

第 3 章

物 理 层

本章在对物理层基本概念讨论的基础上,对数据通信的基本概念、传输介质类型与特点、数据编码方法、多路复用技术、同步数字体系与接入技术的基本概念进行系统讨论。

本章教学要求

- 理解:物理层与物理层协议的基本概念。
- 理解:数据通信的基本概念。
- 掌握:传输介质类型及主要特性。
- 掌握:数据编码的类型和基本方法。
- 掌握:基带传输与频带传输的基本概念。
- 掌握:多路复用技术的分类与特点。
- 掌握:同步数字体系 SDH 的基本概念。
- 掌握:接入技术的基本概念。

3.1 物理层与物理层协议的基本概念

3.1.1 物理层的基本服务功能

理解物理层的服务功能,需要注意以下几个问题。

(1) 物理层与数据链路层的关系

物理层处于 OSI 参考模型的最低层,它向数据链路层提供比特流传输服务。发送端的数据链路层通过与物理层的接口,将待发送的帧传送到物理层;物理层不关心帧的结构,它将构成帧的数据只看成是待发送的比特流。物理层的主要任务是:保证比特流通过传输介质的正确传输,为数据链路层提供数据传输服务。

(2) 传输介质与信号编码的关系

连接物理层的传输介质可以有不同类型,如电话线、同轴电缆、光纤与无线通信线路。不同类型的传输介质对于被传输的信号要求也不同。例如,电话线路只能用于传输模拟语音信号,不能直接传输计算机产生的二进制数字信号。如果要求通过电话线路传输数字信号,那么在发送端就要将数字信号转换成模拟信号,再通过电话线路传输;在接收端将接收到的模拟信号还原成数字信号。如果希望通过光纤来传输数字信号,那么发送端也需要将

电信号变换为光信号;接收端再将光信号还原成电信号。物理层的一个重要功能是:根据所使用传输介质的不同,制定相应的物理层协议,规定数据信号编码方式、传输速率,以及相关的通信参数。

(3) 设置物理层的目的

由于计算机网络使用的传输介质与通信设备种类繁多,各种通信线路、通信技术存在很大的差异。同时,由于通信技术在快速发展,各种新的通信设备与技术不断涌现。为了适应通信技术的变化,研究人员需要针对不同类型的传输介质与通信技术的特点,制定与之相适应的物理层协议。因此,设置物理层的目的是:屏蔽物理层所采用的传输介质、通信设备与通信技术的差异性,使数据链路层只需要考虑如何使用物理层的服务,而不需要考虑物理层的功能具体是使用了哪种传输介质、通信设备与技术实现的。

3.1.2 物理层协议的类型

为了理解物理层的基本概念与物理层协议的基本内容,首先需要研究物理层协议的分类问题。

计算机网络使用的通信线路分为两类:点-点通信线路和广播通信线路。点-点通信线路用于连接两个通信的主机;而广播通信线路的一条公共通信线路可以连接多个主机。需要注意的是:广播通信线路可以分为有线与无线两种。因此,物理层协议可以分为两类:基于点-点通信线路的物理层协议与基于广播通信线路的物理层协议。

1. 基于点-点通信线路的物理层协议

早期流行的物理层协议标准是 EIA-232-C 标准。EIA-232-C 标准是美国电子工业协会 EIA 在 1969 年制定的,它是基于点-点电话线路的串行、低速、模拟传输设备的物理接口标准,目前很多低速的数据通信设备仍然采用这种标准。

随着 Internet 接入技术的发展,家庭接入主要通过 ADSL 调制解调器与电话线路接入,通过线缆调制解调器(Cable Modem)与有线电视同轴电缆接入。ADSL 物理层协议定义了上行与下行传输速率标准、传输信号的编码格式与电平、同步方式、连接接口装置的物理尺寸等内容。Cable Modem 有线电视电缆接入的物理层标准主要有“线缆数据业务接口规范”与 IEEE 802.14 的物理层标准,规定了线缆调制解调器的频带、上行与下行速率、信号调制方式与电平、同步方式等内容。通信技术的变化必将引起物理层协议的变化。

