

# 进化作曲研究

汪 镭<sup>1</sup>, 郑晓妹<sup>1,2</sup>, 申 林<sup>3</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234;

3. 上海师范大学 音乐学院, 上海 200234)

**摘 要:** 算法作曲是计算机音乐中最具吸引力的研究领域, 而基于遗传算法的进化作曲系统已成为算法作曲中的热点. 给出了进化作曲系统的结构, 分析了系统不同的作曲目标, 从适应度函数的设计讨论了两类作曲系统. 最后给出了几个作曲系统实例分析.

**关键词:** 进化作曲; 遗传算法; 算法作曲

**中图分类号:** TP 18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5137(2014) 01-0060-07

## 1 概 述

随着计算机和数字设备的广泛应用, 电子音乐已经进入到完全数字化的计算机音乐(Computer Music)时代, 并且在近几十年迎来了最蓬勃的发展时期. 计算机音乐领域涉及到数字乐器接口、数字音频、合成技术、声音分析、声音信号处理和算法作曲等多个方面, 而其中算法作曲(Algorithmic Composition)无疑是最具挑战性的领域. 算法作曲是指使用形式化的作曲规则作为音乐创作的手段, 以使音乐家们可以利用计算机作为音乐创作的工具, 实现自动作曲<sup>[1]</sup>. 音乐的形式化过程由来已久<sup>[1-2]</sup>, 早在11世纪就出现了一种根据经文中的元音设计音高的模型, 这种形式化技术可以实现经文旋律的创作; 在14~15世纪之间, 一种等节奏模式被应用在具有均匀节奏的经文歌中; 到了20世纪, 集合论和随机过程被引入到算法作曲中, 出现了序列作曲和随机作曲技术. Lejaren Hiller是现代算法作曲的先驱, 他最先将计算机应用于作曲中, 并创造了最早的计算机作曲作品《Illiac 弦乐四重奏组曲》. 随后, 一大批音乐家们都开始使用形式化程序来创作乐曲, 算法作曲进入到一个迅速发展的时期. 算法作曲系统总是与不同的算法和策略紧密联系, 迄今, 在算法作曲中使用的技术包括随机过程、音乐文法、分形、混沌、专家系统、神经网络和遗传算法. 而基于遗传算法的一类算法作曲系统, 利用遗传算法的一系列进化算子来进行音乐的创作, 又称为进化作曲. 由于遗传算法的简单通用、易于实现, 使得遗传算法作曲目前已经成为算法作曲中最为活跃的一支, 在旋律动机生成、旋律发展和弦配置等音乐创作方面获得了较为丰富的成果. 本文作者将从不同角度讨论进化作曲技术, 最后分析几个具体的作曲系统实例.

## 2 进化作曲

进化作曲主要采用以遗传算法为主的进化计算技术. 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种启发式搜索算法, 它采用了自然进化模型, 从代表问题候选解集的一个种群开始, 按照适者生存和优胜劣汰

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 教育部博士点基金(20100072110038); 国家自然科学基金(70871091, 61034004)

作者简介: 汪 镭, 男, 教授, 博导; 郑晓妹, 女, 讲师, 博士研究生; 申 林, 男, 副教授.

通信作者: 汪 镭, E-mail: wanglei@tongji.edu.cn

的生物进化过程,逐代进化产生出问题的最优解或近似解<sup>[3]</sup>.在进化过程中,算法使用了一系列的进化算子包括交叉、变异等操作.遗传算法由于思想简单、便于实现、鲁棒性强以及适于并行计算等特点,在诸多领域获得了广泛的应用.在音乐创作领域,组成音乐的元素例如音高、时值很容易用数字表示,而作曲的方法例如音乐材料的发展手段等又和遗传算法中的进化操作有异曲同工之处.因此,把遗传算法推广到在音乐空间的搜索,产生符合音乐规则的乐曲是非常有效和可行的.20世纪90年代初,Horner 首先把遗传算法应用到算法作曲领域<sup>[4]</sup>,随后一大批计算机学者和音乐家们相继做了有益的尝试和探索,设计了不同的进化作曲系统,并获得了大量的音乐创作成果<sup>[4-20]</sup>.

## 2.1 进化作曲系统结构

基于遗传算法的进化作曲系统结构如图1所示.

