

图解

A/D转换器入门

(日) 米山寿一 著

徐秋泉 程朝安 赵忠林 译

電子工業出版社

内 容 简 介

全书以通俗易懂的文字和插图，详细地讲述了 A/D、D/A 转换器的基本原理、接口电路及设计方法，是一本较好的数字电路方面的普及读物，可供自动控制、测量、图象处理、数字通讯等一般科技人员阅读，也可作为有关专业学生的参考书。

图解A/D转换器入门

(日) 米山寿一 著

徐秋泉 程朝安 赵忠林 译

责任编辑 宋玉升

电子工业出版社出版 (北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山东电子工业印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 7 字数: 200千字

1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷

印数: 1—5100册 定价: 2.15元

统一书号: 15290·581

目 录

1 何谓 A/D 转换器	(1)
1.1 为什么需要A/D 转换器	(1)
1.2 A/D转换器是怎样进行工作的	(4)
1.3 A/D转换器的应用实例	(7)
2 A/D 转换器的基本原理	(11)
2.1 A/D转换器的有关术语	(11)
2.2 运算放大器	(24)
2.3 比较器	(38)
2.4 模拟开关	(39)
3 低速 A/D 转换器原理	(44)
3.1 积分电路	(45)
3.2 双重积分方式A/D转换器	(46)
3.3 四重积分方式A/D转换器	(60)
3.4 完全补偿形四重积分方式	(66)
3.5 五相积分方式 A/D 转换器	(68)
3.6 三角脉冲调幅方式A/D转换器	(69)
3.7 电荷平衡方式	(75)
3.8 量化反馈方式	(77)
3.9 双重平衡方式	(84)
3.10 同时积分方式	(89)
3.11 其它低速A/D转换器	(91)
3.12 各种转换方式的比较	(96)
3.13 积分方式 A/D 转换器的高速化	(105)
4 中、高速 A/D 转换器	(114)

4.1	逐次比较方式A/D转换器	(112)
4.2	电压比较方式	(118)
4.3	电流比较方式	(118)
4.4	电荷比较方式	(121)
4.5	电阻和电容组成的A/D转换器	(123)
4.6	使用等电容电容器的A/D转换器	(126)
4.7	循环比较方式A/D转换器	(130)
4.8	并联比较方式A/D转换器	(132)
4.9	串并联比较方式A/D转换器—I	(136)
4.10	串并联比较方式A/D转换器—II	(139)
4.11	行波方式A/D转换器	(144)
4.12	数字脉冲编码调制方式A/D转换器	(146)
4.13	级联比较方式A/D转换器	(148)
5	A/D转换器的外围电路	(150)
5.1	采样保持电路	(151)
5.2	基准电压源电路	(161)
6	数字/模拟转换器	(170)
6.1	加权电阻方式D/A转换器	(170)
6.2	电阻分压方式D/A转换器	(172)
6.3	电流相加方式D/A转换器	(174)
6.4	电压相加方式D/A转换器	(175)
6.5	加权电流方式	(178)
6.6	电流分级方式D/A转换器	(179)
6.7	恒流二进制衰减方式D/A转换器	(180)
6.8	使用电容器的D/A转换器	(181)
6.9	积分方式D/A转换器	(183)
6.10	D/A转换器的调整	(186)
6.11	D/A转换器用的开关	(193)
7	A/D转换器的设计与应用	(195)
7.1	A/D转换器和微型计算机的接口	(195)

7.2	数字电压表的设计.....	(200)
7.3	A/D、D/A转换器的测试	(208)
附录	低速A/D转换器的模型	(212)

1 何谓 A/D 转换器

以微型计算机, 存储器所代表的大规模集成电路技术的发展为支柱, 数字信号处理技术的应用范围正在迅速扩大。例如, 在数字音响领域, 利用 A/D 转换器能把音乐模拟信号变换为数字信号。通过数字信号处理手段, 不仅扩大了动态范围, 还能使旋转系统产生的变音和放音失真之类的失真降低到检测量限以下, 另外还具有补偿由于磁带伤痕造成的漏失信息的功能。

