

第2章 数据通信技术基础

特别说明：本部分的内容是教材中第二章和第三章中的部分内容整合而成的，所以有些图的编号以及例题的编号对应的顺序就没有做调整，各位同学只需要去关注文档中的内容就可以了。

物理层是网络层次模型的最底层，它建立在物理传输介质的基础上，作为系统和通信介质的接口，用来实现数据链路实体之间比特流的透明传输。同时，计算机网络是由数据通信技术和计算机技术相结合发展而来，可见，数据通信技术是计算机网络技术发展的基础。随着计算机技术与通信技术的结合日趋紧密，数据通信作为计算机技术与通信技术相结合的产物，在现代通信领域中正扮演着越来越重要的角色。

本章主要介绍有关数据通信的一些基础知识，包括基本概念和术语、传输介质、编码和调制技术、多路复用技术、数据交换技术等，最后讨论了物理层的设备和接口。通过本章的学习，要掌握数据通信中的基本概念，掌握奈奎斯特和香农定理的应用，了解各种传输介质的特征，理解多路复用技术和交换技术的原理，掌握循环冗余校验码的检错原理。

2.1 数据通信的基本概念

随着社会的发展，人们进行通信的方式不再局限于传统的电话、电报，因为它们不能满足大信息量的需要，而以数据作为信息载体的通信手段正被得到日益广泛的应用。在计算机网络中，数据通信是指在计算机与计算机以及计算机与终端之间的数据信息传送的过程。人们通过字符、数字、语音、图像等数据的传递，可以进行收发电子邮件、共享各种文件、视频聊天等各种通信活动。本节主要介绍有关数据通信的一些基本概念和术语。

2.1.1 信息、数据与信号

在数据通信技术中，信息(information)、数据(data)与信号(signal)是十分重要的概念。正如前面所讲，数据通信的目的是交换信息，而数据是信息的载体，数据又是以信号的形式进行传输的。

1. 数据和信息

数据是任何描述物体、概念、形态的事实、数字、符号和字母,可定义为有意义的实体,涉及到事物的形式。信息一词,也可译成资讯。从通信的意义上理解,主要涉及到数据的内容和解释。

“数据”目前并没有严格的定义，通常是指预先约定的具有某种含义的数字、符号和字母的组合。数据中包含着信息，涉及信息的表现形式，信息可通过解释数据而产生的。从形式上，数据可分为模拟数据和数字数据两种。

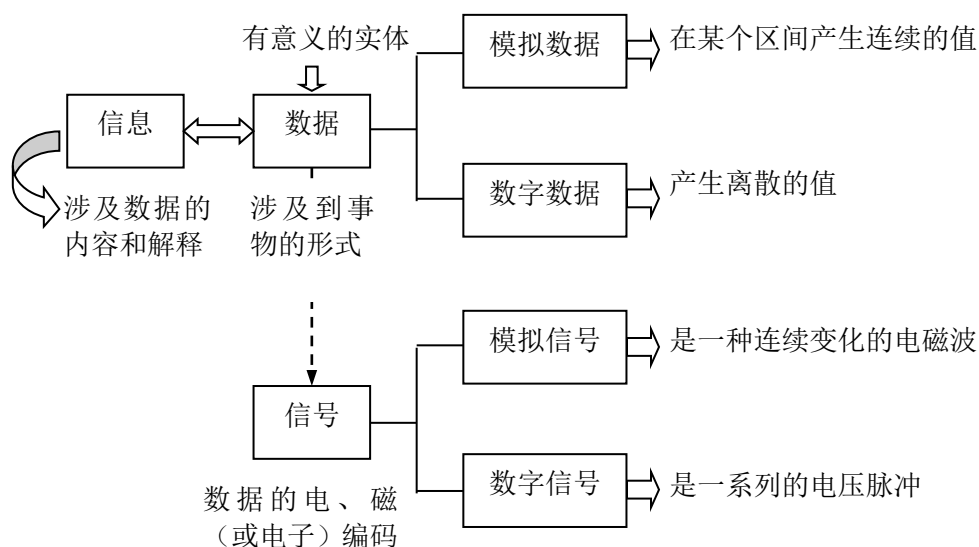


图 2-1 信息、数据和信号等基本概念之间的关系

- 模拟数据——模拟数据的取值是连续的，在现实生活中的数据大多取值是连续的，如声音或视频都是强度连续变化的波形，又如，用传感器采集到的数据包括温度和压力等，都是连续的。是指在某个区间内连续的值。

- 数字数据——数字数据的取值是离散的，如计算机输出的二进制数据只有“0”、“1”两种状态。数字数据比较容易存储、处理和传输，模拟数据经过处理也能变成数字数据。

2. 信号

在数据通信中，数据被转换为适合在通信信道上传输的电磁波编码。这种在信道上传输的电磁波编码叫做信号，所以信号是数据在传输过程中的电磁波的表示形式，和数据的分类类似，信号也分为模拟信号和数字信号两种类型。有关信息、数据和信号等基本概念之间的关系如图 2-1 所示。

模拟信号是指信号的幅度随时间作连续变化的信号。传统电视里的图像和语音信号是模拟信号。传统电话线上传送的电信号是随着通话者的声音大小的变化而变化的，这个变化的电信号无论在时间上或是在幅度上都是连续的，这种信号也是模拟信号。模拟信号无论在时间上和幅值上均是连续变化的，它在一定的范围内可能取任意值。

如果说模拟信号是用一系列连续变化的电磁波或电压信号来表示的，那么数字信号则是用一系列断续变化的电压脉冲(如我们可用恒定的正电压表示二进制数 1,用恒定的负电压表示二进制数 0)，或光脉冲来表示。数字信号在时间上是不连续的、离散性的信号，一般数字脉冲在一个短时间内维持一个固定的值，然后快速变换为另一个值。

模拟信号和数字信号都可以在合适的传输介质上进行传输。我们常用到“信道”一词来表示由（藉）传输介质（以传输介质为基础）构成的用来传输模拟信号或数字信号的通路（path）。由于目前使用的传输介质有多种，它们在传输特性上存在着差别，在后面的章节

中会对此专门介绍。因此，数据传输设备采用不同的信号变换技术，以取得较满意的数据传输质量。

2.1.2 数据通信系统

从对数据通信的定义中可以看出，它包括数据传输和数据传输前后的数据处理两个方面的内容。数据传输是指通过某种方式建立一个数据传输的通道，并将数据以信号的形式在其中传输；数据传输前后的处理可以使数据的传输更加可靠、有效，主要包括数据交换、差错控制、多路复用等。所以，数据通信系统就是完成上述两个部分功能的通信系统。由此看来，对于数据通信系统来说，应该由三个部分构成即发送部分、传输部分（传输媒介）和接收部分，其中传输部分完成数据的传输，发送部分和接收部分完成数据传输前后的处理。数据通信系统的基本模型如图 2-2 所示。

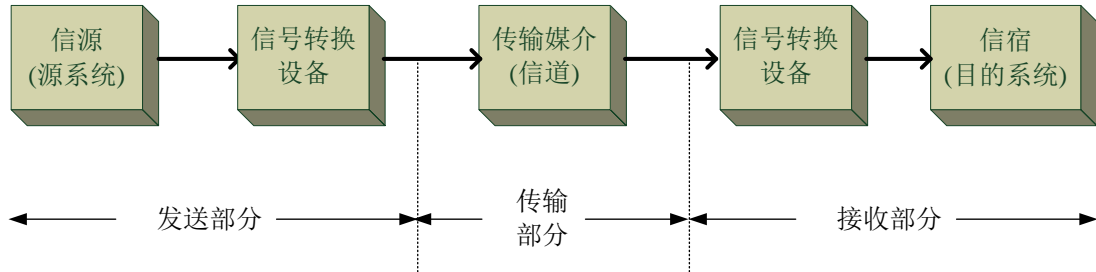


图 2-2 数据通信系统的基本模型

信源主要负责将要处理的原始数据转换成原始的电信号，由于信源发出的原始信号需要进行信号转换后才能够信道中传输。所以，发送部分的信号转换设备负责将原始电信号转换成合适的信道传输信号，通过传输系统的传输，信号到了接收部分，接收部分的信号转换设备负责把收到的信号还原为原始的电信号，然后交由信宿处理，信宿则从收到的信号中判决出数据，如果在整个系统中各个部分都没有出错的情况下，接收到的数据应和发送的数据完全一致。

1. 信源和信宿

信源就是信息的发送端，是发出待传送信息的设备；信宿就是信息的接收端，是接收所传送信息的设备，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

信道是通信双方以传输媒体为基础的传输信息的通道，它是建立在通信线路及其附属设备(如收发设备)上的。该定义似乎与传输媒介一样，但实际上两者并不完全相同。一条通信介质构成的线路上往往可包含多个信道。信道本身也可以是模拟的或数字方式的，用以传输模拟信号的信道叫做模拟信道，用以传输数字信号的信道叫做数字信道。

3. 信号转换设备

其作用是将信源发出的信息转换成适合于在信道上传输的信号，对应不同的信源和信

道, 信号转换设备有不同的组成和变换功能。发送端的信号转换设备可以是编码器或调制器, 接收端的信号转换设备相对应的就是译码器或解调器。

编码器的功能是把信源或其他设备输入的二进制数字序列进行相应的变换, 使之成为其他形式的数字信号或不同形式的模拟信号。编码的目的有两个: 一是将信源输出的信息变换后便于在信道上有效传输, 此为信源编码; 二是将信源输出的信息或经过信源编码后的信息再根据一定规则加入一些冗余码元, 以便在接收端能够正确识别出信号, 降低信号在传输过程中可能出现差错的概率, 提高信息传输的可靠性, 此为信道编码。译码器是在接收端完成编码的反过程。

调制器是把信源或编码器输出的二进制脉冲信号变换(调制)成模拟信号, 以便在模拟信道上进行远距离传输; 解调器的作用是反调制, 即把接收端接收的模拟信号还原为二进制脉冲数字信号。

由于网络中绝大多数信息都是双向传输的, 信源也作信宿, 信宿也作信源; 编码器和译码器并通称为编码译码器; 同样, 调制器和解调器合并称为调制解调器 (MODEM)。

在实际应用中, 典型的数据通信系统的例子如图 2-3 所示。

在该图中, 用户通过拨号上网, 信源即是左边的计算机, 信宿是右边的计算机, 两边的 Modem 承担着信号转换器的功能, 中间的部分则是传输系统。

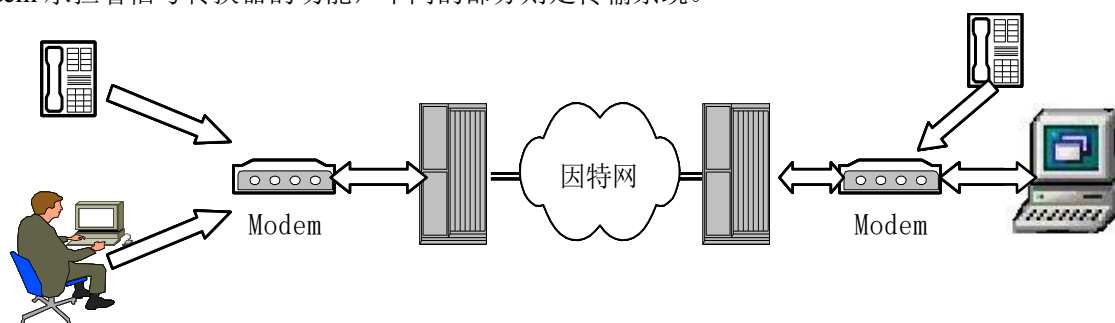


图2-3 用户通过电话线拨号上网

2.1.3 数据通信系统的技术指标

1. 数据传输速率

数据传输速率是衡量数据通信系统能力的主要指标, 主要包括传码速率、传信速率等。

(1) 传码速率

传码速率又称为调制速率、波特率, 记作 N_{Bd} , 是指在数据通信系统中, 每秒钟传输信号码元的个数, 单位是波特 (Baud)。我们在前面介绍过数据和信号的概念, 数据以 0、1 的形式表示, 在传输时通常用某种信号脉冲来表示一个 0、1 或几个 0、1 的组合。这种携带数据信息的信号脉冲称为信号码元。例如, 在图 2-4 中为二电平信号, 用一种波形表示一个

信号码元，一个信号码元携带 1 比特（0 或 1）的数据；图 2-5 为四电平信号，用一种波形表示一个四电平码元，一个信号码元中就会携带 2 比特（00、01、10 或 11）的数据。如信号码元持续的时间为 T 秒，则传码速率为 $1/T$ 波特。

