

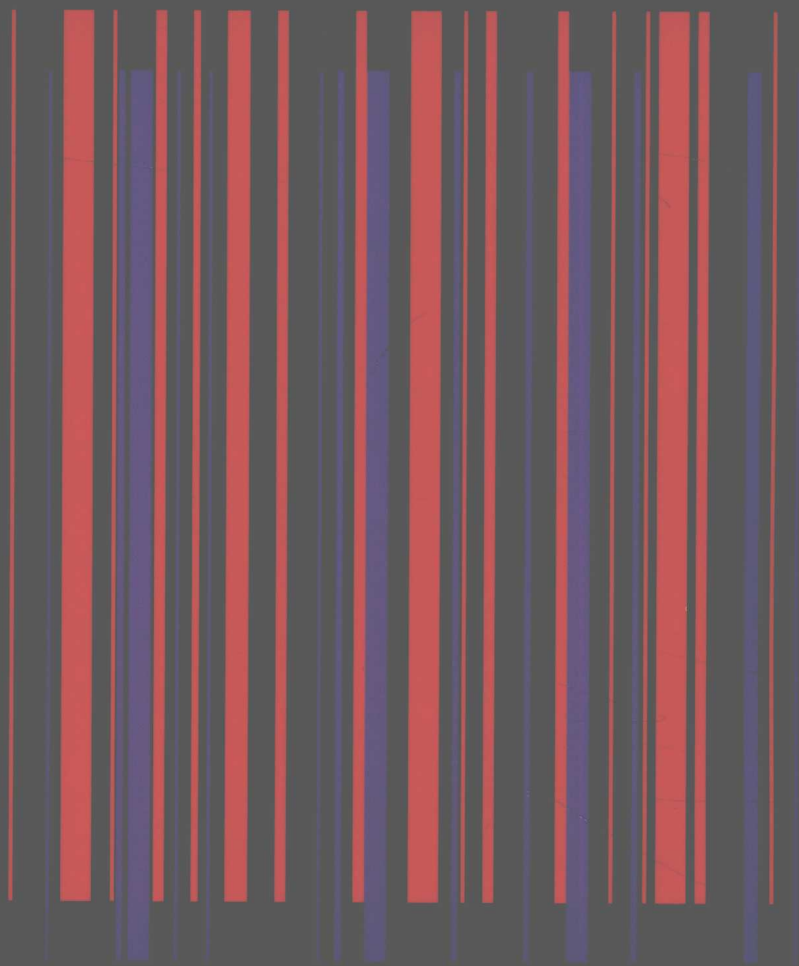
The Computer Music Tutorial

Curtis Roads

[美] 柯蒂斯·罗兹等著

# 计算机音乐教程

下册



## 中译本译著委员会名单

**主 任** 肯尼斯·费尔兹 (Kenneth Fields)

**专家小组** 张小夫 杜晓十 刘 健 吴粤北

韩宝强 黄枕宇 金 平

**审 订** 齐 刚 李斯心

**译 者** 李斯心 李岳凌 齐 刚 陈 泱

姜 浩 杨仁瑛 张睿博 程伊兵

胡 泽 黄志鹏 常 炜

**译文统筹** 金 平

**特约编辑** 张志羽

**责任编辑** 任 云

# 目 录 (Contents)

中译本序	1
序:新音乐与科学约翰·乔宁(John Chowning) (Foreword: New Music and Science)	3
前 言 (Preface)	6
致 谢 (Acknowledgments)	11
凡 例 (Notes)	14
<hr/>	
<b>第一部分 基础概念 (Fundamental Concepts)</b>	<b>1</b>
<hr/>	
第一部分概述(Overview to Part I)	3
第 1 章 数字音频概念(Digital Audio Concepts)	5
柯蒂斯·罗兹(Curtis Roads)、约翰·斯特朗(John Strawn)	
第 2 章 音乐系统编程(Music Systems Programming)	43
柯蒂斯·阿博特(Curtis Abbott)	
<hr/>	
<b>第二部分 声音合成 (Sound Synthesis)</b>	<b>71</b>
<hr/>	
第二部分概述(Overview to Part II)	73
第 3 章 数字声音合成引论( Introduction to Digital Sound Synthesis)	75
柯蒂斯·罗兹(Curtis Roads)、约翰·斯特朗(John Strawn)	
第 4 章 采样合成与加法合成(Sampling and Additive Synthesis)	101
第 5 章 多重波表合成、波貌合成、粒式合成与减法合成 (Multiple Wavetable, Wave Terrain, Granular and Subtractive Synthesis)	139
第 6 章 调制合成( Modulation Synthesis)	188
第 7 章 物理模型与共振峰合成(Physical Modeling and Formant Synthesis)	232

