

## 第 2 章 数据通信基础

### 本章学习目标

本章主要介绍了数据通信的基本原理。通过本章的学习，读者应能够：

- 了解模拟传输与数字传输的基本原理
- 熟悉异步与同步通信的接口标准
- 掌握常用数据编码及多路复用技术
- 掌握信息交换技术

### 2.1 数据通信的基本概念

通信（Communication）已成为现代生活中必不可少的一部分，通信的目的是单双向传递信息。广义上来说，用任何方法，通过任何介质将信息从一地传送到另一地都可称为通信。数据通信是指在两点或多点之间以二进制形式进行信息传输与交换的过程。由于现在大多数信息传输与交换是在计算机之间或计算机与打印机等外围设备之间进行，数据通信有时也称为计算机通信。计算机网络涉及数据通信与计算机科学两个领域，本章将讲述网络数据通信的一般工作原理，包括数据通信的基本概念、数据调制与编码、多路复用、异步与同步通信、数据传输介质和差错控制校验等。

#### 2.1.1 数据通信的基本概念

##### 1. 信息、数据和信号

信息（Information）是客观事物属性和相互联系特性的表征，它反映了客观事物的存在形式和运动状态。事物的运动状态、结构、温度、颜色等都是信息的不同表现形式；而人造通信系统中传送的文字、语音、图像、符号、数据等也是一些包含一定信息内容的不同信息形式。由于信息形式与信息内容的对立统一，有时也直接把它们看成为一些不同的信息类型，简称文字信息、语音信息、图像信息和数据信息等。

数据（Data）一般可以理解为“信息的数字化形式”或“数字化的信息形式”。狭义的“数据”通常是指具有一定数字特性的信息，如统计数据、气象数据、测量数据及计算机中区别于程序的计算数据等。但在计算机网络系统中，数据通常被广义地理解为在网络中存储、处理和传输的二进制数字编码。语音信息、图像信息、文字信息以及从自然界直接采集的各种自然属性信息均可转换为二进制数字编码在计算机网络系统中存储、处理和传输。网络中的数据通信、数据处理和数据库等通常就是指这种广义的数据。

信号 (Signal) 简单地讲就是携带信息的传输介质。在通信系统中我们常常使用的电信号、电磁信号、光信号、载波信号、脉冲信号、调制信号等术语就是指携带某种信息的具有不同形式或特性的传输介质。CCITT 在有关 Signal 的定义中也明确指出：“信号是以其某种特性参数的变化来代表信息的”。信号的频谱宽度就称为该信号的带宽。

根据信号参量取值的不同，信号可分为数字信号和模拟信号，或称为离散信号和连续信号。例如计算机输出的脉冲信号是数字信号，普通电话机输出的信号就是频率和振幅连续改变的模拟信号。

信息不是物质，所以信息的传输必须依靠物质和能量的作用，传输介质正是体现了这种信息、物质和能量的相互联系，信息的传输过程正是把信源的某种属性特征转换为传输介质的某种属性特征，并把这种属性特征作用给信宿，反映到信宿的属性中去。人造信息传输系统—通信系统，为信息的传输提供了适当的传输介质和控制介质参数的方法。人能够通过各种通信系统获得数千公里以外传来的信息，归根到底是通信系统中各种参数介质的物质和能量的作用。信息传输的这一重要概念，也是计算机网络系统以至一切信息系统中信息活动和信息行为的本质。

## 2. 数据通信系统的模型

实现通信的方式很多，目前使用最广泛的方式是电通信，即用电信号携带所要传送的信息，然后经过各种电信道进行传输，达到通信的目的。之所以使用电通信方式是因为这种方式能使信息几乎在任意的通信距离上实现迅速而准确的传递。光通信也属于电通信。

信号由一地向另一地传输需要通过介质。按介质的不同，通信可分为两大类：一类称为有线通信，另一类称为无线通信。有线通信是用导线作为传输介质的通信方式，这里的导线可以是架空明线、各种电缆以及光纤。无线通信则是利用无线电波在自由空间的传输来传递信息。在移动通信系统中，各基站与移动交换局用有线或无线相连，各基站与移动电话之间用无线方式进行通信联络。移动电话把电话信号转换成相应的高频电磁波，通过天线发往基站，基站再通过天线将信号发往其他移动电话，最终实现移动电话之间的通信。

无论是有线通信还是无线通信，为完成通信任务所需要的一切技术设备和传输介质所构成的总体，就称为通信系统。一个简化了的通信系统模型如图 2-1 所示。

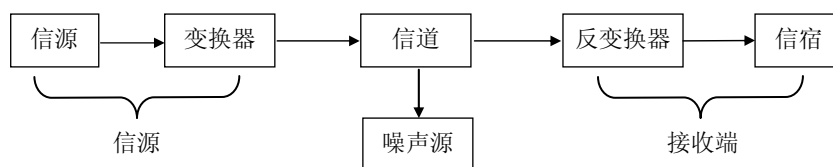


图 2-1 通信系统模型

图 2-1 中，信源是信息的发出者，它把各种可能的信息转换成原始信号，为了使其能适合在信道上传输，就要通过某种变换器将原始信号转换成需要的信号。例如，利用模拟传输系统传输数字数据就需要调制解调器 (Modem) 这样的一种变换器。调制器 (Modulator) 的主要作用是一个波形转换器，它将基带数字信号的波形变换成适合于模拟信号输出的波形；而解调器 (Demodulator) 的作用就是一个波形识别器，它将经过调制器变换过的模拟

信号恢复成原来的数字信号。常用的信源有电话机话筒、摄像机、传真机、计算机等。

在发送设备和接收设备之间用于传输信号的介质称为信道。信道一般表示向某一个方向传送信息的介质，一条信道可以看成是一条电路的逻辑部件。一条物理信道（传输介质）上可以有多个逻辑信道（利用多路复用技术）。数字信号经过数模变换后可以在模拟信道上传送，模拟信号经过模数变换后也可以在数字信道上传送。

信宿是指信息的接收者，它将接收到的信号转换成相应的信息。

图 2-1 中的噪声源是信道中的噪声以及分散在通信系统其他各处噪声的集中表示。信号在传输过程中受到的干扰称为噪声，干扰可能来自外部，也可能由信号传输过程本身产生。

就目前来说，不论是模拟通信还是数字通信，在通信业务中都得到了广泛应用。但是，近几年来，数字通信发展十分迅速，在大多数通信系统中已经替代模拟通信，成为当代通信系统的主流。这是因为与模拟通信相比，数字通信更能适应通信技术越来越高的要求。数字通信的主要优点如下：

- 抗干扰能力强：在远距离传输中，各中继站可以对数字信号波形进行整形再生而消除噪声的积累；此外，还可以采用各种差错控制编码方法进一步改善传输质量。
- 便于加密，有利于实现保密通信。
- 易于实现集成化，使通信设备的体积小，功耗低。
- 数字信号便于存储、处理、交换，便于和计算机连接，也便于用计算机进行管理。

当然，数字通信的许多优点都是用比模拟信号占更宽的频带而换得的。以电话为例，一路模拟电话通常只占 4kHz 带宽，但一路数字电话却占据 20kHz~60kHz 的带宽。随着社会生产力的发展，有待传输的数据量急剧增加，传输可靠性和保密性要求越来越高，所以实际工程中，宁可牺牲系统频带也要采用数字通信。至于在频带宽裕的场合，例如微波通信、光通信等，当然都惟一地选择数字通信。

图 2-2 是通信系统的一个实例，工作站通过公共电话网 PSTN 与一个服务器进行通信。



图 2-2 通信系统实例

在此实例中，数据通信系统要完成的一系列关键任务为：

(1) 接口规范：为了通信，设备接口必须和传输系统相兼容，使产生的信号特性（如信号波形和强度）能适应传输系统传输，并且能够在接收端对数据进行解释。

(2) 同步：接收端要按发送端发送的每个码元波形的重复频率和起止时间来接收数据，并且要校对自己的时钟以便与发送端的发送取得一致，实现同步接收。

(3) 传输系统利用率：传输设施通常是由很多的通信设备共享的。要有效地利用这些设施，必须采用相应的介质访问控制协议来合理有效地为各个站点分配传输介质的带宽；

要协调传输服务的要求，以免系统过载，如各种局域网物理层技术规范及拥塞控制技术。

(4) 差错检测和校验：对通信过程中产生的传输差错进行检测和校正，在发送端对数字信号以一定的编码规则附加一些校验码元进行抗干扰编码，在接收端利用该规则进行相应的译码，译码的结果有可能发现差错并能够纠正差错，最好还有流量控制的功能，以防止接收器来不及接收信号。

(5) 灾难恢复：不同于差错检测和校验，它发生在系统因某种原因（包括自然灾害）被破坏或中断，需要对系统进行恢复时。

(6) 寻址和路由：决定信号到达的目的地的最佳路径。

(7) 网络安全：保证经过加密的数据正确、完整、不被泄漏地从发送端传输到接收端。

(8) 网络管理：对复杂的通信系统设备进行配置、故障、性能、安全、计费管理等。

### 2.1.2 数据通信系统的主要质量指标

数据通信的任务是传输数据，希望达到速度快、出错率低、信息量大、可靠性高，并且既经济又便于使用维护。为了衡量通信系统的质量优劣，必须使用通信系统的性能指标，即质量指标。这些指标是对整个系统进行综合评估而规定的。通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题，涉及通信的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等。但是从研究信息的传输来说，通信的有效性和可靠性是最重要的指标。有效性指的是传输一定的信息量所消耗的信道资源（带宽或时间），而可靠性指的是接收信息的准确程度。这两项指标体现了对通信系统最基本的要求。

有效性和可靠性这两个要求通常是矛盾的，因此只能根据需要及技术发展水平尽可能取得适当的统一。例如在一定可靠性指标下，尽可能提高信息的传输速度；或者在一定有效性条件下，使消息的传输质量尽可能高。模拟通信和数据通信对这两个指标要求的具体内容有较大差异。

#### 1. 模拟通信系统的质量指标

##### (1) 有效性

模拟通信系统的有效性是用有效传输带宽来度量。同样的信息采用不同的调制方式，则需要不同的频带宽度。频带宽度越窄，有效性越好。如传输一路模拟电话，单边带信号只需要 4kHz 带宽，而常规调幅或双边带信号则需要 8kHz 带宽，因此在一定频带内，用单边带信号传输的路数比常规调幅信号多一倍，即可以传输更多的信息，显然单边带系统的有效性比常规调幅系统要好。

##### (2) 可靠性

模拟通信系统的可靠性是用接收端最终的输出信噪比来度量。信噪比越大，通信质量越高。如普通电话要求信噪比在 20dB 以上，电视图像则要求信噪比在 40dB 以上，信噪比是由信号功率和传输中引入的噪声功率决定的。不同调制方式在同样信道条件下所得到的输出信噪比是不同的。例如，调频信号的抗干扰性能比调幅信号好，但调频信号所需的传输带宽却大于调幅信号。

## 2. 数字通信系统的质量指标

数字通信系统的有效性用传输速率来衡量，可靠性用差错率（误码率）来衡量。

### (1) 传输速率

数据传输速率指的是单位时间内传送的信息量，它有多种表示方法。

数字信号由码元组成，码元携带一定的信息量。定义单位时间传输的码元数为码元速率  $R_s$ ，单位为码元/秒，又称为波特（Baud），简记为 Bd，码元速率也称传码率，它是一种调制速率。定义单位时间传输的信息量为信息速率  $R_b$ ，单位为 bit/s（比特/秒）或 bps，所以信息速率又称比特率。波特和比特是两个不同的概念，波特是码元传输速率的单位，它说明每秒传输多少个码元。比特是信息量的单位。一个二进制码元的信息量为 1bit，一个  $M$  进制码元的信息量为  $\log_2 M \text{bit}$ 。信息的传输速率“比特/秒”与码元的传输速率“波特”在数量上有一定的关系，若 1 个码元只携带 1bit 的信息量，则“比特/秒”和“波特”在数值上是相等的；但若使一个码元携带  $n$  bit 的信息量，则  $M$  Baud 的码元传输速率所对应的信息传输速率为  $M.n$  bps，所以码元速率  $R_s$  和信息速率  $R_b$  之间的关系为： $R_b = R_s \cdot \log_2 M$  (bit/s) 或  $R_s = R_b / \log_2 M$  (Baud)。

