

面向抒情歌曲旋律的钢琴自动伴奏算法

曹西征^{a,b}, 牛靖雯^a, 秦杰^a, 孙志勇^a

(河南师范大学 a. 计算机与信息工程学院; b. “智慧商务与物联网技术”
河南省工程实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:目前钢琴自动伴奏中存在着一一定的不和谐问题,其中一个重要原因是由于和弦处理的固定性往往不能满足旋律的不确定性要求.为此,提出一种面向拍号固定的抒情歌曲旋律的自适应伴奏算法.首先,根据拍号对旋律进行小节分割和乐句整合,在传统三度关系的三和弦基础上定义更泛化的三元和弦,自适应获取三元和弦的内部音程关系;然后,自适应计算旋律音对和弦的贡献分值,以获取小节中所有可能的三元和弦;自动选取和弦个数,将选出的和弦与知识库进行匹配,将匹配成功的和弦添加合适的伴奏音型,最终生成伴奏.实验结果表明,人们不容易将该算法生成的伴奏与人工的伴奏进行区分.

关键词:自动伴奏;抒情歌曲;自适应伴奏;三元和弦

中图分类号:TP391

文献标志码:A

歌曲有很多种类型,其中抒情歌曲往往最能抓住人的内心,其主要特点是曲调优美、节奏自由、感情细腻.伴奏是歌曲表现的重要组成部分,它使演奏的主题更形象、更突出、更有感染力.当前,计算机音乐作曲的研究已经取得了一些成果,计算机自动伴奏应运而生,其最大的优点是在满足歌曲主旋律的前提下,瞬间完成伴奏任务.钢琴因其音域广阔、曲调优美、表现力丰富等特点被称为“乐器之王”,因此钢琴自动伴奏是最重要的伴奏形式.

计算机自动伴奏是计算机自动作曲^[1]研究内容的一部分,也是计算机技术和音乐理论相结合、共同深化的产物.目前有许多学者进行了这方面的研究,并根据研究对象提出了相应的伴奏方法,例如文献[2]提出的容错自动伴奏方法,文献[3]提出的基于信息物理系统的自动伴奏方法,文献[4]提出的基于音型元结构的钢琴自动伴奏方法,文献[5]提出的包含领域知识的和弦进行生成方法,文献[6]针对阿拉伯声乐即兴创作的网络服务分析,文献[7]提出的自动生成和声和旋律的 FComp 系统,文献[8]提出的采用人工免疫系统自动生成和弦进行的方法.这些计算机自动伴奏方法在一定程度上满足了人们对歌曲伴奏的需求,但离真正的实用还有一定距离,其中一个重要原因是有两个矛盾存在:一是和弦结构的单一化与音乐风格的多样化存在着矛盾;二是和弦内部各音比例的处理的固定化与歌曲旋律流动的不确定性存在着矛盾.这两种矛盾导致了伴奏的和谐度欠佳.

为了泛化和弦结构,自适应处理和弦音比例,使得自动伴奏的效果趋近于人工的伴奏,本文在自动旋律创作工作^[9]的基础上,以拍号固定的抒情歌曲的旋律为输入,分析旋律的和弦要素,提出一种和弦自适应的自动伴奏算法,将和弦内部和弦音的比例自适应计算,以更符合抒情歌曲的特征.该算法的基本思路是先分析旋律音的和弦内涵,构建比三度音程关系的三和弦更具有普遍性的和弦,并自适应计算和弦音比例,求解和弦域与和弦族,结合和弦进行的有关规则进行匹配,以选取最佳的和弦作为伴奏的输出,使旋律与伴奏具有良好的和谐性、悦耳性,最终使人不容易区分人工的伴奏还是机器的伴奏.

收稿日期:2015-12-07;修回日期:2016-06-15.

基金项目:国家自然科学基金(61402153);河南省重点科技攻关项目(122102210054);河南省高校青年骨干教师项目(2011GGJS-061).

第1作者简介(通信作者):曹西征(1977-),男,山东莒县人,河南师范大学副教授,博士,研究方向为计算机应用, E-mail:caoxizheng@126.com.

