

基于双全正弦的计算机乐器音色建模

曹西征 冯乃勤 张聪品

(河南师范大学计算机与信息技术学院 新乡 453007)

摘要 提出了一种基于双全正弦的计算机乐器音色模型,以达到通过调节参数来改变计算机乐器音色的目的。该模型包括振动物模型和振幅包络子模型。保持了振幅包络参数取值不变,定义了调节音色的参数,分别为振幅系数、周期系数和方差系数。在 VC++ 环境下,利用一维离散余弦变换获取该模型在不同参数下的频谱。通过分析音色参数对频谱的影响,找到这些参数对乐器音色的作用规律。实验表明,在振幅系数和周期系数都相等时,可将音高整体提高一个 8 度。在振幅系数和周期系数其中之一不等时,方差的值越大,音色的频谱就越丰富,乐器音色就越响亮;反之音色就越暗淡。对计算机乐器音色的合成和音乐的计算机生成具有一定的科学意义和实用价值。该模型简单,便于推广。

关键词 计算机乐器,音色模型,双全正弦,离散余弦变换

中图分类号 TP399 **文献标识码** A

Timbre Modeling of Computer Musical Instrument Based on Double-Total-Sine

CAO Xi-zheng FENG Nai-qin ZHANG Cong-pin

(College of Computer and Information Technology, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract This paper presented a timbre model of computer musical instruments based on the double-total-sine, in order to make it possible that the instrument timbre can be controlled by modulating the parameters. This model includes two sub models, the vibration model and the amplitude envelope model. We made the parameter values of the amplitude envelope invariable during analyzing the model. We defined the timbre parameters, including the amplitude coefficient, the cycle coefficient and the variance coefficient. And we got the frequency spectrums of the model in different parameters using one dimensional discrete cosine transform in VC++ environment. We found the rules of the parameters acting on the instrument timbre, by analyzing how the timbre parameters influence on the frequency spectrums. The experiments show that the total pitches can increase one octave if both the amplitude coefficient and the cycle coefficient are equal. And increasing the variance coefficient can make the frequency spectrums abundant, if one of the parameters, the amplitude coefficient and the cycle coefficient, is unequal; thus the instrument timbre is bright, contrarily the timbre is faint. So it is of important scientific significance and practical value for the timbre composition of computer musical instruments and the music generation by computer. This model is simple, so it can be popularized.

Keywords Computer musical instrument, Timbre model, Double-total-sine, Discrete cosine transform

1 引言

音色是赖以判定两个具有同样响度和音高的稳态音之间区别的一种听觉属性^[1]。音色是音乐的 4 种基本要素之一,是音乐中一种非常重要的表现手段。因此,对音色的建模分析具有重要的实际意义。然而,目前关于音乐建模的研究很少^[2],对计算机乐器音色方面的研究还非常薄弱^[3]。

计算机乐器因其音色的无限性使得它成为通用乐器的主要选择^[4]。大多数的传统乐器在设计上主要面向某个特定的单独场合^[5]。为了使计算机乐器产生众多的音色,本文建立了一个基于双全正弦的音色模型,然后在振幅包络参数确定

的情况下,分析该模型中各参数取值对音色的影响,也就是参数取值的多样性决定了乐器音色的多样性。对音乐的计算机生成和音色的计算机合成有重要的实用价值和指导意义。

2 双全正弦音色模型的建立

计算机乐器的音色在客观上主要取决于频谱特性和振幅包络特性^[6],为此音色的建模也是基于这两个立足点,分别建立振动物模型和振幅包络子模型,前者决定了频谱特性,后者决定了振幅包络特性。

2.1 振动物模型

建立振动物模型,如式(1),该模型在一个周期内的曲线

到稿日期:2008-09-02 本文受国家自然科学基金资助项目(60873104),河南省科技攻关项目(082102210107),河南师范大学引进博士科研启动基金(0716)资助。

