



高等学校教材  
专科适用

# 数字通信原理

北京电力高等专科学校 蔡国齐  
王根英 合编  
沈阳电力高等专科学校 周德仁



## 前 言

本书是大专院校电信类的专业基础课教材，主要内容有数字通信概述、脉冲编码调制(PCM)原理、定时与同步、PCM 信令系统、数字信号的基带传输与中继方式、差错控制、数字复接(PDH 和 SDH)与数字通信网、数字调制原理及 PCM 系统测试。

本书侧重于系统概念及物理概念的阐述，在理论分析够用的原则下，着重突出了实用性，通过对大量实用电路及其工作波形图的分析，使读者更形象地理解数字通信中各环节的基本原理。全书内容由浅入深，举例形象，图文并茂。所引用的电路实例，主要从我国电力系统和邮电系统应用较广泛、技术较先进的几种型号的 PCM 通信设备电路中选取，并侧重于说明中、大规模集成电路和数字通信专用集成电路的应用。此外，在技术上尽量注重于近年来国内外数字通信的最新技术，如 SDH、数字交叉连接、ATM 等内容的介绍。

本书的第一、二、三、五章，第七章第七节和第八章第六、七节由蔡国齐同志编写；第四、六、九章由王根英同志编写；第七、八、十章由周德仁同志编写。全书由蔡国齐同志统稿。

本书由华北电力大学王彦俊教授担任主审，对本书内容提出了许多宝贵意见，为提高本书的质量付出了巨大的努力，在此表示衷心地感谢。

限于编者水平，书中不足之处，欢迎读者批评指正。

编 者

1997.9

# 目 录

## 前 言

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 第一章 数字通信概述 .....                                                                                                                | 1  |
| 第一节 数字通信的基本概念 .....                                                                                                             | 1  |
| 一、数字信号和模拟信号 二、数字通信系统 三、数字通信的主要优缺点 四、数字通信的发展                                                                                     |    |
| 第二节 时分多路复用原理 .....                                                                                                              | 11 |
| 一、时分多路复用的基本概念 二、模拟信号的时分多路复用——PAM 多路通信 三、PCM 时分多路复用原理 四、PCM30/32 路基群信号帧结构 五、PCM30/32 路基群设备框图                                     |    |
| 练习题 .....                                                                                                                       | 21 |
| 第二章 话音信号数字化的基本原理 .....                                                                                                          | 22 |
| 第一节 话音信号的主要特性 .....                                                                                                             | 22 |
| 一、话音信号的幅度概率密度 二、话音信号的功率密度谱 三、话音信号的动态范围 四、衡量话音信号传输质量的直观指标                                                                        |    |
| 第二节 抽样与保持 .....                                                                                                                 | 23 |
| 一、抽样定理 二、实际抽样与抽样保持 三、带通信号的抽样 四、抽样（或分路）开关                                                                                        |    |
| 第三节 PCM 量化理论及编码 .....                                                                                                           | 36 |
| 一、均匀量化 二、非均匀量化 三、A 律压扩特性 四、 $\mu$ 律压扩特性 五、数字压缩—A 律 13 折线近似压缩特性 六、A 律 ( $A=87.6$ ) 13 折线近似量化信噪比 七、A 律 ( $A=87.6$ ) 13 折线量化及编解码方法 |    |
| 练习题 .....                                                                                                                       | 51 |
| 第三章 编解码器 .....                                                                                                                  | 53 |
| 第一节 PCM 群路编码器 .....                                                                                                             | 53 |
| 一、逐次反馈比较型线性编码器 二、A 律 13 折线逐次反馈比较型非线性编码器                                                                                         |    |
| 第二节 PCM 群路解码器 .....                                                                                                             | 60 |
| 一、A 律 13 折线非线性解码器 二、A 律 13 折线非线性解码网络集成电路 三、A 律 13 折线非线性群路解码器电路实例                                                                |    |
| 第三节 单路编解码器 .....                                                                                                                | 63 |
| 一、常用单路编解码器的型号及功能 二、单路编解码器中的解码网络 三、常用单路编解码器介绍                                                                                    |    |
| 第四节 自适应差分脉码调制原理及编解码器 .....                                                                                                      | 74 |
| 一、ADPCM 原理 二、ADPCM 编解码器                                                                                                         |    |
| 练习题 .....                                                                                                                       | 78 |
| 第四章 定时与同步 .....                                                                                                                 | 79 |
| 第一节 定时系统 .....                                                                                                                  | 79 |
| 一、发送定时及其时序关系 二、发送定时系统电路的组成 三、帧定位字和帧对告字产生电路 四、接收定时系统电路的组成                                                                        |    |
| 第二节 帧同步系统 .....                                                                                                                 | 87 |
| 一、帧同步的一般原理 二、帧同步码的检出 三、PCM30/32 路系统帧同步原理 四、帧同步的计算 五、复帧同步                                                                        |    |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第三节 帧同步系统的差错控制 .....                                                                 | 99  |
| 一、循环冗余校验 (CRC) 基本原理 二、循环冗余校验 (CRC) 的运算 三、循环冗余校验 (CRC) 编解码电路 四、PCM30/32 路基群设备的 CRC 校验 |     |
| 练习题 .....                                                                            | 102 |
| 第五章 PCM 信令系统 .....                                                                   | 104 |
| 第一节 信令方式 .....                                                                       | 104 |
| 一、用户线信令 二、局间信令                                                                       |     |
| 第二节 PCM 数字型线路信令 .....                                                                | 107 |
| 一、数字型线路信令编码方式 二、局间中继接口配合方式                                                           |     |
| 第三节 PCM 信令转换设备 .....                                                                 | 110 |
| 一、PCM 信令转换设备构成原理 二、信令出入中继器组成原理 三、信令发送电路 四、信令接收电路                                     |     |