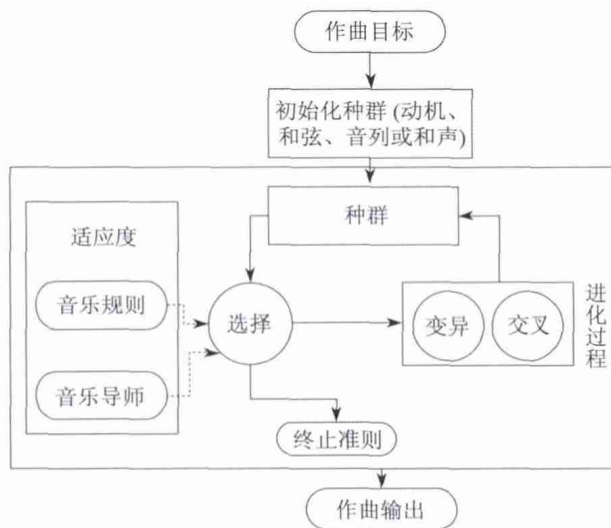


图1 进化作曲系统结构

### 2.1.1 作曲目标

不同的作曲系统最终的目标并不完全相同,有些是生成主题动机,有些是发展旋律,有些是产生和弦、配置和声等.作曲目标影响着算法的具体实现,决定了算法中音乐元素的表示方式,不同的目标对应不同的音乐形式.算法中的基因编码可能是基于一个音符,也可能代表一个和弦,或者一个音符序列;而个体的染色体结构可能设计成一个乐句,也可以是一段和声.

### 2.1.2 初始化种群

根据作曲目标确定了音乐的表示形式后,将生成初始种群.种群的初始化可以是随机产生,也可以由用户定义的初始个体构成.从由用户定义生成的初始种群开始进化,可以有效地保证每代进化的音乐在用户可以接受的范围内,这样系统最终的音乐输出更符合用户的喜好.

### 2.1.3 音乐的进化

进化作曲系统大都采用遗传算法的基本进化操作,包括选择、变异和交叉.系统从种群中根据适应度选择个体,然后借助于遗传算子进行交叉和变异,产生出新种群.这样逐代进化,直至达到终止条件.交叉和变异等算子的设计与音乐作曲方法相关,发展音乐的一些基本手法如重复、迭奏、变奏等可以作为进化算子的设计依据.

### 2.1.4 适应度计算

算法在进化过程中,不借助其他外部信息,只仅仅根据适应度来对个体进行选择,因此适应度函数的设计是算法中非常重要的一部分,它的好坏将直接影响最终的音乐输出结果.一些系统根据音乐规则设计适应度函数,保证参加进化的个体是符合音乐逻辑的;另一类系统的适应度需要人类参加评判,根据专

家或用户的打分,进行个体选择,以保证个体满足用户喜好或者是符合人类听觉经验。

## 2.2 作曲目标

作曲(Composition)的精确定义是完整的音乐创作和创作音乐的行为<sup>[21]</sup>。在传统音乐中作曲是指对素材进行严密的安排组织并成为最后可以演奏的音乐,这样的行为才称之为作曲。而在当今的数字音乐时代,由于计算机和数字设备的应用,即便是没有最后的演奏,也可通过软硬件来得到想要的音乐效果。因此作曲的概念更为广泛,即使是不能演奏的音乐创作过程也属于作曲行为。这个概念尤其体现在算法作曲系统中,当前的算法作曲系统,包括进化作曲系统,大多数都是完成作曲的一个子任务,系统输出的旋律并不一定是能够直接演奏的完整音乐作品。

完成一个音乐内容的创作,涉及调性的选择及变化、纵向的音高排列、横向的和声连接、声部对位、节奏穿插、音色的选取及搭配、节拍的变化、速度的变化等很多过程。因此可以说旋律的创作、和声配置、声部的对位、织体创作、编曲等等,这些过程都是在作曲。在进化作曲系统中,作曲者都是针对不同的作曲过程进行设计和实现,很少有系统能够实现作曲的全部行为。

