

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.018

钢琴乐声仿真频谱模型研究*

曹莎莎 吴永忠 程文娟

(合肥工业大学 计算机与信息学院 合肥 230009)

摘要: 频谱模型的乐音仿真是运用声学理论,由一系列基本函数及其时变幅度乘积的迭加来实现乐器的发声。通过对钢琴琴弦振动和衰减特性的分析以及共鸣箱共振作用的探讨,提出了一种新的数字化钢琴乐音仿真技术,仿真模型由激励系统和共振系统两部分组成。系统以琴弦振动方程为基础,先进行时域上的包络修饰,以模拟琴弦振动的自然衰减,这样可以使乐音各音符间衔接和谐;然后在频域上以频谱包络建模滤波器组,实现共振系统的仿真,对音色进行修饰。该方法能更为有效的雕刻声音,同时较好的表现音色,从而使乐音听起来更加和谐。

关键词: 弦振动; 时域包络; 共振系统; 频谱包络

中图分类号: TN912.16; J611.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on piano sound simulation spectrum model

Cao Shasha Wu Yongzhong Cheng Wenjuan

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Musical simulation based on spectrum model is the use of acoustic theory that can achieve musical instrument's sounds by sum of products of a series of basic functions and time-varying amplitude. A new digital piano sound simulation technique is proposed by analyzing piano string vibration and damping characteristics and investigating the resonance effect of resonance box. The simulation model consists of two parts: the excitation system and the resonance system. Based on the vibration equation of the strings, the envelope modification of time domain is carried out to simulate the natural attenuation of the strings, which can make music harmonious between the notes. Then, the filter group is modeled by spectrum envelope in frequency domain to achieve the simulation of resonance system. This new method can more effectively carving voice, has better performance timbre at the same time, therefore, it makes the sound more harmonious.

Keywords: string vibrations; time-domain envelope; resonance system; spectral envelope

1 引言

乐音合成的研究早在1940年就开始了,目前主要有^[1-5]波表合成(wavetable synthesis)、频谱合成(spectral synthesis)、非线性合成(nonlinear synthesis)以及物理模型(physical model)等几种仿真合成技术。

频谱合成法在乐器仿真、声音合成领域日趋占据重要的地位,其基本原理是一系列基本函数及其时变幅度乘积的迭加。它的研究完全致力于对音频信号本身时频

特性的描述。常用的频谱合成法有:加法合成^[6-7]、减法合成^[8-9]、粒度合成^[10-11]等。加法合成^[12]是一种经典的算法,广泛地用于乐器音色的研究。合成声由正弦波分量叠加而得,正弦波参数包括时变的幅度和频率。由一系列谐波组成的准周期音乐信号特别适合这种算法。正弦波分析是通过计算短时傅里叶变换、搜索频谱峰值、在相邻的分析帧之间进行峰值的匹配来构成正弦波轨迹等一系列步骤来实现的。该方法^[13]较简单,易行,但其需要大量的控制参数,合成的音色单一。减法合成可以过滤掉或者衰减某一频率成分形成我们所希望的频谱形

状,但是其谐波成分不能很好地通过滤波噪声来近似描述。

通过系统地分析钢琴的发声原理、琴弦振动以及共鸣箱的作用,基于上述理论,本文综合提出了一种新的方法,这种方法在加法合成的基础上,对用短时均方根能量提取的时域包络采用曲线拟合法得到准确的包络函数,然后进行时域上的修饰;其次,乐器的音色主要来源于共振体的修饰,频谱包络是共振体的主要体现,通过倒谱法提取钢琴各音符的频谱包络以此作为频率响应建模滤波器对乐音进行频域上的进一步修饰。该方法既克服了加法合成中的噪声使乐音各音符间连续,同时又雕刻了声音,使乐音听起来更加和谐,接近真实乐器。

