

电子数字计算机

# 模拟数字转换技术

(試用教材)

研究所編

长沙工学院

73.873  
C7317

电子数字计算机  
模拟数字转换技术  
(试用教材)  
研究所编

•  
编号: 4030028      印数: 1-1000  
长沙工学院出版      本院印刷厂印刷

•  
1974年8月      定价: 0.80元

本书对于模拟数字转换技术中的基本概念、基本原理及主要模拟电路作了较深入的讨论。

本书是为我院有关专业而编写的选用教材，也可供有关人员自学与参考。书中部分内容选自有关参考书，但也有部分内容是几年来的科研实践总结。有关“数字—转角转换”内容尚未编写，故暂缺。由于编者水平有限，书中一定有很多不当和错误之处，请批评指正。

编 者

1974年2月

1974年2月  
1974年2月  
1974年2月

9527

## 毛主席语录

无产阶级认识世界的目的，只是为了改造世界，此外再无别的目的。

入门既不难，深造也是办得到的，只要有心，只要善于学习罢了。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时间内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

# 目 录

## 第一章 概 论

|                            |    |
|----------------------------|----|
| § 1.1 模拟与数字                | 1  |
| § 1.2 模拟/数字转换在数字控制系统中的应用举例 | 2  |
| § 1.3 转换过程的分析              | 3  |
| § 1.4 转换器的分类               | 10 |
| § 1.5 转换器的基本参数             | 11 |
| § 1.6 确定转换速度的方法            | 13 |

## 第二章 数字——电压转换

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| § 2.1 $R$ 、 $2R$ 梯形网络的 $D/A$ 转换器 | 15 |
| § 2.2 权电阻网络的 $D/A$ 转换器           | 19 |
| § 2.3 电流源的 $D/A$ 转换器             | 22 |
| § 2.4 补码与反码输入的 $D/A$ 转换器         | 24 |
| § 2.5 二——十进制的 $D/A$ 转换器          | 29 |
| § 2.6 数字——交流电压的转换方法              | 34 |
| § 2.7 精度问题                       | 36 |

## 第三章 模拟开关

|                      |    |
|----------------------|----|
| § 3.1 晶体管模拟开关        | 38 |
| § 3.2 提高晶体管模拟开关精度的方法 | 46 |
| § 3.3 场效应晶体管模拟开关     | 48 |

## 第四章 基准电压源

|                      |    |
|----------------------|----|
| § 4.1 稳压二极管          | 55 |
| § 4.2 具有温度补偿的精密稳压二极管 | 57 |
| § 4.3 减小外加电压变化而引起的误差 | 57 |
| § 4.4 减小负载电流变化而引起的误差 | 59 |

## 第五章 电压——数字转换

|                          |    |
|--------------------------|----|
| § 5.1 计数式电压——时间间隔——数字转换器 | 61 |
| § 5.2 计数式电压——频率——数字转换器   | 69 |
| § 5.3 比较式电压——数字转换器       | 72 |
| § 5.4 各种典型转换器的比较         | 85 |

## 第六章 电压比较器

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| § 6.1 电压比较器的作用及主要要求   | 88  |
| § 6.2 简单的电压比较器        | 89  |
| § 6.3 晶体管差动放大器比较器     | 95  |
| § 6.4 晶体管差动放大器比较器典型电路 | 100 |
| § 6.5 场效应晶体管比较器       | 103 |

## 第七章 转角——数字转换

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| § 7.1 码盘                      | 106 |
| § 7.2 旋转变压器及同步机幅度转换的转角——数字转换器 | 122 |
| § 7.3 旋转变压器及同步机相位转换的转角——数字转换器 | 135 |

## 第八章 转换器的多通道工作

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| § 8.1 概述                              | 139 |
| § 8.2 晶体管通道开关                         | 141 |
| § 8.3 结型场效应晶体管( <i>JFET</i> )通道开关     | 148 |
| § 8.4 绝缘栅场效应晶体管( <i>MOS FET</i> )通道开关 | 150 |
| § 8.5 采样保持电路                          | 152 |

## 第九章 其他典型转换

|                  |     |
|------------------|-----|
| § 9.1 数字——相移转换   | 154 |
| § 9.2 数字——平均电流转换 | 157 |

## 第十章 运算放大器及其在转换中的应用

|                   |     |
|-------------------|-----|
| § 10.1 理想的放大器     | 161 |
| § 10.2 运算放大器的基本电路 | 162 |
| § 10.3 求和器        | 163 |
| § 10.4 高输入阻抗变换器   | 164 |
| § 10.5 积分器        | 165 |
| § 10.6 基准电压源      | 168 |
| § 10.7 恆流源        | 170 |
| § 10.8 电压比较器      | 171 |