如上所述, 利用数字处理技术, 不仅能提高信号处理精度, 还增加了模拟信号处理技术不可能实现的功能。然而, 自然现象中的物理量都是模拟量, 要想进行数字处理就不能缺少 A/D、D/A 转换器这一过渡的桥梁。

直到70年代, A/D转换器的价格仍比较昂贵, 人们期待着转换器的迅速发展。到了80年代, 用于数字音响和视频信号的 A/D, D/A 转换器产品已大量问世。本章简单介绍 A/D 转换器的基本概念及其应用。

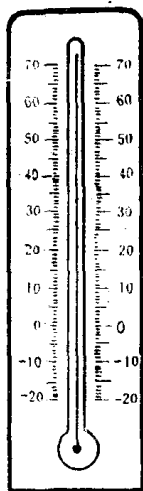
1.1 为什么需要 A/D 转换器

A/D 转换器是英文 Analog to Digital Converter 的缩写, 译为模拟-数字转换器。它是将模拟量转换成数字值的电子装置。最近已实现了单片集成, 市场上有大量的产品出售。那么, 所谓模拟是什么意思, 而数字又是什么意思

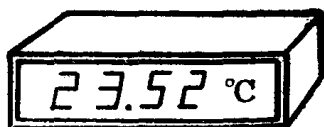
呢？

翻开字典可知，Analog 是“相似物”，“类似物”的意思；Digital 是“手指的，指状的”意思。单从字面上看很费解。“指的，指状的”意思是指能够分开屈指计算一个，二个……的量，而模拟则是指连续的量，不能分段计数。拿身边常用的计算工具来打个比方，模拟量的计算器是计算尺，数字量的计算工具以前是算盘，现在是台式计算器。

那么，为什么要把模拟量变成数字量呢？我们知道，诸如温度、长度、重量、音量等自然界的物理量几乎全都是模拟量。然而，要把温度这个无限连续的量（例如 $23.524\cdots\cdots^{\circ}\text{C}$ ）转告别人，我们可从温度计的刻度上读取适当的位数，然后告诉别人是 23.5°C 。这样进行数字化处理很实用。在这个例子中是人读出模拟量，然后进行数字化处理。使上述过程自动进行的装置就是 A/D 转换器。



(a) 模拟温度计



(b) 数字温度计

图1.1(a) 模拟温度计

图1.1(b) 数字温度计

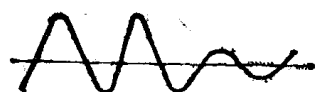
再者，如图 1.1(a) 所示，在读温度计的刻度时，往往因为读数的方法不同(眼睛的位置不同)或人为的误差而读为 23.4°C ，或 23.6°C 。若使用图 1.1(b) 的数字温度计，则无论任何人都能准确读出 23.52°C 。这样就能通过数字化而准确地传递和记录信息。

但是，观察随时间而变化的现象，或凭直接感觉来比较二个量的大小时，模拟手段往往比数字手段好。例如水银温度计，即使有一部分刻度磨掉或被沾污，也能读出粗略的数值，而数字温度计的显示部分一旦出现故障，就完全不能读数。这就是说，数字化能准确记录和传递信息指的是全部功能都正常工作的情况而言。在出现部分故障的情况下，模拟手段往往比数字手段少受不利因素的干扰。可见，可靠性对数字系统来说比模拟系统显得更为重要。

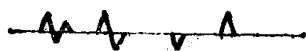
下面就以信号为例，对二者作一比较。当图 1.2(a) 的模拟信号上加有图 1.2(b) 的噪声信号时，则变成如图 1.2(c) 所示的信号。如果噪声信号的波形已知，则可从含噪声的模拟信号中减去噪声，恢复原来的信号波形。然而，噪声波形通常不可能单独知道，所以一旦有噪声就无法将其消除。