2 仿真系统总体模型

2.1 钢琴物理发声机理

钢琴^[14]是结构最为复杂、功能最为强大的乐器,主要由琴键和击锤、琴弦、共鸣箱组成。它的基础音源是琴弦,演奏者通过琴槌激发琴弦振动的方式,令琴弦产生声音。共鸣箱则对来自琴弦的原发性声波产生响应,利用声学共振原理使声波的振幅放大,透过材质的滤波,将声波大面积地辐射出去。琴槌与弦振动共同决定钢琴基音频率和基本音色,共鸣箱则选择频率和放大声音,决定钢琴的音色。

2.2 仿真系统结构组成

如图 1 所示,钢琴乐声仿真系统总体模型主要由激励源和共振系统两大部分组成,其实现过程是以一系列正弦波叠加的加法合成模拟琴弦振动作为激励源,为了使乐音仿真更加逼真,分别从时域和频域两个层面进行音色修饰。在时域上,以时域包络的形式表现琴弦的自

然衰减;在频域上,频谱包络是共振体的主要体现,根据频谱包络建模滤波器组实现共振系统的有效仿真,从而合成乐音。

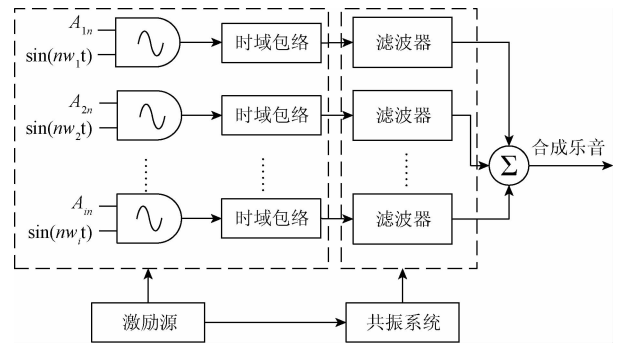


图 1 仿真系统总体模型

Fig. 1 Overall model of simulation system

3 激励源仿真建模

3.1 琴弦振动建模

琴弦的振动是由琴槌激发的。钢琴的琴槌本身连着琴键,当琴键被按下时,琴槌便会打落在琴弦上并借着琴弦的振动使钢琴发声。正常演奏情况下,弦槌对琴弦施力的位置只限于弦槌和琴弦接触的那一小段,击弦的时间十分短促。

设琴弦长为 l , 两端固定, 现在用宽度为 $2d$ 的余弦形凸槌敲击琴弦。敲击点为 $x = x_0$ 处, 弦的运动初速度为 v_0 , 弦振动的加速度为 a , 弦振动时间为 t 。由于是余弦形凸面槌, 因此在敲击瞬间 x_0 点获得的速度最大, 而在 $x = x_0 - d$ 和 $x = x_0 + d$ 两点速度为 0, 此后弦开始自由振动, 弦的振动可归结为定解问题^[15], 如式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} & (0 < x < l, t > 0) \\ u|_{x=0} = u|_{x=l} = 0 \\ u|_{t=0} = \varphi(x) = 0 \\ \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \psi(x) = \begin{cases} 0, & (0 \leq x < x_0 - d, x_0 + d < x \leq l) \\ v_0 \cos \frac{x - x_0}{2d} \pi, & (x_0 - d \leq x \leq x_0 + d) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

解方程组(1)得到钢琴弦槌击弦的弦振动方程^[16]为:

$$u(x, t) = \frac{8v_0 d}{\pi^2 a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{1}{1 - \frac{4d^2 n^2}{l^2}} \sin \frac{n\pi x_0}{l} \cos \frac{n\pi d}{l} \sin \frac{n\pi a t}{l} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (2)$$

采集钢琴第 49 号琴键单音信号,利用傅里叶变换进行分析,获其频域波形,这是一典型的钢琴单音频谱图,

如图 2 所示。从图 2 可知,钢琴频谱中充满了大量倍频振动,这是钢琴音色浑厚浓郁的原因。钢琴单音的振动能量分散于多个频点上,其中基频能量最高,在 2 倍频、3 倍频、4 倍频等处都具有较大的振动能量。从钢琴弦振动的方程来解析,钢琴弦整体振动产生的最低的音是基音,在发出基音的同时,钢琴弦 1/2、1/3、1/4 等各部分也在同时振动,产生了泛音。从而得知,钢琴音色由复杂频谱中的泛音所决定。