## 附 註

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 一、二——十进制数表          | 173 |
| 二、转角——数字转换位数与鑑別力关系表 | 174 |
| 三、三相——二相变压器         | 174 |
| 四、关于旋转变压器作移相器的原理    | 175 |
| 五、关于常态与共态抑制         | 176 |

# 第一章 概 論

## § 1.1 模拟与数字

近年来，随着电子技术的迅速发展，数字技术得到广泛的应用，尤其是电子数字计算机在自动控制系统中的广泛应用，模拟量与数字量之间互相转换的问题已经成为数字技术中的重要问题之一。

本节主要讨论一下模拟与数字这两个概念的含意、区别及特点。

将信息（例如测量某一个电压值）用模拟量与数字量表示时是不同的；当用模拟量表示时可用电压表指针位置等表示；当用数字量表示时可用数字电压表中的数码管等表示。用模拟量表示时，其量值是连续的，而用数字量表示时则是断续的。例如用三位数字量表示电压时在 3.56 伏与 3.57 伏之间就没有其他数字量了，而用模拟量表示时可以有 3.563 伏或 3.5609 伏等等。

再如从 A 地向 B 地传送信息 1157；一种方法是用模拟量的方法：在 A 地用 1157 周/秒的频率表示并发送出去，在接收端 B 地接收。因为发送端的振荡器与接收端接收的频率之间可能有误差，所以接收端可能测得 1157.5 周/秒或者 1158 周/秒等等。

假如 1157 是某一电话号码，则最末位的数 7 与最高位的数 1 是同样重要的，最末位不容许因有误差而变为 6 或 8 等等。在这种情况下可用数字量传送的方法。例如可以用四个通道传送信息，一、二、三、四各通道的发送频率分别为 100、100、500、700（周/秒），而在接收端测量频率时，即使有某些误差，例如第四通道测得为 693 周/秒或 710 周/秒，则都可以断定为数字“7”，这就是说可以修正某些误差而得到正确的判断。这种方法是一种数字传送信息的考虑（实际的数字传送信息的方案要比此例好得多）。

模拟量在客观自然界中是广泛存在的，例如电流、电压、轴的转角、时间、频率、温度、压力等等。数字量是人为的，是从客观世界中抽象出来的，它是人们从测量、计数等这些考虑产生的。用数字量表示时有如下的优点：

### 1. 计算上的优点

例如计算尺是一种模拟计算，算盘是一种数字计算。如计算  $47 \times 38$ ，在计算尺的情况下，由于计算尺本身及人的读数误差，正确读数只能读准到三位，第四位就是不准确的，所以答案可能是  $\overline{1785}$ 。但是用算盘计算时，只要操作正确，算盘本身及人的读数都不会产生误差，所以答案是准确的，为  $\overline{1786}$ 。两种情况如图 1.1 所示。

现在模拟计算的精度为 0.1% 左右，更高精度的计算就比较困难，而且计算的次数越多，则产生的误差可能就越大。然而数字计算就好得多，提高精度是比较容易的，在用算盘的情况下，只要增加位数就可以。因为财务工作者在计算金钱时必须精确计算到最末一位，这就是为什么财务工作者多用算盘来计算的理由。

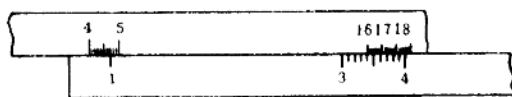


图 1.1

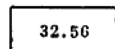
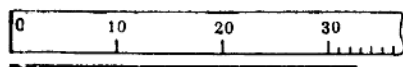
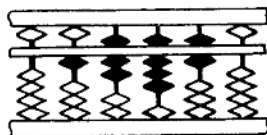


图 1.2

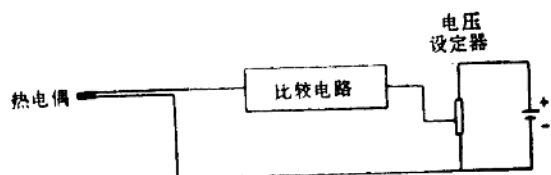
## 2. 记忆上的优点

在将某些信息记忆或记录时，当用模拟量记录时，可用一定比例尺的长度的线表示；当用数字量记录时，可在纸上写上数字，如：32.56；如图 1.2 所示。

由图 1.2 可以看出：数字记录的优点在于准确无误，不会因时间不同、读数的人不同而产生误差。相反地，模拟记录就没有此优点。

## 3. 判断上的优点

所谓判断就是断定两个信息谁大谁小、相等还是不相等。例如在图 1.3 中用热电偶测量温度，温度不同时热电偶产生电势不同，热电偶产生的电势与电压设定器给出的电压加到电压比较器上进行比较判断，这是一种模拟式的判断。因为电压比较器的比较能力是有限的，例如可达到  $0.1mV$ 。假如电压设定器的电压为  $5.32mV$ ，而热电偶的电压为  $5.36mV$ ，显然此时  $5.36mV$  大于  $5.32mV$ ，但是两个电压之差已经小于电压比较器的鉴别能力，所以有可能判断错误，即错误地认为  $5.32mV$  大于  $5.36mV$ 。