大多数进化作曲系统的目标是旋律的生成和发展。最早把遗传算法应用到算法作曲中的 Horner 完成了一个计算机辅助作曲程序<sup>[4]</sup>,该程序仅仅完成一个简单的主题桥接任务:从原始音乐动机变换到目标动机。Biles 的进化作曲系统 GenJam<sup>[5]</sup>可以产生 16 小节长的一段爵士乐旋律,旋律的进化过程使用了倒影、逆行、重复等旋律发展技法。SENEgaL 系统<sup>[18]</sup>允许用户生成和模仿类似于非洲西部地区音乐风格的节奏,与其他系统不同之处,SENEgaL 不是单纯的进化作曲系统,它的最终目的是发展为可以用于音乐教学的人机交互界面。Drezewski 和 Tomecki 的 EvoMusComp 系统<sup>[14]</sup>既可以完成给定主题动机的变换,也可以根据给定的调号生成全新的旋律片段。系统还提供一个人机交互界面,允许用户选择参数构建不同的适应度函数,并且可以随时终止进化过程。

和声的配置是音乐创作中的一个重要过程,在多声部音乐写作中,四声部和声创作是最基本的形式<sup>[22]</sup>。四部和声包括的 4 个声部分别是:高音(Soprano)、中音(Alto)、次中音(Tenor)和低音(Bass),和声的主要结构是和弦的纵向结合以及横向进行规律。Bach in a Box<sup>[15]</sup>是较早实现和声配置功能的进化作曲系统,该系统能够根据事先给定的某个声部旋律片段,产生和弦,最终输出一段巴洛克风格四部和声。R. De Prisco 等人设计的系统同样用于四部和声创作<sup>[17]</sup>,与 Bach 系统不同的是,后者实践的是巴洛克时期数字低音(Figured Bass)的作曲手法:根据给定的低音声部以及说明其上方和弦的数字信息,系统自动实现和弦的排列,输出包含其他 3 个声部的四部和声。

能够输出一首完整乐曲的进化作曲系统并不多,Damon 的自动作曲方法是其中之一<sup>[7]</sup>,这种方法中乐曲的风格不受限制,只要事先给出初始乐曲各段材料以及待演奏的乐器,系统即可生成“悦耳”的歌曲。

## 2.3 适应度

遗传算法是一种启发式搜索算法,启发信息蕴含在适应度函数中,算法在进化搜索中依靠适应度函数来进行选择,因此在进化系统中,适应度函数的选取至关重要。根据适应度计算方法的不同,进化作曲系统主要分为以下两类:自动进化系统和交互式进化系统。

### 2.3.1 自动进化系统

这些系统根据音乐规则设计相应的适应度函数,进化过程中使用这些规则计算个体的适应度,进行进化,进化过程不需要人的参与,是一种自动进化过程。用于适应度函数设计的规则大都基于基本的音乐作曲理论,包括音高的范围、音程的范围、旋律的稳定性、音符和终止符的密度、旋律的变化、和弦的规律、和声逻辑等。根据作曲目标的不同,适应度函数的定义各有差异。例如,生成多声部和声的系统在适应度函数中大多考虑和声进行的规则,文献[15]和[16]都把和弦进行中出现平行四度、五度、七度作为个体适应度减分的依据,而平行八度则被认为是禁止出现的。音乐作曲包含的内容广泛,规则错综复杂,一个作曲系统的适应度函数设计不可能包括所需要的全部规则,而且基于音乐理论的规则可以说明乐

曲要遵循的音乐逻辑,但或许很难用于判断乐曲的好坏.因此,一种交互式遗传算法(Interactive Genetic Algorithm, IGA)被引入到进化作曲系统中.在这种系统中适应度由音乐导师来评判.

### 2.3.2 交互式进化系统

在基于交互式遗传算法的进化作曲系统中,算法根据外部用户的打分来计算适应度<sup>[23]</sup>,这样系统就可以和用户进行交互.算法充分考虑用户的喜好,根据用户的评判选择来进行进化,解决了自动进化系统中,基于音乐规则的适应度函数不能代表人类情感的问题.交互式进化系统中和系统进行交互的可以是普通用户或者是音乐导师,可以是一个人也可以是一个群体. GenJam 是交互式进化系统的代表; Jacob 的系统也使用了交互式遗传算法<sup>[10]</sup>.然而在交互式系统中,用户打分阶段需要花费大量的时间,而且导师容易产生听觉疲劳.因此, Billers 把他的 GenJam 改进为 Autonomous GenJam<sup>[20]</sup>,直接省略了适应度函数计算这一阶段.

## 3 进化作曲系统实例

### 3.1 Horner 的计算机辅助作曲程序

Horner 最早把遗传算法应用到计算机作曲中,实现了一个简单的计算机辅助作曲程序<sup>[4]</sup>.该程序能够完成主题桥接,也就是从一个原始音乐动机出发,经过一系列的变换(桥),最终生成目标动机.图2给出了一个主题桥接的例子.