一般在二元制调相方式中， $R_s$  和  $R_b$  相等；但在多元调相的情况下就不一定了。例如：对于 2400bps 的四相制调制解调器，单位脉冲  $T=833 \times 10^{-6} \text{s}$ ，状态数  $M=4$ ，则数据传输速率  $R_b = (1/T) \times \log_2 M = (1/833) \times 10^6 \times 2 = 2400 \text{bps}$ ；调制速率  $R_s = 1/T = 1200 \text{Baud}$ 。

### (2) 差错率

差错率即误码率，是衡量数据通信系统在正常工作情况下传输可靠性的指标，它的定义是：二进制码元被传输出错的概率。被传错的码元数为  $N_e$ ，传输的二进制码元总数为  $N$ ，则误码率为  $P_s = \text{错误码元数} / \text{传输的总码元数} = N_e / N$ ；有时将误码率称为误符号率。在计算机网络中，误码率通常要求低于  $10^{-6}$ 。定义误比特率  $P_b$  为： $P_b = \text{错误比特数} / \text{传输的总比特数}$ ；误比特率又称为误信率。差错率越小，通信的可靠性越高。

## 2.2 数据编码技术

模拟信号和数字信号在通过某一介质传输时需进行调制和编码。调制是载波信号的某些特性根据输入信号而变化的过程，包括幅度、频率和相位的变化，它其实就是进行波形变换，说得更严格些，是进行频谱变换，将基带数字信号的频谱变换成适合于在模拟信道中传输的频谱。无论是模拟数据还是数字数据，原始输入数据经过调制就作为模拟信号通过介质发送出去，并将在接收端进行解调，再变换成原来的形式。

编码是将模拟数据或数字数据变换成数字信号，以便通过数字通信介质传输出去，简而言之，就是把数据转换成适合在介质上传输的信号。解码就是指在接收端收到数字信号后，再反变换恢复成原来的模拟或数字信号。

数据与信号之间一般有四种可能的组合来满足各种数据传输方法的需要，分别为：数字数据→数字信号；数字数据→模拟信号；模拟数据→数字信号；模拟数据→模拟信号。

### 2.2.1 数字数据的数字信号编码

数字通信系统的任务是传输数字信息。数字信息可能是来自数据终端设备的原始数据信号，也可能是来自模拟信号经数字化处理后的脉冲编码信号。数字信息在一般情况下可以表示为一个数字序列： $\dots, a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$ 简记为 $\{a_n\}$ 。 $a_n$ 是数字序列的基本单元，称为码元。每个码元只能取离散的有限个值，例如在二进制中， $a_n$ 取“0”或“1”两个值；在 $M$ 进制中， $a_n$ 取“0, 1, 2,  $\dots, M_{n-1}$ ”等 $M$ 个值，或者取二进制码的 $M$ 种排列。

传输数字信息的方法是按传输波形来分类的。由于码元只有有限个可能取值，所以通常用不同幅度的脉冲表示码元不同取值，例如用幅度为 $A$ 的矩形脉冲表示“1”，用幅度为 $A$ 的矩形脉冲表示“0”。最简单的数字信息的二元代码波形是让符号“1”和“0”对应直流的正负，或者对应正、负电位之中的任意一个与零电位。像这种不使用载波，而直接让“1”和“0”对应适当电位的方法叫基带方式，相应的脉冲信号被称为数字基带信号，这是因为它们所占据的频带通常从直流和低频开始。在某些有限信道中，特别是在传输距离不太远的情况下，数字基带信号可以直接传输，这种传输方式被称为数字信号的基带传输。但大多数实际信道都是带通型的，所以必须先用数字基带信号对载波进行调制，即在载波的振幅、频率、相位诸物理量中，使其与“1”或“0”对应，形成数字调制信号后再进行传输，这种传输方式被称为数字信号的载波调制传输。虽然在多数情况下必须使用数字调制传输系统，但是对数字基带传输系统的研究仍是十分必要的。这不仅因为基带传输本身是一种重要的传输方式，还因为调制传输与之有着紧密的联系。如果把调制和解调看做广义信道的一部分，则任何数字传输均可等效为基带传输系统，因此掌握数字信号的基带传输原理十分重要。

数字基带信号是数字信息的电脉冲表示，电脉冲的形式称为码型。通常把数字信息的电脉冲表示过程称为码型或码型变换，在有线信道中传输的数字基带信号又称为线路传输码型，由码型还原为数字信息称为码型译码。不同的码型具有不同的频域特性，合理地设计码型使之适合于给定信道的传输特性，是基带传输首先要考虑的问题。对于码型的选择，通常要考虑以下因素：

- 对于传输频带低端受限的信道，线路传输码型的频谱中不应含有直流分量；
- 信号的抗噪声干扰能力强，产生误码时，在译码中产生的误码扩散或误码增值小；
- 便于从信号中提取位同步定时信息；
- 尽量减少基带信号频谱中高频分量，以节省传输频带，并减小串扰；
- 编译码的设备应尽量简单。

数字基带信号的码型种类很多，并不是所有的码型都能满足上述要求，往往要根据实际需要进行选择。本节将介绍目前应用比较广泛的一些重要码型。

最简单的编码是不归零制（NRZ, Non-Return to Zero），即用两个电平来表示两个二进制数字；用高电平（正电压）表示1，用低电平（负电压）表示0（如图2-3（a）所示）。不归零制有很多缺点，它难以判断一位的结束和另一位开始，需要用某种方法来使发送

器和接收器进行定时或同步。如果传输中都是“1”或“0”的话，那么在单位时间内将产生累积的直流分量，它能使设备连接点产生电腐蚀或其他损坏。

克服不归零制编码缺点的一种编码方案是曼彻斯特（Manchester）编码（如图 2-3（b）所示）。它是一种自同步编码方式，包括数据信息和时钟信息。它的编码方法是将每一个码元再分成两个相等的间隔，码元 1 是前一个间隔为高电平而后一个间隔为低电平；码元 0 则正好相反，从低电平变到高电平。这种编码的优点是可以保证在每一个码元的正中间出现一次电平的转换，对接收端提取位同步信号非常有利，而且当码元中间无跳变时，就形成违例码，这种违例的情况可形成帧标志。但是从曼彻斯特编码的波形图不难看出其缺点，这就是它所占的频带宽度比原始的基带信号增加了一倍。

另一种曼彻斯特编码的变种叫做差分曼彻斯特编码（如图 2-3（c）所示），它的编码规则是：若码元为 1，则其前半个码元的电平与上一个码元的后半半个码元的电平一样；但若码元为 0，则其前半个码元的电平与上一个码元的后半半个码元的电平相反。不论码元是 1 或 0，在每个码元的正中间时刻，一定要有一次电平的转换。差分曼彻斯特编码需要较复杂的技术，但可以获得较好的抗干扰性能。

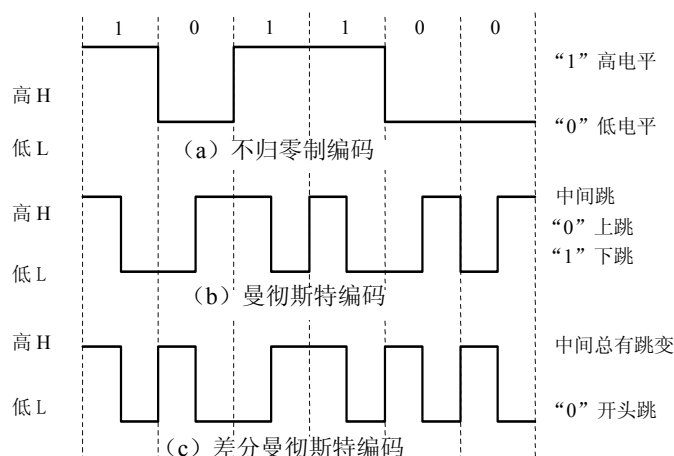


图 2-3 常用数字信号编码

曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码常被广泛地应用于局域网的物理层中，例如曼彻斯特编码被以太网（EtherNet）采用，差分曼彻斯特编码被令牌环网（Token Ring）采用。

## 2.2.2 数字数据的模拟信号编码

数字设备（如计算机或终端）通过调制解调器接入电话网络进行通信是利用模拟信号传输数字数据的典型情况。模拟信号发送的基础就是一种称之为载波信号的连续的频率恒定的信号。通过调制振幅、频率和相位等载波特性或者这些特性的某种组合，来对数字数据进行编码。最基本的数字数据→模拟信号调制方式有以下三种（如图 2-4 所示）。

(1) 幅移键控方式（ASK, Amplitude-Shift Keying）：载波的振幅随基带数字信号而变化。例如，“0”对应于无载波输出，而“1”对应于有载波输出。

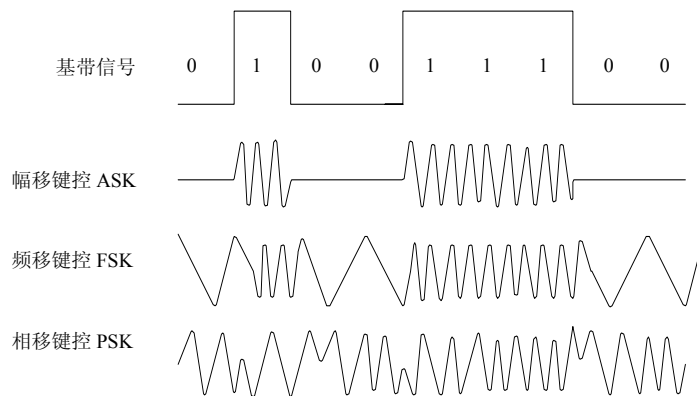


图 2-4 对基带数字信号的几种调制方法

(2) 频移键控方式 (FSK, Frequency-Shift Keying): 载波的频率随基带数字信号而变化。例如, “0” 对应于频率  $f_1$ , 而 “1” 对应于频率  $f_2$ 。

(3) 相移键控方式 (PSK, Phase-Shift Keying): 载波的初始相位随基带数字信号而变化。例如, “0” 对应于相位  $0^\circ$ , 而 “1” 对应于  $180^\circ$ 。

关于解调 (即从模拟信号恢复出数字数据) 的原理简述如下: 对于 ASK 信号, 可以用整流再滤波的方法检测出原始信号; 对于 FSK 信号可以通过检查零交叉点的方法恢复出数据; 对于一般 PSK 信号, 例如相位不变代表 0, 相位移相  $180^\circ$  代表 1, 可以把信号放大整形, 延时一个信号单元时间, 然后反相, 再和原信号相异或, 即可恢复出原始数据。

### 2.2.3 模拟数据的数字信号编码

脉冲编码调制 (PCM, Pulse Code Modulation) 是波形编码中最重要的一种方式, 在光纤通信、数字微波通信、卫星通信等中均获得了极为广泛的应用。现在的数字传输系统大多采用 PCM 体制。PCM 最初并不是用来传送计算机数据的, 采用它是为了解决电话局之间中继线不够的问题, 使一条中继线不只传送一路而是可以传送几十路电话。PCM 过程主要由采样、量化与编码三个步骤组成。采样是把时间上连续的模拟信号转换成时间上离散的采样信号, 量化是把幅度上连接的模拟信号转换成幅度上离散的量化信号, 编码是把时间离散且幅度离散的量化信号用一个二进制码组表示。能否由离散样值序列恢复重建原始模拟信号则是采样定理所要回答的主要问题。采样定理是任何模拟信号数字化的理论基础。通信中的电话、图像业务, 其信源是在时间上和幅度上均为连续取值的模拟信号, 只有通过 PCM 才能实现数字化的传输和交换。话音信号的编码和图像信号的编码, 两者虽然各有其特点, 但基本原理是一致的。

