

# 《数字声频技术讲座》

梁 华

(上海科技大学)

## 第一讲: 数字声频技术的基本原理

### 一、数字声频技术概况

自1887年爱迪生发明留声机以来, 至今已有一百年的历史。在这期间, 声音的记录和重放技术经历了重大的变革。尽管如此, 由于始终没有脱离模拟录放音技术的范畴, 所以大幅度地提高录音和重放质量, 已是困难的事情。

声频数字化从本质上解决了模拟声频技术所无法解决的问题。近几年来, 随着大规模集成电路技术、高密度记录与重放技术、数字信号处理技术和激光技术的迅速发展, 使得数字声频技术迅猛发展, 并使各种数字音响系统达到实用化程度。当前, 数字音响唱片、数字磁带录音机、数字混响器、数字式无线电广播等已经进入了人们的生活领域。

这里所说的数字声频技术, 实际上指PCM声频技术。应该指出, 它们之间还不完全等同。所谓PCM(Pulse Code Modulation——即脉冲编码调制)是将模拟声频信号进行数字化的一种方法, 它早已广泛用于通信领域。1967年日本NHK技术研究所首先把PCM技术引进音响领域, 研制成功旋转磁头方式的数字录音机, 开创了数字声频技术的新纪元。为了清楚地看出它的发展过程, 下面列举若干主要事件:

1937年 法国A. H. Reeves 提出 PCM (脉码调制)技术并取得专利。

1967年 日本NHK 使用磁带录象机(VTR)研制成功旋转磁头方式PCM录音机。

1970年 西德Telefunken公司等发表机械式电视唱片系统; 美国RCA公司发表电容式电视唱片系统。

1972年 英国BBC广播公司发表固定磁头方式开盘式数字录音机; 荷兰Philips公司发表激光式电视唱片系统。

1977年 日本SONY公司在市场发售家用旋转磁头方式的PCM处理机PCM-1。

1979年 荷兰Philips公司发表激光式小型数字唱片系统(简称CD方式)。

1981年 为统一数字唱片标准, 世界各国51家公司在日本召开商讨会, 提出数字唱片三种方式建议:

(1) Philips公司和SONY公司的Compact Disc方式(简称CD方式);

(2) Telefunken公司等的Mini-Disc方式(简称MD方式);

(3) 日本Victor公司的Audio High Density Disc(简称AHD方式)。

1983年 美国和加拿大利用通信卫星实

现数字式立体声广播，在此之前(1981年)西德和日本已利用卫星试验成功数字式音响广播系统。

下面我们首先叙述数字音频技术的基本原理和系统构成，然后以数字录音机和CD唱片唱机为典型示例，说明数字音频技术的应用、特点和性能。

目前，数字音频设备或数字音响系统以数字磁带录音机(DAT)和数字唱片唱机(其中主要是CD)为主，其分类如下：

## 二、数字音频技术的原理与系统组成

- 数字音频
- 数字磁带录音机 (DAT)
    - 固定磁头方式
    - 旋转磁头方式 (VTR + PCM处理机)
  - 数字唱片唱机 (DAD)
    - CD方式(光学反射式)
    - MD方式(压电式)
    - AHD方式(静电式)
  - 其他数字音响设备——数字延迟器、混响器等

数字磁带录音机、数字音响唱片唱机等数字音频系统都可以画成如图1所示的模型。信息源，经传声器等转换成电模拟信号，传统的模拟录音方式就是将这种连续的模拟信号进行记录或重放，而数字音频技术则是先把音频信号数字化，再记入记录媒介进行PCM录音。数字音频录音和放音系统的各部