第 8 章 波形片段、图形以及随机合成( Waveform Segment, Graphic, and Stochastic Synthesis)	278
---	-----

---

<b>第三部分 缩混与信号处理(Mixing and Signal Processing)</b>	<b>303</b>
---	------------

第三部分概述(Overview to Part III)	305
第 9 章 声音缩混( Sound Mixing)	308
第 10 章 信号处理基础(Basic Concepts of Signal Processing)	339
第 11 章 声音空间化和混响( Sound Spatialization and Reverberation)	397

---

<b>第四部分 声音分析(Sound Analysis)</b>	<b>437</b>
----------------------------------	------------

第四部分概述(Overview to Part IV)	439
第 12 章 音高及节奏识别( Pitch and Rhythm Recognition)	441
第 13 章 频谱分析( Spectrum Analysis)	471

---

<b>第五部分 音乐家界面( The Musician's Interface)</b>	<b>537</b>
--	------------

第五部分概述(Overview to Part V )	539
第 14 章 音乐输入设备( Musical Input Devices)	542
第 15 章 演奏类软件( Performance Software)	580
第 16 章 音乐编辑器( Music Editors)	620
第 17 章 音乐语言( Music Languages)	690
第 18 章 算法作曲系统( Algorithmic Composition Systems)	724
第 19 章 算法作曲的表示与策略( Representations and Strategies for Algorithmic Composition)	750

---

<b>第六部分 内部结构与相互连接( Internals and Interconnections)</b>	<b>799</b>
--	------------

第六部分概述(Overview to Part VI)	801
第 20 章 数字信号处理器的内部结构(Internals of Digital Signal Processors)	803
第 21 章 乐器数字接口(MIDI)	850
第 22 章 系统连接( System Interconnections)	895

---

第七部分 心理声学(Psychoacoustics)	923
第七部分概述(Overview to Part VII)	925
第 23 章 计算机音乐中的心理声学(Psychoacoustics in Computer Music)	927
约翰·W. 戈登(John W. Gordon)	

---

附 录(Appendix)	942
傅里叶分析(Fourier Analysis)	
柯蒂斯·罗兹(Curtis Roads)、菲利普·格林斯潘(Philip Greenspun)	
参考文献(References)	977
人名英汉对照表(Name Index)	1069
主题词英汉对照表(Subject Index)	1074
跋(Postscript)	1128
译后记(Write After the Translations)	1130

---

## **第五部分 音乐家界面**

**(The Musician's Interface)**



## 第五部分概述 (Overview to Part V)

音乐家通过“用户界面”(user interface)与计算机音乐系统进行交互。所谓“用户界面”,是指硬件与软件的组合,它决定了信息以何种方式呈现给用户,以及如何从用户那里采集信息。信息可通过下列几种官能传递给音乐家:

视觉:图形终端显示、显示板、仪表、指示灯及开关和衰减器装置(fader settings)

触觉:旋钮、开关、电位器及响应输入设备反馈的“演奏”和“感觉”

听觉:系统生成的声音和静音

相应地,音乐家可通过各种方式将有关音乐信息输入到计算机中,如通过输入设备(诸如音乐键盘)、图形乐谱编辑器、音乐语言或算法作曲。

作曲家能够在短时间内按其音乐理念进行原型创作,并加以倾听,然后对其修改、删除并保存。过去,因使用传统的乐谱、乐器,加之演奏延迟的问题,上述进程需花数年时间。昔日的音乐厅曾是许多未经验证、未经点评的实验作品的试验场所。现在,交互系统有可能极大加速音乐原创进程(Pennycook 1985, Roads 1987, 1992a)。

---

### 背景介绍:音乐界面的发展 (Background: Development of Musical Interfaces)

实时交互系统设想源于最早时期的电子计算机(Eckert 1946),但经数十年之后才得以实现。20世纪50年代和60年代,很少有音乐家能够直接接触运行其方案的计算机。例如,如果要创作一个声音,作曲家在一副穿孔卡片上制作指令。该工作需在一台脱机的卡片打字机上完成,即不与计算机连接的打字机。之后,他们将这副卡片交给一位计算机操作员,由他将卡片输入到与计算



