
数字音响

——基础理论和最新技术——

〔日〕土井利忠 伊贺 章 合著

袁橹林 张桂昌 马桐山 王德声 译

王民政 技术校对

2

電子工業出版社

内 容 简 介

本书介绍数字音响的基础理论和最新技术。内容包括数字音响技术的发展；模拟、数字和脉码调制及其应用；模拟和数字录放技术；数字音响中的采样、量化、编码、滤波、调制、均衡、同步、误码和纠错等基础理论及其电路、电器的设计；数字磁带录音机及唱片的进展、种类、指标、使用，尤其介绍了激光唱片系统的技术知识；其他数字音响系统及今后的展望；书末附有本书的日英汉术语对照表。

本书适合从事音响工程技术的人员及有关院校师生阅读，也可作为数字音响技术和理论的入门书。

土井利忠 伊贺章 共著

デジタル・オーディオ

—基礎理論と最新技術—

※

数字音响

—基础理论和最新技术—

〔日〕土井利忠 伊贺章 合著

袁樵林 张桂昌 马桐山 王德声 译

王民政 技术校对

责任编辑：路石

※

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京昌平星城印刷厂印刷

※

开本：787×1092毫米1/32 印张：14¹/₂ 字数：326千字

1990年1月第一版 1990年1月第一次印刷

印数：1—4000册 定价：6.30元

ISBN 7-5053-0566-2/TN·205

译者的话

随着半导体集成电路、数字通信和计算机技术的飞速发展，数字音响技术经过了二十多年的发展历程，已开始进入实用阶段。由于数字技术的引入，使整个音响界面临着一场新的技术革命。目前许多专业音响用脉码调制（PCM）录音机已经奇迹般地展现在人们面前，数字延时器、数字混响器、数字编辑器、数字调音台及其他信号处理设备也相继出现，从而使整个音响系统发生了巨大的变革。在民用方面，数字音频唱机和小盒式PCM录音机也已问世，它们都具有引人入胜的性能和功能。此外，许多国家利用有线电视（CATV）网进行数字广播，1984年日本发射的直播卫星（BS-2）中，首次采用了PCM副载波方式进行声音广播。与此同时，西欧、北美各国都在努力开发新的PCM音响广播体制。可以预言，音响技术将沿着数字化方向迅速发展。

随着我国四化建设的飞速发展，从专业音响领域到许多民用场合将越来越多地采用数字音响设备。为了适应我国音响技术发展的新形势，为了满足广大读者学习和掌握数字音响的最新技术，我们翻译了《数字音响基础理论和最新技术》一书。本书是一部引导性的有关数字音响技术的系统专著。本书选材广泛，内容丰富，通俗易懂，适合大专毕业的音频工程技术人员阅读，也可作为深入研究有关数字音响技术理论和新技术的入门书，对于广大音频工作者和音响爱好者来说，本书将成为他们学习和掌握数字音响最新技术的有

力工具。

本书的序，第1，2，3，10章由马桐山同志翻译；第4章由张桂昌同志翻译；第5，6章和日英汉术语对照表由袁榕林同志翻译；第7，8，9章由王德声同志翻译。王民政同志对全书作了技术校对。张桂昌同志作了通审。

电子工业部第六研究所正高级工程师谢宝琰同志对本书中技术术语的译法，提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于我们的外语和技术水平有限，再加上数字音响技术本身是一门新兴的技术，所以在文字翻译和技术概念的表达上，一定会有欠妥的地方，恳切希望广大读者批评指正。

序

自从1977年9月第一台“PCM-1”型数字磁带录音机在日本市场上出售以来,仅仅经过几年,技术的进步和音响界的变化却非常之大。在音响专业领域,很多著名的音乐家已应用了数字录音并对其称赞不已。在民用领域,数字音频唱片的制式业已确立。自爱迪生发明留声机以来,现在正进入一个新的音响技术革新时期。在应用领域,除了唱片工业外,广播界和电影工业等也相继开始应用了数字技术。

在数字音响普及的初期,只有技术人员掌握数字技术方面的知识,其他人只能使用他们设计出的产品。但现在的情况则不同了,需要了解数字技术的人越来越多,如办事人员、商业人员、音乐工作者、节目制作人员以及家庭用户等。