输入: 原始动机 $T_0$ ( $^bG, ^bB, F, ^bA, ^bD$ ) 目标动机 $T_t$ ( $F, ^bA, ^bE$ ) 音符长度 $N_d$ : 17	
桥	变换操作( $op_i$ )
	变换后的动机( $T_i$ )
	删除音符
	$^bG, ^bB, F, ^bA(T_1)$
	旋转
	$^bB, F, ^bA, ^bG(T_2)$
	删除音符
	$^bB, F, ^bA(T_3)$
	音符突变
	$^bE, F, ^bA(T_4)$
	旋转
$F, ^bA, ^bE(T_{result}=T_t)$	
音乐输出( $N_r=17$ ): $^bG, ^bB, F, ^bA, ^bB, F, ^bA, ^bG, ^bB, F, ^bA, ^bE, F, ^bA, F, ^bA, ^bE$	

图2 主题桥接示例

系统中定义的变换包括删除音符、旋转、突变、交换等操作,从原始动机到目标动机所经历过的变换操作的集合就是桥.系统的适应度分两步计算,首先衡量经过桥变换后的动机与目标动机的匹配度,这个匹配度既考虑相同音符的比例,也考虑音符顺序的匹配程度;然后进一步计算适应度,考虑音符长度的匹配程度,如果长度也是精确匹配,个体的适应度将达到最大值.

Horner 的辅助作曲程序能够实现的功能虽然简单,但它是最早应用遗传算法的进化作曲系统.系统可以实现一个卡农形式的五声部轮唱主题的生成,在给定原始动机下,各声部独立进行进化,最终输出经过桥接的音乐序列.

### 3.2 十二音体系的组成

Prisco 利用遗传算法实现了1个基于十二音作曲体系的乐曲创作<sup>[16]</sup>.十二音体系是勋伯格创立的无调性音乐体系<sup>[24]</sup>.在这种作曲方法中,1个八度里的所有12个半音( $C, C^\#, D, D^\#, E, F, F^\#, G, G^\#, A, A^\#, B$ )是平等的,在一个音出现以后,其他11个半音出现之前,该音不能重复使用,以免形成调性中心.十二音作曲法中,首先要有1个12个半音组成的1个音列,称之为种子序列或原形 O(Original),从原形又可以派生出序列的几种变形,包括逆行 R(Retrograde)、倒影 I(Inversion)、倒影逆行 RI(Retrograde of Inversion)等.图3给出了1个原形及其变形<sup>[25]</sup>.

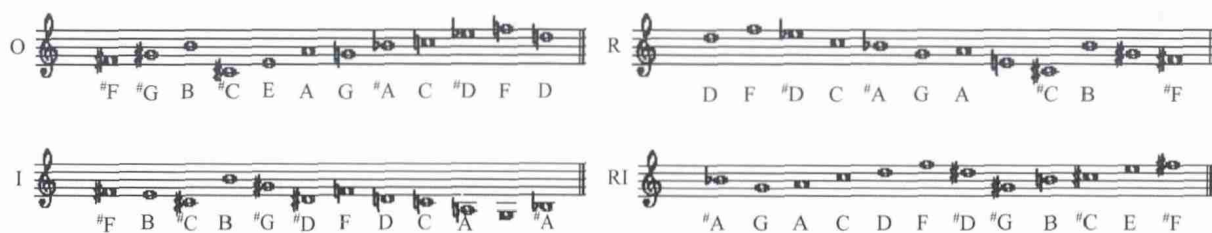


图3 一个原形序列及其变形

(1) 编码. 包括原形和这几种派生变形的序列以及它们在不同音高上的移位所产生的所有序列形式就是十二音作曲的基本材料, 序列被定义为  $T$ , 个体是一个  $K \times V$  的结构, 其中  $K$  代表乐曲中声部的数量,  $V$  是乐曲的长度, 用序列的个数来表示.

(2) 解码. 在个体的编码中没有指定音高的定义, 只有抽象的 12 个半音音符, 因此从基因型到表现型映射时要确定抽象音符的具体音高. 系统设计了一个映射函数  $gpm$  (genotype-phenotype mapping), 该函数根据事先给定的音高范围, 为乐曲中每个音符指定具体的一个音高:  $X = gpm(C)$ .