### 2.2.4 模拟数据的模拟信号调制

在电话机和本地局交换机之间所传输的信号就是采用这种编码方式。模拟的声音数据是加载到模拟的载波信号中传输的。

无线语音广播是模拟信号传输模拟数据的另一个例子。有效的传输需要比较高的频



率。对于无线传播，传送基带信号几乎是不可能的，因为那将需要直径为好几公里长的天线。另外，调制有助于频分复用。

## 2.3 多路复用技术

一般情况下，在远程数据通信或计算机网络系统中，传输信道的传输容量往往大于一路信号传输单一信息的需求，所以为了有效地利用通信线路，提高信道利用率，人们研究和开发了通信链路的信道共享和多路复用（Multiplexing）技术。多路复用器连接许多低速线路，并将它们各自所需的传输容量组合在一起后，仅由一条速度较高的线路传输所有信息。其优点是显然的，这在远距离传输时，可大大节省电缆的安装和维护，降低整个通信系统的费用，并且多路复用系统对用户是透明的，提高了工作效率。

### 2.3.1 频分多路复用

当介质的有效带宽超过被传输的信号带宽时，可以把多个信号调制在不同的载波频率上，从而在同一介质上实现同时传送多路信号，即将信道的可用频带（带宽）按频率分割多路信号的方法划分为若干互不交叠的频段，每路信号占据其中一个频段，从而形成许多个子信道（如图 2-5 所示）；在接收端用适当的滤波器将多路信号分开，分别进行解调和终端处理，这种技术称为频分多路复用（FDM，Frequency Division Multiplexing）。

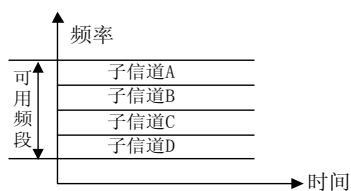


图 2-5 FDM 子信道示意图

FDM 系统的原理示意图如图 2-6 所示，它假设有 6 个输入源，分别输入 6 路信号到频分多路器 FDM-MUX，多路器将每路信号调制在不同的载波频率上（例如  $f_1, f_2, \dots, f_6$ ）。每路信号以其载波频率为中心，占用一定的带宽，此带宽范围称做一个通道，各通道之间通常用保护频带隔离，以保证各路信号的频带间不发生重叠。输入信号可以是模拟的，也可以是数字的。

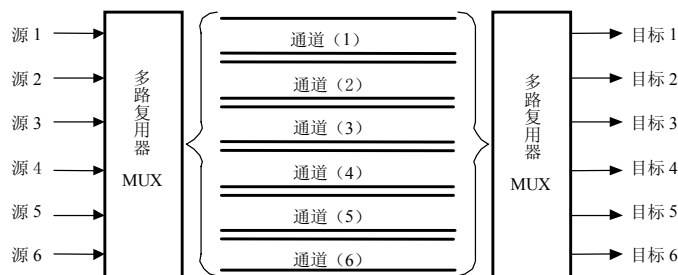


图 2-6 FDM 系统的原理示意图

频分多路复用的优点是信道的利用率高，允许复用的路数多，分路也很方便，并且频带宽度越大，则在此频带宽度内所容纳的用户数就越多；缺点是设备复杂，不仅需要大量的调制器、解调器和带通滤波器，而且还要求接收端提供相干载波；此外，由于在传输过程中的非线性失真及频分复用信号抗干扰性能较差，不可避免地会产生路际串音干扰。为了减少载频的数量和所需设备部件的类型，一般都采用多级调制的方法。

### 2.3.2 时分多路复用

时分多路复用（TDM, Time Division Multiplexing）是将多路信号按一定的时间间隔相间传送以在一条传输线上实现“同时”传送多路信号。基本的 TDM 是同步时分多路复用技术，如果采用较复杂的措施以改善同步时分复用的性能，就成为统计时分多路复用（STDM, Statistical Time Division Multiplexing）或异步时分多路复用（ATDM, Asynchronous TDM）。

TDM 是将传输时间划分为许多个短的互不重叠的时隙，而将若干个时隙组成时分复用帧，用每个时分复用帧中某一固定序号的时隙组成一个子信道，每个子信道所占用的带宽相同，每个时分复用帧所占的时间也是相同的（如图 2-7 所示），即在同步 TDM 中，各路时隙的分配是预先确定的时间且各信号源的传输定时是同步的。对于 TDM，时隙长度越短，则每个时分复用帧中所包含的时隙数就越多，所容纳的用户数也就越多，其原理如图 2-8 所示。每一个通道在时间上按照预先确定的时间错开一位、一个字节或一块数据的时间，以此来共享传输信道。

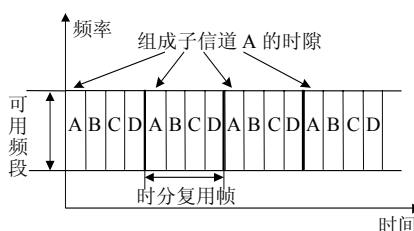


图 2-7 TDM 子信道示意图

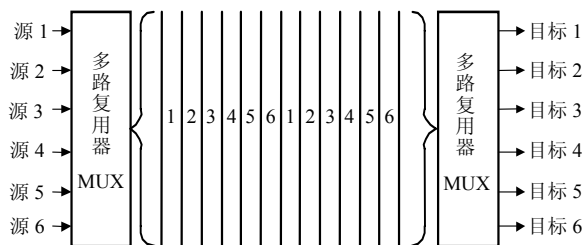


图 2-8 TDM 原理

TDM 与 FDM 在原理上的差别是很明显的。TDM 适用于数字信号，而 FDM 适用于模拟信号；TDM 在时域上各路信号是分割开的，但在频域上各路信号是混叠在一起的；FDM 在频域上各路信号是分割开的，但在时域上各路信号是混叠在一起的；TDM 信号的形成和分离都可通过数字电路实现，比 FDM 信号使用调制器和滤波器要简单得多。

### 2.3.3 波分多路复用

在光纤信道上使用的频分多路复用的一个变种就是波分多路复用（WDM, Wave-length Division Multiplexing）。如图 2-9 所示即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衍射光栅，每根光纤里的光波处于不同的波段上，这样两束光通过棱柱或衍射光栅合到一根共享的光纤上，到达目的地后，再将两束光分解开来。

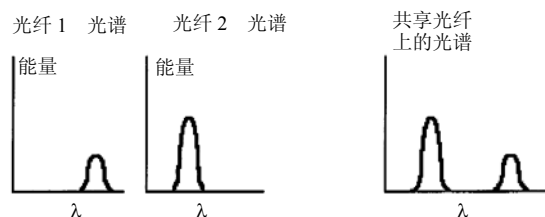


图 2-9 波分多路复用

这是不同波长的光载波信号在同一根光纤中同时传输的复用技术。波分多路复用光纤通信系统分为单向系统和双向系统两种。单向系统使用合波器和分波器来实现波分复用功能。双向系统使用双向耦合器来实现波分复用功能。

在单向波分多路复用光纤通信系统中，发送端用合波器将工作在不同波长的光发射机所发射的光载波信号合起来，通过同一根光纤传送到接收端。在接收端用分波器将不同波长的光载波信号分开，然后分别将它们送到相应光波长的光接收机，对各自所接收到的光信号做进一步处理。在双向系统多路复用光纤通信系统中，采用双向耦合器将工作在不同波长的光发射机所发射的光载波信号合起来，通过同一根光纤传送到接收端。在接收端也用双向耦合器将不同波长的光载波信号分开，然后分别将它们送至相应光波长的光接收机，并做进一步处理。由于通信两端通过一根光纤同时接收和发送，因此实现了双向波分复用功能。

复用器是合波器、分波器和双向耦合器的统称，它是波分复用光纤通信系统的关键。其主要性能指标是插入损耗和串扰衰减。插入损耗是指在波分多路复用系统中，由于使用了复用器而引起的附加损耗，一般要求插入损耗小于 1.0dB~2.5dB。串扰衰减是由于复用器件分光性能不完善，信道间产生一定的串音干扰所产生的。串扰衰减是指其他信道串入本信道的光功率与本信道所接收的有效信号光功率之比，一般要求为 50dB 或更大。

光波复用技术在通信中具有很好的应用前景。光纤带宽高达  $2 \times 10^{10} \text{Hz} \sim 3 \times 10^{10} \text{Hz}$ ，常规光纤通信只利用了光纤带宽很小的一部分。光纤带宽的充分利用，必须依靠光波复用技术。如能很好利用光波复用和光频复用技术，将使一根光纤的传输容量大大提高。光波复用器具有体积小、结构简单、信道传输全透明的特征。电子系统速率在当今条件下已达到极限，但采用光波复用技术则仍可大幅度提高光纤总传输速率。

光波复用技术的发展包括光波分复用器件结构、性能以及光复用技术在通信中的应用。光波分复用器件结构、性能的发展趋势是：复用信道数大，相邻信道间隔小；具有灵活复用和分用的特征，即分波信道的波长可变；发展光集成波导，如平面光栅集成光波分复用器；采用新的工作机制，如用全息透射光栅制作的分波器；全光纤特征的器件；高性能的激光器、光探测器、光纤等。光波分复用技术在通信领域中应用的发展速度也很快。通过光纤放大器和光波分复用技术相结合，能高效经济地发挥长距离光纤网络的巨大带宽潜力，其潜在的传输容量至少是目前系统的 50 倍，并可大大提高网络的可靠性和灵活性。

#### 2.3.4 码分多路复用

前面介绍的频分多路复用 FDM（或波分多路复用 WDM）是以频道的不同来区分地址

的，其特点是独占频道而共享时间。时分多路复用 TDM 则是共享频率而独占时间片，相当于在同一频率内不同相位上发送和接收信号，而频率资源则被共享。

码分多路复用（CDMA，Coding Division Multiplexing Access）技术则是一种用于移动通信系统的新技术。笔记本电脑或个人数字助理（PDA，Personal Data Assistant）以及手提电脑（HPC，Handed Personal Computer）等移动计算机的连网通信将会大量用到码分复用技术。

CDMA 的复用原理是基于码型分割信道的。每个用户分配有一个地址码，而这些码型互不重叠，其特点是频率和时间资源均为共享。因此，在频率和时间资源紧缺的环境下，CDMA 将独具魅力，这也是 CDMA 受到人们普遍关注的缘故。图 2-10 显示了 CDMA 的信道连接方式，在该图中，前向/反向信道是采用频率划分的方式，即移动站对基站方向的载波频率为  $f'$ ，基站对移动站方向的载波频率为  $f$ 。在同一载波的码分信道可如图 2-11 所示。

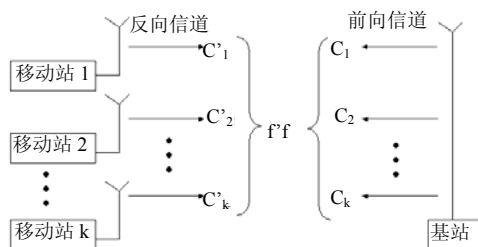


图 2-10 CDMA 技术

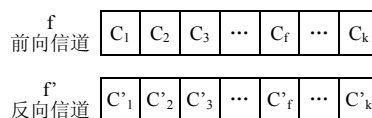


图 2-11 CDMA 码分信道

如图 2-10 和图 2-11 所示，CDMA 技术中的反向信道共享频率  $f'$ ，而前向信道则共享频率  $f$ ；对于共享这些信道的每个用户，又分配了码型信号相互正交的正交地址码  $C_1, C_2, \dots, C_k$ 。利用码型和移动用户的一一对应关系，只要知道用户地址（地址码）便可实现选址通信，从而实现了在时间上的共享。