编写本书的目的是为了让这些非技术人员大体上了解数字音响技术的内容。因此,在编写时力求做到只要具备了高中程度的物理、数学知识和一些音响技术基础知识的人就能理解。另外,本书还尽量避免数学公式,设法选用一些通俗易懂的恰当比喻,当必须涉及数学公式时,也仅限于加减乘除和三角函数的范围,对超越这一范围的高等数学,凡必须讲述的均收录在附录里,并争取做到即使不读附录,仍能定性地掌握其主要知识。

但是,在实际着手编著本书时,发现了一些意想不到的问题。首先是技术进步非常快,过去几年里,数字音响技术处于急剧革新的阶段,直到目前,这种趋势仍在持续发展,

“今天”的技术，“明天”就可能变得陈旧了。

解决的方法只有一个，那就是把今天第一线的研究成果毫无遗漏地总结出来。溯本求源，目前应用的技术，大部分是在10~30年前就已萌芽，技术进步即使再快，从萌芽到实用也需要一定的过程和时间。例如，磁带录音机是1899年发明的，到付诸实用共经历了30年的时间。PCM原理是1939年发明的，直到1961年才在PCM电话中得到应用。因此可以肯定地说，今后10~20年，数字音响技术的大部分进展并不会具有突变性，而是今天已经萌芽的技术逐步成熟的结果。

处于第一线的、认真努力的研究人员并不难预见10年后的技术发展。技术进步是一定有途径可循的，而所有的技术革新只有沿着这条途径才会发展下去。

将来数字音响设备会向什么方向发展呢？对此似乎可以回答以下几点：

- (1) 体积日趋小型化；
- (2) 成本不断降低；
- (3) 一部分设备高性能化；
- (4) 操作越来越简便；
- (5) 应用范围迅速扩大，等等。

为达到上述目的，其发展途径应该是：

- (1) 记录密度越来越高；
- (2) 位压缩技术越来越进步；
- (3) LSI（大规模集成电路）的集成度越来越高；
- (4) 半导体集成电路的运算速度越来越快；
- (5) 信号处理技术越来越趋向软件化，等等。

所有这些技术都已有了良好的开端，将来怎样具体应用这些技术已有眉目，只要把这些技术的“萌芽”全部写进本

书，那么几年之后是不会过时的。

可是，事情并非如此简单。仅从上面列举的几个课题来看，就出现的象“位压缩”、“半导体集成电路运算速度”、

“信号处理技术软件化”等对非技术人员来说不易看懂的术语，甚至有些人对“记录密度”、“LSI”等术语也感到陌生。况且，仅用加减乘除和三角函数是否能真正使非技术人员了解最新研究成果，看来也是一个不好解决的问题。

本书积极果敢地回答了这些问题。

结果如何，尚难断定。一种可能是完全失败，初学者仍然看不懂，而对专业工作者来说又显得啰嗦，不值一读。但也可能出现另外一种结果，本书也许能够启发初学者或技术经验尚浅的人掌握最新技术的精华，并使专业工作者能够从切身体会来加深头脑中已理解了的知识，或者是有助于他们向别人解释这些知识。这些当然是笔者所期望的。

特别应该指出的是，“切身体会”对专业工作者来说最为重要。即使头脑里记了很多数学公式，考试得了100分，也不过仅此而已，有时并不见得真正有用。在进行独创时，只有那些已经真正掌握和消化了的知识才能起到作用。定性的、感觉了的东西比逻辑更为重要。从这种意义上讲，如果本书能够有助于专业工作者进一步消化已经了解的东西，则深感格外荣幸。

本书共由10章组成。第1章简单回顾了过去的音响技术发展史。通过仔细分析，发现了一件有趣的事实，那就是每隔25年发生一次技术革命，从而证明了数字音响技术的出现和进步是历史发展的必然结果。

第2章浅显易懂地介绍模拟方式和数字方式的不同点以及PCM的含义。第3章重点介绍模拟录放方式和数字录放方

式在性能上的区别。

第4章尽量通俗易懂地介绍较难理解的数字音响理论。

4.1~4.5节主要讲采样、量化、编码；4.6~4.11节主要讲提高记录密度和为了提高磁带、唱片的记录位密度而采用的调制方式、波形均衡和帧同步等技术，以及记录等量信息时为压缩位数而采用的差分编码、预测编码和可变字长编码等技术。同时，预测了这些技术今后的发展。