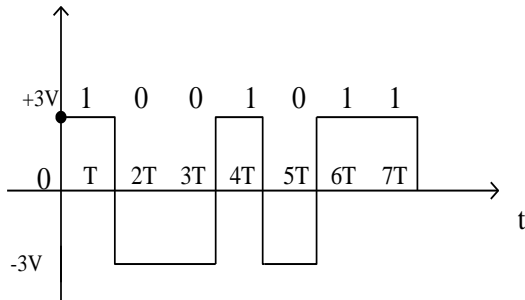


图2-4 二电平信号

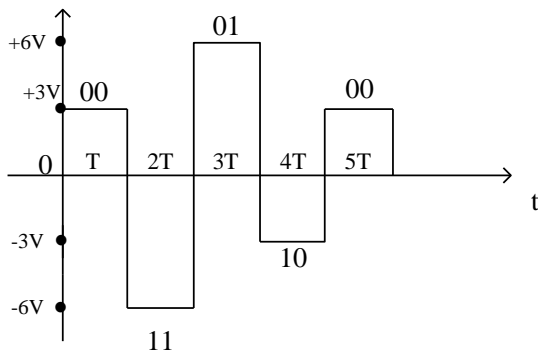


图2-5 四电平信号

（2）传信速率

传信速率又称为比特率，记作 R_b ，是指在数据通信系统中，每秒钟传输二进制码元的个数，单位是比特/秒（bit/s, 或 kbit/s 或 Mbit/s）。

从传信速率的定义中可以看出，它是为了衡量数据通信系统在单位时间内传输的信息量，需要提醒读者的是，虽然两者的单位不同，但是在数值上是有着对应关系的，若是二电平传输，则在一个信号码元中包含一个二进制码元，即二者在数值上是相等的；若是多电平（ M 电平）传输，则二者在数值上有 $R_b = N_{Bd} \times \log_2 M$ 的关系。

[例2-1]若信号码元持续时间为 1×10^{-4} 秒，试问传送8电平信号，则传码速率和传信速率各是多少？

解：由于 $T = 1 \times 10^{-4}$ 秒，所以传码速率 $N_{Bd} = 1/T = 10000$ 波特

由于传送的信号是8电平，所以， $M = 8$ 。

则传信速率 $R_b = N_{Bd} \log_2 M = 30000 \text{ bit/s}$ 。

2. 信道带宽

“带宽” (bandwidth)，本来是指某个信号具有的频带宽度。我们知道，一个特定的信号往往是由许多不同的频率成份组成的。因此一个信号的带宽是指该信号的各种不同频率成份所占据的频率范围。例如，在传统的通信线路上传送的电话信号的标准带宽是 3.1kHz，

从 300Hz --3400Hz，即语音的主要成分的频率范围，其单位是赫兹(或千赫、兆赫)。

在过去很长的一段时间，通信的主干线路都是用来传送模拟信号，因此，表示通信线路允许通过的信号频带范围就称为线路的带宽。当通信线路用于传送数字信号时，数据传信速率就应当成为数据通信系统最重要的指标。但人们仍然愿意将“带宽”作为数字信道的“数据传信速率”的同义语，尽管这种叫法不太严格。所以此时带宽的单位等同于上面所介绍的数据传信速率，是比特/秒 (bit/s 或 kbit/s 或 Mbit/s)。

3. 误码率和误组率

数据传输的目的确保在接收端能恢复原始发送的二进制数字信号序列。但在传输过程中，不可避免地会受到噪声和外界的干扰，致使出现差错。通常，采用误码率、误组率作为衡量数据传输信道的质量指标。

(1) 误码率

误码率 P_e 的定义：指在一定时间 (ITU-T 规定至少 15 分钟) 内接收到出错的比特数 e_1 与总的传输比特数 e_2 之比，它是评定数据传输设备和信道质量的一项基本指标。

$$P_e = \frac{e_1}{e_2} \times 100\% \quad (2-1)$$

(2) 误组率

由于实际的传输信道及通信设备存在随机性差错与突发性差错，在用数据块或帧结构进行数据检验和重发纠错的差错控制方式下，误码率尚不能确切地反映其差错所造成的影响，例如，在一块或一帧中的 1 比特差错和几比特差错都导致数据块 (或帧) 出错，因此，采用误组率 P_B 来衡量差错对通信的影响更符合实际。

$$P_B = \frac{b_1}{b_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中， b_1 为接收出错的组数， b_0 为总的传输组数。

误组率在一些采用块或帧检验以及重发纠错的应用中能反映重发的概率，从而也能反映出该数据链路的传输效率。

[例2-2]在9600bit/s的线路上，进行一小时的连续传输，测试结果为有150比特的差错，问该数据通信系统的误码率是多少？

解：由于 $P_e = \frac{e_1}{e_2} \times 100\%$

$e_1=150\text{bit}$ ，1小时=3600秒

$e_2=9600\text{bit/s} \times 3600\text{s}=34560000\text{bit}$ 。

所以误码率 $P_e=150/34560000=4.34 \times 10^{-6}$

4. 时延

在实际的数据通信系统中，我们经常会将传输的基本单位定义为分组或者报文，在数据交换技术这个小节会讲到它们的概念，在这里，读者只需知道分组或者报文都是由若干个比

特组成的就行了。时延(delay)是指一个报文或分组从一条链路的一端传送到另一端所需的时间。需要注意的是,时延是由以下几个不同的部分组成的:

(1)发送时延:是节点在发送数据时使数据块(一个分组或者一个报文)从节点进入到传输媒体所需要的时间,也就是从数据块的第一个比特开始发送算起,到最后一个比特发送到传输媒介完毕所需的时间。

发送时延又称为传输时延,它的计算公式是:

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据块长度}(\text{bit})}{\text{信道带宽}(\text{b/s})} \quad (2-3)$$

信道带宽就是数据在信道 L 的发送速率,它也常称为数据在信道上的传输速率,即前面所讲到的传信速率。

(2)传播时延:传播时延是电磁波在信道中需要传播一定的距离而花费的时间。该时延的计算公式是:

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度}(m)}{\text{电磁波在信道上的传播速度}(m/s)} \quad (2-4)$$

电磁波在自由空间的传播速率是光速,即 $3 \times 10^5 \text{km/s}$,电磁波在有线传输媒体中的传播速率比在自由空间要略低一些:如在铜线电缆中的传播速率约为 $2.3 \times 10^5 \text{km/s}$,在光纤中的传播速率约为 $2 \times 10^5 \text{km/s}$ 。

从以上讨论可以看出,数据发送速率(即带宽),和电磁波在信道上的传播速率是两个完全不同的概念,因此不能将发送时延和传播时延混为一谈。

(3)处理时延:这是数据在交换节点为存储转发而进行一些必要处理所花费的时间。在节点缓存队列中分组排队所经历的时延是处理时延中的重要组成部分。因此,处理时延的长短往往取决于数据通信系统中当时的通信量。当通信量很大时,还有可能会发生队列溢出,使分组丢失。

这样,数据经历的总时延就是以上三种时延之和:

$$\text{总时延} = \text{传播时延} + \text{发送时延} + \text{处理时延} \quad (2-5)$$

[例2-3]若AB两台计算机之间的距离为1000km,假定在电缆内信号的传播速度是 $2 \times 10^8 \text{m/s}$,试对下列类型的链路分别计算发送时延和传播时延。

(1)数据块长度为 10^8bit ,数据发送速率为 1Mb/s ;

(2)数据块长度为 1000bit ,数据发送速率为 1Gbit/s

解: (1)发送时延=数据块长度/信道带宽= $10^8 \text{bit} / (1 \text{Mb/s}) = 100 \text{s}$

传播时延=信道长度/信号的传播速度= $1000 \text{km} / (2 \times 10^8 \text{m/s}) = 5 \text{ms}$

(2)发送时延=数据块长度/信道带宽= $1000 \text{bit} / (1 \text{Gb/s}) = 1 \mu\text{s}$

传播时延=信道长度/信号的传播速度= $1000 \text{km} / (2 \times 10^8 \text{m/s}) = 5 \text{ms}$

从该例题中我们可以看出,若只考虑发送时延和传播时延的话,不能笼统地说哪一种时延占的比例较大,应该具体情况具体分析,在第一种情况中,发送时延占了主导地位,在第二种情况中,传播时延反而占的比重较大。所以并非信道带宽越大,数据在信道上跑的速度越快,在AB两台设备之间传输数据时花费的总时间越少,总时间(即总时延)是由传播时延+发送时延+处理时延的和。

5. 信道容量

通信系统基础设施的投资费用很大,在总投资额中传输线路的投资比例通常占到 80%。如何高效地使用带宽,提高信道的利用率,一直是研究的重要课题。

任何实用的传输通道都是有限定的带宽,所以信道容量是指在给定条件,给定通信路径(或信道)上的数据传输速率。

(1) 奈奎斯特(Nyquist)定理 1942 年, H.Nyquist 证明,任意一个信号如果通过带宽为 W (Hz) 的理想低通滤波器,当每秒取样 $2W$ 次,就可完整地重现该滤波过的信号。

在理想的条件下,即无噪声有限带宽为 W 的信道,其最大的数据传输速率 C (即信道容量)为:

$$C = 2W \log_2 M \quad (2-6)$$

这就是著名的奈奎斯特(Nyquist)公式,也称奈奎斯特(Nyquist)定理,或取样定理。式中 M 是电平的个数。

如何应用奈奎斯特(Nyquist)公式,现举例如下:

[例 2-4] 一个无噪声的 3000Hz 信道,试问传送二进制信号,可允许的最大的数据传输速率是多少?

解: 由于传送的二进制信号是“1”“0”两个电平,所以, $M=2$ 。 $W=3000\text{Hz}$,

则信道容量,即数据传输速率 $C = 2W \log_2 M = 6000 \text{ bit/s}$ 。

[例 2-5] 一个无噪声的话音带宽为 4000Hz,采用 8 相调制解调器传送二进制信号,试问信道容量是多少?

解: 由于 8 相调制解调器传送二进制信号的离散信号数为 8,即 $M=8$ 。

则信道容量,即数据传输速率 $C = 2 \times 4000 \log_2 8 = 24 \text{ kbit/s}$ 。

(2) 仙农(Shannon)定理

1948 年, Claude Shannon 进而给出了在有噪声的环境中,信道容量将与信噪功率比有关。根据仙农(Shannon)定理,在给定带宽 W (Hz),信噪功率比 S/N 的信道,则最大数据传输速率 C 为

$$C = W \log_2 (1+S/N) \quad (2-7)$$

式中 S/N 常用分贝形式来表示,而公式中的 S/N 为信噪功率比,其计算公式如下:

$$(S/N) \text{ db} = 10 \log_{10} (\text{信号功率 } P_1 / \text{噪声功率 } P_2) \quad (2-8)$$

[例 2-6] 一个数字信号通过两种物理状态经信噪比为 20db 的 3kHz 带宽信道传送,其数

据率不会超过多少？

解：按 Shannon 定理：在信噪比为 20db 的信道上，信道最大容量为：

$$C=W\log_2(1+S/N)$$

已知信噪比电平为 20db，则信噪功率比 $S/N = 100$

$$C = 3000 \times \log_2(1+100) = 3000 \times 6.66 = 19.98 \text{ kbit/s}$$

数据率不会超过 19.98 kbit/s

由仙农定律可知：在信道容量不变时增加带宽就允许降低信噪比。

也就是说，如果通信系统扩展到宽带，就可以在保持误码率性能以及保证信道容量达到预期水平的情况下降低信噪比（S/N）。

2.2 传输介质

在一个数据通信系统中，连接发送部分和接收部分之间的物理通路称为传输介质，也称为传输媒体或传输媒介。传输介质可分为两大类，即有线的传输介质和无线的传输介质。在有线的传输介质中，电磁波沿着固体媒体铜线或光纤向前传播，而无线的传输介质就是指利用大气和外层空间作为传播电磁波的通路。有线传输介质主要有双绞线、同轴电缆和光缆等，无线传输介质主要包括无线电波、地面微波、卫星微波、红外线等。下面将对这主要的 7 种有线和无线的传输介质逐一介绍。

2.2.1 双绞线

双绞线（Twisted Pair, TP）是目前使用最广泛、价格也较低廉的有线传输介质，它是由两根互相绝缘的铜导线并排放在一起，然后用规则的方法绞合起来所构成的；导线的典型直径在 0.4—1.4mm 之间，采用两两相绞的绞线技术可以抵消相邻线对之间的电磁干扰和减少近端串扰。

为了进一步提高双绞线的抗干扰能力，可以在双绞线的外面加上一个用金属丝编织的屏蔽层，这就是屏蔽双绞线，简称为 STP(Shielded Twisted Pair, STP)。它的价格比无屏蔽双绞线(Unshielded Twisted Pair, UTP)要贵一些。屏蔽双绞线和无屏蔽双绞线的结构如图 2-6 所示。