在码分多路复用中，宽带码分多路复用 W-CDMA 是第三代移动通信的重要无线接入技术，在移动网络、移动 Internet 及移动 IP 网中具有广泛的用途。

## 2.4 数据通信方式

### 2.4.1 并行通信与串行通信

在计算机系统的各个部件之间以及计算机与计算机之间，数据信息都是以通信的方式进行交换的。这种通信有两种基本方式：串行和并行。一般说来，并行传输用于近距离，串行传输用于较远的距离。

如图 2-12 (a) 所示，在并行传输中，至少有 8 个数据位在设备之间传输。发送设备将 8 个数据位通过 8 条数据线传送给接收设备，还可以有 1 位用作数据检验位，接收设备

可同时接收到这些数据。在计算机内部的数据通信通常都以并行方式进行，并且把并行的数据传送线称做总线，如并行传送 8 位数据就叫做 8 位总线，并行传送 16 位数据就叫做 16 位总线。

在并行数据传输中，使用的并行数据总线的物理形式有多种，但功能都是一样的。例如：

- 计算机内部数据总线可以直接用电路板实现。
- 使用扁平带状电缆，如硬盘、软盘驱动器上的电缆就属于这一种。
- 圆形屏蔽电缆，例如用于外设的平行通信电缆，通常有屏蔽以防干扰。

并行传输需要 8 条以上的数据线，当进行短距离通信时，其费用还是可以容忍的，但是在进行长距离数据传输时，使用这种方法就显得太不经济了。

串行传输方式是在一根数据传输线上，每次传送一位二进制数据，1 位接 1 位地传送。很显然，在同样的时钟频率下，与同时传输多位数据的并行传输相比，串行传输的速度要慢得多，但由于串行传输节省了大量通信设备和通信线路，在技术上更适合远距离通信。因此，计算机网络普遍采用串行传输方式。

由于计算机内部处理的都是并行数据，在进行串行传输之前，必须将并行数据转换成串行数据；在接收端要将串行数据转换成并行数据。数据转换通常以字节为单位进行，用移位寄存器来完成，如图 2-12 (b) 所示。在发送端将一个字节的数据送入移位寄存器 A，在时钟脉冲 CP1 的作用下，8 位并行数据逐位向右移动。在传输线上形成 8 位串行数据，送往接收端的移位寄存器 B 的串行输入端。在移位寄存器 B 的时钟脉冲 CP2 的作用下，将串行数据逐位右移入移位寄存器 B。当移入一个完整的字节后，就从并行数据输出端将一个字节的数据读出。目前的这种串并行数据之间的转换都是由大规模集成电路来完成的。

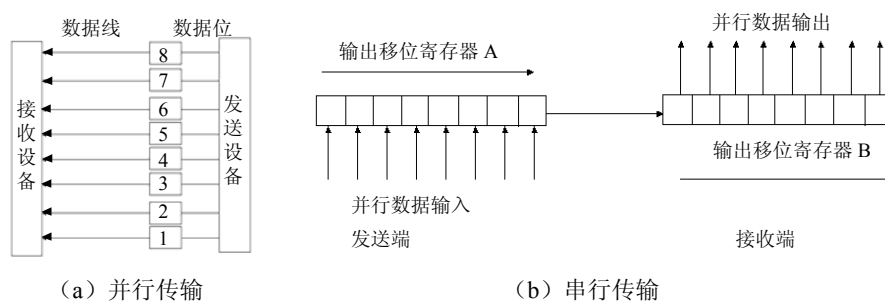


图 2-12 串行通信与并行通信

## 2.4.2 单工通信与双工通信

按照数据在线路上的流向，串行数据通信可分为三种类型：单工、半双工与全双工。

### 1. 单工通信

在单工通信方式中，信号只能向一个方向传输，任何时候都不能改变信号的传送方向。如图 2-13 (a) 所示，数据信息总是从发送端 A 传输到接收端 B。这种情况与无线电广播相类似，信号只在一个方向上传播，电台发送，收音机接收。

## 2. 半双工通信

如图 2-13 (b) 所示, 在半双工通信方式中, 信号可以双向传送, 但必须交替进行, 一个时间只能向一个方向传送。可以双向传送信号, 但必须交替进行的通信信道, 只能用于半双工通信方式中。

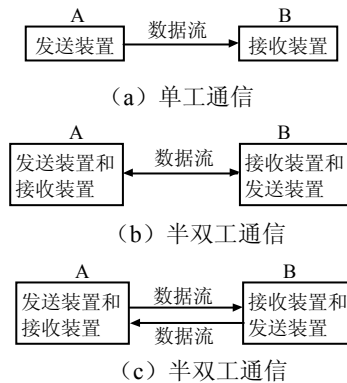


图 2-13 单工、半双工、全双工通信

## 3. 全双工通信

全双工能同时在两个方向上进行通信, 即有两个信道, 如图 2-13 (c) 所示, 数据同时在两个方向流动, 它相当于把两个相反方向的单工通信组合起来。显然, 全双工通信效率高, 但构建系统的造价也高。

单工通信或半双工通信只需要一条信道, 而全双工通信则需要两条信道 (每个方向各一条)。显然, 全双工通信的传输效率最高。

### 2.4.3 基带传输与频带传输

#### 1. 基带传输

在信道上, 数据是由变化的信号携带的。这些信号的变化表现为一定的频率特征, 傅立叶分析表明, 基频为  $f$  的任意周期函数  $g(t)$  都可以表示为无限个正弦和余弦函数之和。即:

$$g(t) = \frac{1}{2}C + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

其中,  $f$  称为基频,  $C$  是一个常数,  $a_n$ 、 $b_n$  是第  $n$  次波的幅值。因此, 对于任意信号, 都可以看做许多不同频率的正弦、余弦信号和一个直流分量的组合。通常把由计算机或终端产生的未经调制过的呈矩形的数字信号所固有的频率范围称做基本频带, 简称基带。基带的范围可以从直流 (0Hz) 到数百千赫, 甚至数兆赫, 例如电视信号的基本频带为 0Hz~6MHz。在数字通信信道上, 直接传输基带信号, 称为基带传输。基带传输是一种重要的传输方式, 它要求形成适当的波形, 使数据信号在带宽受限的信道上通过时不会由于波形失真而产生码间干扰。

在发送端基带传输的信源数据经过编码器变换, 变为直接传输的基带信号, 例如曼彻斯特编码或差分曼彻斯特编码信号。在接收端由解码器恢复成与发送端相同的数据。基带

传输是一种最基本的数据传输方式。

## 2. 频带传输

一般通信线路（如电话线）在远距离传输时，只适合传输一定的频带信号（如电话线路中只适合传输 300Hz~3000Hz 的音频信号），不适于传输基带信号。由于电话交换网是用于传输语音信号的模拟通信信道，并且是目前覆盖面最广的一种通信方式，因此利用模拟通信信道进行数据通信也是最普遍使用的通信方式之一。我们将利用模拟通信信道传输数据信号的方法称为频带传输。

### 2.4.4 同步通信与异步通信

比特的传送和接收是通过定时时钟来完成的。发送计算机利用它的时钟来决定每个比特的起始和结束。在接收计算机那里，时钟被用来确定对信号进行采样取值的位置和间隔时间。一般情况下，使两个独立的时钟精确同步是不太可能的，它们都产生自己的漂移，引起两个连续采样之间的间隔比所希望的变长了或变短了。例如，对于一种产生 100bps 的数据流，应该每隔 0.01 秒有一个时钟信号；但由于时钟的漂移，偏差范围从  $0.01 - \Sigma$  到  $0.01 + \Sigma$ ， $\Sigma$  的大小取决于时钟的产生方法。

时钟漂移会引起接收方在确定一个比特的起始和结束位置时发生错误。由于接收时钟与发送时钟的差异，接收方可能对代表 1 位的信号采样两次，从而多产生一个比特，也可能跳过一个比特。作为例子，如图 2-14 所示，传送 0010 这样一串比特，因为时钟漂移结果被接收方错误地认为是 00110 或 010。

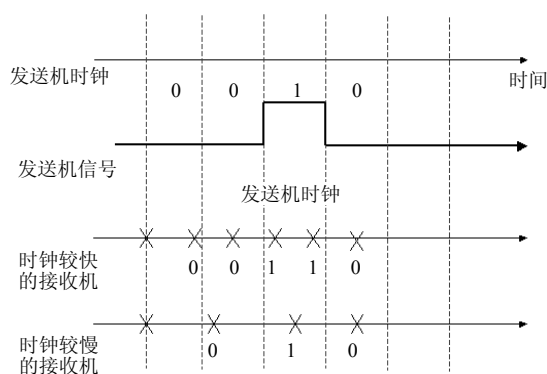


图 2-14 时钟漂移引起的问题

解决上述同步问题的方法有两种。第一种称为异步法，发送方和接收方独立地产生时钟，但定期地进行同步。第二种方法称为同步方法，接收端时钟完全由发送方时钟控制，也就是说，接收方时钟与发送方时钟是严格同步的。

#### 1. 异步传输

异步传输是基于这样的事实：在一定的比特数目内，时钟漂移的程度是有限的。它让接收方在某一个时间点上跟一个发送方时钟信号同步，并由此开始自己独立的时钟信号序列。由于偏移  $\Sigma$  相对于一个比特时间来说是比较小的，故接收方可以在偏移积累到采样发

生错误之前正确地接收若干个比特。

在异步传输中，数据以字符为单元发送；每个字符的长度根据所使用的编码方案可以为 5 到 8 个比特。作为例子，常用的 ASCII 编码每个字符 7 个比特；另一种在所有的 IBM 机器（个人计算机除外）上采用的 EBCDIC（扩展的二进制编码的十进制交换码）编码是每个字符 8 个比特。值得注意的是，定时或同步仅仅在每个字符的范围内维持着，接收方在每个新字符的开头都被提供机会重新进行同步。

## 2. 同步传输

在同步传输中，以一种稳定的流方式传送比特块，不使用开启位和停止位编码。该数据块在长度上可以是多个比特。为了防止发送机和接收机之间的定时漂移，它们的时钟必须通过某种途径保持同步。一种可能性是在发送设备和接收设备之间提供单独的时钟线路，由一方（发送方或接收方）负责在线路上定期地加载脉冲，即每个比特周期发送一个短脉冲。另一方使用这些规则脉冲作为时钟。这种技术在短距离上工作得很好，但对于较长的距离，时钟脉冲会跟数据信号一样面临失真的问题，从而产生定时错误。另一种替代的方法是在数据信号中嵌入时钟信息。对于数字信号，这可以通过使用曼彻斯特或差分曼彻斯特编码得以实现。对于模拟信号，有多种技术可以使用，例如可以使用载波频率本身基于载波的相位来使接收设备同步。

对于同步传输，还需要进行另一个层次上的同步，使得接收设备能够确定一个数据块的开始和结束。为了达到这一目标，每个块以一个前缀比特图案开始，并且一般还用一個后缀比特图案结尾。此外，还附加一些其他比特传递在数据链路控制过程中要使用的控制信息。数据加上前缀、后缀和控制信息就形成了帧。准确的帧格式取决于所使用的数据链路控制过程。

跟异步传输不同，同步传输每次传送一个完整的数据块，而不仅仅是一个字节。信息在发送前要向对方发出专门的同步字符或同步位串，同步在每个数据块的开头进行，所以这是一种面向码组成信息块的通信技术。