机相连的读卡器中。第二天,作曲家领取一份工作报告,包括支付计算和存储使用的费用账单。如果没有错误,会进行一大卷含有声音样本的磁带的转换。将磁带转换为声音是一个独立的、同时也是移出的过程,需在不同地方的另外一台计算机上完成。

直至 20 世纪 70 年代中期,用以数字合成的交互式分时终端和较低成本的微型计算机有了很大进展,从而改变了上述局面。字符显示终端使得音乐家能够在联机的状态下(与计算机相连)编辑输入数据,并能够发出电子指令进行计算。相对前一阶段而言,可谓进了一步,但是键入指令串几乎不能体现音乐交互。

相比之下,1920 年至 1970 年间建造的许多模拟电子仪器可以用手势控制音乐合成。首批实现实时手动操作输入的数字系统是 20 世纪 70 年代的混合音乐系统(hybrid music system)。混合音乐系统将一台数字计算机和一台模拟声音合成器相连。例如,在圣迭哥加州大学开发的 Hybrid IV 型合成器(Kobrin 1977),在表演期间使用了一种包含简短命令、通过字符数字键盘输入的音乐语言。键盘输入(keystrokes)内容由在小型计算机中运行的程序加以解释。然后程序生成控制信号,信号则被输送到模拟合成器中。

20 世纪 70 年代末,商业混合型合成器将微型计算机和管风琴类型的琴键合二为一。程序员编写了键盘扫描程序,当键盘输入信息播放和传到合成器时,旨在捕捉该信息(Knowlton 1971, Andersen 1978, Roberts 1979, Chamberlin 1985)。在贝尔电话实验室,GROOVE“格鲁夫”(混合)系统使得音乐制作人不仅可以使计算机终端,还可使用操纵杆、旋钮(Mathews and Moore 1970)等设备。音乐制作人可以在呈现振荡器或滤波器频率或振幅包络的图形显示屏上绘制曲线图。还有更为高级的音乐控制方式,例如,GROOVE 系统的 CONDUCT“引导”程序试图对振幅、速度、设备平衡作整体的控制,就好比是乐队指挥对全局的掌控。

上述发展历程涉及到交互乐谱编辑器、音乐语言和算法作曲系统,有关内容分别在第 16 章、第 17 章和第 18 章中加以叙述。

---

## 音乐界面的改进(Improving Musical Interfaces)

综合回顾,有关音乐界面的发展可概述如下:计算机音乐早期阶段,用户界面只是后期概念——系统设计的最后部分。现在,人们已充分认识到一个好的用户界面设计的重要性。不论功能性如何,合成器和软件包在其界面之上或成功,或失败。

程序在保持开放或灵活状态时,非常易于处理,音乐制作人可根据需要对程序加以自定义。即使是微不足道的外观改进也可以将复杂的操作程序变得更为容易。例如,许多程序使得用户将“桌面”(desktop)置于显示屏。对于这种方便用户操作或选择的改进,应加以鼓励。

最佳的用户界面不仅易于操作,而且并非巧合,它能够将音乐结构和音乐制作的深层次知识融合在一起。是什么使得一个系统变得“深入”?其中一个标志是战略灵活性——允许用几种方式来完成一项任务;另一标志是集合音乐信息的灵活性。这些标准暗示着一种多角度的音乐表现方式。另外一层深度是指从部分描绘推断概念的能力——像一位训练有素的练习者,能够“填补空缺”。

对此,我们需要把握一种微妙的平衡。当系统——即使是输入设备——变得越智能,就会有一种自身利用知识的欲望。如同助手一般,一个认为了解用户所需的系统可能有益,也可能令人生厌。用户界面设计者面临的最大困难之一就是选择在何地 and 何时提供机器帮助。

---

## 第五部分内容介绍(Organization of Part V)

第五部分,从第 14 章至 19 章,主要讲解了音乐家界面的方方面面。这一部分涉及众多领域,基于从音乐家和计算机音乐系统交互的四种类型,我们对之将加以分别阐述:

手动操作(Gestural)——输入设备和演奏软件(第 14 章和第 15 章内容)

图形编辑(Graphical editing)——乐谱、乐器、声音对象、频谱和样本编辑器(第 16 章内容)

形式语言学(Formal Linguistic)——作曲和合成语言(第 17 章内容)

