



北京市高等教育精品教材立项项目

# 电子音乐与计算机音乐 基础理论

黄忱宇 著



**ELECTRONIC  
AND  
COMPUTER MUSIC**

华文出版社

# 电子音乐与计算机音乐 基础理论

黄忱宇 著

华文出版社

**图书在版编目 ( C I P ) 数据**

电子音乐与计算机音乐基础理论/黄忱宇著. —北京: 华文出版社, 2005. 8

ISBN 7 - 5075 - 1834 - 5

I. 电… II. 黄… III. 计算机应用—音乐制作—理论研究 IV. J619 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 062485 号

**华 文 出 版 社**

(邮编: 100055 北京市宣武区广外大街 305 号 8 区 5 号楼)

网址: <http://www.hwcbs.com.cn>

网络实名名称: 华文出版社

电子信箱: [hwcbs@263.net](mailto:hwcbs@263.net)

电话: (010) 63370164      (010) 63370992

(010) 63370993      (010) 63370996

新 华 书 店 经 销

三 河 市 东 兴 印 刷 有 限 公 司 印 刷

787×980    16 开本    13.625 印张    150 千字

2005 年 9 月第 1 版      2005 年 9 月第 1 次印刷

印数: 0001 - 5000 册

定价: 24.00 元

# 前 言

这是一部关于电子音乐、计算机音乐基础理论的教科书。

电子音乐、计算机音乐技术理论尽管丰富庞杂，但仍可大致分为应用理论和基础理论两类。应用理论是随着电子数字技术飞速发展而日新月异变化着的理论。它包括各种类型的计算机软件学习书籍和技术指南，而基础理论则是电子音乐、计算机音乐理论中相对稳定、基本的部分，它要解释整个理论体系中的一些基本概念和基本原理。

电子音乐基础理论的源头，可追溯到 20 世纪中叶西方电子音乐的艺术探索。只是半个多世纪已经过去，随着电子信息技术的飞速发展，电子音乐从技术上、艺术上都有了翻天覆地的变化。今天，在数字技术已经相当成熟的环境下，大多数电子音乐实践都采用了以计算机为基础平台的制作方式，因此，本书的理论焦点也更多地集中在计算机音乐的数字音频技术层面上。正是出于对历史和现状的全面考虑，我将本书取名为《电子音乐与计算机音乐基础理论》<sup>①</sup>。

---

① 本书书名的确定是个颇费周折的事。电子音乐本是个大的概念，起名为《电子音乐基础理论》似已可以了，但国外更多的类似理论书籍的书名多与“计算机”联系在一起，如颇有影响力的 Dodge 编写的 Computer Music、网上可以看到的 Online Tutorials on Computer Music、Dartmouth 大学的 Music and Computer、Peter Manning 撰写的 Electronic and Computer Music 等等，出于对电子音乐历史和现状的全面考虑，同时也借 Peter Manning “Electronic and Computer Music” 书名的启示，笔者将书名最终确定为《电子音乐与计算机音乐基础理论》。

作为基础理论，本书所涉内容并不是全新的。在国外，电子音乐已经发展了半个多世纪，其技术理论已经相对成熟。本书所涉及的内容，在今天的西方计算机音乐界早已普及，其流行的程度可以在国外各大学、研究机构相继出版的各种同类书籍中体现出来，甚至在网上也已有了各种版本的计算机音乐技术理论指南。本书的撰写也大大得益于这些文献、书籍的帮助。

令人遗憾的是，西方已经普及了数十年的电子音乐和计算机音乐基础理论，在我国竟还没有建立，这与国内如火如荼的计算机音乐发展势头极不相称。从这个意义上讲，这本书确是一部国内专业音乐院校急需的教科书，也是一部填补国内电子音乐、计算机音乐理论空白的教科书。

本书的特点，是它的跨学科性。书中所涉内容包括电子声学、心理声学、数学、数字音频理论、作曲基础理论、计算机理论等领域。也许正因为如此，本书的写作（至少对于音乐出身的我）是一项艰巨困难的工作，它的困难不在于其中的技术有多么高深，而在于它的多学科交叉特性，这也从另一方面解释了为什么计算机音乐在国内发展了这么久，而迟迟无人撰写这类书籍的主要原因。<sup>①</sup>

电子音乐、计算机音乐基础理论的建立，对于一个国家的整体音乐文化的发展是至关重要的，对于各音乐院校的计算机音乐教学体系建设更是不可缺少的。它不仅可满足专业院校迫在眉睫

---

① 本书迟迟无人撰写的另一个原因，也许与我国电子音乐、计算机音乐发展走的是一条市场化、实用型，甚至是作坊式的发展道路有关，社会需要更多的是实践家，似乎不很需要理论，这样一本看起来似乎与计算机音乐实用没有直接关联，且又略显晦涩的理论书籍似乎不是众多实践家们的兴趣所在。

