

第 1 章 计算机网络概论

计算机网络是计算机技术与通信技术相结合的产物。计算机网络是信息收集、分发、存储、处理和消费的重要载体。计算机网络作为一种生产和生活工具被人们广泛接纳和使用之后，对人类社会的经济、政治和文化生活产生了重大影响。本章讲述计算机网络的基本概念和发展简史，以及国际标准化组织定义的开放系统互连参考模型，后者是分析和认识计算机网络的理论基础。

1.1 计算机网络的形成和发展

1. 早期的计算机网络

自从有了计算机，就有了计算机技术与通信技术的结合。早在 1951 年，美国麻省理工学院林肯实验室就开始为美国空军设计称为 SAGE 的半自动化地面防空系统，该系统最终于 1963 年建成，被认为是计算机和通信技术结合的先驱。

计算机通信技术应用用于民用系统方面，最早的当数美国航空公司与 IBM 公司在 20 世纪 50 年代初开始联合研究、60 年代初投入使用的飞机订票系统 SABRE-I。美国通用电气公司的信息服务系统则是世界上最大的商用数据处理网络，其地理范围从美国本土延伸到欧洲、澳洲和亚洲的日本。该系统于 1968 年投入运行，具有交互式处理和批处理能力，由于地理范围大，可以利用时差达到资源的充分利用。

在这一类早期的计算机通信网络中，为了提高通信线路的利用率并减轻主机的负担，已经使用了多点通信线路、终端集中器以及前端处理机等现代通信技术。这些技术对以后计算机网络的发展有着深刻的影响。以多点线路连接的终端和主机间的通信建立过程，可以用主机对各终端轮询或是由各终端连接成雏菊链的形式实现。考虑到远程通信的特殊情况，对传输的信息还要按照一定的通信规程进行特别的处理。

2. 现代计算机网络的发展

20 世纪 60 年代中期出现了大型主机，同时也出现了对大型主机资源远程共享的要求。以程控交换为特征的电信技术的发展则为这种远程通信需求提供了实现的手段。现代意义上的计算机网络是从 1969 年美国国防部高级研究计划局（DARPA）建成的 ARPAnet 实验网开始的。

该网络当时只有 4 个节点，以电话线路作为主干通信网络，两年后，建成 15 个节点，进入工作阶段。此后，ARPAnet 的规模不断扩大。到了 20 世纪 70 年代后期，网络节点超过 60 个，主机 100 多台，地理范围跨越了美洲大陆，连通了美国东部和西部的许多大学和研究机构，而且通过通信卫星与夏威夷和欧洲地区的计算机网络相互连通。

ARPAnet 的主要特点如下。

- (1) 资源共享；
- (2) 分散控制；
- (3) 分组交换；
- (4) 采用专门的通信控制处理机；
- (5) 分层的网络协议。

这些特点被认为是现代计算机网络的一般特征。

20 世纪 70 年代中后期是广域通信网大发展的时期。各发达国家的政府部门、研究机构和电报电话公司都在发展分组交换网络。例如，英国邮政局的 EPSS 公用分组交换网络（1973）、法国信息与自动化研究所（IRIA）的 CYCLADES 分布式数据处理网络（1975）、加拿大的 DATAPAC 公用分组交换网（1976）以及日本电报电话公司的 DDX-3 公用数据网（1979）等。这些网络都以实现计算机之间的远程数据传输和信息共享为主要目的，通信线路大多采用租用电话线路，少数铺设专用线路，数据传输速率在 50Kbps 左右。这一时期的网络被称为第二代网络，以远程大规模互连为其主要特点。

3. 计算机网络标准化阶段

经过 20 世纪六七十年代前期的发展，人们对组网的技术、方法和理论的研究日趋成熟。为了促进网络产品的开发，各大计算机公司纷纷制定自己的网络技术标准。IBM 首先于 1974 年推出了该公司的系统网络体系结构（System Network Architecture, SNA），为用户提供能够互连互通的成套通信产品；1975 年，DEC 公司宣布了自己的数字网络体系结构（Digital Network Architecture, DNA）；1976 年，UNIVAC 宣布了该公司的分布式通信体系结构（Distributed Communication Architecture）。这些网络技术标准只是在一个公司范围内有效，遵从某种标准的、能够互连的网络通信产品，只是同一公司生产的同构型设备。网络通信市场这种各自为政的状况使得用户在投资方向上无所适从，也不利于多厂商之间的公平竞争。1977 年，国际标准化组织（ISO）的 TC97 信息处理系统技术委员会 SC16 分技术委员会开始着手制定开放系统互连参考模型 OSI/RM。作为国际标准，OSI 规定了可以互连的计算机系统之间的通信协议，遵从 OSI 协议的网络通信产品都是所谓的“开放系统”。今天，几乎所有的网络产品厂商都声称自己的产品是开放系统，不遵从国际标准的产品逐渐失去了市场。这种统一的、标准化产品互相竞争的市场进一步促进了网络技术的发展。

4. 微型机局域网的发展时期

20 世纪 80 年代初期出现了微型计算机, 这种更适合办公室环境和家庭使用的新机种对社会生活的各个方面都产生了深刻的影响。1972 年, Xerox 公司发明了以太网, 以太网与微型机的结合使得微型机局域网得到了快速的发展。在一个单位内部的微型计算机和智能设备互连接起来, 提供了办公自动化的环境和信息共享的平台。1980 年 2 月, IEEE 组织了一个 802 委员会, 开始制定局域网标准。局域网的发展道路不同于广域网, 局域网厂商从一开始就按照标准化、互相兼容的方式展开竞争。用户在建设自己的局域网时选择面更宽, 设备更新更快。

5. 国际因特网的发展时期

1985 年, 美国国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 利用 ARPAnet 协议建立了用于科学研究和教育的骨干网络 NSFnet。1990 年, NSFnet 代替 ARPAnet 成为美国国家骨干网, 并且走出了大学和研究机构进入社会。从此, 网上的电子邮件、文件下载和消息传输受到越来越多人的欢迎并被广泛使用。1992 年, Internet 学会成立, 该学会把 Internet 定义为“组织松散的、独立的国际合作互联网络”“通过自主遵守计算协议和过程支持主机对主机的通信”。1993 年, 美国伊利诺斯大学国家超级计算中心开发成功了网上浏览工具 Mosaic (后来发展成 Netscape), 使得各种信息都可以方便地在网上交流。浏览工具的实现引发了 Internet 发展和普及的高潮。上网不再是网络操作人员和科学研究人员的专利, 而成为一般人进行远程通信和交流的工具。在这种形势下, 美国总统克林顿于 1993 年宣布正式实施国家信息基础设施 (National Information Infrastructure, NII) 计划, 从此在世界范围内展开了争夺信息化社会领导权和制高点的竞争。与此同时, NSF 不再向 Internet 注入资金, 使其完全进入商业化运作。到了 20 世纪 90 年代后期, Internet 以惊人的高速度发展, 网上的主机数量、上网人数、网络的信息流量每年都在成倍地增长。

1.2 计算机网络的分类和应用

1.2.1 计算机网络的分类

“计算机网络”这一术语是指由通信线路互相连接的许多自主工作的计算机构成的集合体。这里强调构成网络的计算机是自主工作的, 这是为了和多终端分时系统相区别。在后一种系统中, 终端无论是本地的还是远程的, 只是主机和用户之间的接口, 它本身并不拥有计算资源, 全部资源集中在主机中。主机以自己拥有的资源分时地为各终端用户服务。在计算机网络中的各个计算机 (工作站) 本身拥有计算资源, 能独立工作, 能完成一定的计算任务。同时, 用户