| 练习题 .....                                                                            | 121 |
| 第六章 数字信号的基带传输 .....                                                                  | 122 |
| 第一节 数字信号及其频谱 .....                                                                   | 122 |
| 一、数字信号波形及频谱 二、常见的码型及其特性 三、数字信号传输的基本原则                                                |     |
| 第二节 HDB3 编码和解码原理 .....                                                               | 124 |
| 一、线路传输码型 二、HDB3 编码原理 三、HDB3 编码电路原理 四、HDB3 解码电路原理                                     |     |
| 第三节 信道传输对信号波形的影响 .....                                                               | 127 |
| 一、无码间干扰传输 二、有码间干扰的传输                                                                 |     |
| 第四节 再生中继传输系统 .....                                                                   | 129 |
| 一、再生中继系统构成 二、信号波形的均衡 三、眼图 四、定时提取与判决再生                                                |     |
| 第五节 中继传输系统的性能分析 .....                                                                | 138 |
| 一、信道噪声及干扰 二、误码率及误码率的累积                                                               |     |
| 练习题 .....                                                                            | 144 |
| 第七章 数字复接 .....                                                                       | 145 |
| 第一节 数字信号复接概述 .....                                                                   | 145 |
| 一、数字复接设备的构成 二、复接方式 三、复接类型 四、复接等级 五、码速调整方式                                            |     |
| 第二节 准同步复接二次群设备 .....                                                                 | 149 |
| 一、二次群准同步复接帧结构 二、二次群复接设备的组成及各部分作用 三、发定时电路 四、码速调整电路 五、复接电路                             |     |
| 第三节 分接电路 .....                                                                       | 162 |
| 一、分接电路组成及各部分的作用 二、码速恢复电路 三、锁相电路                                                      |     |
| 第四节 PCM 高次群的复接 .....                                                                 | 166 |
| 第五节 复接抖动 .....                                                                       | 166 |
| 一、产生复接抖动的原因 二、抑制复接抖动的方法                                                              |     |
| 第六节 同步数字复接 (SDH) 技术 .....                                                            | 167 |
| 一、同步数字复接体系概述 二、SDH 的帧结构 三、SDH 的复用原理                                                  |     |
| 第七节 数字交叉连接 (DXC) .....                                                               | 174 |
| 一、数字交叉连接 (DXC) 概述 二、DXC 的配置类型和用途 三、DXC 与数字交换机的区别 四、DXC 的应用                           |     |
| 练习题 .....                                                                            | 177 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 第八章 数字信号的频带传输 .....                                    | 178 |
| 第一节 数字信号的调幅 (ASK) .....                                | 178 |
| 一、双边带调制 二、单边带调制 三、残留边带调制 四、振幅调制信号的解调                   |     |
| 第二节 数字信号的调频 .....                                      | 180 |
| 一、数字调频信号的产生 二、数字调频信号的解调                                |     |
| 第三节 数字信号调相的概述 .....                                    | 182 |
| 一、关于调相的一般原理 二、绝对调相的概念 三、相对调相 四、调相信号的相量表示法              |     |
| 第四节 数字信号的二相调相电路 .....                                  | 184 |
| 一、二相绝对调相的产生 二、二相绝对调相的解调 三、二相相对调相信号的产生 四、二相相对调相信号的解调    |     |
| 第五节 数字信号的四相调相电路 .....                                  | 191 |
| 一、四相调相的相位逻辑 二、四相绝对调相 三、四相相对调相                          |     |
| 第六节 八相调相电路 .....                                       | 199 |
| 一、八相相对编码电路 二、八相反射型微波调相器                                |     |
| 第七节 正交调幅 (QAM) .....                                   | 202 |
| 一、四进制正交调幅调制 二、四进制正交调幅的解调 三、十六进制正交调幅调制 四、十六进制正交调幅的解调    |     |
| 第八节 数字调制系统性能比较 .....                                   | 206 |
| 一、抗噪声性能比较 二、传输效率比较                                     |     |
| 练习题 .....                                              | 207 |
| 第九章 数字通信网 .....                                        | 209 |
| 第一节 电路交换数据网 .....                                      | 209 |
| 一、电路交换的工作过程 二、电路交换网的构成 三、传输与中继                         |     |
| 第二节 分组交换数据网 .....                                      | 211 |
| 一、分组交换基本原理 二、分组交换网的构成 三、终端接口规程                         |     |
| 第三节 综合业务数字网 (ISDN) .....                               | 214 |
| 一、ISDN 与数字通信网的连接 二、ISDN 的基本功能 三、ISDN 通路种类及接口构成         |     |
| 第四节 数字通信网的同步技术 .....                                   | 216 |
| 一、网同步的实现方法 二、准同步方式 三、主从同步方式 四、互同步方式 五、时间基准分配同步方式       |     |
| 第五节 异步转移模式 .....                                       | 220 |
| 一、ATM 的信元结构 二、信头                                       |     |
| 练习题 .....                                              | 222 |
| 第十章 中继传输系统的测试 .....                                    | 223 |
| 第一节 PCM 通信系统测试的有关知识 .....                              | 223 |
| 一、关于电平的基本概念 二、PCM 通信系统常用的测试仪器介绍 三、电信网测试概况 四、测试的含义和测试误差 |     |
| 第二节 PCM 基群复用设备话路传输特性测试 .....                           | 231 |
| 一、传输电平 二、电平特性 三、增益随频率变化 四、空闲话路噪声 五、总失真 六、路际串音 七、互调     |     |
| 第三节 数字复接设备的指标测试 .....                                  | 238 |
| 一、误码测试 二、支路输入允许的最大频偏测试 三、支路输入允许衰耗测试 四、支路输入             |     |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 反射衰减测试 五、支路输入抖动容限测试 六、支路输出抖动测试 七、抖动传递特性测试 八、输出接口脉冲波形测试 |     |
| 第四节 中继传输系统的测试原理 .....                                  | 243 |
| 一、极性误差测试仪误码测试原理 二、误码测试仪工作原理                            |     |
| 练习题 .....                                              | 247 |

# 第一章 数字通信概述

将承载信号的媒体,如话音、图像……等的原始信号转变成数字信号后,再传输的通信方式称为数字通信。目前,在通信领域内数字通信是最先进的通信制式,由于其涉及的理论与技术均有较高的难度,故先在本章对数字通信的基本概念、时分多路复用(TDM)原理作一简要介绍,以利于后续章节对数字通信的主要环节及基本原理进行深入的分析。

## 第一节 数字通信的基本概念

### 一、数字信号和模拟信号

任何电信号既可在时域上用幅度和时间两个物理量来描述,也可从频域上用其频域特征表示。为简化分析,下面仅从时域特性来说明数字信号与模拟信号的定义,以及它们之间的主要区别。