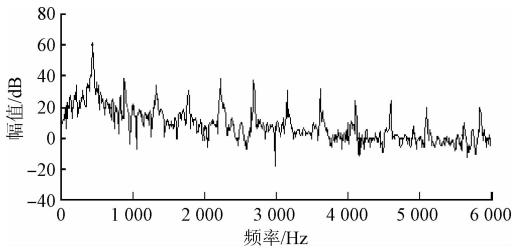


图 2 钢琴单音 a1 频谱图

Fig. 2 The spectrum of the piano tone a1

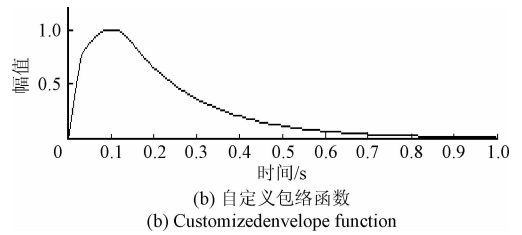


图 3 钢琴单音时域波形及包络函数

Fig. 3 Time waveform of the piano tone and envelope function

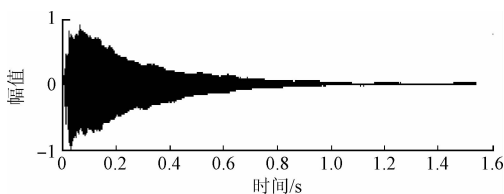
3.2 琴弦衰减包络建模

理想的弦是以一种较为简单的振动模式——简谐振动来完成振动的。它是一种没有衰减的正弦曲线。但实际上,由于受材料、边界条件、外部阻力等因素的影响,琴弦受迫振动后,它的振幅随时间的推移而变得越来越小(图 3(a)),可以用时域的包络来描述。时域包络体现了乐音在演奏过程中振幅随时间的变化,一般由 4 部分组成,即 ADSR^[17]:起音(attack),表示声音波形前沿上升时间;衰减(decay),表示上升之后的衰减时间;保持(sustain),对于持续声音,它表示释放模式前所维持的幅值,对于衰减声音,它表示衰减模式与释放模式的交汇点;释音(release),对于持续声音,释放率为定义键释放后声音的消失时间。对于衰减声音,释放率表示持续振幅点之后的衰减时间。

每种乐器都有其独特的发音方式,对应着不同的时域包络^[18],因此时域包络的提取对特定乐器的仿真起重要作用。对于钢琴信号的时域包络,本文通过计算均方根能量得到相应的时域振幅包络^[19],表达式如下:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2} \quad (3)$$

式中: $x(n)$ 为 1 帧离散时域信号, N 为帧长。对信号进行分帧后,求出每一帧的短时均方根能量,得到时域幅度包络,进而采用曲线拟合来确定包络函数。图 3(b) 所示即为求得的自定义包络函数。由图可知该函数的形状极其柔和,前段振动能量上升较快,保证了合成乐音的高效发音,随着时间的延长,振动能量逐渐下降,在当前音符发音时间结束时,振动能量恰好降为 0,为演奏下个音符做好准备,避免了音符切换时相位差异发生的杂音。



(a) 钢琴单音时域波形图
(a) Time waveform of piano tone

4 共振系统仿真建模

无论是声乐还是器乐,共振都在其中起着决定性的作用,音乐艺术离不开“共振”^[20],甚至可以这样说,没有共振就没有音乐。钢琴琴弦的音调是由琴弦的振动频率所决定的,并由琴弦与共鸣箱体的共振而增强声波和丰富音色的。同样道理,歌唱家也是利用自身各种共鸣腔体(喉腔、胸腔、口腔、鼻腔)的共振来演唱出动人的歌声。共鸣箱的作用就是利用声学共振原理将琴弦发出音源的振幅放大,透过材质的滤波,将声波大面积地辐射出去,从而使乐器的音色得以润饰、音量得以集中和增强。