还可以共享网络中其他计算机的资源（CPU、大容量外存或信息等）。

比计算机网络更高级的系统是分布式系统。分布式系统在计算机网络基础上为用户提供了透明的集成应用环境。用户可以用名字或命令调用网络中的任何资源或进行远程的数据处理，不必考虑这些资源或数据的地理位置。

与计算机网络类似的另一种系统是多机系统。多机系统专指同一机房中的许多大型主机互连组成的功能强大、能高速并行处理的计算机系统。对这种系统互连的要求是高带宽和连通的多样性。计算机网络中的信息传输开销很大，实际的有效数据速率比通信线路能够提供的带宽要小得多。同时，由于距离的原因，在计算机网络终端系统是通过交换设备互连的，这种有限互连的方式不能适应高速并行计算的要求。

计算机网络的组成元素可以分为两大类，即网络节点和通信链路。网络节点又分为端节点和转发节点。端节点指信源和信宿节点，例如用户主机和用户终端；转发节点指网络通信过程中控制和转发信息的节点，例如交换机、集线器、接口信息处理机等。通信链路是指传输信息的信道，可以是电话线、同轴电缆、无线电路、卫星线路、微波中继线路和光纤缆线等。网络节点通过通信链路连接成的计算机网络如图 1-1 所示。

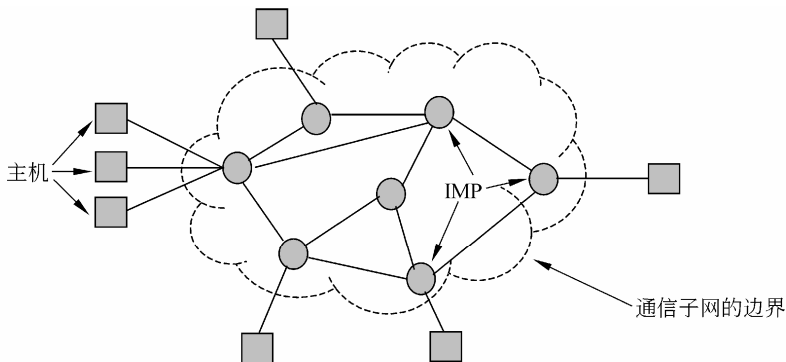


图 1-1 通信子网与资源子网

在图 1-1 中，虚线框外的部分称为资源子网。资源子网中包括拥有资源的用户主机和请求资源的用户终端，它们都是端节点。虚线框内的部分叫作通信子网，其任务是在端节点之间传送由信息组成的报文，主要由转发节点和通信链路组成。在图 1-1 中，按照 ARPA 网络的术语把转发节点统称为接口信息处理机（Interface Message Processor，IMP）。IMP 是一种专用于通信的计算机，有些 IMP 之间直接相连，有些 IMP 之间必须经过其他 IMP 才能相连。当 IMP 收到一个报文后要根据报文的目标地址决定把该报文提交给与它相连的主机还是转发到下一个 IMP，这种通信方式叫作存储-转发通信。在广域网中的通信一般都采用这种方式。另外一种通信方式是广播通信方式，主要用于局域网中。局域网中的 IMP 简化为一个微处理器芯片，每台

主机或工作站中都设置一个 IMP。在广播通信系统中，唯一的信道为所有主机所共享，任何主机发出的信息所有主机都能收到。信息包中的目标地址则指明特定的接收站。在需要时可以用一个特殊的目标地址（例如全 1 地址）表示该信息包是发给所有站的，这叫作多目标发送。

通信子网中转发节点的互连模式叫作子网的拓扑结构。图 1-2 中列出了可能有的几种拓扑结构，其中全连接型对于点对点的通信是最理想的，但由于连接数接近节点数的平方倍，所以实际上是行不通的。在广域网中常见的互连拓扑是树型和不规则型，而在局域网中则常用星型、环型、总线型等规则型拓扑结构。

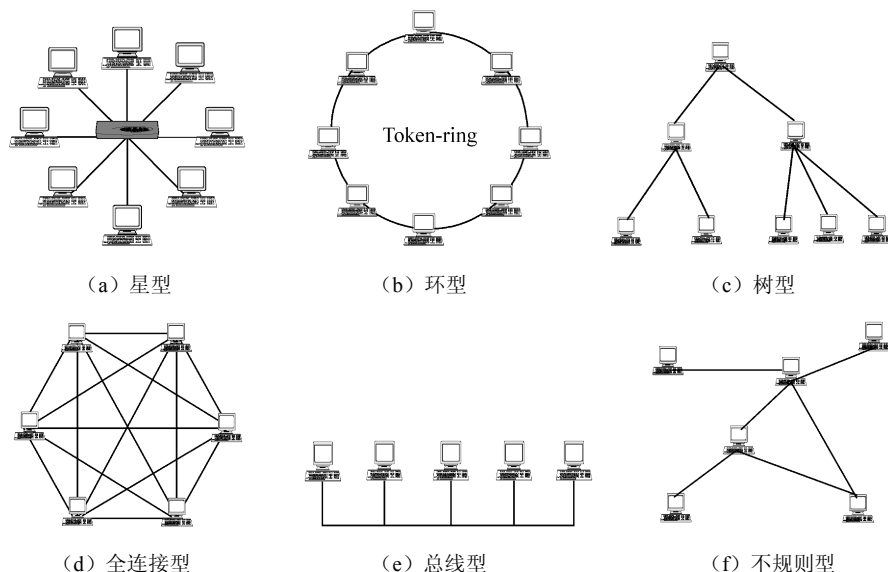


图 1-2 网络的拓扑结构

可以按照不同的方法对计算机网络进行分类。按照互连规模和通信方式，可以把网络分为局域网（LAN）、城域网（MAN）和广域网（WAN），这 3 种网络的比较如表 1-1 所示。

表 1-1 LAN、MAN 和 WAN 的比较

	局 域 网	城 域 网	广 域 网
地理范围	室内，校园内部	建筑物之间，城区内	国内，国际
所有者和运营者	单位所有和运营	几个单位共有或公用	通信运营公司所有
互联和通信方式	共享介质，分组广播	共享介质，分组广播	共享介质，分组交换
数据速率	每秒几十兆位 至每秒几百兆位	每秒几兆位 至每秒几十兆位	每秒几十千位

续表

	局 域 网	城 域 网	广 域 网
误码率	最小	中	较大
拓扑结构	规则结构：总线型、星型和环型	规则结构：总线型、星型和环型	不规则的网状结构
主要应用	分布式数据处理 办公自动化	LAN 互联，综合声音、视频和数据业务	远程数据传输

按照使用方式可以把计算机网络分为校园网（Campus Network）和企业网（Enterprise Network），前者用于学校内部的教学科研信息的交换和共享，后者用于企业管理和办公自动化。一个校园网或企业网可以由内联网（Intranet）和外联网（Extranet）组成。内联网是采用 Internet 技术（TCP/IP 协议和 B/S 结构）建立的校园网或企业网，用防火墙限制与外部的信息交换，以确保内部的信息安全。外联网是校园网或企业网的一部分，通过 Internet 上的安全通道与内部网进行通信。按照网络服务的范围可以把网络分为公用网与专用网。公用网是通信公司建立和经营的网路，向社会提供有偿的通信和信息服务。专用网一般是建立在公用网上的虚拟网络，仅限于一定范围的用户之间的通信，或者对一定范围的通信设备实施特殊的管理。网络按照提供的服务可以分为通信网和信息网。通信网提供远程连网服务，各种校园网和企业网通过远程连接形成 Internet，提供互连服务的供应商叫作 ISP（Internet Service Provider）。信息网提供 Web 信息浏览、文件下载和电子邮件传送等信息服务，提供网络信息服务的供应商叫作 ICP（Internet Content Provider）。