图 1.3 是数字信号的一个例子，即使是含有噪声，也能用图中的阈值电压 V_T 判定。比 V_T 高的定为“1”，比 V_T 低的定为“0”，经过整形电路就能消除噪声的影响。

如上所述，由于不能消除模拟信号中的噪声，所以在实际电路中，不管设计师如何费尽心机，其信噪比(S/N)的提高也是有限度的。数字信号则不然，只要在适当的地方对波形进行整形，就能获得相当高的信噪比，电路设计也很容易，也就是说，数字化信号能进行信号处理。然而数字信号处理系统要比模拟信号处理系统复杂得多，而且还要求有高的



(a) 模拟信号



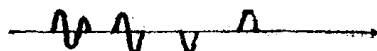
(b) 噪声波形



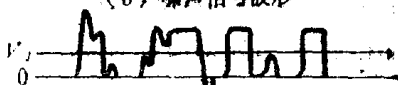
(c) 含噪声的模拟信号



(a) 数字信号波形



(b) 噪声信号波形



(c) 含噪声的数字信号



(d) 整形后的数字波形

图1.2 含噪声的模拟信号

图1.3 数字信号波形

可靠性。正因为如此，在大规模集成电路出现以前，数字信号处理系统的价格是极昂贵的，除精度有特殊要求的自动控制系统外，很少使用 A/D 转换器。

但是，随着大规模集成电路技术的发展，数字信号处理系统的价格也大幅度地降低，使得数字信号处理技术广泛地应用到各个领域。

1.2 A/D转换器是怎样工作的

A/D 转换器是一种由模拟电路和数字电路构成的电子器件。

有几种方法可以测量出如图1.4(a)所示的水槽的水量。若用图1.4(b)那种已知容积的量杯舀水，只要记录到水被舀

完时舀水的次数,就可知道总的水量。不过,采用该方法需多次重复舀水,很费时间,但只要量杯的容积精确,就能准确地测量水量。

其次,图 1.4(c) 的方法是用容积分别为 1 毫升、2 毫升、4 毫升……32 毫升的量杯。先用 32 毫升的量杯,如果量杯能舀满一杯,就舀一次;如果水未能充满量杯,就把量杯中的水倒回原槽,接着用容积为 16 毫升的量杯重复上述操作。再用 8 毫升、4 毫升、2 毫升、1 毫升的量杯作同样的重复操作,最后把舀水量杯的容积相加,就能测出槽中的水量。采用此方法需舀水 6 次,能量出 63 毫升的水。与此相比,若