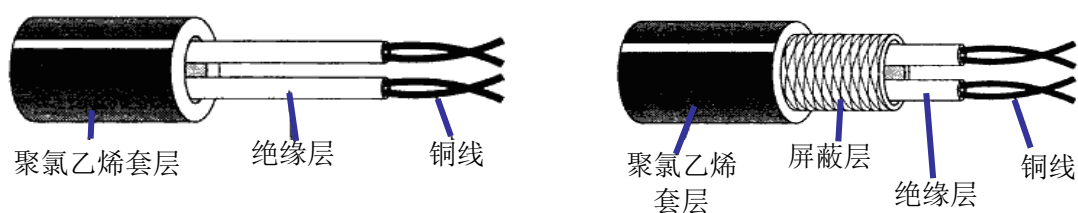


图 2-6 无屏蔽双绞线和屏蔽双绞线的示意图

无屏蔽双绞线具有成本低、重量轻、易弯曲、尺寸小、适合于结构化综合布线等优点，所以在局域网中得到了充分的利用。但是它也存在传输时有信息辐射容易被窃听的缺点，所以，在对一些信息保密级别要求高的场合，还必须采取一些辅助屏蔽措施。相反，屏蔽双绞线具有抗电磁干扰强、传输质量高等优点，但是也存在接地要求高、安装复杂、弯曲半径大、成本高等缺点，所以，在实际中使用的并不普遍。

2.2.2 同轴电缆

同轴电缆是另外一种常见的有线传输介质，其结构如图 2-7 所示。由内导体铜质芯线（股实心线或多股绞合线）、绝缘层、网状编织的外导体屏蔽层以及坚硬的绝缘塑料外层组成。由于外导体屏蔽层的作用，同轴电缆具有较好的抗干扰特性（特别是高频段），适合高速数据传输。

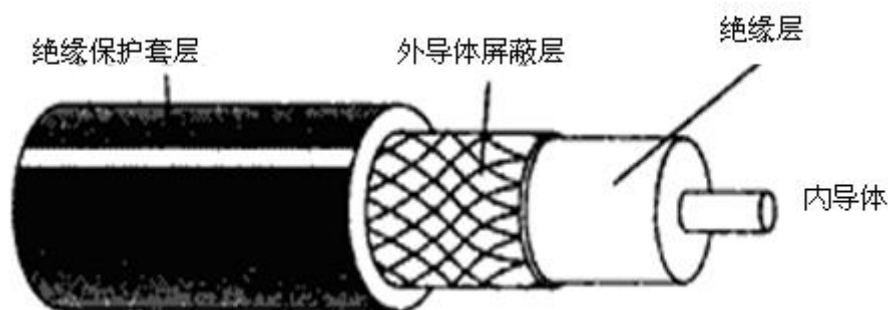


图 2-7 同轴电缆结构图

在计算机网络中所使用的同轴电缆分为粗缆和细缆两种，二者结构是相似的，只是直径不同。粗缆传输距离较远，适合于比较大型的局域网，传输损耗较小，可靠性较高。由于粗缆在安装时不需要切断电缆，所以可以根据需要灵活调整计算机接入网络的位置。但是粗缆在使用时必须安装收发器和收发器电缆，安装难度较大，总体成本较高。细缆安装比较简单，造价也较低，但是传输距离较短，一般不超过 185 米。由于安装过程中需要切断电缆，两头装上基本网络连接头，然后接在 T 型连接器两端，所以会带来接触不良的隐患，也是目前局域网常见的故障之一。

2.2.3 光纤

光纤（Optical Fiber）是一种光传输介质，由于可见光的频率高达 10^{14} MHz，因此光纤传输系统具有足够的传输带宽。光缆是由一束光纤组装而成，用于传输调制到光载频上的已调信号。光缆的结构示意图如图2-8所示。

光纤通常由非常透明的石英玻璃拉成细丝，主要由纤芯和包层构成双层通信圆柱体，其直径（含包层）仅0.2mm。因此，必须加上加强芯和填充物，可增加其机械强度。必要时可接入远供电源线，最后加封包带层和外护套，以满足工程施工和应用的强度要求。光纤通信衰

耗小，距离长，抗干扰能力强，传输容量大，保密性好。

实际上，当光波按一定的入射角注入光纤后，在纤芯与包层的界面上会不断地发生全反射，如图 2-9 所示。因此，含有许多条不同角度入射的光线在一条光纤中传输，这种光纤称之为多模光纤（MMF），如图 2-10（a）所示。若光纤的直径足够细，如使用一个光的波长，则光纤能使光线一直向前传播，这种光纤则称单模光纤（SMF），如图 2-10(b)所示。多模光纤直径较大，不同波长和相位的光束沿光纤壁不停地反射着向前传输，造成色散，限制了两个中继器之间的传输距离和带宽，多模光纤的带宽约为 2.5Gbps。单模光纤的直径较细，光在其中直线传播，很少反射，所以色散减小、带宽增加，传输距离也得到加长。但是与之配套的光端设备价格较高，单模光纤的带宽超过 10Gbps。

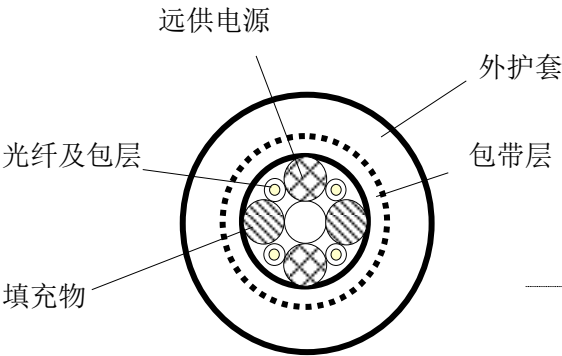


图2-8 光缆结构剖面图

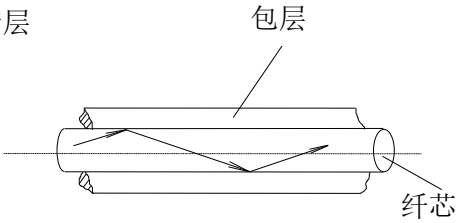


图2-9 光波在纤芯中传播

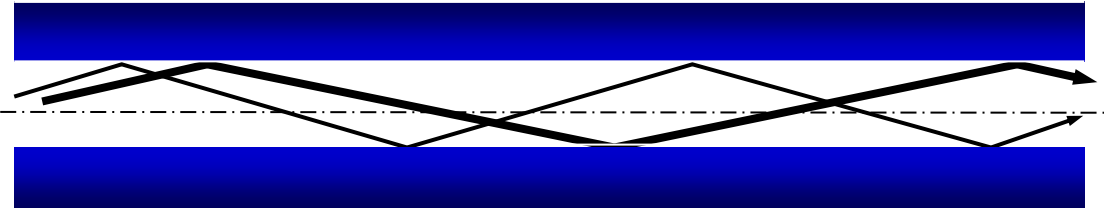


图2-10 (a) 多模光纤

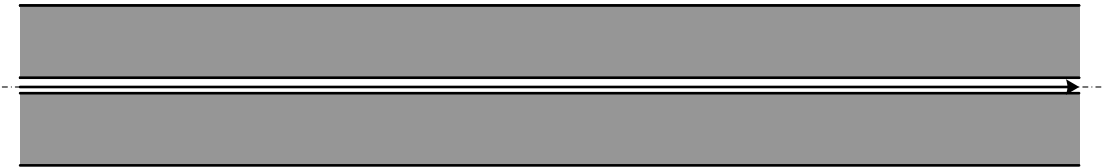


图2-10 (b) 单模光纤

光纤作传输介质用于通信，主要优点是：

（1）尽管由于光纤对不同频率的光有不同的损耗，使频带宽度受到影响，但在最低损耗区的频带宽度也可达30000GHz。目前单个光源的带宽只占了其中很小的一部分(多模光纤的频带约几百兆赫，好的单模光纤可达10GHz以上)，采用先进的相干光通信可以在30000GHz范围内安排2000个光载波，进行波分复用，可以容纳上百万个

频道。

(2) 光纤不受电磁干扰和静电干扰等影响，即使在同一光缆中，各光纤间几乎没有干扰；易于保密；光纤的衰减频率特性平坦，对各频率的传输损耗和色散几乎相同，因而接收端或中继站不必采取幅度和时延等均衡措施；

(3) 光纤的原料为石英玻璃砂（即二氧化硅），原料丰富，取之不尽。相对双绞线、同轴电缆，每公里的单价较贵。随着生产成本的日益降低，光纤必将成为本世纪的全球信息基础设施的主要传输介质。

2.2.4 无线的传输介质

1. 无线电波

无线电波是一个广义的术语，从含义上讲，无线电波是全向传播，而微波则是定向传播。无线电波的频段分配见表 2-1。

无线电波的不同频段可用于不同的无线通信方式。

(1) 频率范围 3~30MHz，通称为高频（HF）段，可用于短波通信。它是利用地面发射无线电波，通过电离层的多次反射到达接收端的一种通信方式。由于电离层随季节、昼夜以及太阳黑子活动情况而变化，所以通信质量难以达到稳定。当用作数据传输时，在邻近的传输码元将会引起干扰。

(2) 频率范围 30~300 MHz 为甚高频（VHF）段，频率范围 300~3000 MHz 为特高频（UHF）段，电磁波可穿过电离层，不会因反射而引起干扰，可用于数据通信。例如，夏威夷 ALOHA 系统，使用两个频率：上行频率为 407.35MHz,下行频率为 413.35MHz，两个信道的带宽均为 100KHz，可传输数据率为 9600 bit/s。传输是以分组形式进行的，所以也称 ALOHA 系统为无线分组通信（Packet Radio Communication）。

此外，蜂窝无线电移动通信（Cellular Radio Mobile Communication)系统得到了广泛的应用。例如，蜂窝式移动电话模拟系统有多种制式提供服务，其中 TACS 制式，基站发射频段为 935~960MHz，移动台发射频率范围为 890~915 MHz，收发间隔 45MHz,频道间隔为 25 KHz，可有 1000 个频道用于通话。另一种是蜂窝式移动电话数字系统，如 GSM，基于数字射频调制技术，时分多址或码分多址技术，提高系统容量和传送质量，有利于引入 ISDN 业务。

表 2-1 无线电波频段和波段名称

频段名称	频率范围	波段名称	波长范围
极低频（ELF）	3~30Hz	极长波	$10^8 \sim 10^7\text{m}$
超低频（SLF）	30~300Hz	超长波	$10^7 \sim 10^6\text{m}$
特低频（ULF）	300~3000Hz	特长波	$10^6 \sim 10^5\text{m}$
甚低频（VLF）	3~30Khz	甚长波	$10^5 \sim 10^4\text{m}$

低频 (LF)	30~300Khz	长波	$10^4\sim 10^3\text{m}$
中频 (MF)	300~3000Khz	中波	$10^3\sim 10^2\text{m}$
高频 (HF)	3~30MHz	短波	$10^2\sim 10\text{m}$
甚高频 (VHF)	30~300MHz	超短波	$10\sim 1\text{m}$
特高频 (UHF)	300~3000MHz	分米波	$1\sim 0.1\text{m}$
超高频 (SHF)	3~30Ghz	厘米波	$100\sim 1\text{cm}$
极高频 (EHF)	30~300Ghz	毫米波	$100\sim 10\text{mm}$
至高频 (THF)	300~3000Ghz	亚毫米波	$1\sim 0.1\text{mm}$

与无线电波频段相对应的波段名称及波长范围中，分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波可统称为微波。

2.地面微波

地面微波的工作频率范围一般为 $1\sim 20\text{GHz}$ ，它是利用无线电波在对流层的视距范围内进行传输。由于受到地形和天线高度的限制，两微波站间的通信距离一般为 $30\sim 50\text{km}$ 。当用于长途传输时，必须架设多个微波中继站，每个中继站的主要功能是变频和放大，这种通信方式称为微波接力通信，如图 2-11 所示。

