

## 第 2 章 数据通信基础



本章将介绍数据通信系统的基础知识以及与计算机网络相关的一些基本概念，为后续章节的学习打下一个良好的基础。通过本章的学习，应该重点掌握和理解以下内容：

- 数据、信息、信号、模拟和数字的概念
- 数据通信系统的构成以及相关基本概念和术语
- 数据通信的几种基本方式
- 传输信号的几种编码形式及特点
- 多路复用技术的分类及各自的特点和用途
- 数据交换三种方式的实现过程及特点
- 差错控制的基本原理、方法以及常见分组码的概念和特点

### 2.1 数据通信的基本概念

计算机网络是数据通信技术和计算机技术相结合的产物，数据通信技术是计算机网络技术发展的基础。随着计算机技术和通信技术的结合日趋紧密，数据通信得到了高速的发展，在现代信息社会中正扮演着越来越重要的角色。

#### 2.1.1 数据、信息与信号

##### 1. 数据和信息

数据是指预先约定的具有某种含义的数字、字母和符号的组合，是现实客观事物的具体描述。用数据表示的内容十分广泛，例如语音、图形、电子邮件、各种计算机文件等。从形式上，数据分为模拟数据和数字数据两种。

模拟数据的取值是连续的，如温度、压力、声音、视频等数据的变化是一个连续的值；数字数据的取值是离散的，如计算机中的二进制数据只能取 0 或 1 两种数值。目前来看，数字数据易于存储、处理和传输，得到了广泛的应用，模拟数据经过处理也能转换成数字数据。

数据通信中的数据是指能被计算机处理的一种信息编码形式，如二进制编码的字母/数字符号、通信中的地址编码和控制代码、程序中的数据等。

人们对数据进行加工处理（解释），就可以得到某种意义，这就是信息。不同领域中对信息有各种不同的定义，一般认为信息是人们对现实世界事物存在方式或运动状态的某种认识。表示信息的形式可以是数值、文字、图形、声音、图像以及动画等，这些表示媒体归根到底都是数据的一种形式。因此可以认为数据是信息的载体，是信息的表示形式，而信息是数据的具

体含义。

## 2. 信号

信号是数据的具体表示形式。通信系统中所使用的信号通常是电信号，即随时间变化的电压或电流。分为两种形式：模拟信号和数字信号。

模拟信号是一种连续变化的电信号，它用电信号模拟原有信息，如图 2-1 (a) 所示就是声音声压随时间而连续变化的函数曲线图。模拟信号传输一定距离后，由于幅度和相位的衰减会造成失真。所以在长距离传输时，需要在中间适当的位置对信号进行修复。

数字信号是用离散的不连续的电信号表示数据。一般用“高”和“低”两种电平的脉冲序列组成的编码来反映信息。如图 2-1 (b) 所示为一组数字信号。数字信号对应的电脉冲含有丰富的低频分量，这种高频分量不适于长距离传输。因此，数字信号通常都有传输距离和速度的限制，超过此限制，需要用专用的设备对数字信号进行“再生”处理。

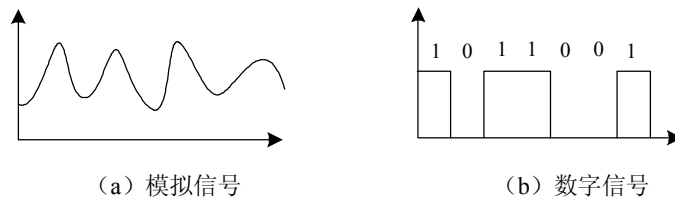


图 2-1 模拟信号和数字信号

不论是模拟数据还是数字数据，都可以用模拟信号或数字信号来表示，并以这些形式进行传输。数据与信号之间转换的示意图，如图 2-2 所示。

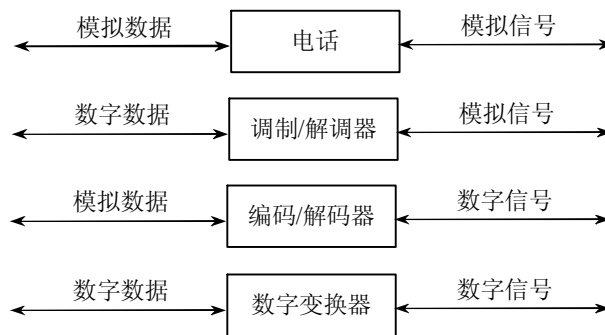


图 2-2 模拟和数字数据与模拟和数字信号的转换

模拟信号可以代表模拟数据（如声音），也可以代表数字数据，此时要利用调制器将二进制数字数据调制成模拟信号，到达数据的接收端，再利用解调器将模拟信号转换成对应的数字数据。调制解调器用于数字数据和模拟信号之间的相互转换过程，又称为 MODEM。

数字信号可以表示数字数据，也可以表示模拟数据，此时要利用编码/解码器来完成这种功能，编码/解码器用于模拟数据和数字信号之间的相互转换。

### 2.1.2 数据通信系统

数据通信是指依照通信协议，利用数据传输技术在两个功能单元之间传递数据信息。它

可实现计算机与计算机、计算机与终端以及终端与终端之间的数据信息传递。数据通信包含两方面内容：数据的传输以及数据传输前后的处理。数据传输是数据通信的基础，而数据传输前后的处理使数据的远距离交换得以实现。这一点将在数据链路、数据交换以及各种规程中加以讨论。

数据通信系统模型如图 2-3 所示。

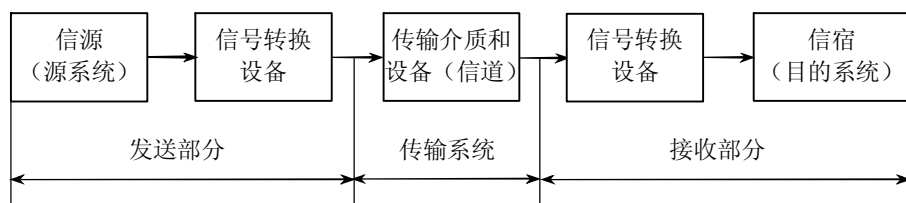


图 2-3 数据通信系统模型

### 1. 信源和信宿

信源就是信息的发送端，是发出待传送数据的设备；信宿就是信息的接收端，是接收所传送数据的设备。在实际应用中，大部分信源和信宿设备都是计算机或其他数据终端设备(Data Terminal Equipment, DTE)。

### 2. 信道

信号的传输通道称为信道，包括通信设备和传输介质。这些介质可以是有形介质（如双绞线、同轴电缆、光线等）和无形介质（如电磁波等）。信道的分类如下：

(1) 按照传输介质分类：分为有线信道和无线信道。

(2) 按照传输信号类型分类：分为模拟信道和数字信道。传输模拟信号的通道称为模拟信道，传输数字信号的通道称为数字信道。

(3) 按照使用权限分类：分为专用信道和公用信道。

### 3. 信号转换设备

信号转换设备的功能：

(1) 发送部分中的信号转换设备将信源发出的数据转换成适于在信道上传输的信号。例如，数字数据要在模拟信道中传输，就要经过信号转换设备（调制器）转换成适合在模拟信道中传输的模拟信号。

(2) 接收部分中的信号转换设备将信道传输过来的数据还原成原始的数据。如上例，经过模拟信道中传输的模拟信号到达接收端时，会由信号转换设备（解调器）转换成对应的数字信号。

图 2-4 所示是利用 PSTN（Public Switched Telephone Network，公共交换电话网络）上网的示意图。

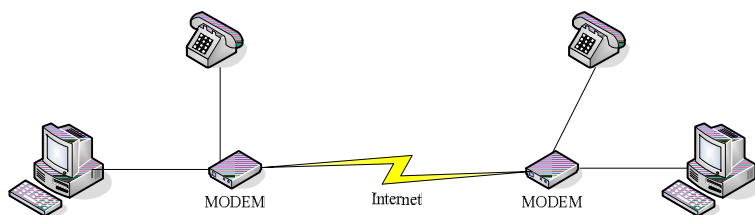


图 2-4 利用 PSTN 上网的示意图

PSTN 是一个模拟信道, 图 2-4 中两端的计算机是信源和信宿, 两边的 MODEM 是信号转换设备, 中间的部分是信道。

### 2.1.3 基本概念和术语

#### 1. 信号传输速率和数据传输速率

信号传输速率和数据传输速率是衡量数据通信速度的两个指标。信号传输速率, 又称为码率或调制速率, 即每秒钟发送的码元数, 单位为波特 (Baud), 信号传输速率又称为波特率。

在数字通信中, 通常用时间间隔相同的信号来表示一位二进制数字, 这样的信号称为二进制码元, 而这个间隔被称为码元长度。

当数据以 0、1 的二进制形式表示时, 在传输时通常用某种信号脉冲表示一个 0、1 或几个 0、1 的组合, 如图 2-5 所示。

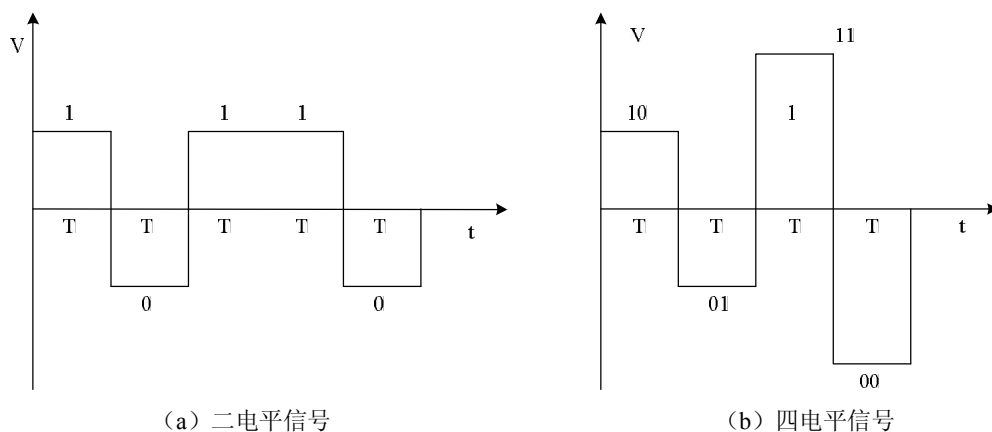


图 2-5 信号脉冲示意图

如果脉冲的周期为  $T$  (全宽码时即为脉冲宽度), 则波特率  $B$  为:

$$B = \frac{1}{T} (\text{Baud}) \quad (2-1)$$

数据传输速率, 又称为信息传输速率, 是指单位时间内传输的二进制位的位数, 单位为比特/秒 (b/s, 也可用 kb/s 或 Mb/s)。注意“b”是小写的, 代表一个二进制位。在计算机网络中的速率, 通常指的就是数据传输速率。

数据传输速率的高低由每个二进制位所占用的时间决定。如果每位所占时间少即脉冲宽度窄, 则数据传输速率高。

数据传输速率和波特率之间的关系如下:

$$C = B \times \log_2 n \quad (2-2)$$

式中  $C$ ——数据传输速率 (b/s);

$B$ ——波特率 (Baud);

