

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学 号: 24320131152447

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于特征旋律挖掘的二阶马尔可夫链在算法作  
曲中的研究与应用

Research and Application on the Second-Order Markov Chains  
Based on Feature Melody Mining in Algorithmic Composition

郭 威

指 导 教 师 : 王 备 战 教 授

专 业 名 称 : 软 件 工 程

论 文 提 交 日 期 : 2 0 1 6 年 4 月

论 文 答 辩 日 期 : 2 0 1 6 年 5 月

学 位 授 予 日 期 : 年 月

指 导 教 师: \_\_\_\_\_

答 辩 委 员 会 主 席: \_\_\_\_\_

2016 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年 月 日

## 摘要

算法作曲是如今国内外许多研究者和作曲家都十分关注和颇感兴趣的一个新兴跨学科领域。本文首先针对算法作曲领域内已有的各类研究做了资源整合、归纳与知识分享工作，即对该领域相关的文献进行了较为详细的分类介绍与优劣述评，并在此基础上，结合自己的探究与思考而尝试设计和提出一种新的用于音乐片段分析与特征旋律挖掘的 ISM 算法，即音程序列挖掘算法。该算法是从用于关联规则挖掘的 Apriori 算法思想中获得启发，并结合相关乐理知识和作曲家作曲的心理过程来进行设计的，它以挖掘到的音乐片段中出现次数最多并相对较长的音程序列作为该音乐片的特征旋律。

算法作曲领域可以大致分为两个方向，一个方向是如何用算法分析已有的音乐作品，另一个方向是如何用算法生成新的音乐作品。本文所提出的 ISM 算法属于前者，对于后者本文采用的主要模型是马尔可夫链模型，它常被用于生成新的音乐片段。本文以 Max/MSP 软件为算法作曲平台，该软件在国外已较为成熟，但在国内的使用范围还不是很广，笔者经学习发现其实用性较强，而且界面设计也十分友好，故花了一定的篇幅对其基本操作方法进行介绍。之后，在其上分别实现了一阶和二阶马尔可夫链模型，并进行相应的验证性实验。从实验结果来看，二阶马尔可夫链模型生成新乐曲的旋律线与用于训练模型的原曲旋律线吻合度更高，效果更好。

本文不仅提出了 ISM 算法，还进一步将该算法和二阶马尔可夫链模型相结合，用实验验证了其在生成具有给定训练乐曲音乐风格的新音符序列时的有效性，并以二者结合的方法探索性地创作了一曲名为《巴赫创意变奏曲》的新音乐小品，这算是在算法作曲领域中所做的一次新的尝试。

**关键词：**算法作曲；特征旋律挖掘；马尔可夫链

## Abstract

Nowadays, algorithmic composition has become a new interdisciplinary field, many researchers and composers both at home and abroad are very concerned about it and find it interesting. In the thesis, all kinds of research resources of algorithmic composition have been integrated, concluded and shared with others, namely related literature in this area are collected and introduced in a more detailed classification and a pros and cons review is given at last part of each class. On this basis, the author combines his inquiry and thinking, and then try to design and put forward a new ISM algorithm, namely interval sequence mining algorithm, for analysing music clips and mining its feature melody. The ISM algorithm gets its inspiration from the idea of Apriori algorithm, which is used for mining association rules. The design of ISM algorithm also takes relative knowledge of music and psychological process of a composer while he is composing into consideration. The goal of the ISM algorithm is to find interval subsequence, which has highest frequency and relatively long length, in the musical piece. And then the algorithm outputs this interval subsequence as the feature melody of the given musical piece.

The field of algorithmic composition can be roughly divided into two directions. For one thing, it is about how to use algorithm to analyze the existing musical pieces. For another, it is about how to use algorithm to generate new musical pieces. The ISM algorithm proposed in the thesis belongs to the former. As for the latter, the Markov Chain Model is used in the thesis, this model is often used to generate a new piece of music. In the thesis, the Max/MSP software is used as algorithmic composition platform. This software has becoming more and more mature in foreign countries, but in the domestic, the range of using this software is still not very wide. After learning, the author found Max/MSP has a strong practicability, and it also has a very friendly and well-designed user interface. So the author spends a certain amount of space to introduce its basic operation methods. Then the author builds the first-order Markov Chain Model and the second-order Markov Chain Model on Max/MSP platform respectively, and do some corresponding validation experiments. From the perspective of experimental results, the

melody line of new musical piece generated by the second-order Markov Chain Model has a better fitness and good result with the melody line of the original musical piece, which is used for training the model.

The author not only proposed the ISM algorithm, but also combined it with the second-order Markov Chain Model. This combination has been proved effective and meaningful by experiments. The combination method can generate new musical piece with the musical style of the given training musical piece. Then the author used this combination method to do an exploratory experiment and composed a new musical piece named *Variations on A Bach's Invention*. It can be considered a new attempt in the field of algorithmic composition.