1 和弦自适应算法的构建

为了构建自适应的和弦伴奏算法,需要对旋律的和弦要素进行分析,然后定义更具有普遍性的三元和弦,并对和弦进行提取和匹配.

1.1 旋律中的和弦要素分析

在设计算法时,很重要的部分是从旋律的小节中提取可能的和弦,这需要对旋律中的和弦内涵进行分析.旋律中各小节的音可分为两种类型:和弦音与和弦外音.当然,和弦音与和弦外音没有明显的界线,某旋律音到底属于和弦音还是和弦外音,不仅取决于整个小节的音符序列特征与和弦进行的规则,还取决于和弦内部的音程结构特征.

和弦内部的音程结构特征是跟歌曲的风格有关系的,如果是五声性调式的中国民族音乐风格,音程结构就不仅仅是三度关系,还有可能是二度、四度、五度等;如果是七声调式,音程结构常常以三度为基础.因此,在设计算法时,音程结构就有了很多种取值的可能.另外,传统和弦的种类也很多,根据和弦音的个数可将其分为三和弦、七和弦、九和弦;根据音程特征可将其分为增和弦、减和弦、大和弦、小和弦^[10].考虑到应用的普遍性问题,本文在和弦个数上取3个,并在传统三和弦基础上进行重新定义,以适用于不同调式的抒情歌曲,也使得这三元的音程结构变得更加丰富.因此,传统三和弦的特征需要先分析一下,这里以C为主音的和弦为例:C,即1级和弦,是用来明确调性,一般用在开头或结尾;Dm,即2级和弦,很柔和也很常用的和弦;Em,即3级和弦,柔美而略带忧伤的和弦;F,即4级和弦,十分明亮的骨干和弦;G,即5级和弦,具有乐曲的终止感;Am,即6级和弦,可以连贯和弦的进行;Bdim,即7级和弦,是减三和弦.

1.2 自适应和弦求解算法的设计

为了生成伴奏声部,根据旋律的和弦内涵,设计了自适应和弦求解的算法.该算法的输入为抒情歌曲主旋律的音符序列,输出为主旋律和伴奏的音符序列,具体的执行步骤如下.

(1) 输入一首拍号固定的抒情歌曲的旋律,主要包括音高、时值、节拍、调式等信息.

(2) 对整个旋律进行小节分割和乐句整合.根据拍号进行小节的分割:如果节拍是四二拍,则以四分音符为一拍,各音符的时值累计和为二拍的音列即为一个小节;如果节拍是四四拍,则各音符的时值累计和为四拍的音列即为一个小节,依次类推,最终旋律被分割成多个小节,在C++中用类的形式来表达各个小节的信息.对各小节的时值进行分析,如果当前小节某音符的时值大于拍号分子的0.7倍,则当前小节可认为是乐句的末尾小节,然后把前面的各小节与当前小节进行排列,最终整合成一个乐句,用同样的方法整合成多个乐句.

(3) 三元和弦的定义.在传统三和弦基础上,将三元和弦定义为: $Cd = \{Cd_1, Cd_2, Cd_3\}$,这里的Cd为三元和弦, Cd_1, Cd_2, Cd_3 分别为和弦的第1、2、3元和弦音,当这3个音的音程为三度时,则对应传统三和弦的根音、三音、五音,也就是说三元和弦是传统三和弦的广义定义,传统三和弦是三元和弦的一个子集.