1.2.2 计算机网络的应用

计算机网络的应用涉及社会生活的各个方面。当前对经济和文化生活影响最大的网络应用列举如下。

（1）办公自动化。网络化办公系统的主要功能是实现信息共享和公文流转。其功能包括领导办公、电子签名、公文处理、日程安排、会议管理、档案管理、财务报销、信访管理、信息发布和全文检索等模块，以解决各种类型的无纸化办公问题。这种系统应该简单、可靠、安全、易用、容易安装和普遍适用。在目前大力推广政府上网、企业上网的情况下，办公软件具有越来越广阔的应用环境。但是，现在的大多数办公产品只能实现部分功能，集成性较差。形成这种状况的主要原因是没有统一的标准和规范，产品之间缺乏兼容性，难以形成整体产业优势。

（2）电子数据交换。电子数据交换（Electronic Data Interchange，EDI）是一种新型的电子贸易工具，是计算机、通信和现代管理技术相结合的产物。它通过计算机通信网络将贸易、运输、保险、银行和海关等行业信息表现为国际公信的标准格式，实现公司之间的数据交换和处

理,并完成以贸易为中心的整个交易过程。由于使用 EDI 可以减少甚至消除贸易过程中的纸质文件,因此又被通俗地称为“无纸贸易”。EDI 传输的文件具有跟踪、确认、防篡改、防冒领功能,以及一系列安全保密功能,并具有法律效力。中国公用电子数据交换业务网(CHINAEDI)是面向社会各行业开放的公用 EDI 网络,其应用范围涉及电子报关、电子报税、银行托收、港口集装箱运输和铁路货运,以及制造业和商业订单的处理等。

(3) 远程教育。远程网络教学是利用因特网技术,与教育资源相结合,在计算机网络上进行的教学方式。通过网络进行教育最明显的优势是可以使有限的教育资源成为近乎无限的、不受时空和资金限制的、人人可以享受的全民教育资源。网络教学利用现代通信技术实施远程交互作用,学习者可以与远地的教师通过电子邮件、BBS 等建立交互联系,学员之间也可进行类似的交流和互助学习。网络教学可采用多种多样的教学形式,可以进行个别化教学,也可以进行小组协作学习,还可以接受远程广播教育。

(4) 电子银行。电子银行是一种在线服务系统,它以因特网为媒介,为客户提供银行账户信息查询、转账付款、在线支付和代理业务等自助金融服务。这种系统需要采用高强度加密算法,客户的资料和信用卡信息才不会被外界获取。电子银行的出现标志着人类的交换方式已经从物物交换、货币交换发展到了信息交换的新阶段。一般商业银行开办的网上银行都提供信用卡账务信息查询、转账、基金业务、外汇买卖、在线支付、异地汇款、代缴各种费用以及个人理财等金融服务。

(5) 证券和期货交易。证券和期货交易是一种高利润、高风险的投资方式,由于行情变化很快,所以投资者更加依赖于及时准确的交易信息。证券和期货市场通过计算机网络提供行情分析和预测、资金管理和投资计划等服务。还可以通过无线网络将各机构相连,利用手持通信设备输入交易信息,通过无线网络迅速传递到计算机、报价服务系统和交易大厅的显示板。管理员、经纪人和交易者也可以迅速利用手持通信设备直接进行交易,避免了由于时间延误所造成的损失。

(6) 娱乐和在线游戏。随着宽带通信与视频演播的快速发展,网络在线游戏正在逐步成为因特网娱乐的重要组成部分,也是互联网最富群众性和最有潜力的赢利点。一般而言,计算机游戏可以分为 3 类:完全不具备联网功能的单机游戏、具备局域网联网功能的多人联网游戏以及基于因特网的多用户游戏。最后一种游戏有大型的客户端软件和复杂的后台服务器系统。目前世界各地大批的网络游戏犹如雨后春笋般涌现出来,已经成为网络经济新的增长点。

1.3 我国互联网的发展

我国互联网的发展始于 20 世纪 80 年代末。1987 年 9 月 20 日,钱天白教授通过意大利公

用分组交换网 ITAPAC 设在北京的 PAD 发出我国的第一封电子邮件，与德国卡尔斯鲁厄大学进行通信，揭开了中国人使用 Internet 的序幕。

1989 年 9 月，国家计委组织建立中关村地区教育与科研示范网络（NCFC）。立项的主要目标是在北京大学、清华大学和中科院 3 个单位间建设高速互连网络，并建立一个超级计算中心，这个项目于 1992 年建设完成。

1990 年 10 月，中国正式在 DDN-NIC 注册登记了我国的顶级域名 CN。1993 年 4 月，中国科学院计算机网络信息中心召集部分网络专家调查了各国的域名系统，据此提出了我国的域名体系。

1994 年 1 月 4 日，NCFC 工程通过美国 Sprint 公司连入 Internet 的 64k 国际专线开通，实现了与 Internet 的全功能连接，从此我国正式成为有 Internet 的国家。此事被国家统计公报列为 1994 年重大科技成就之一。

从 1994 年开始，分别由国家计委、邮电部、国教教委和中科院主持，建成了我国的四大因特网，即中国金桥信息网、中国公用计算机互联网、中国教育科研网和中国科技网。在短短几年间，这些主干网络就投入使用，形成了国家主干网的基础。

1996 年以后，我国互联网的发展进入应用平台建设和增值业务开发阶段。中国互联网进入了空前活跃的高速发展时期。一大批中文网站，包括综合性的“门户”网站和各种专业性的网站纷纷出现，提供新闻报道、技术咨询、软件下载和休闲娱乐等 ICP 服务，以及虚拟主机、域名注册、免费空间等技术支持服务。与此同时，各种增值服务也逐步展开，其中主要有电子商务、IP 电话、视频点播和无线上网等。在互联网的应用面扩宽和普及率快速增长的前提下，一些中国互联网公司开始进军海外股市纳斯达克，成为世纪之交中国新经济发展的重要标志。

1997 年 6 月 3 日，根据国务院信息化工作领导小组办公室的决定，中国科学院网络信息中心组建了中国互联网络信息中心（CNNIC），同时，国务院信息化工作领导小组办公室宣布成立中国互联网络信息中心工作委员会。

1997 年 11 月，CNNIC 发布了第 1 次《中国 Internet 发展状况统计报告》。截止到 1997 年 10 月 31 日，我国共有上网计算机 29.9 万台，上网用户 62 万人，CN 下注册的域名 4066 个，WWW 站点 1500 个，国际出口带宽为 18.64Mbps。

2017 年 1 月 22 日下午，中国互联网络信息中心（CNNIC）发布第 39 次《中国互联网络发展状况统计报告》。截至 2016 年 12 月，中国网民规模达 7.31 亿，相当于欧洲人口总量，互联网普及率达到 53.2%，超过全球平均水平 3.1 个百分点，超过亚洲平均水平 7.6 个百分点。截至 2016 年 12 月，我国手机网民规模达 6.95 亿，增长率连续三年超过 10%。台式电脑、笔记本电脑的使用率均出现下降，手机不断挤占其他个人上网设备的使用。