(3) 乐曲进化过程. 系统的进化设计基于基本的十二音作曲技法, 变异基于 R、I、RI 等序列变形操作来实现. 对于待变异的个体  $C$  中的每个序列用其变形序列替换而生成新的个体. 交叉操作则使用单点交叉. 根据随机产生的交叉点位置, 交换 2 个个体的基因, 产生新个体. 系统中适应度函数的设计则主要考虑了十二音技法中的和声规则, 包括音程的协和度量、和声的手法等. 系统最终可以实现 4 个声部, 长达 30 个序列的乐曲进化.

### 3.3 GenJam

Biles 应用遗传算法实现了一个实时交互式演奏系统——GenJam<sup>[5 20]</sup>. GenJam 可以对一段爵士旋律片段进行进化, 进化的结果用于爵士独奏的材料.

GenJam 中的算法设计了 2 个分层关联种群: 乐节种群 (measure population) 和乐句种群 (phrase population). 一个乐节定义为 8 个音符组成的小节, 而一个乐句包含 4 小节. 这 2 个种群各自进行进化, 有各自的变异和交叉运算.

乐节和乐句种群中个体的适应度单独计算, 尽管乐句由乐节组成, 但是乐句个体的适应度并不是由其中的 4 个乐节的适应度相加即可得, 因为 4 个适应度都很高的乐节组成的乐句并不一定是好听的. GenJam 采用交互式遗传算法进行进化, 系统没有定义适应度函数, 个体的适应度通过和音乐导师交互来获得. 导师在听完乐句或乐节后给出好或者坏的评判, 以此为依据生成个体的适应度. 乐句和乐节的适应度用于 2 个种群的进化选择, 其中乐节的适应度决定着乐句的某些变异操作.

在 GenJam 的进化过程中, 乐节种群包含 64 个个体, 乐句种群包含 48 个个体, 每代进化产生 50% 的新个体. 这些个体的适应度都由导师打分, 因此在每代进化中导师都需要评判几十个音乐片段的“好坏”. 这种交互式打分方式需要耗费大量的时间, 而且容易引起音乐导师的审美疲劳. 另外, GenJam 作为一个交互式实时演奏系统, 进化的结果要作为实时演奏的音乐材料, 因此需要一个快速的进化过程. 因此, Biles 对 GenJam 系统进行了修改, 将其扩展为 Autonomous GenJam. Autonomous GenJam 和前期版本有很大的不同. Biles 选择了很多四小节爵士乐句, 根据它们的风格不同, 建立了 10 个爵士乐数据库, 包括博普、后博普、摇摆乐等不同风格, 这些数据库作为乐节和乐句种群的种子材料. 初始种群从这些数据库中随机选择产生, 这样可以保证生成的个体符合爵士乐的风格. 在进化阶段不使用适应度函数, 省略了导师的交互评分阶段, 个体的选择根据爵士乐数据库中的风格特征来进行. Biles 把 Autonomous GenJam 用于爵士乐的四小节轮奏中, 获得了较好的实时效果.

GenJam 是目前为止最为成功的进化作曲系统之一, 从 1994 年最初设计的一个简单概念模型开始, Biles 不断地对它进行修改完善. 现在的 GenJam 已经是一个较为成熟的交互式实时演奏系统, 可以与人类表演者一起进行各种形式的爵士乐演奏.

## 4 小 结

遗传算法目前已经成为算法作曲领域最重要的策略之一。基于遗传算法的进化作曲系统可以帮助人类完成作曲的不同任务,包括音乐动机的生成、旋律的发展、多声部的和声等不同的音乐层次。遗传算法的目标是找出最优解或者近似解。然而在音乐作曲领域,并没有所谓的“最优解”,大多数进化作曲系统所生成的作品只能是合乎音乐逻辑的,而不一定是最动听的。如何让自动作曲系统更好地模拟人类作曲的过程,使得系统生成的音乐不止是合乎逻辑的,而且是动听的,也是包括进化作曲系统在内的算法作曲系统未来的目标。