的计算机音乐教学，同时也是今后我国电子音乐、计算机音乐理论体系建设的基石。基于这样的认识，笔者用了几年的时间，潜心准备、研读国外各类参考资料，最终完成了全书的撰写工作。

由于本书内容所涉及学科较多，虽然笔者倾注了全力，仍难免会出现一些不足和缺憾，希望在日后的学习和工作中能够逐渐加以修正和完善。在此，笔者热切期望各方专家、同行能够对本书提出宝贵意见。

黄忱宇

2005年春于中央音乐学院

# 目 录

<b>第一章 基本概念</b> .....	(1)
1.1 电子音乐基本概念 .....	(1)
1.2 电子音乐的分类 .....	(4)
1.3 计算机音乐基本概念 .....	(7)
1.4 “工具”论的原则 .....	(9)
<b>第二章 从模拟时代到数字时代</b> ——电子音乐历史发展概述 .....	(11)
2.1 早期的电子音乐尝试 .....	(11)
2.2 法国的具体音乐与德国的纯电子音乐 .....	(12)
2.3 磁带技术和古典工作室时期 .....	(14)
2.4 现场电子音乐 (Live Electronic Music) .....	(15)
2.5 合成器 (Synthesizer) 音乐 .....	(17)
2.6 从合成器的数字化到 MIDI .....	(18)
2.7 计算机音乐 (Computer Music) .....	(20)

### 第三章 音乐声学中几个基本概念

——音乐声学基础之一 ..... (25)

3.1 声音与波、声波、简谐波、波长 ..... (25)

3.2 频率与音高 ..... (27)

3.3 频率与音程的关系 ..... (29)

3.4 频率与传统律制的关系 ..... (30)

3.5 振幅与音量 ..... (31)

### 第四章 声学理论中影响音质(音色)的诸多要素

——音乐声学基础之二 ..... (33)

4.1 相位 (Phasor) ..... (33)

4.2 相位消长 (Phase Cancellation) ..... (36)

4.3 简谐波与复合波 ..... (38)

4.4 包络 (Envelope) ..... (42)

### 第五章 常见的几种声音资源与声电、数模转换

——音乐声学基础之三 ..... (45)

5.1 电子音乐中常见的几种波形和声音资源 ..... (45)

5.2 声电转换 ..... (51)

5.3 数模转换 ..... (52)

### 第六章 心理声学 (Psychoacoustics)

——音乐声学基础之四 ..... (55)

6.1 频率与音高 ..... (56)



6.2	振幅与音量 .....	(57)
6.3	音色感觉 .....	(61)
6.4	瞬时关系 .....	(63)
6.5	声向与方位感 .....	(64)
<b>第七章 数字音频基础</b>		
	——数字音频基础之一 .....	(66)
7.1	信号取样 (离散时间取样) .....	(66)
7.2	量化与量化误差 .....	(70)
7.3	数字音频信号的五个特点 .....	(74)
<b>第八章 数字合成基础</b>		
	——数字音频基础之二 .....	(75)
8.1	在计算机音乐语言中, Instrument 的含义和级别 .....	(76)
8.2	信号流程图 .....	(78)
8.3	数字振荡器基本原理 .....	(80)
8.4	两个典型的语音系统语言中的 Instrument 定义 .....	(86)
<b>第九章 傅立叶系列与傅立叶变换</b>		
	——数字音频基础之三 .....	(87)
9.1	傅立叶系列 .....	(87)
9.2	傅立叶变换与 DFT, FFT and IFFT .....	(89)
9.3	FFT 工作实例 .....	(90)
9.4	格的大小 (The Frame Size) .....	(95)

## 第十章 加法合成与共振峰合成

——合成技术基础理论之一 ..... (97)

10.1 加法合成 ..... (97)

10.2 共振峰合成 (Formant Synthesis) ..... (103)

## 第十一章 减法合成与滤波器

——合成技术基础理论之二 ..... (107)

11.1 模拟滤波器与数字滤波器 ..... (108)

11.2 数字滤波器的功能分类 ..... (109)

11.3 关闭频率 ..... (111)

11.4 过渡带 ..... (111)

11.5 有限脉冲响应数字滤波器和无限脉冲响应数字滤波器 ... (112)

## 第十二章 振幅调制 (AM) 与环行调制

——合成技术基础理论之三——变形合成 1 ..... (118)

12.1 传统振幅调制 (Classical AM) ..... (119)

12.2 环行调制 (Ring Modulation) ..... (125)

## 第十三章 频率调制 (FM) 合成技术

——合成技术基础理论之四——变形合成 2 ..... (129)

13.1 基本原理 ..... (130)