**Key Words:** Algorithmic Composition; Feature Melody Mining; Markov Chains

# 目 录

<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 音乐的起源.....	1
1.2 算法与作曲的渊源.....	2
1.2.1 算法作曲简史.....	2
1.2.2 作曲算法.....	6
1.2.3 算法作曲.....	7
1.3 论文的研究内容.....	8
1.4 论文的组织结构.....	9
<b>第二章 算法作曲的相关研究 .....</b>	<b>11</b>
2.1 语法表示.....	11
2.2 基于规则的知识库系统.....	12
2.3 马尔可夫链.....	13
2.4 人工神经网络.....	15
2.5 进化算法.....	16
2.6 本章小结.....	17
<b>第三章 相关理论与工具 .....</b>	<b>18</b>
3.1 作曲的心理过程.....	18
3.2 马尔可夫链的基本原理.....	19
3.3 Max/MSP 平台简介 .....	21
3.3.1 平台概述.....	21
3.3.2 常用基本功能单位简介.....	22
3.3.3 Max/MSP 的基本操作模式 .....	25
3.4 Sibelius 软件简介 .....	26
3.5 本章小结.....	27
<b>第四章 特征旋律挖掘算法的设计 .....</b>	<b>28</b>

4.1 灵感来源——Apriori 算法思想的影响.....	28
4.2 ISM 算法的设计.....	30
4.2.1 算法涉及的乐理知识.....	31
4.2.2 乐理到算法的映射.....	33
4.2.3 ISM 算法的设计思路.....	36
4.3 本章小结.....	42
<b>第五章 实验设计及结果分析.....</b>	<b>43</b>
5.1 实验环境.....	43
5.2 模型构建——马尔可夫链在 MAX 中的实现.....	43
5.2.1 一阶马尔可夫链模型的构建.....	44
5.2.2 二阶马尔可夫链模型的构建.....	47
5.3 验证性实验.....	51
5.3.1 一阶与二阶马尔可夫链的对比实验.....	52
5.3.2 ISM 算法与二阶马尔可夫链相结合的实验.....	60
5.4 探究性实验——生成新的音乐小品.....	62
5.5 本章小结.....	65
<b>第六章 总结与展望.....</b>	<b>66</b>
6.1 总结.....	66
6.2 展望.....	67
附录 A.....	71
附录 B.....	78
附录 C.....	80
参考文献.....	85
攻读硕士研究生期间发表的论文.....	90



厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 The Origin of Music.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 The Origin Between Algorithm and Composition .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 A Brief History of Algorithmic Composition.....	2
1.2.2 Algorithm for Composition.....	6
1.2.3 Algorithmic Composition .....	7
<b>1.3 Research Contents .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Structure Arrangements.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapter 2 Relative Research of Algorithmic Composition .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Grammar Representations.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Rule-Based and Knowledge-Based Systems .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Markov Chains.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Artificial Neural Networks.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5 Evolutionary Algorithms.....</b>	<b>16</b>
<b>2.6 Summary.....</b>	<b>17</b>
<b>Chapter 3 Relative Theories and Tools .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 The Psychological Process of a Composer While He Is Composing.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 The Basic Theory of Markov Chains .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 A Brief Introduction of Max/MSP Platform .....</b>	<b>21</b>
3.3.1 Summary of the Platform.....	21
3.3.2 A Brief Introduction of Commonly Used Basic Functional Units.....	22
3.3.3 Basic Operation Modes of Max/MSP .....	25
<b>3.4 A Brief Introduction of Sibelius .....</b>	<b>26</b>
<b>3.5 Summary.....</b>	<b>27</b>

<b>Chapter 4 The Design of a Feature Melody Mining Algorithm.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 The Origin of Inspiration — the Influence of the Idea of Apriori Algorithm .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 The Design of ISM Algorithm .....</b>	<b>30</b>
4.2.1 Relative Musical Knowledge.....	31
4.2.2 The Mapping of Musical Knowledge to the Algorithm.....	33
4.2.3 The Idea of Designing ISM Algorithm .....	36
<b>4.3 Summary.....</b>	<b>42</b>
<b>Chapter 5 Experimental Design and the Analysis of Results.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Experimental Environments .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 Model Building — the Implementation of Markov Chains on MAX .....</b>	<b>43</b>
5.2.1 The Building of the First-Order Markov Chain Model .....	44
5.2.2 The Building of the Second-Order Markov Chain Model .....	47
<b>5.3 Validation Experiments .....</b>	<b>51</b>
5.3.1 Contrast Experiments Between the First-Order and the Second-Order Markov Chains .....	52
5.3.2 The Experiment of the Combination of ISM Algorithm and the Second-Order Markov Chains.....	60
<b>5.4 The Exploratory Experiment — Generating a New Musical Piece .....</b>	<b>62</b>
<b>5.5 Summary.....</b>	<b>65</b>
<b>Chapter 6 Conclusions and Prospects.....</b>	<b>66</b>
6.1 Conclusions.....	66
6.2 Prospects .....	67
<b>Appendix A .....</b>	<b>71</b>
<b>Appendix B .....</b>	<b>78</b>
<b>Appendix C.....</b>	<b>80</b>