曹西征(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机音乐技术、多媒体技术,E-mail:caoxizheng@126.com;冯乃勤(1953-),男,博士,教授,主要研究方向为人工智能;张聪品(1968-),女,硕士,副教授,主要研究方向为人工智能。

如图 1 所示。

$$A(t) = \begin{cases} A_1 \sin(2\pi \cdot t/t_0) & 0 \leq t \leq t_0 \\ A_2 \sin[2\pi \cdot t/(T-t_0)] & t_0 < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

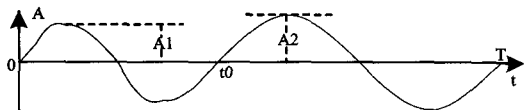


图 1 双全正弦曲线

图 1 给出的模型是由两个在水平方向无任何偏移的全正弦曲线组成, A_1, A_2 分别为两段正弦函数的数字化的振幅峰值, t_0 为两段正弦函数的时间分界点。 T 为振动周期, 它决定了振动的频率, 即某音符的绝对音高。 设 T_1, T_2 分别为两段全正弦的周期, 则 $T_1 = t_0, T_2 = T - t_0$ 。

式(1)中, 令两段全正弦的振幅系数分别为 $c_{A1} = A_1/A_0, c_{A2} = A_2/A_0$ (其中 A_0 为固定的数字化振幅值, 本文在实验时取 4500, 数字量化位数为 16bit, 采样频率 44.1kHz); 周期系数分别为 $c_{T1} = T_1/T = t_0/T, c_{T2} = T_2/T = (T-t_0)/T$ 。 同时为了方便描述参数的取值对音色的影响, 引入另外两个派生参数, 即振幅系数方差 S_A^2 和周期系数方差 S_T^2 , 如式(2)和式(3)。

$$S_A^2 = \frac{1}{2} [(c_{A1} - \overline{c_A})^2 + (c_{A2} - \overline{c_A})^2] \quad (2)$$

$$S_T^2 = \frac{1}{2} [(c_{T1} - \overline{c_T})^2 + (c_{T2} - \overline{c_T})^2] \quad (3)$$

式(2)中, $\overline{c_A}$ 为振幅系数的平均值; 式(3)中, $\overline{c_T}$ 为周期系数的平均值。

2.2 振幅包络子模型

建立振幅包络子模型, 如式(4), 该模型在一个包络周期内的曲线如图 2 所示。

$$c_A(t) = \begin{cases} k_1 t & 0 \leq t < t_1 \\ k_2 t - k_2 t_2 + c_{A2} & t_1 \leq t < t_2 \\ k_3 t - k_3 t_3 + c_{A3} & t_2 \leq t < t_3 \\ c_{A3} \exp[-\alpha(t-t_3)] & t \geq t_3 \end{cases} \quad (4)$$

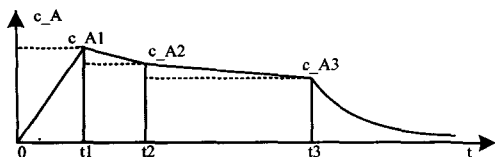


图 2 振幅包络曲线

式(4)中, 设 c_{A1}, c_{A2}, c_{A3} 分别为 t_1, t_2, t_3 对应的振幅包络系数; k_1, k_2, k_3 分别为前 3 段的斜率, 其中 $k_1 = c_{A1}/t_1, k_2 = (c_{A2} - c_{A1})/(t_2 - t_1), k_3 = (c_{A3} - c_{A2})/(t_3 - t_2)$; α 为第 4 段的声音衰减因子。 在实际应用时, 为了方便描述, 再定义时间系数 c_{t1}, c_{t2}, c_{t3} 和包络周期 T_E , 其中 $c_{t1} = t_1/T_E, c_{t2} = (t_2 - t_1)/T_E, c_{t3} = (t_3 - t_2)/T_E$ 。 将模型(4)中的包络系数乘到模型(1)中数字化的幅度值, 即可获取实际的声音波形。