自动化生成(Automated)——算法作曲系统(第 18 章和第 19 章内容)

虽然是逐一论述,但实际上,上述类型之间往往相互结合,融于一个系统之下,相互的界线非常模糊。比如马克斯(Max)系统(Puckette 1988, 1991, Puckette and Zicarelli 1990),可以是“交互演奏系统”,“图形编辑器”,或“图标编程语言”。方便起见,我们将马克斯系统的论述安排在第 15 章(演奏软件),但也在第 16 章或第 17 章中涉及。

这种广义的论述,旨在表现可能的音乐界面的多样性,但并没有适用于所有音乐形式和应用程序的最佳单一界面。事实上,一位作曲家可能会充分利用上述四种交互形式,来完成一篇作品。

---

## 第 14 章 音乐输入设备 (Musical Input Devices)

---

---

电子输入设备的优势 (Advantages of Electronic Input Devices)

---

输入设备模式 (Model of an Input Device)

---

背景: 计算机手动输入的发展历程 (Background: History of Gestural Input to Computers)

电压控制 (Voltage Control)

数字控制 (Digital Control)

---

传统输入设备与创新输入设备 (Traditional versus Innovative Input Devices)

---

输入设备的类型 (Types of Input Devices)

---

从输入设备中映射数据 (Mapping the Data from the Input Device)

---

输入设备的人机工程学和精度 (Ergonomics and Precision of Input Devices)

瞬时精度 (Temporal Precision)

---

音乐键盘 (Musical Keyboards)

键盘状态 (State of the Keyboard)

键盘扫描率 (Keyboard Scan Rate)

力度 (感应) 键盘、触后和压力 (Sensitivity to Velocity, Aftertouch, and Pressure)

键盘弹奏 (Keyboard Actions)

延伸弹奏的键盘 (Extended-action Keyboards)

计算机控制的钢琴 (Computer-controlled Pianos)

键盘规划和分区 (Key Layout and Splitting)

---

遥控器 (Remote Controllers)

指挥棒和手套 (Conducting Batons and Gloves)

遥控器的传送媒介 (Transmission Media for Remote Control)

---

响应输入设备 (Responsive Input Devices)

---

结论 (Conclusion)

---

乐器是最为传统的“音乐家界面”，是手动操作和声音的媒介。通过嘴、手和脚的动作变化演奏乐器，能够产生丰富的表达，从而使技艺精湛的音乐家能够将细微和精彩之处表达得淋漓尽致。人体动作的变化为音乐烙上了生命的印记：呼吸、身体节奏、体力耗费、运动和感觉。听者本能地会对这些演奏特性做出反应；精湛的乐器演奏技艺甚至可以将一曲平庸的乐章提升到一个有魅力的层面之上。

本章探讨了实时演奏乐器，即音乐家使用的音乐输入设备（也称为控制器）。如果说计算机是面向早先的作曲家，即它为希望自身与常规乐句解析保持距离的作曲家提供了一种理想的媒介，但对于寻求更为直接表达方式的作曲家和演奏者而言，他们必须克服这样一个内置距离（Ryan 1991）。在历史背景概述之后，我们探讨了输入设备的人机工程学，特别将重点放在瞬时精度上——乐器对手动操作的反应速度。接下来分析了最常见的输入设备：音乐键盘。然后简单讲解了具有遥控能力的控制器，演奏者借助它能够在台上自由移动，而不为一堆导线所累。本章最后一部分涉及响应输入设备。当在设备上演奏每一部作品时，响应输入设备能够通过编程对演奏者的手势做出不同的响应。另外，本章附有两张表格和一组照片，用以说明可能输入设备的多样性。

为使论述简明扼要，我们将重点放在对合成器的控制上，但实际上本章所包括的一切内容也适用于应用程序，诸如对效果单元、混合系统和光照系统的控制。

当然输入设备只是交互、实时演奏的一个部分。在其他章节，将对演奏软件（第15章）、音高和节奏的识别（第12章）和乐器数字接口技术（MIDI技术）（第21章）作分别阐述。