电话号码

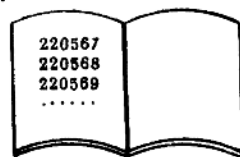
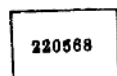


图 1.3

在数字判断的情况下，例如要从很多电话号码中查电话号码 220568，用图 1.3 所示的数字比较时，则这种判断是准确可靠的。

在上述三个方面：计算、记忆、判断，数字技术比模拟技术有明显的优越性。这三个方面也正是数字计算机的基本机能，所以数字计算机技术在国内外迅速地发展。

模拟数字转换技术是客观自然界的模拟量与数字技术中间不可缺少的连结部分。特别是当数字计算机用于自动控制系统中时，模拟数字转换是不可缺少的重要环节。

## § 1.2 模拟/数字转换在数字控制系统中的应用举例

模拟/数字转换技术已经在现代控制系统及信息处理系统中占有重要的地位。尤其



是在遥测遥控系统、数据自动处理系统、程序控制系统、数字控制系统、模拟数字混合计算机、数字仪表中，模拟/数字转换技术应用越来越多。

本节举例说明模拟/数字转换在数字控制系统中的应用。

图 1.4 是一个由雷达、数字计算机、导弹组成的控制系统。

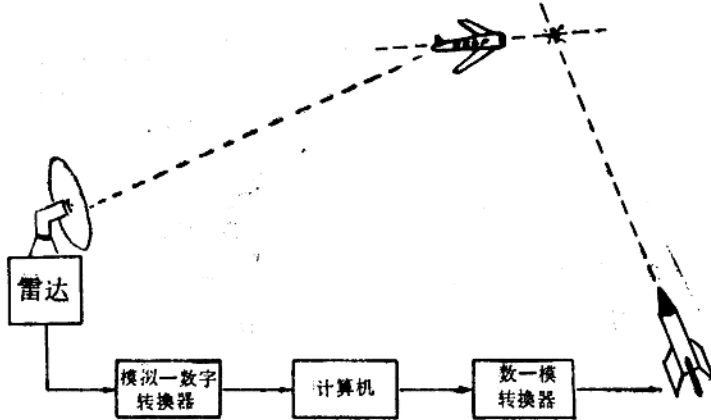


图 1.4

雷达测量敌机的方位角、高低角、距离，而后经过模拟/数字转换输入到数字计算机中，计算机计算出导弹发射时水平瞄准角及高低瞄准角，以便控制导弹的发射。

由图中可见：在此数字控制系统中模拟/数字转换是此系统必不可少的环节。

导弹射击敌机的准确度固然与雷达测量目标的准确性、与计算机计算的准确性有关，但是也与计算机两端的模拟/数字转换的精度有密切的关系。所以在讨论模拟数字转换器时应十分注意转换器的精度问题。

## § 1.3 转换过程的分析

### 一、模拟数字转换过程

模拟数字转换是将时间上连续变化的模拟量用时间上间断的量化了的数值表示。转换过程可以看作下述三个过程组成：

1. 采样：这一过程是把时间上连续变化的模拟量转换为时间上断续的模拟量。通常用等时间间隔采样。

2. 分层(量化)：这一过程是把时间上断续而数值上连续的模拟量（即采样值）以一定的准确度变为时间上断续的量化了的等效数字值来表示。这一过程相当于测量时舍入成整数的过程，量化电平的数目取决于转换系统的鉴别力。

3. 编码：这一过程是对已量化的数字进行编码，以一定形式的数码输出，通常用二进制数码及二—十进制数码。

上述三个过程可用图 1.5 表示，*a*) 表示被转换的连续模拟量，*b*) 表示采样周期为  $T$  的采样过程，*c*) 表示量化电平（即最小刻度）为  $q$  的量化过程，*d*) 表示以二进制编码所得的输出数码。