1.4 计算机网络体系结构

计算机网络发展到今天,已经演变成一种复杂而庞大的系统。在计算机专业人员中,对付这种复杂系统的常规方法就是把系统组织成分层的体系结构,即把很多相关的功能分解开来,逐个予以解释和实现。读者以后会看到,在分层的体系结构中,每一层都是一些明确定义的相互作用的集合,即对等协议;层之间的界限是另外一些相互作用的集合,称为做接口协议。下面首先通过一个简单的例子说明计算机网络应该提供的各种功能。

1.4.1 计算机网络的功能特性

研究计算机网络的基本方法是全面深入地了解计算机网络的功能特性,即计算机网络是怎样在两个端用户之间提供访问通路的。理解了计算机网络的功能特性才能够掌握各种网络的特点,才能了解网络运行的原理。

首先,计算机网络应该在源节点和目标节点之间提供传输线路,这种传输线路可能要经过一些中间节点。如果是远程联网,则要通过电信公司提供的公用通信线路,这些通信线路可能是地面链路,也可能是卫星链路。如果电信公司提供的通信线路是模拟的,还必须用 Modem 进行信号变换,因而网络应该提供与 Modem 的物理的和电气的接口。

计算机通信有一个特点,即间歇性或突发性。人们打电话时信息流是平稳而连续的,速率也不太高。然而计算机之间的通信不是这样。当用户坐在终端前思考时,线路中没有信息流过。当用户发出文件传输命令时,突然来到的数据需要迅速地发送,然后又沉默一段时间。因而计算机之间的通信链路要有较高的带宽,同时由许多节点共享高速线路,以获得合理经济的使用效率。计算机网络的设计者发明了一些新的交换技术来满足这种特殊的通信要求,例如报文交换和分组交换技术。计算机网络的功能之一是对传输的信息流进行分组,加入控制信息,并把分组正确地传送到目的地。

加入分组的控制信息主要有两种:一种是接收端用于验证是否正确接收的差错控制信息;另一种是指明数据包的发送端和接收端的地址信息。因而,网络必须具有差错控制功能和寻址功能。另外,当多个节点同时要求发送分组时,网络还必须通过某种冲突仲裁过程决定谁先发送,谁后发送。所有这些带有控制信息的数据包在网络中通过一个个节点正确地向前传送的功能叫作数据链路控制(Data Link Control, DLC)功能。

关于寻址功能,还有更复杂的一面。如果网络有多个转发节点,则当转发节点收到数据包时必须确定下一个转发的对象,因此每一个转发节点都要有根据网络配置和交通情况决定路由的能力。

复杂网络中的通信类似于道路系统中的交通情况，弄得不好会导致交通拥挤、阻塞，甚至完全瘫痪，所以计算机网络要有流量控制和拥塞控制功能。当网络中的通信量达到一定程度时必须限制进入网络中的分组数，以免造成死锁。万一交通完全阻塞，也要有解除阻塞的办法。

两个用户通过计算机网络会话时，不仅开始时要有会话建立的过程，结束时还要有会话终止的过程。同时它们之间的双向通信也需要进行管理，以确定什么时候该谁说，什么时候该谁听。一旦发生差错，该从哪儿说起。

最后，通信双方可能各有一些特殊性需要统一，才能彼此理解。例如，用户使用的终端不同，字符集和数据格式各异，甚至它们之间还可能使用某种安全保密措施，这些都需要规定统一的协议，以消除不同系统之间的差别。这样，才能保证用户使用计算机网络进行正常的通信。

由上面的介绍可知，网络中的通信是相当复杂的，涉及一系列相互作用的功能过程。用户与远地应用程序通信的过程可以用图 1-3 表示，以上提到的主要功能过程按顺序列在图中。用户输入的字符流按标准协议进行转换，然后加入各种控制位和顺序号用于进行会话管理，再进行分组，加入地址字段和校验字段等。上述信息经过 Modem 的变换，送入公共载波线路传送。在接收端进行相反的处理，就可得到发送的信息。值得注意的是，整个通信过程经过这样的功能分解后，得到的功能元素总是成对地出现。例如，一对 Modem，一对数据链路控制元素等。每一对功能元素互相通信，它们之间的协议不涉及相邻层次的功能。例如，一对 Modem 之间的对话不涉及传输线路的细节，也不必了解它们传输的比特流的意义。而数据链路控制功能则与 Modem 的调制与解调功能无关，也与数据帧中信息字段的内容无关，DLC 元素的作用只是把数据帧从发送节点正确地传送到接收节点。这样，把一对功能元素从整个功能过程中孤立出来，就形成了分层的体系结构。

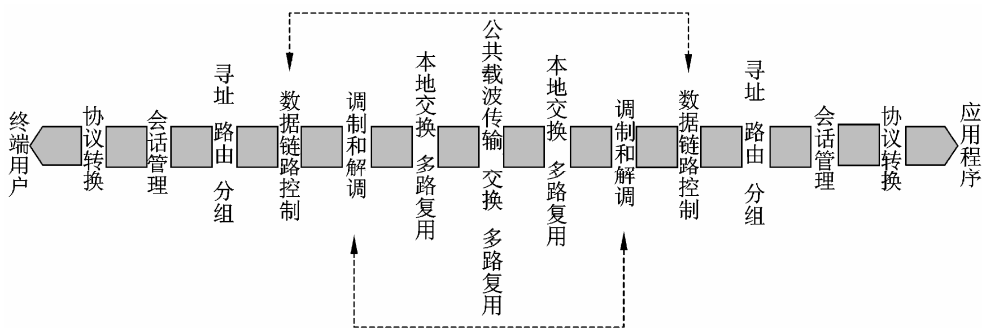


图 1-3 用户与应用程序通信的过程

可以把这些功能层按作用范围分类。Modem和数据链路控制功能是相邻节点间的作用，与

同一线路上的其他节点无关；协议转换、会话管理和打包/拆包功能涉及一对端节点，与端节点之间的转发节点无关。然而，寻址和路由功能则涉及多个节点，完成这样的功能要考虑到网络中的所有节点，以便数据包可以沿着一条最佳线路逐个节点地向前传送，最后到达目的地。

也可以从另一个角度看待这种分层结构，寻址—路由—数据分组之上的功能层次对端用户隐藏了通信网络的细节，因而这些功能层次叫作高层功能，它们下边的功能层次叫作低层功能。这样的功能分解与图 1-1 中把整个计算机网络划分为资源子网和通信子网是一致的。

以上功能分解描绘出一幅规整的图画。事实上，情况远不是如此简单。首先，有些功能会出现在一个以上的层次。例如多路复用功能，即几个信息流交叉地通过同一线路的功能，会出现在数据链路控制过程中，也会出现在公共载波传输系统中。其次，几个端用户可能会多路访问同一通路，当一个用户的数据包从端节点出发进入更下面的功能层次时，就存在选择在哪一层与其他用户的信息流合并的问题。

问题的复杂性还在于同一节点中的层次之间还有控制信息的通信。例如在一个中间节点上，路由功能必须给 DLC 功能提供地址，以便 DLC 能把数据包转发到适当的中间节点上。还需指出的是，有些功能层可能很简单，甚至完全没有。例如，在局域网中就不需要路由功能；对于租用线路，则没有物理层。

用“接口”来描述相邻层之间的相互作用。在两个相邻层之间，下层为上层提供服务，上层利用下层提供的服务实现规定给自己的功能，这种服务和被服务的关系就是人们所说的接口关系。例如，Modem 和 DLC 之间必须按规定的电气接口相互作用；用户程序和网络之间也应规定统一的接口关系，以便于程序的移植。