13.2 FM 中频谱的计算 ..... (133)

13.3 FM 的高级形式: 复合频率调制 ..... (135)

## 第十四章 波塑形 (Waveshaping)

——合成技术基础理论之五——变形合成 3 ..... (140)

14.1 转移函数 ..... (141)

14.2 波塑形指数 ..... (143)

14.3 Chebyshev 多项式 ..... (146)

14.4 波塑形表 (Table Based Waveshapers) ..... (147)

14.5 转移函数的多种类型 ..... (147)

## 第十五章 粒子合成 (Granular Synthesis)

——合成技术基础理论之六..... (149)

15.1 发展历史 ..... (149)

15.2 基本概念 ..... (150)

15.3 基本粒子成分的划分 ..... (151)

15.4 基本粒子的包络 ..... (154)

15.5 粒子的组合与粒子云 ..... (156)

## 第十六章 物理模仿合成 (Physical Modelling)

——合成技术基础理论之七..... (160)

16.1 基本概念 ..... (161)

16.2 历史发展沿革与特性 ..... (162)

16.3 基本技术原理 ..... (163)

## 第十七章 MIDI 技术基础理论 ..... (170)

17.1 MIDI 基本概念 ..... (171)

17.2	MIDI 信息 (MIDI Messages)	(172)
17.3	MIDI 系统与通道	(177)
17.4	GM 标准	(181)
17.5	MIDI 合成技术	(183)
17.6	MIDI 的意义	(190)
<b>第十八章 声辐射与混响</b>		
18.1	声辐射	(192)
18.2	声辐射传播的物理空间属性	(193)
18.3	反射、回声与混响	(194)
18.4	混响在计算机中的应用	(195)
<b>第十九章 声音的空间感与声向</b>		
19.1	点声源、阵声源、移动声源	(199)
19.2	物理空间变化对声向感受的影响	(200)
19.3	远场与近场	(200)
19.4	声向中的耳间时间延持 (ITD)	(201)
19.5	两个耳朵对频率参数感受的区别	(202)
19.6	法国莫图斯在空间艺术上的实践	(203)
<b>主要参考资料</b>		
		(205)



# 第一章 基本概念

本章应先理解电子音乐中一些关键词语的基本含义。

比如，“电子音乐”、“计算机音乐”两个关键词汇，虽已在国内用了多年，但在很多人的心目中，两个词汇的基本含义和概念并不明晰。最明显的例证是目前很多人只将 MIDI 音乐视为计算机音乐，这种解释的流行程度可以在很多有关文章和书籍中，乃至很普及的因特网上相关文件中得以确证。其实，MIDI 音乐只是计算机音乐的一部分，而真正代表计算机音乐个性化和创造性特征，并为国内外众多计算机音乐作曲家倾注精力的部分，恰恰是我们很多人所不熟悉的领域。

## 1.1 电子音乐基本概念

电子音乐 (Electronic Music)，是通过电子设备和电子手段

生成或处理加工的音乐。<sup>①</sup>

“电子音乐”一词的含义很宽泛，这是由电子音乐自身的丰富性所决定的。在电子音乐半个多世纪的发展中，从最具先锋派特征的实验音乐，到最流行的摇滚音乐、商业音乐、电子音乐，几乎涉及了数十年来音乐发展的所有方面。

不过，电子音乐最初的起步阶段，却是在人们开发新的声音资源的热情和动力的感召下成长发展起来的。当时，正值先锋派音乐蓬勃发展的时期，为了开辟新的声音资源，许多先锋派作曲家都不约而同地采用电子手段创作和制作音乐。无形中，电子音乐这一术语在历史上有了先锋派实验音乐的特征和内涵，它似乎暗示着一种特定的风格。这种解释和传统一直延续至今，在新版的 Grove 音乐辞典中，“电子音乐”一词就已经被强调新的声音探索的“电子声学音乐”（Electro-acoustic Music）所取代。

电子音乐有两个突出特点需要说明：

第一，电子音乐在音乐声音资源上的突破。它在给音乐发展带来最丰富音色变化的同时，也对传统音乐在声音资源上带来了冲击。电子音乐的出现从根本上动摇了传统音乐观念对音乐声音资源界限的划分，因为合成或采样的声音可以是任何声音，既可以是乐音，也可以是噪音，而当一切声音都可能成为音乐的声音资源时，对音乐声音资源的界限也就不存在了。这样的突破，同时也对未来的音乐发展提出了一个敏感的问题，就是欣赏者怎样欣赏和理解这些新音乐的音响。当然，音乐的发展总是会牵涉到

<sup>①</sup> 此解释参照旧版 Grove 音乐词典关于电子音乐基本概念的界定。

比我们熟悉的音响更多的声音，但，把一般的日常声音，甚至噪音作为音乐来接受则是一种观念和态度的变化。由于电子音乐大大扩充了使用“新”的声音的可能性，因此，电子音乐在为音乐的声音资源和音响实践提供了更大的可能性的同时，也对音乐的审美、音乐的观念提出了挑战。