同步通信比异步通信更为有效，因为额外开销的同步字符或位串所占的比例小。因此在高速通信中是必用的方式。典型的同步协议有二进制同步通信规程和高级数据链路控制规程。

## 2.5 数据传输介质

传输介质是通信网络中连接计算机的具体物理设备和数据传输物理通路。计算机网络中常使用双绞线、同轴电缆、光纤等有线传输介质。另外，也经常利用无线电短波、地面微波、卫星通信、红外线通信、激光通信等无线传输介质。传输介质的特性包括物理描述、传输特性、信号发送形式、调制技术、传输带宽容量、频率范围、连通性、抗干扰性、性能价格比、连接距离、地理范围等。下面分别介绍几种常用传输介质的特性。



### 2.5.1 有线介质

#### 1. 双绞线

无论是对模拟数据传输还是数字数据传输，最普通的传输介质就是双绞线。它是由按一定规则螺旋结构排列并扭在一起的多根绝缘导线所组成，芯内大多是铜线，外部裹着塑橡胶绝缘外层，线对扭绞在一起可以减少相互间的幅射电磁干扰。早期使用双绞线最多的地方是电话系统，差不多所有的电话机都用双绞线（二芯制，RJ-11 接头）连接到电话交换机上。计算机网络中常用的双绞电缆是由 4 对线（8 芯制，RJ-45 接头）按一定密度相互扭绞在一起的。按照其外部包裹的是金属编织层还是塑橡胶外皮，可分为屏蔽双绞线电缆（STP，Shielded Twisted Pair Cable）和非屏蔽双绞线电缆（UTP，Unshielded TP Cable）。UTP 电缆每对线的绞距与所能抵抗的电磁辐射干扰成正比，并采用了滤波及对称性等技术，具有体积小、安装简便等特点。STP 只不过在护套层内增加了金属屏蔽层，可有效减少串音及电磁干扰 EMI、射频干扰 RFI，它大多是一种屏蔽金属铝箔双绞电缆。STP 电缆还有一根漏电线，主要用来连接到接地装置上，泄放掉金属屏蔽的电荷，解除线间的干扰问题。一般来讲，在低频传输时，双绞电缆的抗干扰性相当于或高于同轴电缆的抗干扰性，但价格要比同轴电缆或光纤便宜得多。如表 2-1 所示是 UTP 电缆的常见类型。10BaseT 局域网中主要使用 3 类和 5 类线，它们的有效传输距离一般在 100m 左右。另外还有超 5 类双绞线电缆，通过对其进行“信道”性能测试，结果表明，与普通 5 类双绞线电缆比较，它的近端串扰、衰减和结构回波等主要性能指标都有很大提高。综合近端串扰（PSNT，Power Sum NEXT）是电缆中所有线对被测线对产生的近端串扰之和。一个能够满足 PSNT 要求的综合布线 5 类双绞线电缆能够支持多种 MAC 信号形式的应用，如 100BaseT4，100BaseTX，100 VG-AnyLAN，1000BaseT 等。

表 2-1 UTP 电缆的常见类型

类型	应用
Category 1	只能用于声音，不能用于数据传输（低于 20kbps）
Category 2	用于 0.1Mbps~2Mbps 的声音和小于 4Mbps 的数据
Category 3	用于 10Mbps，10BaseT 局域网的声音或数据
Category 4	用于 20Mbps，10BaseT 和 16Mbps 的令牌环网
Category 5	用于 100Mbps，100BaseT 和 155Mbps ATM 高速局域网

双绞线的制作分为工作站至工作站和工作站至集线器两种。工作站至集线器的双绞线，其 8 芯线一一对应；工作站至工作站的双绞线，按照如图 2-15 所示的连线制作。

#### 2. 同轴电缆

典型的同轴电缆（Coaxial Cable）由一根内导体铜质芯线，外加绝缘层、密集网状编织导电金属屏蔽层以及外包装保护塑橡胶材料组成，其结构如图 2-16 所示。由于外导体屏蔽层的作用，同轴电缆具有良好的抗电磁干扰和防辐射性能，被广泛应用于总线型以太局域网中。在 10Base2 网络中，如果要将计算机网卡连接到同轴电缆上，还需要一个 T 型接头

和 BNC 接插件。电缆外部绝缘蒙皮一般为黑色，材料是 PVC（即聚氯乙烯，燃烧时产生有毒气体）或聚四氟乙烯（燃烧无毒），分别有阻燃和非阻燃两种。阻燃型电缆内部有一个空气芯，外面有一层阻燃套，这种电缆主要用在室内，也可在有害气体环境中使用；室外电缆主要是非阻燃型的，它常用于建筑群之间或一些对安全要求不高的场合。用户在安装时不能把不同类型的电缆混合使用，原因是不同型号的同轴电缆其特征阻抗值是不同的，会导致网络连接失败。

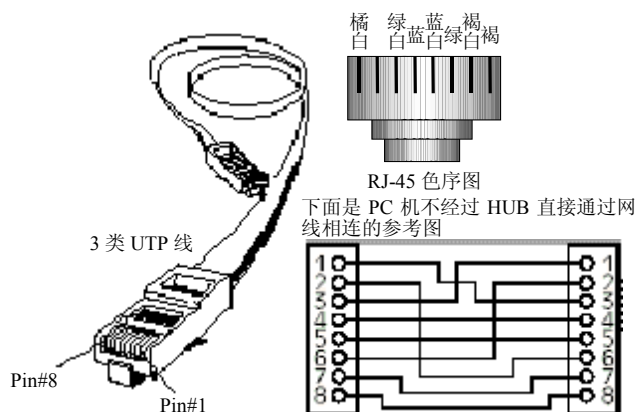


图 2-15 双绞电缆

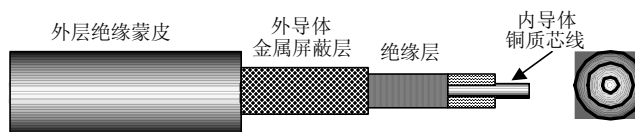


图 2-16 同轴电缆的结构

通常将同轴电缆分成两类：基带同轴电缆和宽带同轴电缆。计算机网络一般选用基带同轴电缆进行数据传输，其屏蔽层是用铜做成网状形，特征阻抗为  $50\Omega$ ，如 RG-8（粗缆）、RG-58（细缆）等。宽带电缆是指采用了频分复用和模拟传输技术的同轴电缆，其屏蔽层通常是用铝冲压成的，特征阻抗为  $75\Omega$ ，如 RG-59 有线电视 CATV 标准传输电缆。另外还有一种 ARCnet 网络及 IBM3270 系统专用的 RG-62（ $93\Omega$ ）电缆系统。对于细同轴电缆，其主要用于 10Mbps 速率的 10Base2 以太局域网中，平均特征阻抗为  $50\pm 2\Omega$ ，阻抗的周期性变化为正弦波，中心平均值为  $\pm 3\Omega$ ，最低传播速率约为  $0.77c$ （ $c$  为光速）。无论是粗缆还是细缆，网络综合布线中均采用总线型拓扑结构。如表 2-2 所示是作者在网络工程施工中常常用到的一些 IEEE802.3 10BaseT 系列网络拓扑经验，仅供读者参考。

表 2-2 10BaseX 系列网络用的同轴电缆

标准	10Base2	10Base5	10BaseT
传输介质	$50\Omega$ 细同轴电缆	$50\Omega$ 粗同轴电缆	3 类双绞线电缆
传输速率 (Mbps)	10	10	10

续表

标准	10Base2	10Base5	10BaseT
电缆直径 (mm)	5	10	每芯 0.511
最大段长 (m)	185	500	100 m 以内效果最佳
每段最大节点数	30	100	2
节点最小间距 (m)	0.5	2.5	一般无限制
最大中继段数	5	5	一般无限制
节点最大间距 (m)	925	2500	约 2800
连接器接口标准	BNC T 型头	AUI DIX 外收发器	RJ-45 HUB
最大节点数	150	500	250
网络拓扑结构	总线型	总线型	星型

### 3. 光纤

光纤是光纤通信的传输媒体，通常是由能传导光波的非常透明的石英玻璃拉成纤维细丝线芯，外加抗拉保护包层构成。光纤通信就是利用光纤传递光脉冲来进行通信，有光脉冲相当于“1”，没有光脉冲相当于“0”；在发送端有光源，可以采用发光二极管或半导体激光器，它们在电脉冲的作用下能产生光脉冲，在接收端利用光电二极管做成光检测器，在检测到光脉冲时可还原出电脉冲。在光纤中，包层较线芯有较低的折射率，当光纤从高折射率的介质射向低折射率介质时，其折射角将大于入射角，如果入射角足够大，就会出现全反射，此时光线碰到包层时就会折射回线芯，这个过程不断重复，光也会沿着光纤传输下去。实际上，只要射到光纤表面的光线的入射角大于某一临界角度，就可以产生全反射，并且可以存在许多条不同角度入射的光线在一条光纤中传输，这种光纤就称为多模光纤 (Multimode Fiber)，如图 2-17 所示。发光二极管 (LED, Light-Emitting Diode) 是一种固态器件，电流通过时就产生一种定向性较差的可见光，并通过在光纤线芯内不断全反射而向前传播，这种光纤一般是多模光纤。半导体激光器一般为注入型激光二极管 (ILD, Injection Laser Diode)，它是一种根据激光器原理进行工作的固态器件，即激励量子电子效应来产生一个窄带宽的超辐射激光束。由于激光的定向性好，它可沿着光纤直接传播，减少了折射和损耗，能传播更长的距离，而且可以保持较高的数据传输率。

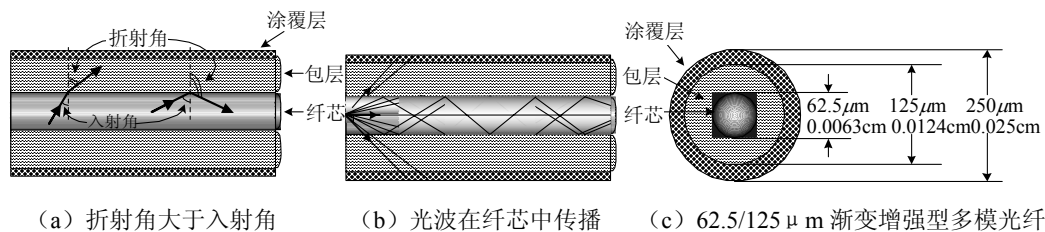


图 2-17 多模光纤

有时光纤的直径可以减小到只有一个光的波长，光纤就像波导一样可使光线一直向前传播，这样的光纤就称为单模光纤 (Single Mode Fiber)。单模光纤的光源一般要使用昂贵

的半导体激光器，而不能使用价格较便宜的发光二极管。单模光纤的衰耗较小，在 2.5Gbps 的高数据传输率下可传输数十公里而不必采用中继器。在接收端用来把光转换为电能的光电二极管检测器一般使用两种固态器件：PIN 检波器和 APD 检波器。PIN 光电二极管在二极管的 P 层和 N 层之间增加了一小段纯硅。APD 雪崩光电二极管的外部特性和 PIN 类似，但使用了一个较强的电磁场，这两种器件基本上是光电计数器。PIN 的价格便宜，但不如 APD 灵敏。对光载波的调制属于幅移键控法 ASK，也称亮度调制（Intensity Modulation）。典型的做法是在给定的频率下，以光的出现和消失来表示两个二进制数字。发光二极管 LED 和注入型激光二极管两种器件都可以用这种方法调制，PIN 和 APD 检波器直接响应亮度调制。从横截面上的折射率来分类，光纤可分为突变阶跃 SI 型和梯度渐变 GI 型；按波长分类，综合布线系统所使用的光纤有三个波长区，分别用于多模光纤通信方式的 0.85 $\mu\text{m}$  波长区，单模光纤通信方式的 1.5 $\mu\text{m}$  波长区，另一个可用于单模多模两种的 1.3 $\mu\text{m}$  波长区。建筑物综合布线一般采用 0.85 $\mu\text{m}$  和 1.3 $\mu\text{m}$  两个波长。按纤芯直径划分，光纤有两类：62.5 $\mu\text{m}$  渐变增强型（Graded Index Enhanced）多模光纤和 8.3 $\mu\text{m}$  突变型（Step Index）单模光纤。光纤的包层直径均为 125 $\mu\text{m}$ 。其中 62.5/125 $\mu\text{m}$  光纤被推荐应用于所有的建筑物综合布线中，它具有很多优点，如符合 FDDI 标准，光耦合效率高，仅需要较少的管理点和接头盒，对微弯曲损耗不太灵敏，价格较便宜等。