#### 1. 模拟信号

一般来说,模拟信号是把非电物理量经传感器(如话筒)变换为以电压或电流表示的电信号。例如话音、图像是非电量,经送话器、摄像机可转换为电压或电流的模拟电信号,其特点是幅度的取值在时间上连续并且大小随非电物理量的特征——声音强度、图像亮度成比例地连续变化,其波形如图 1-1-1 (a) 所示。

如果对模拟信号以相同的时间间隔  $T_s$  抽取样值,如图 1-1-1 (b) 所示,尽管抽样后的

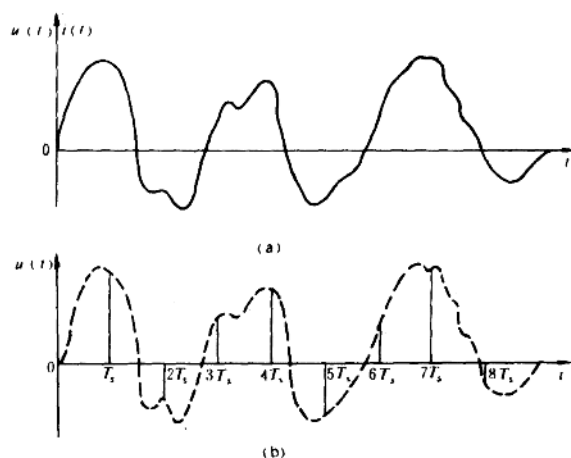


图 1-1-1 模拟信号和 PAM 信号

(a) 模拟信号; (b) PAM 信号

样值信号在时间上已经离散,但其幅度的取值仍可包含无限个的数值,并与原模拟信号一一对应,一般称这种抽样后的信号为脉冲幅度调制(PAM)信号。因它的幅度取值不是离散的,仍有无限个量,所以它仍是模拟信号。

模拟信号可直接在信道中传输,如原来的市内电话;也可经调制后再传输,如电力载波、电视、广播等。因为这两种传输方式中的媒体原始信号为模拟信号,所以称为模拟通信。

## 2. 数字信号

电报信号是通信领域内最早的数字信号。由电传打字机产生的电报信号,如图 1-1-2 所示,为脉冲电流序列。由图可见,该脉冲电流序列在时间上是离散的,且幅值变化也不连续,仅有 A、0 两个值(A 值表示传号,0 值表示空号),具有此种特征的电信号称为数字信号。

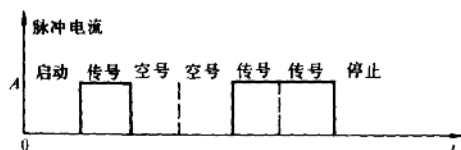


图 1-1-2 电报信号

一般情况下,通常是用 0 或 1 两种二进制符号来表示数字信号,并称为二进制数字信号。此外,还有四进制、八进制……等多进制数字信号。图 1-1-3 为某一个四进制信号的波形图,它由四个离散的幅值 0、1、2、3 表示其幅度的变化。显然,多进制信号也是数字信号。

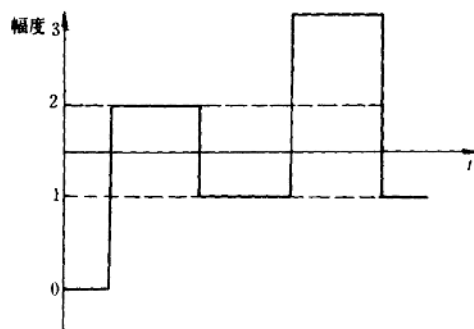


图 1-1-3 四进制信号波形图

若用数字信号来表示原始非电量的物理特征,还需将二进制的各码元(符号)组合为代码,或称为码字或码组。例如电传电报信号,就是采用五位二进制码元的一定组合关系来表示一个英文字母或汉语字母的。又如莫尔斯电报中的汉语“要”字的二进制数字信号的码字为 0110, 0000, 0000, 1000(十进制为 6008),对方接收到该码字后,还需按代码的编码规则解码,译成“要”字。用二进制信号表示话音信号幅度的变化,也需

采用不同的码字,下文将详细说明。

总之,数字信号和模拟信号的主要区别在于携带信息的参量是否离散,而不在于时间的离散与否。模拟信号的电幅度是随非电量的特征连续变化的,所以其携带的信息就直接含于其连续幅度值中;而数字信号的幅值是离散的,它不能表示原始信号的信息,只有通过编码,用一定的二进制码字,才能表示媒体的信息。

## 二、数字通信系统

按业务的种类来分,目前数字通信主要有数字电话通信和数据通信两大类。数字电话是人与人之间的话音通信,因它能既简单又快捷地传输与交换信息,所以是数字通信的主要通信方式。而数据通信是指电报、电传真、计算机、工业过程自动化控制和遥测数据……等数据业务间的通信,近年来发展也十分迅速。数据通信中的媒体(信源)的原始信号就

是数字信号。

而在数字电话通信中，媒体的原始信号不同于数据通信，仍是模拟信号（图像信号与之相同），所以，话音、图像要实现数字通信就必须把模拟信号转换为数字信号。例如电话机送话器只能将话音转换为模拟信号，若要在两个电话机间实现数字通信，就必须把送话器送出的模拟信号转换为数字信号，这一转换过程称为模/数（A/D）变换。在接收端，需经相反的数/模（D/A）变换，把接收到的数字信号转换为模拟信号后，并经一定的处理（恢复或重建），才能被受话器所接受。所以说，将模拟信号转换为数字信号的过程，实质上是 A/D 和 D/A 的变换过程。