2. 基于广播通信线路的物理层协议

广播通信线路又分为有线通信线路与无线通信线路两类。

(1) 最早的 Ethernet 是在共用总线的同轴电缆上用广播的方式发送和接收数据。因此 Ethernet 的 802.3 标准要针对不同的传输介质、传输速率制定多个物理层协议,如针对非屏蔽双绞线的 10Base-2、10Base-5、10Base-T,快速以太网 802.3u 标准的物理层协议包括 100Base-T、100Base-TX 等标准,以及针对光纤传输介质的各种物理层标准。

(2) 无线网络采用广播方式发送和接收数据。无线局域网 802.11 标准、无线城域网 802.16 标准,以及无线个人区域网 802.15.4 标准,分别根据所采用的通信频段、调制方式、传输速率、覆盖范围的不同,制定了多种物理层协议标准。

3. 讨论

(1) 物理层协议的类型增加最快

从以上分析中可以看出,只要计算机网络采用一种新的通信技术,相应地就要制定一种新的物理层标准。与数据链路层、网络层与传输层相比,数据链路层、网络层与传输层的协议体系相对比较稳定,而物理层协议的类型增加最快,技术相差比较大,这就给网络课程的教学带来了一系列的问题。

(2) 教材对物理层与数据链路层的处理方法

根据作者的教学经验,如果我们简单地根据物理层和数据链路层来组织教学内容,将点-点通信线路和广播通信线路的两类物理层与数据链路层、多种协议的内容放在一起讨论,初学者理解和掌握会有一些困难。因此,在本书结构的组织中作者考虑到技术类型、特点的因素,从读者能够循序渐进地学习和接受的角度出发,采取分类讨论的方法。

① 书中第3章、第4章的内容以广域网的物理层、数据链路层技术为研究背景,第3章讨论了基于点-点通信线路的物理层协议标准与技术,第4章进一步研究基于点-点通信线路物理层协议的数据链路层问题。

② 第5章以局域网、城域网与无线网络技术为背景,讨论基于广播信道的物理层和数据链路层协议与标准。

③ 第6章讨论它们共同使用的网络层的IP。

这样的知识点安排既符合技术特点,又能够适应读者循序渐进学习的需要。

3.1.3 物理层向数据链路层提供的服务

理解基于点-点通信线路的物理层功能时,需要注意以下两个问题。

(1) 点-点通信线路的物理层比特流传输过程

图3-1给出了用点-点通信线路连接起来的网络主机之间数据传输过程示意图。通信线路是由传输介质与通信设备组成的。在如图3-1所示的层次结构中,忽略了通信设备的细节,将点-点通信线路简化为点-点传输介质。

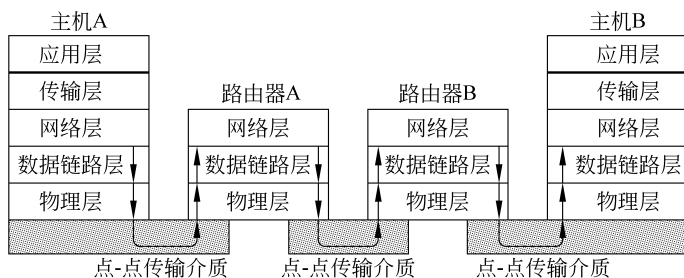


图 3-1 点-点通信线路的物理层数据传输过程示意图

点-点传输介质连接着两个相邻通信主机的物理层,如主机A与路由器A、路由器A与路由器B、路由器B与主机B的物理层分别用点-点传输介质连接。那么,主机A的物理层只能够与路由器A的物理层直接传输比特流,而不可能与路由器B直接传输比特流。主机A要向主机B传输比特流,它只能先由主机A的物理层将比特流发送到路由器A的物理层,经路由器A的数据链路层与网络层处理之后,再由路由器A的物理层发送到路由器