多模光纤和 5 类双绞线的衰减与频率关系如图 2-18 所示，当传输频率超过 100MHz 时，5 类双绞线随着频率的增加衰减愈来愈大；而光纤在 300MHz 以内，衰减基本不变。

套塑后的光纤（此时为芯线）还不能在工程中使用，必须把若干根光纤疏松地置于特制的塑料绷带或铝皮内，再覆塑料或用钢带铠装，加上外护套后即成光缆。一根光缆可以包括一至数百根光纤，再加上加强芯和填充物就可以大大提高其机械强度。必要时还可放入远供电源线，最后加上包带层和外护套就可以使抗拉强度达到几公斤，以满足工程施工的要求。光缆的结构大致可分为缆芯（Cable Core）和保护层（Sheath）两大部分，图 2-19 为四芯光缆剖面的示意图。交叠型光缆保护层由两层相互反向绞合的外周加强构件再加上聚氯乙烯护套组成。为防止鼠咬或雷击，可在交叠型保护层外线纵向包一层铜带后再纵向包一层不锈钢带，最外面再挤压一层聚氯乙烯护套。

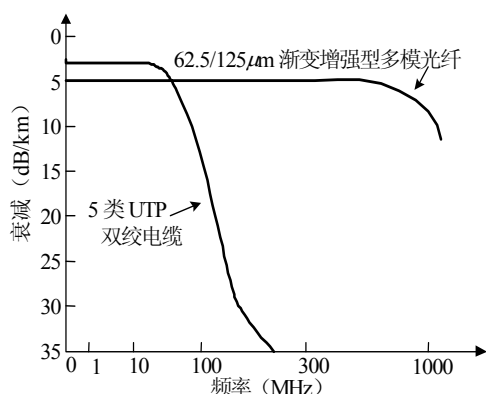


图 2-18 光纤与电缆频率与衰减关系图

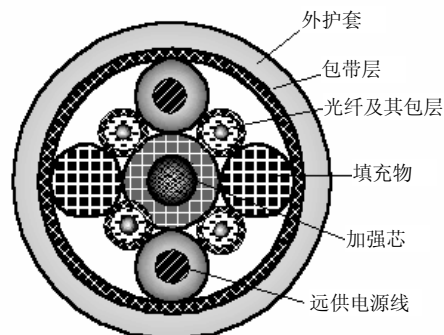


图 2-19 四芯光缆剖面示意图

光纤作为传输介质具有很多优点，如：光纤的数据传输率高、频带宽、通信容量大、损耗低、体积小、重量轻、传输距离远；并且不受电磁干扰或雷电和其他噪声的影响；安全保密性好，数据不易被窃取，尤其适合工作在有大电流磁场脉冲干扰的场所。

## 2.5.2 无线介质

### 1. 无线电短波通信

在一些电缆光纤难于通过或施工困难的场合，例如，高山、湖泊或岛屿等，即使在城市中挖开马路敷设电缆有时也很不划算，特别是通信距离很远，对通信安全性要求不高，铺设电缆或光纤既昂贵又费时，若利用无线电波等无线传输介质在自由空间传播，就会有较大的机动灵活性，可以轻松实现多种通信，抗自然灾害能力和可靠性也较高。

利用无线电短波电台进行数据通信在技术上是可行的，但短波信道的通信质量较差，主要是短波通信主要靠电离层反射，而电离层的不稳定会产生衰落现象，且电离层反射将产生多径效应。多径效应就是指同一个信号经不同的反射路径到达同一个接收点，其强度和时延都不相同，使其最后得到的信号失真很大。一般利用短波无线电台进行几十至几百比特/秒的低速数据传输。

### 2. 地面微波接力通信

无线电数字微波通信系统在长途大容量的数据通信中占有及其重要的地位，其频率范围为 300MHz~300GHz。微波通信主要有两种方式：地面微波接力通信和卫星通信。微波在空间中主要是直线传播，并且能穿透电离层进入宇宙空间，它不像短波那样经电离层反射传播到地面上其他很远的地方。由于地球表面是个曲面，因此其传播距离受到限制且与天线的高度有关，一般只有 50km 左右，长途通信时必须建立多个中继站，中继站把前一站发来的信号经过放大后再发往下一站，类似于“接力”，如果中继站采用 100m 高的天线塔，则接力距离可增大到 100 km。微波接力通信可有效地传输电报、电话、图像、数据等信息，因为微波波段频率很高，其频段范围也很宽，因此其通信信道的容量很大且传输质量及可靠性较高；微波通信与相同容量和长度的电缆载波通信相比，建设投资少、见效快。微波接力通信也存在一些缺点，如：相邻站之间必须直视，不能有障碍物，有时一个天线发射出的信号也会分成几条略有差别的路径先后到达接收天线，造成一定失真；微波的传播有时也会受到恶劣气候环境的影响，如雨雪天气对微波产生的吸收损耗。与电缆通信系统相比，微波通信可被窃听，安全性和保密性较差。另外平时对大量中继站的使用和维护也要耗费一定的人力物力。高可靠性的无人中继站目前还不容易实现。

### 3. 红外线和激光

红外线通信和激光通信就是把要传输的信号分别转换成红外光信号和激光信号直接在自由空间中沿直线进行传播，它比微波通信具有更强的方向性，难以窃听、插入数据和进行干扰，但红外线和激光对雨雾等环境干扰特别敏感。红外线链路由一对发送/接收器组成，这对收发器调制不相干的红外光，收发器必须处于视线范围内，可以安装在屋顶或建筑物内部；安装红外系统不需要经过有关部门特许，几天时间就可以装好，对于短距离、中低速率数据传输非常实用。采用相干光调制的激光收发器也可以安装成类似系统，但因

激光硬件会发出少量射线，所以必须经过特许才能安装。

#### 4. 卫星通信

卫星通信就是利用位于 3 万 6 千公里高空的人造地球同步卫星作为太空无人值守的微波中继站的一种特殊形式的微波接力通信。卫星通信可以克服地面微波通信的距离限制，其最大特点就是通信距离远，且通信费用与通信距离无关。同步卫星发射出的电磁波可以辐射到地球三分之一以上的表面，只要在地球赤道上空的同步轨道上，等距离地放置 3 颗卫星，就能基本上实现全球通信。卫星通信的频带比微波接力通信更宽，通信容量更大，信号所受到的干扰较小，误码率也较小，通信比较稳定可靠。目前常用的频段为 6/4GHz，也就是上行（从地球站发往卫星）频率为 5.925GHz~6.425GHz，而下行（从卫星转发到地球站）频率为 3.7GHz~4.2GHz，频段的宽度都是 500MHz。由于这个频段已经非常拥挤，现在也使用频率更高些的 14/12GHz 的频段。现在，一个典型的通信卫星通常拥有 12 个转发器，每个转发器的频带宽度都为 36MHz，可用来传输 50Mbps 的数据。

卫星通信的缺点是传播时延较长。由于各地球站的天线仰角并不相同，不管两个地球站之间的地面距离是多少，从一个地球站经卫星再转发到另一个地球站的传播时延在 250ms~300ms 之间，平均约为 270ms，这一点与其他通信相比有很大差距。例如，对于地面微波接力通信链路，其传播时延约为  $3\mu\text{s}/\text{km}$ ；而对于同轴电缆链路，传播时延一般为  $5\mu\text{s}/\text{km}$ 。但是，“卫星信道的传播时延较大”并不等于说“用卫星信道传送数据的总时延较大”。这是两个不同的概念，因为传送数据的总时延主要是由传播时延、发送时延和重发时延三个部分组成，总传输时延与误码率也有很大的关系。对于大的数据块，用卫星信道传送的总时延往往要比用“相对低速率”的广域网更小一些。当然，通信卫星本身和发射卫星的火箭技术复杂度和造价都较高，并且受电子元器件寿命的限制，同步卫星的使用寿命一般只有 7~8 年，其通信价格较贵。

#### 5. VSAT 卫星通信

VSAT (Very Small Aperture Terminal, 甚小口径地球终端) 是 20 世纪 80 年代末发展起来并于 20 世纪 90 年代得到广泛应用的新一代数字卫星通信系统。VSAT 网通常由一个卫星转发器、一个大型主站和大量的 VSAT 小站组成，能单双向传输数据、语音、图像、视频等多媒体综合业务。VSAT 具有很多优点，如：设备简单、体积小、耗电少、组网灵活、安装维护简便、通信效率高等，尤其适用于大量分散的业务量较小的用户共享主站，所以许多部门和企业多使用 VSAT 网来建设内部专用网。VSAT 网络组成如图 2-20 所示。

小站和主站通过卫星转发器构成星型网络拓扑结构。由于主站采用大口径天线且发射功率大，而小站天线口径小且发射功率小，这样，小站与大站之间能直接通过卫星转发器进行互相通信，而小站与小站之间就不能直接互通，而要经过小站→卫星→主站→卫星→小站的“双跳”过程才能实现互通。小站通过卫星发往主站称为内向信道，一般采用 TDMA 时分多址或 CDMA 码分多址方式；主站通过卫星发往小站称为外向信道，一般采用 TDM 时分多路复用方式，内外信道复用载波均可采用扩频技术来提高抗干扰能力。

中国金桥网是国民经济信息化 (NII, National Information Infrastructure) 的基础设施，其主干网采用“天地一体化”的网络结构，天网采用 VSAT 卫星通信系统，覆盖全国主要大

中城市；地网采用光纤传输系统，覆盖北京、上海和广州，在统一的网络管理系统下实现互连互通、互为备份、互为补充。

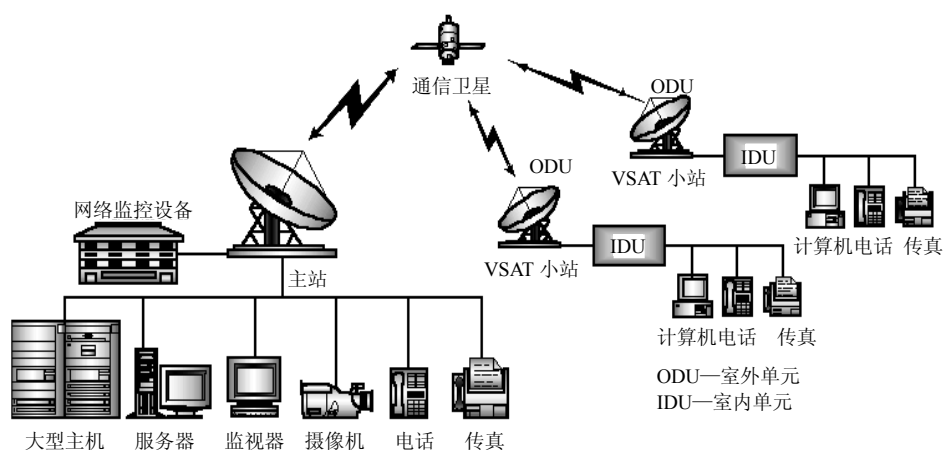


图 2-20 VSAT 网络组成

## 2.6 差错控制与校验

### 2.6.1 差错控制方法

差错控制编码就是对网络中传输的数字信号进行抗干扰编码，目的是为了提高数字通信系统的容错性和可靠性，它在发送端被传输的信息码元序列中，以一定的编码规则附加一些校验码元，接收端利用该规则进行相应的译码，译码的结果有可能发现差错或纠正差错。在差错控制码中，检错码是指能自动发现出现差错的编码，纠错码是指不仅能发现差错而且能够自动纠正差错的编码。当然，检错和纠错能力是用信息量的冗余和降低系统的效率为代价来换取的。