至此，已引入了功能层次的概念。对等层之间按规定的协议通信，相邻层之间按接口关系提供服务 and 接受服务。把实现复杂的网络通信过程的各种功能划分成这样的层次结构，就是网络的分层体系结构。

1.4.2 开放系统互连参考模型的基本概念

所谓开放系统，是指遵从国际标准的、能够通过互连而相互作用的系统。显然，系统之间的相互作用只涉及系统的外部行为，与系统内部的结构和功能无关。因而，关于互连系统的任何标准都只是关于系统外部特性的规定。1979 年，ISO 公布了开放系统互连参考模型（Open System Interconnection/Reference Model, OSI/RM）。同时，CCITT（Consultative Committee of International Telegraph and Telephone）认可并采纳了这一国际标准的建议文本（称为 X.200）。OSI/RM 为开放系统互连提供了一种功能结构的框架，ISO 7498 文件对它做了详细的规定和描述。

第 2 章 数据通信基础

计算机网络采用数据通信方式传输数据。数据通信和电话网络中的语音通信不同，也和无线电广播通信不同，它有其自身的规律和特点。数据通信技术的发展与计算机技术的发展密切相关，又互相影响，形成了一门独立的学科。这门学科主要研究对计算机中的二进制数据进行传输、交换和处理的理论、方法以及实现技术。本章讲述数据通信的基本理论和基础知识，为学习以后各章内容做好准备。

2.1 数据通信的基本概念

通信的目的就是传递信息。通信中产生和发送信息的一端叫作信源，接收信息的一端叫作信宿，信源和信宿之间的通信线路称为信道。信息在进入信道时要变换为适合信道传输的形式，在进入信宿时又要变换为适合信宿接收的形式。信道的物理性质不同，对通信的速率和传输质量的影响也不同。另外，信息在传输过程中可能会受到外界的干扰，把这种干扰称为噪声。不同的物理信道受各种干扰的影响不同，例如，如果信道上传输的是电信号，就会受到外界电磁场的干扰，光纤信道则基本不受电磁场干扰。以上描述的通信模式忽略了具体通信中的物理过程和技术细节，得到如图 2-1 所示的通信系统模型。

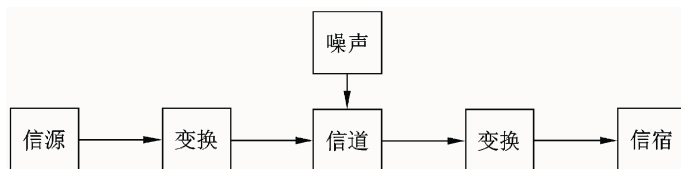


图 2-1 通信系统模型

作为一般的通信系统，信源产生的信息可能是模拟数据，也可能是数字数据。模拟数据取连续值，而数字数据取离散值。在数据进入信道之前要变成适合传输的电磁信号，这些信号也可以是模拟的或数字的。模拟信号是随时间连续变化的信号，这种信号的某种参量（如幅度、相位和频率等）可以表示要传送的信息。电话机送话器输出的话音信号、电视摄像机产生的图像信号等都是模拟信号。数字信号只取有限个离散值，而且数字信号之间的转换几乎是瞬时的，数字信号以某一瞬间的状态表示它们传送的信息。

如果信源产生的是模拟数据并以模拟信道传输，则叫作模拟通信；如果信源发出的是模拟数据且以数字信号的形式传输，那么这种通信方式叫数字通信。如果信源发出的是数字数据，当然也可以有两种传输方式，这时无论是用模拟信号传输或是用数字信号传输都叫作数据通信。可见，数据通信是专指信源和信宿中数据的形式是数字的，在信道中传输时可以根据需要采用模拟传输方式或数字传输方式。

在模拟传输方式中，数据进入信道之前要经过调制，变换为模拟的调制信号。由于调制信号的频谱较窄，因此信道的利用率较高。模拟信号在传输过程中会衰减，还会受到噪声的干扰，如果用放大器将信号放大，混入的噪声也被放大了，这是模拟传输的缺点。在数字传输方式中，可以直接传输二进制数据或经过二进制编码的数据，也可以传输数字化了的模拟信号。因为数字信号只取有限个离散值，在传输过程中即使受到噪声的干扰，只要没有畸变到不可辨认的程度，就可以用信号再生的方法进行恢复，对某些数码的差错也可以用差错控制技术加以消除。所以，数字传输对于信号不失真地传送是非常有好处的。另外，数字设备可以大规模集成，比复杂的模拟设备便宜得多。然而，传输数字信号比传输模拟信号所要求的频带要宽得多，因而信道利用率较低。

2.2 信道特性

2.2.1 信道带宽

模拟信道的带宽如图 2-2 所示。信道带宽 $W=f_2-f_1$ ，其中， f_1 是信道能通过的最高频率， f_2 是信道能通过的最高频率，两者都是由信道的物理特性决定的。当组成信道的电路制成了，信道的带宽就决定了。为了使信号传输中的失真小一些，信道要有足够的带宽。

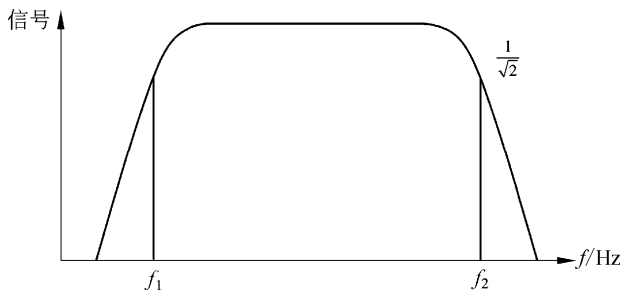


图 2-2 模拟信道的带宽

数字信道是一种离散信道，它只能传送取离散值的数字信号。信道的带宽决定了信道中能

不失真地传输的脉冲序列的最高速率。一个数字脉冲称为一个码元，用码元速率表示单位时间内信号波形的变换次数，即单位时间内通过信道传输的码元个数。若信号码元宽度为 T 秒，则码元速率 $B=1/T$ 。码元速率的单位叫波特（Baud），所以码元速率也叫波特率。早在 1924 年，贝尔实验室的研究员亨利·奈奎斯特（Harry Nyquist）就推导出了有限带宽无噪声信道的极限波特率，称为尼奎斯特定理。若信道带宽为 W ，则尼奎斯特定理指出最大码元速率为

$$B=2W \text{ (Baud)}$$

奈奎斯特定理指定的信道容量也叫作奈奎斯特极限，这是由信道的物理特性决定的。超过奈奎斯特极限传送脉冲信号是不可能的，所以要进一步提高波特率必须改善信道带宽。

码元携带的信息量由码元取的离散值的个数决定。若码元取两个离散值，则一个码元携带 1 位信息。若码元可取 4 种离散值，则一个码元携带两位信息。总之，一个码元携带的信息量 n （位）与码元的种类数 N 有如下关系

$$n=\log_2 N \quad (N=2^n)$$

单位时间内在信道上传送的信息量（位数）称为数据速率。在一定的波特率下提高速率的途径是用一个码元表示更多的位数。如果把两位编码为一个码元，则数据速率可成倍提高。有公式