本文主要讨论在振幅包络系数确定时, 振动子模型中参数取值对音色的影响。 为此, 在模型分析时振幅包络系数始终保持不变, 具体的包络参数取值为: T_E 取一拍的时间(以四分音符为一拍), 本文取 0.6 秒; $c_{t1} = 0.05; c_{t2} = 0.1; c_{t3} =$

0.1; $c_{A1} = 1; c_{A2} = 0.75; c_{A3} = 0.6$ 。 下面分析振动子模型中参数的不同取值对音色的影响。

3 双全正弦音色模型的分析

在 VC++ 环境下, 采用 WINDOWS 下的低级音频函数实现对 WAV 音频数据的播放等操作^[7]。 因为低级音频函数可直接与音频驱动程序交互, 提供了一个设备无关的接口, 控制比较灵活。 数字音频格式为: 采样频率取 44.1kHz, 量化位数为 16bit, 双声道^[8]。 利用一维离散余弦变换(DCT)^[9]获取频谱, 样本个数为 2000。 在分析频谱时所采用的音均为小字一组的 g_1 , 根据十二平均律, 可推算出此音的基音频率为 392Hz, 即 $f_0 = 392\text{Hz}$ 。

在包络参数确定情况下, 讨论参数 $c_{A1}, c_{A2}, c_{T1}, c_{T2}, S_A^2$ 和 S_T^2 的选取对乐器音色的影响。 将这些参数分为 7 种情况:

- (1) $c_{A1} = c_{A2}$, 且 $c_{T1} = c_{T2}$;
- (2) $c_{A1} = c_{A2}$, 且 $c_{T1} \neq c_{T2}$;
- (3) $c_{T1} = c_{T2}$, 且 $c_{A1} \neq c_{A2}$;
- (4) $c_{A1} > c_{A2}$, 且 $c_{T1} > c_{T2}$;
- (5) $c_{A1} < c_{A2}$, 且 $c_{T1} < c_{T2}$;
- (6) $c_{A1} < c_{A2}$, 且 $c_{T1} > c_{T2}$;
- (7) $c_{A1} > c_{A2}$, 且 $c_{T1} < c_{T2}$;

3.1 振幅系数和周期系数都相等

即上面的第(1)种情况, 此时 $T_1 = T_2 = T/2$, 因此此时振动频率 $f = 2f_0 = 784\text{Hz}$, 即为小字二组的 g_2 音的基音频率, 恰好比 g_1 高 8 度。 这时在声音频谱中只有一个频率为 784Hz 的泛音, 如图 3 所示。

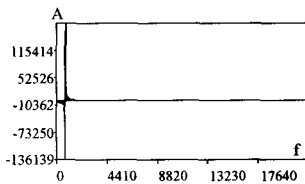


图 3 $c_{A1} = c_{A2}$ 且 $c_{T1} = c_{T2}$

3.2 振幅系数相等但周期系数不等

即上面的第(2)种情况, 这里主要分析在振幅系数相等且一定时, 周期系数方差在不同取值时对音色的影响。 取 $c_{A1} = c_{A2} = 3$, 同时分别取 $S_T^2 = 0.01$ ($c_{T1} = 0.6, c_{T2} = 0.4$) 和 $S_T^2 = 0.09$ ($c_{T1} = 0.8, c_{T2} = 0.2$) 时的频谱如图 4-1 和图 4-2 所示。

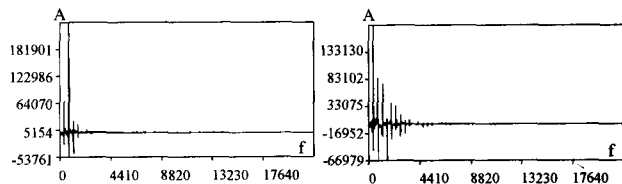


图 4-1 $S_T^2 = 0.01$ ($c_{A1} = c_{A2} = 3$) 图 4-2 $S_T^2 = 0.09$ ($c_{A1} = c_{A2} = 3$)