---

## 电子输入设备的优势 (Advantages of Electronic Input Devices)

音乐家在演奏一种传统声学乐器时，必须耗费精力才能控制和创作声音。即使是一件漂亮的、经过精心设计的乐器也不可避免地受到机械方面的限制。在许多乐器上，仅仅为得到一个纯的基本响音，也需要长时间的反复试验和专家指导。一些乐器本身就比其他乐器演奏难度大。例如，音域较低的大型乐器（低音和中音萨克斯管，低音提琴和大号）需要消耗较多的体力，而且有必要将肢体伸展至最大程度以获得正确的音调。一些声学乐器很难柔和地演奏，而有些乐器也不易演奏出很大的声音。如果要让这两类乐器演奏出极高音或极低音的效果会颇为费劲。将乐器重新调制到一个不同的音阶，或花费很大力气或根本不可行，而且乐器的音色事先已由乐器本身的物理特性所决定。

电子技术引发了新一轮的乐器设计(Snell 1983)。输入设备将人体动作转换为电的形式(或是模拟信号或是数字信号)。这种转换主要具有两个优势。其一,电子输入设备对声音的控制,不需向声音供给能量;在众多输入设备中,任何一件都能够控制同一声音发生器(图 14.1)。这一点造就了音乐的灵活性。借助电子乐器,凭借单一的吹管控制器就能轻松的创造出男低音和女高音。因为是电子控制,所以非常容易创作极其柔和的或极大的声音。但是声音控制和声音创作相分离产生了一个副作用,这一点很明显:在创作某一种声音时,伴随的“感觉”减少了。在响应设备一节中,将就该问题进行讨论并提出了一些缓解办法。

电子输入设备的第二个主要优势在于音调和音色的灵活性。对许多电子乐器而言,改变音阶只需按一下按钮;一些乐器还使得用户自己创造音阶。在钢琴的声音上添加选择性颤音,从而为大家所熟识的音色赋予了一层新的表达内涵。从作曲的角度而言,乐器引发的音乐可能性——听起来一会儿如木笛,一会儿如巴厘岛的“jecogan”,或两种声音同时奏出——相当具有吸引力。

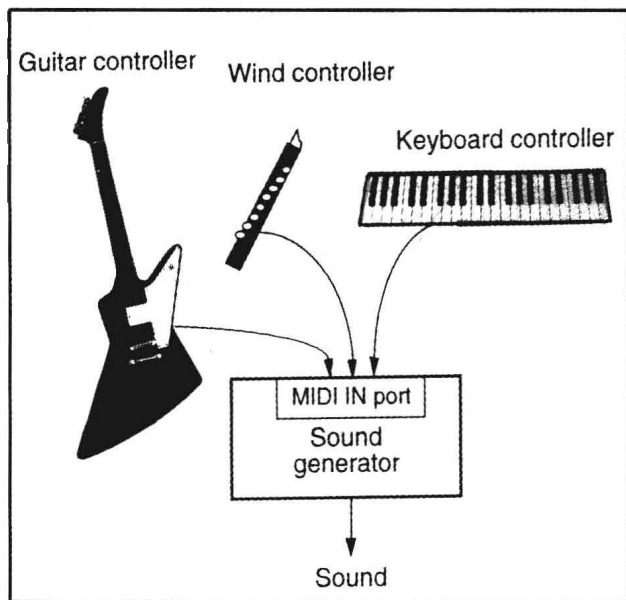


图 14.1 电子输入设备在声音创作机制中,不需要手动操作。在众多的输入设备中,任何一件设备都能生成同样的声音。

Guitar controller=吉他控制器

Wind controller=吹管控制器

Keyboard controller=键盘控制器

MIDI IN port=MIDI 输入端口

Sound generator=声音发生器

Sound=声音

## 输入设备模式(Model of an Input Device)

输入设备的简单模式是指与一个电子接口电路(electronic interface circuit)连接的传感器(sensor)。传感器对某一物理刺激做出反应,比如琴键下按、吹动的空气压力或在超声范围内引发的运动。然后这一反应通过介面电路被转换为一种非连续的或是一种连续的控制信号。非连续控制是指开启、开关操作,诸如下按键盘的琴键或用以选择一个新音色的推动按钮。连续控制是指由操纵轮、推子和踏板产生平稳变化的操作。

传感器是一种典型的机械/模拟装置;在某一点,介面电路将其输出转化为数字形式——通常是一条 MIDI 信息。在商业输入设备中,传感器和介面合为一体,并直接发出 MIDI 信息。对于试验者而言,一种低成本的方法是通过介面电路将传感器的输出转化为电流,并传给现有 MIDI 合成器的踏板输入或呼吸输入。然后,合成器自身将电流转化为连续控制信息,并可通过 MIDI OUT 端口输出。(见第 21 章有关 MIDI 信息详细论述。)