$$R=B \log_2 N=2W \log_2 N \text{ (bps)}$$

其中， R 表示数据速率，单位是每秒位（bps 或 b/s）。

数据速率和波特率是两个不同的概念。仅当码元取两个离散值时两者的数值才相等。对于普通电话线路，带宽为 3000Hz，最高波特率为 6000Baud，最高数据速率可随着调制方式的不同而取不同的值。这些都是在无噪声的理想情况下的极限值。实际信道会受到各种噪声的干扰，因而远远达不到按奈奎斯特定理计算出的数据传送速率。香农（Shannon）的研究表明，有噪声信道的极限数据速率可由下面的公式计算

$$C=W \log_2 \left(1+\frac{S}{N}\right)$$

这个公式叫作香农定理，其中， W 为信道带宽， S 为信号的平均功率， N 为噪声平均功率， S/N 叫作信噪比。由于在实际使用中 S 与 N 的比值太大，故常取其分贝数（dB）。分贝与信噪比的关系为

$$\text{dB}=10\log_{10} \frac{S}{N}$$

例如，当 $S/N=1000$ 时，信噪比为 30dB。这个公式与信号取的离散值的个数无关，也就是说，无论用什么方式调制，只要给定了信噪比，则单位时间内最大的信息传输量就确定了。例如，信道带宽为 3000Hz，信噪比为 30dB，则最大数据速率为

$$C=3000\log_2(1+1000)\approx 3000\times 9.97\approx 30\,000\text{bps}$$

这是极限值，只有理论上的意义。实际上，在 3000Hz 带宽的电话线上数据速率能达到 9600bps 就很不错了。

综上所述，有两种带宽的概念，在模拟信道，带宽按照公式 $W=f_2-f_1$ 计算，例如 CATV 电缆的带宽为 600MHz 或 1000MHz；数字信道的带宽为信道能够达到的最大数据速率，例如以太网的带宽为 10Mbps 或 100Mbps。两者可互相转换。

2.2.2 误码率

在有噪声的信道中，数据速率的增加意味着传输中出现差错的概率增加。用误码率来表示传输二进制位时出现差错的概率。误码率可用下式表示

$$P_e = \frac{N_e (\text{出错的位数})}{N (\text{传送的总位数})}$$

在计算机通信网络中，误码率一般要求低于 10^{-6} ，即平均每传送 1 兆位才允许错 1 位。在误码率低于一定的数值时，可以用差错控制的办法进行检查和纠正。

2.2.3 信道延迟

信号在信道中传播，从源端到达宿端需要一定的时间。这个时间与源端和宿端的距离有关，也与具体信道中的信号传播速度有关。以后考虑的信号主要是电信号，这种信号一般以接近光速的速度（300m/μs）传播，但随传输介质的不同而略有差别。例如，在电缆中的传播速度一般为光速的 77%，即 200m/μs 左右。

一般来说，考虑信号从源端到达宿端的时间是没有意义的，但对于一种具体的网络，我们经常对该网络中相距最远的两个站之间的传播时延感兴趣。这时除了要计算信号传播速度外，还要知道网络通信线路的最大长度。例如，500m 同轴电缆的时延大约是 2.5μs，而卫星信道的时延大约是 270ms。时延的大小对某些网络应用（例如交互式应用）有很大影响。

2.3 传输介质

计算机网络中可以使用各种传输介质来组成物理信道。这些传输介质的特性不同，因而使用的网络技术不同，应用的场合也不同。下面简要介绍各种常用的传输介质的特点。

2.3.1 双绞线

双绞线由粗约 1mm 的互相绝缘的一对铜导线绞扭在一起组成，对称均匀地绞扭可以减少线对之间的电磁干扰。这种双绞线大量使用在传统的电话系统中，适用于短距离传输，若超过几千米，就要加入中继器。在局域网中可以使用双绞线作为传输介质，如果选用高质量的芯线，

采用适当的驱动和接收技术，安装时避开噪声源，在几百米之内数据的传输速率可达每秒几十兆位。

双绞线分为屏蔽双绞线和无屏蔽双绞线，如图 2-3 所示。常用的无屏蔽双绞线电缆（Unshielded Twisted Pair，UTP）由不同颜色的（橙、绿、蓝、棕）4 对双绞线组成。屏蔽双绞线（Shielded Twisted Pair，STP）电缆的外层由铝箔包裹着，价格相对高一些，并且需要支持屏蔽功能的特殊连接器和适当的安装技术，但是传输速率比相应的无屏蔽双绞线高。国际电气工业协会（EIA）定义了双绞线电缆各种不同的型号，计算机综合布线使用的双绞线种类如表 2-1 所示。

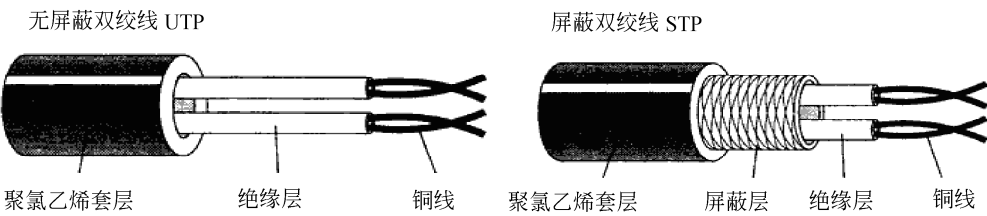


图 2-3 无屏蔽双绞线和屏蔽双绞线

表 2-1 计算机综合布线使用的双绞线

双绞线种类	类 型	带宽/Mbps
屏蔽双绞线	3 类	16
	5 类	100
无屏蔽双绞线	3 类	16
	4 类	20
	5 类	100
	超 5 类	155
	6 类	200

由于双绞线价格便宜，安装容易，适用于结构化综合布线，所以得到了广泛使用。通常在局域网中使用的无屏蔽双绞线的传送速率是 10Mbps 或 100Mbps，随着网卡技术的发展，短距离甚至可以达到 1000Mbps。

2.3.2 同轴电缆

同轴电缆的芯线为铜质导线，外包一层绝缘材料，再外面是由细铜丝组成的网状外导体，最外面加一层绝缘塑料保护层，如图 2-4 所示。芯线与网状导体同轴，故名同轴电缆。同轴电缆的这种结构，使它具有高带宽和极好的噪声抑制特性。

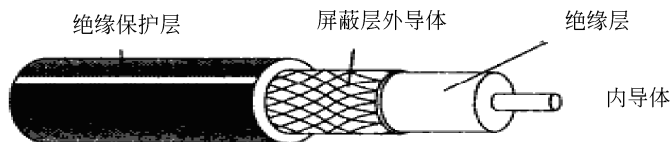


图 2-4 同轴电缆

在局域网中常用的同轴电缆有两种，一种是特性阻抗为 50Ω 的同轴电缆，用于传输数字信号，例如 RG-8 或 RG-11 粗缆和 RG-58 细缆。粗同轴电缆适用于大型局域网，它的传输距离长，可靠性高，安装时不需要切断电缆，用夹板装置夹在计算机需要连接的位置。但粗缆必须安装外收发器，安装难度大，总体造价高。细缆则容易安装，造价低，但安装时要切断电缆，装上 BNC 接头，然后连接在 T 型连接器两端，所以容易产生接触不良或接头短路的隐患，这是以太网运行中常见的故障。

通常把表示数字信号的方波所固有的频带称为基带，所以这种电缆也叫基带同轴电缆，直接传输方波信号称为基带传输。由于计算机产生的数字信号不适合长距离传输，所以在信号进入信道前要经过编码器进行编码，变成适合于传输的电磁代码。经过编码的数字信号到达接收端，再经译码器恢复为原来的二进制数字数据。基带系统的优点是安装简单而且价格便宜，但由于在传输过程中基带信号容易发生畸变和衰减，所以传输距离不能太长。一般在 1 km 以内，典型的数据速率是 10Mbps 或 100Mbps。