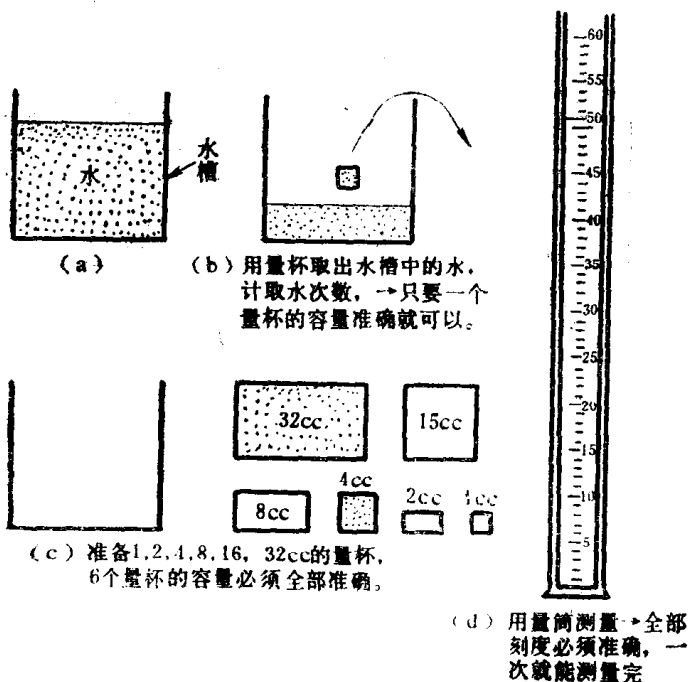


图 1.4 A/D 转换器的概念

采用图1.4(b)的方法,则最多要舀63次。由此可见,图1.4(c)的方法能在较短时间内测出水量。但这种方法要求6个量杯的容积都须精确。

图1.4(d)的方法是把水槽中的水全部倒入量筒中,读量筒的刻度,能在极短时间内进行测量。但这种方法要求量筒的刻度要精确。

不难看出,A/D转换器的性能主要由精度(准确性)和转换时间来决定。如果某个A/D转换器的精度和速度都很高,价格又便宜,当然是最理想的。但从上述例子知道,要想在较短时间内进行测量,就需要准确的量杯或增加刻度的数目。高速A/D转换器需要大量高精度的元件,总体电路很

表1.1 A/D转换器的基本类型

转换速度	主要转换方式	主要用途	工作原理及特点
低 速 (几毫秒至 几秒)	积分式: 双重积分式 电荷平衡式 三角脉冲调制式	数字万用表 数字温度计 电子秤	对输入电压积分,利用积分波形的斜率进行A/D转换。不需要精密元件能达到高精度的转换,所以廉价
中 速 (几微秒至 几百微秒)	反馈比较式 逐次比较式 跟踪比较式	数值控制 程序控制 PCM 通讯	操作内部的D/A转换器,使之与输入电压之差呈最小状态进行A/D转换。用途最广泛
高 速 (几毫微秒 至几百毫微 秒)	无反馈比较式 并联比较式 串并联比较式	波形存储 装置 音频信息 处理	使用多个比较器,同时实现多位数的A/D转换。速度高,电路复杂,价格高

复杂，因此价格很高。

表1.1列出了已被开发的实际的 A/D 转换器，有低速的易于达到高精度的双重积分方式，也有中速、中精度的逐次比较方式（并非不能达到高精度，但造价将提高），还有高速然而精度有限的并联比较方式等等，它们均已在实际中得到应用。

1.3 A/D转换器的应用实例

(1) 电子秤

在超级市场上有电子秤，它不单秤量商品的重量，而且还能扣除皮重（包装之类的重量），计算金额等。图1.5是电子秤的方框图。

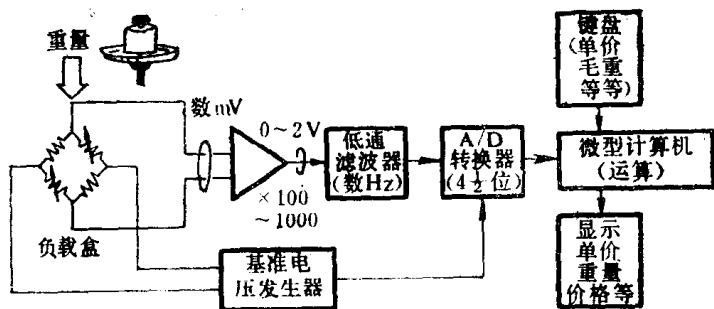


图1.5 电子秤方框图

商品重量由测力传感器之类的敏感元件转换成直流电压。由于测力传感器的输出电压通常只有几毫伏，所以要经放大（放大器放大倍数为几百至几千），再用截止频率为几赫兹的低通滤波器除去噪声，输入A/D转换器，由A/D转换器转变成数字。从键盘输入单价，由计算机算出金额，荧光数码管显

示其结果。由于输入电压是直流, A/D 转换器的转
些也没关系, 但精度要求相当高。通常在 $4\frac{1}{2}$ bi
大都用转换速度为数十毫秒至数百毫秒的双重 积
转换器。