将模拟信号转换为数字信号的方式很多，大致可分类为：波形编码和参量编码两种。波形编码有脉冲编码调制（PCM），差分脉冲编码调制（DPCM），增量调制（ $\Delta M$ ），连续可变斜率增量调制（CVSD），自适应差分脉码调制（ADPCM）……等。参量编码是根据人的发音模型的有关参量来编码的。我们已知声音有清音和浊音之分，发浊音时，浊音有振动的基本频率（称为基音），而清音无基音，类似于白噪声，具有平坦的频谱。清音和浊音在发声时都通过人的声管（包括喉管、口腔、齿、唇等器官），由于声管形成的变化，由气流冲击而形成不同的声音。因此只要在讲话的同时，能够判定区分出清音、浊音，将浊音周期和声管的参数分析出来，就可把这些参数变换为数字信号。参量编码主要采用线性预测编码（LPC），规则脉冲激励长时限预测（RPE-LTP），码本激励线性预测（CELP）和矢量与激励的 LPC（VSELP）编码。参量编码所产生的数字信号的速率较低，但音质尚佳，主要应用于频道十分拥塞的数字移动通信系统中。而本书是以 PCM 数字电话通信为主要内容，对参数编码不再介绍，仅在表 1-1-1 中列出主要话音编码方案的特性，以供参考。

表 1-1-1 主要的话音编码方案特性

| 编码名称              | 速率 (kbit/s) | 时延 (ms) | 主观评分 (MOS) | 备 注      |
|-------------------|-------------|---------|------------|----------|
| PCM               | 64          |         | 4.30       |          |
| ADPCM             | 32          |         | 4.10       |          |
| $\Delta M$ , CVSD | 32          |         | 3.80       |          |
| $\Delta M$ , CVSD | 16          |         | 3.00       |          |
| SBC-ADPCM         | 16          | 7       | 2.92       | 子带-ADPCM |
| RPE-LTP           | 13          | 30      | 3.54       |          |
| CELP              | 8           | 35      | 3.70       |          |
| CELP              | 4.8         | 35      | 3.00       |          |

1. PCM 通信系统

图 1-1-4 是基本的 PCM 通信系统方框图。除信源外，由三个部分组成，即发信端的模/数（A/D）变换、信道传输部分的再生中继和受信端的数/模（D/A）变换。

（1）模/数变换（A/D）。包括抽样与保持、量化和编码等话音信号的主要数字化过程。现对各部分的功能简述如下。

1）抽样与保持。将幅值随时间变化较快的话音信号数字化，首先要经过抽样保持，使其幅值在时间上离散，形成具有一定宽度的一系列样值信号后，才有可能对其量化与编码。

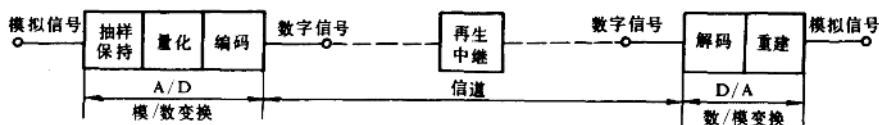


图 1-1-4 PCM 通信系统框图

可以用图 1-1-5 (a) 来形象地比喻抽样过程。用一块开有一细窄长缝隙的硬纸板敷在时间连续的话音信号  $f(t)$  上, 若细缝对准原点  $t=0$  处, 即能看到样值  $f(0)$ , 细缝对准  $t=t_0$  处, 则又能看到样值  $f(t_0)$ 。如果从左向右, 按相同时间间隔  $T$ , 移动硬纸板, 就可得到一个样值信号序列  $f_s(t)$ , 如图 1-1-5 (b) 所示。实际的抽样过程如图 1-1-5 (c) 所示, 先将话音信号  $f(t)$  送入抽样门, 当抽样门被周期为  $T_s$  的抽样脉冲序列  $s(t)$  控制其通、断时, 即可输出  $f(t)$  的样值信号序列  $f_s(t)$ 。这里, 抽样门可以看作是一个脉冲幅度调制器,  $s(t)$  为调制信号。显然, 抽样门的输出就是脉冲幅度调制 (PAM) 序列信号 [即  $f_s(t)$ ]。关于保持原理, 将在后文分析。

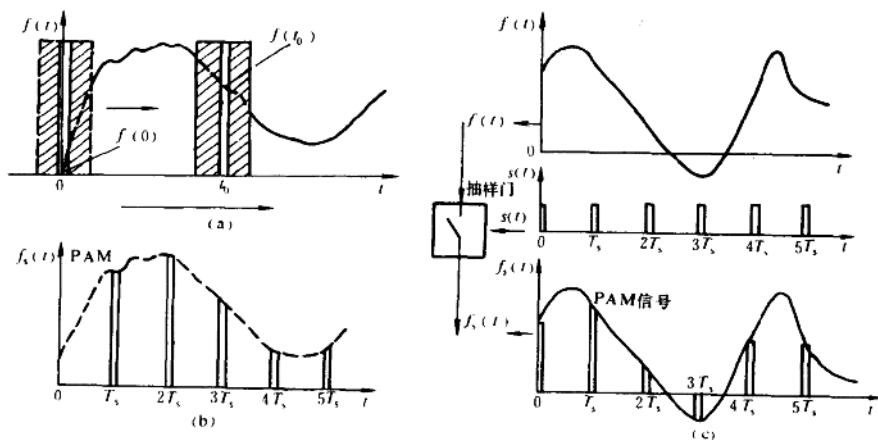


图 1-1-5 模拟信号抽样过程及方法

(a) 抽样过程; (b) 抽样信号序列; (c) 抽样方法

2) 量化。日常生活中有许多量化的例子, 例如用尺量布, 用秤称物等。总之, 用有限刻度的量具去度量某一具有无限多个数值的物理量时, 就存在量化; 同样, 用有限数量的二进制比特 (码元) 数组合的代码来替代幅度连续的 PAM 信号, 也要经过量化处理。这里的量化是指将 PAM 信号幅度变化的最大电平范围分成若干小的间隔, 每一个小间隔称为量化间隔或区间, 划分量化间隔的电平称为分层电平。当某一样值信号幅度落入某一个量化间隔内时, 就用该间隔内的中间值来近似表示, 中间值电平称为量化电平。

图 1-1-6 所示为某一样值信号  $f_s(t)$  的量化过程。  $f_s(t)$  的最大幅度电平为  $\pm U$ , 在  $-U \sim +U$  范围内均匀地分为 8 个等份, 即每一等份为一个量化间隔, 用  $\Delta$  表示。各量化间