常用的另一种同轴电缆是特性阻抗为 75Ω 的 CATV 电缆（RG-59），用于传输模拟信号，这种电缆也叫宽带同轴电缆。所谓宽带，在电话行业中是指比 4 kHz 更宽的频带，而这里是泛指模拟传输的电缆网络。要把计算机产生的比特流变成模拟信号在 CATV 电缆上传输，在发送端和接收端要分别加入调制器和解调器。采用适当的调制技术，一个 6MHz 的视频信道的数据速率可以达到 36Mbps。通常采用频分多路技术（FDM），把整个 CATV 电缆的带宽（1000MHz）划分为多个独立的信道，分别传输数据、声音和视频信号，实现多种通信业务。这种传输方式称为综合传输，适合于在办公自动化环境中应用。

宽带系统与基带系统的主要区别是模拟信号经过放大器后只能单向传输。为了实现网络节点间的相互连通，有时要把整个带宽划分为两个频段，分别在两个方向上传送信号，这叫分裂配置。有时用两根电缆分别在两个方向上传送，这叫双缆配置。虽然两根电缆比单根电缆的价格要贵一些（大约贵 15%），但信道容量却提高 1 倍多。无论是分裂配置还是双缆配置都要使用一个叫作端头（headend）的设备。该设备安装在网络的一端，它从一个频率（或一根电缆）接收所有站发出的信号，然后用另一个频率（或电缆）发送出去。

宽带系统的优点是传输距离远，可达几十千米，而且可同时提供多个信道。然而和基带系统相比，它的技术更复杂，需要专门的射频技术人员安装和维护，宽带系统的接口设备也更昂贵。

2.3.3 光缆

光缆由能传送光波的超细玻璃纤维制成，外包一层比玻璃折射率低的材料。进入光纤的光波在两种材料的界面上形成全反射，从而不断地向前传播，如图 2-5 所示。

光纤信道中的光源可以是发光二极管（Light Emitting Diode, LED）或注入式激光二极管（Injection Laser Diode, ILD）。这两种器件在有电流通过时都能发出光脉冲，光脉冲通过光导纤维传播到达接收端。接收端有一个光检测器——光电二极管，它遇光时产生电信号，这样就形成了一个单向的光传输系统，类似于单向传输模拟信号的宽带系统。如果采用另外的互连方式，把所有的通信节点通过光缆连接成一个环，环上的信号虽然是单向传播，但任一节点发出的信息其他节点都能收到，从而也达到了互相通信的目的，如图 2-6 所示。

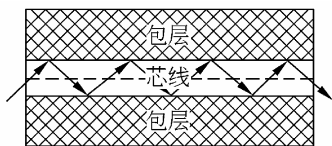


图 2-5 光纤的传输原理

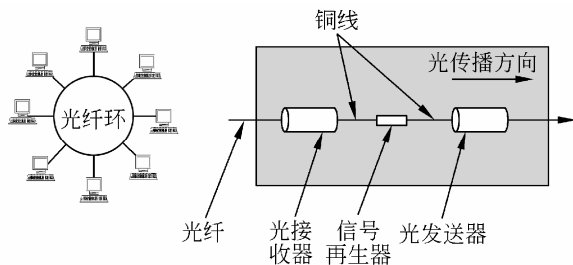


图 2-6 光纤环网

光波在光导纤维中以多种模式传播，不同的传播模式有不同的电磁场分布和不同的传播路径，这样的光纤叫多模光纤（如图 2-7（a）所示）。光波在光纤中以什么模式传播，这与芯线和包层的相对折射率、芯线的直径以及工作波长有关。如果芯线的直径小到光波波长大小，则光纤就成为波导，光在其中无反射地沿直线传播，这种光纤叫单模光纤（如图 2-7（b）所示）。单模光纤比多模光纤的价格更贵。



(a) 多模光纤



(b) 单模光纤

图 2-7 多模光纤与单模光纤

光导纤维作为传输介质，其优点是很多的。首先是它具有很高的数据速率、极宽的频带、低误码率和低延迟。数据传输速率可达1000Mbps，甚至更高，而误码率比同轴电缆可低两个数量级，只有 10^{-9} 。其次是光传输不受电磁干扰，不可能被偷听，因而安全和保密性能好。最后，光纤重量轻、体积小、铺设容易。

2.3.4 无线信道

前面提到的由双绞线、同轴电缆和光纤等传输介质组成的信道可统称为有线信道。这里要讲到的信道都是通过空间传播信号，称之为无线信道。无线信道包括微波、红外和短波信道，下面简略介绍这3种信道的特点。

微波通信系统可分为地面微波系统和卫星微波系统，两者的功能相似，但通信能力有很大的差别。地面微波系统由视距范围内的两个互相对准方向的抛物面天线组成，长距离通信则需要多个中继站组成微波中继链路。在计算机网络中使用地面微波系统可以扩展有线信道的连通范围，例如在大楼顶上安装微波天线，使得两个大楼中的局域网互相连通，这可能比挖地沟埋电缆的花费更少。

通信卫星可看作是悬在太空中的微波中继站。卫星上的转发器把波束对准地球上的一定区域，在此区域中的卫星地面站之间就可互相通信。地面站以一定的频率段向卫星发送信息（称为上行频段），卫星上的转发器将接收到的信号放大并变换到另一个频段上（称下行频段）发回地面接收站。这样的卫星通信系统可以在一定的区域内组成广播式通信网络，特别适合于海上、空中、矿山、油田等经常移动的工作环境。卫星传输供应商可以将卫星信道划分成许多子信道出租给商业用户，用户安装甚小孔径终端系统（VSAT）组成卫星专用网，地面上的集中站作为收发中心与用户交换信息。

微波通信的频率段为吉兆段的低端，一般是1~11GHz，因而它具有带宽高、容量大的特点。由于使用了高频率，因此可使用小型天线，便于安装和移动。不过微波信号容易受到电磁干扰，地面微波通信也会造成相互之间的干扰，大气层中的雨雪会大量吸收微波信号，当长距离传输时会使得信号衰减以至无法接收。另外，通信卫星为了保持与地球自转同步，一般停在36 000km的高空。这样长的距离会造成240~280ms的时延，在利用卫星信道组网时，这样长的时延是必须考虑的因素。

最新采用的无线传输介质要算红外线了（如图2-8所示）。红外传输系统利用墙壁或屋顶反射红外线从而形成整个房间内的广播通信系统。这种系统所用的红外光发射器和接收器常见于电视机的遥控装置中。红外通信的设备相对便宜，可获得高的带宽，这是这种通信方式的优点。其缺点是传输距离有限，而且易受室内空气状态（例如有烟雾等）的影响。

无线电短波通信早已用在计算机网络中了，已经建成的无线通信局域网使用了甚高频（30~300MHz）和超高频（300~3000MHz）的电视广播频段，这个频段的电磁波是以直线方式在视距范围内传播的，所以用作局部地区的通信是适宜的。早期的无线电局域网（例如ALOHA系统）是中心式结构——有一个类似于通信卫星那样的中心站，每一个主机节点都把天线对准中心站，并以频率 f_1 向中心站发送信息，这就是上行线路；中心站向各主机节点发送信息时采用另外一个频率 f_2 进行广播，这叫下行线路。采用这种网络通信方式要解决好上行线路中由于两个以上的站同时发送信息而发生冲突的问题。后来的无线电局域网采用分布式结