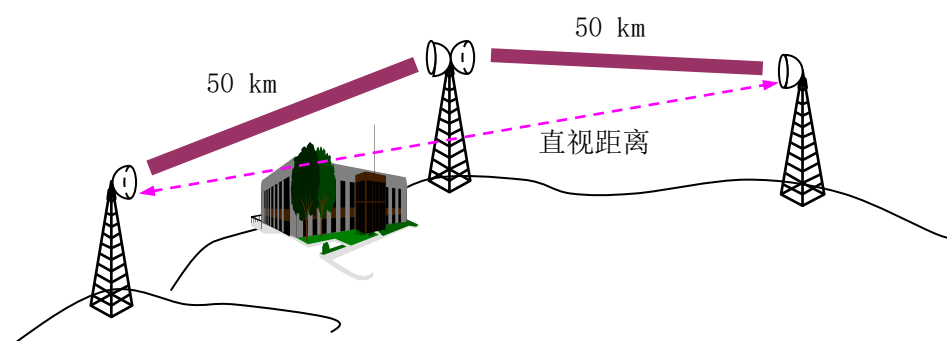


图 2-11 地面微波接力通信

微波通信可传输电话、电报、图象、数据等信息，其主要特点是：

(1) 微波波段频率高，其通信信道的容量大，传输质量上较平稳，但遇到雨雪天气时会增加损耗；

(2) 与电缆通信相比，微波接力信道能通过有线线路难于跨越或不易架设的地区（如高山或深水），故有较大的灵活性，抗灾能力也较强；但通信隐蔽性和保密性不如电缆通信。

3. 卫星微波

通信卫星是现代电信的重要通信设施之一，它被置于地球赤道上空 35784km 处的对地静止的轨道上，与地球保持相同的转动周期，故称为同步通信卫星。实际上，它是一个悬空的微波中继站，用于连接两个或多个地面微波发射/接收设备（称之为卫星通信地球站，简称为地球站），如图 2-12 所示。

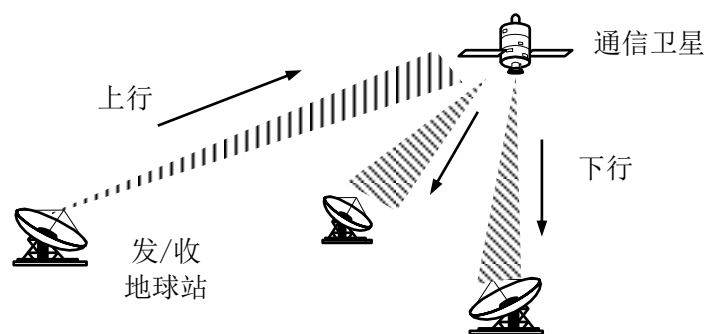


图 2-12 卫星微波中继通信

卫星通信是利用同步通信卫星作为中继站，接收地球地面站送出的上行频段信号，然后以下行频段信号转发到其它地球站的一种通信方式。经卫星一跳（hop），可连通地面最长达 1.3 万公里的两个地球站间的通信。

卫星微波通信的主要特点是：

- （1）通信覆盖区域广，距离远；
- （2）从卫星到地球站是广播型信道，易于实现多址传输；
- （3）通信卫星本身和发射卫星的火箭费用很高，且受电源和元器件寿命的限制等因素，同步卫星的使用寿命一般多则 7~8 年，少则 4~5 年；
- （4）卫星通信的传输时延大，一跳的传播时延约为 270ms 左右，因此，利用卫星微波作数据传输时，必须要考虑这一特点。

4. 红外线技术

红外线（infrared）技术已经在计算机通信中得到了应用，例如两台笔记本电脑对着红外接口，可传输文件。红外线链路只需一对收发器，调制不相干的红外光（ 10^{12} - 10^{14} Hz），在视线距离的范围内传输，具有很强的方向性，可防止窃听、插入数据等，但对环境（如雨、雾）干扰特别敏感。

2.3 多路复用技术

我们知道，在整个通信工程的投资成本中传输媒体占有相当大的比重，传输媒体由于资源有限，制造成本增加，即使采用原料丰富的光纤线路，但铺设费用也在增长。其投资在整个通信网络占有的比重越来越大。尤其是有线传输媒体，对于无线传输媒体来说，有限的可用频率是一种非常宝贵的通信资源。因此，如何提高传输媒体的利用率，则是研究数据通信

系统的一个不可忽视的重要内容。

信道复用技术是指在一条传输信道中传输多路信号,以提高传输媒体利用率的技术。在实际中经常用到的多路复用技术有:时分复用(TDM, Time Division Multiplexing)、频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)、码分复用(CDM, Coding Division Multiplexing)和波分复用(WDM, Wave Division Multiplexing)等。下面就分别来介绍这几种复用技术。

2.3.1 频分复用

任何信号只占据一个宽度有限的频率范围,而在实际应用中,一个信道可以被利用的频率比一个信号的频率宽得多,因而可以利用频率分隔的方式来实现多路复用。

FDM是利用频率分割方式来实现多路复用,传统的多路载波电话系统就是一种典型的频分多路复用系统。它是利用频率变换或调制的方法,将若干路信号搬移到频谱的不同位置,相邻两路的频谱之间留有一定的频率间隔,这样排列起来的信号就形成了一个频分多路复用信号。它将被发送设备发送出去,传输到接收端以后,利用接收滤波器再把各路信号区分开来。这种方法起源于电话系统,我们就利用电话系统这个例子来说明频分多路复用的原理。

我们知道,一路电话的标准频带是0.3KHz至3.4KHz,高于3.4KHz和低于0.3KHz的频率分量都将被衰减掉(这对于语音的清晰度和自然度的影响都很小,不会令人不满意)。所有电话信号的频带本来都是一样的,即0.3~3.4KHz。若在一对导线上传输若干路这样的电话信号,即它们所占用的频段是一样的,接收端将无法把它们分开。若利用频率变换,将三路电话信号搬到频段的不同位置,如图2-18所示这样,就形成了一个带宽为12KHz的频分多路复用信号。图中一路电话信号共占有4KHz的带宽。由于每路电话信号占有不同的频带。到达接收端后,就可以将各路电话信号用滤波器区分开。由此可见,信道的带宽越大,容纳的电话路数就会越多。

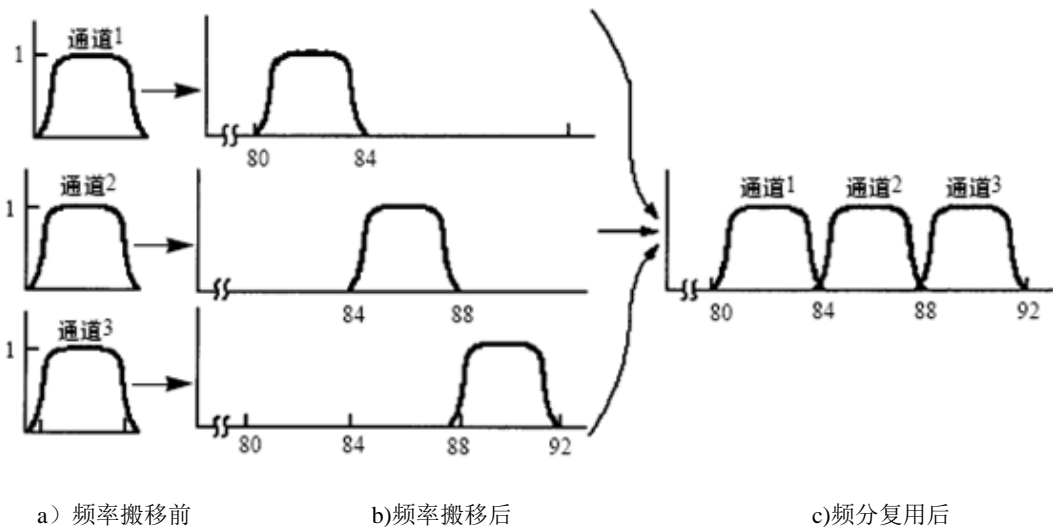


图2-18 使用频分复用技术的多路载波电话系统

由前所述,尽管数字化技术的发展迅速,利用软传输介质的无线电通信、微波通信、卫星通信以及移动通信中,仍然少不了使用频分复用技术。

2.3.2 时分复用

时分复用是利用时间分片方式来实现传输信道的多路复用。从如何分配传输介质资源的观点出发，时分多路复用又可分为两种：

1. 静态时分复用

静态时分复用是一种固定分配资源的方式，即将多个用户终端的数据信号分别置于预定的时隙（TS，time slot）内传输，如图所示。不论用户有无数据发送，其分配关系是固定的，即使图中斜线部分时隙无数据发送，此时其它用户也不得占用。这种方式的发、收之间周期性地依次重复传送数据，且保持严格的同步。所以又称为同步时分复用。使用这种方式时，高速的传输介质容量（即线路可允许的数据速率）是等于各个低速用户终端的数据率之和。

例如，设线路传输速率为 19.2 Kbit/s，若用户终端数 $n = 4$ ，则采用静态时分复用方式时，传输的循环周期 $T = \boxed{\quad}$ ，其中 t_i 表示第 i 个用户所用的时隙。

如图 2-19（a）可见，每个用户的平均数据速率可达 4800 bit/s。这种方式构成的设备，常称之为复用器（MUX，MultipleXer）

2. 动态时分复用

动态时分复用又称异步时分复用，或称统计时分复用（STDM，Statistical Time Division Multiple），是一种按需分配媒体资源的方式，也就是说，只有当用户有数据要传输时才分配资源，若用户暂停发送数据时，就不分配，如图 2-19（b）所示。由此可知，动态时分复用方式可以提高线路传输的利用率，这种方式特别适合于计算机通信中突发性或断续性的应用环境。基于这种方式构成的设备，常称之为集中器（concentrator）；分组交换设备及分组型终端设备也采用了这种工作机制。

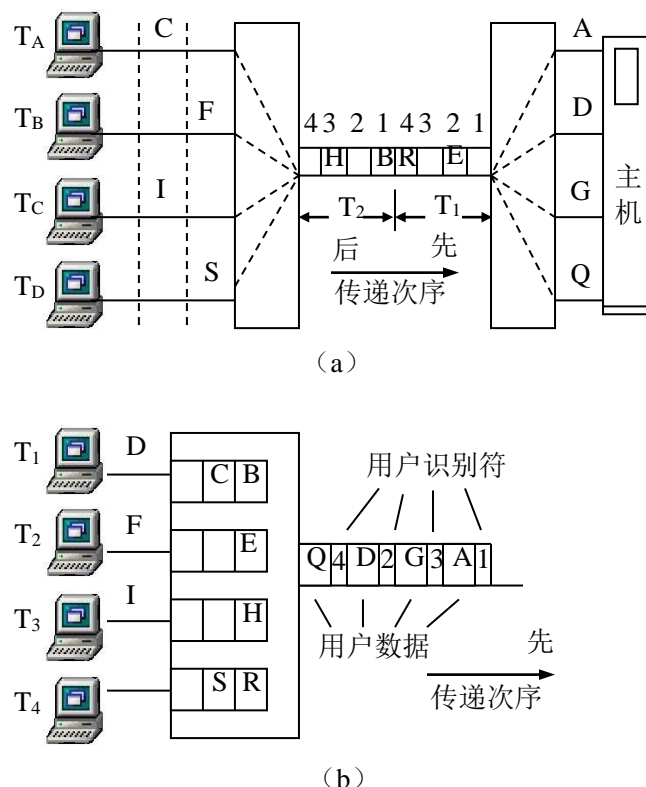


图 2-19 (a) 静态时分复用, (b) 动态时分复用

从图 (a) 和 (b) 比较可见, 当采用动态时分复用时, 每个用户的数据传输速率可高于平均速率, 最高可达到线路传输速率 19.2Kbit/s。但动态时分复用方式在各个线路接口处应采取必要的技术措施:

- 设置缓冲区, 按需要用于存储已到达的, 而尚未发出的数据单元;
- 设置流量控制, 以利于缓和用户争用资源而引发的冲突。

在动态时分复用方式中, 每个用户的数据单元在一条线路上互相交织着传输, 为了便于接收端能区分其归属, 必须在所传数据单元前附加用户识别标志, 并对所传数据单元加以编号。这种机理就象把传输信道分成了若干子信道一样, 这种信道通常称之为逻辑信道(Logical Channel)。每个子信道可用相应的号码表示, 称作逻辑信道号。逻辑信道号作为传输线路的一种资源, 可由网中分组交换机或分组型终端根据数据用户的通信要求予以动态地分配。逻辑信道为用户提供了独立的数据流通路, 对同一个用户, 各次通信可分配不同的逻辑信道号。

2.3.3 码分复用

码分复用又称为码分多址复用 (CDMA, Code Division Multiple Access), 是蜂窝移动通信中迅速发展的一种信号处理方式。在第2代移动通信中, GSM (全球通) 采用了时分多址 (TDMA, Time Division Multiple Access) 技术, 依据帧的属性来分配信道, 将整个信道按TDM (静态) 和按ALOHA (动态) 方法分配给联网的各个站点, 可看作是一种强制性的信道分配方法, 结构复杂。而CDMA则完全不同, 它允许所有站点同时在整个频段上进行传