(4) 自适应获取三元和弦中的内部音程关系以及当旋律音分别为和弦内部某一元素时对和弦的贡献分值.以往的自动伴奏算法是建立在传统三和弦基础上的,旋律音作为三和弦中各元素时对和弦的贡献分值的比值也采用固定模式,使得生成的伴奏太机械化.为了解决这个问题,采用上面定义的三元和弦,用自适应的方法获取和弦内部的音程值和当旋律音分别作为第1、2、3元和弦音时对和弦的贡献分值的比值,分别如下.

$$I(i) = \begin{cases} 0, & i = 1, \\ 2, & T(f_a) > 1 \text{ 且 } T(s_i) > 1, \\ \text{for}[\text{Rand}(1,4)], & \text{其他,} \end{cases} \quad (1)$$

$$p(i) = \begin{cases} \text{Rand}(4,6), & i = 1, \\ \text{Rand}(1, 9 - p(1)), & i = 2, \\ \text{Rand}(1, 10 - p(1) - p(2)), & i = 3. \end{cases} \quad (2)$$

(1)式表达了三元和弦内部的音程关系.其中 $I(i)$ 为音程,用度数来表示, i 的取值范围为1,2,3, $T(f_a)$ 和 $T(s_i)$ 分别为旋律音中 f_a 音和 s_i 音出现的次数,for为循环运算符,利用它可重复计算直至前面的和弦音

叠加该音程后的音存在于旋律音中, $\text{Rand}(1,4)$ 为随机数运算符,表示在 $1 \sim 4$ 的数据范围内随机取 1 个数。(2) 式则表达了旋律音分别作为三元和弦内部和弦音时对和弦的贡献情况. 其中 $p(i)$ 表示旋律音作为三元和弦中第 i 个元素时对和弦的贡献分值. 通过(2) 式可获取分值,进而可获取比值.

(5) 获取小节的旋律中可能的三元和弦序列. 根据抒情歌曲的旋律的特征,构建了提取三元和弦序列的算法,如下:

$$Cd_i = \begin{cases} P, & i = 1, \\ Cd_{i-1} + I(i), & i > 1. \end{cases} \quad (3)$$

$$S(Cd_i) = \sum_{j=1}^n [p(i) \cdot D_j], \quad (4)$$

$$S(Cd) = \sum_{i=1}^3 [S(Cd_i)], \quad (5)$$

(3) 式中, Cd_i 为三元和弦的第 i 个元素的值, P 为旋律音; (4) 式中, $S(Cd_i)$ 为旋律音高值为 Cd_i 时的贡献分数, D_j 为小节旋律中音高值等于 Cd_i 的第 j 个旋律音的时值; (5) 式中, $S(Cd)$ 为和弦 Cd 的和弦分值. 通过上面的计算,便可以获取小节的旋律中所有可能的三元和弦,按照分值,对它们从大到小进行排序.

接下来的问题是应该取前面几个和弦参与后面的和弦匹配. 如果取的太多,则会使得排序靠后的和弦有可能被选中,造成和声与旋律的离心力增大,和谐性降低;如果取的太少,则会使得伴奏呆板,灵活性降低. 因此,固定取几个和弦的方法往往会使得伴奏效果不令人满意. 为此,采用自适应方法,以所有可能的和弦个数为变量进行个数的计算. 为了兼顾和谐性和灵活性,采用式(6) 来自动选取参与后面匹配的和弦个数.

$$N = \begin{cases} N_{\max}, & N_{\max} < 4, \\ \text{int}(N_{\max} \cdot \text{Rand}(a, b) / 10 + 0.5), & \text{其他}. \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式中, N 为参与匹配的和弦个数, N_{\max} 为所有可能的和弦个数, int 为取整运算符, a, b 的值通过(7) ~ (12) 式来计算.

$$X(i) = \begin{cases} \text{Rand}(5, 6), & i \in [0, 39], \\ X(i-40) + \text{Rand}(3, 4), & i \in [40, 79], \\ X(i-80) + \text{Rand}(-3, 3), & i \in [80, 99], \end{cases} \quad (7)$$

$$T = \text{Rand}(0, 1), \quad (8)$$

$$a |_{T=0} = X(\text{Rand}(0, 39)), \quad (9)$$

$$b |_{T=0} = X(\text{Rand}(40, 79)), \quad (10)$$

$$a |_{T=1} = X(\text{Rand}(80, 99)), \quad (11)$$

$$b |_{T=1} = a |_{T=1} + X(\text{Rand}(0, 39)). \quad (12)$$

通过上面的计算,便可获取 N 的值,将排序后的数组进行截取,最终得到该小节的和弦域 $C = \{Cd[0], Cd[1], \dots, Cd[N-1]\}$. 接下来的小节用同样的处理方法,依次类推,直至生成一个乐句的三元和弦族 $S = \{C[0], C[1], \dots\}$. 对整合的各乐句进行上面的处理,即可得到每个乐句三元和弦域序列.