构——没有中心站，节点机的天线是没有方向的，每个节点机都可以发送或接收信息。这种通信方式适合于由微机工作站组成的资源分布系统，在不便于建设有线通信线路的地方可以快速建成计算机网络。短波通信设备比较便宜，便于移动，没有像地面微波站那样的方向性，并且中继站可以传送很远的距离。但是，这种情况容易受到电磁干扰和地形地貌的影响，而且带宽比微波通信要小。

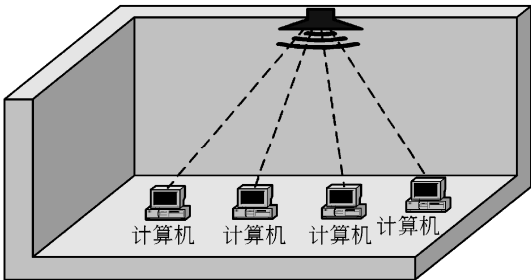


图 2-8 红外传输

2.4 数据编码

二进制数字信息在传输过程中可以采用不同的代码，各种代码的抗噪声特性和定时功能各不相同，实现费用也不一样。下面介绍几种常用的编码方案，如图 2-9 所示。

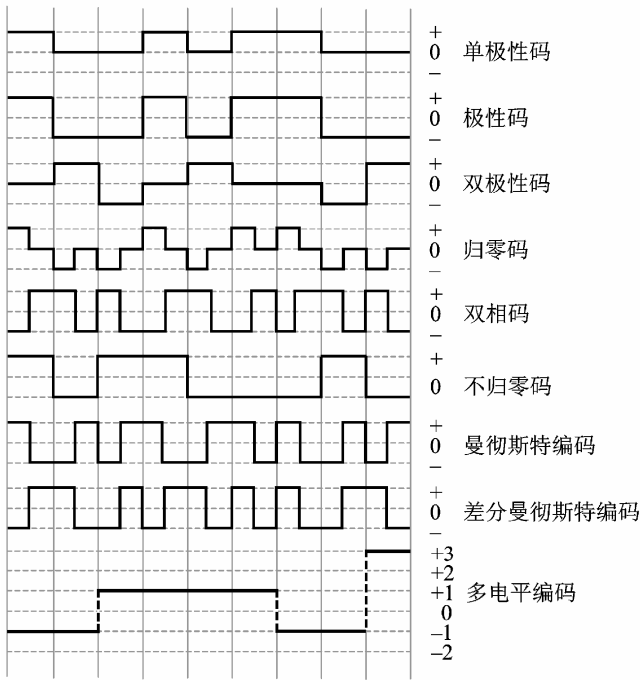


图 2-9 常用编码方案

1. 单极性码

在这种编码方案中，只用正的（或负的）电压表示数据。例如，在图 2-9 中用+3V 表示二进制数字“0”，用 0V 表示二进制数字“1”。单极性码用在电传打字机（TTY）接口以及 PC 与 TTY 兼容的接口中，这种代码需要单独的时钟信号配合定时，否则，当传送一长串 0 或 1 时，发送机和接收机的时钟将无法定时，单极性码的抗噪声特性也不好。

2. 极性码

在这种编码方案中，分别用正电压和负电压表示二进制数“0”和“1”。例如，在图 2-9 中用+3V 表示二进制数字“0”，用-3V 表示二进制数字“1”。这种代码的电平差比单极码大，因而抗干扰特性好，但仍然需要另外的时钟信号。

3. 双极性码

在双极性编码方案中，信号在 3 个电平（正、负、零）之间变化。一种典型的双极性码就是所谓的信号交替反转编码（Alternate Mark Inversion, AMI）。在 AMI 信号中，数据流中遇到“1”时使电平在正和负之间交替翻转，而遇到“0”时则保持零电平。双极性是三进制信号编码方法，它与二进制编码相比抗噪声特性更好。AMI 有其内在的检错能力，当正负脉冲交替出现的规律被打乱时容易识别出来，这种情况叫 AMI 违例。这种编码方案的缺点是当传送长串“0”时会失去位同步信息。对此稍加改进的一种方案是“6 零取代”双极性码 B6ZS，即把连续 6 个“0”用一组代码代替。这一组代码中若含有 AMI 违例，便可以接收机识别出来。

4. 归零码

在归零码（Return to Zero, RZ）中，码元中间的信号回归到零电平，因此，任意两个码元之间被零电平隔开。与以上仅在码元之间有电平转换的编码方案相比，这种编码方案有更好的噪声抑制特性。因为噪声对电平的干扰比对电平转换的干扰要强，而这种编码方案是以识别电平转换边来判别“0”和“1”信号的。图 2-9 中表示出的是一种双极性归零码。可以看出，从正电平到零电平的转换边表示码元“0”，从负电平到零电平的转换边表示码元“1”，同时每一位码元中间都有电平转换，使得这种编码成为自定时的编码。

5. 双相码

双相码要求每一位中都要有一个电平转换。因而这种代码的最大优点是自定时，同时双相码也有检测错误的功能，如果某一位中间缺少了电平翻转，则被认为是违例代码。

6. 不归零码

图 2-9 中所示的不归零码 (Not Return to Zero, NRZ) 的规律是当“1”出现时电平翻转, 当“0”出现时电平不翻转。因而数据“1”和“0”的区别不是高低电平, 而是电平是否转换。这种代码也叫差分码, 用在终端到调制解调器的接口中。这种编码的特点是实现起来简单而且费用低, 但不是自定时的。

7. 曼彻斯特编码

曼彻斯特编码 (Manchester Code) 是一种双相码。在图 2-9 中, 用高电平到低电平的转换边表示“0”, 用低电平到高电平的转换边表示“1”, 相反的表示也是允许的。位中间的电平转换边既表示了数据代码, 同时也作为定时信号使用。曼彻斯特编码用在以太网中。

8. 差分曼彻斯特编码

这种编码也是一种双相码, 和曼彻斯特编码不同的是, 这种码元中间的电平转换边只作为定时信号, 不表示数据。数据的表示在于每一位开始处是否有电平转换: 有电平转换表示“0”, 无电平转换表示“1”。差分曼彻斯特编码用在令牌环网中。

从曼彻斯特码和差分曼彻斯特码的图形中可以看出, 这两种双相码的每一个码元都要调制为两个不同的电平, 因而调制速率是码元速率的 2 倍。这对信道的带宽提出了更高的要求, 所以实现起来更困难也更昂贵。但由于其良好的抗噪声特性和自定时功能, 在局域网中仍被广泛使用。

9. 多电平编码

这种编码的码元可取多个电平之一, 每个码元可代表几个二进制位。例如, 令 $M=2^n$, 设 $M=4$, 则 $n=2$ 。若表示码元的脉冲取 4 个电平之一, 则一个码元可表示两个二进制位。与双相码相反, 多电平码的数据速率大于波特率, 因而可提高频带的利用率。但是这种代码的抗噪声特性不好, 在传输过程中信号容易畸变到无法区分。

在数据通信中, 选择什么样的数据编码要根据传输的速度、信道的带宽、线路的质量以及实现的价格等因素综合考虑。

10. 4B/5B 编码

在曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码中, 每位中间都有一次电平跳变, 因此波特率是数据速率的两倍。对于 100Mbps 的高速网络, 如果采用这类编码方法, 就需要 200 兆的波特率, 其