$n$ ——调制电平数 (为 2 的整数倍), 即一个脉冲所表示的有效状态, 应用最广泛的是一个脉冲表示两种状态, 即  $n=2$ 。

根据式 (2-2) 可知, 当一个系统的码元状态为 2 (如图 2-5 (a) 所示), 则数据传输速率等于波特率, 也就是说每秒钟传输的二进制位数等于每秒钟传输的码元数。同样, 如果一个系

统的码元状态为 4，即一种码元状态可以表示两个二进制数字（如图 2-5（b）所示），此时数据传输速率为波特率的 2 倍。

## 2. 误码率

数据传输的目的是确保在接收端能正确恢复出原始发送的数据，但在传输中不可避免地会受到信道以及噪声的干扰，致使出现差错。误码率是衡量信息传输可靠性的一个参数，它是指二进制码元在传输系统中被传错的概率。当所传输的数字序列足够长时，它近似地等于被传错的二进制位数与所传输总位数的比值。若传输总位数为  $N$ ，传错位数为  $N_e$ ，则误码率  $P_e$  为：

$$P_e = \frac{N_e}{N} \quad (2-3)$$

在计算机网络中，误码率要求低于  $10^{-6} \sim 10^{-11}$ ，即平均每传输 1Mb 才允许错 1bit 或更低。应该指出，不能盲目要求低误码率，因为这将使设备变得复杂，况且不同的通信系统由于任务不同，对可靠性的要求也有所差别。所以，设计一个通信系统，在满足可靠性的基础上应尽量提高传输速率。

实际应用中，可靠性也可以用误字率来表示。由于一个码字总是由若干个码元构成，不论是出现一个还是多个码元错误，都会使这个码字出错。所以，可以用码字出错的概率来表示可靠性。误字率指错误接收的字符数占传输总字符数的比例。

## 3. 信道带宽

在模拟系统中，“带宽”（bandwidth）是指信号所占用的频带宽度。根据傅里叶级数，一个特定的信号往往是由不同的频率成分构成的，因此一个信号的带宽是指该信号的各种不同频率成分所占据的频率范围，单位是赫兹（Hz）。例如，人语音信号的带宽在 300~3400Hz 之间。

模拟信道的带宽是指通信线路允许通过的信号频带范围。对于数字信道，虽仍然延续了“带宽”这个词，但却是指数字信道的数据传输速率，单位为比特/秒。

## 4. 信道容量

对任何一个通信系统而言，人们总希望它既有高的通信速度，又有高的可靠性，可是这两项指标却是相互矛盾的。也就是说，在一定的物理条件下，提高其通信速度，就会降低它的通信可靠性。

根据信息论中的证明，在给定的信道环境下且在一定的误码率要求下，信息的传输速率存在一个极限值，这个极限值就是信道容量。信道容量的定义为：信道在单位时间内所能传送的最大信息量，即信道的最大传输速率，单位是比特/秒（b/s）。

信道的最大传输速率要受信道带宽的制约。对于无噪声理想信道，下述奈奎斯特（Nyquist）准则给出了这种关系：

$$C=2H\log_2n \quad (2-4)$$

式中  $H$ ——为低通信道带宽（Hz），即信道能通过信号的最高和最低频率之差；

$n$ ——意义同公式（2-1）；

$C$ ——该信道的最大数据传输速率。

例如某理想无噪声信道带宽为 4kHz， $n=4$ ，则信道的最大数据传输速率为：

$$C=2 \times 4000 \times \log_2 4 = 16000 \text{ (b/s)}$$

而实际中的信道必然是有噪声和有限带宽的。1948 年，香农（Shannon）利用信息论的相关理论推导出了带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道极限速率。当用此速率进行数据传输时，

可以做到不产生差错。香农公式如下：

$$C=H\log_2(1+S/N) \quad (2-5)$$

式中  $C$ ——信道容量，即信道极限传输速率；

$H$ ——信道带宽，信道能通过信号的最高和最低频率之差；

$S$ ——信号功率；

$N$ ——噪声功率；

$S/N$ ——信噪比（信号功率与噪声功率的比值），通常用 dB（分贝）表示，分贝和一般比值的换算关系为：

$$\text{信噪比 (dB)} = 10\lg(S/N) \quad (2-6)$$

如果  $S/N=100$ ，则用分贝表示的信噪比即为 20dB。

现在通过一个例子来说明如何估算有噪声的信道容量。假定信道带宽为 3000Hz， $S/N=1000$ ，即信噪比为 30dB，则极限传输率约为 30000b/s。需要指出，实际应用中的传输速率离信道容量差距还相当大。

香农公式指出，如果信源的信息速率小于或者等于信道容量  $C$ ，那么，在理论上存在一种方法可使信源的输出能够以任意小的差错概率通过信道传输。从公式中可以看出，信道容量与信道带宽、信号功率及噪声功率密切相关。

(1) 信道容量  $C$  与信道带宽  $H$  成正比。当采用高带宽的传输介质时（如光纤），会大幅度提高信道的极限速率，这也是目前发展信息高速公路的主要思想来源。

(2) 信道容量  $C$  与信噪比  $S/N$  成正比。在信道带宽一定的情况下，提高信号的功率并降低噪声的功率，同样可以提高信道的极限速率。当然，这在很多情况下是不容易实现和不经济的。

(3) 当信道容量  $C$  存在一个定值时，信道带宽和信噪比成反比的关系。也就是说，当信道的极限速率确定后，加大信道带宽，可以降低信噪比。反之亦然。

## 2.2 数据通信的基本方式

### 2.2.1 并行传输与串行传输

#### 1. 并行传输

采用并行传输方式时，多个数据位同时在信道上传输，并且每个数据位都有自己专用的传输通道，如图 2-6 所示。

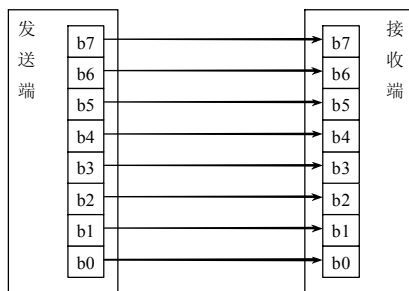


图 2-6 并行传输

这种传输方式的数据传输速率相对较快，适于在近距离数据传输（如设备内部）中使用。如果在远距离传输中使用并行传输，则需要付出较高的技术成本和经济成本。

## 2. 串行传输

串行传输时，数据将按照顺序一位一位地在通信设备之间的信道中传输，如图 2-7 所示。

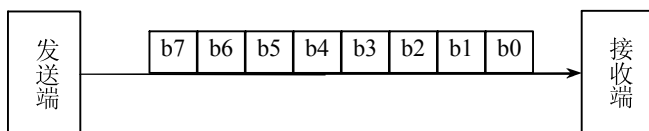


图 2-7 串行传输

由于发送端和接收端设备内部的数据往往采用并行传输方式，因此在数据传至线路之前需要有个并/串的过程。而当数据到达接收端时，需要一个串/并的转换过程。

由于串行传输只有一个传输信道，因而具有简单、经济、易于实现的特点，适于远距离的数据传输；其缺点是较并行方式的数据传输率低。

### 2.2.2 单工、半双工和全双工传输

根据数据传输方向，数据通信操作有单工、半双工和全双工数据传输三种方式。

#### 1. 单工通信

单工数据传输是两数据站之间只能沿一个指定的方向进行数据传输，如图 2-8 所示。

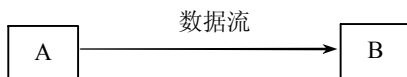


图 2-8 单工通信

数据由 A 站传到 B 站，而 B 站至 A 站只传送联络信号。前者称为正向信道，后者称为反向信道。无线电广播和电视信号传播都是单工传送的例子。

#### 2. 半双工通信

半双工通信是指信息流可在两个方向上传输，但某一时刻只限于一个方向传输，如图 2-9 所示。

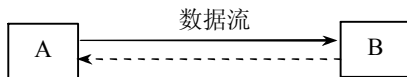


图 2-9 半双工通信

半双工通信中只有一条信道，采用分时使用的方法，在 A 发送信息时，B 只能接收；而当 B 发送信息时，则 A 只能接收。通信双方都具有发送器和接收器。由于要频繁调换信道方向，所以效率低，但可节省传输线路资源。如对讲机就是以这种方式通信的。

#### 3. 全双工通信

如果在两个通信站之间有两条通路，则发送信息和接收信息就可以同时进行，如图 2-10 所示。

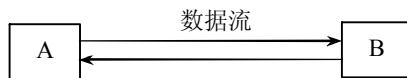


图 2-10 全双工通信

如当 A 发送信息，B 接收，B 同时也能利用另一条通路发送信息而由 A 接收，这种工作方式称为全双工通信方式。它相当于把两个相反方向的单工通信方式组合在一起。这种方式适用于计算机与计算机之间通信。

### 2.2.3 同步传输和异步传输

在串行数据传输过程中，数据是逐位依次传输的，而每位数据的发送和接收都需要时钟脉冲的控制。发送方通过发送时钟确定数据位的起始和结束。而接收方为了能够正确识别数据，则需要以适当的时间间隔在适当的时刻对数据流进行采样。也就是说，接收方和发送方必须保持步调一致，否则将会出现漂移现象，最终导致数据传输出现差错。

同步是数据通信中必须解决的一个重要问题，数据通信的同步包括位同步和字符（或帧）同步两种情况。

#### 1. 位同步

数据接收双方的时钟频率，即使标称值相同，也一定会存在有微小的误差。这些误差会导致收发双方的时钟周期略有不同，在大量的数据传输过程中，这些误差会累积直至造成传输错误。因此，在数据通信过程中首先要解决收发双方的时钟频率一致性问题。其基本思路是：要求接收方根据发送方发送数据的起止时间和时钟频率来校正自身的时间基准和时钟频率，这个过程就是位同步。实现方法有：

(1) 外同步法。发送方有两路信号发往接收方。一路用于传输数据；另外一路传输同步时钟信号，以供接收方校正，实现收发双方的位同步。由于需要专用的线路，这种位同步方法通信代价较高，很少采用。

(2) 内同步法。要求发送方发送的数据带有丰富的定时信息，以便接收方实现位同步，如曼彻斯特编码等。

#### 2. 字符同步

在每个二进制位的同步问题得到解决后，由若干个二进制位组成的字符（字节）或数据块（帧）的同步问题也需要加以考虑。有两种解决方法：异步通信方式和同步通信方式。

(1) 同步通信。同步传输将字符组织成组，以组为单位连续传送。在有效数据传送之前首先发送一个或多个用于同步控制的特殊字符，称为同步字符 SYN。接收端收到 SYN 后，根据 SYN 来确定数据的起始与终止，以实现同步传输的功能，如图 2-11 所示。



图 2-11 同步通信格式

同步通信要求在传输线路上始终保持连续的字符位流，若计算机没有数据传输，则线路上要用专用的“空闲”字符或同步字符填充。

在同步传送过程中，发送端和接收端的每一位数据均保持同步。传送的数据组亦称为数据帧，数据帧的位数几乎不受限制，通常可以是几个到几千个字节，甚至更多。其通信效率高，但实现较为复杂，适用于高速数据传输的场合。