应该指出的是模拟数字转换的实质是把时间上连续变化的模拟量（图 1.5*a*）用等时

间间隔的数字 (图1.5d) 来表示。上述三个过程最重要的过程是量化过程。这三个过程对于具体的转换器有时分得并不那么明显；尤其是二、三过程是连在一起的，不易明显的区分。

## 二、数字模拟转换过程

数字模拟转换过程可分别下述两个过程：

1. 以一定的频率按等时间间隔将数码变为模拟量；
2. 将时间上间断的模拟量以一定的方式连成曲线。这一过程也就是平滑过程，因为在模拟数字转换器中，仅取采样点瞬间的模拟量变为数字，反转换时最多只能恢复采样点瞬间的模拟量，因此应以一定的方式把这些点连结起来。

上述两个过程中，最重要的过程是第一个过程，即将数码反转换为等效的拟模量。

## 三、采样理论

由于模拟数字转换过程中包含采样过程，因此我们要分析一下连续量经过采样后，它发生了什么变化。

采样过程利用信号的频率含量来说明最容易了解。当所有的信息包含在一定频带之内时，我们认为信号的信息是带宽受限的。

假如声频信号  $A\cos\omega_a t$  被另一个信号  $C\cos\omega_c t$  相乘，则产生双边带信号。

$$f(t) = (A\cos\omega_a t) \cdot (C\cos\omega_c t) = AC \cdot \cos\omega_a t \cdot \cos\omega_c t \quad (1-1)$$

利用三角关系式得：

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2} AC \cos(\omega_c - \omega_a)t + \frac{1}{2} AC \cos(\omega_c + \omega_a)t \\ &= \frac{1}{2} AC [\cos 2\pi(f_c - f_a)t + \cos 2\pi(f_c + f_a)t] \end{aligned} \quad (1-2)$$

$f(t)$  的频率图如图 1.6 虚线所示。图中声频信号  $A\cos 2\pi f_a t$  及载波信号  $C\cos 2\pi f_c t$  的频率用实线箭头表示，所产生的双边带信号用虚线箭头表示。图中假设  $A$  与  $C$  的幅度相等。

当信息不是含有单一频率，而是具有一个带宽时，即由某一带宽之内的诸单频信号之和组成时，可以用同样的方法，将频带受限的信号乘以一个单一频率  $f$ 。信号，产生高低边带信号，如图 1.7 a) 所示。

用数学方法和图解方法可以写出包括正负频率的频谱。负数频率的概念出现在福里哀分析中，即当级数写成下列指数形式时：

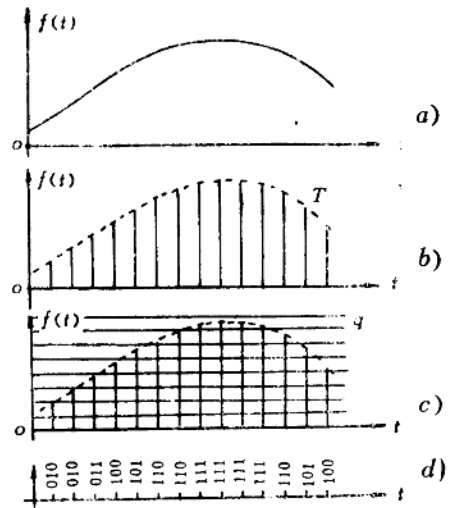


图 1.5

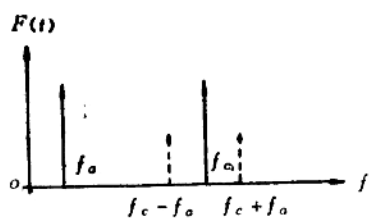


图 1.6

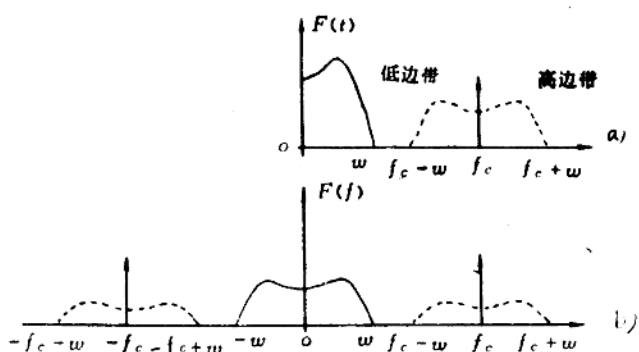


图 1.7

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{+\infty} C_n \cdot e^{jn\omega_0 t} \quad (1-3)$$

其中

$$C_n = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (1-4)$$

图 1.7b) 示出了将图 1.7a) 用正负频率表示的频谱图。注意到每一频率包括正频及负频，其大小为图 1.7a) 的一半。假如将图 1.7b) 的频谱的垂直轴折疊并且各频率成分相加，则得到图 1.7a) 所示的图形。