隔相对应的分层电平为  $0\Delta, \pm 1\Delta, \pm 2\Delta, \pm 3\Delta$  和  $\pm 4\Delta$ ; 量化电平分别为  $\pm 0.5\Delta, \pm 1.5\Delta, \pm 2.5\Delta$  和  $\pm 3.5\Delta$ 。若量化级数用  $N$  表示, 则  $N=8$ 。 $f_s(t)$  经量化后, 其幅值被离散为  $0.5\Delta, 1.5\Delta, 2.5\Delta, 3.5\Delta, -3.5\Delta, -2.5\Delta, -1.5\Delta$  和  $-0.5\Delta$  等有限个量化电平值, 在图 1-1-6 中用虚线表示。

由于采用了近似的方法对  $f_s(t)$  进行量化, 显然要引起量化误差  $e$ , 并可用下式表示

$$\text{量化误差 } e = |\text{样值信号幅值} - \text{量化电平值}|$$

因样值信号为时间函数, 故量化误差也随时间变化, 见图 1-1-6 (b), 但其最大幅度  $e_{\max}$  不超过半个量化间隔, 即

$$e_{\max} \leq \Delta/2$$

量化误差的实质是在样值信号上叠加了一个额外的噪声, 所以又称为量化噪声。它是数字电话通信所固有的噪声。显然, 只有增加量化级数即减小量化间隔  $\Delta$ , 才能减小量化噪声。

3) 编码。用一定位数的二进制码元组合成不同的码字来表示样值信号的方法称为编码。编码所需的二进制码元数 (比特数) 与量化级数  $N$  有关。若码元数用  $n$  表示, 则

$$N = 2^n$$

通常, 样值信号的正负极性用二进制码元的最高有效位即极性码表示。一般用 1 表示正极性, 0 表示负极性。余下的码元用于表示样值信号幅度的绝对值, 并称为幅度码。图 1-1-6 所示的  $f_s(t)$  的各种例值, 经编码后的二进制码字如图 1-1-7 所示。

上述量化过程, 其量化间隔是均匀的, 故称为均匀量化。

为便于对编码过程有一较形象地描述, 用图 1-1-8 所示天平称物的过程来比喻之。设编码位数  $n=3$  (不包括极性码), 对应于 3 位码的权值, 砝码重量应分别为  $4g, 2g, 1g$ 。该天平所能称物的重量应在  $0 \sim 7g$  之间。其编码规则与每次所加砝码的顺序有关。显然应先加最重的  $4g$  砝码, 然后判决被测物体是重于抑或轻于  $4g$  砝码重量。若物重大于砝码重, 则记为 1, 而且下次操作时应加大  $2g$  砝码; 若物重小于砝码重, 则记为 0, 而且下次应取下  $4g$  砝码而换上  $2g$  砝码。依此规则和顺序, 就可测出物体重量并得出与之对应的一组二进制码字。例如某物重  $4.8g$ , 第一次加  $4g$  砝码, 物重  $>$  砝码重量, 记为 1, 并保留  $4g$  砝码再加上  $2g$  砝码。第二次物重  $<$  砝码重量  $= 4g + 2g$ , 记为 0, 并取下  $2g$  砝码换上  $1g$  砝码。第三次物重仍小于砝码重量  $= 4g + 1g$ , 再记为 0。三次称重结果所记二进制码字为 100, 这就

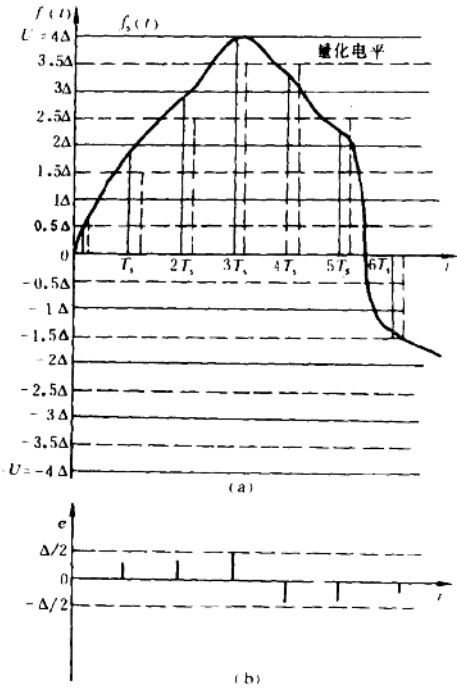


图 1-1-6 量化过程与量化误差  
(a) 量化过程; (b) 量化误差

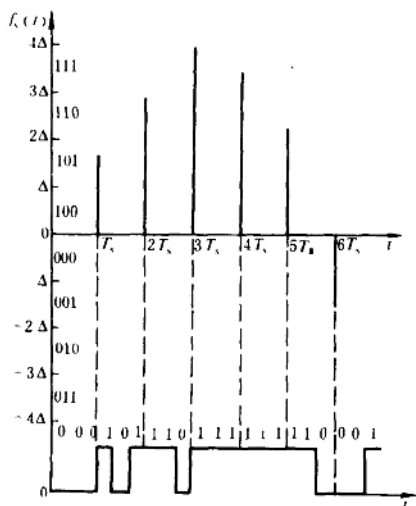


图 1-1-7 编码示意图

程称为信道编码。图 1-1-9 (b) 所示的双极性归零信号 (简记为 RZ 码) 为码型变换的方案之一例。

双极性 RZ 码在信道传输过程中也会因为信道的衰减和干扰, 在到达接收端后, 产生如图 1-1-9 (c) 所示的波形畸变, 而且随着传输距离的增加, 这种畸变越严重。因此在信道中, 必须相距一定的距离设置再生中继器, 借助其判决再生功能将畸变后的信号恢复为无畸变的数字信号。再生判决原理是: 再生中继器首先从接收信号  $u_r$  中提取定时时钟作为判决脉冲, 其波形见图 1-1-9 (d), 以确定何时判决 (即选定最佳判决时刻)。在某一判决时刻, 如果  $u_r$  的幅值大于正判决电平  $+u_g$  并小于负判决电平  $-u_g$  时, 则恢复为 1 码; 反之, 当  $u_g > u_r > -u_g$  时, 则恢复为 0 码, 恢复后的信号波形见图 1-1-9 (e), 显然它已完全去除了信道衰减和干扰