(2) 异步通信。异步通信是指通信中两个字符之间的时间间隔是不固定的，而在一个字符内各位的时间间隔是固定的。异步通信规定字符由起始位 (Start Bit)、数据位 (Data Bit)、奇偶校验位 (Parity) 和停止位 (Stop Bit) 构成。起始位表示一个字符的开始，接收方可以用起始位使自己的接收时钟与数据同步。停止位则表示一个字符的结束。这种用起始位开始，停止位结束所构成的一串信息称为一帧。异步通信的传送格式如图 2-12 所示。

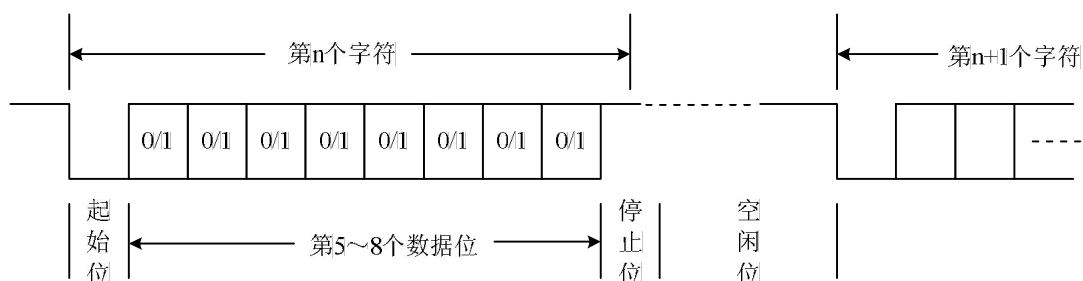


图 2-12 异步通信格式

异步通信在传送一个字符时，由一位逻辑“0”（低电平）的起始位开始，接着传送数据位，数据位的位数为 5~8 位。在传送数据时，按低位在前，高位在后的顺序传送。奇偶校验位用于检验数据传送的正确性，可由程序来指定，也可以没有。最后传送的是逻辑“1”（高电平）的停止位，停止位可以是 1 位、1.5 位或 2 位，两个字符之间的空闲位要由高电平 1 来填充。

异步通信时，所传送的字符可以连续发送，也可以单独发送；当不发送字符时，线路上发送的始终是停止电平（逻辑 1）。因此每个字符的起始时刻可以是任意的，从这个意义上讲，收发双方的通信具有异步性。

异步通信方式的优点是实现字符同步简单，收发双方的时钟信号不需要严格同步；缺点是不适于高速数据通信，且对每个字符都需要加入额外的起始位和终止位，通信效率较低。

#### 2.2.4 基带传输与频带传输

数据传输系统中，根据数据信号是否发生过频谱搬移，可把传输方式分为基带传输和频带传输两种。

(1) 基带传输。数字数据被转换成电信号时，利用原有电信号的固有频率和波形在线路上传输，称为基带传输。计算机等数字设备中，二进制数字序列最方便的电信号表示方式是方波，即“1”或“0”分别用“高”或“低”电平来表示。所以把方波固有的频带称为基带，方波电信号称为基带信号，而在信道上直接传输基带信号称为基带传输。

基带信号含有从直流到高频的频率特性，因此，这种传输要求信道有极宽的带宽，其传输距离较近。近年来，随着光纤传输技术的发展，越来越显示出数字传输的优势。光纤具有带宽高、抗干扰能力强等特点，极大地提高了传输距离。在计算机网络的主干传输网上，主要采用光纤数字传输。

(2) 频带传输。频带传输也叫做宽带传输。其传输的方法是将二进制脉冲所表示的数据信号，变换成便于在较长的通信线路上传输的交流信号后再进行传输。一般地，在发送端通过调制解调器将数据编码波形调制成一定频率的载波信号，使载波的某些特性按数据波形的某些特性而改变。将载波传送到目的地后，再将载波进行解调（去掉载波），恢复原始数据波形。

## 2.3 数据编码技术

在数据通信中，只要是将原始数据转换成另外一种数据形式，都可以看做是编码的过程。如前所述，不论是数字数据还是模拟数据，均可用模拟信号或数字信号来发送或传输。除了用模拟信号来传输模拟数据以外，它们都需要某种形式的编码和数据表示方法。共有三类数据编码的方法：数字数据采用模拟信号的编码方法；数字数据采用数字信号的编码方法；模拟数据采用数字信号的编码方法。

### 2.3.1 数字数据用数字信号表示

当在数字信道上传输数字信号时，要完成把数字数据用物理信号（如电信号）的波形表示的问题。离散的数字数据可以用不连续的电压或电流的脉冲序列表示，每个脉冲代表一个信号单元。可以用不同形式的电信号的波形来表示，这里只讨论二进制的数字信号，也就是用两种码元分别表示二进制数字符号“1”和“0”，每一位二进制符号和一个码元相对应。

#### 1. 单极性码

所谓单极性码，是指在每一个码元时间间隔内，有电压（或电流）表示二进制的“1”，无电压（或电流）则表示二进制的“0”。每一个码元时间的中心是采样时间，判决门限为半幅度电压（或电流），设为 0.5。若接收信号的值在 0.5 与 1.0 之间，就判为“1”；若在 0 与 0.5 之间就判为“0”。

如果整个码元时间内维持有效电平，这种码属于全宽码，称为单极性不归零码（NRZ，Not Return Zero），如图 2-13（a）所示。如果逻辑“1”只在该码元时间维持一段时间（如码元时间的一半）就变成了电平 0，称为单极性归零码（RZ，Return Zero），如图 2-13（b）所示。

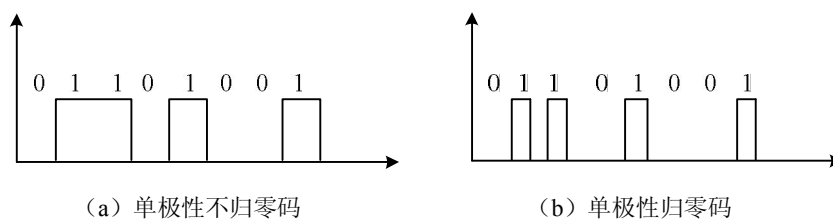


图 2-13 单极性编码图

单极性码的原理简单，容易现实。其主要缺点有：

（1）含有较大的直流分量。对于非正弦的周期函数，根据傅里叶级数，其直流分量为周期内函数的面积除以周期。如果“0”和“1”出现的概率相同，单极性 NRZ 编码的直流分量为逻辑“1”对应值的一半，而单极性 RZ 编码的直流分量会小于单极性 NRZ，但还是会存在的。直流分量的存在，会产生较大的线路衰减且不利于使用变压器和交流耦合的线路，其传输距离会受到限制。

（2）单极性 NRZ 编码在出现连“0”或连“1”的情况时，线路长时间维持一个固定的电平，接收方无法提取出同步信息。

（3）单极性 RZ 编码在出现连“1”的情况时，线路电平有跳变，接收方可以提取同步信

息；但连“0”时，接收方依然无法提取出同步信息。

## 2. 双极性码

所谓双极性码，是指在每一个码元时间间隔内，发出正电压（或电流）表示二进制的“1”，发出负电压（或电流）表示二进制的“0”。正的幅值和负的幅值相等，所以称为双极性码。与单极性编码相同，如果整个码元时间内维持有效电平，这种码属于全宽码，称为双极性不归零码（NRZ），如图 2-14（a）所示。如果逻辑“1”和逻辑“0”的正、负电流只在该码元时间维持一段时间（如码元时间的一半）就变成了 0 电平，称为双极性归零码（RZ），如图 2-14（b）所示。

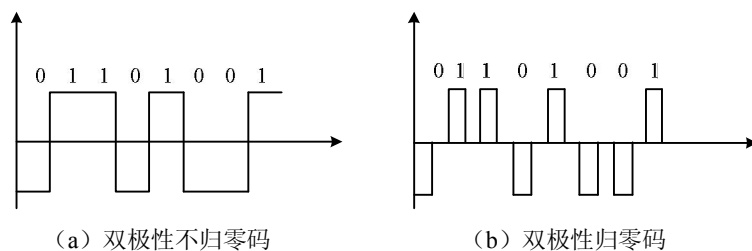


图 2-14 双极性编码图

双极性码的判决门限电平为零电平，如果接收信号的值在零电平以上，判为“1”，如果在零电平以下判为“0”。

双极性码的特点如下：

（1）如果“0”和“1”出现的概率相同，双极性码的直流分量为 0。但在出现连“0”或连“1”的情况时，依然会含有较大的直流分量。

（2）双极性 NRZ 编码在出现连“0”或连“1”的情况时，线路长时间维持一个固定的电平，接收方无法提取出同步信息。

（3）双极性 RZ 编码在出现连“0”或连“1”的情况时，线路电平有跳变，接收方可以提取同步信息。

## 3. 曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码

所谓曼彻斯特编码，是指在每一码元时间间隔内，每位中间有一个电平跳变，假设从高到低的跳变表示“1”，从低到高的跳变表示“0”，如图 2-15（a）所示。

在差分曼彻斯特编码中，对曼彻斯特编码进行改进。每位的中间也有一个跳变，但它不是用这个跳变来表示数据的，而是利用每个码元开始时有无跳变来表示“0”或“1”，例如规定有跳变表示“0”，没有跳变表示“1”，如图 2-15（b）所示。

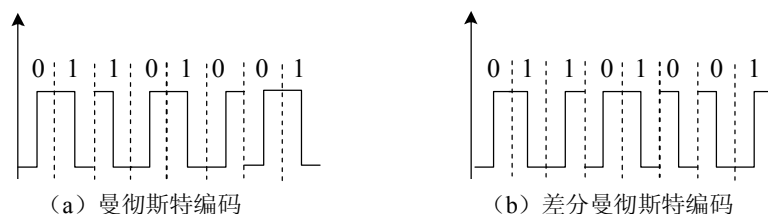


图 2-15 曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码

与单极性和双极性码相比，曼彻斯特码和差分曼彻斯特码在每个码元中间均有跳变，不包含有直流分量；在出现连“0”或连“1”的情况时，接收方可以从每位中间的电平跳变提取出时钟信号进行同步；因此，在计算机局域网中广泛地采用了这种编码方式。其缺点在于：经过曼彻斯特编码后，信号的频率翻倍，对应的要求信道的带宽高；此外，对编解码的设备要求也较高。

### 2.3.2 数字数据用模拟信号表示

计算机中使用的都是数字数据，在电路中是用两种电平的电脉冲来表示的，一种电平表示“1”，另一种电平表示“0”，这种原始的电脉冲信号就是基带信号，它的带宽很宽。当希望在模拟信道中（如传统的模拟电话网）来传输数字数据，就需要将数字数据转换成模拟信号传输，到接收端再还原为数字数据。

通常会选择某一合适频率的正弦波作为载波，利用数据信号的变化分别对载波的某些特性（振幅、频率、相位）进行控制，从而达到编码的目的，使数字数据“寄生”到载波上。携带数字数据的载波可在模拟信道中传输，这个过程称为调制。从载波上取出它所携带的数字数据的过程称为解调。基本的调制方法有三种：调幅制、调频制、调相制，如图 2-16 所示。