B 的物理层;以此类推,通过多段点-点传输介质连接的物理层之间的协作,共同完成网络中主机 A 与主机 B 之间比特流的正确传输。

(2) 点-点通信线路的物理层的通信过程与高层协议层的关系

在图 3-1 中,如果主机 A 希望将数据传输到主机 B,那么由主机 A 网络层启动路由选择算法来决定下一个主机是谁。在网络层 IP 的表述中,习惯将路由选择算法选择的“下一个主机”称为“下一跳节点”或“下一跳路由器”。

在这个例子中,假设主机 A 的网络层选择的下一跳主机是路由器 A,那么主机 A 的网络层通知数据链路层,数据链路层通知物理层,要在主机 A 的物理层与路由器 A 的物理层之间建立起物理连接;主机 A 的物理层执行命令,与路由器 A 的物理层建立物理连接,并通过该连接传送比特流;当比特流传输完成后,释放物理连接。同样,路由器 A 的网络层根据数据传输的目的地址,启动路由选择算法确定下一跳节点是谁。如果下一跳选择了路由器 B,那么路由器 A 的物理层就必须与路由器 B 的物理层建立连接,然后再继续传送比特流。这个过程一直持续到目的主机为止。因此,点-点通信线路的物理层的通信需要经过:建立物理连接、传输比特流与释放物理连接的过程。

3.2 数据通信的基本概念

3.2.1 信息、数据与信号

在讨论了物理层基本概念与功能的基础上,我们需要进入实现物理层数据传输技术的讨论。为了深入理解计算机网络与数据通信技术的内在关系,首先需要理解信息、数据与信号之间的联系与区别。

1. 信息、数据与信号的基本概念

信息、数据与信号是三个不同的概念。理解这一点需要注意以下几个问题。

(1) 信息(information)

组建计算机网络的目的是实现信息共享。信息的载体可以是文字、语音、图形、图像或视频。传统的信息主要是指文本或数字类信息。随着网络电话、网络电视、网络视频技术的发展,计算机网络传送的信息从最初的文本或数字类信息,逐步发展到包含语音、图形、图像与视频等多种类型的多媒体(Multimedia)信息。

(2) 数据(data)

计算机为了存储、处理和传输信息,首先要将表达信息的字符、数字、语音、图形、图像或视频用二进制数据表示。计算机存储与处理的是二进制代码。

(3) 信号(signal)

在通信系统中,二进制代码 0、1 比特序列必须变换成用不同的电平或频率变化的信号之后,才能够通过传输介质进行传输。

2. 信息与编码

目前,应用最广泛的是美国信息交换标准编码 ASCII 码。ASCII 码本是一个信息交换编码的国家标准,但是后来被国际标准化组织 ISO 接受,成为国际标准 ISO 646,又称为国际 5 号码。因此,它被用于计算机内码,也是数据通信中的编码标准。

二进制编码按高位到低位($b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0$)的顺序排列,而 b_7 位一般用于字符的校验。如果采用奇校验,则英文单词“NETWORK”的 ASCII 码编码的二进制比特序列(采用奇校验)应该是“11001110 01000101 01010100 01010111 01001111 01010010 11001011”。如果主机 A 将这个比特序列准确地传送到主机 B,并且主机 A、B 都使用 ASCII 编码,则主机 B 可以将接收的比特序列正确地解释为“NETWORK”。