参照语音信号的源-滤波器模型^[21],在乐器中,激励源对应于产生振动的声源,决定乐音的音高;滤波器则对应共振体部分,对音色起重要作用。音色能将音高、强弱和时长都相同的两种乐器所发出的声音区分开来,其关键在于各次谐波的幅度(频谱包络)的不同,频谱包络中包含着主要的音色信息。乐器的音色主要来源于共振体的修饰。因此,乐器共鸣状态的研究可体现在乐音频谱包络形状上,可以通过研究信号的频谱包络获取共振体的信息,从而为乐音仿真奠定基础。

本文采用倒谱法^[22]进行频谱包络的提取,倒谱定义为信号频谱取对数后的傅里叶反变换,它是同态分析的有力工具。对信号获取频谱包络的流程如图 4 所示。

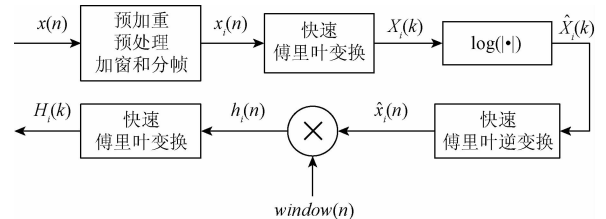


图 4 倒谱法获取乐音信号频谱包络的流程

Fig. 4 Flow chart of the music signal spectrum envelope obtained by opposed spectrum

为了使提取的包络更加精确,本文采用预加重技术,并在倒频谱上设置一个低通的窗函数,将激励信号对包络的影响降到最低,以保证声道传输函数信息的准确体

现,从而得到频谱包络的估计。钢琴不同单音信号提取频谱包络的结果如图 5 所示。表 1 为对应单音信号第一共振峰频率。比较各图以及表中数据可知,对于不同的单音信号,谐波的位置虽然会随音高的不同而发生变