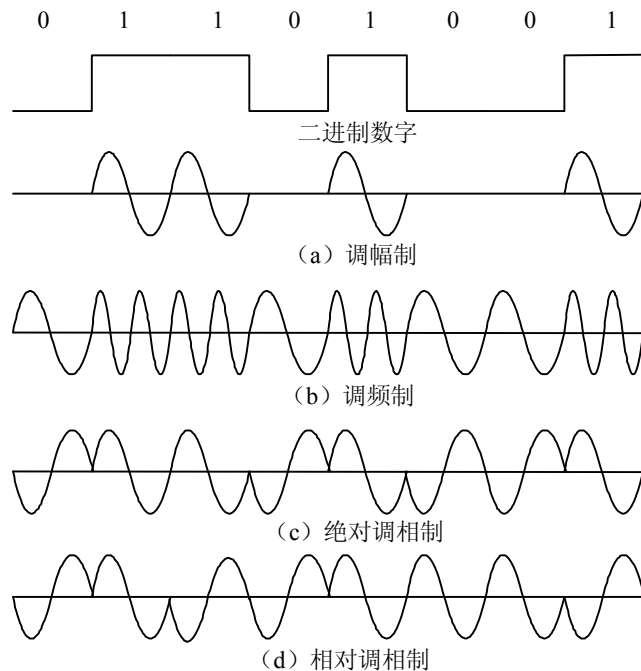


图 2-16 调制方式示意图

#### 1. 调幅制

调幅制又称振幅键控法 ASK (Amplitude-Shift Keying)，是按照数字数据的取值来改变载波信号的振幅。可用载波的两个振幅值表示两个二进制值，也可用“有载波”和“无载波”表示二进制的两个值。这种方式技术简单，但抗干扰能力较差，它容易受增益变化的影响，是一种效率较低的调制技术。调幅制示意图如图 2-16 (a) 所示。

## 2. 调频制

调频制又称为频移键控法 FSK (Frequency-Shift Keying), 即用数字数据的取值去改变载波的频率, 即用两种频率分别表示“1”和“0”。它是一种常用的调制方法, 比调幅技术有较高的抗干扰性, 但所占频带较宽。调频制示意图如图 2-16 (b) 所示。

## 3. 调相制

调相制又称为相位键控法 PSK (Phase-Shift Keying), 它是用载波信号的不同相位来表示二进制数。根据确定相位参考点的不同, 调相方式又分为绝对调相和相对调相 (或差分调相)。

绝对调相是利用正弦载波的不同相位直接表示数字。例如, 当传输的数据为“1”时, 绝对相移调制信号和载波信号的相位差为 0; 当传输的数据为“0”时, 绝对相移调制信号和载波信号的相位差为  $\pi$ , 调制方法如图 2-16 (c) 所示。

相对相移调制是利用前后码元信号相位的相对变化来传送数字信息。假设当传送的数据为“1”时, 码元中载波的相位相对于前一码元的载波相位差为  $\pi$ ; 当传送的数据为“0”时, 码元中载波的相位相对于前一码元的载波相位不变。调制方法如图 2-16 (d) 所示。

上述例子中只有两种相位的调相方式称为两相调制。为了提高信息的传输速率, 还经常采用多相调制方式。所谓多相调制是指一个码元可以携带多个二进制信息。假设采取  $M$  相调制, 则携带二进制信息位数为  $\log_2 M$ , 经常采用的是四相制和八相制调制方式。这两种调制方式的数字信息的相位分配情况如图 2-17 所示。

数字信息	00	01	10	11
相位	$0^\circ$ (或 $45^\circ$ )	$90^\circ$ (或 $135^\circ$ )	$180^\circ$ (或 $225^\circ$ )	$270^\circ$ (或 $315^\circ$ )

(a) 四相调制方式的相位分配

数字信息	000	001	010	011	100	101	110	111
相位	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$	$225^\circ$	$270^\circ$	$315^\circ$

(b) 八相调制方式的相位分配

图 2-17 四相位和八相位调制方式的相位分配

### 2.3.3 模拟数据用数字信号表示

数字数据传输的优点是传输质量高, 由于数据本身就是数字信号, 适合在数字信道中传输; 此外, 在传输的过程中, 可以在适当的位置通过“再生”中继信号, 没有噪声的积累。因此, 数字数据传输在计算机网络中得到了广泛的应用。

模拟数据要在数字信道上传输, 需要将模拟信号数字化。一般在发送端设置一个模拟—数字转换器 (Analog-to-Digital Converter), 将模拟信号变换成数字信号再发送; 而在接收端设置一个数字—模拟转换器 (Digital-to-Analog Converter), 将接收的数字信号转变成模拟信号。通常把模—数转换器称为编码器, 而把数—模转换器称为解码器。

对模拟信号进行数字化编码, 需要对幅度和时间做离散化处理, 最常见的方法是脉冲编码调制 PCM (Pulse Code Modulation), 简称脉码调制。

脉冲编码调制 PCM 的过程包括采样、电平量化和编码三个步骤, 如图 2-18 所示。

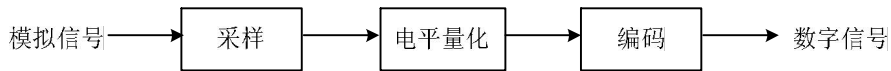


图 2-18 PCM 编码过程示意图

采样是将模拟信号转换成时间离散但幅度仍是连续的信号，量化是将采样后信号的幅度做离散化处理，最后将幅度和时间都呈现离散状态的信号进行编码，得到对应的数字信号。PCM 编码过程的时域示意图如图 2-19 所示。

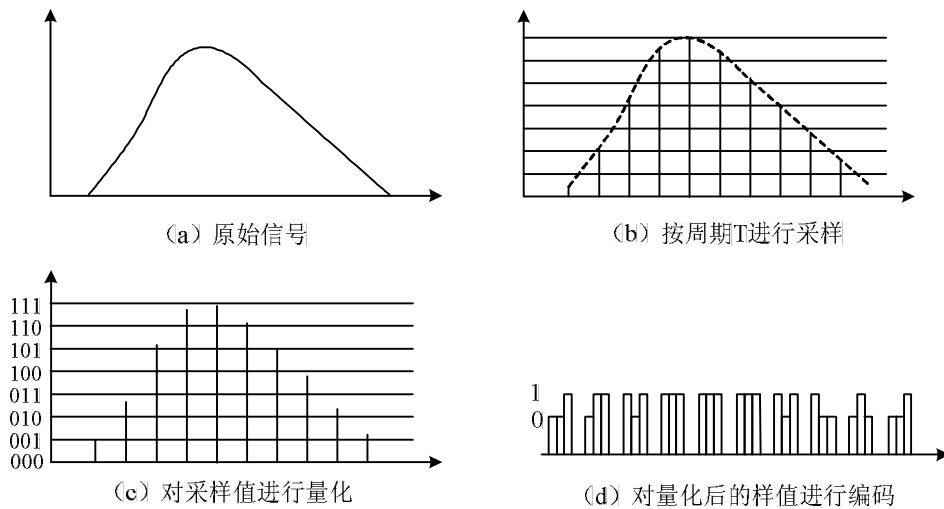


图 2-19 PCM 编码过程

在具体的数字化过程中，不可避免地会造成误差。因此，在采样、量化和编码的过程中，需要采取措施，将误差控制在允许的范围内。

### 1. 采样

采样是每隔一定的时间间隔，把模拟信号的值取出来，获得幅度采样值，用它作为样本代表原始信号，如图 2-19 (b) 所示。

根据奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理：在进行模拟/数字信号的转换过程中，当采样频率大于信号中最高频率 2 倍时，采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息频率。即：

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_m \quad (2-7)$$

式 (2-7) 中， $f_s$ ——采样频率； $T_s$ ——采样周期； $f_m$ ——原始模拟信号的最高频率。

实际应用中，通常采样频率为信号最高频率的 5~10 倍。例如，计算机中对语音信号的处理如下：语音信号的带宽在 300~3400Hz 之间，为了保证声音不失真，采样频率应该在 6.8kHz 以上。常用的音频采样频率有 8kHz、22.05kHz (FM 广播的声音品质)，44.1kHz (CD 音质) 等。

### 2. 量化

量化决定采样值属于哪个量化级，并将其幅度按量化级取整，使每个采样值都近似地量化为对应等级值，如图 2-19 (c) 所示。量化的过程必然会产生误差，对于原始信号分成多少个量化级要根据对精度的要求而定，可以有 8 级、16 级等。当前声音数字化系统中常分为 128 个量化级。

### 3. 编码

编码是将每个采样值用相应的二进制编码来表示，如图 2-19 (d) 所示。若量化级为  $N$  个，二进制编码位数为  $\log_2 N$ 。如果 PCM 用于声音数字化时常为 128 个量化级，则要有 7 位编码。

脉码调制方案是等分量化级，此时不管信号的幅度大小，每个采样的绝对误差是相等的。因此，低幅值的地方相对容易变形。为了减少整个信号的变形，人们常用非线性编码技术来改进脉码调制方案，即在低幅值处使用较多的量化级，而在较高幅值处使用较少的量化级。限于篇幅，非线性编码的内容请读者参考其他的资料。

## 2.4 多路复用技术

在通信系统中，为了扩大传输容量和提高传输效率，常采用多路复用技术。多路是指多个不同的信号源；复用是指在同一通信介质上同时传输多个不同的信号。采用多路复用技术，可以将多路信号组合在一条物理信道上进行传输，到接收端再用专门的设备将各路信号分离开来，极大地提高了通信线路的利用率，如图 2-20 所示。

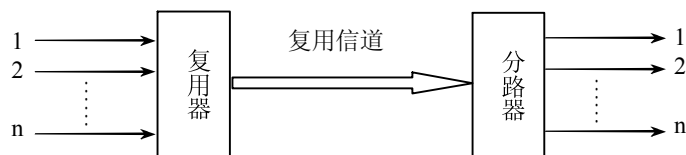


图 2-20 复用与分路

实现多路复用的前提是信道实际传输能力超过单个信号所要求的能力，即对信道的带宽和信号的传输速度有较高的要求。根据信号分割技术不同，多路复用可以分为频分多路复用、时分多路复用、波分多路复用等。

### 2.4.1 频分多路复用技术

频分多路复用 (FDM, Frequency Division Multiplexing) 是按照频率参量的差别来分割信号的，用于在一个具有较宽带宽的信道上传输多路带宽较窄的信号。图 2-21 给出了频分多路复用的原理图。

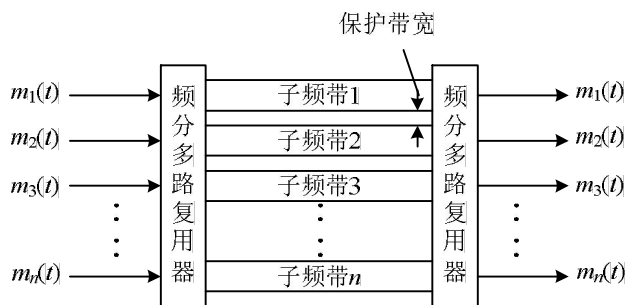


图 2-21 频分多路复用原理图

频分多路复用技术将信道的传输频带分成若干个较窄的子频带，每个窄的子频带构成一

个子通道，独立地传输信息。为了防止各路信号之间的相互干扰，相邻两个子频带之间需要有一定的保护带宽。接收端用滤波器将接收到的时域信号，按照频率分隔开来，以恢复原始的信号。