3. 信息、数据与信号的关系

图 3-2 给出了信息、数据与信号关系的示意图。假如在一次屏幕会话中,发送端通过计算机发送一个英文单词“NETWORK”,计算机按照 ASCII 编码规则用一组特定的二进制比特序列的“数据”记录下来。但是计算机内部的二进制数不符合传输介质传输的要求,不能够直接通过传输介质传输。要正确实现收发双方之间的比特流传输,首先要将待传输的计算机产生的二进制比特序列通过数据信号编码器转换为一种特定的电信号,再由发送端的发送设备通过通信线路,将信号传送到接收端。接收端的数据信号接收设备在接收到信号之后,传送给数据信号解码器,还原出二进制数据。接收端计算机按照 ASCII 编码规则解释接收到的二进制数据,并在接收端计算机的屏幕上显示出“NETWORK”这样一个英文单词。因此,会话双方之间交换的是“信息”,计算机将信息转换为计算机能够识别、处理、存储与传输的“数据”,而计算机网络物理层之间通过传输介质传输的是“信号”。

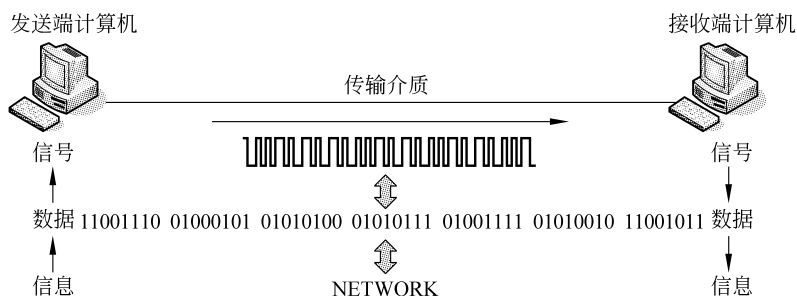


图 3-2 信息、数据与信号关系示意图

3.2.2 数据通信方式

图 3-3 给出了计算机网络中两台主机通信过程的示意图。在数据通信技术的讨论中,我们经常将发送数据的一方叫做“信源”、“源主机”、“发送端”或“发送主机”,将接收数据的一方叫做“信宿”、“目的主机”、“接收端”或“接收主机”。如果主机 A 要与主机 B 进行通信,主机 A 首先要将数据传送给路由器 A;路由器 A 以存储转发方式接收数据,由它来决定通信子网中数据传送路径;由于源主机 A 与目的主机 B 之间没有直接连接,数据可能要通过

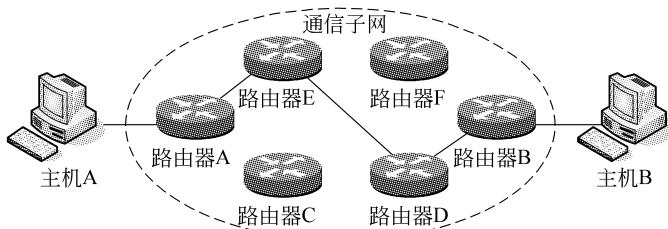


图 3-3 计算机网络中两台计算机的通信过程

路由器 A、路由器 E、路由器 D、路由器 B 到达主机 B。由于路由器本身就是计算机,因此图 3-3 给出了计算机网络中两台主机通信过程可以看成是由多段点-点通信线路连接的计算机之间的数据通信问题。

理解计算机网络的通信过程,需要解决以下几个基本问题。

1. 数据传输类型

计算机系统关心的是信息用什么样的数据编码表示。例如,如何用 ASCII 码表示字母、数字与符号;如何用双字节去表示汉字;如何表示语音、图形、图像与视频。对于数据通信技术来说,它研究的是如何将表示各类信息的二进制比特序列通过传输介质在不同计算机之间传输的问题。物理层需要根据所使用的传输介质与传输设备来确定,表示数据的二进制比特序列采用哪一种信号编码的方式传输。在传输介质上传输的信号类型有两种:模拟信号与数字信号。

图 3-4 给出了模拟信号与数字信号的波形。电平幅度连续变化的电信号称为模拟信号(analog signal)。人的语音信号属于模拟信号。传统的电话线路是用来传输模拟信号的。计算机产生的电信号是用两种不同的电平表示 0、1 比特序列电压跳变的脉冲信号,这种脉冲信号称为数字信号(digital signal)。