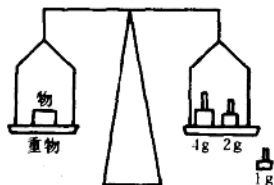


图 1-1-8 天平秤称物

是重量为 4.8g 物体的二进制码字。与砝码重量相对应的电平值  $4\Delta$ ,  $2\Delta$ ,  $1\Delta$ , 又称为权值电平 (即分层电平)。由于权值是离散的, 所以在每次记二进制数 (即编码) 时, 已经进行了量化。由此可知量化和编码是同时进行的。为便于分析量化引起的噪声, 故在叙述上将量化与编码分开。

对于话音样值信号的量化编码原理与天平称物类似, 将在后文再详细分析。但需指出, 实际的话音编码, 采用  $n=8$ , 共有  $2^8=256$  个量化级, 并采用非均匀量化。

(2) 再生中继。在图 1-1-4 中的 A/D 变换后的二进制数字信号的波形如图 1-1-9 (a) 所示, 它是一种单极性不归零码 (简记为 NRZ 码)。第六章将分析它不适于在信道中传输, 所以还应对其进行码型变换, 这一过程

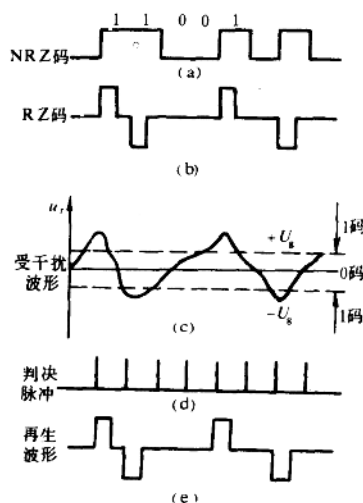


图 1-1-9 再生判决过程

(a) NRZ 码; (b) RZ 码; (c) 再生判决; (d) 判决脉冲; (e) 再生波形

引起的畸变。数字通信正是因为有判决再生这一特点，大大地提高了系统的抗干扰性，大幅度地增加了长途电信的传输距离。

(3) 解码和重建。如图 1-1-10 所示，要把接收的 PCM 数字信号还原为时间和幅度上均连续的原模拟信号，还需经解码和重建过程。解码的功能是把图 1-1-10(a) 所示的数字信号还原为模拟的 PAM 信号。但 PAM 信号幅度的取值在时间上是离散的，其波形为一系列不等幅的脉冲序列。如果将它直接施加于受话器上，只能发出不可懂的一连串喀喀的噪声，因此应将其重建为时间上连续的原模拟信号。由图 1-1-10(c) 可见，PAM 信号的包络与原模拟信号  $f(t)$  的包络完全一致，或者如第二章分析的那样，PAM 信号的频谱中的低频部分中包含了  $f(t)$  的全部频率成分。这样，如果将 PAM 信号送入低通滤波器 (LPF)，LPF 的输出就是  $f(t)$ ，这一过程就是恢复或重建。

## 2. 增量调制 ( $\Delta M$ )

话音信号数字化的另一方案是增量调制

制，与 PCM 类似， $\Delta M$  将话音信号转换为数字信号的过程也包含抽样、量化和编码。但两者的区别在于：PCM 是对抽样时刻的瞬时样值进行量化编码，且编码位数较高，均取  $n=8$ ；而  $\Delta M$  不是对瞬时样值进行量化编码，它先求出某一抽样时刻信号的瞬时样值与前一抽样时刻信号瞬时样值间的差值后，再对该差值进行量化编码。如果抽样速率足够高时，差值比瞬时样值的幅度要小很多，因此所需编码位数少，通常取  $n=1$ 。因差值也可称为增量，故取名为增量调制。

由图 1-1-11 可说明增量调制的基本过程。该图 (a) 为原模拟信号  $f(t)$  的波形，在发送端，每隔  $T$  时间对  $f(t)$  抽取一个样值。后一样值与前一时刻样值间的差值  $\Delta(t)$  如图 (b) 所示。编码规则是，若差值  $\Delta(t) > 0$ ，编为 1 码； $\Delta(t) < 0$ ，编为 0 码。从而可实现模/数转换，得到数字信号  $d(t)$ ，如图 (c) 所示。在接收端，对  $d(t)$  的解码原理是，每收到一个 1 码，其幅度增加一个量阶电压  $\Delta$ ；每收到一个 0 码，其幅度下降一个  $\Delta$ ，解码后的波形如图 (d) 实线所示。再由低通滤波器恢复为与原模拟信号相近的波形  $f'(t)$ ，如图 (d) 虚线所示。

实现增量调制的关键是如何求出前一抽样时刻样值  $f_a(t)$ ，然后再由本抽样时刻的输入信号  $f(t)$  求出差值  $e_a(t)$ ，即  $\Delta(t)$ 。这一步骤由图 1-1-12 所示的增量调制通信系统框图