图 1.8 示出了一个采样器，它以周期为  $T$  的固定频率工作。采样器可以看作是一个开关，它只容许输入信号在采样周期  $T$  内的一个很短的时间  $\Delta t$  内通过，而在其他时间内禁止输入信号通过。在数学上，采样器使采样输入信号  $f(t)$  乘采样函数  $s(t)$ ，得到采样输出信号  $f^*(t)$ ，如图 1.8 所示，即有：

$$f^*(t) = f(t) \cdot s(t) \quad (1-5)$$

采样函数  $s(t)$  的频谱是用福里哀级数来计算的，其频率函数与脉冲宽度  $\Delta t$  及

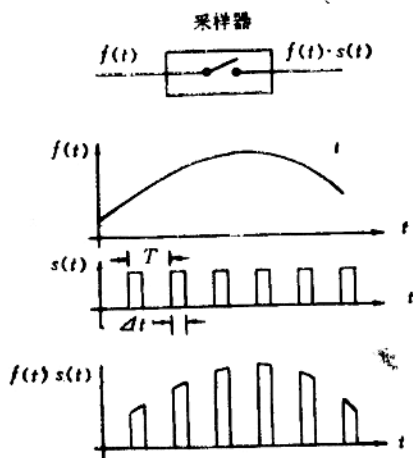


图 1.8

周期  $T$  有关。脉冲周期  $T$  相同 脉冲宽度  $\Delta t$  不同的频谱如图 1.9 所示。基频为

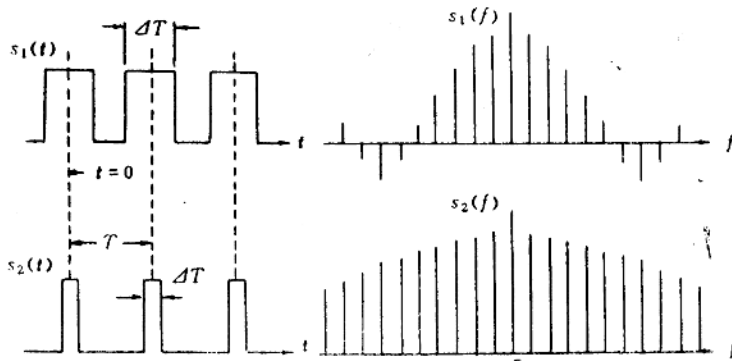


图 1.9

$f_1 = \frac{1}{T}$ , 频谱中的其他频率是基频的整数倍关系。这些频谱的包络为  $\frac{\sin x}{x}$  函数; 应注意到: 当脉冲变得越窄时, 频谱变得越宽。在极限时  $\Delta t \rightarrow 0$ , 频谱变为无限多的恒定幅度的频率分量。

现在我们来看一看信号  $f(t)$  经过采样后变为  $f^*(t)$  这一函数在频率域的情况。假设信号  $f(t)$  如图 1.10(a) 所示, 其频谱如图 1.10(b) 所示, 即为有限频谱。采样函数  $s(t)$  及其频谱如图 1.10(c) 及 (d) 所示。

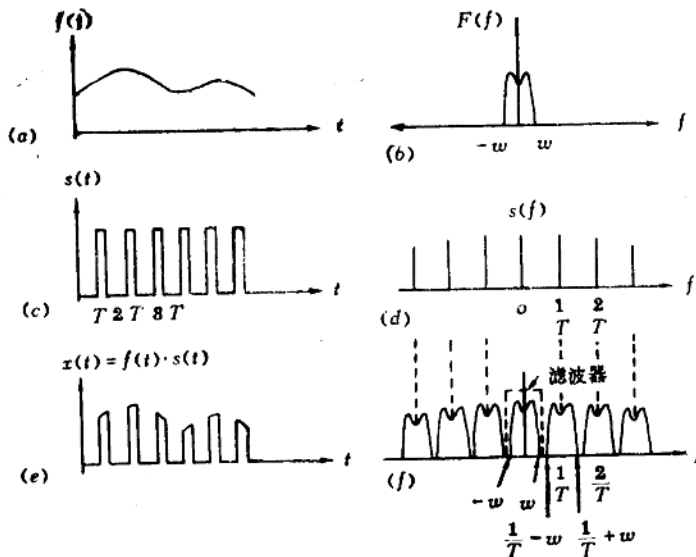


图 1.10

由上述讨论可知: 两个函数  $f(t)$  与  $s(t)$  相乘时, 在采样函数  $s(t)$  中的每个频率分量产生双边带, 所以经过采样后的信号  $x(t)$  及其频谱如图 1.10(e) 及 (f) 所示。