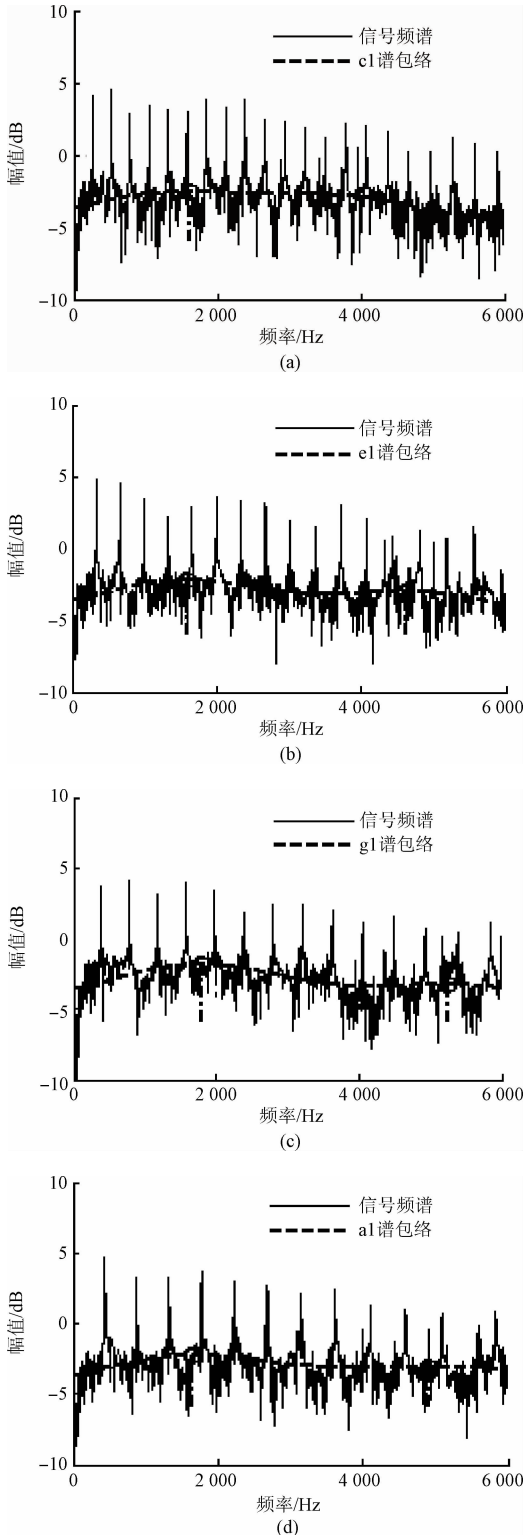


图 5 钢琴部分单音信号提取的频谱包络
Fig. 5 Spectrum envelope of the piano single tones

表 1 共振峰点数据

Table 1 Formant frequency data

音符	e1	e1	g1	a1
第一共振峰点/Hz	1 613.22	1 594.76	1 690.38	1 649.57

化,但频谱包络的形状几乎保持不变。因此,我们可以利用提取的频谱包络作为滤波器的频率响应设计对应的滤波器组。

5 实验验证和分析

本实验选用钢琴 C 大调的一段乐音进行仿真,其主要实现步骤如下。

1) 根据 C 大调乐曲《两只老虎》的一段简谱图(图 6),利用“十二平均律^[23]”计算各个音符对应的基音频率,并采集钢琴 C 大调(do、re、mi、fa、so、la、si)各单音素材,分别进行傅里叶变换^[24],获得各次谐波的频率以及归一化幅值。表 2 表示各单音信号频谱数据(二次、三次…分别指二次谐波、三次谐波,频率的单位为 Hz,幅值均指归一化幅值)。

$$1=C \frac{4}{4}$$

1 2 3 1 | 1 2 3 1 | 3 4 5 - | 3 4 5 - |
两只老虎, 两只老虎, 跑得快, 跑得快,

图 6 《两只老虎》简谱图

Fig. 6 Chords of “the two tigers”

2) 计算音符的时长。在简谱中,不同的音符具有不同的长度。音符可分为全音符、二分音符、四分音符、八分音符、十六分音符等。可以通过识别每个音符的外形来判断节拍数,从而得到每个音符的时长。如在图 7 所示的简谱图中,4/4 表示以四分音符为一拍,每一节四拍。在第 1 小节中每个音符各占一拍,第 3 小节中前两个音符各占一拍,第 3 个音符占两拍。根据简谱图可知每小节的节拍数,一拍大约 0.5 s^[25],从而求得每个音符的持续时间。表 3 即为简谱图中对应音符的时长。

3) 根据上述得到的频谱数据利用加法合成将一系列正弦波叠加在一起合成一段乐音信号,分别采用指数包络和自定义包络函数进行时域上的修饰,然后将以频谱包络建模的滤波器对合成信号做频域上的修饰,对比各合成乐音的时频域波形图,并试听其效果。

图 7 所示为钢琴乐音仿真的时域波形图,其中图 7(a)为指数形包络乐音仿真;图 7(b)为自定义时域包络函数乐音仿真;图 7(c)为本文时域包络和滤波器同时修饰的乐音仿真信号。与前面相比,本文方法处理后的乐音信号各音符间切换平顺,单个音符自身变化柔和,且信号部分有所增强。同时听起来也更加柔和,接近于真实钢琴乐。