我们以传输 3 位二进制码组为例来说明检测纠错的基本原理。3 位二进制码元共有 8 种组合：000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111。假如这 8 种码组都用于传递信息，在传输过程中若发生一个误码，则一种码组就会错误地变成另一种码组，但接收端却不能发现错误，因为任何一个码组都是许用码组。但是，如果只选取其中 000, 011, 101, 110 作为许用码组来传递消息，则相当于只传递 00, 01, 10, 11 这 4 种消息，而第 3 位是附加的，其作用是保证码组中 1 码的个数为偶数。除上述 4 种许用码组以外的另外 4 种码组不满足这种校验关系，称为禁用码组。在接收时一旦发现这些禁用码组，就表明传输过程中发生了错误。用这种简单的校验关系可以发现 1 或 3 个错误，但不能纠正。如果进一步将许用码组限制为 2 种：000 和 111，那么就可以发现所有 2 个以下的错误。如用来纠错，则可纠正 1 位错误。可见，码组之间的差别与码组的差错控制能力有着至关重要的关系。

在差错控制能力相同的前提下，我们希望找到编码效率尽可能高，同时译码方法尽量

简单的编码方法，这是使差错控制编码实用化的关键技术。在差错控制系统中，常用的差错控制编码方法主要有三种：前向纠错（FEC）、检错重发（ARQ）和混合纠错（HEC）。在前向纠错系统中，发送端经编码发出能够纠正错误的码，接收端收到这些码组后，通过译码能够自动发现并纠正传输过程中的错误。前向纠错方式特别适合于只提供单向信道的场合，同时也适合一点发送多点接收的广播方式。由于能自动纠错，不要求检错重发，因而接收信号的时延小，但纠错能力愈强，编译码设备就愈复杂。在检错重发（自动请求重发）系统中，发送端经编码后发出能够检错的码，接收端收到后进行检验，再通过反向信道反馈给发送端一个应答信号，发送端收到应答信号后进行分析，如果接收端认为有错，发送端就把储存在缓冲存储器中的原有码组副本读出后重新传输，直到接收端认为已正确收到信息为止。混合纠错方式是前向纠错方式和检错重发方式的结合，其内层采用前向纠错方式，纠正部分差错；外层采用检错重发方式，重传那些虽已检出但未纠正的差错。混合纠错方式较适合于环路延迟大的高速数据传输系统。

按照信息码元和附加校验码元之间的关系，可以将差错控制编码分为线性编码和非线性编码。若信息码元与校验码元之间的关系为线性关系，即校验码元是信息码元的线性组合，则称为线性码；反之，若两者不存在线性关系，则称为非线性码。按照信息码元和校验码元之间的约束方式可分为分组码和卷积码。在分组码中，编码前先把信息序列分为  $k$  位一组，然后用一定规则附加  $m$  位校验码元，形成  $n = k + m$  位的码组。校验码元仅与本码组的信息码元有关，而与其他码组的信息码元无关。但在卷积码中，码组中的校验码元不仅与本码组信息码元有关，而且与前面码组的信息码元也有约束关系，就像链条那样一环扣一环，所以卷积码又称为连环码或链码。

## 2.6.2 常用的差错控制编码

### 1. 奇偶校验码

奇偶校验码是一种最简单也是最基本的检错码，一维奇偶校验码的编码规则是把信息码元先分组，在每组最后加一位校验码元，使该码中 1 的数目为奇数或偶数，奇数时称为奇校验码，偶数时称为偶校验码。例如信息码元每两位一组，加一位校验位使码组中 1 的总数为 0 或 2，即构成偶校验码。这时许用码组为 000, 011, 101, 110；禁用码组为 001, 010, 100, 111。接收端译码时，对各码元进行模 2 加运算，其结果应为 0，如果传输过程中码组任何一位发生了错误，则收到的码组必定不再符合偶校验的条件，因此就能发现错误。设码组长度为  $n$ ，记为  $a_{n-1}a_{n-2}a_{n-3}\dots a_0$ ，其中前  $n-1$  位为信息位，第  $n$  位为校验位，则偶校验时有  $a_0a_1\dots a_{n-1}=0$ ；奇校验时有  $a_0a_1\dots a_{n-1}=1$ 。不难看出，这种奇偶校验只能发现单个和奇数个错误，而不能检测出偶数个错误，因此它的检错能力不高，只适用于检测随机的零星错码。

在上述一维奇偶校验码的基础之上形成了二维奇偶校验码，又称水平垂直奇偶校验码或方阵码，它的编码规则是先将奇偶校验码的若干码组排列成矩阵，每一码组写成一，然后再按列的方向增加第二维校验位，如下所示：



$$\begin{array}{cccccc}
 a_{n-1}^1 & a_{n-2}^1 & \cdots & a_1^1 & a_0^1 & \\
 a_{n-1}^2 & a_{n-2}^2 & \cdots & a_1^2 & a_0^2 & \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \\
 a_{n-1}^m & a_{n-2}^m & \cdots & a_1^m & a_0^m & \\
 c_{n-1} & c_{n-2} & \cdots & c_1 & c_0 & 
 \end{array}$$

其中  $a_0^1 a_0^2 \dots a_0^m$  为  $m$  行奇偶校验码中的  $m$  个校验位,  $c_{n-1} c_{n-2} \dots c_0$  为按列进行第二次编码所增加的校验位,  $n$  个校验位组成一校验位行。除了能检验出所有行和列中的奇数个差错以外, 方阵码有更强的检错能力。虽然每行的校验位  $a_0^1 a_0^2 \dots a_0^m$  不能用于检验本行中的偶数个错码, 但按列的方向有可能由  $c_{n-1} c_{n-2} \dots c_0$  等校验位检测出来, 这样就能检出大多数偶数个差错。此外, 方阵码还对检测突发差错码有一定的适应能力。因为突发差错码常常成串出现, 随后有较长一段无差错区间, 所以在某一行中出现多个奇数或偶数错码的机会较多, 而行校验和列校验的共同作用正适合于这种码。另外, 还有一种由 Richard Hamming 提出的称为海明校验的一种纠错控制方法, 它实际上是一种多重奇偶校验, 即将代码按照一定规律组织为若干小组, 分组进行奇偶校验, 各组的检错信息组成一个指误字, 不仅能检测是否出错, 而且在只有一位出错的情况下可指出是哪一位出错, 从而将该位自动纠正。由于奇偶校验码的编码方法简单且实用性很强, 所以很多计算机网络数据传输系统采用了这种编码。

## 2. 循环冗余码

循环冗余码 (CRC, Cyclic Redundancy Code) 校验 (Check) 是目前在计算机网络通信及存储器中应用最广泛的一种校验编码方法, 它所约定的校验规则是: 让校验码能为某一约定代码所除尽; 如果除得尽, 表明代码正确; 如果除不尽, 余数将指明出错位所在位置。CRC 是一种线性分组码, 具有较强的纠错能力并有许多特殊的代数性质, 前  $k$  位为信息码元, 后  $r$  位为校验码元, 它除了具有线性分组码的封闭性之外, 还具有循环性。其编码和译码电路很容易用移位寄存器实现, 因而在 FEC 系统中得到了广泛的应用。

在 CRC 中, 我们采用了一种以按位加减为基础的模 2 运算, 不考虑进位和借位, 即通过模 2 减实现模 2 除, 以模 2 加将所得余数拼接在被除数后面, 形成一个能除尽的校验码。模 2 加减即按位加减, 相当于“异或”, 可用异或门硬件逻辑实现, 当然也可用软件实现。

我们可以将任何一个二进制数字或字符编码用多项式来描述。  $k$  位要发送的待编信息 (被除数) 可对应一个  $(k-1)$  次多项式  $K(x)$ , 约定用来产生  $r$  位冗余位的生成多项式 (除数) 为  $G(x)$ , 所产生的  $r$  位余数 (冗余校验位) 则对应一个  $(r-1)$  次多项式  $R(x)$ , 由  $k$  位信息位后面加上  $r$  位冗余位组成的  $k+r$  位循环校验码则对应于一个  $(k+r-1)$  次多项式  $T(x)$ 。例如信息位代码 1101011 对应的多项式为  $K(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x + 1$ , 4 位冗余位 1110 对应的多项式  $R(x) = x^3 + x^2 + x$ , 最终组成的循环校验码字 1101011110 对应的多项式则为  $T(x) = K(x) \cdot x^4 + R(x) = x^{10} + x^9 + x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x$ 。由待编信息位产生冗余校验位的编码过程其实就是已知  $K(x)$  再根据生成多项式  $G(x)$  求  $R(x)$  的过程, 下面简略介绍其编码方法。

为了求得  $r$  位余数，首先将待编码的  $k$  位有效信息  $K(x)$  左移  $r$  位，得  $K(x) \cdot x^r$ ；接着选取一个  $r+1$  位的生成多项式  $G(x)$ ，对  $K(x) \cdot x^r$  作模 2 除，即  $K(x) \cdot x^r / G(x) = Q(x) + R(x) / G(x)$ ；因为在按位运算中，模 2 加与模 2 减的结果是一致的，即  $K(x) \cdot x^r - R(x) = K(x) \cdot x^r + R(x) = Q(x) \cdot G(x) = T(x)$ 。 $K(x) \cdot x^r$  的末尾  $r$  位为 0，所以与余数  $R(x)$  的加减实际上就是将  $K(x)$  与  $R(x)$  相拼接，拼接成的循环冗余校验码  $T(x)$  必定能为约定的  $G(x)$  所除尽。CRC 循环冗余码一般是指  $R(x)$  部分的校验码。

例：若生成多项式为 1011，请将 4 位有效信息 1100 编成 7 位循环冗余校验码。

解： $K(x) = x^3 + x^2$  即 1100

冗余位数  $r = 7 - 4 = 3$

$K(x) \cdot x^r = x^6 + x^5$ ，即 1100000

$$\frac{K(x) \cdot x^r}{G(x)} = \frac{1100000}{1011} = 1110 + \frac{010}{1011}$$

所以 7 位循环冗余校验码为

$T(x) = K(x) \cdot x^r + R(x) = 1100000 + 010 = 1100010$ ，这个编好的循环校验码就称为 (7, 4) 码。

下面为模 2 除算式，供参考

$$\begin{array}{r} 1110 \\ 1011 \overline{) 1100000} \\ \underline{1011} \phantom{000} \\ 0110 \phantom{00} \\ \underline{0101} \phantom{0} \\ 0010 \phantom{0} \\ \underline{0000} \phantom{0} \\ 010 \phantom{0} \end{array}$$

接收端的校验过程（译码与纠错）就是将收到的循环校验码用约定的生成多项式  $G(x)$  去除。若余数为 0，则认为传输无差错；若传输中受噪声干扰，在接收端某位出错，则余数不为 0，不同位出错则余数不同，余数代码与出错位序号之间有惟一的对应关系。通过例题可求出其余数与出错位序号之间的对应模式（如表 2-3 所示），出错模式只与 CRC 码制和生成多项式有关而与不同待传码字代码无关。表 2-3 对于 (7, 4) 码具有一定的通用性，可作为其出错判别依据。当然，对于其他码制或选用其他生成多项式，出错模式可能有不同。表 2-3 中列举了 8 种情况。一种是正确码字，除后余数为 0。其余 7 种是依次有位出错，余数不为 0，与出错位序号有惟一的对应模式。进一步研究将发现一个有实用价值的规律：如果有一位出错，用  $G(x)$  除后得到一个不为 0 的余数，如果对该余数补 0，继续除，各次余数将按表 2-3 顺序循环，例如第 7 位  $A_7$  出错，余数 001，补 0 后继续除，得余数 010，以后将依次为 100, 011, 110, 111, 101，然后又是 001，呈循环状。这就是“循环码”名称的由来。