第5章的内容专业性较强，说明数字音响设备中所用的各种器件和电路。数字音响设备的进步是依靠半导体器件的进步取得的，今后的发展在很大程度上仍要依赖于半导体器件的进步。例如，数字音频唱片就是依赖于半导体激光器等器件的进步才研制成功的；在磁记录领域，薄膜磁头等器件将成为今后新技术的核心。

第6章是本书中最难理解的部分，是讲磁带和唱片有缺陷时引起的误码具有什么性质和用什么方法加以解决。近几年来，数字音响技术实用化之所以有了迅速发展，实际上正是依赖于纠错码技术的完善。虽然纠错码技术早已在电子计算机中应用，但在数字音响中还正在对其进一步加以发展，在学术上开辟了一个新的领域。本文以比喻方式说明纠错码的基本概念，在附录中作了某些数理上的讲解。本章在叙述上主要着眼于“理解”与“应用”，因而说明时所取的角度与通常的系统讲述方法完全不同。对于专业工作者来说，建议进一步参考有关的专门著作。

第7章为应用篇，介绍数字磁带录音机的技术内容和已实用的几个机种。

第8章详细说明数字音频唱片的CD、AHD、MD三种制式的技术内容。本章内容的专业性相当强。

第9章综合介绍唱片和磁带录音机以外的其它数字音响设备。电子编辑机和数字混响器很早就已应用，数字调音台也公开报导过很多样机，达到实用化只是时间问题。最近，又在研究利用电缆电视网直接进行数字音响广播，或利用人造卫星直接广播，这些都说明广播系统也正逐步地改变面貌。

第10章以展望今后的发展趋势作为结束。

笔者自己通读了以上内容以后，正如当初所担心的那样，觉得还是把对初学者的讲解与一些十分专门的技术内容混杂在一起了，缺乏连贯性，并且把本来应该分为两本书写的内容，勉强地归结成了一本书。但是，目前的情况是：数字音响技术尚未完全开发，在这种情况下，我们总算是从一个角度系统地把所有资料综合在一起，相信这还是有意义的。至于编排不妥之处，请读者选择适当的阅读方法来加以弥补。

对初学者来说，首先阅读第1章、第2章、第3章和第4章的4.5节，就可以了解数字音响技术是怎么回事。如果能再进一步阅读第7章、第8章和第9章，能可以掌握这些技术在实际设备中是怎样应用的。

对专业工作者来说，第4章的后半部分、第5章、第6章、第7章和第8章都有十分值得参考的内容。即使是初学者，在了解了基础知识之后，最好也来看一看这些章节。

作为一门学问，数字音响技术还不够成熟，也不够系统，因此，内容和术语经常出现不统一和混乱。特别是术语，每年都有变化，要想最后确定下来，还需要几年的时间。例如，“PCM录音机”、“PCM磁带录音机”、“数字磁带录音机”，实际上是表达同一内容的几种不同术语。本书虽

力求做到同一内容采用同一术语，但在某些部分中仍不免反映出术语上的混乱。本书尽量采用有关学会所规定的术语，但遇有一部分学会规定的术语过分生硬而脱离日常习惯时，则采用人们熟悉的惯用术语。

本书第2章和第5章由伊賀执笔，其它章节由土井执笔。

笔者在研究开发数字音响技术过程中，得到了索尼公司大賀典雄副社长、森园正彦专务董事、中島平太郎常务董事以及索尼公司技术研究所和数字音响部各位先生的很多指教和帮助，谨在此表示衷心的感谢。此外，如果没有“ラジオ技術社”铃木编辑长和堀井干事长在长达两年多的时间里所给予的热情帮助和鞭策，本书是无法问世的。谨在此一并表示谢意。

土井利忠

目 录

译者的话

序

第1章 揭开数字音响时代的帷幕	(1)
1.1 T.爱迪生发明留声机以来的 音响技术 百年发展史.....	(1)
1.2 数字音响技术的引入	(3)
第2章 模拟、数字和PCM	(10)
2.1 模拟和数字	(10)
2.2 模拟信号转换为数字信号	(12)
2.2.1 模拟信号转换成码.....	(14)
2.2.2 码及其种类.....	(17)
2.2.3 十进制和二进制.....	(19)
2.2.4 从码到数字信号.....	(21)
2.2.5 数字信号和PCM	(24)
2.3 PCM方式和其他调制方式的比较.....	(25)
2.3.1 各种调制方式.....	(25)
2.3.2 调制方式的比较.....	(28)
2.4 PCM方式的应用实例.....	(41)
2.4.1 在卫星通信中的应用.....	(41)
2.4.2 电话用的PCM方式	(42)
2.4.3 PCM录放装置	(43)
2.4.4 PCM直接广播	(44)
第3章 模拟录放和数字录放	(46)