FDM 最典型的例子是语音信号频分多路载波通信系统，图 2-22 说明了如何使用 FDM 将三个语音通道复用在一起。

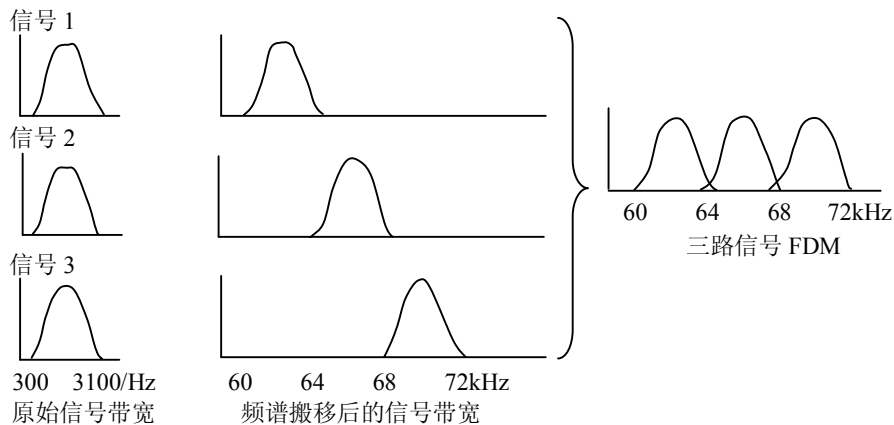


图 2-22 语音通道频分多路复用示意图

图 2-22 中，将每个语音通道的带宽限制在 3000Hz 左右。当多个通道被复用在一起时，每个通道分配 4000Hz，以使彼此间隔足够远。利用不同频率的载波对各语音信号进行调制，从时域上看，各信号是混杂在一起的；但在频域上看，实际上是进行了频谱的“搬移”，由于各通道占用的频率不相同，频域上不会发生混淆。到达接收端后，可以利用滤波器将不同频段的信号滤出，以还原时域信号。

FDM 的主要优点在于实现相对简单，技术成熟，能较充分地利用信道带宽，因而系统效率较高。其缺点主要有：保护带宽的存在，大大地降低了 FDM 技术的效率；信道的非线性失真，改变了它的实际频带特性，易造成串音和互调噪声干扰；所需设备量随接入路数增加而增多，且不易小型化；频分多路复用本身不提供差错控制技术，不便于性能监测。因此，在数据通信中，FDM 正在被时分多路复用所替代。

#### 2.4.2 时分多路复用技术

时分多路复用 TDM (Time Division Multiplexing) 是按照时间参量的差别来分割信号的，通过为多个信道分配互不重叠的时间片的方法实现多路复用。时分多路复用分为同步时分多路复用和异步时分多路复用两种。

##### 1. 同步时分多路复用

当信道的最大数据传输速率大于等于各路信号的数据传输速率的总和时，可以将使用信道的时域分成一个个的时间片，按照一定的规则将这些时间片分配给各路信号，每一路信号只能在自己的时间片内独占信道进行传输，这就是时分多路复用，又称为同步时分多路复用。如图 2-23 所示。图 2-23 中的“T”为复用信道的一个传输周期。

同步时分多路复用将时间片预先分配给各个低速线路，并且时间片固定不变。复用器按照规定的次序轮流从每个信道中取数据，就像一个轮盘一样，在每个瞬间只有一路信号占用信道，这与频分多路复用中，在同一时刻有多路信号同时传输是不同的。由于每个时间片的顺序



是固定的，因此，分路器可以按照预先设定的顺序从复用信道中获取数据，并正确传输至目的线路。通过时分多路复用，多路低速数字信号可以复用一条高速的信道，特别适合于数字信号传输（如计算机网络）的场合。

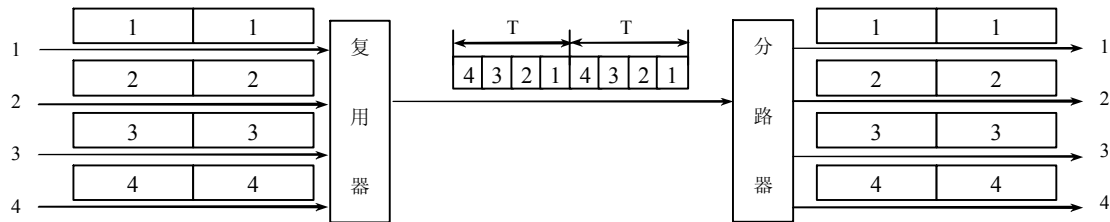


图 2-23 时分多路复用

同步时分多路复用中将各个时间片固定分配给各低速线路，不管该低速线路是否有数据发送，属于它的时间片都不能被占用。而在计算机网络中，数据的传输具有很强的突发性，可能很长时间某个低速线路没有数据。因此，在计算机网络中的同步时分多路复用不能充分利用信道容量，会造成通信资源的浪费。如果设想各个低速线路只在需要信道时才分配给它们时间片，则可大大改进信道利用率，这就是异步时分多路复用。

## 2. 异步时分多路复用

异步时分多路复用又称统计时分多路复用 (STDM, Statistical Time Division Multiplexing)，允许动态地分配时间片，如果某个低速线路不发送信息，则其他的终端可以占用该时间片，如图 2-24 所示。

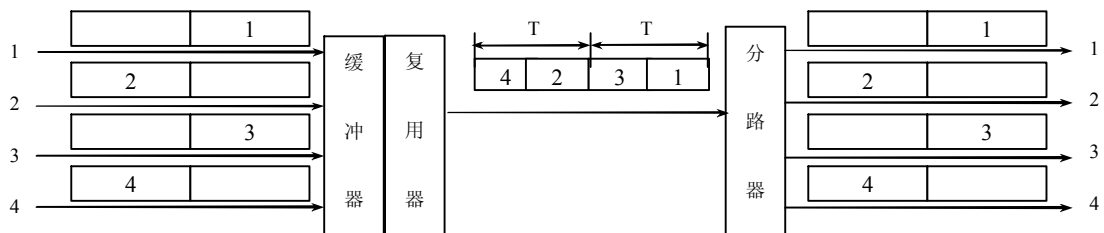


图 2-24 异步时分多路复用

由图 2-24 可知，各低速线路的数据首先被送到缓冲器中，复用器从缓冲器中取出数据，送至复用信道中。这样做的好处在于，当低速线路没有数据时，不会占用缓冲器，也就是说，不会占用复用信道，从而提高信道利用效率。由于计算机网络数据传输具有突发性的特点，很可能某个时刻只有几条线路（不是全部）会有数据传输，因此在异步时分多路复用中，复用信道的速率可以小于各个低速线路速率之和，从而节省线路资源。

异步时分多路复用的实现较为复杂，主要体现在：

(1) 缓冲器的设计。缓冲器读写速度和容量的大小，要综合考虑各低速线路的输入情况和复用器取数据的情况：如果过小，很可能后续数据无法存入，造成缓冲的溢出和数据的丢失；如果过大，很可能会造成资源的浪费。

(2) 与同步时分多路复用的时间片的顺序固定不同，为了使接收端能够分辨出所接收数据的来源和目的地，需要对低速线路的数据进行编址处理，这也会在一定程度上造成通信效率的低下和实现过程的复杂。

从统计角度来看，所有的低速线路同时要求分配信道的可能性是很小的，因此异步时分多路复用可以为更多的用户服务。异步时分多路复用的缺点主要有：需要比较复杂的寻址和控制能力，需要有保存输入排队信息的缓冲器，设备实现复杂且费用较高。

### 2.4.3 波分多路复用技术

波分多路复用（WDM, Wavelength Division Multiplexing）是在光纤信道上使用的频分多路复用的一个变例。图 2-25 是一种在光纤上获得 WDM 的简单方法。在这种方法中，两根光纤连到一个棱柱（或更可能是衍射光栅），每根的能量处于不同的波段。两束光通过棱柱或光栅，合成到一根共享的光纤上，传送到远方目的地，在接收端利用相同的设备将各路光波分开。按一个话路 64kb/s 计算，在一条光纤上能同时传送 156250 个话路。

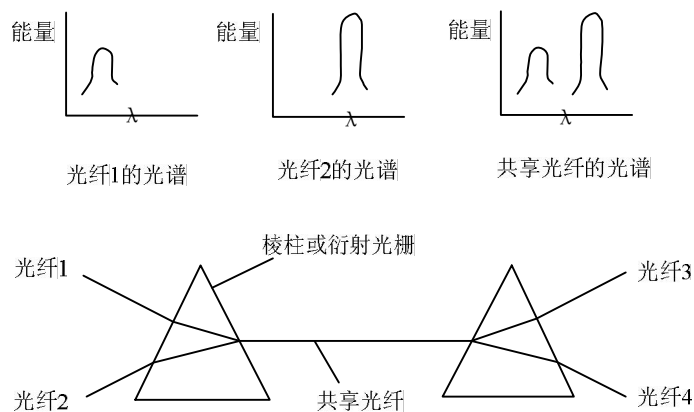


图 2-25 波分多路复用

由于每个信道有自己的频率范围，而且所有的范围都是分隔的，所以它们可以被多路复用到长距离的光纤上。与电子 FDM 的唯一区别是：光纤系统使用的衍射光栅是完全无源的，因此极其可靠。

应该注意到，WDM 很流行的原因是一根光束信号上的能量常常仅有几兆赫宽，而现在不可能在光电介质之间作更快的转换。一根光纤的带宽大约是 25000GHz，因此可以将很多信道复用到长距离光纤上。当然前提条件是所有的输入信道都应使用不同的频率。

## 2.5 数据交换方式

两个设备进行通信，最简单的方式是用一条线路直接连接这两个设备，但这往往是不现实的，尤其在广域网中。两个相距很远的设备之间不可能有直接的连线，它们是通过通信子网建立连接的。通信子网由传输线路和中间节点组成，当信源和信宿间没有线路直接相连时，信源发出的数据先到达与之相连的中间节点，再从该中间节点传到下一个中间节点，直至到达信宿，这个转接过程就称为交换。

计算机网络通信中常用的数据交换有三种：电路交换、报文交换、分组交换。

### 2.5.1 电路交换

电路交换（Circuit Switching）要求在通信的双方之间建立起一条实际的物理通路，并且在整个传输过程中，这条通路被独占。电话系统是最典型的电路交换例子。电路交换的通信过程可分为建立电路连接、数据传输和拆除电路连接三个阶段。