由图 1.10(f) 中可以看到: 为由经过采样后的信号  $f^*(t)$  恢复原始频谱 (或原始信

号), 则可以用一个理想的低通滤波器。图中用围绕着最低频谱的虚线表示。但是这里必须满足一个条件, 即采样频率  $f_s$  (即图中的  $\frac{1}{T}$ ) 必须大于或者等于二倍的信号带宽; 即应满足下式条件:

$$f_s = \frac{1}{T} \geq 2w \quad (1-6)$$

若相邻的边带重叠, 则无法通过滤波而恢复原始频谱。上述公式称为采样定理。实际上为使用更经济的滤波器, 采样频率多为  $2.5 \sim 3.5w$  的数值。

采样定理用数学语言来说就是: 频率受限的任何一个连续信号  $f(t)$ , 可以被经过时间间隔为  $T = \frac{1}{2f_0}$  的采样点瞬时值完全精确的确定, 其中  $f_0$  为连续信号频谱的上限。

采样定理告诉我们: 连续量和断续量在一般情况下有质的不同, 前者是由无限多个量构成的, 后者为有限个量。但是在一定条件下二者可以互相转换, 即由无限多个量构成的断续量在一定的条件下可以用有限个量构成的断续量完全精确地代替, 该条件就是连续信号频谱受限, 并且断续量的时间间隔 (采样周期)  $T \leq \frac{1}{2f_0}$ 。

#### 四、量级化理论

模拟数字转换, 含有采样、量化、编码三个过程。信号的采样前面已经讨论了, 下面讨论量化及由此产生的误差。

从分析误差角度出发, 量化有二种情况, 一种情况如图 1.11 a) 所示, 另一种情况如图 1.11 b) 所示。前者只舍不入, 故仅有正误差; 后者是有舍有入, 故有正负两种误差。

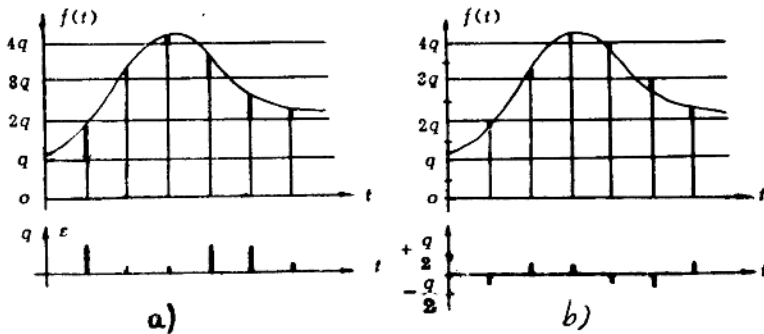


图 1.11

对应于两种不同的量化, 转换器的输入输出特性可分别如图 1.12 a)、b) 所示。

因为对于连续变化的输入信号, 只当其数值恰好等于量化电平时, 输出才是准确值, 而当输入信号为其他数值时, 输出都只是输入信号的近似值。因此从这个意义上说量化是一个非线性过程。这种由于量化而产生的误差称为量化误差或量化干扰。这种误差产生的原因是由于量化电平刻度的有限性。

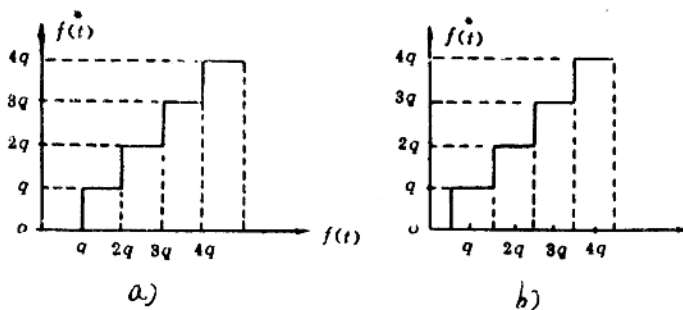


图 1.12

量化误差显然是量化刻度  $q$  及输入信号  $f(t)$  的函数, 即:

$$\varepsilon = \varepsilon[q; f(t)] = f(t) - f^*(t)$$

由于量化误差  $\varepsilon[q; f(t)]$  的解析式不易得到, 而且不便于实际使用, 因此为估计量化误差通常采用均方误差。

按仅有正误差量化的转换器, 可以认为量化误差  $\varepsilon$  在  $(0, q)$  范围内是以相等的概率分布的, 如图1.13所示。

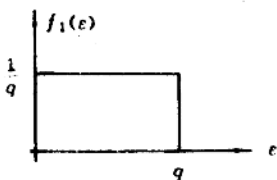


图 1.13

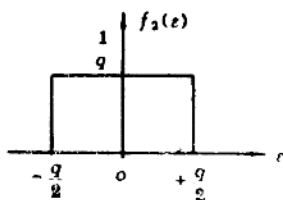


图 1.14

设均方误差为  $\sigma_1$ , 则由概率论的知识得:

$$\sigma_1^2 = \int_0^q f_1(\varepsilon) \left(\varepsilon - \frac{q}{2}\right)^2 d\varepsilon = \frac{q^2}{12} \quad (1-7)$$