图 4-1 和图 4-2 中, 最左边的峰即是 $f_0 = 392\text{Hz}$ 的基音(第一谐波); 第二个峰的频率 $f = 784\text{Hz}$, 是基音频率的二倍, 为第二谐波; 第三个峰的频率 $f = 1176\text{Hz}$, 为第三谐波, 依此

类推。

从这两幅图可以看出,在周期系数方差较小时,第二谐波的振幅最大,这是因为在方差较小时,两个全正弦在波形上比较接近,相当于产生了两个相当的全正弦波,因此频率加倍,表现出来的效果为趋向第二谐波。而随着周期系数方差的增大,频谱向中高频部分扩展,第二谐波有所减弱,在音色上表现为逐渐响亮,因此周期系数方差可以作为调节乐器声音亮暗程度的一项指标。

3.3 周期系数相等但振幅系数不等

即上面的第(3)种情况,此处分析在周期系数相等且一定时,振幅系数方差在不同取值时对音色的影响。取 $c_{T1}=c_{T2}=0.5$,同时分别取 $S_A^2=0.25(c_{A1}=3,c_{A2}=4)$ 和 $S_A^2=4(c_{A1}=1,c_{A2}=5)$ 时的频谱如图 5-1 和图 5-2 所示。

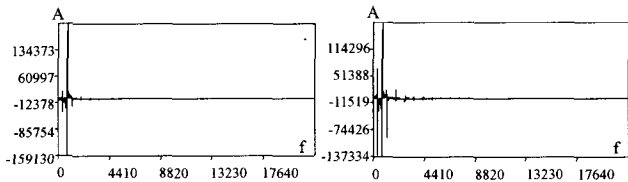


图 5-1 $S_A^2=0.25$ ($c_{T1}=c_{T2}=0.5$) 图 5-2 $S_A^2=4$ ($c_{T1}=c_{T2}=0.5$)

从图 5-1 和图 5-2 可以看出,在振幅系数方差较小时,第二谐波的振幅最大,这与图 4-1 在原理上基本相同。随着振幅系数方差增大,频谱向低高频部分扩展,在音色上表现为逐渐浑厚,因此振幅系数方差可以作为调节乐器声音浑厚程度的一项指标。

另外,比较图 4-1 和图 5-1 以及图 4-2 和图 5-2,可以看出,相对于振幅系数方差来说,音色对周期系数方差比较敏感,因此下面分析的基本思路是确保振幅系数一定,在周期系数方差改变时音色的变化情况。

3.4 振幅系数和周期系数都不等且大小同向

即上面的第(4)和第(5)种情况,分析在振幅系数不等相等且一定时,周期系数方差在不同取值时对音色的影响。取 $c_{A1}=4,c_{A2}=2$,同时分别取 $S_T^2=0.01(c_{T1}=0.6,c_{T2}=0.4)$ 和 $S_T^2=0.09(c_{T1}=0.8,c_{T2}=0.2)$ 时的频谱如图 6-1 和图 6-2 所示。

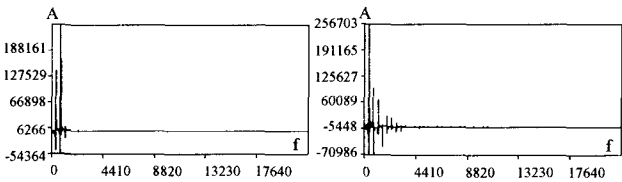


图 6-1 $S_T^2=0.01$ ($c_{A1}=4,c_{A2}=2$) 图 6-2 $S_T^2=0.09$ ($c_{A1}=4,c_{A2}=2$)

3.5 振幅系数和周期系数都不等且大小反向

即上面的第(6)和第(7)种情况。取 $c_{A1}=5,c_{A2}=1$,同时分别取 $S_T^2=0.01(c_{T1}=0.4,c_{T2}=0.6)$ 和 $S_T^2=0.09(c_{T1}=0.2,c_{T2}=0.8)$ 时的频谱如图 7-1 和图 7-2 所示。