输，采用扩频（Spread Spectrum）编码原理对同时的多路传输加以识别。

CDMA的关键就是在多重线性叠加的信号中能提取所需的信号，对其它的信号当作随机噪声丢弃。在CDMA中，每比特时间被分成 m 个切片（chip），通常，每比特可有64个或128个切片。

每个站点被指定一个唯一的 m 位代码或切片序列（chip sequence）。当发送比特1时，站点送出的是切片序列，若发送比特0时，站点送出的是切片序列的补码。为简单说明其工作原理，现设每比特含8个切片。假设某站点的切片序列为00011011，在信道上传输的切片序列00011011表示发送了比特1，而其补码11100100则表示发送了比特0。显然，CDMA要求的带宽增加了 m 倍。例如，1.25Mhz的带宽给100个站点来共享，在使用FDM方法时，每个站点传输速率只能为12.5 kbits/s（假定1 bit/Hz）；当使用CDMA技术时，每个站点能使用1.25Mhz的全部带宽，切片速率则为1.25M片/秒。因此，CDMA每站的切片只要小于100片/秒，其有效带宽就可高出FDM。

在接收端，若要从信号中提取单个站点的比特流，必须事先知道该站点的切片序列。通过计算收到的切片序列（各站发送的线性总和）和待还原站点的切片序列的内标积，就可导出比特流。

2.3.4 波分复用

波分复用(WDM)是在光纤成缆的基础上实现的大容量传输技术。第一代光纤使用 0.8 波长的激光器，传输率可达 280Mbit/s。目前使用了第 4 代掺铒光放大器(EDFA:Erbium-Doped Fiber Amplifier)的单模光纤，数据传输速率已达 10-20Gbit/s。

采用波分复用技术（如图 2-20）后，这种技术在一根光纤上使用不同的波长传输多种光

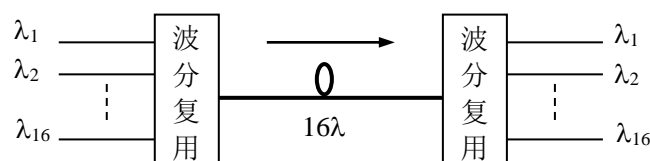


图 2-20 波分复用 (WDM)

信号。单纤可传送 16 种波长，每一波长速率为 2.5Gbit/s，则构成 40Gbit/s 的传输系统。

密集波分复用（DWDM）一词经常被用来描述支持巨大数量信道的系统，“密集”没有明确的定义。例如，100GHz（通道间隔） 40CH（通道数）的DWDM模块采用干涉滤波器技术，其功能是将满足ITU波长的光信号分开（解复用）或将不同波长的光信号合成（复用）至一根光纤上，可支持100万个话音和1500个视频信道。

2.4 数据交换技术

在大量用户（人或计算机）群体之间互相要求通信时，如何有效地进行接续？实践表明，

采用交换的概念是一种有效且经济的解决办法。例如，数据经过编码后要在通信线路上传输，最简单的形式是用传输介质将两个端点直接连接起来进行数据传输。但是，每个通信系统都采用把收发两端直接相连的形式是不可能的。一般要通过一个由多个节点组成的中间网络来把数据从源点转发到目的点，以此实现通信。这个中间网络不关心所传输数据的内容，而只是为这些数据从一个节点到另一个节点直至到达目的点提供交换的功能。因此，这个中间网络也叫交换网络，组成交换网络的节点叫交换节点。交换节点泛指通信网内各类交换机，它是由交换网络（SN，Switching Network）、通信接口（用户接口、中继接口等）、控制单元以及信令单元等部分所组成，如图 2-21 所示。

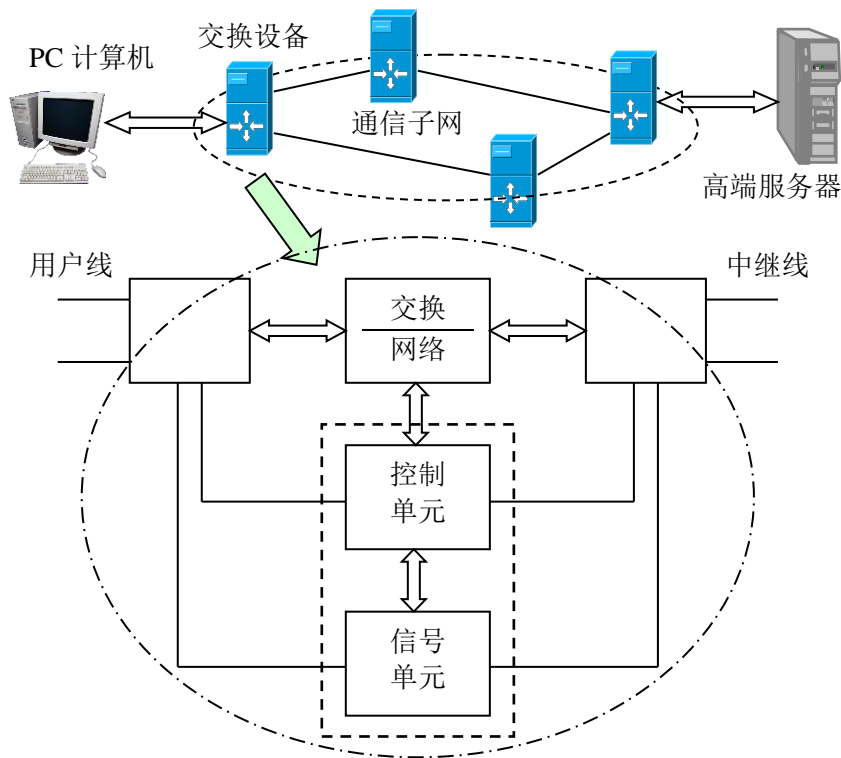


图 2-21 交换节点的基本组成

数据交换是多节点网络中实现数据传输的有效手段。常用的数据交换方式有电路交换方式和存储交换方式两大类，存储交换又可分为报文交换和报文分组交换方式。下面分别介绍这几种交换方式。

2. 4. 1 电路交换

电路交换(circuit switching)也叫线路交换，是数据通信领域最早使用的交换方式。通过电路交换进行通信，就是要通过中间交换节点在两个站点之间建立一条专用的通信线路。最普通的电路交换例子是电话通信系统。电话交换系统利用交换机，在计算机通信与网络中应用的电路交换和电话交换系统工作原理是相似的，但从系统设计的对象来讲是不同的：电话交换系统是以话音业务通信为目标，而计算机网中的电路交换是面向数据业务的，组成电路

交换的公用数据网（CSPDN，Circuit Switching Public Data Network）。

所有电路交换的基本处理过程都包括呼叫建立、通信（信息传送）、连接释放三个阶段，如图 2-22 所示。

1. 呼叫建立阶段

图中主叫（calling party）用户取机，听拨号音，拨被叫（called party）号码。若被叫用户不在同一个交换局，则 A 局向 B 局送占用信号，转接被叫号码，再由 B 局转发到 C 局。A 局常称本地局，C 局为远端局，而 B 局仅起到中转作用，称中转局。最终 C 局按被叫号

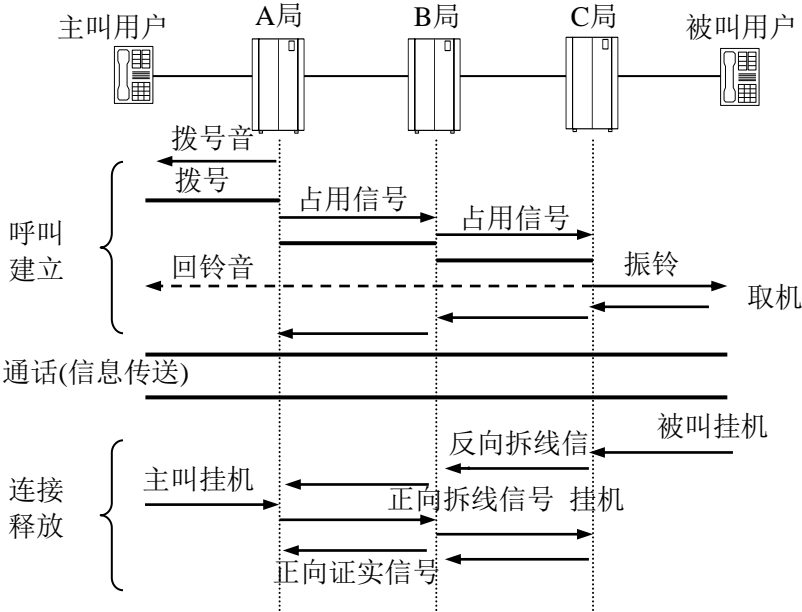


图 2-22 电路交换原理

码向被叫发送振铃信号。当被叫用户取机后，C 局接收应答信号，然后通知各局加以连接。

2. 通信阶段

在通信阶段，始终在主叫与被叫用户间保持这一条物理连接。

3. 连接释放阶段

当主叫或被叫任一方挂机，如图所示，局间互送正向或反向拆线信号，经证实后释放连接。值得说明的一点，目前电路交换系统采用了主叫计费方式，因此，若被叫先挂机，物理连接暂不释放，由端局向主叫送忙音催挂。

电路交换的主要特点归纳如下：

- (1) 电路交换是一种实时交换，适用于实时要求高的话音通信（全程 $\leq 200\text{ ms}$ ）。
- (2) 在通信前要通过呼叫，为主、被叫用户建立一条物理的、逻辑的连接。
- (3) 电路交换是预分配带宽，话路接通后，即使无信息传送也虚占电路，据统计，传送数字话音时电路利用率仅为 36%。
- (4) 在传送信息时，没有任何差错控制措施，不利于传输可靠性要求高的突发性数据业务。

2. 4. 2 报文交换

早在 20 世纪 40 年代，电报通信系统采用了报文交换方式，报文交换（Message Switch）与电路交换的工作原理不同，每个报文传送时，没有连接建立/释放两个阶段。在报文交换节点，接收一份份报文，予以存储，再按报文的报头（内含收报人地址，流水号）进行转发，如图 2-23 所示。

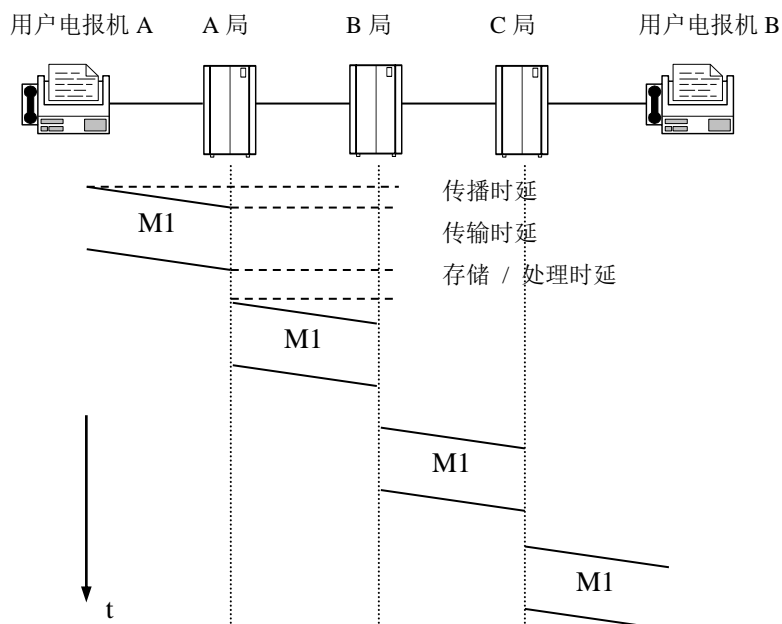


图 2-23 报文交换的基本处理过程

报文交换的特点如下：

- (1) 交换节点采用存储 / 转发方式对每份报文完整地加以处理；
- (2) 每份报文中含有报头，必须包含收、发双方的地址，以便交换节点进行路由选择；
- (3) 报文交换可进行速率、码型的变换，具有差错控制措施，便于一对多地址传送报文，过负荷时将会导致报文延迟。

2. 4. 3 分组交换

分组交换也是一种存储—转发处理方式，其处理过程是需将用户的原始信息（报文）分成若干个小的数据单元来传送，这个数据单元专门称之为分组（Packet），也可称之为“包”。每个分组中必须附加一个分组标题，含可供处理的控制信息（路由选择、流量控制和阻塞控制等）。图 2-24 给出了三台分组交换机（PSE: Packet Switching Equipment）互连而成的分组交换网示意图，图中设每台分组交换机各连一台计算机（或称主机）。

