[M]. Information Technologies in Medicine. 2016
- [43] 郑林启, 矫盼盼, 杜晓岳, 等. 不同弹拨力度下吉他弦振动频谱的研究[J]. 全国声学大会, 2018: 37(6): 533-534
- [44] Cohen Tenoudji F.. Analog and Digital Signal Analysis[M]. 2016: 33-41
- [45] 赵子萱. 不同触键方式下钢琴声音频谱研究[D]. 2016
- [46] 胡丽莹, 肖蓬. 快速傅里叶变换在频谱分析中的应用[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2011, 027(004): 27-30
- [47] Brigham E. O., Morrow R. E.. The fast Fourier transform[J]. Acoustics Speech & Signal Processing IEEE Transactions on, 2009, 4(12): 63-70

后 记

论文的顺利完成预示着我三年的硕士生活即将结束，也为我在母校的人生最美好的三年画上了圆满的句号。三年的时间太长太长，经历了太多事情，三年的时间又太短太短，转瞬即逝大家都已经要分开了。还清楚的记得迎来新同学时的欣喜，集体活动中的欢声笑语，紧张的学习中的忙里偷闲，学术创作中的绞尽脑汁，没课时的百无聊赖，寻找工作时的焦急万分。时光如水般流逝，忙得我们仿佛还没有看清同窗的彼此就又要踏上新的征程。

在此我要首先感谢我的导师庄桥副教授在三年研究生期间给予我的关怀与指导，他以严谨细致、一丝不苟的学术作风，循循善诱、不拘一格的教导风格深深的影响着我，也使我在学术方面不断进取、刻苦追求，使我终身受益。

感谢齐丽花老师在研究思路和实验设计方面的指导，给了我很多帮助和启发。

感谢理学院老师王凤翔老师、秦希峰老师、张宁玉老师、赵俊卿老师、李鲁艳老师、付刚老师、季艳菊老师、陈莹老师、宋洪胜老师、庄世栋老师。感谢他们在专业学习上给予的倾心传授，让我有了扎实的专业基础知识，也感谢他们在生活上给予我的无私帮助和照顾。

感谢我的同学们，三年来我们一起上课、一起完成各种任务，互相督促、互相帮助，在学习和生活上给了我多关心和支持。还要感谢我的师弟们，对我的实验给予了很多帮助，使实验能够顺利完成。

感谢远方的家人。他们一直是我生活中不可或缺的支柱。七年前，我带着理想也带着家人的嘱托来到了美丽的丽娃河畔，回想大学时的青涩，研究生生活的忙碌，过去的种种都历历在目，在心里升起的已不仅仅是感动，现在就要离开心中仍有隐隐的不舍。一路走来，永远不会忘记我在山东建筑大学度过了我人生最美好也最重要的几年，这也是我以后永远值得自豪的。

最后，祝愿各位老师和同学们身体健康心想事成!

攻读硕士学位期间论文发表及科研情况

[1] 矫盼盼, 袁威, 庄桥. 吉他 d 弦不同弹拨位移下振动特性及声学品质[J], 电子技术与软件工程, 2020,(01): 131-132

[2] Jiao Panpan, Qi Lihua, Zhuang Qiao. Study on Guitar d String Vibrations and Acoustical Quality under Different Plucking Displacements[C], 2020 4th International Conference on Digital Signal Processing, 2020

[3] 郑林启, 矫盼盼, 杜晓岳, 等. 不同弹拨力度下吉他弦振动频谱的研究[C], 2018 年全国声学大会

[4] 周泽奇, 杜晓岳, 矫盼盼, 等. 皮氏菊头蝠耳廓斜截结构声学功能的研究[C], 2018 年全国声学大会

[5] 王若宇, 杜晓岳, 矫盼盼, 等. 马铁菊头蝠喂养过程中语音信号特征研究[C], 2018 年全国声学大会