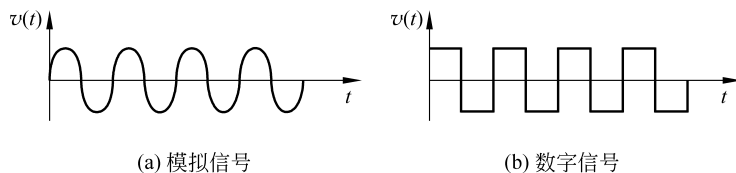


图 3-4 模拟信号与数字信号波形

数据在计算机中是以离散的二进制数字表示的,但是在数据通信过程中,它是以数字信号方式还是以模拟信号方式表示,这将取决于通信线路所允许传输的信号类型。如果通信信道不允许直接传输计算机所产生的数字信号,那么就需要在发送端将数字信号变换成模拟信号,在接收端再将模拟信号还原成数字信号,这个过程称为调制/解调。如果通信线路允许直接传输计算机所产生的数字信号,为了很好地解决收发双方的同步与具体实现中的技术问题,也需要将数字信号进行波形变换。因此,在研究数据通信技术时,首先要讨论数据在传输过程中的表示方式与数据传输类型问题。

2. 数据通信方式

在设计一个数据通信系统时,还需要回答以下三个主要的问题:串行通信与并行通信,单工、半双工与全双工通信,同步技术。

(1) 串行通信与并行通信

按照数据通信使用的信道数,它可以分为两种类型:串行通信与并行通信。图 3-5 给出了串行通信与并行通信的工作原理示意图。在计算机中,通常是用 8 位的二进制代码来表示一个字符。在数据通信中,将表示一个字符的二进制代码按由低位到高位顺序依次发送的方式称为串行通信;将表示一个字符的 8 位二进制代码同时通过 8 条并行的通信信道发送,每次发送一个字符代码的方式称为并行通信。

显然,采用串行通信方式只需在收发双方之间建立一条通信信道;采用并行通信方式在收发双方之间必须建立并行的多条通信信道。对于远程通信来说,在同样的传输速率的情

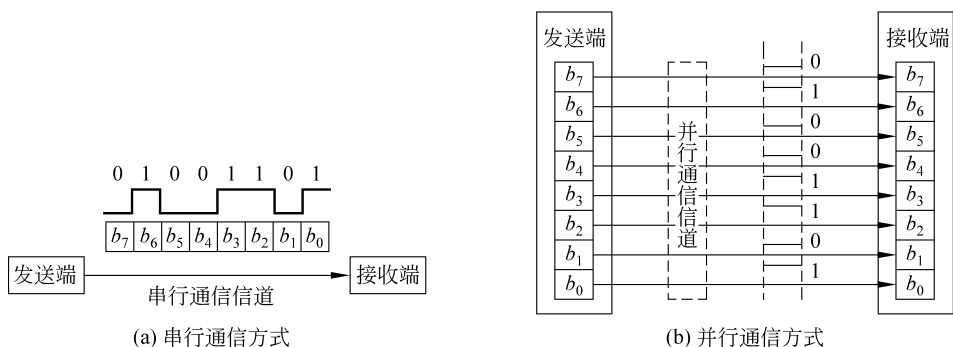


图 3-5 串行通信与并行通信

况下,并行通信在单位时间内所传送的码元数是串行通信的 n 倍(在这个例子中 $n=8$)。由于需要建立多个通信信道,并行通信方式造价较高。因此,在远程通信中一般采用串行通信方式。

(2) 单工、半双工与全双工通信

按照信号传送方向与时间的关系,数据通信可以分为三种类型:单工通信、半双工通信与全双工通信。如图 3-6 所示分别为单工、半双工与全双工通信。在如图 3-6(a)所示的单工通信方式中,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。在如图 3-6(b)所示的半双工通信方式中,信号可以双向传送,但是必须是交替进行,一个时间只能向一个方向传送。在如图 3-6(c)所示的全双工通信方式中,信号可以同时双向传送。