比较图 6-1 和图 6-2 以及图 7-1 和图 7-2,可以看出,在振幅系数不等且一定时,随着周期系数方差的增加,频谱都向高频方向扩展,而且在系数大小为反向状态时的频谱要比系数

大小为同向状态时的频谱丰富。图 6-1 表现出来的音色效果比较暗淡,而图 7-2 的音色效果浑厚且响亮。当然,对计算机乐器音色的喜好程度取决于不同类群体对音色的理解状况。

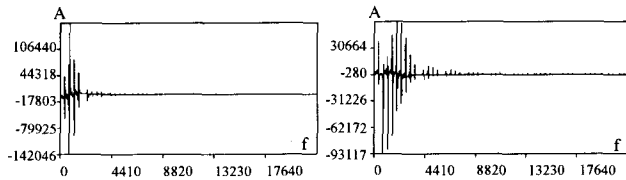


图 7-1 $S_T^2=0.01$ ($c_{A1}=5,c_{A2}=1$) 图 7-2 $S_T^2=0.09$ ($c_{A1}=5,c_{A2}=1$)

4 实验

通过上面的分析,可以获取参数与音色效果的作用规律。因此,在掌握了基本作用规律的基础上就可以利用已有的音乐作品的乐谱信息去测试这种计算机乐器音色模型的声音效果。

下面以一首乐段《敢问路在何方》为例,取一定的参数,即 $c_{A1}=4,c_{A2}=1,S_T^2=0.04(c_{T1}=0.3,c_{T2}=0.7)$,调号取 $1=D$,每分钟写 100 拍。然后对乐谱进行编码,包括对调号、相对音高、绝对音高、音符时值、音符进行编码,振幅包络参数的取值依然不变。在 VC++ 环境下,将乐谱信息写入,则生成《音色实验_敢问路在何方.wav》的乐曲文件,该乐曲中的乐器只有一种,就是本文中的音色模型表达的乐器。该乐曲一个声道的波形如图 8 所示。

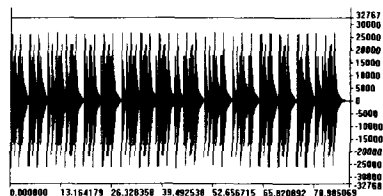


图 8 《音色实验_敢问路在何方》片段的波形

实验中,此段乐曲的 WAV 格式的参数值为:采样频率 44.1kHz,量化位数 16bit,播放时间 88.2 秒,样本个数 3889620。播放该乐曲可试听声音效果。通过调节音色参数 $c_{A1},c_{A2},c_{T1},c_{T2},S_A^2$ 和 S_T^2 可获取比较满意的适合于自己理解的声音,然后可将 WAV 格式转换为任何其他的声音格式,如 MP3, RM 等,以方便于存储。

结束语 本文用一个简单的模型实现了音色的大范围调节。由上面的分析可知,在振动模型的 4 个参数中,振幅系数和周期系数都相等时,可实现将整体音高提高 8 度,但音色的频谱中只有一个谐波,发出的声音效果是单一的,相当于音叉的音色。在振幅系数和周期系数的其中之一相等时,另外的参数的方差越大,音色的频谱越丰富。在振幅系数和周期系数都不相等时,大小为同向时的音色敏感度要低于大小为反向时的敏感度。

因此,音色对振动参数的敏感度,按照从大到小可排序为:振幅系数和周期系数都不相等且大小反向;振幅系数和周期系数都不相等且大小同向;振幅系数相等且周期系数不等;周期系数相等且振幅系数不等。所以,在利用该模型提供的参数对音色进行特性调节时,可充分利用音色对参数的敏感

(下转第 288 页)