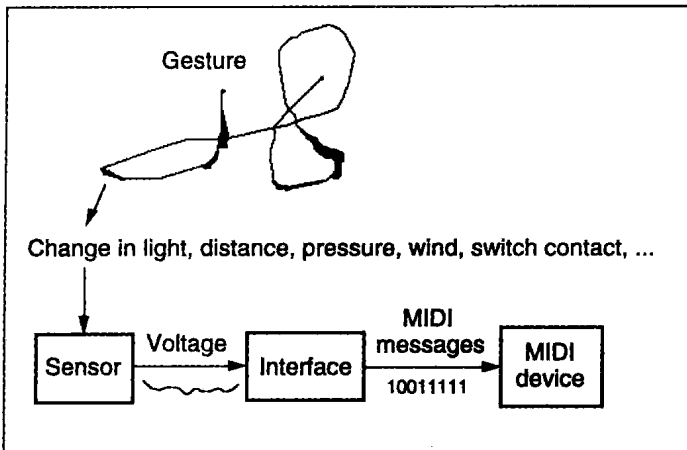


图 14.2 输入设备模式:与电子接口连接的传感器。

Gesture=手动操作    Change in light, distance, pressure, wind, switch contact=光线、距离、压力、气流、开关触点等变化    Sensor=传感器    Voltage=电压    Interface=接口  
MIDI messages=MIDI 信息    MIDI device=MIDI 设备

## 背景: 计算机手动输入的发展历程 (Background: History of Gestural Input to Computers)

模拟电子乐器演奏比计算机音乐试验早数十年(Rhea 1972, 1984, Young 1989)。当今的数字演奏系统源于颇具影响力的现场电子音乐(借助或不借助传统乐器),以及自由爵士乐和即兴创作(Mumma 1975, Battier 1981, Bernardini 1986, Roads 1985b; Valentino 1986)的方法。富有表现力的电子乐器,除其他之外,诸如泰尔鸣电子琴(Theremin)(1928),恩代什·马雷特诺特(Ondes Maretenot)(1928),克鲁瓦索诺(电子乐器)(Croix Sonore)(1934),“昂笛莱”(Ondioline)(1941),电子萨克布(号)(Electronic Sackbut)(1948)和“混合一向动仪”(Mixtur-Trautonium)(1949)早在厂商设计 MIDI 多年之前,就已开创了新的演奏技术和电子声音(图 14.3)。



图 14.3 罗伯特·穆戈(Robert Moog)正在演奏泰尔鸣电子琴,用以示范正确的手动操作。摘自《先锋泰尔鸣 505 型电子琴操作说明》(*Operating Instructions for the Vanguard Theremin Model 505*)约 1960 年。

## 电压控制 (Voltage Control)

20 世纪 70 年代的模块模拟合成器因按电压控制操作,所以外部控制颇具灵活性。在电压控制的合成器中,如果合成模块的控制输入插座是可变电压,则音高、振幅、滤波器中心频率和许多其他参数都会随之发生变化。因为音乐家能够重新将输入设备和他所控制的模块相连,所以模块模拟合成器具有灵活性。20 世纪 70 年代,电子演奏有时会使用外来输入设备控制的合成器,诸如电容键盘或脑电波转换器(Rosenboom 1976, 1990)。

在模拟系统中,大致而言,合成器能够通过触发器(例如,演奏者触发键盘按键时传递的脉冲)和包络跟随器(追踪事件振幅包络的设备)“聆听”演奏者的手动操作。数字技术,因其内存增加,具有更为灵活的处理能力,因而能够对外部手动操作进行更为准确的识别。(见第 12 章和第 13 章有关对音高、节奏和频谱分析的论述。)计算机能够对其探测的手动操作做出充分的、前后相系的响应。

## 数字控制 (Digital Control)

20 世纪 60 年代,在贝尔电话实验室,马修斯(Mathews)(1969)和罗斯勒(Rosler)(1969)对计算机手动输入的应用进行了开拓性研究。用户能够使用光笔在显示屏上迅速地绘制图形乐谱。加拿大渥太华国家研究院(National Research Council)的研究人员研制出一个系统,即通过类似于鼠标的指示设备,实现图形与音乐符号编辑器的交互。达特茅茨数字合成器(Dartmouth digital synthesizer)(Alonso, Appleton, and Jones 1977)是第一台将诸如键盘、可分配旋钮、许多按钮和开关控制等实时控制器合为一体的数字合成器。自此以后,几乎所有的混音(模拟加数字)和纯数字合成器开始将键盘和其他输入设备合为一体。(见 Metlay 1990,有关 MIDI 输入设备概论。)