(2) 声音脉冲编码调制通讯

以前, 中速 A/D 转换器多用于工业机 器人等
系统中, 最近, 在脉冲编码调制 (PCM) 通讯、数
统中的应用颇为引入注目。

图1.6为 PCM 通讯的方框图。由话筒检出
经前置放大器放大后加至低通滤波器。采样可以

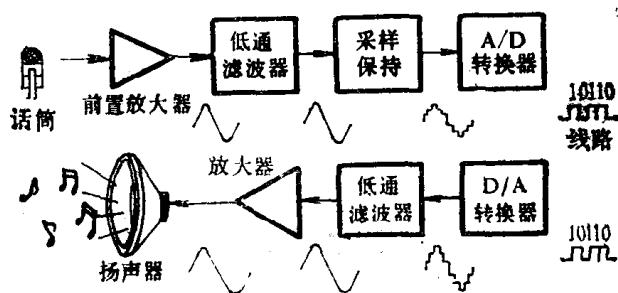


图1.6 PCM通信的方框图

信号最高频率 2 倍的频率进行, 但是在超过采样
率分量出现时将会产生失真, 所以要用截止特性
波器滤除高频分量, 然后再加于采样保持电路。
路的输出信号由 A/D 转换器转换成数字信号, 通
过通信线路、中继线、交换机等传递到接收端。
数字信号, 即使在传递中产生失真, 也能在适当

波形整形加以改进。在接收端，由 D/A 转换器将数字信号还原成模拟信号。因 D/A 转换器的输出信号是阶梯状的，会有大量高次谐波，因此需要用低通滤波器滤除高次谐波分量，然后放大，再驱动扬声器还原成声音。

该领域中所用的 A/D 转换器的转换速度为 $150\mu\text{s}$ (6.6kHz) 左右，大都采用对数特性的 A/D 转换器，这样只要用 8bit 就能获得大约 72dB (4000 倍左右，相当于 12bit) 的动态范围。

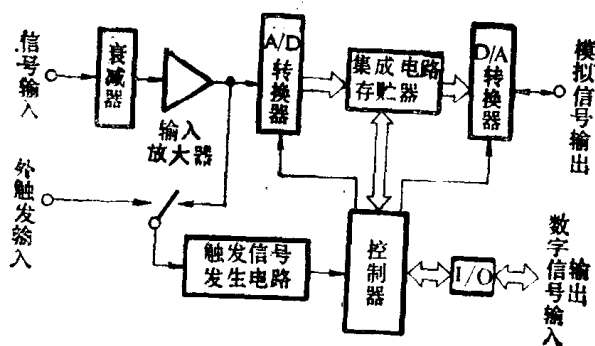
近来人们关注的数字音响系统可简化成图 1.6 所示的结构。它需要 16bit 的精度，因此要求更高精度的 A/D、D/A 转换器。为了防止录音磁带失漏信息，线路上还增设了信号替补、纠错符号等功能，因此电路组成更趋复杂。不过可以修正错误，这是数字化的优点。

(3) 波形存储装置

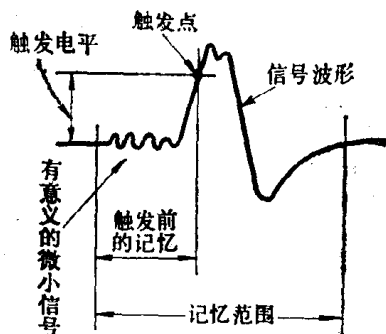
高速 A/D 转换器，可用于对电视信号和扫描线数的变换进行数字处理，下面以波形存储装置为例予以说明。图 1.7 是波形存储装置的方框图。A/D 转换后的数字信号被存储在存储装置中，再根据需要将读出的信号进行 D/A 转换，显示在萤光屏上，或者通过接口与计算机连接，进行付里叶分析等数字运算。在本例中，数字化的优点是，即使输入信号为计算机无法响应的高速现象，也可以将存储在存储器中的信息在计算机需要的时间从容地读出来进行数字化信号的处理。还可以将波形输送到 X-Y 绘图机和 X-Y 记录仪上。