(6) 将各乐句的三元和弦域序列与和弦进行知识库进行匹配,获取各乐句的目标三元和弦序列. 先结合调式类别,搜集抒情歌曲常用的和弦进行,构建和弦进行的知识库. 然后采用下面的方法进行匹配:首先,计算当前乐句的小节个数 B_n ,然后提取数据库中所有元素个数为 B_n 的和弦字符串,存储到临时数组 $Cb = \{Cb[0], Cb[1], \dots, Cb[B_n-1]\}$ 中. 然后,提取当前乐句 $C[0]$ 中 $Cd[0]$ 的第 1 元和弦 Cd_1 ,从 Cb 中寻找所有起始和弦根音为 Cd_1 的元素,组成一个 Cb 的子集 Cb' . 如果该子集中某元素的第 2 个和弦根音与 $C[1]$ 中 $Cd[0]$ 的第 1 元和弦相同,则和弦族 S 的下标递增;反之,则 S 的下标不变,和弦域 C 的下标递增. 依次类推,直至从 Cb' 中找到匹配率大于 80% 的和弦进行字符串 $Cb[i]$,每匹配成功 1 次,便记录下三元和弦的域下标和族下标,对这些下标对应的和弦进行排列得到的三元和弦序列即为目标.

(7) 将三元和弦序列配上伴奏音型以生成伴奏. 首先需要搜集抒情歌曲常用的伴奏音型,构建伴奏音型库. 伴奏音型^[11]一般分为柱形和弦、半分解和弦、分解和弦,它们与音乐情绪有关^[12]. 柱式和弦是指和弦音上下对齐,像一个柱状,同时弹奏多个和弦音,适合欢快或高潮部分的乐曲;半分解和弦是指依次弹奏单个或多

个和弦音,有多种组合方式,是最常用的形式;分解和弦是指依次弹奏和弦音,适合抒情柔和的乐曲^[13]。因此,在构建抒情歌曲的伴奏音型数据库时,半分解和弦与分解和弦所占的比例控制在80%~90%之间,柱形和弦也占一定比例,以丰富音乐的表现力。结合钢琴音色模拟技术^[14],从库中随机选取满足调式、节拍等参数的伴奏音型,根据其中的音程关系和位置关系,最终生成伴奏。

2 实验

为了验证自适应和弦伴奏算法的有效性,这里进行实验验证。先对20首抒情歌曲进行了伴奏实验测试,各首歌曲的伴奏操作流程一致,限于篇幅(五线谱图片尺寸较大),这里只呈现几个典型例子的五线谱图片,但在实验评价时展示多首作品的列表。

2.1 实验结果举例

以抒情歌曲《母亲》《时间都去哪儿了》和《传奇》为例,呈现其五线谱图片。《母亲》为E大调式,四四拍,节奏缓慢,初始的旋律如图1所示;《时间都去哪儿了》为F调小调式,四四拍,深情流畅,初始旋律如图2所示;《传奇》为E大调式,四四拍,情感丰富,初始旋律如图3所示。利用自适应和弦伴奏算法,生成的伴奏分别如图4~图6所示。



图1 《母亲》的旋律



图2 《时间都去哪儿了》的旋律



图3 《传奇》的旋律



图4 《母亲》自动伴奏结果



图5 《时间都去哪儿了》自动伴奏结果



图6 《传奇》自动伴奏结果

2.2 实验结果评估与分析

由于艺术的特殊性,因此传统的比较评价方法不适用于艺术的评价。很多学者对评价的方法进行了研究,比较公认的、有效的方法^[15]是将机器的伴奏和人工的伴奏放在一起,通过试听的方法,由人来区分,通过区分的错误率来评价机器伴奏的效果。为此,本文也采用此种评价方法。