表2 C大调频谱数据
Table 2 C major spectrum data

		do	re	mi	fa	so	la	si
基频	频率	261.8	293.7	329.7	349.2	392.3	440.1	493.92
	幅值	0.044 0	0.076 8	0.172 3	0.133 9	0.082 4	0.126 2	0.112 8
二次	频率	523.5	587.1	659.8	699.2	784.3	880.8	988.51
	幅值	0.080 1	0.042 4	0.050 0	0.034 7	0.034 4	0.015 2	0.013 8
三次	频率	786.0	882.2	989.8	1 050.1	1 179.3	1 320.6	1 482.67
	幅值	0.016 4	0.010 3	0.015 7	0.006 7	0.005 9	0.006 2	0.005 7
四次	频率	1 048.1	1 177.9	1 318.1	1 396.2	1 569.2	1 760.9	1 976.68
	幅值	0.008 1	0.021 9	0.004 7	0.006 1	0.010 3	0.004 4	0.004 1
五次	频率	1 313.5	1 467.6	1 647.9	1 745.8	1 646.5	2 201.2	2 469.98
	幅值	0.005 4	0.018 1	0.007 3	0.009 4	0.009 0	0.005 9	0.005 5
六次	频率	1 570.2	1 761.5	1 977.3	2 095.2	1 975.8	2 640.7	2 964.75
	幅值	0.006 3	0.003 2	0.006 7	0.004 2	0.001 8	0.004 3	0.003 8
七次	频率	1 832.4	2 055.1	2 307.2	2 444.2	2 746.5	3 080.8	3 458.42
	幅值	0.012 9	0.009 8	0.002 5	0.005 8	0.003 3	0.001 6	0.001 4

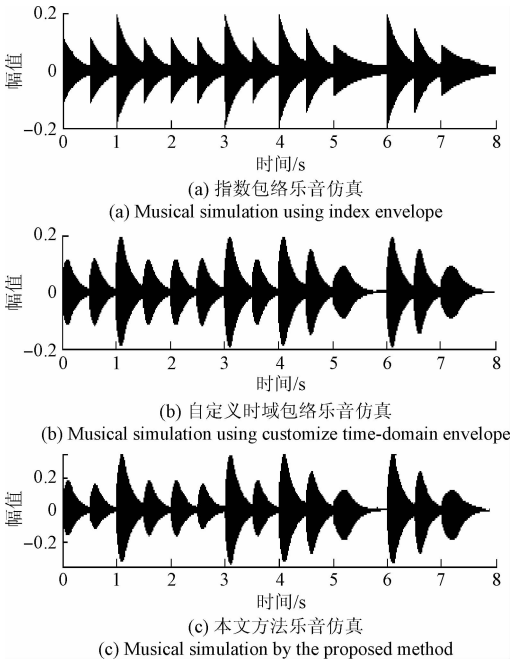


图7 时域波形图

Fig. 7 Time waveforms

表3 简谱图对应的音符时长

Table 3 Chords corresponding note duration

音符	1	2	3	1	1	2	3
时间/s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
音符	1	3	4	5	3	4	5
时间/s	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.5	1

是本文时域包络和以频谱包络建模的滤波器共同修饰得到的乐音信号语谱图。语谱图可以更直观的看出不同频段的信号强度随时间的变化情况,经过比较,本文方法较好的表现了时间分辨率,清楚地显示了谐波结构,同时增强了低频以及中频段的信号分量,也衰减了高频噪声分量,使乐音音色得到了一定的改善,听起来更加和谐,浑厚。

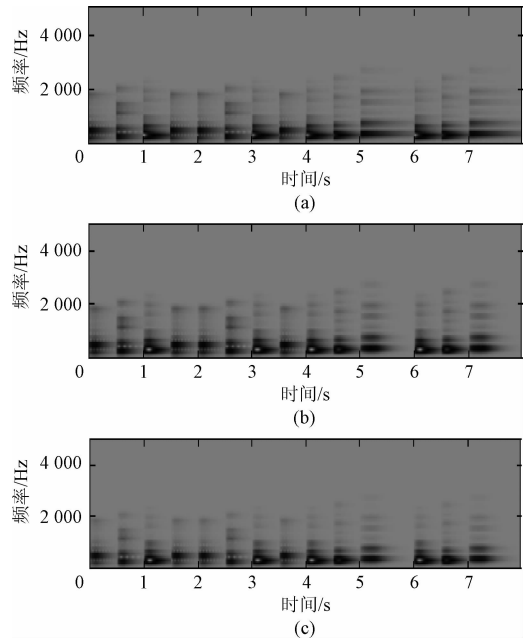


图8 语谱图

Fig. 8 Spectrograms

对应乐音信号的语谱图如图8所示,其中横轴表示时间,纵轴表示频率。图8(a)是指数形包络乐音信号的语谱图;图8(b)为自定义时域包络信号语谱图;图8(c)