波形存储装置大都使用中速的逐次比较式 A/D 转换器。在高速的情况下，在分辨能力为 8bit 时，采样频率可使用 100 兆赫左右。

另外，波形存储装置要求更高速度时，就要使用扫描



(a) 波形记忆装置的构成



(b) 触发点以前的记忆

图1.7 波形存储装置方框图

转换管、电子轰击型半导体(Electron Bombarded Semiconductor)等。此外，在低速情况下，有在自动控制领域使用的回转式编码器，它不属于电子回路构成的 A/D 转换器之列，所以本书就不作介绍了。

2 A/D转换器的基本原理

A/D、D/A 转换器使用着许多术语，而术语的定义又因厂家不同而异。在此仅就较为广泛使用的定义来予以说明。但在实际使用时，需按各厂家的定义进行比较和研究。

A/D 转换器有多种形式，在第三章以后将要讲到它们。但大多数都以某种形式使用着运算放大器和模拟开关。例如，为将传感器输出的信号放大到适当的电压值，使用运算放大器，还有，为了从多个信号中选出所需的信号输送给 A/D 转换器，就要用模拟开关作为多路转换器。因此在理解 A/D 转换器的工作原理及使用 A/D 转换器时，都需要了解运算放大器和模拟开关。本章后半部分将作简单介绍。要想对运算放大器进一步了解，请参考有关书籍。

2.1 A/D转换器的有关术语

(1) 分辨能力和量化误差

所谓将模拟量转换成数字值，就是将连续的量转换成非连续的值。我们来分析一下用 3bit 的 A/D 转换器将 $0V \sim 1.0V$ 的模拟电压转换成数字的过程。3bit 的输出数字有 000、001、010、011、100、101、110、111 八种。就是说，模拟输入电压将要转换成 8 种输出数字中的某一种。模拟输入电压和输出数字的关系，如图 2.1 所示。在图中，输

• 可见各公司的说明书。

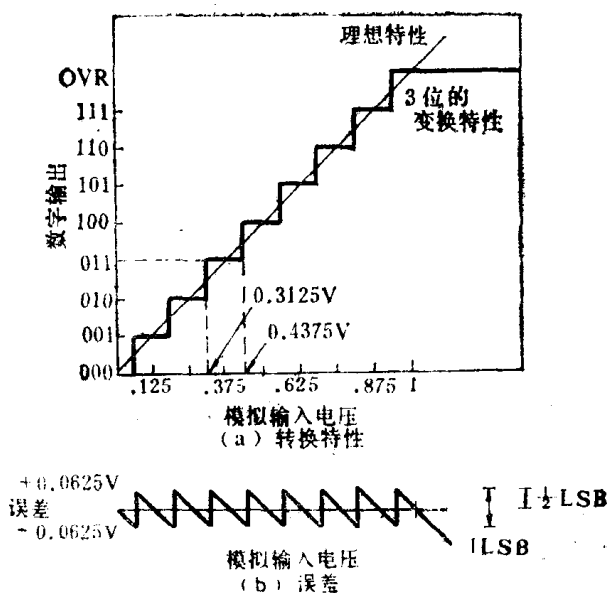


图2.1 模拟-数字转换特性

出数字为011时，模拟电压在 $0.3125 \sim 0.4375\text{V}$ 之间。与一个输出数字相对应的模拟输入电压具有 0.125V 的幅度。因此，如果两个模拟电压 V_1 和 V_2 的差大于 0.125V 时，输出的数字就会变化，所以能够区分 V_1 和 V_2 的差。把这种能够区分的电压范围叫做“分辨能力”。通常用最低有效位 (LSB) 表示。分辨能力的本来定义已如上述，然而人们常用“3 比特分辨能力”来表示。在这种情况下，分辨能力变为满量程 (FSR) 除以 2^N (N 为位数)，即

$$1\text{LSB} = \frac{\text{FSR}}{2^N} \quad (2-1)$$

- 数字信号的最低位同样用LSB表示。