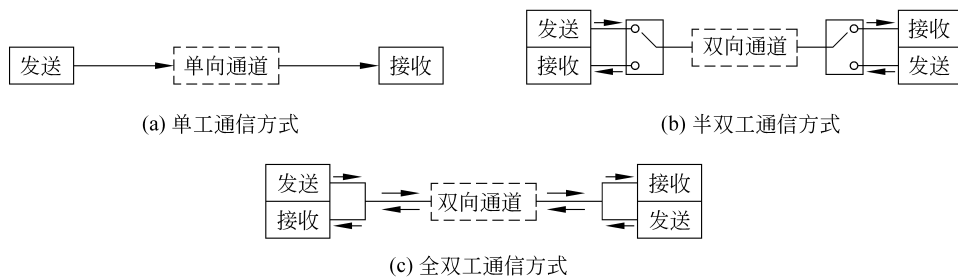


图 3-6 单工、半双工与全双工通信

(3) 同步技术

① 同步的基本概念

同步是数字通信中必须解决的一个重要问题。同步是要求通信双方在时间基准上保持一致的过程。计算机通信过程与人们使用电话通话的过程有很多相似之处。在正常的通话过程中,人们在拨通电话并确定对方是要找的人时,双方就可以进入通话状态。在通话过程中,说话人要讲清楚每个字,讲完每句话需要停顿。听话人也要适应说话人的说话速度,听清对方讲的每个字,并根据说话人的语气和停顿判断一句话的开始与结束,这样才可能听懂对方所说的每句话,这就是人们在电话通信中解决的“同步”问题。如果在数据通信中收发双方同步不良,轻者会造成通信质量下降,严重时甚至造成系统不能工作。

在数据通信过程中,收发双方同样要解决同步问题,但是问题更复杂一些。数据通信的同步包括以下两种类型:位同步,字符同步。

② 位同步

数据通信的双方如果是两台计算机,尽管两台计算机的时钟频率相同(假如都是330MHz),实际上不同计算机的时钟频率误差是不相同的。这种时钟频率的差异将导致不同计算机发送和接收的时钟周期误差。尽管这种差异是微小的,但在大量数据的传输过程中,其积累误差足以造成接收比特取样周期和传输数据的错误。因此,数据通信首先要解决收发双方的时钟频率一致性问题。解决这个问题的基本方法是:要求接收端根据发送端发送数据的时钟频率与比特流的起始时刻,校正自己的时钟频率与接收数据的起始时刻,这个过程就称为位同步。实现位同步的方法主要有以下两种:外同步法与内同步法。

外同步法是在发送端发送一路数据信号的同时,另外发送一路同步时钟信号。接收端根据接收到的同步时钟信号来校正时间基准与时钟频率,实现收发双方的位同步。

内同步法则是从自含时钟编码的发送信号中提取同步时钟的方法。曼彻斯特编码与差分曼彻斯特编码都是自含时钟编码方法。

③ 字符同步

在解决比特同步问题之后,第二个问题解决的是字符同步(character synchronous)问题。标准的ASCII字符是由8位二进制0、1组成的。发送端以8位为一个字符单元来发送,接收端也以8位的字符单元来接收。保证收发双方正确传输字符的过程就叫做字符同步。实现字符同步的方法主要有以下两种:同步传输,异步传输。

采用同步方式进行数据传输称为同步传输(synchronous transmission)。同步传输将字符组织成组,以组为单位连续传送。每组字符之前加上一个或多个用于同步控制的同步字符SYN,每个数据字符内不加附加位。接收端接收到同步字符SYN后,根据SYN来确定数据字符的起始与终止,以实现同步传输的功能。图3-7给出了同步传输的工作原理。