<b>References .....</b>	<b>85</b>
<b>Publications .....</b>	<b>90</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>91</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 音乐的起源

古今中外，无数爱智慧之人，在他们漫长的人生道路上无不对宇宙间万物的起源充满了无限的好奇与不懈的追问。人们对宇宙、生命、物质、意识等方面起源的追问古已有之，并将在未来不断地被继续追问下去。“物有本末，事有始终”，音乐亦不例外，人类社会音乐之起源可以追溯至非常久远的洪荒时代。“早在人类语言诞生之前，人们就已经知道如何利用声音的高低、强弱、适时停顿等来表达自己的意思和情感。”<sup>[1]</sup> 历代致力于研究音乐起源的学者们各有说法，莫衷一是，其中较有代表性的有自然模仿说、情感或娱乐说、巫术说、语言说和劳动起源说等。古人与今人一样，都有思想、有感情、有信仰、有劳动、会模仿自然界的事物，“所以音乐的起源是来源于人们对未知事物的求知欲望、来源于人们的感情世界、来源于人们的生活习惯和劳动习惯”<sup>[2]</sup>，原因多元，不可一概而论。

音乐在人类历史与社会发展进程中扮演着十分重要的角色。古希腊哲人柏拉图在他的对话录《理想国》卷三中写到：“音乐教育比起其他教育都重要得多。头一层，节奏与乐调有最强烈的力量浸入心灵的最深处，如果教育的方式合适，它们就会拿美来浸润心灵，使它也就因而美化；如果没有这种适合的教育，心灵也就因而丑化。其次，受过这种良好的音乐教育的人可以很敏捷地看出一切艺术作品和自然界事物的丑陋，很正确地加以厌恶；但是一看到美的东西，他就会赞赏它们，很快乐地把它们吸收到心灵里，作为滋养，因此自己性格也变成高尚优美。他从理智还没有发达的幼年时期，对于美丑就有这样正确的好恶，到了理智发达之后，他就亲密地接近理智，把她当作一个老朋友看待，因为他的过去音乐教育已经让他和她很熟悉了。”<sup>[3]</sup> 我们知道，意识形态往往为它所出自的社会基础服务，柏拉图之所以这样说，与他当时所处的社会环境和历史背景是分不开的。他是贵族出身，他所提出的教育理念多是为统治阶级和政治服务的。在古代中国，不论是奴隶制社会还是封建社会，音乐都是统治者一贯推崇的，音乐被用来治

理国家与维护社会的安定。孔子于春秋时期提出：“礼、乐、书等六艺”，把乐放在第二位，足可见出音乐在我国当时社会上的地位之高。暂撇开上述细节不论，近两千五百年前的古人就如此提倡音乐教育，亦足以使我们管窥到音乐教育对人的重要性和深远影响。

## 1.2 算法与作曲的渊源

### 1.2.1 算法作曲简史

公元前 4000 年左右，在“人类文明的发祥地”两河流域的交汇处，人类最早的文字——楔形文字被聪明的苏美尔人发明了。与此同时，他们还发明了“一周七天”、“一年十二个月”等历制，这就好比是算法诞生之初的混沌状态。

公元前两三千年来左右，人类最早关于算法的文字和符号记录在两河流域的众多黏土板上被发现。其中的“计算利息何时能够与本金相等”就是一个典型的例子。到公元前 2100 年，科学家通过研究发现，黏土板上还记载着大量巴比伦人已获得的数学知识，其中有倒数表、乘法表、平方表和立方表等，当时的乘法表采用六十进制计数法。这些都为算法的萌芽奠定了基础。

到大约公元前 1000 年时，欧几里得算法诞生，这是人类目前已知最为古老而成型的算法。该算法即辗转相除法，用于计算两个正整数的最大公约数。在我国，欧几里得算法的描述可以追溯至东汉时的数学专著《九章算术》。