故 
$$\sigma_1 = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad (1-8)$$

按有正负误差的转换器可以认为量化误差在  $\pm \frac{1}{2}q$  范围内是以相等概率分布的。

如图1.14所示。设此时的均方误差为  $\sigma_2$ , 则计算得:

$$\sigma_2^2 = \int_{-\frac{q}{2}}^{+\frac{q}{2}} f_2(\varepsilon) \cdot \varepsilon^2 d\varepsilon = \frac{q^2}{12} \quad (1-9)$$

故 
$$\sigma_2 = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad (1-10)$$

从公式(1-8)及(1-10)可以看出, 对于两种不同量化的转换器, 其均方误差是相同的。

但是不难看出: 在第一种情况下, 平均误差 (即概率论中的数学期望) 为  $\frac{q}{2}$ , 最大误差

为  $q$ ；第二种情况下，平均误差为 0，最大误差为  $\frac{q}{2}$ 。因此从量化误差来看，后一种量化更好些。

从上述分析中可以得出如下结论：量化误差是原理性的误差，它只能减小而无法消除，为降低转换器的量化误差应该取小的刻度单位。

为了描述量化产生的误差，有时也用到峰值瞬时功率信号干扰比及平均功率信号干扰比这些概念。

设转换器的二进制位数为  $n$ ，注意  $n$  不考虑符号位在内，则可以转换的信号最大值（峰值）为  $(2^n - 1)q$ 。

假设我们讨论量化误差为  $\pm \frac{q}{2}$  的情况，则峰值瞬时信号功率  $S_p$  为：

$$S_p = (2^n - 1)^2 \cdot q^2 \quad (1-11)$$

峰值干扰信号功率  $N_p$  为：

$$N_p = \frac{q^2}{4} \quad (1-12)$$

注意在上述二个公式中，在计算功率时通常使用的方法是将电压波形加到  $1\Omega$  的电阻上。

故峰值瞬时功率信号干扰比为：

$$\frac{S_p}{N_p} = (2^n - 1)^2 \cdot 4 \quad (1-13)$$

由上式可见：峰值瞬时功率信号干扰比随着转换器位数成指数的增加。

通常，峰值瞬时功率信号干扰比不同于平均功率信号干扰比，后者是我们主要关心的问题。

计算平均功率需要知道信号及量化干扰的波形或统计规律。

假如量化干扰在  $\pm \frac{q}{2}$  内具有等概率的分布，则量化干扰的平均功率即为：

$$N_0 = \int_{-\frac{q}{2}}^{+\frac{q}{2}} v_n^2 \cdot p(v_n) dv_n = \int_{-\frac{q}{2}}^{+\frac{q}{2}} v_n^2 \cdot \frac{1}{q} dv_n = \frac{q^2}{12} \quad (1-14)$$

此结果说明量化干扰为等概率分布时，则干扰的平均功率为量化刻度  $q$  的平方之十二分之一，转换器的单位刻度越小，则干扰的平均功率越小。

假如信号峰值幅度为  $(2^n - 1)q$  的正弦波，则信号的平均功率为：

$$S_s = \frac{[(2^n - 1)q]^2}{2} = \frac{(2^n - 1)^2 \cdot q^2}{2}$$

当  $n$  较大时：

$$S_s \doteq \frac{2^{2n} \cdot q^2}{2} \quad (1-15)$$

所以对于正弦波信号由于量化误差而产生的平均功率的信号干扰比为：

$$\frac{S_s}{N_0} = \frac{(2^n - 1)^2 q^2}{\frac{q^2}{12}} = (2^n - 1)^2 \cdot 6 \doteq 2^{2n} \cdot 6 \quad (1-16)$$