分组交换可提供两种服务方式：虚电路（VC, Virtual Circuit）和数据报（DG, Datagram），在第四章中会详细的介绍这两种服务方式。

分组交换的主要优点可以归纳如下：

(1) 能够实现不同类型的数据终端设备（含有不同的传输速率、不同的代码、不同的通信控制规程等）之间的通信。

(2) 分组多路通信功能。由于提供线路的分组动态时分复用，因此提高了传输介质（包括用户线和中继线）的利用率。每个分组都有控制信息，使分组型终端和分组交换机间的一条传输线路上可同时与多个不同用户终端通信。

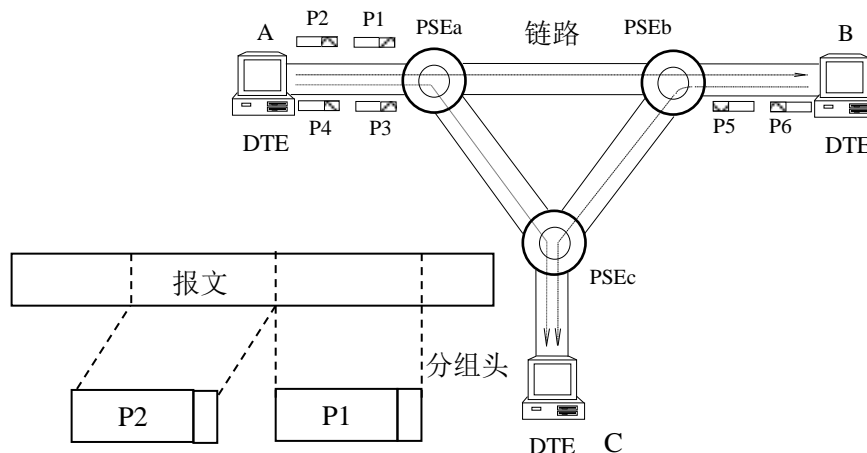


图 2-24 分组交换网的虚连接

(3) 数据传输质量高、可靠性高。每个分组在网络内中继线和用户线上传输时可以分段独立地进行差错流量控制，因而网内全程的误码率可达 10^{-10} 以下。由于分组交换网内具有路由选择、拥塞控制等功能，当网内线路或设备产生故障后，网内可自动为分组选择一条迂回路由，避开故障点，不会引起通信中断。

(4) 经济性好。分组交换网是以分组为单元在交换机内存储和处理的，因而有利于降低网内设备的费用，提高交换机的处理能力。由于分组采用动态时分多路复用，大大提高了通信线路的利用率，相对可降低用户的通信费用。另一方面分组交换方式可准确地计算用户的通信量，因此通信费用可按通信量和时长相结合的方法计算，而与通信距离无关。分组交换网可通过网络管理系统对网内实行分散式处理、控制和集中维护的管理模式，提高网络全程的运行效率。

分组交换的缺点是：

(1) 由于采用存储—转发方式处理分组，所以分组在网内的平均时延可达几百毫秒

(2) 每个分组附加的分组标题，都会需要交换机分析处理，而增加开销，因此分组交换适宜于计算机通信的突发性或断续性业务的需求，而不适合于在实时性要求高、信息量大的环境中应用；

(3) 分组交换技术比较复杂，涉及到网络的流量控制、差错控制、代码、速率的变换方法和接口；网络的管理和控制的智能化等。

2.5 差错控制技术

前面曾分析过由于实际的物理信道并不可靠，还可能受到各种噪声的干扰，数据在传输时常常会出现比特的丢失、增加或畸变等现象，从而使接收方对数据信号的判断失误，造成传输差错。而计算机通信要求可靠地传递信息，因此必须采取有效的措施来发现和纠正错误，以提高信息的传输质量，这就是差错控制的目的和任务。差错控制主要涉及两个方面的问题，一是如何检测出错误；二是发现错误后，如何进行纠正。

2.5.1 差错控制的基本概念

差错即是误码，差错控制的核心是抗干扰编码。差错控制的基本思路是：在发送端被传送的信息码序列的基础上，按照一定的规则加入若干“监督码元”后进行传输，这些加入的码元与原来的信息码序列之间存在着某种确定的约束关系。在接收数据时，检验信息码元与监督码元之间的既定的约束关系，如该关系遭到破坏，则在接收端可以发现传输中的错误，乃至纠正错误。可以看出，用纠(检)错来控制差错的方法来提高数据通信系统的可靠性是以牺牲有效性为代价换取的。

1. 差错分类

数据信号在信道中传输，会受到各种不同的噪声干扰。噪声大体分为两类：随机噪声和脉冲噪声，前者包括热噪声、散弹噪声和传输媒介引起的噪声等；后者是指突然发生的噪声，这种噪声包括雷电、开关引起的瞬态电信号变化等。随机噪声导致传输中的随机差错；脉冲噪声使传输出现突发差错。

随机差错又称独立差错，它是指那些独立地、稀疏地和互不相关地发生的差错。存在这种差错的信道称为无记忆信道或随机信道，例如微波接力和卫星转发信道。突发差错是指一串串，甚至是成片出现的差错，差错之间有相关性，差错出现是密集的。产生这种突发错误的信道称为有记忆信道或突发信道，如短波、散射等信道。

实际信道是复杂的，所出现的错误也不是单一的，而是随机和突发错误并存的，只不过有的信道以某种错误为主而已，这两类错误形式并存的信道称为组合信道或复合信道。一般来说，针对随机错误的编码方法与设备比较简单，成本较低，而效果较显著；而纠正突发错误的编码方法和设备较复杂，成本较高，效果不如前者显著。因此，要根据错误的性质设计编码方案和选择差错控制的方式。

2. 差错控制方式

在数据通信系统中，差错控制方式一般可以分为 4 种类型：

(1) 检错重发

检错重发简称 ARQ。这种差错控制方式在发送端对数据序列进行分组编码，加入一定多余码元使之具有一定的检错能力，成为能够发现错误的码组。接收端收到码组后，按一定规则对其进行有无错误的判别，并把判决结果(应答信号)通过反向信道送回发送端。如有错误，发送端把前面发出的信息重新传送一次，直到接收端认为已正确接收到信息为止。在具体实现检错重发系统时，通常有 3 种形式，即停止一等待重发，返回重发（连续 ARQ）和选择重发（选择 ARQ）。

(2) 前向纠错

前向纠错方式简称 FEC 方式。前向纠错系统中，发送端的信道编码器将输入数据序列变换成能够纠正错误的码，接收端的译码器根据编码规律检验出错误的位置并自动纠正。前向纠错方式不需要反馈信道，特别适合于只能提供单向信道的场合。由于能自动纠错，不求检错重发，因而延时小，实时性好。其缺点是所选择的纠错码必须与信道的错码特性密切配合，否则很难达到降低错码率的要求；为了纠正较多的错码，译码设备复杂，而要求附加的监督码也较多，传输效率就低。因此，过去单独使用这种控制方式的不很多，但随着编码理论和微电子技术的发展，译码设备成本降低，加之这种方式具有能实现单向通信和控制电路简单的优点，因而在实际应用中日益增多。

(3) 混合纠错检错

混合纠错检错方式是前向纠错方式和检错重发方式的结合。在这种系统中，发送端发出同时具有检错和纠错能力的码，接收端收到码后，检查错误情况，如果错误少于纠错能力，则自行纠正；如果干扰严重，错误很多，超出纠正能力，但能检测出来，则经反向信道要求发送端重发。

混合纠错检错方式在实时性和译码复杂性方面是前向纠错和检错重发方式的折衷，因而近年来，在数据通信系统中采用较多。

(4) 信息反馈

信息反馈方式(简称 IRQ)又称回程校验。接收端把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，从而发现是否有错误，并把认为错误的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。

这种方式的优点是，不需要纠错、检错的编译器，设备简单。缺点是需要和前向信道相同的反向信道，实时性差。另外，发送端需要一定容量的存储器以存储发送码组，环路时延越大，数据速率越高，所需存储容量越大。因而 IRQ 方式仅使用于传输速率较低，数据信道差错率较低，且具有双向传输线路及控制简单的系统中。

上述差错控制方式应根据实际情况合理选用。除 IRQ 方式外，都要求发送端发送的数据序列具有纠错或检错能力；为此，必须对信息源输出的数据以一定规则加入多余码元(纠错编码)。对于纠错编码的要求是加入的多余码元少而纠错能力却很高，而且实现方便，设备简单，成本低。下面将讨论检错和纠错编码的基本原理和一些常用的检错纠错码。

3. 差错控制原理

所谓差错控制编码实际上就是在保持信息的位数不变的情况下，采用增加码长的方法来降低误码率。具体来说，码的检错和纠错能力是用信息量的冗余度来换取的。

一般信息源发出的任何消息都可以用二进制信号“0”和“1”来表示。例如，要传送 A 和 B 两个消息，可以用“0”码来代表 A，用“1”码来代表 B。在这种情况下，若传输中产生错码，即“0”错成“1”，或“1”误为“0”，接收端都无从发现，因此这种编码没有检错和纠错能力。

如果分别在“0”和“1”后面附加一个“0”和“1”，变为“00”和“11”(本例中分别表示 A 和 B)。这时，在传输“00”和“11”时，如果发生一位错码，则变成“01”或“10”，译码器将可判决为有错，因为没有规定使用“01”或“10”码组。这表明附加一位码(称为监督码)以后码组具有了检出 1 位错码的能力。但因译码器不能判决哪位是错码，所以不能予以纠正，这表明没有纠正

错码的能力。本例中“01”和“10”称为禁用码组，而“00”和“11”称为许用码组。

若在信息码之后附加两位监督码，即用“000”代表消息 A，用“111”表示 B，这时，码组成为长度为 3 的二进制编码，而 3 位的二进制码有 $2^3=8$ 种组合，本例中选择“000”和“111”为许用码组。此时，如果传输中产生一位错误，接收端将成为 001 或 010 或 100 或 011 或 101 或 110，这些(余下的 6 组)均为禁用码组。因此，接收端可以判决传输有错。不仅如此，接收端还可以根据“大数”法则来纠正一个错误，即 3 位码组中如有 2 个和 3 个“0”码则判为“000”码组(消息 A)，如有 2 个和 3 个“1”码则判为“111”码(消息 B)，所以，此时还可以纠正一位错码。如果在传输中产生两位错码，也将变为上述的禁用码组，译码器仍可以判为有错，但如果纠错则不能得到正确结果。这说明本例中的码具有可以检出两位和两位以下的错码以及纠正一位错码的能力。

由此可见，纠错编码之所以具有检错和纠错能力，是因为在信息码之外附加了监督码。监督码不载荷信息，它的作用是用来监督信息码在传输中有无差错，对用户来说是多余的，最终也不传送给用户，对于表示信息来说是“冗余”的，但它提高了传输的可靠性。但是，监督码的引入，降低了信道的传输效率。一般说来，引入监督码越多，码的检错、纠错能力越强，但信道的传输效率下降也越多。人们研究的目标是寻找一种编码方法，使所加的监督码元最少，而检错、纠错能力又高，且又便于实现。

4. 码距与检错和纠错能力

在信道编码中，定义码组中非零码元的数目为码组的重量，简称码重。例如，“010”码组的码重为 1，“011”码组的码重为 2。把两个码组中对应码位上具有不同二进制码元的位数定义为两码组的距离，简称码距。而在一种编码中，任意两个许用码组间距离的最小值，即码组集合中任意两元素间的最小距离，称为这一编码的汉明(Hamming)距离，以 d_{\min} 表示。下面我们将具体讨论一种编码的最小码距 d_{\min} 与这种编码的检错和纠错能力的数量关系。

在一般情况下，对于分组码有以下结论：

(1) 为检测 e 个错码，要求最小码距为 $d_{\min} \geq e+1$ 。或者说，若一种编码的最小距离为 d_{\min} ，则它能检出 $e \leq d_{\min} - 1$ 个错码。