## 参考文献:

- [1] 柯蒂斯·罗兹. 计算机音乐教程[M]. 北京: 人民音乐出版社 2011.
- [2] 冯寅,周昌乐. 算法作曲的研究进展[J]. 软件学报 2006, 17(2): 209–215.
- [3] 王小平,曹立明. 遗传算法理论、应用和软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社 2002.
- [4] HORNER A, GOLDBERG D E. Genetic algorithm and computer-assisted music composition[C]. Proceeding of the 4th International Conference on Genetic Algorithm. San Diego: Morgan Kaufman Publishers, 1991.
- [5] BILES J A. GenJam: A Genetic Algorithm for Generating Jazz Solos[C]. Proceedings of the International Computer Music Conference. San Francisco: International Computer Music Association, 1994.
- [6] BURTON A R, VLADIMIROVA T. Generation of Musical Sequence with Genetic Techniques[J]. Computer Music Journal, 1999, 23(4): 59–73.
- [7] DAMON D Z. A Novel Approach to Automatic Music Composition: Using Genetic Algorithm[C]. Proceedings of the 2006 International Computer Music Conference. San Francisco: International Computer Music Association, 2006.
- [8] TUOHY D R, POTTER W D. GA-based Music Arranging for G. uitar[C]. 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 2006.
- [9] GARLAND J A, COPLEY P. The Suitability of Genetic Algorithms for Music Composition[J]. Contemporary Music Review, 2003, 22(3): 43–55.
- [10] JACOB B L. Composing With Genetic Algorithms[C]. Proceedings of the 1995 International Computer Music Conference. San Francisco: International Computer Music Association, 1995.
- [11] JACOB B L. Algorithmic Composition as a Model of Creativity[J]. Organised Sound, 1996, 1(3): 157–165.
- [12] KURT T. GeNotator: an Environment for Exploring the Application of Evolutionary Techniques in Computer-assisted Composition[J]. Organised Sound, 1999, 4(2): 127–133.
- [13] MARQUES M, LASEEB-ISR-IST L, OLIVEIRA V, et al. Music composition using genetic evolutionary algorithms[C]. Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 2000.
- [14] DREZEWSKI R, TOMECKI P. Evolutionary System Supporting Music Composition[J]. Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services Smart Innovation Systems and Technologies, 2011, 11: 29–38.
- [15] RYAN A, JINTYRE M. Bach in a Box: The Evolution of Four Part Baroque Harmony Using the Genetic Algorithm[C]. First IEEE Conference on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 1994.
- [16] DE-PRISCO R, GIANLUCA Z, ROCCO Z. A Genetic Algorithm for Dodecaphonic Compositions[M]. Applications of Evolutionary Computation, Heidelberg: Springer, 2011.
- [17] DE-PRISCO R, ZACCANINO R. An Evolutionary Music Composer Algorithm for Bass Harmonization[M]. Applications of evolutionary computing, Heidelberg: Springer, 2009.
- [18] DIMITRIOS T, ELENI M. A Dynamic GA-Based Rhythm Generator[M]. Trends in Intelligent Systems and Computer Engineering, US: Springer, 2008.
- [19] TOWSEY M, BROWN A R, WRIGHT S K, et al. Toward Melodic Extension Using Genetic Algorithms[J]. Educational

- Technology & Society 2001 4(2):54-65.
- [20] BILES J A. Autonomous GenJam: Eliminating the Fitness Bottleneck by Eliminating Fitness[C]. Proceedings of the 2001 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program. San Francisco: GECCO 2001.
- [21] 崔晓东. 作曲[EB/OL]. (2013-09-17) [2013-10-20] <http://baike.baidu.com/view/903729.htm>.
- [22] 桑桐. 和声学教程[M]. 上海: 上海音乐出版社 2001.
- [23] SUNGE-BAE C. Towards Creative Evolutionary Systems with Interactive Genetic Algorithm[J]. Applied Intelligence, 2002, 16: 129-138.
- [24] 郑英烈. 序列音乐写作教程[M]. 上海: 上海音乐出版社 2007.
- [25] 高师《基本乐理》教材编写组. 基本乐理[M]. 北京: 人民音乐出版社 2000.

## Research on evolutionary music composer system

WANG Lei<sup>1</sup>, ZHENG Xiaomei<sup>1,2</sup>, SHEN Lin<sup>3</sup>

(1. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

3. Music College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** Algorithmic composition is the most attractive research area in computer music and genetic algorithm-based evolutionary music composer system has become a hot spot in the algorithmic composition. This paper gives a structure of evolutionary music composer system, analyzes different goals of music composer systems, and then discusses two types of evolutionary music composer system from the aspect of fitness function design. Finally, several instances of evolutionary music composer system are analyzed.

**Key words:** evolutionary music composer; genetic algorithm; algorithmic composition

(责任编辑: 包震宇)