设量化电平的总数为  $m$ ，则因有

$$m = (2^n - 1) \quad (1-17)$$

所以有：

$$\frac{S_s}{N_0} = 6 \cdot m^2 \quad (1-18)$$

上面是假设信号为正弦波的情况下，求出了平均功率的信号干扰比。如果信号为某一函数  $f(t)$  的一般情况下，则信号的平均功率为：

$$S_s = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt \quad (1-19)$$

描述量化误差的另一个概念为谐波失真  $D_h$ 。

谐波失真  $D_h$  可表示为量化干扰信号的均方根与基波信号的均方根之比。

由(1-7)、(1-9)及(1-14)可知量化干扰信号的均方根为  $\sigma$ ：

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sqrt{\frac{q^2}{12}} = \sqrt{N_0} \quad (1-20)$$

由(1-15)可知基波信号的均方根为  $\sqrt{S_s}$ ：

$$S_s = \frac{(2^n - 1)^2}{2} q^2 = \frac{m^2}{2} q^2 \quad (1-21)$$

所以：

$$D_h = \frac{\sqrt{N_0}}{\sqrt{S_s}} = \frac{1}{m\sqrt{6}} \quad (1-22)$$

表 1.1 给出了对于不同  $m$  值时的谐波失真  $D_h$  之值。

表 1.1

| 转换器的位数<br>$n$ | 量化电平数<br>$m$ | 谐波失真<br>$D_h$ (%) |
|---------------|--------------|-------------------|
| 8             | 255          | 0.16              |
| 9             | 511          | 0.09              |
| 10            | 1023         | 0.05              |
| 11            | 2047         | 0.03              |
| 12            | 4095         | 0.02              |

综上所述，量化误差是转换器原理性误差，这是因为量化过程就是舍入成整数的过程。转换器的另一种误差是因转换器本身电路、设备等误差而产生的误差，这种误差可称为转换器设备误差，在设计时应使转换器设备误差保持在低于一个量化电平的程度上。

## § 1.4 转换器的分类

模拟数字转换器正确分类的意义在于：有利于统一术语；根据分类的基本特征便可以了解各类转换器的主要特征。利于掌握建立转换器的一般规律；促进科研的发展。

模拟数字转换器分类的方法很多；我们这里是以基本工作原理来分类，即按量化的基本方法分类。这样形式上千变万化的各类转换器均可归属于某一大类中。

表 1.2 给出了模拟数字转换器的三大类。

表 1.2

|           |   |
|-----------|---|
| 模拟——数字转换器 | $\left\{ \begin{array}{l} \text{计数式} \\ \text{比较式} \\ \text{直读式} \end{array} \right.$ |
|           |   |
|           |   |



表 1.3 给出了电压——数字转换器较详细的分类。

表 1.3

|               |     |    |             |
|---------------|-----|----|-------------|
| 电压——数字<br>转换器 | 计数式 | 调宽 | 单积分         |
|               |     |    | 双积分         |
|               |     |    | 四次积分        |
|               | 比较式 | 调频 | 一般式         |
|               |     |    | 二次采样积分      |
|               | 比较式 |    | 正向计数器型      |
|               |     |    | 可逆计数器型(随动型) |
|               |     |    | 置“1”置“0”型   |
|               |     |    | 逐位比较型       |

表 1.4 给出了转角——数字转换器较详细的分类。

表 1.4

|               |                   |                   |        |  |  |
|---------------|-------------------|-------------------|--------|--|--|
| 转角——数字<br>转换器 | 计数式：同步机、旋转变压器相位转换 | 比较式：同步机、旋转变压器幅值转换 | 直读式：码盘 |  |  |
|               |                   |                   |        |  |  |
|               |                   |                   |        |  |  |

## § 1.5 转换器的基本参数

设计与选择某种类型的转换器，对各种转换器性能进行比较，都是由转换器的基本参数确定的。

转换器的基本参数有：模拟量的类别及其变化范围；转换精度；转换速度；下面分别讨论之。

### 一、模拟量的类别及其变化范围

最常见的模拟量是电压及转角；此外较常见的还有电流、相位（时间间隔）等。

由于自然界中物理量的种类是极多的，如温度、速度、压力等等，因此当模拟量若不为上述常见的形式时，一般是先经过模拟——模拟变换器将模拟量变为上述常见的形式，而后进行模拟数字的转换。

本书主要讨论模拟量电压及转角同数字量之间的转换技术。

在设计或选用转换器时，应该考虑到模拟量的变化范围，通常模拟量的变化范围是指最大值与最小值之差，即：

$$f(t)_m = f(t)_{\max} - f(t)_{\min} \quad (1-23)$$

在某些情况下设计与选用转换器时不仅要考虑到模拟量变化范围，而且要注意到模拟量的最大值  $f(t)_{\max}$ 。

### 二、转换精度

转换精度具有通常测量某一个量时的准确度的意义，但表示的方法有所不同。一般