3.1	模拟录放	(46)
3.2	数字录放	(48)
3.3	记录密度	(50)
3.4	采样频率	(55)
第4章	数字音响基础与最新技术	(60)
4.1	采样与频带宽度	(62)
4.1.1	采样频率必须为原信号 最高频率的两倍以上	(62)
4.1.2	原波形为什么可以得到恢复	(66)
4.2	量化和量化噪声	(71)
4.3	线性量化与折线量化	(74)
4.4	二进制编码	(77)
4.5	二进制码的运算和数字滤波器	(80)
4.6	PCM信号的调制方式	(84)
4.6.1	各种调制方式	(84)
4.6.2	调制方式的特性参数	(97)
4.6.3	调制方式的历史	(99)
4.7	码间干扰与波形均衡	(102)
4.8	帧构成与帧同步	(106)
4.9	差分码与预测码	(111)
4.10	可变字长码	(121)
4.11	提高信息记录密度的技术	(128)
4.12	数字音响设备的信号流程	(131)
第5章	数字音响电路与器件	(135)
5.1	半导体技术的进步	(135)
5.1.1	分立式晶体管时代	(136)
5.1.2	IC时代	(140)

5.1.3	LSI时代	(140)
5.1.4	微型电子计算机	(142)
5.1.5	存储器件	(146)
5.1.6	逻辑器件	(148)
5.1.7	数量和成本问题	(149)
5.2	滤波器	(153)
5.2.1	数字滤波器	(153)
5.2.2	模拟滤波器	(158)
5.3	采样保持电路	(162)
5.4	模-数转换器	(167)
5.4.1	模-数转换器的特性	(167)
5.4.2	各种模-数转换器	(171)
5.5	数-模转换器	(184)
5.5.1	数-模转换器的特性	(184)
5.5.2	各种数-模转换器	(186)
5.6	去过冲电路	(201)
5.7	半导体激光器	(203)
5.8	薄膜磁头	(210)
第6章	误码的性质和对策	(216)
6.1	误码产生的原因和倾向	(217)
6.2	交织	(222)
6.3	检错	(224)
6.4	单消失纠错	(226)
6.5	单一错误的纠错, 双消失纠错	(230)
6.6	交叉交织法	(234)
6.6.1	简单的交叉交织码	(234)
6.6.2	改进型交叉交织码	(238)
6.6.3	分组码与卷积码	(240)

6.6.4 CIRC	(241)
6.7 纵横字谜解码法	(242)
6.8 误码的补偿	(247)
6.9 纠错方法的评价	(249)
附录6A 二进制数的多项式表示	(257)
附录6B 二进制数的运算	(258)
附录6C CRC举例	(260)
附录6D 邻接码	(261)
附录6E 里德-索罗门码举例	(266)
附录6F 码间距离与纠错、检错能力	(274)
第7章 数字磁带录音机	(278)
7.1 数字磁带录音的各项指标	(278)
7.2 旋转磁头式数字磁带录音机	(292)
7.3 固定磁头式数字磁带录音机	(307)
7.4 使用普通盒式磁带的数字录音机	(322)
7.5 第三种方式	(327)
附录7A 旋转磁头式数字磁带录音机的采样频率	(328)
附录7B EIAJ标准的纠错方式和纠错能力	(332)
第8章 数字音频唱片	(337)
8.1 数字音频唱片的进展	(338)
8.2 数字音频唱片系统的三种制式	(340)
8.2.1 规格和性能	(344)
8.2.2 刻纹方法	(344)
8.2.3 唱片的制造方法	(347)
8.2.4 重放方法	(350)
8.2.5 唱片规格	(355)
8.2.6 记录密度	(358)