#### 1. 建立电路连接

在传输任何数据之前，都必须建立端到端（站到站）的直通电路，如图 2-26 所示。

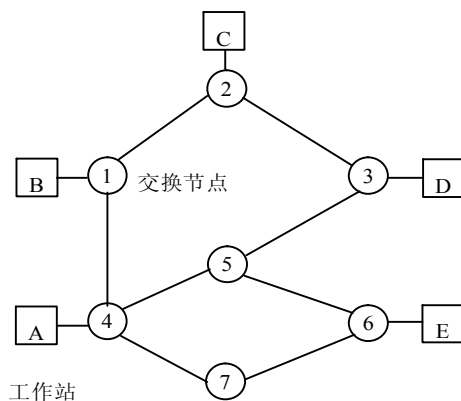


图 2-26 电路交换示意图

假设 A 站欲与 E 站进行数据通信，则 A 站先发送一个请求到节点 4，请求与 E 站建立一个连接。节点 4 要根据路径选择信息，在通向节点 6 的路径中找到下一个分支。例如，节点 4 选择了到节点 5 的线路，在此线路上分配一个未用的通道（使用时分多路复用 TDM 或频分多路复用 FDM），并且发送一个报文请求通过节点 6 连接到 E 站。至此，已经建立了一个由 A 站开始，经过节点 4、节点 5、节点 6 到 E 站的专用通路。在完成这个连接的过程中，要进行测试来确定 E 站是否忙或者是否准备接收本次连接。

一般来说，这种连接是全双工的，因此还有个 E 站到 A 站的电路建立过程。

#### 2. 数据传输

在电路建立后，信源和信宿双方就可以沿着已经建立好的传输线路，进行单工、半双工或全双工的数据传输了。

#### 3. 拆除电路连接阶段

在数据传送结束后，通常由任一站主动发出“拆除连接”请求，以便释放电路中所占用的资源。

电路交换的优点是数据传输可靠、迅速，而且保证顺序。缺点是电路建立和拆除的时间较长，而且在这期间，电路不能被共享，资源被浪费；另外，当数据量较小时，为建立和拆除电路所花的时间得不偿失。因此，电路交换适用于系统间要求高质量的大量数据的传输。

### 2.5.2 报文交换

由于电路交换在数据交换期间会独占信道，有时会降低线路的利用率，因而产生了另一种数据交换方式——报文交换（Message Switching）。

所谓报文对用户来说是一个完整的信息单元。报文在不同的环境中有不同的限制，其长度变化很大，小的几千个字节，大的数万个字节。

报文交换方式是一种“存储—转发”方式。源站在发送报文时，把目的地址添加在报文中，然后发给相邻的节点。收到报文的节点根据目的地址和自身的转发算法决定下一个接收报文的节点，如此往复，直到该报文到达目的地。通信的双方以报文为单位交换数据，它们之间没有专用的通信线路。

如上例中，A 站向 E 站发送报文，则先将 E 站地址添加在报文中，节点 4 暂存收到的报文并确定路由（设指向节点 5），然后节点 4 把需在 4~5 链路上传送的所有报文排队，当链路可用时，便将报文发至节点 5，依此类推，报文经由节点 6 送到 E 站。

报文交换方式的“存储—转发”方式，能够平滑通信量和充分利用信道。只要存储时间足够长，就可以把信道忙碌和空闲的状态均匀化，大大压缩了必需的信道容量和转接设备的容量。

报文交换方式与电路交换方式相比有如下特点：

- (1) 线路效率较高。因为许多报文可分时共享一条节点到节点的通道。
- (2) 接收者和发送者无需同时工作。在接收者忙时，网络节点可先将报文暂时存起来。
- (3) 当流量增大时，在电路交换中可能导致一些呼叫不能被接收，而在报文交换中，报文仍可接收，只是延时会增加。
- (4) 报文交换可把一个报文送到多个目的地，而电路交换很难做到这一点。
- (5) 可建立报文优先级，可以在网络上实现差错控制和纠错处理。
- (6) 报文交换能进行速度和代码转换。两个数据传输速率不同的站可以互相连接，也易于实行代码格式的变换（如将 ASCII 码变换为 EBCDIC 码）。这在电路交换中是不可能的。

报文交换的主要缺点是网络延时较长，波动范围较大，不宜用于实时通信或交互通信，如语音、传真、终端与主机之间的会话业务等。

### 2.5.3 分组交换

分组交换（Packet Switching）又称包交换，是综合了电路交换和报文交换两者优点的一种交换方式。

分组交换仍采用报文交换的“存储—转发”技术。但不像报文交换那样，以整个报文为交换单位，而是设法将一份较长的报文分解成若干固定长度的“段”，每一段报文加上交换时所需的呼叫控制信息和差错控制信息，形成一个规定格式的交换单位，通常称之为“报文分组”（简称“分组”或“包”）。

由于分组长度固定且较短，又具有统一的格式，因此便于中间节点存储、分析和处理。分组进入中间节点进行排队和处理只需停留较短的时间，一旦确定了新的路径，就立刻被转发到下一个中间节点或用户终端。从统计结果上看，分组交换传输速度高于报文交换，低于电路交换，可以理解为是一种“快速的报文交换”。

分组交换比报文交换有明显的优点，主要如下：

- (1) 减少了时间延迟。当第一个分组发送给第一个节点后，接着可发送第二个分组，随后发送其他分组，这样一个报文分割成多个分组，多个分组可同时在网上传播，总的延时大大减少。
- (2) 每个节点上所需的缓冲容量减少了（因为分组长度小于报文长度），有利于提高节点存储资源的利用率。

(3) 易于实现线路的统计时分多路复用，提高了线路的利用率。

(4) 可靠性高。分组作为独立的传输实体，便于实现差错控制，从而大大降低了数据信息在分组交换网中传输的误码率，一般可达  $10^{-10}$  以下。另外由于“分组”在分组交换网中传输的路由是智能可变的，也提高了网络通信的可靠性。

(5) 易于重新开始新的传输。可让紧急分组迅速发送出去，不会因传输优先级较低的报文而堵塞。

(6) 容易建立灵活的通信环境，便于在传输速率、信息格式、编码类型、同步方式、通信规程等方面都不相同的数据终端之间实现互通。

分组交换的主要缺点如下：

(1) 在分组交换网中附加的传输信息较多，影响了分组交换的传输效率。

(2) 实现技术复杂，中间节点要对各种类型的分组进行分析处理，为分组提供传输路由，为数据终端设备提供速率、格式、码型和规程等的变换，为网络的维护管理提供必需的报告信息等，这就要求中间节点具有较强的处理功能。

分组交换可提供两种服务方式：数据报 (Datagram) 方式和虚电路 (Virtual Circuit) 方式。

#### 1. 数据报方式

在数据报方式中，每个分组称为一个数据报，若干个数据报构成一次要传送的报文或数据块。数据报方式中对每个分组单独进行处理。

当信源站要发送一个报文时，将报文拆分成若干个带有序号和地址信息的数据报，依次发送给网络节点。每个数据报自身携带足够的信息，它的传送是被单独处理的。一个节点接收到一个数据报后，根据数据报中的地址信息和当时网络的流量、故障等情况选择路由，找出一个合适的出路，将数据报发送到下一个节点。由于不同时间的网络流量、故障等情况不同，各个数据报所走的路径就可能不相同，因此，各数据报不能保证按发送的顺序到达目的节点（乱序），有些数据报甚至还可能在途中丢失。

以图 2-26 中的网络拓扑结构为例，设 A 站有一报文需要传输，将该报文拆分成三个分组，按 1、2、3 的顺序，依次送入节点 4。分组 1 到达节点 4 时，通过路由选择，确定节点 5 的分组队列比节点 7 的要短，所以将该分组送入节点 5 的队列中，但分组 2 到达节点 4 时，发现节点 7 的队列最短，便将分组 2 置于节点 7 的队列中，对分组 3 也作同样的处理，如图 2-27 所示。

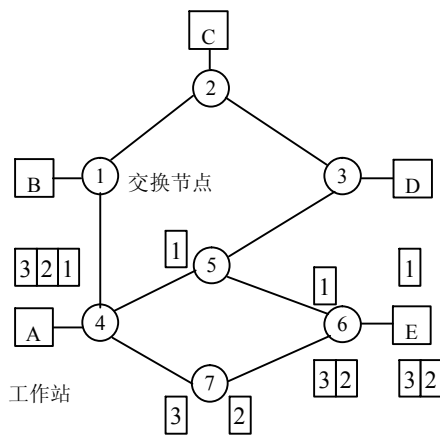


图 2-27 数据报示意图

数据报方式中即使有相同目的地址的每个分组也不一定沿同一条路径传送，而且分组到达 E 站的顺序也可以不同于发送顺序。E 站应该具有重新排序分组和将其重装成报文的功能。

## 2. 虚电路方式

虚电路方式中，在分组发送前，通过呼叫的过程（虚呼叫）使交换网建立一条通往目的站的逻辑通路，然后，一个报文的所有分组都沿着这条通路进行“存储—转发”，不允许中间节点对任一个分组进行单独的处理和另选路径。

例如以图 2-26 中的网络拓扑结构为例，A 站有分组要发到 E 站，它首先向节点 4 发“呼叫请求”分组，请求与 E 站建立连接，节点 4 通过路由选择将该呼叫请求传到节点 5，节点 5 确定将呼叫请求传至节点 6，再传至 E 站。如果 E 站接受该连接请求，便向节点 6 发“呼叫接收”分组，沿相反路径返回到 A 站。此时，A 站和 E 站的逻辑连接（即虚电路 A-4-5-6-E）建立成功，同时分配一个“逻辑通道”标识符（即虚电路标识符），即可开始交换数据，如图 2-28 所示。

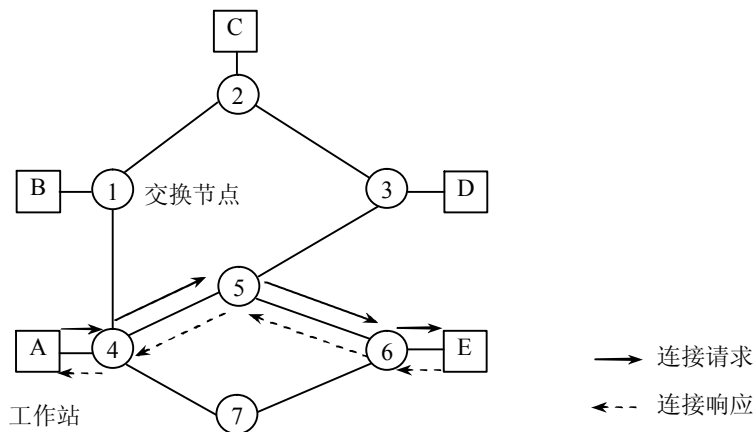


图 2-28 数据报示意图

此后，每个分组就会沿着前面建立好的路径进行数据传输。数据传输完毕，任何一方均可发出“拆除连接”分组，终止本次连接。

根据多路复用的原理，每个中间节点可与其他某个中间节点建立多条虚电路，也可以同时与多个中间节点建立虚电路。

数据报方式和虚电路方式各有优缺点，主要如下：

(1) 在使用数据报时，每个分组必须携带完整的地址信息。而使用虚电路时仅需虚电路号码标志，这样可使分组控制信息的比特数减少，从而减少了额外开销。

(2) 使用数据报方式时，用户端的主机要承担端到端的差错控制以及流量控制；使用虚电路时，网络节点有端到端的流量控制和差错控制功能，即由网络保证分组按顺序交付，而且不丢失、不重复。