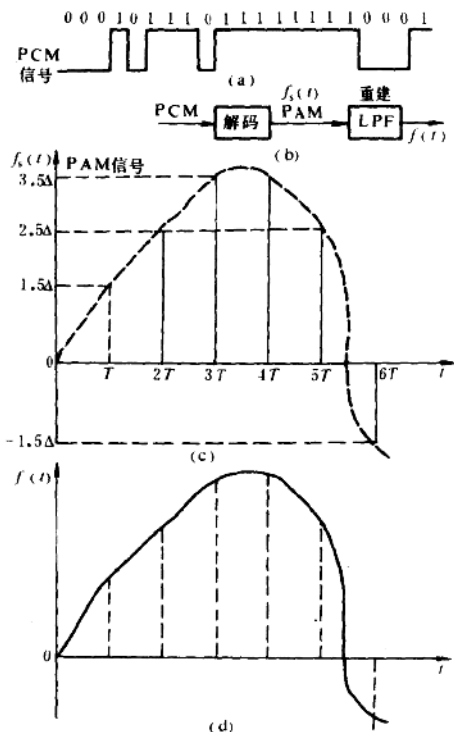


图 1-1-10 解码和重建过程

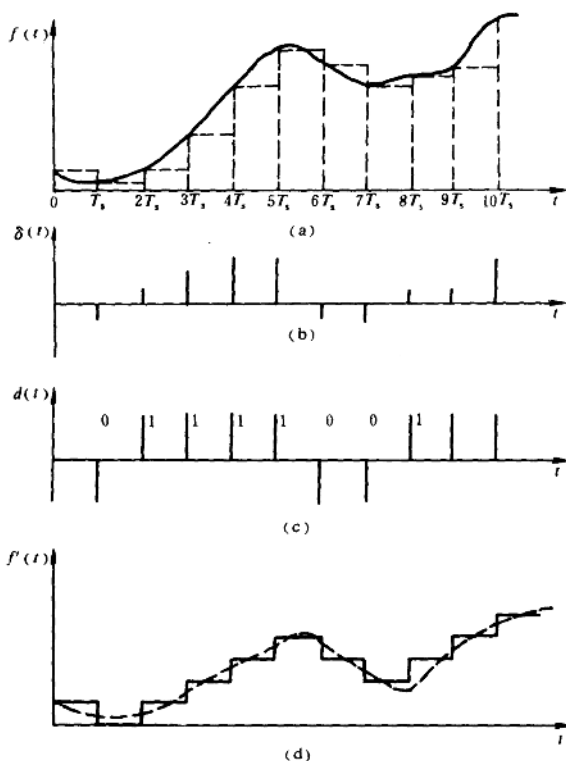


图 1-1-11 增量调制通信过程波形图

(a)  $f(t)$  波形; (b)  $\Delta(t)$  样值; (c) 二进制码元信号; (d) 解码后的波形

中的本地解码网络(理想积分器)和求和电路实现。本地解码网络通常可由理想积分器构成,限于本书的篇幅,对积分器的原理不再说明。

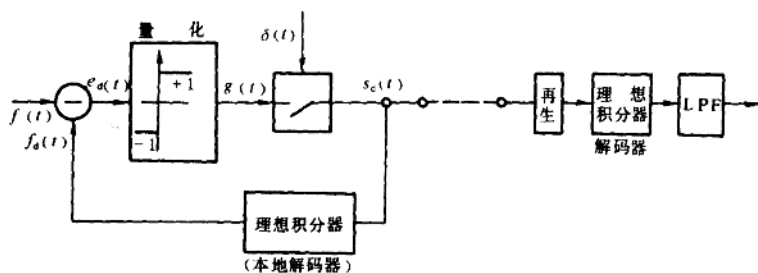


图 1-1-12 增量调制通信系统框图

### 三、数字通信的主要优缺点

#### 1. 数字通信的主要优点

与模拟通信相比,数字通信具有以下优点。

(1) 抗干扰能力强。信号在传输过程中,会受到各种噪声的干扰,再加上信道传输带宽的有限性,均会使数字信号的波形发生畸变。对于模拟通信而言,是无法消除此种畸变的。而数字通信系统传送的是二进制数字信号,其携带的信息不包含在脉冲的波形上,而是体现在脉冲的有或无的不同组合之中。仅有当波形畸变的绝对值与判决电平相比较,超过某个门限时,才有可能误判脉冲的有无,即畸变才会引起通信质量的降低。故只要如图 1-1-9 所示,在信道的适当距离上,设置再生中继器,就有可能彻底清除畸变的恶劣危害,大大提高通信的质量。这是数字通信比模拟通信最突出的优点,也是数字通信之所以得到广泛应用的原因。

(2) 设备的可靠性高,功耗和成本低,体积小。数字通信技术是以集成电路技术为基础的,近年来,随着微电子技术的飞速发展,各种数字通信专用的超大规模集成电路(VLSI)应运而生,加之大容量现场可编程门阵列(FPGA)的运用,对提高数字通信设备的可靠性,降低成本、功耗,减小体积等均起了突出的作用。此外,不需采用大量的滤波器也是提高此类指标的主要原因。

(3) 易于与计算机接合并采用计算机技术。由于数字通信中的二进制数字信号与计算机的二进制数字信号完全一致,所以数字通信电路可以方便地与计算机接口,实现数字通信网管理的自动化和智能化,从而可大幅度提高通信网的传输效率和可靠性。采用计算机技术还可实现各种低速率编解码的不同算法,并使交换技术完全程控化。

(4) 易于加密与解密。随着数字通信网业务的日益扩大,信息传输的安全性和保密性日趋重要。国家军事、经济和政治等情报,企业集团的商务、金融信息在传输中需严格防止泄密。由于数字通信采用二进制数字信号,因而具有易于加密和解密的优点。

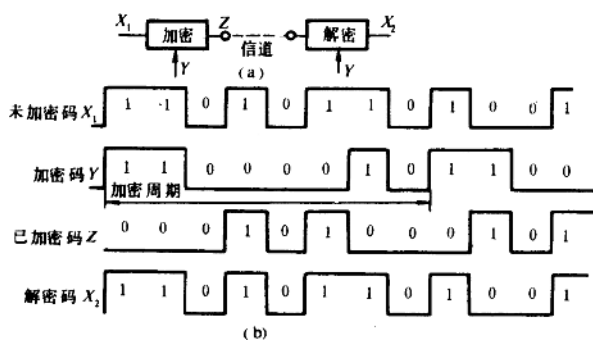


图 1-1-13 数字信号的加密与解密  
(a) 过程框图; (b) 图 (a) 中对应点的波形图

图 1-1-13 (a) 为数字信号采用简单的逻辑异或功能实现加密与解密的过程框图。图中  $X_1$  为未加密码,  $Y$  是人为编制选定的加密码, 并预先约定一个周期长度(加密周期)。将  $Y$  加至由异或门构成的加密电路上, 与  $X_1$  进行异或逻辑运算, 使已加密码变成与  $X_1$  不同的  $Z$  码后, 再将  $Z$  码送至信道。接收端收到  $Z$  码后, 再对其解密。解密电路也是由异或门构成, 只要收端的解(加)密码与发端的  $Y$  完全一致, 经异或运算, 即可从  $Z$  中恢复出解密

码  $X_2$ ，显然  $X_1 = X_2$ 。

(5) 可以组成综合业务数字通信网 (ISDN)。由于数字通信是将电话业务转换为数字信号后再传输与交换，因此它就有可能与原来已是数字信号的电报、传真、计算机、自动化装置……等数据业务在同一数字通信网中传输与交换。与之类似，其他模拟业务，如图像、音乐等，也可转换为数字信号，综合于一个数字通信网中，实现多业务的多媒体通信。