8.2.7	信号格式	(359)
8.2.8	其他	(360)
8.3	CD制数字音频唱片系统的基础	(361)
8.3.1	激光唱片的记录密度	(361)
8.3.2	聚焦伺服控制	(367)
8.3.3	循迹伺服控制	(375)
8.3.4	光学系统	(379)
8.3.5	信号处理系统	(384)
8.3.6	调制方式	(387)
8.3.7	纠错方式	(390)
8.3.8	用户位	(396)
8.3.9	大规模集成电路 (LSI) 的开发	(397)
第9章	其他数字音响系统	(402)
9.1	编辑机	(402)
9.2	调音台	(407)
9.3	混响器	(409)
9.4	采样频率变换器	(412)
9.5	电子乐器	(415)
9.6	用电缆电视网传输数字音响信号	(417)
9.7	人造卫星广播	(418)
第10章	今后展望	(421)
10.1	2002年将出现第六次音响技术革命	(421)
10.2	第五次音响技术革命将这样展开	(425)
10.2.1	数字唱片是否会淘汰模拟唱片	(425)
10.2.2	盒式磁带将小型化到什么程度	(427)
10.2.3	是否会出现数字扬声器	(428)
10.2.4	今后的广播将变成什么样子	(429)
	日英汉术语对照表	(431)

第1章 揭开数字音响时代的帷幕

1.1 T.爱迪生发明留声机以来的 音响技术百年发展史

众所周知，1877年T.爱迪生（T.Edison）发明了留声机。据说，世界上第一次录音表演的内容就是爱迪生自己唱的“玛丽的小羊”。

爱迪生以纵向振动方式将声音信号刻录在圆筒形“唱片”上。后来，E.伯利纳（E.Berliner）于1887年以横向振动方式将声音信号刻录在圆盘上，发明了类似于今天的唱片，这是继爱迪生之后音响领域的第二次技术革命。这种唱片虽然于1893年开始在市场上出售，但直到1901年伯利纳开设了维克托（Victor）公司以后才正式大批量生产，圆盘唱片比爱迪生的圆筒形“唱片”更适于大量生产，因此很快淘汰了圆筒形“唱片”。但爱迪生却始终坚持自己的方式，并继续进行改进，一直到1929年他82岁高龄时才放弃了这方面的研究，两年后就逝世了。这样一位天才为什么看不清技术的进步？难道是因为他缺乏从事经营的才能吗！？

当爱迪生放弃了这方面的研究时，音响领域已经发生了第三次技术革命。1925年，美国贝尔研究所的J.P.马克斯菲尔德（J.P.Maxfield）等人开始采用“电气灌片”方式录音。在此之前，录制唱片时是向着与刻纹刀直接连接的喇叭里灌音的。这样，演奏人员一多，就很难灌片了。而电气灌片则

与现在的作法大体相同，是通过传声器和放大器进行的，所以能够自由地控制电平，大大促进了录音技术的进步，并最终导致了电唱机的出现。

1948年，美国哥伦比亚广播系统（CBS）研究所的P.戈德马克（P.Goldmark）研制出密纹唱片，引起了音响领域的第四次技术革命。不久， $33\frac{1}{3}$ 转密纹唱片与立体声技术结合起来，为今日高保真系统不断进步奠定了基础。其实， $33\frac{1}{3}$ 转密纹唱片早在1931年就由美国无线电公司（RCA）出售了，但因当时的唱片材料和唱片性能都很差，不久即消声匿迹了。实际上，正是在当时的RCA计划主持人E.沃勒斯坦（E.Wallerstein）担任了CBS研究所所长以后，才完成了密纹唱片的研究。由此可见，这项先进的技术，从开始设想到外围技术成熟得足以保证其实现，总共用了17年的时间，而且其成功归因于一个人的执意追求，它的意义是很深远的。

拿立体声唱片来说，最初的专利是1931年英国电子乐器工业公司（EMI）的A.D.布卢姆莱因（A.D.Blumline）申请的，其原理和刻纹刀的构造都与现在相差无几，但是，由于当时的外围技术不成熟，一直到密纹唱片实现之后才于1958年问世。密纹唱片的成功还有赖于磁带录音机，因为有了磁带录音机才能进行长时间刻纹，并且无需在演奏现场操作。

第五次音响领域的技术革命就是数字音响技术了。1977年市场上出现了世界上第一台“PCM-1”型数字磁带录音机，同时有几家公司发表了数字唱机的样机。后来的发展情况，本书将在有关章节中详细叙述。

从以上介绍可以发现一个非常有趣的问题。自1877年爱迪生发明留声机到1977年出现数字磁带录音机，恰好经历了100年，也就是一个世纪。而第二次、第三次、第四次音响