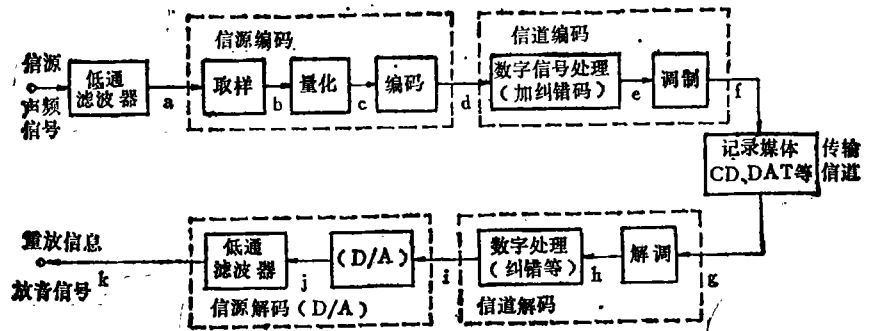


图1 PCM录音、放音系统

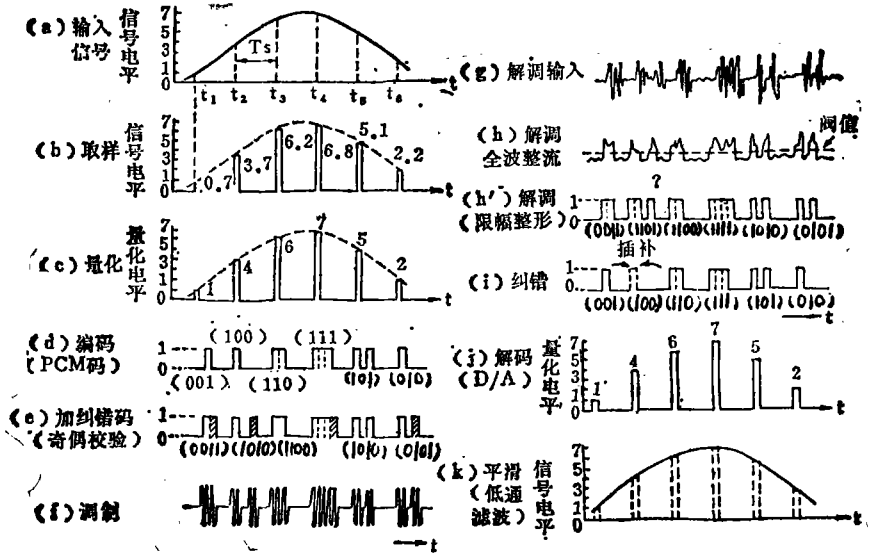


图2 PCM录、放音系统的各点波形

分的相应信号波形如图 2 所示。图(a)即输入的电模拟声频信号, 声频信号的数字化包含取样、量化和编码三个过程。首先确定最小信号单位, 例如 1mV, 每隔一定时间间隔(即取样周期) $T_s$ , 即在 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ……检出输入信号的电平, 如图 (b)所示, 经过取样, 在时间上使连续信号离散化。接着把取出的信号值小数点以后各数值进行四舍五入将其归为某一邻近的整数, 这种分级取整的过程就是量化, 如图 2(c)所示。即将幅度上连续变化的取样信号, 改成每隔一定幅值  $\Delta u$ (最小信号单位)的幅度离散化的信号。然后将该整数数值变换成二进制数, 用脉冲电平 0 或 1 示出, 这个过程即 PCM 编码, 如图(d)所示。这时已是数字化的声频信号, 它已可以进行数字记录、存储或传输。为了减少数字信息在记录或传输中的差错, 还加入信道编码器进行再次编码。信道编码的任务除了使数字声频信号转换成适合信道记录或传输的码型外, 主要是增强数字信号在信道(记录媒介或传输通道)中的抗干扰能力。各种检错纠错的编码的方法就是信道编码的内容。例如, 如图(e)所示, 利用奇偶校验码, 加入奇偶脉冲使各取样值的脉冲总数为偶数。由于该信号中含有直流成分, 若直接录制在介质上就会造成噪声干扰。为此要将其消除后再加在

载波上(图(f))。若用脉冲信号对载波进行振幅调制, 再通过记录媒介或传输线, 此时各种干扰也同时被接收下来, 使解调器输入出现图(g)所示的失真。因此, 经全波整流或同步检波解调出的信号如图(h)所示。如果用限幅电平将图中虚线部分整形就可得到接近原来图(e)的波形(见图(h')), 但因在记录或传输过程受到干扰可能会出现差错, 这时可通过奇偶校验方法找出其中差错。例如, 图(h')中的第二个取样值的脉冲个数不为偶数(1101), 故为差错。此时, 可通过电路技术, 用该值前后的两个取样值即第一、第三取样值的平均值进行取代, 即所谓插补校正, 如图(i)所示。然后通过数模转换器(D/A)变换成图(j)的 PAM 脉冲信号, 再经低通滤波器平滑, 还原为原来的声音模拟信号。

为了加深对数字信号的理解, 下面对上述数字录音、放音的过程从时域(波形)和频域(频谱)进行对比与分析。如图 3 所示, 在声频信号 $f(t)$ 的数字化过程中, 取样过程相当于模拟信号 $f(t)$ 与取样脉冲信号 $\delta(t)$ 的相乘, 即图 3 上半部的 $f_s(t) = f(t) \cdot \delta_p(t)$ 。从频域角度来看, 即图 3 的下半部, 取样后的频谱相当于原信号频谱 $F(\omega)$ 与取样脉冲信号的频谱 $F[\delta(t)]$ 的卷积。由 $F(f)$ 的频谱图可见, 取样后的频谱是输入信号频谱沿正负频率