---

## 传统输入设备与创新输入设备 (Traditional versus Innovative Input Devices)

在设计合成器输入设备时,主要的问题在于是否有必要模仿传统乐器制作,比如依照自古就有的传统设备键盘来制作合成器键盘。

以传统设备作模型有以下几点优势。第一,对已熟悉一种传统乐器(比如



小提琴)的音乐家而言,他们能够更为容易地适应附在合成器上的传统控制器(图 14.4),并且能够很快应用多年积累的高超演奏技巧。因为音乐教育受传统束缚,所以要找寻能够在新输入设备上进行娴熟演奏的人并非易事。从商业角度而言,在音乐商品销售市场,相对于外表怪异、五花大绑的设备而言,人们更容易接受熟悉的乐器外观。

但是传统乐器模型也有其缺陷。合成器的最大功率可能受制于控制之下的传统乐器。为了充分利用目前合成器中的声音选项板,我们也需要特殊的输入设备用以迎合特殊的需求(Cadoz, Luciani, and Florens 1984, Florens and Cadoz 1991)。传统乐器的设计倾向反映了对过去因素的关注,而这些因素也许与现在无关。例如,在过去,指法用来在木管乐器上生成声音,现在部分受到乐器声学特性的支配。使用电子管乐器,指法变得更为简单、更加直观(Yunik, Borys, and Swift 1985)。许多乐器在设计上,都采用了平均律的音高系统。如果音乐家想要探寻其他律制,可能会倾向于一种更为灵活的设计。

数字合成、处理和播放内在的可能性要求有新的控制模式,而这需要特殊的输入设备和交互风格(Collins 1991a, b)。开发研制的各种各样的“指挥手套”恰好说明了这一点(Waisvisz 1985)。

在录音室环境下,首先考虑的是灵活性和对复杂性的管理,而不是减少自发的表达。录音室环境有利于用工具辅助音乐家或声音工程师构建计划框架——复杂的、多层次的作品。非乐器设备,诸如字符数字键盘、鼠标、线性推子(推子)、旋钮和带灯标的开关,适用于编程并可对音频工作站加以控制。

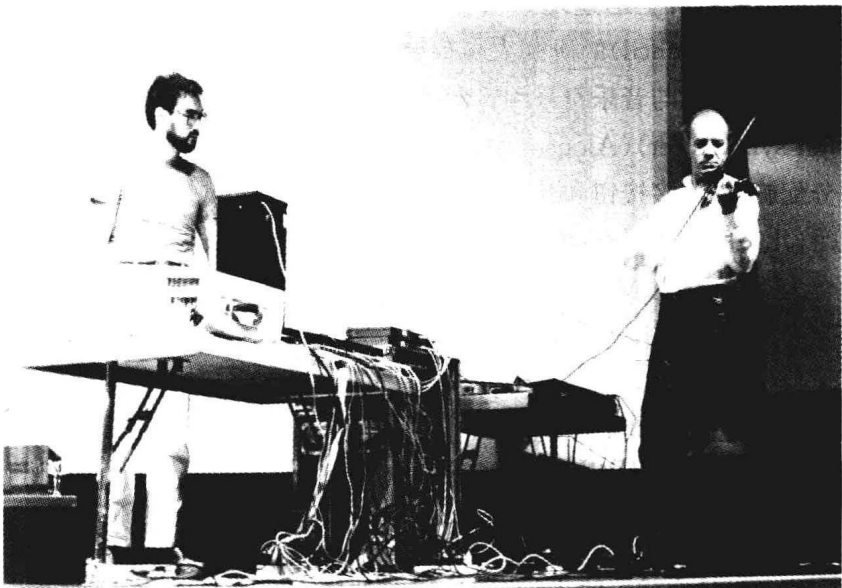


图 14.4 在计算机音乐中,利用传统乐器作控制器(Negyesy and Ray 1989)。小提琴家J. 内杰希(Janos Negyesy)使用了一把配有传感器的小提琴进行演奏,传感器用来控制电子音乐硬件。左:系统设计师李·雷(Lee Ray)。