上式可以通过图 3-13(a)来证明。图中 c 表示某码组，当误码不超过 e 个时，该码组的

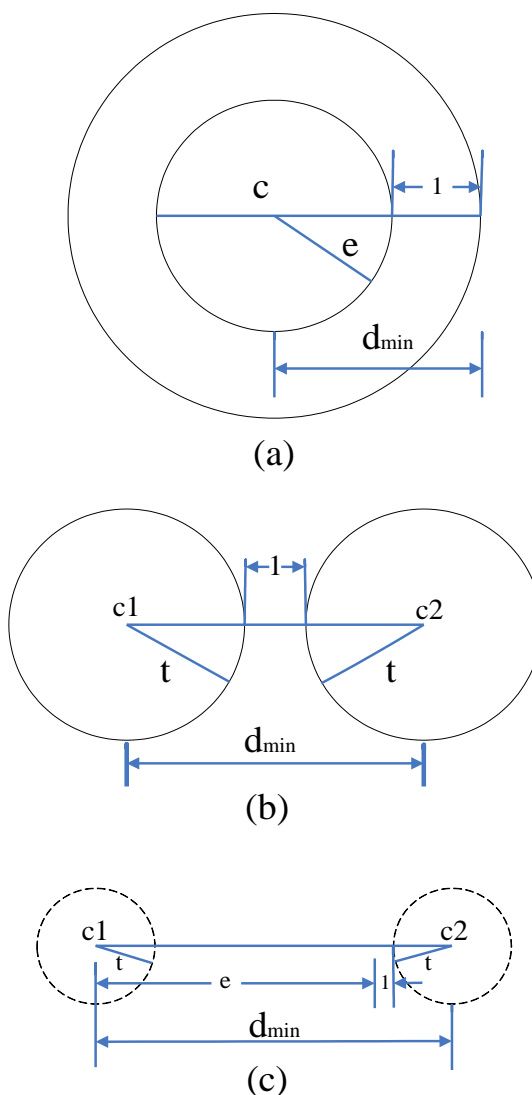


图 3-13 码距与纠错和检错能力的关系

位置将不超过以 c 为圆心以 e 半径的圆(实际上是多维的球)。只要其他任何许用码组都不落入此圆内,则 c 码组发生 e 个误码时就不可能与其他许用码组相混。这就证明了其他的许用码组必须位于以 c 为圆心,以 $e+1$ 为半径的圆上或圆外,所以,该码的最小码距 d_{\min} 为 $e+1$ 。

(2) 为纠正 t 个错码,要求最小码距为 $d_{\min} \geq 2t+1$ 。或者说,若一种编码的最小距离为 d_{\min} ,则它能纠正 $t \leq (d_{\min}-1)/2$ 个错码。

上式可以用图 3-13(b)来说明。图中 c_1 和 c_2 分别表示任意两个许用码组,当各自错码不超过 t 个时,发生错码后两个许用码组的位置移动将分别不会超过以 c_1 和 c_2 为圆心,以 t 为半径的圆。只要这两个圆不相交,则当错码小于 t 个时,可以根据它们落在哪个圆内就能判断为 c_1 或 c_2 码组,即可以纠正错误。而以 c_1 和 c_2 为圆心的两个圆不相交的最近圆心距离为 $2t+1$,这就是纠正 t 个错误的最小码距了。

(3) 为纠正 t 个错码,同时检测 e ($e > t$) 个错码,要求最小码距为 $d_{\min} \geq e+t+1$ 。首先说明什么是“纠正 t 个错码,同时检测 e 个错码”(简称纠检结合)。在某些情况下,要求对于出现较频繁但错码数很少的码组,按前向纠错方式工作,以节省反馈重发时间;同时又希望对一些错码数较多的码组,在超过该码的纠错能力后,能自动按检错重发方式工作,以降低系统的总误码率。这种方式就是“纠检结合”,如图 3-13(c)所示。

在上述“纠检结合”系统中,差错控制设备按照接收码组与许用码组的距离自动改变工作方式。若接收码组与某一许用码组间的距离在纠错能力 t 范围内,则将按纠错方式工作;若与任何许用码组间的距离都超过 t ,则按检错方式工作。

5. 纠错编码的分类

从不同的角度出发,纠错编码可有不同的分类方法。

(1) 按码组的功能分,有检错码和纠错码两类。一般地说,能在译码器中发现错误的,称为检错码,它没有自动纠正错误的能力。如果在译码器中不仅能发现错误,又能自动纠正错误的,则称为纠错码,它是一种最重要的抗干扰码。

(2) 按码组中监督码元与信息码元之间的关系分,有线性码和非线性码两类。线性码是指监督码元与信息码元之间的关系呈线性关系,即可用一组线性代数方程联系起来,几乎所有得到实际运用的都是线性码;非线性码指的是二者是非线性关系,非线性码正在研究开发,它实现起来很困难。

(3) 按照信息码元与监督码元的约束关系,又可分为分组码和卷积码两类。所谓分组码是将是 k 个信息码元划分为一组,然后由这 k 个码元按照一定的规则产生 r 个监督码元,组成长度 $n = k + r$ 的码组。在分组码中,监督码元仅监督本码组中的信息码元。分组码一般用符号 (n, k) 表示,并且将分组码的结构规定为前面 k 位为信息位,后面附加 r 个监督位。

在卷积码中,每组的监督码元不但与本组码的信息码元有关,而且还与前面若干组信息码元有关,即不是分组监督,而是每个监督码元对它的前后码元都实行监督,前后相连,因此有时也称为连环码。

(4) 按照信息码元在编码前后是否保持原来的形式不变,可划分为系统码和非系统码。在差错控制编码中,通常信息码元和监督码元在分组内有确定的位置,而非系统码中信息码元则改变了原来的信号形式。系统码的性能大体上与非系统码的相同,但是在某些卷积码中

非系统码的性能优于系统码，由于非系统码中的信息位已经改变了原有的信号形式，这对观察和译码都带来麻烦，因此很少应用，而系统码的编码和译码相对比较简单些，所以得到广泛应用。

(5) 按纠正差错类型可分为纠正随机错误的码和纠正突发错误的码。

(6) 按照每个码元取值来分，可分为二进制码与多进制码。

2.5.2 简单的差错控制编码

下面介绍几种出现较早也较为实用的简单差错控制编码，它们都属于分组码一类，而且是行之有效的。

1. 奇偶监督码

这是一种最简单的检错码，又称奇偶校验码，在计算机数据传输中得到广泛的应用。其编码规则是在所要传输的数据码元分组数据后面附加一位监督位，使得该组码连同监督位在码组中“1”的个数为偶数(称为偶校验)或奇数(称为奇校验)，在接收端按同样的规律检查，如发现不符就说明产生了差错，但是不能确定差错的具体位置，即不能纠错。

奇偶监督码的这种监督关系可以用公式表示。设码组长度为 n ，表示为 $(a_{n-1}, a_{n-2}, a_{n-3}, \dots, a_0)$ ，其中前 $n-1$ 位为信息码元，第 n 位为监督位 a_0 。在偶检验时有

$$a_0 \oplus a_1 \oplus \dots \oplus a_{n-1} = 0 \quad (3-1)$$

其中 \oplus 表示模 2 加运算，监督位 a_0 可由下式产生

$$a_0 = a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_{n-1} \quad (3-2)$$

在奇校验时有

$$a_0 \oplus a_1 \oplus \dots \oplus a_{n-1} = 1 \quad (3-3)$$

监督码元 a_0 可由下式产生

$$a_0 = a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_{n-1} \oplus 1 \quad (3-4)$$

这种奇偶检验只能发现单个或奇数个错误，而不能检测出偶数个错误，因而它的检错能力不高，但这并不表明它对随机奇数个错误的检错率和偶数个错误的漏检率相同。从相关理论容易证明，出错位数为 $2t-1$ 奇数概率总比出错位数为 $2t$ 偶数(t 为正整数)的概率大得多，即错一位码的概率比错两位码的概率大得多、错三位码的概率比错四位码的概率大得多。因此，绝大多数随机错误都能用简单奇偶校验查出，正是因为如此，这种方法被广泛用于以随机错误为主的计算机通信系统。但这种方法难于对付突发差错，所以在突发错误很多的信道中不能单独使用。可以看出，奇偶校验码的最小码距为 $d_{\min}=2$ 。

2. 水平奇偶监督码

为了提高上述奇偶监督码的检错能力，特别是不能检测突发错误的缺点，可以将经过奇偶监督编码的码元序列按行排成方阵，每行为一组奇偶监督码，但发送时则按列的顺序传输。接收端仍将码元排成发送时方阵形式，然后按行进行奇偶校验。由于按行进行奇偶校验，因此称为水平奇偶监督码。

可以看出，由于发端是按列发送码元而不是按码组发送码元，因此把本来可能集中发生在某一个码组的突发错误分散在于方阵的各个码组中，每行可能只有一个错码，因此可得到整个方阵的行监督。这样，采用这种方法可以发现某一行上所有奇数个错误以及所有长度不

大于方阵中行数的突发错误。

3. 二维奇偶监督码

二维奇偶监督码是将水平奇偶监督码推广而得，又称行列监督码和方阵码。它的方法是在水平监督基础上对方阵中每一列再进行奇偶校验。发送仍然是按列序顺次传输。

显然，这种码比水平奇偶监督码有更强的检错能力，它能发现某行或某列上的奇数个错误和长度不大于行数(或列数)的突发错误。这种码还有可能检测出偶数个错码，因为如果每行的监督位不能在本行检出偶数个错误时，则在列的方向上有可能检出。当然，在偶数个错误恰好分布在矩阵的四个顶点上时，这样的偶数个错误是检测不出来的。此外，这种码还可以纠正一些错误，例如当某行某列均不满足监督关系而判定该行该列交叉位置的码元有错，从而纠正这一位上的错误。这种码由于检错能力强，又具有一定纠错能力，且实现容易因而得到广泛的应用。

此外，数据通信中应用较多的还有恒比码、正反码等。

2.5.3 循环码

循环码是线性分组码中一类重要的码，它是以现代代数理论作为基础建立起来的。循环码的编码和译码设备都不太复杂，且检错纠错能力较强，目前在理论和实践上都有较大的发展。这里，仅介绍二进制循环码。

1. 循环码的循环特性

循环码是一种线性分组码，且为系统码，即前 k 是位为信息位，后 r 位为监督位，它除了具有线性分组码的一般性质外，还具有循环性，即循环码中任一许用码组经过循环移位后(将最右端的码元移至左端，或反之)所得到的码组仍为该集合中的一个许用码组。若 $(a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0)$ 是一个 (n, k) 循环码的码组，则 $(a_{n-2}, a_{n-3}, \dots, a_0, a_{n-1})$ 、 $(a_{n-3}, a_{n-4}, \dots, a_{n-1}, a_{n-2})$ 、 $(a_0, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1)$ 也都是该编码集合中的码组。

2. 码多项式和生成多项式

为了便于用代数理论来研究循环码，把长为 n 的码组与 $n-1$ 次多项式建立一一对应的关系，即把码组中各码元当作是一个多项式的系数，若码组 $A=(a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_1, a_0)$ ，则相应的多项式表示为

$$A(x) = a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \dots + a_1x + a_0 \quad (3-12)$$

如码组 1100101 对应的多项式为

$$A_7(x) = 1 \cdot x^6 + 1 \cdot x^5 + 0 \cdot x^4 + 0 \cdot x^3 + 1 \cdot x^2 + 0 \cdot x + 1 \quad (3-13)$$

在这种多项式中， x 仅是码元位置的标记，例如式(3-13)表示码组中 a_6, a_5, a_2 和 a_0 为“1”，其他均为零。因此我们并不关心 x 的取值，多项式中 x^i 的存在只表示该对应码位上是“1”码，否则为“0”码，我们称这种多项式为码多项式。由此可知，码组和码多项式本质上是一回事，只是表示方法不同而已。

在整数运算中，有模 n 运算。在码多项式运算中也有类似的按模运算，这里仅讨论码多项式的模 2 运算。在码多项式中常常将“ \oplus ”简写为“+”，仍表示“模 2”加，在本节中，除非另加说明，这类式中的“+”就表示“模 2”加。

在循环码中, 一个 (n, k) 码有 2^k 个不同的码组, 用 $g(x)$ 表示其中前 $(k-1)$ 位皆为“0”的码组。在循环码中除全“0”码组外, 再没有连续 k 位均为“0”的码组, 即连“0”的长度最多只能有 $(k-1)$ 位。否则, 在经过若干次循环移位后将得到一个 k 位信息位全为“0”, 但监督位不全为“0”的码组, 这在线性码中显然是不可能的。因此 $g(x)$ 必须是一个常数项不为“0”的 $n-k$ 次多项式, 而且, 这个 $g(x)$ 还是这种 (n, k) 码中次数为 $n-k$ 的唯一的—一个多项式。我们称这唯一的 $(n-k)$ 次多项式 $g(x)$ 为码的生成多项式。一旦确定了 $g(x)$, 则整个 (n, k) 循环码就被确定了。

由循环码的封闭性和循环性可知, 所有码多项式 $A(x)$ 都是 $g(x)$ 的倍数, 即都可被 $g(x)$ 整除, 而且任—次数不大于 $(k-1)$ 的多项式乘 $g(x)$ 都是码多项式。

3. 循环码的编码方法

编码的任务是在已知信息位的条件下求得循环码的码组, 而我们要求得到的是系统码, 即码组前 k 位为信息位, 后 $r=n-k$ 位是监督位。因此, 首先要根据给定的 (n, k) 值选定生成多项式 $g(x)$ 。