为了进一步验证本文方法的有效性,本文采用线性残差倒谱法^[26]对合成乐音信号进行基音频率检测,将检测结果与简谱图中各音符基音频率理论值进行比较,得

其准确率,如表4所示。为了简化,表中只显示部分音符基音频率。

$$\text{准确率} = 1 - \frac{|\text{检测值} - \text{理论值}|}{\text{理论值}} \times 100\% \quad (4)$$

表4 检测结果

Table 4 Test results

简谱图中的各音符	理论值/Hz	检测值/Hz	准确率/%
1	261.63	262.11	99.82
2	293.66	293.02	99.78
3	329.63	330.12	99.85
1	261.63	262.11	99.82
3	329.63	331.58	99.41
4	349.23	352.8	98.98
5	392	393.75	99.56

从表4中可以看出,本文方法合成的乐音信号与真实钢琴乐器各音符的理论值非常接近,准确率平均达到了99%,此数据证明了本文方法的有效性以及模拟钢琴发声的准确度。

6 结 论

本文通过研究钢琴发声原理、弦振动以及共鸣箱的作用,基于频谱合成的基本理论,根据一段C大调乐谱的各音符基频和各次谐波频率以及持续时间等参数按一定规则输入,在加法合成的基础上,实现一种乐器的数字化仿真。并根据乐音振动能量的衰减以及共鸣箱的作用分别从时域和频域两个方向对乐音仿真进行音色的改善。实验结果证明,时域包络和频域包络的有效结合,使仿真的乐音听起来更加圆润,和谐,接近真实乐器。本文提出的频谱模型仿真对C大调的乐曲得到了有效的验证,限于篇幅和巨大的工作量对于其他音调的钢琴乐曲将在后续得到进一步的验证。

参考文献

- [1] MIRANDA E R. Computer Souns Design: Synthesis Techniques and Programming [M]. London: Taylor & Francis, 2012.
- [2] LEE C, HORNER A, BEAUCHAMP J. Discrimination of musical instrument tones resynthesized with piecewise-linear approximated harmonic amplitude envelopes [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2012, 60(11): 899-912.
- [3] BENEDETTO J J. Spectral Synthesis [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [4] SIDDIQ S. A physical model of the nonlinear sitar string [J]. Archives of acoustics, 2012, 37(1): 73-79.
- [5] TRAUTMANN L, PETRAUSCH S, RABENSTEIN R.

Physical modeling of drums by transfer function methods [C]. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE, 2001, 5: 3385-3388.

- [6] 胡书翰. 解密频谱——频谱作曲中的音响观念 [J]. 音乐艺术, 2010(3): 125-130.
- HU SH H. Decryption spectrum the sound ideas of spectral composition [J]. Musical Arts, 2010 (3): 125-130.
- [7] WEN X, SANDLER M. Fast additive sinusoidal synthesis with a subband sinusoidal method [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(5): 467-470.
- [8] PEKONEN J, VALIMAKI V, NAM J, et al. Variable fractional delay filters in bandlimited oscillator algorithms for music synthesis [C]. International Conference on Green Circuits and Systems (ICGCS), IEEE, 2010: 148-153.
- [9] SHIRAZI J, GHAEMMAGHAMI S, RAZZAZI F. Improvements in audio classification based on sinusoidal modeling [C]. International Conference on Multimedia and Expo, IEEE, 2008: 1485-1488.
- [10] JAMES S. A multi-point 2D interface: audio-rate signals for controlling complex multi-parametric sound synthesis [C]. Proceedings of New Interfaces for Music Expression, 2016.
- [11] FORBES A, VILLEGAS J. Creative applications of microvideos [C]. International Academy, Research and Industry Association, 2014.
- [12] 周宏, 潘亚涛, 陈健. 计算机合成音乐的历史与发展 [J]. 计算机工程, 2001, 27(3): 62-65.
- ZHOU H, PAN Y T, CHEN J. History and development of computer music synthesis [J]. Computer Engineering, 2001, 27(3): 62-65.
- [13] 吴永忠. 基于物理模型的声音合成技术理论研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- WU Y ZH. Theoretical research on sound synthesis technique based on physical model [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [14] 姜丽颖. 钢琴音色之我见——从音乐声学的角度浅析钢琴弹奏方法与音色的关系 [J]. 黑龙江科技信息, 2011 (36): 276-276.
- JIANG L Y. Analysis of the relationship between the method of playing piano and the sound from the angle of musical acoustics [J]. Heilongjiang Technology Information, 2011 (36): 276-276.
- [15] LIU T, SUN S, PAN Y. Emotional recognition for chime bell music [C]. International Conference on Systems, Man and Cyber-Netics, IEEE, 2004, 1: 568-573.