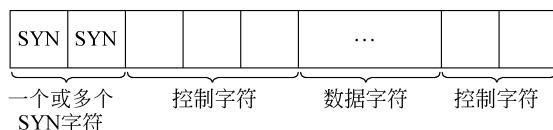


图 3-7 同步传输的工作原理

采用异步方式进行数据传输称为异步传输(asynchronous transmission)。异步传输的特点是:每个字符作为一个独立的整体进行发送,字符之间的时间间隔可以是任意的。为了实现字符同步,每个字符的第一位前加1位起始位(逻辑“1”),字符的最后一位后加1或两位终止位(逻辑“0”)。图3-8给出了异步传输的工作原理。在实际问题中,人们也将同步

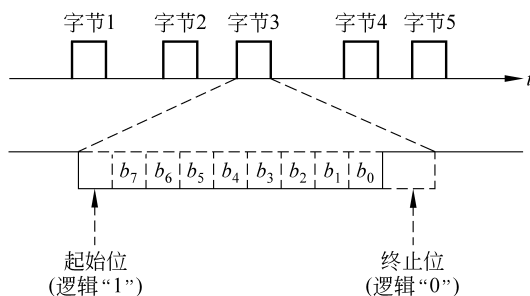


图 3-8 异步传输的工作原理

传输称为同步通信,将异步传输称为异步通信。同步通信比异步通信的传输效率要高,因此同步通信更适用于高速数据传输。

3.2.3 传输介质的主要类型与特性

传输介质是网络中连接收发双方的物理通路,也是通信中实际传送信息的载体。网络中常用的传输介质有:双绞线、同轴电缆、光纤、无线与卫星通信信道。

1. 双绞线的主要特性

双绞线是局域网中最常用的传输介质。图 3-9 给出了双绞线的基本结构示意图。双绞线可以由 1 对、2 对或 4 对相互绝缘的铜导线组成。一对导线可以作为一条通信线路。每对导线相互绞合的目的是为了使通信线路之间的电磁干扰达到最小。

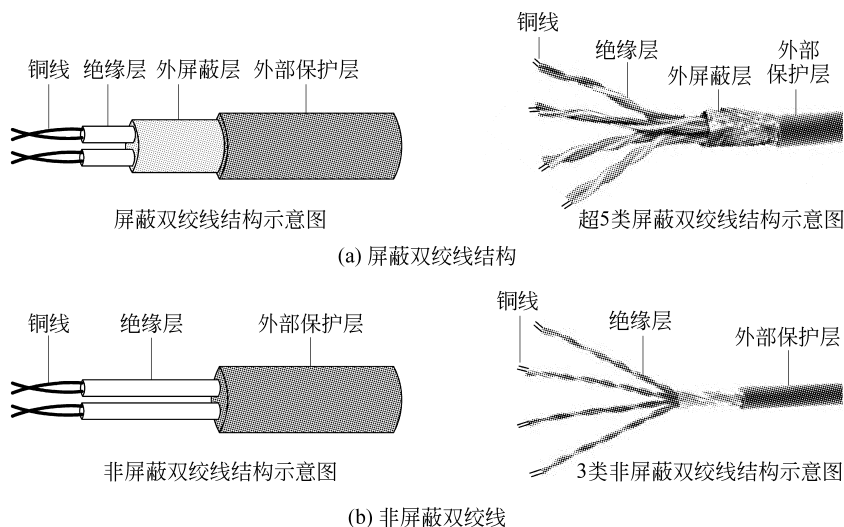


图 3-9 双绞线的基本结构示意图

局域网中所使用的双绞线分为两类:屏蔽双绞线(Shielded Twisted Pair, STP)与非屏蔽双绞线(Unshielded Twisted Pair, UTP)。屏蔽双绞线由外部保护层、屏蔽层与多对双绞线组成;非屏蔽双绞线由外部保护层与多对双绞线组成。在典型的 Ethernet 中,常用的非屏蔽双绞线 UTP 有 3 类线与 5 类线。随着千兆以太网 GE 等高速局域网的出现,各种高带宽的双绞线不断推出,如超 5 类线、6 类与 7 类线。