设信息位的码多项式为

$$m(x) = m_{k-1}x^{k-1} + m_{k-2}x^{k-2} + \dots + m_1x + m_0 \quad (3-14)$$

其中系数 m_i 为1或0。

我们知道 (n, k) 循环码的码多项式的最高幂次是 $n-1$ 次, 而信息位是在它的最前面 k 位, 因此信息位在码多项式中应表现为 $x^{n-k}m(x)$ (成为最高幂次为 $n-k+k-1=n-1$)。显然

$$x^{n-k}m(x) = m_{k-1}x^{n-1} + m_{k-2}x^{n-2} + \dots + m_1x^{n-k+1} + m_0x^{n-k} \quad (3-15)$$

它从幂次 x^{n-k-1} 起至 x^0 的 $n-k$ 位的系数都为0。

如果用 $g(x)$ 除 $x^{n-k}m(x)$, 可得

$$\frac{x^{n-k}m(x)}{g(x)} = Q(x) + \frac{r(x)}{g(x)} \quad (3-16)$$

其中 $Q(x)$ 为幂次小于 k 的商多项式, 而 $r(x)$ 的次数必小于 $g(x)$ 的次数, 为幂次小于 $n-k$ 的余式。公式(3-16)可改写成

$$x^{n-k}m(x) + r(x) = Q(x) \cdot g(x) \quad (3-17)$$

公式(3-18)表明: $x^{n-k}m(x) + r(x)$ 必为 $g(x)$ 的倍式, 则 $x^{n-k}m(x) + r(x)$ 必定是由 $g(x)$ 生成的循环码中的码字, 而余式 $r(x)$ 即为该码字的监督码对应的多项式。

根据上述原理, 编码步骤可归纳如下:

(1) 用 x^{n-k} 乘 $m(x)$ 。这一运算实际上是把信息码后附上 $(n-k)$ 个“0”。例如, 信息码为110, 它相当于 $m(x) = x^2 + x$ 。当 $n-k = 7-3 = 4$ 时, $x^{n-k}m(x) = x^4(x^2 + x) = x^6 + x^5$, 它相当于1100000。

(2) 用 $g(x)$ 除 $x^{n-k}m(x)$, 如公式(3-17), 得到商 $Q(x)$ 和余式 $r(x)$ 。

(3) 将余式 $r(x)$ 与 $x^{n-k}m(x)$ 相加, 得 $A(x) = x^{n-k}m(x) + r(x)$, 即为所求的发送序列码。

上述三步编码运算, 在用硬件实现时, 可以由除法电路来实现。除法电路的主体由一些移位寄存器和模2加法器组成。码多项式中的 x 的幂次代表移位的次数, $g(x)$ 多项式中系

数是 1 或 0 表示该位上反馈线的有无。由于微处理器和数字信号处理器的应用日益广泛，目前已多采用先进的微处理器件和相应的软件来实现上述编码。

4. 循环码的解码方法

接收端解码的要求有两个：检错和纠错。达到检错目的的解码原理十分简单。由于任一码组多项式 $A(x)$ 都应能被生成多项式 $g(x)$ 整除，所以在接收端可以将接收码组 $R(x)$ 用原生成多项式 $g(x)$ 去除。当传输中未发生错误时，接收码组与发送码组相同，即 $R(x)=A(x)$ ，故接收码组 $R(x)$ 必定能被 $g(x)$ 整除；若码组在传输中发生错误，则 $R(x) \neq A(x)$ ， $R(x)$ 被 $g(x)$ 除时可能除不尽而有余项。因此，我们就以余项是否为零来判别码组中是否有错码。需要指出的是，如果信道中错码的个数超过了这种编码的检错能力，恰好使有错码的接收码组能被 $g(x)$ 所整除，这时的错码就不能检出了。这种错误称为不可检错误。

解码器的核心就是一个除法电路和缓冲移存器，而且这里的除法电路与发送端编码器中的除法电路相同。若在此除法器中进行运算得出的余项为零，则认为码组 $R(x)$ 无错，这时将暂存于缓冲移存器的接收码组送出到解码器输出端；若运算结果余项不等于零，则认为 $R(x)$ 中有错，但不知错在何位，这时，就可以将缓冲移存器中的接收码组删除，并向发送端发出重发指令，要求重发一次该码组。

在数据通信中广泛采用循环冗余检验(Cyclic Redundancy Checks, CRC)，简称 CRC 校验，而循环冗余检验码就简称 CRC 码。目前常用的 CRC 校验码中采用的生成多项式如下，数字 12, 16 是指 CRC 余数的长度。对应地，CRC 除数分别是 13, 17 位长。

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

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

例 3-5 一个报文的比特序列为 1101011011 通过数据链路传输，采用 CRC 进行差错检测，如所用的生成多项式为 $g(x) = x^4 + x + 1$ ，试说明：

(1) CRC 码的产生过程及所产生的发送序列；

(b) CRC 码的检测过程（有差错及无差错）。

解：生成多项式为 $g(x) = x^4 + x + 1$ ，则其编码为 10011， $r=4$ 。

因为 $r=4$ ，所以 CRC 校验码是 4 位的。对于报文 1101011011，将其左移 4 位，即在报文末尾加 4 个“0”，这等于报文乘以 2^4 ，然后被生成多项式模 2 除。

CRC 码和发送序列的产生和检测如图 3-14。

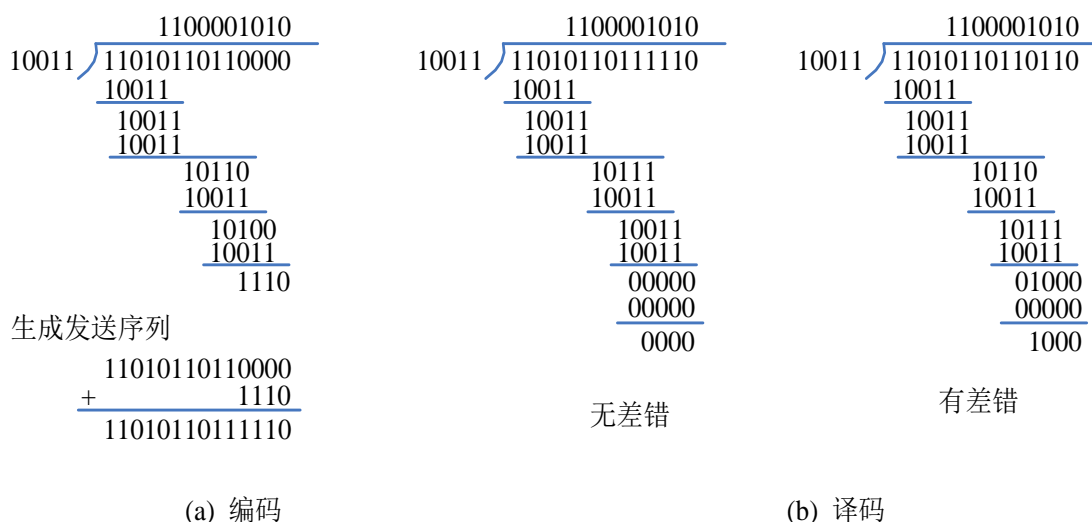


图 3-14 CRC 的编码和译码

本章总结

1. 数据是预先约定的具有某种含义的数字、字母或符号的集合，数据中包含着信息，信息可通过解释数据而产生的，信号是数据的电磁（或电子）编码。
2. 数据通信是指在计算机与计算机以及计算机与终端之间的数据信息传送的过程，包括数据传输和数据传输前后的数据处理两个方面的内容。数据通信系统就是完成上述两个部分功能的通信系统，由信源（发送部分）、传输系统（传输介质）和信宿（接收部分）三个部分组成。
3. 衡量数据通信系统性能的指标有工作速率、传输差错率和时延等，工作速率包括传码速率、传信速率，传输差错率包括误码率、误组率等，时延主要包括发送时延、传播时延和处理时延。
4. 任何信道在传输信号时都存在一个数据传输率的限制，这就是Nyquist（奈奎斯特）定理和Shannon（香农）定理所要告诉我们的结论。
5. 传输介质包括有线的和无线的两大类，在有线的传输介质中，电磁波沿着固体媒体铜线或光纤向前传播，而无线的传输介质就是指利用大气和外层空间作为传播电磁波的通路。有线传输介质主要有双绞线、同轴电缆和光缆等，无线传输介质主要包括无线电波、地面微波、卫星微波、红外线等。
7. 数据在通过传输介质发送之前，必须转换成相应的物理信号，信号的转换方式依赖于数据的原始格式和通信硬件采用的格式。在实际应用中，比较常用的有四种方式：数字-数字编码、模拟-数字编码、数字-模拟调制和模拟-模拟调制。
8. 为了提高传输介质的利用率，我们可以使用多路复用技术。多路复用技术有频分复

用、时分复用、码分复用、波分复用四种，它们分别用在不同的场合。

9. 为了提高线路的利用率，用户终端要通过交换网连接起来，数据交换技术主要包括电路交换、报文交换和分组交换三种，它们各自有优缺点。

10. 电路交换方式是两台计算机或终端在相互通信之前，预先建立起一条实际的物理链路，在通信的过程中自始至终使用该链路进行数据传输，并且不允许其它用户同时共享该链路，通信结束后再拆除该链路。

11. 报文交换是一种以报文为单位存储—转发处理方式，当用户的报文到达交换机时，先放在交换机的存储器里进行存储，等到输出线路有空闲的时候，再将该报文进行转发。

12. 分组交换也是一种存储—转发处理方式，其处理过程是需将用户的原始信息（报文）分成若干个小的数据单元来传送，这个数据单元专门称之为分组（Packet），也可称之为“包”。

13. 差错控制的基本思路是：在发送端被传送的信息码序列的基础上，按照一定的规则加入若干“监督码元”后进行传输，这些加入的码元与原来的信息码序列之间存在着某种确定的约束关系。在接收数据时，检验信息码元与监督码元之间的既定的约束关系，如该关系遭到破坏，则在接收端可以发现传输中的错误，乃至纠正错误。

14. 纠错编码之所以具有检错和纠错能力，是因为在信息码之外附加了监督码。监督码对于表示信息来说是“冗余”的，但它提高了传输的可靠性。但是，监督码的引入，降低了信道的传输效率。一般说来，引入监督码越多，码的检错、纠错能力越强，但信道的传输效率下降也越多。

15. 奇偶校验码是一种最简单的检错码，在计算机数据传输中得到广泛的应用。汉明码是一种能够纠正一位错码且编码效率较高的线性分组码。

16. 循环码是一种线性分组码，且为系统码，即前 k 位为信息位，后 r 位为监督位，它除了具有线性分组码的一般性质外，还具有循环性。循环码是线性分组码中一类重要的码，它是现代代数理论作为基础建立起来的。循环码的检错纠错能力较强，目前在理论和实践上都有较大的发展。

习题

2.01 试给出数据通信系统的基本模型并说明其主要组成构件的作用。

2.02 试解释以下名词：数据，信号，模拟数据，模拟信号，数字数据，数字信号。

2.03 什么叫传信速率？什么叫传码速率？说明两者的不同与关系。

2.04 设数据信号码元长度为 833×10^{-6} 秒，若采用 16 电平传输，试求其传码速率和传信速率。

2.05 奈氏准则与香农公式在数据通信中的意义是什么？比特和波特有何区别？

2.06 假设带宽为 3000Hz 的模拟信道中只存在高斯白噪声，并且信噪比是 20dB，则该信道能否可靠的传输速率为 64kb/s 的数据流？

2.07 常用的传输媒介有哪几种？各有何特点？

- 2.08 什么是曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码?其特点如何?
- 2.09 数字通信系统具有哪些优点? 它的主要缺点是什么?
- 2.10 带宽为6MHz的电视信道, 如果使用量化等级为4的数字信号传输, 则其数据传输率是多少? 假设信道是无噪声的。
- 2.11 对于带宽为3kHz、信噪比为20dB的信道, 当其用于发送二进制信号时, 它的最大数据传输率是多少?
- 2.12 一个每秒钟采样一次的4kHz无噪声信道的最大数据传输率是多少?
- 2.13 什么是多路复用? 按照复用方式的不同, 多路复用技术基本上分为几类? 分别是什么?
- 2.14 比较频分多路复用和时分多路复用的异同点。
- 2.15 简述电路交换和分组交换的优缺点。
- 2.16 试比较报文交换和分组交换。
- 2.17 常用的差错控制的方法有哪些? 各有什么特点?
- 2.18 在循环冗余校验系统中, 利用生成多项式 $G(x) = x^5 + x^4 + x + 1$ 判断接收到的报文1010110001101是否正确? 并计算100110001的冗余校验码。