(3) 数据报方式由于每个分组可独立选择路由，当某个节点发生故障时，后续分组就可另选路由，从而提高了可靠性；而使用虚电路时，如一个节点失效，则通过该节点的所有虚电路均丢失了，可靠性降低。

虚电路技术与电路交换方式一样，都要经历“建立连接、数据传输、拆除连接”这三个阶段，都是面向连接的交换技术。数据传输都会沿着已经建立好的连接路径进行传输，不需要再进行路径选择，且数据会按序到达目的地。

虚电路技术与电路交换方式的不同之处在于：虚电路使用“存储—转发”方式传输数据，分组在每个节点仍然需要存储，并在线路上进行输出排队，只是断续地占用一段又一段的链路。虚电路的标识符只是对逻辑信道的一种编号，并不指某一条物理线路本身。一条物理线路可能被标识为许多逻辑信道编号，这正体现了信道资源的共享性。

### 2.5.4 交换技术的比较

图 2-29 给出了各种交换技术的工作时序，从中可看出数据报分组交换速度较快，它是在数据网络中使用最广泛的一种交换技术。

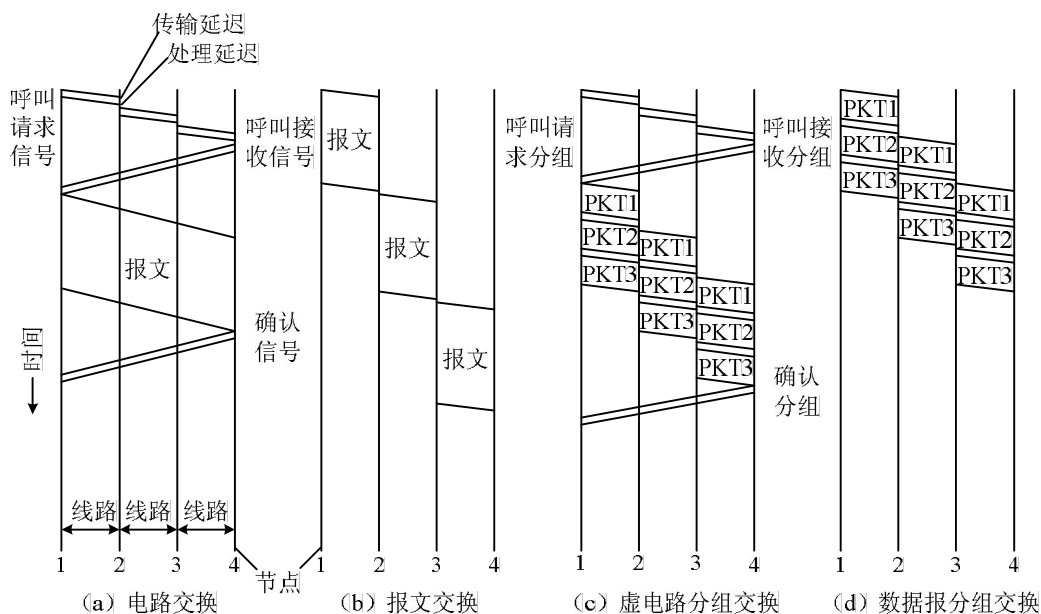


图 2-29 数据交换方式比较

三种交换方式各有优缺点，主要如下：

(1) 电路交换。在数据传送开始之前必须先设置一条完全的通路。在线路释放以前，该通路将由一对用户完全占用。对于突发式的数据通信，线路交换效率不高。

(2) 报文交换。报文从信源传送到目的地采用“存储—转发”的方式。在中间节点中需要缓冲存储，报文需要排队。由于报文的长度不固定，因此，报文交换不能满足实时通信的要求。

(3) 分组交换。分组交换方式和报文交换方式类似，但报文被分成组传送，并规定了最大的分组长度。在数据报分组交换中，目的地需要重新组装报文。分组交换技术是在数据通信网络中广泛使用的一种交换技术。

## 2.6 差错检验和控制

### 2.6.1 差错类型

数据通信要求信息传输具有高度的可靠性，即要求误码率足够低。然而，数据信号在传

输过程中不可避免地会发生差错，即出现误码。造成误码的原因很多，但主要可归结为两个方面：一是信道不理想造成的符号间干扰；二是噪声对信号的干扰。由于前者常可以通过均衡办法予以改善，因此，常把信号噪声作为造成传输差错的主要原因。

危害数据传输的噪声大体上有两类：白噪声和脉冲噪声。白噪声是在较长时间内一直存在的，并且在所有频率上的强度都一样，又称为热噪声，是一种随机的噪声信号；脉冲噪声是由某种特定的、短暂的原因造成的，幅度可能很大，是数据传输中造成差错的主要原因。

噪声类型不同，引发的差错类型也不同，一般可分为以下两种类型的差错。

(1) 随机差错。随机差错是指某一码元出错与前后码元无关，它是由信道中的热噪声引起的。如果传输信号的信噪比较高，这种差错可以得到有效的降低。

(2) 突发差错。突发差错是前后码元发生的错误有相关性，一个错误的出现往往引起前后码元也出现错误，使错误成串密集地产生。脉冲噪声产生的差错就是突发出错。

实际的传输线路中所出现的差错是随机性错误和突发性错误的混合，如果采用有效的屏蔽措施，改善设备，选择合理的方式、方法，可使噪声大大降低，但不能完全消除噪声的影响，所以传输线路中要有差错控制。

## 2.6.2 差错控制的方式

差错控制是指在传输数据时用某种方法来发现错误，并进行纠正以提高传输质量。主要从两个方面采取措施：一是将信源的数据进行某种编码，使得信宿在接收到数据后，能够自动地对错误进行检查和纠正；二是如果信宿仅能发现错误，无法具体定位和纠错时，系统采取某种措施以纠正差错。差错控制的方式主要有以下几种。

### 1. 检错重发（ARQ, Automatic Repeat-reQuest）方式

检错重发又称自动反馈重发，如图 2-30 所示。

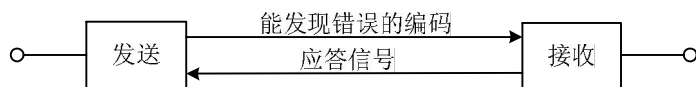


图 2-30 检错重发示意图

发送端送出的信息序列，一方面经检错码编码器编码送入信道，另一方面也把它存入存储器，以备重传。接收端经检错码译码器对接收到的信息序列进行译码，检查有无错误，若无错误，就发出无错误的应答信号，经反馈信道送至发送端，同时将译码后的信息序列传送到信宿；若有错误，通过反馈信道传送给发送端一个重发指令，信宿不再接收此信息序列。

发送端如果收到重发请求后立即重传原信息序列，直到接收端返回正确接收信息为止；发送端如果收到无错误的应答信号，就会开始下一个发送周期。

检错重发的方式中要求有反馈信道，且接收端无需纠错，实现简单，是目前广泛的差错控制方式。但如果干扰频繁，多次重发会使连贯性较差，是其主要缺点。

在 ARQ 方式中，较常用的三种形式是：发送—等待自动检错重发、连续发送自动检错重发和选择重传自动检错重发。

### 2. 前向纠错（FEC, Forward Error Correction）方式

发送端按照一定的编码规则对即将发送的信号码元附加冗余码元，构成纠错码。接收端



根据附加冗余码元按一定的译码规则进行变换,用来检测所收到的信号中是否有错误。如有错误,能自动地确定误码位置并加以纠正。

FEC 方式的优点是实现简单,无需反馈信道,延时小,实时性好,适用于只能提供单向信道的场合。其缺点是采用的纠错码与信道的差错统计特性有关,因此对信道的差错统计特性必须有充分的了解。另外,冗余码元要占总发送码元的 20%~50%,从而降低了传输效率。

### 3. 混合纠错 (HEC, Hybrid Error Correction) 方式

HEC 方式是前向纠错和检错重发方式的结合。在发送端发送具有检错和纠错能力的码组,接收端对所接收的码组中的差错个数在纠错能力范围以内的能自动进行纠错,否则接收端通过反馈重发的方法来纠正错误。

这种方式综合了 ARQ 和 FEC 的优点,但并没能克服各自的缺点,因而限制了它的实际应用。

### 4. 信息反馈 (IRQ, Information Repeat reQuest) 方式

信息反馈方式又称为回程校验方式(或反馈方式),接收端把接收到的数据序列全部由反向信道送回发送端,发送端比较发送的数据序列与送回的数据序列,从而检测是否有错误,并把有错误的数据序列的原数据再次传送,直到发送端没有发现错误为止。

## 2.6.3 常用的检错纠错码

帮助发现错误并能自动纠正错误的有效手段是对数据进行抗干扰编码,可分为检错码和纠错码。所谓检错码是指接收端能自动发现差错的编码;而纠错码则是指接收端不仅能发现差错而且能自动纠正差错的编码。这两类码并没有明显的界限,纠错码也可用来检错,有的检错码也可用来纠错。

### 1. 检错纠错码的基本原理

检错纠错码的基本思想是通过对信号码元序列作某种变换,使得原来彼此独立、无相关性的信号码元之间产生某种规律性或相关性,从而在接收端可以根据这种规律性来检测甚至纠正传输序列中可能出现的错误。例如只传送两种状态 A 和 B,最有效的编码是采用 1bit,假设用 1 表示 A, 0 表示 B。接收端在收到数据时,无法根据 0 或 1 判断出数据传输是否有错误,即这种编码不具备检纠错的能力。

如果系统采用 2bit 进行编码,并假设用 11 表示 A, 00 表示 B。如果接收端收到 10 或 01 时,知道数据发生了错误,但无法纠正这些错误。也就是说只具有检错能力,不具备纠错能力。

在检纠错码中,编码效率是指传输的码组中信息位和整个码组总位数的比值。如果系统采用 2bit 进行编码,编码效率将由 100%降低到 50%。

如果系统采用 3bit 进行编码,并假设用 111 表示 A, 000 表示 B。如果接收端收到非 111 或 000 的数据时,就会知道数据发生了错误,并可纠正 1 位错误(例如将 110、011 或 101 纠正为 111)。这时的编码效率已经降低到了 33.3%。

由上例可以看出,对原有的数据需要附加冗余位才能达到检纠错的功能,同时也牺牲了编码效率。目前,按照编码的构成可将检纠错码分为分组码和卷积码两种。

分组码是将  $k$  个二进制位划分为一组,然后将这  $k$  个二进制位(又称为信息位)按照一定的规则产生  $r$  个二进制冗余位(又称为监督位),最后组成长度为  $n=k+r$  的二进制序列(又称为码组),其编码效率为  $k/n$ 。通常称这种结构的码为  $(n, k)$  码,如图 2-31 所示。