其后的两千多年间，伴随着世界各地文明的发展，语言的不断进步使得人们的沟通更加便利，同时也使得大量数学知识得以积累和传播。各类数学理论体系逐步形成与完善，数学著作大量涌现、汗牛充栋，数字系统也应运而生。算法的产生与发展自然离不开符号、语言、数学理论和用于设计的数字系统这些必要前提条件。“算法是人类思维抽象化和形式化发展进程中的产物”<sup>[4]</sup>，是人类智慧的果实与结晶。就算法思维的发展史而言，“一个必要的抽象化进程就发源于这类算法系统的逐步完善之中。”<sup>[5]</sup> 算法的抽象化思维方式，是在人类对世界的理解和认知基础上，归纳总结出普遍事物中蕴含的规律，进而抽象地提升为一个完整的、规范的、具有特定步骤的方法体系这样一个思维的过程。

1842 年，英国数学爱好者拜伦（Ada Augusta Byron）设计了巴贝奇分析机上求解伯努利方程的一个程序，她还建立了循环和子程序等概念。至此，世界上第一个计算机程

序诞生了，拜伦也因此被视为“世界上第一个为计算机写程序的人”。

1936年5月，英国数学家图灵（Alan Mathison Turing）向伦敦权威数学杂志投递了一篇题为《论数字计算在决断难题中的应用》的论文，在这篇重要的论文中，他为“可计算性”下了严格的数学定义，提出了一种可用于辅助数学研究的机器——著名的“图灵机”的设想。他的理论对后来算法的发展起了至关重要的推动作用。

1946年2月14日，世界上第一台可编程通用计算机 ENIAC 在美国宣告诞生。算法本是独立于计算机之外的概念，它是一种思维方式，而计算机则为这种思维的产物提供了实现技术和手段。计算机的诞生似一针兴奋剂，让算法有了一片更为广阔的驰骋之地。

以上是对算法和计算机的诞生与发展所进行的简要介绍，在这个背景之下，“算法作曲”也因而有了得以孕育萌生的沃土和有利条件，构建音乐结构的各类算法开始逐步被提出和应用开来。

相较于音乐的起源，算法的诞生已大大滞后；而相较于算法的诞生，“算法作曲”概念的出现亦大大在其之后，迄今仅有短短三四百年的历史。古希腊数学家毕达哥拉斯在对其门徒的教诲中指出：“音乐和算数是不可分割的，数字是打开整个精神世界和物质世界的钥匙，而乐音和节奏体系既然是按数字排列，就必然体现天地之和谐并与宇宙相对应。”<sup>[6]</sup> 在毕达哥拉斯学派的美学观念中，他们认为“美在于数与和谐”<sup>[7]</sup>。这个思想此后几乎影响了西方整个艺术发展的走向，数所表达的和谐感与对称美是艺术长久以来所追求的理想境界。

历史上最有名的早期“算法作曲”之例当属十八世纪奥地利音乐大师莫扎特（Wolfgang Amadeus Mozart）于1787年创作的 Mozart's Musical Dice Game。在这个作曲骰子游戏中，莫扎特预先写好了176个小步舞曲（Minuet）音乐片段（即小节）和96个三重奏（Trio）音乐片段。小步舞曲音乐片段的规则表见表1-1和表1-2，三重奏音乐片段的规则表见表1-3。三张规则表中，每一列的列号代表乐曲的各个小节编号（一个随机乐曲共32小节：从第1小节到第32小节），而每一行的行号代表掷骰子产生的随机数的值（前16小节小步舞曲部分的每个小节由掷两枚骰子所得的点数之和来决定随机抽取到的行号，后16小节三重奏部分的每个小节由掷一枚骰子所得的点数来决定随

机抽取到的行号)。

表 1-1: Mozart's Musical Dice Game 小步舞曲音乐片段规则表

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>2</i>	96	22	141	41	105	122	11	30
<i>3</i>	32	6	128	63	146	46	134	81
<i>4</i>	69	95	158	13	153	55	110	24
<i>5</i>	40	17	113	85	161	2	159	100
<i>6</i>	148	74	163	45	80	97	36	107
<i>7</i>	104	157	27	167	154	68	118	91
<i>8</i>	152	60	171	53	99	133	21	127
<i>9</i>	119	84	114	50	140	86	169	94
<i>10</i>	98	142	42	156	75	129	62	123
<i>11</i>	3	87	165	61	135	47	147	33
<i>12</i>	54	130	10	103	28	37	106	5

资料来源: <http://sunsite.univie.ac.at/Mozart/dice/rules.txt> (表 1-2、1-3 也均来源于此)。

表 1-2: Mozart's Musical Dice Game 小步舞曲音乐片段规则表 (续表)

	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>
<i>2</i>	70	121	26	9	112	49	109	14
<i>3</i>	117	39	126	56	174	18	116	83
<i>4</i>	66	139	15	132	73	58	145	79
<i>5</i>	90	176	7	34	67	160	52	170
<i>6</i>	25	143	64	125	76	136	1	93
<i>7</i>	138	71	150	29	101	162	23	151
<i>8</i>	16	155	57	175	43	168	89	172



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.