数字通信还有许多其他的优点，不再一一列举。

## 2. 数字通信的主要缺点

相对于模拟通信而言，数字通信的主要缺点是占用信道频带较宽。传输一路模拟话音信号，通常占用信道频带宽度为 4kHz；而传输数字话音信号所占带宽约为模拟通信的 10 倍左右，从而大大减小了信道的利用率。现代化通信除要求传输的高质量与可靠性外，还要求增大信道的容量，提高传输的有效性。为克服数字通信占用频带较宽的缺点，近年来，各种低速率的压缩编码方案已取得了重大突破，获得了广泛的应用。此外，随着大容量光纤信道的大量采用，这一缺点已不再突出。

## 四、数字通信的发展

人类最早采用电信号来传递信息是以数字通信方式实现的。自 1835 年莫尔斯发明电报以来，人类正式进入了电信时代。继 1844 年长途电报业务的开通和 1858 年大西洋海底电缆的架设成功，使数字通信进入了一个新时期。

1876 年电话的发明，开创了模拟通信的新纪元。以后随着电子管的出现，振荡、调制、放大、滤波……等新技术在通信领域中得到了广泛应用，加上交换技术的应用，从而使模拟通信进入了全盛时期，至今已有一百多年的历史。

直到 1937 年提出了脉冲编码调制 (PCM) 的成熟理论，才奠定了数字通信的理论基础。

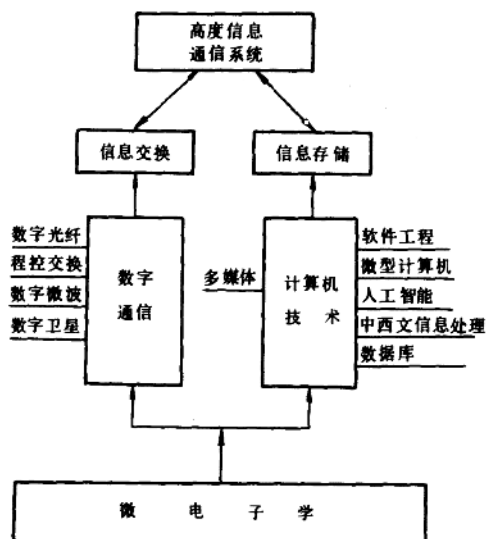


图 1-1-14 高度信息社会的基础

由于它具有显著的抗干扰性强的突出优点，引起了通信界极大的关注。但限于当时电子技术的局限，未能立即付诸实施。直到 1960 年，由于半导体技术的成熟，集成电路的出现，PCM 通信才首先在市内电话中得到初步应用，随之还产生了数字交换技术。从 20 世纪 70 年代初期至今，数字通信取得了飞跃发展，已广泛应用于通信的各个领域。90 年代初期，在先进国家的通信领域，数字通信已占主导地位，有些国家甚至已全盘数字化。近 30 年来，从无到有，PCM 通信在我国的发展也十分迅速，数字光纤和数字微波已成为信息传输的主要媒介。而大中城市的交换技术也已完全程控化，至 1996 年我国已建成了覆盖全国面积的 ISDN。

材料、能源和信息是人类社会的三大基本资源。以往的三次产业革命都是以能源的开发和新材料的研制为基础而展开的。随着工业化的逐渐实现,经济、政治、文化、金融、娱乐、教育……的活动日益频繁,人类和社会对信息的需求日趋突出。事实表明,第四次产业革命将是信息革命。如图 1-1-14 所示,信息革命所建立的高度信息化社会,具有高度信息通信系统——信息高速公路,这是建立在以微电子技术为基础的数字通信技术和计算机技术两大柱石上的。数字光纤、数字微波、数字卫星和程控交换(以及其它新的数字交换技术,如 ATM 等)建立起了庞大的信息高速公路网。而多媒体的应用,使通信可深入国民经济、人类社会与生活的各个领域与角落。

总之,数字通信与计算机的有机结合,必将成为新产业革命的动力,其前景是十分光辉灿烂的,它给人类最终会创造出何种奇迹是不可预计的。而高度信息化社会通信系统要求通信网的全盘数字化,所以数字通信的发展势头也是难以估计的。

综上所述,可见数字通信所包含的业务种类是很多的,本书不能一一加以介绍。鉴于数字电话是目前最主要而又最重要的通信业务,而且数字通信的各种规范、标准均与数字电话有关,所以本书仅讨论数字电话通信。

## 第二节 时分多路复用原理

为提高信道的利用率,在信号的传输过程中均采用多路复用方式,即让多个话音信号在同一信道中传输。目前,常用的多路复用方式分为频分复用(FDM)和时分复用(TDM)。FDM 是把多个话音信号的频谱,借助于调制(如单边带调制),分别将它们搬移到不同频率的载波上去后,再用带通滤波器分别取出其有用频带(如下边带)至信道传输。因各路话音信号经调制和滤波后,其所占用频段在频域上已相互错开,因而可在同一信道上传输而不会相互串扰。频分多路复用仅适用于模拟通信,不属于本书讨论范围。时分多路复用适用于模拟与数字通信,本书着重讨论 PCM 时分多路复用。

还需指出,本节所引用的一些原理涉及后续章节的内容,故只能先给出结论,这些结论的分析与论证见后续章节。

### 一、时分多路复用的基本概念

要在同一信道上传送  $N$  个话音信号,而该  $N$  个话音信号又不会发生相互串扰,如前所述,频分多路复用是利用信道的频域特征来实现的。而时分多路复用采取的方法则是利用  $N$  个话音信号在同一信道上占用  $N$  个不同的时间间隙这一特征,将各路信号在时间上相互错开,分时传输。因各路信号在同一信道上,占用不同的时间间隙(时隙),从而绝不会发生相互串扰。具体方法是每路信号的传输时间分配在不同的时隙内,例如,在第 1 秒传输第 1 路,第 2 秒传输第 2 路……,依次类推,当第  $N$  秒传送完第  $N$  路信号后,再重复这一传输过程,周而复始,不断地循环下去。每路话音信号所占用的时间间隙取名为路时隙,简称为时隙。从第 1 路传送开始至第  $N$  路传输结束的总时间称为一帧。时隙和帧是时分多路复用中十分重要的概念。

将  $N$  个时间上连续的话音信号在时间上相互错开的具体方法是借助于前节所述的抽