考虑到人在评价时心理状态的变化,为了使得评估结果有效,这里从这20首自动伴奏的乐曲中随机选取10首。用数字1~10表示曲目序号,分别为《母亲》《时间都去哪儿了》《我会好好的》《一生有你》《传奇》《怒放的生命》《听海》《童话》《我愿意》《因为爱情》。加上对应的人工伴奏(人工伴奏产生的过程是这样的:伴奏者根据输入旋律的主观感觉,手动输入伴奏的音符信息,保存为MIDI输出)的10首,共10对乐曲参与评价试验。邀请30位年龄在20~45岁之间的评估者(含音乐专业人员12人,非专业的音乐爱好者18人)参与试

听,随机播放它们,让这30位受试者回答所播放的乐曲是人工伴奏还是机器伴奏,统计回答的人数,根据回答错误的人数在总人数中所占的比例得出回答错误率.伴奏方式有“机器”和“人工”两种选项,回答机器伴奏的人数和回答人工伴奏的人数分别用“机器人人数”、“人工人数”来表示,如表1所示.

通过表1可以算出回答的平均错误率为45.84%,而平均错误率的期望值为50%,因此相对误差为8.33%.后来又做了与上面类似的实验,在作品规模(扩展至80首,包括民族的,流行的)和评估规模(扩展至50人,包括音乐学院和非音乐学院的大一到大三的学生,考虑到人评估的心理变化反应,做了对作品4次的评估实验,经过20d返回结果)上进行了扩大,最终得出的回答错误率的平均值为44.91%,相对误差为10.18%,限于篇幅,这里就不再列出详细的清单(形式类似于表1的例子).

表1 实验结果统计

曲目序号	伴奏方式	机器人人数	人工人数	错误/%
1	机器	16	14	46.7
1	人工	13	17	43.3
2	机器	14	16	53.3
2	人工	15	15	50.0
3	机器	16	14	46.7
3	人工	12	18	40.0
4	机器	15	15	50.0
4	人工	13	17	43.3
5	机器	16	14	46.7
5	人工	14	16	46.7
6	机器	17	13	43.3
6	人工	15	15	50.0
7	机器	16	14	46.7
7	人工	12	18	40.0
8	机器	15	15	50.0
8	人工	13	17	43.3
9	机器	16	14	46.7
9	人工	12	18	40.0
10	机器	14	16	53.3
10	人工	11	19	36.7

上面的数据总体还令人满意,虽然机器伴奏与人工伴奏还存在一定的差距,但已经很小,因此可以说,人们不容易分清是人工的伴奏还是通过自适应算法生成的机器伴奏.

3 总结

本文面向抒情歌曲这一大众喜欢的歌曲类型,构建了自适应伴奏算法,为广大音乐爱好者提供了基本的伴奏方法和载体.由于人们的审美观存在差异,如果他们对输出伴奏结果的某个和弦或某个音不满意,可以进行修改,而不是从零开始进行伴奏,因此很大程度上减少了他们伴奏的工作量.

抒情歌曲不仅有流行的,国外的,还有中国民族的.由于风格存在不同,调式存在差异,和弦结构也会不同,因此,目前已有的建立在三度音程关系的自动伴奏方法就不能满足各类风格的伴奏需求.本文提出的自适应伴奏算法是考虑了各种抒情歌曲风格的和弦可能性,综合给出了和弦的求解,不同的风格采用不同的和弦结构,对应着不同的三元和弦内部音程参数,因此,该算法具有更普遍的实用性.

在进行和弦求解时,和弦中各和弦音比例的处理,应该具有动态性,而目前已有的技术是固定比例模式.为了解决这个问题,本文在处理三元和弦中各和弦音的比例时,采用了自适应的方法,使得它更符合旋律具有的不确定性这一特征.