2. 同轴电缆的主要特性

尽管目前实际的局域网组网中,双绞线与光纤逐步替代了同轴电缆,但是早期 Ethernet 是在同轴电缆基础上发展起来的,了解同轴电缆的结构对于理解局域网的工作原理是有益的。

同轴电缆由内导体、绝缘层、外屏蔽层及外部保护层组成。同轴介质的特性参数由内导体、外屏蔽层及绝缘层的电参数与机械尺寸决定。同轴电缆的特点是抗干扰能力较强。图 3-10 给出了同轴电缆的基本结构示意图。

3. 光纤的主要特性

(1) 光纤结构与传输原理

光纤是传输介质中性能与应用前景最好的一种。光纤的纤芯是一种直径为 $8\sim 100\mu\text{m}$

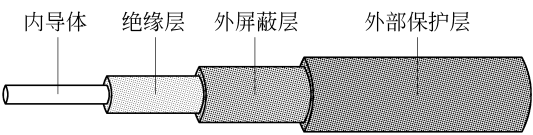


图 3-10 同轴电缆的基本结构示意图

的柔软、能传导光波的玻璃或塑料,其中用超高纯度石英玻璃纤维制作的纤芯传输损耗最低。在折射率较高的纤芯外面,用折射率较低的包层包裹起来,外部再包裹涂覆层,这样就构成了一条光纤。多条光纤组成一束构成一条光缆,其结构如图 3-11(a)所示。

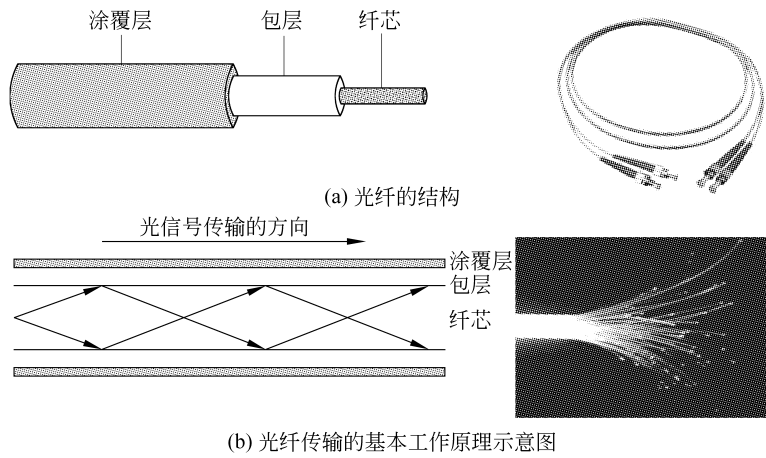


图 3-11 光纤结构与传输原理示意图

由于光纤的折射系数高于外部包层的折射系数,因此可以形成光波在光纤与包层的界面上的全反射。光纤通过内部的全反射来传输一束经过编码的光信号。图 3-11(b)给出了光波通过光纤内部全反射实现光信号传输的原理示意图。

(2) 光纤传输系统结构

图 3-12 给出了典型的光纤传输系统结构。在发送端,使用发光二极管(LED)或注入型激光二极管(ILD)作为光源。在接收端,使用光电二极管 PIN 检波器将光信号转换成电信号。光载波调制方法采用振幅键控 ASK 调制方法,即亮度调制。光纤传输速率可以达到 Gbps 的量级。



图 3-12 典型的光纤传输系统结构

(3) 单模光纤与多模光纤

光纤传输有两种模式：单模光纤与多模光纤。多模光纤是指光信号与光纤轴成多个可分辨角度的多路光载波传输。单模光纤是指光信号仅与光纤轴成单个可分辨角度的单路光载波传输。单模光纤的性能优于多模光纤。多模光纤与单模光纤传输模式的比较如