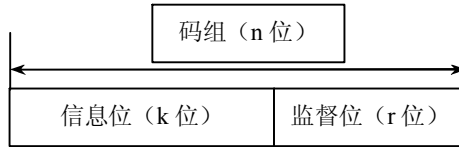


图 2-31 分组码结构

在分组码中，监督位是由信息位根据某种算法得到的。在所有的码组集合中，按照通信双方的协议能够出现的码组称为许用码组，不应该出现的称为禁用码组。当接收端收到了禁用码组，一定说明通信过程中出现了错误，这是分组码能够检纠错的基础。分组码在计算机网络中经常被采用，常见的有奇偶校验码、循环冗余校验码等。

在分组码中，监督位仅仅是监督本组的二进制位。在卷积码中，每组的监督码元不仅与本组的数据有关，还与前面若干组的数据有关，也就是说每个监督位对它前面的若干位进行监督。卷积码需要的运算较大，实现复杂，在前向纠错中应用比较广泛。

限于篇幅，本书只介绍常见的分组码。

## 2. 奇偶校验码

奇偶校验码是一种最简单的检错码。其编码规则是：首先将要传送的信息分组，各组信息后面附加一位校验位，校验位的取值使得整个码字（包含校验位）中“1”的个数为奇数个或偶数个，若为奇数个“1”，则称为奇校验，为偶数个“1”则称为偶校验。

例如，要传输的信息位为 7 位：1010110，现要在信息位末尾增加一个奇校验位，则编码后的二进制串序列为：10101101。

奇偶校验的基本思想是：数据在传输过程中发生错误，只能是“1”变成“0”，或者“0”变成“1”，若有奇数个码元发生错误，就使得整个码组中“1”的个数的奇偶数发生变化。如果在每组信息位后各插入一个冗余位使整个码组中“1”的个数固定为偶数或奇数，这样，在传输中发生一位或奇数位错误，在接收端检测中将因“1”的个数不符合偶数或奇数规律而发现有错。所以奇偶校验码只能发现奇数个错误，不能发现偶数个错误。

奇偶校验又可分为垂直和水平奇偶校验。

(1) 垂直奇偶校验。首先，把数据先以适当的长度划分成数据块（一个数据块包括若干个码组），并把每个码组按顺序一列一列地排列起来，然后对垂直方向的码元进行奇偶校验，得到一行校验位，附加在其他各行之后，然后按列的顺序进行传输，如表 2-1 所示。

表 2-1 垂直奇偶校验

位	码组									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1
2	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
4	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
5	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
偶校验位	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1

待传输数据块共有 10 个码组，每个码组 5 个信息位和 1 个校验位，传输时按列顺序传输（每列包括 5 位信息位和 1 位校验位）。

这种校验方法能检测出传输中的任意奇数个错误，但不能检测出偶数个错误。

(2) 水平奇偶校验。在水平奇偶校验中，把数据先以适当的长度划分成数据块（一个数据块包括若干个码组），并把每个码组按顺序一列一列地排列起来，然后对每个码组相同位的码元进行奇偶校验，得到一列校验位，附加在其他各列之后，然后按列的顺序进行传输，如表 2-2 所示。

表 2-2 水平奇偶校验

位	码组										偶校验位
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
2	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
4	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
5	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0

数据块共有 10 个码组，每个码组共有 5 个信息位。传输时即按列的顺序先传送第 1 码组，然后传送第 2 个码组……，最后传送第 11 列，即校验位码组。

水平奇偶校验不但可以检测数据块内各个字符同一位上的奇数个错误，而且可检测出突发长度  $\leq n$ （每列长度）的突发性错误。因此，它的检错能力比垂直奇偶校验强，但实现电路比较复杂。

(3) 水平垂直奇偶校验。水平垂直奇偶校验方法是水平方向和垂直方向奇偶校验法的联合应用，是将要传输的码组一列一列排列起来，然后对数据块进行水平和垂直两个方向的校验，又称为二维奇偶校验或方阵码，如表 2-3 所示，传输时依然按列顺序进行传输。

表 2-3 水平垂直奇偶校验

位	码组										偶校验位
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
2	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
4	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
5	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
偶校验位	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1

水平垂直奇偶校验除了能够检测出所有行和列中的奇数个错误外，还有更强的检错能力。虽然每行的监督位不能用于检测本行的偶数个错误，但按照列的方向有可能检测出来；同样对

于在每列中出现的偶数个错误也可能被检测出来,也就是说,方阵码有可能检测出大多数的偶数个错误。此外,方阵码对检测突发误码也有一定的适应性:因为突发误码常常成串出现,随后有较长一段无错区间,所以在某个码组中出现多个奇数个或偶数个错误的机会较多,而行校验和列校验的共同作用正适合这种场合。

### 3. 循环冗余校验码

循环冗余码(CRC, Cyclic Redundancy Code)是一种分组码,其主要特性有:

- (1) 一种码中的任何两个许用码组按模 2 相加后,形成的新序列仍为一个许用码组。
- (2) 一个许用码组每次移位后,仍为许用码组。

循环冗余码又称为多项式码,任何一个由二进制数位串组成的代码都可以和一个只含有 0 和 1 两个系数的多项式建立一一对应关系,即任何一个二进制比特流都可以看成是某个一元多项式的系数。

例如二进制串 101101 可以看成是一元多项式  $x^5+x^3+x^2+x^0$  的系数。以  $k+1$  个信息位为系数构成的多项式称为信息多项式  $K(x)$ , 其最高次幂为  $k$  次。以  $r+1$  个监督位构成的多项式称为监督多项式  $R(x)$ , 其最高幂次为  $r$  次。

现在用  $K(x)$  代表欲发送数据信息的码多项式,对码多项式  $K(x)$  左移  $r$  位,即为  $x^r \cdot K(x)$ 。用  $r$  次的生成多项式  $G(x)$  去除  $x^r \cdot K(x)$  (模 2 运算),得:

$$x^r \cdot K(x) / G(x) = C(x) + R(x) / G(x) \quad (2-8)$$

其中,  $C(x)$  为  $x^r \cdot K(x) / G(x)$  的商,  $R(x)$  为  $r$  位的余数。

将 (2-8) 式变换得:

$$x^r \cdot K(x) = C(x) \cdot G(x) + R(x) \quad (2-9)$$

将 (2-9) 式两端同时加上  $R(x)$ , 得

$$x^r \cdot K(x) + R(x) = C(x) \cdot G(x) + R(x) + R(x) \quad (2-10)$$

因为采用模 2 运算,则  $R(x)+R(x)=0$ , 即  $x^r \cdot K(x)+R(x)$  能被  $G(x)$  整除。

因此可以规定发送方发出的码组为:

$$P(x) = x^r \cdot K(x) + R(x) \quad (2-11)$$

假设接收方接收的码组为:

$$P(x) + E(x) \quad (2-12)$$

$E(x)$  为错误样本,当  $E(x)$  为 0 时,接收方收到的码组为  $P(x)$ , 能被  $G(x)$  除尽。否则当  $P(x)+E(x)$  不能被  $G(x)$  除尽时,则认定  $E(x)$  并非全 0, 传输过程中出现错误。

显然若  $E(x)$  并非全 0, 但它恰好是生成多项式  $G(x)$  的整数倍, 则接收方会把有错的接收数据误认为无错误。 $G(x)$  的选择应使这种出错几率非常小。

CRC 校验具有很强的检错能力, 它的校验能力与  $G(x)$  的构成密切相关。 $G(x)$  的次数越高, 检错能力越强, 目前国际常用的生成多项式有:

$$\text{CRC-12} = x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x^1 + 1$$

$$\text{CRC-16} = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$$

$$\text{CRC-CCITT} = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

$$\text{CRC-32} = x^{32} + x^{26} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

在 CRC 检验中, 由信息位产生监督位的编码过程, 就是已知  $K(x)$  和  $G(x)$ , 完成除法运算求  $R(x)$  的过程。这里的除法指的是模 2 除法, 除法中用到的减法也是模 2 减法, 它和模 2 加法一样, 也是“异或”运算。

假设要计算  $k$  位的信息位  $K(x)$  的校验码, 生成多项式为  $G(x)$ , 计算校验码的算法如下:

(1) 设  $G(x)$  为  $r$  阶, 则在信息位的末尾附加  $r$  个 0, 使帧变为  $k+r$  位, 此时相应的多项式是  $x^r \cdot K(x)$ 。

(2) 按模 2 除法用对应于  $G(x)$  的位串去除对应于  $x^r \cdot K(x)$  的位串。

(3) 将余数与  $x^r \cdot K(x)$  进行异或。结果就是要传送的带校验码的多项式  $P(x)$ 。

假设信息位为 1101011011, 生成多项式  $G(x)=x^4+x+1$ , 计算它的冗余位。

由题意可知: 除数为 10011,  $r=4$ 。

在信息码字后附加 4 个 0 形成的串为 11010110110000, 进行模 2 除法如下:

$$\begin{array}{r}
 1100001010 \\
 10011 \sqrt{11010110110000} \\
 \underline{10011} \phantom{0000} \\
 10011 \phantom{0000} \\
 \underline{10011} \phantom{0000} \\
 00001 \phantom{0000} \\
 \underline{00000} \phantom{0000} \\
 00010 \phantom{0000} \\
 \underline{00000} \phantom{0000} \\
 00101 \phantom{0000} \\
 \underline{00000} \phantom{0000} \\
 01011 \phantom{0000} \\
 \underline{00000} \phantom{0000} \\
 10110 \phantom{0000} \\
 \underline{10011} \phantom{0000} \\
 01010 \phantom{0000} \\
 \underline{00000} \phantom{0000} \\
 10100 \phantom{0000} \\
 \underline{10011} \phantom{0000} \\
 01110 \phantom{0000} \\
 \underline{00000} \phantom{0000} \\
 1110 \text{ (余数)}
 \end{array}$$

得到余数后按  $x^r \cdot K(x) \oplus R(x)$  构成的帧  $P(x)$  为 11010110111110。

采用 CRC 校验后, 其误码率比方块码可再降低 1~3 个数量级; 此外, 随着集成电路工艺的发展, 循环冗余码的产生和校验均有集成电路产品, 发送端能够自动产生 CRC 码, 接收端自动校验, 速度大大提高。因此, CRC 目前广泛应用在计算机和数据通信中。



## 习题 2

### 2-1 名词解释:

- (1) 数据 (2) 信息 (3) 信源 (4) 信宿

(5) 信道 (6) 数据传输速率 (7) 信号传输速率 (8) 信道容量

2-2 什么叫模拟信号？什么叫数字信号？数据有哪几种传输方式？

2-3 按数据传输方向，数据信息在信道上有哪几种通信方式？

2-4 通过基带传输数字信号时采用哪些编码？各有什么特点？

2-5 已知脉冲序列为 0100110，请按上题介绍的编码方案，绘制相应的波形。

2-6 简述频分多路复用技术和时分多路复用技术的概念及特点。

2-7 有几种网络交换方式？各有什么特点？

2-8 分别叙述调幅制（ASK）、调频制（FSK）和调相制（PSK）信号的形成。已知脉冲序列为 1100101，画出 ASK、PSK 和 FSK 信号波形。

2-9 设信息为 7 位，冗余位为 4 位，生成多项式采用  $x^4+x^3+1$ ，试计算传输信息为 1011001 和 1101001 的 CRC 编码。