第二，电子音乐借助电子设备，使人类第一次实现了不用人演奏的音乐“演出”，使人类第一次可以脱离人的现场表演而呈于听众（现场电子音乐除外），这种变化尽管今天不屑一提，但在音乐发展史上却是前所未有的，它从根本上改变了音乐运作模式和人的欣赏习惯。

总之，电子音乐作为音乐发展的新生事物，不仅在创作上为未来音乐发展提供了广阔的天地，而且对传统音乐欣赏模式和音乐创作、表现体系也带来了强烈的冲击。

从更宏观的历史角度看，电子音乐其实是人类历史走向信息时代的产物。音乐的特殊性注定了音乐是反映人类生产力发展水平变化最直接、最敏感的艺术种类。在人类从原始社会、农业社会向工业社会的发展进程中，音乐一直伴随着人类生产力的逐步发展而不断成长变化。如果说，早期以声乐为主的音乐形式是人类原始社会、农业社会的产物，那么以管弦乐为标志的器乐时代则是西方几百年来工业文明的产物，这种器乐化的音乐传统一直延续至今。而20世纪以电子技术为依托的音乐实践，则是人类走向信息时代音乐探索的开端。从真空管到晶体管，从集成电路到微处理芯片，电子音乐发展正是在电子技术的不断革新中发展起来的。只有从这个宏观角度，我们才能更准确地评价电子音乐



发展的历史意义，我们才敢于确认电子音乐在 21 世纪音乐发展中的重要地位。

## 1.2 电子音乐的分类

我们可以从三个角度来为电子音乐作类型的划分。首先，从音乐发展走向的不同，可以分为走大众化道路的流行音乐、商业音乐和走专业化实验主义道路的电子声学音乐（Electro-acoustic Music），即实验音乐。当然，这两大领域在风格上又是极为丰富多样的，比如市场商业化的电子音乐领域尤其需要作更细致的划分；其次，在专业实验音乐领域内，从利用声音资源的不同和制作手段的不同，又可分为纯电子音乐和具体音乐。

纯电子音乐（Purely Electronic Music），是指通过音频技术完成的音乐。这种音乐的技术环节首先通过电子振荡器生成，然后通过其他技术手段作进一步修改、变化、合成。纯电子音乐不采用传统乐器或其他外部自然的具体音响的采样作为音乐的声音资源。早期德国的科隆电子音乐是这类音乐发展的代表，后来的一些计算机音乐部分延续了这个传统。

具体音乐（Concrete Music），以 20 世纪 50 年代法国巴黎的电子音乐为代表。具体音乐一般采用自然的或周边的音响通过各种电子手段加以处理改变形成。“自然的音响”包括日常声音、环境噪音、人声、传统乐器的音响、机械音响乃至电子乐器的音



响等。既然世上所有的音响都可以作为这类音乐的声源，艺术家们可以利用不同的途径制作不同风格样式的音乐。

从20世纪60年代以后，纯电子音乐与具体音乐两种风格逐渐相互吸收、融合，而统称为电子声学音乐(Electro-acoustic Music)。

根据制作手段和演出方式的不同，电子音乐又可分为电子声学音乐（或工作室音乐、磁带音乐）和现场电子音乐（Live Electronic Music）两类。前者是作曲家和工程师的工作；后者则加入了演奏家努力的成分。

“电子声学音乐”一词很重要，今天，在专业实验音乐领域和计算机音乐中，“电子声学音乐”是最广泛、最流行的电子音乐称谓。这个词汇的英文 Electro-acoustic Music 是个组合词，在普通字典里是查不到的，这个词汇中 acoustic 的原词应为 Acousmatic，意思是“幻听”，该词源自古希腊文 akusmatikoi。传说，毕达哥拉斯为了让学生更专注于他的讲课，要求他的学生们绝对安静地坐在屏风后面聆听导师的教诲。1955年，在一次电台访谈中，法国作家杰罗姆·培诺特（Jerome Peignot）用了“bruit acousmatique”一词来描述具体音乐中声音与它的声音源分离的现象，1966年，具体音乐创立者舍费尔在他的论文 *Traite Des Objects Musicaux* 中，将磁带音乐与毕达哥拉斯的屏风传说加以比较，强调磁带音乐在欣赏方面独立于视觉感受的专注性方面的优势。他还认为，磁带音乐让欣赏者反复地欣赏，能够使欣赏者对音乐中精微抽象的部分得到更好的理解。1974年，佛朗哥·贝尔（Francois Bayle）作为 *Groupe de Recherches Musicales* 的领导，建议采用比 Electronic Music 一词更合适的术语，即