由于对和弦进行了泛化和动态处理,因此实验结果还令人满意.当然,机器伴奏跟人工伴奏还是不同的,机器伴奏要考虑大多数人喜欢的方式进行构建算法,具有共性特征;而人工伴奏是感性的,具有个性特征.为了提高伴奏效果,在以后的研究中将进一步挖掘影响伴奏效果的因素,使得它们的作用在算法中尽可能的得

以体现.

参 考 文 献

- [1] Huang C F, Nien W P, Yeh Y S. Learning effectiveness of applying automated music composition software in the high grades of elementary school[J]. *Computers & Education*, 2015, 83: 74-89.
- [2] Sagayama S, Nakamura T, Nakamura E, et al. Automatic music accompaniment allowing errors and arbitrary repeats and jumps[C]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Providence, 2015.
- [3] Cont A, Echeveste J, Giavitto J L. The cyber-physical system approach for automatic music accompaniment in Antescofo[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(4): 2377-2377.
- [4] Feng Y, Chen K, Liu X B. Harmonizing melody with meta-structure of piano accompaniment figure[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2011, 26(6): 1041-1060.
- [5] Paiement J F, Eck D, Bengio S. Probabilistic melodic harmonization[C]//Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence. Berlin: Springer, 2006.
- [6] Al-Ghawanmeh F M, Shannak Z R. Automatic Accompaniment to Arab Vocal Improvisation: From Technical to Commercial Perspectives[J]. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2015, 8(1): 16.
- [7] Magalhaes J P, Koops H V. Functional generation of harmony and melody[C]. *Proceedings of the 2nd ACM SIGPLAN international workshop on Functional art, music, modeling & design*, New York, 2014.
- [8] Navarro M, Caetano M, Bernardes G, et al. Automatic generation of chord progressions with an artificial immune system[C]//International Conference on Evolutionary and Biologically Inspired Music and Art. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 175-186.
- [9] 曹西征, 毛文涛, 乔 锐, 等. 基于音高旋律元的柔和乐曲的自动作曲算法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(10): 1627-1638.
- [10] Bakker D R, Martin F H. Musical chords and emotion: Major and minor triads are processed for emotion[J]. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 2015, 15(1): 15-31.
- [11] 陈 魁. 基于音型数据库的钢琴自动伴奏系统的研究与设计[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [12] Chen P C, Lin K S, Chen H H. Emotional Accompaniment Generation System Based on Harmonic Progression[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(7): 1469-1479.
- [13] Chen P C, Lin K S, Chen H H. Automatic accompaniment generation to evoke specific emotion[C]. 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), San Jose, 2013.
- [14] 曹西征, 曹 英, 孙 林. 面向学前教育教学的钢琴音色的计算机模拟[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 47-50.
- [15] Lo M Y. Evolving cellular automata for music composition with trainable fitness functions[D]. Kaochesite, University of Essex, 2012.

Automatic Piano Accompaniment Algorithm for the Melodies of Lyric Songs

CAO Xizheng^{a,b}, NIU Jingwen^a, QIN Jie^a, SUN Zhiyong^a

(a. College of Computer and Information Engineering; b. Engineering Lab of Intelligence Business & Internet of Things, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: At present, the disharmonious problem exists in the automatic piano accompaniment. One of the important reasons is that the stationarity of chord processing often can't meet the requirement of the uncertainty of melody. Therefore, this paper proposes an adaptive accompaniment algorithm for the melodies of lyric songs whose time signature is fixed. First, the segmentation of bars and the integration of phrases are conducted in melody based on time signature. Second, the more generalized ternary chords are defined on the basis of the traditional triads of three intervals, and the inner intervals of the ternary chords are obtained adaptively. Third, the melody tone's contributions to the chord are adaptively computed to get all the possible ternary chords in bars. Fourth, the number of chords is obtained automatically, and some of them are matched with their knowledge base. Finally, the chords which are matched successfully are added a suitable accompaniment figure, and the piano accompaniments are generated. The experiment results show that people can't easily distinguish the accompaniments generated by this algorithm from that generated by manual.

Keywords: automatic accompaniment; lyric song; adaptive accompaniment; ternary chord