- [16] 韩佩琦. 弦乐器泛音的分析及应用[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2006,24(4):503-506.
HAN P Q. String of harmonic analysis and application[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science Edition,2006,24(4):503-506.
- [17] 毛春静,关永,刘永梅,等. 数字音乐合成器的研究与设计[J]. 计算机工程与应用,2009,45(6):89-91.
MAO CH J, GUAN Y, LIU Y M, et al. Research and design of digital synthesis[J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(6): 89-91.
- [18] 平利川. 频域分辨率和时域包络周期性对音乐音高分辨的影响[J]. 声学学报,2012(3):325-329.
PING L CH. Frequency resolution and time domain envelope periodic impact on music pitch resolution[J]. Acta Acustica,2012(3): 325-329.
- [19] 王琪. 西洋乐器的音色识别[D]. 济南:山东大学,2015.
WANG Q. Timbre recognition of western instruments[D]. Ji'nan: Shandong University,2015.
- [20] 朱嘉星. 乐器音响仿真及虚拟技术研究[D]. 北京:中央音乐学院,2013.
ZHU J X. Study on simulation technology of the musical instrument sound [D]. Beijing: Central Conservatory of Music,2013.
- [21] 刘若伦,张家琦. 乘法模型下西洋乐器音色特征[J]. 声学技术,2009(3):269-275.
LIU R L, ZHANG J Q. Timbre features of western instrument under multiplication model[J]. Technical Acoustics, 2009(3):269-275.
- [22] GOLD B, MORGAN N, ELLIS D. Speech and Audio Signal Processing: Processing and Perception of Speech and Music[M]. New York:John Wiley & Sons, 2011.
- [23] 黄力民. 对十二平均律的解读与平均律原则的确立[J]. 天津音乐学院学报,2008,(2):25-28.
HUANG L M. The interpretation of twelve-tone equal temperament and the establishment of the average principle[J]. Journal of Tianjin Conservatory of Music, 2008(2):25-28.
- [24] 布雷斯韦尔. 殷勤业,张建国译. 傅里叶变换及其应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005.
BRACEWELL R N. YIN Q Y, ZHANG J G, Trans. The Fourier Transform and its Application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005.
- [25] 程美芳. 钢琴音色识别与电子合成系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2014.
CHENG M F. Design and realization of piano timbre recognition and electronic synthesis system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology,2014.
- [26] 钱博,李燕萍,唐振民,等. 一种基于线性预测残差倒谱的基音检测算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(32):210-213.
QIAN B, LI Y P, TANG ZH M, et al. Research of pitch detection based on LPC-residual cepstrum. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(32): 210-213.

作者简介



曹莎莎,1991年出生,合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向计算机音乐的分析与合成。

E-mail:caoshasha_yq@163.com

Cao Shasha was born in 1991, M. Sc. candidate in Hefei University of Technology.

Her main research field is computer music analysis and synthesis.



吴永忠,1964年出生,毕业于合肥工业大学获得博士学位,现为合肥工业大学计算机与信息学院教授/硕导,主要研究方向电子工程与红外技术,计算机音乐合成与分析。

E-mail:wyz64@163.com

Wu Yongzhong was born in 1964, received Ph. D. from Hefei University of Technology, professor and M. Sc. tutor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His present research interests include electrical engineering and infrared technology, computer music synthesis and analysis.