表 2-3 (7, 4) CRC 循环码的出错模式 ( $G(x) = 1011$ )

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	余数	出错位
正确校验码	1	1	0	0	0	1	0	0 0 0	无
接收端一位 出错校验码	1	1	0	0	0	1	1	1 0 1	7
	1	1	0	0	0	0	0	1 1 1	6
	1	1	0	0	1	1	0	1 1 0	5
	1	1	0	1	0	1	0	0 1 1	4
	1	1	1	0	0	1	0	1 0 0	3
	1	0	0	0	0	1	0	0 1 0	2
	0	1	0	0	0	1	0	0 0 1	1

循环冗余校验码的检错能力取决于生成多项式  $G(x)$  的选择,但并不是任何一个多项式都可以作为  $G(x)$ 。若从检错纠错的目的出发,生成多项式应能满足下列要求:任何一位数据发生错误时都应使余数不为 0,不同位出错则余数不同,余数代码与出错位序号之间最好有惟一的对应关系,并满足余数循环规律。在计算机网络通信系统中广泛使用的是下述三种标准:

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

$$\text{CRC-16 : } G(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$$

$$\text{CRC-32 : } G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

## 2.7 信息交换技术

数据在通信线路上传输的最简单的形式是在两个用某种类型的传输介质直接连接的设备之间进行的通信。但是直接连接两个设备常常是不现实的,一般通过有中间节点的网络把数据从源地发送到目的地,以实现通信。这些中间节点并不关心数据内容,目的是提供一个交换设备。用这个交换设备把数据从一个节点传到另一个节点,直至到达目的地。

通常使用的数据交换技术有三种:线路交换、报文交换、分组交换。

### 2.7.1 线路交换

使用线路(电路)交换(Circuit Switching)方式,就是通过网络中的节点在两个站之间建立一条专用的通信线路。最普通的线路交换例子是电话系统。

通过线路交换进行通信,指的是在两个站之间有一个实际的物理连接。这种连接是节点之间的连接序列。在每条线路上,通道专用于连接。线路交换方式的通信包括三种状态:

(1) 线路建立:在传输任何数据之前,都必须建立端到端(站到站)的线路。

(2) 数据传送:所传输的数据可以是数字的也可以是模拟的。

(3) 线路拆除:在某个数据传送周期结束以后,就要结束连接,通常由两个站中的一个来完成这个动作。

这种方式使用的设备及操作简单,特别适合于交互式通信以及远距离成批处理,建立一次连接就可以传送大量数据。因为在数据传输开始以前必须建立连接通路,因此通路中的每对节点之间的通道容量必须是可用的,而且每个节点必须有内部交换能力来处理连接。交换节点必须具有智能以进行分配和求出通过网络的路径。线路交换可能效率很低,因为通道容量在连接期间是专用的,即使没有数据传送,别人也不能用。就性能而言,在数据传输以前,为了呼叫建立,有一个延迟,然而一旦建立了线路,网络对于用户实际上是透明的,用户可以用固定的数据传输速率来传输数据,除了通过传输链路时的传输延迟外,不再有别的延迟。在每个节点上的延迟是很小的。

### 2.7.2 报文交换

另一种网络通信的方法是报文交换(Message Switching)。在报文交换中不需要在两个

站之间建立一条专用通路。如果一个站想要发送一个报文（信息的一个逻辑单位），只需要把一个目的地址附加在报文上，然后把报文通过网络从节点到节点地进行传送。在每个节点中，接收整个报文，暂存这个报文，然后发送到下一个节点。

在线路交换的网络中，每个节点是一个电子的或机电结合的交换设备。这种设备发送二进制位同接收二进制位一样快。报文交换节点通常是一台通用的小型计算机。它具有足够的存储容量来缓存进入的报文。一个报文在每个节点的延迟时间等于接收报文的所有位所需的时间加上等待时间和重传到下一个节点所需的排队延迟时间。

这种方法与线路交换相比有以下优点：

(1) 线路效率较高，因为许多报文可以分时共享一条节点到节点的通道。

(2) 不需要同时使用发送器和接收器来传输数据，网络可以在接收器可用之前，暂时存储这个报文。

(3) 在线路交换网上，当通信量变得很大时，就不能接收某些呼叫。而在报文交换网上，却仍然可以接收报文，这时报文被缓冲导致传送延迟增加，但不会引起阻塞。

(4) 报文交换系统可以把一个报文发送到多个目的地。

(5) 根据报文的长短或其他特征能够建立报文的优先权，使得一些短的、重要的报文优先传递。

(6) 报文交换网可以进行速度和代码的转换。因为每个站都可以用它特有的数据传输率连接到其他节点，所以两个不同传输率的站也可以连接。报文交换网还能转换数据的格式，例如从 ASCII 码转换为 EBCDIC 码。

报文交换不能满足实时或交互式的通信要求，经过网络的延迟时间相当长，而且由于负载不同，延迟时间有相当大的变化。这种方式不能用于声音连接，也不适合交互式终端到计算机的连接。

### 2.7.3 分组交换

分组交换（Packet Switching）试图兼有报文交换和线路交换的优点，而使两者的缺点最少。分组交换与报文交换的工作方式基本相同，形式上的主要差别在于，分组交换网中要限制所传输的数据单位的长度。典型的最大长度是 1 千位至几千位，称为包（Packets）。报文交换系统却适应更长的报文。从一个站的观点来看，把超过最大长度的报文的数据块按限定的大小分割成一个个小段，为每个小段加上有关的地址信息以及段的分割信息并组成一个数据包，然后依次发送。为了区分这两种技术，分组交换系统中的数据单位通常称为分组。与报文交换的区别是，分组通常不归档，分组拷贝暂存起来的目的是为了纠正错误。

从表面看，分组交换与报文交换相比没有什么特殊优点。值得注意的是，把数据单位的最大长度限制在较小的范围内，这种简单的方法会在性能上有一个引人注目的结果。一个站要发送一个报文，若其长度比最大分组长度还长，它先把该报文分成组，再把这些组发送到节点上。这种交换方式必须解决的问题是根据网络当前的状况为各个数据包选择不同的传输路径，以便网络中各信道的流量趋于平衡。问题是网络将如何管理这些分组流呢？目前有两种方法：数据报和虚电路。

在数据报中，每个数据包被独立处理，就像在报文交换中每个报文被独立处理那样，每个节点根据一个路由选择算法，为每个数据包选择一条路径，使它们的目的地相同。一个节点在发送多个发往同一地址的数据包时，可以根据线路的拥挤情况为各个包选择不同的转发节点，所以一个大数据段的各个数据包可能是从不同的路径到达目的地的，并且到达的先后顺序也不一定是分割时的顺序，这要根据网络中当时的具体流量等情况而定。每个数据包都有相应的分割信息，接收端可以根据这些信息把它们重新组合起来，恢复原来的数据块。

在虚电路中，数据在传送以前，发送和接收双方在网络中建立起一条逻辑上的连接，但它并不是像电路交换中那样有一条专用的物理通路，该路径上各个节点都有缓冲装置，服从于这条逻辑线路的安排，也就是按照逻辑连接的方向和接收的次序进行输出排队和转发，这样每个节点就不需要为每个数据包作路径选择判断，就好像收发双方有一条专用信道一样。发送方依次发出的每个数据包经过若干次存储转发，按顺序到达接收方。双方完成数据交换后，拆除掉这条虚电路。

#### 2.7.4 三种数据交换技术的比较

三种数据交换技术总结如下：

(1) 线路交换：在数据传送之前需建立一条物理通路，在线路被释放之前，该通路将一直被一对用户完全占有。

(2) 报文交换：报文从发送方传送到接收方采用存储转发的方式。在传送报文时，只占用一段通路；在交换节点中需要缓冲存储，报文需要排队。因此，这种方式不满足实时通信的要求。

(3) 分组交换：此方式与报文交换类似，但报文被分成组传送，并规定了分组的最大长度，到达目的地后需重新将分组组装成报文。这是网络中最广泛采用的一种交换技术。

三种交换方式的比较如图 2-21 所示。

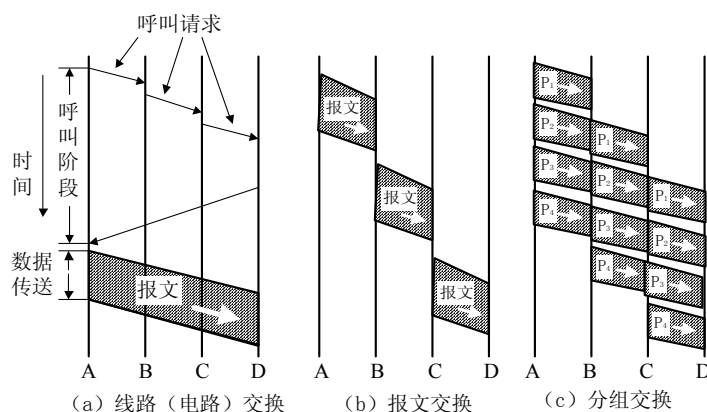


图 2-21 三种交换方式的比较

三种数据交换方式各有其特点，对于实时性强的交互式传输，电路交换最合适，不宜

采用报文方式；对于网络中较轻的或间歇式负载，报文交换方式较合算；对于中等或稍重的负载，分组交换方式有较好的效果。

### 2.7.5 其他数据交换技术

随着通信和网络应用的发展，传统的交换技术已经不能满足需要。例如，交互式的会话通信对实时性要求很高，延时要小；高清晰度（HDTV）图像及高速数据的传送要求高速宽带的通信网。目前提高数据交换速度的方案有很多，主要有 DSI，Frame Relay 和 ATM 等。

(1) 利用数字语音插空技术 DSI (Digital Speech Interpolation) 能提高线路交换的传输能力。传统的线路交换技术在接通到通路后，该通路被一对用户完全占用。但是在传输语音信号时，通路并不始终处于忙的状态，而是有很多空闲的状态。DSI 技术的原理是仅当传输语音信号时，才向通话用户分配通道，其余时刻可把通道分配给数据通信。

(2) 帧中继 (Frame Relay) 是对目前广泛使用的 X.25 分组交换通信协议的简化和改进，它在链路上无差错控制功能和流量控制功能，并且帧中继采用面向连接的模式，是一种简化的面向连接的分组交换。因为光纤通信具有低误码率的特性，无需在链路层进行差错控制，可采用端对端检错重发控制方式，采用固定长度的分组。这种简化了的协议，可以方便地用 VLSI 技术实现。这种高速分组交换技术有很多优点：可灵活设置信号的传输速率；充分利用网络资源，提高传输效率；可对分组呼叫进行带宽的动态分配。因此可获得低延时、高吞吐率的网络特性。

(3) 异步传输模式 ATM (Asynchronous Transfer Mode) 是线路交换与分组交换技术的结合，能最大限度地发挥线路交换与分组交换技术的优点，具有从实时的语音信号到高清晰度电视图像等各种高速综合业务的传输能力。

## 2.8 思考题

1. 什么是比特率?什么是波特率?请举例说明两者的联系和区别?
2. 什么是信号?在数据通信系统中有几种信号形式?
3. 什么是基带传输?什么是频带传输?在基带传输中采用哪几种编码方法?
4. 何谓单工、半双工、全双工通信?请举例说明它们的应用场合?
5. 什么是多路复用?有几种常用的多路复用技术?
6. 在计算机网络中，数据交换的方式有哪几种?各有什么优缺点?
7. 有哪几种常用的传输介质?各有什么特性?
8. 条件：
  - ① CRC 校验中的生成多项式为发送数据的比特序列为 110101；
  - ② 生成多项式为  $G(x)=x^5+x^4+x^2+1$ ；
  - ③ 数据的比特序列为 100010010111。试计算求出其 CRC 校验码的比特序列。