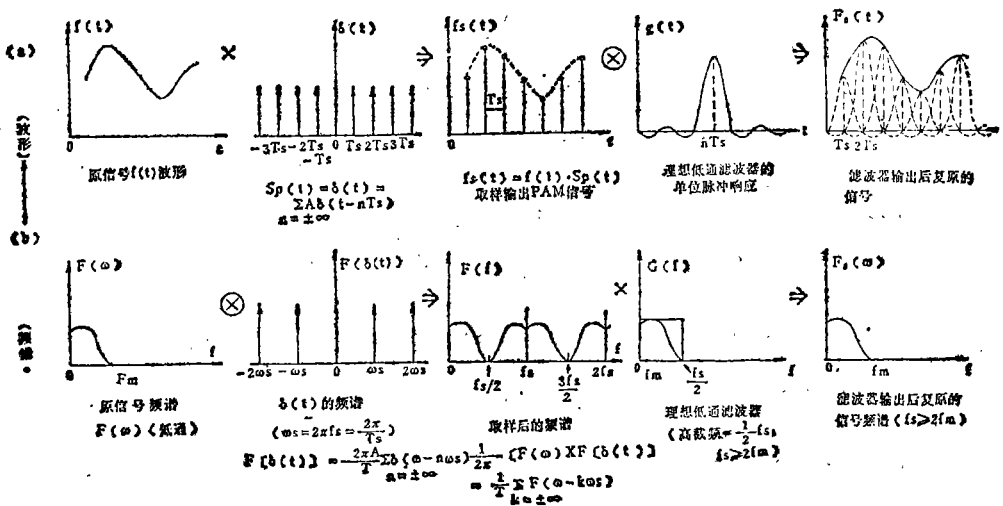


图3 从时域与频域分析取样过程

轴，每隔一取样频率 $f_s$ 作频谱周期延拓。因此，为了使信号在取样后不产生频谱混迭失真，必须要求取样频率 $f_s$ 大于两倍的信号频谱的最高频率 $f_m$ ，即 $f_s \geq 2f_m$ ，这就是奈奎斯特取样定理。

为了避免高于 $f_s/2$ 的杂散频谱(或噪声)进入取样器造成频谱混迭，在取样器之前常常加一个保护性的前置低通滤波器，将高于 $f_s/2$ 的频谱成分滤掉，以避免混迭效应的产生。所以，在图1中，输入端加接低通滤波器。

另一方面，已取样的信号 $f_s(t)$ (如图2(b)、(c)或(j))，只要经过一个带宽为 $f_s/2$ 的理想低通滤波器(即图1输出端的后置低通滤波器)，即相当于图3中用理想低通滤波器 $G(f)$ 去选出 $F(f)$ 的基带频谱，因而低通滤波器输出的就是原信号频谱，即实现恢复出原信号来。从时域角度来看，理想低通的脉冲响应 $g(t)$ 为辛克 $\left(\frac{\sin x}{x}\right)$ 函数，已取样信号

$f_s(t)$ 通过理想低通相当于 $f_s(t)$ 与 $g(t)$ 的卷积，即取样信号通过内插函数 $g(t)$ 的内插而恢复出原来的模拟信号，如图3上半部的 $f_a(t)$ 所示。

根据以上分析，可以确定数字声频一些主要参数。首先是取样频率的选择。由取样定理可知，声频信号的最低取样应大于信号最高频率的两倍。除了必须遵守奈奎斯特取样定理之外，还要考虑一些其他因素。根据实验结果认为人的可闻带宽的最高频率为15千赫，设计数字声频系统时，取样频率以复盖20千赫为好。而且，为了使数字声频系统便于与电视、录像和电影等连结，因此要与行频与帧频同步或呈整数关系。考虑到上述各种因素，取样频率有取44.05594千赫和44.1千赫等。由此转换时间(速度) $=\frac{1}{44.1\text{KHz}}$   
 $=22.7\mu\text{s}$ ，对于双声道则为 $11.35\mu\text{s}$ ，即转换速度约 $10\mu\text{s}$ 。