加实用。这包括提高传统基于状态遍历算法处理能力,并推广应用基于结构信息的验证方法,以便简化验证问题。

参 考 文 献

- [1] Hassoun S, Sasao T, Brayton R K. Logic Synthesis and Verification [M]. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2002
- [2] Burch J R, Singhal V. Robust Latch Mapping for Combinational Equivalence Checking [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD). San Jose, CA, USA, November 1998; 563-569
- [3] Ng K, Prasad M R, Mukherjee R, et al. Solving the Latch Mapping Problem in an Industrial Setting [C]//Proceedings of IEEE/ACM Design Automation Conference (DAC'2003). Anaheim, CA, USA, June 2003; 442-447
- [4] Anastasakis D, Damiano R, et al. A Practical and Efficient Method for Compare-Point Matching [C]. DAC, New Orleans, LA, USA, June 2002; 305-310
- [5] van Eijk C, Jess J A G. Detection of Equivalent State Variables in Finite State Machine Verification [C]//Proceedings of ACM/IEEE International Workshop on Logic Synthesis. Lake Tahoe, California, USA, 1995; 335-344
- [6] Mohnke J, Molitor P, Malik S. Establishing Latch Correspondence for Sequential Circuits Using Distinguishing Signatures [C]//Proceedings of IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Sacramento, CA, USA, August 1997
- [7] Cao Wanlin, Walker D M H, Mukherjee R. An efficient solution to the storage correspondence problem for large sequential circuits [C]//Proceedings of Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). Yokohama, Japan, January 30-February 2, 2001; 181-186
- [8] Burch J R, Clarke E M, et al. Symbolic Model Checking for Sequential Circuit Verification [J]. IEEE Transactions On Computer-Aided Design, 1994, 13(4): 401-424
- [9] Ranjan R K, Aziz A, Brayton R K, et al. Efficient BDD algorithms for FSM Synthesis and Verification //Proceedings of the International Workshop on Logic Synthesis (IWLS). Lake Tahoe, California, USA, 1995
- [10] van Eijk C, Jess J A G. Exploiting Functional Dependencies in Finite State Machine Verification [C]//Proceedings of IEEE European Design & Test Conference. Paris, France, 1996; 9-14
- [11] 郑飞君, 杨军, 葛海通, 等. 面向等价性验证的锁存器匹配算法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(8): 1293-7296
- [12] Synopsys Inc. Formality Workshop Student Guide. Synopsys Customer Education Services

(上接第 281 页)

度大小,以达到“小的调节,大的改变”的目的,从而适应不同的人群对音色的感觉需求和创作需要。

本文的分析是在振幅包络子模型参数取值不变的情况下进行的,如果在改变振动子模型参数的同时也改变振幅包络参数的取值,则可以获取成千上万种音色,那么对众多音色的组织和管理将是以后要讨论的问题。

参 考 文 献

- [1] ANSI S. 3. 20-1973, American National Standards Institute [S]
- [2] 张一彬, 周杰, 边肇祺, 等. 基于内容的音频与音乐分析综述 [J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 712-729
- [3] Tardieu D, Rodet X. An Instrument Timbre Model for Computer Aided Orchestration [J]//2007 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. New Paltz, NY, October 2007
- [4] 陈旭. 电脑音乐的音色优势与创编理念 [J]. 湛江师范学院学报, 2008, 29(2): 112-115
- [5] Jordà S. Multi-user Instruments: Models, Examples and Promises [J]//Proceedings of the 2005 International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME05). Vancouver, BC, Canada; 23-26
- [6] 黄忱宇. 电子音乐与计算机音乐基础理论 [M]. 北京: 华文出版社, 2005
- [7] 张静, 梁澍. Windows 多媒体编程基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [8] 郑阿奇, 刘毅. 多媒体实用教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 8: 21
- [9] 韩纪庆, 冯涛, 郑贵滨, 等. 音频信息处理技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007, 1: 37

《计算机科学》杂志报导国内外计算机科学与技术的发展动态, 主要栏目有: 计算机网络与信息技术、人工智能、图像处理、数据库、人机界面、软件工程等; 欢迎各高等院校师生以及从事计算机科学与技术领域的科研、生产人员踊跃投稿。投稿邮箱: jsjkxtg@163.com