另一个重要参数是量化比特数的选择。由图2可知，量化后的信号与取样点的信号幅值之间有一个差值，称为量化误差。在接收端这种误差表现为噪声，称为量化噪声。量化误差的大小与量化级数 $N$ 的多少有关，量化级数越多，量化误差就越小，量化噪声也越小。但量化级数 $N$ 增多，随之量化比特数 $n(N=2^n)$ 增多，频带宽度增加，对录音信号传输不利，同时也增加设备复杂性，提高成本。由实验得知，对于可接受的声音，使用12量化比特数即可；若要获得高保真声音信号，则需14比特，目前数字声频技术中通常采用14~16比特。

计算可得，由量化噪声引起的信噪比为

$$\frac{S}{N_q} = \frac{3}{2} N^2 = \frac{3}{2} 2^{2n}$$

用分贝表示，即为

$$\left(\frac{S}{N_q}\right)_{\text{dB}} = 10\lg\left(\frac{3}{2} \times 2^{2n}\right) = 6n + 1.8(\text{dB})$$

$$\approx 6n(\text{dB})$$

式中 $n$ 为量化比特数，上式就是数字声频编码器的动态范围。可见，每增加一个比特，信噪比和动态范围可提高6分贝。对于14比特，信噪比和动态范围约为 $6 \times 14 = 84$ 分贝；对于16比特则为 $16 \times 6 = 96$ 分贝。以往模拟唱片，其动态范围最好也不过60分贝，相差30分贝以上。每秒所传送的码数，即码率(传输速率)等于 $nf_s$ 。因此，对于 $f_s$ 为44.05594千赫、14比特信号的码率为

$$nf_s = 14 \times 44.056 = 616784 \text{ 比特/秒}$$

对于立体声需两路，即为1233568比特/秒。折算为带宽约为其0.5~1倍，即1.23兆赫。对于CD唱片，两路立体声的码率为 $16 \times 44100 \times 2 = 1411200$ 比特/秒，即相当于1.41兆赫带宽。也就是说，数字音响录音、放音设备的带宽要大于1.5兆赫，而目前普通盒式录音机、唱机的频率特性最高只有20千赫。所以，两者的记录媒介相差很大，数字声频

作纵向调整及周向旋动。工作台右边为气动系统的部件(空压机外附),工作台左边为电振荡器及电气控制箱。

术委员会主持的焊机技术鉴定会上鉴定通过。

## 五、塑料件焊接应用举例

焊机的一般工作方式是,对于一定的塑料件,选定一定的电气控制参数和气动控制参数后,踩下脚踏开关,焊机即自动进行操作并完成焊接。必要时亦可用手动控制操作。塑料件焊接应用举例见于表1。

本焊机已于1985年10月在广州市科学技

## 参 考 文 献

- [1] 谢源清, 晶体管低频电路, 人民邮电出版社, 1979。
- [2] 袁仁昌, <电子科学技术>, 1979, 7。
- [3] J. 范兰德拉特等编, 彭浩波等译, 压电陶瓷, 科学出版社, 1981。
- [4] 陈桂生, 朱革非, 张宏彬, “大振幅超声换能器设计”, 声学技术, 2卷1期, 1983。
- [5] Nicholas Maropis, “The Design of High-Power Ceramic Transducer Assemblies”, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. Su-16, No. 3, July, 1969.
- [6] Ultrasonics International Conference Proceedings, 1979.

(上接封三)

要用高密度信息记录媒介。

此外,除了上述的线性量化之外,还有非线性(非均匀)量化。即在小信号时量化级分得较细,强信号时量化级分得较大,所以弱信号量化噪声小,提高了弱信号时的信噪比,并增大了工作的动态范围。采用非均匀量化,可降低量化比特数,此时一般只要12~14比特即可。

## 三、数字声频设备的优缺点

数字声频设备的主要优点是:

- (1) 音响质量好。以磁带录音机为例,见下表:
- (2) 数字声频信号经多次重放,质量不劣化,能使录音带多次重录仍保持声音质量

性能	PCM录音机	模拟式录音机(高级)
频响	20Hz~20KHz, $\pm 0.5\text{dB}$	30Hz~15KHz, $\pm 2\text{dB}$
失真度	小于0.03%	0.5%
抖晃率	小到无法测出	0.02% rms
信噪比	90dB以上	60dB
动态范围	90dB以上	60dB (一般只有40dB)

良好,这对于节目制作、编辑、分配、传输质量的提高创造了有利条件。而通常的模拟录音机每次复录要降低信噪比3分贝,音质逐渐恶化。

(3) 因数字化易于采用大规模集成电路,使整机调试方便,性能稳定,可靠性高。而且便于大批生产,成本会逐步下降。

但数字声频设备也有缺点,主要是:

- (1) 数字设备比模拟设备复杂。
- (2) 目前价格较贵。